

Document public

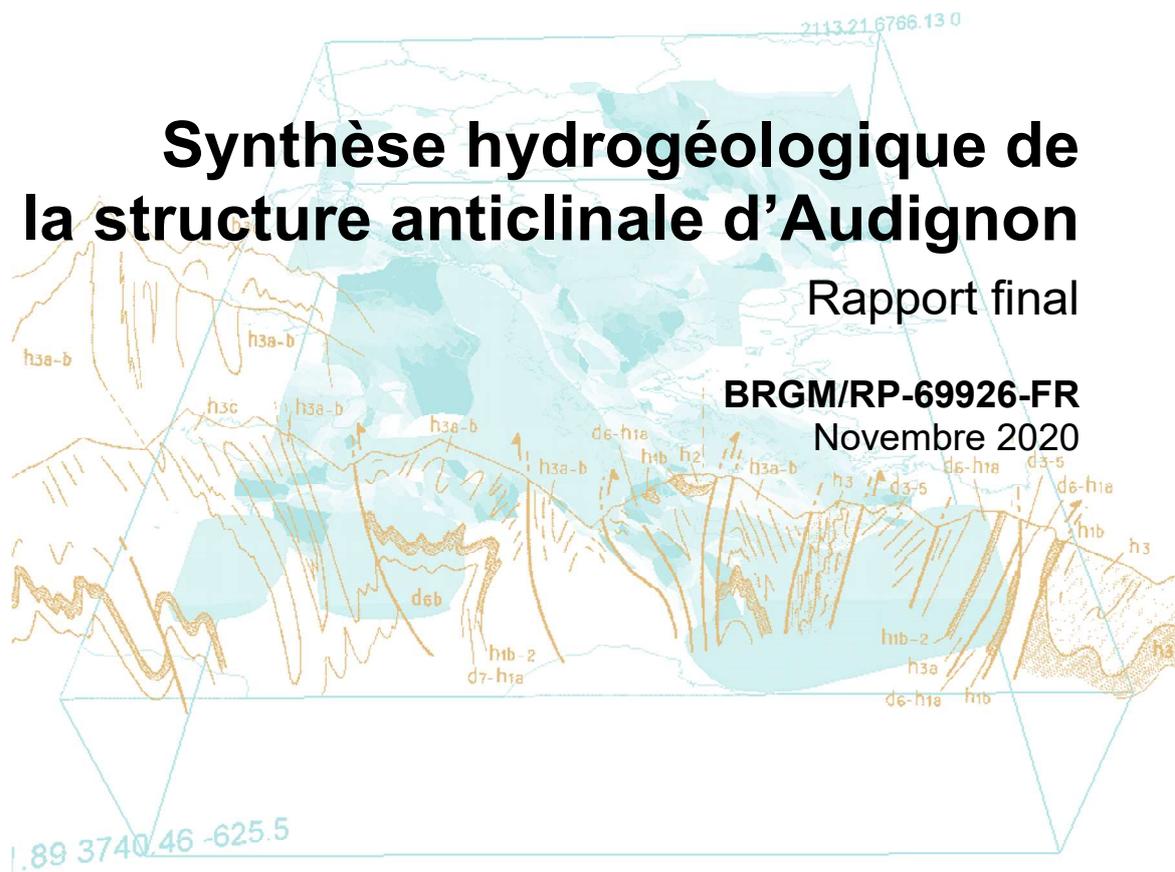


Synthèse hydrogéologique de la structure anticlinale d'Audignon

Rapport final

BRGM/RP-69926-FR

Novembre 2020



Document public

Synthèse hydrogéologique de la structure anticlinale d'Audignon

Rapport final

BRGM/RP-69926-FR

Novembre 2020

Étude réalisée dans le cadre du projet
de Service public du BRGM AP17AQI014

O. Cabaret, E. Husson, B. Ladouche, B. Dewandel et C. Baudement
Avec la collaboration de **L. André**

Vérificateur :

Nom : Y. CABALLERO

Fonction : Hydrogéologue

Date : 23/05/2020

Signature :



Approbateur :

Nom : N. PÉDRON

Fonction : Directeur régional du
BRGM Nouvelle-Aquitaine

Date : 20/11/2020

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

Mots-clés : Nouvelle-Aquitaine, Landes, structure anticlinale, Audignon, modèle géologique, gravimétrie, ligne sismique, hydrogéologie, piézométrie, physico-chimie, pompage d'essai.

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

Cabaret O., Husson É., Ladouche B., Dewandel B. et Baudement C. avec la collaboration de **André L.** (2020) - Synthèse hydrogéologique de la structure anticlinale d'Audignon. Rapport final. BRGM/RP-69926-FR, 136 p., 110 ill., 4 ann.

Synthèse

Dans le sud du Bassin aquitain, les formations carbonatées se retrouvent à l'affleurement à la faveur notamment de structures anticlinales qui sont la conséquence de l'orogénèse pyrénéenne. Ces affleurements peuvent être le siège d'une karstification et constituent par ailleurs des zones d'alimentation ou d'exutoire potentiels des nappes dites profondes régionales. Parmi cette série d'antiformes, l'anticlinal d'Audignon porte à l'affleurement des formations du Crétacé et du Paléocène. Des travaux récents ont démontré le rôle de la karstification dans les transferts rapides d'eau depuis la surface au sein de ces aquifères qui alimentent par ailleurs des sources stratégiques pour la région dont celle du Marseillon, principale ressource du secteur. Le comportement karstique de la structure anticlinale engendre une vulnérabilité forte des eaux souterraines vis-à-vis des pollutions de surface et des problèmes de turbidité interviennent fréquemment dans la source. Ces phénomènes ont été observés en parallèle de crues du Laudon (cours d'eau proche de la source) dont une partie pourrait s'infiltrer pour rejoindre la résurgence.

En vue d'améliorer la protection de la ressource dans ce secteur, les objectifs de ce projet s'inscrivent à deux échelles de travail. Il s'agit d'améliorer la **compréhension de l'hydrogéologie des aquifères du Crétacé et du Paléocène à l'échelle de la structure anticlinale d'Audignon**. Elle passe par l'analyse des modalités d'écoulement au sein de la structure (continuité des réservoirs entre eux), des relations eaux de surface / eaux souterraines et par la caractérisation de cette structure en tant qu'exutoire et/ou alimentation des aquifères dits profonds du sud du Bassin aquitain. Il s'agit également de préciser le **fonctionnement hydrogéologique de la source du Marseillon** visant à en sécuriser l'approvisionnement en eau.

Les travaux menés ont conduit en premier lieu à revisiter le contexte géologique (géométrie et changements de faciès des formations), dont les résultats sont synthétisés au travers d'un modèle géologique. Ce dernier s'appuie sur la validation des logs de forages et des cartes géologiques, sur l'interprétation et l'intégration des profils de sismique-réflexion, ainsi que sur des acquisitions gravimétriques. Une réflexion sur la karstification des formations carbonatées est également apportée. Elle a permis de mettre en évidence la faible intensité de la karstification à l'échelle de la structure. Celle-ci est principalement due à une karstification récente. Le rôle des Sables fauves dans cette karstification puis, plus tard, dans le fonctionnement hydrogéologique a également été exprimé.

Dans un second temps, une analyse du fonctionnement hydrogéologique de la structure anticlinale a été conduite au travers de l'élaboration de cartes piézométriques, de campagnes physico-chimiques et isotopiques et enfin d'une approche fonctionnelle. Les interprétations combinées ont permis d'apporter des éléments de compréhension quant au fonctionnement hydrogéologique de la structure :

- Le réseau hydrographique participe au drainage du réservoir au nord de la structure. Au sud, par contre, des infiltrations pourraient ainsi avoir lieu et participeraient ainsi à la recharge du réservoir du Paléocène et du Crétacé ;
- Au droit de la structure anticlinale, le réservoir du Crétacé bénéficie d'une recharge sur quasiment l'ensemble de la structure, les secteurs favorables à l'infiltration se situant principalement dans ses parties centrale et méridionale ;
- Le rôle important joué par la formation des Sables fauves dans le contrôle du processus de recharge, en tamponnant le signal d'infiltration et retardant la recharge directe et rapide vers la nappe, a été identifié ;

- Le compartiment profond du réservoir du Crétacé et du Paléocène, en provenance de l'est / sud-est et s'écoulant vers le nord et l'ouest n'est pas apparu comme jouant un rôle majeur dans les écoulements de surface observés au droit de la structure anticlinale.

Enfin, une attention particulière sur le fonctionnement hydrogéologique de la source du Marseillon a été proposée s'appuyant principalement sur un long suivi temporel du débit et de quelques propriétés physico-chimiques de la source, des campagnes géochimiques et un essai par pompage. Les analyses menées ont permis de proposer une délimitation approximative du bassin d'alimentation de la source, qui majoritairement s'étend au sud et à l'est de la source. Le rôle des Sables fauves et de la composante karstique du réservoir crétacé dans le fonctionnement hydrodynamique de la source, ainsi que dans la survenue d'eaux turbides, a également été mis en évidence. Concernant cette survenue, des réponses quant au rôle de pertes possibles du Laudon et d'écoulements rapides au profit de la source ont été apportées. Les résultats obtenus convergent vers une absence de pertes du Laudon au profit de la source.

Sommaire

1. Contexte et objectifs de l'étude.....	13
2. Révision géologique et amélioration des connaissances concernant la karstologie de la structure d'Audignon	17
2.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE - ÉTAT DES CONNAISSANCES	17
2.1.1. L'histoire du Bassin sud-aquitain.....	17
2.1.2. L'anticlinal d'Audignon	22
2.2. OBJECTIFS	27
2.3. GEOMETRIE DES FORMATIONS.....	27
2.3.1. Étude des profils sismiques	27
2.3.2. Complément d'acquisition gravimétrique.....	34
2.3.3. Modèle géologique 3D	38
2.4. REFLEXION SUR LA KARSTIFICATION, A L'ECHELLE DE LA STRUCTURE.....	47
2.4.1. La karstification épigène	47
2.4.2. La karstification hypogène	54
3. Fonctionnement hydrogéologique des réservoirs du Crétacé et du Paléocène de l'anticlinal d'Audignon	65
3.1. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE - ÉTAT DES CONNAISSANCES.....	65
3.1.1. Fonctionnement hydrogéologique local.....	67
3.1.2. Source du Marseillon	73
3.2. OBJECTIFS A DEUX ECHELLES.....	76
3.3. EQUIPEMENTS.....	77
3.3.1. Données piézométriques à l'échelle de la structure	77
3.3.2. Données physico-chimiques disponibles à l'échelle de la structure.....	78
3.3.3. Données climatiques.....	79
3.3.4. Attention particulière portée au système du Marseillon	81
3.4. FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE GENERAL DES AQUIFERES PROFONDS AU NIVEAU DE LA STRUCTURE D'AUDIGNON	85
3.4.1. Cartes piézométriques en hautes et basses eaux des aquifères du Crétacé et du Paléocène de la structure anticlinale d'Audignon	85
3.4.2. Caractérisations géochimique et isotopique de la zone d'étude	89
3.4.3. Approche fonctionnelle de la structure d'Audignon.....	101
3.4.4. Conclusion.....	105
3.5. AMELIORATION DE LA CONNAISSANCE DU FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE DE LA SOURCE DU MARSEILLON.....	107

3.5.1. Analyse des courbes de récession	107
3.5.2. Première estimation de l'extension du bassin d'alimentation de la source du Marseillon	108
3.5.3. Essai par pompage.....	111
3.5.4. Caractérisation des liens avec le cours d'eau voisin du Laudon	117
3.5.5. Apport pour une meilleure compréhension du phénomène de turbidité	120
3.5.6. Conclusion	127
4. Conclusion	129
5. Bibliographie	131

Liste des illustrations

Illustration 1 - Carte géologique à gauche (en bleu, les formations jurassiques ; en vert, les formations crétacées ; en dégradé de jaune et orange, les formations cénozoïques) et carte structurale du Bassin aquitain à droite (Serrano, 2001)	13
Illustration 2 - Structures anticlinales portées à l'affleurement au sud-ouest du Bassin aquitain (en rouge : positionnement de la coupe sur l'illustration 3).....	14
Illustration 3 - Vue géologique en plan de la structure anticlinale d'Audignon et coupe verticale nord-sud (Briand, 2014, d'après Oller, 1986) - Positionnement de la coupe sur l'illustration 2.....	15
Illustration 4 - Disposition des faciès crétacés, du Néocomien jusqu'au Maastrichtien (Biteau et al., 2006).....	19
Illustration 5 - Principales rides et anticlinaux (en gris) dans le Bassin aquitain (Brunet, 1991).....	20
Illustration 6 - Tableau stratigraphique des formations paléogènes du bassin de l'Adour (d'après Serrano, 2001).....	21
Illustration 7 - Coupe géologique à travers le sous-bassin d'Arzacq, de l'avant-pays pyrénéen jusqu'à la ride d'Audignon (Bitaud et al., 2006).....	21
Illustration 8 - a) Schéma structural, illustrant les styles des déformations tectoniques et salifères de la région, centré sur « la ride » d'Audignon - b) Coupe géologique d'Orthez à Roquefort, en passant par la structure d'Audignon (d'après Rocher et al., 2000)	22
Illustration 9 - Restauration séquentielle du dôme de Bastennes-Gaujacq et de la ride d'Audignon, depuis la fin du Jurassique (Canérot et al., 2005).....	23
Illustration 10 - Carte géologique de la zone d'étude centrée sur la structure d'Audignon (la légende des formations correspond aux couleurs du log présentées à l'illustration 11).....	24
Illustration 11 - Log synthétique des formations constituant la structure d'Audignon et propriétés "réservoirs" associées (Le nom des formations de cette colonne stratigraphique peut être mis en regard avec les différentes appellations de la littérature dans le tableau de l'Annexe 1.)	25
Illustration 12 - Plan de position des profils sismiques retraités, aux alentours de la structure d'Audignon (profils en jaune : disponibles avant l'étude ; profils en rose : retraités pour l'étude ; triangles bleus : forages profonds utilisés pour caler l'interprétation sismique)	28
Illustration 13 - Liste des profils retraités au cours de cette étude et leurs caractéristiques.....	28
Illustration 14 - Profil sismique 85AUD9, retraité dans le cadre de cette étude (en haut : profil vierge ; en bas : profil interprété).....	30

Illustration 15 - Profil sismique 85AUD12, retraité dans le cadre de cette étude (en haut : profil vierge ; en bas : profil interprété).....	31
Illustration 16 - Profil sismique 84TUR04, retraité dans le cadre de cette étude (en haut : profil vierge ; en bas : profil interprété).....	32
Illustration 17 - Schéma structural proposé suite à l'interprétation des profils sismiques (mise en évidence des zones de connexion entre les formations "réservoir", de part et d'autre du chevauchement d'Audignon)	33
Illustration 18 - Carte d'implantation des stations gravimétriques acquises pendant cette étude (losanges rouges) et celles présentes dans la base de données gravimétriques (croix noires) - fond topographique IGN 1/25 000 ^{ème}	34
Illustration 19 - Anomalie de Bouguer (mGal)	35
Illustration 20 - Anomalie régionale (mGal).....	35
Illustration 21 - Anomalie résiduelle (mGal)	36
Illustration 22 - Position des profils sismiques reportée sur la carte de l'anomalie résiduelle	37
Illustration 23 - Carte géologique avec superposition des axes et discontinuités gravimétriques, et des contours de l'anomalie résiduelle (mGal). Les axes positifs sont numérotés (traits rouges) de P1 à P15, les axes négatifs (traits bleus) de N1 à N113, les discontinuités de D1 à D21.	38
Illustration 24 - Zone modélisée (vue en plan du modèle) et pile stratigraphique modélisée, avec correspondance du log présenté au chapitre 2.1.2 (le recouvrement n'a pas été modélisé ; la série du diapir est la dernière série modélisée ; la coupe 85AUD10 est positionnée)	39
Illustration 25 - Coupe d'orientation nord-sud, issue du profil sismique 85AUD10 (Illustration 24), qui traverse la structure d'Audignon, à l'aplomb de l'anticlinal dont le cœur est du Crétacé inférieur	40
Illustration 26 - Modèle géologique 3D de la zone d'étude	41
Illustration 27 - Modèle géologique 3D complet, vu depuis le sud	41
Illustration 28 - Modèle géologique 3D, ôté de la formation molassique	42
Illustration 29 - Modèle géologique 3D, ôté de la formation molassique et de la formation "réservoir" éocène-oligocène. Ecorché de la formation des marnes de l'Eocène	42
Illustration 30 - Modèle géologique 3D, ôté de la formation molassique, de la formation "réservoir" éocène-oligocène et de la formation des marnes de l'Eocène. Ecorché du réservoir Crétacé supérieur-Paléocène	42
Illustration 31 - Tableau de moyenne des valeurs de densité par formation et écart-type associé, provenant des forages possédant des lois de vitesse.....	43
Illustration 32 - Comparaison en 2D de la réponse gravimétrique du modèle, pour la coupe 85AUD10 (courbe rouge), avec la gravimétrie issue de Bouguer.....	44
Illustration 33 - Comparaison en 2D de la réponse gravimétrique du modèle, pour la coupe 85AUD10 (courbe rouge), avec la gravimétrie issue de la Résiduelle, après optimisation des densités.....	46
Illustration 34 - Essai d'optimisation des densités pour faire correspondre au mieux la réponse du modèle aux données gravimétriques.....	46
Illustration 35 - Carte géologique des différentes formations "réservoirs" ou épontes et localisation des indices spéléogénétiques recensés par Soussieux (1984)	48
Illustration 36 - Pinacles de calcaire du Crétacé supérieur, mis à nu par l'érosion (affleurement situé au sommet d'un relief, à proximité de la source du Marseillon)	49

Illustration 37 - Coupe schématique d'un karst sous-couverture (ou crypto-karst) illustrant les différentes morphologies, ainsi que les formes associées (d'après Quinif, 2010)	49
Illustration 38 - Différents types de fantômes de roches et évolution de réseaux fantômés	50
Illustration 39 - Affleurement de sables fauves présentant une croûte ferrugineuse intercalée entre deux séquences de dépôts fluviaux	51
Illustration 40 - Représentation synthétique de l'épikarst (Jouves, 2018, modifié d'après Bakalowicz, 2013)	53
Illustration 41 - Carte des modalités d'infiltration (en vert : infiltration lente et diffuse ; en orange : infiltration diffuse directe et rapide ; en gris : zones peu perméables, avec un ruissellement plus important que l'infiltration)	54
Illustration 42 - Indices de paléo-circulations hypogènes dans la carrière d'Arcet, dans la commune de Montaut : (A) panorama de la carrière, fracturation et poches karstiques sont visibles sur les fronts de taille ; (B) calcite filonienne injectée dans la « core zone » de la faille ; (C) conduit en cours de décolmatage dans le front de taille supérieur et amas bréchifique dans le front inférieur ; (D) bloc de brèche montrant une composante par bréchification hydraulique ; (E) géode de calcite drusique	56
Illustration 43 - Localisations des affleurements de grès de Coudures (d'après Capdeville et al., 1997) et des sites de géodes siliceuses signalés par M. Daniaud (Les sites étudiés par Douez (2007) et échantillonnés au cours de cette étude (AUD-437 et AUD-441) sont reportés sur cette carte.)	57
Illustration 44 - Présentation du site AUD 437 (pour localisation, voir illustration 43) : A- photographie du talweg qui incise les formations du Maastrichtien ; B- clastes transportés par le cours d'eau : galets de grès ferruginisés et géodes siliceuses ; C- « collecte » de géodes trouvées dans les dépôts du talweg	58
Illustration 45 - Géodes siliceuses (à gauche : échantillon AUD-441 ; à droite : échantillon AUD-437)	59
Illustration 46 - Photos des cristaux de quartz constitutifs des géodes siliceuses, en lames minces	60
Illustration 47 - Photos, en lames minces, des cristaux de quartz (gris à noir), constitutifs des géodes siliceuses, incrustés de plus petits minéraux d'anhydrite (biréfringences de couleur vive)	60
Illustration 48 - Spectres obtenus par analyse au MEB (en haut) et exemples d'image de portion de lame mince, analysée par le MEB (en bas)	61
Illustration 49 - Affleurement de grès de Coudures, remaniés du fait d'une exploitation (A- éléments de quartzites ; B- niveau plus sableux et C- niveau plus gréseux)	62
Illustration 50 - Ouvrages (forages, puits et sources) présents sur l'anticlinal d'Audignon	65
Illustration 51 - Aquifères captés par les ouvrages de la structure d'Audignon	67
Illustration 52 - Piézométrie de la nappe du Paléocène (Guinand et Roullin, 1978)	68
Illustration 53 - Piézométrie de la nappe du Crétacé supérieur (Guinand et Roullin, 1978)	68
Illustration 54 - Réseau hydrographique et influence anthropique des écoulements de surface, au droit de la structure anticlinale d'Audignon	70
Illustration 55 - Représentation du système aquifère nord-pyrénéen, au niveau de la structure anticlinale d'Audignon (Armand et al., 1993)	71
Illustration 56 - Localisation des affleurements karstiques connus dans le lit du Laudon (localisation générale visible sur l'illustration 50) : 440 m à vol d'oiseau séparent ces affleurements de la source	72
Illustration 57 - Station de jaugeage départementale	73
Illustration 58 - Plan schématique des ouvrages de la station d'exploitation du Marseillon et logs techniques des ouvrages d'exploitation et de l'ancien forage F0 (Briand, 2014)	74

Illustration 59 - Photographies de la lagune à sec, en août 2012, obtenues du Syndicat	75
Illustration 60 - Schéma conceptuel d'apparition de la turbidité, dans la source du Marseillon.....	76
Illustration 61 - Carte des forages accessibles pour une mesure piézométrique et forages disposant d'une chronique de suivi continu (portail ADES).....	78
Illustration 62 - Périodes de temps couvertes par les suivis piézométriques horaires	78
Illustration 63 - Carte des forages et sources accessibles pour une mesure physico-chimique et ouvrages intégrés au réseau "qualité" du Département des Landes (portail ADES).....	79
Illustration 64 - Localisation des mailles SAFRAN et de la station météorologique du Marseillon, sur l'anticlinal d'Audignon	80
Illustration 65 - Comparaison de la pluviométrie journalière obtenue dans le pluviomètre, situé au Marseillon, avec celle de la maille SAFRAN correspondante	80
Illustration 66 - Synthèse des suivis de haute fréquence (maximum journaliers) effectués sur le site du Marseillon.....	81
Illustration 67 - Instrumentation de la lagune	82
Illustration 68 - Courbe de tarage de la source du Marseillon et chronique piézométrique	83
Illustration 69 - Comparaison des mesures de niveau de la source, en sortie de lagune, avec celles du P1	83
Illustration 70 - Equipement de suivi du Laudon	84
Illustration 71 - Courbe de tarage du Laudon, au niveau du pont, et chronique piézométrique	84
Illustration 72 - Positionnement des campagnes piézométriques par rapport au niveau des nappes.....	85
Illustration 73 - Ouvrage 09783X0038 (Lacoumatte à Sarraziet).....	86
Illustration 74 - Origine des mesures piézométriques utilisées pour les campagnes piézométriques.....	86
Illustration 75 - Carte piézométrique en basses eaux des aquifères du Crétacé et du Paléocène, de la structure anticlinale d'Audignon.....	88
Illustration 76 - Carte piézométrique en hautes eaux des aquifères du Crétacé et du Paléocène, de la structure anticlinale d'Audignon.....	89
Illustration 77 - Indication des campagnes de prélèvement géochimique, dans le contexte piézométrique de la zone d'étude.....	90
Illustration 78 - Localisation des points de prélèvements pour la campagne de hautes eaux, en mai 2018 (les numéros permettent d'identifier les points dans les illustrations suivantes).....	91
Illustration 79 - Localisation des points de prélèvements pour la campagne de basses eaux, en septembre 2018 (les numéros permettent d'identifier les points dans les illustrations suivantes).....	91
Illustration 80 - Diagramme de Piper des eaux échantillonnées	92
Illustration 81 - Diagramme de Schoeller-Berkaloff des eaux de la source de Marseillon et comparaison avec des eaux prélevées à proximité géographique de la source	93
Illustration 82 - Diagrammes binaires	94
Illustration 83 - Évolution des concentrations en nitrate des eaux, en fonction des teneurs en chlorure, magnésium, bore et lithium.....	95
Illustration 84 - Évolution du rapport B/Cl en fonction des concentrations en magnésium.....	96
Illustration 85 - Évolution du rapport Mg/Ca en fonction des teneurs en silice	97
Illustration 86 - Évolution du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en fonction du ratio 1/Sr et de la signature isotopique de l'oxygène 18 de l'eau	98

Illustration 87 - Évolution des signatures en deutérium, en fonction des signatures en oxygène 18 (contexte de basses eaux).....	100
Illustration 88 - Évolution des signatures en deutérium, en fonction des signatures en oxygène 18 (contexte de hautes eaux)	100
Illustration 89 - Résultats du modèle TEMPO pour le forage de Chrestian	102
Illustration 90 - Réponse impulsionnelle du système aquifère (au forage Chrestian) à la recharge par les pluies efficaces.....	102
Illustration 91 - Résultats du modèle TEMPO pour la source du Marseillon.....	103
Illustration 92 - Dynamiques des réponses impulsionnelles des composantes lente et rapide de l'écoulement à la source du Marseillon.....	104
Illustration 93 - Comparaison des dynamiques de fonctionnement lentes de la source du Marseillon et du forage Chrestian.....	104
Illustration 94 - Position de la source du Marseillon (triangle bleu) dans la classification des systèmes karstiques, obtenue à partir de l'analyse des courbes de récession, selon Mangin (1975) (modifié d'après El-Hakim and Bakalowicz, 2007)	108
Illustration 95 - Tableau des résultats des extensions de bassin d'alimentation de la source du Marseillon.....	109
Illustration 96 - Proposition de bassin d'alimentation de la source du Marseillon	111
Illustration 97 - Données du suivi de l'essai multi-puits, réalisé dans les forages du site d'exploitation de la source d'Audignon, entre le 08 et le 12 avril 2019 (graphe du haut : suivi des niveaux piézométriques dans les forages exploités (F1 et F2) et le piézomètre P1 ; suivi des débits du pompage des ouvrages ; graphe du bas : suivis des débits de la source et des ouvrages pompés)	112
Illustration 98 - Pompage dans une fracture située dans un aquifère multicouche et à proximité d'une source (modification de Hunt, 2004 et Dewandel et al., 2018).....	113
Illustration 99 - Schéma de calcul utilisé (référentiel : F1 ; modèle : fracture et source), modifié de Hunt (2004) et Dewandel et al. (2018), lors des pompages effectués dans les forages d'Audignon	114
Illustration 100 - Modélisation des rabattements dans les puits de pompage F1 et F2 et piézomètre P1 (graphe arithmétique).....	114
Illustration 101 - Modélisation de l'impact sur la source, suite aux pompages dans F1 et F2 (graphe arithmétique)	115
Illustration 102 - Paramètres hydrodynamiques retenus dans le modèle	115
Illustration 103 - Impacts des prélèvements de F1 et F2 (chacun pompé à 300 m ³ /h) sur la source	116
Illustration 104 - Résultat des deux opérations de jaugeages sériés dans le Laudon, réalisés le 30 octobre 2018	118
Illustration 105 - Évolutions de la conductivité électrique (CE) des eaux du Laudon et de la source de Marseillon, lors des crues du printemps 2018 ; les évolutions du niveau de la rivière et de la piézométrie de l'aquifère sont également reportées	119
Illustration 106 - Évolutions de la conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$) et de la température ($^{\circ}\text{C}$) des eaux du Laudon (en vert et rouge) et de la source de Marseillon (en noir et violet), lors des crues du printemps 2018	120
Illustration 107 - Évolutions de la turbidité, de la piézométrie et des volumes prélevés dans les forages F1 et F2 (champ captant de Marseillon, du 01/05/2018 au 31/07/2018).....	122
Illustration 108 - Évolutions de la turbidité, de la conductivité des eaux des forages F1 et F2 du champ captant de Marseillon, ainsi que de la piézométrie, entre le 01/01/2019 et le 01/03/2019	

(l'évolution du niveau et de la conductivité de l'eau du Laudon, situé à proximité, est également reportée)	123
Illustration 109 - Évolutions de la turbidité, de la piézométrie et des volumes prélevés dans les forages F1 et F2 du champ captant de Marseillon, entre le 01/01/2019 et le 01/03/2019	124
Illustration 110 - Évolutions de la turbidité, de la conductivité des eaux des forages F1 et F2 du champ captant de Marseillon et de la piézométrie, entre le 15/05/2019 et le 15/06/2019 (l'évolution du niveau et de la conductivité de l'eau du Laudon, situé à proximité, est également reportée)	126

Liste des annexes

Annexe 1 Tableau de corrélation des formations, selon les différents auteurs et cette étude	137
Annexe 2 Liste des ouvrages de la structure anticlinale d'Audignon	141
Annexe 3 Informations du volet géochimique	145
Annexe 4 Courbes-types de l'évolution du rabattement et de l'impact sur la source et paramètres du modèle mathématique d'interprétation, retenu pour l'essai par pompage	157

1. Contexte et objectifs de l'étude

Le Bassin sédimentaire aquitain correspond à une vaste dépression au sud-ouest de la France. Largement ouvert vers l'ouest et l'Océan atlantique, il est ceinturé par les reliefs du Massif Armoricain au nord, du Massif Central et de la Montagne Noire à l'est, et la chaîne des Pyrénées au sud (Illustration 1). Son comblement progressif à partir du socle continental a conduit à une alternance verticale d'aquifères et d'épentes depuis les premières formations sédimentaires du Trias et du Jurassique jusqu'à celles, récentes, du Plio-Quaternaire. Cette alternance amène à considérer cet ensemble comme un multicouche aquifère au sein duquel les réservoirs sont plus ou moins individualisés. Parmi eux, les réservoirs carbonatés notamment du Jurassique et du Crétacé revêtent un enjeu économique majeur dans la mesure où ils sont largement exploités pour l'alimentation en eau potable et l'agriculture.

Ces réservoirs carbonatés particulièrement bien représentés dans le Bassin aquitain, notamment en bordure ouest du Massif Central, par les assises jurassiques et crétacées, se retrouvent également à l'affleurement essentiellement au sud d'un accident ancien, la flexure celtaquitaine (Illustration 1). Celle-ci sépare le Bassin aquitain en deux domaines (BRGM et al., 1974) : au nord se développe une plateforme stable et peu épaisse, alors qu'au sud, un bassin fortement subsident, pouvant dépasser 3 000 mètres de profondeur, montre une structuration complexe où apparaissent des plis, ou structures anticlinales, qui sont la conséquence de l'orogénèse pyrénéenne. Ces structures anticlinales, qui portent à l'affleurement des aquifères profonds (Sables Infra-Molassiques, Paléocène, Crétacé supérieur), constituent des zones potentielles d'exutoire ou bien, à l'inverse, d'alimentation. Cependant, les études hydrogéologiques les concernant, trop peu nombreuses et relativement anciennes, laissent la place à des interrogations quant à leur fonctionnement et à leur rôle dans l'hydrodynamisme régional.

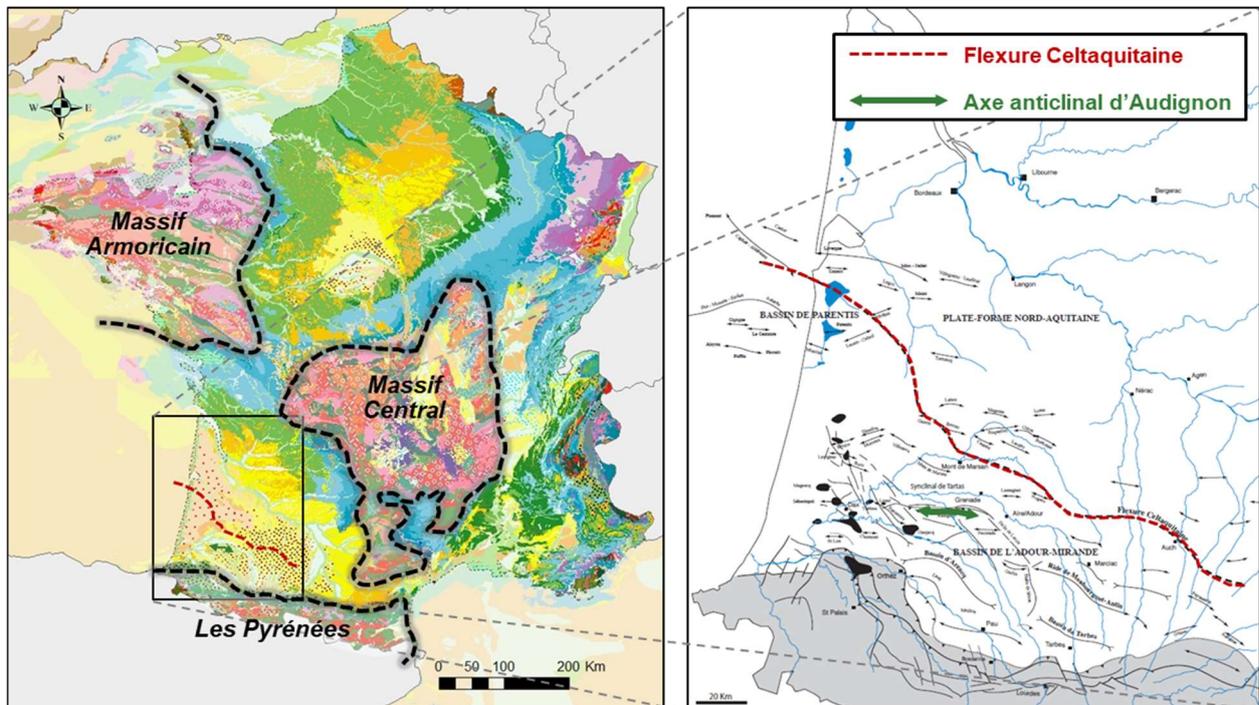


Illustration 1 - Carte géologique à gauche (en bleu, les formations jurassiques ; en vert, les formations crétacées ; en dégradé de jaune et orange, les formations cénozoïques) et carte structurale du Bassin aquitain à droite (Serrano, 2001)

Parmi cette série d'antiformes, la structure anticlinale d'Audignon est l'une des plus imposantes (Illustration 2). Située dans le département des Landes, au sud du fleuve de l'Adour, son nom provient de la commune d'Audignon présente au centre de l'anticlinal.

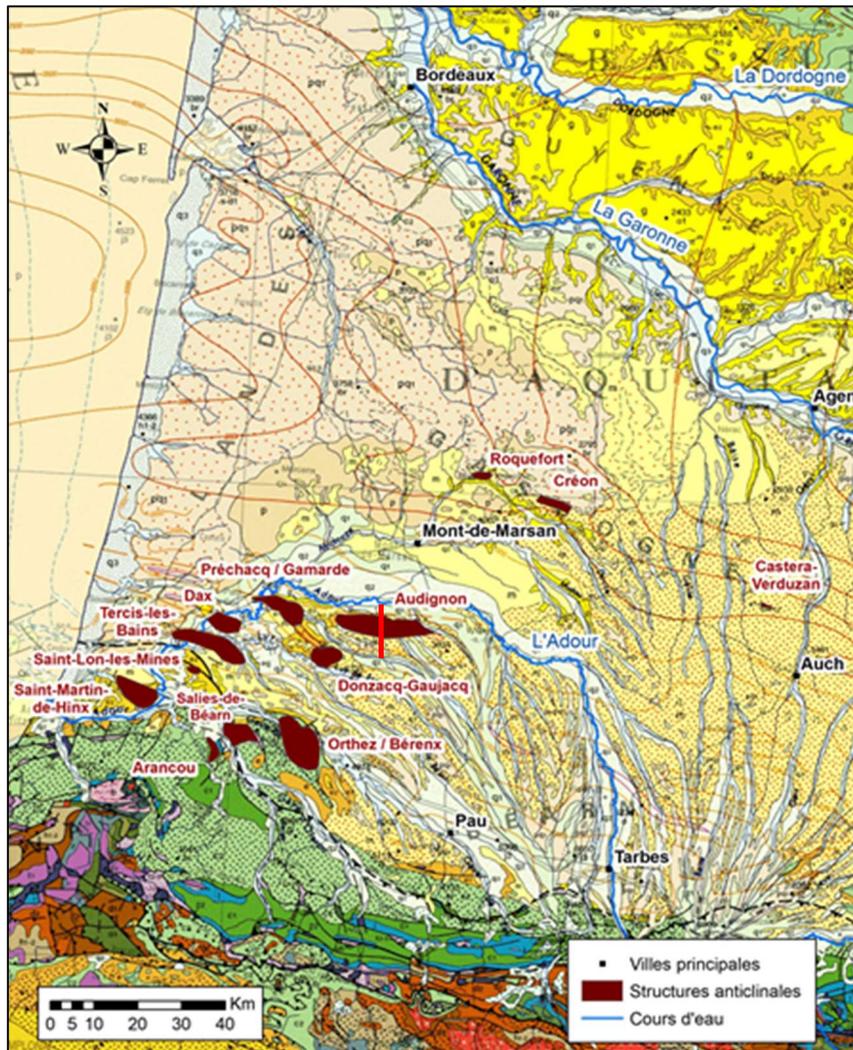


Illustration 2 - Structures anticlinales portées à l'affleurement au sud-ouest du Bassin aquitain (en rouge : positionnement de la coupe sur l'illustration 3)

Cette structure, traversée par des failles longitudinales et dont l'axe est orienté approximativement est-ouest, correspond à un anticlinal faillé dissymétrique, avec un flanc sud à pendage modéré, contrastant avec un flanc nord à pendage élevé. Cet anticlinal porte à l'affleurement, sur environ 85 km², les formations carbonatées profondes du Crétacé et du Paléocène, disposées de manière concentrique. Des travaux récents (Fiquet & Armand, 2000) (Briand, 2014) ont démontré le rôle de la karstification¹ dans les transferts rapides d'eau depuis la surface au sein de ces aquifères qui alimentent par ailleurs des sources stratégiques pour la région. Parmi celles-ci, la source du Marseillon, présente au cœur de l'anticlinal, alimente en eau potable plus d'une vingtaine de communes. L'importante activité agricole, qui se déploie sur son

¹ Processus pendant lequel de l'eau de pluie chargée en dioxyde de carbone attaque de la roche calcaire, principalement composée de calcite, élargissant les vides initiaux (fractures) de la roche et établissant progressivement une structure de drainage organisée le long de chemins préférentiels d'écoulement (discontinuités géologiques)

impluvium, engendre une forte vulnérabilité des eaux souterraines vis-à-vis des pollutions de surface, notamment celles liées aux nitrates. Par ailleurs, des problèmes de turbidité interviennent fréquemment dans la source, nécessitant un arrêt d'exploitation par le Syndicat des eaux du Marseillon et du Tursan. La compréhension du schéma de fonctionnement de la source doit permettre d'améliorer la protection de cette ressource d'un point de vue quantitatif et qualitatif.

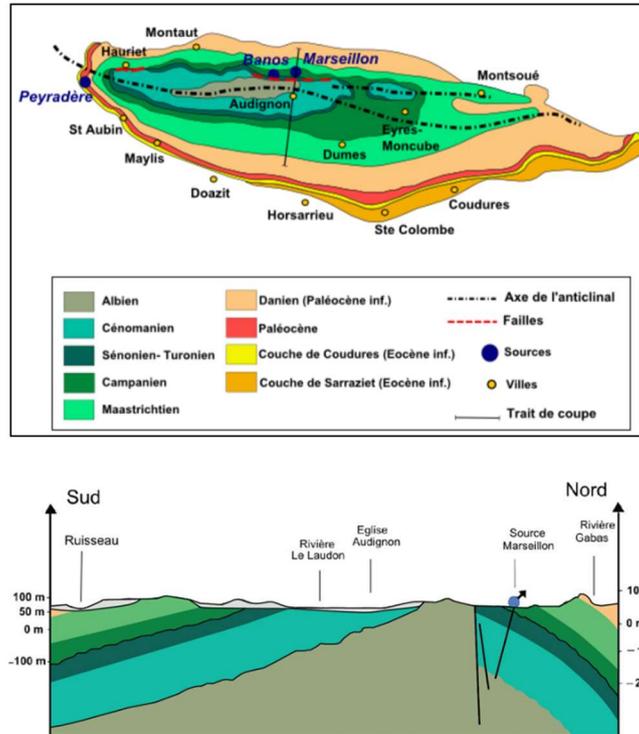


Illustration 3 - Vue géologique en plan de la structure anticlinale d'Audignon et coupe verticale nord-sud (Briand, 2014, d'après Oller, 1986) - Positionnement de la coupe sur l'illustration 2

Les objectifs de ce projet s'inscrivent dans deux échelles d'analyse. La première consiste à améliorer la **compréhension du fonctionnement hydrogéologique des aquifères profonds du Crétacé et du Paléocène à l'échelle de la structure anticlinale d'Audignon**. Cette compréhension passe par l'analyse des modalités d'écoulement au sein de la structure (continuité des réservoirs entre eux), des relations eaux de surface / eaux souterraines et par la caractérisation de cette structure en tant qu'exutoire et/ou alimentation des aquifères dits profonds du sud du Bassin aquitain. La seconde échelle d'analyse consiste à préciser le **fonctionnement hydrogéologique de la source du Marseillon** pour être en mesure d'en sécuriser l'approvisionnement en eau.

En préalable à l'analyse hydrogéologique, une **révision de la connaissance géologique et de l'état de karstification de la structure anticlinale d'Audignon sera proposée**. Il s'agira de préciser la géométrie et les faciès des réservoirs hydrogéologiques de la structure et leur rôle à l'échelle régionale.

Cette démarche répond au classement de la structure d'Audignon en ZOS (Zones à Objectifs plus Stricts) du Bassin Adour-Garonne, pour lesquelles des programmes doivent être engagés de façon prioritaire, afin de réduire les coûts de traitement de l'eau potable. L'étude proposée s'inscrit dans le cadre de la sous-disposition 1.3 (*Préciser la délimitation des zones de sauvegarde de la ressource en eau AEP*) du PAGD du SAGE Adour-Amont pour la sécurisation de l'alimentation en eau potable, d'un point de vue quantitatif et qualitatif.

2. Révision géologique et amélioration des connaissances concernant la karstologie de la structure d'Audignon

En raison d'affleurements limités des formations carbonatées et de leur recouvrement par les formations sédimentaires plus récentes, cette révision s'appuie sur la mise en place d'outils géophysiques (interprétations de données existantes et nouvelles acquisitions). Elle vise à préciser la géométrie des formations, leurs propriétés réservoirs et leur niveau de karstification.

2.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE - ÉTAT DES CONNAISSANCES

2.1.1. L'histoire du Bassin sud-aquitain

À la fin de l'ère primaire, la chaîne hercynienne se disloque. Les failles majeures, mises en place au cours de cette orogénèse, vont jouer un rôle structurant par la suite, aussi bien dans les phases d'extension au Mésozoïque, que durant les phases de compression pyrénéenne (Villien et Matheron, 1989).

Le bassin triasique s'inscrit dans les prémices de la phase d'extension mésozoïque, de direction NE-SW (Curnelle, 1983), pendant laquelle se forme un bassin caractérisé par une subsidence tectonique et une sédimentation syn-rift, détritique à la base, puis de plus en plus dominée par un environnement évaporitique (Curnelle, 1983).

Après le cycle évaporitique du Trias et du Lias inférieur, le Lias moyen s'inscrit dans un cycle transgressif sous la forme d'une méga-séquence de comblement comprenant à la base, d'épais niveaux argileux et marneux (Lias marneux) puis au sommet, un passage progressif à un important ensemble plus franchement carbonaté, le Dogger. Au cours de cette période, la sédimentation marine est responsable du développement de grandes plateformes carbonatées de type "barrière", couvrant toute la région (Curnelle et Dubois, 1968). La subsidence progressive du bassin associée à un nouveau cycle transgressif-régressif, provoque, au Jurassique supérieur, le dépôt d'un terme plutôt marneux et argileux à sa base (Oxfordien-Kimméridgien), puis un terme plus franchement carbonaté (Tithonien), avec le développement de la dolomie de Mano à son sommet.

À la fin du Jurassique et au début du Crétacé, le Bassin aquitain subit une transformation profonde, avec l'apparition de deux sous-bassins (Parentis au nord et Adour-Mirande au sud), résultants de l'extension affectant la croûte continentale due à la séparation de l'Ibérie et de l'Europe (Biteau et al., 2006). Ce changement de régime provoque les premiers mouvements diapiriques (Winnock et Pontalier, 1970 ; Canérot, 1988 ; James and Canérot, 1999) qui donnent lieu à une discordance régionale tout au long du Néocomien (Canérot et al., 2005).

Au cours du Crétacé, le déplacement entre les plaques européenne et ibérique provoque les phases principales suivantes (Biteau et al., 2006) :

- Au début du Crétacé inférieur (Illustration 4 g-h), guidés par des contraintes en extension NE-SW, les dépôts-centres des bassins d'Arzacq-Tarbes et de Parentis s'individualisent : ils y sont donc les plus épais ;

- À l'Aptien-Albien moyen (Illustration 4 i), ces deux dépôts-centres atteignent leur paroxysme. Sous le poids de cette importante sédimentation, les évaporites migrent vers les bords de ces bassins, où des rides de sel se forment, provoquant des lacunes de sédimentation à l'aplomb de ces rides ;
- Les premiers mouvements compressifs relatifs à la subsidence de la plaque ibérique, sous la plaque européenne, apparaissent à la fin du Crétacé (Campanien). Un bassin d'avant-pays se forme au sud des sous-bassins d'Arrzacq, Tarbes et Comminges, comblé par une importante épaisseur de flysch, alors qu'au nord de ces sous-bassins se développent des plateformes carbonatées (Illustration 4 k-l).

À partir du Paléocène, le régime compressif pyrénéen devient actif en permanence et va s'exercer sur une couverture sédimentaire déjà fortement structurée au cours du Mésozoïque, (Canérot et Lenoble, 1993 ; Bourrouilh et al., 1995). Les structures dues à une nouvelle phase de tectonique salifère sont nombreuses (Illustration 5) : diapirs, rides anticlinales, simple bombement, percement complet... Les diapirs développés du Crétacé inférieur à l'Aptien, orientés est-ouest, à l'aplomb de grands accidents de socle, évoluent au cours du Cénozoïque en plis à vergence nord (anticlinal d'Audignon). Les diapirs albiens, situés à l'intersection des failles est-ouest (Canérot et Lenoble, 1991), forment des plis ovoïdes (anticlinaux de Louer), parfois à cœur diapirique perçant (diapir de Bastennes-Gaujacq).

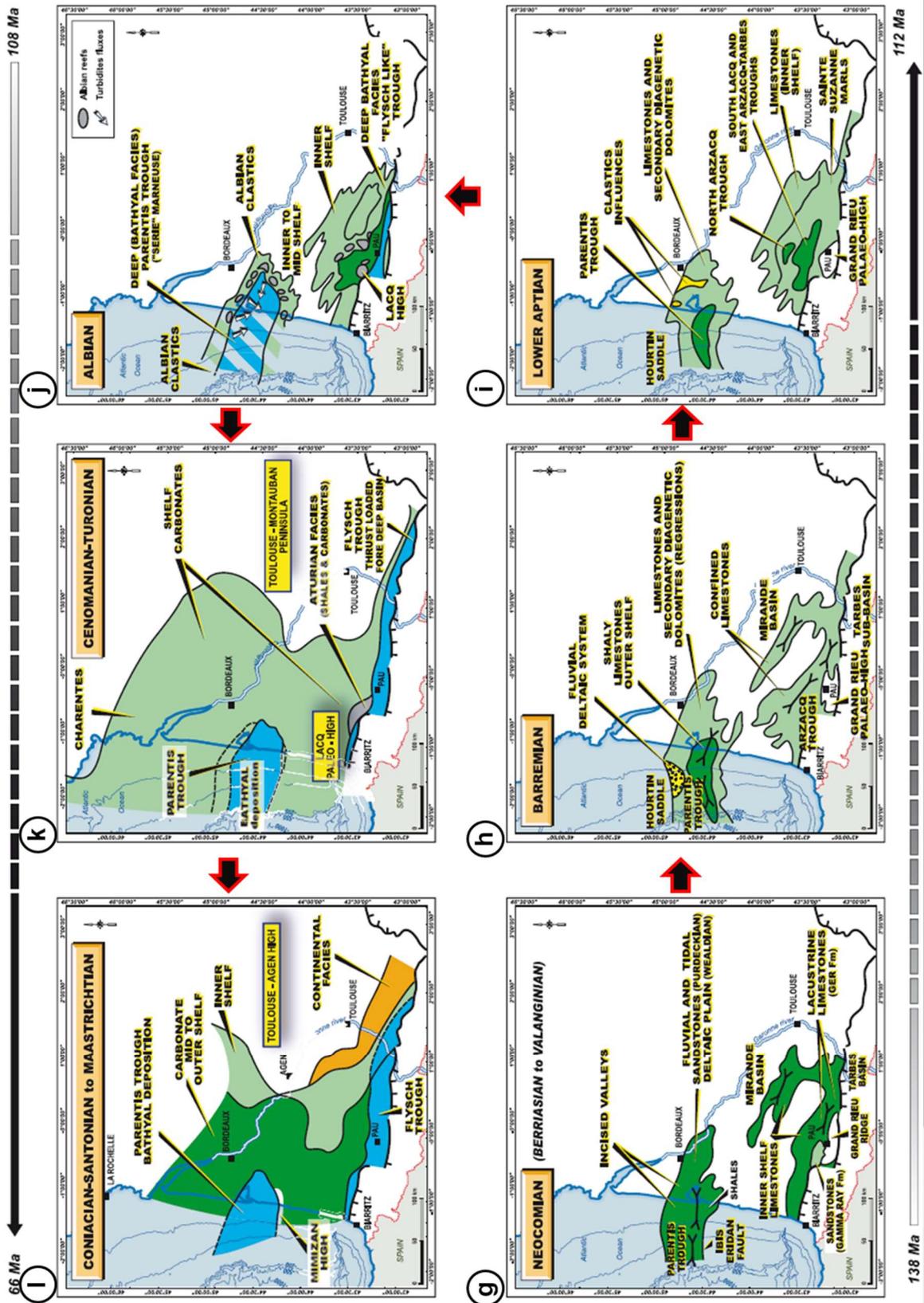


Illustration 4 - Disposition des faciès crétaqués, du Néocomien jusqu'au Maastrichtien (Biteau et al., 2006)

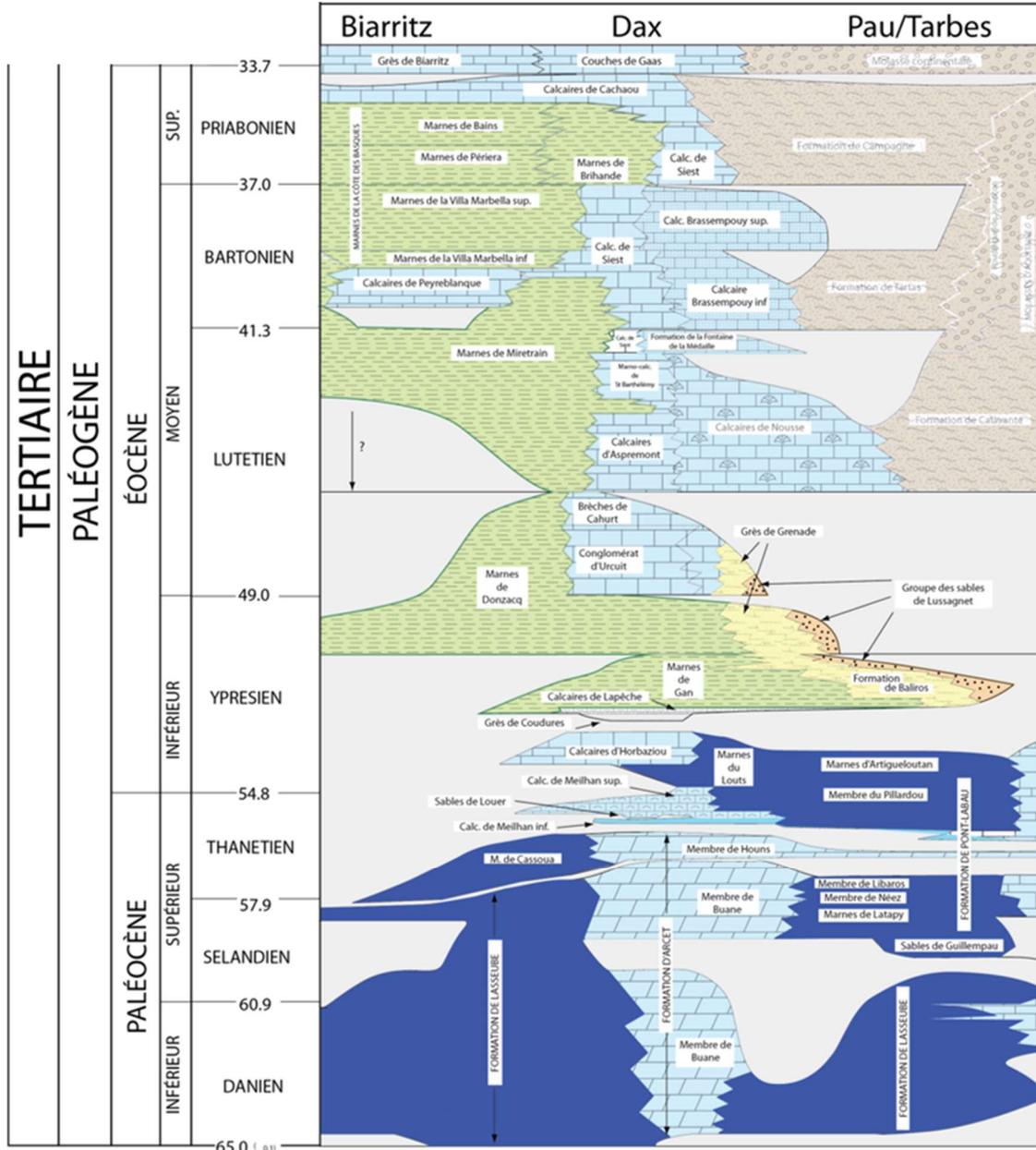


Illustration 6 - Tableau stratigraphique des formations paléogènes du bassin de l'Adour (d'après Serrano, 2001)

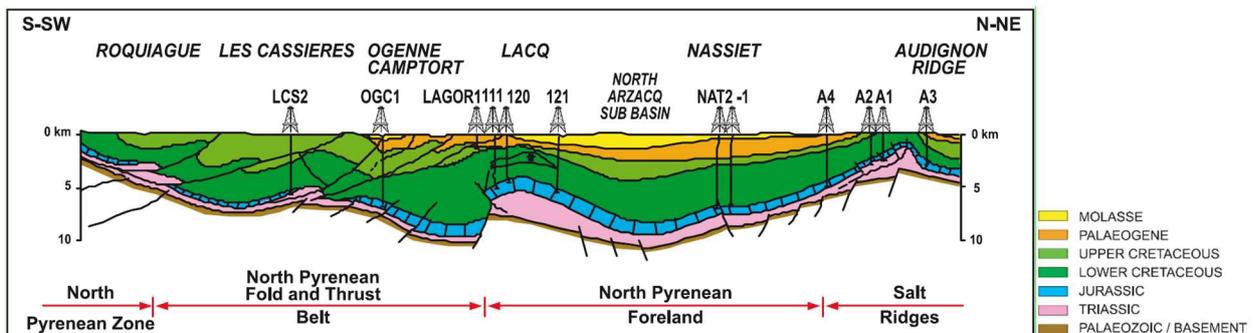


Illustration 7 - Coupe géologique à travers le sous-bassin d'Arzac, de l'avant-pays pyrénéen jusqu'à la ride d'Audignon (Bitaud et al., 2006)

2.1.2. L'anticlinal d'Audignon

Le schéma structural

La structure d'Audignon, appelée aussi « la ride » d'Audignon, correspond à un anticlinal sur faille inverse, d'axe est-ouest, à vergence nord (Illustration 8a et b). Dans sa partie est, la structure subit une virgation vers le sud et s'amortit ; à l'ouest, elle vient buter sur la structure anticlinale de Louer-Montfort, elle-même reliée au diapir de Bastennes-Gaujacq au sud (Illustration 8).

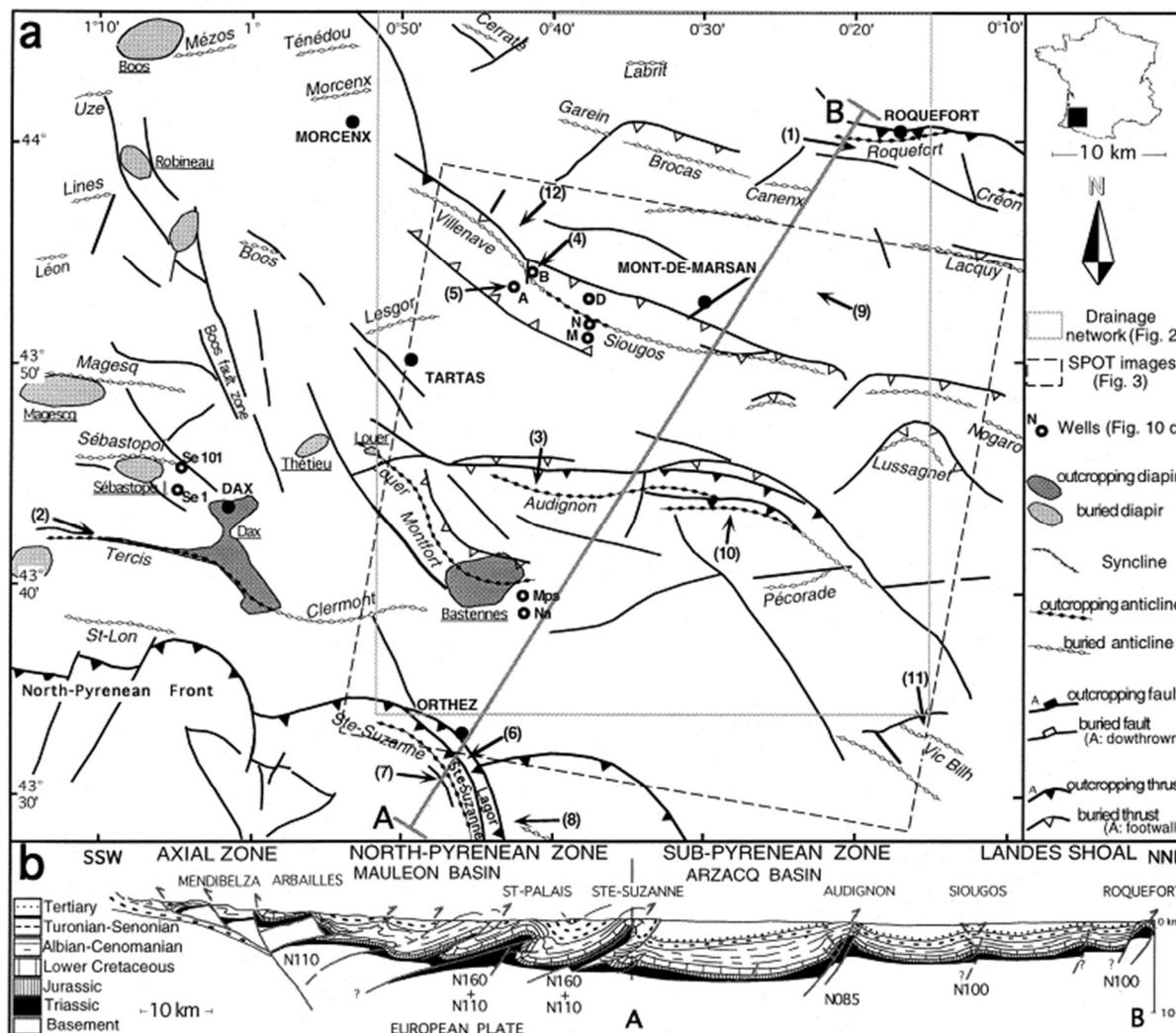


Illustration 8 - a) Schéma structural, illustrant les styles des déformations tectoniques et salifères de la région, centré sur « la ride » d'Audignon - b) Coupe géologique d'Orthez à Roquefort, en passant par la structure d'Audignon (d'après Rocher et al., 2000)

La géométrie de cette structure résulte d'une structuration polyphasée (Illustration 9). Après le dépôt des formations jurassiques (Illustration 9 a), un premier raccourcissement s'effectue au Crétacé inférieur, lors d'un mouvement compressif nord-sud, à l'origine de la formation d'un pli accommodé par la déformation du sel triasique (Illustration 9 b). La tête de pli, où s'étaient déposés précédemment les carbonates jurassiques (Illustration 9 a), est fortement érodée, ne laissant que des dépôts du Lias (Jurassique inférieur). L'extension de l'Apto-Albien, couplée à la charge sédimentaire qui se dépose dans le bassin au sud, permet la remontée du sel et la percée du diapir de Bastennes-Gaujacq à travers la couverture sédimentaire (Illustration 9 c et d).

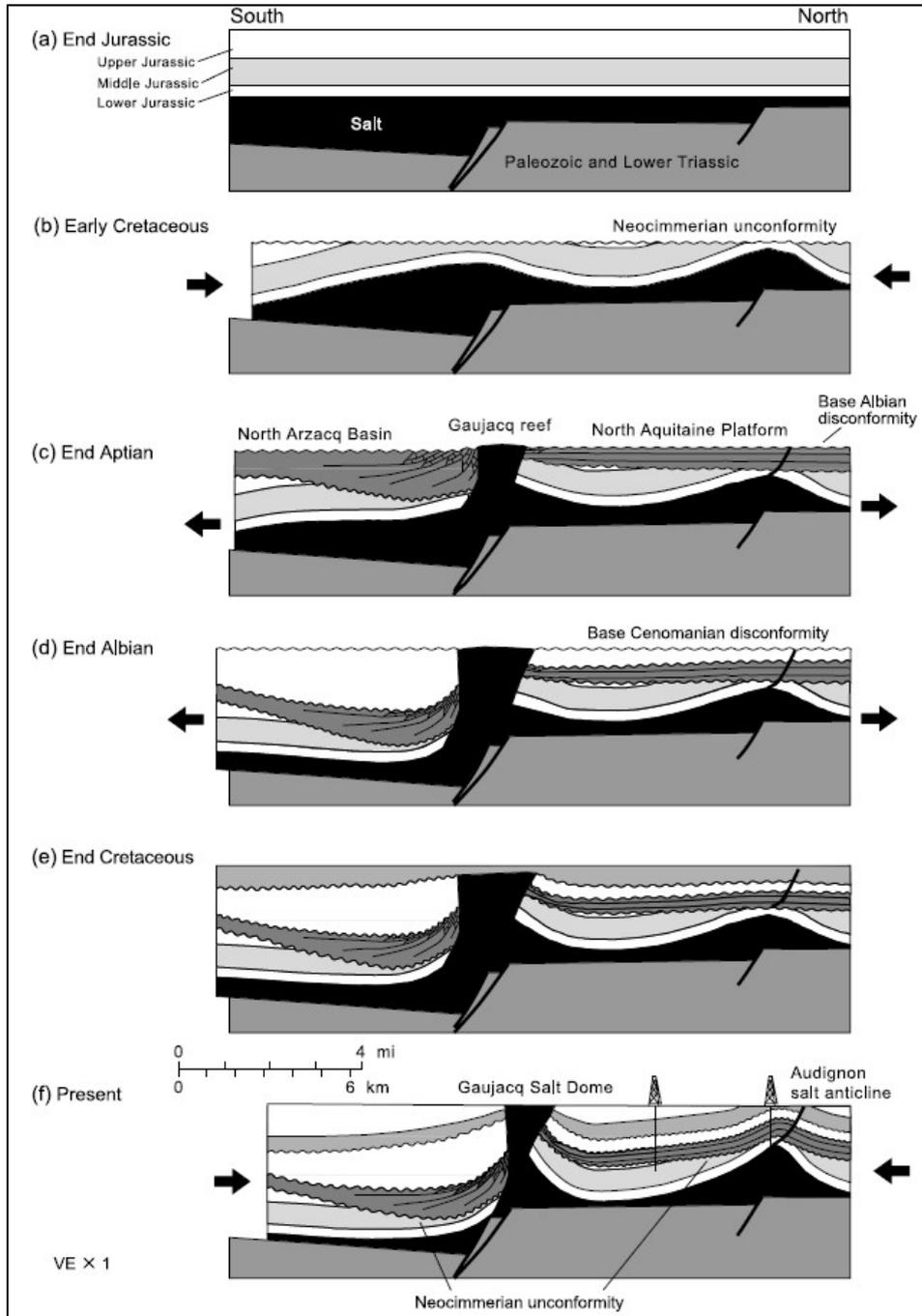


Illustration 9 - Restauration séquentielle du dôme de Bastennes-Gaujacq et de la ride d'Audignon, depuis la fin du Jurassique (Canérot et al., 2005)

Les formations du Crétacé supérieur se déposent en discordance sur les structures précédemment formées (Illustration 9 e). Lors de la compression pyrénéenne, ces formations sont reprises dans la structure d'Audignon par des mouvements chevauchants à vergence nord (Illustration 9 f). Sous l'anticlinal d'Audignon le sel -jouant comme niveau de décollement- reste enterré, tandis qu'au niveau du dôme de Bastennes-Gaujacq, les formations du Crétacé supérieur sont de nouveau traversées par le sel.

Grâce à cette structure anticlinale, les terrains mis à l'affleurement couvrent un large éventail stratigraphique, présenté dans le paragraphe suivant.

La colonne stratigraphique

Le découpage des formations a été homogénéisé et harmonisé en traitant l'ensemble des formations géologiques, du Crétacé inférieur à celles du Plio-Quaternaire reconnues à l'affleurement (Illustration 10) et en sondage. La reconstitution d'un log synthétique, pour la zone d'étude, en lien avec les propriétés "réservoir" des différentes formations, a été réalisée (Illustration 11) à partir des références du secteur (Feinberg, 1964 ; Guingand et Roullin, 1978 ; Pouchan, 1986 ; Armand et al., 1993 ; Serrano, 2001 ; Douez, 2007).

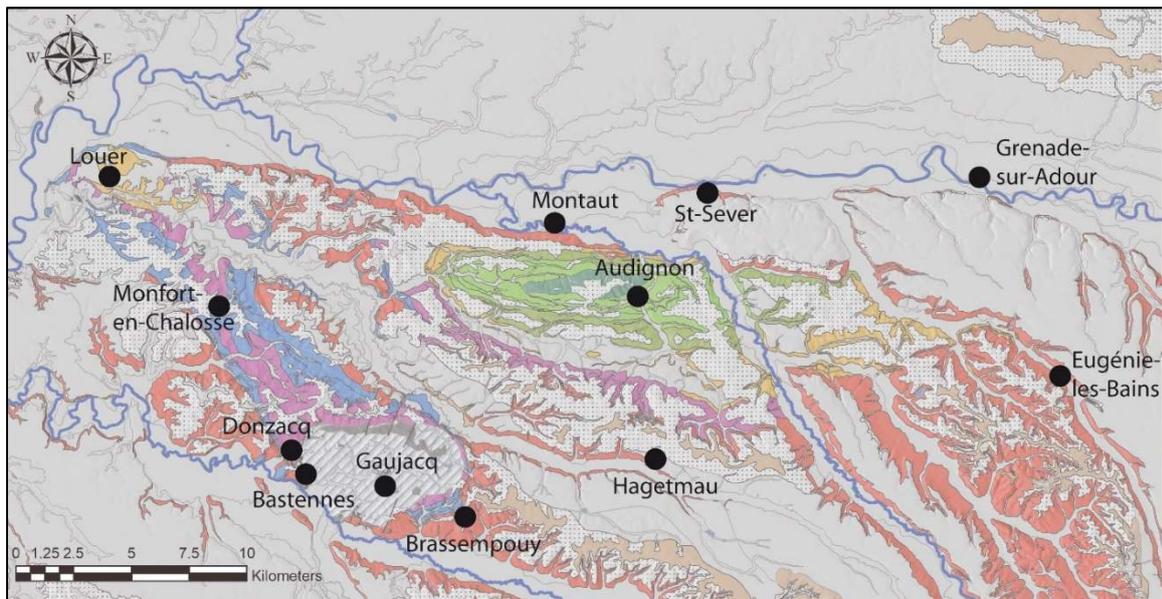


Illustration 10 - Carte géologique de la zone d'étude centrée sur la structure d'Audignon (la légende des formations correspond aux couleurs du log présentées à l'illustration 11)

L'examen des données disponibles a permis de dresser un inventaire des unités géologiques "réservoirs" (Illustration 11), parmi lesquelles plusieurs formations présentent des évidences de karstification :

- Les **carbonates du Crétacé supérieur** présentent un ensemble relativement continu de faciès calcaire, plus ou moins dolomitique, ponctué de passées marneuses discontinues ou suffisamment fines pour ne pas considérer qu'elles modifient les écoulements à l'échelle de la structure. L'ensemble, souvent fissuré et vacuolaire, présente des indices de karstification évidente en surface et constitue un réservoir de bonne qualité. Le sommet de cet ensemble est constitué de la formation de Dumes, dont les variations de faciès ont amené certains auteurs à suspecter un niveau plus marneux dans la partie ouest de la structure (Bel et Sourisseau, 1989). Or ces variations latérales de faciès apparaissent rapides et brutales d'un forage à l'autre et ne permettent pas de constituer une zonation ordonnée ou prévisible de ce niveau potentiellement moins perméable. À noter que la formation, affleurant dans la commune de Dumes, est constituée d'une alternance régulière marno-calcaire à sa base et de bancs franchement calcaires en son sommet. Cette partie sommitale, constituée de calcaire blanc mudstone d'aspect crayeux, accueille d'ailleurs un niveau fortement karstifié. Le Maastrichtien n'est donc pas qu'une éponte locale : il est aussi constitué de niveaux très perméables et transmissifs, permis grâce à la karstification. Pour cela, nous avons choisi par la suite -notamment pour la partie modélisation (cf. chapitre 2.3.3)- de ne pas introduire d'éponte entre les formations "réservoirs" du Crétacé supérieur et celles de la base du Tertiaire, considérant qu'elle ne constituait pas une barrière à l'écoulement à l'échelle de la structure.

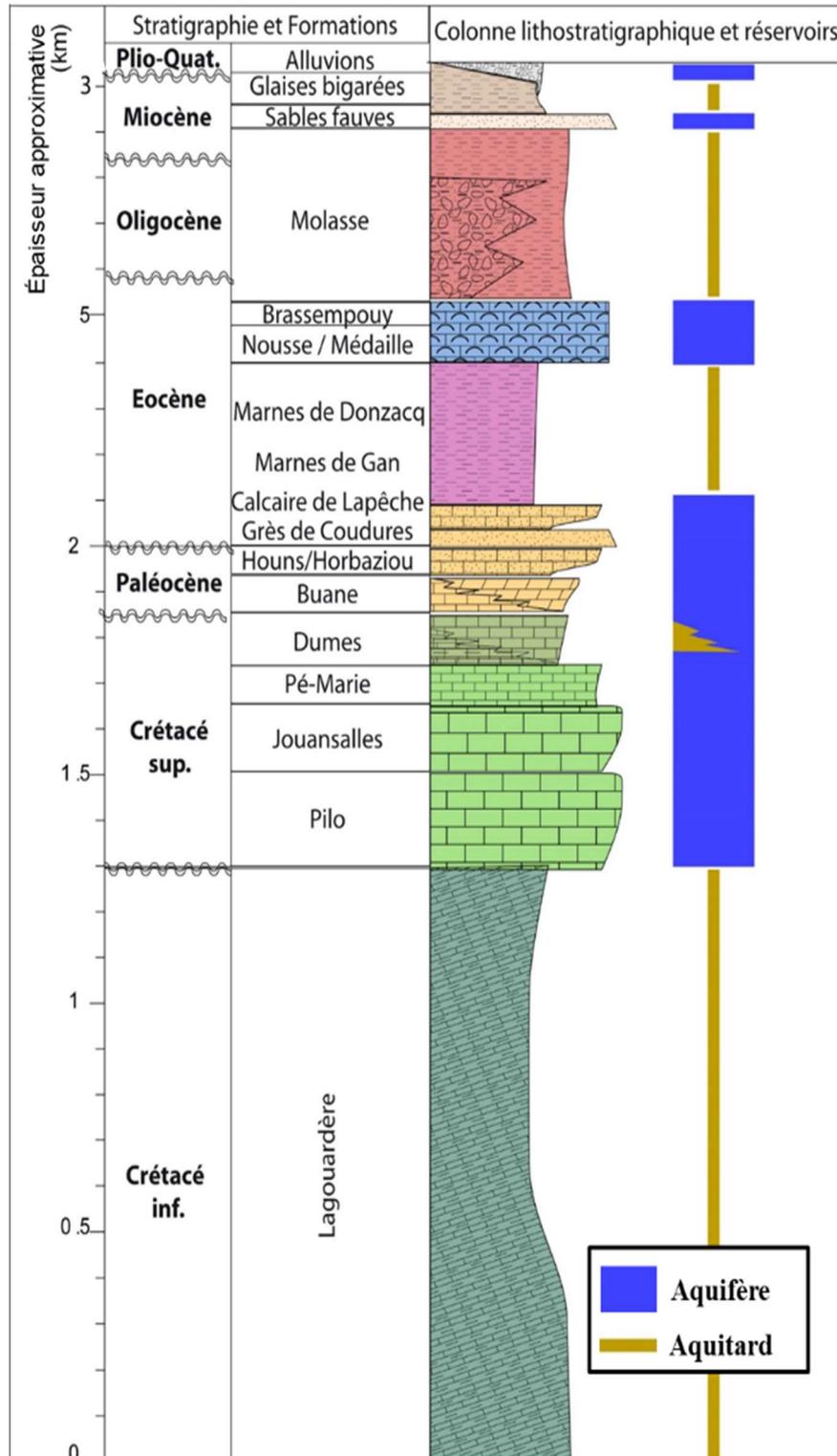


Illustration 11 - Log synthétique des formations constituant la structure d'Audignon et propriétés "réservoirs" associées (Le nom des formations de cette colonne stratigraphique peut être mis en regard avec les différentes appellations de la littérature dans le tableau de l'Annexe 1.)

- Les **formations de la base du Tertiaire** (Paléocène/Éocène inférieur) débutent par un ensemble dolomitique, appelé « couche d'Arcet » ou « membre de Buane », que l'on retrouve à l'échelle de toute la structure d'Audignon, en surface et en forage. L'ensemble évolue vers des faciès calcaires de moins en moins dolomitiques (formations de Houns et Horbaziou). Ces formations sont fissurées et presque constamment karstifiées à l'affleurement. Elles sont recouvertes par une formation sablo-gréseuse appelée « grès de Coudures ». Cette formation, rencontrée en forage sous un faciès sableux, présente une forte cimentation en surface et est souvent décrite comme des grès, voire des quartzites. Enfin, la formation sommitale correspond aux calcaires de Lapêche, qui présentent de bonnes qualités de réservoir.
- Les **formations grésocarbonatées du sommet de l'Éocène** (formation de la fontaine de la Médaille, calcaires de Nousse, grès à Nummulites, calcaires de Brassempouy, sables du Lussagnet) constituent un réservoir connu sous le nom régional des sables infra-molassiques (SIM). La succession verticale des faciès est constituée d'une alternance de calcaires et de faciès plus gréseux, qui passent latéralement à des faciès plus argileux ou marneux. Ce réservoir possède une épaisseur et une qualité variables à l'échelle de la structure. Sa morphologie sera discutée suite à l'interprétation des profils sismiques (cf. chapitre 2.3.1).
- Les **sables fauves** correspondent à un dépôt sableux qui nappe l'ensemble de la structure d'Audignon. On les trouve à l'affleurement sur l'ensemble de la structure, recouvrant en discordance les différents terrains qui forment l'anticlinal d'Audignon (Illustration 10), ce qui leur permet d'être en contact direct avec les réservoirs sous-jacents.
- Les **alluvions quaternaires** se retrouvent au niveau des principaux cours d'eau qui incisent la structure avec une épaisseur pouvant être importante (jusqu'à plus de 20 m). Au centre de la structure, ces alluvions se retrouvent au contact des réservoirs précédemment décrits (Illustration 10).

Les formations "réservoirs" du Crétacé supérieur, prolongées par les formations "réservoirs" du début du Tertiaire forment un ensemble qui, à l'échelle de la structure d'Audignon, peut être considéré comme un seul et même réservoir. Si localement certaines passées marneuses peuvent dépasser plusieurs dizaines de mètres, les variations latérales de faciès entraînent rapidement la disparition de ces épontes très locales et ne justifient pas la distinction en deux aquifères distincts. Cet aquifère constitue le réservoir principal au niveau de la structure d'Audignon, exploité pour les besoins d'irrigation ou l'alimentation en eau potable.

Ce réservoir Crétacé-Tertiaire est séparé du réservoir grésocarbonaté de l'Eocène supérieur, par une importante épaisseur de marnes, appelée « marnes de Gan » et/ou « marnes de Donzacq », qui isolent ces deux réservoirs dans l'ensemble de la structure, à l'exception de la partie est, à l'aplomb du secteur d'Eugénie-les-Bains. En effet dans ce secteur, les marnes passent latéralement à des niveaux plus argilo-sableux.

Enfin, la couverture qui scelle partiellement l'ensemble de la structure correspond aux formations molassiques. Ces formations issues de l'altération des reliefs pyrénéens constituent une épaisse pile sédimentaire de dépôts grésocarbonatés intercalant des niveaux discontinus de carbonates marins et lacustres. La molasse est considérée comme une éponte au sein du système étudié, car les niveaux "réservoirs" qu'elle renferme sont de petite taille et discontinus.

Les glaises bigarrées jouent un rôle minime dans les écoulements au sein de la structure. Présentes dans les points hauts du secteur, en position d'interfluve, elles n'impactent uniquement que les écoulements de surface en ces points précis.

2.2. OBJECTIFS

L'objectif de cette révision géologique est de mieux contraindre la géométrie des formations "réservoirs" en 3D pour l'ensemble de la structure et leurs connexions potentielles, afin de localiser les formations aquifères et les potentiels chemins d'écoulement des eaux souterraines. Les formations carbonatées étant karstifiées, il apparaît nécessaire d'évaluer l'intensité de la karstification, afin de mieux comprendre son influence sur le comportement hydraulique de la structure (et en particulier sur celui de la source de Marseillon).

La toponymie relativement plane de la zone, ainsi que le recouvrement des formations carbonatées par les formations sédimentaires plus récentes, impliquent des conditions d'affleurement relativement limitées. Afin de compléter les données de terrain, l'étude s'est appuyée sur les outils géophysiques suivants, en vue de préciser la géométrie des formations et leurs propriétés "réservoirs" :

- le retraitement de profils sismiques existants et l'interprétation géologique de ces profils, pour construire des coupes géologiques et les intégrer à un modèle géologique en 3D ;
- l'acquisition de données gravimétriques complémentaires, pour couvrir l'ensemble de la zone d'étude.

La gravimétrie donne une information à propos des structures présentes en profondeur, en carte, alors que les profils sismiques donnent une information concernant la géométrie des formations, en coupe. Ces deux jeux de données géophysiques sont donc complémentaires.

Le fonctionnement karstique de la source de Marseillon nous pousse à investiguer la nature et le type de karstification, ainsi que son rôle à l'échelle de la structure. Les conditions d'affleurement sont relativement limitées, mais des indices existent. L'étude de terrain permet de discuter de l'origine de la karstification et de la re-contextualiser dans l'histoire géologique. Une carte présentant les modalités potentielles d'infiltration est proposée pour fournir des éléments de compréhension sur le fonctionnement hydrogéologique de la structure et de la source du Marseillon.

2.3. GEOMETRIE DES FORMATIONS

2.3.1. Étude des profils sismiques

La structure d'Audignon a fait l'objet de plusieurs campagnes d'exploration pétrolière, au cours de la seconde moitié du XX^{ème} siècle. Lors de ces recherches, des profils sismiques ont été acquis et des forages profonds réalisés. Les données acquises en sismique-réflexion permettent, de manière non destructive, d'obtenir une image du sous-sol et de fournir des informations concernant les structures géologiques (couches géologiques, failles, structures) en profondeur.

Les données acquises sur le terrain ne sont pas exploitables directement et nécessitent un traitement adapté pour obtenir une image interprétable par un géologue. Le BRGM a précédemment retraité une partie des lignes des différentes campagnes, dans le cadre de plusieurs études intéressant le Bassin aquitain (en jaune sur l'illustration 12). Pour cette étude, 3 profils supplémentaires ont été retraités (en rose sur l'illustration 12), afin de compléter le jeu de données, pour mieux imaginer la géométrie de la structure à l'aplomb de l'anticlinal et sur le périclinal oriental.

Retraitement de profils sismiques

Trois lignes sismiques 2D, acquises en 1984 et 1985, lors de la « campagne Audignon » et traversant la structure, ont été retraitées (Illustration 12) : 84TUR04, 85AUD09, 85AUD12, pour un total de 61,8 km (Illustration 13).

Le traitement sismique n'est pas univoque. Il nécessite la mise au point et la supervision d'une séquence de traitement du signal spécifique, comportant plusieurs étapes, avant d'obtenir l'image finale interprétable, appelée profil sismique, ligne sismique, donnée traitée ou donnée retraitée. Une acquisition sismique 2D, dans une telle zone structurée, constitue un défi pour le retraitement de ces trois lignes, dont la chaîne de retraitement est détaillée dans le rapport BRGM RP-69463-FR (Capar et Marc, 2018).

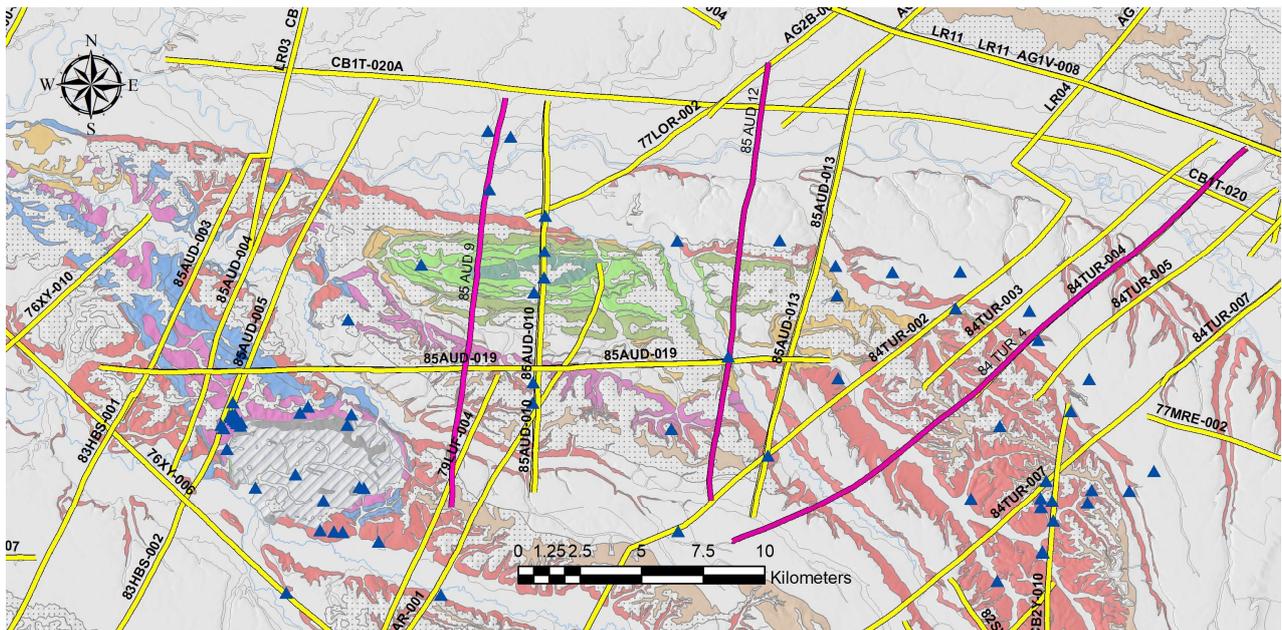


Illustration 12 - Plan de position des profils sismiques retraités, aux alentours de la structure d'Audignon (profils en jaune : disponibles avant l'étude ; profils en rose : retraités pour l'étude ; triangles bleus : forages profonds utilisés pour caler l'interprétation sismique)

Ligne	Premier CMP	Dernier CMP	Distance entre CMP (m)	Premier Point de tir	Dernier Point de tir	Distance entre Point de tir (m)	Longueur entre CMP (m)
84TUR04	202	1 267	25	101	634	50	26 625
85AUD09	202	881	25	103	411	50	16 975
85AUD12	202	930	25	101	453	50	18 200
						Total	61 800

Illustration 13 - Liste des profils retraités au cours de cette étude et leurs caractéristiques

Interprétation des profils sismiques

L'interprétation des profils sismiques est effectuée avec le logiciel SeisVision (Géographix). Les horizons modélisés, pour l'ensemble des profils de la zone, correspondent à la base des formations suivantes :

- Crétacé supérieur,
- Tertiaire (Paléocène),
- marnes éocènes (Gan et Donzacq),
- réservoirs Eocène-Oligocène,
- molasse.

Ce découpage repose sur la nature « réservoir ou éponte » des formations (Illustration 11), afin de faire ressortir la position et la géométrie des différents réservoirs et leurs éventuelles connexions.

La structure d'Audignon étant complexe et les points de contraintes en profondeur (forages profonds) peu nombreux, les formations sous-jacentes au Crétacé supérieur n'ont pas été interprétées en station sismique. Ces formations ne sont pas détaillées lors de la modélisation. Elles sont néanmoins représentées sur les profils retraités au cours de l'étude (Illustration 14, Illustration 15, Illustration 16), afin de discuter de la structure.

Les formations les plus superficielles comme les sables fauves, les glaises bigarrées ou les alluvions n'ont pas été interprétées, car leur épaisseur n'est pas suffisante et elles sont trop proches de la surface pour être visibles sur les profils sismiques.

Concernant sa géométrie structurale, la ride d'Audignon n'est pas seulement un anticlinal. Il s'agit d'un chevauchement provoqué par le déplacement de la partie supérieure ou chevauchante (*hanging wall*) sur la partie inférieure ou chevauchée (*foot wall*). L'anticlinal créé par le chevauchement s'exprime au sud de l'émergence de celui-ci, qui est scellé par la couverture molassique. Dans la partie ouest, l'anticlinal d'Audignon est séparé de l'anticlinal de Louer-Gaujacq par le synclinal du Louts. Dans cette zone, l'anticlinal d'Audignon est moins prononcé que dans sa partie centrale, sans doute lié à la présence du diapir de Bastennes-Gaujacq, qui accommode une partie de la déformation compressive. Dans la partie est, l'axe de la structure est dévié vers le sud-est, sans doute induit par un héritable structural en profondeur. Au sud de l'anticlinal d'Audignon et de Louer-Gaujacq, les formations plongent vers le sud en direction du bassin, jusqu'à des profondeurs importantes. Au nord du chevauchement, la plaine de l'Adour se développe à l'aplomb du synclinal de Tartas.

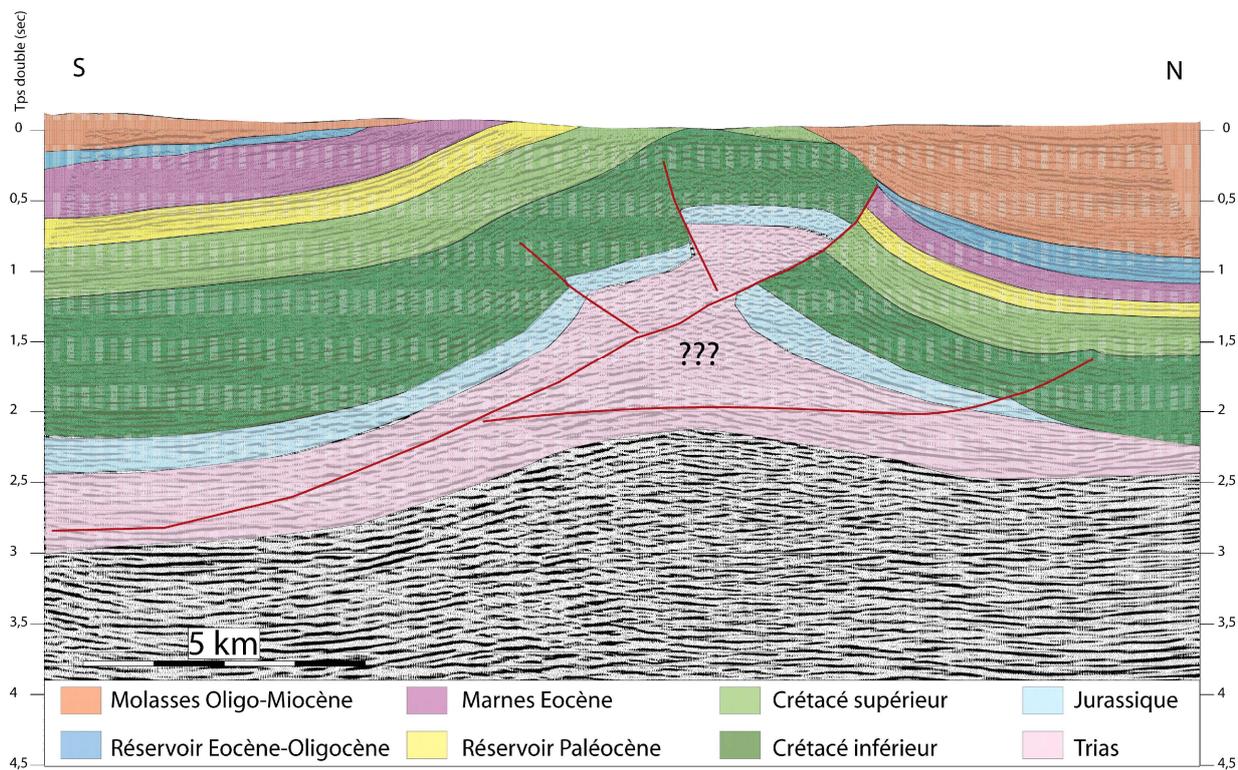
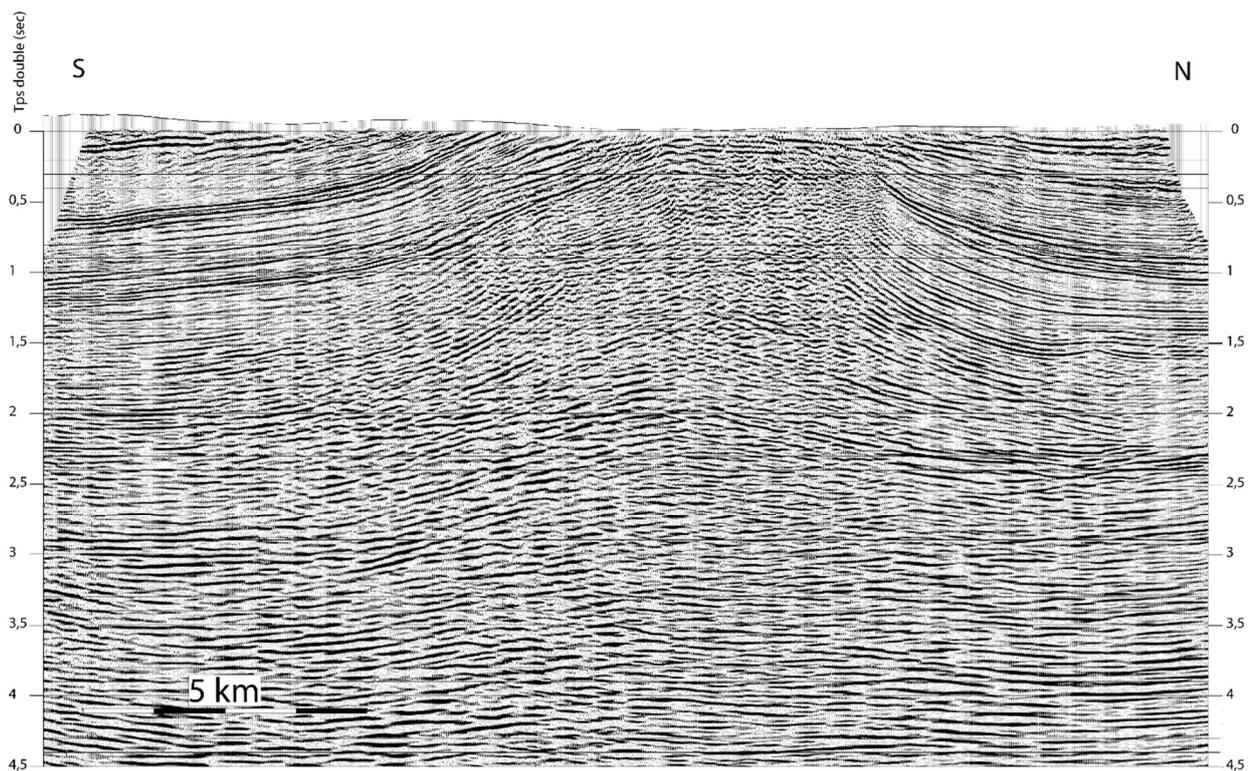


Illustration 14 - Profil sismique 85AUD9, retraité dans le cadre de cette étude (en haut : profil vierge ; en bas : profil interprété)

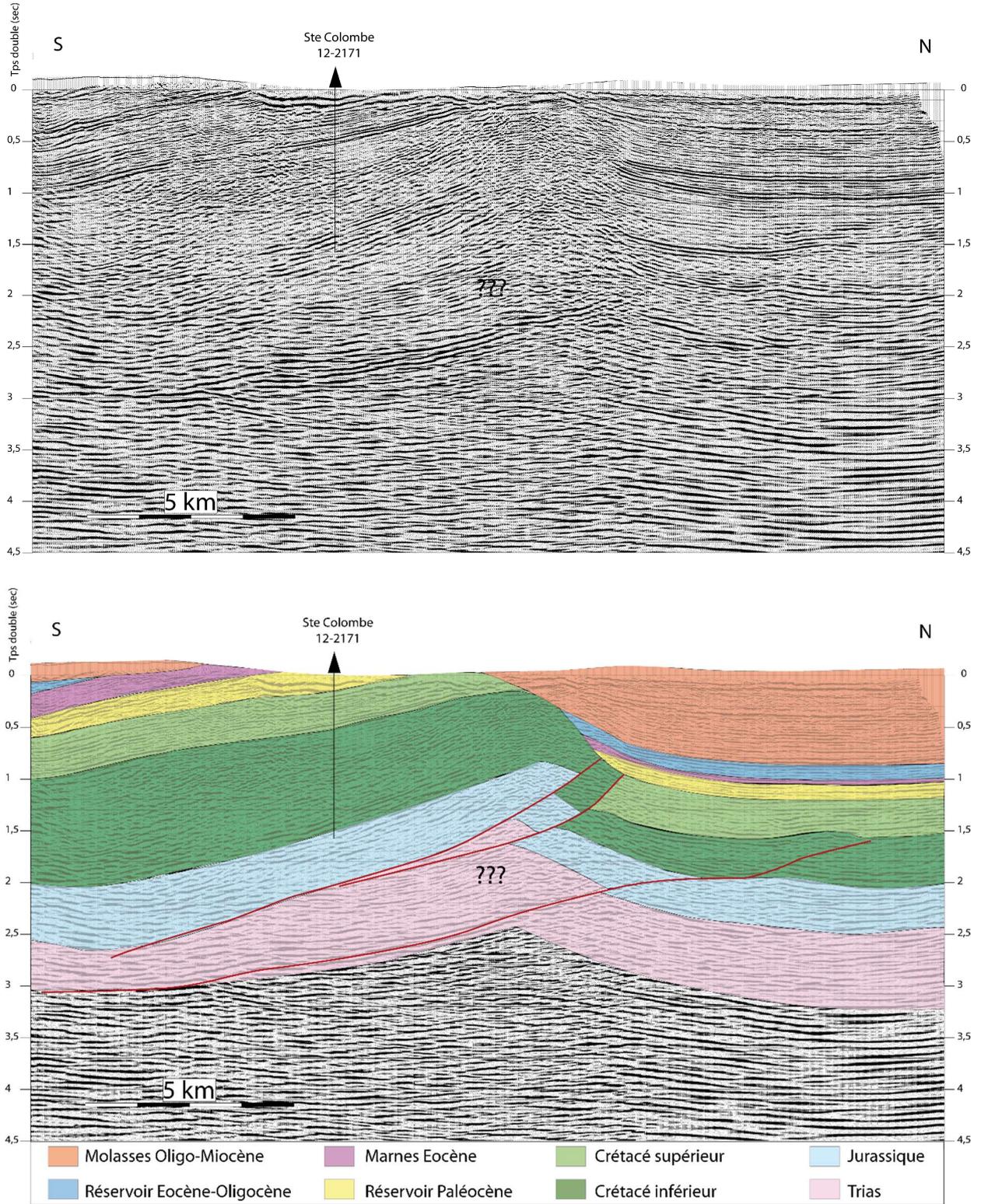


Illustration 15 - Profil sismique 85AUD12, retraité dans le cadre de cette étude (en haut : profil vierge ; en bas : profil interprété)

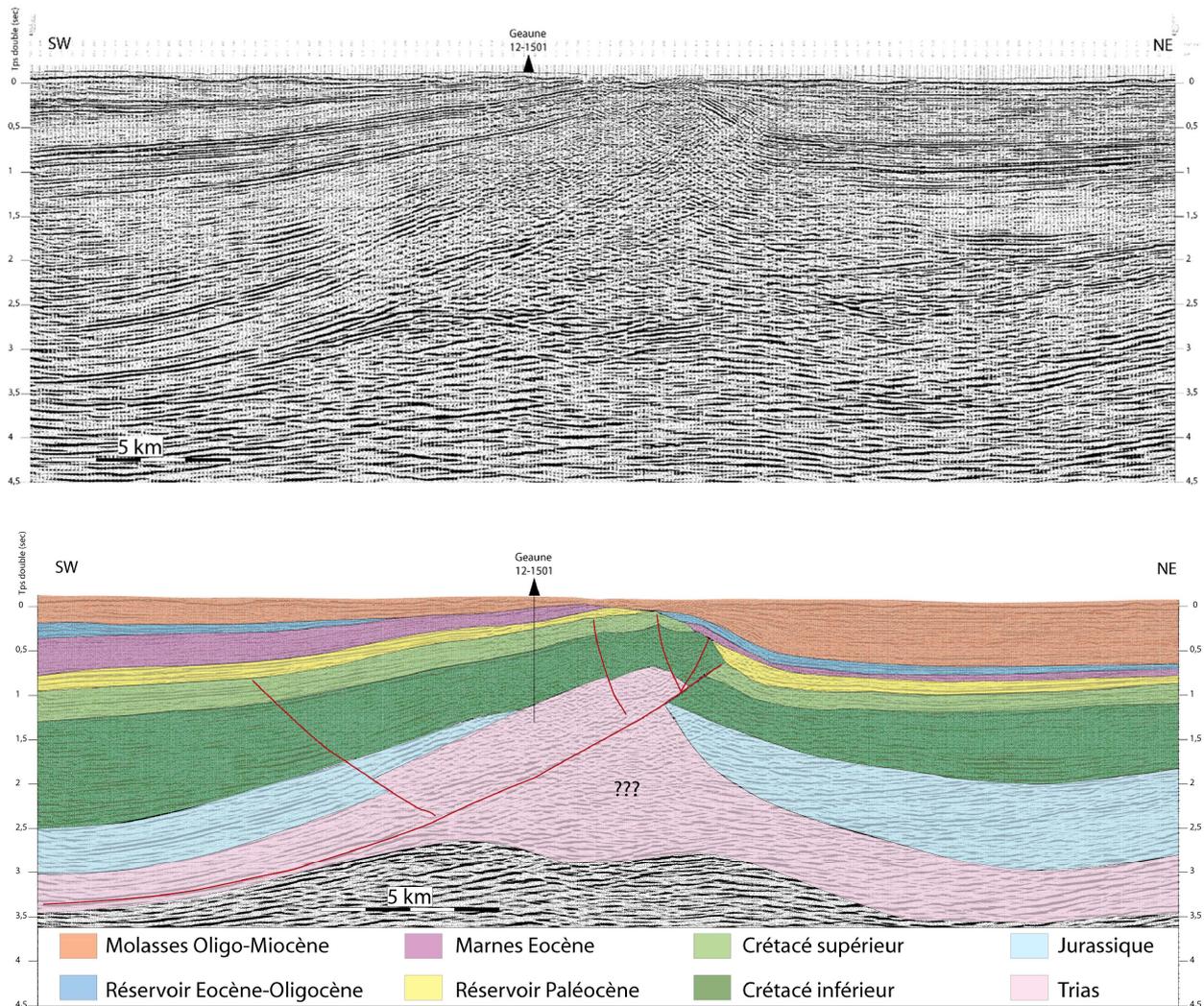


Illustration 16 - Profil sismique 84TUR04, retraité dans le cadre de cette étude (en haut : profil vierge ; en bas : profil interprété)

Concernant la géométrie des formations, on distinguera la partie sud et la partie nord, de part et d'autre de la faille majeure, qui limite le front du chevauchement formant la structure d'Audignon (Illustration 17) :

- Dans la partie sud, les profils sismiques montrent une bonne continuité des réflecteurs, permettant d'identifier clairement les différentes formations. Elles reposent sur les formations du Crétacé inférieur, qui apparaissent marneuses sur une grande épaisseur en forage (jusqu'à plus de 3 000 m à Sainte-Colombe, illustration 15). Ces formations marneuses constituent la base de l'aquifère du Crétacé supérieur-Paléocène. Les formations constituant cet aquifère sont présentes dans l'ensemble de la partie sud, sauf là où l'anticlinal d'Audignon affleure dans sa partie centrale (Illustration 14 et Illustration 15). Dans cette zone, les formations du Paléocène ont été érodées et celles du Crétacé supérieur aussi, au niveau du cœur de l'anticlinal où le Crétacé inférieur affleure. Cet aquifère (vert et jaune) est séparé de l'aquifère grésocarbonaté de l'Éocène-Oligocène (bleu), par une formation marneuse de l'Éocène (violet), qui recouvre l'ensemble de la structure et constitue une éponte entre ces deux réservoirs (Illustration 14, illustration 15 et illustration 16). Toutes ces formations ont subi une forte érosion, révélée par la discordance sur laquelle vient se déposer la formation des molasses de l'Oligo-Miocène (rouge). Celle-ci recouvre donc en discordance stratigraphique le réservoir de l'Éocène-Oligocène (bleu), les marnes de l'Éocène (violet), le

2.3.2. Complément d'acquisition gravimétrique

Afin d'imager au mieux la structure d'Audignon, un complément d'acquisition gravimétrique a été effectué. Ces données ont permis de renseigner les aires sans point gravimétrique et d'obtenir un maillage plus resserré dans la zone d'étude. Le mode opératoire et les traitements pour obtenir les anomalies gravimétriques sont détaillés dans le rapport BRGM RP-68098 (Jacob, 2018). Les principaux résultats issus de cette acquisition sont résumés dans ce chapitre.

Acquisition et résultats

Une nouvelle acquisition gravimétrique, comprenant 255 stations (Illustration 18), a été levée, afin de compléter les données gravimétriques existantes, qui couvraient alors la moitié de la structure anticlinale, et d'affiner la carte d'anomalie de Bouguer pouvant aider à mieux modéliser la structure d'Audignon.

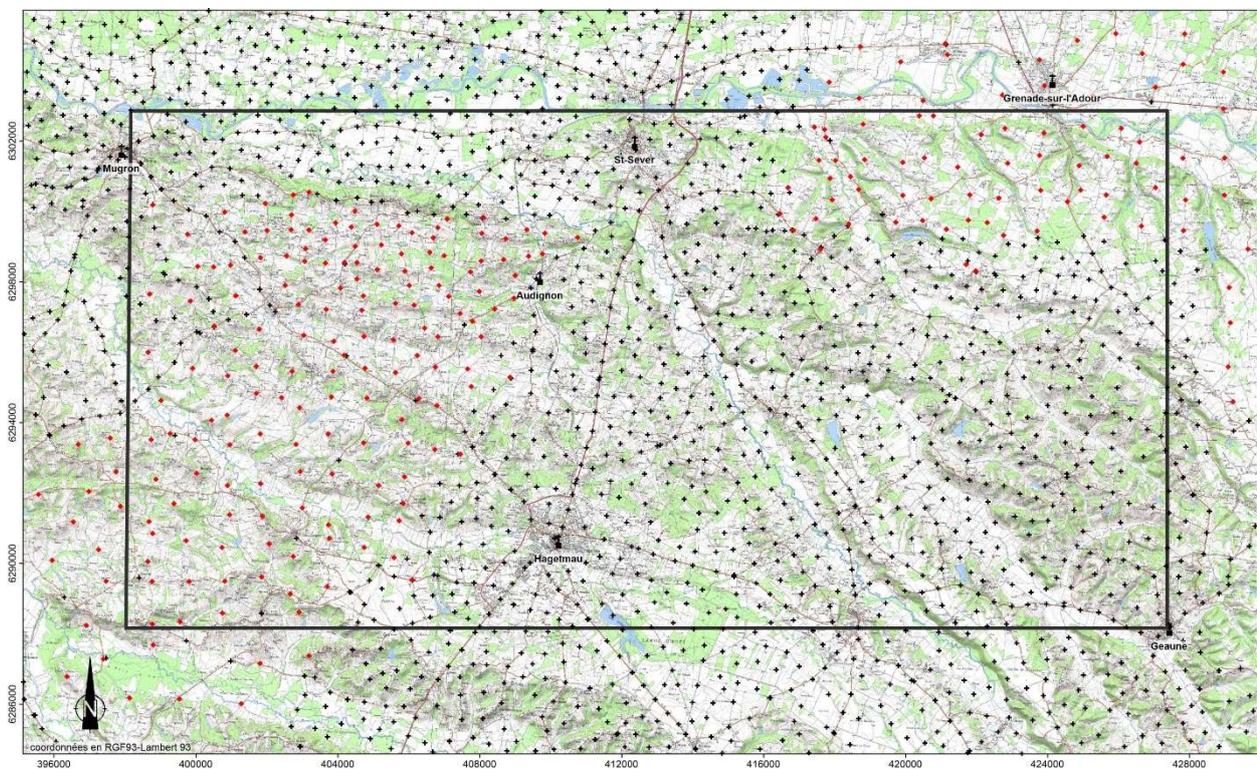


Illustration 18 - Carte d'implantation des stations gravimétriques acquises pendant cette étude (losanges rouges) et celles présentes dans la base de données gravimétriques (croix noires) - fond topographique IGN 1/25 000^{ème}.

Les résultats issus de ce travail sont présentés ci-après sous la forme de trois cartes : l'anomalie de Bouguer, l'anomalie résiduelle et les axes gravimétriques, issus de l'anomalie résiduelle.

L'anomalie de Bouguer est fonction de l'ensemble des variations de densité, sous la surface topographique : ces variations peuvent être localisées superficiellement ou en profondeur. Les valeurs élevées de l'anomalie de Bouguer sont caractéristiques de matériaux denses, alors que les valeurs faibles caractérisent des matériaux moins denses. La carte d'anomalie de Bouguer est présentée sur l'illustration suivante. L'anomalie résiduelle est obtenue en soustrayant une anomalie régionale (Illustration 20) à l'anomalie de Bouguer (Illustration 19).

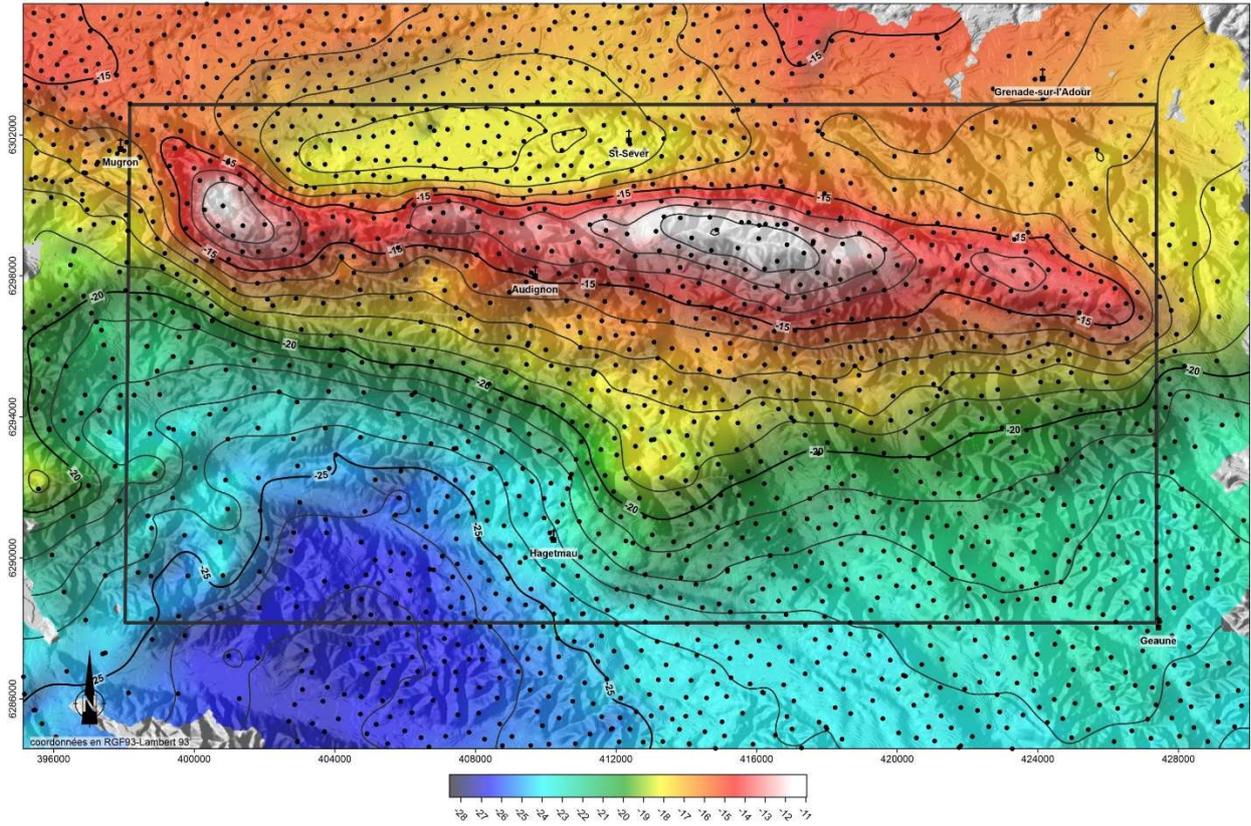


Illustration 19 - Anomalie de Bouguer (mGal)

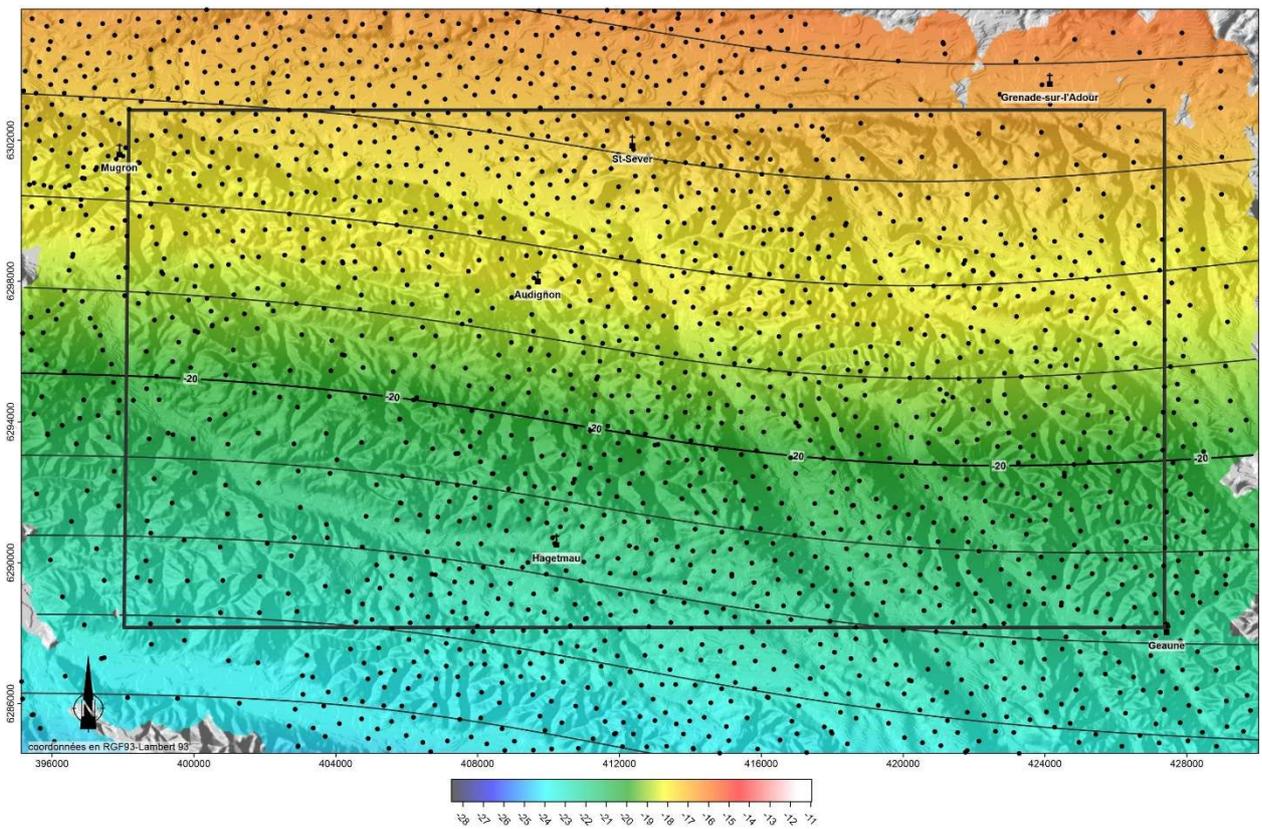


Illustration 20 - Anomalie régionale (mGal)

L'anomalie régionale est obtenue par l'ajustement d'une surface interpolée avec la méthode d'interpolation, décrite dans le rapport BRGM RP-68098-FR (Jacob, 2018). L'anomalie régionale retenue se rapproche d'un plan, n'ayant qu'une légère courbure et rend ainsi compte des tendances observées à l'échelle de la carte, caractéristiques des très grandes longueurs d'ondes présentes dans l'anomalie de Bouguer. L'anomalie résiduelle correspond ainsi aux contributions de plus faibles longueurs d'ondes. Celle-ci fait alors ressortir les variations de gravité en lien avec les variations de densité dans les premiers kilomètres depuis la surface. Elle est présentée en Illustration 21.

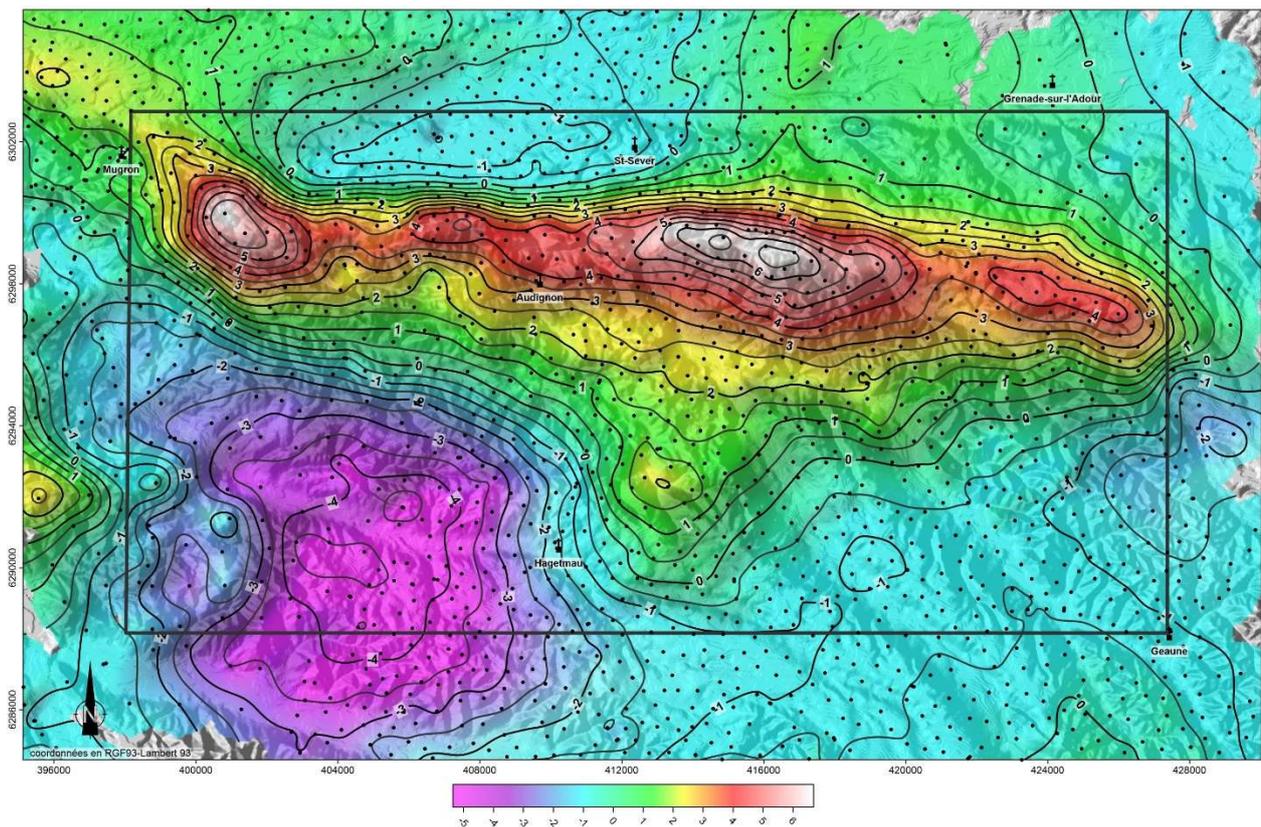


Illustration 21 - Anomalie résiduelle (mGal)

Pour améliorer la détection des discontinuités gravimétriques permettant de cartographier les bordures d'éventuelles structures et pour procéder à une analyse cartographique structurale fine, il est possible d'appliquer des opérateurs, dits 'focalisant', à l'anomalie résiduelle ; dont la dérivée seconde verticale et le module du gradient horizontal (Jacob, 2018).

Les discontinuités ainsi décelées correspondent à des contacts latéraux de roches de densité différentes, qui peuvent être mis en relation avec :

- des failles mettant en contact latéral des formations de densité différentes (failles normales et inverses, décrochements) ;
- des contacts stratigraphiques de type "discordant" (remplissage de vallées, par exemple) ;
- des contacts stratigraphiques normaux entre formations de densités différentes, mais ayant un pendage important (plis) ;
- des contacts de type intrusif (plutonisme, diapirisme).

- Les axes positifs P13 et P14 correspondent aux affleurement d'ophites au sein du diapir triasique de Bastennes-Gaujacq et la discontinuité D18 correspond à la limite est du diapir.

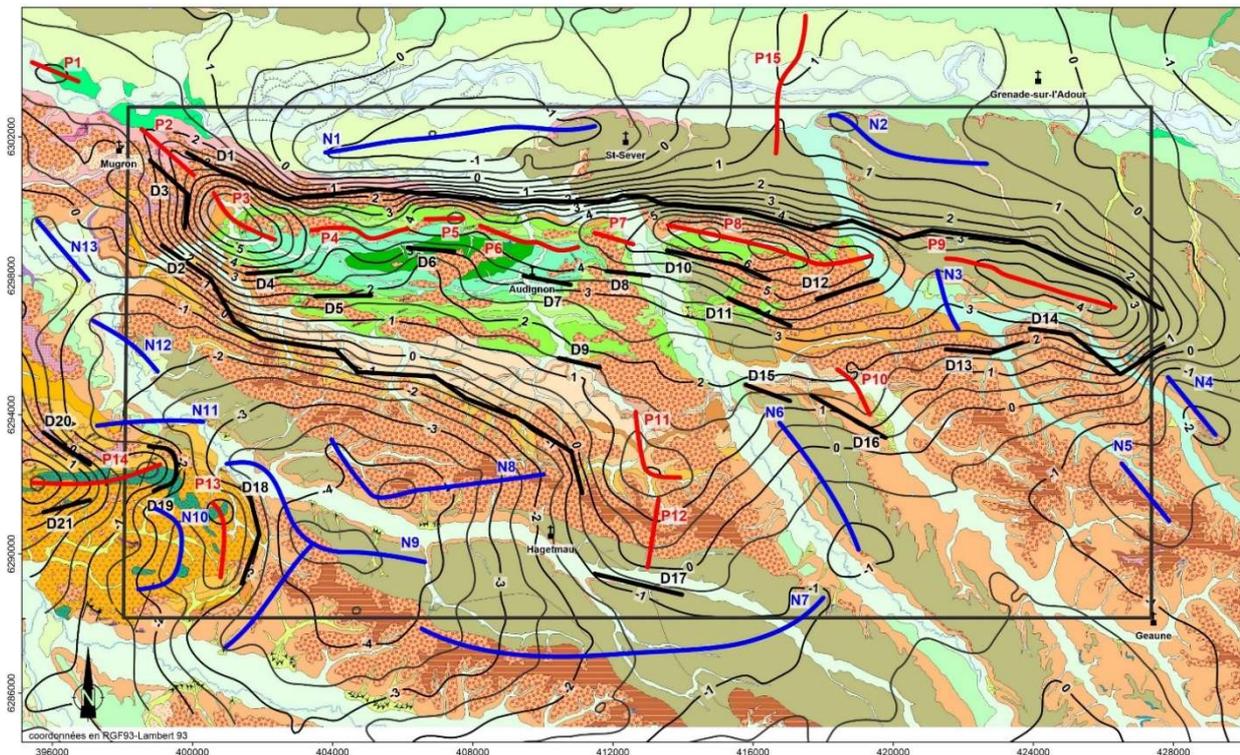


Illustration 23 - Carte géologique avec superposition des axes et discontinuités gravimétriques, et des contours de l'anomalie résiduelle (mGal). Les axes positifs sont numérotés (traits rouges) de P1 à P15, les axes négatifs (traits bleus) de N1 à N13, les discontinuités de D1 à D21.

À l'aplomb de l'anomalie positive d'Audignon (Illustration 22), la variation de densité qui s'exprime dans les nuances de couleur rouge à blanc semble s'expliquer par la présence et l'épaisseur de sel triasique, impliquées dans le chevauchement. Le sel restant moins dense que les calcaires mésozoïques, il provoque une anomalie plus faiblement positive lorsqu'il est présent et impliqué en grande quantité au niveau de l'anticlinal. À l'inverse, lorsque les formations carbonatées mésozoïques sont latéralement de plus grande épaisseur, voire provoquent la répétition de leur série au sein du chevauchement (cas du profil sismique 85AUD-12, Illustration 15), l'anomalie gravimétrique devient encore plus fortement positive.

Sur la carte de l'anomalie résiduelle (Illustration 22), l'anomalie fortement négative, qui s'exprime dans les couleurs violette et bleu foncé, semble correspondre à une épaisseur de Crétacé inférieur (marneux) importante, observée dans les profils sismiques. Cette formation est conservée sous la forme d'un synclinal scellé par les formations sus-jacentes, pincé entre le diapir de Bastennes-Gaujacq et la structure d'Audignon.

2.3.3. Modèle géologique 3D

Afin d'obtenir une cohérence entre les différentes données (carte géologique, coupes issues des profils sismiques, forages), un modèle géologique 3D a été réalisé. Sa robustesse sera ensuite évaluée au regard de la réponse gravimétrique générée par le modèle et comparée aux données gravimétriques de terrain.

Construction et présentation du modèle

La zone modélisée couvre une superficie de 1 265 km² (23 km nord-sud x 55 km est-ouest - Illustration 24). Le modèle englobe la structure d'Audignon dans son ensemble, depuis le secteur de Louer à l'ouest, la zone d'Eugénie-les-Bains à l'est, le bassin de Tartas où coule l'Adour au nord et le diapir de Bastennes-Gaujacq au sud.

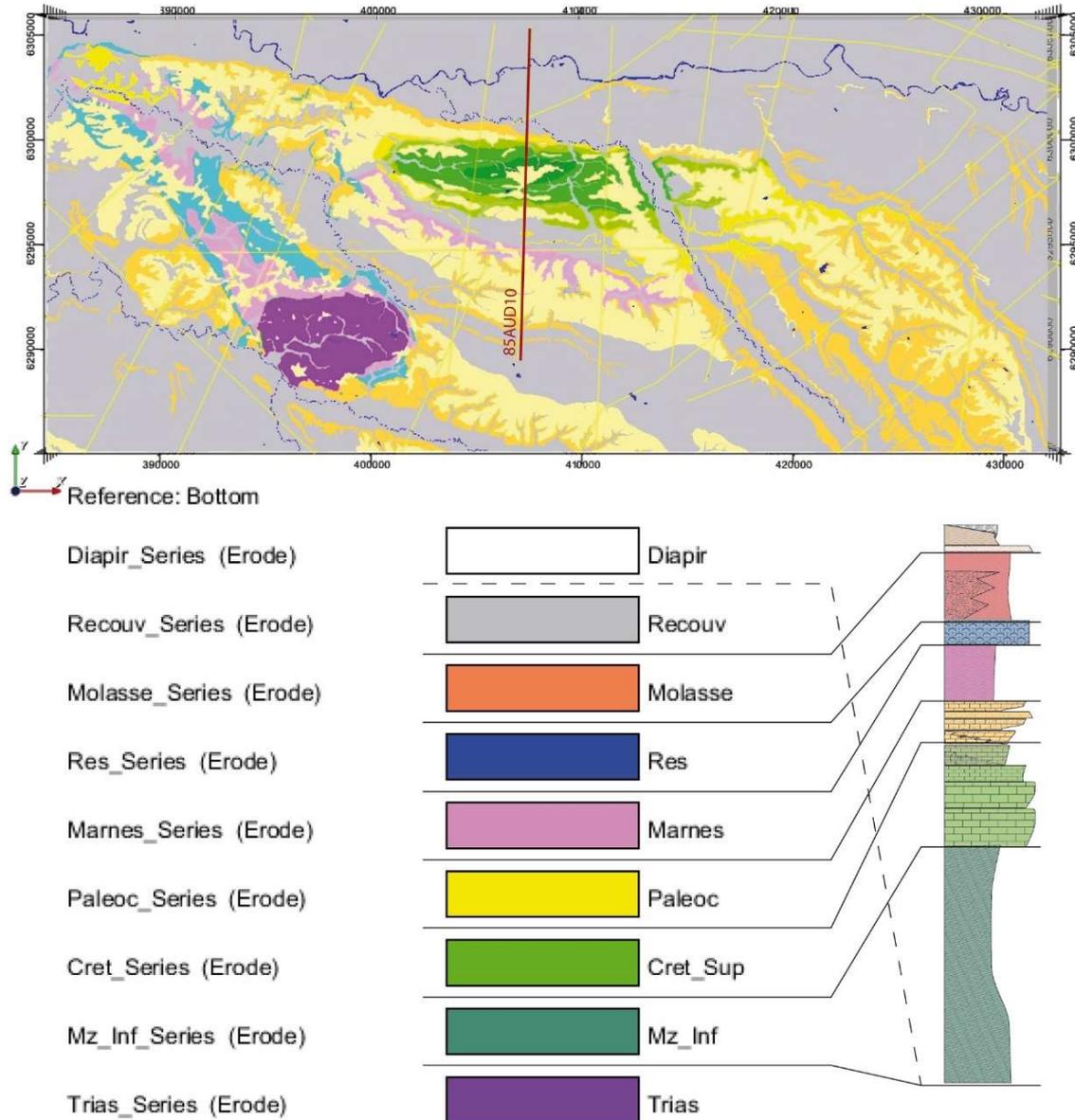


Illustration 24 - Zone modélisée (vue en plan du modèle) et pile stratigraphique modélisée, avec correspondance du log présenté au chapitre 2.1.2 (le recouvrement n'a pas été modélisé ; la série du diapir est la dernière série modélisée ; la coupe 85AUD10 est positionnée)

Les formations intéressant notre étude concernent les formations à partir du Crétacé supérieur. Pour l'ensemble de la zone d'étude, ces formations se trouvent à des profondeurs très variables. Par exemple, pour le Crétacé, la base de cette formation est portée à l'affleurement au niveau de l'anticlinal d'Audignon et atteint des profondeurs de plus de 2 800 m au sud de la structure, au sud-ouest du diapir de Bastennes-Gaujacq (forage pétrolier de Marpaps 12-2272). De fait,

l'épaisseur du modèle géologique 3D est de 3 000 m, afin de modéliser l'ensemble des formations "réservoirs" principales (crétacée et paléocène) dans l'ensemble de la zone d'étude.

La pile sédimentaire modélisée correspond au découpage "réservoirs-couverture" justifié dans le chapitre 2.1.2. Seules les formations les plus superficielles, comme les sables fauves, les glaises bigarrées et les alluvions, n'ont pas été modélisées, du fait de leur trop faible épaisseur face à l'épaisseur totale du modèle 3D. À l'inverse, les formations sous-jacentes au Crétacé inférieur ont dû être modélisées, afin de combler le volume de roche sous les formations du Crétacé supérieur à l'aplomb de la structure. Trois formations ont donc été ajoutées : une formation « mésozoïque », regroupant les formations du Crétacé inférieur et celle du Jurassique, et deux formations du Trias, avec l'une pour le diapir et l'autre pour le Trias, impliqué dans la structure d'Audignon même. Ces formations n'ont pas été interprétées dans tous les profils sismiques et n'ont pas été converties en profondeur. Elles ne sont donc calées qu'au niveau des rares points de contraintes donnés dans les forages profonds. Au total, 8 formations (appelées « séries » pour la modélisation) ont été modélisées (Illustration 24).

Les forages découpés selon la pile ont été importés, ainsi que les coupes issues des profils sismiques, converties en profondeur (Illustration 25).

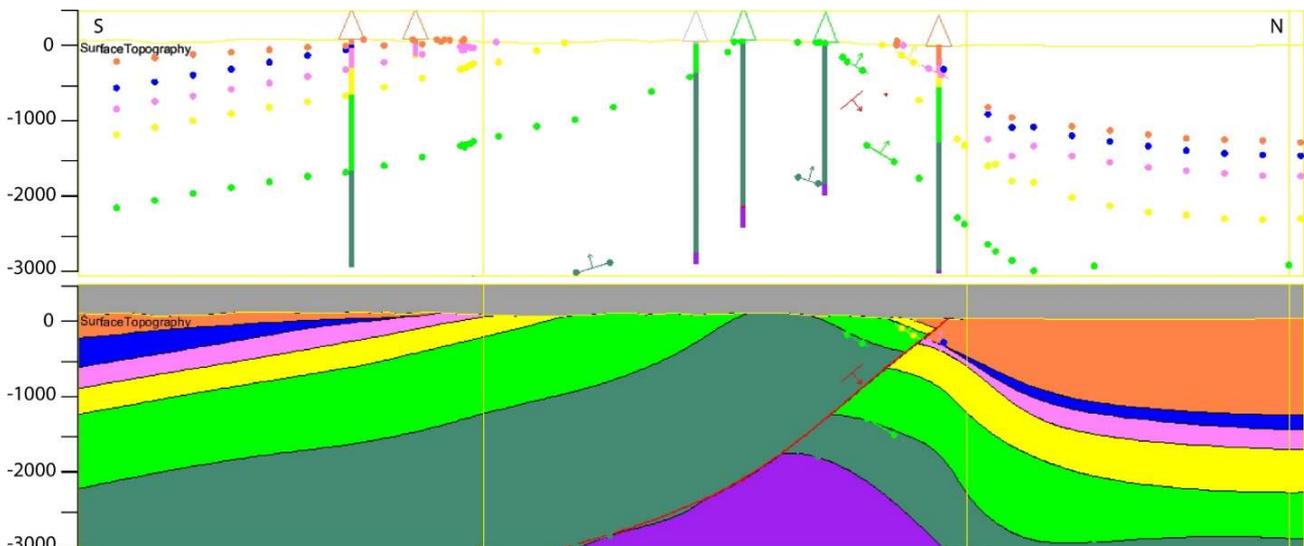


Illustration 25 - Coupe d'orientation nord-sud, issue du profil sismique 85AUD10 (Illustration 24), qui traverse la structure d'Audignon, à l'aplomb de l'anticlinal dont le cœur est du Crétacé inférieur. En haut : les formations interprétées en sismique sont converties en profondeur (m) de façon ponctuelle et régulière (points), les forages (projetés) sont reportés sur cette coupe. En bas : interpolation des surfaces modélisées et remplissage entre ces surfaces. Voir la légende des formations modélisées sur l'illustration 24.

La modélisation procède par interpolation entre les différentes données (cartes géologiques, forages, profils sismiques). Lors de la mise en évidence de données incohérentes entre elles, un choix doit être fait afin de supprimer la donnée incohérente avec le reste. Le modèle obtenu in fine est cohérent (Illustration 26).

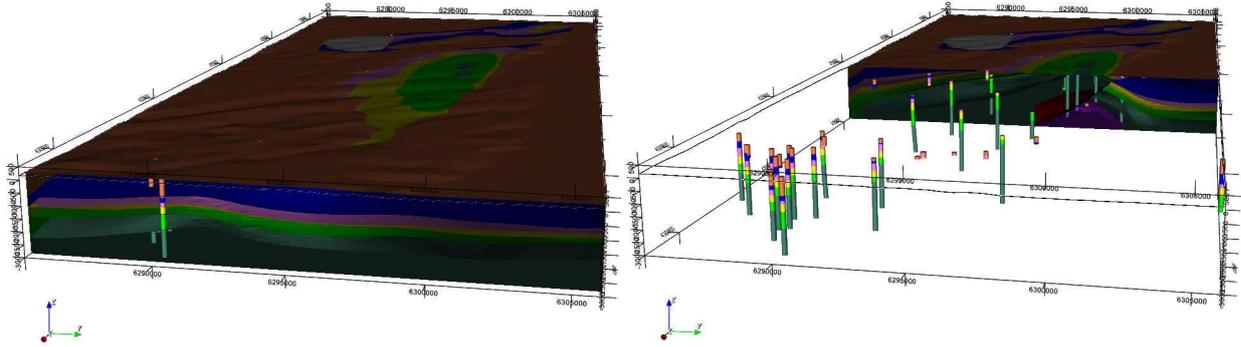


Illustration 26 - Modèle géologique 3D de la zone d'étude

A gauche : modèle complet, vu depuis le bord oriental du modèle. A droite : même orientation, mais le modèle est coupé au niveau de l'anticlinal d'Audignon ; on voit le Trias (en violet) apparaître à la base de la structure

On peut ainsi visualiser en 3D la géométrie des réservoirs et des épontes (Illustration 27, Illustration 28, Illustration 29, Illustration 30). On observe, dans la partie sud (au sud du chevauchement d'Audignon), la déconnexion totale entre le réservoir crétacé-paléocène et le réservoir grésocarbonaté éocène-oligocène. Les marnes des formations de Gan et Donzacq, constituent une barrière infranchissable à l'écoulement (Illustration 28 et illustration 29).

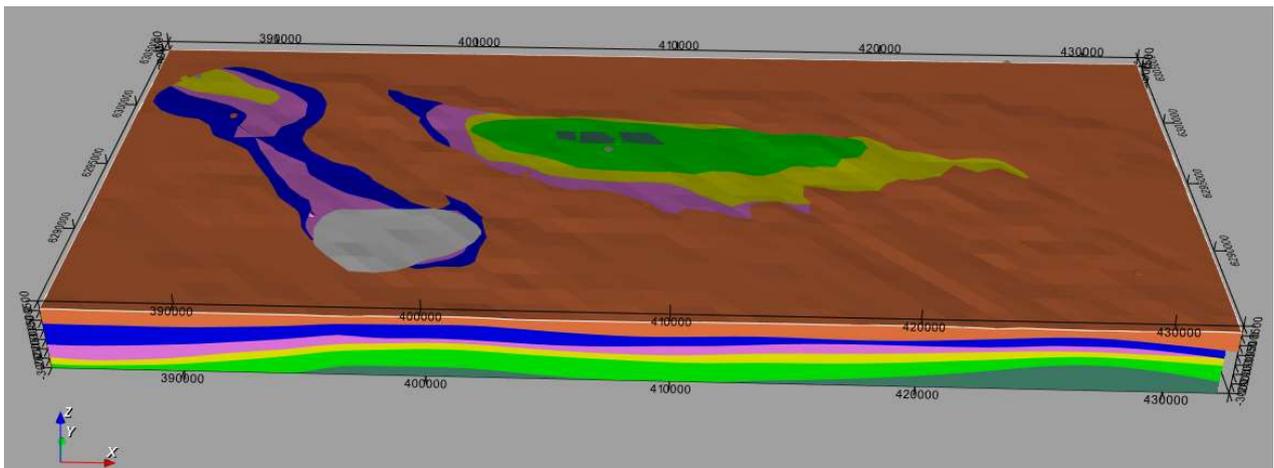


Illustration 27 - Modèle géologique 3D complet, vu depuis le sud

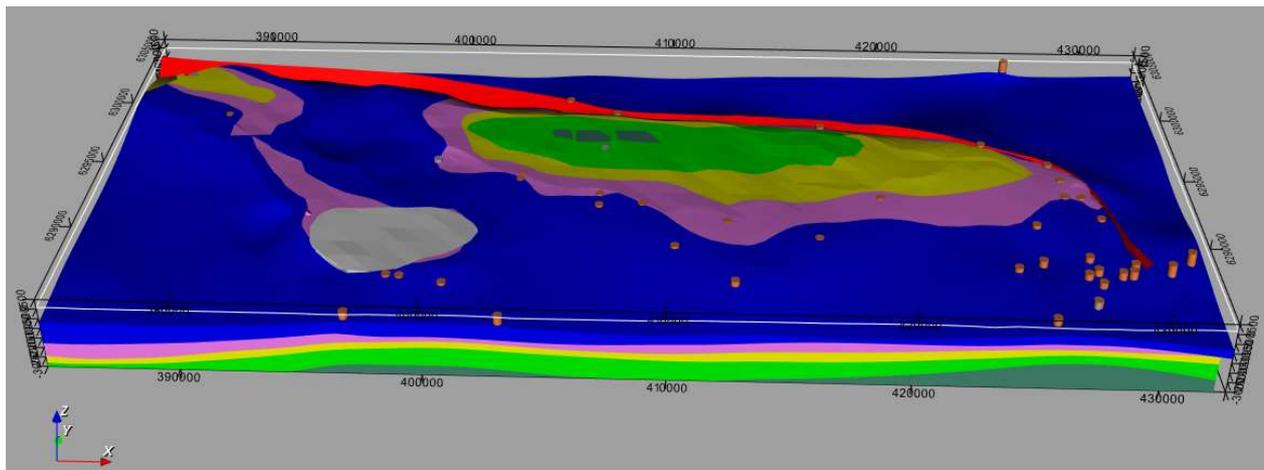


Illustration 28 - Modèle géologique 3D, ôté de la formation molassique

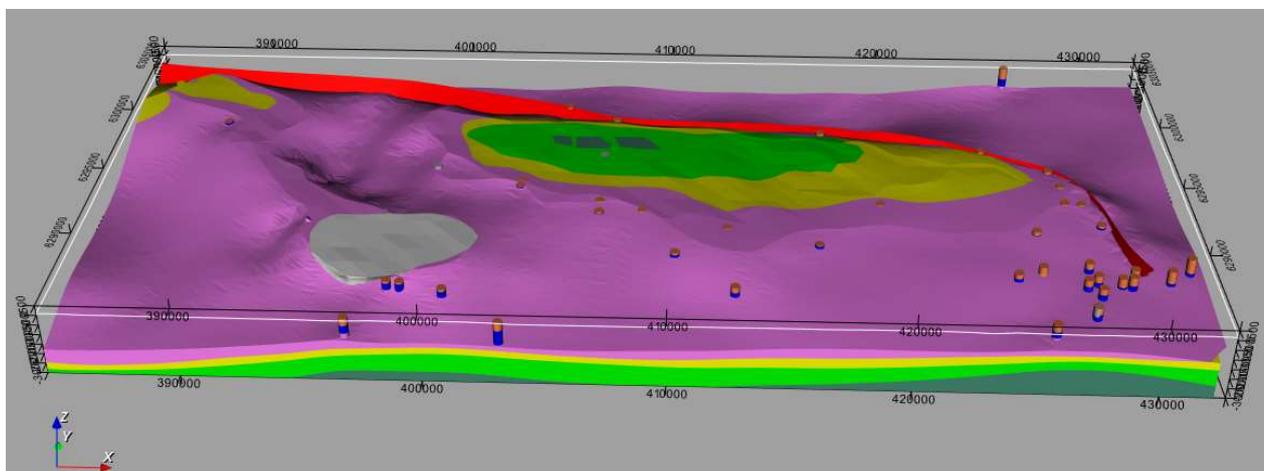


Illustration 29 - Modèle géologique 3D, ôté de la formation molassique et de la formation "réservoir" éocène-oligocène. Ecorché de la formation des marnes de l'Eocène

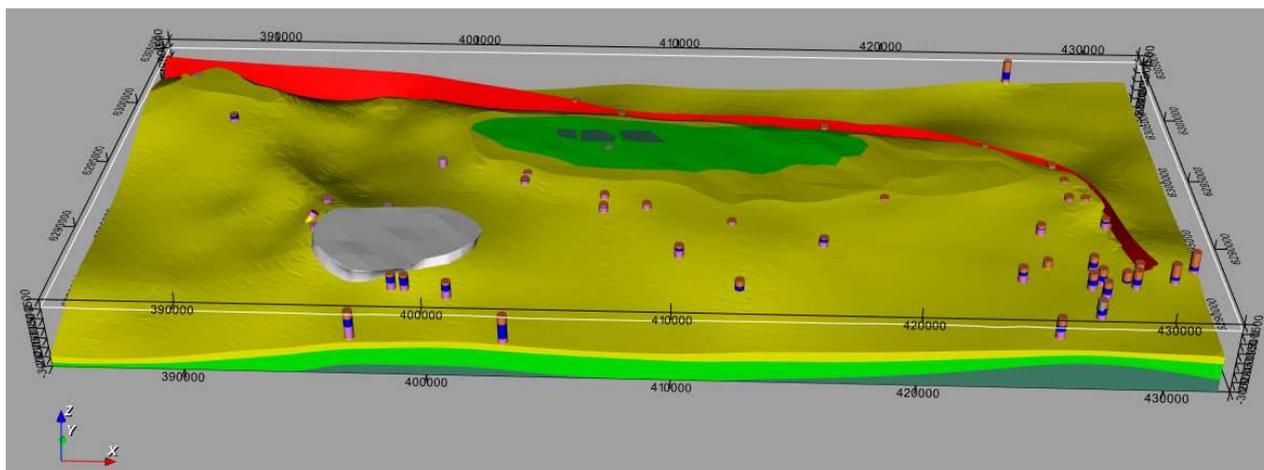


Illustration 30 - Modèle géologique 3D, ôté de la formation molassique, de la formation "réservoir" éocène-oligocène et de la formation des marnes de l'Eocène. Ecorché du réservoir Crétacé supérieur-Paléocène

En résumé, les réservoirs semblent bien déconnectés dans l'ensemble de la structure, hormis dans la partie est, où les variations de faciès au sein de l'Éocène provoquent l'amincissement du faciès marneux (en rose), situé entre le réservoir Crétacé supérieur-Paléocène (en vert et jaune) et le réservoir grés-carbonaté de l'Éocène-Oligocène (en bleu). La partie orientale de la zone permet une connexion entre différents réservoirs de part et d'autre du chevauchement, dans sa partie nord, et une connexion entre ces mêmes réservoirs, plus au sud, où le chevauchement ne s'exprime plus (Illustration 27 à illustration 30).

Comparaison avec la gravimétrie

Le modèle précédemment obtenu découle directement du modèle conceptuel, défini au départ de la modélisation. Une fois qu'une cohérence géologique et géométrique est atteinte pour le modèle 3D, l'enjeu est de vérifier s'il peut être validé en le confrontant à d'autres informations « a priori », qui n'ont pas été utilisées dans la modélisation 3D. Ces informations sont en général des données de géophysique. Ici, nous avons accès aux données de sismique et de gravimétrie. Comme les coupes sismiques ont été utilisées dans le processus de modélisation, elles ne peuvent plus être utilisées pour valider le modèle car, par définition, l'information « a priori » qu'elles contiennent est déjà dans le modèle. Pour tester le modèle, il reste les données de gravimétrie, qui n'ont pas été utilisées dans la modélisation.

Pour calculer la réponse gravimétrique du modèle, il faut des valeurs de densité par formation modélisée. Les densités ont été obtenues, par calcul, à partir des forages possédant une loi de vitesse. Le calcul de densité se fait suivant la loi de Gardner et al. (1974), qui donne une relation entre la vitesse de propagation des ondes (V_P) et la masse volumique des formations qu'elles traversent :

$$\rho_G = 0,23 V_P^{0,25} ; \quad (V_P \text{ en m/s})$$

Les logs sismiques donnent la vitesse des ondes P, sous forme de tableau ou de graphique, dans les rapports de fin de sondage. Les logs stratigraphiques donnent la distribution des formations en profondeur. On peut donc facilement, en appliquant cette loi, retrouver une densité par formation. Dix forages disposent d'une loi de vitesse dans la zone d'étude. Pour chacun de ces forages, les valeurs de densité ont été calculées et moyennées par formation, puis elles ont été moyennées par formation pour l'ensemble des forages. On obtient donc une moyenne et un écart-type par formation (Illustration 31).

Formations	Densité moyenne	Écart type
Molasse	2.11930945	0.05228688
Réservoir Eocène-Oligocène	2.18632513	0.15181221
Marnes Donzacq	2.21977788	0.10922491
Réservoir Paléocène	2.44242651	0.21930923
Crétacé sup	2.59045979	0.11410209
Mésozoïque	2.58860357	0.13332651
Trias	2.65459301	0.11793449

Illustration 31 - Tableau de moyenne des valeurs de densité par formation et écart-type associé, provenant des forages possédant des lois de vitesse

L'étape du problème direct a pour but d'obtenir une carte qui donne les valeurs de gravimétrie en surface du modèle (gravimétrie calculée), qui peuvent alors être comparées aux valeurs de la carte, correspondant au champ gravimétrique de l'anomalie de Bouguer ou de l'anomalie résiduelle (gravimétrie observée). Le logiciel calcule la réponse gravimétrique du modèle en assignant les valeurs moyennes à l'ensemble des formations, sans prendre en compte l'écart-type.

Le but n'est pas d'obtenir les mêmes valeurs entre le résultat et la gravimétrie observée, mais d'observer les mêmes tendances. L'illustration 32 montre la comparaison entre la gravimétrie mesurée de Bouguer et la gravimétrie calculée du modèle, pour une coupe avec les valeurs de densités du tableau des valeurs utilisées (Illustration 31).

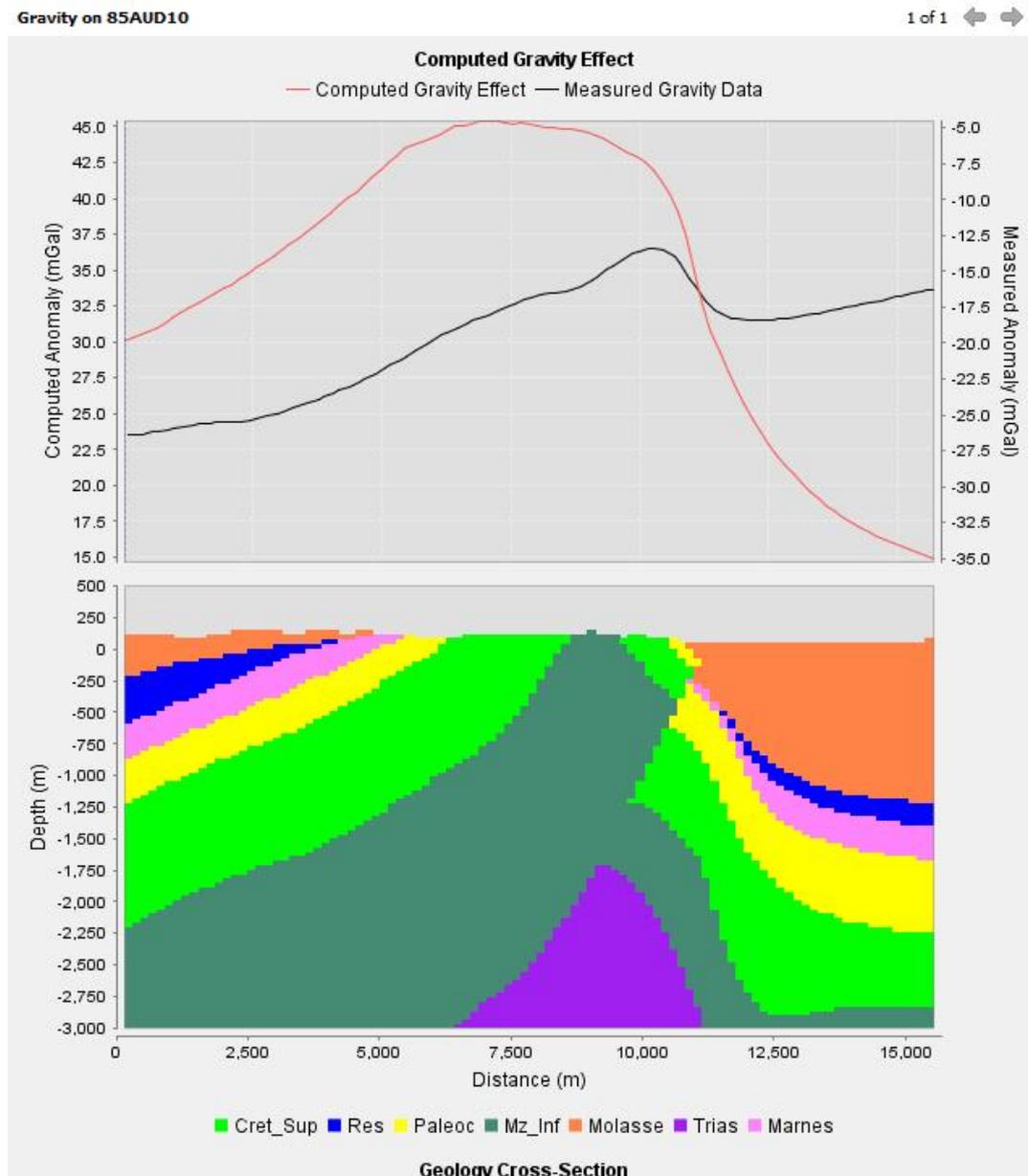


Illustration 32 - Comparaison en 2D de la réponse gravimétrique du modèle, pour la coupe 85AUD10 (courbe rouge), avec la gravimétrie issue de Bouguer

Sans prendre en compte les valeurs, les tendances entre la Bouguer et la Résiduelle sont les mêmes et les tendances entre la Résiduelle et le modèle sont moyennement similaires dans la partie sud du chevauchement et peu compatibles dans la partie nord.

Ces différences peuvent avoir plusieurs origines :

- Certaines incertitudes demeurent concernant la gravimétrie, notamment pour le calcul de l'anomalie de Bouguer, de la Régionale et donc de la Résiduelle. L'anomalie régionale est la plus discutable. En effet, celle-ci est utilisée pour filtrer la Bouguer, afin d'obtenir la Résiduelle. Elle est censée faire ressortir les anomalies correspondant à notre modèle. Or, faute de données géologiques en profondeur pour mieux la contraindre, la Régionale a été calculée de manière théorique (mathématique), mais ne correspond pas forcément à la réalité « du terrain ». Ceci peut être une première source d'erreur entre gravimétrie modélisée et gravimétrie observée ;
- Concernant le modèle, les erreurs peuvent provenir de multiples facteurs :
 - o la géométrie du modèle peut être discutée, malgré les observations géologiques ponctuelles disponibles. Les biais peuvent venir du retraitement des profils sismiques, de l'interprétation qui en a été faite et de la conversion en profondeur de ces profils ;
 - o les valeurs de densités peuvent aussi être remises en cause. La loi de Gardner et al. (1984) n'est peut-être pas adaptée au contexte. On peut aussi observer que la répartition des forages possédant des lois de vitesse n'est pas homogène dans la zone. On remarque que, pour certaines formations, l'écart-type est important, indiquant que ces valeurs moyennes obtenues ne sont pas valables en tous points de la zone du modèle.

À titre d'exemple, une optimisation des densités a été testée pour faire correspondre au mieux les tendances entre gravimétrie mesurée et réponse du modèle. L'illustration 33 montre la comparaison entre la gravimétrie mesurée de la Résiduelle et la gravimétrie calculée du modèle, pour une coupe, avec les valeurs de densités du tableau de l'illustration 34. Toujours sans prendre en compte les valeurs, les gravimétries de la Résiduelle et du modèle montrent des tendances plus similaires dans la partie sud du chevauchement. Néanmoins, on observe un décalage entre les deux pics d'anomalie positive, au droit de l'anticlinal, qui met en évidence un problème de géométrie. Cette différence pourrait s'expliquer par la non prise en compte du détail des formations sous le Crétacé supérieur, notamment la distinction Crétacé inférieur/Jurassique et la géométrie de l'interface avec le Trias, qui n'est donnée que par quelques forages profonds. De plus, au nord du chevauchement, les tendances demeurent incompatibles entre la gravimétrie mesurée et celle du modèle. Difficile d'identifier d'où provient cette erreur. Peu de forages profonds traversent cette zone, mais la géométrie des profils sismiques semble plutôt facile à interpréter. Cette donnée, issue d'un autre procédé géophysique, donne des résultats incompatibles avec les cartes gravimétriques obtenues. Dans cette zone, peut-être qu'une Régionale mal calibrée pourrait générer cette différence. Malheureusement en l'absence de forages atteignant le socle, afin de contraindre cette Régionale, il est impossible de faire mieux.

En vue des résultats trop divergents entre le modèle et la gravimétrie, il n'est finalement pas envisageable de mettre en place une approche d'inversion gravimétrique, afin d'obtenir une distribution (sous forme de probabilités) des densités au sein des différentes couches modélisées (Guillen et al., 2008). Le but recherché aurait été de relier ces informations aux données de karstologie et d'hydrologie et d'approcher une distribution de la karstification au sein des formations "réservoirs" (Husson, 2013).

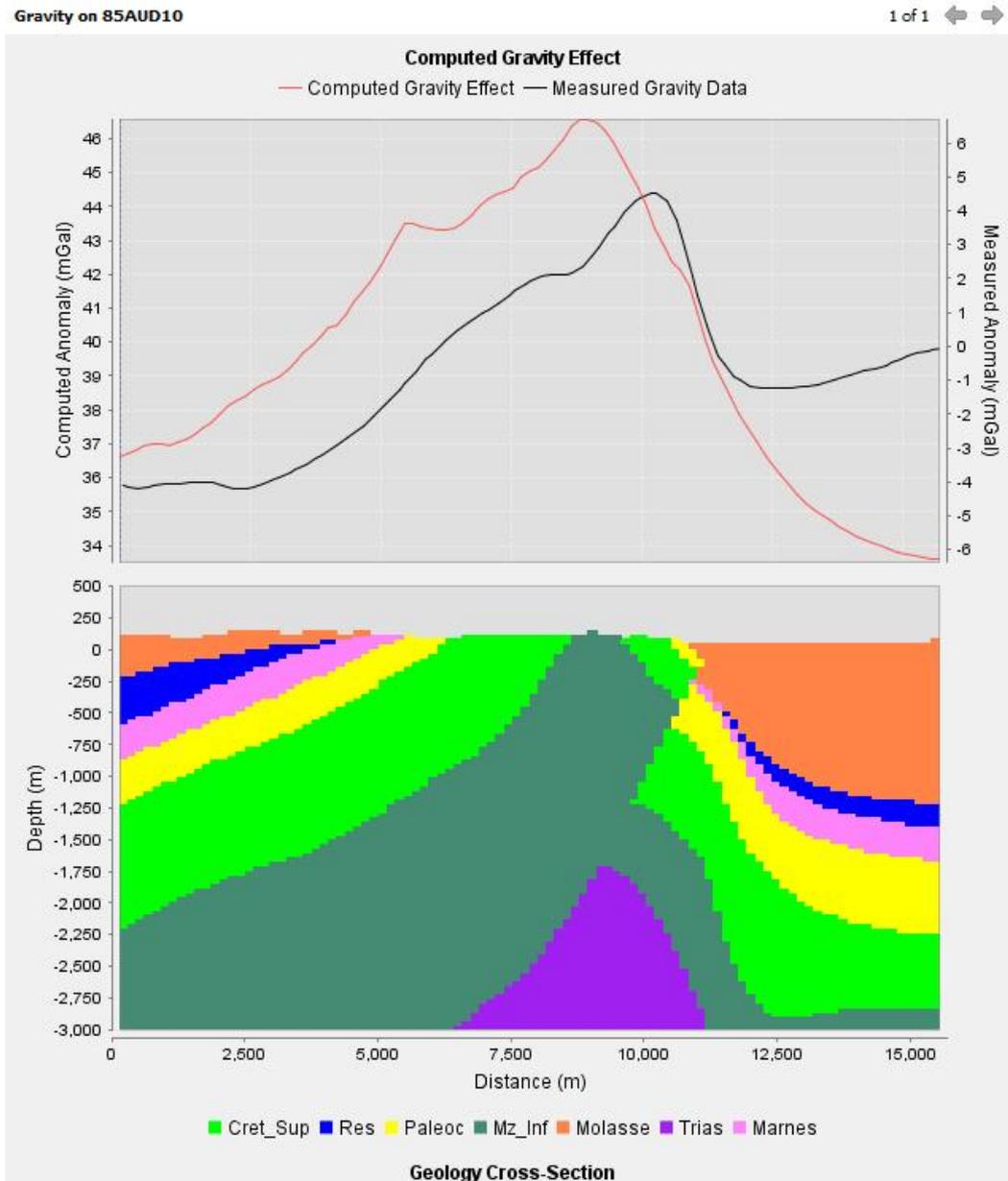


Illustration 33 - Comparaison en 2D de la réponse gravimétrique du modèle, pour la coupe 85AUD10 (courbe rouge), avec la gravimétrie issue de la Résiduelle, après optimisation des densités

Formations	Moyenne densité
Molasse	2.45
Réservoir Eocène Oligocène	2.4
Marnes Donzacq	2.2
Réservoir Paléocène	2.6
Réservoir Crétacé sup	2.5
Mésozoïque	2.6
Trias	2.65

Illustration 34 - Essai d'optimisation des densités pour faire correspondre au mieux la réponse du modèle aux données gravimétriques

2.4. REFLEXION SUR LA KARSTIFICATION, A L'ECHELLE DE LA STRUCTURE

Un des objectifs de l'étude est de mieux comprendre le rôle de la karstification des formations carbonatées de la structure d'Audignon, dans les écoulements, à plusieurs échelles. Les karstifications épigène et hypogène diffèrent par la direction des sens d'écoulement à grande échelle -descendant pour les circulations épigènes et ascendant pour les circulations hypogènes- mais aussi par l'origine de l'acidité générée en profondeur dans le cas des karsts hypogènes. Lorsqu'elles sont karstifiées, les formations carbonatées enregistrent les traces du passage des fluides. Les morphologies karstiques renseignent sur les conditions dans lesquelles s'est produite la karstification et conservent parfois des indices sur la provenance des fluides. C'est pourquoi, on recherchera :

- les indices de karstification épigène (en lien avec une karstification de surface) nous renseignant sur les modalités d'infiltration de l'eau au sein de la structure ;
- les indices de karstification hypogène (en lien avec des fluides profonds) pour caractériser la structure comme exutoire ou paléo-exutoire.

2.4.1. La karstification épigène

Les indices de karstification sur le terrain

Au sein des formations carbonatées "réservoirs" du Crétacé et du Paléocène/Éocène, on trouve des évidences de karstification. Les indices sont rencontrés à la fois en forage et sur le terrain (à l'affleurement ou en souterrain au travers des cavités). En forage, on trouve de nombreuses évidences de karstification, par le biais d'arrivées d'eau, ou de pertes d'eau ou de boues de forage. Ces indices sont confirmés par les indices de terrain, constitués par quelques affleurements (en carrière notamment) et par un inventaire de grottes et cavités recensées dans la région (Soussieux, 1984 - Illustration 35).

Sur le terrain, le secteur d'Audignon présente des conditions d'affleurement assez limitées. Le relief n'y est pas très prononcé, la végétation est dense et la formation des sables fauves recouvrant la région est souvent la seule formation qui affleure dans les talus et bords de route. Les points d'observation sont donc rares. On peut néanmoins noter, dans les environs de la source du Marseillon, la présence de chicots calcaires (pinacles) du Crétacé supérieur qui affleurent dans un champ (Illustration 36). Cette morphologie, appelée « ruiniforme », se forme par dissolution des carbonates sous une couverture non karstifiable, mais perméable (souvent des sables) soumise à l'altération. Cette karstification affecte particulièrement le toit des calcaires, présentant des reliefs résiduels arrondis (pinacles) séparés de dépressions en entonnoir (crypto-doline). Ces formes typiques de crypto-lapias constituent un des rares témoins de terrain pour évoquer une karstification sous-couverture (appelée aussi crypto-karstification).

Concernant les indices karstiques souterrains, ils sont de manière générale assez peu nombreux, si on prend comme référence les grandes provinces karstiques, telles que les Grands Causses.

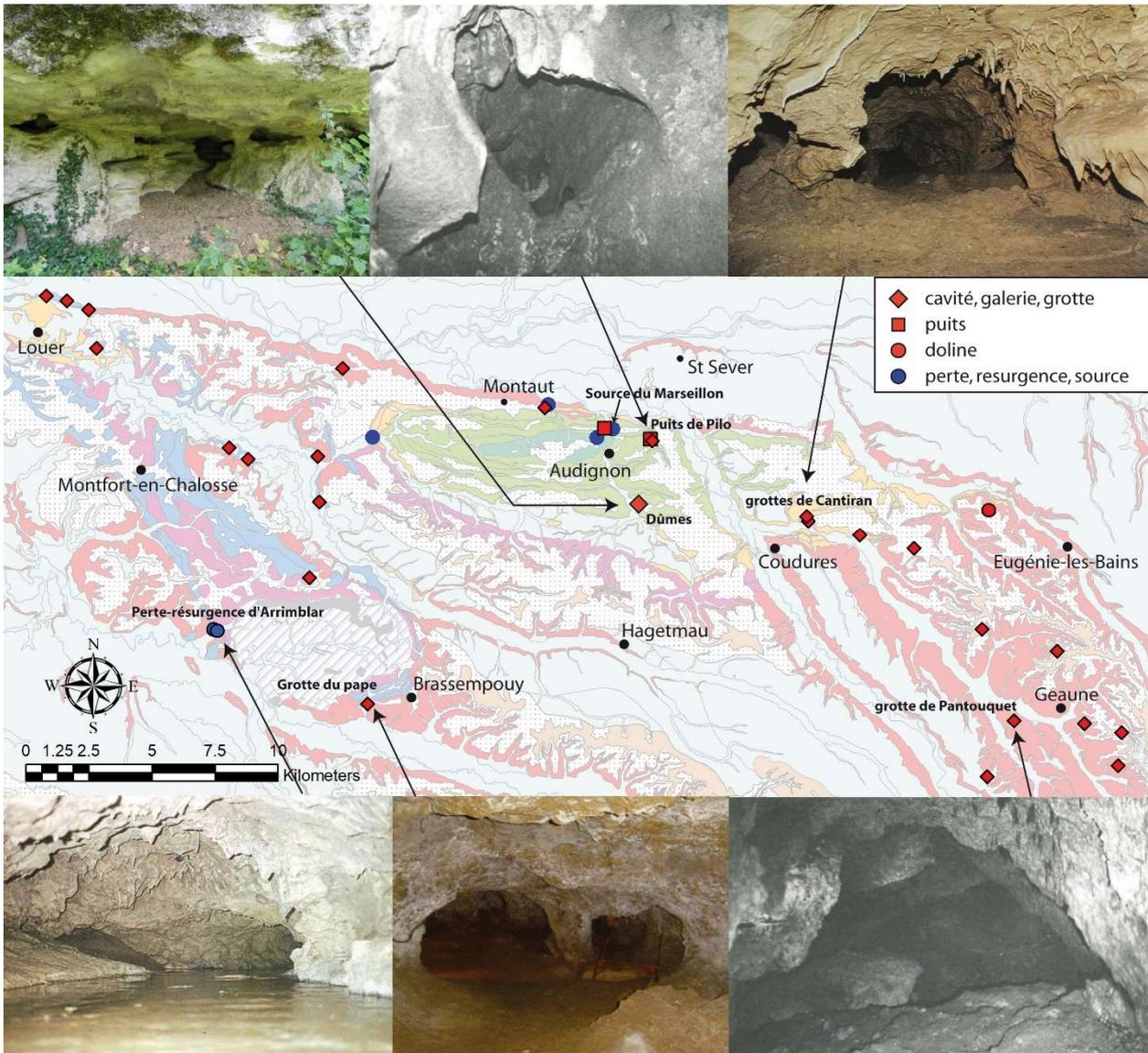


Illustration 35 - Carte géologique des différentes formations "réservoirs" ou épontes et localisation des indices spéléogénétiques recensés par Soussieux (1984)

On peut néanmoins citer des grottes et des réseaux dans les différentes formations "réservoirs" suivantes (Illustration 35) :

- Les indices spéléologiques trouvés au cœur de l'anticlinal crétacé sont peu nombreux. Ils ont été référencés dans les calcaires de Dumes, de Jouansalles, de Pé-Marie et de Pilo. Ils correspondent à des puits borgnes ou qui débouchent dans des salles aveugles (Soussieux, 1984) ;
- Les formations carbonatées de la base du Tertiaire abritent plusieurs grottes et réseaux à faible développement (37 mètres au maximum aux grottes de Cantiran), situés dans le secteur de Coudures (formation de Houns et Horbaziou), du côté de Louer (calcaire de Lapêche) et à Montaut (cavités découvertes lors de l'exploitation de la carrière d'Arcet). La topographie de ces réseaux montre souvent des relations orthogonales entre les galeries d'un même réseau (Soussieux, 1984), évoquant les réseaux labyrinthiques (Illustration 38) ou « à baïonnettes », issus d'une spéléogenèse par fantômisation (Bruxelles et al., 2009 ; Quinif et al., 2014 ; Audra et Palmer, 2015 ; Jouves, 2018) ;



Illustration 36 - Pinacles de calcaire du Crétacé supérieur, mis à nu par l'érosion (affleurement situé au sommet d'un relief, à proximité de la source du Marseillon)

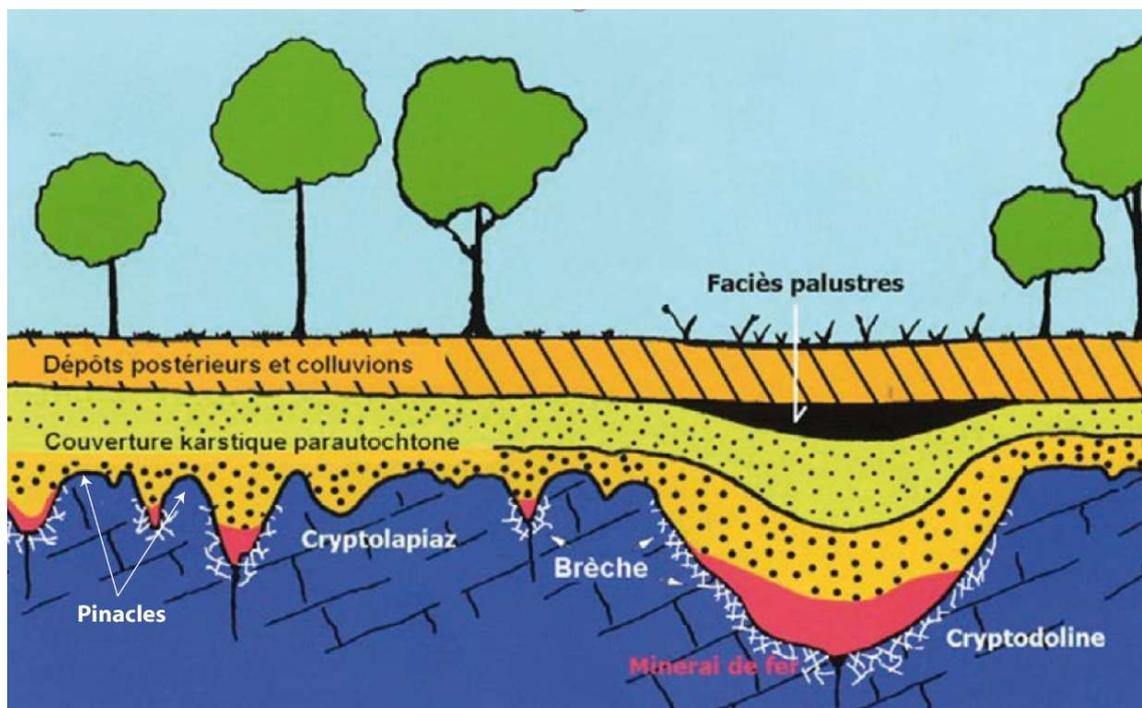


Illustration 37 - Coupe schématique d'un karst sous-couverture (ou crypto-karst) illustrant les différentes morphologies, ainsi que les formes associées (d'après Quinif, 2010)

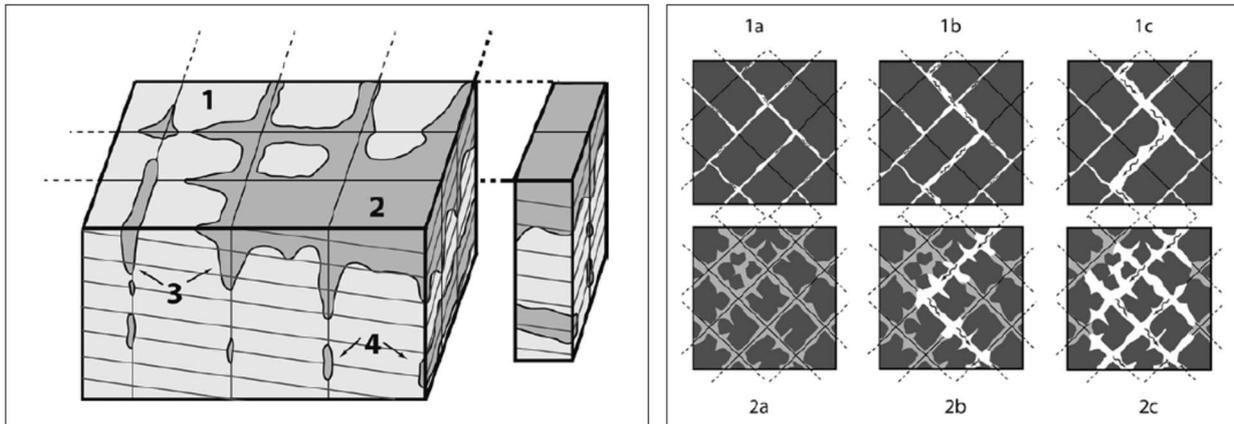


Illustration 38 - Différents types de fantômes de roches et évolution de réseaux fantômés
 À gauche : la roche non altérée (1) est recoupée par de nombreuses discontinuités (joints et plans de stratification), qui sont en partie utilisées par la fantômisation. Le fantôme peut se présenter comme des masses altérées (2), comme des poches et des couloirs (3) et comme des pseudo-endokarsts entourés de roche saine (4).

A droite en haut (1a, b, c) : évolution karstique "normale" par dissolution et élimination complète du matériel dissous.

A droite en bas (2a, b, c) : karstification par fantômisation. Lors d'un faible gradient, le faible écoulement produit la matrice résiduelle (altérite) mais ne peut pas l'exporter (a). Après une chute de niveau de base et un fort gradient hydraulique, un écoulement turbulent apparaît et exporte les particules fines par érosion régressive (b). Graduellement, le maillage de la fracturation est révélé et un labyrinthe apparaît à la place du fantôme initial (c). Les parties les plus éloignées du flux turbulent restent colmatées de fantômes (Bruxelles et al., 2009).

- Les formations carbonatées du sommet de l'Éocène présentent aussi des manifestations d'indices spéléologiques, comme la grotte du Pape (Brassempouy) -célèbre pour ses découvertes archéologiques-, le système perte-résurgence d'Arrimblar (à l'ouest du diapir de Bastennes-Gaujacq), les grottes en rive gauche du Louts que drainent des petits cours d'eau souterrains (Soussieux, 1984). Il est intéressant de noter que la majorité des réseaux karstiques recensés au sein de ces formations sont actifs et parcourus par de petits cours d'eau souterrains à faible débit ;
- Enfin un certain nombre d'indices karstiques sont reconnus dans les formations de la molasse oligo-miocène. Considérée comme une éponte à l'échelle régionale du système, elle abrite, au sein de ses niveaux carbonatés, une quantité non négligeable de manifestations karstiques, situées dans la partie sud-est de l'anticlinal. Leur morphologie et leur dimension sont comparables à celles qui affectent les précédentes formations décrites. On atteint même un record de 83 mètres de développement pour le réseau de la grotte des Fées, de la commune de Castelnaud-Tursan. La plupart de ces réseaux se retrouve drainée par des petits rus, à faible débit. Leur résurgence se situe perchée sur les versants, car localisée au sein de bancs carbonatés lenticulaires et peu épais, recoupés par les cours d'eau qui incisent les formations molassiques.

En résumé, les réseaux karstiques recensés sur l'anticlinal d'Audignon sont peu nombreux ; leur développement n'est pas très important et la taille des boyaux est assez restreinte. On observe donc une karstification, certes présente à l'échelle de la zone d'étude dans les formations "réservoirs", mais dont l'intensité et l'ampleur restent relativement limitées (Soussieux, 1984).

Dans l'ensemble, il existe peu de différences de morphologies entre les réseaux qui affectent les différentes formations "réservoirs". Cette observation favorise l'hypothèse d'une karstification homogène au sein des formations, acquise à la même période pour toutes les formations, donc relativement jeune dans l'histoire géologique. Les morphologies en surface (crypto-karst) et en souterrain (développement en baïonnettes) semblent indiquer que la karstification ait été principalement acquise sous-couverture à l'échelle de la structure. Les quelques réseaux gravifiques actifs, calqués sur le niveau de base actuel, semblent s'être formés en lien avec l'incision des cours d'eau qu'on observe dans le paysage.

Ces observations favorisent l'hypothèse suivante : la karstification a pu s'acquérir dans un premier temps sous-couverture, puis lors de la chute du niveau de base, la mise en place d'un gradient a permis d'évider des parties altérées et la création de petits réseaux gravifiques.

La formation des sables fauves -sableuse, non karstifiable et perméable- est la seule formation qui recouvre l'ensemble de la structure en discordance et donc repose sur toutes les formations "réservoirs". Cette formation, datée du Miocène (Serravalien, d'après Capdeville et al., 1997), est constituée de sable fin à moyen ocre-jaune pouvant admettre des variations de couleurs allant du blanc à la base, au marron rougeâtre au sommet. D'épaisseur comprise entre 5 et 35 m, elle est composée de deux séquences sédimentaires superposées, chacune oxydée par une altération sommitale du haut vers le bas. Cette altération a généré la formation de croûtes ferrugineuses (Illustration 39) pouvant aller jusqu'à 1,5 m d'épaisseur par endroit (Capdeville et al., 1997). Elle est responsable de la coloration des sables, de leur induration (grès durs et sable blanc kaolinique à la base et ferrugineux au sommet) et atteint même le substratum. Capdeville et al. (1997) signalent que la molasse argileuse carbonatée au contact des sables fauves devient une argile plastique de type kaolinique ; ils en concluent que la formation des sables fauves est le résultat du dépôt d'une formation fluviatile soumise à une altération intense après son dépôt.



Illustration 39 - Affleurement de sables fauves présentant une croûte ferrugineuse intercalée entre deux séquences de dépôts fluviatiles

Les sables fauves semblent donc constituer la couverture sous laquelle a pu se développer la karstification sous-couverture, qui s'est produite lors de l'altération de cette formation. Les zones affectées correspondent au contexte où les formations "réservoirs" carbonatées sont recouvertes en discordance par les sables fauves, ce qui est valable pour l'ensemble des indices karstiques retrouvés en surface, même dans les zones où les sables fauves ont été érodés.

La chute du niveau de base, à l'origine de la mise en place du gradient hydraulique, provoque l'érosion de la couverture des sables fauves, le soutirage, l'évidement des altérites et la formation de karsts gravifiques, réempruntant une pré-structuration acquise lors de l'altération des carbonates sous-couverture. Cette chute est d'origine quaternaire, en réponse aux variations glacio-eustatiques, responsables de la mise en place du réseau hydrographique structuré d'aujourd'hui.

Le potentiel altimétrique -et donc le gradient hydraulique- reste relativement faible dans la région, ce qui explique le faible développement vertical des réseaux. La couverture des sables fauves est encore largement présente sur l'ensemble de l'anticlinal d'Audignon, ce qui explique la répartition des indices spéléologiques reconnus à ce jour. Enfin, la jeunesse de la mise en place des réseaux gravifiques et les modalités d'infiltration largement tamponnées par la couverture sableuse explique le faible développement des réseaux et la taille plutôt restreinte des galeries.

Les modalités d'infiltration

Afin de mieux comprendre le comportement hydrogéologique de la structure, une carte des modalités d'infiltration est proposée. Elle ne tient pas compte des paramètres hydrologiques, mais uniquement de la nature des terrains constituant l'impluvium des sources et des cours d'eau principaux. Elle pourra servir d'appui à la définition du schéma conceptuel d'écoulement au niveau de la structure.

En dehors de la structure anticlinale d'Audignon, les formations grésos-carbonatées de l'Eocène-Oligocène, qui affleurent en surface sur la structure Louer-Bastennes-Gaujacq, sont hydrauliquement séparées des formations carbonatées du Crétacé-Paléocène-Eocène inférieur de la structure anticlinale d'Audignon, par les marnes de Donzacq et les marnes de Gan, qui constituent une éponte régionale. La connexion entre ces deux réservoirs ne peut donc se faire que par drainance, générant des flux très lents sur des temps très longs.

De manière générale, les modalités d'infiltration de l'eau en terrain karstique caractérisent l'aptitude de ce terrain à concentrer l'eau, pour favoriser une infiltration rapide vers la profondeur, ou au contraire à stocker de manière temporaire l'eau à proximité de la surface, générant ainsi un effet de retard sur l'infiltration. La recharge des aquifères karstiques épigènes s'effectue généralement au travers de l'épikarst (Illustration 40), sauf cas particulier d'alimentation unique par des systèmes de pertes.

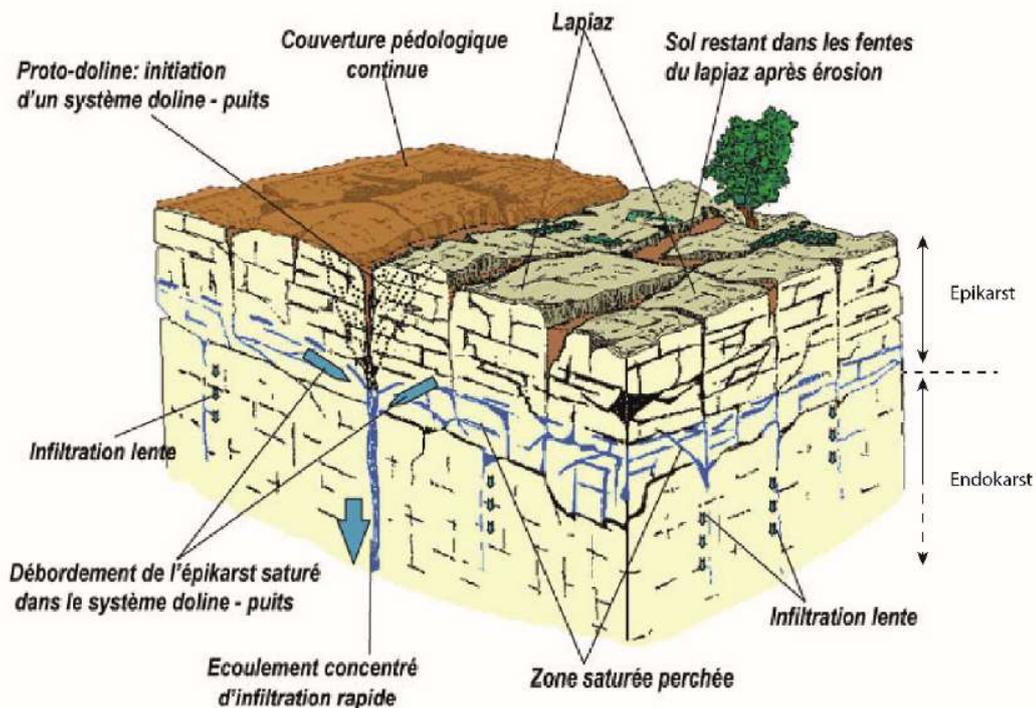


Illustration 40 - Représentation synthétique de l'épikarst (Jouves, 2018, modifié d'après Bakalowicz, 2013)

La perméabilité de l'épikarst est accrue par rapport à celle de la roche plus en profondeur. Cette zone est discontinue et est drainée latéralement par les conduits karstiques rejoignant l'endokarst. Lorsqu'une couverture est présente, elle est soutirée par infiltration lente dans les fissures.

En fonction des indices karstologiques reconnus, trois principaux types de modèles de dynamiques d'infiltration peuvent être différenciés dans la structure anticlinale d'Audignon (Illustration 41) :

- infiltration lente et diffuse (en vert sur l'illustration 41). Ce sont les secteurs où les eaux de surface ont la possibilité de s'infiltrer directement, sans avoir la possibilité de se concentrer en surface, en raison de la présence de formations peu karstifiables ou de formations superficielles poreuses, mais peu perméables. C'est le cas du crypto-karst sous le recouvrement de la formation des sables fauves. Ces zones peuvent également correspondre à des surfaces dénudées, où l'essentiel des discontinuités est colmaté et le karst peu développé et hiérarchisé ou à des zones de crypto-lapiaz. L'infiltration sera alors diffuse et homogène vers la profondeur, avec un certain effet de retard et/ou tampon du fait d'un stockage à proximité de la surface dans l'épikarst. Ce type d'infiltration concerne la majorité des terrains de la structure : en effet, le crypto-karst semble en grande partie encore colmaté par le soutirage de la couverture des sables fauves ;
- infiltration diffuse directe et rapide (en orange sur l'illustration 41). Ce sont les secteurs où l'essentiel des eaux de surface peut s'infiltrer directement dans des surfaces dénudées, telles que des lapiaz sur roche nue. L'infiltration diffuse se concentre rapidement dans des chemins d'écoulement préférentiels souterrains. Ce type d'infiltration est valable dans les terrains carbonatés, au droit des cours d'eau qui les incisent. En revanche, dans le contexte de la structure d'Audignon, les connexions au niveau des cours d'eau avec la nappe sous-jacente peut aussi fonctionner dans l'autre sens : non plus en infiltration, mais en résurgence. Des précisions seront apportées dans le chapitre suivant sur les connexions entre le réservoir du Crétacé-Paléocène et les cours d'eau ;

- infiltration concentrée et rapide (en gris sur l'illustration 41). Ce sont les réceptacles des eaux de ruissellement collectées, issues des zones peu perméables. Les eaux se perdent de manière concentrée et rejoignent rapidement les circulations endokarstiques. Cet ensemble concerne, d'une manière générale, les différentes zones de pertes (zones de contact d'un karst binaire, zones de poljés, etc.). Dans notre secteur, la karstification relativement récente et fruste ne permet pas le développement d'un endokarst très grand. Les zones de pertes concernées par ce type d'infiltration, qui correspondraient aux réceptacles des eaux de ruissellement ainsi qu'aux quelques zones où des dolines/pertes apparaissent sur le terrain, ne sont pas représentées sur la carte, car elles sont « marginales ».

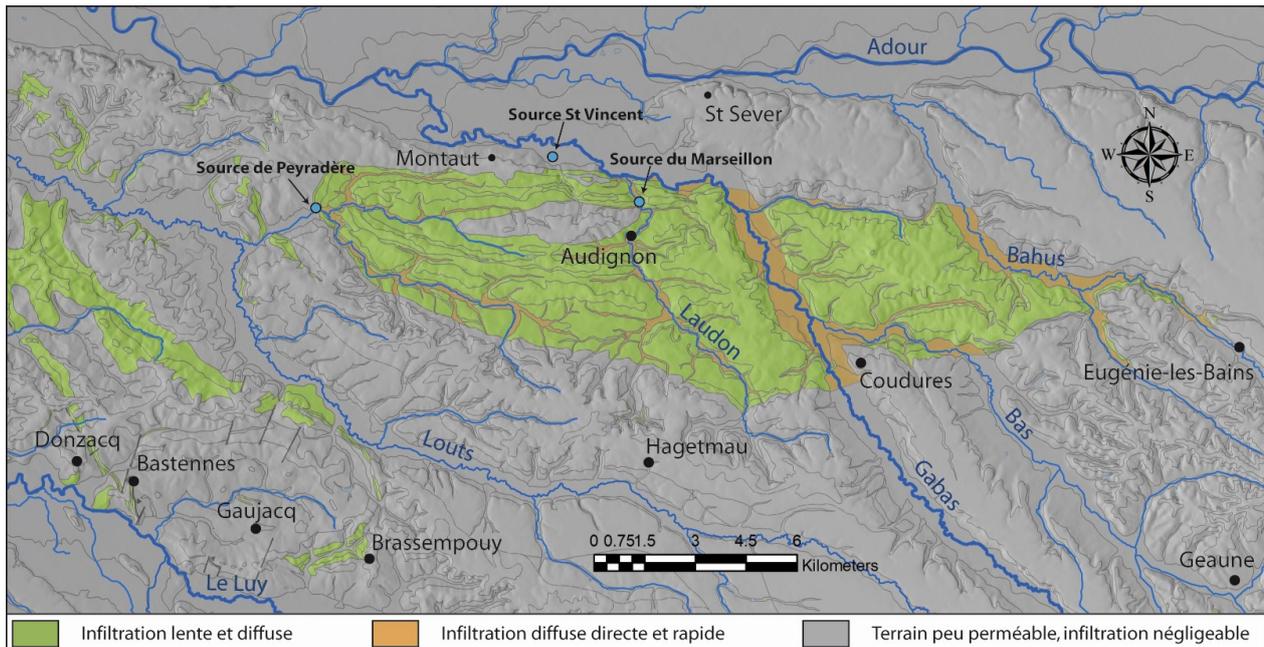


Illustration 41 - Carte des modalités d'infiltration (en vert : infiltration lente et diffuse ; en orange : infiltration diffuse directe et rapide ; en gris : zones peu perméables, avec un ruissellement plus important que l'infiltration)

2.4.2. La karstification hypogène

Les indices de karstification hypogène

Les réseaux hypogènes sont le plus souvent reconnus dans des contextes thermaux ou sulfuriques. De nombreuses références permettent désormais d'identifier le rôle de la spéléogénèse à acide sulfurique dans certains contextes hypogènes. La spéléogénèse à acide sulfurique (SAS) implique la dissolution du calcaire par l'acide sulfurique, dérivé de H_2S , qui dégaze à partir d'une eau hypogène alimentée par des sources profondes.

Plusieurs indices de fonctionnement et de paléo-fonctionnement hypogènes sont à noter au sein de la zone de la structure d'Audignon. Ces indices sont à mettre en relation avec la structuration de l'anticlinal et le diapir de Bastennes-Gaujacq, qui sont deux accidents impliquant les évaporites triasiques. En effet, les évaporites contiennent des sulfates -le gypse ($CaSO_4$) étant le principal minéral libérant des sulfates dans l'eau- qui par le biais d'un agent réducteur (matière organique, Fe^{2+} , $H_2...$) sont réduits en sulfure (on parle de sulfato-réduction). La dissolution des évaporites du Trias peut donc produire des fluides riches en acide sulfurique, très agressifs, augmentant le pouvoir de dissolution de ces fluides.

Si aucune morphologie typique de SAS, ni aucune minéralisation induite par ces processus-là n'ont été visibles sur le terrain, il existe des indices de circulation et de paléo-circulation de fluides ascendants sulfatés, pouvant être à l'origine d'une karstification hypogène.

Tout d'abord, la présence d'anciennes résurgences thermales à Eugénie-les-Bains (zone est de la structure) indique la venue d'eau chaude en surface. Si les sources sont tarées aujourd'hui, les forages qui les remplacent pour le fonctionnement des thermes captent une eau à faciès sulfaté, sodique à calcique, de l'ordre de 42°C, au sein de la formation "réservoir" de la base du Tertiaire, située à 70 m de profondeur. Cette anomalie de température signe la provenance et la remontée de fluides profonds. De plus, ces eaux contenues dans ce réservoir sont aussi caractérisées par une forte teneur en H₂S (Aquila Conseil, 2002).

Au sud-ouest de la structure cette fois, Soussieux (1984) signale au sein du système perte-résurgence d'Arrimblar (Illustration 35), que plusieurs petites sources d'eau sulfureuses viennent rejoindre de cours d'eau principal dans la galerie souterraine, « provoquant une odeur assez désagréable ». La présence de ces eaux sulfureuses est liée à la proximité du diapir triasique de Bastennes-Gaujacq.

En terme d'indices géologiques, les conditions d'affleurement limitent l'observation de ces phénomènes. La carrière d'Arcet, dans la commune de Montaut, constitue l'une des rares fenêtres nous permettant d'observer la karstification des formations "réservoirs" qui ici sont les calcaires et dolomies du Paléocène (Illustration 42-A). Les fronts de taille de la carrière présentent une fracturation et une bréchification importantes à plusieurs échelles. La circulation permise par des chemins de perméabilité préférentielle va permettre une karstification, qui s'exprime le long des fractures et au sein même des amas bréchiques. Des petits conduits à remplissage jaune-ocre, en cours d'évidement, sont visibles sur les fronts de taille (Illustration 42-C). La calcite est très présente, sous forme filonienne, dans la « core zone » des failles (Illustration 42-B), sous forme de calcite drusique, dans des géodes (Illustration 42-E), et associée à de la fracturation hydraulique (Illustration 42-D).

Aucune analyse n'a été entreprise dans les remplissages au sein de ces brèches. Il est donc difficile d'émettre, avec certitude, la source de cette composante hypogène, ni l'âge de mise en place des brèches. En revanche, ces éléments restent des indices cohérents avec l'hypothèse d'une karstification hypogène au niveau de la carrière d'Arcet, qui se situe à l'aplomb de la faille majeure d'Audignon (voir chapitre 2.3.1 portant sur l'interprétation des profils sismiques).

À l'échelle de la structure, on peut néanmoins remarquer que ces indices hypogènes ne sont pas répartis aléatoirement. Ils sont situés au droit de la faille majeure d'Audignon, concernant la carrière d'Arcet, et les sources d'Eugénie-les-Bains ou à proximité du diapir de Bastennes-Gaujacq. Dans les deux cas, les formations de ces secteurs ont pu subir une karstification en lien avec la circulation de fluides, enrichis en éléments sulfatés ou sulfurés, provenant d'une source triasique : que ce soit par contact quasi-direct avec le diapir de Bastennes-Gaujacq ou bien par connexion plus profonde via la faille majeure d'Audignon.

Néanmoins, cette karstification ne semble pas avoir de lien avec les évidences de karstification spéléogénétiques recensées par Soussieux (1984).

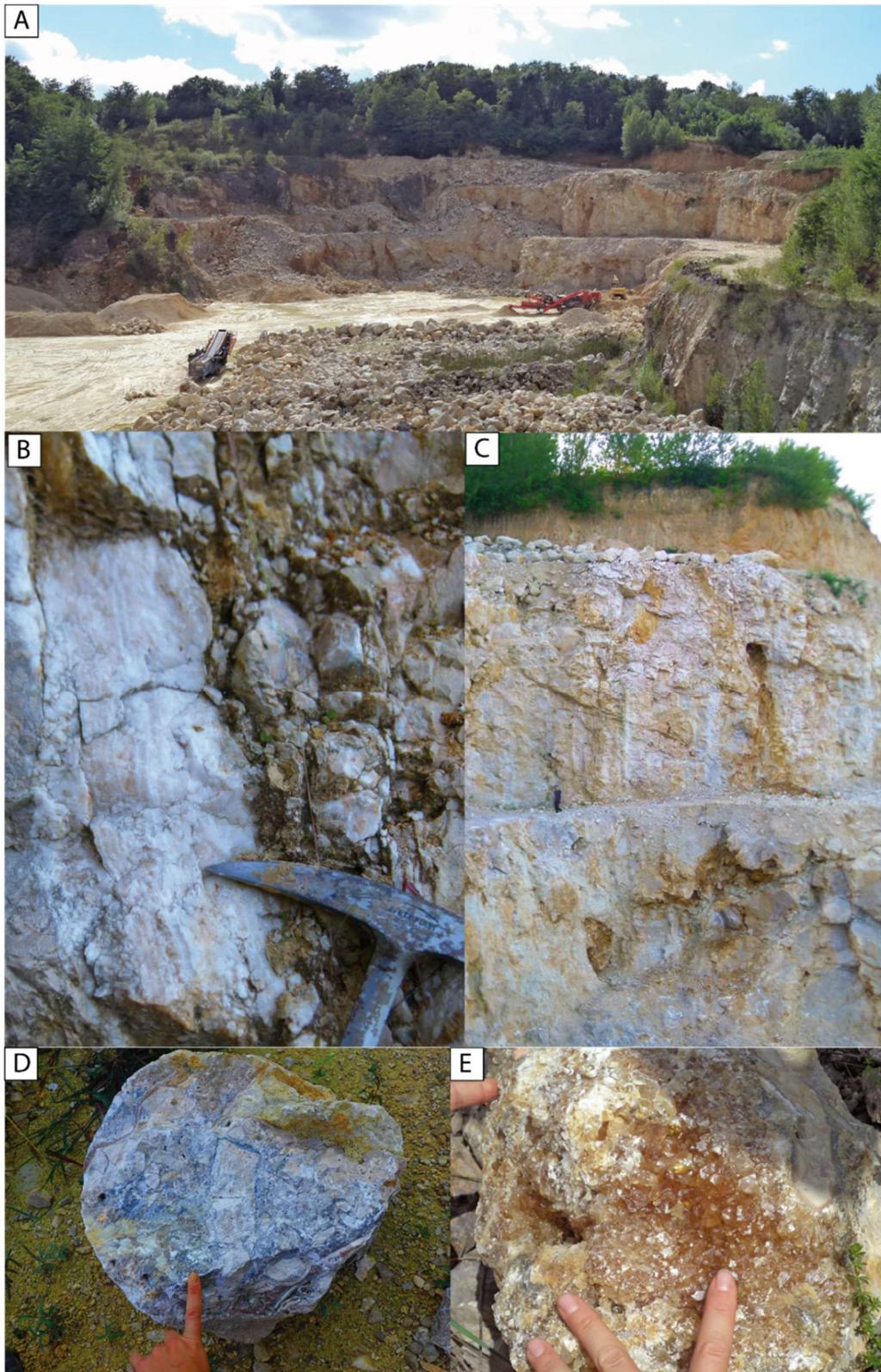


Illustration 42 - Indices de paléo-circulations hypogènes dans la carrière d'Arcet, dans la commune de Montaut : (A) panorama de la carrière, fracturation et poches karstiques sont visibles sur les fronts de taille ; (B) calcite filonienne injectée dans la « core zone » de la faille ; (C) conduit en cours de décolmatage dans le front de taille supérieur et amas bréchifique dans le front inférieur ; (D) bloc de brèche montrant une composante par bréchification hydraulique ; (E) géode de calcite drusique

Les autres indices de karstification hypogène ?

D'autres éléments de terrain posent question et ont parfois fait l'objet d'hypothèses les assignant à des indices hypogènes. Il s'agit de la formation des grès de Coudures et de certaines minéralisations siliceuses sous formes de géodes (Illustration 43).

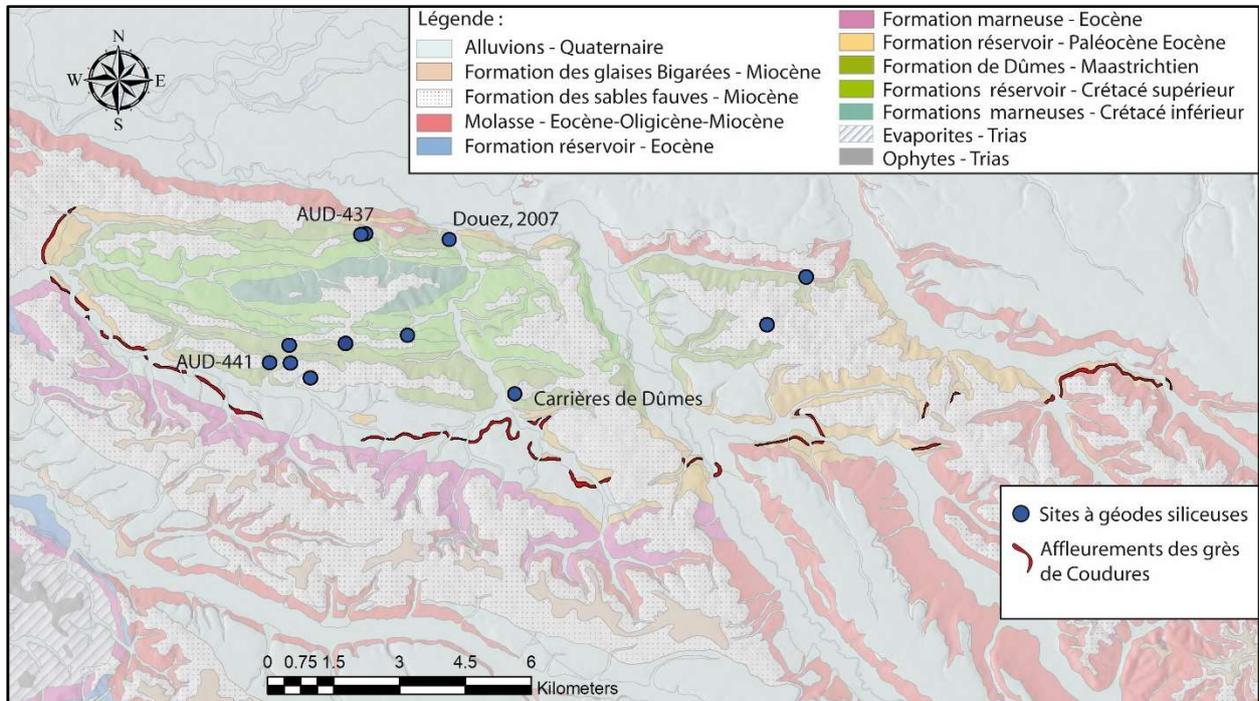


Illustration 43 - Localisations des affleurements de grès de Coudures (d'après Capdeville et al., 1997) et des sites de géodes siliceuses signalés par M. Daniaud (Les sites étudiés par Douez (2007) et échantillonnés au cours de cette étude (AUD-437 et AUD-441) sont reportés sur cette carte.)

• Les géodes

Dans la commune de Dumes, dans d'anciennes carrières, des géodes de quartz ont été trouvées en place dans les marno-calcaires du Maastrichtien (Illustration 43). Capdeville et al. (1997) les décrivent comme des « accidents siliceux de type géode à l'aspect caractéristique [...] pouvant dépasser 20 cm de diamètre. La surface externe beige à sombre présente des crêtes mamelonnées, tandis que l'intérieur est tapissé par des cristaux de quartz parfois rangés en semi-sphérules translucides ou laiteuses ». Les carrières de Dumes n'étant plus accessibles aujourd'hui, d'autres sites nous ont été signalés par M. Daniaud, minéralogiste (Illustration 43). Deux sites à géodes siliceuses (quartz et calcédoine), signalés par M. Daniaud, ont fait l'objet d'une étude pétrographique : les sites AUD-441 et AUD-347.

À proximité de la carrière d'Arcet, le site AUD-437 (Illustration 43) présente une coupe au sein du talweg formé par les alluvions du lit d'un petit ruisseau, dans lequel les géodes de quartz sont contenues. Constitutives de ces alluvions, les géodes sont associées à des blocs de grès ferruginisés et de galets de quartz, issus d'un transport fluvial assez long (Illustration 44). A l'inverse, les géodes sont dans un état de très bonne conservation et sont sans doute issues d'un gisement beaucoup plus proche. En effet, les alluvions reposent sur le substratum maastrichtien, que le cours d'eau incise en amont, dégageant les géodes de l'encaissant carbonaté.



Illustration 44 - Présentation du site AUD 437 (pour localisation, voir illustration 43) : A- photographie du talweg qui incise les formations du Maastrichtien ; B- clastes transportés par le cours d'eau : galets de grès ferruginisés et géodes siliceuses ; C- « collecte » de géodes trouvées dans les dépôts du talweg

Le deuxième site (AUD441) se situe au lieu-dit de la ferme Bourdillon, à mi-chemin d'un profil amont-aval entre le ruisseau qui passe en contrebas de la propriété et le relief de Labourdette (colline au sommet plat). Dans cette aire-là, il est signalé que de nombreuses découvertes de géodes de quartz sont remontées à la surface, lorsque les champs sont labourés. Dans une zone en contrebas de la ferme, le terrain labouré permet de trouver des géodes de quartz, enserrées dans une gangue de fer (Illustration 45). Bien qu'invisible et recouvert sous un sol épais, le substratum est situé à quelques mètres en dessous (et affleure à proximité du cours d'eau). Il est constitué là-aussi par le Maastrichtien.



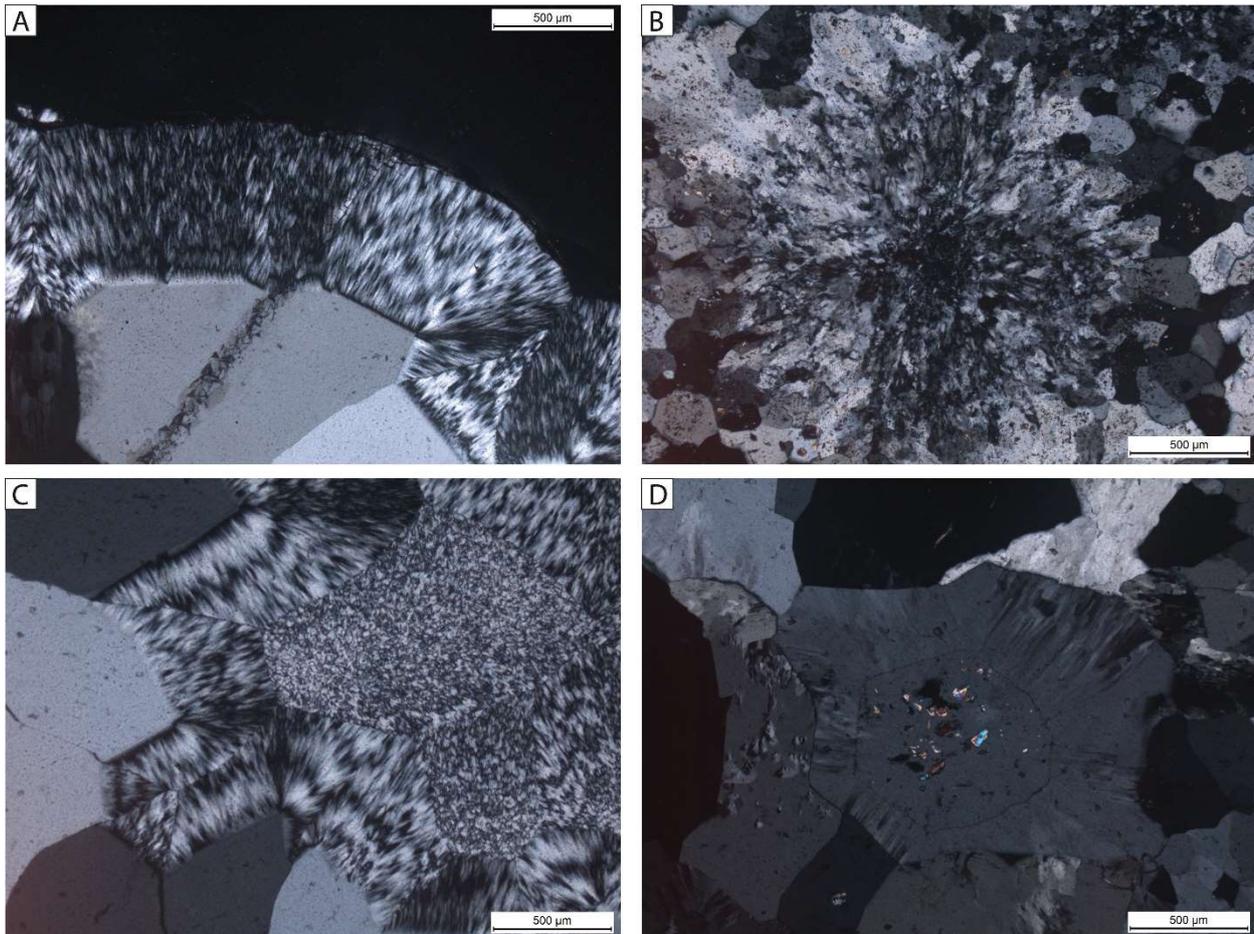
Illustration 45 - Géodes siliceuses (à gauche : échantillon AUD-441 ; à droite : échantillon AUD-437)

Un autre gisement de géode siliceuse est recensé sur l'anticlinal d'Audignon, dont les minéralisations ont déjà fait l'objet d'études (Douez, 2007). Il s'agit d'un site proche de la source du Marseillon (Illustration 43). Là encore, les géodes sont issues de la partie altérée des formations maastrichtiennes. Douez (2007) a attribué ces géodes siliceuses à une activité hydrothermale, bien que rien ne permette de l'affirmer avec certitude. Un essai de datation a même été tenté sur le quartz d'une géode, par RPE (résonance paramagnétique électronique) ou ESR (electron spin resonance). La méthodologie développée n'est pas suffisante pour juger de l'âge obtenu ($72\ 200 \pm 7\ 000$ ans BP). Mais le résultat semble discutable.

Des lames minces ont été réalisées dans les géodes siliceuses des sites AUD-441 et AUD-437 (Illustration 46). Elles montrent que ces dernières sont constituées de silice partiellement cristallisée (quartz et calcédoine). On observe des cristaux parfaitement formés, entourés d'une frange de silice à texture plumeuse (Illustration 46 A) ou associés à des textures sphérulitiques (Illustration 46 B) qui correspondent à des gels de silice (forme plus ou moins amorphe du minéral).

Plusieurs photos de lames minces illustrent le degré de cristallisation de la silice, avec plusieurs stades de cristallisation qui se côtoient. Sur l'illustration 46 C, on observe des textures plumeuses, dans les zones de croissance autour des cristaux, qui entourent un gel de silice encore plus faiblement cristallisé. L'illustration 46 D présente au centre un cristal initial auréolé d'une frange, qui conserve les traces d'une texture plumeuse en cours de recristallisation. Par ailleurs, on remarque que le cristal initial contient des inclusions d'autres minéraux (biréfringence de couleurs vives). On retrouve ces minéraux dans la plupart des cristaux de quartz bien cristallisés (Illustration 47).

Afin de définir leur origine, une analyse au microscope électronique à balayage (MEB) a été effectuée. La technique consiste en un balayage de la surface de l'échantillon à analyser, par un faisceau d'électrons, surface qui, en réponse, réémet certaines particules. Ces particules sont analysées par différents détecteurs, qui permettent d'obtenir une cartographie des éléments constitutifs de la zone balayée. L'analyse confirme la composition du quartz (SiO_2) par les deux éléments Si et O retrouvés dans les spectres (Illustration 48). Les petites inclusions de minéraux à biréfringences vives sont composées des éléments Ca, S et O (Illustration 48). Ces minéraux correspondent à de l'anhydrite (CaSO_4).



*Illustration 46 - Photos des cristaux de quartz constitutifs des géodes siliceuses, en lames minces
A : liseré de gel de silice à texture plumeuse encore non cristallisé (Ech AUD437). B : silice à texture sphérolitique (Ech AUD441). C : passage de quartz cristallisé à une texture plumeuse en cours de cristallisation à un gel complètement amorphe (Ech AUD437). D : cristal de quartz avec un nucléus bien délimité qui correspond au cristal initial, avec une zone de croissance partiellement cristallisée qui conserve les traces d'une structure plumeuse (Ech AUD437).*

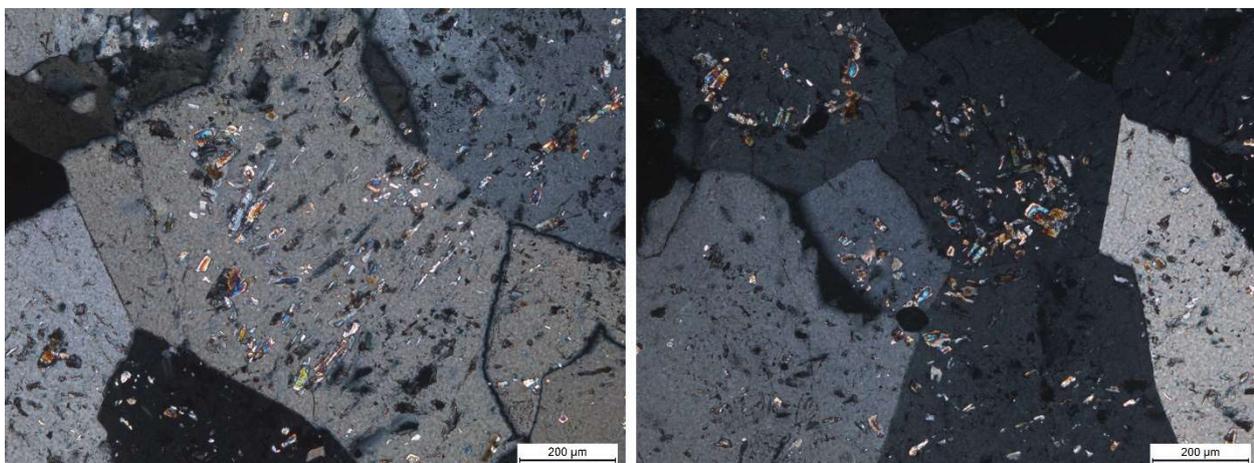


Illustration 47 - Photos, en lames minces, des cristaux de quartz (gris à noir), constitutifs des géodes siliceuses, incrustés de plus petits minéraux d'anhydrite (biréfringences de couleur vive)

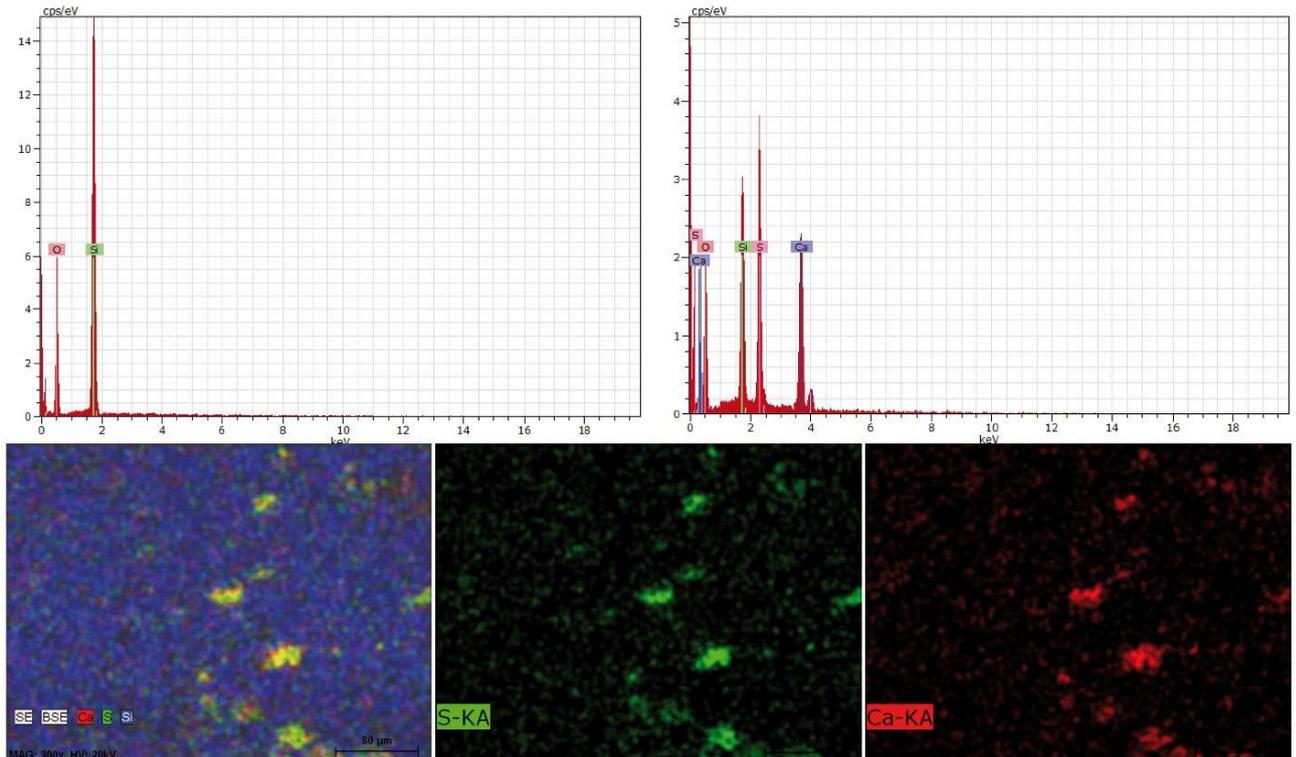


Illustration 48 - Spectres obtenus par analyse au MEB (en haut) et exemples d'image de portion de lame mince, analysée par le MEB (en bas)

En haut : Spectres obtenus par l'analyse au MEB, donnant la composition des éléments des cristaux de quartz (Si et O), à gauche, et la composition des cristaux d'anhydrite (Ca, S et O), à droite. Les spectres obtenus sur les cristaux d'anhydrite conservent l'élément Si, car les cristaux sont petits et la mesure « déborde » sur le cristal de quartz.

En bas : Exemples d'images de portion de lame mince, analysée par le MEB. De gauche à droite : i) image avec les éléments Si (bleu) qui correspondent au cristal de quartz, S (vert) et Ca (rouge) qui correspondent aux inclusions d'anhydrite ; ii) image des éléments S (vert) ; iii) image des éléments Ca (rouge).

Ce type de géode siliceuse, en milieu carbonaté, a fait l'objet de nombreuses études aux Etats-Unis (Chowns et Elkins, 1974 ; Tucker, 1976 ; Shulka et Friedman, 1981 ; Maliva, 1987), mais aussi en Espagne et en France (Arbey, 1980, Elorza et Rofriguez-Lazaro, 1984 ; Lezin, 2000). Pour ces auteurs, ces géodes siliceuses sont issues du remplacement de nodules d'anhydrite par différents types de quartz (quartz et calcédoine), lors de la diagenèse précoce avant compaction du sédiment. Le mécanisme se fait en deux temps : d'abord se produit la formation de nodules d'anhydrite et ensuite, la silice biogénique contenue dans les sédiments est remobilisée lors de la diagenèse pour former des chailles (silex) et remplacer l'anhydrite des géodes (transformation par épigenèse). La silice dans ces cristaux est mal organisée, ce qui se marque dans ses caractères optiques (texture plumeuse ou sphérolitique). Dans le temps, la diagenèse évolue par phases (au moins deux). Cette évolution va dans le sens d'une amélioration de la cristallinité : opale, calcédoine, quartz mal organisé, puis quartz de mieux en mieux organisé.

Boulanger et Deicha, (1958) ont proposé, pour la formation de ces géodes, des conditions de température et de pression modestes, en lien avec une histoire d'enfouissement modeste du fait de l'activité tectonique de ride. L'étude en lame mince semble plaider pour cette hypothèse, car aucune inclusion fluide n'est visible et la cristallinité est plutôt représentative d'un fluide « froid ». La silicification secondaire de ces nodules, lors d'une diagenèse précoce de faible enfouissement, semble donc être plus probable qu'une mise en place par remontées de fluide.

- **Les grès de Coudures**

Les grès de Coudures se rencontrent sur le flanc sud de l'anticlinal d'Audignon, en affleurements discontinus, voire sous forme de blocs épars (Illustration 49), constitués de sable à la base et surmontés par des grès et des quartzites (Capdeville et al., 1997).



Illustration 49 - Affleurement de grès de Coudures, remaniés du fait d'une exploitation (A- éléments de quartzites ; B- niveau plus sableux et C- niveau plus gréseux)

La genèse des grès de Coudures est discutée depuis longtemps : Daguin (1948), Feinberg (1964), Boulanger (1968), Capdeville et al. (1997) et Douez (2007). Si l'origine sableuse du dépôt ne fait aucun doute, la question principale réside dans l'origine de la cimentation (silicification), a priori postérieure de ces grès de Coudures. La plupart des auteurs attribuent cette cimentation, de l'espace inter-granulaire par la silice, à une transformation diagénétique (comme les géodes, vu précédemment), d'autres proposent une hypothèse en lien avec d'anciennes zones d'émergence (Douez, 2007).

Cette formation a d'ailleurs fait l'objet d'études récentes (Douez, 2007), afin d'étudier la possibilité d'une cimentation de ces sables, lors d'un fonctionnement de paléo-émergences. L'hypothèse de travail étant que les grès de Coudures pourraient correspondre à l'exutoire de la nappe des « sables infra-molassiques », située à la base des molasses (cf chapitre 2.1.2). Séparée stratigraphiquement du réservoir du Crétacé-Paléocène par la formation des marnes éocènes (Donzacq et Gan), ces deux réservoirs se retrouvent localement en contact par le jeu de la faille d'Audignon, du côté d'Eugénie-les-Bains (Illustration 17). Si l'hypothèse est plausible, la démonstration ne répond pas à toutes les questions. Un essai de datation a été réalisé sur la partie carbonatée du ciment des grès de Coudures, qui donne des âges très récents (< à 11 000 ans BP). Mais cet âge sur fraction carbonatée n'est pas forcément contemporain de la silicification et n'implique pas nécessairement de lien avec les eaux provenant de la nappe des sables infra-molassiques. Cette datation ne donne que l'âge de précipitation de la calcite dans la porosité de ces niveaux gréseux, qui correspond sans doute à des circulations de fluides issus du bassin versant carbonaté ; circulations qui peuvent effectivement être récentes et complètement décorréées de la période de silicification.

Concernant la silicification, pour Boulanger (1968) : « les conditions d'affleurement de cette formation sont assez particulières et posent problème. En effet, on ne trouve les grès de Coudures pratiquement jamais autrement que sous la forme de blocs isolés, plus ou moins gros, à l'affleurement souvent emballés dans les sables fauves de la Chalosse ». Les forages, qui recoupent cette formation au sud de l'affleurement, ne traversent pas de quartzite ou de grès ; les faciès décrits en tant que "grès de Coudures" correspondent à des sables, des calcaires et même de l'argile (Douez, 2007). Seul un forage, étudié par Feinberg (1964), semble avoir recoupé un faciès gréseux. Il s'agit donc d'une silicification en surface, ou proche de la surface, qui n'affecte que la partie affleurante de la formation des grès de Coudures ; d'où l'hypothèse de précipitation de silice au niveau de paléo-émergence (Douez, 2007). Mais une autre hypothèse peut aussi être avancée : une des sources de silice dans la zone d'étude est constituée par la formation des sables fauves qui, lors de son altération (voir chapitre 2.4.1), pourrait fournir la silice qui migrerait vers les formations sous-jacentes. D'ailleurs, une partie des carbonates du réservoir paléocène-éocène, notamment les couches de Sarraziet (équivalent des couches de Lapèche, voir 2.1.2), qui sont des calcaires à alvéolines, présentent un faciès plus ou moins silicifié, secondairement à l'affleurement (Feinberg, 1964). Cette silicification se serait produite lorsque ces formations carbonatées étaient encore sous le recouvrement des sables fauves, avant leur érosion. Lors de l'altération, la silice en solution migre vers les carbonates et précipite à leur contact. Cette hypothèse serait plus cohérente avec l'altération des sables fauves et la karstification sous-couverture associée des calcaires sous-jacents, présentée au chapitre 2.4.1.

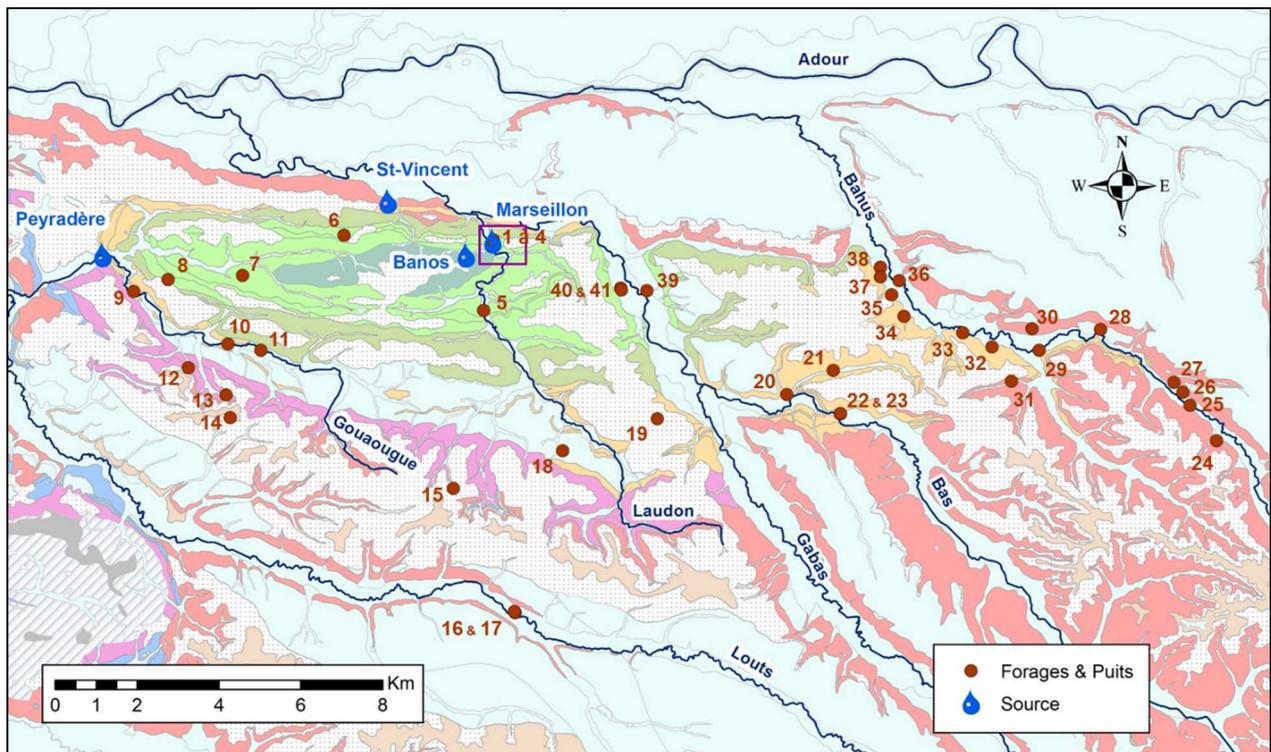
3. Fonctionnement hydrogéologique des réservoirs du Crétacé et du Paléocène de l'anticlinal d'Audignon

3.1. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE - ÉTAT DES CONNAISSANCES

L'analyse géologique précédente confirme que les réservoirs présents, au niveau de la structure anticlinale d'Audignon, correspondent aux réservoirs du Crétacé et du Paléocène/Éocène inférieur qui, à l'échelle de la structure, seraient en continuité hydraulique. Cet ensemble, isolé des réservoirs sous-jacents par les marnes albiennes, se retrouve en contact en surface avec les sables fauves, puis les alluvions.

Les réservoirs carbonatés de la structure anticlinale d'Audignon font l'objet de prélèvements pour les besoins en eau potable et l'irrigation. Il existe ainsi un nombre important de forages qui ont été réalisés dans les années 1980, avec l'accompagnement financier du Département des Landes.

39 forages et 2 puits ont été recensés (Illustration 50 - Annexe 2). Plusieurs autres apparaissent également en bibliographie et sur le site *Infoterre*. Ils s'avèrent être généralement des doublons, correspondant à des forages de reconnaissance préalables à ceux existants. Ils ont été écartés et la Banque du Sous-Sol (BSS) a été mise à jour.



*Illustration 50 - Ouvrages (forages, puits et sources) présents sur l'anticlinal d'Audignon
Le carré violet correspond au zoom effectué au-dessus de la source du Marseillon
(Illustration 56). La légende correspond au log synthétique (Illustration 11).*

Quatre sources sont référencées sur l'anticlinal (Illustration 50 - Annexe 2) :

- la source AEP du Marseillon, exploitée par le Syndicat des eaux du Marseillon et du Tursan,
- la source AEP de Banos (quelques litres par seconde), exploitée par la Régie des eaux de la commune de Banos (300 habitants en 2015 (INSEE, 2015)),
- la source de Peyradère, non exploitée et privée. Son accès a été refusé, rendant impossible tout équipement et mesure ponctuelle (débit/physico-chimie). Seul le Département des Landes y a accès pour le contrôle de la qualité des eaux, dans le cadre du réseau de suivi qualitatif des eaux souterraines,
- la source de Saint-Vincent à Montaut, non exploitée, qui se déverse dans un lavoir communal. Le débit a été estimé à 5 l/s (Pouchan, 1986).

Aucune de ces sources ne fait l'objet d'un suivi des débits, qu'il soit en continu ou ponctuel, en raison des configurations des sites principalement. Seule la source du Marseillon sera équipée pour en mesurer le débit en continu (cf. chapitre 3.3.4). Une cinquième source, située à Coudures et non exploitée, se déverse dans un lavoir communal. Le débit est faible et les analyses physico-chimiques ont montré qu'il s'agissait probablement d'une source perchée, sans lien avec les réservoirs carbonatés. Elle n'a pas été intégrée à l'étude.

Trois sources reconnues en bibliographie (Pouchan, 1986) n'ont pas été retrouvées sur le terrain :

- la source de Montsoué : il s'agirait en réalité d'une zone marécageuse alimentée par plusieurs sources. Un bassin aurait été aménagé pour l'irrigation. Le ruisseau drainant cette zone marécageuse aurait un débit d'environ 10 l/s, à sa jonction avec le Bahus,
- la source Saby, qui se trouverait dans le lit du Gabas (rive droite), est constituée de plusieurs petits griffons bouillonnants dans une buse. Le débit serait d'environ 1,3 l/s,
- la source Arcet à Montaut, située dans une excavation. Busée, elle se déverserait dans un bassin. Le débit serait d'environ 1 l/s.

Concernant les puits et forages, chacun des ouvrages a fait l'objet d'une validation géologique, sur la base des coupes de forage (géologique et technique) et du croisement avec le modèle géologique (Illustration 51).

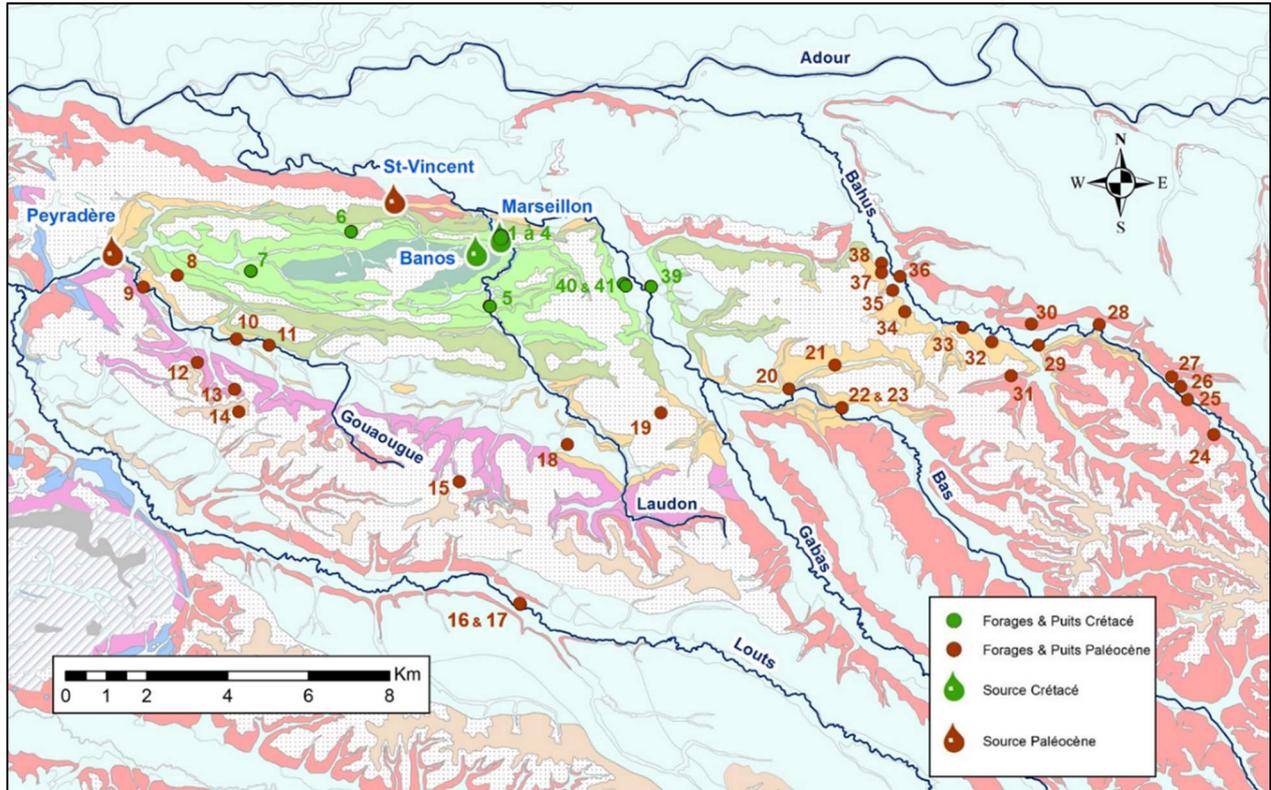


Illustration 51 - Aquifères captés par les ouvrages de la structure d'Audignon

3.1.1. Fonctionnement hydrogéologique local

Du point de vue du fonctionnement hydrogéologique, cette structure anticlinale joue le rôle à la fois de zone de recharge et de zone d'exutoire des nappes profondes, considérées ici, à savoir le Crétacé et le Paléocène. Ce double rôle a été abordé sous différents angles :

- Les cartes piézométriques (Guigand et Roullin, 1978 ; Mauroux et Danneville, 1996 ; Douez, 2007), disponibles à l'échelle régionale pour les aquifères du Crétacé et du Paléocène, montrent que la structure d'Audignon est un **exutoire naturel possible** de ces nappes (Illustration 52 et Illustration 53). Celles-ci présentent des sens d'écoulement semblables, depuis le sud-est vers l'ouest, notamment en direction d'Audignon. Les zones de recharge supposées correspondent, pour le Paléocène, en partie aux Petites Pyrénées (Guessab, 1970). Pour le Crétacé, les zones d'affleurement sont très restreintes. Aussi, la direction principale de drainage et la comparaison des cartes piézométriques permettent d'envisager des communications entre les deux nappes (Duez, 2007). Ces zones de communication sont mises en évidence par Guigand et Roullin (1978, Illustration 53). L'ensemble des cartes piézométriques disponibles à l'échelle régionale s'appuie sur un faible nombre de données, réparties de manière hétérogène sur le territoire, qu'il convient donc de prendre avec précaution.

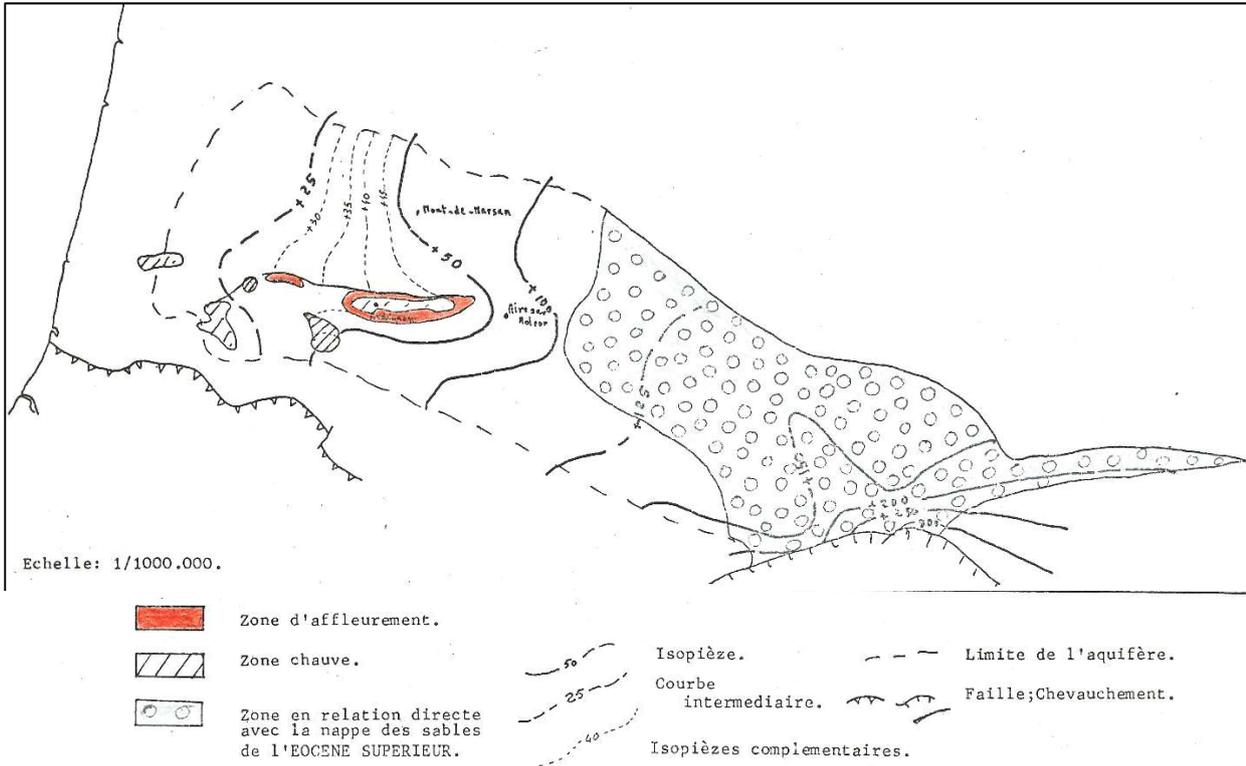


Illustration 52 - Piézométrie de la nappe du Paléocène (Guingand et Roullin, 1978)

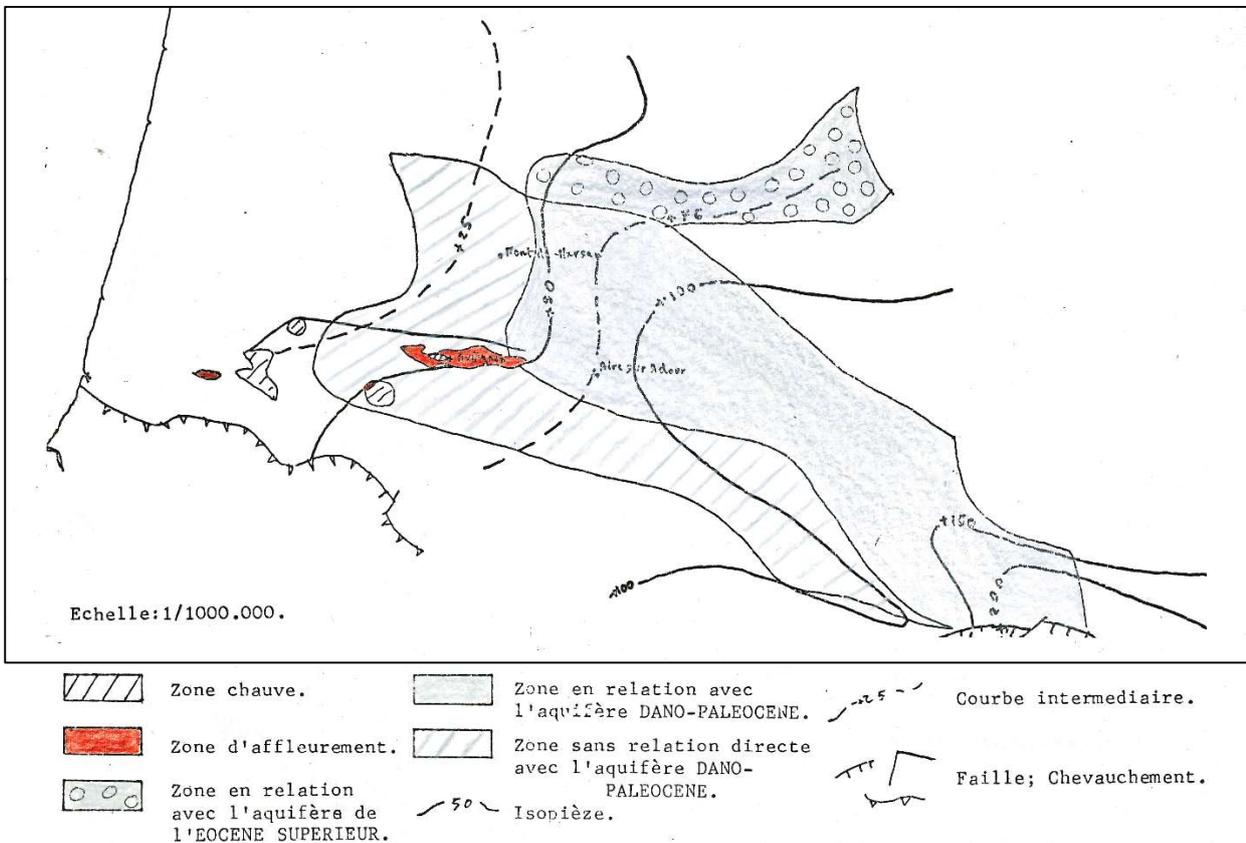


Illustration 53 - Piézométrie de la nappe du Crétacé supérieur (Guingand et Roullin, 1978)

Les exutoires de ces nappes, au-delà de ce que pourraient représenter ponctuellement les accidents structuraux, se situeraient plus à l'ouest et au nord. Les hypothèses souvent mises en avant correspondent à l'Océan atlantique et au compartiment nord du Bassin aquitain.

- Les cartes piézométriques établies pour la structure anticlinale montrent que les isopièzes suivent la topographie (Guingand et Roullin, 1978 ; Fiquet et Armand, 2000). Ainsi, la piézométrie de nappe captive passe, à Audignon, à une piézométrie de nappe libre, mettant en évidence la recharge locale, pouvant s'opérer sur la structure elle-même, par infiltration directe de l'eau de pluie. L'analyse des chroniques de débits de la source du Marseillon et de piézométrie du forage agricole F3 d'Audignon montre le rôle important que joue la pluie dans les écoulements. Armand et al. (1993) indiquent que ce rôle se décompose en une réaction rapide (3 jours), atténuée par la forte inertie de la nappe, à mettre en relation avec les formations superficielles voisines de l'exutoire et les calcaires fortement karstiques contenant la nappe libre. L'infiltration et les écoulements peuvent être également retardés par les nombreux placages de sables fauves, présents sur la structure, au droit des aquifères.
- Les formations du Crétacé et du Paléocène montrent également des liens étroits avec le réseau hydrographique, au droit de la structure anticlinale. Celle-ci est en effet parcourue par plusieurs cours d'eau, qui la traversent du sud-est au nord-ouest, pour rejoindre le fleuve Adour (Illustration 54). À l'ouest, seule la Gouaougue se jette dans le Louts. Le Bahus, à l'est, puis vers l'ouest, le Gabas, le Laudon et enfin la Gouaougue ruissellent sur les marnes et molasses éocènes à miocènes, puis traversent les formations calcaires du Paléocène et/ou du Crétacé. Dans la partie méridionale de la structure, ces cours d'eau se retrouvent en position haute par rapport à la piézométrie des nappes, indiquant alors des pertes possibles de ces cours d'eau au profit des nappes (Fiquet et Armand, 2000). Dans la partie septentrionale, les tronçons aval des cours d'eau constitueraient au contraire des zones d'exutoires des nappes, celles-ci étant alors drainées par le réseau hydrographique. Ce comportement double a été étudié plus spécifiquement avec le Bahus et le Gabas, où des jaugeages différentiels et des analyses hydro-chimiques ont mis en évidence ces pertes, puis ces résurgences, suivant les tronçons de ces cours d'eau, à leur traversée de la structure d'Audignon (Armand, 1994 ; Lachassagne et al., 1998 ; Labat, 1998). Certains de ces cours d'eau ont un régime influencé par des barrages, qui vont atténuer les débits de hautes eaux lors de leur remplissage et soutenir les débits de basses eaux. C'est le cas des cours d'eau du Laudon, du Bas et du Gabas, qui subissent la gestion des barrages respectivement d'Hagetmau-Monségur (Landes - Briand, 2014), de Coudures (Landes) et de quatre communes des Pyrénées-Atlantiques et Hautes-Pyrénées (Comité français des Barrages et Réservoirs, 2019). De plus, certains forages prélevés pour l'irrigation relarguent une partie de leur eau dans le Laudon : c'est le cas des forages d'Audignon (09782X0016/F3) et de Lannebourdes à Sainte-Colombe (09782X0019/F). Enfin, il existe divers affluents pour ces cours d'eau, dont beaucoup correspondent à des cours d'eau temporaires, situés principalement au cœur de l'anticlinal.

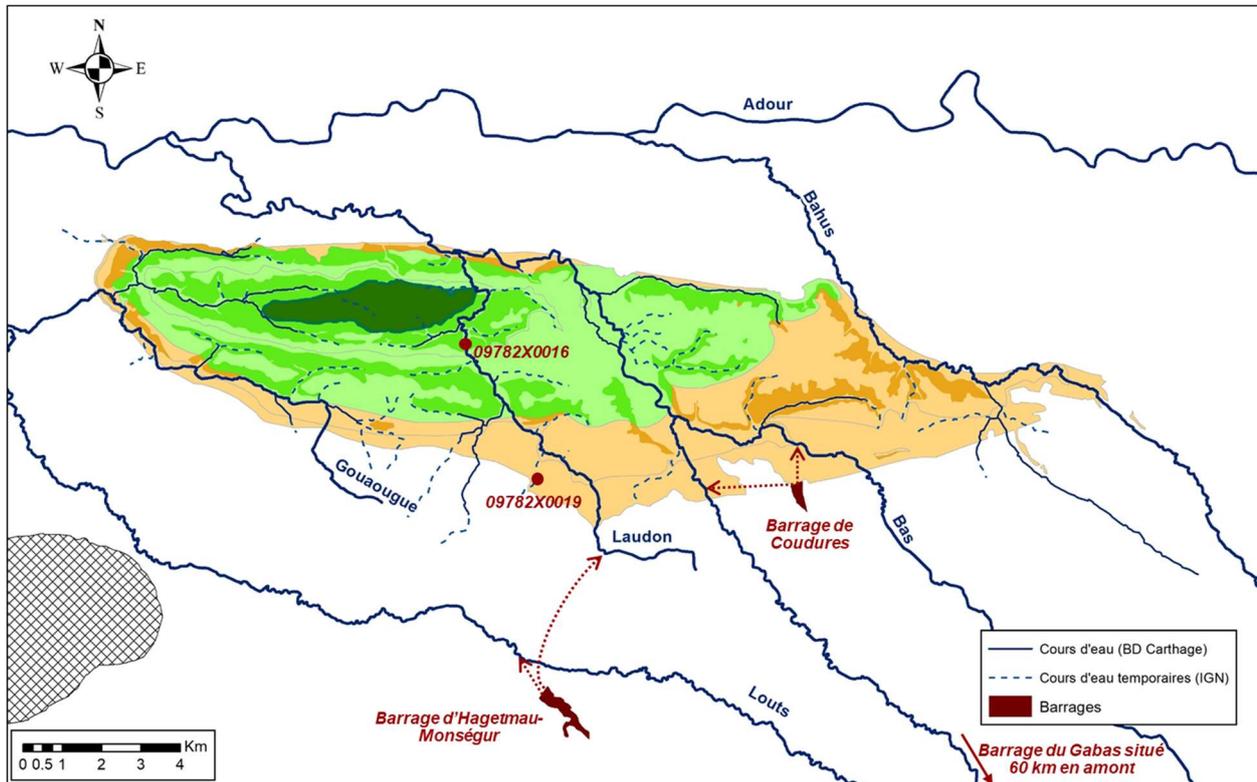


Illustration 54 - Réseau hydrographique et influence anthropique des écoulements de surface, au droit de la structure anticlinale d'Audignon

L'approche systémique utilisée pour l'aquifère nord-pyrénéen (aquifères du Crétacé, du Paléocène et de l'Eocène inférieur), appliquée à l'anticlinal d'Audignon (Armand et al., 1993), synthétise le schéma de fonctionnement suivant (Illustration 55) :

- une alimentation principale constituée par les nappes du Crétacé et du Paléocène (par communication et drainance avec les autres nappes (peut-être celle des sables infra-molassiques), à la faveur de zones de fractures ou de niveaux plus ou moins perméables ;
- une alimentation secondaire par infiltration directe, au droit de la structure anticlinale, dans les zones d'affleurement du Crétacé et du Paléocène ou par pertes au sein du réseau hydrographique ;
- des sorties de nappes nombreuses, que ce soit les exutoires naturels (sources et drainage du réseau hydrographique), les prélèvements artificiels (besoins pour AEP et irrigation) ou, principalement, les écoulements vers d'autres nappes.

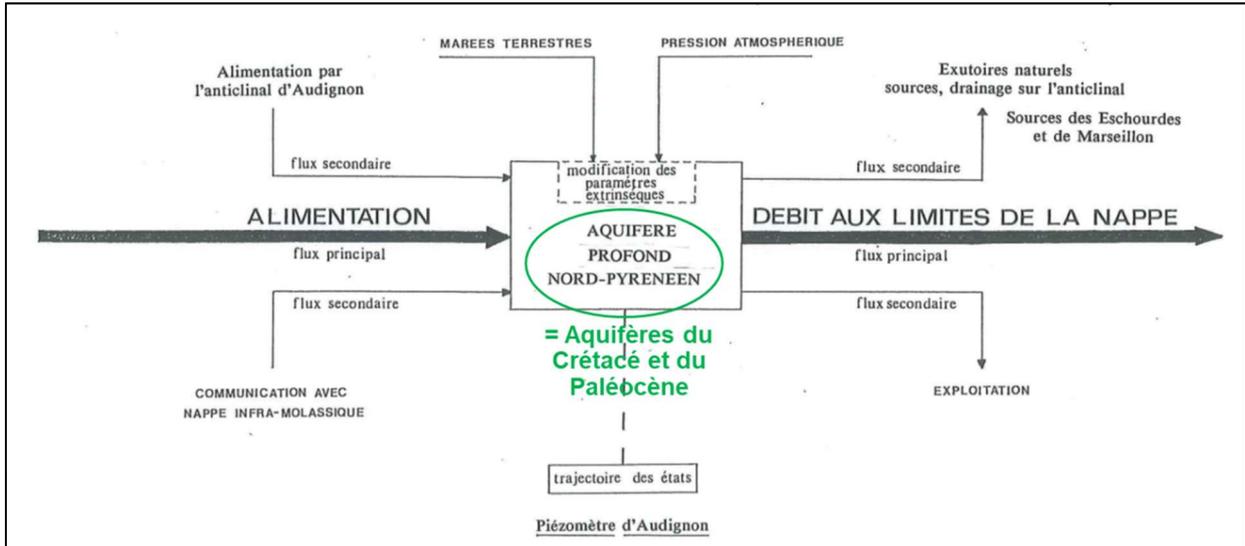


Illustration 55 - Représentation du système aquifère nord-pyrénéen, au niveau de la structure anticlinale d'Audignon (Armand et al., 1993)

Ce comportement double d'exutoire et de recharge se révèle, d'un point de vue géochimique, par les mélanges d'eaux observés dans certains des ouvrages de la structure d'Audignon, par différents auteurs :

- Blavoux (1986 ; 1991) et Pouchan (1986) identifient, à partir des propriétés physico-chimiques de l'eau (suivis des températures, de la conductivité, des ions majeurs, ...) puis isotopiques (3H, 2H, 18O), la notion de mélange d'eaux jeunes et d'eaux anciennes, au niveau des sources de Marseillon et de Peyradère, ainsi que du forage artésien de Labarthe (à l'est de la structure). Si, pour l'un, ces ouvrages montrent une alimentation pour l'essentiel locale ; pour l'autre, leurs débits sont soutenus en grande majorité par un important réservoir amont, profond, relevant soit de l'aquifère du Crétacé, soit de l'aquifère des sables infra-molassiques (ou SIM) présents plus à l'est (le Crétacé étant alors dans ce cas un aquifère relai) ;
- Bourguine et al. (1997) confirment également le rôle de la structure d'Audignon dans la recharge potentielle du Paléocène, en analysant les activités en tritium et carbone 14 de quelques ouvrages supplémentaires ;
- Fiquet et Armand (2000), puis Briand (2014), au travers des concentrations de nitrates observées dans différents ouvrages de la structure, montrent le rôle de la recharge locale des aquifères, qui s'opère dans la structure. Les valeurs parfois élevées dans les ouvrages (plusieurs dizaines de mg/l) témoignent en effet de contaminations locales ;
- L'utilisation des données isotopiques a été particulièrement mise en œuvre jusqu'ici, en raison de la difficulté de dissocier, d'un point de vue de faciès chimique, les aquifères du Crétacé et du Paléocène (Armand et al., 1993 ; Bourguine et al., 1997).

À ce fonctionnement général de nappes régionales inertielles, en lien avec les milieux superficiels, se surimpose, au droit de la structure anticlinale d'Audignon, un fonctionnement hydrologique karstique, dont l'expression, en surface et en profondeur, se traduit par des variations rapides de débits dans les sources, des transferts rapides intra-karsts associés à des anomalies de physico-chimie (température, turbidité) et des contaminants. La karstification de ces formations est observable dans les coupes de forages et au travers de manifestations karstiques en surface (dolines, avens, vallées sèches, ...). D'un point de vue hydrodynamique, elle se révèle dans différents ouvrages autour de la structure, via différents exemples :

- Des problèmes de vulnérabilité de certains captages sont apparus, depuis une trentaine d'années, en lien avec cette karstification. C'est le cas notamment de la source exploitée du Marseillon, qui présente des pollutions de surface et des survenues de turbidité rendant difficile sa gestion pour l'alimentation en eau potable (cf chapitre 3.1.2) ;
- Les ouvrages AEP de la commune de Maylis sont également confrontés à des épisodes récurrents de turbidité, ainsi qu'à la survenue de nitrates, ayant entraîné un abandon de ces forages par l'exploitant. Pourtant, les ouvrages Maylis - Sourigues (09781X0013/F) et Maylis - Lacrouts (09781X0015/P219) sont profonds puisqu'ils captent les formations paléocènes, respectivement de 80 à 180 m et de 307 à 551 m, donc à des profondeurs favorisant leur protection vis-à-vis d'intrants de surface. Ces mêmes forages présentent également des caractéristiques physico-chimiques, qui traduisent une influence d'eau d'origine superficielle, relativement proche, dans la nappe captée (Fiquet et Armand, 2000). Pour ces auteurs, ces anomalies s'expliquent par une recharge préférentielle de la nappe dans la vallée de la Gouaougue, voire du Laudon, en lien avec des calcaires sub-affleurants, une zone intensément fracturée, de nombreux indices de karstification et un niveau piézométrique de la nappe plus bas que la rivière. Ces eaux superficielles alimenteraient alors la nappe : les eaux sont froides et chargées en nitrates. Les circulations de type karstique sont trop rapides pour que la température s'élève. Ces circulations alimentent les forages de Maylis 1 et de Maylis 2. L'analyse des variations piézométriques a montré que celles-ci étaient en partie liées aux précipitations au droit de l'anticlinal : ces dernières constituent donc la recharge de la nappe. Les temps de réaction observés sont de l'ordre de 4 à 5 jours, dans le forage de Maylis - Sourigues. Ce résultat est comparable aux estimations effectuées dans la source du Marseillon, pour laquelle le temps de réaction aux épisodes pluvieux est évalué à 3 jours (Armand et al., 1993) ;
- Le lit de certains cours d'eau montre des formations carbonatées karstifiées. C'est le cas notamment du Laudon, où le calcaire est visible sur un linéaire d'une trentaine de mètres, mais ne présente pas une karstification très développée (Illustration 56), et du Gabas (Briand, 2014), non reconnu sur le terrain dans le cadre de ce projet. Ces affleurements favoriseraient les échanges avec le milieu souterrain, à l'origine éventuellement de problèmes de contaminations de la source du Marseillon.

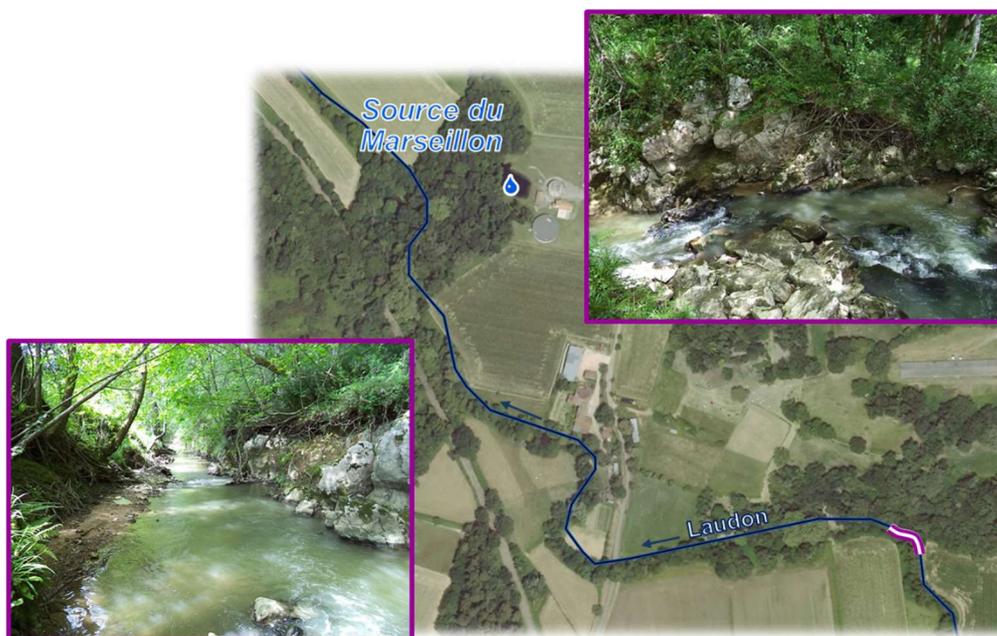


Illustration 56 - Localisation des affleurements karstiques connus dans le lit du Laudon (localisation générale visible sur l'illustration 50) : 440 m à vol d'oiseau séparent ces affleurements de la source

3.1.2. Source du Marseillon

La source du Marseillon illustre à elle seule la composante karstique, qui existe dans la structure anticlinale. Il s'agit d'une résurgence naturelle, située sur le flanc nord de l'anticlinal et captée, depuis la Seconde guerre mondiale, pour l'alimentation en eau potable grâce à plusieurs ouvrages.

Son débit n'a été suivi, en continu, que pendant une courte période : cette source a en effet été équipée d'une station de mesure, positionnée à 350 m de la résurgence, gérée par le Conseil Général des Landes et mise en fonctionnement en juillet 1988 (Illustration 57). Des données sont effectivement disponibles de janvier 2000 à décembre 2003, dans la *Banque hydro* (<http://www.hydro.eaufrance.fr/>). A cause de problèmes d'entretien et de végétation envahissante, cette station a été délaissée. De plus, la représentativité de la mesure n'était pas assurée en raison de la présence, à l'aval, d'un canal de moulin qui, en fonction de son ouverture, modifiait la ligne d'eau au niveau de la station (station « sans signification hydrologique » et données à l'état « provisoire » dans la *Banque hydro*). De même, cette station ne mesure pas uniquement le débit de la source : en effet, entre la source et la station, se déversent des eaux de ruissellement provenant d'un bassin versant adjacent et qui sont amenées par un système de buses (Illustration 60). En parallèle, des chroniques de débit incomplètes sont disponibles de juillet 1988 à novembre 1992 (Armand, 1994).

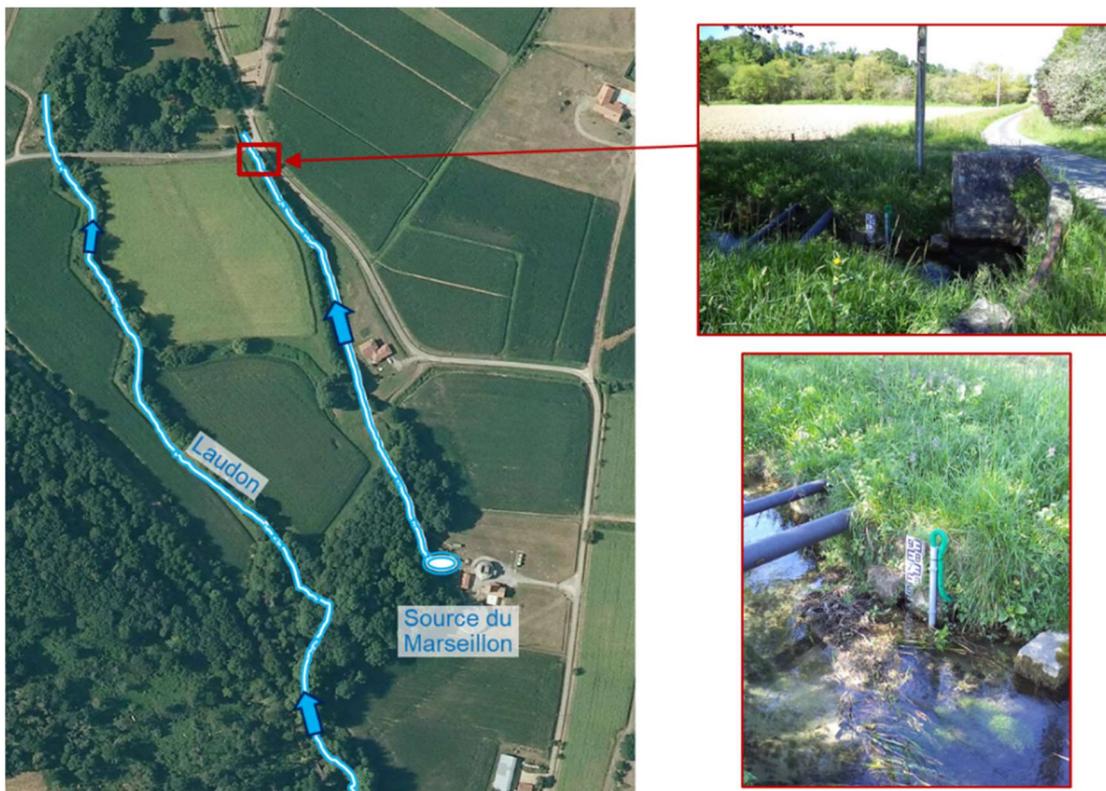


Illustration 57 - Station de jaugeage départementale

La station d'exploitation de la source comporte (Illustration 58) :

- les puits P1 (09782X0006/P1) et P2 (09782X0022/P2), de 3 m de profondeur, non utilisés,
- 1 ancien forage de reconnaissance F0 (09782X0023/F0), jamais exploité et rebouché en décembre 2013, pour cause d'effondrements,

- le forage F1 (09782X0024/F1), réalisé en 1991, qui capte le Crétacé de 22 à 100 m de profondeur,
- le forage F2 (09782X0025/F2), réalisé en 1993, qui capte le Crétacé de 24 à 35 m.

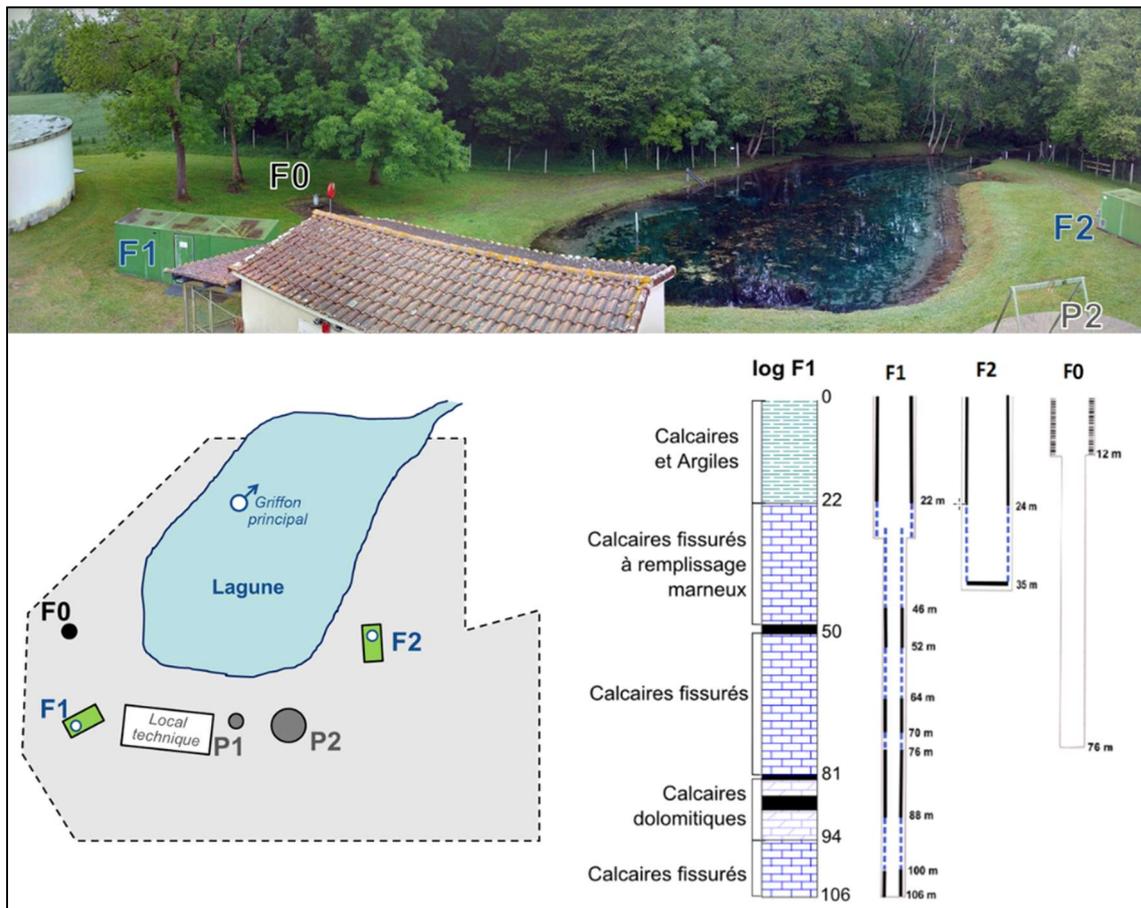


Illustration 58 - Plan schématique des ouvrages de la station d'exploitation du Marseillon et logs techniques des ouvrages d'exploitation et de l'ancien forage F0 (Briand, 2014)

La source n'est donc pas prélevée directement. Elle correspond aujourd'hui à une lagune de 500 m² avec un griffon principal et probablement quelques petits griffons secondaires. Les observations faites à l'œil nu ont montré que, depuis 3 ans, la forme du griffon principal a évolué. S'il n'apparaissait pas de conduit large visible jusqu'ici, mais davantage de petits affaissements en fond de lagune (Illustration 59), les techniciens du Syndicat ont observé, en mars 2018, un gros effondrement au niveau de l'œil principal. Un sondage bathymétrique réalisé dans la foulée par la DREAL Nouvelle-Aquitaine (Mont-de-Marsan) a montré que le conduit principal s'était effectivement agrandi. La profondeur sondée était d'un peu plus de 4 m sous le niveau d'eau, correspondant à 2 m supplémentaire par rapport à la cote moyenne du fond de la lagune. Depuis cette mesure, et notamment à l'été 2019, il apparaît à l'œil nu que ce conduit s'agrandit encore.



Illustration 59 - Photographies de la lagune à sec, en août 2012, obtenues du Syndicat

La source du Marseillon a fait l'objet de travaux spécifiques, dans le passé, en lien avec les problèmes de vulnérabilité qu'elle rencontre. La connaissance du fonctionnement hydrogéologique de la source a été abordée par différents auteurs, déjà évoqués précédemment, dont Pouchan (1986), Armand et al. (1993), Véolia (2013) et Briand (2014). Il apparaît que les eaux, qui ressortent au niveau de la source, montrent une composante profonde, associée à la décharge de l'aquifère du Crétacé et combinée aux infiltrations au droit des affleurements crétacés du cœur de l'anticlinal. Une composante rapide de l'écoulement est également reconnue, en lien avec la karstification. Cette dernière introduirait des problèmes de vulnérabilité que rencontre la source. Il arrive en effet que la ressource soit contaminée par de la turbidité, des coliformes, des pesticides.

Les problèmes de turbidité restent la difficulté principale pour la gestion de la ressource, puisqu'elle nécessite d'arrêter la production de la station de pompage, d'en assurer la purge et le nettoyage et de solliciter des ressources de substitution, engendrant ainsi des coûts supplémentaires. De 2006, année de reprise de l'exploitation par le SIEA Marseillon, à 2014, étaient constatées, sur le site de production du Marseillon, deux sortes de turbidité (SIEAM, communication personnelle 2018 - Illustration 60) :

- une « turbidité par débordement », qui survenait lorsque la lagune était inondée du fait du débordement du Laudon. Elle avait pour conséquence l'arrêt complet du forage F1 et le bridage de la production du forage F2, ce qui permettait de limiter les valeurs de turbidité de l'eau prélevée. Ce débordement résulte d'une montée très importante des eaux dans le lit du Laudon, de l'ordre de 3 à 4 mètres, au-dessus des berges, permettant un déversement direct dans la lagune située à 75 m. À cet endroit, le lit du cours d'eau est d'ailleurs situé sous le point d'émergence de la source. La source n'a pas de lien direct avec le Laudon, puisque la confluence, avec le cours d'eau auquel elle donne naissance, n'a lieu que 500 m à l'aval de la source ;
- une « turbidité d'orage », qui arrivait généralement en été, lorsque les niveaux d'eau dans la lagune étaient bas. À la suite de fortes précipitations, les eaux de ruissellement d'un petit

bassin versant, situé au nord de la station de pompage, sont en grande partie collectées par un système de fossés connectés entre eux. L'ensemble des eaux est ensuite dirigé artificiellement vers un point unique de déversement dans le cours d'eau issu de la source, à 115 m en aval de la station de pompage. La source donne en effet naissance à un petit cours d'eau, dénommé aussi localement Canal du Moulin, qui longe ensuite le Laudon avant de le rejoindre. La faible pente du Canal du Moulin et l'importante concentration des eaux, en cas de fortes pluies, permettent à ces eaux de remonter le cours d'eau et de se déverser dans la lagune, apportant alors les eaux boueuses du bassin versant. Cette turbidité impacte immédiatement le forage F2, qui est alors arrêté, tandis que le forage F1 peut continuer à être exploité tout en le bridant.

En décembre 2013, le forage F0 est rebouché. Depuis, divers problèmes sont arrivés. Les épisodes de turbidité dans les ouvrages, et principalement le forage F1, interviennent sans rapport avec les conditions hydrologiques. Dans le griffon de la lagune, des épisodes de turbidité arrivent également avant les épisodes de turbidité par débordement ou par remontée du Canal du Moulin.



Illustration 60 - Schéma conceptuel d'apparition de la turbidité, dans la source du Marseillon

La source du Marseillon montre également une tendance significative à l'augmentation des concentrations en nitrates, passant de 10 mg/L à la fin des années 1970, à 27 mg/L de nos jours. L'origine des nitrates a été recherchée par Briand (2014), à l'aide des outils isotopiques ($\delta^{15}\text{N-NO}_3$, $\delta^{18}\text{O-NO}_3$ et $\delta^{11}\text{B}$) et microbiologiques, permettant d'identifier une connexion hydraulique entre les eaux de surface et la source du Marseillon, favorisée pendant les épisodes de crues des eaux de surface.

3.2. OBJECTIFS A DEUX ECHELLES

Il apparaît, à l'issue de cet état des connaissances, que certains éléments de compréhension restent à préciser, aussi bien au niveau de la structure anticlinale, que de la source du Marseillon. Nous essaierons d'apporter des éléments de réponse aux questions suivantes, à ces deux échelles de travail :

a. Fonctionnement hydrogéologique de la structure anticlinale d'Audignon :

Quelles sont les modalités d'écoulement au sein de la structure ? Existe-t-il une continuité entre les réservoirs du Paléocène et du Crétacé ?

Quel est le rôle de la structure anticlinale dans l'hydrodynamisme local et régional ? S'agit-il d'une zone d'exutoire ou de recharge des nappes profondes ?

Comment se font les relations entre eaux de surface et eaux souterraines, en lien avec les spécificités karstiques de la structure ?

b. Fonctionnement hydrogéologique de la source du Marseillon :

Quel est le bassin d'alimentation de la source ?

Des pertes du Laudon au profit de la source sont-elles possibles ?

La turbidité peut-elle être liée à des infiltrations depuis le Laudon ?

3.3. EQUIPEMENTS

Afin d'aborder ces différentes problématiques, un inventaire des ouvrages accessibles aux mesures piézométriques et physico-chimiques est réalisé. De même, les différents suivis, disponibles à l'échelle de la structure d'Audignon, et les équipements complémentaires, mis en place dans le cadre de ce projet, sont répertoriés.

3.3.1. Données piézométriques à l'échelle de la structure

Trente-sept des ouvrages présents sur la structure anticlinale sont accessibles pour une mesure piézométrique (Illustration 61).

Quatre ne le sont pas, pour les raisons suivantes (Illustration 61) :

- Laheourère (09781X0008/F), à Montaut, est un ouvrage agricole exploité, mais qui ne dispose pas de tube guide-sonde ;
- F3 du Stade (09782X0008/F3), à Hagetmau, est exploité pour l'AEP par la Régie des Eaux d'Hagetmau. Il n'est pas accessible, mais le forage F4 (09782X0021/F4) peut le remplacer puisqu'il capte la même nappe et n'est distant que de 30 m ;
- Lartigue (09782X0020/F), à Sainte-Colombe, est un forage agricole exploité, mais qui ne dispose pas de tube guide-sonde ;
- Le Bas - Taulade (09783X0025/F2), à Sarraziet, est un forage agricole exploité, ne disposant pas de tube guide-sonde, mais pouvant être remplacé par l'autre forage du Bas (09783X0018/F1) captant la même nappe et distant de 15 m.

Par ailleurs, 9 forages disposent de chroniques piézométriques continues, complétées dans le cadre des réseaux de suivi des nappes, par le Département des Landes (Illustration 61). Ces données, disponibles au pas de temps horaire, ont été mises à disposition par le Département (Illustration 62).

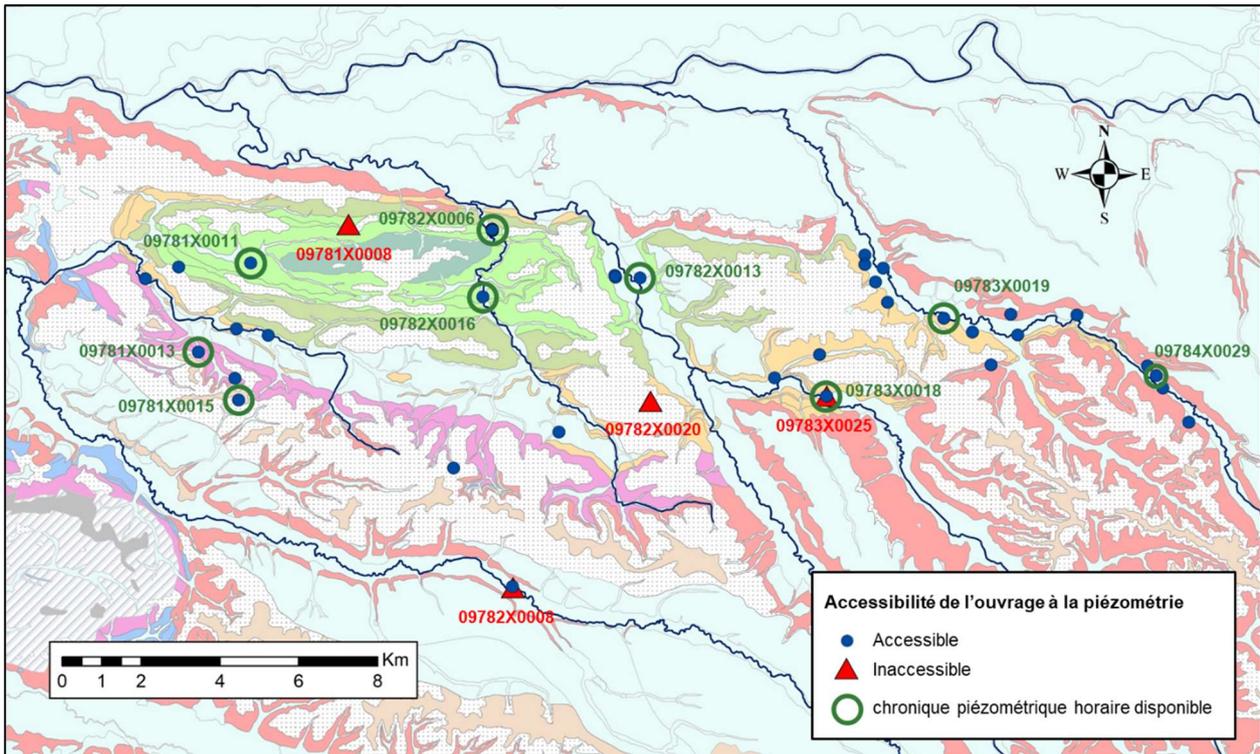


Illustration 61 - Carte des forages accessibles pour une mesure piézométrique et forages disposant d'une chronique de suivi continu (portail ADES)

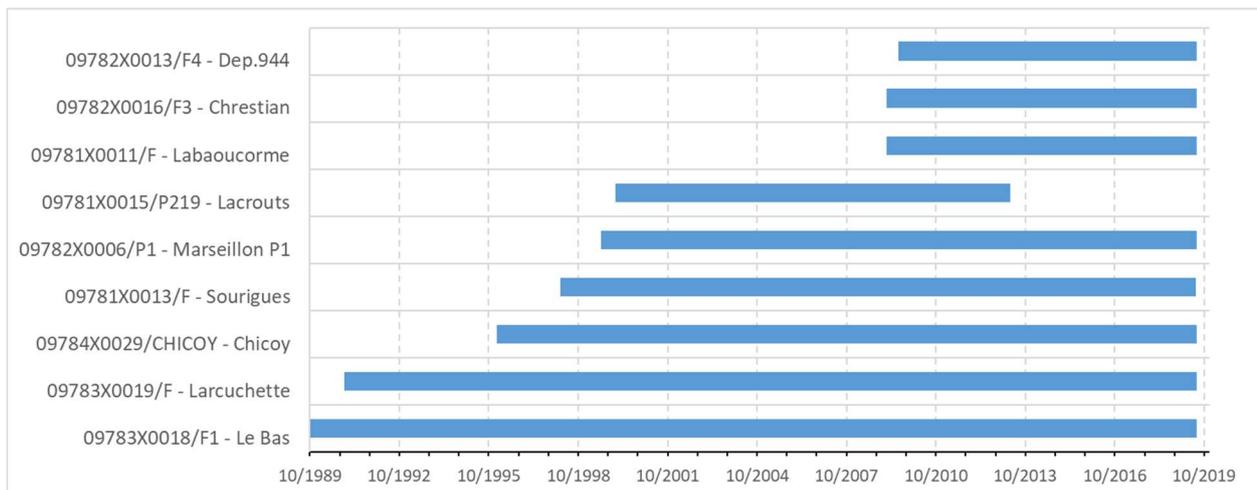


Illustration 62 - Périodes de temps couvertes par les suivis piézométriques horaires

3.3.2. Données physico-chimiques disponibles à l'échelle de la structure

Trente-six forages et quatre sources sont accessibles pour réaliser des prélèvements d'eau et peuvent, de ce fait, faire l'objet de prélèvements pour la physico-chimie de l'eau.

Cinq ne le sont pas, pour les raisons suivantes (Illustration 63) :

- Sourigues (09781X0013/F), à Maylis, est un ancien forage AEP, qui n'est plus exploité en raison de problèmes de turbidité. Il n'est pas prélevable ;
- Cassouret (09782X0027/F), à Horsarrieu, est un ancien forage AEP du Syndicat des Eaux du Marseillon. La pompe présente dans le forage n'est plus électrifiée ;
- F4 du Stade (09782X0021/F4), à Hagetmau, est remplacé par le forage F3 (09782X0008/F3) utilisé pour l'AEP par la Régie des Eaux ;
- Lartigue (09782X0020/F), à Sainte-Colombe, est un forage agricole exploité, mais ne dispose pas de vannes de prélèvement. L'accès a été refusé par son propriétaire ;
- Le Bas (09783X0018/F1), à Sarraziet, est utilisé en parallèle du 09783X0025/F2 captant la même nappe et distant de 15 m.

Par ailleurs, 13 forages et 2 sources font partie du réseau de suivi "qualité" du Département des Landes, dont les données sont accessibles sur le portail ADES (Illustration 63).

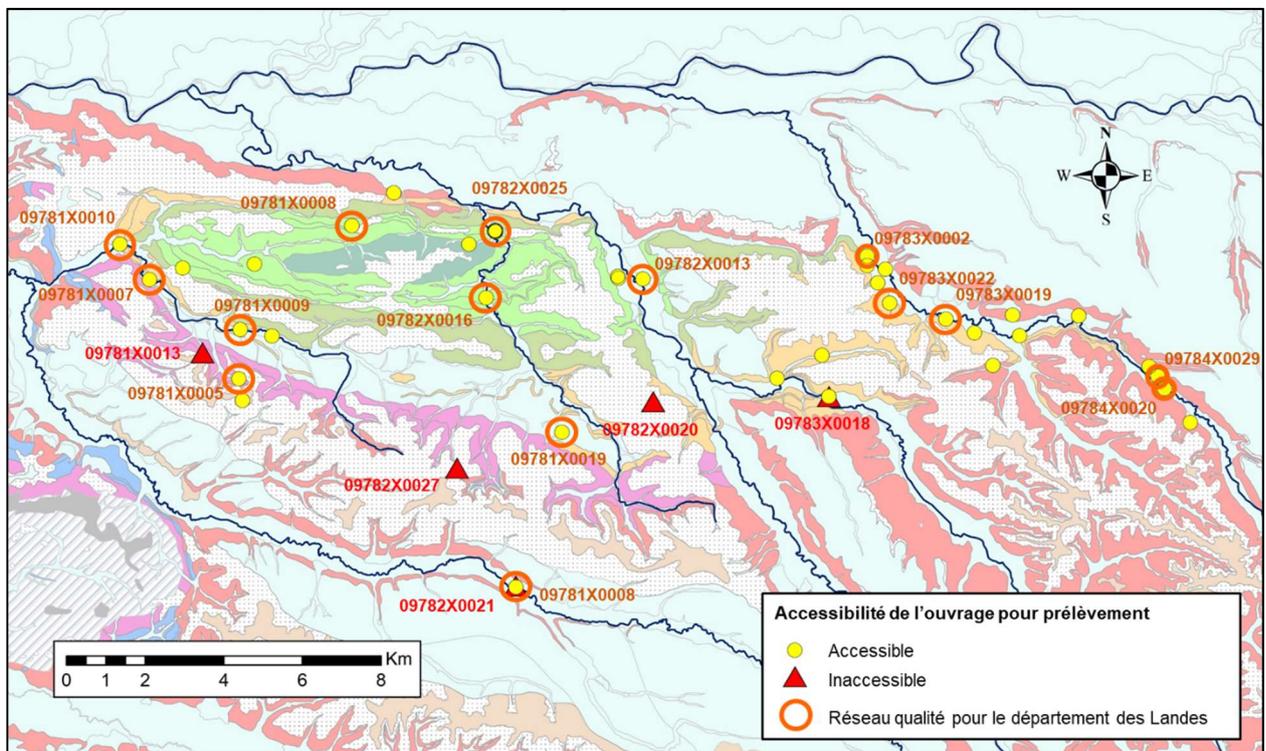


Illustration 63 - Carte des forages et sources accessibles pour une mesure physico-chimique et ouvrages intégrés au réseau "qualité" du Département des Landes (portail ADES)

3.3.3. Données climatiques

En l'absence de station climatique Météo-France à proximité de la structure anticlinale, la station la plus proche étant située à Mont-de-Marsan (20 km), les données climatiques sont récupérées à partir des ré-analyses SAFRAN, fournies par Météo-France, disponibles à l'échelle de la maille SAFRAN 8 km x 8 km pour l'ensemble du secteur d'étude. L'anticlinal d'Audignon est ainsi couvert par 8 mailles SAFRAN, disposant de pluies journalières, pour la période janvier 1958 - avril 2019 (Illustration 64).

En complément, un pluviomètre, existant sur le site du Marseillon, mais non utilisé, a été remis en service à la date du 15 décembre 2017. La comparaison de la chronique de ce pluviomètre

avec celle de sa maille SAFRAN permet d'observer la bonne correspondance globale, tant en phase qu'en amplitude, entre observations à la station et données de ré-analyse (Illustration 65).

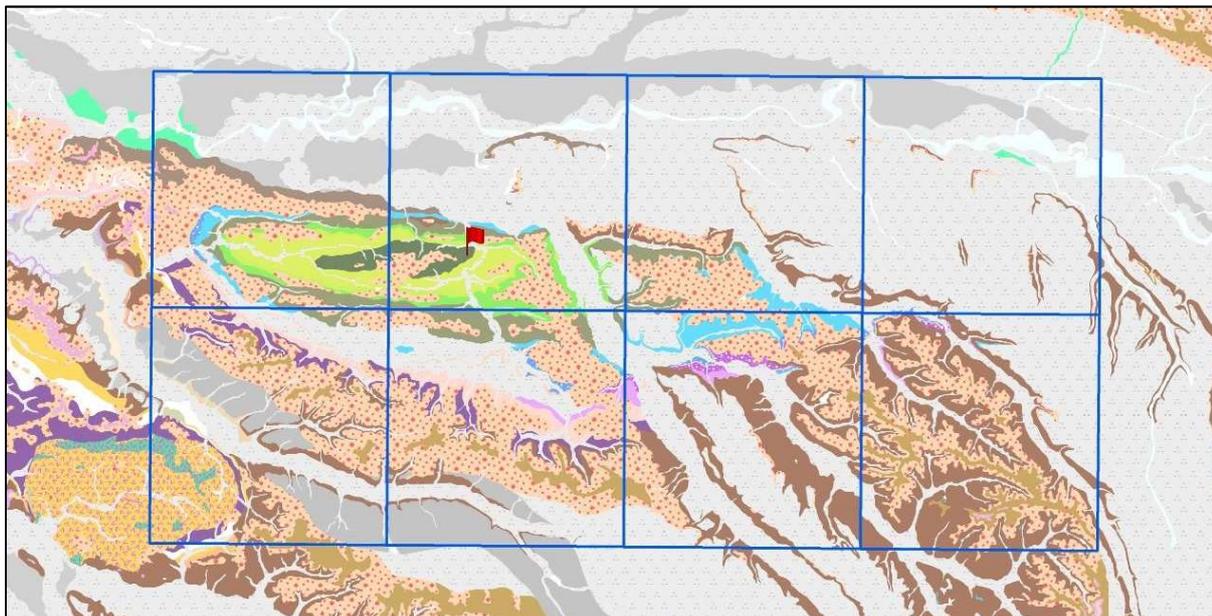


Illustration 64 - Localisation des mailles SAFRAN et de la station météorologique du Marseillon, sur l'anticlinal d'Audignon

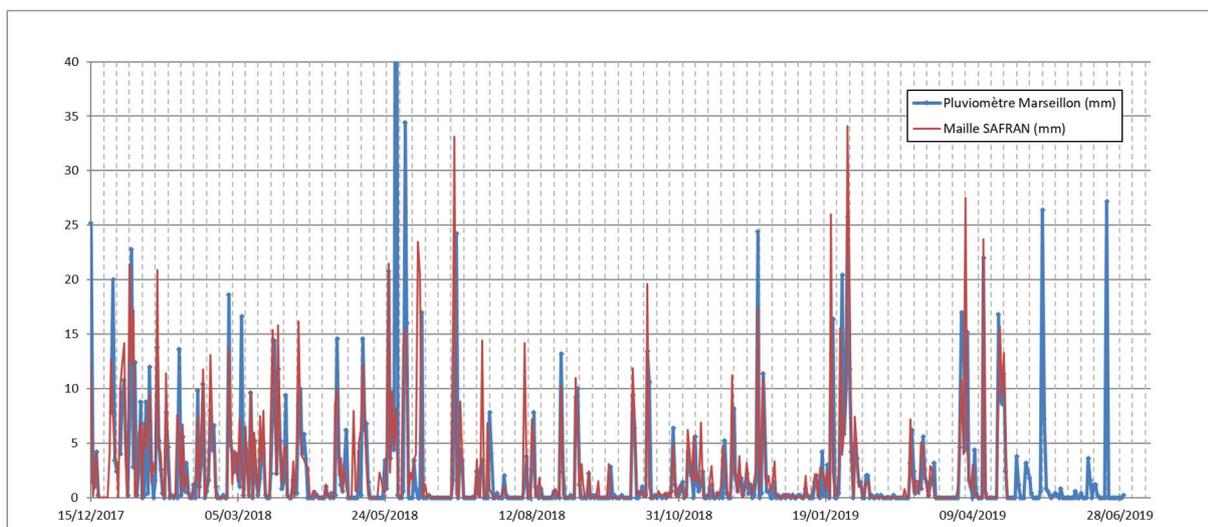


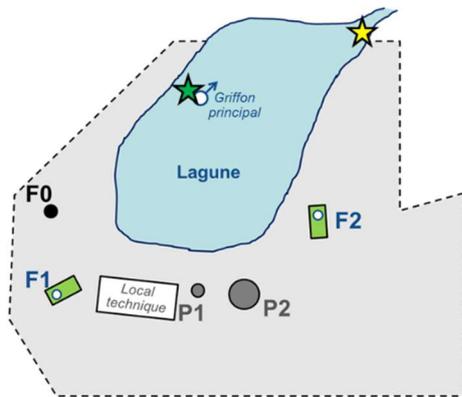
Illustration 65 - Comparaison de la pluviométrie journalière obtenue dans le pluviomètre, situé au Marseillon, avec celle de la maille SAFRAN correspondante

Quelques exceptions peuvent être notées, puisque des phénomènes orageux locaux sont parfois sous-estimés dans les données SAFRAN : c'est notamment le cas de l'orage survenu dans la nuit du 29 au 30 mai 2018, où la pluviométrie a atteint 20 mm à Mont-de-Marsan quand, dans le même temps, elle était de 74 mm à Audignon, d'après le pluviomètre, et de 13,1 mm, d'après la maille SAFRAN.

Cette bonne correspondance entre les deux chroniques permet de compléter celle de la maille SAFRAN, pour les mois de mai et juin 2019.

3.3.4. Attention particulière portée au système du Marseillon

Site de la source du Marseillon



Source	F1 et F2	P1
<p>★ Niveaux -> Débits BRGM : 15/11/2017 au 30/06/2019 SIEAM : depuis le 11/04/2018</p>	<p>Niveaux (SIEAM) Récupérés depuis le 01/01/2016</p>	<p>Niveau (CD40) Récupéré depuis 01/01/2016</p>
<p>Température ★ BRGM : 23/11/2017 au 17/06/2019 ★ SIEAM : depuis le 01/03/2018</p>	<p>Volumes prélevés journaliers récupérés depuis le 10/05/2017</p>	<p>Nitrates (CD40) Données horaires depuis le 01/01/2016</p>
<p>Conductivité ★ SIEAM : depuis le 12/04/2018</p>		
<p>Turbidité ★ BRGM : 23/11/2017 au 08/08/2019 ★ SIEAM : depuis le 12/04/2018</p>	<p>Turbidité (SIEAM) Récupérées depuis le 01/01/2016</p>	

Illustration 66 - Synthèse des suivis de haute fréquence (maximum journaliers) effectués sur le site du Marseillon

Les deux forages de production (**F1 et F2**) sont suivis, par le Syndicat des Eaux du Marseillon (SIEAM), avec des sondes de niveaux et de turbidité. Les prélèvements journaliers pour les besoins en eau potable sont également enregistrés. Il existe des mesures de température et de conductivité, mais dans les eaux après mélange. Ces mesures n'ont donc pas été utilisées.

La **source** elle-même ne faisait l'objet d'aucun suivi. Des sondes de température, niveau, turbidité et conductivité ont été mises en place (Illustration 67), en premier lieu par le BRGM, puis par le SIEAM. Les sondes de turbidité, température et conductivité du SIEAM ont été mises au cœur du griffon. Les sondes de turbidité, température, conductivité du BRGM ont été positionnées en sortie de lagune, de même que les sondes de niveaux des eaux suivis par les deux organismes.

Le **puits P1** est utilisé par le Département des Landes, pour le suivi des niveaux et des concentrations en nitrates de la source. Les données ont également été récupérées.

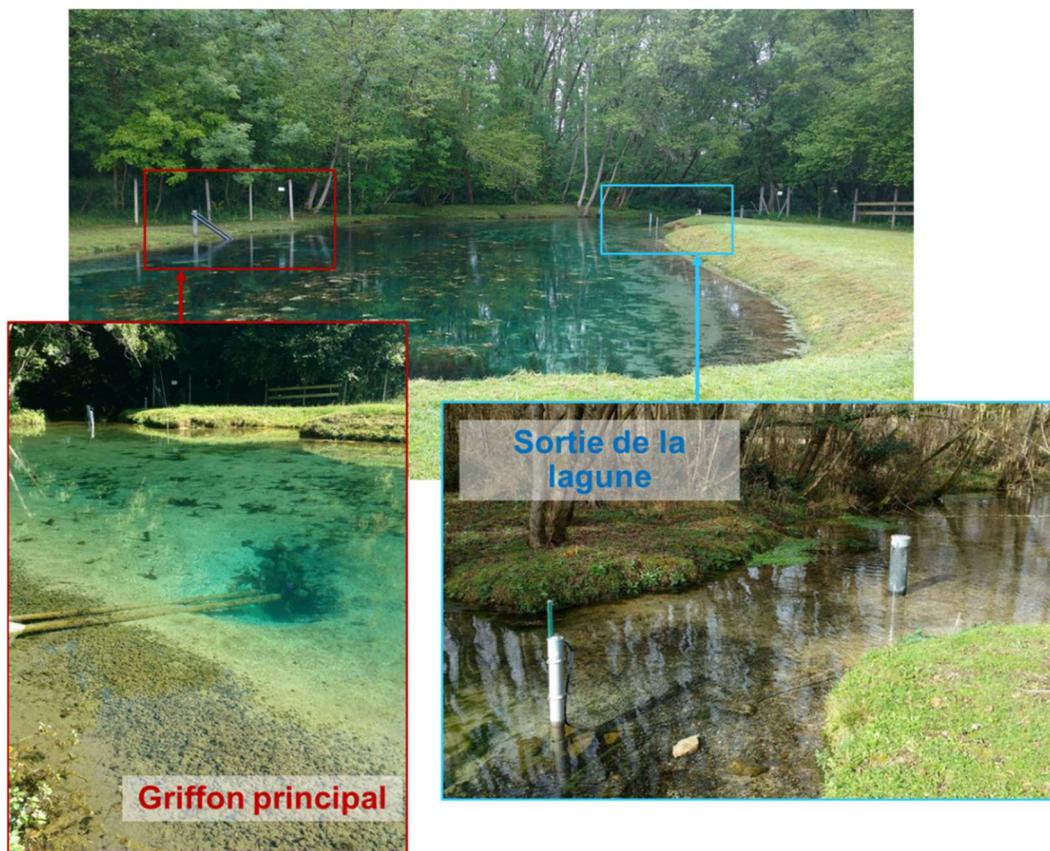


Illustration 67 - Instrumentation de la lagune

Afin de convertir les niveaux mesurés à la sortie de la source, en débits, une courbe de tarage (ou courbe de correspondance niveau/débit) a été réalisée (Illustration 68). Celle-ci s'appuie sur 26 mesures, faites entre décembre 2017 et août 2019. Les conditions hydrologiques rencontrées durant cette période n'ont pas engendré de valeurs extrêmes, notamment en très basses eaux. Les périodes d'assèchement, visibles en 2012 par exemple (Illustration 59), n'ont pas eu lieu. Afin d'avoir une courbe de tarage la plus représentative possible, les niveaux bas, apparaissant lorsqu'un forage est en route, ont été plusieurs fois jaugés.

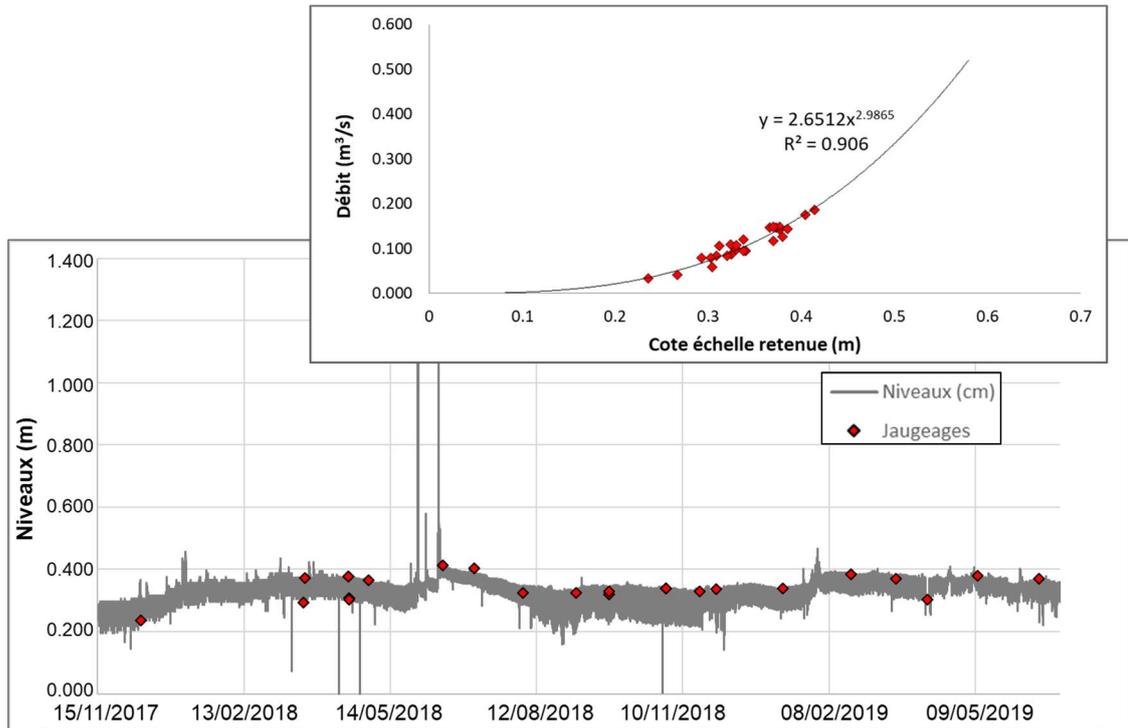


Illustration 68 - Courbe de tarage de la source du Marseillon et chronique piézométrique

Afin d'avoir une chronique la plus longue possible, il a été décidé d'utiliser les mesures réalisées dans le puits P1, pour évaluer les débits à la source (Illustration 69). En effet, les deux chroniques sont cohérentes entre elles, au cours de l'ensemble de la période où elles sont suivies. Cette cohérence s'explique par le fait que ce puits est installé dans un des griffons principaux de la source (Briand, 2014). Les amplitudes et réactivités ne sont pas strictement semblables, mais l'utilisation de la chronique piézométrique du P1 permet d'avoir un suivi des débits depuis le 04 août 1999.

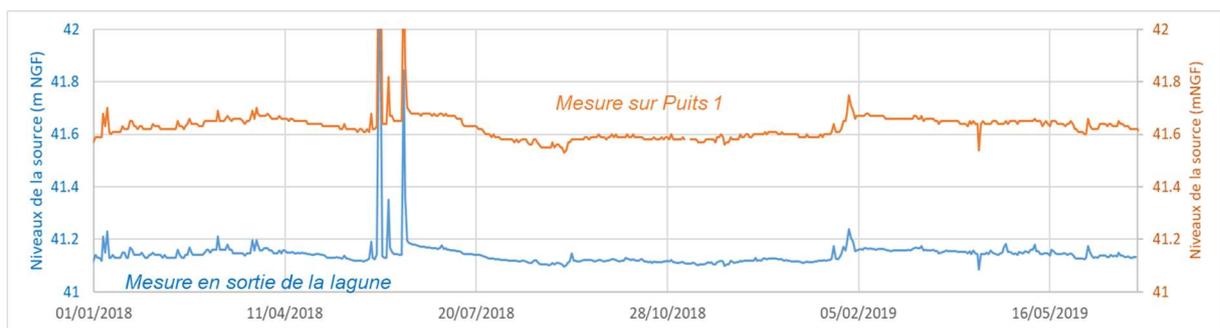


Illustration 69 - Comparaison des mesures de niveau de la source, en sortie de lagune, avec celles du P1

Site du Laudon

Le cours d'eau du Laudon, qui passe à proximité de la source, a également été équipé afin d'en suivre le débit, la température et la conductivité, pour essayer d'évaluer les liens possibles entre ce cours d'eau et la source. L'équipement a été mis en place au niveau d'un pont, situé à 300 m de la source (Illustration 70). Les capteurs restent en place à l'issue de ce travail : les données sont collectées par le Syndicat des Eaux du Marseillon et du Tursan. Des discussions sont en cours pour évaluer la possibilité de pérenniser cette station de mesures.

Ce point fait partie du réseau de suivi "qualité" du Département des Landes et fait l'objet de mesures de débit ponctuel, sans présence d'un équipement continu ni d'échelle limnimétrique.

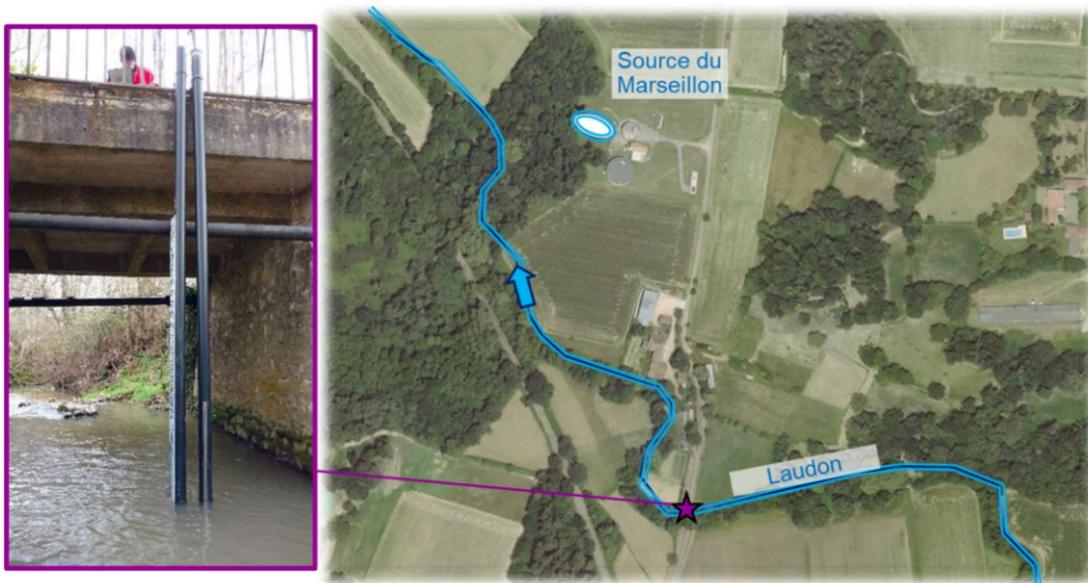


Illustration 70 - Equipement de suivi du Laudon

À l'instar de la source du Marseillon, une courbe de tarage a été établie, au niveau du pont, afin de convertir les suivis de hauteur du cours d'eau, en débit. Cette courbe (Illustration 71) repose sur 19 points de mesure réalisés par le BRGM, le Département des Landes et la DREAL pour les mesures hautes. Cette courbe n'est valide que pour des mesures comprises entre 0,39 et 0,69 m (soit 89 % des mesures effectuées au cours de la période entre le 15/11/2017 et le 06/08/2019).

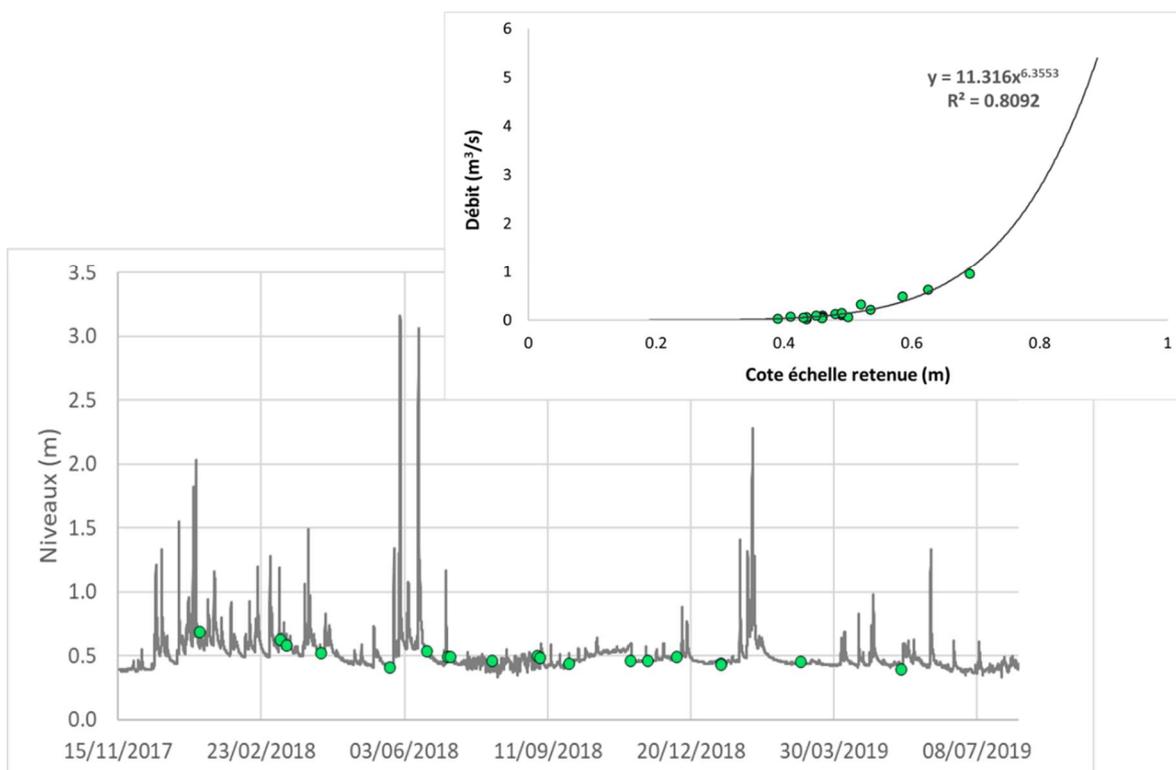


Illustration 71 - Courbe de tarage du Laudon, au niveau du pont, et chronique piézométrique

3.4. FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE GENERAL DES AQUIFERES PROFONDS AU NIVEAU DE LA STRUCTURE D'AUDIGNON

La compréhension du fonctionnement des aquifères, à l'échelle de la structure, est abordée par la combinaison de cartes piézométriques en hautes et basses eaux, ainsi que d'analyses physico-chimiques et de l'analyse de 2 chroniques (hydrométrique et piézométrique) de l'aquifère crétacé.

3.4.1. Cartes piézométriques en hautes et basses eaux des aquifères du Crétacé et du Paléocène de la structure anticlinale d'Audignon

Campagnes piézométriques

Deux campagnes piézométriques ont été réalisées en avril 2018 (période de hautes eaux) et septembre 2018 (basses eaux), afin d'évaluer les modalités d'écoulement au sein des aquifères du Crétacé et du Paléocène de la structure d'Audignon, au cours de deux périodes hydrologiques marquées (Illustration 72).

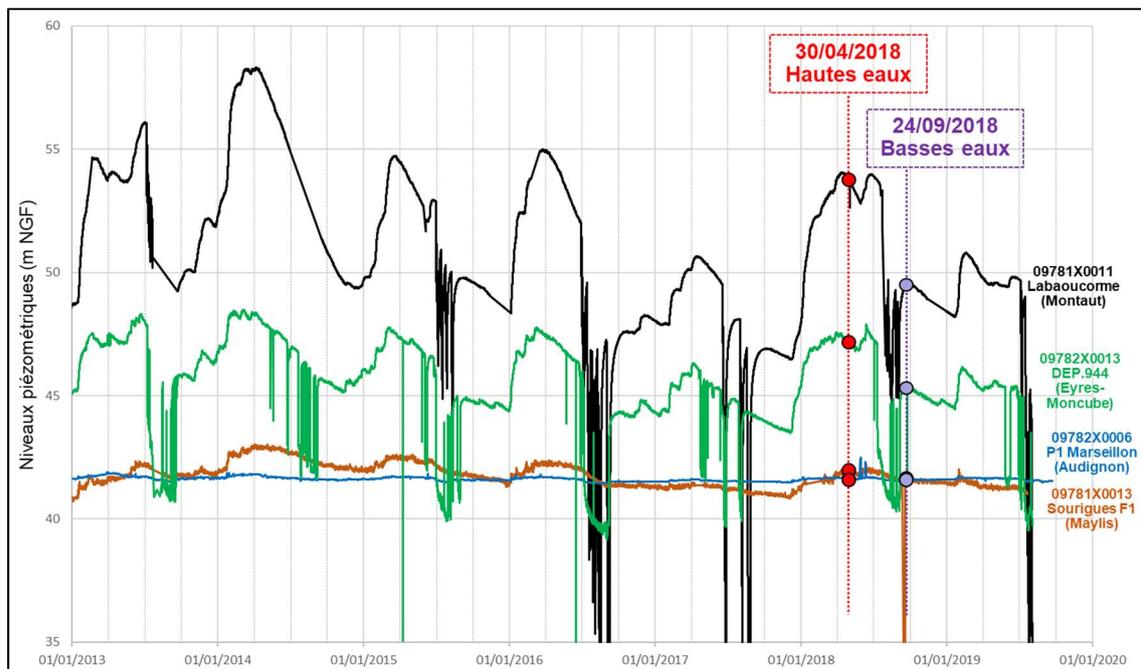


Illustration 72 - Positionnement des campagnes piézométriques par rapport au niveau des nappes

La campagne de hautes eaux a été réalisée à la fin du mois d'avril 2018. Le choix de cette période correspond à la disponibilité des ouvrages agricoles. En effet, pour pouvoir combiner cette campagne piézométrique à une campagne physico-chimique, les pompes doivent être alimentées en électricité pour pouvoir fonctionner. Or, les contrats d'électricité ne sont, pour certains, activés seulement que quelques mois dans l'année (vers mars pour les premiers). Pour cette campagne, 37 ouvrages ont fait l'objet d'une mesure manuelle (Illustration 74). En complément, les cotes d'émergence des 4 sources ont été considérées et une mesure, dans l'ouvrage 09784X0018 d'Eugénie-les-Bains, a été transmise par son exploitant (Chaîne Thermale du Soleil). Enfin, 2 ouvrages n'ont pu être mesurés en l'absence de tube guide-sonde.

Afin de contraindre les cartes piézométriques et en raison de leur position sur la structure anticlinale, il a été décidé de reprendre les mesures disponibles dans la bibliographie (niveaux statiques disponibles dans la Banque du Sous-Sol (BSS)).

Une mesure, réalisée dans l'ouvrage 09783X0038 (Lacoumatte à Sarraziet - Illustration 73) a finalement été retirée en raison des incertitudes concernant sa représentativité. Il s'agit d'un ancien ouvrage qui n'aurait jamais été exploité. Il avait été refermé par une plaque en métal, à même le sol, et recouvert de terre.



Illustration 73 - Ouvrage 09783X0038 (Lacoumatte à Sarraziet)

La campagne de basses eaux a été réalisée à la fin du mois de septembre 2018. Cette période correspond à la fin de la période d'irrigation, bien visible chaque année sur les chroniques de suivis piézométriques, avec des chutes de niveaux marquées. Il ne s'agit pas de la période de plus basses eaux mais, tout comme la campagne de hautes eaux, il a été nécessaire de pouvoir disposer d'un maximum d'ouvrages pour les mesures physico-chimiques et donc de ne pas attendre trop longtemps après la fin de la période d'irrigation.

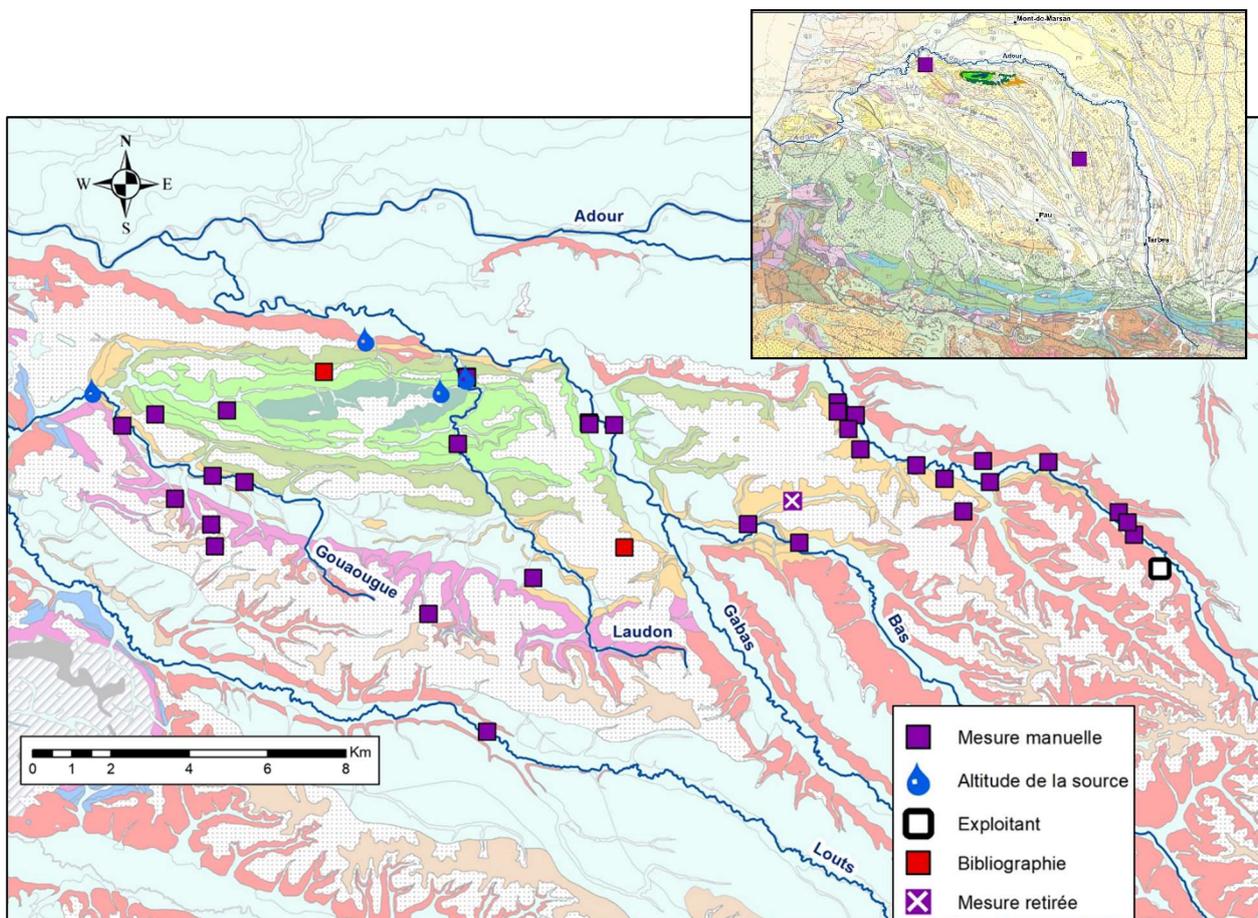


Illustration 74 - Origine des mesures piézométriques utilisées pour les campagnes piézométriques

Réalisation des cartes

Pour l'élaboration des cartes piézométriques, les deux ensembles aquifères du Paléocène et du Crétacé ont été regroupés. Les informations géologiques ne permettent pas en effet de statuer sur le caractère imperméable de la couche de Dumes, à l'ouest de la structure (cf chapitre 2.1.2). De plus, il n'existe pas non plus de piézomètres d'observation dans les deux aquifères et au même endroit pour constater des écarts de niveaux entre les deux aquifères, nécessitant de devoir les considérer comme distincts.

Les limites des réservoirs autour de l'anticlinal sont reprises du modèle géologique. Elles reprennent la présence de la faille, sur le flanc nord, qui délimite un compartiment méridional, sur lequel se trouve l'anticlinal, déconnecté du compartiment septentrional. Ces limites intègrent également l'absence de réservoir au droit du dôme de Bastennes-Gaujacq, au sud-ouest de l'anticlinal.

Par ailleurs, le réseau hydrographique apparaît, au nord de la structure, comme drainant les réservoirs. En l'absence de jaugeages différentiels effectués le long de ces cours d'eau, ce constat, évoqué dans certains travaux concernant le Bahus (Armand et al., 1993 ; Labat, 1998), apparaît lorsque l'on croise le MNT à 5 m avec la piézométrie des réservoirs : les principales vallées montrent alors des relations étroites avec les nappes. Ceci se confirme également par l'artésianisme de 3 ouvrages, situés dans la vallée du Bahus, en aval de la commune de Bahus-Juzanx, observé lors des différentes campagnes de terrain -le propriétaire d'un ouvrage précisant notamment que son puits était artésien toute l'année sauf cas exceptionnel. De même, la présence, à l'ouest et au nord de la structure d'Audignon, des sources de Peyradère, Saint-Vincent et Marseillon semblent indiquer la vidange de ces réservoirs, dans ces secteurs. Ainsi, pour contraindre les cartes piézométriques, il a été décidé de prendre en compte les altitudes du réseau hydrographique dans la partie aval des cours d'eau, lorsqu'ils traversent la structure.

Interprétation

Les cartes piézométriques réalisées en hautes eaux (Illustration 75) et basses eaux (Illustration 76) montrent globalement le même schéma de fonctionnement, conditionné par la présence de la faille au nord de la structure et le cœur albien imperméable de l'anticlinal. Les points suivants peuvent être mis en évidence :

- un gradient général des nappes, depuis l'est / sud-est vers le nord et l'ouest, conditionné par les zones de mises en charge situées au niveau des Pyrénées ;
- dans la partie nord de la structure, une partie des écoulements de ces nappes se fait au profit du réseau hydrographique : les isopièzes montrent un drainage par les cours d'eau du Laudon, du Gabas et du Bahus, venant confirmer les jaugeages différentiels, effectués auparavant dans ce dernier, et les résurgences constatées en aval des tronçons traversant la structure (Armand et al., 1993 ; Labat, 1998) ;
- une partie des écoulements est restituée également au profit des sources : le Marseillon bénéficie en ce sens de l'écran imperméable que constitue le cœur albien de l'anticlinal qui permet de dévier et concentrer une partie des écoulements vers le nord ;
- à l'ouest, la source de Peyradère et la partie aval de la Gouaougue se trouvent dans un point bas. Elles semblent bénéficier essentiellement des écoulements provenant du nord-ouest de la structure.

En ce sens, l'anticlinal d'Audignon constitue, dans sa partie nord et ouest, une zone d'exutoire des nappes du Crétacé et du Paléocène.

Les cartes piézométriques mettent également en évidence le rôle de la structure anticlinale comme zone d'alimentation des réservoirs au travers de deux processus :

- des infiltrations dues aux précipitations tombant sur la structure anticlinale. Les eaux s'infiltrent soit de manière diffuse directement via les surfaces d'affleurement des aquifères ou au travers des nombreux placages de sables fauves, soit de façon concentrée via les quelques pertes et vallées sèches visibles en surface. En bordure du cœur albien, les isopièzes mettent en évidence qu'une zone de recharge apparaît au nord-ouest de la structure et vient participer aux écoulements au nord et à l'ouest. Au sud de l'Albien, une seconde zone de recharge conditionne également les écoulements. Cette seconde zone impose une recharge des aquifères vers le sud et, principalement en hautes eaux, une déviation des écoulements venant du sud-est vers le nord et le sud à proximité du Laudon ;
- des infiltrations directes via les cours d'eau. Déjà mises en évidence dans le Bahu (Armand et al., 1993 ; Labat, 1998), ces pertes apparaissent dans l'ensemble des cours d'eau prenant naissance en dehors de l'anticlinal et traversant la structure. Les cours d'eau, soutenus parfois par les lâchers de barrage (Briand, 2014), s'écoulent sur les marnes et molasses avant de traverser, plus en aval, l'anticlinal. Ils verraient alors une partie de leur débit diminuer au droit des réservoirs du Paléocène et du Crétacé : la piézométrie en effet plus basse de ces réservoirs, sur le flanc septentrional de l'anticlinal, favorise l'infiltration d'une partie des eaux fluviales. Ces pertes de cours d'eau conditionnent également les écoulements souterrains, puisqu'en imposant une charge hydraulique élevée, elles dévient une partie des eaux du Crétacé et du Paléocène provenant du sud-est vers l'ouest.

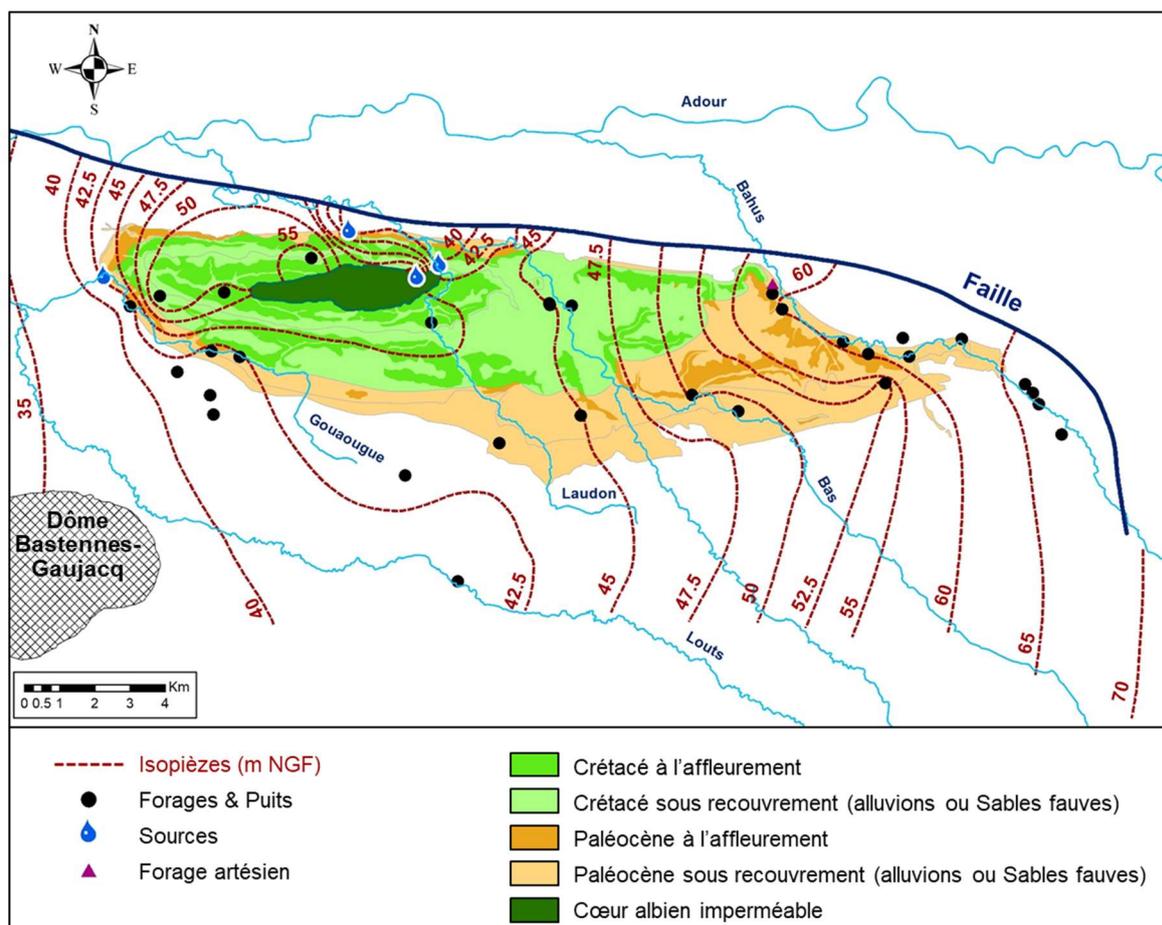


Illustration 75 - Carte piézométrique en basses eaux des aquifères du Crétacé et du Paléocène, de la structure anticlinale d'Audignon

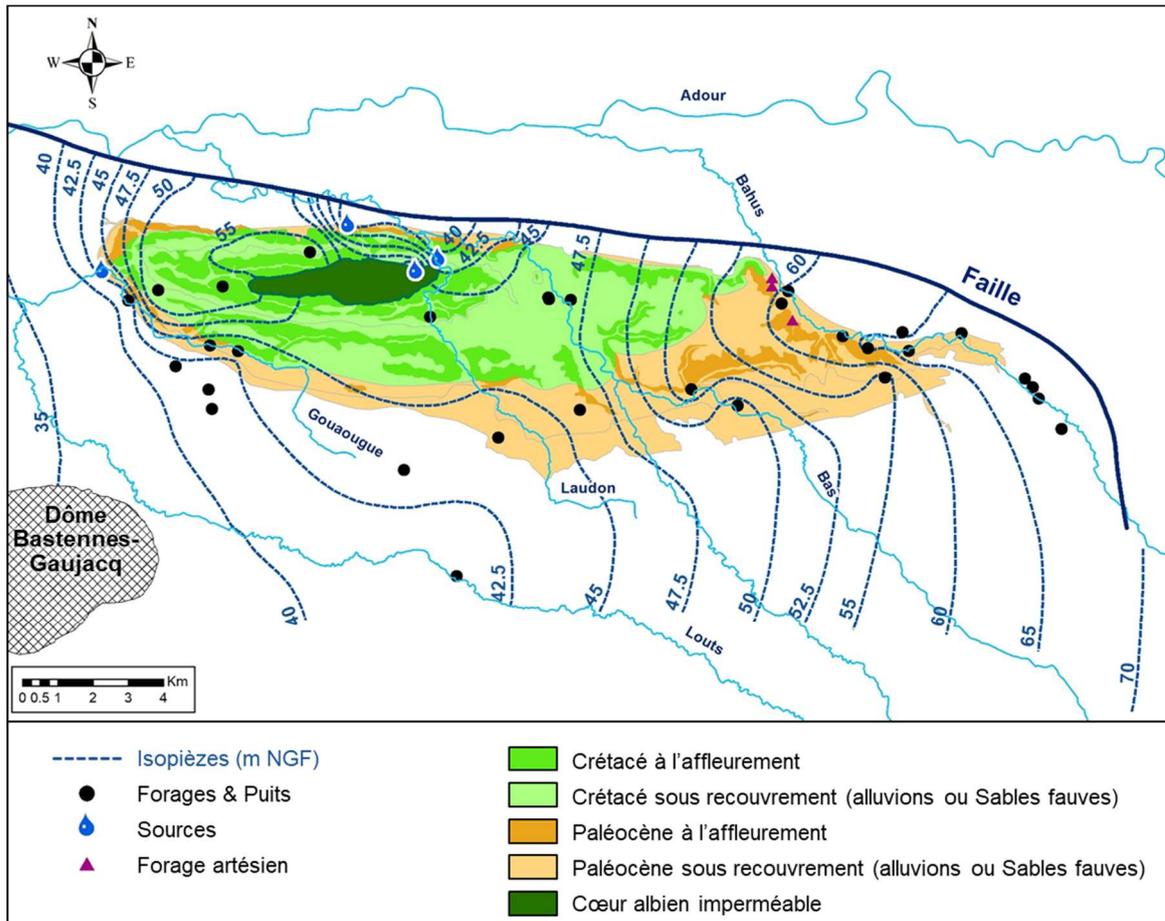


Illustration 76 - Carte piézométrique en hautes eaux des aquifères du Crétacé et du Paléocène, de la structure anticlinale d'Audignon

3.4.2. Caractérisations géochimique et isotopique de la zone d'étude

Des caractérisations géochimiques ont été réalisées dans le but de mieux comprendre les modalités d'écoulement des eaux au sein de la structure d'Audignon, de caractériser l'existence de mélange entre les réservoirs et d'appréhender les relations "eaux de surface / eaux souterraines", en lien avec les spécificités karstiques des calcaires crétacés et paléocènes de la structure anticlinale.

Campagnes de prélèvements des eaux souterraines

Trois campagnes physico-chimiques ont été réalisées en mars et mai 2018 (période de hautes eaux) et septembre 2018 (basses eaux) ; l'indication des dates des campagnes de prélèvement géochimique dans le contexte piézométrique de la zone d'étude est présenté sur l'illustration 77. Ces campagnes visaient à caractériser la composition en éléments majeurs, en éléments traces et en isotopes, d'eaux issues des forages sollicitant les principaux réservoirs (Crétacé, Paléocène, Paléocène profond, Eocène), mais aussi celles des principaux cours d'eau traversant la structure (Bas, Gabas et Loudon). Les résultats des analyses sont rassemblés dans les tableaux en annexe 3.

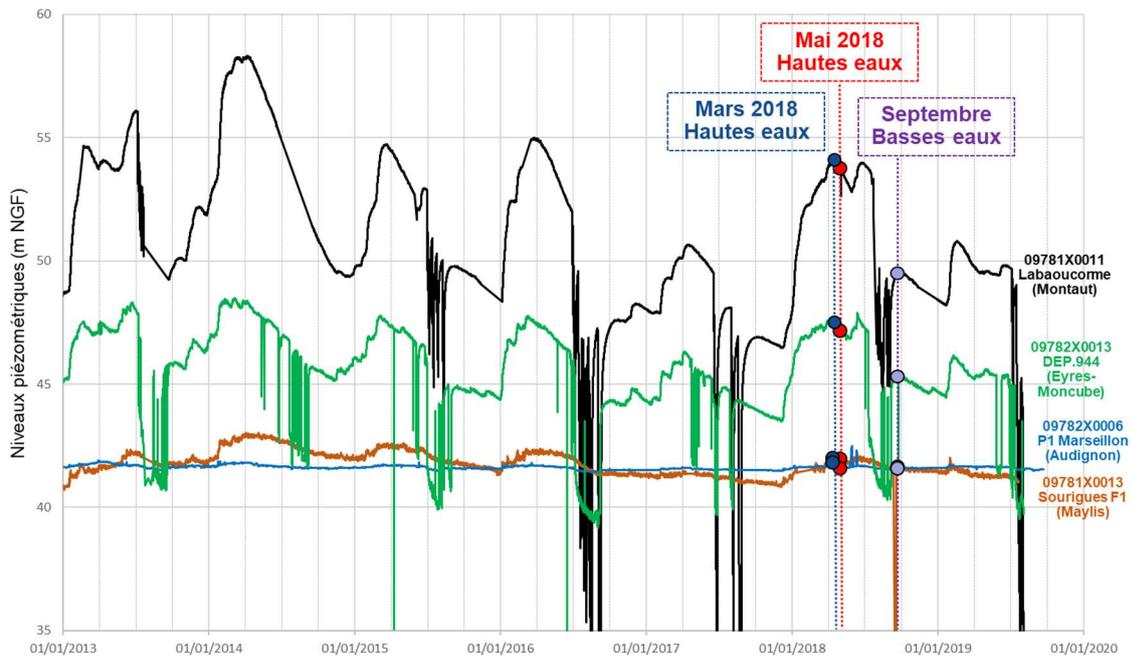


Illustration 77 - Indication des campagnes de prélèvement géochimique, dans le contexte piézométrique de la zone d'étude

Pour la campagne de hautes eaux de mars 2018, 5 ouvrages ont fait l'objet de prélèvements d'eau (Illustration 78). Cette première campagne, focalisée sur les eaux du réservoir crétacé, avait pour objectif de caractériser l'existence d'échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines, notamment à l'aide des isotopes du strontium. Les ouvrages de Daourat (09782X0011) et Chrestian à Audignon (09782X0016) et l'eau du forage F2 du site du Marseillon (09782X0025) ont été prélevés pour identifier les signatures géochimiques du réservoir crétacé. Les cours d'eau échantillonnés sont le Laudon et le Gabas.

La campagne de prélèvements des eaux, en période de hautes eaux, du mois de mai 2018, a été réalisée dans 26 ouvrages (Illustration 78). Elle a été menée conjointement avec le Département des Landes, qui échantillonne périodiquement 8 des ouvrages sélectionnés, dans le cadre de son réseau de surveillance de la qualité des eaux. Les analyses réalisées concernent les paramètres physico-chimiques, les ions majeurs (excepté les ions bicarbonatés en raison d'un problème d'analyse), quelques paramètres indicateurs de pollution tels que l'ammonium et les nitrites, le carbone organique dissous, ainsi que certains métaux. Les isotopes du carbone 13 du CMTD² ainsi que les isotopes stables de l'eau (¹⁸O/²H) sont également analysés lors de cette campagne.

² CMTD : Carbone Minéral Total Dissous

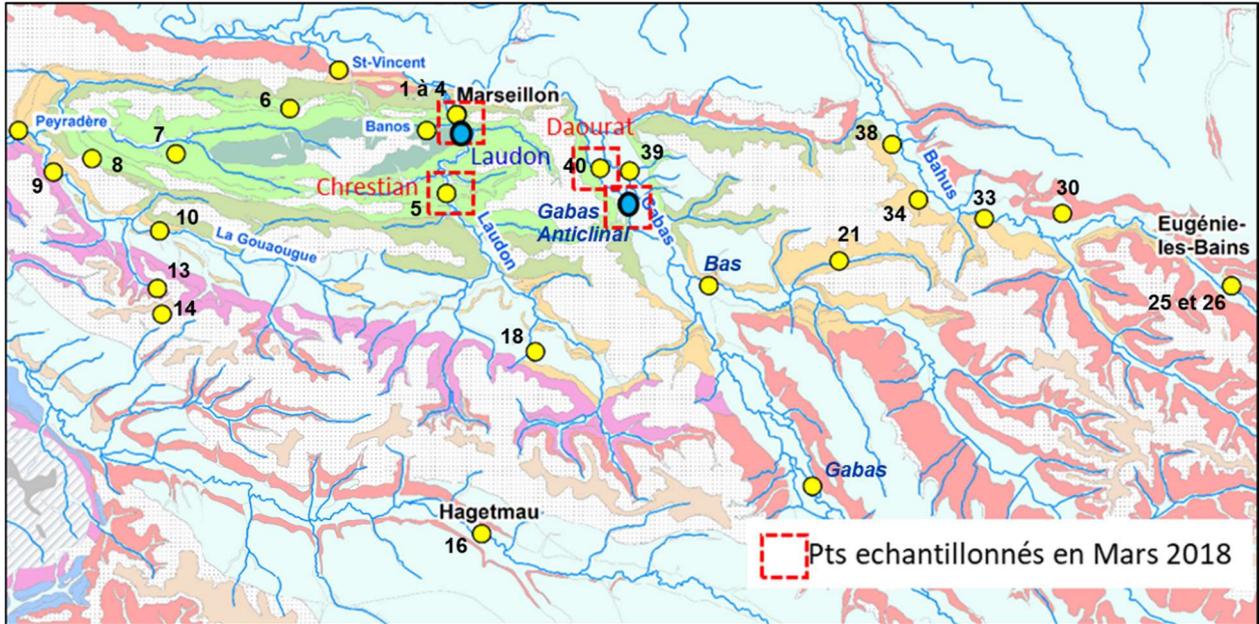


Illustration 78 - Localisation des points de prélèvements pour la campagne de hautes eaux, en mai 2018 (les numéros permettent d'identifier les points dans les illustrations suivantes)

La campagne de septembre 2018, en période de basses eaux, a été réalisée dans 25 ouvrages, toujours en collaboration avec le Département des Landes (5 ouvrages prélevés). Les mêmes analyses que celles de la campagne de hautes eaux ont été demandées (paramètres physico-chimiques, ions majeurs, métaux, isotopes ...).

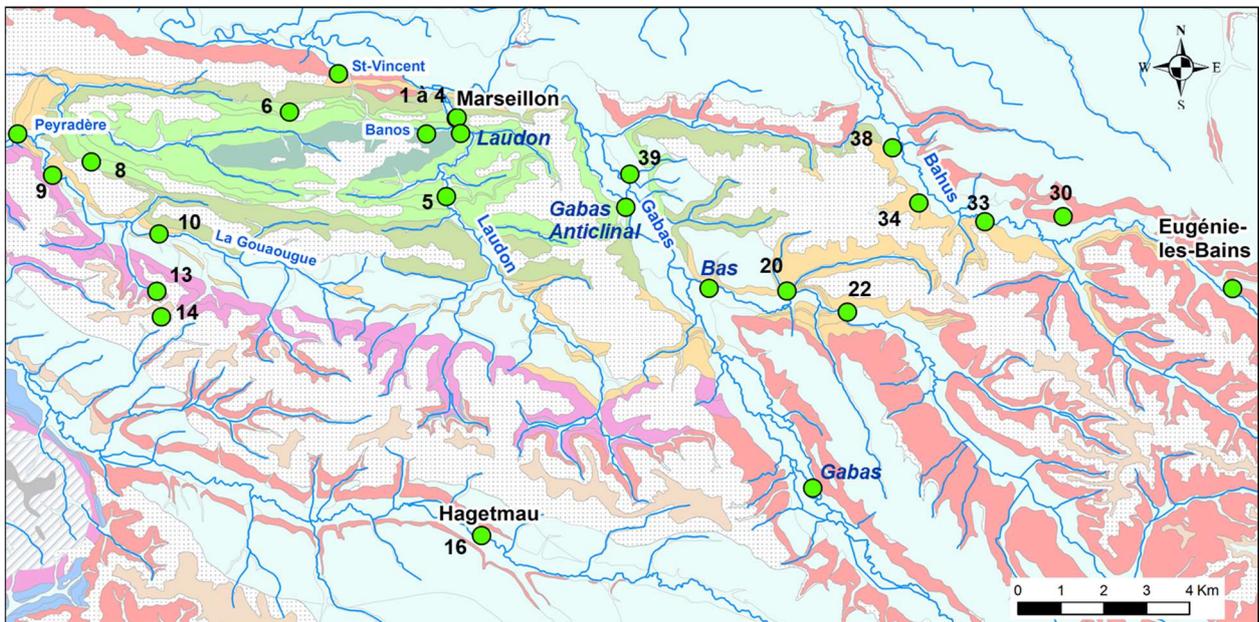


Illustration 79 - Localisation des points de prélèvements pour la campagne de basses eaux, en septembre 2018 (les numéros permettent d'identifier les points dans les illustrations suivantes)

Caractérisation des faciès chimiques des eaux

Les eaux d'origine profonde (Chicoy - 09784X0029/CHICOY, Hagetmau - 09782X0008/F3, Moulin Bougnère - 09784X0020/F) de la zone d'étude présentent un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien, très différent du faciès bicarbonaté-magnésien des eaux du Crétacé et du Paléocène peu profond (Illustration 80).

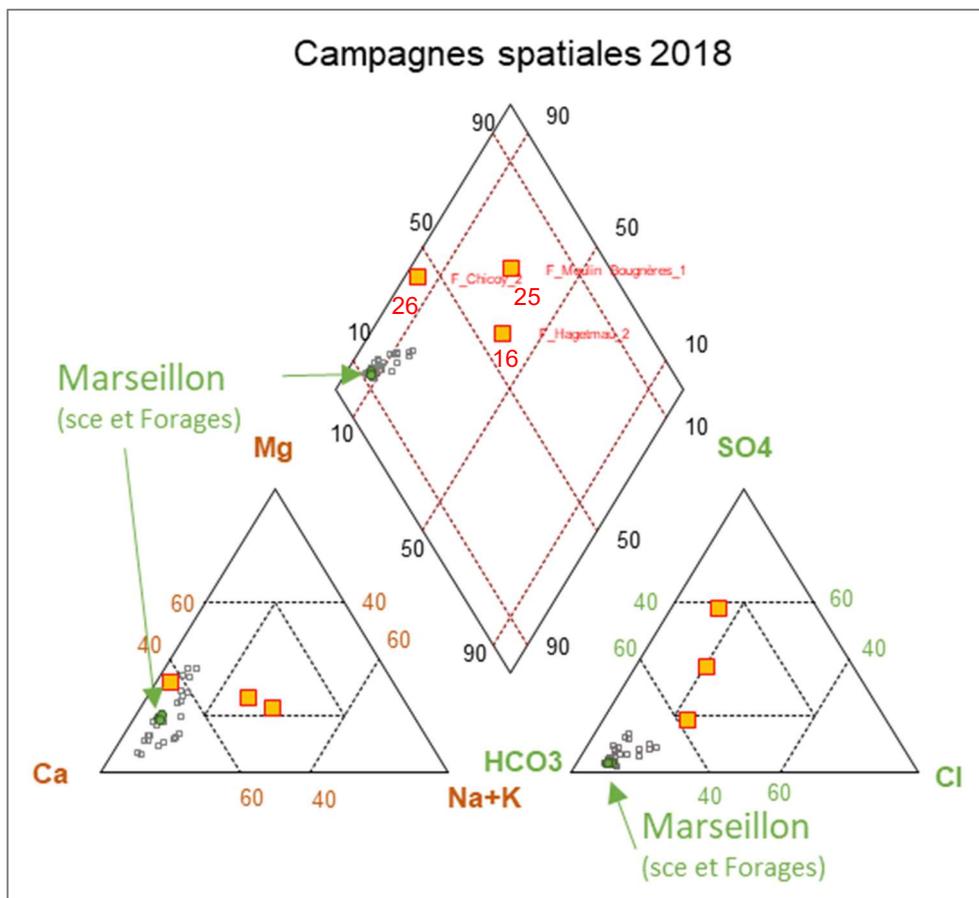


Illustration 80 - Diagramme de Piper des eaux échantillonnées

Les eaux de la source de Marseillon et des deux forages (F1 et F2) ont une signature bicarbonatée calcique. Le diagramme de Schoeller-Berkaloff indique que les eaux des 3 ouvrages sont identiques (Illustration 81 A). Les signatures des eaux de Marseillon sont assez similaires à celles des eaux prélevées au forage Chrestian à Audignon et à Sarraziet (CD52 et Taulade). Dans ces deux derniers forages, on notera simplement un léger enrichissement en sulfates et en magnésium, par rapport aux eaux de Marseillon (Illustration 81 B). Les signatures des eaux de Marseillon sont également similaires aux eaux captées à Eyres-Moncube (forage de la DEP. 944 - 09782X0013). On notera également que les eaux, prélevées plus à l'ouest de la structure, comme les eaux de l'Abbaye de Maylis et les eaux de la source de Saint-Vincent à Montaut, présentent des similitudes de faciès chimique avec les eaux de Marseillon, mais des concentrations globalement supérieures (Illustration 81 C). Enfin, l'illustration 81 D présente des eaux (source Banos, forages Gardelly et Larcuchette à Fargues) ayant des faciès relativement proches de celui de la source de Marseillon, mais avec cependant des concentrations différentes, notamment en magnésium et sulfates. Les eaux des sables infra-molassiques, prélevées à Geaune (Illustration 81 A), présentent des différences notables notamment en termes de concentration en chlorures, sulfates et magnésium, par rapport à la signature de la source de Marseillon.

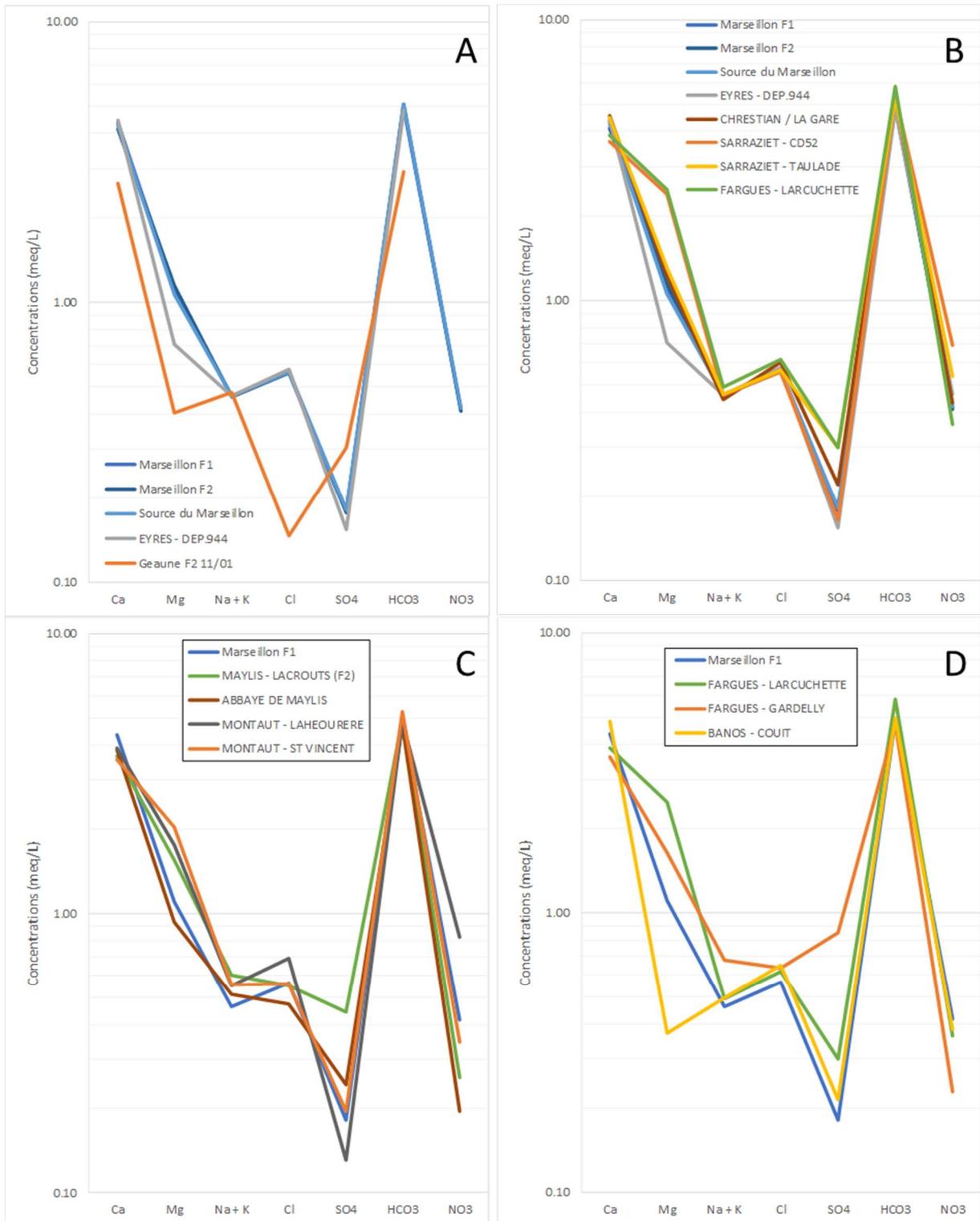


Illustration 81 - Diagramme de Schoeller-Berkaloff des eaux de la source de Marseillon et comparaison avec des eaux prélevées à proximité géographique de la source

L'examen des diagrammes binaires de l'illustration 82, qui exprime l'évolution des concentrations en Na, Ca, Mg et SO₄ en fonction du Cl, permet d'apporter des informations complémentaires. La comparaison des eaux avec la droite de dilution de l'eau de mer indique que les eaux profondes du Paléocène sont enrichies en sodium, ce qui traduit des interactions eau-roche avec des minéraux contenant du sodium. Les eaux des cours d'eau (Gabas notamment) et de certains ouvrages présentent un faible enrichissement en chlorure par rapport à la droite de dilution de l'eau de mer, ce qui témoigne d'impacts anthropiques. Les interactions eaux-roche des eaux au sein des réservoirs se traduisent par un enrichissement en Ca, Mg et SO₄, en comparaison à la droite de dilution de l'eau de mer. Les teneurs en sulfates très faibles, mesurées dans l'ouvrage Lagorce, interpellent (erreur de mesure ?). Dans le cas contraire, l'appauvrissement en SO₄ des eaux pourrait témoigner de l'existence d'un phénomène de dégradation de la matière organique par des bactéries sulfato-réductrices, dans un milieu anoxique et très réducteur ($E_h \ll 0$).

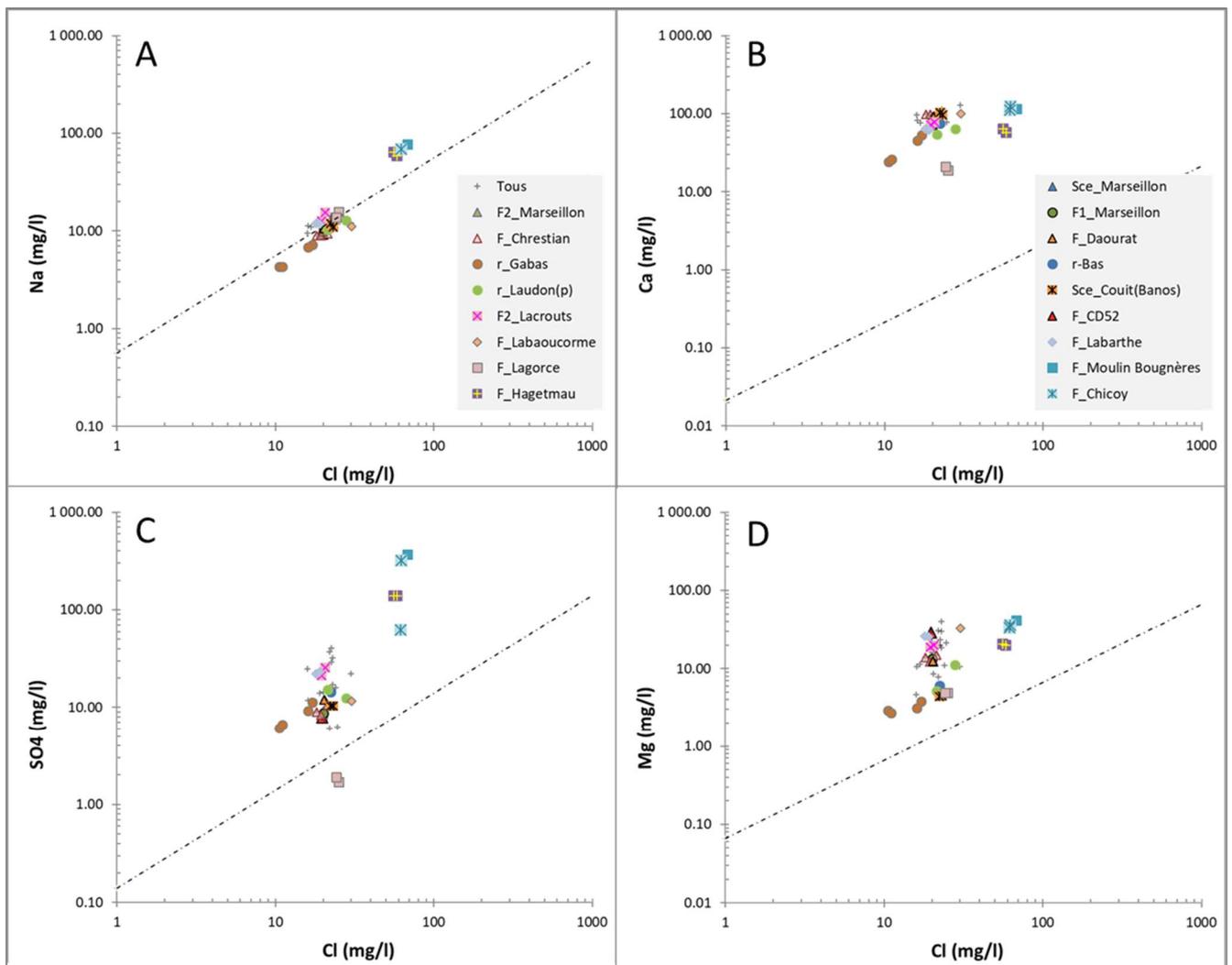


Illustration 82 - Diagrammes binaires

L'évolution des teneurs en nitrate, en fonction des concentrations en chlorure, magnésium, bore et lithium, est présentée sur l'illustration 83. Les eaux du Paléocène profond (Chicoy, Hagetmau, Moulin Bougnère) se distinguent nettement par une absence de nitrate et des concentrations très significativement supérieures en Cl, Li et B, par rapport aux autres eaux échantillonnées : ce qui témoigne de nouveau de l'origine profonde des fluides. Les teneurs en nitrate des eaux du Paléocène et du Crétacé sont très variables, à l'échelle de la zone d'étude, et globalement

élevées (de l'ordre de 25 mg/l à Marseillon) : ce qui témoigne de l'influence anthropique. Aucune corrélation ne semble se dessiner entre les teneurs en nitrate et chlorure, en lien avec l'influence anthropique (Illustration 83A). Aucune corrélation des teneurs en nitrate avec les concentrations en magnésium n'est mise en évidence, les teneurs importantes en Mg traduisant des temps d'interaction importants de l'eau avec les réservoirs carbonatés (Illustration 83 B).

Certains ouvrages du Paléocène (F2 Lacrouts, Gardelly, Abbaye, Bahus) présentent des teneurs importantes en Li et B, et de faibles teneurs en nitrate (< 15 mg/l), en comparaison des autres ouvrages. La position des points dans les diagrammes suggère la participation d'une contribution d'eau issue de la composante profonde du Paléocène (Illustration 83 C et D). L'examen du rapport B/Cl en fonction du Mg (Illustration 84) semble conforter ce résultat (ouvrages concernés : forage F2 Lacrouts, forage Abbaye, forage Bahus et forage Gardelly en basses eaux).

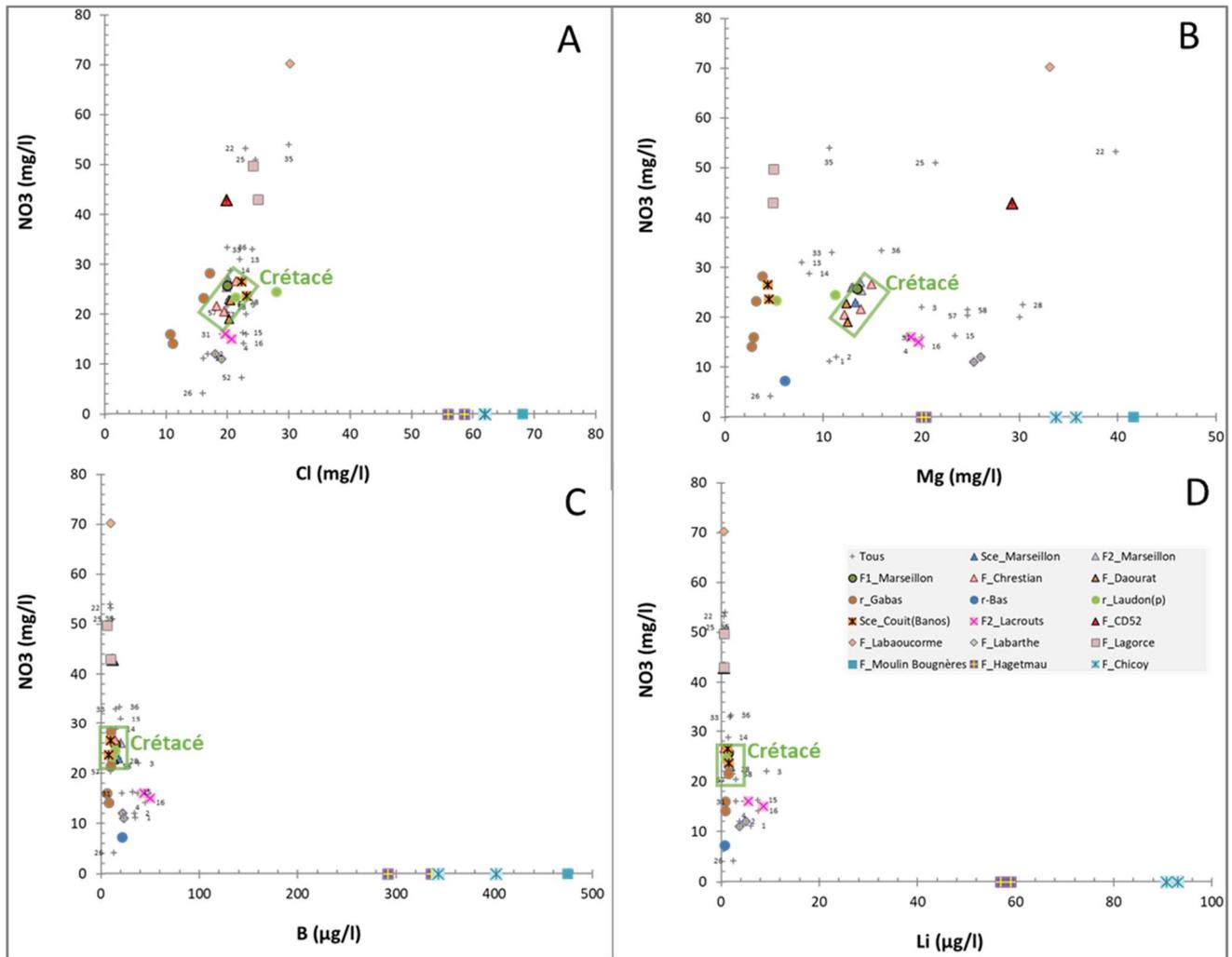


Illustration 83 - Évolution des concentrations en nitrate des eaux, en fonction des teneurs en chlorure, magnésium, bore et lithium

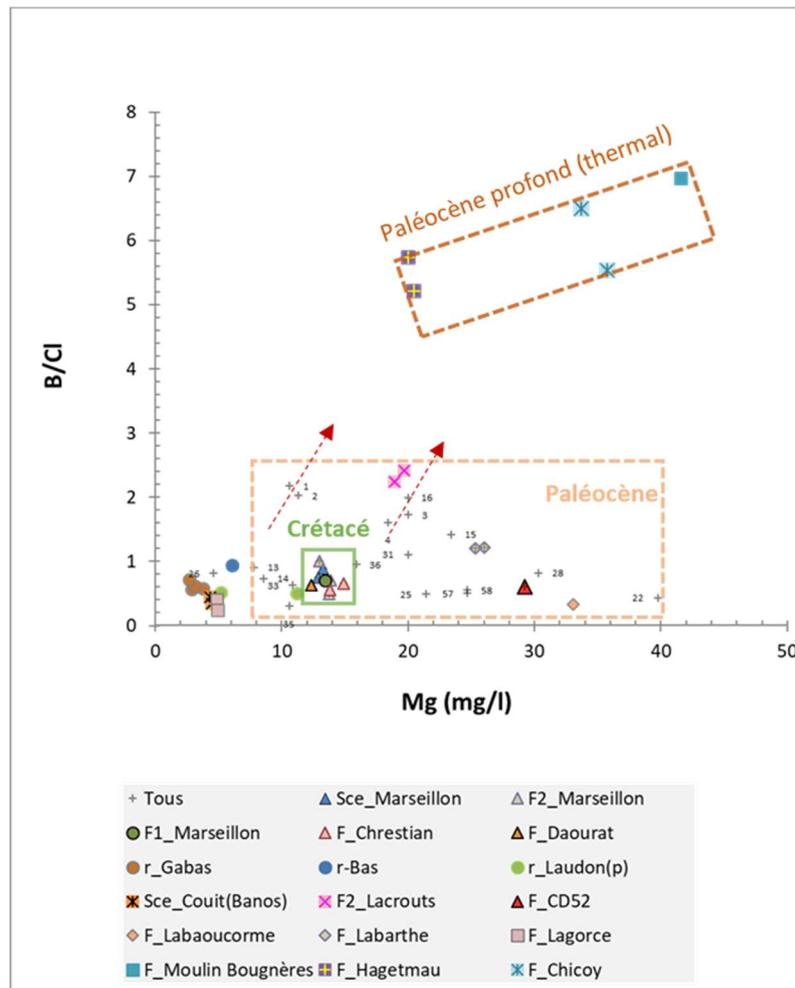


Illustration 84 - Évolution du rapport B/Cl en fonction des concentrations en magnésium

L'examen des traceurs d'interaction eau-roche (rapport Mg/Ca et SiO₂) permet la distinction des eaux de la zone d'étude (Illustration 85). Les teneurs en silice élevées (> 16 mg/l) des eaux du Paléocène profond sont à relier au caractère thermal et profond de ces points d'eau. Les ouvrages influencés par la composante profonde paléocène (forage F2 Lacrouts, forage Abbaye, forage Bahus et forage Gardely en basses eaux, Illustration 84) présentent des teneurs en silice comprise entre 10 et 16 mg/l ; les eaux du Crétacé, dans le secteur de la source de Marseillon, présentent des valeurs comprises entre 8 et 10 mg/l. Le contraste des teneurs en silice mesurées dans les eaux est trop faible pour mettre en évidence, de manière démonstrative, la part de la composante profonde du système hydrogéologique. Au sein du Paléocène, le rapport Mg/Ca permet de distinguer les eaux selon l'importance de l'interaction eau-roche ; ce rapport augmentant en fonction de l'augmentation du temps de résidence de l'eau dans le réservoir et/ou de la nature plus ou moins dolomitique du réservoir. Pour des teneurs en silice comparables de l'ordre de 9 mg/l, on constate que les eaux du Crétacé présentent globalement des rapports Mg/Ca plus faibles, que ceux mesurés dans les eaux du Paléocène. Les eaux de surface du Gabas présentent des signatures bien distinctes des eaux de Crétacé et du Paléocène : les faibles teneurs en SiO₂ (< 4 mg/l) suggèrent une faible contribution des eaux souterraines à l'écoulement. À l'inverse, les teneurs en silice du Laudon et du Bas sont plus élevées (entre 6 et 9 mg/l), ce qui suggère une contribution plus importante des eaux souterraines à l'écoulement.

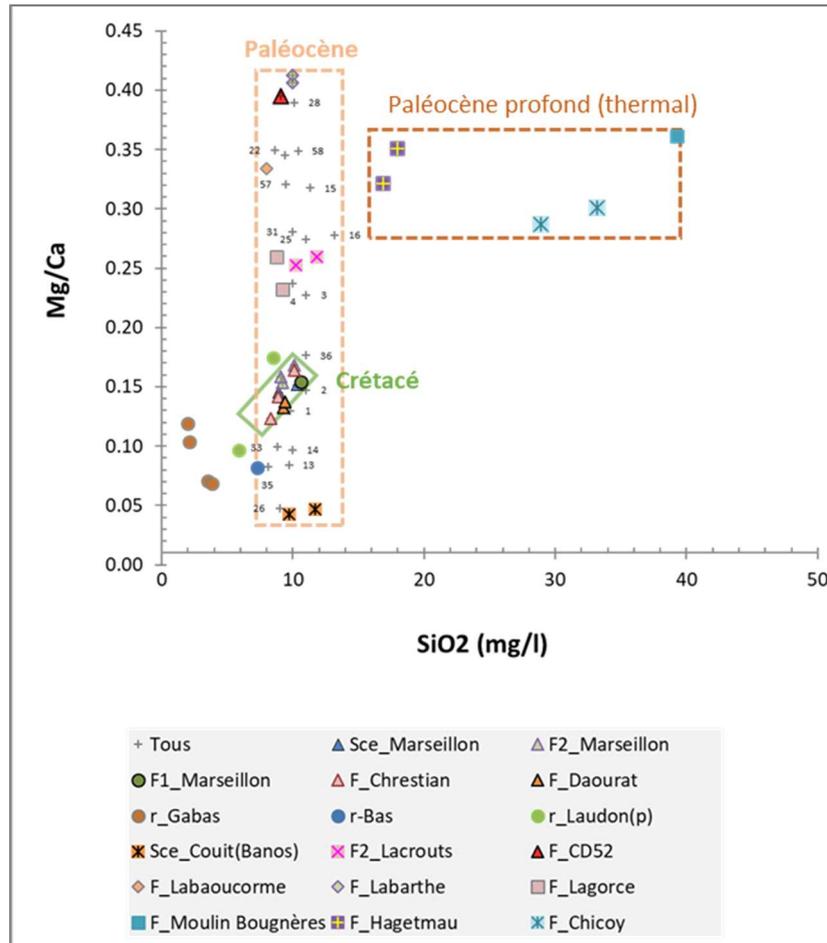


Illustration 85 - Évolution du rapport Mg/Ca en fonction des teneurs en silice

Caractérisation isotopique ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$)

Les rapports isotopiques du strontium, en fonction du ratio 1/Sr (Illustration 86 A), des eaux de surface, sont comparés à ceux des eaux souterraines, issues des calcaires crétacés du secteur de la source du Marseillon, et à ceux des eaux d'origines profondes prélevées dans le Paléocène. Les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des formations géologiques du Crétacé supérieur et du Miocène (issus de la bibliographie) sont également reportés. Le rapport isotopique du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) d'une eau est directement lié à celui du minéral ou de l'assemblage minéralogique avec lequel l'eau a interagi. Ainsi, les eaux qui drainent des roches silicatées (granite par exemple) présentent des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ relativement élevés ; celles qui drainent des roches carbonatées ont des signatures plus faibles (moins radiogéniques). Le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des roches carbonatées (et des évaporites) suit fidèlement celui de l'eau de mer de l'époque du dépôt (Faure, 1986). Les eaux d'origine profonde du Paléocène (Chicoy, Hagetmau) présentent un rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ comparable aux rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des carbonates du Paléocène, tel que défini par Veizer et al. (1989). Les eaux prélevées dans le Crétacé (source et F2 Marseillon, forages Chrestian et Douarat) présentent des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ compris entre 0,708294 et 0,708531. Ces valeurs apparaissent très significativement supérieures aux valeurs du Crétacé supérieur, défini par Veizer et al. (1989). Les eaux du Crétacé en période de hautes eaux présentent des valeurs comparables aux rapports isotopiques des sables fauves (Miocène - Veizer et al., 1989). **Ces résultats permettent de montrer que l'infiltration au travers de la couverture des sables fauves, largement présente sur l'ensemble de l'anticlinal d'Audignon, contrôle fortement la signature isotopique des eaux du réservoir crétacé sous-jacent.**

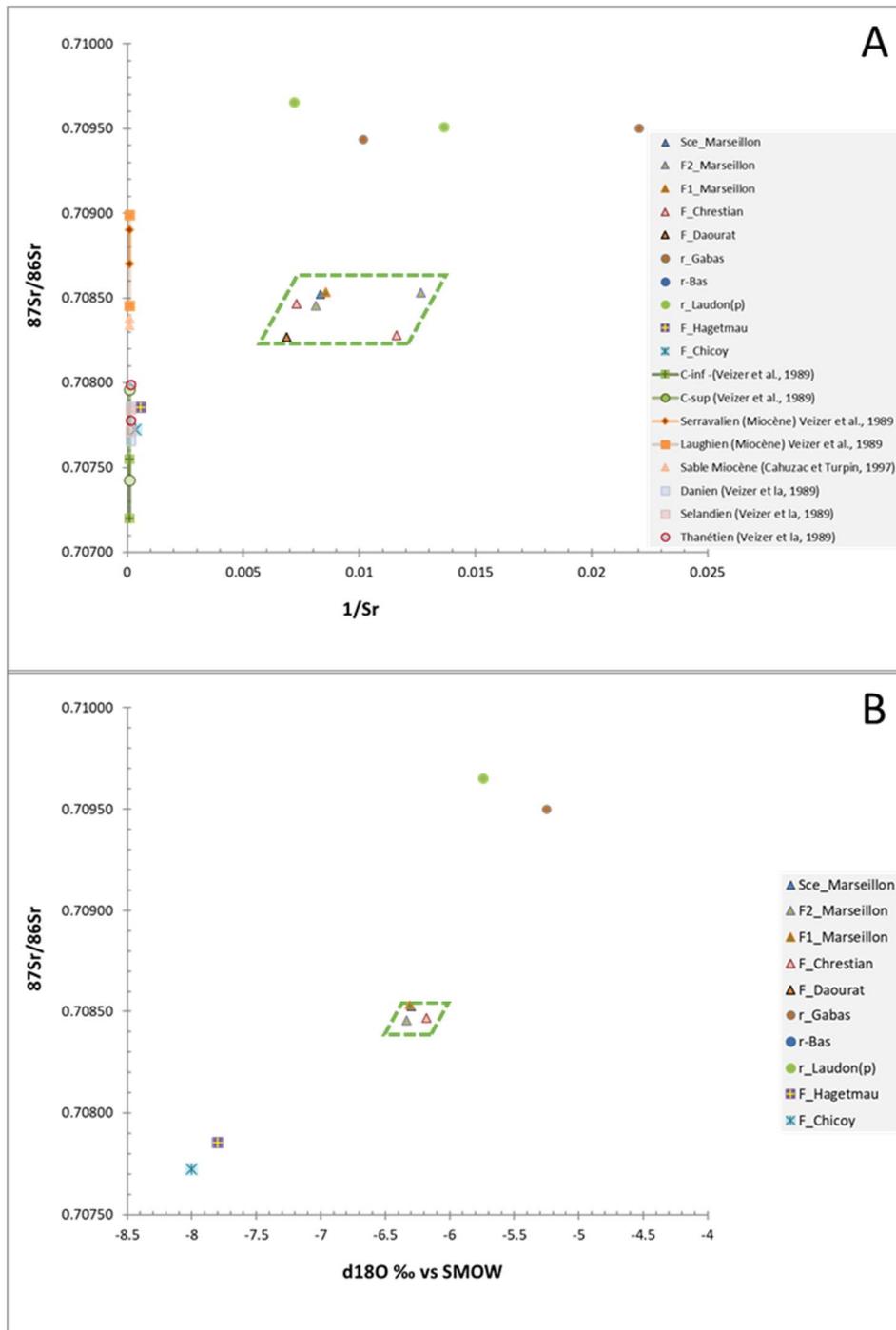


Illustration 86 - Évolution du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en fonction du ratio $1/\text{Sr}$ et de la signature isotopique de l'oxygène 18 de l'eau

En période de basses eaux, les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des eaux du Crétacé, prélevées dans le forage F2 Marseillon, diminuent -la signature évoluant vers les rapports des carbonates du Crétacé- tandis que les teneurs en strontium augmentent. Les signatures mesurées et les évolutions observées dans le Crétacé ne mettent pas en évidence de contribution d'eau de surface, par des relations directes avec le réservoir du Crétacé. La confrontation des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ avec la signature en oxygène 18 des eaux ($\delta^{18}\text{O}$, Illustration 86 B) semble confirmer cette conclusion.

Les résultats indiquent que les eaux de surface (qui présentent des indices d'évaporation, cf. Figure A- 1 en annexe 3) sont différentes des eaux du Crétacé, elles-mêmes très distinctes des eaux du Paléocène profond, qui apparaissent nettement appauvries en isotopes lourds (^{18}O).

L'évolution des signatures en deutérium, en fonction des teneurs en oxygène 18, des eaux du secteur d'étude est présentée ci-dessous (Illustration 87 et illustration 88). Les données anciennes collectées par Chery (1999), ainsi que les données des suivis de pluie mensuelle à la station de Dax (1997-2003, BRGM, GNIP) sont reportées. Les signatures isotopiques des moyennes pondérées des pluies de Dax (altitude = 9 m) des différents cycles hydrologiques sont également représentées : les évolutions permettent d'apprécier la variabilité climatique interannuelle. Pour l'ensemble de la période 1997-2003, la moyenne pondérée des eaux de pluie, qui contribue à la recharge des aquifères, est estimée à : $\delta^{18}\text{O} = 6,2 \text{ ‰}$; $\delta^2\text{H} = -38,6 \text{ ‰}$. Ces valeurs permettent d'approcher, pour la zone d'étude, la signature de la pluie, qui recharge les calcaires crétacés de l'anticlinal d'Audignon (altitude moyenne = 80 m).

Les signatures isotopiques, mesurées en période de basses eaux dans les eaux souterraines, permettent d'accéder à la signature isotopique moyenne des eaux d'infiltration, qui contribuent à la recharge des aquifères. Les valeurs mesurées dans cette étude et les données anciennes indiquent que les signatures isotopiques des eaux des calcaires crétacés sont très comparables à la signature de l'eau de recharge par les précipitations actuelles. Dans ce contexte, la part des eaux d'origine profonde du Paléocène, caractérisées par des signatures appauvries, apparaît très limitée voire négligeable. Les études isotopiques antérieures (Blavoux et al, 1993) suggèrent que la part d'eau ancienne, âgée de plusieurs milliers d'années (19 000 à 29 000 à Hagetmau, Bourguin et al., 1987), appauvrie en isotopes lourds, du Paléocène profond, contribue très faiblement (de 3 % à 11 % selon les informations apportées par l'hélium dissous) au fonctionnement des eaux souterraines du secteur d'Audignon. Les caractérisations géochimiques réalisées dans cette étude ne permettent pas de mettre en évidence cette composante profonde dans le fonctionnement de la source du Marseillon.

En période de hautes eaux, on observe globalement un appauvrissement des signatures des isotopes stables de l'eau, en lien avec les apports de l'eau de recharge, qui est en général appauvrie en isotopes lourds (un suivi des pluies à Audignon en 2018 aurait permis de préciser les signatures). Les variations observées entre les périodes de basses et hautes eaux permettent d'illustrer le caractère karstique des calcaires crétacés de la zone d'étude. Les évolutions traduisent l'existence de phénomène de mélange entre l'eau de la zone noyée et les eaux d'infiltration, qui ont majoritairement transité au sein des sables fauves, comme l'ont indiqué les isotopes du strontium. Les dynamiques de fonctionnement de la zone d'infiltration seront étudiées à l'aide de l'approche fonctionnelle (ci-après).

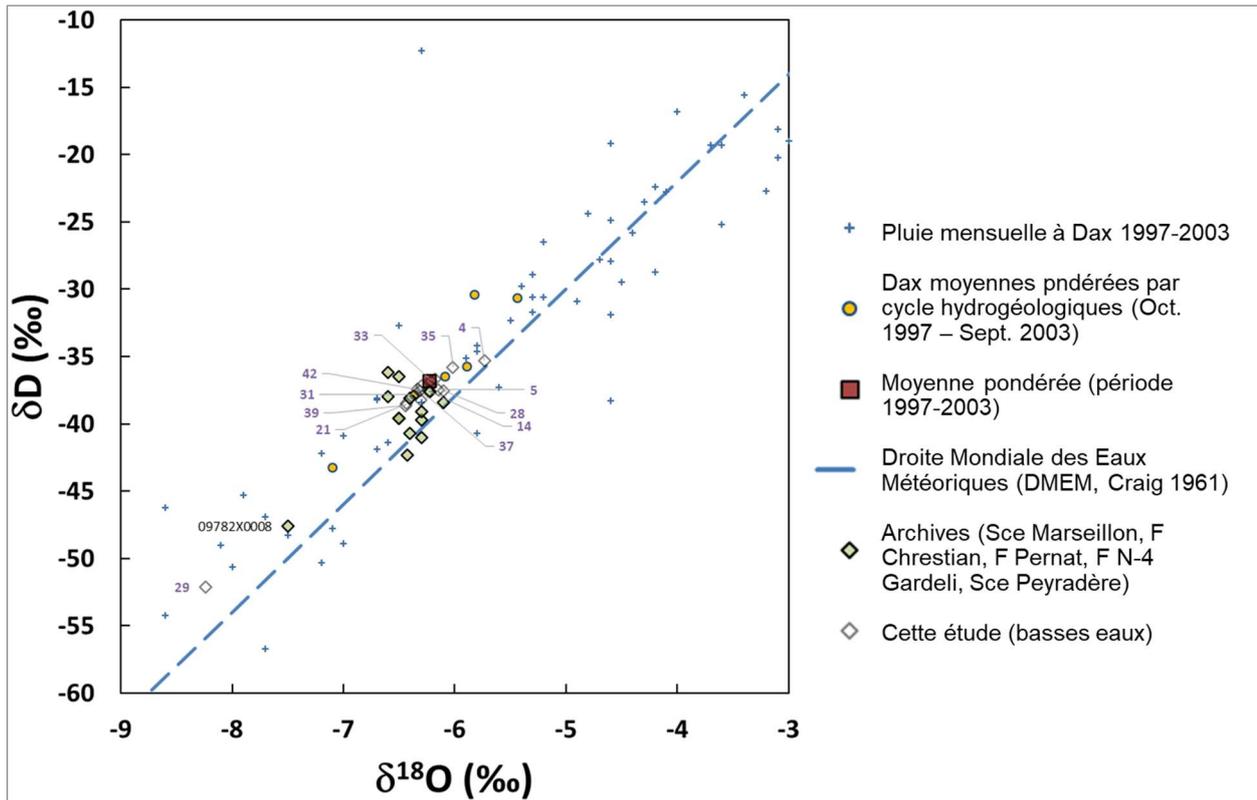


Illustration 87 - Évolution des signatures en deutérium, en fonction des signatures en oxygène 18 (contexte de basses eaux)

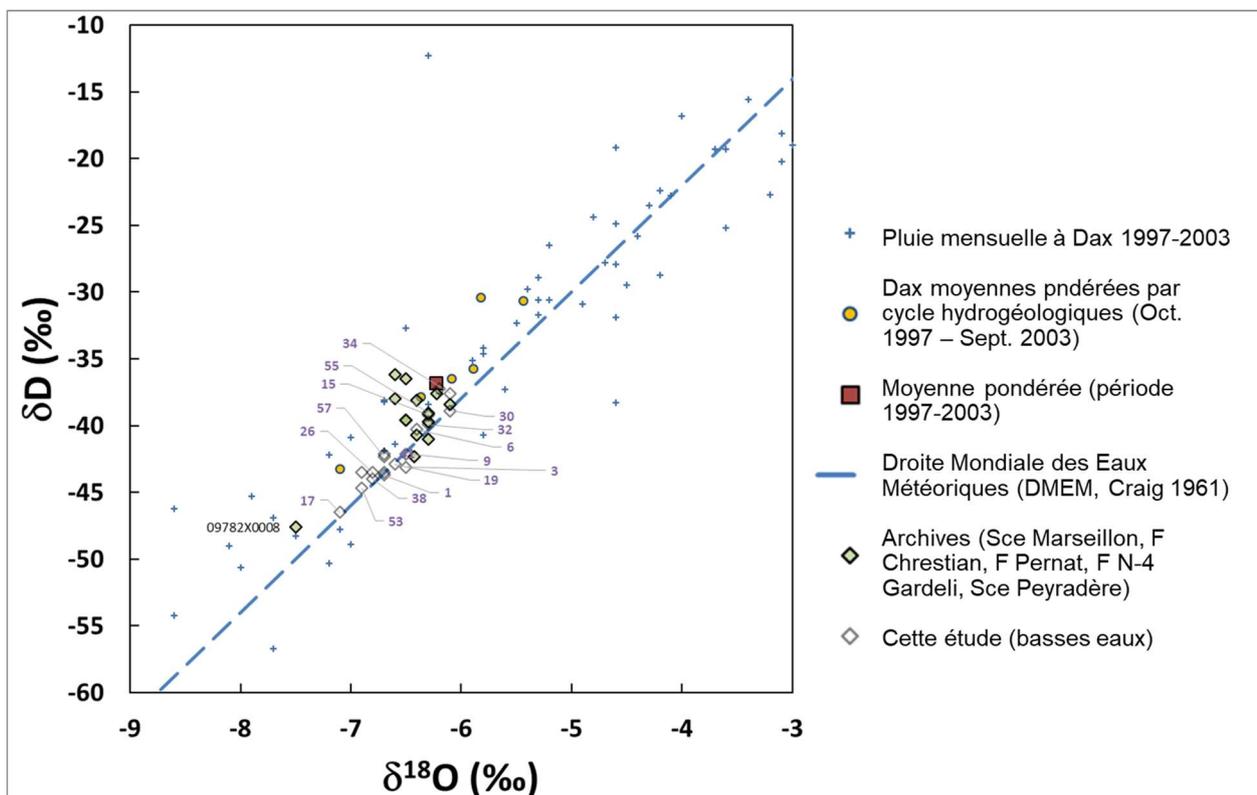


Illustration 88 - Évolution des signatures en deutérium, en fonction des signatures en oxygène 18 (contexte de hautes eaux)

3.4.3. Approche fonctionnelle de la structure d'Audignon

L'étude du fonctionnement hydrogéologique de la structure d'Audignon a été abordée à l'aide du logiciel TEMPO (©BRGM, Pinault et al., 2001a, b), qui repose sur la notion de réponse impulsionnelle, qui exprime la manière dont une variable de 'sortie' d'un système hydrogéologique (débit, niveau piézométrique, flux...) réagit suite à une variation brève d'une des 'entrées' (pluie, ETP, prélèvement, ...). L'approche méthodologique permet la caractérisation du fonctionnement d'hydrosystèmes complexes, tels que les systèmes karstiques (Pinault et al., 2004, 2005 ; Pinault et Schomburgk, 2006 ; Dörfliger et al., 2009 ; Ladouche et al., 2014).

L'étude du fonctionnement de l'aquifère du Crétacé est ici réalisé au travers de la modélisation des chroniques de débit du Marseillon, ainsi que celle du forage agricole Chrestian (09782X0016/F3), situé à près de 2 km au sud de l'exutoire du Marseillon.

La piézométrie du forage de Chrestian (Illustration 89) est fortement influencée par les pompages agricoles. Dans le schéma de modélisation, les prélèvements ont donc été considérés comme une des variables importantes à prendre en compte en entrée du modèle, l'autre entrée étant la pluie efficace, calculée par l'outil à l'aide des chroniques SAFRAN de pluie et d'ETP. Le modèle permet de reproduire, de manière jugée satisfaisante (critère de Nash = 0,73), les évolutions piézométriques du forage de Chrestian (Illustration 89). La réponse impulsionnelle du système aquifère à la recharge par les pluies efficaces est présentée sur l'illustration 90. L'allure générale de la réponse impulsionnelle évoque la recharge d'un réservoir, suivie de sa vidange. Le pic de réponse de l'aquifère est observé environ 3-4 jours après un épisode de recharge, la lente décroissance observée témoigne du caractère inertiel de l'aquifère.

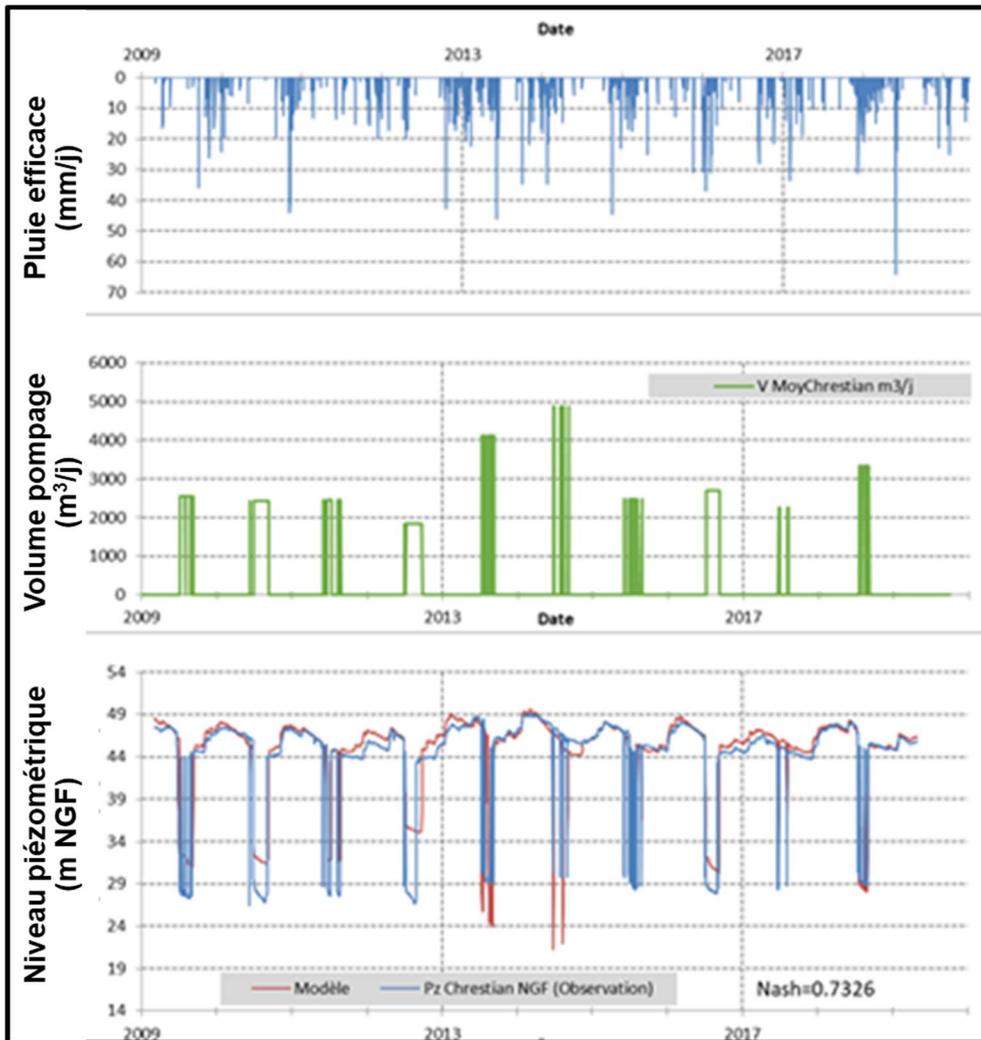


Illustration 89 - Résultats du modèle TEMPO pour le forage de Chrestian

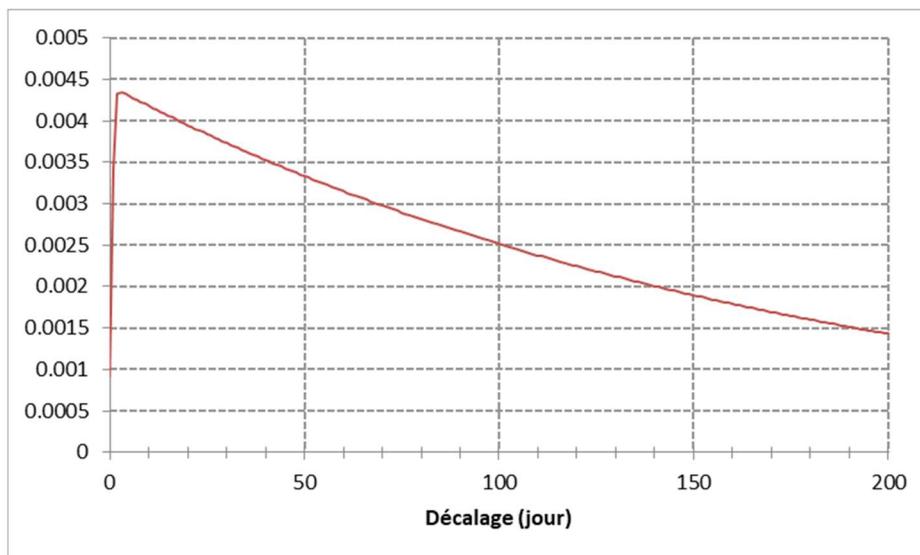


Illustration 90 - Réponse impulsionnelle du système aquifère (au forage Chrestian) à la recharge par les pluies efficaces

Le traitement du débit de la source du Marseillon est plus délicat, car la chronique est relativement bruitée par les pompages du champ captant. La chronique du piézomètre P1 a été utilisée pour tenter de reconstituer les débits « naturels » de la source depuis 1999, à l'aide de la courbe de tarage établie précédemment (Illustration 68) et des prélèvements. Dans le schéma de modélisation, les prélèvements n'ont donc pas été considérés en entrée du modèle, contrairement à l'exercice précédent pour le forage Chrestian.

Les résultats de la modélisation de la source Marseillon sont présentés sur l'illustration 91. Les débits simulés reproduisent globalement la dynamique de fonctionnement annuel, mais les dynamiques rapides ne sont pas bien reproduites, le critère de Nash est faible (0,32), la surface de l'impluvium est estimée à 14 km². Ces résultats sont principalement liés à la difficulté d'estimer les débits naturels à partir de la chronique piézométrique qui reste très influencée par les pompes.

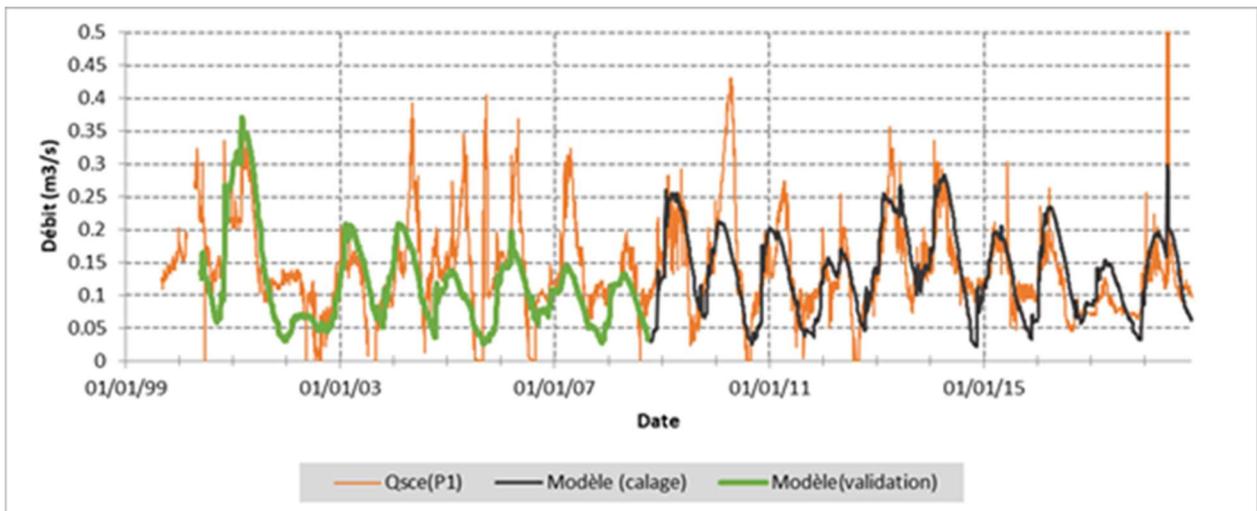


Illustration 91 - Résultats du modèle TEMPO pour la source du Marseillon

L'examen des réponses impulsionnelles (Illustration 92), calculé par le modèle de transfert, indique que 2 modalités d'écoulements semblent s'observer : l'une rapide, qui cesse au bout d'une dizaine de jours, après un épisode de recharge ; l'autre plus lente, qui présente un pic différé (autour de 40-50 jours) et une décroissance très lente. Les dynamiques des fonctions de transfert des composantes lente et rapide de l'écoulement, caractérisées par le modèle, semblent confirmer les observations, faites précédemment par Armand et al. (1993) et Briand (2014) sur des chroniques plus courtes, à savoir un pic de réponse très rapide observé dans les 2-3 jours, après un épisode de pluie efficace. Ce comportement est à relier à la nature karstique du réservoir et témoigne de l'existence d'un transfert rapide entre la zone d'infiltration et le réseau de drainage de zone noyée. Compte tenu des indices karstologiques reconnus dans le secteur d'étude (cf. chapitre 2.4.1), cette composante rapide serait préférentiellement à associer aux quelques zones où des dolines apparaissent sur le terrain, et/ou aux pertes, qui peuvent se produire au sein des vallons secs, pouvant se mettre en eau temporairement lors des périodes de crue.

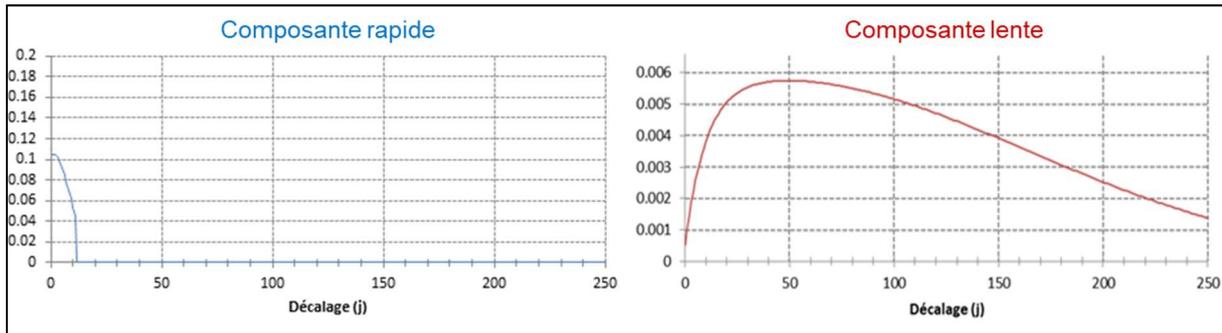


Illustration 92 - Dynamiques des réponses impulsionnelles des composantes lente et rapide de l'écoulement à la source du Marseillon

L'allure générale de la réponse impulsionnelle de la composante lente évoque la recharge d'un réservoir, suivie de sa vidange. Le pic étalé qui s'observe entre 30 et 70 jours après un épisode de pluie efficace permet de qualifier les modalités de transfert au sein de la zone d'infiltration. Les dynamiques lentes du flux d'infiltration sont à relier à la présence des formations de recouvrement superficielles (sables fauves), qui tamponnent et diffèrent dans le temps la recharge du Crétacé sous-jacent, dans lequel se développe la zone noyée de l'aquifère. Ce résultat apparaît renforcé par les informations des isotopes du strontium qui montrent que l'infiltration, au travers de la couverture des sables fauves, contrôle largement la signature isotopique des eaux du réservoir crétacé sous-jacent (cf. chapitre 3.4.2).

La comparaison des dynamiques de fonctionnement des composantes lentes, calculées par modélisation, pour la source du Marseillon et au forage Chrestian, indique que les dynamiques de fonctionnement de la zone noyée sont très similaires (Illustration 93). Cette cohérence permet a posteriori de valider les informations qualifiées par les modélisations, la réponse de l'aquifère étant spatialement comparable. Pour expliquer les réponses hydrogéologiques observées, il n'est donc pas nécessaire d'introduire une autre composante d'écoulement. Dans ce contexte, la composante régionale, si elle existe, ne semble pas induire de modification visible de la piézométrie et du débit au niveau de la source du Marseillon et dans le secteur du forage Chrestian, situé plus au sud. Cela ne veut pas forcément dire que cette alimentation n'existe pas, mais plutôt que le flux d'alimentation, s'il existe, est globalement très constant à l'échelle du cycle hydrologique, car il ne provoque pas de variations piézométriques/hydrodynamiques notables. D'après les informations géochimiques, ce flux est très faible pour la source de Marseillon (cf. chapitre 3.4.2), estimé à moins de 10 % selon Blavoux et al. (1993).

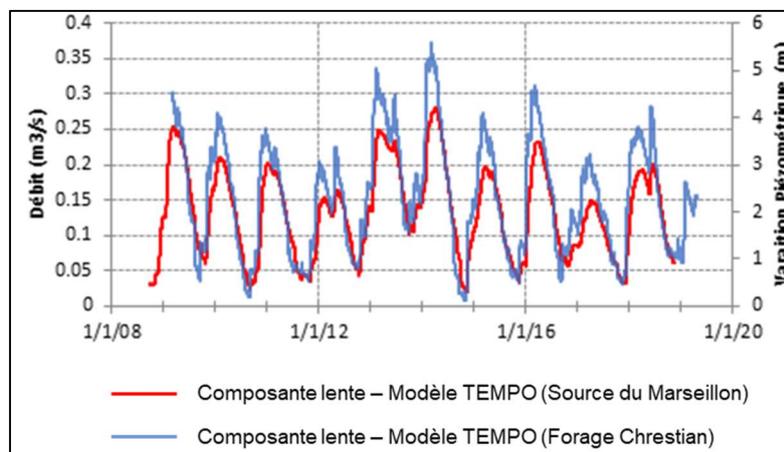


Illustration 93 - Comparaison des dynamiques de fonctionnement lentes de la source du Marseillon et du forage Chrestian

3.4.4. Conclusion

Le choix initial de considérer ensemble, les réservoirs du Crétacé et du Paléocène, au droit de la structure anticlinale d'Audignon, s'il s'est appuyé sur des considérations géologiques, n'a pas été remis en cause par l'approche hydrogéologique menée au cours de ce travail. Les données piézométriques sont cohérentes entre les deux réservoirs. L'absence de forages captant au même endroit ces deux aquifères ne permet pas d'évaluer de différentiel de pression entre les aquifères. Par ailleurs les interprétations physico-chimiques montrent des signatures relativement semblables, ne permettant pas de les distinguer l'un de l'autre.

L'analyse générale des données géologiques, géochimiques, isotopiques, piézométriques fait apparaître 3 compartiments hydro(géo)logiques au niveau de l'anticlinal d'Audignon :

- le **compartiment des eaux de surface. Au nord de la structure, le réseau hydrographique participe au drainage du réservoir.** Ceci, déjà mis en évidence dans certains travaux au travers de jaugeages différentiels dans le Bahus, est conforté, pour le Laudon et le Gabas, par l'analyse des cartes piézométriques et des mesures isotopiques. **Au sud, par contre, leur rôle peut être différent.** Après un ruissellement sur les molasses, les cours d'eau se retrouvent, lors de leur entrée sur l'anticlinal, en position haute, favorisant ainsi des pertes au profit du réservoir. **Des infiltrations diffuses et directes pourraient ainsi avoir lieu et participeraient à la recharge du réservoir du Paléocène et du Crétacé.** Ces pertes sont cohérentes avec la carte piézométrique proposée et ont été mises en évidence dans des travaux passés, seulement pour le Bahus. Ces infiltrations rapides pourraient, dans certains secteurs, être à l'origine de la turbidité observée dans quelques ouvrages au sud de la structure, comme proposé par certains auteurs (forages AEP de Maylis et Horsarrieu). D'un point de vue physico-chimique, les échantillonnages, tels que réalisés dans cette étude, ne peuvent être utilisés pour mettre en évidence que les eaux de surface contribuent de manière directe à l'alimentation des aquifères au sud de la structure. En effet, ils ont été réalisés essentiellement à l'aval des cours d'eau. Les données géochimiques recueillies indiquent que les cours d'eau, au nord du secteur d'étude, ont tendance à drainer les aquifères. À ce stade, seul le Bas, qui a une minéralisation beaucoup moins élevée, laisse imaginer qu'il draine moins les formations calcaires.
- le **compartiment des eaux souterraines au droit de la structure anticlinale** : c'est le compartiment principal. Les travaux menés mettent en évidence plusieurs éléments concernant son fonctionnement hydrogéologique :
 - Le réservoir du Crétacé et du Paléocène bénéficie d'une **recharge sur quasiment l'ensemble de la structure**, à l'exception du cœur albien. Au-delà des pertes possibles des cours d'eau, au profit de la nappe, comme évoqué précédemment dans le sud de l'anticlinal, des **infiltrations diffuses et lentes apparaissent sur l'ensemble de la structure, principalement dans ses parties centrale et méridionale.** En appui de la carte piézométrique, les données isotopiques et l'approche fonctionnelle confirment le **rôle important joué par les sables fauves dans ce processus de recharge.** Ces sables fauves, qui recouvrent l'ensemble de la structure, semblent effectivement contrôler le processus de recharge en tamponnant le signal d'infiltration et retardant la recharge directe et rapide vers la nappe.
 - **L'essentiel de l'eau sortant au travers des sources et cours d'eau provient de la recharge sensu stricto sur l'anticlinal crétacé.**
 - La **karstification épigène existe mais reste relativement limitée** : les observations géologiques (cf. chapitre 2.4) montrent la présence de quelques réseaux, mais dont le développement est peu important. Elle s'exprime cependant, d'un point de vue hydrogéologique, au travers de vitesses d'écoulement localement importantes qui

conduisent à des variations rapides de débits. Pour la source du Marseillon et dans le forage de Chrestian, cette composante rapide apparaît après un épisode pluvieux. Elle est à l'origine également de variations physico-chimiques observables dans certains ouvrages et de l'apport, en profondeur, de turbidité et de composés chimiques d'origine anthropique. L'impact de la karstification sur les écoulements reste cependant limitée.

- Les observations géologiques semblaient plaider pour une **karstification récente, réalisée sous-couverture, à la faveur des sables fauves** (crypto-karst, cf. chapitre 2.4.1). Les considérations hydrogéologiques évoquées précédemment confirment le rôle actuel des sables fauves dans le processus de recharge et donc sur la karstification, qui évolue encore aujourd'hui et qui est vraisemblablement à l'origine des problèmes de turbidité rencontrés dans les captages et notamment à la source du Marseillon.

- le **compartiment des eaux souterraines profondes**. Ce compartiment apparaît en bordure de l'anticlinal et s'exprime par des faciès hydrochimiques contrastés, observables dans les ouvrages de Chicoy, Hagetmau et Moulin de Bougnères. Il s'agit de la composante profonde des aquifères du Crétacé et du Paléocène qui, depuis l'est / sud-est s'écoule vers le nord et l'ouest. La carte piézométrique démontre à ce titre le rôle de la faille au nord de la structure, qui limite les écoulements vers le nord et favorise un écoulement vers l'ouest. Il n'est cependant pas possible d'écarter une contribution des parties profondes de ces nappes aux écoulements de surface observés au droit de la structure anticlinale. Mais cette participation n'est apparue, ni prépondérante, ni décelable dans les résultats géochimiques obtenus.

À ce stade, si le fonctionnement de la structure anticlinale a pu être précisé, il pourrait être amélioré au travers de certaines actions spécifiques :

- la réalisation d'un bilan hydrologique, plus détaillé à l'échelle de l'anticlinal. Difficile à appréhender à cette échelle, il doit s'appuyer sur la quantification des flux entrants et sortants au niveau des cours d'eau, via la mise en place de stations de suivis des débits des cours d'eau, voire de jaugeages différentiels, au cours de quelques périodes de l'année. La connaissance des prélèvements, tout au long de l'année, et des rejets (STEP d'Audignon, de Dumes, ...), dont l'eau rejetée dans le réseau d'assainissement ne vient pas forcément de l'anticlinal, est par ailleurs primordiale. L'équipement des sources majeures est également un préalable obligatoire à l'élaboration du bilan hydrologique. En plus du Marseillon, dont le suivi doit être poursuivi parallèlement aux forages du champ captant, pour améliorer l'estimation du débit naturalisé, il est impératif de suivre les débits de l'autre exutoire majeur que constitue la source de Peyradère, situé à l'ouest de la structure anticlinale. Cette dernière source n'a malheureusement pas pu faire l'objet de caractérisation dans le cadre de ce projet.
- la détermination du rôle précis des cours d'eau, dans leur participation au drainage ou à la recharge des nappes. Ce rôle pourrait également être précisé au travers d'échantillonnages physico-chimiques plus fins, à la fois spatialement et temporellement, complétés par des jaugeages différentiels en hautes eaux et basses eaux.
- l'étendue de l'approche fonctionnelle à tous les ouvrages. Appliquée à la source du Marseillon et au forage Chrestian, l'approche fonctionnelle pourrait être également conduite pour l'ensemble des chroniques piézométriques disponibles à l'échelle de la structure, sous réserve de la connaissance des débits de prélèvement des ouvrages. Ces investigations permettraient de renforcer la connaissance sur les modalités de fonctionnement hydrogéologique des différents secteurs de la zone d'étude (sud et est de la structure anticlinale) et aussi de renseigner la dynamique de fonctionnement du flux d'eau, d'origine profonde.

3.5. AMELIORATION DE LA CONNAISSANCE DU FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE DE LA SOURCE DU MARSEILLON

Les suivis de débit réalisés dans la source du Marseillon, qui sont voués à se pérenniser, permettent d'apporter des éléments nouveaux quant à la compréhension des modalités d'écoulement au niveau de la source. Sur la base de ces enregistrements, complétés des suivis physico-chimiques et de mesures réalisées dans le cours d'eau voisin (cf. chapitre 3.3.4 - Attention particulière portée au système du Marseillon), un ensemble de méthodologies est ici mis en œuvre, afin de préciser le fonctionnement de la source.

3.5.1. Analyse des courbes de récession

Cette analyse permet d'appréhender le fonctionnement de la zone d'infiltration et d'évaluer l'importance des réserves de la zone noyée, en attribuant une forme mathématique aux courbes de décrue (partie décroissante de l'hydrogramme de crue d'une source) et de tarissement. L'hydrogramme simple est alors décomposé en deux fonctions mathématiques caractérisant chacune un type d'écoulement, selon la méthode proposée par Mangin (1975), adaptée depuis par Ladouche et al. (2006).

Les paramètres, ainsi déterminés par ajustement de la loi de Mangin, décrivant la récession, permettent de (Dörfliger et al., 2010) :

- estimer le volume d'eau contenu dans le réservoir à l'origine de la décroissance des débits observés,
- caractériser le fonctionnement de la zone d'infiltration par le calcul des coefficients k , qui traduit l'aptitude du système à stocker les précipitations et à les restituer au cours du temps (on parle de pouvoir régulateur), et qui traduit le retard à l'infiltration.

Dans le cadre de cette analyse pour la source du Marseillon, la chronique longue des débits, élaborée à partir du suivi du puits P1, est utilisée (cf. chapitre 3.3.4). La piézométrie apparaît toutefois très influencée par les pompages, notamment en périodes estivales. Dans ce contexte, au cours de la période 1999-2019, seuls 5 cycles ont pu être utilisés pour le calcul des paramètres de l'approche de Mangin.

Les calculs réalisés avec ces 5 cycles montrent que les coefficients de tarissement de la source sont globalement faibles (0,0049 +/- 0,0026), ce qui indique que les réserves du système sont drainées globalement lentement (et/ou difficilement) par le réseau de drains de la source. Les volumes dynamiques sont importants : de l'ordre de 2,7 +/- 1,9 millions de m³ ; la forte dispersion reflète à la fois la variabilité de la recharge et/ou l'incertitude provoquée par les pompages.

La classification de la source du Marseillon (Illustration 94) montre un paramètre d'infiltration de Mangin élevé, ce qui dénote de forts retards à l'infiltration et une zone noyée assez importante.

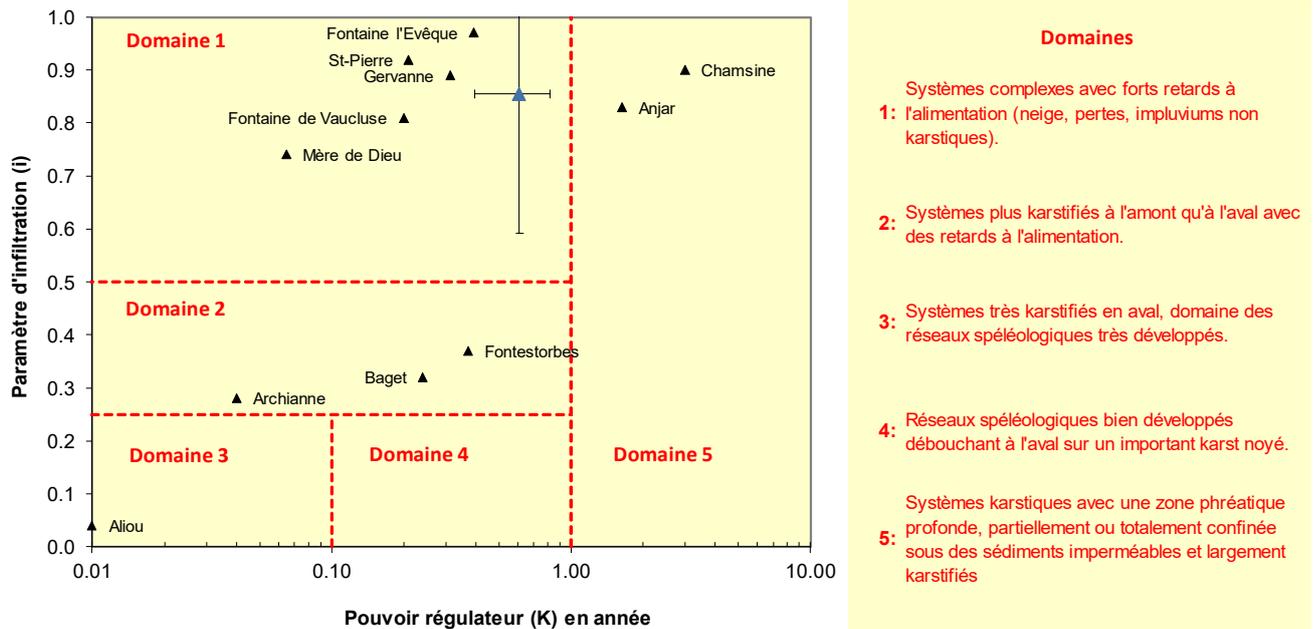


Illustration 94 - Position de la source du Marseillon (triangle bleu) dans la classification des systèmes karstiques, obtenue à partir de l'analyse des courbes de récession, selon Mangin (1975) (modifié d'après El-Hakim and Bakalowicz, 2007)

3.5.2. Première estimation de l'extension du bassin d'alimentation de la source du Marseillon

Cette première estimation se base sur l'étude des bilans hydrologiques. Ceux-ci reposent sur l'analyse de la cohérence qui existe entre les flux d'entrée et les flux de sortie, à l'exutoire d'un système, permettant in fine de caractériser globalement les limites de l'impluvium du système. La méthode consiste à évaluer, pour une période donnée, le volume d'eau écoulé à l'exutoire (V) et le volume des pluies qui renouvelle les réserves et entretient l'écoulement dans le système (Dörfliger et al., 2010). Elle repose ainsi sur la détermination des précipitations efficaces. Les pluies efficaces représentent la quantité d'eau fournie par les précipitations, qui reste disponible pour le système, après soustraction des pertes par évapotranspiration réelle (ETR) et de la variation du stock d'eau dans la zone non saturée (ΔR) :

$$P_{efficace} = P - ETR \pm \Delta R \quad (\text{Équation 1})$$

La surface du bassin d'alimentation du système est ensuite déterminée à l'aide du rapport suivant :

$$S_{alimentation} = \frac{V}{P_{efficace}} \quad (\text{Équation 2})$$

Le volume écoulé au niveau de la source est obtenu à partir de la chronique du puits P1 (cf. chapitre 3.3.4), afin d'obtenir une chronique plus longue (1999-2018), sur 19 cycles hydrologiques, limitant ainsi l'influence des variations de réserves souterraines.

Le calcul de la pluie efficace a reposé sur 4 méthodologies différentes. Les méthodes utilisées présentent des hypothèses qui leurs sont propres, faisant appel à des notions physiques différentes, ainsi que des données variées (climatologiques, pédologiques, ...). Pour obtenir une estimation réaliste de la recharge, assortie d'un intervalle de confiance à l'échelle d'un bassin hydrogéologique, il est donc recommandé d'appliquer des approches variées qui se complètent et de comparer leurs résultats (Lanini et al., 2020) :

1. les **données SAFRAN, issues de Météo-France** : SAFRAN est un schéma d'analyse qui permet d'obtenir des données pour 7 paramètres atmosphériques au niveau de la surface et au pas de temps horaire. Ces paramètres, et les analyses qui en découlent, sont ensuite interpolés pour couvrir l'ensemble de la France. À partir des données collectées, un calcul des pluies efficaces est réalisé en fonction de la connaissance des précipitations et du calcul de l'ETP, via la formule de Penman-Monteith ;
2. la **formule de Turc** : elle consiste à calculer le déficit d'écoulement qui permet de s'affranchir des paramètres climatiques. Le calcul du déficit annuel d'écoulement D par cette méthode empirique est basé sur la formule suivante :

$$D = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \text{ avec } L = 300 + 25 T + 0,05 T^3 \quad (\text{Équation 3})$$

où P représente les précipitations (mm) et T la température (°C) moyenne de l'air

La surface d'alimentation du système est alors obtenue en appliquant le rapport suivant :

$$S_{\text{alimentation}} = \frac{V}{P-D} \quad (\text{Équation 4})$$

3. les formules s'appuyant sur **la nature du sol** : plusieurs méthodes ont été mises en œuvre, grâce à l'outil ESPERE (Lanini, 2020), s'appuyant sur la définition de la Réserve Utile (RU) qui établit le stock maximal d'eau dans le sol. La réserve utile retenue dans cet exercice est de 200 mm, d'après la carte de l'INRA (Gis Sol, 2011).

Les méthodologies d'estimation des pluies efficaces et, in fine, des bassins d'alimentation de la source du Marseillon fournissent des résultats contrastés selon les cycles hydrologiques (Illustration 95). Les extensions moyennes obtenues sont comprises entre 11 et 16 km² avec des variations importantes, notamment concernant les résultats obtenus par les formules utilisant la réserve utile.

Cycles hydrologiques	Volume écoulé total (m3)	Pluviométrie (mm) - SAFRAN	1. SAFRAN		2. Formule de Turc		3. Formules utilisant la Réserve Utile (fixée à 200 mm)			
			Pluie efficace (mm)	Bassin d'alimentation (km ²)	Déficit d'écoulement	Bassin d'alimentation (km ²)	Pluie efficace Thornthwaite (mm)	Bassin d'alimentation (km ²)	Pluie efficace Dingman (mm)	Bassin d'alimentation (km ²)
1999-2000	5 599 511	1 104	476	11.77	624	11.68	877.00	6.38	927.64	6.04
2000-2001	6 229 340	1 427	858	7.26	694	8.50	81.40	76.53	155.99	39.93
2001-2002	3 311 006	683	158	21.00	509	19.05	439.50	7.53	472.34	7.01
2002-2003	3 333 542	894	349	9.55	614	11.95	464.10	7.18	536.78	6.21
2003-2004	4 660 425	1 065	483	9.64	621	10.50	221.50	21.04	301.36	15.46
2004-2005	4 734 396	778	216	21.93	550	20.71	261.00	18.14	331.49	14.28
2005-2006	5 028 585	861	300	16.77	573	17.47	404.90	12.42	470.65	10.68
2006-2007	4 846 521	1 099	456	10.62	646	10.70	301.00	16.10	347.57	13.94
2007-2008	3 774 647	908	276	13.66	572	11.25	502.40	7.51	552.78	6.83
2008-2009	4 715 210	1 042	440	10.72	605	10.81	339.90	13.87	418.64	11.26
2009-2010	5 746 834	886	371	15.50	578	18.67	319.60	17.98	384.53	14.94
2010-2011	4 443 054	915	377	11.80	588	13.59	384.80	11.55	427.81	10.39
2011-2012	3 487 282	868	337	10.34	582	12.20	703.30	4.96	766.21	4.55
2012-2013	5 000 482	1 224	695	7.19	643	8.61	568.10	8.80	634.49	7.88
2013-2014	5 451 360	1 230	665	8.20	660	9.57	413.00	13.20	449.88	12.12
2014-2015	4 191 569	919	385	10.88	614	13.73	456.00	9.19	513.51	8.16
2015-2016	3 809 805	913	401	9.51	602	12.27	220.80	17.25	285.50	13.34
2016-2017	2 603 181	828	282	9.22	579	10.48	576.80	4.51	612.46	4.25
2017-2018	3 750 878	1 088	576	6.52	633	8.25				
Moyenne Bassin d'alimentation (km²) :			11.69			12.63		15.23		11.52

Illustration 95 - Tableau des résultats des extensions de bassin d'alimentation de la source du Marseillon

En complément, l'analyse des chroniques de débit par la modélisation TEMPO (cf. chapitre 3.4.3) permet de qualifier la dynamique de fonctionnement de la recharge du Crétacé. L'impluvium de la source estimée par le modèle est de 14,7 km², ce qui reste dans l'ordre de grandeur des extensions calculées.

Ces résultats indiquent qu'une surface d'infiltration comprise entre 11 et 16 km² est nécessaire à la restitution des débits à la source du Marseillon. Il apparaît, des conclusions du fonctionnement hydrogéologique de la structure (cf. chapitre 3.4.4), qu'une composante souterraine d'origine profonde pourrait contribuer pour moins de 10 % au débit de la source, selon certains auteurs. L'effet de cette composante souterraine profonde ne remettra donc pas en cause l'ordre de grandeur de l'extension de l'impluvium de la source, située sur les calcaires crétacés de la structure anticlinale.

Au vu des données de topographie, de la carte des conditions d'infiltration (Illustration 41) et des cartes piézométriques de la structure (Illustration 75 et illustration 76), un bassin d'alimentation de la source du Marseillon peut être proposé.

Ce bassin est ici présenté en trois parties, dont la principale, d'environ 8 km² de superficie, s'étend au sud de la source. Une partie de l'eau qui ruisselle sur les marnes albiennes, dans le cœur de l'anticlinal, peut ensuite s'infiltrer avant de rejoindre la source. Cette superficie couvre une partie de la rive gauche du Laudon et une large zone comprise entre le Laudon et le Gabas, à l'est. La géologie rencontrée sous son emprise est favorable à l'infiltration diffuse. Les sables fauves notamment, dont le rôle important a été évoqué précédemment, sont très présents dans l'extension proposée. Pour compléter ce bassin d'alimentation, deux autres parties sont proposées :

- une zone, en hachuré noir, au sud, de près de 5 km². Cette zone s'appuie principalement sur la topographie du secteur. Les cartes piézométriques indiquent qu'une infiltration dans ces secteurs rechargerait les nappes vers le sud. Toutefois, du fait de la pente, la part de l'eau qui ruisselle pourrait être collectée au profit de la source du Marseillon ;
- une zone à l'est, d'environ 2 km², du côté d'Eyres-Moncube. Dans cette zone, les écoulements souterrains sont dirigés vers l'ouest, tandis que la topographie favoriserait un écoulement vers le Gabas. Cette zone marquerait donc les apports de la composante profonde des nappes, venant du sud-ouest de la structure. On ne peut également exclure à ce stade une contribution du Gabas (au travers de pertes) dans cette zone pour rejoindre la source, d'autant plus que le cours d'eau est a priori perché par rapport à la nappe en amont d'Eyres-Moncube.

L'ordre de grandeur du bassin d'alimentation proposé apparaît cohérent. Sa délimitation exacte reste plus délicate à ce stade. Des essais de traçage, notamment dans certains des forages du bassin d'alimentation, pourraient être proposés. De même, des compléments pourraient être apportés par l'analyse de pertes possibles depuis le réseau hydrographique.

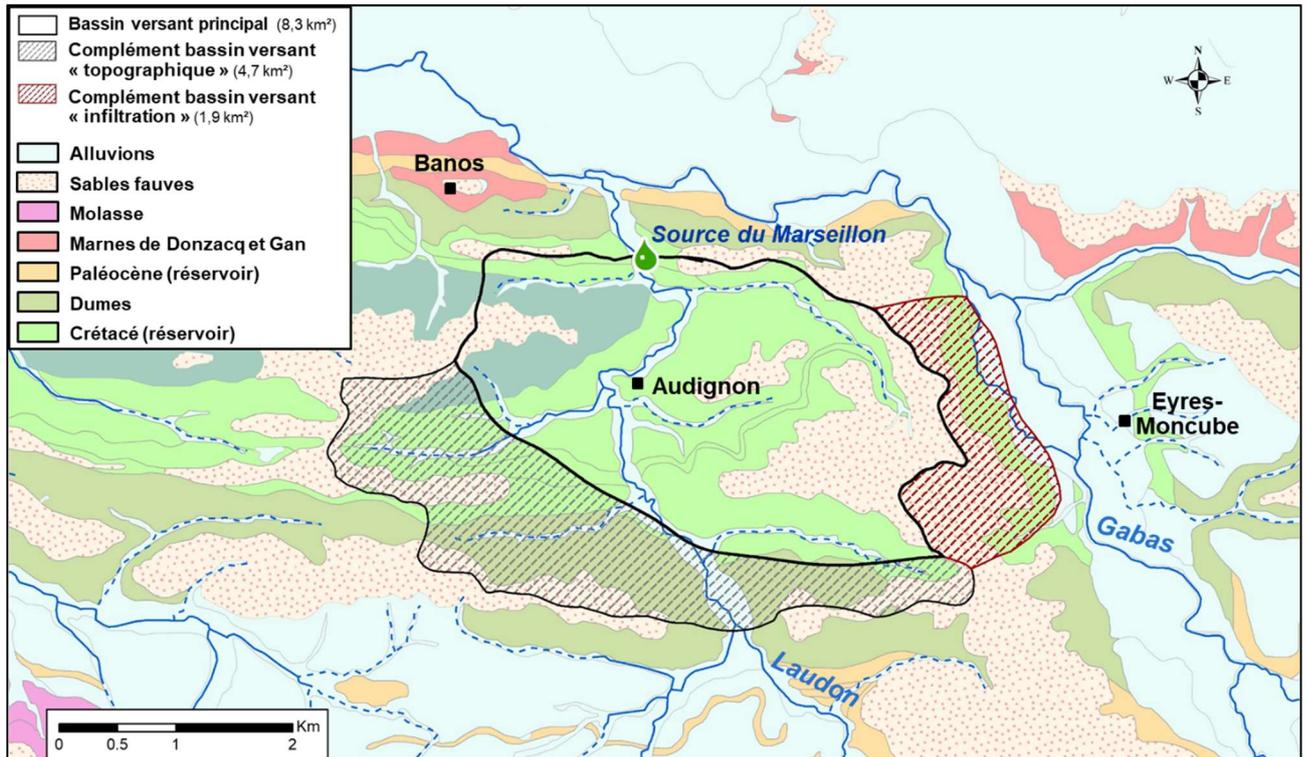


Illustration 96 - Proposition de bassin d'alimentation de la source du Marseillon

3.5.3. Essai par pompage

Protocole

Un essai par pompage multi-puits entre les forages F1 et F2 a été réalisé en avril 2019, puis interprété, afin de préciser les modalités d'écoulement au niveau de la source. Préalablement, à cet essai, une phase d'arrêt des pompes de quelques heures a été demandée, afin de mettre le système aquifère à l'équilibre et ainsi retrouver des niveaux piézométriques stabilisés dans les ouvrages. L'essai de pompage a consisté ensuite en un pompage d'abord dans F1, durant environ 24 h à 300 m³/h, puis à son arrêt et la mise en route de F2, durant environ 27 h (débit : 300 m³/h). Ensuite un arrêt de F2 durant environ 16 h, puis enfin une reprise de l'exploitation (F1 et F2 pompés en alternance à 300 m³/h), ont été effectués. Les suivis réalisés durant cet essai de pompage sont les suivants (Illustration 97) :

- niveaux dans les ouvrages exploités et le piézomètre P1,
- débits pompés dans F1 et F2,
- débit de la source.

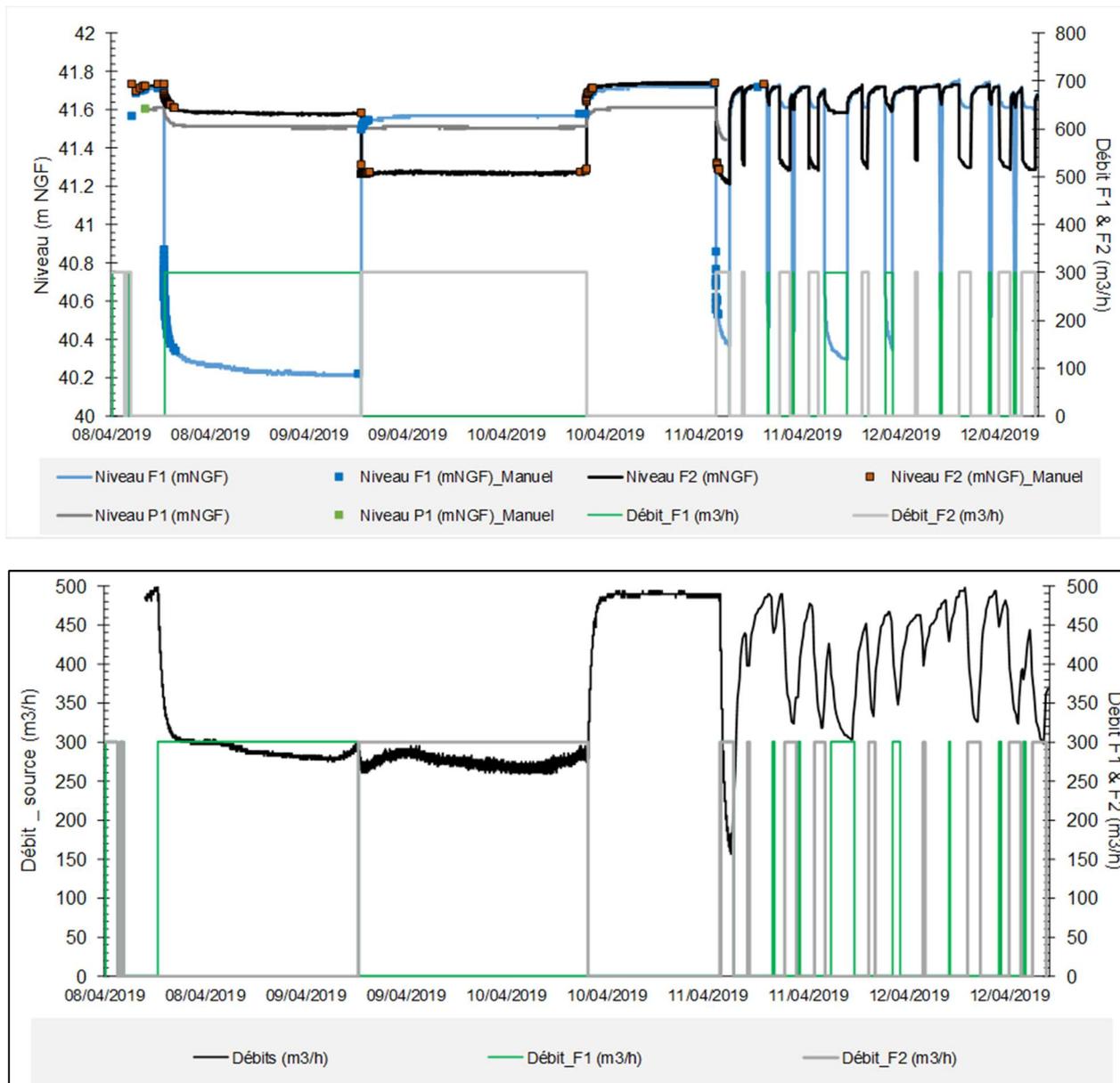


Illustration 97 - Données du suivi de l'essai multi-puits, réalisé dans les forages du site d'exploitation de la source d'Audignon, entre le 08 et le 12 avril 2019 (graphe du haut : suivi des niveaux piézométriques dans les forages exploités (F1 et F2) et le piézomètre P1 ; suivi des débits du pompage des ouvrages ; graphe du bas : suivis des débits de la source et des ouvrages pompés)

Modélisation de l'essai - Choix du modèle mathématique

Le modèle choisi pour interpréter cet essai considère un pompage dans une fracture verticale au sein d'un aquifère multicouche, pour répondre au contexte hydrogéologique de la source, et permet de calculer l'impact, en terme de débits, dans une source voisine (Illustration 98). Ce modèle a été construit à partir des solutions proposées par Hunt (2004) et Dewandel et al. (2018). Dans ce modèle, l'aquifère est un multicouche constitué d'un niveau perméable pompé au travers d'une fracture (longueur : $2xf$), de transmissivité T et d'emmagasinement S , surmonté d'un niveau semi-perméable (ou aquitard) de perméabilité k' , d'épaisseur B' , et d'emmagasinement σ . La source, de diamètre $2x_0$ est située à une distance d du puits de pompage. Son lit est caractérisé par sa perméabilité (k'') et son épaisseur (b''). Un paramètre de drainance α contrôle les

échanges entre l'aquifère pompé et la source. Il est, entre autres, fonction du diamètre de la source et de la perméabilité du sol au niveau de la source ($\alpha = \frac{\pi x_0^2}{Tb''} k''$; Hunt, 2004).

L'objectif est de modéliser le rabattement dans l'aquifère pompé, au puits de pompage ou dans un piézomètre, et d'évaluer l'impact en terme de débit sur la source. L'annexe 4 présente des courbes-types de l'évolution du rabattement et de l'impact sur la source, au cours du temps, pour différentes valeurs du coefficient α (voir Dewandel, 2018, pour plus d'information sur ce type de graphique, ainsi que les paramètres du modèle).

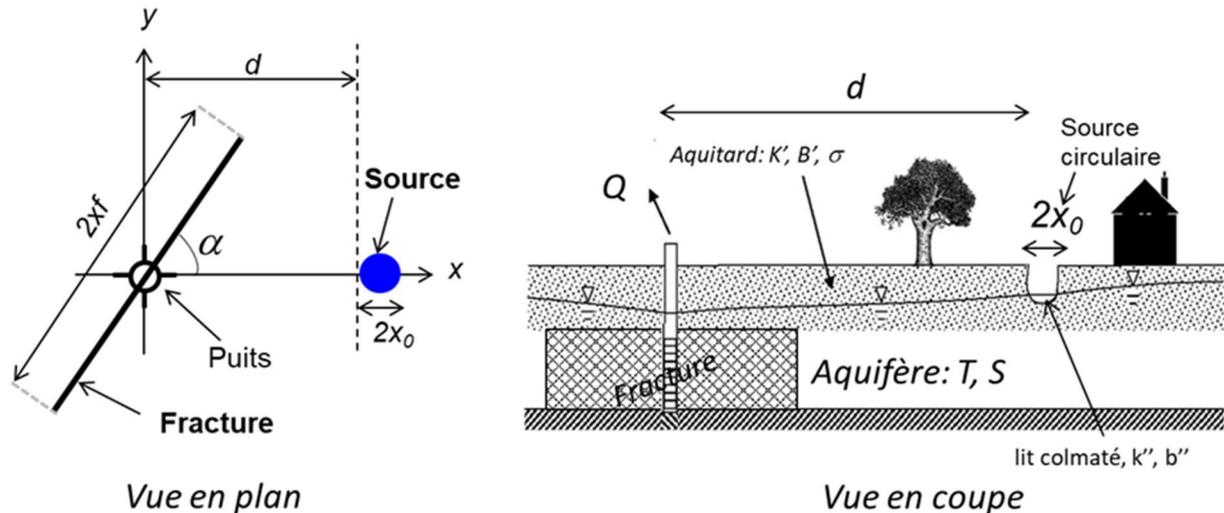


Illustration 98 - Pompage dans une fracture située dans un aquifère multicouche et à proximité d'une source (modification de Hunt, 2004 et Dewandel et al., 2018)

Résultats

Comme il s'agit d'un essai multi-puits, un modèle mathématique, déduit du précédent, a été construit de façon à prendre en compte les interférences d'un puits de pompage sur l'autre (forages pompés F1 et F2), de calculer le rabattement induit par les deux pompages au piézomètre de surface (P1) et de modéliser l'évolution du débit de la source, durant l'essai dans les deux ouvrages. L'objectif est d'arriver à modéliser les rabattements aux puits de pompage F1 et F2, le rabattement au piézomètre P1 et l'impact sur le débit de la source, avec un jeu de paramètres hydrodynamiques aussi proches que possible, si ce n'est identiques.

L'illustration 99 présente le schéma de calcul utilisé dans le référentiel F1-source (le puits de pompage F1 a pour coordonnées $x=y=0$, et la source est située sur l'axe des x). Par défaut, les directions des fractures interceptées par les deux ouvrages pompés (F1 et F2) ont été choisies perpendiculaires, leurs dimensions (longueur $2xf$) ont été évaluées par calages successifs.

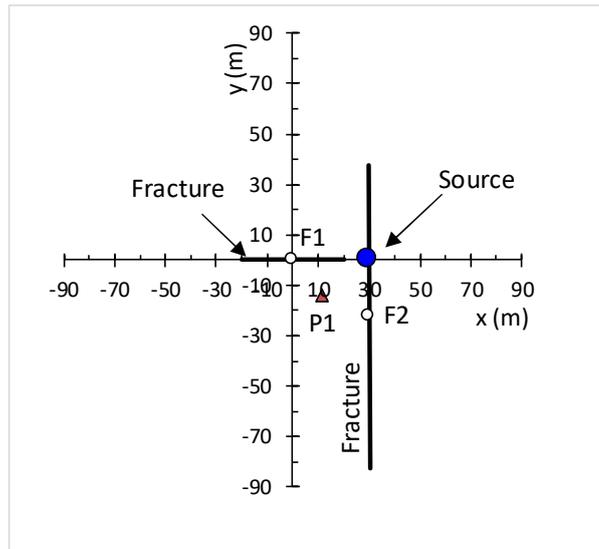


Illustration 99 - Schéma de calcul utilisé (référentiel : F1 ; modèle : fracture et source), modifié de Hunt (2004) et Dewandel et al. (2018), lors des pompages effectués dans les forages d'Audignon

Les résultats de la modélisation (Illustration 100 et illustration 101) montrent que les rabattements et l'impact sur la source sont correctement reproduits par le modèle ; les résultats sont de bonne qualité. L'illustration 102 présente les paramètres du modèle. On notera que les différentes modélisations ont été réalisées avec un jeu de paramètres hydrodynamiques identiques, sauf pour la drainance au niveau du piézomètre P1 (voir explication ci-dessous) et les pertes de charge quadratiques au niveau des forages pompés, ce qui est attendu puisqu'il s'agit d'un paramètre intrinsèque au puits.

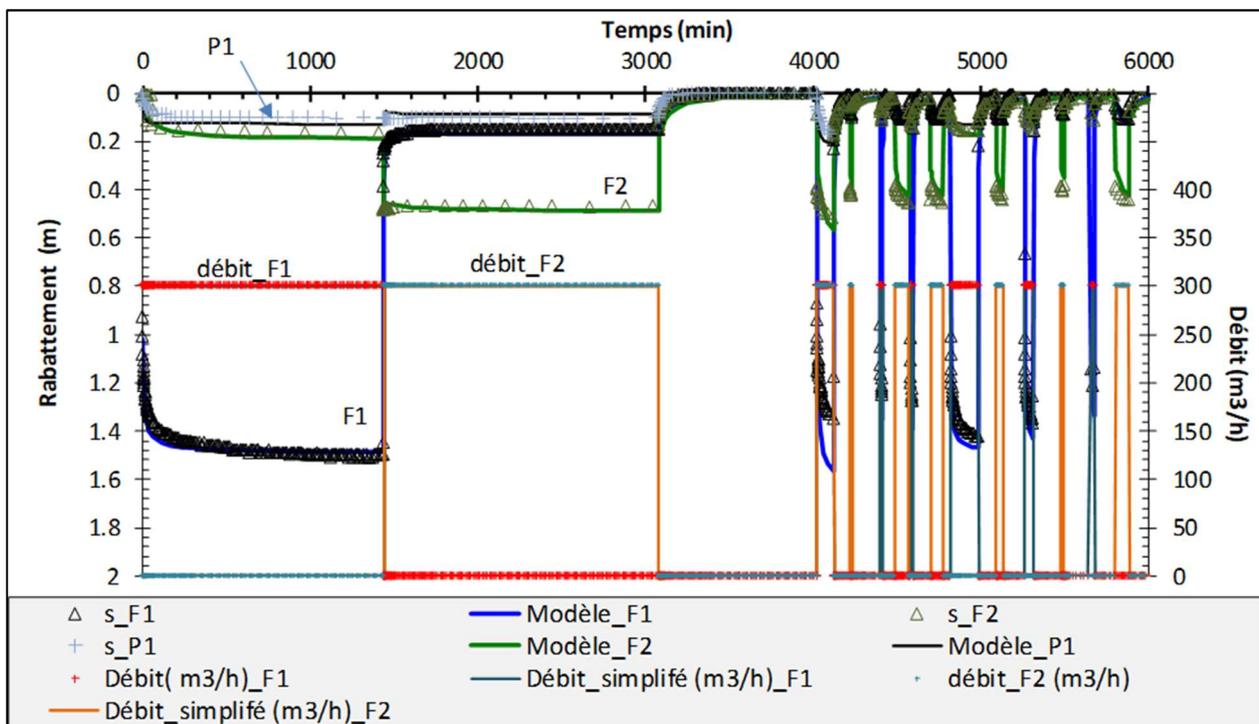


Illustration 100 - Modélisation des rabattements dans les puits de pompage F1 et F2 et piézomètre P1 (graphe arithmétique)

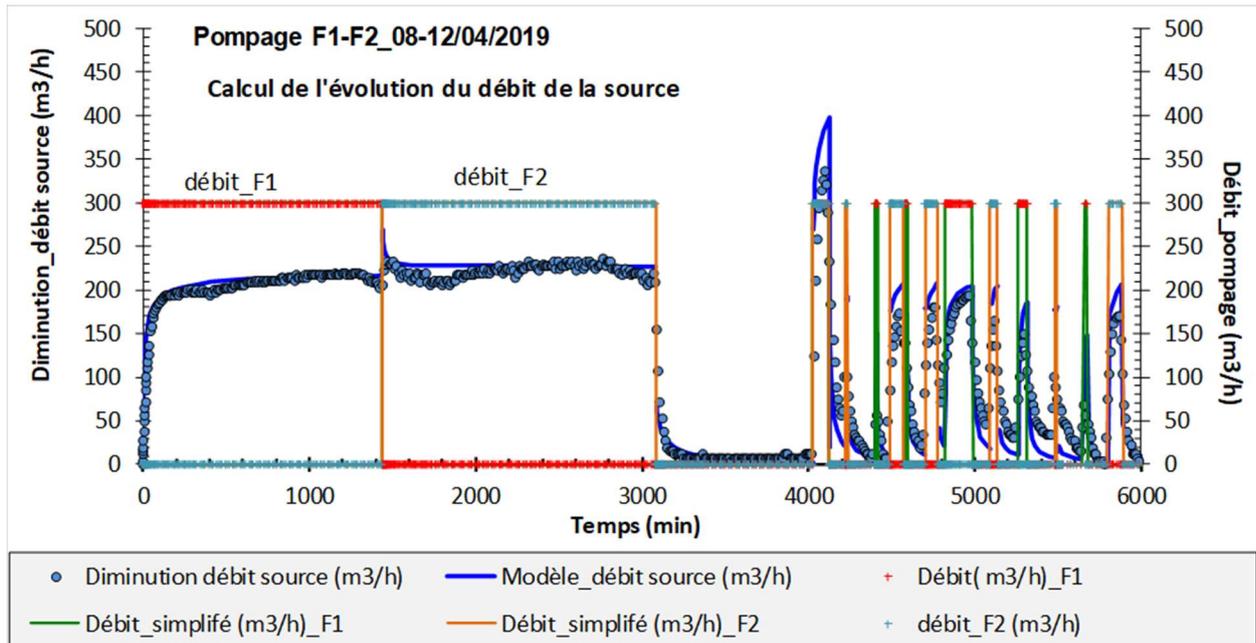


Illustration 101 - Modélisation de l'impact sur la source, suite aux pompages dans F1 et F2 (graphe arithmétique)

Modèle fracture et source	F1	F2	P1
r ; distance / F1 (m)	0.1	37.5	18.2
T ; transmissivité (m^2/s)	4.0E-02	4.0E-02	4.0E-02
S ; emmagasinement (-)	6.0E-02	6.0E-02	6.0E-02
xf ; demi-longueur fracture (m)	20	60	-
α_{fract} (°) ; angle fracture (/axe puits-source)	0	0	-
k' ; Perm. aquitard (m/s)	1.0E-06	1.0E-06	3.0E-05
B' ; épaisseur aquitard (m)	1	1	1
σ ; emmag. semi-perm. (-)	infini	infini	infini
d ; dist. puits-source (m)	30.0	22.5	-
α ; coef. drainance source/aquifère (-)	1 100	1 100	1 100
C ; pertes de charge quadratiques ($m^{-5}s^2$)	140	35	-
Rc ; effet capacité (m)	0.5	0.1	-

Illustration 102 - Paramètres hydrodynamiques retenus dans le modèle

La transmissivité de l'aquifère est élevée, de l'ordre de $4.10^{-2} m^2/s$; son emmagasinement est estimé aux environs de 6 %, ce qui traduit vraisemblablement le caractère très fracturé et probablement libre de l'aquifère. La dimension des fractures interceptées par les forages F1 et F2 est notable, de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres dans F1 à une centaine de mètres dans F2. Concernant la drainance en provenance de l'horizon superficiel semi-perméable, σ vaut une valeur infinie, ce qui signifie que le niveau d'eau dans cet horizon ne s'abaisse pas durant le pompage. La drainance ($k' : 10^{-6} m/s$ pour une épaisseur B' unitaire) est faible et traduit vraisemblablement le flux d'eau souterraine qui alimente la source, voire aussi l'alimentation de l'aquifère directement par la vasque d'où sourd la source, plutôt qu'un aquitard de subsurface.

Ces flux de drainance, qui correspondent à des entrées dans le système, pourraient également correspondre à des apports, via des pertes à proximité (cours d'eau, pertes sans vraie connexion hydraulique avec la nappe), mais qu'il est difficile d'identifier en l'état. Il n'apparaît pas de limite alimentée dans l'essai de pompage pouvant s'apparenter à cet apport depuis le cours d'eau. Enfin, ces flux pourraient davantage correspondre au signal d'infiltration au travers de la couverture des sables fauves mis en avant précédemment (cf. chapitre 3.4.3.).

On notera aussi que pour modéliser le rabattement dans le piézomètre (P1), la drainance a dû être augmentée ($k' : 3 \times 10^{-5}$ m/s). Cette plus forte valeur peut être expliquée par le fait que cet ouvrage, de seulement trois mètres de profondeur, ne capte qu'une partie de l'aquifère et donc qu'il n'est pas représentatif de la variation totale du niveau d'eau dans l'aquifère. Dans ce cas, l'augmentation, arbitraire, de la drainance a donc pour objectif de diminuer l'amplitude du rabattement et donc de caler les données observées. Le coefficient d'échange entre la source et l'aquifère est particulièrement élevé ($\alpha > 1\ 000$) et traduit que les échanges entre l'aquifère et la source sont importants. Ce type de valeurs est typique de l'émergence par une zone de fractures (Hunt et Smith, 2008).

Au final, la modélisation de l'essai par pompage multi-puits sur le site d'Audignon a nécessité le développement d'un modèle mathématique original, nécessitant de prendre en compte : 1) des fractures représentant le développement karstique souterrain, 2) l'impact sur une source et 3) le fait que plusieurs ouvrages sont pompés.

Le modèle reproduit de façon convenable les rabattements et l'évolution du débit de la source durant les pompages et a permis de faire une estimation des paramètres de cet aquifère.

Il apparaît, au terme de ce travail, que :

- La source est davantage impactée par le pompage dans F2 (77 % du débit pompé) que dans F1 (72 % du débit pompé). Lorsque ceux-ci sont prélevés à 300 m³/h (débit d'exploitation normal), les impacts respectifs sur le débit de la source sont de 230 m³/h et 215 m³/h (Illustration 103). Lorsque les deux ouvrages sont en route, près de 74 % du débit pompé provient du débit de la source ;

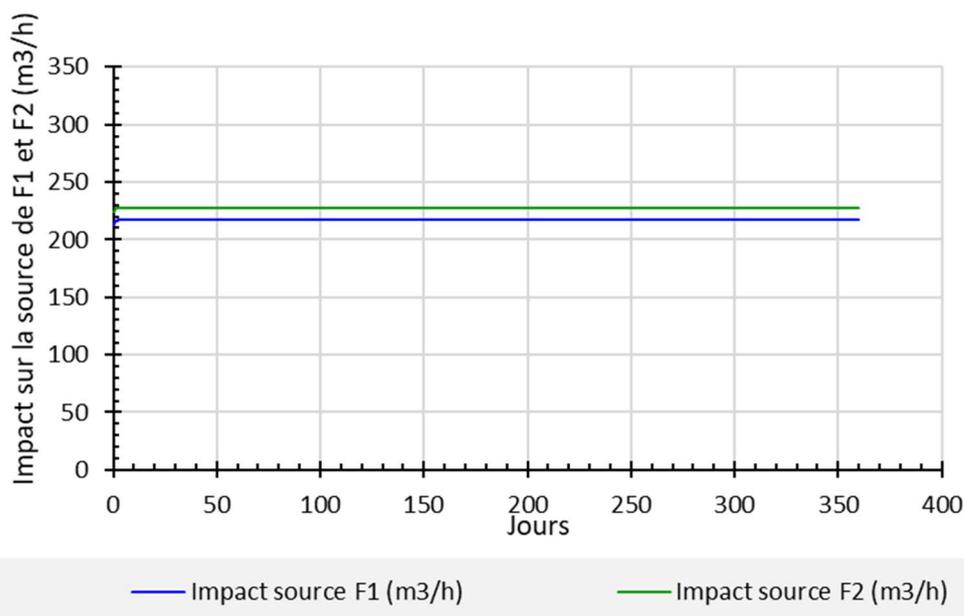


Illustration 103 - Impacts des prélèvements de F1 et F2 (chacun pompé à 300 m³/h) sur la source

- Le modèle montre que les échanges entre l'aquifère, les puits et la source sont importants, l'émergence s'effectuant au travers d'une zone de fractures ;
- Il n'apparaît pas de limite alimentée pouvant permettre d'identifier le soutien du débit de la source par le cours d'eau. Toutefois, des flux d'entrée dans le système sont identifiables au travers d'un flux de drainance. Ces flux pourraient être assimilés au flux d'eau souterraine qui alimente la source, voire en partie par la vasque de la source ou des pertes entrant dans le système. Il pourrait s'agir plus vraisemblablement de la composante de recharge, via la couverture des sables fauves, mise en évidence dans l'approche fonctionnelle de la structure d'Audignon (cf. chapitre 3.4.3).

3.5.4. Caractérisation des liens avec le cours d'eau voisin du Laudon

La survenue de la turbidité au niveau de la source, si elle apparaît au travers de l'envahissement par débordement du Laudon ou par remontée d'eau turbide le long du canal (cf. chapitre 3.1.2), a souvent été mise en rapport avec des pertes du Laudon dans l'aquifère, qui ressortent au niveau de la source, sans jamais cibler les modalités de connexion. Dans le but de préciser ces relations possibles et en l'absence de mise en œuvre d'une opération de traçage, des jaugeages différentiels, de part et d'autre des pertes suspectées, ainsi que des suivis en haute fréquence des débits et surtout des paramètres de température et de conductivité du Laudon, ont été réalisés pour être mis en perspective avec ceux de la source.

La zone présumée des pertes du Laudon correspond aux affleurements des calcaires reconnus dans le lit du Laudon (Illustration 56). Des jaugeages en série ont été effectués afin d'évaluer de potentielles pertes visibles au travers d'un changement de débit du Laudon, entre l'amont et l'aval de ces possibles pertes. Ces mesures de débit ne sont possibles que lorsque le Laudon ne reçoit pas de contribution d'un cours d'eau temporaire, le Casterra, qui se déverse, depuis l'est, au niveau des affleurements karstiques. L'opération de jaugeages sériés a été menée le 30 octobre 2018, en période de basses eaux. Deux mesures en amont et deux mesures en aval ont été réalisées de manière synchrone, afin de se prémunir de modification de conditions d'écoulement.

Les résultats (Illustration 104) montrent que les variations de débits entre l'amont et l'aval de la zone de pertes présumées sont très faibles (inférieures à 4 %) et jugées non significatives au regard des incertitudes de mesure du débit (minimum 5 %). À ce stade, il est donc difficile d'affirmer l'existence de pertes du Laudon, au profit du système karstique de la source de Marseillon. Si des pertes existent, les flux d'échanges seraient très faibles (quelques l/s) d'après les mesures réalisées.

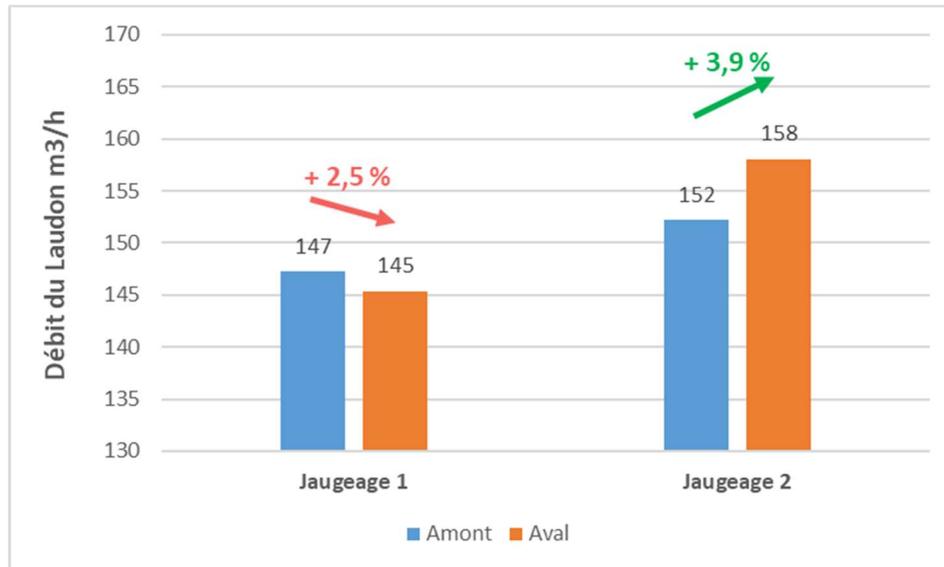


Illustration 104 - Résultat des deux opérations de jaugeages sériés dans le Laudon, réalisés le 30 octobre 2018

L'examen des suivis temporels de conductivité électrique et de température du Laudon et de la source du Marseillon, ainsi que les suivis hydrodynamiques, peuvent apporter un éclairage intéressant pour qualifier les interdépendances éventuelles entre les eaux de surface et les eaux souterraines (Illustration 105 et Illustration 106). Les eaux du Laudon présentent d'importantes variations de conductivité et de température au cours du cycle hydrologique, contrairement aux eaux de la source du Marseillon, qui demeurent remarquablement stables. Au cours du printemps 2018, les seules variations notables dans la source ont été observées temporairement (pendant quelques heures) au cours des crues de la fin du mois de mai et mi-juin. Ces variations ont été provoquées par le débordement de crue du Laudon, qui a envahi le canal d'évacuation des eaux de la source ; l'eau de crue, turbide et moins minéralisée du Laudon, a pu envahir la source et donc se mélanger à l'eau de l'aquifère (cf. zooms de l'illustration 105). En dehors de ces périodes, la charge piézométrique de l'aquifère apparaît supérieure à la cote du plan d'eau, mesurée à la station du suivi des débits du Laudon. Dans ce contexte, les échanges entre la nappe et la rivière se feraient plutôt au profit de la rivière (drainage). Ce résultat permet de confirmer l'absence de pertes de débit dans le Laudon, mesurée par jaugeages différentiels. L'absence de variations notables des paramètres physico-chimiques de la source, en comparaison des eaux de surface, permet également de renforcer ces résultats.

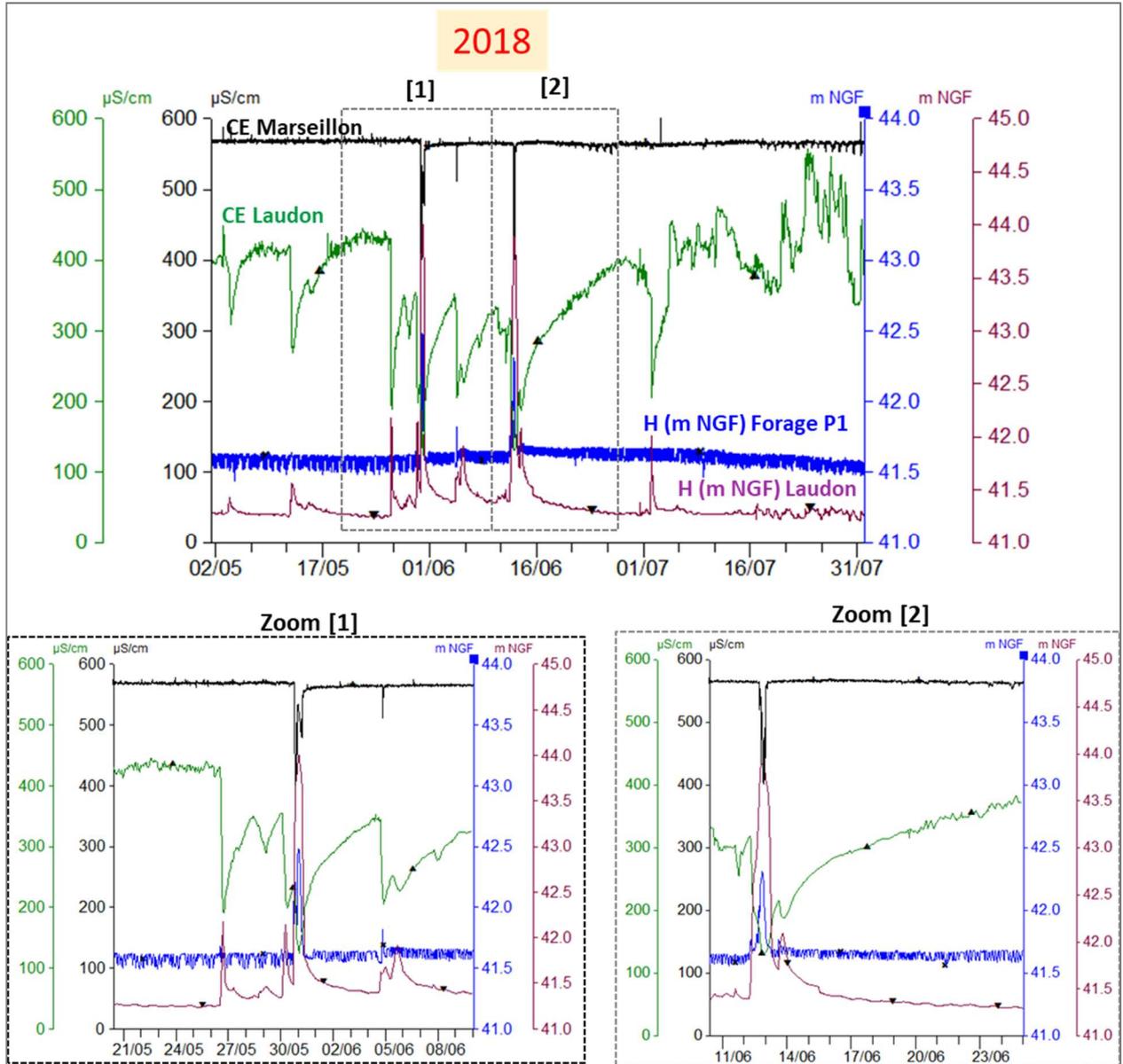


Illustration 105 - Évolutions de la conductivité électrique (CE) des eaux du Laudon et de la source de Marseillon, lors des crues du printemps 2018 ; les évolutions du niveau de la rivière et de la piézométrie de l'aquifère sont également reportées

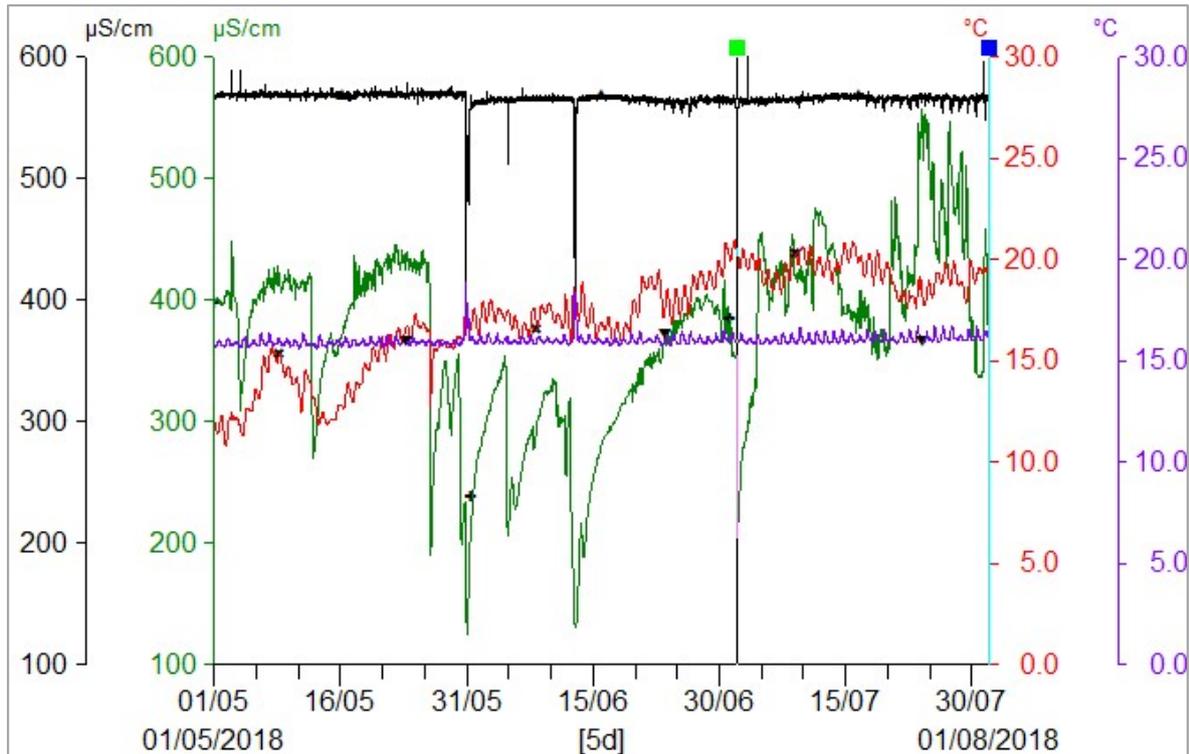


Illustration 106 - Évolutions de la conductivité électrique ($\mu\text{S/cm}$) et de la température ($^{\circ}\text{C}$) des eaux du Laudon (en vert et rouge) et de la source de Marseillon (en noir et violet), lors des crues du printemps 2018

3.5.5. Apport pour une meilleure compréhension du phénomène de turbidité

Les problèmes de turbidité rencontrés sur le site de Marseillon perturbent la gestion de la ressource, puisqu'elle se traduit par l'arrêt de la production et le recours à des ressources de substitution, puis la nécessité de purges et le nettoyage du système de production, engendrant ainsi des coûts supplémentaires.

Dans le but d'anticiper et mieux gérer l'exploitation de la ressource, un capteur de turbidité a été disposé, en avril 2018, dans le griffon principal de la source. Ce nouveau suivi direct de turbidité dans la lagune vient ainsi compléter le suivi, qui était seulement réalisé jusqu'ici dans les eaux pompées dans les deux forages. Dès la mise en route de ce capteur dans la lagune, 2 seuils ont été programmés qui, s'ils sont atteints, entraînent une coupure des prélèvements et l'apparition d'eau turbide dans les forages, permettant ainsi d'éviter de purger et nettoyer le réseau de production.

Les suivis de turbidité réalisés dans les forages, au cours de la période 2018-2019, ont été confrontés aux suivis réalisés dans la source en 2019, dans le but de mieux comprendre les phénomènes. Les suivis mettent en évidence une évolution complexe de la turbidité, au cours du cycle hydrologique : il n'existe pas de relation univoque entre la piézométrie et la turbidité, ni de relation évidente entre la turbidité et le débit de pompage. Par ailleurs, les suivis montrent que les turbidités des eaux pompées dans les 2 forages ne suivent pas les mêmes dynamiques. Les exemples des épisodes de crue, de mai-juin 2018 et du mois de janvier 2019, permettent de bien illustrer ce constat.

Épisodes de turbidité de mai et juin 2018

Les évolutions de la turbidité mesurées dans les ouvrages, au cours des crues de fin mai et mi-juin 2018, sont présentées dans l'illustration 107. Les évolutions de la piézométrie et du débit de pompage sont également reportées sur l'illustration, pour mieux comprendre les évolutions des chroniques de turbidité. L'illustration 108 présente de manière plus détaillée les évolutions mesurées au cours de l'épisode de fin mai 2018.

L'épisode pluvieux de fin mai 2018 a provoqué un phénomène de crue et de débordement du Laudon. L'eau de crue turbide et moins minéralisée du Laudon a pu envahir la source et donc se mélanger à l'eau de l'aquifère. Ce phénomène a provoqué l'arrêt du pompage dans le forage F1, en raison de la forte augmentation de la turbidité mesurée dans l'ouvrage. Suite à l'arrêt du F1, les prélèvements dans le F2 ont été augmentés pour compenser le F1. L'augmentation des prélèvements dans le F2 n'a pas provoqué de changement notable de la turbidité des eaux pompées : le signal est resté globalement très faible. Suite à l'épisode de la fin du mois de mai 2018, la turbidité mesurée dans l'ouvrage F1 a présenté une diminution pendant une dizaine de jour ; le pompage était à l'arrêt pendant cette période. Un questionnement subsiste sur la représentativité des évolutions mesurées dans le forage F1, pendant l'arrêt du pompage : les évolutions mesurées pendant cette période ne sont pas jugées représentatives de l'eau de l'aquifère, mais vraisemblablement de l'eau de la colonne d'exhaure.

L'épisode pluvieux de mi-juin n'a pas provoqué de variation significative de la turbidité de l'ouvrage F2. Aucune variation n'a été mesurée dans le forage F1, qui était toujours à l'arrêt à cette période. La remise en route du pompage au forage F1, à partir du 20 juin, a été suivie d'une succession de phénomènes d'augmentation temporaire de la turbidité des eaux pompées. Aucun lien n'est mis en évidence avec la chronique des prélèvements journaliers. L'absence de variation notable de la piézométrie après le 20 juin ne permet pas d'établir de lien avec la turbidité du forage F1. Ces résultats suggèrent que les variations de turbidité, mesurées dans les eaux pompées par le forage F1, seraient causées par le pompage dans l'ouvrage (effet local à l'ouvrage) et ne traduiraient donc pas un fonctionnement représentatif de l'aquifère. Les données du fluorimètre de terrain auraient permis de faire avancer la réflexion sur ce questionnement : les données de turbidité des eaux de la vasque (non représentées), recueillies par le Syndicat des Eaux, indiquent de faibles valeurs (< 1 NTU), ce qui renforcerait l'idée que le problème de turbidité serait lié aux drains karstiques, recoupés par l'ouvrage F1 (effet local à l'ouvrage).

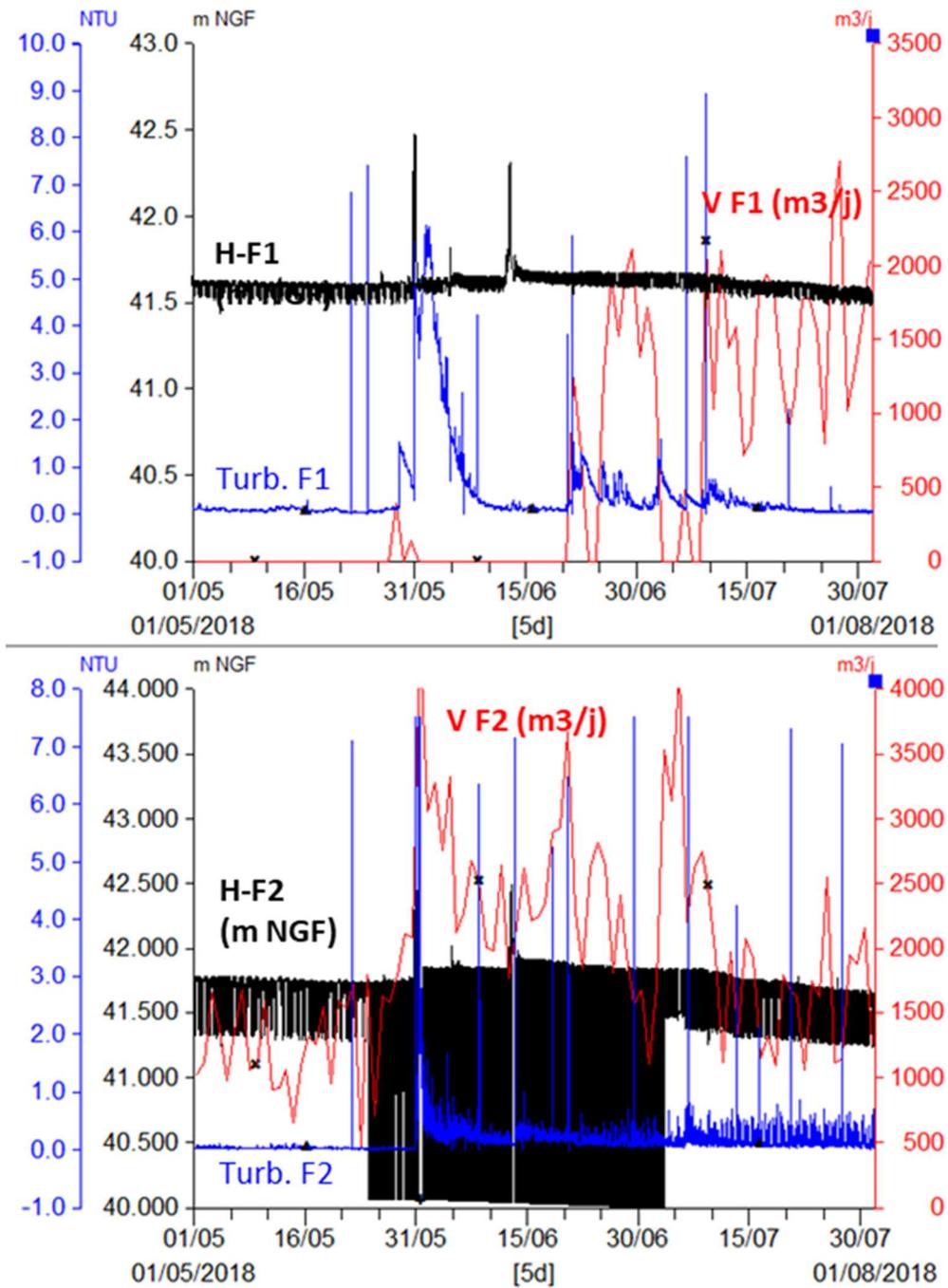


Illustration 107 - Évolutions de la turbidité, de la piézométrie et des volumes prélevés dans les forages F1 et F2 (champ captant de Marseillon, du 01/05/2018 au 31/07/2018)

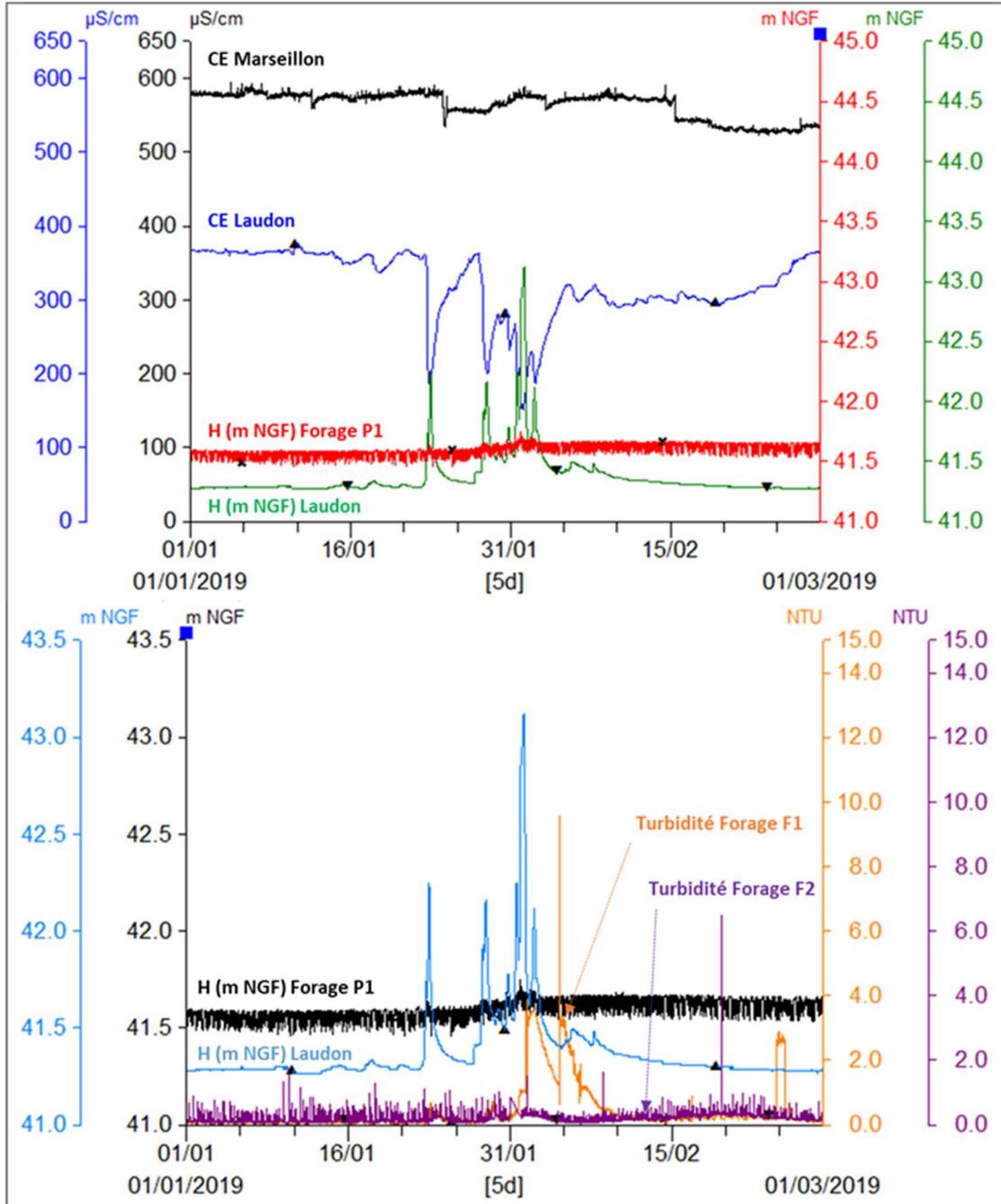


Illustration 108 - Évolutions de la turbidité, de la conductivité des eaux des forages F1 et F2 du champ captant de Marseillon, ainsi que de la piézométrie, entre le 01/01/2019 et le 01/03/2019 (l'évolution du niveau et de la conductivité de l'eau du Laudon, situé à proximité, est également reportée)

Episodes de turbidité de février 2019

Les évolutions de la turbidité mesurées dans les ouvrages, au cours de la crue de début février 2019, sont présentées dans l'illustration 109.

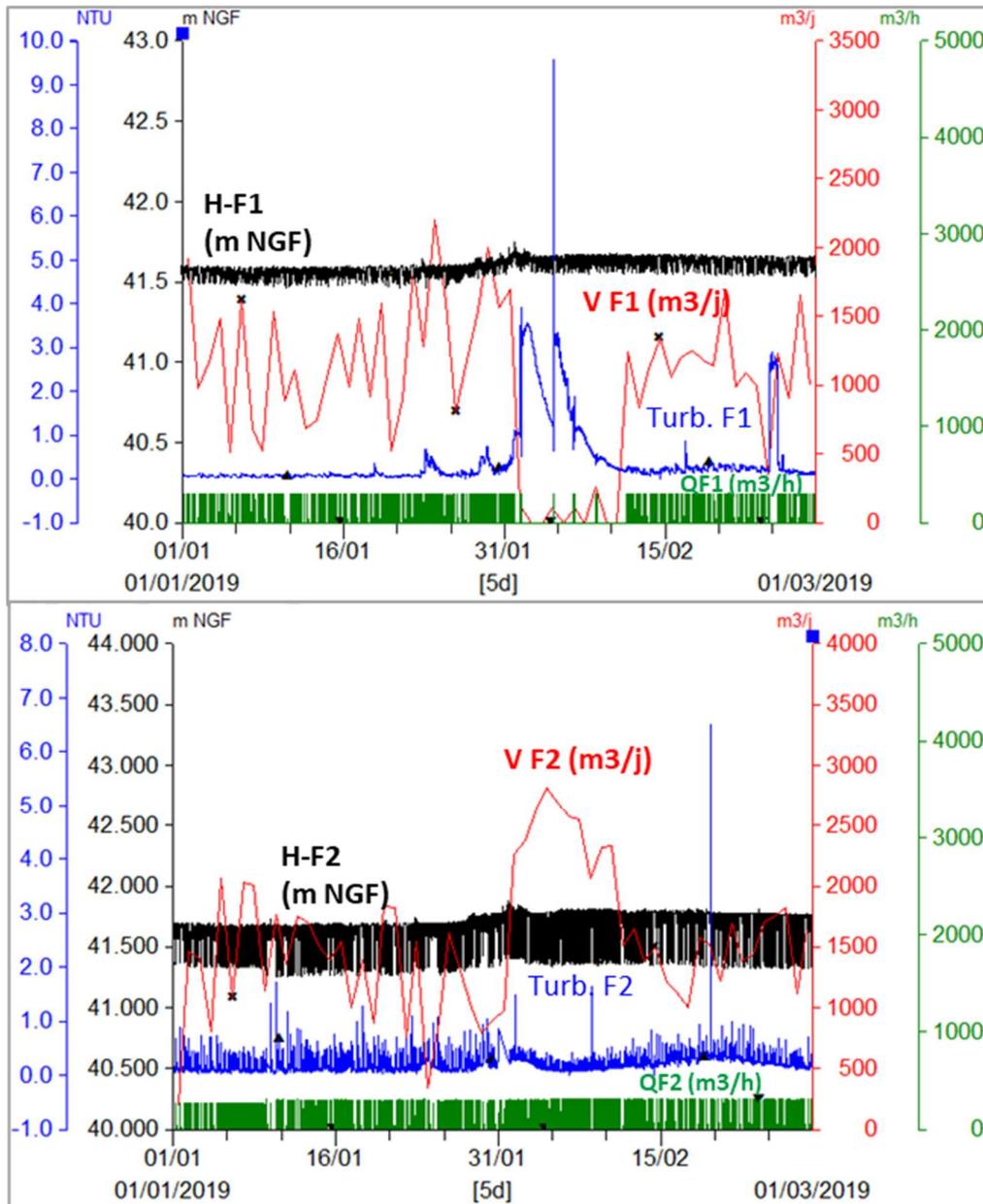


Illustration 109 - Évolutions de la turbidité, de la piézométrie et des volumes prélevés dans les forages F1 et F2 du champ captant de Marseillon, entre le 01/01/2019 et le 01/03/2019

La crue du mois de février a provoqué une augmentation de la turbidité des eaux pompées dans le forage F1, ce qui s'est traduit par l'arrêt du pompage. Suite à cet arrêt, les prélèvements dans le F2 ont été augmentés, pour compenser le F1. L'augmentation des prélèvements dans le F2 n'a pas provoqué de changement notable de la turbidité des eaux pompées : le signal est resté globalement très faible et du même ordre de grandeur que celui mesuré avant la crue. La turbidité mesurée dans l'ouvrage F1, pendant l'arrêt de production du F1, n'est pas jugée représentative pour les raisons précédemment évoquées. Pour le forage F2, les cycles de pompage infra-journaliers permettent d'expliquer les faibles variations mesurées.

Episodes de turbidité de juin 2019

Les évolutions de la turbidité mesurées dans les ouvrages, au cours de la crue du mois de juin 2019, sont présentées dans l'illustration 110.

L'épisode de crue du mois de juin 2019 a provoqué une faible augmentation de la turbidité des eaux pompés dans le forage F1, qui ne s'est pas traduit par l'arrêt du pompage dans le forage F1. La turbidité du forage F2 est restée globalement très faible et du même ordre de grandeur que celle mesurée avant la crue. La confrontation des mesures de turbidité dans la source et dans le forage suggère que les dynamiques d'évolution sont comparables. Les très faibles variations d'amplitudes de turbidité, mesurées au cours de cette épisode, ne permettent malheureusement pas d'apporter des informations notables sur le fonctionnement du système vis-à-vis de la turbidité.

L'absence d'évolution de la minéralisation des eaux, au cours de cet épisode, met en évidence l'absence de phénomène de dilution, en lien avec un phénomène d'infiltration rapide au sein du karst. Dans ce contexte, les faibles évolutions, observées lors de cet épisode pluvieux, pourraient être corrélées au phénomène de transfert de pression, au sein de la zone noyée du karst, qui remobilise les particules fines, présentes au sein du réseau de drainage karstique de la source.

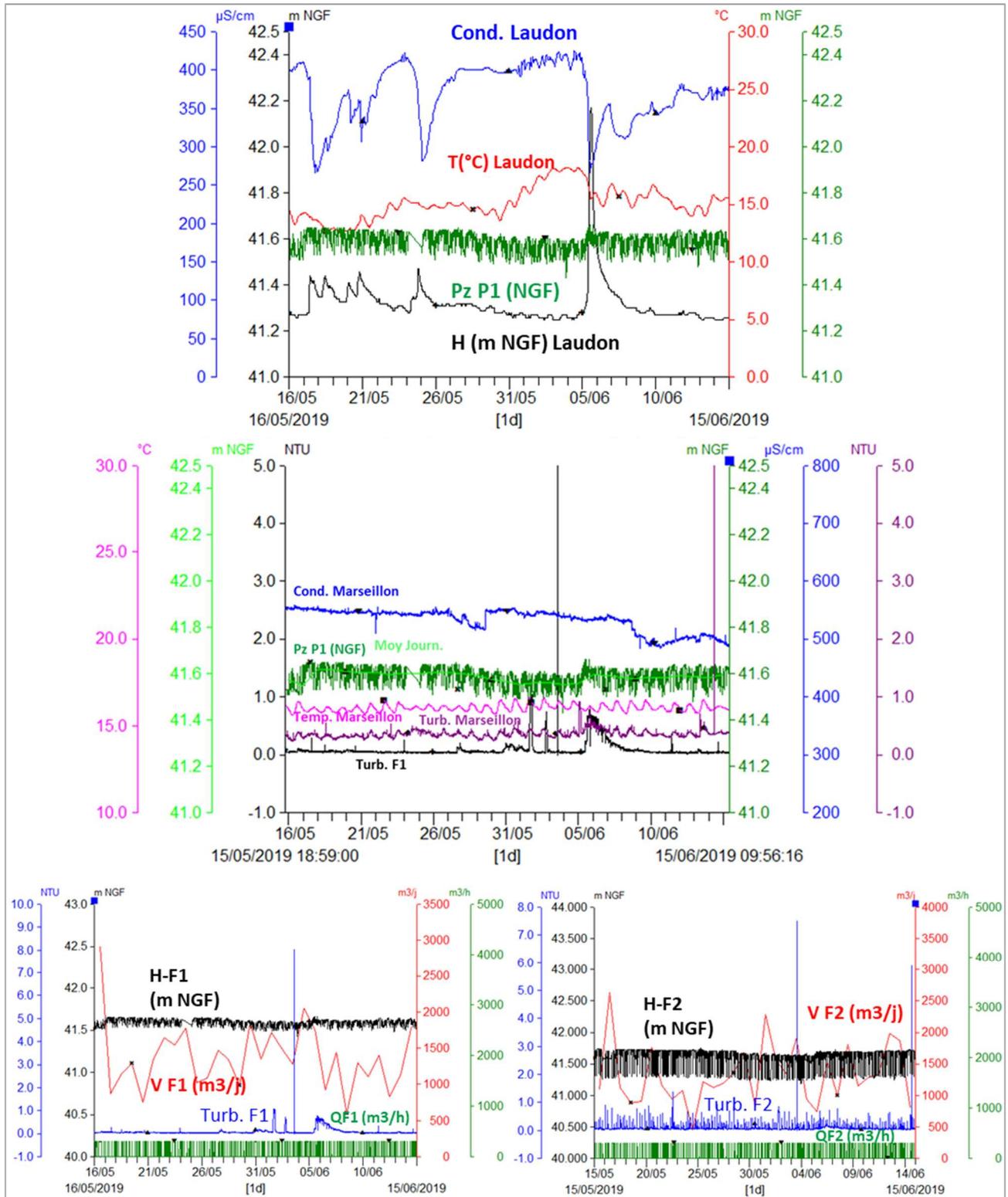


Illustration 110 - Évolutions de la turbidité, de la conductivité des eaux des forages F1 et F2 du champ captant de Marseillon et de la piézométrie, entre le 15/05/2019 et le 15/06/2019 (l'évolution du niveau et de la conductivité de l'eau du Laudon, situé à proximité, est également reportée)

3.5.6. Conclusion

Le fonctionnement de la source du Marseillon est abordé ici surtout d'un point de vue quantitatif. Dans le cadre de ce travail, plusieurs éléments sont apportés quant à la compréhension de son fonctionnement :

- La **composante karstique** du fonctionnement hydrogéologique de la source est de **faible intensité**, en comparaison des systèmes très karstifiés reconnus notamment sur la plateforme carbonatée nord-aquitaine.
- Le **rôle des sables fauves dans la dynamique de la source** a pu être démontré par les approches géochimiques et l'approche fonctionnelle du karst, mises en œuvre. L'essai par pompage indique que la ressource viendrait essentiellement des calcaires crétacés, qui pourraient en partie drainer les sables fauves.
- Les **liens avec le cours d'eau du Laudon**, au travers de pertes possibles au niveau de ses parties karstifiées, **apparaissent inexistantes** au regard des résultats obtenus des jaugeages différentiels, du pompage d'essai, des différentiels de charges piézométriques constatés, des données des campagnes géochimiques et des suivis physico-chimiques.
- Le suivi des conductivité et température dans la source et le Laudon montre que les **échanges entre la nappe et la rivière se feraient plutôt au profit de la rivière**.
- Les **épisodes de turbidité ne peuvent être mis en lien avec des infiltrations rapides depuis le Laudon**. Cette turbidité reste liée, comme expliqué en préambule, soit à l'envahissement de la lagune par le Laudon, soit à des remontées depuis le Canal du Moulin. Toutefois, l'apparition de turbidité dans le griffon de la lagune, avant l'envahissement par les eaux superficielles, pourrait être liée à la remobilisation de particules fines, présentes dans le réseau de fractures du réservoir. La mise en évidence des phénomènes de karstification sous-couverture (crypto-karstification), à l'origine d'une altération du réservoir (fantômisation), pourrait être la cause de cette turbidité. En effet, l'étude de la karstification (cf. chapitre 2.4.1) met en avant la mise en place des réseaux karstiques en deux temps : d'abord l'initiation d'un proto-réseau par fantômisation, suivi de la vidange des fantômes de roche, lors de l'instauration du gradient hydraulique, mis en place au cours de l'incision des vallées. Il est fort probable que le réservoir altéré soit encore en train d'être vidangé, notamment lors des crues, quand les mises en charge du système peuvent solliciter des zones de réservoir peu sollicitées habituellement et créer la vidange de ces zones avec l'évacuation des altérites du réservoir. Cette vidange peut alors se répercuter jusqu'en surface avec le soutirage des sables fauves. L'origine de ces particules fines n'a pas été recherchée dans le cadre de cette étude, mais les analyses faites par le Syndicat des Eaux du Marseillon et du Tursan (2020) montrent qu'elles sont d'origine minérale. Les épisodes de turbidité ont aussi été corrélés avec le rebouchage du forage F0, qui semble avoir provoqué une augmentation de la fréquence de ces épisodes. Dans ce cas particulier, le rebouchage de ce forage a pu perturber l'équilibre du réservoir et provoquer une modification au sein des chemins d'écoulement, ce qui a pu produire la sollicitation d'une partie du réservoir jusque-là non sollicitée et favoriser l'évacuation de ce fantôme de roche.

À l'issue de ce travail, il convient donc de poursuivre la mesure des débits de la source, afin de conforter les résultats présentés. Il s'agira ainsi d'évaluer, sur le long terme, le bassin d'alimentation du Marseillon et préciser son fonctionnement hydrogéologique. L'origine de la turbidité n'a pas été spécifiquement identifiée dans le cadre de ce travail, mais elle pourrait l'être afin de mieux la prévenir, même si les capteurs disposés dans la lagune au cours de cette étude permettent d'améliorer la gestion, en prévenant la survenue de turbidité dans les forages. L'étude spécifique de la turbidité, au travers notamment de l'analyse des particules et des éléments

bactériologiques, permettrait également d'apporter des compléments quant au fonctionnement hydrogéologique de la source.

4. Conclusion

La compréhension du fonctionnement hydrogéologique de la structure anticlinale d'Audignon, ainsi que celle de la source du Marseillon, principale ressource en eau du secteur pour l'AEP, a nécessité une approche pluridisciplinaire combinant la géologie, la géomorphologie, la karstologie, l'hydrogéologie, l'hydraulique ou encore la géochimie.

Une première phase a ainsi consisté à revisiter le contexte géologique de la structure. En raison de conditions d'affleurements peu propices à une analyse de terrain et à une relativement faible quantité de données pertinentes dans les forages, la compréhension de la géométrie des formations et des changements de faciès s'est appuyée sur l'interprétation et l'intégration des profils de sismique-réflexion, ainsi que sur un complément d'acquisitions gravimétriques. L'ensemble a été synthétisé dans un modèle géologique permettant de soutenir les analyses hydrogéologiques (chapitre 2.3). De plus, une réflexion sur la karstification des formations carbonatées a été apportée. Elle a permis de mettre en évidence la faible intensité de la karstification à l'échelle de la structure, qui serait principalement due à une karstification récente. Le rôle des sables fauves dans cette karstification puis, plus tard dans le fonctionnement hydrogéologique, a également été décrit (chapitre 2.4).

Dans un second temps, une analyse du fonctionnement hydrogéologique de la structure anticlinale a été conduite au travers de l'élaboration de cartes piézométriques, de campagnes physico-chimiques et isotopiques et enfin d'une approche fonctionnelle (chapitre 3.4). Les interprétations combinées ont permis d'apporter des éléments de compréhension quant au fonctionnement hydrogéologique de la structure :

- le réseau hydrographique participe au drainage du réservoir au nord de la structure. Au sud, par contre, des infiltrations pourraient ainsi avoir lieu et participeraient à la recharge du réservoir du Paléocène et du Crétacé ;
- au droit de la structure anticlinale, le réservoir du Crétacé bénéficie d'une recharge sur quasiment l'ensemble de la structure ; les secteurs favorables à l'infiltration se situant principalement dans ses parties centrale et méridionale ;
- le rôle important joué par la formation des sables fauves dans le contrôle du processus de recharge, en tamponnant le signal d'infiltration et retardant la recharge directe et rapide vers la nappe, a été identifié ;
- le compartiment profond du réservoir du Crétacé et du Paléocène, en provenance de l'est / sud-est et s'écoulant vers le nord et l'ouest, n'est pas apparu comme jouant un rôle majeur dans les écoulements de surface, observés au droit de la structure anticlinale.

Enfin, une attention particulière sur le fonctionnement hydrogéologique de la source du Marseillon a été proposée (chapitre 3.5), en s'appuyant principalement sur un long suivi temporel du débit et de quelques propriétés physico-chimiques de la source, de campagnes géochimiques et d'essai par pompage. Les analyses menées ont permis de proposer une délimitation approximative du bassin d'alimentation de la source, qui majoritairement s'étend au sud et à l'est de la source. Le rôle des sables fauves et de la composante karstique du réservoir crétacé dans le fonctionnement hydrodynamique de la source, ainsi que dans la survenue d'eaux turbides, a également été mis en évidence. Concernant cette survenue, des réponses quant au rôle de pertes possibles du Laudon et d'écoulements rapides au profit de la source ont été apportées. Les résultats obtenus convergent vers une absence de pertes du Laudon au profit de la source. Toutefois, la mise en charge du réservoir crétacé pourrait permettre la remise en suspension de particules et provoquer l'apparition de turbidité, en plus de celle apparaissant à la suite d'un

envahissement de la source par les eaux de surface (par débordement de cours d'eau ou ruissellement).

5. Bibliographie

ARBEY F. (1980) - Les formes de la silice et l'indentification des évaporites dans les formations silicifiées. Bulletin des centres de recherches exploration-production Elf-Aquitaine 4, 309-65.

ARMAND C., MANGIN A. et MERCADIER J. (1993) - Traitement des chroniques de débits et de piézométrie relatives à l'aquifère profond nord-pyrénéen dans la région de Mont-de-Marsan. Tome 1 : texte. / Tome 2 : figures. Rapport N0995BOR4S93.

ARMAND C. (1994) - Etude géologique et hydrogéologique autour du site des Landes de Siougos (40). Phase II. Volet hydrogéologie. Rapport N1451 BOR 4S 94, 60 p., 71 pl., 2 ann. Document non public.

AUDRA P. et PALMER A.N. (2015) - Research frontiers in speleogenesis. Dominant processes, hydrogeological conditions and resulting cave patterns. Acta Carsologica, 44, 3, 315-348.

AQUILA CONSEIL (2002) - Eugénie-les-Bains : Etude géologique et hydrogéologique. Evaluation de l'impact hydrogéologique des stockages de gaz d'Izaute et de Lussagnet. Rapport AQ/TOTAL/ELB-RD-0502-002. 60 p.

BAKALOWICZ M. (2013) - Epikarst Processes. In: J. Shroder, A. Frumkin (Eds.), Treatise on geomorphology. Elsevier, pp. 164-171.

BEL F. et SOURISSEAU B. (1989) - Nappe inframolassique dans les régions midi-pyrénées et sud aquitaine - Etat des connaissances et surveillance piézométrique. (Mise à jour à décembre 1983). Rapport 89-SGN-274-AQI-MPY.

BITEAU J.J., LE MARREC A., LE VOT M. et MASSET J.M. (2006) - The Aquitaine Basin. Petroleum Geoscience, 12, pp. 247-273.

BLAVOUX B. (1986) - Éléments d'interprétation des analyses isotopiques des eaux des réservoirs du Crétacé et de l'Éocène du sud de l'Aquitaine, 11 p.

BLAVOUX B. (1991) - Utilisation du marquage isotopique naturel à la connaissance des aquifères du département des Landes, 10 p.

BLAVOUX B., DRAY M., FEHRI A., OLIVE P., GROENING M., SONNTAG C., HAUQUIN J.P., PELISSIER G. et POUCHAN P. (1993) - Palaeoclimatic and hydrodynamic approach to the aquitaine basin deep aquifer (France) by means of environmental isotopes and noble gases. International Atomic Energy Agency (IAEA): IAEA.

BOULANGER, D. (1968) - Révision du nummulitique de la Chalosse, du Bearn et du Bas-Adour (Landes et Basses-Pyrénées). Thèse de doctorat, Université de Paris, 376 pp.

BOULANGER D. et DEICHA G. (1958) - Presence de différents types d'accidents siliceux dans le Senonien supérieur de Dumes (Landes). Bulletin de la Société Géologique de France. S6-VIII, 2, 159-163.

BOURGINE B., CAPDEVILLE J.P., RAZIN P., SOURISSEAU B. et VAIRON J. (1997) - Outil de gestion des systèmes aquifères du Sud du Bassin Adour Garonne - Concept géologique et hydrogéologique - Rapport R 39538, 120 p., 33 fig., 4 ann.

BOURROUILH R., RICHERT J.P., et ZOLNAÏ G. (1995) - The North Pyrenean Aquitanian basin, France : Evolution and hydrocarbons. AAPG Bulletin, 79, 831- 853.

BRGM (1974) - Atlas géologique du Bassin d'Aquitaine B.R.G.M. and ELF-RE and ESSO-REP and SNPA.

BRIAND C. (2014) - Approche multi-traceurs pour la détermination de l'origine des nitrates dans les eaux souterraines : exemple d'une source karstique dans les Landes. Thèse Université Pierre et Marie Curie, 297 p.

BRUNET M.F. (1991) - Subsidence et géodynamique du Bassin d'Aquitaine. Relations avec l'ouverture de l'Atlantique. Thèse Univ. Paris VI, 288 p.

BRUXELLES L., QUINIF Y. et WIENIN M. (2009) - How can ghost rocks help in karst development? International Congress of Speleology, Kerrville, pp. 814-818.

CAHUZAC, B et TURPIN, L (1999) - Stratigraphie isotopique du strontium dans le miocène marin du Bassin d'Aquitaine (SW France). Rev. Soc. Geol. Espana, 12 (1): pp. 37-56.

CANEROT J. (1988) - Manifestations de l'halocinèse dans les Chaînon Béarnais (Zone Nord-Pyrénéenne) au Crétacé inférieur. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, 306, pp. 1099-1102.

CANEROT J., et LENOBLE J.L. (1991) - Diapirisme sur une marge en distension puis en décrochement, exemple des Pyrénées occidentales françaises. Association des Sédimentologistes Français, 13, 124 pp.

CANEROT J., et LENOBLE J.L. (1993) - Diapirisme crétacé sur la marge ibérique des Pyrénées occidentales: Exemple du Pic de Lauriolle, comparaisons avec l'Aquitaine, les Pyrénées centrales et orientales: Bulletin de la Société Géologique de France, 164, pp. 719-726.

CANEROT J., HUDEC M.R. et ROCKENBAUCH K. (2005) - Mesozoic diapirism in the Pyrenean orogen: Salt tectonics on a transform plate boundary. AAPG Bulletin, 89, 2, pp. 211-229.

CAPDEVILLE J.P., GINESTE, M.C., TURQ A. et VERGAIN P. (1997) - notice explicative de la feuille d'Hagetmau à 1/ 50 000. Carte géologique de la France à 1/50 000. BRGM, Orléans, 70p.

CAPAR L. et MARC S. (2018) - Retraitement de 3 lignes sismiques 2D dans la région d'Audignon. Rapport RP-69463-FR, 19 pp., 7 fig, 1 annexe.

CHERY L (1998) - Ressources thermominérales du Bas-Adour Grille d'observation de la qualité des eaux (année 2). Rapport R 40047.

CHOWNS T. M. et ELKINS J. E. (1974) - The origin of quartz geodes and cauliflower cherts through the silicification of anhydrite nodules. Journal of Sedimentary Petrology 44, pp. 885-903.

COMITÉ FRANÇAIS DES BARRAGES ET RÉSERVOIRS (2019) - site internet <https://www.barrages-cfbr.eu/> consulté le 20/11/2019

CURNELLE R. (1983) - Evolution structuro-sédimentaire du Trias et de l'Infra-Lias d'Aquitaine. Soc. Nat. Elf Aquitaine (Production), F-64018, Pau, pp. 69-99.

CURNELLE R. et DUBOIS P. (1968) - Evolution mésozoïque des grands bassins sédimentaires français ; bassins de Paris, d'Aquitaine et du Sud-Est. Bull. Soc. Géol. France, **8-II**, 4, 529-546.

DAGUIN F. (1948) - L'Aquitaine occidentale. Paris : Hermann, 232 pp.

DEWANDEL B. (2018) - Méthodes analytiques d'estimation de l'impact quantitatif d'un prélèvement en nappe sur un cours d'eau - Problématique et solutions mathématiques. Rapport final. BRGM/RP-67566-FR, 107 p., 45 fig., 2 tabl., 1 ann.

DEWANDEL B., LANINI S., LACHASSAGNE P. et MARECHAL J.C. (2018) - A generic analytical solution for modelling pumping tests in wells intersecting fractures. J. Hydrol., 559, 89-99, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.013>.

DORFLIGER N, FLEURY P, et LADOUCHE B (2009) - Inverse Modeling Approach to Allogenic Karst System Characterization. Ground Water ;47(3): pp. 414-26.

DORFLIGER N, CROCHET P. GUERIN R., JOZJA N. MARSAUD B. MONDAIN P. MUET P. et PLAGNES V. (2010) - Guide méthodologique. Les outils de l'hydrogéologie karstique pour la caractérisation de la structure et du fonctionnement des systèmes karstiques et l'évaluation de leur ressource. BRGM/RP-58237-FR, 246 p., 82 illus., 5 ann.

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 de doctorat, Université de Bordeaux III, 306 p.

ELORZA J.J. et ROFRIGUEZ-LAZARO J. (1984) - Late Cretaceous quartz geodes after anhydrite from Burgos, Spain. Geol. Mag. 121, 2, pp. 107-113.

FAURE G. (1986). Principles of Isotope Geology, 2nd ed. xv 589 pp. New York.

FEINBERG H. (1964) - Contribution à l'étude stratigraphique et structurale de l'anticlinal d'Audignon (Landes). Thèse de doctorat, Université de Paris, 123 p.

FIQUET M. et ARMAND C. (2000) - Renforcement des ressources en eau potable des syndicats de Mugron, des Eschourdes et de Marseillon (40) : étude hydrogéologique du secteur compris entre Saint-Aubin et Buanes (2ème phase). Rapport ANTEA, 87 p.

GARDNER G.H.F., GARDNER L.W. et GREGORY A.R. (1974) - Formation velocity and density-The diagnostic basics for stratigraphic traps. Geophysics, 9, 6, pp. 770-780.

GELY J.P. et SZTRAKOS K. (2000) - L'évolution paléogéographique et géodynamique du Bassin aquitain au Paléogène : enregistrement et datation de la tectonique pyrénéenne. Géologie de la France, 2, pp. 31-57.

GIS Sol (2011) - L'état des sols de France Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 188 p.

GUESSAB D. (1970) - Etude de l'alimentation des aquifères Eocène et Crétacé supérieur par les affleurements des Petites Pyrénées. Thèse de l'université de Bordeaux, 187 p.

GUILLEN A., CALCAGNO PH., COURRIOUX G., JOLY A., et LEDRU P. (2008) - Geological modelling from field data and geological knowledge Part II. Modelling validation using gravity and magnetic data inversion. Physics of the Earth and Planetary Interiors, **171**, 1-4, pp. 158-169.

GUINGAND G. et ROULLIN J. (1978) - Contribution à l'étude structurale et hydrogéologique de la ride d'Audignon. Mémoire de DEA, Université de Bordeaux III, 72 p.

HUNT B. (2004) - A spring-depletion solution. ASCE Journal of Hydrologic Engineering, Vol.9, No.2: pp. 144-149.

HUNT B. et SMITH M. (2008) - Improved spring depletion solution and analysis. ASCE Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 13, No.. 2, pp. 80-89.

HUSSON E. (2013) - Interaction géodynamique/karstification et modélisation géologique 3D des massifs carbonatés: Implication sur la distribution prévisionnelle de la karstification. Phd, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 326 p.

JACOB T. (2018) - Acquisition gravimétrique dans la région d'Audignon (40). Rapport intermédiaire. BRGM/RP-68098-FR, 45 p.

JAMES V. et CANEROT J. (1999) - Diapirisme et structuration post-triasique des Pyrénées occidentales et de l'Aquitaine méridionale (France): Eclogae Geologicae Helvetiae, 92, pp. 63-72.

JOUVES J. (2018) - Origine, caractérisation et distribution prédictive des structures karstiques - De la karstologie aux modèles numériques 3D. Thèse de doctorat. Université Aix Marseille, 256 p.

LABAT N. (1998) - Rôle de particularités sédimentaires et structurales sur le comportement de l'aquifère des sables sous-molassiques soumis aux fluctuations induites par des stockages souterrains de gaz : application à l'étude de leur influence sur l'hydrodynamisme des émergences locales. Thèse de doctorat, Université Michel de Montaigne - Bordeaux 3, 228 p.

LACHASSAGNE P., SOURISSEAU B., AMRAOUI N. et IZAC J.-L. (1998) - Outil de gestion des systèmes aquifères du Sud du Bassin Adour Garonne- Synthèse des données et concept hydrogéologique. Rapport RR-39941-FR, 164 p.

LADOUCHE B., MARECHAL J.C. et DORFLIGER N. (2014) - Semi-distributed lumped model of a karst system under active management. Journal of Hydrology, Vol 509: pp. 215-230, doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.11.017.

LANINI S., CABALLERO Y. et LE COINTE P. (2020) - Manuel utilisateur ESPERE - Version 2. Rapport final.. BRGM/RP-69538-FR, 27 p., 2 ann.

LEZIN C. (2000) - Analyse des faciès et stratigraphie intégrée : application aux évènements du passage Lias-Dogger sur la plateforme du Quercy. Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 297 p.

MALIVA R.G. (1987) - Quartz geodes: early diagenetic silicified anhydrite nodules related to dolomitization. Journal of sedimentary petrology, 57, 6, pp. 1054-1059.

MANGIN A. (1975) - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Université de Dijon, 267 p.

MAUROUX B. et DANNEVILLE L. (1986) - Outil de gestion des systèmes aquifères du Sud du bassin Adour-Garonne - Phase préliminaire : inventaire des prélèvements - BRGM/RR-38871-FR, 290 p.

OLLER G. (1986) - Enquête sanitaire pour la définition des périmètres de protection de la source de Marseillon à Audignon (Landes).

PINAULT J.-L. et Schomburgk S. (2006) - Inverse modeling for characterizing surface water/groundwater exchanges, *Water Resour. Res.*, 42, W08414, doi:10.1029/2005WR004587.

PINAULT J.-L., AMRAOUI N. et GOLAZ C. (2005) - Groundwater-induced flooding in macropore-dominated hydrological system in the context of climate changes, *Water Resour. Res.*, 41, W05001, doi:10.1029/2004WR003169

PINAULT J.-L., DORFLIGER N., LADOUCHE B. et BAKALOWICZ M. (2004) - Characterizing a coastal karst aquifer using an inverse modeling approach: The saline springs of Thau, southern France, *Water Resour. Res.*, 40, W08501, doi:10.1029/2003WR002553.

PINAULT J.-L., PAUWELS H. et CANN Ch (2001a) - Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems: Application to nitrate transport and denitrification, *Water Res. Research*, 37 (8), pp. 2179-2190.

PINAULT J.-L., PLAGNES V., AQUILINA L. et BAKALOWICZ M. (2001b) - Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems: Characterization of karst system functioning, *Water Res. Research*, 37 (8), pp. 2191-2204.

POUCHAN P. (1986) - Le cadre géologique et hydrogéologique de la source du Marseillon. Université de Bordeaux III, 20 p.

QUINIF Y. (2010) - Fantômes de roche et fantômisations : Essai sur un nouveau paradigme en karstogenèse. *Karstologia Mémoires*, 18, 196 p.

QUINIF Y., BAELE J.M., DUBOIS C., HAVRON C., KAUFMANN O. et VERGARI A. (2014) - Fantômisations : un nouveau paradigme entre la théorie des deux phases de Davis et la théorie de la biorhexistasie d'Erhart. *Geologica Belgica*, 17, 1, pp. 66-74.

ROCHER M., LACOMBE O., ANGELIER J., DEFFONTAINES B., et VERDIER F. (2000) - Cenozoic folding and faulting in the south Aquitaine Basin (France): insights from combined structural and paleostress analyses. *Journal of Structural Geology*, 22, pp. 627-645.

BAKALOWICZ M. 2001) - Le Crétacé supérieur-Paléogène du bassin compressif Nord Pyrénéen (Bassin de l'Adour), sédimentologie, stratigraphie, géodynamique. Thèse de doctorat, Université de Rennes, 101 p.

SHULKA V. et FRIEDMAN G.M. (1981) - An unusual occurrence of surficial anhydrite in a moist temperature zone: Example from the Lockport Formation (Middle Silurian) of New York. *Sedimentary Geology*, 29, pp. 125-31.

SOUSSIEUX PH. (1984) - Les Landes souterraines. *Ed .Ph. Soussieux*, 250 p.

SZTRAKOS K., GELY J.P., BLONDEAU A. et MÜLLER C. (1997) - Le Paléocène du Bassin sud-aquitain : lithostratigraphie, biostratigraphie et analyse séquentielle. *Géologie de la France*, 4, pp.27-54.

SZTRAKOS K., GELY J.P., BLONDEAU A. et MÜLLER C. (1998) - L'Eocène du Bassin sud-aquitain : lithostratigraphie, biostratigraphie et analyse séquentielle. *Géologie de la France*, 4, pp.57-105.

TUCKER M.E. (1976) - Quartz replaced anhydrite nodules (Bristol Diamonds) from the Triassic of the Bristol District. *Geological Magazine* 113, pp. 569-74.

VEIZER J., ALA D., AZMY, K., BRUCKSCHEN P., BRUHN F., BUHL D., CARDEN, G., DIENER A., EBNETH S., GODDRIS Y., JASPER T., KORTE C., PAWELLEK F., PODLAHA O. et STRAUSS H. (1999) - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ EVOLUTION OF PHANEROZOIC SEAWATER, *Chemical Geology*, 161: pp.59-88.

VÉOLIA (2013) - Forages du SI des Eaux du Marseillon, 26 p.

VILLIEN A. et MATHERON P. (1989) - Géodynamique de la zone nord pyrénéenne: conséquences sur l'exploration pétrolière. *Bulletin Technique Exploration - Production Elf Aquitaine*, 131, pp. 3-19.

WINNOCK E. et PONTALIER Y. (1970) - Lacq gas field, France, *in* M. T. Halbouty, ed., *Geology of giant petroleum fields*. AAPG Memoir 14, pp. 370- 387.

Annexe 1

Tableau de corrélation des formations, selon les différents auteurs et cette étude

Annexe 2

Liste des ouvrages de la structure anticlinale d'Audignon

Synthèse hydrogéologique - structure anticlinale d'Audignon

Numéro	INDICE_BSS	Désignation	Commune	lieu dit	XL93	YL93	z_sol	Nature	Profondeur	Equipé Pompe ?	Mesure piezo possible ?	Suivi piézométrique (réseaux départementaux - exploitants) ?	Pas de temps	Qualimètre (réseau départemental) ?
1	09782X0039	SOURCE	AUDIGNON	Source du Marseillon	409717	6299242	40.70	SOURCE	0	Non	Non	Non		Non
2	09782X0010	SOURCE	BANOS	COUIT	409076	6298891	53.11	SOURCE	2,5	Non	Non	Non		Anciennement
3	09781X0010	S	SAINT-AUBIN	PEYRADERE	400180	6298902	43.56	SOURCE	0	Non	Non	Non		Oui
4	09513X0039	S	MONTAUT	SAINT VINCENT	407152	6300217	38.15	SOURCE	0	Non	Non	Non		Non
1	09782X0024	F1	AUDIGNON	Marseillon F1	409738	6299220	40.70	FORAGE	106	Oui	Oui - Tube guide sonde	Oui	Horaire	Anciennement
2	09782X0025	F2	AUDIGNON	Marseillon F2	409733	6299257	40.70	FORAGE	35	Oui	Oui - Tube guide sonde	Oui	Horaire	Oui
3	09782X0022	P2	AUDIGNON	Marseillon P2	409740	6299244	40.70	PUITS	2,6	Non	Oui directement dans colonne	Non		Anciennement
4	09782X0006	P1	AUDIGNON	Marseillon P1	409740	6299238	40.70	PUITS	3	Non	Oui directement dans colonne	Oui	Horaire	Anciennement
5	09782X0016	F3	AUDIGNON	CHRISTIAN / LA GARE	409502	6297529	49.93	FORAGE	114	Oui	Oui	Oui	Horaire	Oui
6	09781X0008	F	MONTAUT	LAHEOURERE	406089	6299378	95.90	FORAGE	101	Oui	Non	Non		Oui
7	09781X0011	F	MONTAUT	LABAUCORME	403607	6298391	81.60	FORAGE	100	Oui	Oui - Tube guide sonde	Oui	Horaire	Non
8	09781X0006	F	SAINT-AUBIN	LAGORCE	401782	6298289	74.24	FORAGE	60	Oui	Oui directement dans colonne	Non		Non
9	09781X0007	F	SAINT-AUBIN	SARTOUT	400939	6297997	45.86	FORAGE	80	Oui	Oui directement dans colonne	Oui	Manuel (3xan)	Oui
10	09781X0009	F	MAYLIS	ST GERMAN (MOULIN)	403250	6296711	55.32	FORAGE	80	Oui	Oui - Tube guide sonde	Non		Oui
11	09781X0020	F	MAYLIS	LAGOULOUQUE	404054	6296549	56.82	FORAGE	48	Oui	Oui - Tube guide sonde	Non		Non
12	09781X0013	F	MAYLIS	SOURIGUES	402282	6296120	80.11	FORAGE	184	Oui mais non utilisable	Oui - Tube guide sonde	Oui	Horaire	Anciennement
13	09781X0005	F	SAINT-AUBIN	ABBAYE DE MAYLIS	403207	6295452	86.48	FORAGE	117,5	Oui	Oui - Tube guide sonde	Non		Oui
14	09781X0015	P219	MAYLIS	LACROUTS	403303	6294894	117.53	FORAGE	551	Oui	Oui - Tube guide sonde	N'est plus suivi	Horaire jusqu'en 2013	Anciennement
15	09782X0027	F	HOISARRIEU	CASSOURET	408754	6293154	122.08	FORAGE	601	Non (pas d'EDF)	Oui	Non		Anciennement
16	09782X0008	F3	HAGETMAU	STADE	410264	6290103	89.52	FORAGE	700	Oui	Non	Non		Oui
17	09782X0021	F4	HAGETMAU	STADE	410251	6290130	90.06	FORAGE	701	Oui	Oui - Tube guide sonde	Non		Anciennement
18	09782X0019	F	SAINTE-COLOMBE	LANNEBOURDES	411431	6294079	74.61	FORAGE	99	Oui	Oui directement dans colonne	Non		Oui
19	09782X0020	F	SAINTE-COLOMBE	LARTIGUE	413748	6294868	84.27	FORAGE	91	Oui	Non	Non		Non
20	09783X0017	F	SARRAZIET	CD 52	416906	6295462	60.46	FORAGE	160	Oui	Oui directement dans colonne	Non		Non
21	09783X0018	F1	SARRAZIET	LE BAS	418219	6294992	61.00	FORAGE	110	Oui	Oui - Tube guide sonde	Oui	Horaire	Anciennement
23	09783X0038	F	SARRAZIET	LACOUIMATE	418049	6296057	73.99	FORAGE	45	Non	Oui directement dans colonne	Non		Non
22	09783X0025	F2	SARRAZIET	LE BAS, TAILADE	418220	6294999	61.00	FORAGE	107	Oui		Non		Non
24	09784X0018	F	EUGENIE-LES-BAINS	ETABLISSEMENT THERMAL - CHRISTINE MARIE	427418	6294328	99.63	FORAGE	260	Oui		Non		Non
25	09784X0020	F	EUGENIE-LES-BAINS	MOULIN DE BOUGNERES (Appelé LASMOULIERES par DDTM40)	426764	6295198	88.05	FORAGE	66,78	Oui	Oui directement dans colonne	Oui	Manuel (3xan)	Oui
26	09784X0029	CHICOY	EUGENE-LES-BAINS	CHICOY	426594	6295515	88.77	FORAGE	83,5	Oui	Oui - Tube guide sonde	Oui	Horaire	Oui
27	09784X0030	FRECO	EUGENE-LES-BAINS	CHICOY	426374	6295769	87.72	FORAGE	120	Oui	Oui directement dans colonne	Non		Non
28	09784X0028	F13	BUANES	LA VIOLETTE	424576	6297061	71.55	FORAGE	54	Oui	Oui - Tube guide sonde	Non		Non
29	09784X0038	F	BUANES	PRABENDE - PARCELLE ZE90	423079	6296552	71.73	FORAGE	110	Non	Oui directement dans colonne	Non		Non
30	09784X0022	F	FARGUES	GARDEU	422904	6297087	78.87	FORAGE	101,27	Oui		Non		Non
31	09784X0021	F	FARGUES	GOUAILLARD	422403	6295790	80.93	FORAGE	143,7	Oui		Non		Non
32	09784X0035	F	FARGUES	PERRE	421924	6296632	67.84	FORAGE	61	Oui	Oui mais pincé à 4,90m Sinon passer par extrados	Non		Non
33	09783X0019	F	FARGUES	LARCUCLETTE	421206	6296978	67.37	FORAGE	106	Oui	Oui directement dans colonne	Oui	Horaire	Oui
34	09783X0022	F	MONTSOUE	BAHUS JUZANX	419772	6297387	62.89	FORAGE	67	Oui	Oui directement dans colonne	Oui	Manuel (3xan)	Oui
35	09783X0032	F	MONTSOUE	LES BARTHES DU BAHUS	419469	6297913	60.96	FORAGE	120	Oui	Oui directement dans colonne	Non		Non
36	09783X0023	F	FARGUES	MENJOUET	419659	6298264	60.30	FORAGE	72	Oui	Oui directement dans colonne	Non		Non
37	09783X0033	F	MONTSOUE	LABARTHE	419195	6298356	59.300	FORAGE	120	Oui	Oui directement dans colonne	Non		Anciennement
38	09783X0002	FACR3	MONTSOUE	LABARTHE	419196	6298596	58.500	FORAGE	75,05	Oui Artesien	Non	Non		Oui
39	09782X0013	F4	EYRES-MONCUBE	DEP.944	413487	6298015	49.392	FORAGE	105	Oui	Oui directement dans colonne	Oui	Horaire	Oui
40	09782X0011	F2	EYRES-MONCUBE	DAOURAT	412848	6298078	47.35	FORAGE	126	Oui	Oui directement dans colonne	Non		Non
41	09782X0012	F2TER	EYRES-MONCUBE	DAOURAT	412866	6298032	47.681	FORAGE	58	Oui	Oui directement dans colonne	Non		Non

Annexe 3

Informations du volet géochimique

Tableau 1 - Liste des échantillons prélevés le 14/03/2018, caractéristiques physico-chimiques mesurées sur le terrain et composition chimique en éléments majeurs

Indice BSS	Site	Nature	X_L93	Y_L93	T (°C)	Cond. (µS/cm)	pH	O ₂ dissous (mg/L)	Redox (mV)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	HCO ₃ (mg HCO ₃ /L)	Cl (mg/L)	NO ₃ (mg NO ₃ /L)	SO ₄ (mg SO ₄ /L)
09782X0025	F2 Marseillon	Forage	409732.856	6299257.058	16	571	7.33	6.24 mg/l	231.3	89.3	13.72	9.9	1.5	306	20.1	27	8.9
09782X0016	Chrestian (Audignon)	Forage	409501.52	6297528.741	<i>Pb batterie</i>	7.3	<i>Pb batterie</i>	159.3	97.5	13.82	9	1.2	325	18.2	21.7	8.9	
09782X0011	Daourat (Eyres-Moncube)	Forage	412848.377	6298077.665	15.3	575	7.23	2 mg/l	175.1	93.3	12.34	10.6	1.5	300	20.5	22.8	11.9
	Laudon (zone de pertes)	Cours d'eau	410062.433	6298939.629	8.9	369	7.58		163	53.8	5.19	10.4	4.3	145	21.3	23.4	15.2
	Gabas	Cours d'eau	413431.565	6297300.162	10	348	7.995	11.42 mg/l	159	53.6	3.8	7.2	4.1	138	17.1	28.3	11.3

Tableau 2 - Liste des échantillons prélevés le 14/03/2018, composition chimique en éléments traces

Indice BSS	Site	T.A.C. (°f)	Carbone Organique Total (COT) (mg C/L)	Carbone Organique Dissous (mg C/L)	Fluorures (mg F/L)	Brome total (mg Br ₂ /L)	Brome libre (mg Br ₂ /l)	Silice (mg SiO ₂ /L)	Al (µg/L)	B (µg/L)	Sr (µg/L)	Fe (µg/L)	Isotopes Strontium	
													⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ(m)
09782X0025	F2 Marseillon	25.05	0.2	0.2	0.05	<0.05	<0.05	9.2	<1	<10	79.1	<1	0.708531	0.000008
09782X0016	Chrestian (Audignon)	26.65	0.2	0.2	<0.05	<0.05	<0.05	8.9	<1	<10	86.3	2.1	0.708280	0.000007
09782X0011	Daourat (Eyres-Moncube)	24.55	0.3	0.3	0.06	<0.05	<0.05	9.3	2.5	13	146.0	1.7	0.708269	0.000008
	Laudon (zone de pertes)	11.90	4.1	4.0	0.08	<0.05	<0.05	5.9	64.6	11	73.4	86.0	0.709510	0.000007
	Gabas	11.30	3.0	3.0	0.07	<0.05	<0.05	3.5	107.5	<10	98.5	90.2	0.709437	0.000008

Tableau 3 - Liste des échantillons prélevés lors de la campagne de mai 2018 et caractéristiques physico-chimiques mesurées sur le terrain

INDICE_BSS	nom commune	Lieu-dit	XL93	YL93	nature	Date	T (°C)	Cond (µS/cm)	pH	O ₂ dissous (mg/L)	Redox (mV)
09782X0011	EYRES-MONCUBE	DAOURAT	412848.377	6298077.665	FORAGE	02/05/2018	15.4	563	7.50	x	
09781X0005	SAINT-AUBIN	ABBAYE DE MAYLIS	403207.402	6295452.085	FORAGE	02/05/2018	15.4	583	7.21	5.00	248.3
09783X0038	SARRAZIET	LACOUMATTE (BESTEL)	418048.761	6296056.675	FORAGE	02/05/2018	15.0	840	6.70	3.08	139.6
09781X0006	SAINT-AUBIN	LAGORCE	401781.632	6298289.406	FORAGE	02/05/2018	16.3	244	5.59	8.65	211.4
09784X0022	FARGUES	GARDELLY	422904.372	6297087.37	FORAGE	02/05/2018	16.6	587	7.56	7.68	196.6
09782X0016	AUDIGNON	CHRESTIAN	409501.52	6297528.741	FORAGE	02/05/2018	14.8	588	7.00	x	x
09781X0015	MAYLIS	LACROUTS (F2)	403303.13	6294893.665	FORAGE	03/05/2018	15.6	574	x	7.00	x
09781X0011	MONTAUT	LABAUCORME	403607.32	6298391.13	FORAGE	03/05/2018	14.2	759	x	7.13	x
09781X0009	MAYLIS	ST GERMAIN (MOULIN)	403249.782	6296710.51	FORAGE	11/06/2018	14.5	806	7.71	9.24	63.5
09782X0019	SAINTE-COLOMBE	LANNEBOURDES	411431.337	6294079.127	FORAGE	02/05/2018	13.9	553	7.36	2.78	211.9
09782X0025	AUDIGNON	Marseillon F2	409732.856	6299257.058	FORAGE						
09783X0002	MONTSOUE	LABARTHE	419196	6298596	FORAGE	02/05/2018	15.7	553	7.55	3.44	182.7
09783X0022	MONTSOUE	BAHUS JUZANX	419772.198	6297386.916	FORAGE	02/05/2018					
09781X0007	SAINT-AUBIN	SARTOUT	400939.17	6297997.113	FORAGE	11/06/2018	14.7	670	7.27	3.36	48.2
09781X0008	MONTAUT	LAHEOURERE	406089.457	6299377.607	FORAGE						
09782X0013	EYRES-MONCUBE	DEP.944	413486.642	6298015.263	FORAGE	17/05/2018	14.6	570	7.67	x	x
09783X0019	FARGUES	LARCUCLETTE	421206.215	6296978.241	FORAGE	30/05/2018	14.5	682	7.70	5.83	230.7
09782X0039	AUDIGNON	Source du Marseillon	409716.683	6299241.514	SOURCE	03/05/2018	15.0	577	x	6.42	222.2
09782X0010	BANOS	COUIT	409065	6298899	SOURCE	03/05/2018	14.5	580	x	4.67	x
09781X0010	SAINT-AUBIN	PEYRADERE	400180	6298902	SOURCE	02/05/2018	13.3	573	7.42	3.98	156.9
09515X0039	MONTAUT	St-Vincent	407152	6300217	SOURCE	02/05/2018	17.3	604	7.28	6.46	260.6
Station 05230200	Serres-Gaston	Gabas Amont	417465.86	6291143.09	Cours d'eau	02/05/2018	12.5	244	8.59	11.51	168.5
Q1360430	COUDURES	Bas	415210.89	6295516.35	Cours d'eau	03/05/2018	12.4	334	x	10.53	215.3
Gabas	EYRES-MONCUBE	Gabas_Coeur_Anticlinal	413403.02	6297293.76	Cours d'eau	03/05/2018	12.1	304	x	10.35	215.1
Laudon	AUDIGNON	Laudon	409806.767	6298913.395	Cours d'eau	03/05/2018	12.1	402	x	10.52	220.2
09782X0008	HAGETMAU	STADE	410263.881	6290103.272	FORAGE	02/05/2018	22.5	790	7.15	4.22	231.0
09784X0029	EUGENIE-LES-BAINS	CHICOY	426594.067	6295515.296	FORAGE	02/05/2018	23.9	1170	7.65	6.91	230.2

Tableau 4 - Liste des échantillons prélevés lors de la campagne de mai 2018 et composition chimique en éléments majeurs

INDICE_BSS	nom commune	Lieu-dit	Date	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)
09782X0011	EYRES-MONCUBE	DAOURAT	02/05/2018		20.30	11.90	19.03	90.76	12.46	10.70	1.03
09781X0005	SAINT-AUBIN	ABBAYE DE MAYLIS	02/05/2018		16.10	11.70	11.23	81.67	10.60	11.33	1.22
09783X0038	SARRAZIET	LACOUMATTE (BESTEL)	02/05/2018		22.90	10.70	53.27	113.74	39.76	10.15	0.64
09781X0006	SAINT-AUBIN	LAGORCE	02/05/2018		25.00	1.70	42.98	18.83	4.88	15.62	0.68
09784X0022	FARGUES	GARDELLY	02/05/2018		22.50	29.10	16.34	73.79	23.42	14.50	1.82
09782X0016	AUDIGNON	CHRESTIAN	02/05/2018		19.40	8.30	20.58	98.34	12.13	8.96	0.88
09781X0015	MAYLIS	LACROUTS (F2)	03/05/2018		20.70	25.60	14.99	78.07	19.71	15.46	1.64
09781X0011	MONTAUT	LABAUCORME	03/05/2018		30.20	11.60	80.82	98.99	33.08	11.15	0.94
09781X0009	MAYLIS	ST GERMAIN (MOULIN)	11/06/2018								
09782X0019	SAINTE-COLOMBE	LANNEBOURDES	02/05/2018								
09782X0025	AUDIGNON	Marseillon F2									
09783X0002	MONTSOUE	LABARTHE	02/05/2018								
09783X0022	MONTSOUE	BAHUS JUZANX	02/05/2018								
09781X0007	SAINT-AUBIN	SARTOUT	11/06/2018								
09781X0008	MONTAUT	LAHEOURERE									
09782X0013	EYRES-MONCUBE	DEP.944	17/05/2018								
09783X0019	FARGUES	LARCUCHETTE	30/05/2018								
09782X0039	AUDIGNON	Source du Marseillon	03/05/2018		20.20	8.90	23.02	91.64	13.30	10.57	1.18
09782X0010	BANOS	COUIT	03/05/2018		22.30	10.40	26.55	103.24	4.36	11.94	0.40
09781X0010	SAINT-AUBIN	PEYRADERE	02/05/2018								
09515X0039	MONTAUT	St-Vincent	02/05/2018		20.00	9.60	20.36	77.04	24.69	11.64	0.88
Station 05230200	Serres-Gaston	Gabas Amont	02/05/2018				21.54				
Q1360430	COUDURES	Bas	03/05/2018								
Gabas	EYRES-MONCUBE	Gabas_Coeur_Anticlinal	03/05/2018		16.10	9.20	23.25	45.35	3.10	6.87	3.12
Laudon	AUDIGNON	Laudon	03/05/2018								
09782X0008	HAGETMAU	STADE	02/05/2018		56.00	140.00	0.00	63.69	20.45	63.81	8.72
09784X0029	EUGENIE-LES-BAINS	CHICOY	02/05/2018		62.00	321.00	0.00	124.64	35.72	68.45	14.77

Tableau 5 - Liste des échantillons prélevés lors de la campagne de mai 2018 et composition chimique en éléments traces et isotopes du carbone-13

INDICE_BSS	nom commune	Lieu-dit	Date	Si (mg SiO ₂ /L)	NH ₄ (mg/L)	NO ₂ (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	COD (mg/L)	δ ¹³ C (‰)	Al (µg/L)	Ba (µg/L)	B (µg/L)	Brome total (mg Br ₂ /l)	Brome libre (mg Br ₂ /L)	Fe _{total} (µg/L)	Li (µg/L)
09782X0011	EYRES-MONCUBE	DAOURAT	02/05/2018	9.42	0.001	0	19.03	0.62	-11.89							
09781X0005	SAINT-AUBIN	ABBAYE DE MAYLIS	02/05/2018	9.79	0.004	0	11.23	0.36	-8.69	3.4	16	35	<0.05	<0.05	4.2	6
09783X0038	SARRAZIET	LACOUMATTE (BESTEL)	02/05/2018	8.66	0.004	0	53.27	1.84	-14.62	35.9	22.8	<10	<0.05	<0.05	28	<0.5
09781X0006	SAINT-AUBIN	LAGORCE	02/05/2018	8.78	0.509	0	42.98	1.22	-19.64	<1	22.1	<10	<0.05	<0.05	<1	<0.5
09784X0022	FARGUES	GARDELLY	02/05/2018	11.34	0.008	0	16.34	0.63	x	17.5	30.8	32	<0.05	<0.05	20.4	7.5
09782X0016	AUDIGNON	CHRESTIAN	02/05/2018	8.32	0.008	0	20.58	0.66	-11.04							
09781X0015	MAYLIS	LACROUTS (F2)	03/05/2018	10.24	0.016	0	14.99	0.59	-10.03	3.4	20.1	50	<0.05	<0.05	4.2	8.6
09781X0011	MONTAUT	LABAUCORME	03/05/2018	8.02	0.014	0	80.82	2.04	-10.88	73.1	22	<10	<0.05	<0.05	45.2	<0.5
09781X0009	MAYLIS	ST GERMAIN (MOULIN)	11/06/2018						-13.03							
09782X0019	SAINTE-COLOMBE	LANNEBOURDES	02/05/2018						-11.92	28.4	15	13	<0.05	<0.05		2.5
09782X0025	AUDIGNON	Marseillon F2							-11.85							
09783X0002	MONTSOUE	LABARTHE	02/05/2018							1.5	29	22	<0.05	<0.05		5
09783X0022	MONTSOUE	BAHUS JUZANX	02/05/2018						-12.28	1.9	40.9	38	<0.05	<0.05		9.2
09781X0007	SAINT-AUBIN	SARTOUT	11/06/2018						-12.12							
09781X0008	MONTAUT	LAHEOURERE														
09782X0013	EYRES-MONCUBE	DEP.944	17/05/2018													
09783X0019	FARGUES	LARCUCHETTE	30/05/2018						-13.03							
09782X0039	AUDIGNON	Source du Marseillon	03/05/2018	8.93	0.008	0	23.02	0.45	-11.68	21.9	18.4	18	<0.05	<0.05	5.6	1.9
09782X0010	BANOS	COUIT	03/05/2018	9.71	0.014	0	26.55	0.57	-12.89	<1	11.2	<10	<0.05	<0.05		1.3
09781X0010	SAINT-AUBIN	PEYRADERE	02/05/2018						-11.14	7.7	15.7	20	<0.05	<0.05	3.7	4.5
09515X0039	MONTAUT	St-Vincent	02/05/2018	9.49	0.008	0	20.36	0.76	-11.96	1.7	12.6	10	<0.05	<0.05	4.5	3
Station 05230200	Serres-Gaston	Gabas Amont	02/05/2018	3.66	0.038	0.0782	21.54		-11.38	41	38.2	<10	<0.05	<0.05		1.4
Q1360430	COUDURES	Bas	03/05/2018						-12.32	96	31.2	11	<0.05	<0.05		1.3
Gabas	EYRES-MONCUBE	Gabas_Coeur_Anticlinal	03/05/2018	3.84	0.068	0.0626	23.25		-11.93	123	37.7	<10	<0.05	<0.05	130	1.4
Laudon	AUDIGNON	Laudon	03/05/2018						-12.62	80	21.2	12	<0.05	<0.05	0.303	1.1
09782X0008	HAGETMAU	STADE	02/05/2018	16.88	0.399	0	0.00	0.87	-4.28	1.9	38	292	<0.05	<0.05	3.9	59
09784X0029	EUGENIE-LES-BAINS	CHICOY	02/05/2018	28.89	0.034	0	0.00	1.03	-5.38	7	41	343	<0.05	<0.05	41	93

Tableau 6 - Liste des échantillons prélevés lors de la campagne de septembre 2018 et caractéristiques physico-chimiques mesurées sur le terrain

INDICE_BSS	nom commune	Lieu-dit	XL93	YL93	nature	Préleveur	Date	T (°C)	Cond (µS/cm)	pH	O ₂ dissous (mg/L)	Redox (mV)	TAC
09783X0025	SARRAZIET	TAULADE	418220	6294999	FORAGE	BRGM	25/09/2018	14.1	612	7.47	8.08	240.0	26.4
09783X0017	SARRAZIET	CD52	416906.31	6295462.04	FORAGE	BRGM	24/09/2018	14.9	621	6.93	3.87	287.0	26.9
09781X0005	SAINT-AUBIN	ABBAYE DE MAYLIS	403207.402	6295452.085	FORAGE	BRGM	26/09/2018	13.8	503	7.86	5.56	185.1	23.5
09781X0006	SAINT-AUBIN	LAGORCE	401781.632	6298289.406	FORAGE	BRGM	26/09/2018	14.3	250	6.56	8.45	209.1	4.0
09784X0022	FARGUES	GARDELLY	422904.372	6297087.366	FORAGE	BRGM	26/09/2018	15.4	582	7.46	5.57	182.1	23.7
09782X0016	AUDIGNON	CHRESTIAN	409501.52	6297528.741	FORAGE	BRGM	25/09/2018	14.4	608	7.31	6.32	200.5	27.1
09781X0015	MAYLIS	LACROUTS (F2)	403303.13	6294893.665	FORAGE	BRGM	25/09/2018	15.5	564	7.77	7.82	177.6	24.6
09781X0009	MAYLIS	ST GERMAIN (MOULIN)	403249.782	6296710.51	FORAGE	CD40	24/09/2018	14.0	775	7.94	9.19		
09782X0024	AUDIGNON	Marseillon F1			FORAGE	BRGM	25/09/2018	15.7	527	7.25	?	?	24.6
09782X0025	AUDIGNON	Marseillon F2	409732.856	6299257.058	FORAGE	BRGM	25/09/2018	15.1	570	7.25	5.42	303.5	25.4
09783X0002	MONTSOUE	LABARTHE	419196.29	6298595.825	FORAGE	CD40	24/09/2018	15.7	537	7.96	3.26		
09783X0022	MONTSOUE	BAHUS JUZANX	419772.198	6297386.916	FORAGE	CD40	24/09/2018	18.1	581	8.28	8.05		
09781X0007	SAINT-AUBIN	SARTOUT	400939.17	6297997.113	FORAGE	CD40	24/09/2018	14.6	640	7.62	3.67		
09781X0008	MONTAUT	LAHEOURERE	406089.457	6299377.607	FORAGE	BRGM	26/09/2018	15.3	593	8.43	9.72	190.0	24.3
09782X0013	EYRES-MONCUBE	DEP.944	413486.642	6298015.263	FORAGE	BRGM	25/09/2018	15.0	557	7.23	6.48	274.70	24.15
09783X0019	FARGUES	LARCUCHETTE	421206.215	6296978.241	FORAGE	BRGM	25/09/2018	15.1	636	7.40	6.57	202.00	28.90
09782X0039	AUDIGNON	Source du Marseillon	409716.683	6299241.514	SOURCE	BRGM	25/09/2018	15.0	572	7.28	5.30	232.0	25.4
09782X0010	BANOS	COUIT	409065	6298899	SOURCE	BRGM	26/09/2018	14.5	570	7.32	4.62	240.6	25.0
09781X0010	SAINT-AUBIN	PEYRADERE	400180	6298902	SOURCE	CD40	24/09/2018	17.3	565	7.78	4.12		
09515X0039	MONTAUT	ST VINCENT	407151.91	6300217.3	SOURCE	BRGM	26/09/2018	15.6	574	7.35	5.67	192.0	26.3
Station 05230200	Serres-Gaston	Gabas Amont	417465.86	6291143.09	Cours d'eau	BRGM	26/09/2018	16.7	180	7.67	10.03	299.9	5.2
Q1360430	COUDURES	Bas	415210.89	6295516.35	Cours d'eau	BRGM	25/09/2018	21.6	464	7.97	8.25	192.5	19.3
Gabas	EYRES-MONCUBE	Gabas_Coeur_Anticlinal	413403.02	6297293.76	Cours d'eau	BRGM	25/09/2018	18.1	202	7.91	8.99	229.2	6.1
Laudon	AUDIGNON	Laudon	409806.767	6298913.395	Cours d'eau	BRGM	26/09/2018	15.8	476	7.78	8.42	198.5	17.8
09782X0008	HAGETMAU	STADE	410263.881	6290103.272	FORAGE	BRGM	26/09/2018	32.8	793	7.31			
09784X0029	EUGENIE-LES-BAINS	CHICOY	426594.067	6295515.296	FORAGE	BRGM	26/09/2018	23.5	1156	7.14			
09784X0020	EUGENIE-LES-BAINS	MOULIN BOUGNERES			FORAGE	BRGM	25/09/2018	34.7	1182	7.22	1.53	-320.0	19.2

Tableau 7 - Liste des échantillons prélevés lors de la campagne de septembre 2018 et composition chimique en éléments majeurs

INDICE_BSS	nom commune	Lieu-dit	Date	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)
09783X0025	SARRAZIET	TAULADE	25/09/2018	321	0.00	20.00	14.40	33.40	90.10	15.90	9.70	1.70
09783X0017	SARRAZIET	CD52	24/09/2018	328	0.00	19.80	7.90	42.90	73.90	29.20	9.30	2.20
09781X0005	SAINT-AUBIN	ABBAYE DE MAYLIS	26/09/2018	287	0.00	16.80	11.70	12.10	76.80	11.30	10.90	1.50
09781X0006	SAINT-AUBIN	LAGORCE	26/09/2018	49	0.00	24.20	1.90	49.80	21.10	4.90	13.80	1.00
09784X0022	FARGUES	GARDELLY	26/09/2018	289	0.00	22.60	40.70	14.20	72.00	20.00	14.30	2.30
09782X0016	AUDIGNON	CHRESTIAN	25/09/2018	330	0.00	21.40	10.60	26.70	90.90	14.90	9.30	1.50
09781X0015	MAYLIS	LACROUTS (F2)	25/09/2018	300	0.00	19.60	21.30	16.00	72.90	18.90	12.70	1.90
09781X0009	MAYLIS	ST GERMAIN (MOULIN)	24/09/2018									
09782X0024	AUDIGNON	Marseillon F1	25/09/2018	300	0.00	20.00	8.70	25.80	87.00	13.40	9.80	1.40
09782X0025	AUDIGNON	Marseillon F2	25/09/2018	310	0.00	19.90	8.50	25.40	82.60	13.90	9.80	1.30
09783X0002	MONTSOUE	LABARTHE	24/09/2018									
09783X0022	MONTSOUE	BAHUS JUZANX	24/09/2018									
09781X0007	SAINT-AUBIN	SARTOUT	24/09/2018									
09781X0008	MONTAUT	LAHEOURERE	26/09/2018	296	0.00	24.60	6.30	51.00	78.00	21.40	11.70	1.70
09782X0013	EYRES-MONCUBE	DEP.944	25/09/2018	295	0.00	20.50	7.40	28.80	89.00	8.60	9.80	1.40
09783X0019	FARGUES	LARCUCLETTE	25/09/2018	353	0.00	21.90	14.40	22.50	77.80	30.30	10.30	1.70
09782X0039	AUDIGNON	Source du Marseillon	25/09/2018	310	0.00	20.00	8.70	26.00	85.10	12.90	9.80	1.40
09782X0010	BANOS	COUIT	26/09/2018	304	0.00	23.10	10.30	23.60	96.40	4.50	11.00	0.70
09781X0010	SAINT-AUBIN	PEYRADERE	24/09/2018									
09515X0039	MONTAUT	ST VINCENT	26/09/2018	321	0.00	19.90	9.40	21.50	70.80	24.70	11.10	2.90
Station 05230200	Serres-Gaston	Gabas Amont	26/09/2018	63	0.00	10.60	6.10	16.10	24.40	2.90	4.30	3.60
Q1360430	COUDURES	Bas	25/09/2018	235	0.00	22.30	14.30	7.30	74.50	6.10	10.90	6.70
Gabas	EYRES-MONCUBE	Gabas_Coeur_Anticlinal	25/09/2018	74	0.00	11.10	6.60	14.20	26.00	2.70	4.30	3.80
Laudon	AUDIGNON	Laudon	26/09/2018	217	0.00	27.90	12.40	24.50	64.30	11.20	12.80	3.70
09782X0008	HAGETMAU	STADE	26/09/2018	203	0.00	58.40	139.00	0.00	57.20	19.60	58.70	9.16
09784X0029	EUGENIE-LES-BAINS	CHICOY	26/09/2018	243	0.00	61.90	313.00	0.00	112.00	33.70	62.00	14.60
09784X0020	EUGENIE-LES-BAINS	MOULIN BOUGNERES	25/09/2018	234	0.00	68.00	371.00	0.10	115.20	41.60	77.10	18.60

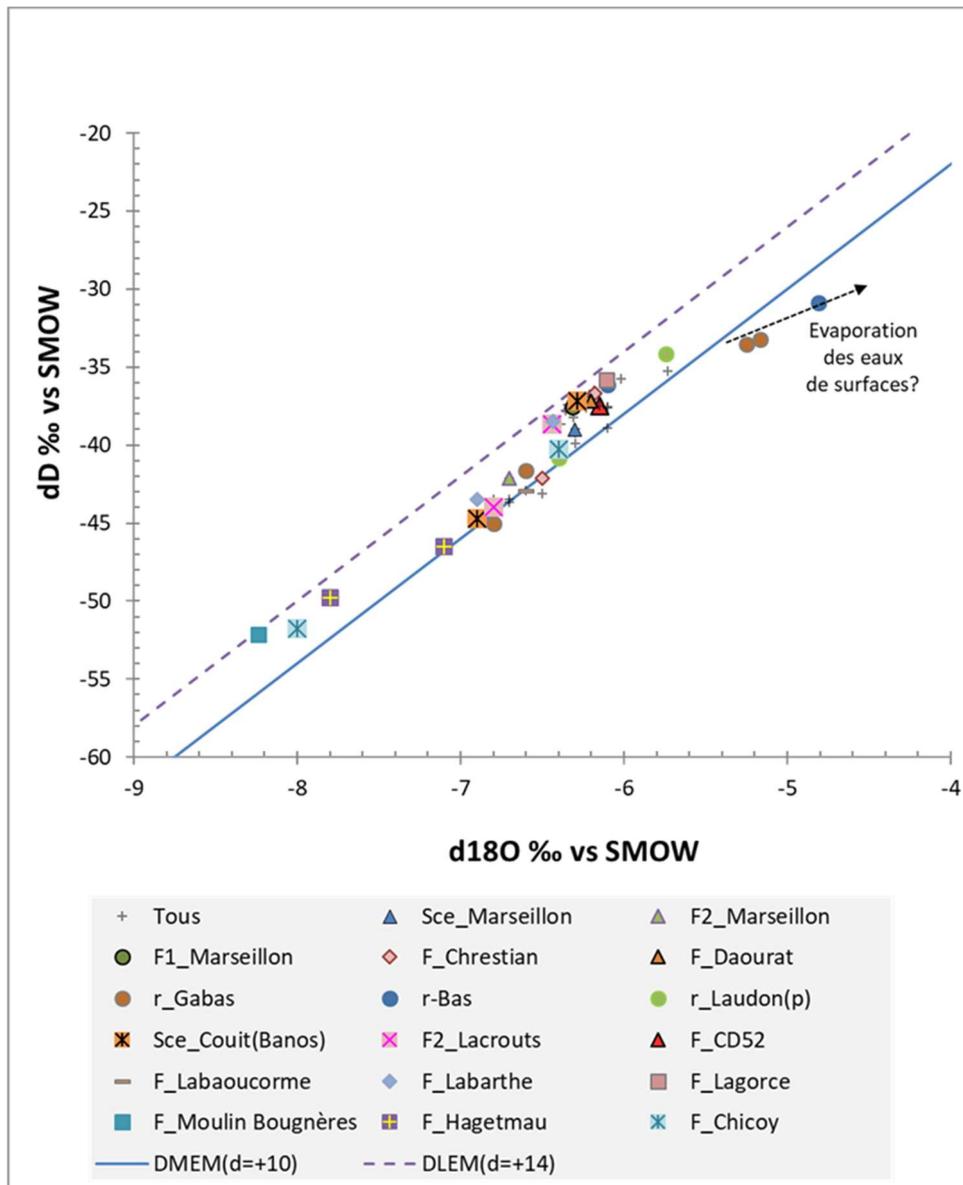
Tableau 8 - Liste des échantillons prélevés lors de la campagne de septembre 2018 et composition chimique en éléments traces et isotopes stables de l'eau

INDICE_BSS	nom commune	Lieu-dit	Date	Si (mg SiO ₂ /L)	NH ₄ (mg/L)	NO ₂ (mg/L)	COD (mg/L)	Al (µg/L)	Ba (µg/L)	B (µg/L)	Br (mg/L)	Fe _{total} (µg/L)	Li (µg/L)	Sr (µg/L)	δ ¹⁸ O	σ	δ ² H	σ
09783X0025	SARRAZIET	TAULADE	25/09/2018	11.00	<0.05	<0.01	0.30	<1	17.8	19	<0.10	<10	2	127	-6.3	0.04	-38.2	0.10
09783X0017	SARRAZIET	CD52	24/09/2018	9.10	<0.05	<0.01	0.20	3.1	21.3	12	<0.10	33	<0.5	56.9	-6.1	0.01	-37.5	0.03
09781X0005	SAINT-AUBIN	ABBAYE DE MAYLIS	26/09/2018	11.00	<0.05	<0.01	<0.2	1.1	13.1	34	<0.10	12	3.8	363	-6.3	0.03	-37.4	0.25
09781X0006	SAINT-AUBIN	LAGORCE	26/09/2018	9.20	<0.05	<0.01	0.50	2.9	19.5	6	0.1	143	<0.5	74	-6.1	0.02	-35.8	0.03
09784X0022	FARGUES	GARDELLY	26/09/2018	13.20	<0.05	<0.01	0.40	1.9	30.5	45	0.1	43	7.6	345	-6.4	0.02	-38.7	0.08
09782X0016	AUDIGNON	CHRESTIAN	25/09/2018	10.10	<0.05	<0.01	0.40	<1	16.3	14	<0.10	53	0.7	137	-6.2	0.02	-36.7	0.05
09781X0015	MAYLIS	LACROUTS (F2)	25/09/2018	11.80	<0.05	<0.01	<0.2	<1	16.9	44	<0.10	<10	5.5	332	-6.4	0.01	-38.6	0.05
09781X0009	MAYLIS	ST GERMAIN (MOULIN)	24/09/2018					<1	17.6	9	<0.10	<10	0.8	128	-6.0	0.02	-35.8	0.06
09782X0024	AUDIGNON	Marseillon F1	25/09/2018	10.60	<0.05	<0.01	0.20	<1	15.5	14	<0.10	15	1.5	117	-6.3	0.01	-37.5	0.03
09782X0025	AUDIGNON	Marseillon F2	25/09/2018	10.10	<0.05	<0.01	<0.2	<1	15.2	14	<0.10	<10	1.4	123	-6.3	0.03	-37.4	0.02
09783X0002	MONTSOUE	LABARTHE	24/09/2018					<1	26.8	23	<0.10	<10	3.7	176	-6.4	0.03	-38.5	0.08
09783X0022	MONTSOUE	BAHUS JUZANX	24/09/2018					2.7	27.7	37	<0.10	<10	4.6	286	-5.7	0.01	-35.3	0.06
09781X0007	SAINT-AUBIN	SARTOUT	24/09/2018					<1	15.7	15	<0.10	264	1.8	170	-6.2	0.03	-36.8	0.11
09781X0008	MONTAUT	LAHEOURERE	26/09/2018	11.00	<0.05	<0.01	<0.2	1.5	15.3	12	0.1	17	0.9	93	-6.2	0.02	-36.5	0.06
09782X0013	EYRES-MONCUBE	DEP.944	25/09/2018	10.00	<0.05	<0.01	0.40	<1	17.2	15	<0.10	<10	1.5	109	-6.2	0.06	-37.6	0.17
09783X0019	FARGUES	LARCUCHETTE	25/09/2018	10.10	<0.05	0.03	0.70	1.7	19.3	18	<0.10	95	1.9	112	-6.1	0.02	-37.5	0.01
09782X0039	AUDIGNON	Source du Marseillon	25/09/2018	10.30	<0.05	0.01	<0.2	<1	15.8	15	<0.10	14	1.5	120	-6.3	0.01	-37.2	0.13
09782X0010	BANOS	COUIT	26/09/2018	11.70	<0.05	<0.01	0.50	2.4	9.9	8	0.1	13	1.6	457	-6.3	0.02	-37.2	0.02
09781X0010	SAINT-AUBIN	PEYRADERE	24/09/2018					<1	14.4	21	<0.10	<10	3	197	-6.4	0.03	-37.8	0.04
09515X0039	MONTAUT	ST VINCENT	26/09/2018	10.40	<0.05	<0.01	0.20	<1	11.7	11	<0.10	67	2.4	158	-6.2	0.02	-37.0	0.07
Station 05230200	Serres-Gaston	Gabas Amont	26/09/2018	2.00	<0.05	0.03	2.90	32.2	27.3	6	<0.10	93	0.8	51	-5.2	0.02	-33.2	0.04
Q1360430	COUDURES	Bas	25/09/2018	7.30	<0.05	0.02	4.40	29.3	28.6	21	<0.10	251	0.7	157	-4.8	0.01	-30.9	0.05
Gabas	EYRES-MONCUBE	Gabas_Coeur_Anticlinale	25/09/2018	2.10	<0.05	0.04	2.00	47.5	25.4	8	<0.10	142	0.8	45.4	-5.3	0.01	-33.5	0.05
Laudon	AUDIGNON	Laudon	26/09/2018	8.50	<0.05	0.04	2.60	20.3	26.2	14	0.1	178	0.9	139	-5.7	0.02	-34.1	0.02
09782X0008	HAGETMAU	STADE	26/09/2018	18.20	0.590	0	0	0.79	38	336	307	30	57	1770	-7.8		-49.8	
09784X0029	EUGENIE-LES-BAINS	CHICOY	26/09/2018	33.20	0.760	0	0	< 0.5	37	402	430	330	90.7	2870	-8.0		-51.8	
09784X0020	EUGENIE-LES-BAINS	MOULIN BOUGNERES	25/09/2018	39.30	0.940	<0.01	0.50	<1	26.7	474	0.5	129	104	3289	-8.2	0.01	-52.1	0.07

Tableau 9 - Liste des échantillons et référencements pour les illustrations du rapport

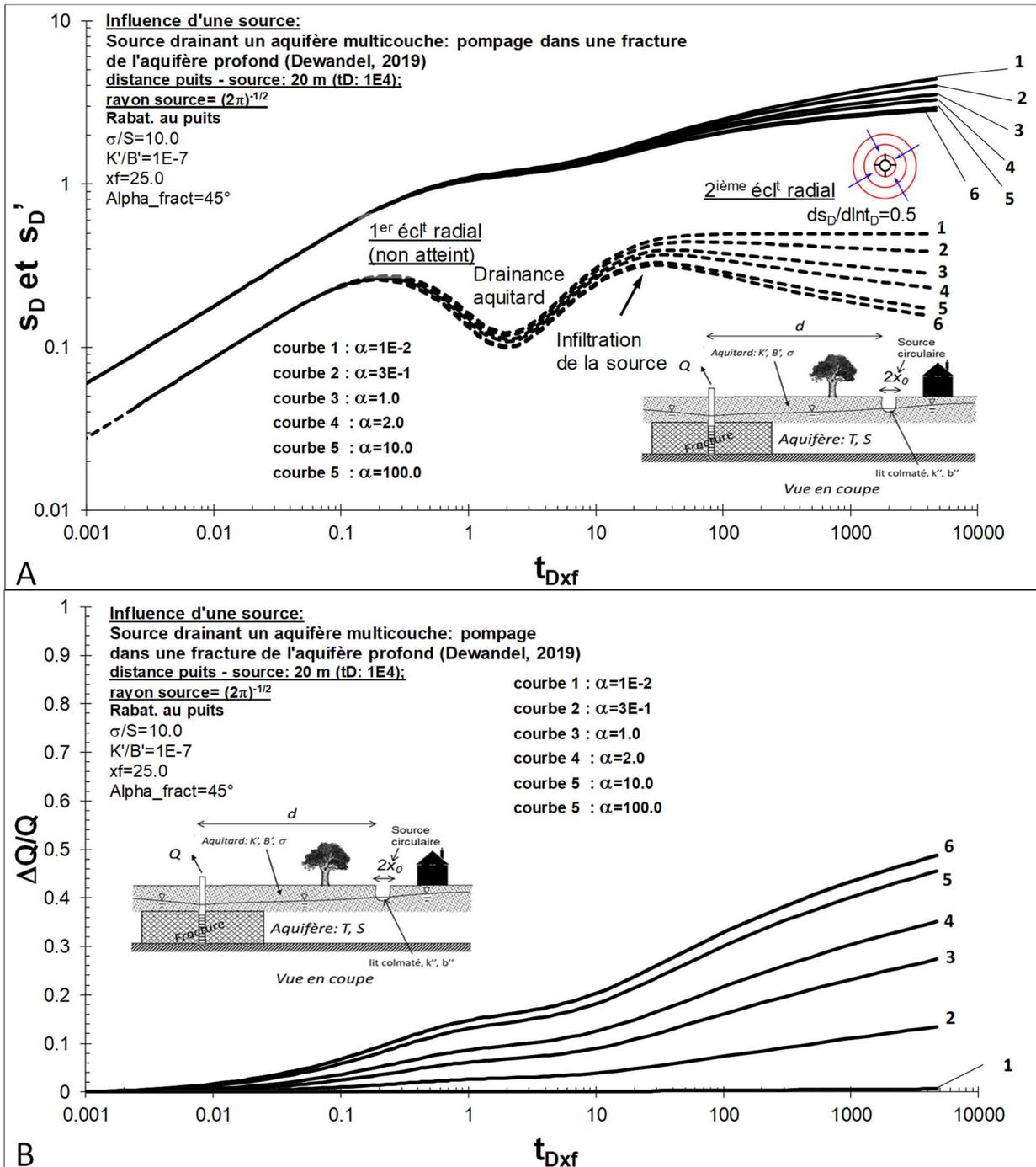
1	09781X0005	F_Abbaye_1	paléocène	29	null	F_Moulin Bognères_1	
2	09781X0005	F_Abbaye_2	paléocène	30	09781X0010	F_peyradere_1	Paléocène
3	09783X0022	F_Bahus_1	Paléocène? Crétacé?	31	09781X0010	F_peyradere_2	Paléocène
4	09783X0022	F_Bahus_2	Paléocène? Crétacé?	32	09781X0007	F_Sartou_1	Eocène
5	09783X0017	F_CD52_1	Paléocène	33	09781X0007	F_Sartou_2	Eocène
6	09784X0029	F_Chicoy_1	Paléocène	34	09781X0009	F_StGermain_1	Paléocène
7	09784X0029	F_Chicoy_2	Paléocène	35	09781X0009	F_StGermain_2	Paléocène
8	09782X0016	F_Chrestian_1	crétacé	36	09783X0025	F_Taulade_1	Paléocène?
9	09782X0016	F_Chrestian_2	crétacé	37	09782X0024	F1_Marseillon_1	crétacé
10	09782X0016	F_Chrestian_3	crétacé	38	09781X0015	F2_Lacrouts_1	Paléocène Profond
11	09782X0011	F_Daourat_1	crétacé	39	09781X0015	F2_Lacrouts_2	Paléocène Profond
12	09782X0011	F_Daourat_2	crétacé	40	09782X0025	F2_Marseillon_1	crétacé
13	09782X0013	F_Dep944_1	crétacé	41	09782X0025	F2_Marseillon_2	crétacé
14	09782X0013	F_Dep944_2	crétacé	42	09782X0025	F2_Marseillon_3	crétacé
15	09784X0022	F_Gardelly_1	Paléocène	43	Station 0523	r_Gabas_1	
16	09784X0022	F_Gardelly_2	Paléocène	44	Station 0523	r_Gabas_2	
17	09782X0008	F_Hagetmau_1	Paléocène profond	45	Station 0523	r_Gabas_3	
18	09782X0008	F_Hagetmau_2	Paléocène profond	46	Gabas Coeur	r_Grabas_4	
19	09781X0011	F_Labaoucorme_1	crétacé	47	Gabas Coeur	r_Grabas_5	
20	09783X0002	F_Labarthe_1	Paléocène	48	Laudon	r_Laudon(p)_1	
21	09783X0002	F_Labarthe_2	Paléocène	49	Laudon	r_Laudon(p)_2	
22	09783X0038	F_Lacumatte_1	Paléocène?	50	Laudon	r_Laudon(p)_3	
23	09781X0006	F_Lagorce_1	Eocène	51	Q1360430	r-Bas_1	
24	09781X0006	F_Lagorce_2	Eocène	52	Q1360430	r-Bas_2	
25	09781X0008	F_Laheourere_1	crétacé	53	09782X0010	Sce_Couit(Banos)_1	crétacé
26	09782X0019	F_Lannebourdes_1	Paléocène	54	09782X0010	Sce_Couit(Banos)_2	crétacé
27	09783X0019	F_Larcuchette_1	Paléocène	55	09782X0039	Sce_Marseillon_1	crétacé
28	09783X0019	F_Larcuchette_2	Paléocène	56	09782X0039	Sce_Marseillon_2	crétacé
				57	09515X0039	sce_StVincent_1	
				58	09515X0039	sce_StVincent_2	

Figure A- 1. Evolution des signatures en deutérium en fonction des signatures en oxygène 18 des eaux prélevées en 2018.



Annexe 4

Courbes-types de l'évolution du rabattement et de l'impact sur la source et paramètres du modèle mathématique d'interprétation, retenu pour l'essai par pompage



Pompage d'un aquifère multicouche par une fracture verticale située à proximité d'une source au fond colmaté (modification de Hunt, 2004 et Dewandel et al., 2018). Calculs pour différentes valeurs de α . A : évolution du rabattement (s_D) au puits de pompage et de sa dérivée (s_D'), B : impact du pompage sur le débit de la source. La source est toujours située à la même distance (20 m).

s_D, s_D' : rabattement et dérivée adimensionnels ; t_{Dxf} : temps adimensionnel.

$$t_D = \frac{tT}{Sxf^2} \text{ et } s_D = \frac{2\pi T}{Q} s, \text{ avec } t \text{ le temps et } s \text{ le rabattement.}$$

Paramètres du modèle fracture et source (modification de Hunt, 2004 et Dewandel et al., 2018)	
distance	r (m)
Transmissivité de l'aquifère capté	T (m ² /s)
Emmagasinement de l'aquifère capté	S (-)
Demi-longueur de la fracture	x_f (m)
Alpha_fracture (angle de la fracture / axe des x)	α_{fract} (°)
Perméabilité de l'aquitard	k' (m/s)
Epaisseur de l'aquitard	B' (m)
Emmagasinement de l'aquitard	σ (-)
Perméabilité du lit de la source	k'' (m/s)
Epaisseur du lit de la source	b'' (m)
Rayon du lit de la source	x_0 (m)
Distance puits de pompage - source	d (m)
Capacité du puits	Rc (m)
Pertes de charge quadratiques (puits)	C (m ⁻⁵ s ²)

Tableau des paramètres du modèle fracture et source. Modèle : modification de Hunt, 2004 et Dewandel et al., 2018)



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009

45060 - Orléans Cedex 2 - France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Nouvelle-Aquitaine

Parc Technologique Europarc
24, avenue Léonard de Vinci

33600 - Pessac - France

Tél. : 05 57 26 52 70