



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Projet GAIA. Année 5. Avancement des volets hydrogéologique et hydrogéochimique

Rapport final

RP-70381-FR

1er septembre 2021

Étude réalisée dans le cadre du projet de recherche
PDR13AQI02

André L., Stéphan S., Bourbon P., Cabaret O., Douez O.

Vérificateur :

Nom : B. Dewandel

Fonction : Hydrogéologue

Date : 04/02/2021

Signature :

Approbateur :

Nom : N. Pédron

Fonction : Directeur du BRGM
Nouvelle-Aquitaine

Date : 20/08/2021

Signature :

Le Directeur Régional
du BRGM Nouvelle-Aquitaine

Nicolas PÉDRON

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

Contact : qualite@brgm.fr

RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

eau
GRAND SUD-OUEST
AGENCE DE L'EAU ADOUR-GARONNE

TEREGA

Mots clés : Hydrogéologie, Géologie, Nouvelle-Aquitaine, Occitanie, Sables Infra-Molassiques

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

André L., Stéphant S., Bourbon P., Cabaret O., Douez O. (2021) - Projet GAIA. Année 5. Avancement des volets hydrogéologique et hydrogéochimique. Rapport final. **RP-70381-FR**, 123 p.

Synthèse

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

Le présent rapport, qui correspond au rapport final concernant les investigations réalisées dans le cadre des travaux relatifs à ce programme de recherche GAIA, restitue 3 études conduites en 2019 et 2020 ; il s'agit :

i) de l'identification de potentiels marqueurs géochimiques qui permettraient de caractériser d'éventuels transferts verticaux des formations sus-jacentes ou sous-jacentes au réservoir des Sables Infra-Molassiques par des essais de lixiviation. Ces essais ont été réalisés sur des roches provenant à la fois des zones aquifères (Sables de Lussagnet et Grès à Nummulites), mais aussi des horizons sus-jacents (molasse) et sous-jacents (Paléocène) dans 2 ouvrages de Lussagnet.

L'analyse des lixiviats issus de la molasse a mis en avant des différences de composition entre les couches géologiques supérieures et l'aquifère, qui pourraient être exploitées. Les éléments qui ont été retenus pour ces essais sont l'antimoine, le baryum, le lithium, le bore, le magnésium et le tungstène, ainsi que les isotopes du bore.

Concernant les horizons et réservoirs sous-jacents, des différences de teneurs dans différents éléments ont été constatées entre les Grès à Nummulites et le Paléocène. Les Grès à Nummulites montrent ainsi des teneurs plus fortes en strontium, alors que le Paléocène pourrait être caractérisé par des teneurs plus fortes en lithium et en fluor.

Le baryum est présent dans les échantillons solides de molasse, de Sables de Lussagnet et semble absent des Grès à Nummulites et du Paléocène. De possibles transferts de baryum, depuis le toit du réservoir (de la molasse), peuvent être supposés.

Pour ce qui est de l'antimoine, les analyses ne révèlent que très rarement la présence de cet élément dans les eaux des Sables de Lussagnet. Sa concentration est très souvent inférieure aux limites de détection. En ce qui concerne le lithium, les concentrations dans les Sables de Lussagnet et dans les Grès à Nummulites sont relativement faibles, alors que des concentrations plus fortes sont observées dans la molasse et dans le Paléocène. Cette observation pourrait expliquer les enrichissements locaux observés dans les eaux de forage, par transferts verticaux. Des analyses isotopiques complémentaires permettraient de mieux identifier la source exacte du lithium présent dans les eaux de l'aquifère. Enfin, le bore semble être un élément important dans la compréhension des processus de transfert, notamment en raison des écarts mesurés de son isotope principal, le ^{11}B .

Cette étude confirme ainsi que les Sables de Lussagnet et les Grès à Nummulites sont des horizons renfermant très peu d'espèces solubles ; les eaux de ce réservoir devraient ainsi théoriquement être peu minéralisées. L'enrichissement en certains éléments, observé dans les eaux des forages, provient très probablement des horizons sus ou sous-jacents, par transferts verticaux. A noter toutefois que cette étude ne porte que sur deux forages, relativement proches l'un de l'autre. Elle donne donc une vision assez précise des potentiels marqueurs spécifiques à

chaque horizon, dans ce secteur de l'aquifère. Des études plus larges, à l'échelle du bassin, seraient nécessaires pour confirmer ces premiers résultats.

ii) de l'établissement de cartes piézométriques des Sables Infra-Molassiques (SIM), réalisées à partir de campagnes de mesures et de collectes de données conduites entre septembre 2017 et avril 2018 (données qui ont été corrigées des effets de température et de pression). Des cartographies mensuelles de la piézométrie de la nappe des SIM ont ainsi été tracées. Au préalable, une analyse des ouvrages, mais également des données acquises et collectées, a dû être réalisée du fait d'incertitudes demeurant quant à l'aquifère capté et/ou sur le niveau piézométrique mesuré dans certains ouvrages. Ainsi, pour l'aquifère capté, la nécessité d'une validation, notamment à travers le modèle géologique, réalisé en parallèle dans le cadre du programme GAIA, s'est avérée indispensable. Par ailleurs, certains niveaux piézométriques mesurés, voire collectés et attribués à la nappe des SIM, se sont avérés peu fiables pour la réalisation de la cartographie (certains ouvrages captant plusieurs aquifères par exemple). Ces mesures ont donc été écartées pour la réalisation des cartes. Au final, 8 cartes mensuelles de septembre 2017 à avril 2018 ont été produites à partir de 49 points de mesures. Pour ce faire, une interpolation des données, contraintes par l'intégration de failles structurantes reconnues et déconnectant hydrauliquement le réservoir des SIM, a été dans un premier temps réalisée. A la suite de la production de ces premières cartes, un travail d'expertise hydrogéologique a permis de les affiner. Les tracés piézométriques obtenus sont plus ou moins précis, selon les secteurs, en fonction de la densité de points de mesure. Ainsi, les isopièzes générées dans le secteur des stockages et dans un rayon d'une quarantaine de kilomètres autour de ces derniers sont globalement fiables, à l'échelle régionale de travail. Dans les autres secteurs de la zone d'étude, les isopièzes produites peuvent être très incertaines du fait d'un manque de mesures.

Ces cartographies permettent de montrer, pour la période de septembre 2017 à avril 2018, l'évolution des niveaux piézométriques et en particulier la variation des niveaux liée aux stockages de gaz dans le réservoir des SIM et sa propagation dans le temps. Ainsi, les niveaux au droit des stockages sont de l'ordre de +150 m NGF en fin d'été (suite à la phase de remplissage) et de l'ordre de +40 m NGF en fin de stockage (soutirage pendant la période hivernale). Plus globalement, la piézométrie montre une compartimentation entre les écoulements sud-ouest, au sud de la flexure celtaquitaine, et ceux à l'est et au nord de la zone d'étude. Cette représentation des écoulements est cohérente avec les principales zones géochimiques proposées par André L. (2002).

Ces différentes informations permettront de contraindre le modèle hydrodynamique développé, afin qu'il reproduise ces piézométries observées et les sens d'écoulement qui peuvent en être déduits.

iii) d'une synthèse géologique sur le dôme de Gondrin. Cette synthèse a notamment été fournie à l'ENSEGID pour le travail qu'il mène dans le cadre de GAIA et dont l'intitulé est le suivant : « l'étude du fonctionnement hydrodynamique et hydrogéochimique d'une butte tertiaire située à Gondrin (département du Gers) ». Il s'agit d'étudier les possibilités de transferts verticaux à travers l'alternance de formations molassiques et de niveaux carbonatés, observée sur la butte de Gondrin.

Les formations lacustres calcaires identifiées dans le secteur de Gondrin sont souvent fracturées, et parfois karstifiées. Elles peuvent présenter un intérêt hydrogéologique pour les territoires. La compréhension des relations géométriques entre ces formations et les formations molassiques argileuses et marneuses, parfois sableuses, environnantes, est donc un point-clé pour la compréhension des transferts verticaux. La pile de sédiments molassiques, où s'intercalent ces formations calcaires, atteint une épaisseur de l'ordre de 600 mètres, dans le secteur de Gondrin.

D'un point de vue lithologique, les faciès de la molasse « inférieure » (environ 50 mètres d'épaisseur dans le secteur) sont constitués de dépôts argilo-carbonatés à marneux, avec parfois une fraction plus ou moins grossière, notamment lorsqu'il s'agit de paléo-chenaux de réseaux fluviaux. La molasse « supérieure », d'une épaisseur plus conséquente que celle de la molasse « inférieure », environ 570 mètres de puissance dans cette zone, est très influencée par des dépôts lacustres et correspond aux dépôts aquitaniens constitutifs de la Molasse de l'Agenais supérieure. Les investigations menées dans le secteur de Gondrin mettent en exergue que les formations carbonatées lacustres présentent de fortes hétérogénéités. Les données de sondages et tests de perméabilité réalisés par le bureau d'étude Anteagroup, lors de son étude sur les molasses du Bassin aquitain (étude réalisée pour le compte de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne), tendent à infirmer l'idée d'une continuité hydraulique au sein même de la formation des Calcaires gris de l'Agenais. Pour cette formation géologique, des investigations complémentaires permettraient de mieux comprendre les écoulements hydrogéologiques, à plus grande échelle. En effet, les résultats obtenus concernent seulement un secteur très restreint dans la partie ouest de la butte et des écoulements sont suspectés dans d'autres zones au sein du Calcaire gris de l'Agenais. De plus, les continuités hydrauliques vis-à-vis des autres formations lacustres présentes dans le secteur sont également à préciser (Calcaires blancs de l'Agenais, Calcaires de Gondrin et de Herret, Calcaires de Pellecahus ou de Lectoure, etc.). Si leur potentiel hydrogéologique reste à confirmer, les niveaux molassiques plus ou moins argileux, intercalés et pouvant atteindre plus d'une vingtaine de mètres d'épaisseur (d'après les forages reconnus dans le secteur), doivent être identifiés et leurs caractéristiques hydrodynamiques précisées.

Sommaire

1. Introduction	13
2. Hydrogéochimie - Interactions eau-roche	15
2.1. Objectifs	15
2.2. Echantillons de roches issus du toit de l'aquifère éocène	15
2.2.1. Analyse des phases solides	15
2.2.2. Etudes des lixiviats	17
2.2.3. Résultats des analyses sur les lixiviats.....	18
2.3. Echantillons de roches issus du mur de l'aquifère éocène	23
2.3.1. Analyses des phases solides.....	23
2.3.2. Etude des lixiviats	24
2.3.3. Résultats des analyses sur les lixiviats.....	25
2.4. Synthèse des résultats	28
3. Etablissement de cartes piézométriques mensuelles	31
3.1. Analyse des ouvrages	31
3.1.1. Secteur de Geaune.....	31
3.1.2. Secteur d'Eugénie-les-Bains	32
3.1.3. Secteur de Castéra-Verduzan	33
3.1.4. Secteur de Barbotan.....	34
3.1.5. Secteur de Simacourbe / Lembeye / Lespielle	37
3.1.6. Secteur de Bordes	38
3.1.7. Secteurs des stockages de Lussagnet et Izaute	39
3.1.8. Autres cas.....	39
3.1.9. Synthèse des données retenues	41
3.2. Méthodologie d'élaboration des cartes	42
3.3. Cartographies piézométriques	43
4. Synthèse géologique dans le secteur de Gondrin	47
4.1. Cadre de l'étude	47
4.2. Cadre géologique	49
4.2.1. Contexte géologique régional	49
4.2.2. Secteur de Gondrin.....	52
4.2.3. Structuration du sous-sol.....	53
4.3. Géologie détaillée de la butte de Gondrin	63
4.3.1. Stratigraphie et géométrie de la pile molassique.....	65
4.3.2. Etude pour la « Définition d'une stratégie de surveillance de certaines masses d'eau de type "molasses" - Antegroup, 2016	75
4.4. Synthèse, conclusion et perspectives	81
5. Conclusions	83
6. Bibliographie	85

Liste des illustrations

Illustration 1 - Evolution du pH et du redox, à 16 et 28 jours, en fonction de la profondeur	19
Illustration 2 - Evolution de la concentration en calcium, chlorure, sodium, sulfate, potassium et magnésium, à 16 et 28 jours, en fonction de la profondeur	20
Illustration 3 - Evolution de la concentration en silicium et en traces, en fonction de la profondeur des roches	21
Illustration 4 - Evolution de la concentration et du rapport isotopique du bore, en fonction de la profondeur, après 28 jours d'essai	22
Illustration 5 - Photographies des échantillons de roches utilisés pour les expériences de mise en solution (gauche : échantillons à l'interface Sables de Lussagnet / Grès à Nummulites ; centre : échantillons à l'interface Eocène / Paléocène ; droite : échantillons du Paléocène)	23
Illustration 6 - Evolution du pH (gauche), de la conductivité (centre) et du potentiel redox (droite), à 14 et 30 jours, en fonction de la profondeur	25
Illustration 7 - Evolution de la concentration en calcium et chlorure (gauche), potassium et magnésium (centre), sodium et sulfate (droite), à 14 et 30 jours, en fonction de la profondeur	26
Illustration 8 - Evolution de la concentration en silicium et en éléments traces, en fonction de la profondeur des roches.....	27
Illustration 9 - Piézométries du secteur de Geaune (entre septembre 2017 et avril-mai 2018).....	32
Illustration 10 - Piézométries du secteur d'Eugénie-les-Bains (entre septembre 2017 et avril-mai 2018)	33
Illustration 11 - Piézométries du secteur de Castéra-Verduzan (entre septembre 2017 et avril-mai 2018)	34
Illustration 12 - Coupe géologique schématique de la structure de Barbotan (Domez, 2007 ; d'après Platel, 1990 et Guillemin et Krause, 2000)	34
Illustration 13 - Schéma du modèle conceptuel hydrogéologique de Barbotan (AquilaConseil, 2001)	35
Illustration 14 - Piézométries des ouvrages du compartiment sud de Barbotan (entre septembre 2017 et avril-mai 2018)	36
Illustration 15 - Piézométries des ouvrages du compartiment nord de Barbotan (entre septembre 2017 et avril-mai 2018)	36
Illustration 16 - Piézométries des ouvrages du secteur de Barbotan (entre septembre 2017 et avril-mai 2018).....	37
Illustration 17 - Localisation des ouvrages du secteur de Barbotan et niveaux piézométriques mesurés durant la campagne de Septembre 2017	37
Illustration 18 - Comparaison des piézométries des forages de Lembeye 1 et Lespielle 2, à Simacourbe, et des ouvrages environnants	38
Illustration 19 - Chronique piézométrique de l'ouvrage d'Auvillar (09293X0123/F)	41
Illustration 20 - Localisation des ouvrages retenus pour les cartes piézométriques mensuelles (nom des ouvrages en annexe 2)	42

Illustration 21 - Cartes piézométriques pour la période de septembre à décembre 2017 (fond vert : extension de la zone d'étude ; traits pleins : isopièzes fiables ; traits en pointillés : isopièzes incertaines)	44
Illustration 22 - Cartes piézométriques pour la période de janvier à avril 2018 (fond vert : extension de la zone d'étude ; traits pleins : isopièzes fiables ; traits en pointillés : isopièzes incertaines)	45
Illustration 23 - Présentation du secteur de l'étude (en haut : fond de carte IGN au 1/50 000 ; en bas : fond MNT - source Géoportail de l'IGN).....	48
Illustration 24 - Blocs-diagrammes représentant la succession de contextes géologiques régionaux, au cours du cycle alpin ; le carré rouge indique la localisation approximative du site Gondrin (source : BRGM, 1986)	50
Illustration 25 - Série virtuelle locale dans les terrains molassiques du Miocène du Bassin d'Aquitaine (Crouzel, 1957).....	51
Illustration 26 - Variation horizontale d'ensemble des faciès molassiques, à l'échelle du Bassin aquitain (Sunyach, 1984)	51
Illustration 27 - Carte géologique de synthèse au 1/250 000 dans le secteur de Gondrin (d'après Monod et al., 2014).....	53
Illustration 28 - Cartographie des isohypses de la base du Tertiaire dans le Bassin aquitain ; localisation de la flexure celtaquitaine (tireté violet) ; localisation de Gondrin (point bleu) et localisation des lignes sismiques régionales et des principales structures tectoniques (d'après Serrano et al., 2006).....	55
Illustration 29 - Localisation et profil de la ligne sismique régionale n°5 interprétée ; localisation de Gondrin (flèche et point bleus) et localisation de la flexure celtaquitaine (tireté violet) (d'après Serrano et al., 2006).....	56
Illustration 30 - Localisation de la ligne de corrélation diagraphique partiellement présentée en Illustration 31 (rectangle bleu) ; localisation de Gondrin (point bleu) (d'après Serrano, projet GAIA, 2016)	57
Illustration 31 - Profil de corrélation diagraphique (localisé sur l'illustration 30) ; localisation de Gondrin (flèche bleue) et localisation de la flexure celtaquitaine (tireté violet) (d'après Serrano, réunion de présentation du projet GAIA, 2016).....	57
Illustration 32 - Carte structurale schématique autour du secteur d'étude de Gondrin (rond rouge) : structures anticlinales (doubles flèches noires) et flexure celtaquitaine (tireté noir) (Serrano, 2001)	58
Illustration 33 - Carte de localisation du périmètre du modèle géologique « GAIA » sur la carte géologique simplifiée du sud-ouest de la France, d'après la carte géologique à 1/1 000 000 de la France 3 ^e édition révisée (Chantraine et al., 2006).....	59
Illustration 34 - Surfaces géologiques modélisées dans le modèle géologique 3D (Lasseur et al., 2021)	60
Illustration 35 - Localisation des trois coupes présentées dans le modèle « GAIA », du forage de Gondrin (09533X0016/F - BSS002EFWR) (réf. GAIA - F99-082) et positionnement de l'anticlinal de Roquefort-Créon avec les affleurements de Cénomaniens et de Tithoniens (cartes géologiques au 1/250 000 de l'Aquitaine et de Midi-Pyrénées, centrées sur le secteur de Gondrin).....	61
Illustration 36 - Coupe GAIA 1 (extrait du modèle géologique 3D - Lasseur et al., 2021)	61

Illustration 37 - Coupe GAIA 2 (extrait du modèle géologique 3D - Lasseur et al., 2021)	62
Illustration 38 - Coupe GAIA 3 (extrait du modèle géologique 3D- Lasseur et al., 2021)	62
Illustration 39 - Carte géologique à 1/50 000 dans le secteur de Gondrin (carte géologique harmonisée du Gers), localisation des indices BSS dans le secteur, coupes « GAIA » et coupes locales (légende Illustration 40)	63
Illustration 40 - Légende de la carte géologique harmonisée du Gers à 1/50 000, dans le secteur de Gondrin	64
Illustration 41 - Coupes 1 et 2 (respectivement gauche et droite) présentées dans l'illustration 39 (A. Faucher, à partir de la carte géologique au 1/50 000)	69
Illustration 42 - Coupes 3 et 4 (respectivement gauche et droite) présentées dans l'illustration 39 (A. Faucher, à partir de la carte géologique au 1/50 000)	69
Illustration 43 - Carte paléoenvironnementale au Bartonien (Synthèse géologique et géophysique des Pyrénées, BRGM-AGSO, 2018) et localisation du secteur de Gondrin (rectangle noir).....	72
Illustration 44 - Carte paléoenvironnementale entre le Rupélien et l'Aquitainien (Synthèse géologique et géophysique des Pyrénées, BRGM-AGSO, 2018) et localisation du secteur de Gondrin (rectangle noir)	73
Illustration 45 - Carte paléoenvironnementale au Langhien-Serravalien (Synthèse géologique et géophysique des Pyrénées, BRGM-AGSO, 2018) et localisation du secteur de Gondrin (rectangle noir)	75
Illustration 46 - Localisations des coupes « GAIA » et locale du profil de tomographie électrique Antegrup (TE-3), de la source Le Barrade et du sondage Pz14, sur fond de carte géologique à 1/50 000 (feuille d'Eauze n°953)	76
Illustration 47 - Résultats des investigations de tomographie électrique, réalisées dans le secteur de Gondrin (Antegrup, 2016)	78
Illustration 48 - Localisation du captage de la source « Le Barrade » (point rouge) et du forage Pz14 (triangle bleu), cartes et coupes géologiques interprétatives du secteur de Gondrin (Antegrup, 2016).....	79
Illustration 49 - Coupe du sondage Pz14 réalisé dans le secteur de Gondrin (source : Antegrup, 2016)	80
Illustration 50 - Log géologique schématique, établi dans le secteur de Gondrin (Antegrup, 2016)	81

Liste des tableaux

Tableau 1 - Quantification des oxydes et éléments composant la molasse et les roches, au toit de l'aquifère des Sables de Lussagnet	16
Tableau 2 - Composition minéralogique des roches ("tr" indique les minéraux présents à l'état de traces)	17
Tableau 3 - Quantités d'eau et de roche utilisées pour chaque essai.....	18

Tableau 4 - Analyses isotopiques du bore réalisées dans le cadre de cette étude (chaque échantillon a été analysé deux fois)	22
Tableau 5 - Composition élémentaire des roches exprimées en pourcentage massique d'oxyde (document TEREGA)	23
Tableau 6 - Composition minéralogique totale des roches exprimées en pourcentage massique (document TEREGA)	24
Tableau 7 - Quantités d'eau et de roche, utilisées pour chaque essai, dans les échantillons issus du mur de l'aquifère.....	24
Tableau 8 - Rappel des éléments majeurs et traces, analysés dans les expériences de lixiviation (en gras, éléments d'intérêt qui pourraient être utilisés comme traceurs des transferts entre horizons géologiques)	28
Tableau 9 - Coupe lithostratigraphique initiale du forage 09533X0016/F (BSS002EFWR)	65
Tableau 10 - Coupe lithostratigraphique du forage 09533X0016/F (BSS002EFWR), réinterprétée dans le cadre du projet GAIA et intégrée dans la base (réf. F89-002).....	65
Tableau 11 - Coupes lithostratigraphiques interprétées des forages 09533X001 et 09533X0017	66
Tableau 12 - Description et principales caractéristiques des terrains à l'affleurement dans le secteur de Gondrin, tels que décrits sur la carte géologique au 1/50 000 d'Eauze (d'après A. Faucher)	67

Liste des annexes

Annexe 1 Composition chimique des lixiviats après 30 jours.....	89
Annexe 2 Liste des 49 ouvrages finalement retenus pour l'élaboration des cartes piézométriques mensuelles.....	93
Annexe 3 Planches photographiques (A. Faucher).....	97

1. Introduction

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

L'objet de ce rapport est de restituer un certain nombre d'actions conduites dans ce domaine, de 2019 à 2020. Elles sont au nombre de trois. Il s'agit :

- de l'identification de potentiels marqueurs géochimiques, afin de caractériser de potentiels transferts verticaux avec les formations sus-jacentes ou sous-jacentes du réservoir des Sables Infra-Molassiques (SIM), par des essais de lixiviation (cf. chapitre 2) ;
- de l'établissement de cartes piézométriques au sein des SIM, à partir de campagnes de mesures et de collectes de données, conduites entre septembre 2017 et avril 2018 (cf. chapitre 3) ;
- d'une synthèse géologique sur le dôme de Gondrin. Cette synthèse a notamment été fournie à l'ENSEGID, pour le travail qu'il mène dans le cadre de GAIA et dont l'intitulé est le suivant : « l'étude du fonctionnement hydrodynamique et hydrogéochimique d'une butte tertiaire située à Gondrin (département du Gers) » (cf. chapitre 4).

Il convient de noter que ce rapport ne vise pas à être exhaustif de l'ensemble des actions conduites dans le domaine de l'hydrogéologie et de l'hydrogéochimie, dans le cadre du programme GAIA en 2019 et 2020 ; certaines d'entre elles ayant fait l'objet d'une documentation séparée. Ainsi, deux autres rapports ont été restitués, durant la même période, relatifs au volet hydrogéologique et hydrogéochimique du programme. Il s'agit des documents suivants :

- Manceau J.-C., André L., Bourbon P., Wuilleumier A. (2019) - Origines des variations cycliques des teneurs en sulfate observées au voisinage du forage de Nogaro 2 : investigations de terrain, validation des hypothèses envisagées par modélisation hydrodynamique et transport de masse. Rapport final. BRGM/RP-69552-FR ;
- Douez O., Wuilleumier A., Corbier P. avec la collaboration de Minvielle S. (2019) - Projet GAIA. Étude des exutoires des aquifères profonds du sud du Bassin aquitain. BRGM/RP-69131-FR.

Le présent document fait, par ailleurs, suite au rapport d'année 4 du programme GAIA, qui rendait compte de l'avancement des actions conduites dans le domaine de l'hydrogéologie en 2017 et début 2018 (André et al., 2019). Enfin, il correspond au rapport final concernant les investigations réalisées dans le cadre des travaux relatifs au programme de recherche GAIA.

2. Hydrogéochimie - Interactions eau-roche

2.1. OBJECTIFS

L'un des questionnements du projet GAIA concerne l'hydrogéochimie des eaux et notamment l'origine de la minéralisation des eaux de l'aquifère de l'Eocène. En effet, des variations de composition chimique des eaux, selon les secteurs de l'aquifère, sont observées. Compte tenu de la relative pauvreté minéralogique de l'aquifère (composé principalement de quartz, de feldspath et autres minéraux très peu solubles), il est nécessaire d'envisager des échanges verticaux pour pouvoir expliquer des enrichissements de composition chimique. Pour identifier ces potentiels transferts, une hypothèse consiste à mettre en évidence la présence de marqueurs géochimiques dans les formations géologiques adjacentes (supérieures ou inférieures) à l'aquifère éocène et à vérifier leur éventuelle présence dans les eaux de l'aquifère.

L'objectif des expériences présentées dans ce chapitre est donc d'identifier ces potentiels marqueurs géochimiques (éléments majeurs, traces, ainsi que des traceurs isotopiques). Pour cela, des expériences de lixiviation ont été réalisées avec des cuttings (= déblais de forage) provenant de différentes formations, situées au toit (paragraphe 2.2) et au mur de l'aquifère (paragraphe 2.3). Il est important ici de noter que les échantillons de roche, utilisés pour les expériences de lixiviation, n'ont pas été conservés dans des conditions similaires à celles du réservoir (les minéraux présents dans les roches ont pu être oxydés depuis qu'ils ont été échantillonnés). De la même manière, les expériences de lixiviation n'ont pas été menées dans des conditions anoxiques, similaires à celles du réservoir. En conséquence, les essais réalisés ne sont pas une réplique des réactions qui se passent réellement dans le réservoir, mais ces expériences doivent permettre d'identifier si des parties du réservoir ou des niveaux sus ou sous-jacents relarguent facilement des éléments dans la phase aqueuse, éléments qui pourront servir de marqueurs géochimiques.

2.2. ECHANTILLONS DE ROCHES ISSUS DU TOIT DE L'AQUIFERE EOCENE

Pour cette étude, 10 échantillons de roches, provenant du puits LUG-74, ont été testés (puits d'observation situé au droit de la bulle de stockage de Lussagnet - BSS ID : BSS002EFNJ). Ces échantillons ont été prélevés à des profondeurs variables allant de 521 m à 610 m/sol. Le réservoir R7_sup a été localisé entre les profondeurs 553 et 579,4 m/sol : il est principalement constitué d'un toit calcaire argileux, d'une alternance d'argile calcaire et de marne avec, à la base, un calcaire beige mudstone plus ou moins induré d'une épaisseur voisine de 2 m. Les Sables de Lussagnet commencent donc à 579,4 m/sol et s'étendent jusqu'à 640 m/sol, profondeur maximale atteinte par le forage. Aucune information sur la nature des roches sous-jacentes n'est disponible. Les échantillons de roche étudiés correspondent donc à des échantillons issus de la molasse et des deux réservoirs aquifères (R7_sup et Sables de Lussagnet).

2.2.1. Analyse des phases solides

Les différents échantillons, sélectionnés à partir du log géologique et récupérés auprès de la carothèque de Boussens, ont été caractérisés dans les laboratoires du BRGM en réalisant :

Oxydes	LD'	Profondeur (m/sol) Unité	Molasse					Réservoir R7_sup		Sables de Lussagnet		
			521	524	526	541	545	562	574	580	586	610
Ag	0.2	mg/kg	0	0	0	0	0	0.5	0	0.5	0	0
Al₂O₃	0.2	%	6.93	6.73	11.6	8.77	4.78	5.27	4.67	2.13	2.48	0.39
As	20	mg/kg	65	129	65	64	86	130	132	142	138	128
B	10	mg/kg	72	47	56	73	52	40	47	45	26	23
Ba	10	mg/kg	223	138	227	256	169	208	400	308	252	45
Be	2	mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bi	10	mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CaO	0.1	% mass.	18.2	38.5	14.2	13	32.6	37.7	35.5	38.7	4.41	1.03
Cd	2	mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ce	10	mg/kg	34	21	33	41	33	20	13	0	10	0
Co	5	mg/kg	7	0	7	5	0	5	0	0	0	0
Cr	10	mg/kg	40	33	39	35	23	29	25	12	17	0
Cu	5	mg/kg	24	0	23	12	0	7	9	6	6	0
Fe₂O₃	0.05	% mass.	1.4	1.67	3.66	2.23	1.9	1.99	2.71	1.28	1.89	0.19
K₂O	0.05	% mass.	1.51	0.17	2.46	1.88	0.73	0	0	0	0.11	0
La	20	mg/kg	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0
Li	10	mg/kg	36	28	36	28	17	22	15	0	14	0
MgO	0.2	% mass.	2.37	0.98	9.48	1.83	1.5	1.28	0.73	0.56	0	0
MnO	0.02	% mass.	0.03	0.09	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.02	0	0
Mo	5	mg/kg	5	9	5	5	8	9	9	9	10	9
Na₂O	0.2	% mass.	0	0.22	0.6	0	0	0	0	0	0	0
Nb	20	mg/kg	91	170	91	91	88	170	169	168	168	167
Ni	10	mg/kg	21	16	21	20	13	17	14	14	0	0
P₂O₅	0.05	%	0.07	0	0.12	0.12	0.07	0.06	0.07	0.12	0	0
Pb	10	mg/kg	12	17	0	10	0	12	23	15	12	10
Sb	10	mg/kg	75	77	37	36	38	77	77	77	74	73
SiO₂	0.2	%	49.6	17.4	60.8	56.4	28.9	19.1	16.2	22.7	85.5	97.4
Sn	10	mg/kg	132	132	69	66	66	131	132	131	130	129
Sr	5	mg/kg	160	221	192	180	291	400	353	691	128	30
S	0.01	% mass.	0.02	0	0.03	0.01	0.55	0.28	0.03	0.31	0.02	0.07
TiO₂	0.05	% mass.	0.31	0.24	0.6	0.47	0.3	0.24	0.23	0.11	0.09	0
V	10	mg/kg	42	50	51	45	34	47	48	27	43	12
W	10	mg/kg	63	124	63	63	63	124	125	124	129	124
Y	20	mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zn	5	mg/kg	30	31	40	40	22	32	29	28	9	0
Zr	20	mg/kg	0	179	197	273	229	198	180	214	219	173
Perte au feu		% mass.	18.7	33.6	0	14.9	28.3	35	40.1	34.2	5.61	1.26
Total (% mass.)			99.1	99.6	103.6	99.6	99.7	101.0	100.3	100.1	100.1	100.3

Tableau 1 - Quantification des oxydes et éléments composant la molasse et les roches, au toit de l'aquifère des Sables de Lussagnet

- une analyse élémentaire des roches, en combinant des analyses par fluorescence X pour les éléments majeurs et des analyses par ICP-AES et ICP-MS, après dissolution des échantillons dans une solution de peroxyde de sodium et d'acide chlorhydrique (33 %), pour les éléments traces. Les éléments quantifiés sont : Ag, Al₂O₃, As, B, Ba, Be, Bi, CaO, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Fe₂O₃, K₂O, La, Li, MgO, MnO, Mo, Nb, Ni, P₂O₅, Pb, Sb, SiO₂, Sn, Sr, TiO₂, V, W, Y, Zn et Zr. Les résultats obtenus sont normalisés par rapport à la masse initiale de la roche séchée à 40°C (Tableau 1) ;
- et une identification et quantification des phases cristallines, par diffraction par rayon X (DRX) combinée à une analyse Rietveld (programme SiroQuant V.4 de Sietronics) (Tableau 2).

Les roches étudiées sont principalement composées (entre 50 % et 98 %) d'oxydes de calcium et de silice. L'analyse DRX montre que les échantillons de molasse sont principalement constitués de calcite, d'illite / mica et de quartz. La quantité de mica peut atteindre 12 à 17 % en masse (comme à 521 et 526 m/sol).

Dans le réservoir R7 et dans les Sables de Lussagnet, l'illite / mica disparaissent totalement. Le quartz devient le principal constituant au mur des Sables (au-dessous de 580 m/sol) alors que le réservoir R7 et le toit des Sables sont majoritairement carbonatés.

Minéral	Profondeur (m/sol)	Molasse					Réservoir R7_SUP		Sables de Lussagnet		
		521	524	526	541	545	562	574	580	586	610
Quartz		45	15	50	50	27	17	15	22	87	98
Illite/Mica		12	1	17	6	3	0	0	0	0	0
Kaolinite/Chlorite		3	8	7	6	3	8	8	3	4	tr
Microcline		0	1	0	2	1	0	0	0	tr	0
Albite		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Calcite		30	68	18	21	56	67	70	72	8	1.5
Pyrite		tr	0	tr	tr	1	1	tr	1	tr	tr
Non-ferroan Dolomite		7	3	8	5	6	4	1	2	0	0

Tableau 2 - Composition minéralogique des roches ("tr" indique les minéraux présents à l'état de traces)

Les proportions obtenues sont cohérentes dans la mesure où il est possible de recalculer, à partir de la composition minéralogique (Tableau 2), la composition élémentaire (Tableau 1) en aluminium, calcium, fer, silicium et soufre avec des écarts inférieurs à 5 % massique.

2.2.2. Etudes des lixiviats

En parallèle de l'analyse des roches et des phases solides, des essais de lixiviation ont été réalisés. Le protocole expérimental se résume de la façon suivante :

1. les échantillons de roche sont broyés et tamisés à 315 µm, dans le but d'accélérer les cinétiques de dissolution et ainsi diminuer la durée des essais ;
2. environ 13 g d'échantillon sont introduits dans un flacon en PEHD de 250 ml ;
3. de l'eau distillée est ajoutée pour obtenir un rapport massique eau / roche voisin de 10 (Tableau 3). L'eau n'a pas été dégazée et la phase "gaz" présente dans chaque flacon est composée d'air. Comme indiqué précédemment, ces expériences ne cherchent pas à reproduire strictement les conditions redox dans le réservoir, mais à identifier les marqueurs géochimiques facilement transférables dans la phase aqueuse ;

4. les flacons sont placés sur un plateau rotatif à 120 rpm¹, lui-même placé dans une étuve à 38°C (température moyenne de l'aquifère à LUG-74). De plus, chaque flacon est agité manuellement de manière quotidienne (sauf pendant les week-ends) ;
5. après 16 jours d'essais, une aliquote (2 mL) de solution est prélevée et filtrée (0,2 µm) pour réaliser une première analyse de sa composition chimique. Le pH et le potentiel redox sont mesurés immédiatement après le prélèvement. Les solutions sont ensuite diluées (facteur 2) et conservées à 4°C, jusqu'à quantification des principaux ions. Ca, Mg, Na et K sont quantifiés par dosage ICP/AES, alors que Cl⁻ et SO₄²⁻ sont dosés par chromatographie ionique ;
6. et au bout de 28 jours, l'essai est arrêté. Les mêmes analyses qu'à 16 jours sont réalisées (pH, redox et composition en éléments majeurs de la solution). De plus, la concentration en éléments traces est mesurée par ICP-masse pour les éléments Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Sn, Sr, Ti, V, W, Zn. Le fer et la silice sont aussi analysés avec le même protocole. Une analyse isotopique du bore est réalisée dans certaines aliquotes.

Profondeur (m)	Quantité de roche (g)	Quantité d'eau (g)	Rapport massique Eau/Roche
Blanc	0	125.4998	
521	13.727	137.2513	10.0
524	15.0118	150.8286	10.0
526	14.0122	140.1743	10.0
541	12.1357	121.4344	10.0
545	13.7966	143.0265	10.4
562	12.1188	121.2928	10.0
574	12.3026	123.2468	10.0
580	12.4529	124.4366	10.0
586	12.7421	128.6097	10.1
610	13.5295	135.3246	10.0

Tableau 3 - Quantités d'eau et de roche utilisées pour chaque essai

Les lignes blanches correspondent à des échantillons provenant de la molasse ; les lignes gris-foncé, à des échantillons provenant du réservoir R7_sup ; alors que les lignes gris-clair correspondent à des échantillons issus de l'aquifère des Sables de de Lussagnet.

2.2.3. Résultats des analyses sur les lixiviats

Le pH des échantillons est compris entre 6,9 et 8,9 (Illustration 1). Cette grandeur diminue de 9 à 7, entre 520 m et 574 m, et augmente de 7 à 8, entre 574 m et 610 m. Les valeurs de pH proches de 8 (comme dans les Sables de Lussagnet) sont cohérentes avec un équilibre calco-carbonique, contrôlé par la présence de calcite et une pCO₂ atmosphérique de l'ordre de 10^{-3,5} atm (= pression partielle de CO₂ dans l'air). Pour la molasse et le réservoir R7, le pH s'écarte de cette valeur, proche de 8, indiquant des dissolutions supplémentaires d'autres minéraux.

¹ rpm : round per minute (tour par minute)

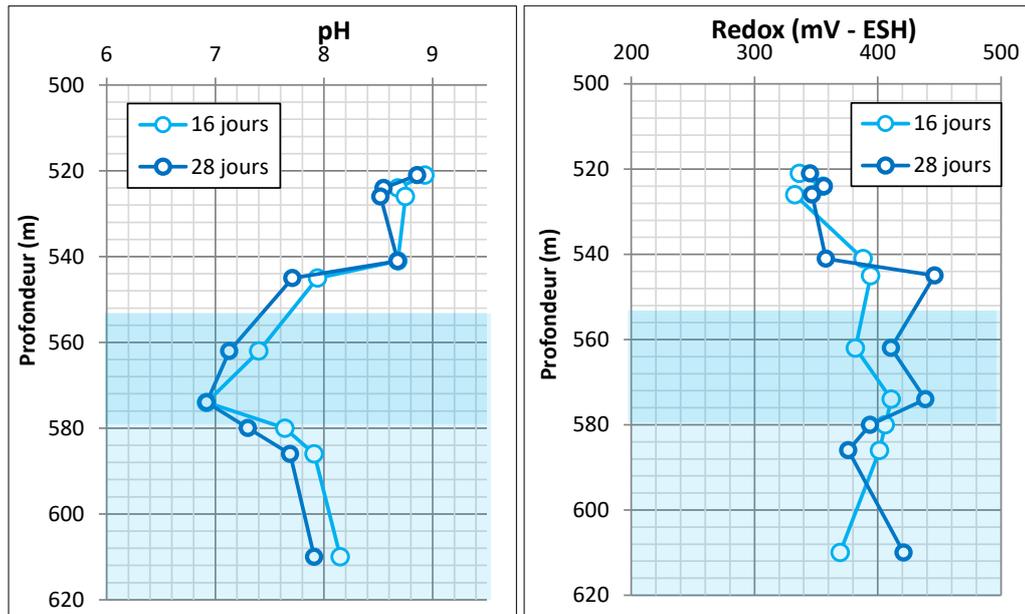


Illustration 1 - Evolution du pH et du redox, à 16 et 28 jours, en fonction de la profondeur
La zone bleue foncée correspond au réservoir R7_sup ; alors que la zone bleue claire correspond à l'aquifère des Sables de Lussagnet.

Le potentiel redox semble, quant à lui, relativement peu impacté par la profondeur des roches. De 521 m à 541 m, le redox est d'environ 350 mV - ESH. Entre 545 m et 610 m le redox augmente et varie de 376 mV - ESH à 439 mV - ESH, suivant les profondeurs. Malgré les conditions oxydantes utilisées pour ces expériences, des variations de l'ordre de 100 mV sont observées en fonction de la profondeur.

Les mesures de pH entre 16 et 28 jours sont très proches. En moyenne, l'écart est de l'ordre de grandeur de la précision de la mesure (0,2). Les mesures de redox restent également du même ordre de grandeur, aux deux dates, puisque l'écart moyen est de 12 mV.

Bien que n'étant que des indicateurs globaux de la chimie du système, ces résultats semblent indiquer une faible évolution de la composition chimique de la solution entre 16 et 28 jours. Cette affirmation est, de manière générale, confirmée par l'évolution de la concentration en calcium, chlorure, et en sodium (Illustration 2 et Annexe 1). Ces figures montrent, seulement pour certaines profondeurs, un décalage sensible dans les concentrations en magnésium, potassium et sulfate, entre 16 et 28 jours. Ces écarts, pouvant atteindre 20 % pour les sulfates, à 545 et 565 m de profondeur, sont probablement liés à des cinétiques lentes de dissolution de certains minéraux sulfatés ou de minéraux sulfurés suivies d'une oxydation.

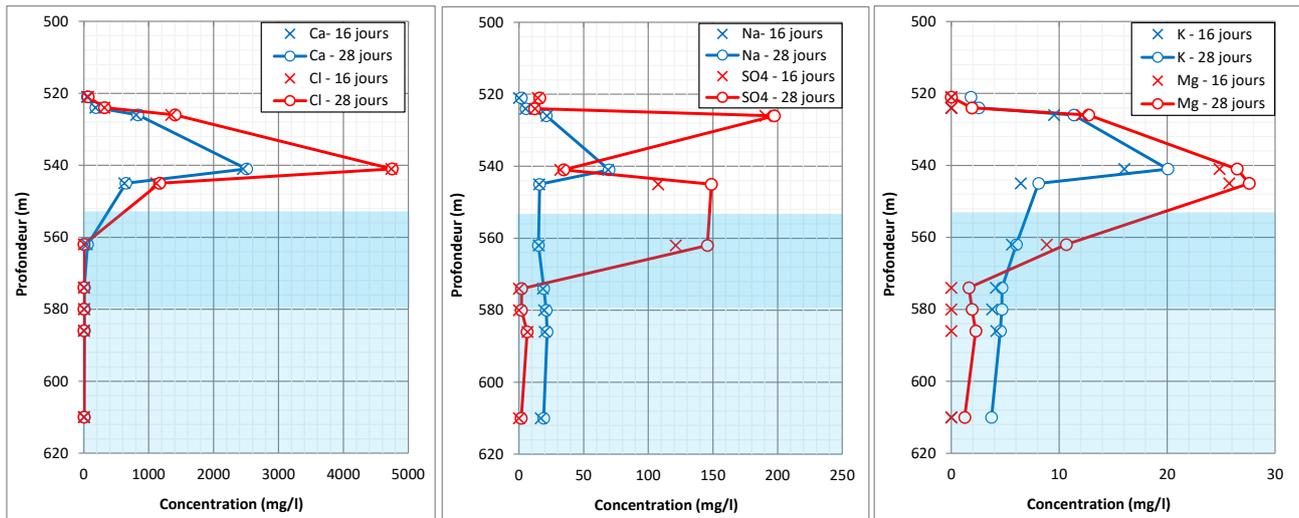


Illustration 2 - Evolution de la concentration en calcium, chlorure, sodium, sulfate, potassium et magnésium, à 16 et 28 jours, en fonction de la profondeur

La zone bleue foncée correspond au réservoir R7_sup ; alors que la zone bleue claire correspond à l'aquifère des Sables de Lussagnet. A noter, qu'une quantité importante de potassium (1,4 mg/L) a été mesurée dans la zone blanche.

A la profondeur 540 m/sol, un facteur 2 peut être remarqué entre les concentrations en calcium et en chlorure, laissant supposer une dissolution massive de CaCl_2 . Cependant, ces fortes concentrations ne semblent pas liées à la présence d'un minéral porteur de ces éléments ; il est probable que les échantillons de forage aient été mal lavés et qu'ils contiennent encore des traces des boues de forage, qui ont pu contaminer l'échantillon.

En fonction de la profondeur, les concentrations en magnésium, potassium, sodium et sulfate évoluent de manière similaire :

- entre 521 m et 541 m, les concentrations augmentent,
- entre 541 m et 574 m, les concentrations diminuent fortement, excepté pour les sulfates,
- au-delà de 574 m, les concentrations restent minimales.

Parmi les éléments traces (Illustration 3 et Annexe 1), des différences notables sont visibles. L'antimoine, le baryum, le strontium, le manganèse, le lithium, le zinc et le tungstène semblent être beaucoup plus présents dans la molasse que dans les parties aquifères. Il faut tout de même remarquer que le baryum, le manganèse et le lithium sont uniquement enrichis à la profondeur de 540 m/sol, soit la profondeur enrichie en CaCl_2 . Des analyses complémentaires seraient nécessaires pour mieux comprendre cet enrichissement très local. A l'inverse, les aquifères présentent des concentrations remarquables en fer, cuivre et titane ; éléments que l'on ne retrouve pas dans la molasse. Ces différences permettraient une discrimination entre l'aquifère et les formations géologiques supérieures.

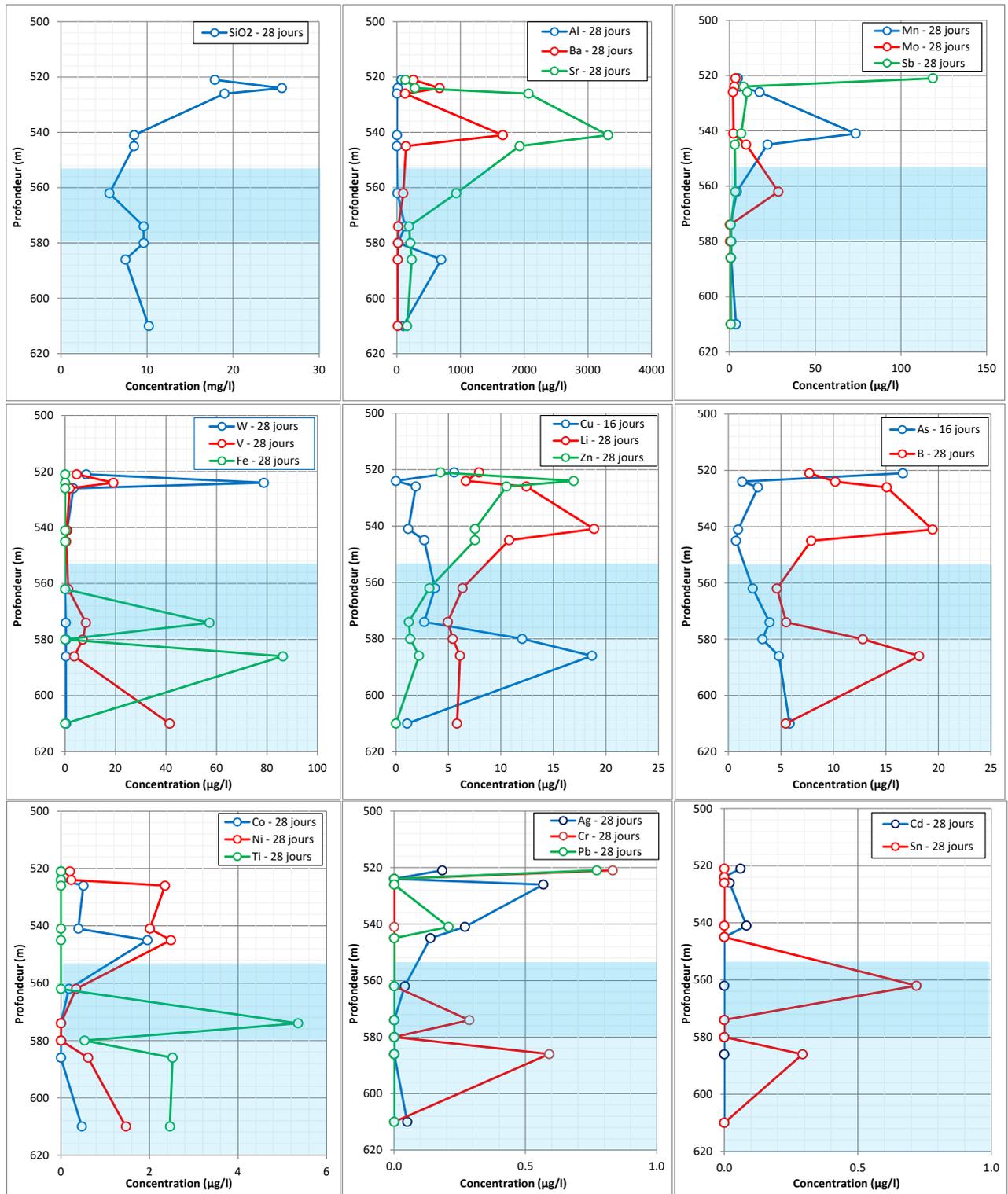


Illustration 3 - Evolution de la concentration en silicium et en traces, en fonction de la profondeur des roches

La zone bleue foncée correspond au réservoir R7_sup ; alors que la zone bleue claire correspond à l'aquifère des Sables de Lussagnet.

Le bore présente une concentration similaire dans la molasse et dans les Sables. L'analyse isotopique du bore est couramment utilisée dans la littérature comme marqueur géochimique (Négre et al., 2009). Dans le cadre de cette étude, compte tenu des variations de concentration totale en bore entre les différents horizons, des analyses complémentaires d'isotopie du bore ont été réalisées. Les valeurs obtenues (Illustration 4) mettent en évidence des résultats contrastés suivant la profondeur. En effet, le rapport isotopique est de +2,12 ‰ à 541 m et de -3,15 ‰ à 610 m. Le bore et ses isotopes semblent donc pouvoir être utilisés pour attester d'éventuels transferts de matière verticaux, entre les différents milieux. Ces données ont d'ailleurs été utilisées pour expliquer les variations isotopiques observées au forage de Nogaro 2 (André et al., 2020).

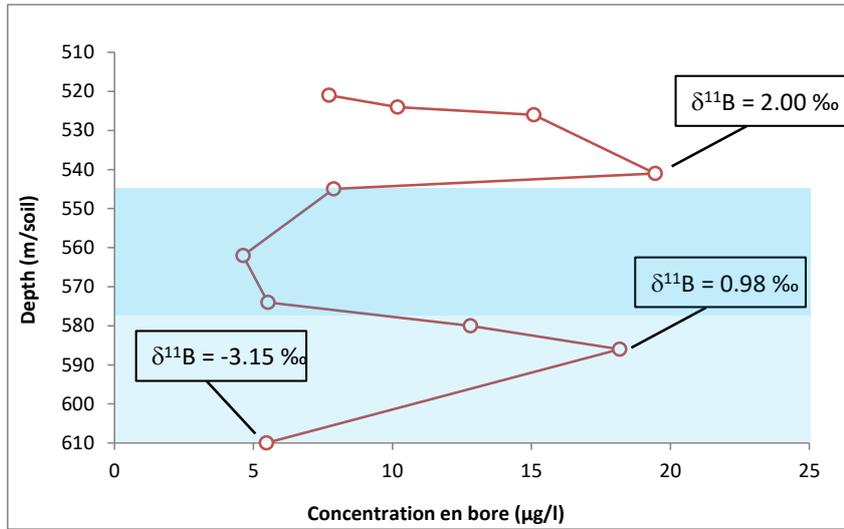


Illustration 4 - Evolution de la concentration et du rapport isotopique du bore, en fonction de la profondeur, après 28 jours d'essai
La zone bleue foncée correspond au réservoir R7_sup ; alors que la zone bleue claire correspond à l'aquifère des Sables de Lussagnet.

Profondeur (m)	$\delta^{11}\text{B}$ en ‰	$\pm 2\sigma(m)$ (‰)
541	1,91	0,19
	2,33	0,07
586	1,02	0,28
	0,93	0,07
610	-3,40	0,39
	-2,91	0,09

La valeur obtenue sur 14 déterminations du standard NBS951 durant cette période est de 4.05358 ± 0.00119 (2σ) (reproductibilité externe = ± 0.29 en ‰). Une incertitude analytique totale de ± 0.3 ‰ (2σ) est attribuée à chaque détermination individuelle de $\delta^{11}\text{B}$ dans le cadre de cette étude. La valeur moyenne à long terme obtenue sur le standard d'eau de mer IAEA-B1 est de $\delta^{11}\text{B} = 39.19 \pm 0.33$ ‰ (2σ) ($n=87$). Le rapport isotopique est donné en déviation pour mille. $\delta^{11}\text{B} = \{[(\text{Rapport } 11/10 \text{ échantillon})/(\text{Rapport } 11/10 \text{ standard})]-1\} * 1000$

Tableau 4 - Analyses isotopiques du bore réalisées dans le cadre de cette étude (chaque échantillon a été analysé deux fois)

2.3. ECHANTILLONS DE ROCHES ISSUS DU MUR DE L'AQUIFERE EOCENE

Pour ces expériences, des échantillons de roches provenant du puits LUG-101 (puits d'observation situé au sud de la bulle de stockage de Lussagnet - BSS ID : BSS002EFMX) ont été analysés. Ces échantillons ont été prélevés à des profondeurs variables : allant de 720 à 930 m/sol. Les déblais de forages et carottes proviennent d'horizons situés au-dessous de l'aquifère des Sables de Lussagnet, principalement dans les Grès à Nummulites et le Paléocène (Illustration 5).



Illustration 5 - Photographies des échantillons de roches utilisés pour les expériences de mise en solution (gauche : échantillons à l'interface Sables de Lussagnet / Grès à Nummulites ; centre : échantillons à l'interface Eocène / Paléocène ; droite : échantillons du Paléocène)

2.3.1. Analyses des phases solides

Les analyses de composition élémentaire (Tableau 5) et DRX (Tableau 6) ont été réalisées sur des déblais de forage et des carottes de roches.

Profondeur (m)	Grès à Nummulites							Paléocène				
	Oxydes	730	745.85	747.13	757.64	795.75	796.7	802.35	829.72	874.95	905.39	919.52
Na ₂ O	0	0.03	0.04	0.11	0.12	0.31	0.24	0	0.1	0.06	0.03	0.03
MgO	0.08	0.89	0.87	0.56	1.25	1.55	1.95	0.44	0.21	3.5	19.91	18.7
Al ₂ O ₃	1.81	0.42	0.8	5.38	2.76	12.19	8.01	0	0.16	3.91	0.62	0.37
SiO ₂	97.24	2.13	2.26	86.59	19.05	67.96	54.29	0.43	31.75	6.48	2.07	1.67
P ₂ O ₅	0.02	0.06	0.08	0.05	0.07	0.06	0.11	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
SO ₃	0.03	0.1	0.17	0.07	0.39	0.91	0.74	0.11	1.15	0.65	0.2	0.18
K ₂ O	1.13	0.03	0.03	1.93	1.17	3.06	2.43	0	0	0.08	0	0
CaO	0.15	49.37	47.23	1.34	40.49	4.91	14.11	55.78	37.93	44.05	31.73	32.4
TiO ₂	0.05	0.02	0.04	0.55	0.17	0.84	0.55	0.01	0.02	0.13	0.03	0.03
MnO	0	0.06	0.1	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0	0	0	0
Fe ₂ O ₃	0.22	4.24	6.97	3.31	3.68	3.3	4.89	0	0.62	0.75	0.13	0
BaO	0.02	0	0	0.03	0.01	0.05	0.03	0	0	0.01	0	0
SrO	0	0.08	0.06	0	0.04	0.03	0.04	0.02	0.02	0.11	0.02	0.02
ZrO ₂	0	0	0	0.07	0	0.07	0.05	0	0	0	0	0
LOI*	0.5	41.3	40.1	1.5	32.2	6.2	13.1	43.2	28.8	39.6	45.6	46.8

* LOI = Perte au feu

Tableau 5 - Composition élémentaire des roches exprimées en pourcentage massique d'oxyde (document TERECA)

Les analyses montrent que les Grès à Nummulites sont principalement constitués de silice (sous forme de quartz) et de carbonates (sous forme de calcite). Selon la profondeur, la présence de smectite, de kaolinite et de micas est aussi observable. Dans le Paléocène, la proportion en silice décroît fortement, laissant la place à des horizons essentiellement dolomitiques.

Depth	Albite	Microcline	Quartz	Calcite	Dolomite	Siderite	Apatite	Pyrite	Barytine	Anatase	Goethite	Zircon	greenalite	Kaolinite	Chlorite C	Muscovite	Illite	Smectite	Biotite	Unknown mineral	Clays & micas	I.O.M	Insoluble residu	Hydrogen index
	(Mass %)																							
730.00	0.0	6.5	91.1	0.5	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.1	0.0	1.5	0.0	99.0	0.005
745.85	0.0	0.0	3.0	91.1	0.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	3.5	0.0	0.0	0.2	0.0	0.3	1.0	0.5	0.0	0.0	2.0	0.0	4.4	0.013
747.13	0.0	0.0	4.4	86.0	0.3	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	6.5	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.0	2.5	0.1	6.6	0.023
757.64	0.0	8.0	78.9	0.9	0.0	0.0	0.1	0.2	0.1	0.6	0.0	0.1	0.0	5.0	0.0	6.0	0.1	0.0	0.0	0.0	11.1	0.1	96.5	0.027
795.75	0.1	1.0	12.8	70.0	0.2	0.0	0.2	0.3	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	1.4	4.0	6.8	2.0	0.0	13.2	0.1	29.0	0.022
796.70	0.0	5.8	45.6	8.0	0.0	0.1	0.1	0.6	0.1	0.8	0.2	0.1	0.0	11.0	0.0	14.4	0.0	13.0	0.0	0.0	38.4	0.1	90.5	0.076
802.35	0.0	3.3	38.9	25.8	0.0	0.0	0.2	0.4	0.0	0.5	0.1	0.1	0.0	3.0	0.0	9.4	0.0	18.0	0.0	0.0	30.4	0.1	74.2	0.046
829.72	0.0	0.0	0.4	99.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.000
874.95	0.0	0.0	29.9	68.0	0.3	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.1	0.5	0.1	0.0	0.0	1.2	0.0	32.4	0.003
905.39	0.4	0.5	3.0	71.7	15.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	5.7	0.0	0.0	2.5	0.1	0.0	0.0	8.3	0.2	14.1	0.027
919.52	0.2	0.0	0.0	0.6	95.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.2	1.4	0.7	0.0	0.0	3.3	0.0	3.2	0.007
922.46	0.1	0.0	0.5	3.0	92.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.1	2.0	0.5	0.0	0.0	3.6	0.0	2.0	0.007

Tableau 6 - Composition minéralogique totale des roches exprimées en pourcentage massique (document TEREQA)

2.3.2. Etude des lixiviats

Le même protocole que celui présenté précédemment (§ 2.2.2) a été appliqué à 12 échantillons de roche, issus du forage de LUG-101. Seule la durée totale de la lixiviation a varié : 30 jours, au lieu de 28 dans le cas précédent. Les quantités de roche et d'eau ayant été utilisées pour les expériences sont présentées dans le Tableau 7.

Profondeur (m)	Quantité de roche (g)	Quantité d'eau (g)	Rapport massique Eau/Roche
730	12.4834	124.1597	9.9460
742.5	10.3659	105.6001	10.1873
757	10.7470	107.1181	9.9673
780	11.3470	114.2986	10.0730
782	11.0867	110.8270	9.9964
797	10.4400	104.3973	9.9997
830	11.2184	114.3287	10.1912
856	10.6409	109.7173	10.3109
875	10.5704	109.5921	10.3678
905	11.6011	115.7893	9.9809
920	11.4338	114.4728	10.0118
922	12.2991	112.2780	9.1290

Tableau 7 - Quantités d'eau et de roche, utilisées pour chaque essai, dans les échantillons issus du mur de l'aquifère

2.3.3. Résultats des analyses sur les lixiviats

Les mesures de pH entre 14 et 30 jours sont très proches. En moyenne, l'écart est de l'ordre de 0,5 unité pH. Les mesures de redox restent également du même ordre de grandeur, entre les deux dates de mesure. L'écart moyen est de 14 mV, ce qui reste dans la gamme de précision de la méthode. Enfin, pour ce qui est de la conductivité électrique, les variations moyennes sont de l'ordre de 10-20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et n'excèdent pas 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pour les eaux les plus minéralisées. Ces paramètres physico-chimiques indiquent de faibles variations entre les deux analyses et laissent supposer qu'un état d'équilibre chimique a été atteint.

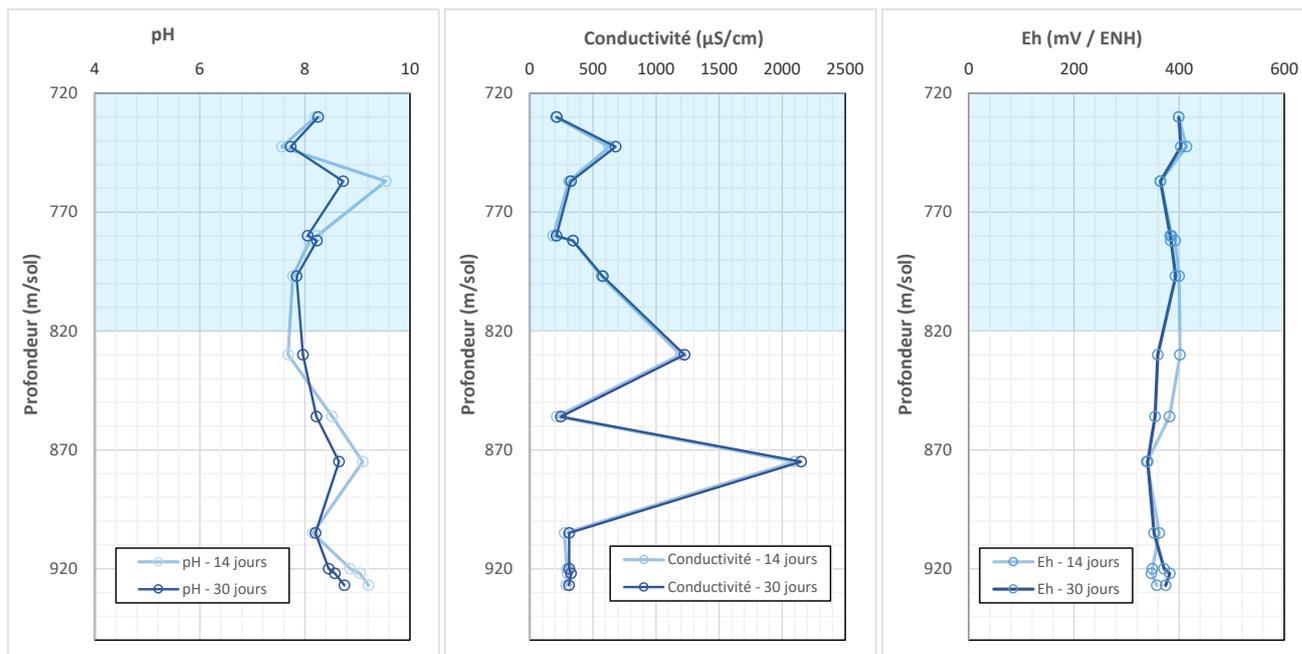


Illustration 6 - Evolution du pH (gauche), de la conductivité (centre) et du potentiel redox (droite), à 14 et 30 jours, en fonction de la profondeur
Les zones bleues correspondent au réservoir des Grès à Nummulites.

L'évolution de la concentration en éléments majeurs (calcium, chlorure, magnésium, potassium, sodium et sulfate), entre 14 et 30 jours, est minime, ce qui semble confirmer les données de conductivité, pH et Eh (potentiel redox) et qu'un état stationnaire a été atteint (Illustration 6 et Annexe 1). Cette figure montre que les eaux sont faiblement minéralisées, même si certains échantillons semblent contenir de plus fortes concentrations en sels (comme l'échantillon à 875 m qui présente des concentrations plus fortes en sodium et sulfates).

On peut également remarquer un fort enrichissement en CaSO_4 au mur des Grès à Nummulites (830 m/sol). En effet, des concentrations de l'ordre de 144 mg/L en Ca (soit 3,6 mmol/L) et 540 mg/L en sulfate (soit 5,6 mmol/L) sont observées, ce qui pourrait indiquer des interactions avec des phases minérales sulfatées, non identifiées dans les échantillons solides (Illustration 7). Enfin, dans le Paléocène (à une profondeur, d'environ 875 m/sol), on peut observer un fort enrichissement en sodium et sulfate. Cette forte minéralisation est d'ailleurs visible sur la courbe de conductivité (Illustration 6).

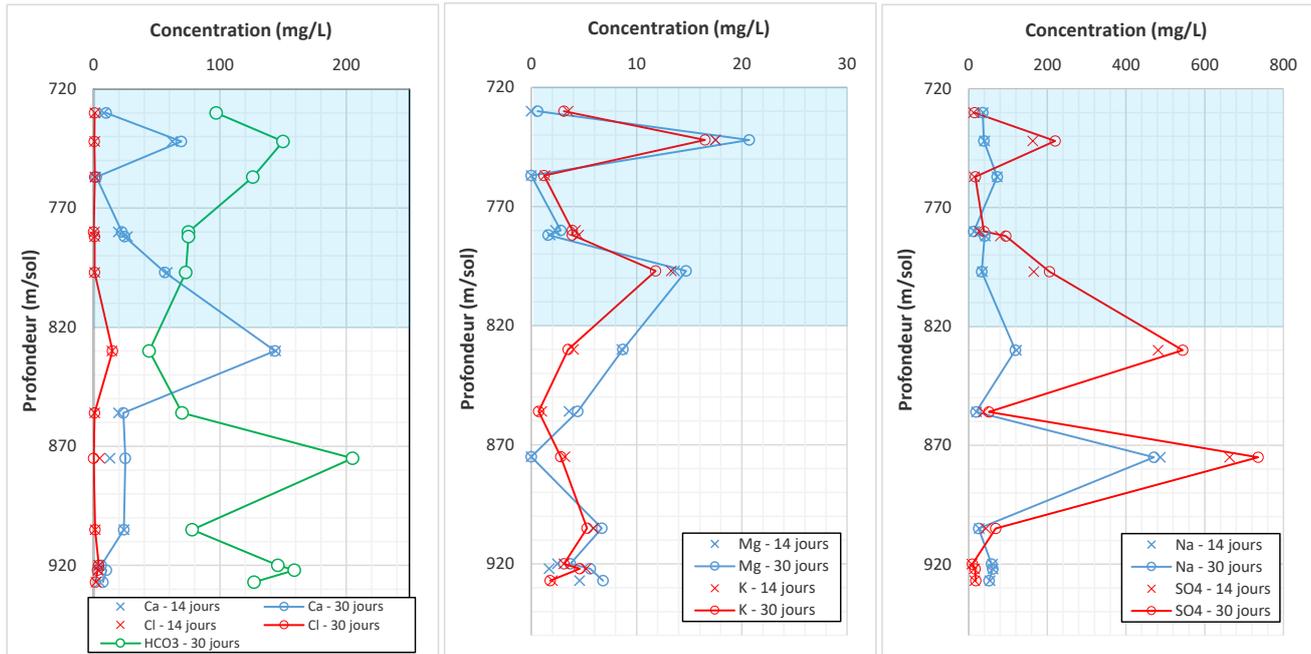


Illustration 7 - Evolution de la concentration en calcium et chlorure (gauche), potassium et magnésium (centre), sodium et sulfate (droite), à 14 et 30 jours, en fonction de la profondeur
Les zones bleues correspondent au réservoir des Grès à Nummulites.

Pour ce qui est des traces (Illustration 8 et Annexe 1), les analyses révèlent des variations plus fortes que celles observées dans les échantillons au toit des Sables de Lussagnet. On notera notamment des concentrations élevées en V, Sb, Mo, Cu, W, As, B, Ni, Cr, Ti, dans l'échantillon à 875 m/sol, qui coïncident également avec les teneurs élevées en sodium et sulfate. Cet échantillon semble très particulier. Des analyses complémentaires seraient nécessaires pour déterminer la source de ces éléments, car les analyses de la phase solide indiquent uniquement la présence de calcite et de quartz (> 98 % en masse). Une pollution de l'échantillon par les boues de forage n'est pas à exclure. L'illustration 8 indique également que les Grès à Nummulites semblent contenir de fortes concentrations en strontium, alors que les Sables de Lussagnet semblent en être exempts. Cet élément pourrait ainsi représenter un marqueur des eaux des Grès à Nummulites. Une caractérisation de l'isotopie du strontium permettrait de mieux signer l'origine de cet élément. Excepté l'échantillon à 875 m/sol, on remarquera enfin un enrichissement notable en lithium et en fluor, dans le Paléocène, au-delà de 900 m/sol de profondeur (probablement en lien avec l'augmentation des dolomies calcaires). Là encore, le lithium et le fluor pourraient représenter des indicateurs des potentiels échanges avec les horizons sous-jacents.

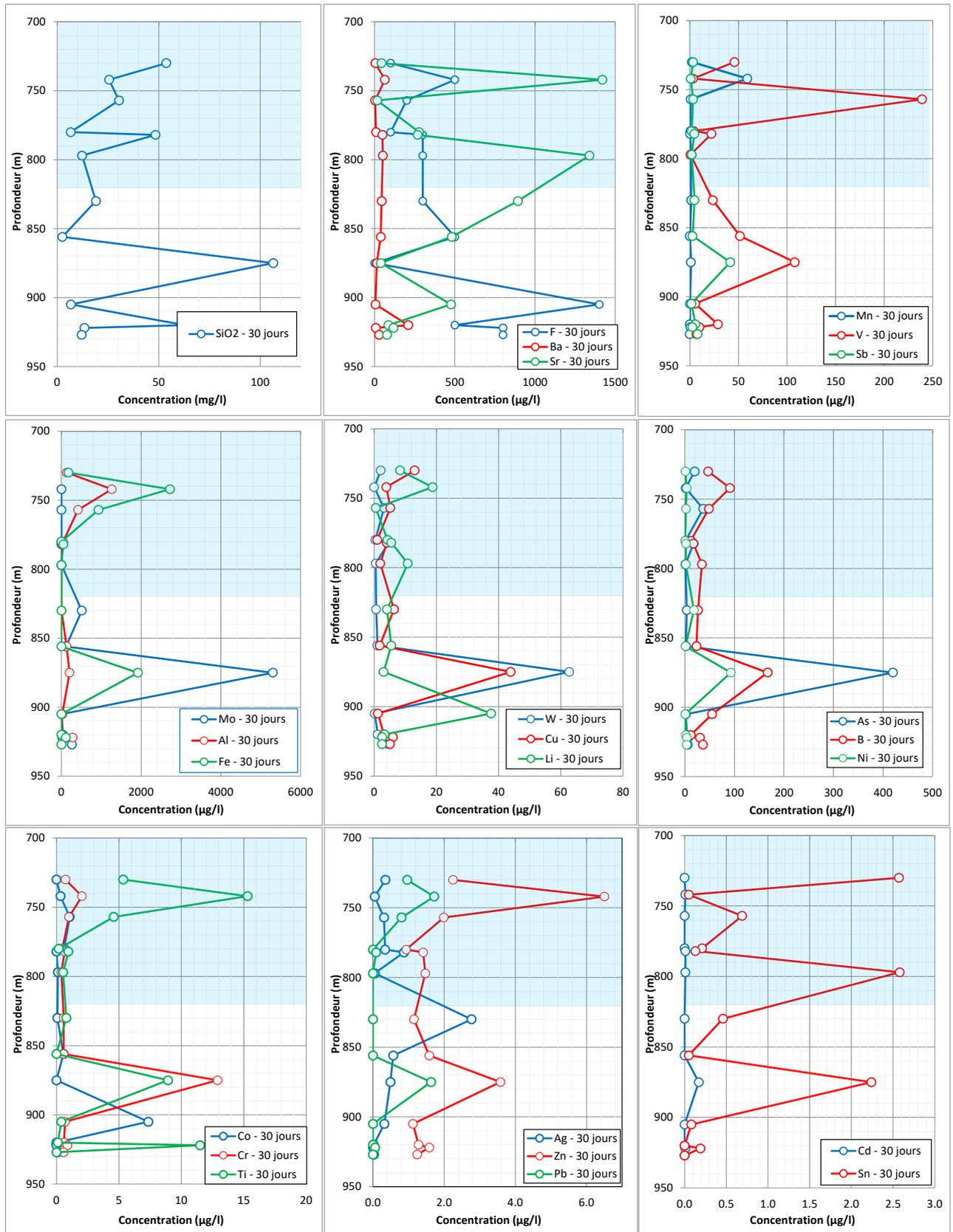


Illustration 8 - Evolution de la concentration en silicium et en éléments traces, en fonction de la profondeur des roches
Les zones bleues correspondent au réservoir des Grès à Nummulites.

2.4. SYNTHÈSE DES RESULTATS

Des essais de lixiviation ont été réalisés sur des roches provenant à la fois des zones aquifères (Sables de Lussagnet et Grès à Nummulites), mais aussi des horizons sus-jacents (molasse) et sous-jacents (Paléocène). Le but était de mettre en évidence la présence de marqueurs géochimiques dans ces roches, permettant d'attester d'éventuels transferts verticaux entre ces différents niveaux.

L'analyse des lixiviats, issus de la molasse, a mis en avant des différences de composition entre les couches géologiques supérieures et l'aquifère qui pourraient être exploitées. Les éléments qui semblent les plus prometteurs comme traceurs sont l'antimoine, le baryum, le lithium, le bore, le magnésium et le tungstène. L'isotopie du bore pourrait également représenter un traceur intéressant compte tenu des écarts mesurés, avec des valeurs passant de 2,12 ‰ à -3,15 ‰ entre 540 m et 610 m.

Pour ce qui est des horizons et réservoirs sous-jacents, on note des différences entre les Grès à Nummulites et le Paléocène. Ainsi, les Grès à Nummulites montrent des teneurs plus fortes en strontium, alors que le Paléocène pourrait être caractérisé par des teneurs plus fortes en lithium et en fluor (Tableau 8).

Couche	Eléments majeurs	Traces
Molasse	Mg, K, SO₄ (Ca, Cl ?)	Ba, W, Sb, Li, As, B (+ isotope) (Sr, Mn, Li ?)
R7_Sup	SO₄	Fe, Sn, Ti
Sables de Lussagnet	/	Fe, Cu, B (+ isotope)
Grès à Nummulites	Mg, K, SO₄	Sr, Fe, Ti, Zn, V
Paléocène	Na, HCO₃, Ca, SO₄	Li, F (V, Sb, Mo, Cu, W, As, B ?)

Tableau 8 - Rappel des éléments majeurs et traces, analysés dans les expériences de lixiviation (en gras, éléments d'intérêt qui pourraient être utilisés comme traceurs des transferts entre horizons géologiques)

Le baryum est présent dans les échantillons solides de molasse, de Sables de Lussagnet et semble absent des Grès à Nummulites et du Paléocène. Dans les expériences menées, des concentrations de l'ordre de 1 500 µg.L⁻¹ ont été mesurées dans les lixiviats de la molasse, ce qui correspond à une eau à l'équilibre thermodynamique avec la barytine. En revanche, dans les échantillons des Sables de Lussagnet, les concentrations en baryum sont bien plus faibles, comprises entre 13 et 22 µg.L⁻¹ (Illustration 3 et Annexe 1). Pour ces derniers échantillons, la concentration en baryum ne semble pas être contrôlée par la barytine. Ce gradient de concentration entre la molasse et les Sables de Lussagnet nous indique que de possibles transferts de baryum, depuis le toit du réservoir (de la molasse) vers les Sables, sont envisageables, notamment par des processus de diffusion.

Pour ce qui est de l'antimoine, les analyses ne révèlent que très rarement la présence de cet élément dans les eaux des Sables. Sa concentration est très souvent inférieure aux limites de détection. Le tungstène n'est que très rarement mesuré. Pour le lithium, les concentrations dans les Sables de Lussagnet et dans les Grès à Nummulites sont relativement faibles mais, on retrouve des concentrations plus fortes au toit (dans la molasse) et au mur (dans le Paléocène), qui pourraient expliquer localement des enrichissements par transferts verticaux (les concentrations dans les eaux des Sables sont habituellement comprises entre 10 et 20 µg.L⁻¹).

Des analyses isotopiques complémentaires permettraient de mieux identifier la source exacte du lithium présent dans les eaux de l'aquifère. Enfin, le bore semble être un élément important dans la compréhension des processus de transfert, notamment en raison des écarts mesurés sur son isotope principal, le ^{11}B .

Cette étude confirme que les Sables de Lussagnet et les Grès à Nummulites sont des horizons renfermant très peu d'espèces solubles, rendant les eaux au contact de ces roches relativement peu minéralisées. L'enrichissement en certains éléments provient très probablement des horizons adjacents, par transferts verticaux. Ces transferts seront facilités par les conditions locales, notamment les contacts entre formations.

Toutefois, cette étude ne porte que sur deux forages relativement proches l'un de l'autre. Elle donne donc une vision assez précise des potentiels marqueurs spécifiques à chaque horizon, dans ce secteur de l'aquifère. Des études plus larges, à l'échelle du bassin, seraient nécessaires pour confirmer ces premiers résultats.

3. Etablissement de cartes piézométriques mensuelles

Les cartes piézométriques mensuelles, établies entre septembre 2017 et avril 2018, ont pour objectif de rendre compte de la propagation, au sein de l'aquifère, de la pression issue des cycles de stockage et de déstockage du gaz à Lussagnet et Izaute. Dans la continuité des travaux précédents (André et *al.*, 2019), les ouvrages retenus et les mesures pertinentes pour l'élaboration des cartes sont présentés, puis la méthodologie retenue est expliquée. Les 8 cartes piézométriques réalisées offrent une vision inédite de l'impact des stockages de gaz.

3.1. ANALYSE DES OUVRAGES

Les travaux précédents (André et *al.*, 2019) avaient permis la collecte et l'acquisition de mesures mensuelles pour 96 ouvrages. Des éléments, tels que l'aquifère réellement capté ou les influences entre ouvrages, manquaient alors pour valider la pertinence des mesures à retenir pour élaborer les cartes. L'analyse, portée sur les ouvrages et leurs piézométries mensuelles, est présentée ci-dessous.

3.1.1. Secteur de Geaune

L'ensemble des ouvrages capte les Sables de Lussagnet. Les piézométries sont globalement cohérentes entre elles. À noter que seul l'ouvrage de Geaune 5 (09788X0069/F5) est artésien de septembre à février, sans possibilité d'avoir d'équivalence en piézométrie absolue, en raison d'un manomètre inutilisable sur site (la cote de l'artésianisme mesurée à +99,19 m NGF est cohérente avec les ouvrages alentours). Trois ouvrages localisés à proximité (Geaune 2 - 09788X0004/F2, Geaune 3 - 09788X0011/F3 et Geaune 4 - 09795X0219/F4) montrent des piézométries proches, avec des comportements semblables. Dans le détail cependant, des incohérences peuvent apparaître avec des gradients hydrauliques qui s'inversent au cours du temps puis, à Geaune 4, une piézométrie qui se démarque à partir de janvier. Ces comportements sont le résultat d'interférences du fait de pompages dans les forages à proximité. A partir de janvier, il a été difficile de pouvoir mesurer des niveaux de nappes « stabilisés », du fait de la difficulté des exploitants à arrêter les pompages pour une longue durée.

Pour l'élaboration des cartes piézométriques, l'objectif étant d'avoir une carte piézométrique à l'échelle régionale, seule la piézométrie de Geaune 2 a donc été conservée (les piézométries de Geaune 3, Geaune 4 et Geaune 5 seront écartées).

INDICE_BSS	Désignation	Septembre	Octobre	Novembre	Decembre	Janvier	Fevrier	Mars	Avril-Mai
09788X0015	BATS URGON - MOULIN DES PERES à GEAUNE	108.23	110.96	112.75	110.78	106.57	100.76	91.93	Denoyage capteur Z= 90 mNGF
09784X0010	LE BRAC à CASTELNAU-TURSAN	106.78	110.59	111.35	109.48	106.02	100.62	92.27	83.16
09795X0219	MARCUSSE / GEAUNE 4 à SORBETS	106.73	109.21	110.69	107.94	97.41	87.51	78.93	80.96
09788X0011	DUBASQUE / GEAUNE 3 à PÉCORADE	107.29	109.15	111.56	109.12	105.08	99.11	89.35	n.m.
09788X0014	PECORADE 101 à GEAUNE	106.05	108.73	110.34	108.35	104.10	98.27	n.m.	n.m.
09788X0004	LARRIOUCLA / GEAUNE 2 à PÉCORADE	106.18	108.56	111.21	107.93	103.95	98.13	89.19	78.73
09788X0069	GEAUNE 5 à GEAUNE	ARTESIEN Z= 99.192 mNGF						88.45	79.72

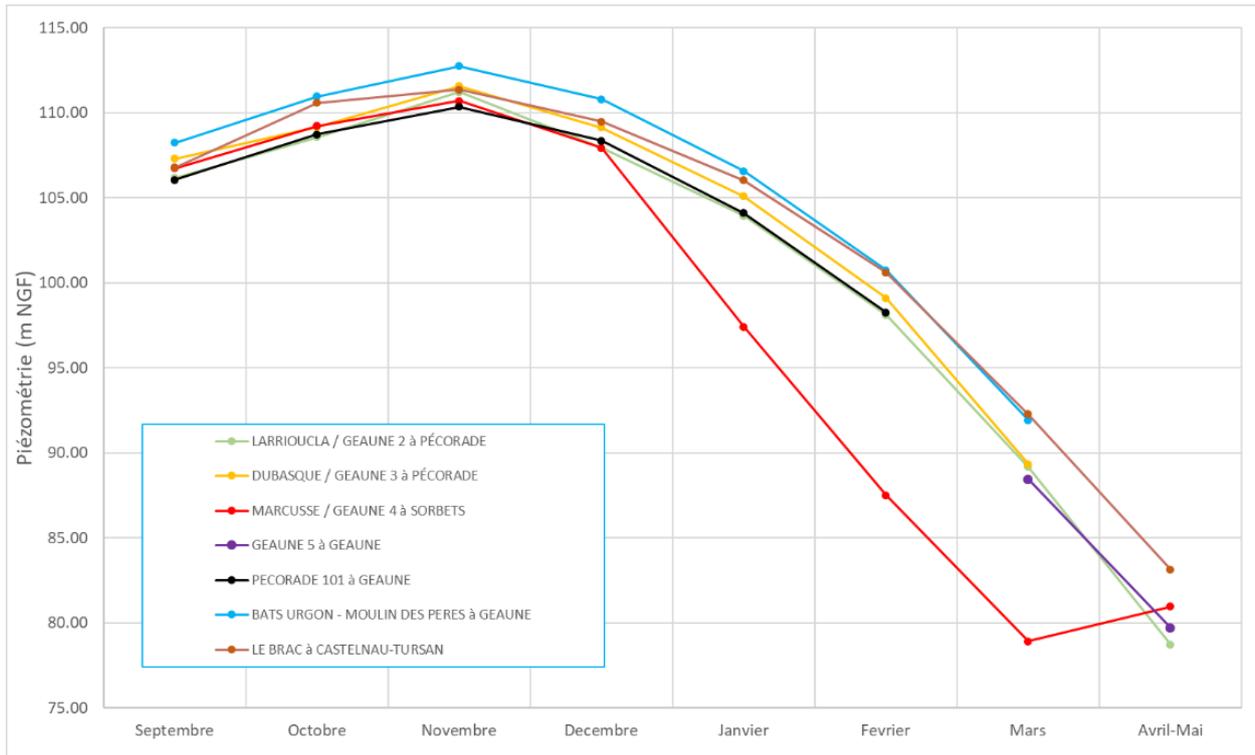


Illustration 9 - Piézométries du secteur de Geaune (entre septembre 2017 et avril-mai 2018)

3.1.2. Secteur d'Eugénie-les-Bains

Les forages de Chicoy, Moulin de Bougnères et Christine-Marie présentent une piézométrie différente des autres ouvrages, en valeur absolue et en variation. Ces trois ouvrages, ne captant finalement pas les Sables Infra-Molassiques, ont été écartés pour l'élaboration des cartes piézométriques.

Concernant la station des Thermes d'Eugénie, le forage ELB02 (09784X0031/ELB02) capte la nappe des Sables Infra-Molassiques et plus particulièrement la formation des Grès à Nummulites. Les autres forages (09784X0024/EF1, 09784X0025/EF2 et 09784X0036/ALIENO) ne montrent pas explicitement les mêmes niveaux captés, en raison des incertitudes portant sur les coupes géologiques. Toutefois, il apparaît que ces mesures sont globalement cohérentes avec le forage ELB02.

En raison des incertitudes portant sur sa mesure et de sa proximité avec le forage EF2, le forage EF1 est écarté des cartes piézométriques mensuelles.

INDICE_BSS	Désignation	Septembre	Octobre	Novembre	Decembre	Janvier	Fevrier	Mars	Avril-Mai
09784X0031	ELB02	102.21	105.42	105.96	106.94	104.61	98.65	88.51	79.25
09784X0029	CHICOY	65.77	66.12	66.19	66.33	67.00	67.30	67.33	67.62
09784X0020	MOULIN DE BOUGNÈRES	65.93	66.27	66.34	66.48	67.30	67.56	67.55	67.89
09784X0036	FORAGE AQUA ALIENOR	103.30	106.40	108.00	109.00	105.50	99.20	88.00	76.80
09784X0024	ETABLISSEMENT THERMAL (EF1)	<i>incertitude</i>	102.20	104.20	105.10	<i>n.m.</i>	105.50	98.90	91.90
09784X0025	ETABLISSEMENT THERMAL (EF2)	98.04	99.54	100.64	101.24	<i>n.m.</i>	101.74	97.04	91.90
09784X0018	CHRISTINE-MARIE	65.36	65.86	65.86	<i>n.m.</i>	<i>n.m.</i>	<i>n.m.</i>	66.45	66.62

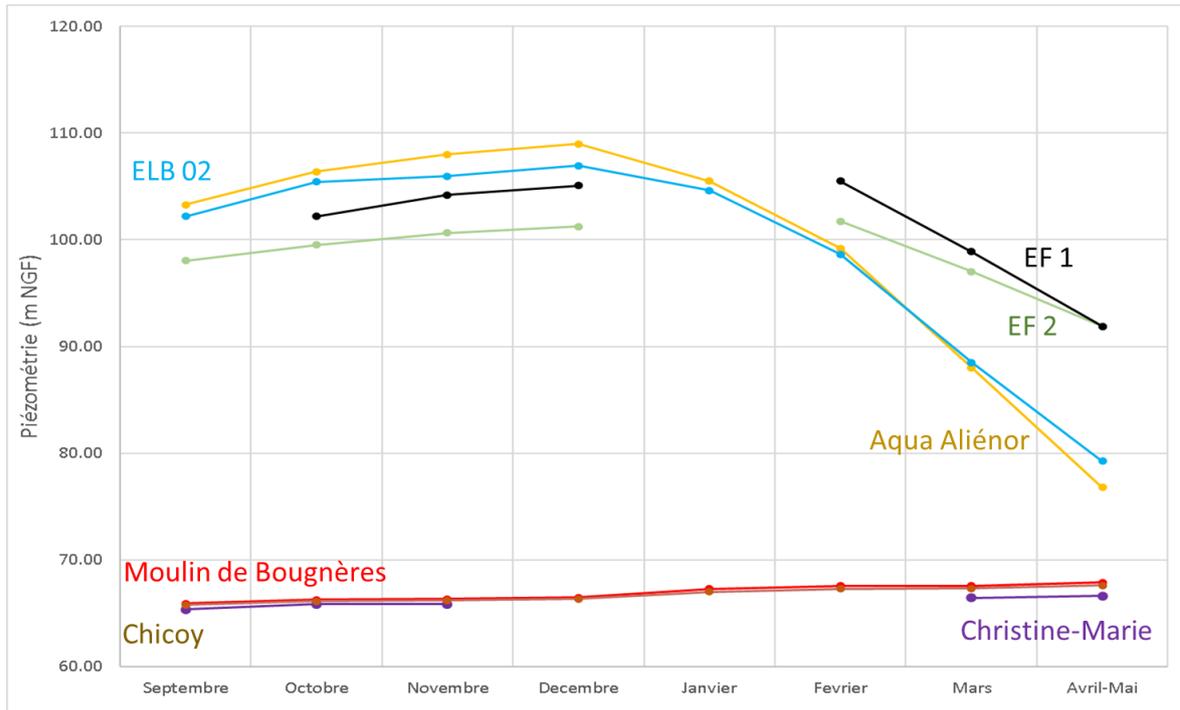


Illustration 10 - Piézométries du secteur d'Eugénie-les-Bains (entre septembre 2017 et avril-mai 2018)

3.1.3. Secteur de Castéra-Verduzan

Dans ce secteur, le forage CV1 de l'établissement thermal (09545X0019/F) n'a pas de positionnement des crépines connu. L'ouvrage se localise dans les molasses : il capterait des calcaires intra-molassiques. Toutefois, au regard des piézométries avec les ouvrages du même secteur (forage AEP 2 - 09545X0017/F et Le Masca - 09546X0022/F), connus pour capter les Sables de Lussagnet, les gradients hydrauliques mensuels du forage CV1 paraissent cohérents et les variations de charges ne montrent pas de déconnexion entre les ouvrages. Ainsi, pour l'établissement des cartes piézométrique les données du forage CV1 de l'établissement thermal (09545X0019/F) seront utilisées. Toutefois, les mesures réalisées dans le forage Le Masca et le forage AEP restent toutefois privilégiés en terme de représentativité.

INDICE_BSS	Désignation	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril-Mai
09546X0022	LE MASCA à JEGUN	121.28	121.13	120.96	121.00	121.88	122.64	123.07	123.45
09545X0017	FORAGE AEP N. 2 -F2 à CASTERA-VERDUZAN	112.48	112.98	112.88	112.77	112.52	112.64	112.56	112.45
09545X0019	ETABLISSEMENT THERMAL -CV1 à CASTERA-VERDUZAN	105.11	104.92	104.90	104.90	105.55	106.65	106.68	106.65

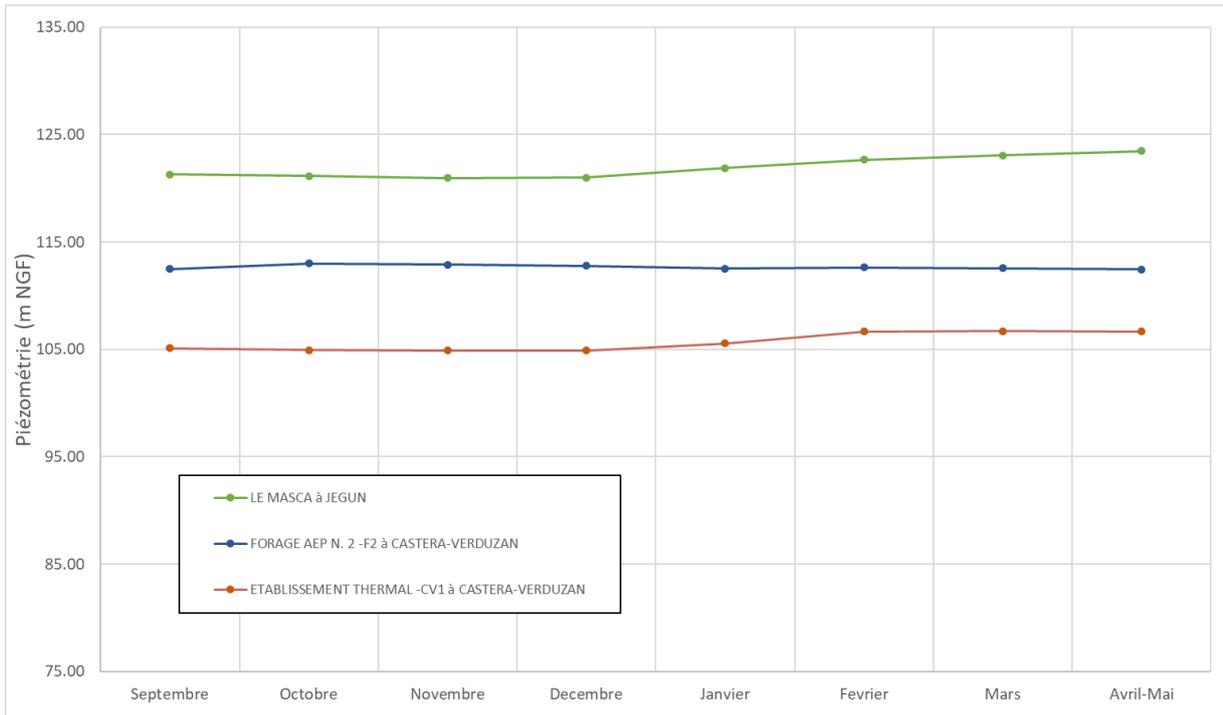


Illustration 11 - Piézométries du secteur de Castéra-Verduzan (entre septembre 2017 et avril-mai 2018)

3.1.4. Secteur de Barbotan

Ce secteur montre un comportement hydrogéologique complexe. L'aquifère est ici compartimenté entre un domaine nord et un domaine sud, de part et d'autre d'une faille, qui limite les communications hydrauliques. Une description synthétique géologique, issue d'une synthèse bibliographique de ce secteur, est proposée dans le rapport relatif aux exutoires et réalisé dans le cadre du projet GAIA (Douez et *al.*, 2019). Cette structure se présente comme un anticlinal faillé (Illustration 12), dont le flanc nord est affecté par un pendage faible et cloisonné par un ensemble de failles inverses, dont les rejets sont peu importants (Beicip, 1987).

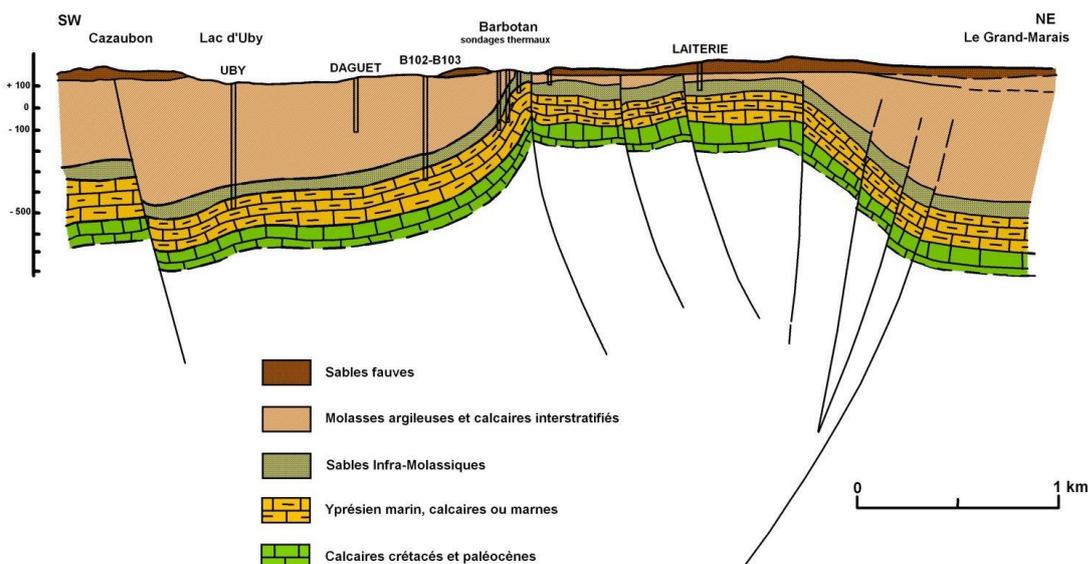


Illustration 12 - Coupe géologique schématique de la structure de Barbotan (Douez, 2007 ; d'après Platel, 1990 et Guillemain et Krause, 2000)

Trois sous-réservoirs sont identifiés (R1, R2 et R3). Les deux derniers correspondent aux Sables Infra-Molassiques (Sables de Lussagnet et Grès à Nummulites) (Illustration 13). Au nord de la faille, le forage de Laiterie ne présente pas de variation piézométrique et garde un niveau assez stable dans le temps ; ce constat met en avant le rôle de barrière hydraulique de la structure de Barbotan, entre les compartiments nord et sud. Il est par ailleurs noté une très faible influence des stockages de gaz dans les forages F4 et F5, situés juste au nord de cette faille (Labat 1998).

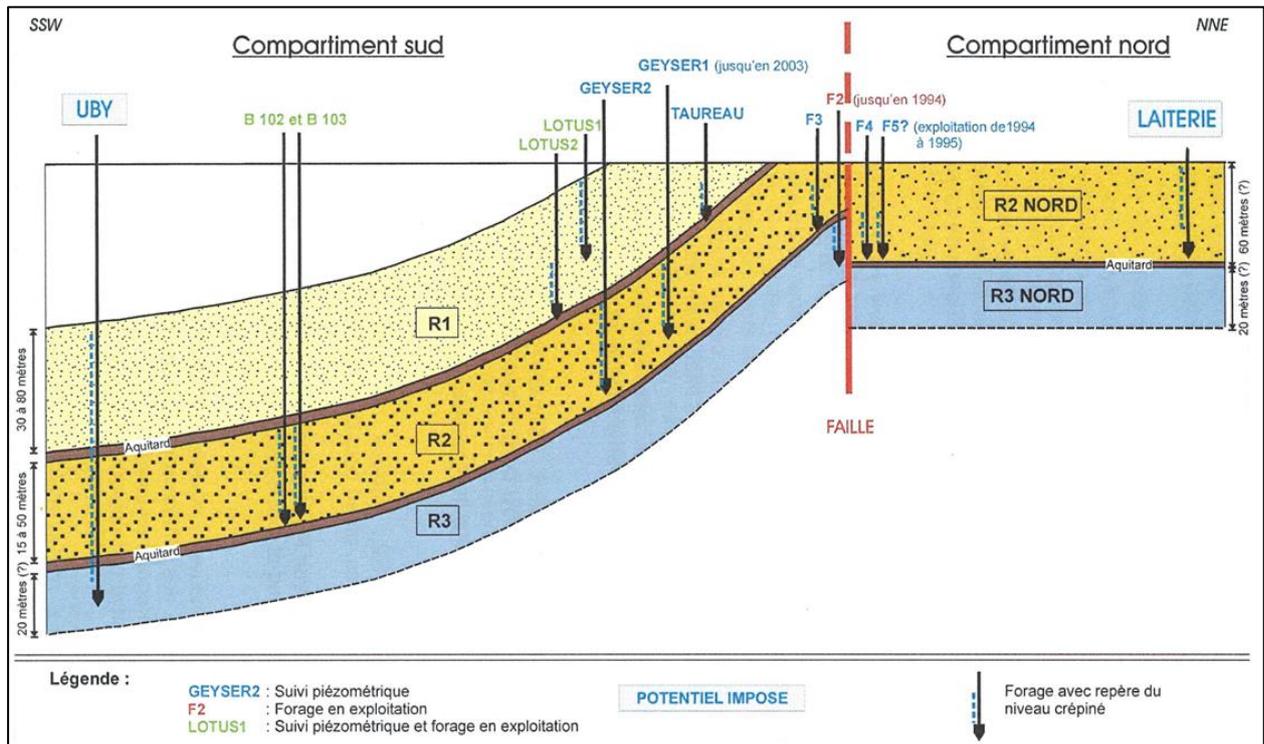


Illustration 13 - Schéma du modèle conceptuel hydrogéologique de Barbotan (AquilaConseil, 2001)

Sur le site des thermes, les besoins en eaux froides de la station sont couverts par l'exploitation du compartiment supérieur de l'aquifère, au travers des forages de Lotus 1 (09268X0062/F) et de Lotus 2 (09268X0063/F). Ces deux derniers forages sont utilisés en fonction des demandes pour la station thermale. S'influençant l'un l'autre, il est difficile d'observer un niveau statique non influencé. La Chaîne Thermale du Soleil a indiqué utiliser le forage de Taureau (09268X0035/F) afin d'observer les variations piézométriques de ce sous-réservoir (communication personnelle, 07/2018). Ce dernier forage non exploité est très peu influencé par les forages Lotus et montre de ce fait les montées et baisses de pression dans le réservoir en lien avec le stockage de gaz. Il est donc décidé de garder les mesures piézométriques de ce forage pour réaliser les cartes piézométriques mensuelles.

Au regard du contexte spécifique hydrogéologique de ce secteur, différents points ont été analysés plus en détail :

- Uby présente une piézométrie plus élevée que les autres ouvrages et une amplitude de variation ayant atteint 60 m quand, dans les autres ouvrages, ces amplitudes sont inférieures à 12 m (Illustration 14). Labat (1998) présentait dans sa thèse cette inversion de régimes hydrodynamiques de la façon suivante : « une période pendant laquelle le niveau piézométrique à Uby est supérieur au niveau piézométrique à Barbotan : cette situation qui correspondrait à l'écoulement "normal" ou "naturel" dans ce secteur, dure en moyenne 8 à 9 mois/an (de mai à janvier) ; une période pendant laquelle le niveau piézométrique à Uby est

inférieur au niveau piézométrique à Barbotan : c'est un régime d'inversion des potentiels dû au déstockage sur le site d'Izaute qui dure 3 à 4 mois/an (de février à mai) ».

- Le forage de l'Uby est connu pour capter les trois sous-réservoirs. Il sera conservé pour l'élaboration des cartes piézométriques.
- Les forages B102 et B103 montrent les mêmes comportements en variations et amplitudes (Illustration 14). Ils présentent cependant des différences piézométriques de l'ordre d'1,65 m. À l'échelle de la carte piézométrique qui sera élaborée, seul l'ouvrage B102 sera conservé.
- Un peu plus au nord, les forages Geyser 2, Taureau, F2 et F3 sont présents. Au regard de la qualité des données, seuls Taureau et F2 sont conservés (Illustration 14).

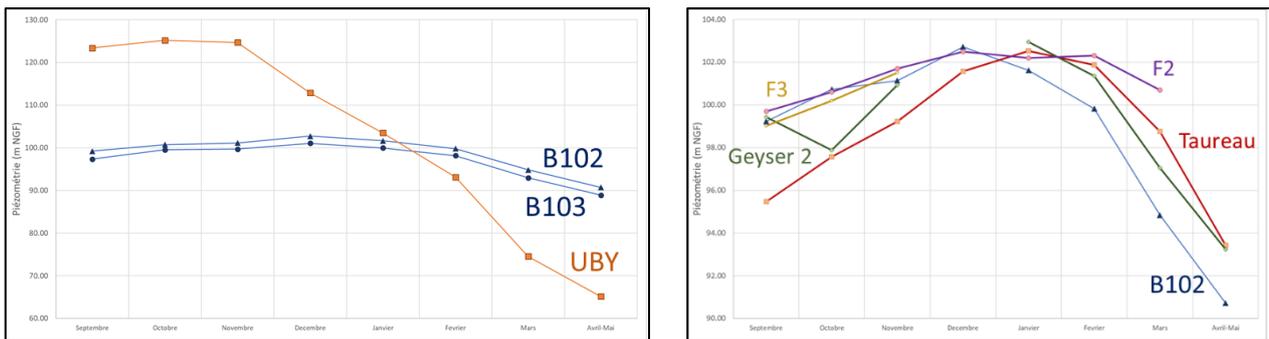


Illustration 14 - Piézométries des ouvrages du compartiment sud de Barbotan (entre septembre 2017 et avril-mai 2018)

- Dans le compartiment nord, les forages F4 et F5 montrent des piézométries identiques. Seul F5 est conservé pour l'élaboration de la carte piézométrique régionale. Le forage de Laiterie, plus au nord, est également conservé. Les piézométries de ce compartiment nord illustrent la complexité du fonctionnement hydrogéologique du secteur de Barbotan, puisque les variations piézométriques des forages F4 et F5 sont quasiment nulles au cours de la période de mesure, contrairement à celles de Laiterie. Par ailleurs, la cote piézométrique globale de ces forages est également supérieure au compartiment sud mais aussi, pour toute la période d'observation, au forage de Laiterie.

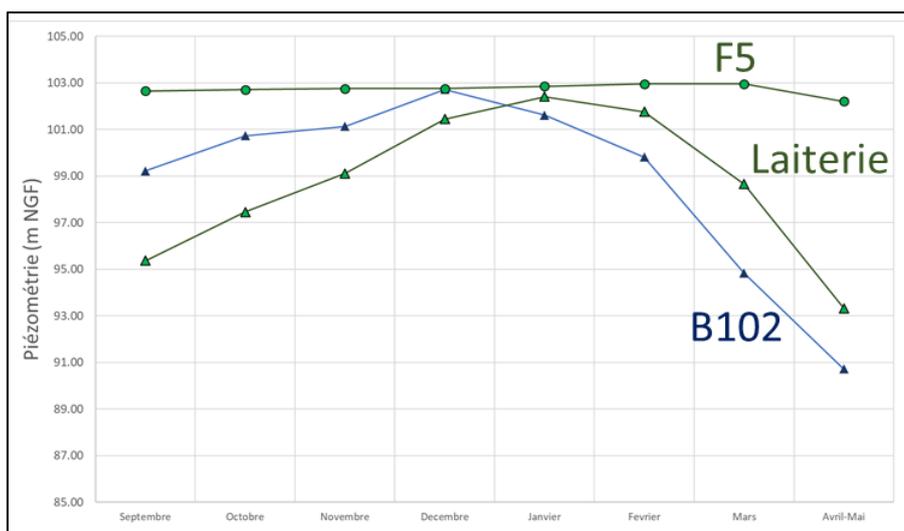


Illustration 15 - Piézométries des ouvrages du compartiment nord de Barbotan (entre septembre 2017 et avril-mai 2018)

Le tableau de l'illustration 16 présente le résultat des différentes campagnes de mesures, l'illustration 17 présente les niveaux mesurés pour la campagne de septembre 2017.

INDICE_BS S	Désignation	Septembre	Octobre	Novembre	Decembre	Janvier	Fevrier	Mars	Avril-Mai
09268X0059	B102	99.23	100.73	101.14	102.72	101.62	99.82	94.84	90.72
09268X0061	B103	97.35	99.54	99.69	101.05	99.95	98.15	92.97	88.89
09268X0055	UBY	123.39	125.18	124.68	112.88	103.47	93.12	74.55	65.15
09268X0035	TAUREAU	95.47	97.57	99.22	101.57	102.52	101.87	98.76	93.42
09268X0048	GRAND GEYSER "G2"	99.42	97.88	100.93		102.95	101.35	97.05	93.23
09268X0049	F2	99.70	100.60	101.70	102.50	102.20	102.30	100.70	
09268X0050	F3	99.02	100.20	101.50					
09268X0064	F4	102.66	102.73	102.76	102.66	103.06	103.06	102.96	102.61
09268X0065	F5	102.66	102.71	102.76	102.76	102.86	102.96	102.96	102.21
09268X0037	LAITERIE	95.37	97.46	99.12	101.45	102.41	101.76	98.66	93.33

Illustration 16 - Piézométries des ouvrages du secteur de Barbotan (entre septembre 2017 et avril-mai 2018)

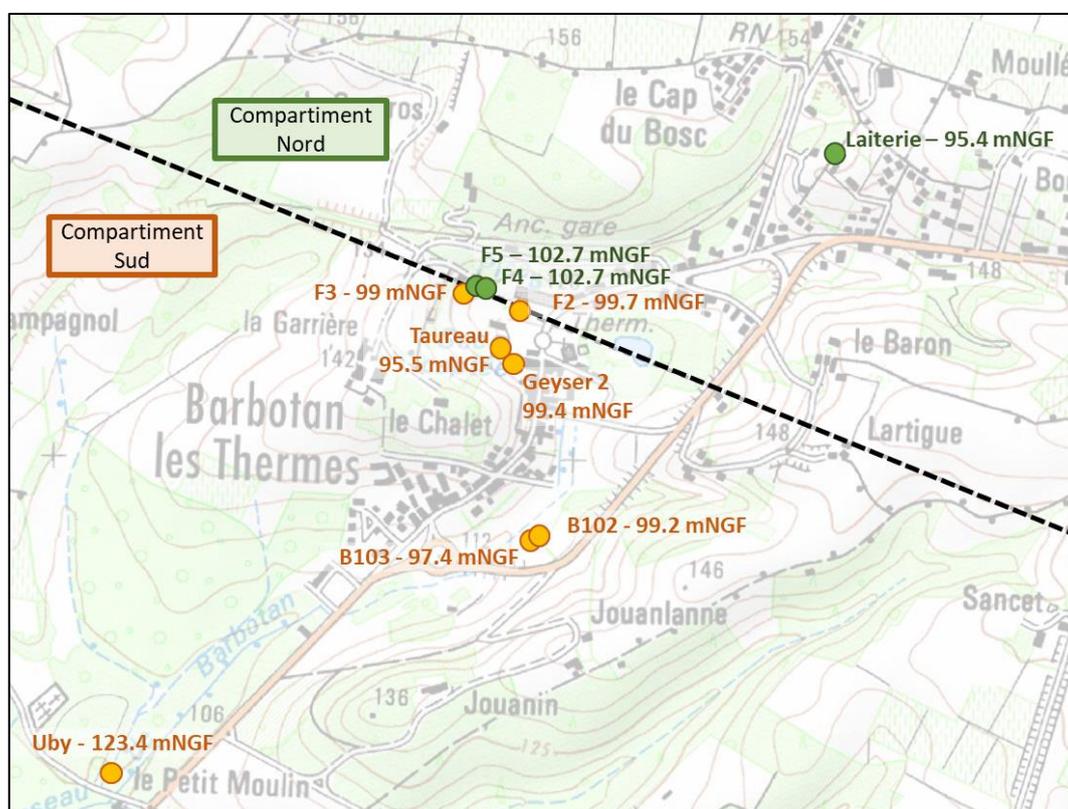


Illustration 17 - Localisation des ouvrages du secteur de Barbotan et niveaux piézométriques mesurés durant la campagne de septembre 2017

3.1.5. Secteur de Simacourbe / Lembeye / Lespielle

Le forage de Lespielle 2 (10057X0003/LESP-2) exploite les Sables de Lussagnet pour l'alimentation en eau potable. Dans le périmètre de protection rapproché de cet ouvrage, le forage de Lembeye 1 (10057X0001/LEE-1) est utilisé pour le suivi de la piézométrie des Sables Infra-Molassiques ; les données de ce suivi sont bancarisées dans le portail ADES. Les chroniques continues, qui montraient des niveaux semblables avant 2007, font apparaître une différence de piézométrie, actuellement de l'ordre de 10 à 20 m, confirmée par les 3 mesures piézométriques réalisées sur site entre mars et octobre 2018. Ces chroniques montrent également des propriétés-

réservoirs différentes, avec des amplitudes de variation importantes et des dynamiques relativement décalées dans le temps.

On constate aussi que :

- le niveau piézométrique du forage de Lespielle 2 est davantage cohérent avec les niveaux observables dans les ouvrages de Lasseppe (10052X0037/F) et Lespielle 1 (10053X0002/F1) ;
- les logs géologiques font apparaître que l'ouvrage de Lembeye 1 (10057X0001/LEE-1) capte, en plus des Sables du Lussagnet, la formation des Grès à Nummulites, située en-dessous et semblant séparée de la formation sus-jacente par des formations argileuses pouvant alors mettre en pression le réservoir. Par le passé, le forage de Lembeye 1 (10057X0001/LEE-1) était particulièrement colmaté, comme le montre le résultat d'un pompage d'essai : quatre ans après le pompage, le niveau redevenait stable.

Se pose ainsi la question de la représentativité des mesures de l'ouvrage de Lembeye 1. Comme les 2 ouvrages (Lespielle 2 et Lembeye 1) sont proches, seules les mesures piézométriques relatives à Lespielle 2 (10057X0003/LESP-2) ont donc été retenues pour l'établissement des cartes piézométriques.

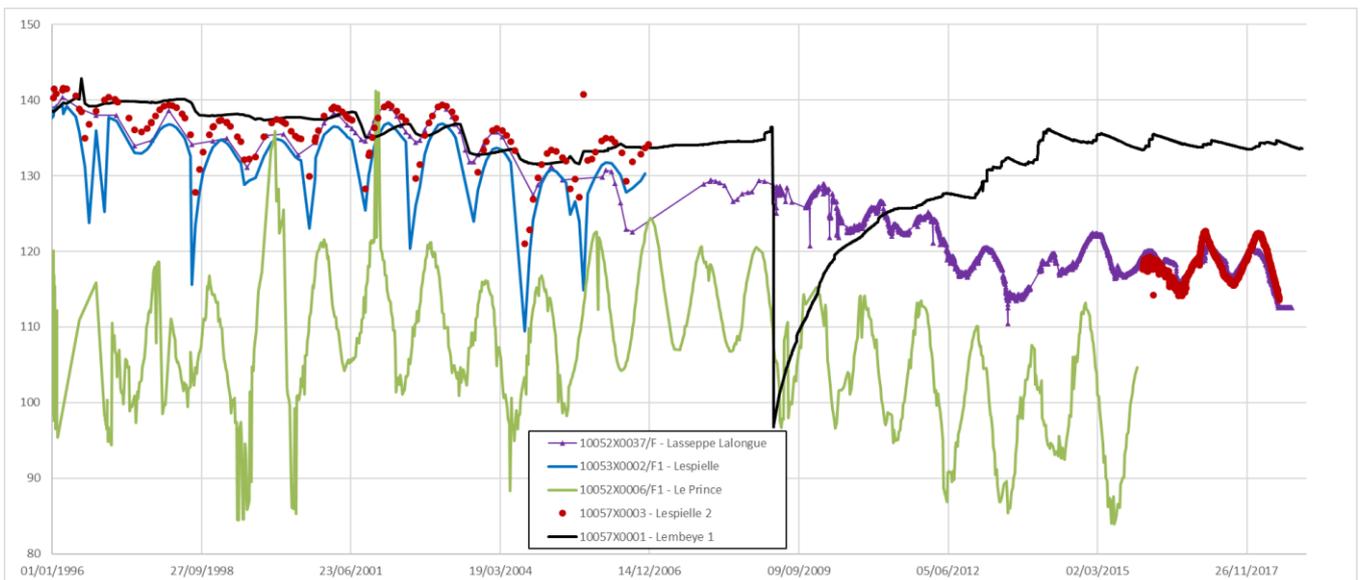


Illustration 18 - Comparaison des piézométries des forages de Lembeye 1 et Lespielle 2, à Simacourbe, et des ouvrages environnants

3.1.6. Secteur de Bordes

À Bordes, dans les Pyrénées-Atlantiques, 4 forages étaient exploités pour l'AEP, par le Syndicat Mixte du Nord-Est de Pau :

- Bordes Angais 1 - 10306X0036/F1
- Bordes Angais 2 - 10306X0033/F2
- Bordes Angais 3 - 10306X0034/F3
- Bordes Angais 4 - 10306X0035/F4

Depuis plusieurs années, des pollutions chroniques, d'origine agricole (nitrates et pesticides), sont apparues, amenant le SMNEP à trouver une ressource de substitution et à cesser l'exploitation et le suivi piézométrique effectué dans ces 4 forages. Suite à cette décision, le BRGM, avec l'accord du SMNEP, a décidé de reprendre le suivi du forage F3 et un capteur de pression a été mis en place, à la fin du mois de novembre 2017. Pour les autres ouvrages, les données des capteurs de l'exploitant, qui ont été en place de septembre 2017 à avril 2018, ont été récupérées puis recalées en altimétrie, suite au nivellement des ouvrages effectués en mars 2018. Après analyse de l'ensemble des données disponibles, et compte tenu de la proximité des 4 ouvrages entre eux (dans un rayon d'un kilomètre), il a été décidé de ne conserver que les mesures du forage F3 (à dire d'experts), pour la réalisation des cartes mensuelles à l'échelle régionale (les autres ouvrages présentant, à cette échelle, des valeurs proches du forage en question).

3.1.7. Secteurs des stockages de Lussagnet et Izaute

Les ouvrages retenus pour l'établissement des cartes piézométriques, captant les Sables de Lussagnet, au droit des stockages de gaz, sont les suivants :

- dans la zone de Lussagnet : 09526X0049/LUG46 - Lussagnet 46 à Lussagnet ; 09526X0210/F - Lussagnet 57 et 09526X0225/F - Lussagnet 68 à Le Houga ; 09526X0089/LUG69 - Lussagnet 69 à Cazères-sur-l'Adour ;
- dans la zone de Izaute : 09527X0017/NOG4 - Iza 4 à Magnan ; 09527X0018/NOG5 - Iza 5 à Laujusant ; 09528X0019/NOG2 - Iza 2 et 09528X0020/NOG3 - Iza 3 à Caupenne-d'Armagnac.

En ce qui concerne les forages LUG101 (09526X0228/LUG101) et IZA101 (09527X0021/S), les chroniques piézométriques montrent une faible évolution de la piézométrie au cours du temps, ne restituant pas les variations de pression observées dans les Sables de Lussagnet. À LUG101, les perforations sont ainsi situées dans la partie inférieure des Grès à Nummulites (de 780 à 795 m de profondeur), soit plus de 50 m sous la base des Sables de Lussagnet. IZA101 est, quant à lui, un puits de contrôle utilisé par TEREKA, dont les perforations initiales, faites dans les Sables de Lussagnet, ont été abandonnées en 1981, lors de l'approfondissement de l'ouvrage. Ultérieurement, une perforation a été effectuée à 732 m de profondeur, au droit du Paléocène. Les données relatives à ces deux ouvrages ne seront donc pas retenues pour les cartes piézométriques. Elles montrent par contre l'état de la connexion entre les Sables de Lussagnet et les niveaux sous-jacents.

3.1.8. Autres cas

Le forage de Saint-André (10336X0002/F) apparaît, au regard du modèle géologique, comme en dehors de l'emprise des Sables de Lussagnet et des Grès à Nummulites. Sa piézométrie se révèle très élevée par rapport au forage voisin de Puymaurin (10078X0001/F) : il est par conséquent écarté des points retenus pour l'élaboration des cartes piézométriques mensuelles.

En ce qui concerne les forages localisés dans le département du Tarn, l'ensemble de ceux-ci est conservé pour l'établissement des cartes piézométriques :

- le forage Muret 104 (10098A0004/F) capte les Sables grossiers Infra-Molassiques ;
- les forages de Graulhet (USINE KP1 - 09586X0008/F et Usine de REY - 09587X0029/F) captent les bancs calcaires intra-molassiques de l'Eocène supérieur et moyen. Les SIM ne sont pas atteints par le forage USINE KP1, et juste atteints à la fin du forage de l'usine de REY. A noter que le faciès SIM est ici sensiblement différent (argile rouge à graviers, très

peu perméables) de celui de Muret 104. Ces formations semblent en connexion hydraulique avec les SIM et peuvent donc imprimer une charge hydraulique dans cette partie de l'aquifère ;

- les forages de Labruguière (10122X0055/F) et Valdurenque (09866X0074/F) captent l'Eocène inférieur, qui a ici un faciès argilo-sableux, peu perméable. Cet aquifère est susceptible d'être en relation avec les calcaires molassiques de Castres (sub-affleurants), en discordance sur le socle primaire ;
- le forage de Guitalens-L'Albarède (09857X0104/F) capte les mêmes formations, de l'Eocène inférieur, que Labruguière, en discordance avec le socle, mais qui plonge à ce niveau. Les relations avec les calcaires molassiques de Castres sont également potentielles.

Le forage de Marchepin (09014X0013/F), à Buzet-sur-Baïse, ne capterait finalement pas les Sables de Lussagnet et les Grès à Nummulites, après reconsidération des connaissances précédentes. Toutefois, du fait des incertitudes portant sur la validation géologique, et en raison de la cohérence des charges hydrauliques avec les ouvrages situés au sud, les valeurs de piézométrie de ce forage ont été conservées.

Dans le secteur centre-est de la zone d'étude, il existe peu d'ouvrages dans lesquels des mesures piézométriques peuvent être réalisées. Deux ouvrages ont ainsi été retenus pour la campagne de mesures : les forages du Ritouret à Blagnac (09838A0421/F) et de Muret 104 (10098A0004/F). Toutefois, bien que ces ouvrages captent bien la formation des Sables Infra-Molassiques, des questions se posent quant à leur connexion avec d'autres formations aquifères. Ainsi, le forage de Blagnac présente un enrichissement important en ^{18}O , qui s'écarte de la droite météorique. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer cet enrichissement : comme une phase d'évaporation des eaux lors de leur infiltration, ou bien des mélanges avec des eaux plus profondes, présentant des $\delta^{18}\text{O}$ enrichis (André, 2002 ; Barrière et al., 2019), ou encore des échanges "eau-roche" en contexte géothermal de haute température (Barrière et al., 2019). Cet ouvrage présente une piézométrie inférieure de 40 m par rapport au forage proche de Muret 104 et des incertitudes demeurent quant à la mesure. Le forage Muret 104 pose également question, comme d'autres ouvrages pétroliers transformés en piézomètres, qui ont connu différents problèmes, notamment de colmatage. A noter que dans cet ouvrage, les SIM sont en potentielle connexion avec l'aquifère sous-jacent du Paléocène. Toutefois, à défaut d'avoir, dans ce secteur, une donnée fiable pour établir la carte piézométrique, il a été décidé de garder le forage Muret 104 et d'écarter l'ouvrage de Blagnac, pour contraindre la carte, malgré les incertitudes des mesures dans cet ouvrage.

Le forage de l'établissement Weishardt (09587X0002/F), à Graulhet, ne peut être systématiquement arrêté pour effectuer une mesure de piézométrie, en raison des activités de l'établissement. Par ailleurs, lorsqu'il est arrêté, il est impacté par un autre forage, utilisé par le même établissement (ouvrage qui ne peut être stoppé). Cet ouvrage n'a donc pas été retenu pour être mesuré. Par ailleurs, aucune donnée historique n'a été trouvée pour permettre d'estimer la piézométrie. Les piézométries des forages de l'usine de KP1 et de l'usine du Rey, à Graulhet, se substitueront à celui de l'établissement Weishardt, pour contraindre la piézométrie dans ce secteur.

Dix ouvrages de la structure d'Audignon n'ont pas été retenus et mesurés. Au regard de la validation géologique proposée dans le cadre du projet « Audignon » (Cabaret et al., 2020), ces ouvrages ne captent pas les Sables Infra-Molassiques.

Le piézomètre d'Auvillar (09293X0123/F) n'a pas été utilisé du fait d'une détérioration du tubage (perforation à 400 mètres de profondeur - venues d'eau ?) et de la présence de débris, au-dessus des crépines, ne permettant pas de connaître l'état complet de l'ouvrage (examen endoscopique réalisé par Hydro-Assistance le 05/09/2017 - Hydro-Assistance (2017)). Par ailleurs, les données

piézométriques sont difficilement exploitables à cause d'une remontée piézométrique atypique de presque 20 mètres, entre 2004 et 2008 (Illustration 19), liée à une mise en communication de différents niveaux aquifères.



Illustration 19 - Chronique piézométrique de l'ouvrage d'Auvillar (09293X0123/F)

3.1.9. Synthèse des données retenues

Sur les 96 ouvrages initiaux, seulement 49 sont conservés pour l'élaboration des cartes piézométriques mensuelles (Illustration 20 et Annexe 2). À cette liste, 2 forages éocènes, captant les Sables Inférieurs du Bordelais, ont été ajoutés pour contraindre la piézométrie dans le nord du réservoir (08526X0003/F - Auros et 08764X0008/F - Grignols). Enfin, au regard des différentes zones d'affleurement présentes, il a été nécessaire d'intégrer 2 points de contrainte supplémentaires, afin de rendre compte du rôle de ces zones comme zone d'infiltration imposant une charge hydraulique à l'aquifère. L'affleurement 1 représente une charge hydraulique au niveau de Castéra-Verduzan, le réservoir se retrouvant à proximité de la surface (faible recouvrement) ; le second affleurement nécessitant une charge hydraulique est celui situé au nord-ouest de Lacquy. D'autres affleurements sont présents et pourraient être pris en compte. Toutefois, il existe à leur proximité des mesures de piézométrie, dans des forages utilisés pour l'élaboration des cartes mensuelles. Il a été décidé de ne pas intégrer ces autres points d'affleurement.

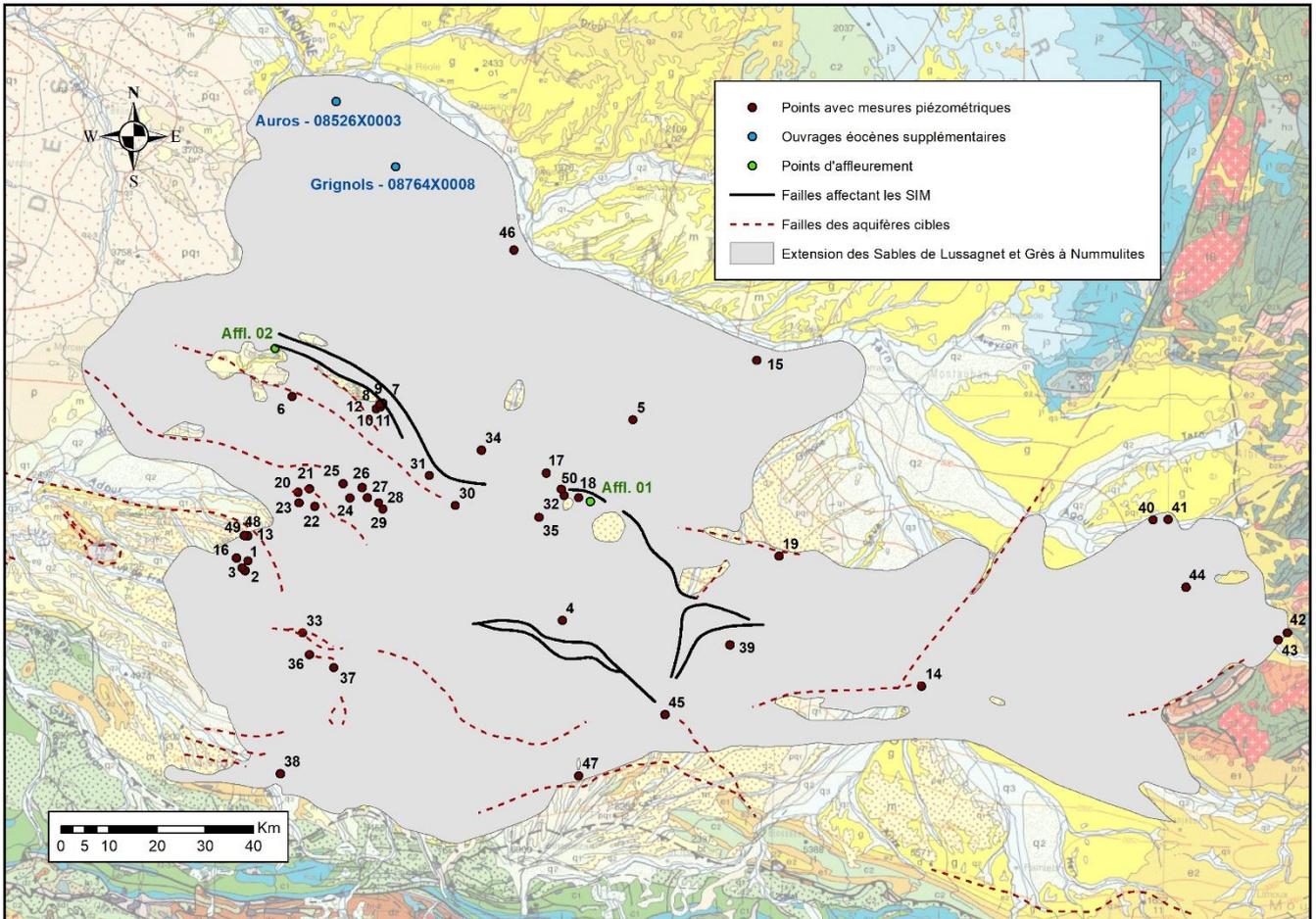


Illustration 20 - Localisation des ouvrages retenus pour les cartes piézométriques mensuelles (nom des ouvrages en annexe 2)

3.2. METHODOLOGIE D'ELABORATION DES CARTES

À partir des mesures des 49 ouvrages retenus, une interpolation a été réalisée en utilisant la méthode du krigeage, avec variogramme linéaire sans dérive, qui permet de restituer la piézométrie la plus cohérente dans son ensemble. Les limites d'interpolation reprennent la courbe-enveloppe des Sables Infra-Molassiques (Sables de Lussagnet et Grès à Nummulites) définie sur la base des informations géologiques, fournies dans le cadre des travaux GAIA pour la modélisation hydrogéologique notamment (carte de faciès des formations des Sables de Lussagnet et Grès à Nummulites et données issues des travaux de modélisation géologique - à paraître).

Afin de réaliser les cartographies piézométriques, un ensemble de failles a été pris en compte (Illustration 20). Ces failles sont celles utilisées pour la réalisation du modèle géologique, dans lequel toutes les failles n'engendrent pas forcément une déconnexion hydraulique de l'aquifère des Sables Infra-Molassiques. Aussi, seules celles engendrant effectivement une déconnexion au sein de l'aquifère, ou du moins générant une déconnexion hydraulique partielle (cas de Barbotan où la faille ne déconnecte pas totalement les réservoirs, chapitre 3.1.4), ont été gardées.

A noter le cas particulier, à l'est de Castéra-Verduzan, où la cartographie ne présente pas de faille, mais où la différence de piézométrie, de plus de 80 mètres entre différents ouvrages, ne

peut s'expliquer que par une déconnexion nord-sud. Dans le cadre de cette étude, une déconnexion est donc proposée comme hypothèse, pour ce secteur.

A noter aussi que ces cartes ne prennent pas en compte les influences, éventuellement locales, de pompages locaux.

Enfin, afin de rendre compte de ces spécificités qu'une interpolation automatique ne peut faire, les cartes interpolées, de manière automatique, ont été retravaillées dans certaines zones.

3.3. CARTOGRAPHIES PIEZOMETRIQUES

Les cartes produites sont présentées en Illustration 21 et Illustration 22. A noter que ce tracé piézométrique est plus ou moins précis, selon les secteurs, en fonction de la densité de points de mesure. Ainsi, les isopièzes, représentées par un trait continu, correspondent aux secteurs où la piézométrie restituée est globalement « fiable » (zone d'un rayon d'une quarantaine de kilomètres autour des stockages) à l'échelle régionale de travail, du fait d'un nombre important d'ouvrages de mesures (« à dire d'experts »). Les isopièzes, représentées en pointillés, concernent les secteurs où la piézométrie esquissée présente de grandes incertitudes du fait d'un manque de données.

Ces cartographies permettent de constater, pour la période de septembre 2017 à avril 2018, l'évolution des niveaux piézométriques, en particulier la variation des niveaux liée aux stockages de gaz dans le réservoir des Sables Infra-Molassiques et sa propagation dans le temps. Ainsi, les niveaux au droit des stockages sont de l'ordre de +150 m NGF en fin d'été (suite à la phase de remplissage) et de l'ordre de +40 m NGF en fin de stockage (soutirage pendant la période hivernale).

Plus globalement, la piézométrie montre une compartimentation entre les écoulements sud-ouest, au sud de la flexure celtaquitaine, et ceux à l'est et au nord de la zone d'étude. Cette représentation des écoulements est cohérente avec les principales zones géochimiques proposées par André L. (2002).

Ces différentes informations permettront de contraindre le modèle hydrodynamique développé, afin qu'il reproduise ces piézométries observées et les sens d'écoulement qui peuvent en être déduits.

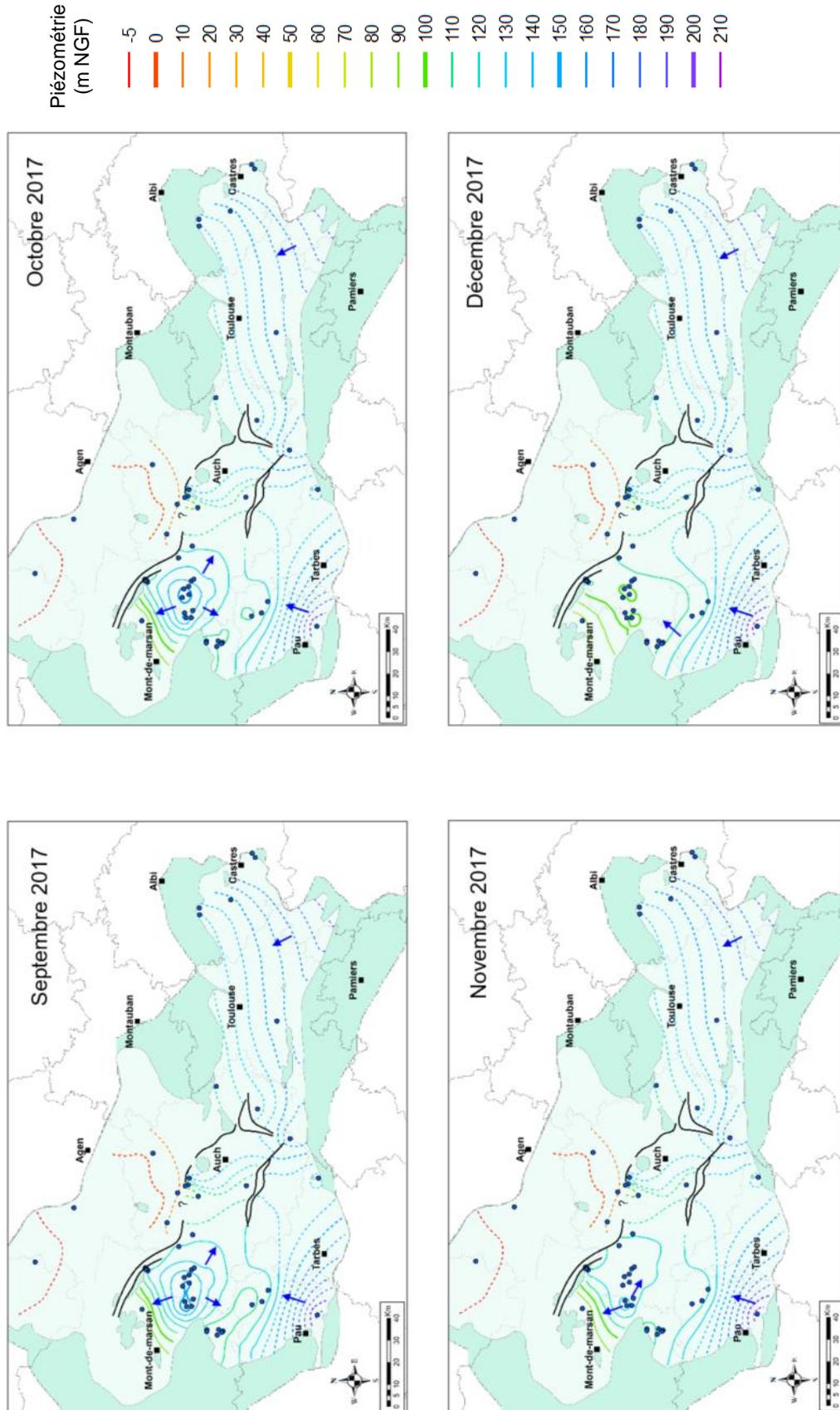


Illustration 21 - Cartes piézométriques pour la période de septembre à décembre 2017 (fond vert : extension de la zone d'étude ; traits pleins : isopièzes fiables ; traits en pointillés : isopièzes incertaines)

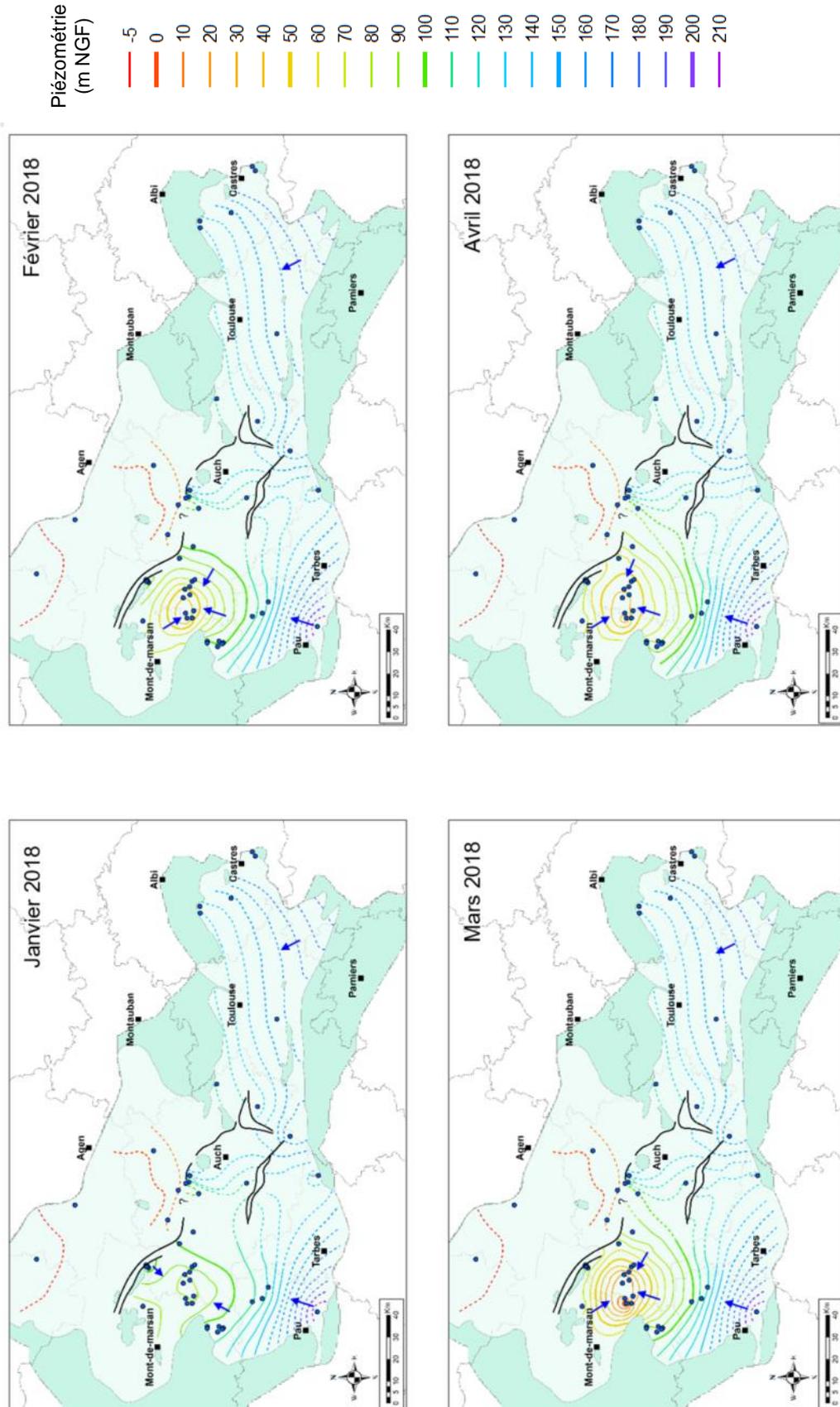


Illustration 22 - Cartes piézométriques pour la période de janvier à avril 2018 (fond vert : extension de la zone d'étude ; traits pleins : isopièzes fiables ; traits en pointillés : isopièzes incertaines)

4. Synthèse géologique dans le secteur de Gondrin

4.1. CADRE DE L'ETUDE

Le présent chapitre vise à rassembler et fournir les données géologiques, anciennes et récentes, connues dans le secteur de la butte de Gondrin (département du Gers). Cette synthèse est établie afin d'orienter, au mieux, les investigations menées par l'ENSEGID, pour affiner la compréhension hydrogéologique du site, notamment dans le cadre du projet GAIA.

Le secteur de Gondrin, visé par l'étude, correspond au relief formé par l'incision des cours d'eau autour de la butte de Gondrin. Il est délimité par les vallées de l'Auzoue à l'ouest et de l'Osse à l'est (Illustration 23).

La situation géologique du secteur, au cœur du domaine sud-aquitain, et sa proximité avec la chaîne des Pyrénées, située à une centaine de kilomètres au sud, impliquent une structuration complexe du sous-sol.

Le secteur s'inscrit dans un vaste domaine géologique molassique, avec une sédimentation continentale enregistrée régionalement depuis la fin de l'Eocène jusqu'au Miocène, pouvant atteindre plus de 600 mètres d'épaisseur.

Dans cette partie sud du Bassin d'Aquitaine, la continentalisation s'est initiée d'est en ouest. Durant cette période, qui court de l'Yprésien au Bartonien (paroxysme de la compression pyrénéenne), d'importants transferts de sédiments détritiques terrigènes, issus de l'érosion du « jeune » relief pyrénéen, ont entraîné la mise en place d'une épaisse série progradante constituée de grès et de sables (les Grès à Nummulites, puis les Sables de Lussagnet). Par la suite, des environnements plus calmes se sont développés, avec une sédimentation continentale molassique associée à des dépôts de sédiments plus fins, souvent argileux, carbonatés, pouvant contenir localement des niveaux calcaires dits « lacustres ». Ces formations calcaires peuvent parfois atteindre plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur.

Les formations lacustres calcaires sont souvent fracturées, parfois karstifiées, et peuvent présenter un intérêt hydrogéologique pour les territoires. La compréhension des relations géométriques entre ces formations et les formations molassiques argileuses et marneuses, parfois sableuses, environnantes, est un point-clé pour la compréhension des écoulements localisés ou, parfois même, de secteurs plus vastes d'échelle départementale.

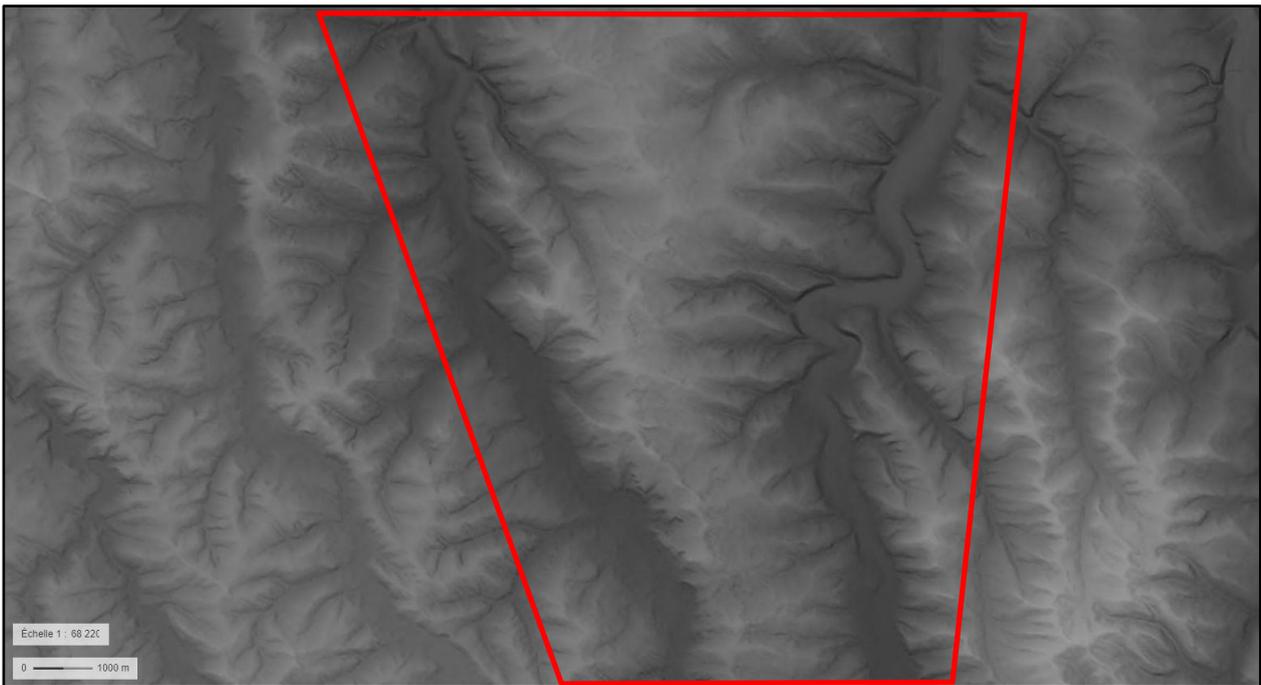
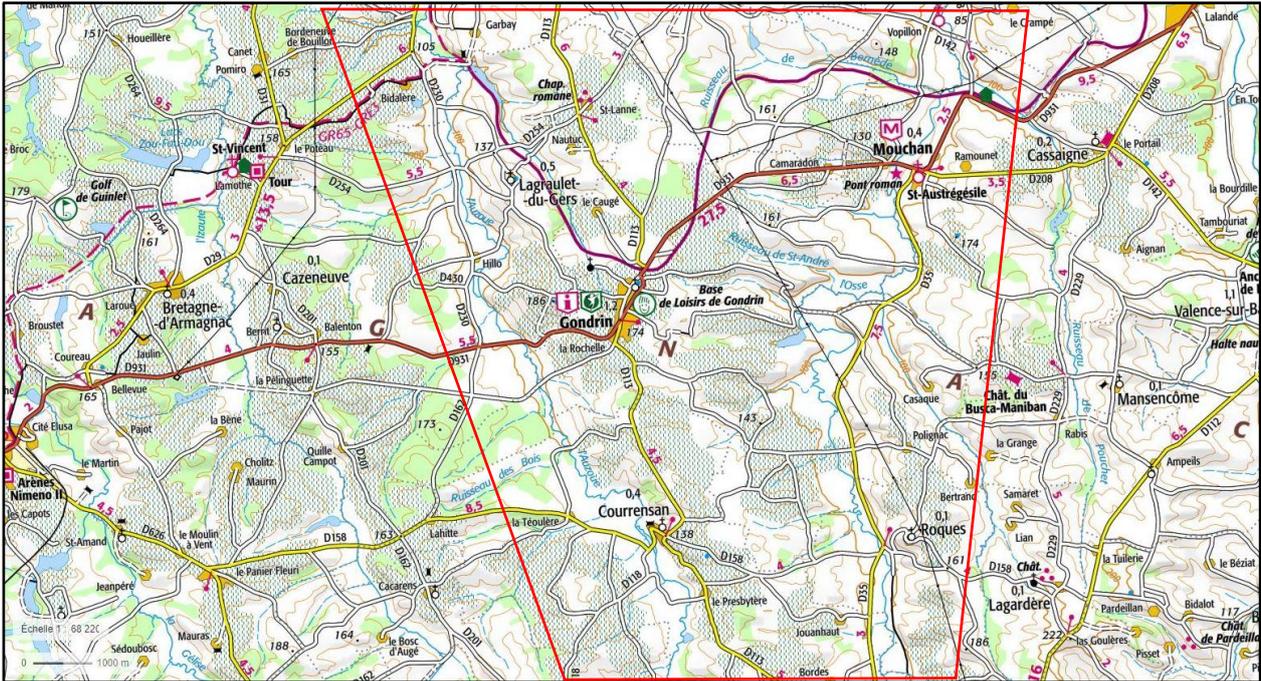


Illustration 23 - Présentation du secteur de l'étude (en haut : fond de carte IGN au 1/50 000 ; en bas : fond MNT - source Géoportail de l'IGN)

4.2. CADRE GEOLOGIQUE

4.2.1. Contexte géologique régional

Depuis le Trias et au cours du cycle alpin, le Bassin d'Aquitaine enregistre les mouvements relatifs des plaques "Ibérie" et "Eurasie", permettant d'en retracer l'histoire (Choukroune, 1976 ; Choukroune et Mattauer, 1978). Le Mésozoïque et le Cénozoïque comportent ainsi au moins cinq stades géodynamiques majeurs (Illustration 24) qui influencent les conditions tecto-sédimentaires, depuis l'initiation du rifting intracontinental au Trias, jusqu'au stade compressif au début du Tertiaire, en passant par le stade distensif au Jurassique, où se développe un large bassin intracratonique, et par les stades transtensif² et transpressif³, au cours du Crétacé (Serrano, 2001 ; Serrano et al. 2006).

Cette évolution au Crétacé inférieur est liée à l'ouverture du golfe de Gascogne. Séparée de la partie sud du Bassin par la flexure celtaquitaine, la partie nord du Bassin d'Aquitaine n'est pas affectée par cette ouverture océanique. Dans la partie sud, on enregistre alors le passage d'une plate-forme unique à un système de bassins profonds différenciés (Serrano, 2001), qui évolue vers un rifting hyper-aminci à l'Albo-Cénomanién (Massini et al., 2014 ; Saspiturry et al., 2020). Ce régime est ensuite à nouveau bouleversé en évoluant vers un système convergent à partir du Cénomanién et jusqu'à la fin du Crétacé supérieur. Cette inversion généralisée de la tectonique régionale, liée à la compression pyrénéenne, entraîne des géométries aussi complexes que variées.

Après une période de quiescence tectonique au Danien (début du Paléocène), cette phase transpressive amorcée évolue vers une phase compressive. Elle entraîne une reprise inversée de l'ensemble des structures héritées, qui correspondent aujourd'hui aux plis anticlinaux de la partie sud du Bassin, ainsi que le soulèvement du relief relatif à la mise en place d'un bassin flexural d'avant-pays nord-pyrénéen (Serrano, 2001). Dans le secteur étudié, on enregistre des dépôts de type "flysch", qui sont associés à ce contexte géodynamique.

Au cours de l'évolution de cette phase compressive, l'environnement marin, qui a persisté dans le sud du Bassin aquitain durant la majeure partie du Mésozoïque, va ainsi évoluer, à l'Yprésien (début de l'Eocène), vers un système sédimentaire de plus en plus influencé par le continent. Les dépôts détritiques associés, comme les Grès à Nummulites et les Sables de Lussagnet, vont évoluer depuis un système deltaïque progradant à polarité est-ouest jusqu'au Bartonien-Priabonien, vers une sédimentation typique d'environnements calmes avec une faible pente, à partir du Priabonien (Biteau et Canérot, 2007) : ils formeront les dépôts molassiques.

² Se dit d'un système en décrochement et en extension

³ Se dit d'un système en décrochement et en compression

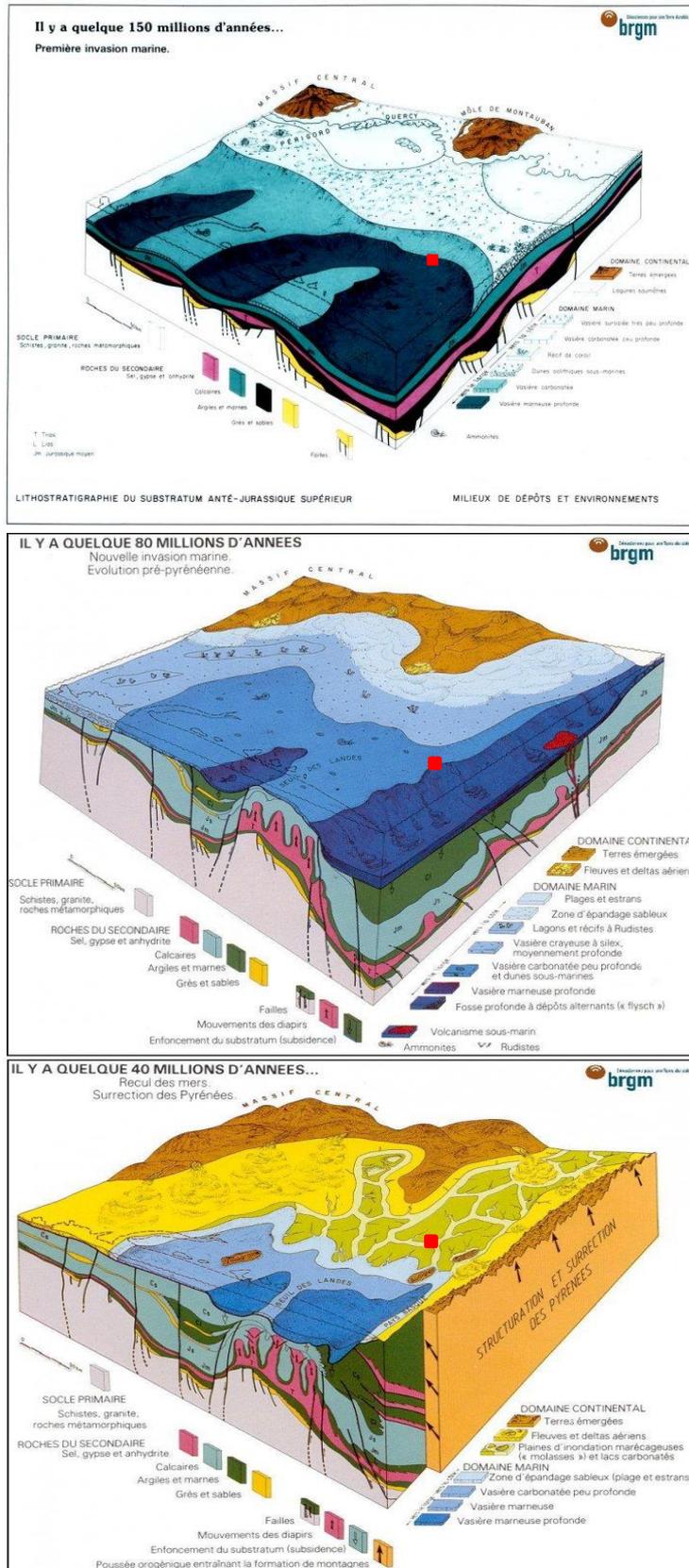


Illustration 24 - Blocs-diagrammes représentant la succession de contextes géologiques régionaux, au cours du cycle alpin ; le carré rouge indique la localisation approximative du site Gondrin (source : BRGM, 1986)

La molasse est une roche complexe, formée de matériel détritique et consolidée par un ciment marneux tendre (Crouzel, 1957), correspondant à un ensemble de faciès-types qui peuvent être fluviatiles (à chenaux et plaines d'inondation), lacustres (notamment représentés par des niveaux calcaires) et palustres (environnements marécageux).

Cette formation géologique figure partout dans le Bassin d'Aquitaine. L'étude consacrée par Crouzel (1957) sur les molasses « n'a pas permis de distinguer parmi les molasses plusieurs variétés bien séparées, car elles présentent tous les aspects et passages possibles entre les trois pôles suivants : poudingues, sables et calcaires marneux ». Ainsi sur de vastes étendues, le terrain est formé par la superposition et l'alternance de bancs calcaires, molassiques ou *macigno*, de niveaux de poudingues et de couches de marne (Illustration 25).

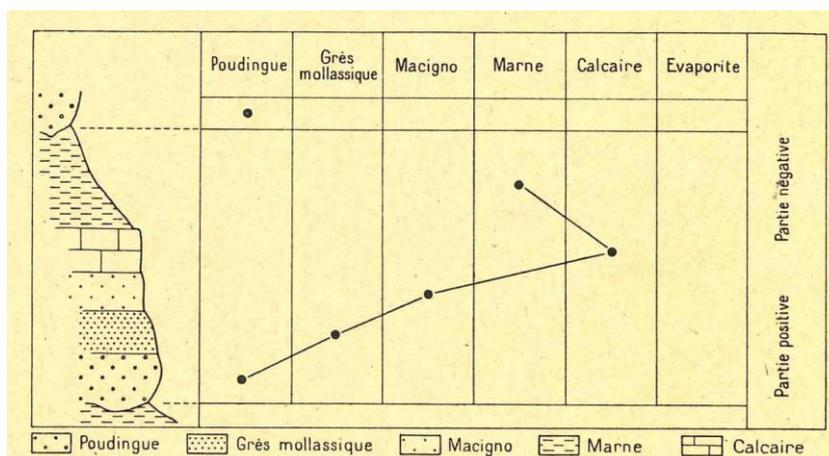


Illustration 25 - Série virtuelle locale dans les terrains molassiques du Miocène du Bassin d'Aquitaine (Crouzel, 1957)

Toutefois, dans son étude de 1984, Sunyach propose un modèle régional, à l'échelle du Bassin d'Aquitaine, faisant intervenir une variation horizontale d'ensemble des faciès molassiques. Ainsi, on retrouve au sud des faciès plutôt majoritairement détritiques (grès, poudingues, sables), qui cèdent peu à peu la place aux faciès calcaires « sans que la continuité des niveaux paraisse rompue » (Illustration 26). Dans cette même étude, Sunyach précise que les formations molassiques sont caractérisées, à grande échelle, par une forte hétérogénéité verticale (de l'ordre du mètre).

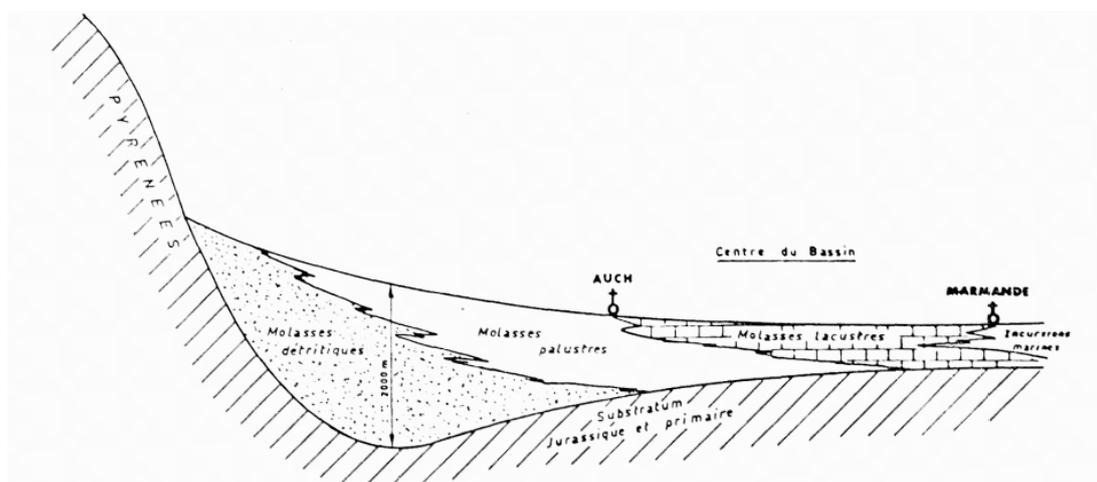


Illustration 26 - Variation horizontale d'ensemble des faciès molassiques, à l'échelle du Bassin aquitain (Sunyach, 1984)

À l'Oligocène, les Pyrénées sont quasiment émergées et la ligne de rivage se situe à l'ouest du Bassin d'Arzacq (4.2.3.a). L'érosion de la chaîne s'accélère et nourrit le dépôt des molasses continentales grés-conglomératiques proximales et argilo-carbonatées distales.

Jusqu'à la fin du Tertiaire, l'évolution paléogéographique amorcée à l'Oligocène se poursuit au cours du Miocène et le Bassin d'avant-pays aquitain se comble de molasses argileuses, où des calcaires lacustres vont s'intercaler (séries gersoises). Quelques incursions marines provenant de l'Atlantique sont enregistrées dans ce système, de plus en plus continentalisé. Les limites géographiques atteintes par ces transgressions marines sont toutefois limitées côté est et peinent à atteindre le « golfe d'Agen », au Miocène inférieur, ou les plaines de l'Armagnac, au cours des dernières grandes transgressions marines du Langhien-Serravallien (Miocène moyen).

Au Quaternaire, les séries affleurantes sont peu à peu incisées, entaillées par le réseau hydrographique en cours de structuration, au gré des variations climatiques enregistrées avec une fréquence élevée.

4.2.2. Secteur de Gondrin

a) *Le sous-sol*

Dans le secteur de Gondrin, les séries du Paléocène et du début de l'Yprésien sont caractérisées par le développement de plateformes carbonatées, tectoniquement stables. La polarité sédimentaire est alors globalement orientée vers les bassins profonds flexuraux, au sud.

A l'Yprésien supérieur (Cuisien), un profond changement, en termes de faciès et de polarité sédimentaire, va être enregistré régionalement : de vastes deltas vont se mettre en place et on observe une nette progradation des séries détritiques depuis l'est vers l'ouest (Sables de Lussagnet, Baliros, Grenade, etc.). Ce bouleversement témoigne de l'émersion d'un relief et de la mobilisation des produits issus de son érosion depuis l'est vers l'ouest (Gély et Sztrakos, 2000).

Puis, la sédimentation molassique s'installe dès le Bartonien. Elle se généralise toutefois au cours du Priabonien à l'ensemble de l'avant-pays nord-pyrénéen (Lasseur et *al.*, 2017). Au sud du secteur, au pied des reliefs, des séries détritiques terrigènes plus grossières se mettent également en place (poudingues de Palassou, de Jurançon ; Ortiz, 2019).

L'ensemble de ces dépôts continentaux molassiques vient ainsi compléter le remplissage tertiaire du Bassin aquitain, depuis l'Eocène moyen jusqu'au Miocène moyen.

b) *La carte géologique*

D'après la carte géologique, le secteur de la butte de Gondrin est constitué de couches subhorizontales, principalement molassiques, entaillées par l'érosion au niveau de vallées dans lesquelles se sont déposées de fines couches d'alluvions. De manière générale, on retrouve, à l'affleurement, la série stratigraphique suivante, du plus récent au plus ancien :

- Fz : alluvions fluviales des basses terrasses - Pléistocène à Holocène ;
- Fy : alluvions fluviales des terrasses inférieures - Pléistocène ;
- Ec : formations de pentes (éboulis, colluvions) ;
- m3-4SF : formation des Sables Fauves - Miocène moyen ;
- m1-3M : Molasses indifférenciées - Miocène ;
- g-m1MA : Molasses de l'Agenais - Oligocène à Aquitanien.

Un extrait de la carte de synthèse géologique au 1/250 000, dans ce secteur, est présenté ci-après.

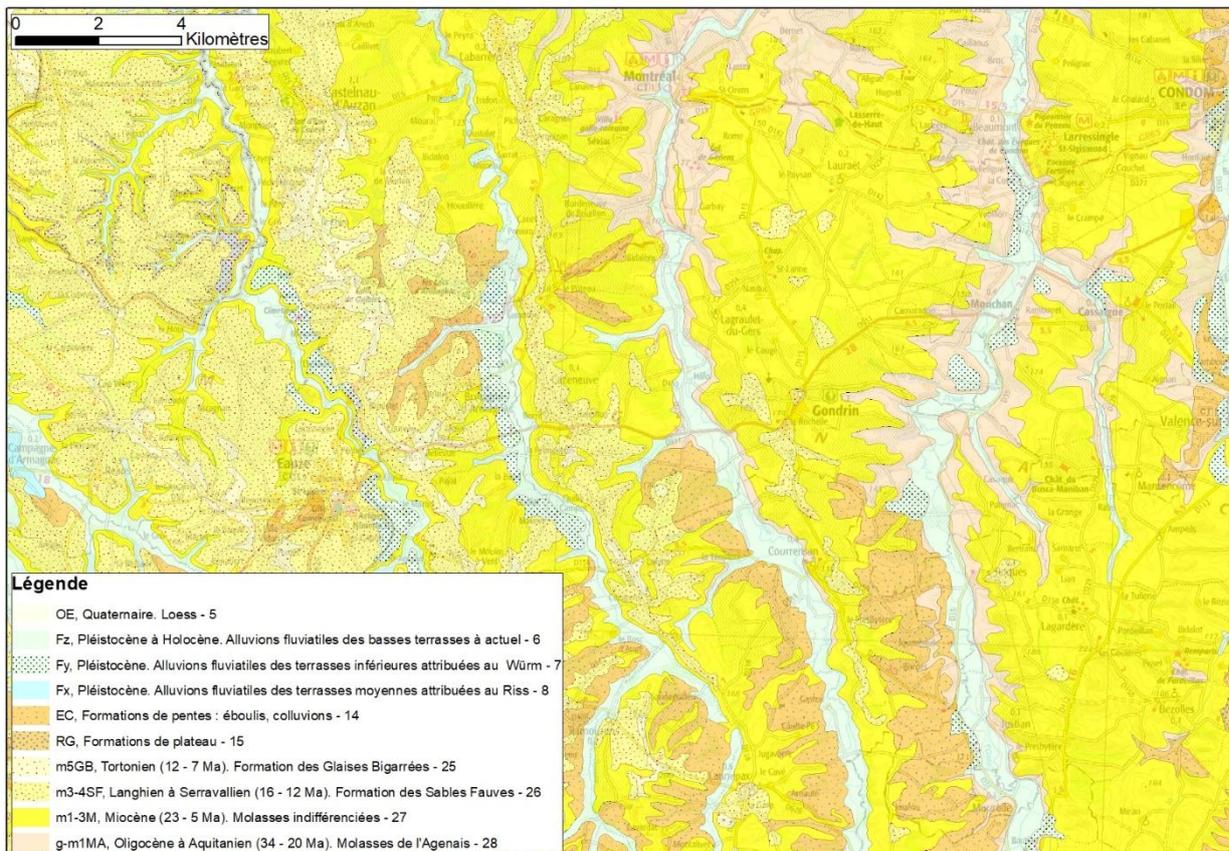


Illustration 27 - Carte géologique de synthèse au 1/250 000 dans le secteur de Gondrin (d'après Monod et al., 2014)

4.2.3. Structuration du sous-sol

a) Généralités

A partir de l'éclatement de la Pangée au Permo-Trias, suivie de l'ouverture de l'Atlantique au Jurassique, le Bassin aquitain se développe au gré d'une subsidence plus ou moins généralisée. D'après Brunet (1991), c'est au Jurassique supérieur que les sous-bassins d'Aquitaine s'individualisent (Bassins de l'Adour-Mirande, Parentis, Charentes). Ils sont contrôlés par des accidents N100-110. Au cœur de l'Aquitaine, cette répartition annonce les prémices du fonctionnement de la **flexure celtaquitaine** et de son importance future dans l'organisation et la structuration du Bassin aquitain.

Cette structure, qui est définie à l'échelle du Bassin d'Aquitaine, constitue une limite majeure entre un domaine septentrional, de type "plateforme", et un domaine méridional (Bassin de l'Adour-Mirande) où peuvent régner de forts taux de subsidence, avec une accumulation de sédiments sur une épaisseur beaucoup plus importante.

Au Crétacé inférieur, l'ouverture du golfe de Gascogne engendre la rotation de l'Ibérie et un régime transtensif dans la partie sud du Bassin aquitain. Cette phase tectonique va entraîner une augmentation importante de la subsidence dans le Bassin de l'Adour, qui va continuer à

s'approfondir et à s'individualiser, plus particulièrement suivant un couloir orienté est-ouest. Les secteurs les plus subsidents vont ainsi migrer du nord au sud, mais également d'est en ouest (Serrano, 2001).

Avec le début de la convergence pyrénéenne, au cours du Crétacé supérieur, le développement d'un bassin flexural va entraîner une subsidence dans les parties les plus méridionales du Bassin (Razin, 1989). Ce fonctionnement va se poursuivre jusqu'à l'Eocène moyen, au paroxysme de la tectonique compressive (Kieken, 1973 ; Synthèse géophysique et géologique des Pyrénées, 2018). Les Illustration 28 à Illustration 31 suivantes soulignent l'importance de la flexure celtaquitaine dans cette structuration régionale, qui se poursuit au Paléogène.

A l'échelle du Bassin aquitain, la base des formations tertiaires s'approfondit vers le sud (Illustration 28), montrant bien la subsidence de cette partie du Bassin, depuis le Jurassique et le contrôle de la flexure celtaquitaine. Cette base remonte localement en plusieurs pointements, qui correspondent aux plis anticlinaux, mis en place pendant la compression pyrénéenne (Illustration 28 à Illustration 31).

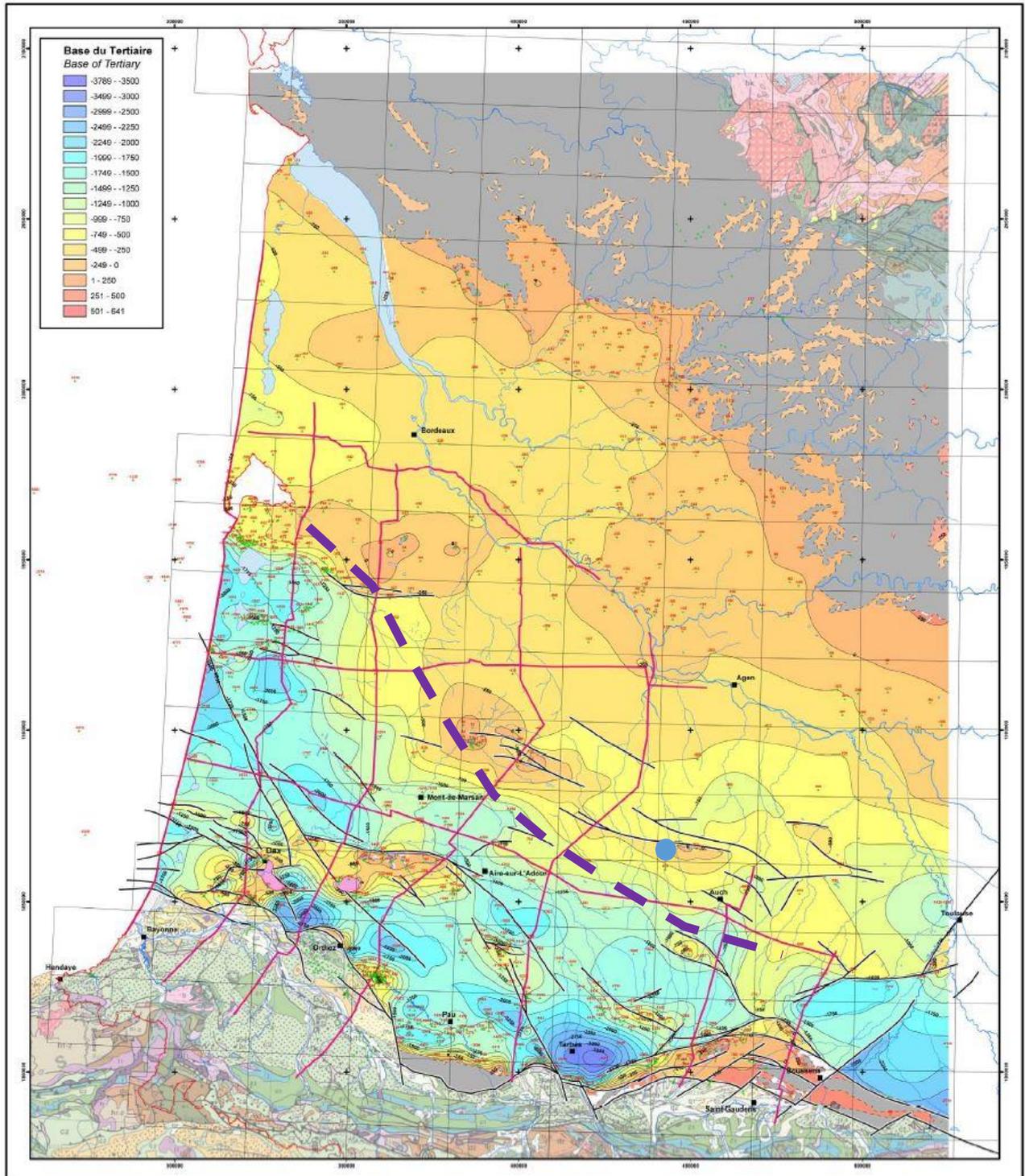


Illustration 28 - Cartographie des isohypses de la base du Tertiaire dans le Bassin aquitain ; localisation de la flexure celtaquitaine (tireté violet) ; localisation de Gondrin (point bleu) et localisation des lignes sismiques régionales et des principales structures tectoniques (d'après Serrano et al., 2006)

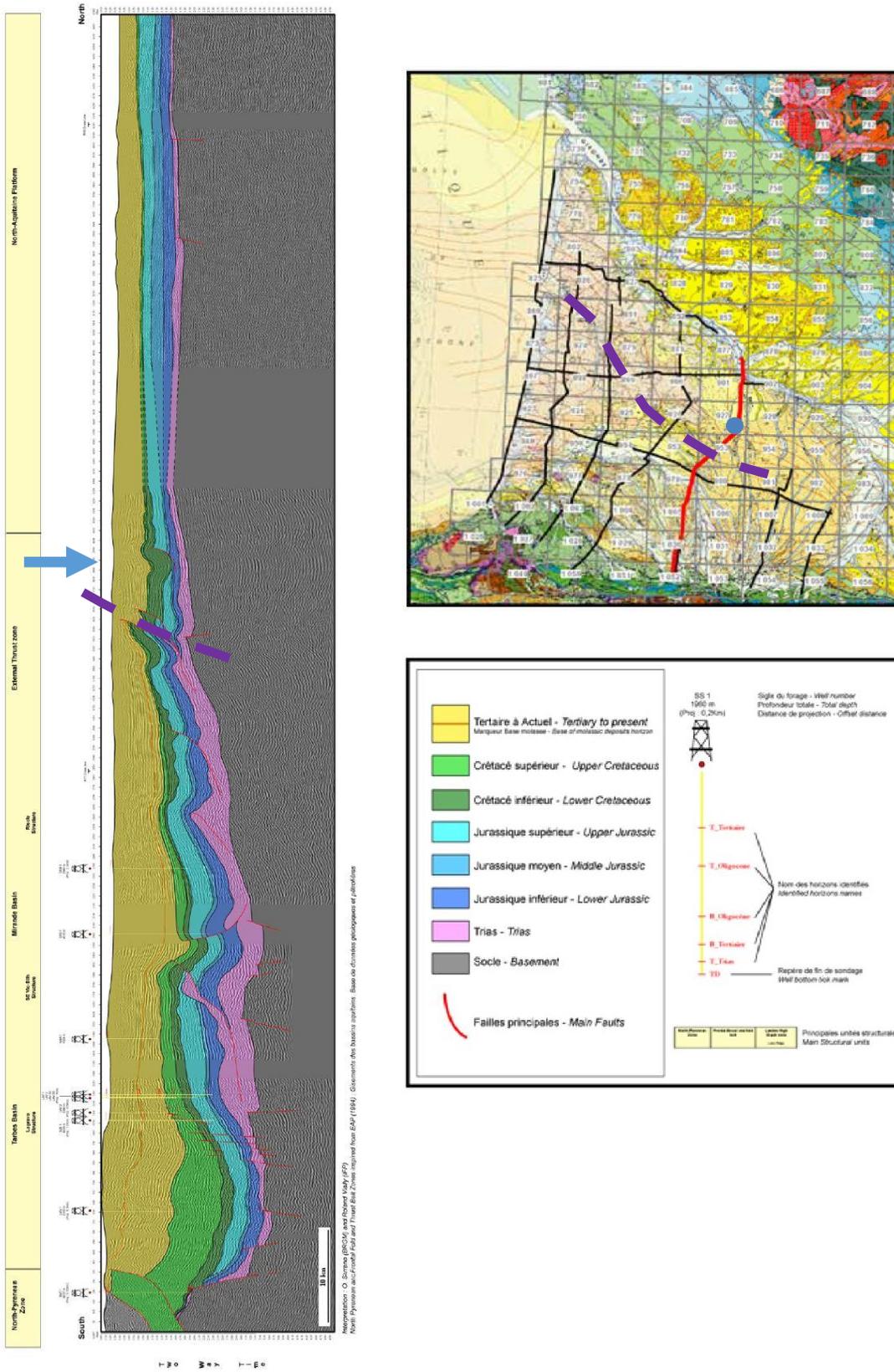


Illustration 29 - Localisation et profil de la ligne sismique régionale n°5 interprétée ; localisation de Gondrin (flèche et point bleus) et localisation de la flexure celtaquitanienne (tireté violet) (d'après Serrano et al., 2006)

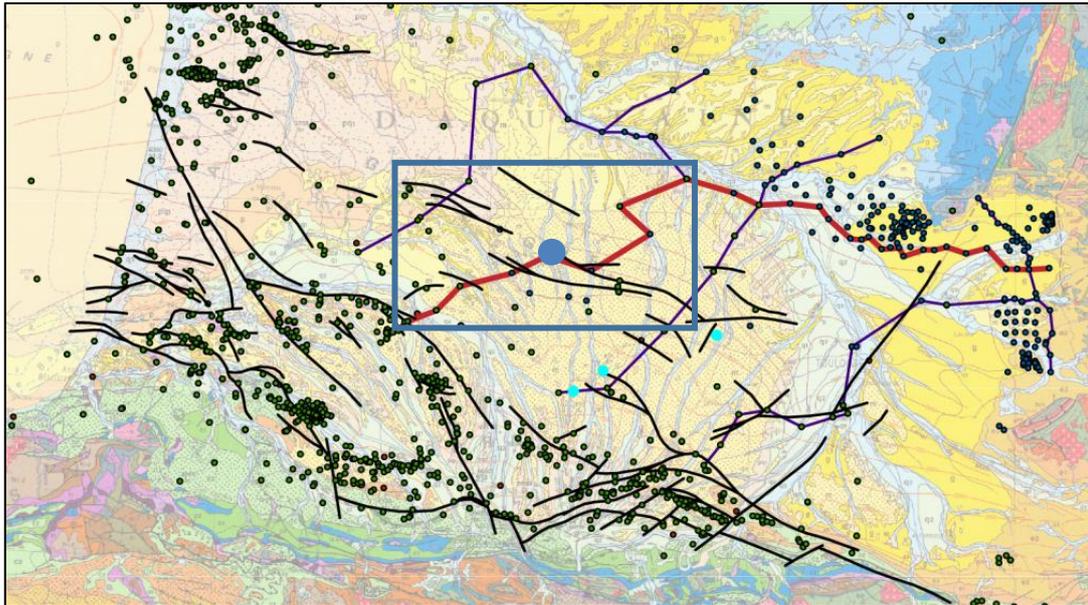


Illustration 30 - Localisation de la ligne de corrélation diagraphique partiellement présentée en Illustration 31 (rectangle bleu) ; localisation de Gondrin (point bleu) (d'après Serrano, projet GAIA, 2016)
 Les traits noirs correspondent aux failles sous couverture molassique, contrôlant la formation des plis anticlinaux, qui affectent les terrains mésozoïques du Bassin. Les forages profonds sont localisés par les points verts.

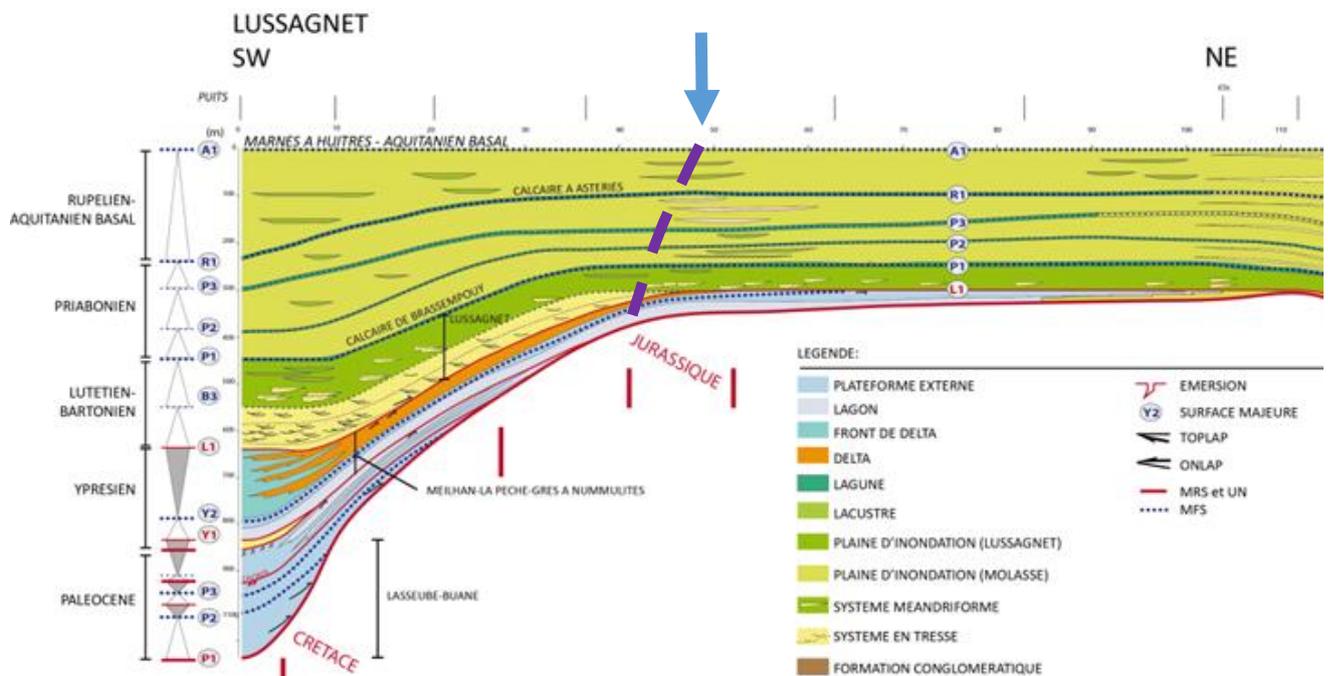


Illustration 31 - Profil de corrélation diagraphique (localisé sur l'illustration 30) ; localisation de Gondrin (flèche bleue) et localisation de la flexure celtaquitaine (tireté violet) (d'après Serrano, réunion de présentation du projet GAIA, 2016)

Au Crétacé supérieur, **des structures anticlinales** se mettent en place avec une structuration générale qui suit la direction de la flexuration régionale (Illustration 32). Ces structures sont généralement espacées sur des distances de l'ordre de la dizaine de kilomètres environ. Ces plissements anticlinaux se sont développés majoritairement à la faveur de l'inversion de failles normales d'extension, développées au cours du Crétacé inférieur, dans un contexte tectonique distensif et sont, au sud de la flexure celtaquitaine, principalement la conséquence d'une activité diapirique associée aux chevauchements lors de la compression pyrénéenne.

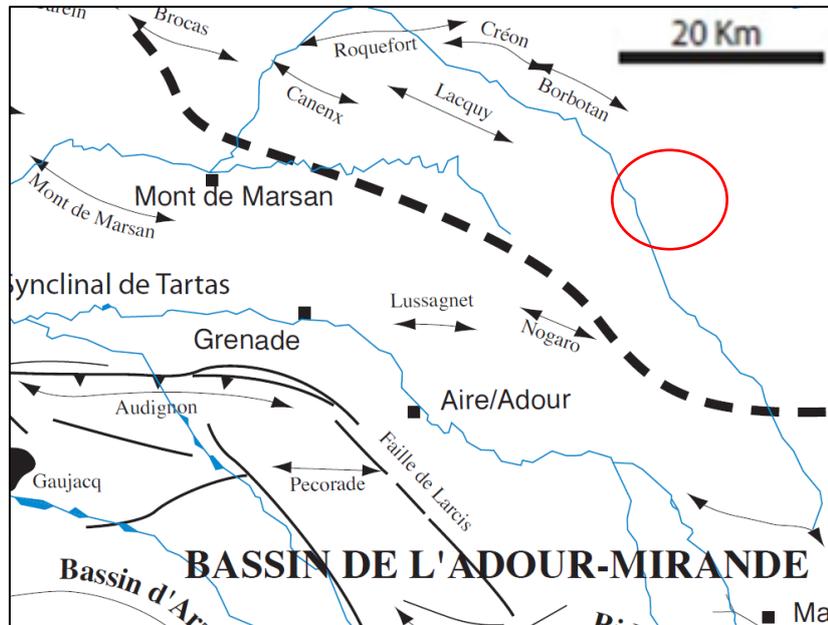


Illustration 32 - Carte structurale schématique autour du secteur d'étude de Gondrin (rond rouge) : structures anticlinales (doubles flèches noires) et flexure celtaquitaine (tireté noir) (Serrano, 2001)

L'illustration 32 présente, de manière très schématique, ces différentes structurations dans le sous-sol. On note principalement la présence de la flexure celtaquitaine, à proximité du secteur de Gondrin (la localisation de la flexure ici est très approximative, puisqu'elle s'étend sur plusieurs dizaines de kilomètres).

Comme évoqué précédemment, cette structure, qui est définie à l'échelle du Bassin d'Aquitaine, constitue une limite majeure entre un domaine septentrional, de type "plateforme" et un domaine méridional (Bassin de l'Adour-Mirande) où peuvent régner de forts taux de subsidence avec une accumulation de sédiments sur une épaisseur beaucoup plus importante.

La compression pyrénéenne, ainsi que le développement de bassins d'avant-pays, à mesure de la progression des nappes du sud vers le nord, ont entraîné, au sein du Bassin Adour-Mirande, l'individualisation de sous-bassins subsidents (Arzacq, Tarbes, Comminges), dans lesquels la pile de sédiments tertiaires va être d'autant plus développée.

Dans l'objectif de mieux appréhender la géométrie et la structuration des couches du sous-sol dans ce secteur, le projet GAIA a entrepris la réalisation d'un modèle géologique 3D, détaillé sur l'ensemble du piedmont pyrénéen occidental. Ce modèle géologique « GAIA » a été bâti à partir de profils sismiques et de forages existants dans le secteur. Le chapitre suivant en précise les principaux contours et présente quelques coupes du sous-sol exportées à partir de ce modèle, au niveau du secteur de Gondrin.

b) *Modèle géologique régional (Lasseur et al., 2021)*

L'objectif principal du projet GAIA consiste à mieux comprendre le fonctionnement hydrodynamique global du système aquifère multicouches du sud de l'Aquitaine, que ce soit concernant les modalités de recharge, les écoulements intra et inter aquifères (de façons directes ou à travers les épontes) ou le rôle des structures dans ces écoulements, etc.

Cela implique notamment l'étude des continuités hydrogéologiques de ce système multicouches à l'échelle régionale, mais également de manière plus localisée. Cela suppose ainsi de mieux connaître la géométrie et la structuration des formations géologiques concernées en trois dimensions, pour mieux appréhender les circulations potentielles :

- avec les formations géologiques limitrophes ;
- au niveau de l'ensemble de la pile sédimentaire, notamment au niveau des formations sus-jacentes pour des questions de recharges.

La définition de ces objectifs a donc impliqué la mise en place d'un modèle géologique de la pile tertiaire et d'une partie du Crétacé supérieur dans la région concernée par l'étude. Ce modèle géologique « GAIA », réalisé sous le logiciel ®Pétrel (Lasseur et al., 2021), est d'envergure régionale. Son étendue globale est présentée à l'illustration 33 suivante.

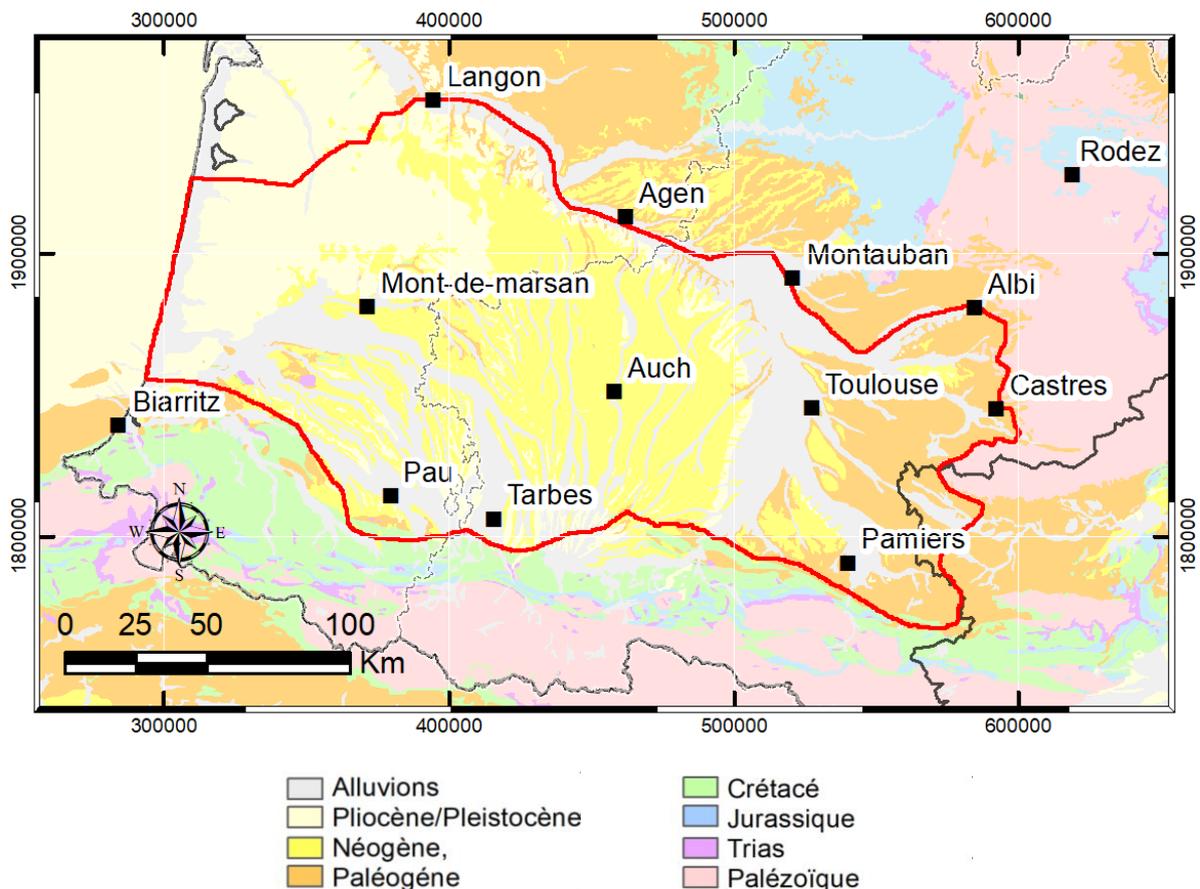


Illustration 33 - Carte de localisation du périmètre du modèle géologique « GAIA » sur la carte géologique simplifiée du sud-ouest de la France, d'après la carte géologique à 1/1 000 000 de la France 3^e édition révisée (Chantraine et al., 2006)

Les surfaces modélisées dans le modèle géologique « GAIA » sont les suivantes (Illustration 34) :

- BMS : base molasse supérieure ;
- BMI : base molasse inférieure ;
- BLU : base Lussagnet ;
- BGN : base Grès à Nummulites ;
- TFL : toit flysch ;
- BFL : base flysch ;
- Bter : base du Tertiaire ;
- BCamp : base du Campanien ;
- BCS : base Crétacé supérieur.

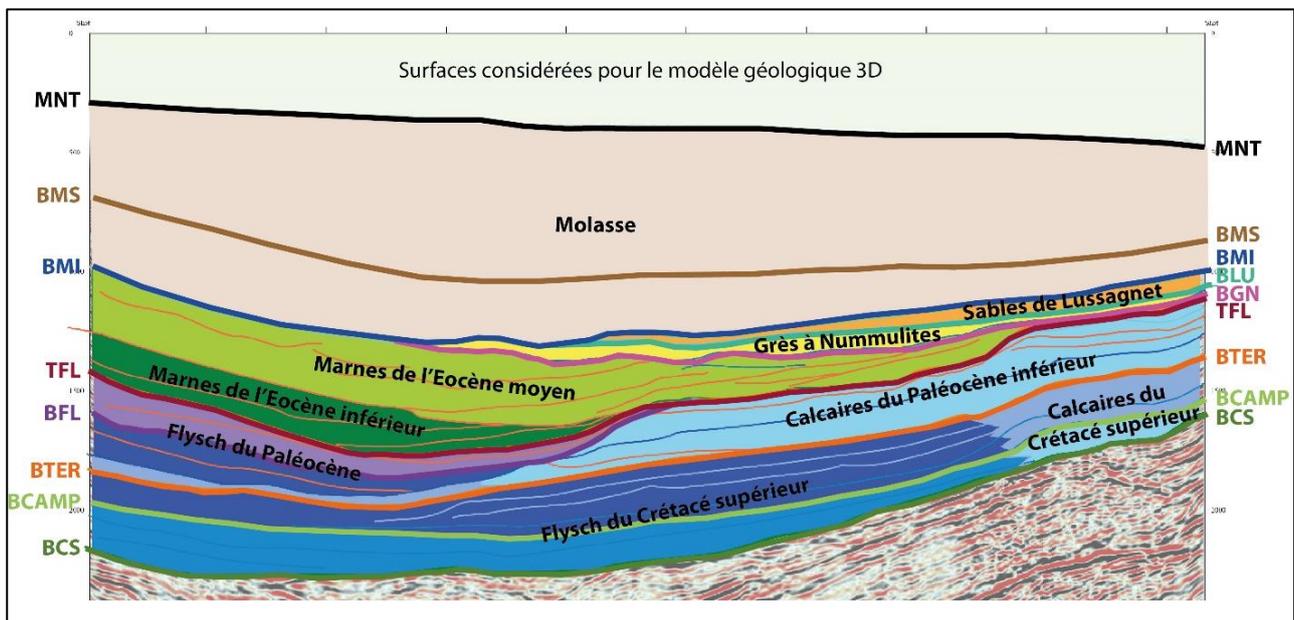


Illustration 34 - Surfaces géologiques modélisées dans le modèle géologique 3D (Lasseur et al., 2021)

Pour tirer profit de ce modèle, dans le cadre de l'étude des transferts hydrogéologiques dans le secteur de la butte de Gondrin, un certain nombre de coupes a été réalisé. La localisation des trois coupes, issues du modèle « GAIA », dans le secteur de Gondrin (Illustration 35 à Illustration 38), est présentée ci-dessous.

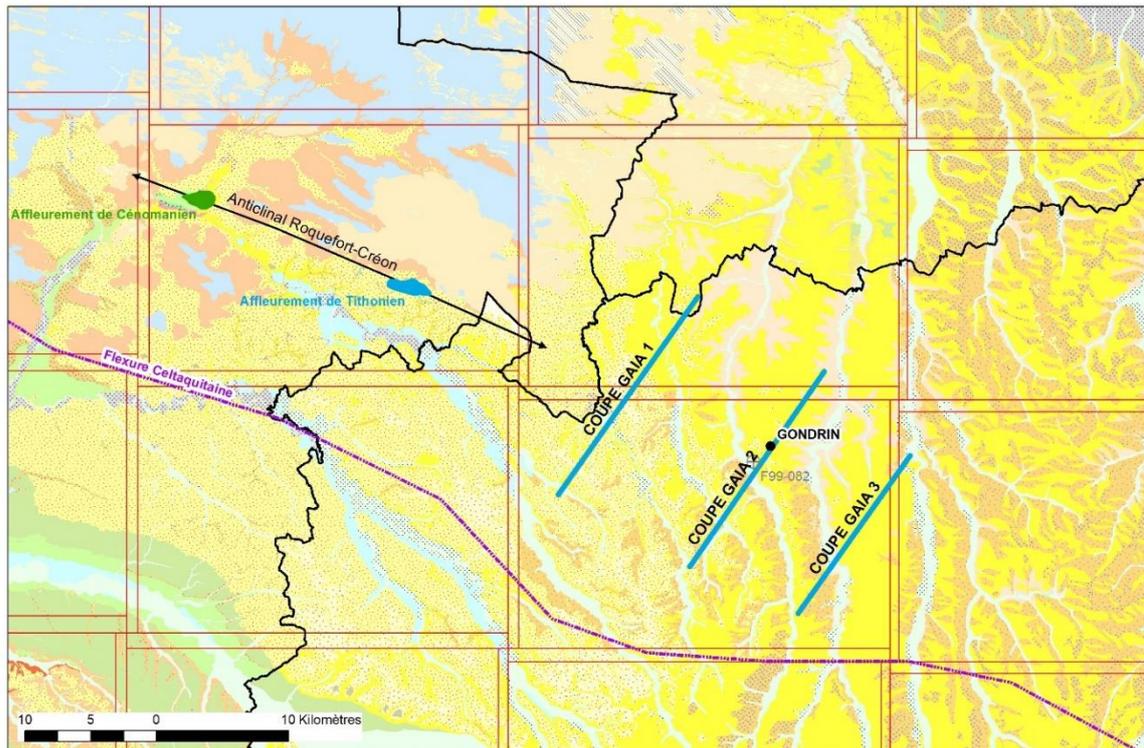


Illustration 35 - Localisation des trois coupes présentées dans le modèle « GAIA », du forage de Gondrin (09533X0016/F - BSS002EFWR) (réf. GAIA - F99-082) et positionnement de l'anticlinal de Roquefort-Créon avec les affleurements de Cénomanien et de Tithonien (cartes géologiques au 1/250 000 de l'Aquitaine et de Midi-Pyrénées, centrées sur le secteur de Gondrin)

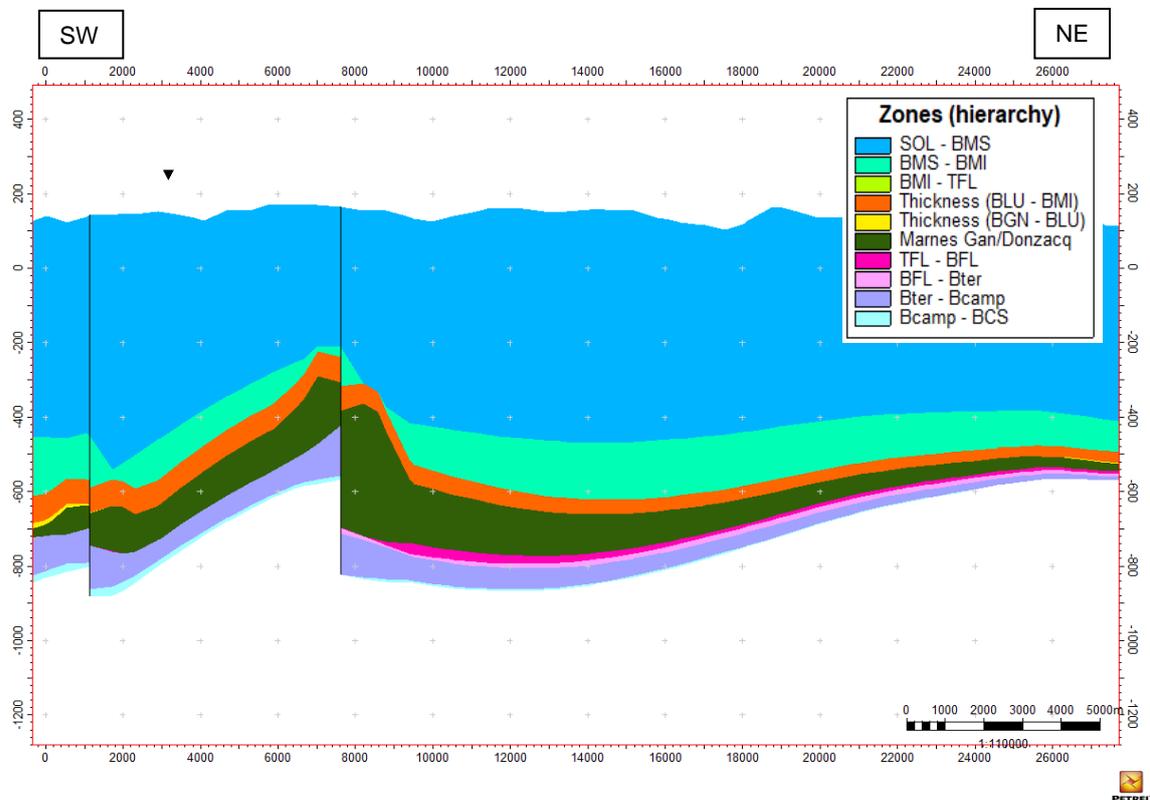


Illustration 36 - Coupe GAIA 1 (extrait du modèle géologique 3D - Lasseur et al., 2021)

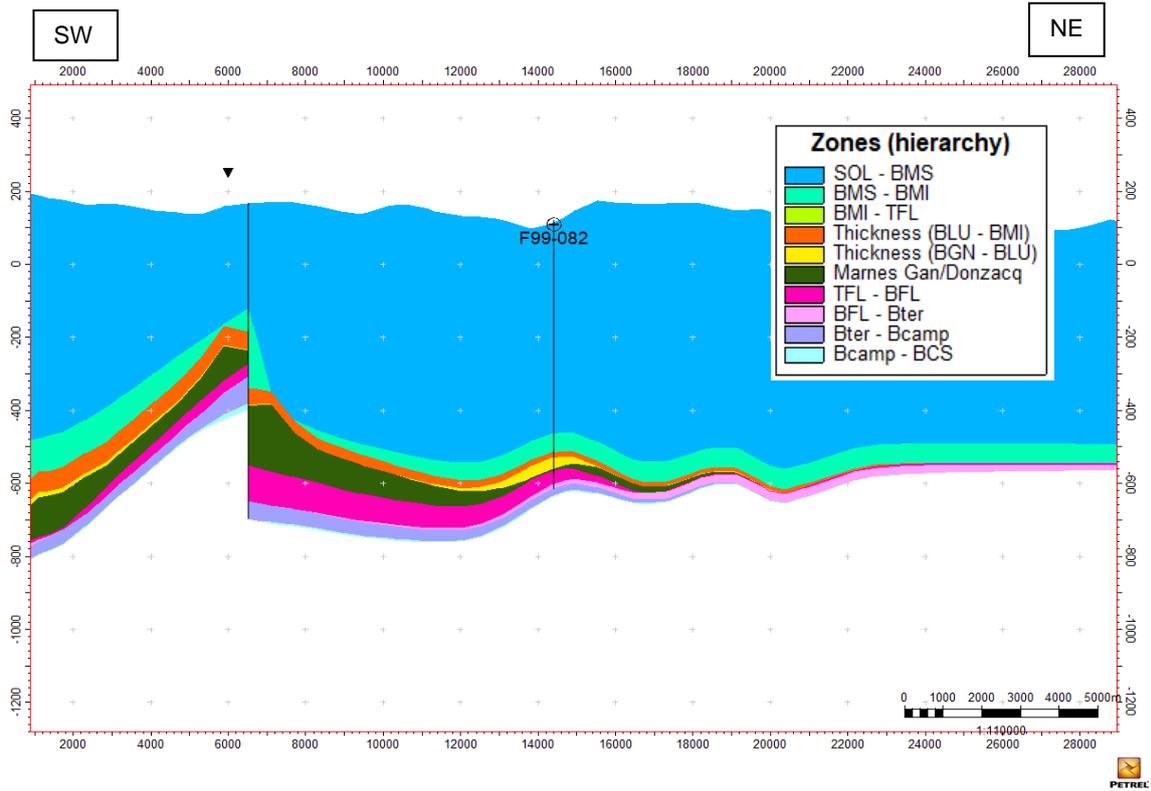


Illustration 37 - Coupe GAIA 2 (extrait du modèle géologique 3D - Lasseur et al., 2021)

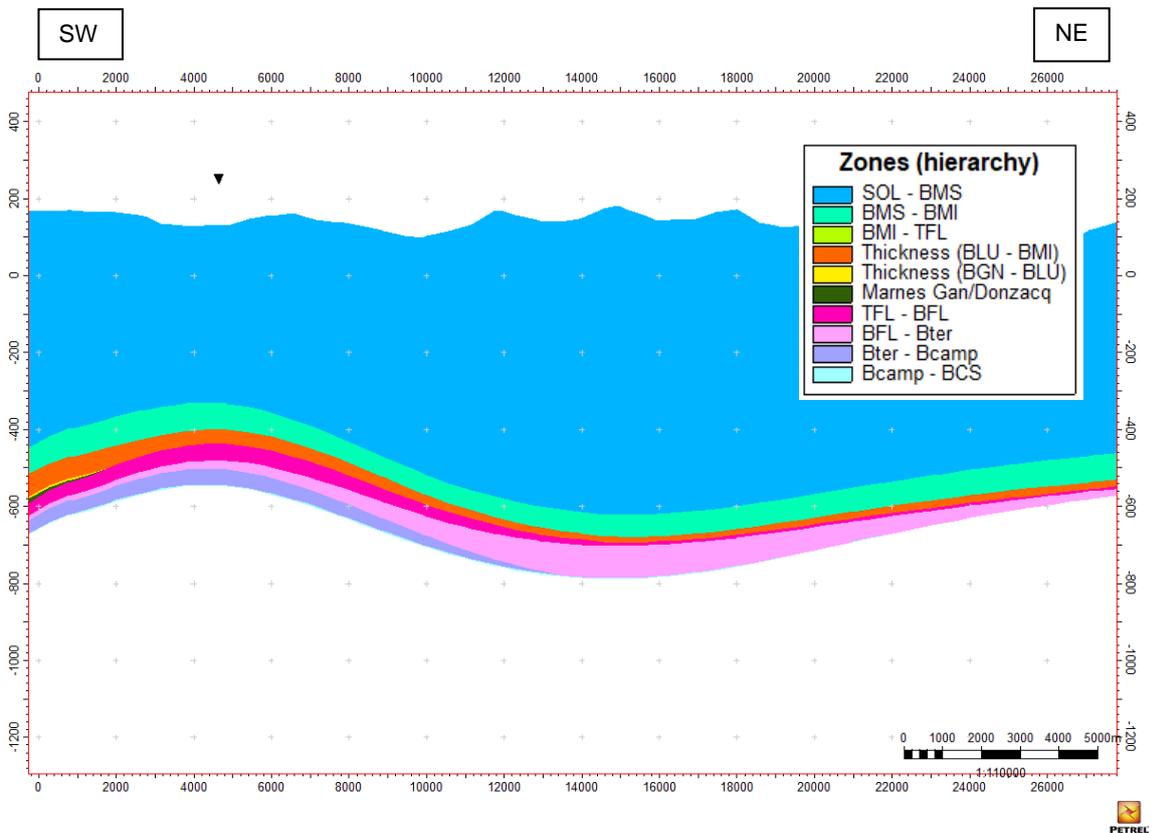


Illustration 38 - Coupe GAIA 3 (extrait du modèle géologique 3D- Lasseur et al., 2021)

Sans illustrer la présence de la flexure celtaquitaine, les trois coupes présentées ci-dessus soulignent une épaisseur des dépôts du Crétacé supérieur et de la base du Tertiaire plus importantes, à mesure que l'on se dirige vers le sud-ouest.

A environ 7 km au sud-ouest du forage 09533X0016/F (BSS002EFWR) (réf. GAIA - F99-082), situé sur la commune de Gondrin, on note la présence d'une **faille majeure** qui décale notamment les séries paléogènes. Il s'agit ici du prolongement à l'extrême sud-est de la **structure anticlinale faillée d'axe N110 de Roquefort-Créon** où le Tithonien est mis à l'affleurement (zone située à environ 30 km de Gondrin vers le nord-ouest). La géométrie détaillée de la structure dans ce secteur et celle des formations géologiques associées seraient à préciser, car pour des besoins de modélisation, les failles ont été dessinées ici de manière verticale.

Au droit du forage F89-082 situé à Gondrin (Illustration 37), un anticlinal de second ordre, au nord-est du pli-faille majeur décrit ci-dessus, est également visible. Il affecte la molasse inférieure et entraîne localement une moindre épaisseur de la molasse supérieure d'une cinquantaine de mètres environ.

4.3. GEOLOGIE DETAILLEE DE LA BUTTE DE GONDRIN

La carte ci-dessous présente la géologie détaillée dans le secteur de Gondrin.

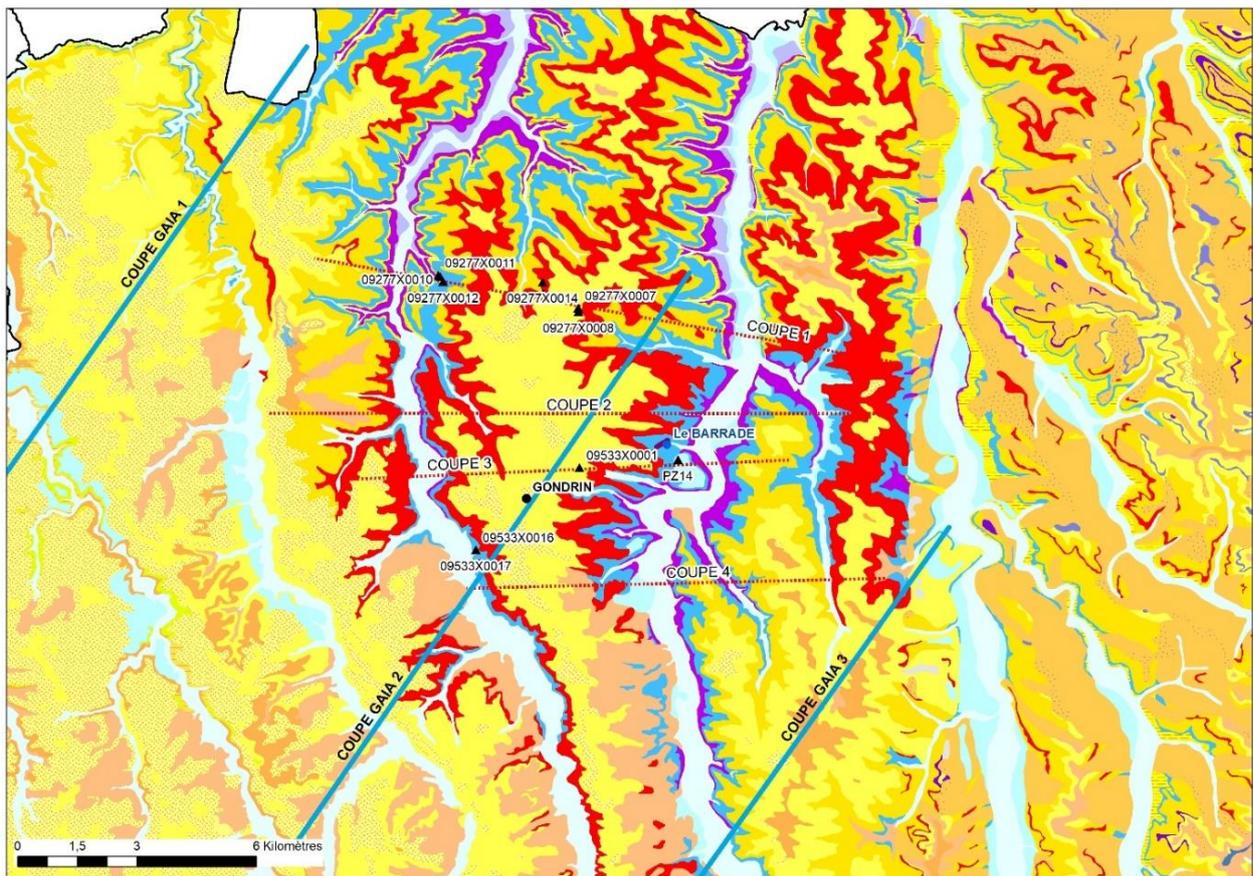


Illustration 39 - Carte géologique à 1/50 000 dans le secteur de Gondrin (carte géologique harmonisée du Gers), localisation des indices BSS dans le secteur, coupes « GAIA » et coupes locales (légende Illustration 40)

Légende	
	CFM, Holocène. Colluvions argilo-sableuses à limoneuses, tardiglaciaires à actuelles, issues des formations fluviatiles et molassiques. Allèrites limono-argileuses - 2
	Fz, Holocène. Alluvions fluviatiles actuelles et récentes d'âge compris entre 11430 et 0 BP : sables micacés, argiles tourbeuses et siltueuses grises - 5
	Fyb, Pléistocène supérieur. Alluvions würmiennes des terrasses inférieures des rivières et alluvions anciennes des rivières : graviers, galets siliceux, limons, sables grisâtres à fines passées argileuses grises et jaunes - 6
	Fxb, Pléistocène moyen. Alluvions rissiennes des terrasses moyennes : galets siliceux et limons - 8
	Fv, Pléistocène inférieur terminal. Alluvions des niveaux supérieurs attribuées au Günz : galets siliceux, argile rubéfiée - 11
	Fp-IV, Pliocène supérieur - Pléistocène inférieur. Nappe alluviale de très haut niveau, datée du Biber-Donau : petits galets rubéfiés - 12
	Rg-m, Quaternaire indifférencié. Formations résiduelles des plateaux : éluvions limoneuses, argileuses ou sableuses - 14
	RCg-m, Quaternaire indifférencié. Formations résiduelles de pente issues de la molasse : formations colluviales argilo-limoneuses décalcifiées, ocre ou ocre-rouge - 15
	m5GB, Tortonien. Formation des Glaises bigarrées : argiles bariolées à passées sableuses, argiles à galets - 20
	m4, Serravallien. Molasses : niveaux des cailloutils de l'Astarac, des calcaires d'Alan, des molasses du Fousseret et des calcaires supérieurs de l'Astarac - 21
	m4SF, Serravallien. Formation des Sables fauves : sables moyens à fins, plus ou moins argileux, ocres à blancs - 24
	m3-4SF, Langhien-Serravallien. Formation des Sables fauves (faciès marin épicontinentaux) : grès calcaire bioclastique. Faluns de Manciet : graviers, sables, grès (Langhien) - 26
	m3, Langhien. Molasses : niveaux des calcaires inférieurs de l'Astarac - 29
	g2-m2, Chattien à Burdigalien supérieur. Molasses de type Armagnac : argiles carbonatées, siltueuses, jaunâtres (partie occidentale). Molasses : niveaux des calcaires supérieurs de Lectoure et du calcaire d'Auch (partie orientale) - 30
	m2Ca, Burdigalien supérieur. Bancs calcaires dans la formation molassique du Calcaire d'Auch - 31
	m2bc, Burdigalien moyen. Bancs calcaires dans la formation molassique de Larroque-Saint-Sernin : Calcaires de Peilécabus, Calcaires inférieurs de Lectoure et Calcaires de Larroque-Saint-Sernin - 33
	m2b, Burdigalien moyen. Molasses de type Armagnac (argiles carbonatées siltueuses jaunâtres) : niveaux des calcaires de Peilécabus, des calcaires inférieurs de Lectoure, des calcaires de Larroque-Saint-Sernin - 34
	m2bCL, Burdigalien moyen. Bancs calcaires dans la formation molassique des Calcaires inférieurs de Lectoure - 35
	m2bcP, Burdigalien moyen. Bancs calcaires dans la formation molassique des Calcaires de Peilécabus - 36
	m2a, Burdigalien inférieur. Molasses de type Armagnac (argiles carbonatées, siltueuses, jaunâtres) - 39
	m2aC, Burdigalien inférieur. Molasses : niveaux des calcaires de Gondrin, de Herret et de Mauvezin - 40
	m1bcc, Aquitanien moyen à supérieur. Calcaire gris de l'Agonais : calcaires palustres et lacustres gris à beige clair - 41
	m1, Aquitanien. Marnes à Ostrea agnensis : argiles carbonatées gris jaune siltueuses, passées marines à hutres (partie occidentale du département). Molasses indifférenciées et marnes (partie orientale) - 42
	m1aC, Aquitanien inférieur. Calcaire blanc de l'Agonais : calcaires lacustres blancs - 43
	g1, Rupélien : Stampien supérieur. Molasses de l'Agonais : argiles carbonatées siltueuses jaunâtres - 44

Illustration 40 - Légende de la carte géologique harmonisée du Gers à 1/50 000, dans le secteur de Gondrin

4.3.1. Stratigraphie et géométrie de la pile molassique

a) Base de données des forages

Forage 09533X0016/F

Le forage visible dans les illustrations du chapitre précédent (réf. GAIA - F99-082, illustrations Illustration 35 et Illustration 37) est enregistré dans la BSS avec l'indice 09533X0016/F - BSS002EFWR. Situé sur la commune de Gondrin, il s'agit d'un forage pour l'eau potable, réalisé en 1987, à une profondeur de 728 mètres. Sa cote altimétrique est d'environ 111 mètres NGF. Il avait pour objectif d'atteindre les niveaux sableux infra-molassiques, qui présentent un bon potentiel aquifère.

D'après ce forage, la pile de sédiments molassiques, dans le secteur de Gondrin, atteint une épaisseur de l'ordre de 600 mètres. La coupe lithostratigraphique initiale est présentée dans le tableau ci-dessous (Tableau 9).

Profondeur	Lithologie	Stratigraphie
De 0.0 à 1.0 m	REMBLAI: LIMON	
De 1.0 à 34.0 m	ARGILE JAUNE CARBONATEE	MIOCENE
De 34.0 à 613.0 m	MOLASSE, ARGILE, BANC GRESEUX, GYPSE	OLIGOCENE
De 613.0 à 693.0 m	ALTERNANCE DE BANCS DE SABLE ET D'ARGILE (+ CUSIEN-SUP)	de EOCENE-INF a YPRESIEN a CUISIEN a YPRESIEN
De 693.0 à 728.0 m	CALCAIRE GRIS BEIGE	LIAS

Tableau 9 - Coupe lithostratigraphique initiale du forage 09533X0016/F (BSS002EFWR)

Les données sismiques du secteur ont permis d'identifier les surfaces réflectrices principales au sein de la molasse. Une réinterprétation de la coupe de ce forage a été effectuée dans le cadre du projet GAIA. Elle a été modifiée⁴ de la manière suivante :

Profondeur (m/TN)	Alt. toit (m NGF)	Epais. (m)	Formation	Stratigraphie
0 - 572	111	572	Molasse supérieure	Rupélien à Miocène moyen
572 - 624	-461	52	Molasse inférieure	Lutétien sup. à Rupélien
624 - 640	-513	16	Sables de Lussagnet	Yprésien sup. à Lutétien inf.
640 - 674	-529	34	Grès à Nummulites	Yprésien inf.
674 - 712	-563	38	Flysch paléocène	Sélandien à Thanétien
712 - 728	-601	16	Calcaire	Danien

Tableau 10 - Coupe lithostratigraphique du forage 09533X0016/F (BSS002EFWR), réinterprétée dans le cadre du projet GAIA et intégrée dans la base (réf. F89-002)

Les termes de références lithostratigraphiques, utilisés pour la réinterprétation de ce forage, ont été définis dans le cadre de l'étude GAIA.

⁴ Les levés des coupes lithologiques sont parfois soumis à certaines incertitudes, notamment lorsque la description des terrains en dehors des cibles visées présente peu d'intérêt pour les foreurs. Toutefois, l'interprétation qui peut être établie sur la base de données croisées reste donc subjective et discutable.

Forages 09533X0017 et 09533X001

Ces deux forages sont moins profonds que le précédent. Le forage 09533X0017 (BSS002EFWS) a atteint 50 m de profondeur, et le forage 09533X0001 (BSS002EFWB) 103,5 m de profondeur. La localisation de ces forages est présentée dans l'illustration 39. Il est à noter que le forage 09533X0017 est très proche du forage 09533X0016.

La description géologique des terrains traversés est plus détaillée, permettant ainsi de proposer les coupes lithostratigraphiques suivantes.

Prof (m)	Alt. toit (m)	Ep. (m)	Description des terrain	Formation géologique	Stratigraphie
09533X001					
0-10	150	10	Calcaire	Calcaire de Gondrin	Burdigalien inférieur
10-39	140	29	Argiles jaunes gonflantes	Molasse	-
39-51	111	12	Calcaire	Calcaire gris de l'Agenais	Aquitanien supérieur
51-75	99	24	Sables + alternances calcaire	Molasse	-
75-103,5	75	28,5	Calcaire (pertes vers 85 m)	Calcaire blanc de l'Agenais	Aquitanien inférieur
09533X0017					
0-2	111	2	Limons	Colluvions ?	-
2-7	109	5	Marne gris-jaune	Calcaire gris de l'Agenais	Aquitanien supérieur
7-9	104	2	Grès tendre à ciment calcaire	Calcaire gris de l'Agenais	Aquitanien supérieur
9-13	102	4	Marne gris-vert	Molasse	-
13-17	98	4	Argile sableuse ocre	Molasse	-
17-33,5	64	16,5	Marne ocre et gris-blanc parfois gréseuse	Molasse	-
33,5-37	77,5	3,5	Calcaire lacustre gréseux et karstifié	Calcaire blanc de l'Agenais	Aquitanien inférieur
37-50	74	13	Marne blanche + alternance calcaire gréseux jaune	Calcaire blanc de l'Agenais	Aquitanien inférieur

Tableau 11 - Coupes lithostratigraphiques interprétées des forages 09533X001 et 09533X0017

La comparaison entre les forages 09533X0016 et 17 n'est pas évidente, compte tenu de la description moins détaillée du premier qui atteint une profondeur beaucoup plus importante.

Toutefois, les descriptions lithostratigraphiques de ces deux coupes de forages dressent une structure plus ou moins tabulaire des terrains, dans ce secteur, jusqu'à une profondeur d'au moins 70 mètres. On peut ainsi établir une coupe synthétique des formations molassiques identifiées dans le secteur de la manière suivante, de haut en bas :

- limon argileux (colluvions ?) : 0 à 2 mètres identifiés ;
- calcaire de Gondrin : épaisseur d'~10 mètres (apparition vers 150 m NGF) ;
- argiles carbonatées molassiques intercalées : épaisseur de 29 mètres ;

- Calcaire gris de l'Agenais : épaisseur de 7 à 12 mètres (apparition vers 109/111 m NGF) ;
- molasse hétérogène (argile, marne et sable) : épaisseur de 24 mètres environ (apparition vers 99/102 m NGF) ;
- Calcaire blanc de l'Agenais : épaisseur reconnue entre 16,5 et 28,5 mètres (apparition vers 75/77,5 m NGF).

Ces informations sont fournies ici à titre indicatif et sont dépendantes des descriptions des forages. Un levé détaillé de terrain, notamment le long des flancs de la butte de Gondrin, permettrait d'effectuer une cartographie plus précise.

Les données de ces deux forages indiquent la présence d'intercalations entre les formations lacustres calcaires. Ces intercalations peuvent être de nature argilo-marneuse et, à ce titre, présenter un caractère peu perméable, plus marqué que les autres niveaux géologiques rencontrés.

Ces considérations resteraient toutefois à préciser par des investigations de terrain plus détaillées, afin d'être validées. Ces dernières permettraient éventuellement de mieux préciser la nature lithologique des formations présentes, ainsi que leurs caractéristiques hydrogéologiques.

b) Carte géologique à 1/50 000 d'Eauze (feuille n°953) et notice descriptive

D'après les éléments décrits dans la notice de la carte géologique à 1/50 000 d'Eauze, une présentation des terrains en place dans le secteur de Gondrin est développée dans le tableau ci-dessous (Tableau 12) :

Stratigraphie	Formations géologiques	Description	Epaisseur	Position
Pléistocène à Holocène	Alluvions polygéniques des basses terrasses	Alluvions sablo-graveleuses		Peu étendues et discontinues
Pléistocène	Alluvions de fond de vallées	Alluvions sableuses, très argileuses, peu caillouteuses		
Langhien à Serravalien	Sables Fauves à Ostrea Crassissima	Peu cohérents, ces sables s'effondrent et coulent sur tous les terrains.	3 à 5 m	Base érosive
Burdigalien supérieur	Calcaire sup. de Lectoure		5 à 9 m	
Burdigalien moyen	Calcaire Pellécahus Calcaire inf. de Lectoure Calcaire de Larroque St-Sernin	Calcaires dominants	C. Pellécahus < 3 m C. de Larroque 6 à 9 m	
Burdigalien inférieur	Calcaires de Gondrin / Herret	Bancs durs importants et continus C. Gondrin : base détritique	C. Gondrin : 6-9 m C. Herret : 6-10 m	
Aquitainien supérieur	Calcaire gris de l'Agenais	Calcaire blanc et jaune taché d'ocre	7 à 8 m	Surmonte des marnes
Aquitainien inférieur	Calcaire blanc de l'Agenais	Calcaire blanc taché d'ocre et de jaune		Surmonte des bancs de faciès détritique

Tableau 12 - Description et principales caractéristiques des terrains à l'affleurement dans le secteur de Gondrin, tels que décrits sur la carte géologique au 1/50 000 d'Eauze (d'après A. Faucher)

On constate que la carte géologique à 1/50 000 (Eauze) indique majoritairement la présence de niveaux calcaires et présente peu de détail quant aux niveaux marneux et silto-carbonatés qui peuvent s'y intercaler. Les calcaires lacustres, bien que particulièrement épais au droit du secteur de Gondrin, peuvent effectivement être séparés par des niveaux intermédiaires avec des

caractéristiques hydrogéologiques moins perméables. Un examen détaillé de ces discontinuités est nécessaire pour comprendre les transferts hydrogéologiques verticaux qui peuvent s'opérer au sein de la série molassique dans ce secteur.

Les coupes suivantes (Illustration 41 et Illustration 42) ont été réalisées à partir de la carte géologique à 1/50 000 d'Eauze (d'après A. Faucher). Toutefois, il faut noter que ces coupes sont fortement interprétatives, compte tenu des descriptions très regroupées dans les niveaux de molasse (qui semblent donc uniquement porter le nom du calcaire sommital), et dans lesquels les lithologies sont variables (marnes, molasses, calcaires). Les niveaux marneux molassiques doivent cependant être confrontés aux données de forages existants, ainsi qu'aux données de terrain (levés spécifiques à réaliser).

NB : des planches photographiques sont présentées en annexe 3. Elles illustrent les différents faciès rencontrés dans les secteurs qui sont décrits ci-dessus.

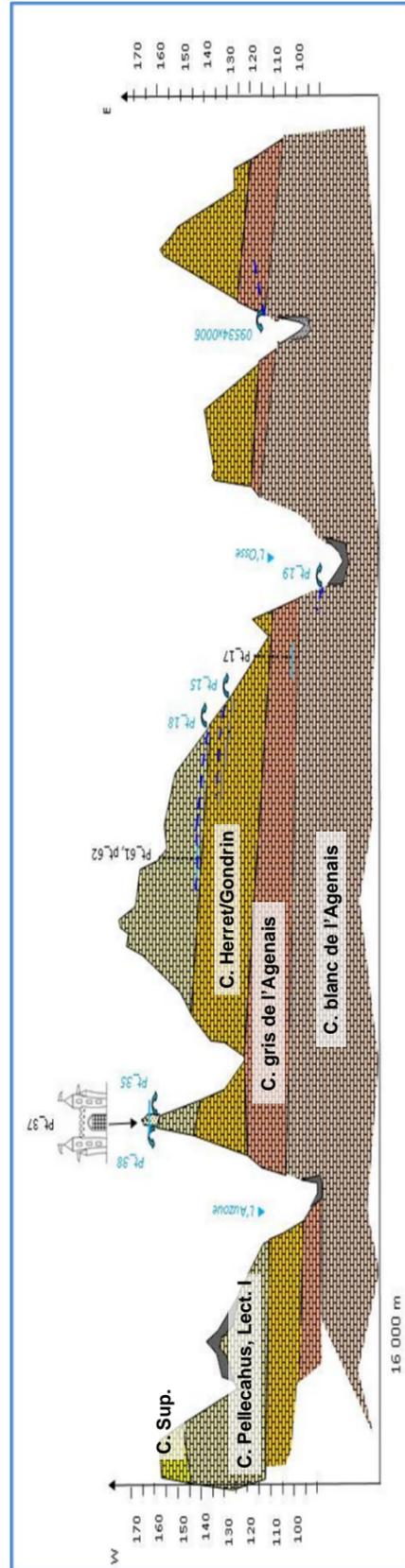


Illustration 41 - Coupes 1 et 2 (respectivement gauche et droite) présentées dans l'illustration 39 (A. Faucher, à partir de la carte géologique au 1/50 000)

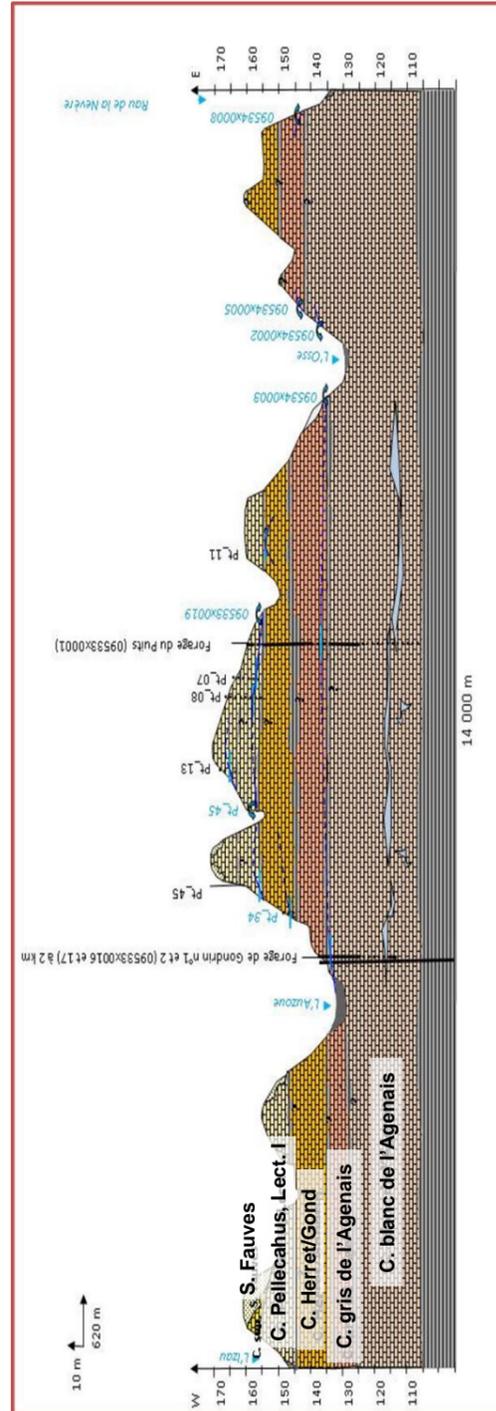
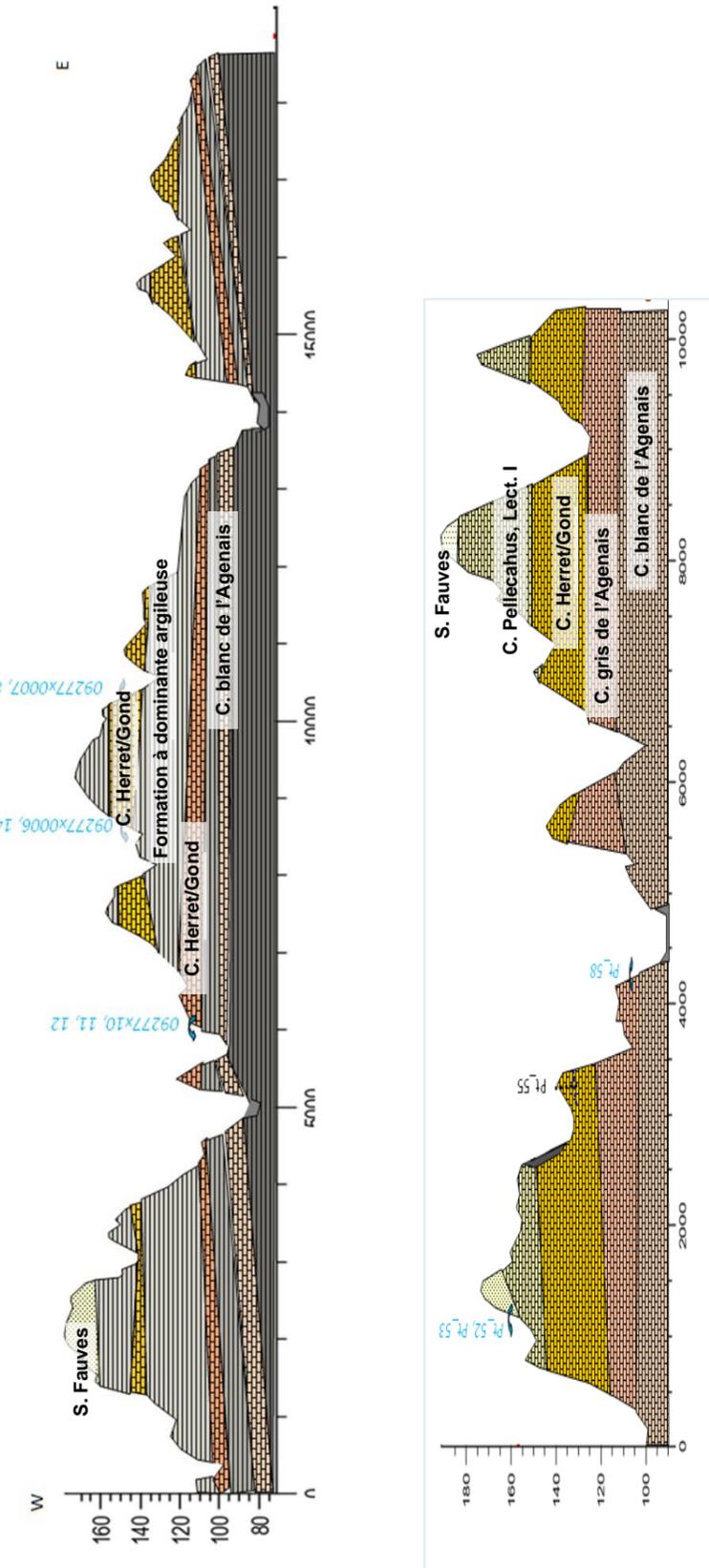


Illustration 42 - Coupes 3 et 4 (respectivement gauche et droite) présentées dans l'illustration 39 (A. Faucher, à partir de la carte géologique au 1/50 000)



c) Paléogéographie du Tertiaire molassique

Les données obtenues grâce aux forages et leur datation ont permis d'interpréter la paléogéographie de ce secteur du Bassin aquitain, pendant le dépôt des molasses. Ces interprétations permettent de dessiner les limites d'extension des différents faciès des formations géologiques, auxquels on attribue des propriétés aquifères dans les modèles hydrogéologiques. La partie suivante expose les connaissances actuelles des milieux de dépôts du secteur de Gondrin.

A partir du Lutétien supérieur (Eocène moyen) et jusqu'à la fin du Burdigalien (Miocène inférieur), le secteur de Gondrin s'inscrit, d'un point de vue paléogéographique, en domaine continental (Illustration 43 et Illustration 44). Dès lors, les dépôts sédimentaires sont constitués exclusivement d'argiles plus ou moins sableuses et carbonatées, ainsi que de calcaires lacustres (sédimentation molassique de type fluviale, lacustre ou palustre, voir § 4.1).

Molasse « inférieure » (Eocène moyen à Oligocène inférieur)

D'un point de vue lithologique, les faciès de la molasse inférieure sont constitués de dépôts argilo-carbonatés à marneux, avec parfois une fraction plus ou moins grossière, notamment lorsque l'on se situe dans un paléo-chenal du réseau fluviale.

D'après la coupe géologique du forage 09533X0016/F, une ou plusieurs intercalations de gypse sont décrites au sein de la molasse inférieure. Le gypse est présent soit sous forme pulvérulente, soit en gros cristaux maclés de type « fer de lance ».

Géométriquement, la molasse inférieure présente une épaisseur d'environ 50 mètres dans le secteur de Gondrin, ce qui est relativement faible en regard de l'épaisseur de l'ensemble de la pile molassique.

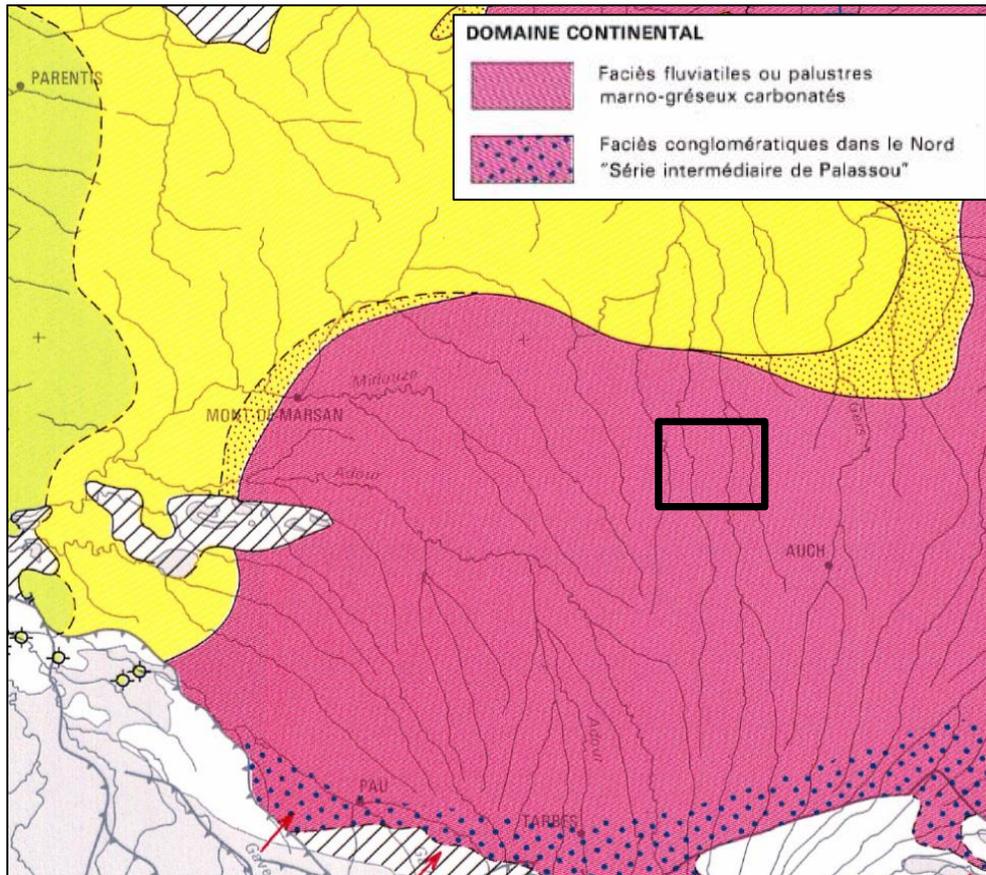


Illustration 43 - Carte paléoenvironnementale au Bartonien (Synthèse géologique et géophysique des Pyrénées, BRGM-AGSO, 2018) et localisation du secteur de Gondrin (rectangle noir)

Molasse « supérieure » et équivalent chronologique marin (Oligocène inférieur à Miocène moyen)

- Molasse supérieure (Oligocène inférieur)

L'Oligocène marque la limite entre le passage de la molasse inférieure à la molasse supérieure. Cette dernière présente une épaisseur plus conséquente que celle de la molasse inférieure, avec environ 570 mètres de puissance.

De nombreuses intercalations de calcaires lacustres y sont mentionnées et décrites dans les notices des cartes géologiques au 1/50 000, notamment dans la partie supérieure de la molasse supérieure. Cet ensemble très influencé par des dépôts lacustres correspond aux dépôts aquitaniens constitutifs de la **molasse de l'Agenais supérieure**.

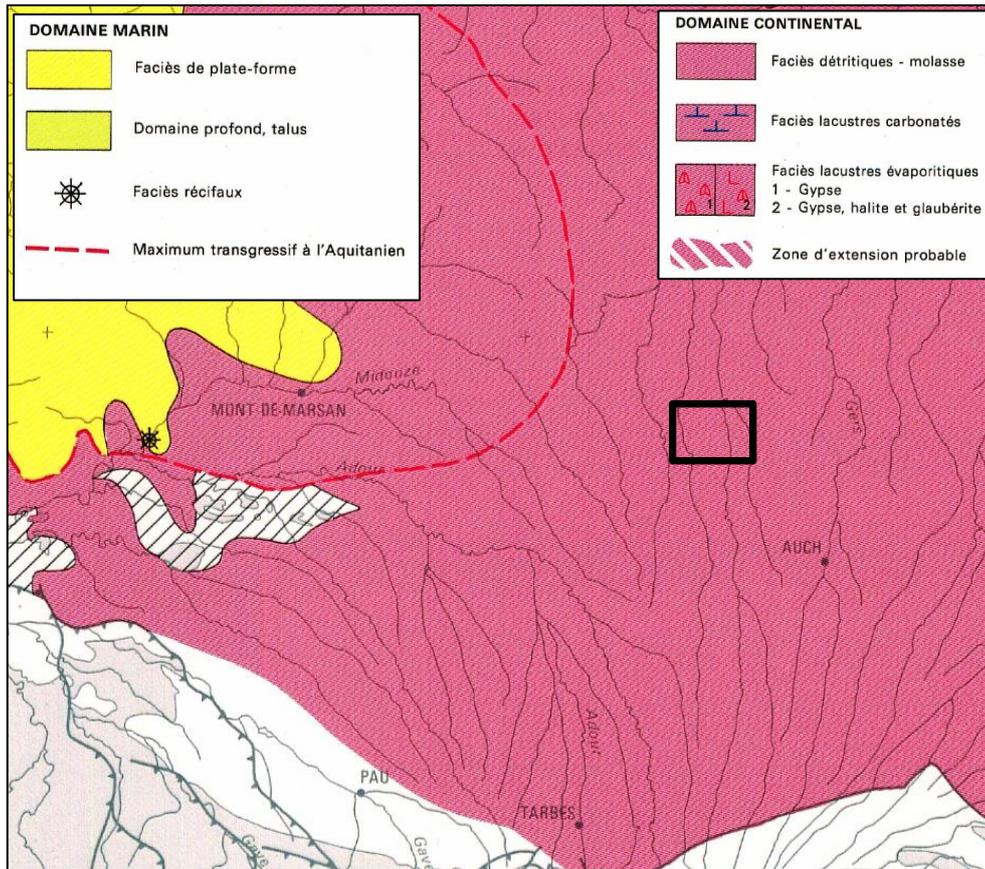


Illustration 44 - Carte paléoenvironnementale entre le Rupélien et l'Aquitarien (Synthèse géologique et géophysique des Pyrénées, BRGM-AGSO, 2018) et localisation du secteur de Gondrin (rectangle noir)

En effet, durant certaines périodes, des zones en dépression sont le siège de phénomènes complexes de dissolution et de précipitation des ions carbonates de calcium dans les eaux souterraines. Dans ce contexte lacustre, riche en éléments carbonatés, la formation progressive de bancs calcaires se développe.

Dans le département du Gers, un certain nombre de niveaux de calcaires lacustres sont observés de manière assez continue dans le paysage. Les importantes superficies relevées, de même que les importantes épaisseurs observées (jusqu'à plusieurs dizaines de mètres), permettent ainsi d'appréhender leurs géométries.

Les principaux niveaux lacustres appartiennent à la formation de la molasse de l'Agenais, couvrant l'Aquitarien, et à la molasse miocène, couvrant le Burdigalien. On y rencontre de haut en bas :

- le calcaire de Lectoure supérieur (Burdigalien supérieur) ;
- les calcaires de Lectoure inférieur, de Pellecahus et de Larroque-Saint-Cernin (Burdigalien moyen) ;
- les calcaires de Gondrin et de Herret (Burdigalien inférieur) ;
- le Calcaire gris de l'Agenais (Aquitarien supérieur) ;
- le Calcaire blanc de l'Agenais (Aquitarien inférieur).

Des niveaux calcaires plus jeunes que le calcaire de Lectoure supérieur sont mentionnés, notamment sur la carte géologique au 1/50 000 du BRGM (feuille d'Eauze n°953). Il s'agit par exemple des calcaires de Sansan, de Montlezun et de Bassoues (Langhien supposé) et du calcaire supérieur de l'Astarac (Serravalien supposé). Dans le secteur de Gondrin, ces derniers sont toutefois en partie arasés par l'érosion tortonienne et quaternaire, et ne sont représentés que par des buttes-témoins.

Compte tenu de leur lithologie, de leur porosité matricielle et de leur épaisseur, les **calcaires de Gondrin et de Herret** ont fait l'objet d'une **karstification**. Cette caractéristique est décrite dans la notice de la carte géologique d'Eauze (n°953). Toutefois, cette karstification reste en toute vraisemblance peu étendue.

- Miocène inférieur marin

Le Miocène est marqué par plusieurs épisodes transgressifs, associés à des dépôts sédimentaires à caractère littoral de mer peu profonde.

Au cours de l'Aquitaniens, la limite atteinte par le rivage, pendant l'épisode du maximum de transgression dans ce secteur, est identifiée sur la carte paléoenvironnementale de l'époque (Illustration 44). La sédimentation associée à l'environnement marin transgressif a donné lieu à la mise en place de calcaires coquilliers (faluns), comme ceux de la formation des **faluns de Saint-Avit**, des calcaires gréseux et des grès à Miogypsine.

Le secteur de Gondrin n'est a priori pas concerné par cette incursion marine aquitaniens. La sédimentation enregistrée est lacustre, dans ce secteur toujours émergé, et correspond aux formations des Calcaires blancs et gris de l'Agenais.

Faluns et formation des Sables Fauves du Miocène moyen

Dès la base de l'Helvétien, on enregistre dans le secteur des faciès coquilliers, caractéristiques de milieux marins très peu profonds (faciès de Manciet). On les rencontre dans un secteur qui va de Manciet (à 18 km au sud-ouest de Gondrin), jusqu'aux environs de Condom (à 12 km au nord-est de Gondrin, Illustration 45).

Pendant la même période, des dépôts littoraux correspondants à la formation des Sables Fauves se sont déposés. Il s'agit de dépôts marins très proximaux, qui ont recouvert une vaste étendue depuis le Gers et la Chalosse, jusqu'au nord du bassin d'Arcachon. La formation des Sables Fauves comprend généralement, à la base, une sédimentation marine peu profonde et des apports continentaux toujours détritiques, au sommet.

Dans le secteur de Gondrin, cette formation ravine et recouvre pratiquement tous les niveaux du Miocène situés au-dessus des Calcaires gris de l'Agenais. Au-dessus, on observe très ponctuellement les argiles de la formation des Glaises bigarrées.

Les dépôts du Miocène moyen ne sont présents qu'au niveau des buttes-témoins.

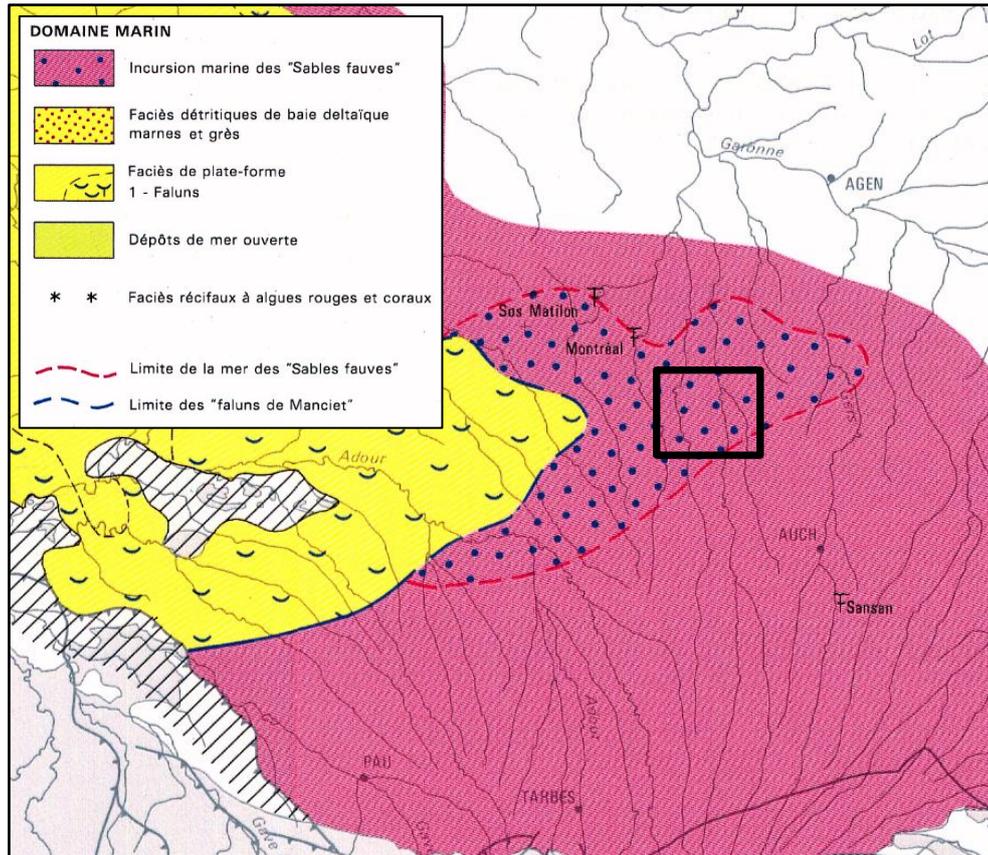


Illustration 45 - Carte paléoenvironnementale au Langhien-Serravalien (Synthèse géologique et géophysique des Pyrénées, BRGM-AGSO, 2018) et localisation du secteur de Gondrin (rectangle noir)

4.3.2. Etude pour la « Définition d'une stratégie de surveillance de certaines masses d'eau de type "molasses" - Anteagroup, 2016

Dans le cadre de l'étude pour la « définition d'une stratégie de surveillance de certaines masses d'eau de type "molasses" », pilotée par le bureau d'étude Anteagroup, en partenariat avec les bureaux d'études Calligée et CEBTP, pour le compte de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, une synthèse détaillée des formations molassiques à l'échelle du Bassin aquitain a été réalisée.

Anteagroup présente une partie des formations géologiques identifiées pour la masse d'eau, correspondante aux niveaux molassiques présents sur le territoire Gers-Gascogne, incluant le secteur de Gondrin.

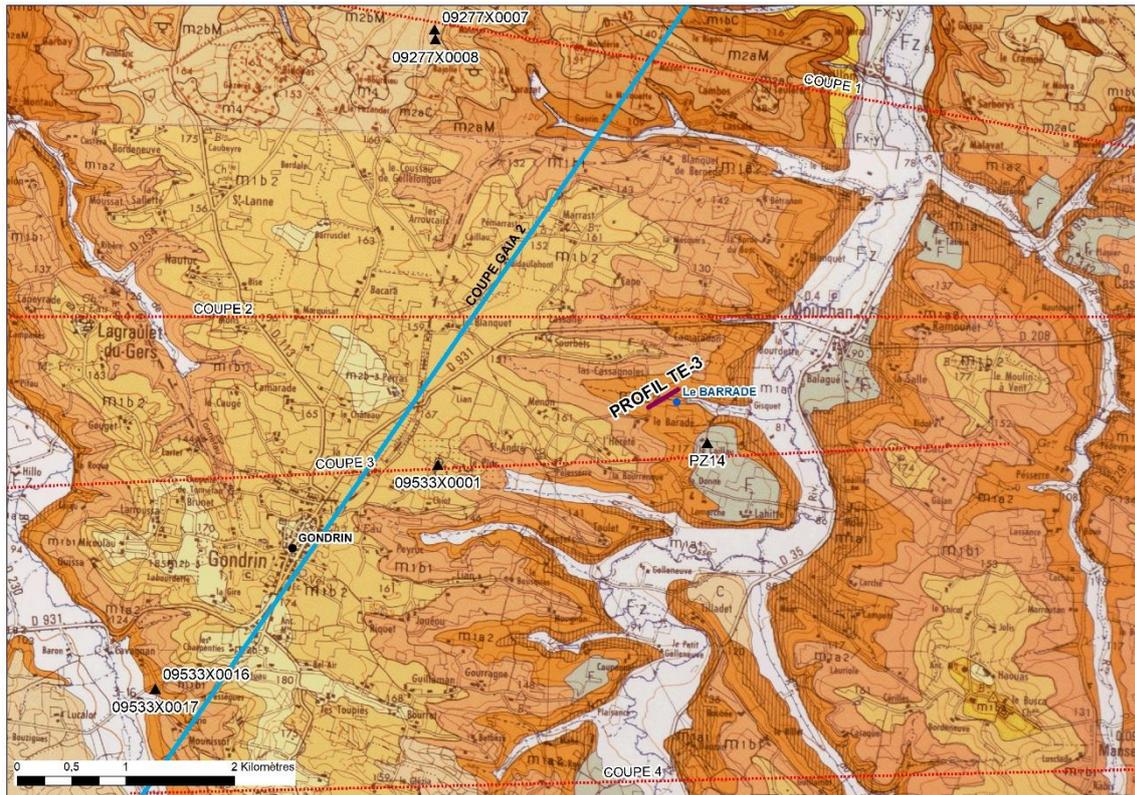


Illustration 46 - Localisations des coupes « GAIA » et locale du profil de tomographie électrique Anteagroup (TE-3), de la source Le Barrade et du sondage Pz14, sur fond de carte géologique à 1/50 000 (feuille d'Eauze n°953)

Au cours de cette étude, quelques investigations ont été réalisées dans le secteur de Gondrin, notamment au niveau de la source « Le Barrade », qui capte l'aquifère des Calcaires gris de l'Agenais (Aquitanien - Miocène). Cette source est identifiée sous l'indice BSS 09534X0003/HY.

Toujours dans le cadre de cette étude, un sondage a été réalisé à 460 mètres au sud-est de cette source, pour y implanter un piézomètre (Pz14). Le niveau des Calcaires gris de l'Agenais est recoupé dans ce sondage ; les calcaires sont décrits de la manière suivante :

« Les calcaires recoupés par sondage (Pz14 - Gondrin, Pz1 et Pz2 - Montréal-du-Gers) présentent des passages altérés voir karstifiés, ils peuvent être surmontés de niveaux sableux argileux (Gondrin) pouvant être en continuité hydraulique, ce qui limite la protection, ou de marnes (Montréal). A Gondrin et à Montréal, les calcaires sont proches de la surface (tomographie) et leur épaisseur est comprise entre 10 et 20 m. »

Le plan de localisation de Pz14, ainsi que les cartes et coupes géologiques interprétatives, sont présentées dans l'illustration 48. La coupe du sondage Pz14 est présentée en illustration 49.

Des tests de traçage ont été réalisés par injection de 1 500 g de fluorescéine et de sulforhodamine dans un ruisseau, dans le but de tester la restitution dans un captage en aval. Pour le test réalisé dans le secteur de Gondrin (source « Le Barrade »), et pour une distance de 460 mètres entre l'injection et le prélèvement, aucune restitution n'a été identifiée.

Par ailleurs, toujours dans le cadre de cette étude, des investigations géophysiques électriques ont été réalisées afin d'établir des profils tomographiques (intervention de la société Calligée). Les résultats de ces investigations sont présentés en illustration 47.

Une interprétation de la géométrie du sous-sol, dans le secteur de Gondrin, est proposée par Anteagroup, à partir des données de la carte géologique et des éléments d'investigations menées :

« La tomographie montre, en surface sur la partie SW une formation assez conductrice (20 à 50 Ohm.m) pouvant correspondre au niveau marneux du Burdigalien inférieur. En dessous et apparaissant en surface sur le reste de la tomographie et jusqu'à 95 m NGF, une formation plus résistante est mise en évidence (75 à 300 Ohm.m). Cette formation peut s'apparenter aux calcaires gris de l'Agenais. Elle apparaît moins résistante et donc vraisemblablement plus altérée à proximité du ruisseau. En dessous, les formations sont moins résistantes (30 à 50 Ohm.m) et pourraient coïncider aux molasses de l'Aquitainien inférieur et aux molasses supérieures de l'Agenais. »

D'après les données présentées par la société Anteagroup, le Calcaire gris de l'Agenais identifié dans les profils de tomographie électrique est relativement hétérogène (Illustration 47). Il paraît effectivement plus altéré dans le talweg, formé par le ruisseau créé par la source captée (« Le Barrade »). De plus, on observe des variations latérales dans les données de mesures de résistivité, ce qui indique des propriétés différentes. Ce constat reste cohérent avec les coupes établies à partir de la carte géologique où on observe des variations latérales de faciès (Illustration 41 et Illustration 42).

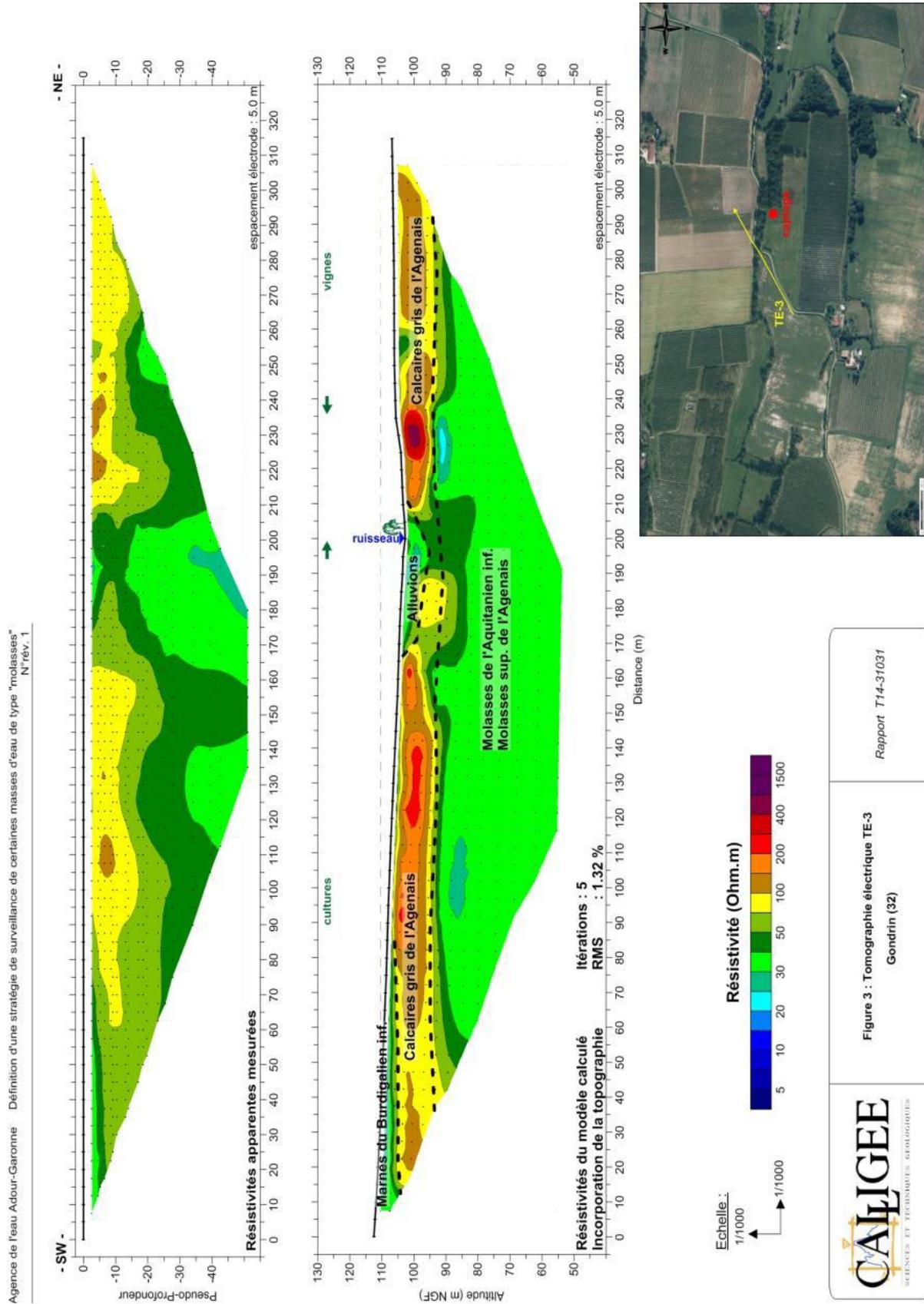


Illustration 47 - Résultats des investigations de tomographie électrique, réalisées dans le secteur de Gondrin (Anteagroup, 2016)

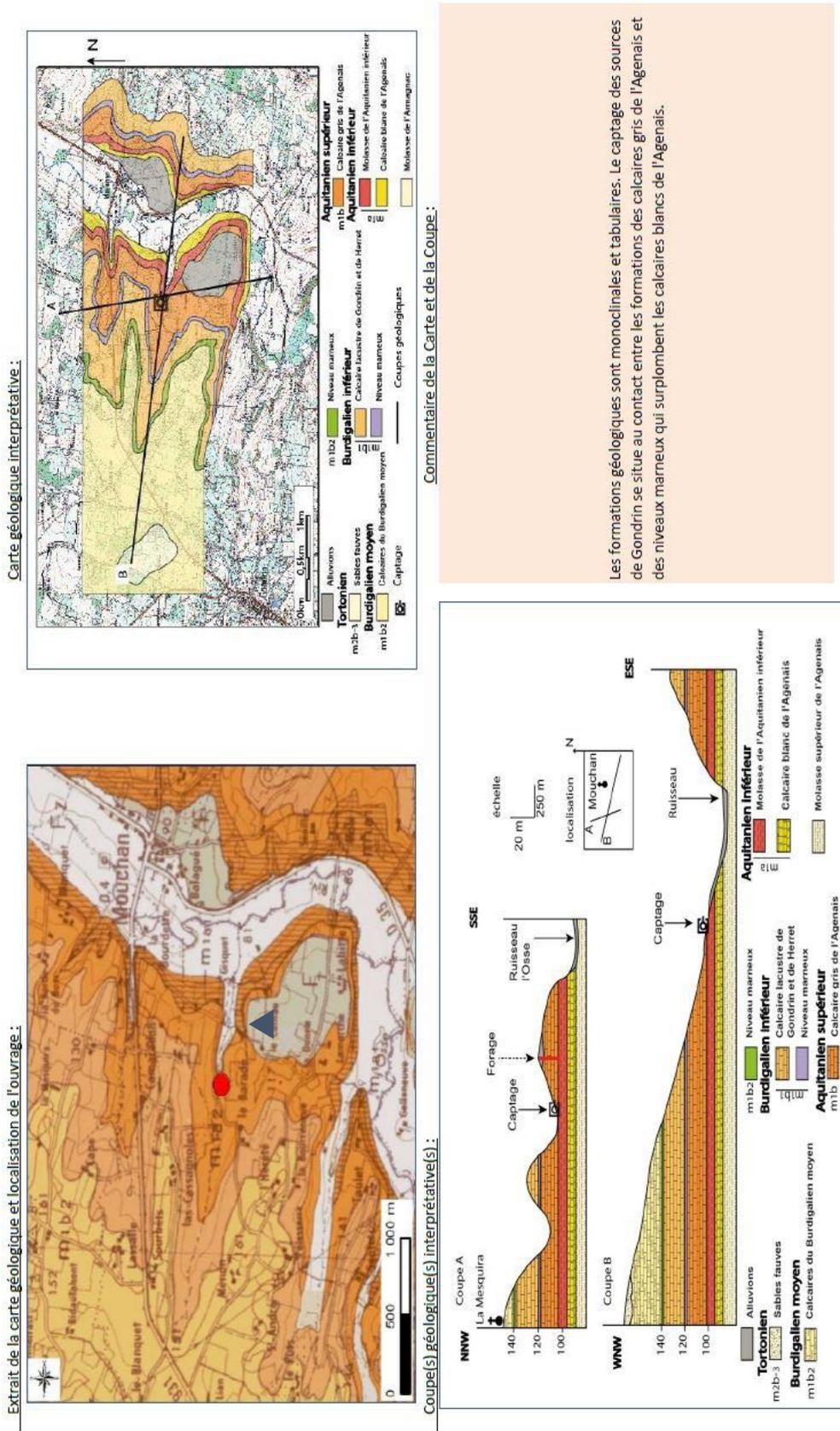


Illustration 48 - Localisation du captage de la source « Le Barrade » (point rouge) et du forage Pz14 (triangle bleu), cartes et coupes géologiques interprétatives du secteur de Gondrin (Anteagroup, 2016)

GINGER
CEBTP

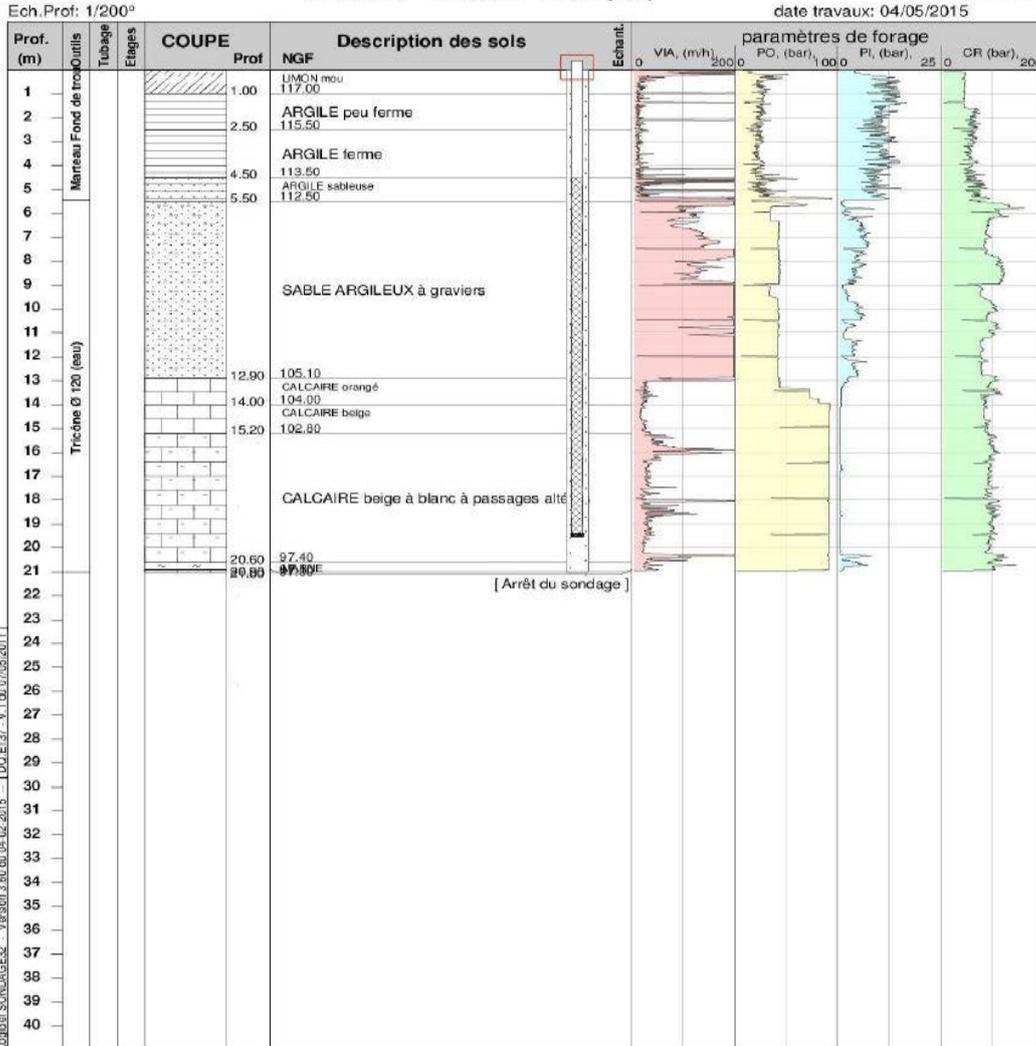
SONDAGE - GONDRIN - PZ14

Chantier : Stratégie de surveillance de masses d'eau de type 'molasses'

Client : Agence de l'Eau ADOUR-GARONNE
Dossier : SLG2.E.0017.002

Coordonnées du sondage:
X : 483095.7 Y : 6346322 Z : 118 (NGF)

annexe:



Sondeuse: M414

Nappe : /
à la date du sondage

Observations : Forage à l'eau pas de niveau stabilisé de la nappe, cote altimétrique indicative
PIEZOMETRIE: tube Ø Int. 80mm, longueur 19.5m, crépiné de 4.5 à 19.5m,
gravillonnage mis en place. Protection: Capot métallique Ø 105 en tête.

Edité le 10/11/2015

Illustration 49 - Coupe du sondage Pz14 réalisé dans le secteur de Gondrin (source : Anteagroup, 2016)

Dans ce rapport, Anteagroup présente un log géologique schématique du secteur de Gondrin (Illustration 50). Il est précisé que le log a été établi à partir de données de tomographies électriques, de sondages et de levés géologiques réalisés à proximité des captages.

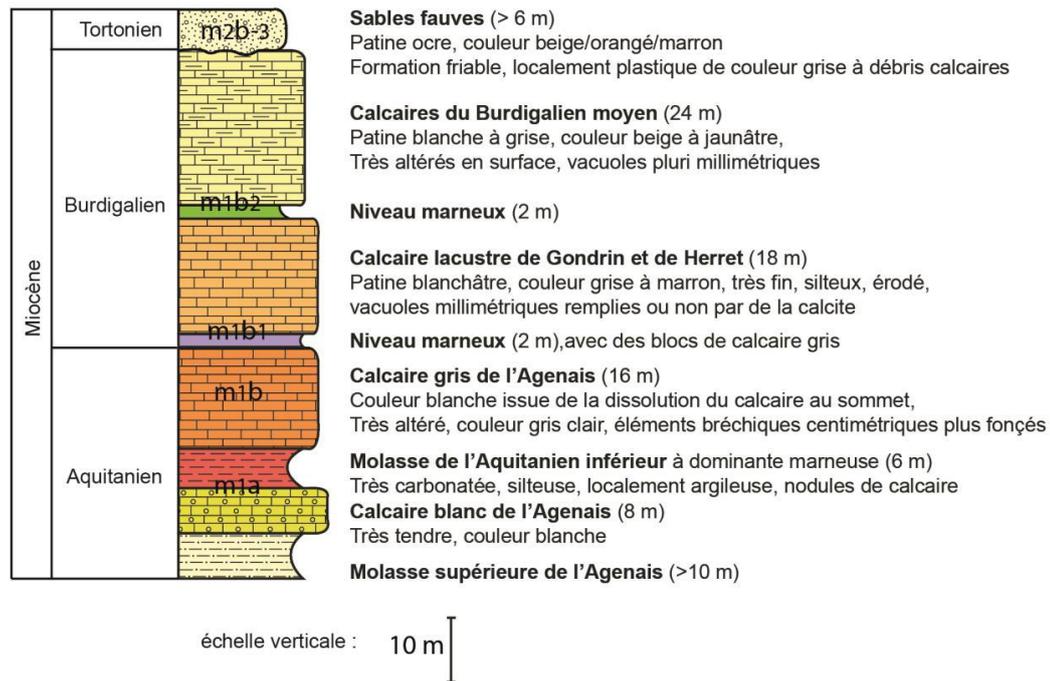


Illustration 50 - Log géologique schématique, établi dans le secteur de Gondrin (Anteagroup, 2016)

4.4. SYNTHÈSE, CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La présente synthèse établit un cadre géologique général du secteur de Gondrin. Les différentes phases tectoniques régionales impliquent un empilement sédimentaire, ainsi qu'une structuration complexe.

Au-dessus des Sables Infra-Molassiques, les molasses inférieures et supérieures atteignent une épaisseur de plus de 600 mètres dans ce secteur. Ces formations molassiques continentales sont constituées par un empilement de couches sablo-marneuses carbonatées, avec des intercalations de bancs de calcaires lacustres, pouvant atteindre plus de 10 mètres d'épaisseur.

Les formations calcaires identifiées dans le secteur sont souvent fracturées et parfois karstifiées. Cela est notamment précisé dans la littérature concernant les Calcaires gris de l'Agenais et les calcaires de Gondrin et de Herret, qui peuvent atteindre jusqu'à 35 mètres d'épaisseur cumulée.

Ces formations peuvent présenter un intérêt hydrogéologique pour les territoires. La compréhension des relations géométriques entre ces formations et les formations molassiques argileuses et marneuses, parfois sableuses, environnantes, est un point-clé pour la compréhension des écoulements localisés ou parfois même de secteurs plus vastes d'échelle départementale.

Les investigations menées dans le secteur de Gondrin mettent en exergue que les formations carbonatées lacustres présentent de fortes hétérogénéités. Cela a notamment été précisé par les résultats des investigations mises en œuvre par le bureau d'étude Anteagroup, dans son étude sur les molasses d'Aquitaine (étude réalisée pour le compte de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne). Dans le secteur de Gondrin, ces investigations concernent principalement la formation du Calcaire gris de l'Agenais. En effet, les données tomographiques, données de sondages et tests de perméabilités réalisés tendent à infirmer l'idée d'une continuité hydrogéologique au sein même de cette formation.

Des investigations complémentaires permettraient de mieux circonscrire les écoulements hydrogéologiques à plus grande échelle. En effet, les résultats obtenus concernent seulement un secteur très restreint dans la partie ouest du secteur de Gondrin. Des écoulements sont suspectés dans d'autres zones, au sein du Calcaire gris de l'Agenais. Les résultats très contrastés des mesures géophysiques électriques apportent de bonnes perspectives dans le domaine. Un complément d'investigations pourrait permettre d'élargir l'emprise des connaissances acquises.

De plus, les continuités hydrogéologiques avec les autres formations lacustres présentes dans le secteur sont également à préciser : que ce soient le Calcaire blanc de l'Agenais sous-jacent, les calcaires de Gondrin et de Herret, les calcaires de Pellecahus ou de Lectoure sus-jacents. Si leur potentiel hydrogéologique reste à confirmer, les niveaux molassiques, plus ou moins argileux, intercalés et pouvant atteindre plus d'une vingtaine de mètres (d'après les forages reconnus dans le secteur), doivent être identifiés et éventuellement modélisés. Des compléments d'investigations (tomographie étendue, sondages), permettraient d'apporter plus d'éléments sur l'ensemble de la butte de Gondrin et des formations géologiques molassiques associées.

Dans l'optique de réaliser un modèle conceptuel des circulations hydrogéologiques au sein de la butte de Gondrin, des analyses ciblées (essais de pompage, etc.) seraient également nécessaires, afin de mieux définir les paramètres hydrogéologiques pour les formations géologiques existantes, et notamment suivant les faciès hétérogènes rencontrés.

5. Conclusions

Le présent rapport, qui correspond au rapport final concernant les investigations réalisées dans le cadre des travaux relatifs au programme de recherche GAIA, restitue trois études, de deux thématiques différentes : hydrogéologiques / hydrogéochimiques, conduites en 2019 et 2020.

Un **premier sujet** a concerné l'identification de potentiels marqueurs géochimiques, afin de caractériser de potentiels transferts verticaux avec les formations sus-jacentes ou sous-jacentes du réservoir des Sables Infra-Molassiques, par des essais de lixiviation. Ces essais ont été réalisées sur des roches provenant à la fois des zones aquifères (Sables de Lussagnet et Grès à Nummulites), mais aussi des horizons sus-jacents (molasse) et sous-jacents (Paléocène), dans deux ouvrages de Lussagnet. L'analyse des lixiviats, issus de la molasse, a mis en avant des différences de composition entre les couches géologiques supérieures et l'aquifère, qui pourraient être exploitées pour tracer les transferts d'eau verticaux : antimoine, baryum, lithium, bore, magnésium et tungstène, ainsi que les isotopes du bore.

Les Grès à Nummulites montrent des teneurs plus fortes en strontium, alors que le Paléocène pourrait être caractérisé par des teneurs plus fortes en lithium et en fluor. Le baryum est présent dans les échantillons solides de molasse, de Sables de Lussagnet et semble absent des Grès à Nummulites et du Paléocène. De possibles transferts de baryum depuis le toit du réservoir (de la molasse) peuvent être supposés. Les concentrations en lithium dans les Sables de Lussagnet et les Grès à Nummulites sont relativement faibles, alors que des concentrations plus fortes sont observées dans la molasse et dans le Paléocène. Ces gradients de concentration pourraient expliquer des enrichissements locaux, observés dans les eaux de forage, par transferts verticaux. Des analyses isotopiques complémentaires permettraient de mieux identifier la source exacte du lithium, présent dans les eaux de l'aquifère. Enfin, le bore semble être un élément important dans la compréhension des processus de transfert, notamment en raison des écarts mesurés sur son isotope principal, le ^{11}B . Pour ce qui est de l'antimoine, les analyses ne révèlent que très rarement la présence de cet élément dans les eaux des Sables. Sa concentration est très souvent inférieure aux limites de détection.

Cette étude confirme ainsi que les Sables de Lussagnet et les Grès à Nummulites sont des horizons renfermant très peu d'espèces solubles et les eaux de ce réservoir devraient être ainsi théoriquement peu minéralisées. L'enrichissement en certains éléments observés dans les eaux de forage provient donc très probablement des horizons adjacents, par transferts verticaux. Cette étude ne porte que sur deux forages, relativement proches l'un de l'autre, mais apporte quelques éléments d'information sur la possibilité de la recharge des aquifères profonds par drainance verticale à travers certaines formations molassiques. Des études plus larges seraient toutefois nécessaires pour confirmer ces premiers résultats et mieux appréhender les éventuels transferts verticaux à l'échelle du Bassin et ce dans l'objectif de pouvoir mieux les prendre en compte dans le modèle hydrogéologique.

Un **second sujet** a concerné l'établissement de cartes piézométriques des Sables Infra-Molassiques (SIM). Des cartographies mensuelles de la piézométrie (corrigées des effets de pressions et températures) de la nappe des SIM ont été tracées pour les mois de septembre 2017 à avril 2018. Une analyse des ouvrages, mais également des données acquises et collectées, a dû être réalisée du fait d'incertitudes quant à l'aquifère capté et/ou sur le niveau piézométrique mesuré dans certains ouvrages. Au final, les cartes ont été produites à partir de 49 points de mesures. Pour ce faire, une interpolation des données, contraintes par l'intégration de failles structurantes reconnues et déconnectant hydrauliquement le réservoir des SIM, a été dans un premier temps réalisée, suivie d'un travail d'expertise hydrogéologique permettant d'affiner les

cartes. Les tracés piézométriques obtenus sont plus ou moins précis selon les secteurs, en fonction de la densité de points de mesure. Les isopièzes, générées dans le secteur des stockages de gaz et dans un rayon d'une quarantaine de kilomètres autour de ces derniers, sont globalement fiables à l'échelle régionale de travail, par rapport à d'autres zones où les isopièzes produites peuvent être très incertaines du fait d'un manque de mesures. Ces cartographies permettent de montrer, pour la période de septembre 2017 à avril 2018, l'évolution des niveaux piézométriques et en particulier la variation des niveaux dans le réservoir des Sables Infra-Molassiques liée aux stockages de gaz et sa propagation dans le temps. Plus globalement, la piézométrie montre une compartimentation entre les écoulements sud-ouest, au sud de la flexure celtaquitaine, et ceux à l'est et au nord de la zone d'étude. Ces différentes informations permettront de contraindre le modèle hydrodynamique développé, afin qu'il reproduise les piézométries observées et les sens d'écoulement qui en sont déduits.

Enfin, un **troisième sujet** a concerné la réalisation d'une synthèse géologique préliminaire à « l'étude du fonctionnement hydrodynamique et hydrogéo-chimique d'une butte tertiaire située à Gondrin (département du Gers) », que mène l'ENSEGID. Il s'agit d'étudier les possibilités de transferts verticaux à travers l'alternance de formations molassiques et de niveaux carbonatés observée sur la butte de Gondrin, à travers des analyses hydrogéologiques menées sur le terrain par l'Institut. Les résultats qui pourront sortir de cette étude de l'ENSEGID permettront, à l'instar du volet « géochimie » mené sur les ouvrages profonds, d'apporter des éléments sur la possibilité de transfert d'eau à travers la molasse. Ces éléments pourront notamment permettre de contraindre un peu plus le modèle hydrogéologique dans les années à venir. Cependant et comme indiqué précédemment, il faudra toutefois pouvoir disposer d'informations à grande échelle, pour une utilisation dans ce modèle régional.

Concernant les travaux de synthèse géologique, il ressort que les formations lacustres calcaires identifiées dans le secteur de Gondrin sont souvent fracturées et parfois karstifiées ; elles peuvent présenter un intérêt hydrogéologique pour les territoires. La pile de sédiments molassiques, où s'intercalent ces formations calcaires, atteint une épaisseur de l'ordre de 600 mètres, dans le secteur de Gondrin. D'un point de vue lithologique, les faciès de la molasse « inférieure » (environ 50 mètres d'épaisseur dans le secteur) sont constitués de dépôts argilo-carbonatés à marneux avec parfois une fraction, plus ou moins grossière, alors que la molasse « supérieure » (environ 570 mètres d'épaisseur dans cette zone), est très influencée par des dépôts lacustres et correspond aux dépôts aquitaniens constitutifs de la molasse de l'Agenais supérieure. Les investigations menées dans le secteur de Gondrin mettent en exergue que les formations carbonatées lacustres présentent de fortes hétérogénéités. Ainsi, les données de sondages et tests de perméabilité, réalisés par le bureau d'étude Anteagroup dans son étude sur les molasses d'Aquitaine (étude réalisée pour le compte de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne), tendent à montrer une discontinuité hydrogéologique au sein même de la formation des Calcaires gris de l'Agenais. Pour cette formation géologique, des investigations complémentaires permettraient de mieux circonscrire les écoulements hydrogéologiques, à plus grande échelle. Par ailleurs, les continuités hydrogéologiques avec les autres formations lacustres, présentes dans le secteur, sont également à préciser (Calcaires blanc de l'Agenais, calcaires de Gondrin et de Herret, calcaires de Pellecahus ou de Lecture, etc.). Si leur potentiel hydrogéologique reste à confirmer, les niveaux molassiques, plus ou moins argileux, intercalés et pouvant atteindre plus d'une vingtaine de mètres (d'après les forages reconnus dans le secteur), doivent être identifiés et leurs caractéristiques hydrodynamiques précisées.

6. Bibliographie

André L., (2002) - Contribution de la géochimie à la connaissance des écoulements souterrains profonds - Application à l'aquifère des Sables Infra-Molassiques du Bassin Aquitain. Thèse, Université Michel de Montaigne - Bordeaux 3.

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

André L., Manceau J.-C., Bourbon P., Wuilleumier A. (2020) - Cyclic variations of sulfate and boron concentrations and isotopes in deep groundwaters in the Aquitaine Basin, France. Submitted to Applied Geochemistry

Anteagroup (2016) - Définition d'une stratégie de surveillance de certaines masses d'eau de type « molasses ». Phase 2 : Investigations de terrain, interprétations des données et proposition d'une méthodologie pour les zones d'alimentation. Mai 2016 - A81875/B.

Barrière J., Gal F., André L., Wuilleumier A., avec la collaboration de Bentivegna G., Djemil M., (2019) - Projet GAIA. Investigations dans les forages profonds de Polastron, Saint-André et Lacquy : caractérisation, diagraphies de production, prélèvements sélectifs et analyses. Rapport d'étape. BRGM/RP-69170-FR, 82 p., 34 fig., 17 tab., 8 ann.

Biteau J.-J., Canérot J., (2007) - La Chaîne des Pyrénées et ses avant-pays d'Aquitaine et de l'Èbre : caractéristiques structurales, évolution géodynamique et tectono-sédimentaire. Revue Géologues, numéro 155, décembre 2007. ISSN 0016.7916.

Brunet, M. F. (1991) - Subsidence et géodynamique du Bassin d'Aquitaine. Relations avec l'ouverture de l'Atlantique. Thèse de doctorat, Paris 6.

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

Douez O., Wuilleumier A., Corbier P. avec la collaboration de Minvielle S. (2019) - Projet GAIA. Étude des exutoires des aquifères profonds du sud du Bassin aquitain. BRGM/RP-69131-FR, 110 p., 107 ill., 2 ann.

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.

Gély J.-P., Sztrakos K. (2000) - L'évolution paléogéographique et géodynamique du Bassin aquitain au Paléogène : enregistrement et datation de la tectonique pyrénéenne. Géologie de la France, n°2, 2000, pp. 31-57, 14 fig.

Hydro-Assistance Ingénierie (2017) - Examen Endoscopique - Forage « Auvillar » - 82340 Saint-Michel - BSS002CYQE (09293X0123/F). Géologie de la France, n°2, 2000, pp. 31-57, 14 fig.

Kieken M. (1973) - Evolution de l'Aquitaine au cours du Tertiaire. Bull. Soc. géol. Fr., (7), 15, 1, 385-397.

Kieken M., Winnock E. (1973) - Olistostromes dans le Lutécien du bas-Adour à l'avant du front nord-pyrénéen - Bull. BRGM Fr., (IV), 1, 5-15.

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 l'Université Michel de Montaigne - Bordeaux 3, 228p.

Lasseur E., Ortega C., Issautier B., Briais J., Guillocheau F. et al. (2017). - Upper Cretaceous Paleogene sedimentary record of the Pyrenean retroforland (Aquitain Basin). Deformations and sediment dynamics. International Meeting of Sedimentology 2017, Oct 2017, Toulouse, France. pp.488.

Lasseur E., Grataloup S., Badinier G., Vernhet Y. (2021) - Synthèse géologique et modélisation 3D des aquifères sous-molassiques aquitains. Rapport Final. BRGM/RP-70569-FR

Masini, E., Manatschal, G., Tugend, J., Mohn, G., & Flament, J.-M. (2014). The tectono-sedimentary evolution of a hyper-extended rift basin: The example of the Arzacq-Mauléon rift system (Western Pyrenees, SW France). International Journal of Earth Sciences, 103, 1569–1596. <https://doi.org/10.1007/s00531-014-1023-8> Crossref CAS Web of Science@Google Scholar

Monod B. (2014) - Carte géologique numérique à 1/250 000 de la région Midi-Pyrénées. Notice technique. BRGM/RP-63650-FR, 160 p., 23 fig., 1 pl. hors-texte.

Négre P., Petelet-Giraud E., Brenot A. (2009) - Use of isotopes for groundwater characterization and monitoring. In P. Quevauviller, A.M. Fouillac, J. Grath, & R. Ward (Eds.), Groundwater monitoring, (pp. 331–354). The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, UK: John Wiley and Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470749685>.

Ortiz A. (2019) - Géométries et bilan érosion-sédimentation d'un rétro-bassin d'avant-pays durant son évolution finie-orogénique et post-orogénique : le cas du système Pyrénées / bassin d'Aquitaine / golfe de Gascogne de 38 à 0 Ma. Thèse de doctorat, Université Rennes 1.

Razin, P. (1989) - Evolution tecto-sédimentaire alpine des Pyrénées Basques à l'Ouest de la transformante de Pamplona (province du Labourd). Thèse de doctorat.

Saspiturry, N, Allanic, C, Razin, P, Issautier B., Baudin T., Lasseur E., Serrano O., Leleu S. (2020) - Closure of a hyperextended system in an orogenic lithospheric pop-up, Western Pyrenees: The role of mantle buttressing and rift structural inheritance. Terra Nova 2020; 00:1–8.<https://doi.org/10.1111/ter.12457>

Serrano O. (2001) - Le Crétacé supérieur - Paléogène du bassin compressif nord-pyrénéen (bassin de l'Adour), sédimentologie, stratigraphie, géodynamique. Thèse de doctorat, Université Rennes 1. Français. (tel-00675829).

Serrano O., Delmas J., Hanot F., Vially R., Herbin J.P., Houel P., Tourlière B. (2006) - Le Bassin d'Aquitaine : valorisation des données sismiques, cartographique structurale et potentiel pétrolier, Ed. BRGM, 245 p., 142 figures, 17 tableaux, 17 annexes.

Sunyach J. (1984) - Formations molassique du Bassin aquitain : leur cartographie géologique à l'aide des images prises par satellites. Revue géographique des Pyrénées et du Sud-ouest, Tome 55, fasc. 1, pp.29-48, Toulouse, 1984.

Synthèse géophysique et géologique des Pyrénées - Volume 3 : Cycle alpin : Phénomènes alpins (2018) - Co-édition AGSO et BRGM, 483 p., 286 fig

Annexe 1

Composition chimique des lixiviats après 30 jours

Elément	Unité	Profondeur (m/sol)									
		521	524	526	541	545	562	574	580	586	610
Ag	µg/L	0.18	< LQ	0.57	0.27	0.14	0.04	< LQ	< LQ	< LQ	0.05
Al	µg/L	71.51	14.57	3.23	2.65	< LQ	8.82	130.28	20.20	697.17	99.64
As	µg/L	16.62	1.31	2.82	0.93	0.73	2.33	3.92	3.24	4.81	5.84
B	µg/L	7.71	10.18	15.08	19.45	7.89	4.62	5.52	12.80	18.17	5.47
Ba	µg/L	260.48	671.41	128.91	1664.54	143.32	100.18	22.21	19.71	14.24	13.60
Be	µg/L	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Bi	µg/L	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Ca	mg/L	52.36	185.57	830.90	2508.04	648.01	57.27	6.34	6.40	8.18	4.23
Cd	µg/L	0.06	< LQ	0.02	0.08	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Co	µg/L	< LQ	< LQ	0.51	0.39	1.95	0.18	< LQ	< LQ	< LQ	0.47
Cl	mg/L	64.33	317.06	1403.12	4749.19	1165.12	1.41	2.04	2.13	2.27	3.48
Cr	µg/L	0.83	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0.29	< LQ	0.59	< LQ
Cu	µg/L	5.56	< LQ	1.90	1.18	2.70	3.72	2.70	12.03	18.67	1.07
Fe	mg/L	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0.06	< LQ	0.09	< LQ
K	mg/L	1.83	2.54	11.36	20.07	8.08	6.03	4.70	4.69	4.54	3.73
Li	µg/L	7.91	6.66	12.44	18.87	10.78	6.35	4.95	5.42	6.11	5.82
Mg	mg/L	< LQ	1.91	12.73	26.48	27.60	10.65	1.63	1.92	2.27	1.24
Mn	µg/L	4.93	5.87	17.57	73.61	22.20	4.26	0.65	1.00	0.89	3.78
Mo	µg/L	3.52	2.81	2.01	2.28	9.68	28.52	0.23	0.34	0.61	0.71
Na	mg/L	1.83	5.51	21.15	69.72	15.97	15.07	19.21	21.12	21.80	19.14
Ni	µg/L	0.20	0.23	2.35	2.01	2.48	0.34	< LQ	< LQ	0.61	1.47
Pb	µg/L	0.77	< LQ	< LQ	0.21	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Sb	µg/L	118.65	8.14	10.38	6.85	3.13	3.34	0.69	0.87	0.66	0.80
SiO ₂	mg/L	17.86	25.66	19.00	8.48	8.48	5.63	9.60	9.60	7.49	10.19
Sn	µg/L	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0.72	< LQ	< LQ	0.29	< LQ
SO ₄	mg/L	16.03	12.09	197.40	34.55	148.84	145.69	2.04	1.92	6.36	1.74
Sr	µg/L	133.73	284.19	2067.86	3316.12	1928.07	932.44	191.07	210.76	233.90	160.35
Ti	µg/L	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	5.35	0.53	2.52	2.46
V	µg/L	4.56	19.08	1.82	0.65	0.39	1.20	8.23	6.99	3.62	41.42
W	µg/L	8.33	78.72	3.25	0.75	0.10	< LQ	0.24	0.38	0.27	0.36
Zn	µg/L	4.24	16.92	10.54	7.53	7.53	3.20	1.23	1.37	2.20	< LQ

Tableau A.1 - Composition chimique des lixiviats, issus des roches prélevées au toit de l'aquifère des Sables de Lussagnet, lors de la foration du puits de LUG 74

Élément	Unité	Profondeurs des échantillons (m/sol)													
		Blanc	730	742.5	757	780	782	797	830	856	875	905	920	922	927
Ag	µg/L	0.21	0.35	0.05	0.31	0.34	0.87	0.05	2.77	0.57	0.49	0.32	0.02	< LQ	0.03
Al	µg/L	0.51	132	1264	416	43.8	19.7	5.27	3.74	128	204	21.7	2.89	281	5.25
As	µg/L	0.05	19.5	1.50	36.9	1.22	17.4	1.06	3.70	1.89	420	1.76	3.99	6.80	5.48
B	µg/L	< LQ	46.8	90.8	48.2	11.7	17.0	34.1	26.4	23.2	167	54.6	11.6	30.1	36.2
Ba	µg/L	0.16	4.87	63.6	2.85	8.99	48.7	51.0	43.6	38.0	13.7	5.56	209	7.14	27.7
Be	µg/L	< LQ	0.01	0.08	0.02	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Bi	µg/L	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
CO ₃	mg/L	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Ca	mg/L	< LQ	10.0	69.4	2.1	22.3	24.5	56.4	143.5	23.6	25.0	23.9	6.1	10.1	7.4
Cd	µg/L	< LQ	< LQ	0.01	< LQ	< LQ	0.01	0.01	< LQ	< LQ	0.17	< LQ	< LQ	0.01	< LQ
Cl	mg/L	< LQ	0.7	0.6	0.9	< LQ	0.7	0.8	14.9	0.7	1.2	4.1	3.1	1.6	
Co	µg/L	< LQ	0.32	1.06	0.62	< LQ	0.12	0.07	0.56	< LQ	7.35	< LQ	< LQ	0.09	0.16
Cr	µg/L	0.20	0.72	2.04	1.00	0.46	0.66	0.39	0.58	0.57	12.9	0.69	0.60	0.88	0.57
Cu	µg/L	0.51	13.0	3.91	5.19	1.00	4.07	1.98	6.36	1.77	43.9	1.21	3.09	6.02	5.06
F	mg/L	< LQ	0.1	0.5	0.2	0.1	0.3	0.3	0.3	0.5	1.4	0.5	0.8	0.8	
Fe	mg/L	< LQ	0.177	2.722	0.929	< LQ	0.049	< LQ	< LQ	< LQ	1.917	< LQ	< LQ	0.108	< LQ
HCO ₃	mg/L	12	97	150	126	75	75	73	44	70	205	78	146	159	127
K	mg/L	< LQ	3.1	16.5	1.2	3.9	3.9	11.8	3.5	0.7	2.8	5.3	3.1	4.6	1.8
Li	µg/L	0.12	8.33	18.8	0.51	4.29	5.53	10.8	4.13	5.50	3.04	37.6	3.29	2.58	2.54
Mg	Mg/L	< LQ	0.6	20.7	< LQ	2.8	1.6	14.7	8.7	4.4	< LQ	6.7	3.7	5.6	6.8
Mn	µg/L	< LQ	2.14	59.1	0.85	0.54	0.24	1.17	1.36	< LQ	1.11	0.12	< LQ	0.62	< LQ
Mo	µg/L	< LQ	1.10	0.46	0.75	0.65	2.03	1.85	511	114	5305	5.93	38.1	17.7	263
Na	mg/L	< LQ	35.4	38.3	72.6	13.0	40.2	32.8	118.3	18.6	471.2	25.3	57.8	61.1	51.5
Ni	µg/L	0.20	1.03	3.52	2.07	0.43	2.18	1.66	18.1	1.26	92.6	0.61	1.58	3.65	3.45
Pb	µg/L	< LQ	0.96	1.72	0.80	< LQ	0.09	< LQ	< LQ	< LQ	1.63	< LQ	< LQ	0.06	< LQ
SO ₄	mg/L	< LQ	14.7	219.8	16.6	38.5	93.9	205.7	544.0	51.1	735.7	68.6	9.3	15.9	17.8
Sb	µg/L	0.05	3.30	0.94	3.36	1.84	4.54	1.97	4.76	2.79	41.6	1.64	5.69	2.61	8.03
SiO ₂	mg/L	< LQ	53.7	25.5	30.4	6.6	48.4	12.2	19.0	2.5	106.4	6.7	62.9	13.4	12.0
Sn	µg/L	< LQ	2.57	0.05	0.69	0.21	0.13	2.58	0.46	0.05	2.24	0.08	< LQ	0.19	< LQ
Sr	µg/L	0.73	42.5	1420	16.4	277	268	1339	893	480	38.6	476	85.5	117	77.5
Ti	µg/L	< LQ	5.35	15.3	4.58	0.18	0.95	0.53	0.79	< LQ	8.93	0.39	0.11	11.5	< LQ
V	µg/L	< LQ	46.0	3.17	239	3.91	22.3	0.69	23.6	51.6	108	5.42	28.8	9.78	6.93
W	µg/L	< LQ	2.11	< LQ	3.14	0.40	4.60	0.50	0.64	1.07	62.7	0.18	1.15	2.48	4.48
Zn	µg/L	1.20	2.25	6.50	1.99	0.93	1.41	1.47	1.15	1.58	3.58	1.12	1.28	1.58	1.24

Tableau A.2 - Composition chimique des lixiviats, issus des roches prélevées au mur de l'aquifère des Sables de Lussagnet lors de la foration du puits de LUG 101

Annexe 2

Liste des 49 ouvrages finalement retenus pour l'élaboration des cartes piézométriques mensuelles

Numéro	INDICE_BSS	Désignation	X193	Y193	Septembre 2017	Octobre 2017	Novembre 2017	Decembre 2017	Janvier 2018	Fevrier 2018	Mars 2018	Avril-Mai 2018
1	09788X0004	LARRIOUCLIA / GEAUNE 2 à PÉCORADE	428 205	6 288 970	106.18	108.56	111.21	107.93	103.95	98.13	89.19	78.73
2	09788X0014	PÉCORADE 101 à GEAUNE	427 569	6 286 964	106.05	108.73	110.34	108.35	104.10	98.27	non mesuré	non mesuré
3	09788X0015	BATS URGON - MOULIN DES PERES à GEAUNE	426 982	6 287 554	108.23	110.96	112.75	110.78	106.57	100.76	91.93	Denoyage rateur = 90
4	10071X0012	LAMAZERE 1 - GLA 1 à LAMAZERE	493 488	6 276 564	104.98	105.84	107.04	107.77	108.58	108.81	108.40	106.88
5	09287X0023	MOULIN DE REPASSAC à LECTOURE	508 198	6 318 489	1.52	1.49	1.45	1.41	1.37	1.34	1.30	1.25
6	09266X0004	LACQUY 101 à LACQUY	437 385	6 323 348	76.71	76.68	76.66	76.63	76.61	76.58	76.56	76.53
7	09268X0037	LE MOULEY-LAITERIE à CAZAUBON	456 251	6 321 980	95.37	97.46	99.12	101.45	102.41	101.76	98.66	93.33
8	09268X0035	TAUREAU à CAZAUBON	455 609	6 321 605	95.47	97.57	99.22	101.57	102.52	101.87	98.76	93.42
9	09268X0049	F.2 à CAZAUBON	455 648	6 321 686	99.70	100.60	101.70	102.50	102.20	102.30	100.70	non mesuré
10	09268X0055	FORAGE PROFOND DE L'UBY à CAZAUBON	454 859	6 320 774	123.39	125.18	124.68	112.88	103.47	93.12	74.55	65.15
11	09268X0059	BARBOTAN 102 - ST-PIERRE 1 B102 à CAZAUBON	455 676	6 321 234	99.23	100.73	101.14	102.72	101.62	99.82	94.84	90.72
12	09268X0065	BARBOTAN LES BAINS F.5 à CAZAUBON	455 563	6 321 716	102.66	102.71	102.76	102.76	102.86	102.96	102.96	102.21
13	09784X0031	ELB02 à EUGÉNIE-LES-BAINS	428 128	6 294 272	102.21	105.42	105.96	106.94	104.61	98.65	88.51	79.25
14	10098A0004	MURET 104 à EAUNES	568 116	6 262 833	156.69	156.73	156.70	156.53	156.64	156.70	156.74	156.70
16	09784X0010	LE BRAC à CASTELNAU-TURSAN	425 777	6 289 617	106.78	110.59	111.35	109.48	106.02	100.62	92.27	83.16
17	09541X0021	BEAUCAIRE à BEAUCAIRE	490 195	6 307 404	4.75	4.74	4.68	4.51	4.59	4.61	4.54	4.54
18	09546X0022	LE MASCA à JEGUN	496 874	6 302 215	121.28	121.13	120.96	121.00	121.88	122.64	123.07	123.45
19	09824X0002	ST CRICO à THOUX	538 466	6 289 992	111.72	111.69	111.65	111.61	111.58	111.55	111.51	111.47
20	09526X0049	LUSSAGNET GAZ 46 (LUG 46) à LUSSAGNET	438 646	6 303 396	161.97	154.53	138.17	104.45	80.84	27.00	-9.43	19.66
21	09526X0210	LUG57 - Puits de contrôle à LE HOUGA	440 917	6 304 051	151.06	147.35	133.02	103.09	81.81	33.57	9.99	36.13
22	09526X0225	LUSSAGNET GAZ 68 (LUG 68) à LE HOUGA	442 059	6 300 399	145.95	140.59	124.10	102.46	77.53	40.75	21.94	43.15
23	09526X0089	LUSSAGNET GAZ 69 (LUG 69) à CAZERES-SUR-L'ADOUR	438 758	6 301 114	145.99	135.63	122.37	96.50	80.79	46.65	24.69	42.92
24	09527X0017	IZA 4 à MAGNAN	449 357	6 302 092	150.23	152.78	123.61	95.85	79.23	44.44	15.61	40.20
25	09527X0018	IZA 5 à LAUZIAN	447 986	6 305 106	149.87	152.42	123.36	102.46	77.73	40.06	10.38	35.31
26	09528X0019	IZA 2 à CAUPENNE-D'ARMAGNAC	451 880	6 304 368	147.90	151.48	122.79	96.39	79.39	48.18	20.29	42.52
27	09528X0020	IZA 3 à CAUPENNE-D'ARMAGNAC	453 010	6 302 216	144.14	147.59	124.82	101.33	86.10	59.14	33.23	47.23
28	09528X0002	NOGARO 1 à NOGARO	455 400	6 301 133	134.96	137.32	125.48	105.84	93.82	70.56	47.19	46.62
29	09528X0026	NOGARO 2 à NOGARO	456 219	6 299 923	131.58	132.70	123.72	106.89	92.60	70.64	47.43	47.95
30	09536X0008	DENU à DENU	471 245	6 300 602	114.76	117.18	118.32	113.93	108.30	101.27	89.41	77.63
31	09536X0030	BERNEDE - F3 à ENUZE	465 887	6 306 850	120.01	124.75	123.84	111.01	100.66	87.84	65.03	56.35
32	09545X0017	FORAGE AEP N. 2 - F2 à CASTERA-VERDUZAN	493 877	6 302 648	112.48	112.98	112.88	112.77	112.52	112.64	112.56	112.45
33	10052X0006	GARLIN - LE PRINCE à BIROSSE-MENDOUSSE	439 510	6 273 937	104.69	108.76	111.90	112.02	109.45	105.13	98.55	88.39
34	09533X0016	GONDRIN à GONDRIN	476 702	6 312 152	9.87	9.87	9.87	9.87	9.87	9.87	9.87	9.87
35	09545X0018	PLEHAUT à SAINT-JEAN-POUTGE	488 613	6 298 146	98.02	99.27	100.17	100.72	101.69	101.11	100.51	98.35
36	10052X0037	LASSEPE à LALONGUE	440 902	6 269 418	114.29	115.09	116.49	116.99	116.89	116.79	115.89	113.19
37	10057X0003	LESPIELLE 2 à SIMACOURBE	446 049	6 266 713	115.08	116.14	117.62	118.88	120.51	121.05	119.57	117.14
38	10306X0034	LES BORDES ANGAIS 3 à BORDES	434 888	6 244 561	213.15	212.60	216.54	218.28	218.98	219.42	219.44	219.57
39	10082X0001	POLASTRON 101 à POLASTRON	528 283	6 271 467	122.17	122.13	122.07	122.02	121.97	121.93	121.88	121.81
40	09586X0008	FORAGE DE L'USINE KP1 à GRAUJHET	616 238	6 297 553	126.22	127.17	128.62	126.68	127.99	127.99	127.99	127.99
41	09587X0029	FORAGE DE L'USINE DE REY à GRAUJHET	619 293	6 297 661	136.36	136.52	136.67	136.72	136.83	136.99	136.96	137.11
42	09866X0074	VALDURENQUE à VALDURENQUE	644 131	6 273 942	222.04	222.12	222.12	222.15	222.17	222.19	222.20	222.31
43	10122X0055	LABRUGUIÈRE à LABRUGUIÈRE	642 192	6 272 488	191.27	191.29	191.29	191.27	191.32	191.34	191.34	191.49
44	09857X0104	STATION DE POMPAGE à GUITALENS-L'ALBAUDE	622 992	6 283 542	146.65	146.65	146.74	146.72	146.83	146.94	146.89	146.85
45	10078X0001	PUMMAURIN à MONBARDON	514 801	6 256 862	168.05	167.99	167.96	167.94	167.96	167.94	167.98	167.90
46	09014X0013	MARCHEPIN à BUZET-SUR-BAISE	483 458	6 353 974	-2.01	-2.34	-3.01	-2.76	-2.44	-2.75	-2.51	-2.83
47	10326X0009	CASTELNAU MAGNAC à CIZOS	496 881	6 244 110	126.45	126.41	126.36	126.31	126.27	126.23	126.18	126.12
48	09784X0036	FORAGE A QUAI ALIENOR à EUGÉNIE-LES-BAINS	428 1874	6 294 238	103.30	106.40	108.00	109.00	105.50	99.20	88.00	76.80
49	09784X0025	ETABLISSEMENT THERMAL (EF2) à EUGÉNIE-LES-BAINS	427 434	6 294 302	98.04	99.54	100.64	101.24	non mesuré	101.74	97.04	91.90
50	09545X0019	ETABLISSEMENT THERMAL (EF2) à CASTERA-VERDUZAN	493 269	6 303 959	105.11	104.92	104.90	104.90	105.55	106.65	106.68	106.65
	08764X0008	GRIGNOLS - Point éocène	458 805	6 371 376	-6.69	-6.52	-6.37	-6.39	-6.22	-6.18	-6.29	-6.36
	08526X0003	AUROS - Point éocène	446 521	6 385 060	-8.97	-9.02	-9.07	-9.02	-8.97	-8.92	-8.88	-8.97
	Affl 01	Affl 01	499 310	6 303 415								
	Affl 02	Affl 02	499 310	6 301 400								

Annexe 3

Planches photographiques (A. Faucher)

Nom du point : A_01

Coordonnées Lambert 93: X : 482380,42800000001 Y : 6315623,5099999998

Géologie : Calcaire Agenais blanc (m1a1)

Description : Calcaire grisâtre à tacheté de jaune, présence de nodules. Légère stratification.



Photos : 160-162



Nom du point : A_02

Coordonnées Lambert 93 : X : 481351 ; Y : 6315296

Géologie : Calcaire Agenais gris (m1a2)

Description : Calcaire altéré pulvérulent (aspect d'une craie blanche), matrice fine

Photo : 166



Nom du point : A_07

Coordonnées Lambert 93 : X : 481627 ; Y : 6312911

Géologie : Calcaire Agenais gris (m1a2)

Description : Calcaire altéré pulvérulent

Photos : 174-177



Nom du point : A_08

Coordonnées Lambert 93 : X : 481363 ; Y : 6313052

Géologie : Calcaire Agenais blanc (m1a1)

Description : Calcaire gris à nodules

Photos : 179-182



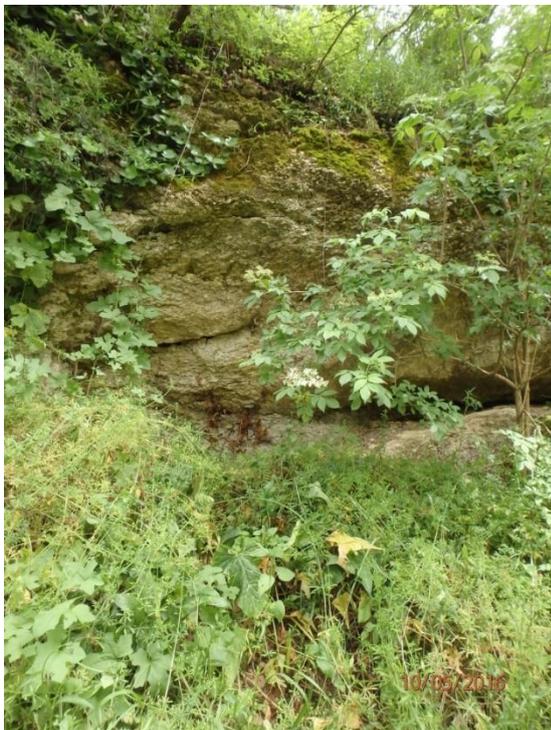
Nom du point : A_11

Coordonnées Lambert 93 : X : 482940 ; Y : 6314072

Géologie : Calcaire Agenais blanc

Description : Calcaire à nodules. Observation d'un banc marneux entre 2 niveaux calcaires.
Echantillon B prélevé au dessus

Photos : 32-33



Nom du point : A_12

Coordonnées Lambert 93 : X : 482928 ; Y : 6314093

Géologie : Calcaire Agenais blanc

Description : Calcaire grisâtre à nodules



Nom du point : A_13

Coordonnées Lambert 93 : X : 476622 ; Y : 6313367

Géologie : Sables Fauves (m2b3)

Description : Sable roux

Photos : 96-97



Nom du point : A_14

Coordonnées Lambert 93: X : 476277 ; Y : 6316084

Géologie : Calcaire Herret, Gondrin

Description : Calcaire blanc friable, pas de calcite cristallisée, pas de nodules mais quelques cailloutis

Photo : 122



Nom du point : A_17

Coordonnées Lambert 93 : X : 479369 ; Y : 6312618

Géologie : Calcaire Herret, Gondrin

Description : Calcaire blanc friable, absence de calcite cristallisée et de nodules

Photo : 138



Nom du point : A_20

Coordonnées Lambert 93 : X : 479840 ; Y : 6317588

Géologie : Calcaire Larroque St-Sernin, C. inf. Lectoure, Pellecahus (m1b2)

Description : Calcaire massif, dur, blanc

Photo :



Nom du point : A_21

Coordonnées Lambert 93 : X : 479576 ; Y : 6317774

Géologie : Calcaire de Herret, Gondrin

Description : Carrière remplie d'eau, non exploitée

Photo :



Nom du point : A_06

Coordonnées Lambert 93 : X : 479345 ; Y : 6313824

Géologie : Calcaire Larroque St-Sernin, C. inf. Lectoure, Pellecahus (m1b2)

Description : Calcaire massif bancs indurés puissance variable 15cm en bas / 5 cm en haut, séparés par des niveaux cavités horizontales très allongés. Texture "graphiteuse" avec veinules allongées de calcite, belle cristallisation. Fracture NW315°

Photos : 22-23



Nom du point : A_03

Coordonnées Lambert 93 : X : 480863 ; Y : 6313469

Géologie : Calcaire Agenais gris (m1a2)

Description : Calcaire altéré pulvérulent (aspect d'une craie blanche), matrice fine, fracturation verticale visible

Photos : 13-15



Nom du point : A_04

Coordonnées Lambert 93 : X : 480615 ; Y : 6313385

Géologie : Calcaire Agenais blanc (m1a1)

Description : Affleurement calcaire à nodules blanc-gris, parfois ocre localement (tâches sur une zone d'~1m²)

Relief assez marqué = banc de 2-3 m

"Sous-cavage" en pied de rupture de pente.

Photos : 1 à 4



Nom du point : A_05

Coordonnées Lambert 93 : X : 480566 ; Y : 6313396

Géologie : Calcaire Agenais blanc (m1a1)

Description : Calcaire noduleux à cristaux calciques

Photo :



Nom du point : A_09

Coordonnées Lambert 93 : X : 480602 ; Y : 6313535

Géologie : Calcaire Agenais gris (m1a2)

Description : Sur la carte géol : en limite des c. agenais gris et c. Gondrin/Herret

Calcaire à matrice + fine jaunâtre à gris-clair

Absence de nodules, grains invisibles

petites cavités pluricentimétriques+/- allongées horizontales. Observation de fracturation sub-verticales N20 à N25

Photos : 9 à 12



Nom du point : A_15

Coordonnées Lambert 93: X : 480570 ; Y : 6313390

Géologie : Calcaire Agenais blanc (m1a1)

Description : Affleurement en contrebas à A_06.

Forte érosion

Puissance 2,5 m

Grisâtre à tacheté de jaune.

Calcaire avec gros nodules. Légère stratification.

Rupture dans la pente, il y a qqch qui s'érode plus facilement.

Photos : 07 et 08



Nom du point : A_16

Coordonnées Lambert 93 : X : 481440 ; Y : 6313608

Géologie : Calcaire Agenais gris (m1a2)

Description : Calcaire grossier d'aspect un peu gréseux, aucun nodule, moins altéré que A_04, à 10 m, apparition de nodules, fracturation N20

Photos : 16-19



Nom du point : A_18

Coordonnées Lambert 93 : X : 477703 ; Y : 6311045

Géologie : Calcaire Herret, Gondrin

Description : Calcaire blanc à teintes jaunâtre très altéré pulvérulent. Panneau "risque d'inondations"

Photos : 27



Nom du point : A_22

Coordonnées Lambert 93 : X : 479396 ; Y : 6318253

Géologie : Calcaire Larroque St-Sernin, C. inf. Lectoure, Pellecahus (m1b2)

Description : Calcaire massif, avec figures de dissolution +/- sphériques texture "graphite" cristallisée

Photos : 36-40



Nom du point : A_24

Coordonnées Lambert 93 : X : 477796 ; Y : 6311217

Géologie : Sables Fauves (m2b3)

Description : Sables roux

Photos : 25-26



Nom du point : A_25

Coordonnées Lambert 93 : X : 480686 ; Y : 6313368

Géologie : Calcaire Agenais blanc (m1a1)

Description : Affleurement à 150 m de A_04.

Plus massif, stratification plus marquée.

Puissance de 1,5 m.

Nodules plus petits

Même aspect général que A_04

Photo :



Nom du point : A_28

Coordonnées Lambert 93: X : 477494 ; Y : 6311088

Géologie : Calcaire Herret, Gondrin

Description : Calcaire blanc friable, pas de calcite cristallisée, pas de nodules mais quelques cailloutis

Photos : 28-29



Nom du point : A_30

Coordonnées Lambert 93: X : 477225 ;Y : 6311175

Géologie : Calcaire Herret, Gondrin

Description : Calcaire blanc +/- dur, pas de calcite cristallisée, pas de nodules mais quelques cailloutis

Photos : 34-35





**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 - Orléans Cedex 2 - France
Tél. : 02 38 64 34 34

Direction régionale Nouvelle-Aquitaine - site de Bordeaux

Parc technologique Europarc
24, avenue Leonard de Vinci
33600 - Pessac - France
Tél. : 05-57-26-52-70

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm