

Document à accès immédiat

Liberte Égalité Fraternité



0442 01 6766 13 (

Projet GAIA. Construction et calage du modèle hydrodynamique

h3a-b

haa-b

Rapport Final

BRGM/RP-70475-FR

1er octobre 2022

Étude réalisée dans le cadre des projets de recherche

Manceau J.C., Thiéry D., Douez O., Lasseur E., Grataloup S., Arnaud L.,

Cabaret O. htb. Vérificateur : Approbateur : de-hia Nom : Amraoui N. N. Pédron Nom : Directeur Régional du Fonction : Hydrogéologue Fonction : **BRGM Nouvelle-Aquitaine** 89 3740,46 Date : 21/09/2021 Date : 19/07/2022 e Directeur Régiona du BRGM Nouvette - Aquitain Signature : Signature : S PEDRON

> Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001. Contact : gualite@brgm.fr





Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire mis à votre disposition.



Mots clés : Hydrogéologie, Nouvelle-Aquitaine, Occitanie, Sables Infra-molassiques, Paléocène, Crétacé supérieur, Modélisation hydrogéologique

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

Manceau J.C., Thiéry D., Douez O., Lasseur E., Grataloup S., Arnaud L., Cabaret O. (2022) - Projet GAIA. Construction et calage du modèle hydrodynamique. Rapport Final. BRGM/RP-70475-FR, 127 p.

© BRGM, 2022, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM. IM003-MT008-P2-01/04/2021

Synthèse

Le programme scientifique GAIA, financé par TEREGA, l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et le BRGM, et piloté par le BRGM, a pour vocation d'améliorer la connaissance géologique et hydrogéologique des aquifères profonds du sud du Bassin aquitain. Conduit sur une période de six ans, 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, de nombreux travaux ont eu lieu afin d'acquérir de la connaissance qu'elle soit géologique, hydrogéologique ou bien hydrogéochimique, et de discuter différentes hypothèses de fonctionnement des aquifères profonds. Un modèle géologique à visée hydrogéologique a également été construit. Le présent rapport présente la construction et la calibration d'une première version du modèle hydrodynamique intégrant les données acquises et les outils produits au cours du programme de recherche.

Les étapes classiques de la construction d'un modèle hydrodynamique ont été suivies. Dans un premier temps, la géométrie du modèle géologique a été transférée depuis Petrel[®] vers le code de calcul MARTHE, choisi pour construire et exploiter le modèle hydrogéologique GAIA. Au total, le modèle contient plus de 675 000 mailles, pour une emprise de plus de 30 000 km². Il est constitué de 8 couches effectives (formations molassiques, Sables de Lussagnet, Grès à Nummulites, Marnes de l'Eocène, Flysch & Calcaires yprésiens - Ilerdien, Paléocène, Campanien, Crétacé supérieur ante-Campanien), les formations superficielles étant regroupées avec les formations sous-jacentes (molasses pour la majeure partie du secteur) pour cette première version du modèle. Une des originalités du modèle géologique est l'intégration, au sein d'une même couche, de portions aquifères et épontes d'une même formation stratigraphique. Des cartes de faciès ont donc été utilisées permettant de sectoriser des zones de perméabilités différentes, basées sur la géologie.

Le secteur d'étude est bordé à l'ouest par l'océan, au sud par le Front nord-pyrénéen, à l'est par les contreforts du Massif Central et de la Montagne Noire, et au nord par une limite fixée par le cours du Tarn et de la Garonne. Des limites à flux nul ont été choisies pour les bordures est et sud du modèle, et des charges ont été imposées au nord du modèle, afin d'assurer une cohérence avec le modèle MONA (Modèle Nord-Aquitain), et à l'ouest du modèle, afin d'autoriser d'éventuelles connexions entre le Crétacé supérieur et l'océan. Des flux de recharge ont été imposés au droit des structures où affleurent les aquifères profonds modélisés à l'aide d'un bilan hydroclimatique simplifié. Les autres zones de recharge des aquifères profonds, envisagées le long du piémont pyrénéen, ainsi qu'en bordure sud-est de la zone d'étude, ont été intégrées par l'intermédiaire de charges imposées (ce qui évite d'imposer un flux de recharge fixe), étant données les incertitudes existant autour de leur localisation et de leur étendue.

Les opérations d'injection et de soutirage de gaz, qui ont lieu depuis 1958 sur le site de Lussagnet et depuis 1981 sur le site d'Izaute, ont été intégrées après conversion des volumes de gaz injectés et soutirés en volumes d'eau équivalents. A partir des travaux de collecte et d'interprétation de données, réalisés dans le programme GAIA, 123 chroniques de prélèvements ont également été intégrées au modèle hydrodynamique.

Les formations représentées dans le modèle hydrogéologique affleurent, mais atteignent également des profondeurs importantes : le modèle hydrodynamique GAIA a donc été construit de sorte à prendre en compte les variations de densité et de viscosité des eaux induites par les différences de température attendues.

Le modèle ainsi construit a été calibré en régime transitoire, au pas de temps annuel jusqu'en 1980 et au pas de temps mensuel ensuite. En l'absence de prise en compte des formations superficielles et du réseau hydrographique, dans la version actuelle du modèle, la calibration a principalement été menée par comparaison des charges hydrauliques observées et des charges hydrauliques simulées. Du fait des effets de température précédemment mentionnés, cette comparaison a été menée sur des charges d'eau douce équivalentes, impliquant une procédure de conversion des charges observées *in situ*. Au total, 94 piézomètres ont été considérés dans la calibration pour près de 260 000 mesures individuelles. A noter que ces mesures ne sont pas réparties de façon homogène 1) entre les différentes couches (65 % dans les Sables inframolassiques - SIM), 2) spatialement au sein d'une même couche (les formations du Crétacé et du Paléocène sont principalement caractérisées à proximité des structures affleurantes) et 3) temporellement (1 000 mesures sur 260 000 étaient disponibles en 1980). La qualité de la calibration a été évaluée pour 18 différents secteurs au sein du domaine d'étude.

Au final, le modèle hydrodynamique ainsi calibré reproduit de façon satisfaisante, à l'échelle régionale, les gradients de charges observés dans les différentes formations aquifères, y compris dans les secteurs proches de la flexure celtaquitaine, où des gradients importants étaient notés. Plus localement, la piézométrie de la nappe des SIM semble bien reproduite dans la quasi-totalité des secteurs bénéficiant de mesures. De ce fait, l'influence des opérations d'injection/soutirage de gaz sur les charges des SIM, se traduisant par des variations cycliques des niveaux piézométriques, est correctement retranscrite, à la fois en amplitude et en phase, à proximité d'Izaute et de Lussagnet, mais également en s'en éloignant. Les tendances à la baisse de ces niveaux, plus ou moins prononcées selon les secteurs concernés, sont également bien capturées par le modèle. Le modèle hydrodynamique est également cohérent avec la plupart des charges observées aux structures affleurantes, ce qui renforce la confiance dans les modèles conceptuels spécifiquement mis en place pour ces structures ; cette remarque est également valable pour les structures non affleurantes d'Izaute et de Lacquy, dont les comportements hydrodynamiques atypiques posent question.

Même s'il n'a pas été possible de calibrer le modèle en restituant des débits dans les cours d'eau, le modèle hydrodynamique a été discuté sous l'angle des quantités rechargées et de la localisation estimée des exutoires des nappes profondes avant toute exploitation. Les exutoires des nappes profondes connus du secteur sont ainsi correctement localisés par le modèle hydrodynamique et le bilan hydraulique global du modèle traduit la baisse observée (par ex. par la perte d'artésianisme et le tarissement de sources dans certains secteurs) des volumes à ces sorties, au cours du temps. Enfin, les zones de recharge et les quantités infiltrées (qu'elles aient été prises en compte par des flux de recharge imposés ou bien par des charges imposées) ne montrent pas d'incohérence qui pourrait traduire une surestimation ou une sous-estimation importante des volumes échangés et ainsi remettre en cause la validité du modèle.

Comme tout modèle hydrodynamique, *a fortiori* à cette échelle régionale, le modèle construit et présenté dans ce rapport est sujet à différentes incertitudes et limites. Au-delà des incertitudes liées aux données d'entrée (e.g. à propos des prélèvements ou bien des pluies efficaces) qui ne sont pas spécifiques à ce modèle, la phase de calibration a permis de mettre en évidence différentes limitations :

- Tout d'abord, même si le modèle actuel reproduit une bonne partie des phénomènes locaux observés, sa résolution horizontale de 500 m x 500 m limite *de facto* la représentation de ces phénomènes. Dans des secteurs accidentés comme peuvent l'être les secteurs à enjeux du sud du Bassin aquitain, cette résolution est limitante et a nécessité des compromis et des approximations.
- Ensuite, la résolution verticale du modèle, c'est-à-dire le découpage du modèle en grands aquifères est également une approximation importante. Cette approximation, même si elle

semble acceptable à l'échelle régionale, peut entraîner certaines imprécisions locales lorsque des variations verticales de faciès existent au sein d'un aquifère. En particulier, les nappes de l'Eocène inférieur (Ilerdien), du Paléocène et du Crétacé supérieur ont été considérées en connexion sur une grande partie de l'emprise du modèle, constituant dans ces secteurs une seule nappe. A l'échelle régionale, cette hypothèse est la plus raisonnable étant données les informations à disposition (elle n'est d'ailleurs pas remise en cause par les charges observées), mais la non-vérification de cette hypothèse localement pourrait être à l'origine de certains comportements atypiques observés, que le modèle ne reproduit pas très bien (e.g. secteur des Landes de Siougos).

- En outre, certaines limitations sont dues à des lacunes importantes de connaissances géologiques et hydrogéologiques de certains secteurs. Par définition, les secteurs (notamment les secteurs très profonds) pour lesquels les mesures piézométriques manquent sont sujets à des incertitudes importantes. On peut citer en guise d'exemple l'est du domaine d'étude à la fois pour les SIM et pour les aquifères sous-jacents.
- Enfin, les aquifères superficiels (et le réseau hydrographique) n'étant pas considérés dans la version actuelle du modèle hydrodynamique, une calibration utilisant les débits des cours d'eau n'a pas été possible. Même si le modèle a été discuté du point de vue de la cohérence des volumes échangés (bilan hydraulique), une calibration sur les débits des cours d'eau viendrait valider le bilan hydraulique du modèle d'une manière plus fiable.

Malgré ces limites, la construction du modèle hydrodynamique a pu permettre d'apporter des éléments à différentes grandes questions, auxquelles le programme GAIA s'est attaché à répondre. Ainsi :

- Le rôle d'exutoire ou bien d'aire d'alimentation des nappes profondes, que constituent les différentes structures affleurantes, a été discuté pour chacune d'entre elles.
- Le rôle de la flexure celtaquitaine comme écran quasi-imperméable, depuis Roquefort jusqu'à l'est de Auch, a été mis en évidence.
- L'importance de l'alimentation des nappes du Paléocène et du Crétacé supérieur à l'est du secteur d'étude a été soulignée. Même si les quantités infiltrées plaideraient pour un rôle du massif des Petites Pyrénées - Pantaurel dans cette alimentation, le modèle hydrodynamique ne peut, à lui seul, trancher cette question.
- La calibration du modèle hydrodynamique la plus acceptable a été obtenue sans connexion entre les aquifères du Crétacé supérieur et l'océan ; même si cette hypothèse ne peut être vérifiée, il semblerait que ces échanges, s'ils existent, ne soient pas de grande ampleur.
- Enfin, les termes du bilan hydraulique du modèle hydrodynamique montrent qu'à l'échelle régionale, une calibration acceptable des charges des SIM a pu être obtenue sans apports importants depuis les molasses sus-jacentes au regard des autres termes du bilan. A noter que 1) les volumes de ces apports restent toutefois difficiles à estimer précisément et que 2) cette observation faite à l'échelle du modèle régional ne permet pas d'exclure l'existence de certaines communications locales préférentielles avec les formations molassiques.

Principe de la modélisation et limites du modèle

Le principe de la modélisation consiste à reproduire, numériquement et avec les données disponibles, une réalité complexe pour ensuite réaliser des simulations diverses (prévisions dans le temps...). Les modèles hydrogéologiques permettent de reproduire les écoulements souterrains à partir des équations générales qui les décrivent mathématiquement. Il s'agit de déterminer la charge hydraulique (variable inconnue) sur les éléments d'un maillage, en fonction du temps et à partir de paramètres hydrodynamiques (perméabilité, emmagasinement), de conditions aux limites et de conditions initiales.

Les méthodes numériques consistent en une discrétisation du domaine d'étude :

- dans l'espace (maillage),
- dans le temps pour les régimes transitoires.

Dans chaque maille sont intégrées des données **moyennées**, qu'elles soient relatives à la géométrie (topographie, profondeur d'une couche géologique), ou bien aux caractéristiques hydrodynamiques (perméabilité et emmagasinement).

À chaque stade de construction du modèle, des **approximations** doivent donc être réalisées. Pour reproduire au mieux cette réalité, des paramètres « inconnus » (particulièrement les paramètres hydrodynamiques) doivent être estimés lors de la phase de calage. Les valeurs calculées par le modèle (dont les chroniques de niveaux d'eau) sont comparées aux données observées sur le terrain. Une fois le calage jugé satisfaisant, le modèle peut être utilisé pour faire des simulations à partir de différents scénarios.

Les **objectifs de la modélisation** qui sont par exemple de i) restituer le comportement hydrodynamique d'un système aquifère multicouche régional, ii) prévoir l'impact hydrogéologique d'un champ captant, iii) optimiser l'implantation et les caractéristiques d'un doublet géothermique... vont **conditionner** l'extension de la zone à modéliser et donc **l'échelle spatiale** de modélisation (locale, intermédiaire, régionale) et par conséquent l'interprétation des résultats du modèle qui pourra être réalisée. En fonction de cette échelle de travail, on ne pourra pas demander la même précision des résultats, notamment sur le calage. L'écart relatif acceptable entre le calage et la réalité sera donc très différent : un très bon calage pourra être demandé pour un modèle très local (et très bien connu), mais ne pourra pas être exigé à une échelle régionale. Par ailleurs, en fonction des complexités hydrogéologique, géologique et structurale de différents secteurs modélisés, les résultats observés seront plus ou moins biens restitués.

Dans le cas présent, le modèle utilisé est un modèle à l'échelle régionale de plus de 30 000 km² et permet, du fait de ses spécifications, de répondre à des questionnements à une échelle régionale et non à une échelle locale. Le maillage est au pas de 500 m et par conséquent l'ensemble des données entrées dans le modèle et l'ensemble des variables calculées le sont à cette résolution. Ainsi, par exemple, dans une maille, il n'existe qu'une **seule** valeur de topographie, de profondeur de couche etc. La charge calculée est également **moyennée** pour la maille et ne peut représenter précisément le niveau mesuré dans un piézomètre, en particulier quand il y a plusieurs ouvrages de prélèvements dans cette même maille. Par ailleurs, le pas de temps mensuel des données introduites et des données restituées induit une impossibilité de représentation des phénomènes transitoires plus courts que ce pas de temps. Enfin, il existe également une part d'incertitude sur les chroniques de prélèvements (même si l'exhaustivité est recherchée).

L'interprétation des résultats du modèle GAIA est donc limitée actuellement à une utilisation régionale, le modèle apportant des informations pertinentes à cette échelle de travail. Les résultats sont les plus fiables au niveau des points de calage (piézomètres) ; en s'éloignant de ces points, et dans les zones sans informations, la précision diminue.

Sommaire

1. INTRODUCTION			13
2. CON	ICEPT	S DE LA MODELISATION EN HYDROGEOLOGIE	15
2.1.	DEFIN	ITION D'UN MODELE HYDROGEOLOGIQUE	15
2.2. 2.2 2.2 2.2 2.2 2.2	LES DI 2.1. 2.2. 2.3. 2.4. 2.5	FFERENTES ETAPES DE L'ELABORATION D'UN MODELE HYDROGEOLOGIQUE Définition du cadre de la modélisation et conceptualisation Collecte, analyse et synthèse des données Construction optionnelle d'un modèle géologique 3D Construction du modèle hydrogéologique ou d'écoulement souterrain Calage du modèle (ou calibration)	16 16 16 17 17
3. GEC		RIE DU MODELE : IMPORT DES DONNEES DU MODELE GEOLOGIQUE	10
PETRE	EL [©] ET	INTEGRATION DES FACIES	19
3.1.	IMPOR	T DES GEOMETRIES	19
3.2. 3.2 3.2	Modif 2.1. 2.2.	PICATIONS DES GEOMETRIES Prise en compte de la molasse dans le modèle hydrogéologique Modifications dans la géométrie des marnes éocènes	23 23 24
3.3.	INTEG	RATION DES FACIES	24
4. CON	DITIC	NS AUX LIMITES DU MODELE ET RECHARGE	27
4.1. 4.1 4.1 4.1 4.1	COND 1.1. 1.2. 1.3. 1.4.	TIONS AUX LIMITES Conditions aux limites à l'ouest du secteur d'étude Conditions aux limites au nord du secteur d'étude Conditions aux limites au sud et à l'est du secteur d'étude Prise en compte des formations molassiques	27 27 29 30 30
4.2. 4.2 4.2	RECH/ 2.1. 2.2.	ARGE AUX AFFLEUREMENTS Affleurements au niveau des différentes structures Autres affleurements	30 30 31
5. PRIS	SE EN	COMPTE DES STOCKAGES DE GAZ	35
6. INTE	GRA	TION DES POINTS DE PRELEVEMENTS ET DE SURVEILLANCE	~-
PIEZO	MEIR	IQUE	37
6.1.	BASE	DE DONNEES DES VOLUMES PRELEVES	37
6.2.		EES PIEZOMETRIQUES UTILISEES POUR LA CALIBRATION DU MODELE	40
7. PRI	SE EN		43
7.1.	RAPPE	ELS DU RAPPORT MANCEAU ET AL. (2018)	43
7.2.	CONS	EQUENCES SUR LA MODELISATION HYDRODYNAMIQUE	43
7.3. MODE	CONSI	EQUENCES SUR LES DONNEES PIEZOMETRIQUES UTILISEES POUR LA CALIBRATION DU	47
8. CAL	.IBRA	FION DU MODELE	49
8.1.	Сноіх	DE MODELISATION ET PROCEDURE SUIVIE POUR LA CALIBRATION	49
8.2.	EVALL	JATION DE LA QUALITE DE LA CALIBRATION	50
8.3.	Сомр	ARAISON ENTRE CHARGES SIMULEES ET CHARGES OBSERVEES : AQUIFERE DES SIM.	53

8.3.1. Secteurs 1 et 2 : stockages de Lussagnet et d'Izaute	53
8.3.2. Secteur 3 : Nogaro	53
8.3.3. Secteur 4 : est des stockages	57
8.3.4. Secteur 5 : Eugénie-les-Bains / Geaune - Pécorade	61
8.3.5. Secteur 6 : Lespielle - Garlin	65
8.3.6. Secteur 7 : Barbotan - Uby & compartiment nord	69
8.3.7. Secteur 8 : Castera - Verduzan / Cézan - Lavardens	70
8.3.8. Secteur 9 : secteur SIM-nord	70
8.3.9. Secteur 10 : secteur SIM-sud.	75
8.3.10. Secteur 11: secteur SIM-est.	76
de la nappe des SIM	cnelle 81
8.4. COMPARAISON ENTRE CHARGES SIMULEES ET CHARGES OBSERVEES : EOCENE INFERIE	UR
(ILERDIEN) / PALEOCENE / CRETACE SUPERIEUR	82
8.4.1. Secteur 12 : Créon d'Armagnac	82
8.4.2. Secteur 13 : Roquefort	82
8.4.3. Secteur 14 : Audignon	87
8.4.4. Secteur 15 : Préchacq - Gamarde	93
8.4.5. Secteur 16 : anticlinaux d'Izaute et de Lacquy	93
8.4.6. Secteur 17 : Landes de Siougos et système dacquois	97
8.4.7. Secteur 18 : Paléocène - autres ouvrages	99
8.4.8. Conclusion intermédiaire n°2 : évaluation globale de la calibration des charge	es
simulées à l'échelle des formations Eocène inférieur (llerdien) / Paléocène / Crétacé	400
superieur	103
8.5. COHERENCE GLOBALE DES ZONES DE RECHARGE ET EXUTOIRES	104
8.5.1. Localisation des exutoires dans le modèle hydrodynamique en régime perma	anent
(régime naturel avant exploitation)	104
8.5.2. Discussion concernant les zones de recharges dans le modèle hydrodynamie 105	que
	106
8.6.1 Perméghilités	106
8.6.2 Emmanasinements cantif et libre	106
	100
8.7. PIEZOMETRIE CALCULEE ET DIRECTIONS PRINCIPALES D'ECOULEMENT	109
8.8. BILAN HYDRAULIQUE DES AQUIFERES PROFONDS DU SUD DU BASSIN AQUITAIN	113
8.9. DISCUSSION SUR LES ECHANGES D'EAU PAR DRAINANCE, DEPUIS LES FORMATIONS	115
9. CONCLUSION	117
10. BIBI IOGRAPHIE	119

Liste des illustrations

Illustration 1 - E	Extension des différentes formations du modèle géologique	21
Illustration 2 - F	aciès considérés a priori dans le modèle hydrogéologique	25
Illustration 3 - 0	Charge d'eau douce équivalente, imposée par l'océan, en fonction de la profondeur des zones d'échange éventuelles entre l'aquifère du Crétacé supérieur et l'océan	29
Illustration 4 - F	Récapitulatif des conditions aux limites et de prise en compte de la recharge aux affleurements	33
Illustration 5 - C	Chroniques des pressions du réservoir et des volumes stockés, au droit des stockages de Lussagnet et d'Izaute (informations TEREGA)	е 36
Illustration 6 - D	Débits d'injection d'eau équivalents, au pas de temps mensuel, calculés pour les stockag de Lussagnet et d'Izaute	es 36
Illustration 7 - \	/olumes prélevés totaux issus de la base de données "prélèvement" et volumes prélevés dans le modèle hydrodynamique	; 38
Illustration 8 - 0	Cartographie des points de prélèvement présents au sein de la base de données et modalités de prise en compte dans le modèle	39
Illustration 9 - E	Evolution du nombre de mesures piézométriques, dans le domaine d'étude, en fonction d temps	lu 41
Illustration 10 -	Cartographie des piézomètres présents au sein de la base de données et modalités de prise en compte dans le modèle	42
Illustration 11 -	Champ de température intégré au modèle hydrodynamique	45
Illustration 12 -	Différences entre charges piézométriques mesurées et converties en charge hydrauique d'eau douce et froide	∍ 48
Illustration 13 -	Découpage du domaine d'étude en différents secteurs	52
Illustration 14 -	Comparaison "charges simulées vs. charges observées" pour le secteur 1 du stockage Lussagnet (orange : charges simulées ; bleu :charges observées ; noir :charges observées considérées dans le calcul des indicateurs)	de 55
Illustration 15 -	Comparaison "charges simulées vs. charges obsevées" pour le secteur 2 du stockage d'Izaute (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observé considérées dans le calcul des statistiques de calage)	es 55
Illustration 16 -	Comparaison "charges simulées vs. charges observées" pour le secteur 3 de Nogaro (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)	56
Illustration 17 -	Evolution des charges pour l'ouvrage de Saint-Médard / Idrac-Respaillès (10072X0026/	F) 58
Illustration 18 -	Comparaison "charges simulées vs. charges observées" pour le secteur 4 de l'est des stockages de gaz(1/2) (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)	59
Illustration 19 -	Comparaison "charges simulées vs. charges observées" pour le secteur 4 de l'est des stockages de gaz(2/2) (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)	59
Illustration 20 -	Evolution des charges au niveau des ouvrages de Geaune Pécorade 1, Geaune 2, Geaune 3 et Geaune 4	61
Illustration 21 -	Comparaison "charges simulées vs. charges observées" pour le secteur 5 d'Eugénie-les Bains / Geaune - Pécorade (1/2) (orange : charges simulées ; bleu : charges observées noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)	3- 3 ; 63

Illustration 22 -	Comparaison "charges simulées vs. charges observées" pour le secteur 5 d'Eugénie-les- Bains / Geaune - Pécorade (2/2) (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)
Illustration 23 -	Comportements hydrogéologiques dans le secteur de Lespielle-Garlin
Illustration 24 -	Comparaison "charges simulées vs. charges observées" pour le secteur 6 de Lespielle - Garlin (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)
Illustration 25 -	Comparaison "charges simulées vs. charges observées" pour le secteur 7 de Barbotan (Uby & compartiment nord) (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)
Illustration 26 -	Comparaison "charges simulées vs. charges observées" pour le secteur 8 de Castéra - Verduzan / Cézan - Lavardens (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)
Illustration 27 -	Comparaison "charges simulées vs. charges observées" pour le secteur 9 du nord de la nappe des SIM (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)
Illustration 28 -	Evolution des charges au niveau des ouvrages de Bordes 3 (10306X0034/F3) et 4 (10306X0035/F4)
Illustration 29 -	Evolution des charges dans l'ouvrage Muret 104 (10098A0004/F)77
Illustration 30 -	Comparaison "charges simulées vs. charges observées" pour le secteur 10 du sud de la nappe des SIM (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)
Illustration 31 -	Comparaison "charges simulées vs. charges observées" pour le secteur 11 de l'est de la nappe des SIM (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)
Illustration 32 -	Diagramme de dispersion "charges observées vs. charges simulées" au sein des SIM 81
Illustration 33 -	Proposition d'un schéma de fonctionnement hydrodynamique de la structure de Roquefort (d'après Douez et al., 2019)
Illustration 34 -	Comparaison "charges simulées vs. charges obsevées" pour le secteur 12 de Créon d'Armagnac (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)
Illustration 35 -	Comparaison "charges simulées vs. charges obsevées" pour le secteur 13 de Roquefort (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)
Illustration 36 -	Diagramme de dispersion spécifique au secteur d'Audignon pour les nappes de l'Eocène inférieur (Ilerdien) / Paléocène / Crétacé supérieur
Illustration 37 -	Evolution des charges au niveau des ouvrages ASA et ASA 8 d'Audignon
Illustration 38 -	Evolution des charges pour les ouvrages Labaoucoume (09781X0011/F), F1 et F2 de Maylis (09781X0013/F et 09781X0015/P219) et Sartou (09781X0007/F)
Illustration 39 -	Comparaison "charges simulées vs. charges obsevées" pour le secteur 13 d'Audignon (1/3) (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)
Illustration 40 -	Comparaison "charges simulées vs. charges obsevées" pour le secteur 13 d'Audignon (2/3) (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)
Illustration 41 -	Comparaison "charges simulées vs. charges obsevées" pour le secteur 13 d'Audignon (3/3) (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)

Illustration 42 -	Comparaison "charges simulées vs. charges obsevées" pour le secteur 15 de Préchacq - Gamarde (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)
Illustration 43 -	Comparaison "charges simulées vs. charges obsevées" pour le secteur 16 relatif aux anticlinaux d'Izaute et Lacquy (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)
Illustration 44 -	Evolution des charges de l'ouvrage de Saint-André (10336X0002/F) 99
Illustration 45 -	Comparaison "charges simulées vs. charges obsevées" pour le secteur 17 des Landes de Siougos et du système dacquois (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage) 101
Illustration 46 -	Comparaison "charges simulées vs. charges obsevées" pour le secteur 18 relatifs aux autres ouvrages de l'aquifère du Paléocène (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)
Illustration 47 -	Diagramme de dispersion "charges observées vs. charges simulées" au sein des formations de l'Eocène inférieur (Ilerdien), du Paléocène et du Crétacé supérieur 103
Illustration 48 -	Champ de perméabilité des couches aquifères après calibration du modèle hydrodynamique
Illustration 49 -	Champ de coefficients d'emmagasinement spécifique des couches aquifères après calibration du modèle hydrodynamique
Illustration 50 -	Champ de charges d'eau douce calculées au sein des couches aquifères au 1/09/2014. Les flèches correspondent aux vecteurs vitesses calculés par le modèle fournissant les directions des écoulements souterrains
Illustration 51 -	Bilan hydraulique obtenu par le modéle calibré (en positif : les entrées du modèle ; en négatif : les sorties)
Illustration 52 -	Termes des échanges aux limites à potentiel imposé du modèle hydrodynamique (en positif : les entrées du modèle ; en négatif : les sorties)
Illustration 53 -	Termes des échanges aux limites à potentiel imposé du modèle hydrodynamique avec une perméabilité des molasses considérée à 10 ⁻¹¹ m/s (en positif : les entrées du modèle ; en négatif : les sorties)

Liste des annexes

Annexe 1 Cartes de faciès associées aux couches 3, 4, 6 et 7 du modèle hydrogéologique 123

1. Introduction

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

L'un des objectifs du programme GAIA est la construction d'un modèle géologique de ces aquifères, puis d'un modèle hydrodynamique, ayant pour vocation d'aider à gérer au mieux les ressources en eau, en particulier celles contenues dans l'aquifère des Sables infra-molassiques.

Ce rapport vise à restituer les travaux de modélisation des écoulements au sein des aquifères profonds. Son objet est donc double : d'une part, présenter la construction du modèle depuis le transfert du modèle géologique jusqu'à la prise en compte des spécificités du secteur (notamment les opérations d'injection/soutirage de gaz et la prise en compte des gradients de température au sein des formations profondes) et d'autre part, présenter les éléments complémentaires de compréhension que le modèle peut fournir sur les grandes questions traitées dans le cadre du programme scientifique GAIA.

Dans un contexte caractérisé par la diminution des niveaux piézométriques de la nappe des Sables infra-molassiques (SIM dans la suite du rapport), enregistrée quasiment depuis le début des suivis, associée à une perte d'artésianisme et de tarissement des sources, et liée en particulier aux différents prélèvements, de nombreuses questions se posent concernant le fonctionnement de l'hydrosystème global, avec différentes incertitudes à propos de plusieurs points :

- Les aquifères sous-molassiques constituent un système multicouche (SIM, Calcaires de l'Eocène inférieur-Ilerdien, Calcaires du Paléocène, Calcaires du Crétacé supérieur, voire Calcaires du Jurassique), mais les communications entre les différentes couches perméables restent peu connues. D'éventuelles interactions avec les formations molassiques peu perméables sus-jacentes pourraient également influer sur ce système aquifère.
- Le secteur est complexe sur le plan structural du fait de la compression pyrénéenne et d'une phase distensive antérieure : ainsi le réseau de failles est dense et les structures (anticlinaux, synclinaux, diapirs) nombreuses. Ces structures entraînent l'affleurement des terrains tertiaires et crétacés, par exemple le long de la flexure celtaquitaine, au niveau des rides anticlinales de Roquefort, de Créon d'Armagnac-Barbotan et de Cézan-Lavardens, ou bien au niveau de l'anticlinal d'Audignon. Des difficultés de compréhension du rôle exact, joué par ces structures dans les écoulements locaux et régionaux, en matière d'alimentation ou bien de sorties d'eau des nappes profondes, existent parfois ; des questions similaires se posent sur les connexions possibles entre le sud et le nord du Bassin, de part et d'autre de la flexure celtaquitaine.
- Les autres possibilités d'alimentation des aquifères profonds se situeraient au sud et au sudest du Bassin, mais les modalités de la recharge des aquifères, tant en terme de localisation (rôle du massif des Petites Pyrénées - Plantaurel, des contreforts de la Montagne noire) que de quantité infiltrée, restent des sujets de discussion.
- Similairement, la possibilité d'exutoires additionnels des aquifères profonds à la bordure océanique du Bassin a souvent été discutée sans que cette question ne puisse être tranchée.

Toutes ces problématiques ont déjà fait l'objet d'études au sein du programme GAIA ; l'objectif du modèle hydrodynamique est alors d'y apporter un éclairage supplémentaire, sous un angle différent.

Le présent rapport restitue les points suivants :

- l'import du modèle géologique sous le logiciel de modélisation ;
- l'intégration des cartes de faciès des différentes formations aquifères au sein du modèle ;
- la discussion sur les conditions aux limites du modèle ;
- les modalités de prise en compte de la recharge des aquifères profonds ;
- les modalités de prise en compte des stockages de gaz ;
- l'intégration des points de prélèvements ;
- les modalités de prise en compte des effets de température ;
- la calibration du modèle ainsi établi au regard des informations de surveillance piézométrique ;
- une discussion, au fil de cette calibration, concernant les choix faits pour aboutir au modèle calibré et les éclairages apportés sur les différentes questions d'intérêt.

Au préalable, un premier chapitre rappelle les concepts essentiels de la modélisation numérique en hydrogéologie.

2. Concepts de la modélisation en hydrogéologie

Les grands principes et recommandations de ce chapitre sont principalement issus des références bibliographiques suivantes : Barthélémy et Seguin (2016) ; Dassargues (1995) ; Yurtsever et al. (2001).

2.1. DEFINITION D'UN MODELE HYDROGEOLOGIQUE

Le principe de la modélisation en hydrogéologie consiste à reproduire une réalité complexe à partir de différentes équations mathématiques, dans le but de mieux comprendre le fonctionnement de l'hydrosystème (outils de compréhension), et/ou de réaliser des simulations ou des prévisions dans le temps (outils de gestion et de prédiction des ressources et/ou de la qualité des eaux).

En hydraulique souterraine, de nombreuses solutions analytiques ont été développées, au fil du temps, pour apporter des réponses quantitatives aux problèmes classiquement posés par l'exploitation des eaux souterraines. Toutefois, ce type d'outil ne s'utilise que dans des cas très simples. Pour répondre aux questionnements complexes, différents types de modèles numériques peuvent être mis en œuvre : modèles globaux (types "boîte noire" ou conceptuel - ie à base physique), semi-globaux (type conceptuel) ou spatialisés. Ainsi, les solutions analytiques atteignent vite leurs limites, les conditions d'application étant en général très restrictives : milieu homogène, infini ou semi-infini ; régime hydraulique permanent ou régime transitoire en réponse à une impulsion brève ou continue (Barthélemy et Seguin, 2016). Dans les cas pratiques, les limites sont en effet irrégulières, le milieu est hétérogène (variabilité spatiale des propriétés relatives à l'écoulement et au transport), les valeurs des termes "sources" sont variables dans le temps et réparties dans l'espace, etc. (Dassargues, 1995). Les modèles, de type spatialisé, utilisés dans le cadre de ce travail (dit également distribué ou maillé), permettent de rendre compte de la variabilité spatiale du domaine en représentant de manière plus explicite la réalité. Ces modèles permettent la résolution des équations de l'écoulement (et du transport), dans un domaine étudié, en recherchant une variable définie en chaque point de l'espace (x, y et z) et à chaque instant t (en régime transitoire). Ainsi, pour l'écoulement d'une nappe d'eau souterraine, il s'agira par exemple de déterminer la charge hydraulique H en tout point de de l'espace (de la nappe) en fonction du temps (H(x,y,z,t)) à partir de paramètres hydrodynamiques connus (perméabilité, transmissivité, emmagasinement), de conditions aux limites et de conditions initiales à un instant donné. Les modèles spatialisés (maillés) offrent la plus large gamme d'utilisation : ils sont notamment incontournables pour la représentation des systèmes aquifères multicouches, systèmes complexes pouvant contenir plusieurs nappes libres et/ou captives, où chaque couche aquifère peut échanger de l'eau par drainance verticale avec les couches sus et sous-jacentes ou bien latéralement (Barthélemy et Seguin, 2016).

Le principe des modèles spatialisés réside dans la discrétisation du domaine d'étude :

- dans l'espace (maillage),
- dans le temps pour les régimes transitoires.

Différentes méthodes numériques sont utilisées en modélisation hydrogéologique : méthode des éléments finis, méthode des différences finies, méthodes des volumes finis. Dans les travaux qui seront proposés par la suite, le code de calcul MARTHE (Modélisation d'Aquifères par Maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements),

développé par le BRGM, sera utilisé. Ce logiciel est basé sur la méthode des volumes finis avec maillage parallélépipédique (Thiéry, 2020).

Le code de calcul MARTHE permet de modéliser les hydrosystèmes en intégrant, de manière couplée, les écoulements souterrains (aquifères monocouches et multicouches), le bilan hydroclimatique (pluie, neige, évapotranspiration), et les réseaux hydrographiques (rivières, cours d'eau, drains). Il permet également de prendre en compte le transport de masse et le transfert de chaleur, en zone saturée et en zone non saturée, en milieux monophasique et diphasique, en fonction des effets densitaires et des effets thermiques. Il est possible de représenter des systèmes complexes multicouches, avec disparition locale de couche et présence de surfaces libres en n'importe quelle couche. Le maillage peut intégrer des sous-maillages gigognes pour affiner localement la discrétisation.

2.2. LES DIFFERENTES ETAPES DE L'ELABORATION D'UN MODELE HYDROGEOLOGIQUE

2.2.1. Définition du cadre de la modélisation et conceptualisation

La première étape dans la conception et l'application d'un modèle est de définir la nature du problème et l'objectif du modèle. Cette étape est étroitement associée à l'élaboration d'un modèle conceptuel (Yurtsever et al., 2001), consistant à choisir les hypothèses fondamentales qui vont sous-tendre toute la modélisation. Les hypothèses retenues réduisent le problème réel en un problème simplifié, qui doit être acceptable au vu des objectifs de modélisation et des questions spécifiques auxquelles il faut répondre (Dassargues, 1995). Ces choix conditionnent ainsi le type de modèle à mettre en œuvre, l'extension du secteur à modéliser, le nombre de couches (monocouche, multicouche), la nature des phénomènes à considérer (cours d'eau, transports de masses, prise en compte des effets densitaires etc.), les pas d'espace (taille du maillage) et de temps (mensuel, décadaire, journalier etc.) à adopter pour les simulations, etc... L'ensemble de ces informations permettra d'orienter les phases de collecte, d'analyse et de synthèse des données.

Dans le cadre du projet GAIA, le travail de conceptualisation a été réalisé au cours des différents travaux (Manceau et al., 2018 ; Wuilleumier et al., 2016, notamment). Il est poursuivi dans le présent rapport.

2.2.2. Collecte, analyse et synthèse des données

Les données à acquérir et à traiter (analyse de leur validité) pour la construction d'un modèle spatialisé concernent la structure géologique du/des réservoir(s) et des encaissants, les propriétés hydrogéologiques de ces formations, le contexte hydraulique, les chroniques hydroclimatiques, l'historique des prélèvements etc. Lorsque les écoulements souterrains interagissent avec un réseau hydrographique, il faut en outre caractériser les échanges entre nappe(s) et cours d'eau. Enfin, il n'est pas rare que des campagnes de mesures, investigations de terrain (nivellement, jaugeages, etc.), enquêtes socio-économiques, analyse de photos aériennes, imagerie satellite, recherches bibliographiques, etc. soient nécessaires pour combler des lacunes de données jugées trop pénalisantes (Barthélemy et Seguin, 2016).

Les principaux types de données nécessaires à l'élaboration des modèles d'écoulement sont les suivants :

- géologie : les données géologiques permettent de déterminer la géométrie des couches à modéliser, la distribution des faciès, les paramètres pétrophysiques associés à ces faciès,

l'interprétation de l'existence de failles (sources : bases de données géologiques, données géophysiques, rapports d'études...) ;

- hydrogéologie : caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère, piézométrie de la nappe en périodes contrastées (au minimum basses et hautes eaux), chroniques piézométriques etc... (sources : base de données, rapports d'études, ...);
- hydrologie : réseau hydrographique (caractérisé par sa géométrie largeur, longueur et profondeur débits, niveaux...) (sources : BD Carthage, Banque Hydro, rapports d'études..) ;
- topographie : cote du sol (sources : Institut Géographique national, LIDAR) ;
- climatologie : pluviométrie et évapotranspiration (source : Météo-France) ;
- pédologie : réserve utile en eau (sources : INRA, chambres d'agricultures, rapports d'études,..);
- prélèvements d'eau et rejets: pour l'alimentation en eau potable (AEP), l'irrigation et autres (industrie, particuliers...) (sources : Agences de l'eau, DDT, chambres d'agricultures, syndicat d'eau,...).

Ces données ont été collectés et des données hydrogéologiques et hydrogéochimiques complémentaires ont été acquises tout au long du projet et ont fait l'objet de différents rapports (Wuilleumier et al., 2015 ; Wuilleumier et al., 2017 ; André et al., 2019).

2.2.3. Construction optionnelle d'un modèle géologique 3D

Dans le cas d'un modèle complexe et de grande étendue, il est recommandé de construire, préalablement au modèle hydrogéologique, un modèle des formations géologiques en 3D à l'aide d'un modeleur géologique. Ce type d'outil permet une construction cohérente et actualisable (en fonction de nouvelles données qui pourraient être récoltées) de l'architecture des couches géologiques en intégrant notamment l'ensemble des données structurales (ex. failles). La structure géologique peut ensuite être exportée dans le modèle hydrogéologique et constituer la géométrie des aquifères. A noter qu'il est impératif que l'hydrogéologue et le géologue puissent travailler ensemble sur la réalisation de ce type d'outil.

Suite aux nombreux travaux de géologie réalisés dans le cadre du projet GAIA, un modèle géologique 3D a été construit avec le logiciel Petrel[®] (Lasseur et al., 2022). Ce travail fait l'objet de la rédaction d'un rapport de restitution expliquant la mise en œuvre de ce modèle géologique. L'import du modèle géologique sous le code de calcul MARTHE est présenté dans le présent rapport.

2.2.4. Construction du modèle hydrogéologique ou d'écoulement souterrain

La construction d'un modèle consiste à organiser les données récoltées sous une forme utilisable par le logiciel de modélisation, en générant des fichiers compatibles avec ce logiciel. Une fois la taille des mailles définie, chaque maille est renseignée avec la description de la géométrie du système aquifère, des propriétés hydrogéologiques du milieu, des conditions aux limites et des entrées/sorties hydrauliques. A noter que les données doivent être intégrées au modèle hydrogéologique sous la contrainte de sa résolution spatiale et temporelle. A noter également que cette étape nécessite l'élaboration d'un modèle conceptuel précisant le fonctionnement attendu du système aquifère, ce modèle conceptuel pouvant évoluer au regard des résultats fournis par le modèle numérique.

2.2.5. Calage du modèle (ou calibration)

La connaissance, en tout point du secteur d'étude, des informations hydrogéologiques (paramètres hydrodynamiques, niveaux de nappes etc.) n'est, d'une manière générale, pas possible. En effet, ces informations ne sont disponibles que très ponctuellement, et l'estimation de ces paramètres dans l'emprise du modèle doit être réalisée (distribution spatiale généralisée). Par ailleurs, viennent s'ajouter des effets d'échelle : lorsqu'un paramètre est mesuré à une échelle très locale et qu'il doit être utilisé, dans le modèle, à un niveau d'échelle supérieur (dans une maille ou un ensemble de mailles par exemple). Il est nécessaire alors de vérifier si les résultats du modèle sont réalistes. Cette procédure est appelée calibration ou calage du modèle et consiste à minimiser la différence entre mesures et résultats (chronique piézométrique, débits de cours d'eau) par l'ajustement des données d'entrée (paramètres hydrogéologiques), jusqu'à ce que le modèle reproduise les conditions du champ mesuré avec un niveau de précision acceptable. Le calage peut être réalisé dans un premier temps en régime permanent (temps théoriquement infini) avec un seul état restitué (état piézométrique par exemple) à partir d'un seul jeu de données d'entrée (recharge, prélèvements etc.). Il sert généralement à « dégrossir » le calage du champ de perméabilité et à restituer les principales directions d'écoulement. Le régime transitoire tient compte du facteur "temps", en intégrant des chroniques de paramètres en entrée du modèle (chroniques de recharge, chroniques de prélèvements) et fournit ainsi des chroniques de sortie (chroniques piézométriques, débits de cours d'eau etc.).

Cette étape du travail de modélisation est déterminante, car elle vise à identifier une distribution spatiale des paramètres hydrogéologiques qui permet d'atteindre une bonne adéquation entre résultats de simulation et observations de terrain, aussi bien en termes de charges hydrauliques que de débits de sources et cours d'eau. A noter que la comparaison entre les observations et les résultats de calcul n'aboutira généralement jamais à une parfaite adéquation (du fait de l'échelle de travail également), le modèle n'étant qu'une approximation du système réel, construit avec une série d'hypothèses de travail sous-jacentes, propres à chaque opérateur.

Dans la mesure du possible, pour le calage du modèle, devra être retenue une période d'observations, comportant des épisodes hydrodynamiques semblables à ceux qui pourront être simulés lors des scénarios prévisionnels, de façon à pouvoir apprécier la représentativité du modèle dans cette plage de fonctionnement.

Les paramètres à ajuster au cours du calage sont ceux qui définissent les propriétés hydrauliques du milieu, les paramètres intervenant dans l'estimation de la recharge et les paramètres du cours d'eau quand le réseau hydrographique est pris en compte. Pour faciliter cette opération, des zones homogènes peuvent être prédéfinies, sur la base d'une analyse hydrogéologique préalable, ou être constituées en cours de calage, grâce à l'amélioration progressive des connaissances et à la meilleure perception du comportement dynamique du système aquifère, apportées par cette phase de travail (Barthélemy et Seguin, 2016).

Pratiquement et d'une façon générale, une procédure de calage par "essais-erreurs" est réalisée par l'hydrogéologue modélisateur et se fait donc par le jugement et l'expérience de ce dernier, afin d'obtenir finalement une calibration fiable. Des procédures de calage automatique peuvent être proposées, mais elles restent, pour le moment, délicates à mettre en œuvre pour les systèmes aquifères multicouches complexes et de grande envergure. Le jugement et l'expérience de l'hydrogéologue modélisateur restent des facteurs majeurs pour le calage à la fois précis et efficace d'un modèle, même si des procédures automatisées sont utilisées (Yurtsever et al., 2001).

Ces deux dernières étapes sont décrites dans le présent rapport.

3. Géométrie du modèle : import des données du modèle géologique Petrel[©] et intégration des faciès

Les travaux de géologie concernant le Bassin d'Aquitaine, réalisés dans le cadre du projet GAIA, ont débouché sur la réalisation d'un modèle géologique 3D. Dans ce chapitre, est présentée l'approche ayant permis la transposition des informations géologiques dans le modèle hydrogéologique. Pour de plus amples informations sur la construction du modèle géologique, le lecteur est invité à consulter le rapport dédié de Lasseur et al. (2022).

3.1. IMPORT DES GEOMETRIES

Les géométries des différentes formations modélisées avec le logiciel Petrel[©] ont été importées sous le logiciel de modélisation hydrogéologique MARTHE (c'est la version 7.8 d'août 2020 qui a été utilisée ; Thiéry, 2020). Toutefois, un import direct de cette géométrie n'a pas été possible ; le code de calcul MARTHE requérant un maillage rectangulaire, alors que le logiciel Petrel[®] produit un maillage adaptatif en fonction des contraintes géologiques. Un nouveau maillage régulier à la résolution de 500 m x 500 m, de même extension que le modèle géologique Petrel[®] et contenant 9 couches (nombre de formations modélisées géologiquement), a donc été construit directement sous MARTHE. Pour chacune des couches, la liste des mailles inexistantes dans le modèle géologique (correspondant à des zones où cette formation est absente) a été importée sous MARTHE, puis ces mailles ont été désactivées. Enfin, les altitudes des surfaces du modèle géologique (toits et murs des différentes formations) ont été transférées depuis Petrel[®] vers MARTHE.

Au final, le modèle hydrogéologique construit par cette procédure contient près de 800 000 mailles et son emprise est de plus de 30 000 km². Les différentes formations considérées dans le modèle géologique sont les suivantes :

- 1 Molasse supérieure
- 2 Molasse inférieure
- 3 Sables de Lussagnet
- 4 Grès à Nummulites
- 5 Marnes de l'Eocène
- 6 Flysch & Calcaires yprésiens (Ilerdien)
- 7 Paléocène
- 8 Campanien
- 9 Crétacé supérieur ante-Campanien.

Les différentes couches des modèles géologique et hydrogéologique sont présentées à l'Illustration 1.



Illustration 1 - Extension des différentes formations du modèle géologique

Projet GAIA. Construction et calage du modèle hydrodynamique

3.2. MODIFICATIONS DES GEOMETRIES

3.2.1. Prise en compte de la molasse dans le modèle hydrogéologique

D'un point de vue hydrogéologique, représenter le fonctionnement des calcaires du Bartonien (couche 2 - Molasse inférieure) par l'intermédiaire d'une couche ne paraît pas pertinent dans la mesure où cette formation est constituée de petits niveaux calcaires indépendants peu connus en terme d'extension et en grande majorité déconnectés des Sables infra-molassiques. Il a donc été décidé, dans la première version du modèle, de ne pas considérer ces niveaux qui peuvent être localement aquifères et de fusionner la Molasse supérieure et la Molasse inférieure au sein d'une seule couche, dans le modèle hydrogéologique, représentant les formations molassiques. A noter que les seuls calcaires de l'Eocène moyen, connectés aux Sables infra-molassiques (et donc à considérer d'un point de vue hydrogéologique), sont les Calcaires de Nousse qui avaient déjà été considérés dans la formation des Sables de Lussagnet, lors de la construction du modèle géologique. Avec ce choix, le modèle hydrogéologique est constitué de 8 couches actives.

On rappelle également que les formations peu profondes en recouvrement des molasses ou des formations sous-jacentes n'ont pas été discrétisées dans le modèle géologique : elles ont été, d'un point de vue géométrique, intégrées aux formations sous-jacentes (donc la plupart du temps aux formations molassiques), afin 1) de permettre plus facilement la prise en compte de ces formations superficielles, dans une future version du modèle hydrogéologique, et 2) de conserver une certaine cohérence avec le modèle géologique. C'est pourquoi, il a été décidé de garder la numérotation du modèle géologique des couches 3 (Sables de Lussagnet) à 9 (Crétacé supérieur ante-campanien). Au final, les 8 couches actives du modèle hydrogéologique (et leur numérotation) sont donc les suivantes :

- couche n°1 Formations molassiques
- couche n°3 Sables de Lussagnet
- couche n°4 Grès à Nummulites
- couche n°5 Marnes éocènes
- couche n°6 Flysch & Calcaires yprésiens (llerdien)
- couche n°7 Paléocène
- couche n°8 Campanien
- couche n°9 Crétacé supérieur ante-Campanien

[Dans le futur, le modèle pourra rapidement évoluer vers 9 couches actives :

- couche n°1 Formations superficielles
- couche n°2 Formations molassiques
- couche n°3 Sables de Lussagnet
- couche n°4 Grès à Nummulites
- couche n°5 Marnes éocènes
- couche n°6 Flysch & Calcaires yprésiens (llerdien)
- couche n°7 Paléocène
- couche n°8 Campanien
- couche n°9 Crétacé supérieur ante-Campanien]

3.2.2. Modifications dans la géométrie des marnes éocènes

De fortes incertitudes existent à propos de l'épaisseur des marnes éocènes, au sein du modèle géologique. En effet, cette couche des marnes n'a pas été modélisée en tant que telle, mais a été construite comme couche résiduelle à partir de la modélisation de la formation des Sables infra-molassiques puis des sous-formations des Sables de Lussagnet et des Grès à Nummulites. De ce fait, cette couche « résiduelle » peut présenter des lacunes ou des faibles épaisseurs dans des secteurs où la couche est bien continue.

Or, cette formation joue un rôle hydraulique important dans les relations entre l'aquifère des Sables infra-molassiques et celui des Calcaires yprésiens (Ilerdien) et paléocènes. De faibles épaisseurs, voire des lacunes modélisées dans des zones où les marnes seraient présentes, aboutiraient à d'importantes erreurs de modélisation. Afin de pallier ce problème, une couche continue, sous l'ensemble des Sables de Lussagnet et des Grès à Nummulites (avec une épaisseur minimale de 1 mètre), a été ajoutée. Aussi, les marnes sont considérées *a priori* comme totalement imperméables, afin de diminuer les conséquences d'erreurs d'estimation des épaisseurs. Le risque de cette opération est de combler éventuellement des lacunes réelles, il s'agira donc, au cours du calage, d'ajuster les valeurs de perméabilité de cette couche 5 - Marnes de l'éocène - pour permettre un écoulement là où les marnes seraient réellement absentes et ne joueraient donc pas un rôle d'« écran ».

A la suite des modifications faites sur les géométries, le modèle est constitué de 675 780 mailles.

3.3. INTEGRATION DES FACIES

Une des originalités du modèle géologique est l'intégration, au sein d'une même couche, de portions aquifères et non aquifères, d'une même formation stratigraphique alors qu'il est d'usage habituellement, dans les modèles hydrogéologiques, de séparer les couches aquifères et aquitards (considération des formations litho-stratigraphiques). Du fait d'avoir les faciès aquifères et non aquifères dans une même couche nécessite toutefois d'avoir en possession *a minima* des cartes de faciès pour chacune des couches du modèle, faciès permettant de construire de premières zones de perméabilité différente, basées sur la géologie.

Les cartes de faciès considérées pour les couches 3 (Sables de Lussagnet), 4 (Grès à Nummulites), 6 (Flysch & Calcaires yprésiens - Ilerdien) et 7 (Paléocène) sont celles produites dans le cadre de GAIA. Elles sont présentées en Annexe 1.

Concernant les couches du Crétacé supérieur (8 et 9), les cartes paléogéographiques de la Synthèse géologique et géophysique des Pyrénées (BRGM / AGSO, 2018) ont été utilisées. La couche 8 du modèle géologique est basée sur la carte du Maastrichtien moyen et sur celle du Campanien inférieur, avec prise en compte de l'avancée des faciès deltaïques au sud-est du domaine d'étude. La carte du Coniacien supérieur a été considérée pour la couche 9 (la carte du Cénomanien est similaire et aurait également pu être utilisée).

Les différentes zones de géométrie liées au faciès et considérées dans le modèle hydrogéologique sont présentées à l'Illustration 2. Pour le moment, sont distingués les faciès aquifères des faciès non-aquifères, ces cartographies fournissent donc un indice qualitatif de perméabilité *a priori* basé sur la géologie. Lors de la calibration du modèle, l'objectif a été de conserver, dans la mesure du possible, les zones correspondant aux différents faciès avec tout de même la possibilité de créer des sous-zones en conservant un ordre de grandeur similaire pour les perméabilités et l'emmagasinement.



Illustration 2 - Faciès considérés a priori dans le modèle hydrogéologique

Projet GAIA. Construction et calage du modèle hydrodynamique

4. Conditions aux limites du modèle et recharge

Les conditions aux limites et de prise en compte de la recharge aux affleurements des aquifères sont résumés sur la carte de l'Illustration 4.

4.1. CONDITIONS AUX LIMITES

Le secteur d'étude est bordé à l'ouest par l'océan, au sud par le Front nord-pyrénéen, à l'est par les contreforts du Massif Central et de la Montagne Noire, et au nord par une limite fixée par le cours du Tarn et de la Garonne. A noter que ces limites sont très éloignées des zones à enjeux et, même si elles conditionnent les résultats du modèle, elles n'ont pas une influence directe sur ces zones.

4.1.1. Conditions aux limites à l'ouest du secteur d'étude

Seules les formations crétacées présentent des faciès potentiellement aquifères au droit de la bordure ouest du modèle hydrodynamique. Une éventuelle connexion hydraulique entre la nappe du Crétacé supérieur et l'océan est néanmoins une des inconnues du problème à traiter. Cette formation est continue jusqu'à l'océan, mais la question de ses caractéristiques aquifères jusqu'aux zones de contact entre cette formation et l'eau de mer, ou bien jusqu'à d'éventuels aquifères-relais, reste sans réponse définitive : les cartes paléogéographiques montrent, en direction du nord-ouest, des lithologies de plus en plus marneuses avec le passage de faciès calcaires à des faciès calcaires marneux, puis à des marnes dans le bassin de Parentis. Mais, Sauty (1997) rappelle que les tests pétroliers réalisés entre Soustons et Mimizan ont fait, pour la plupart, état de « pertes totales » en cours de forage.

Avant la calibration du modèle et puisque l'hypothèse d'une telle connexion hydraulique ne peut être exclue, les conditions existantes aux limites entre l'océan et l'aquifère du Crétacé supérieur doivent être établies. Il paraît raisonnable de considérer l'océan comme une charge imposée représentant un niveau de base en « sortie » de modèle et donc de l'aquifère, valeur de charge qui permettra de quantifier ces échanges.

Wuilleumier et al. (2017) ont abordé la question de la possibilité d'émergences offshore des aquifères profonds du sud du Bassin aquitain, notamment sous l'angle des charges hydrauliques nécessaires à l'existence de telles émergences. La pression imposée par l'océan au niveau d'éventuelles connexions avec l'aquifère du Crétacé supérieur ou bien avec des aquifères-relais dépend 1) de la température de l'eau de mer, depuis la surface jusqu'à la profondeur des connexions, 2) de la salinité de cette colonne d'eau de mer, 3) de l'altitude de la surface de l'eau de mer (charge d'eau de mer) et 4) de la profondeur de ces connexions. Les trois premiers éléments peuvent être estimés, mais le quatrième est inconnu. D'ailleurs de façon plus générale, c'est la localisation même de ces zones de contact qui n'est pas connue.

En se basant sur les niveaux moyens fournis par le SHOM (RAM, 2017) au niveau des sites de référence localisés en bordure de notre zone d'étude, nous obtenons pour :

- Capbreton : un niveau moyen de 2,4 m, pour une cote de zéro hydrographique de + 2,1 m NGF = +0,3 m NGF ;
- Mimizan : un niveau moyen de 2,2 m, pour une cote de zéro hydrographique de + 2,2 m NGF = 0 m NGF.

Un niveau moyen autour de 0 m NGF peut donc être retenu, dans le modèle hydrodynamique, pour la charge d'eau de mer. Les température et salinité de l'eau de mer dans le Golfe de Gascogne sont d'environ 11°C et de 35,5 g/L (Ifremer, 2012). On peut donc considérer que l'océan impose une pression égale à cette colonne d'eau salée et froide, jusqu'à la profondeur des contacts avec le Crétacé supérieur (ou avec un aquifère-relais).

La question de l'influence de la température (et de la salinité) sur les charges hydrauliques est plus amplement discutée au chapitre 7 (Prise en compte des effets de température) de ce rapport. Pour bien comprendre comment la profondeur des contacts peut jouer sur les charges à imposer au modèle, l'Illustration 3 montre la charge d'eau douce équivalente à la charge d'eau de mer selon la profondeur des connexions éventuelles. Ainsi, comme indiqué par Wuilleumier et al. (2017), « le potentiel minimal à atteindre pour une émergence se situe au droit du littoral, tandis qu'il augmente au fur et à mesure de l'éloignement à la côte et de l'augmentation de la bathymétrie. Le seul secteur identifié dans lequel les formations éocènes et anté-éocènes sont affleurantes sur les fonds marins à des profondeurs permettant d'envisager une exhaure se situe en face des côtes basques. Aucune observation de terrain n'a permis cependant de confirmer l'existence de ce potentiel ».

Concernant d'autre exutoires éventuels plus profonds (au niveau de canyons comme le gouf de Capbreton), il est notable que les pressions pour lesquelles une émergence *offshore* serait possible sont fortes, en tous les cas, éloignées de la valeur de 0 m NGF qui aurait pu être prise en compte sans considération de la salinité et de la température. Les charges d'eau douce équivalentes ne pouvant pas seules expliquer les directions d'écoulement, lorsque les effets de température et de salinité sont considérés (voir chapitre 7), ces valeurs ne permettent pas de conjecturer directement un sens d'écoulement : les résultats du modèle hydrodynamique pourront être des éléments explicatifs.

L'étude de Wuilleumier et al. (2017) concluant qu'aucune zone d'affleurement permettant d'éventuels exutoires ne se dégage clairement, les conditions considérées aux limites ouest du modèle hydrodynamique sont les suivantes : température de 11 C, salinité de 35,5 g/L et charge d'eau froide et salée de 0 m NGF, appliquées aux mailles de la couche du Campanien. Cela revient en fait à considérer les bordures du modèle comme zones de contact directes entre le Crétacé supérieur et l'océan (à des profondeurs moyennes de 1 000 m).

NB. La prise en compte de contacts indirects via des aquifères-relais est encore moins triviale : une façon de faire lors de la calibration du modèle serait de considérer une charge d'eau froide et salée plus faible aux limites, de sorte à artificiellement considérer une colonne d'eau aux propriétés différentes (moins salée et moins froide, donc plus légère) lors du passage *via* ces aquifères-relais.



Illustration 3 - Charge d'eau douce équivalente, imposée par l'océan, en fonction de la profondeur des zones d'échange éventuelles entre l'aquifère du Crétacé supérieur et l'océan

4.1.2. Conditions aux limites au nord du secteur d'étude

Mis à part les formations molassiques, les Marnes éocènes et le Paléocène pour lesquels les faciès ne sont pas perméables en limite nord de l'emprise du modèle, toutes les autres formations s'étendent au-delà de la limite du modèle. Afin de prendre en compte au mieux ces échanges avec le nord du modèle, le modèle hydrodynamique peut bénéficier des résultats du Modèle Nord-Aquitain MONA (Buscarlet et al., 2019) qui chevauche la zone d'étude, dans ce secteur. Toutefois les charges hydrauliques calculées dans le modèle MONA ne peuvent être intégrées directement pour différentes raisons :

- Les couches des deux modèles ne sont pas identiques : il s'agit donc d'associer aux formations discrétisées, dans le modèle hydrodynamique GAIA, les formations considérées dans le modèle MONA :
 - \circ SIM (3 & 4) du modèle GAIA \leftrightarrow aquifère de l'Eocène moyen du modèle MONA
 - ○Calcaires yprésiens (Ilerdien) (6) du modèle GAIA ↔ aquifère de l'Eocène inférieur du modèle MONA
 - oaquifère du Crétacé supérieur (8 & 9) du modèle GAIA ↔ aquifère du Campanien du modèle MONA.
- Les modalités de modélisation diffèrent également. Il est attendu que le modèle GAIA prenne en compte les effets de la température des formations profondes. Les charges issues du MONA (modèle isotherme) ne peuvent donc pas être imposées directement. Il n'existe pas de manière parfaite d'intégrer ces charges, mais il est décidé de considérer une température de 20°C dans toutes les mailles où les charges du MONA sont imposées pour qu'il y ait cohérence entre les charges imposées (voir la discussion sur la prise en compte des effets de température au chapitre 7).
- Enfin ce sont des charges annuelles qui ont été extraites du modèle MONA ; elles sont simplement lissées pour s'adapter au pas de temps mensuel qui est attendu pour le modèle hydrodynamique GAIA.

NB. Des incertitudes assez importantes existent sur les charges imposées dans ce secteur nord du modèle GAIA (notamment pour le Crétacé), dans la mesure où le modèle MONA, dans sa partie sud, restitue des niveaux pour lesquels des incertitudes existent du fait d'un manque de données observées dans cette nappe, pour la calibration du modèle.

4.1.3. Conditions aux limites au sud et à l'est du secteur d'étude

La limite sud de l'emprise du modèle géologique a été fixée sur ou au nord du Chevauchement frontal nord-pyrénéen : les écoulements souterrains à travers cette limite sont donc jugés très limités, étant donnée la compartimentation ayant résulté de ce chevauchement. Une limite à flux nul est donc considérée.

La limite orientale se trouve en limite d'extension des différentes couches, ce qui plaide également pour une limite à flux nul.

NB. Nous verrons plus loin dans ce chapitre (paragraphe 4.2.2) que des limites à potentiel imposé sont considérées localement au sud et à l'est du domaine d'étude, pour prendre en compte notamment la recharge en surface aux affleurements.

4.1.4. Prise en compte des formations molassiques

Comme indiqué précédemment, les formations superficielles aquifères ne sont pas intégrées au modèle hydrodynamique en tant que couche individualisée, mais elles sont intégrées dans la première couche du modèle, c'est-à-dire aux formations molassiques lorsque ces dernières sont présentes. Cette couche des formations molassiques est considérée comme une formation très peu perméable, mais sa charge est tout de même prise en compte dans le modèle afin de calculer d'éventuels échanges avec les couches sous-jacentes. Plutôt que de mettre en place un flux de recharge dans cette couche des molasses (couche n°1), il a été décidé de la considérer dans son entièreté comme une limite à charge imposée, avec comme charge, son altitude topographique (issue du Modèle Numérique de Terrain considéré lors de l'élaboration du modèle géologique).

4.2. RECHARGE AUX AFFLEUREMENTS

4.2.1. Affleurements au niveau des différentes structures

Les aquifères de surface, ainsi que le réseau hydrographique qui constitue l'exutoire principal de ces nappes superficielles n'étant pas explicitement intégrés au modèle, dans cette première version, la recharge est donc appliquée seulement au niveau des affleurements des aquifères profonds modélisés, essentiellement au niveau des différentes structures localisées le long de la flexure celtaquitaine ou de la ride d'Audignon, ou bien au niveau de pointements salifères dans la région de Dax et de Bastennes-Gaujacq. L'infiltration au niveau de ces structures est complexe et issue de phénomènes potentiellement très locaux : interception du flux d'infiltration par des nappes alluviales superficielles, relations avec les cours d'eau (dont des pertes éventuelles). L'utilisation d'un bilan climatique « classique » (calcul de la pluie efficace et partition entre ruissellement et infiltration) et l'application à l'échelle du modèle hydrodynamique ne sont donc pas aisées. Le flux de recharge à appliquer au droit de ces différentes zones d'affleurements a été obtenu par calage de la manière suivante :

- premier calage « provisoire » des charges à partir d'un flux de recharge constant dans le temps ;

- second calage, en imposant pour chacune des zones de recharge une chronique d'infiltration construite à partir :
 - ode la pluie efficace calculée localement à partir des pluies et ETP SAFRAN¹, et
 - od'un coefficient d'infiltration, constant au cours du temps, appliqué à la pluie efficace : ce coefficient est calculé comme le ratio entre le flux de recharge constant obtenu à partir du premier calage provisoire et la pluie efficace moyenne.

L'objectif principal est d'intégrer l'influence des variations climatiques dans cette première version du modèle hydrodynamique.

NB1. Toutes ces structures ne sont pas *a priori* des zones de recharge, même si un flux de recharge y est appliqué ; c'est le résultat des simulations qui permettra de distinguer les exutoires des zones de recharge et de vérifier la cohérence entre les résultats de la modélisation hydrodynamique et les observations de terrain (cf. l'étude des exutoires des aquifères profonds du sud du Bassin aquitain réalisée dans le cadre du projet GAIA ; Douez et al., 2019).

NB2. En l'absence de considération des couches superficielles, une recharge fixe (arbitrairement choisie à 100 mm/an) est appliquée aux Marnes éocènes (non perméables), quand elles affleurent, dans le but d'assurer une saturation en eau de ces formations.

4.2.2. Autres affleurements

Des affleurements des aquifères profonds existent également sur le piémont pyrénéen, ainsi qu'en bordure sud-est de la zone d'étude. Les Sables infra-molassiques pourraient être rechargés :

- au sud de Pau, dans le secteur de Bordes-Angaïs, dans la zone alluviale du gave de Pau où les sables de Baliros sont en contact avec les alluvions. On retrouve également dans cette zone des conglomérats peu consolidés (poudingues de Jurançon) qui permettraient une éventuelle recharge indirecte des SIM sur une zone plus large (Lasseur et al., 2021).
- sur les contreforts de la Montagne Noire et dans le piémont pyrénéen (secteur des Petites Pyrénées - Plantaurel, qui s'étend parallèlement aux Pyrénées depuis Saint-Marcet à l'ouest jusqu'à Lavelanet à l'est). L'éventuelle recharge directe ou indirecte des SIM dans ces deux secteurs a fait l'objet d'un rapport dans le cadre du projet GAIA (Saplairoles et al., 2017 - RP-65024-FR) :
 - Au droit des contreforts de la Montagne Noire, dans le bassin de Castres et Albi, les premières formations infra-molassiques correspondent aux argiles à graviers. Les ordres de grandeur des perméabilités de ces argiles aux affleurements, estimés dans le cadre du projet GAIA, sont favorables à une infiltration des eaux. Toutefois, les rares informations disponibles à propos de ces faciès plaident pour une hétérogénéité verticale importante, rendant incertaine une éventuelle alimentation des SIM du centre

¹ SAFRAN est un système d'analyse à méso-échelle de variables atmosphériques près de la surface du sol. Il utilise des observations de surface combinées à des données d'analyse de modèles météorologiques pour produire les paramètres horaires suivants : température, humidité, vent, précipitations solides et liquides, rayonnement solaire et infrarouge incident. Ces paramètres sont analysés par pas de 300 m d'altitude. Ils sont ensuite interpolés sur une grille de calcul régulière (8 x 8 km). Le système d'analyse Safran a été développé à l'origine par le Centre d'études de la neige (Durand et al., 1993) pour la prévision des risques d'avalanches. L'acronyme Safran signifie : Système d'Analyse Fournissant des Renseignements A la Neige. Il a ensuite été étendu à l'ensemble de la France métropolitaine (Le Moigne, 2002 ; Vidal et al., 2010).

du bassin par les argiles à graviers (zones de recharge locales, cf. Lasseur et al., 2021);

•Concernant le secteur des Petites Pyrénées - Plantaurel, la faible perméabilité apparente des formations équivalentes aux SIM, présentes dans ce secteur : faciès deltaïques argilo-sableux et partie inférieure des poudingues de Palassou (l'étude spécifique de ces Poudingues -André et al. (2019)- a permis des mesures de perméabilité moins favorables que celles des argiles à graviers) ne plaide pas pour une recharge importante des SIM.

Les calcaires du Paléocène et du Crétacé supérieur affleurent également dans le secteur des Petites Pyrénées - Plantaurel. Des pertes, en relation avec des phénomènes karstiques, ont notamment été observées, dans le Plantaurel, dans les calcaires du Paléocène, à l'occasion du projet GAIA. D'après Lasseur et al. (2022), les faciès les plus favorables à une alimentation des aquifères profonds semblent être les dépôts deltaïques et continentaux du Campanien-Maastrichtien, ainsi que les dépôts du Paléocène qui affleurent en limite sud-est du modèle hydrodynamique (zone de Mirepoix, Lavelanet) dans la mesure où ces ensembles y sont relativement peu déformés et/ou localisés sur un chevauchement. Ailleurs, le long des Petites Pyrénées, des affleurements existent aussi, mais étant donnée la déformation principalement postérieure à ces dépôts (soulèvement et transport de la zone sub-pyrénéenne à l'Eocène supérieur), la connexion directe entre aquifère est probablement assez faible (Lasseur et al., 2022).

Etant données les incertitudes associées à ces différentes zones d'alimentation, à leurs localisations précises, aux phénomènes impliqués (recharge directement due à la pluviométrie, pertes de cours d'eau), ces différentes informations ont été intégrées de la manière suivante :

- La recharge des SIM au sud de Pau est considérée par une zone à charge imposée, dans la couche des Sables de Lussagnet, à une valeur qu'il s'agira de déterminer lors de la phase de calibration (couche 3);
- La recharge des SIM à l'est du modèle n'est pas considérée dans le modèle, pour le moment. La calibration dudit modèle viendra confirmer ou infirmer cette hypothèse.

La recharge des aquifères du Paléocène et du Crétacé supérieur est considérée par une zone à charge imposée dans la partie orientale des faciès deltaïques de la couche du Campanien (couche 8), à une valeur de charge qui sera déterminée lors de la phase de calibration. Puisque les aquifères du Paléocène (couche 7) et du Crétacé supérieur ante-Campanien (couche 9) sont en relation avec le Campanien, d'éventuelles alimentations des aquifères profonds par l'intermédiaire de ces couches seraient quand même prises en compte. De plus, cette condition aux limites à l'est a comme intérêt de pouvoir représenter des effets de recharge ayant éventuellement lieu dans le secteur oriental du domaine d'étude, mais dans une zone différente de celle où la condition a été imposée, voire de pouvoir représenter d'autres échanges se produisant aux abords de cette limite comme des échanges avec d'autres aquifères. Il s'agira donc de discuter les quantités d'eau transitant par ce secteur.



Illustration 4 - Récapitulatif des conditions aux limites et de prise en compte de la recharge aux affleurements

5. Prise en compte des stockages de gaz

Deux sites de stockage de gaz en aquifère sont localisés dans la zone d'étude : les sites de Lussagnet et d'Izaute, situés au sud-est de Mont-de-Marsan et ayant débuté les opérations de stockage dans les Sables infra-molassiques respectivement en 1958 et en 1981.

L'étude Manceau et al. (2018), réalisée dans le cadre du projet GAIA, présente en détail la procédure suivie pour la prise en compte dans le modèle hydrodynamique de ces opérations consistant à stocker du gaz en été et à le soutirer en hiver, quand la demande en gaz naturel est forte. Cette procédure consiste à convertir les volumes de gaz injectés et soutirés en volumes d'eau équivalents. Cette conversion nécessite la connaissance des informations suivantes :

- les conditions de pression et de température du réservoir :
 - La température est considérée constante à une valeur de 35°C, pour les deux sites de stockage ;
 - La pression considérée est celle de deux puits de référence, IZA6B pour le stockage d'Izaute et LUG18 pour le stockage de Lussagnet. Les chroniques de pression utilisées dans le modèle hydrodynamique GAIA sont issues du modèle utilisé par TEREGA pour la gestion des stockages de gaz ; elles sont au pas de temps mensuel. Elles sont tracées à l'Illustration 5.
- les volumes normaux de gaz stockés. Les chroniques utilisées dans le modèle hydrodynamique GAIA sont également issues du modèle des stockages de TEREGA ; elles sont au pas de temps mensuel, pour des pressions et températures de référence, respectivement de 1 bar et 0°C. Elles sont fournies à l'Illustration 5.
- une loi de compressibilité dépendant du gaz stocké et des conditions de pression et de température. Cette loi a été fournie par TEREGA, et permet d'obtenir le facteur de compressibilité à intégrer dans la loi des gaz réels.

Une chronique de débit d'eau à injecter / soutirer est ensuite produite par le biais de la formule suivante :

Entre deux dates données,				
$\begin{bmatrix} Volume d'eau \\ équivalent \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Volume normal de gaz \\ injecté/soustrait \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Facteur de \\ compressibilité \end{bmatrix} \times$	$\times \frac{\begin{bmatrix} \text{Pression du} \\ réservoir \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} \text{Pression de} \\ référence \end{bmatrix}} \times \frac{\begin{bmatrix} \text{Température de} \\ référence \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} \text{Température du} \\ réservoir \end{bmatrix}}$			

Dans le rapport Manceau et al. (2018), il est mentionné que, sans correction additionnelle, cette procédure peut conduire à des variations de charge intempestives, lors de certaines transitions soutirage / injection, aux abords directs des sites de stockage. Ce phénomène se produit du fait de la non-homogénéité des pressions au sein du panache de gaz, qui est une des hypothèses de la procédure. La construction des chroniques de débits d'eau équivalents sans correctif montre que ce phénomène se produit très régulièrement au niveau du stockage de Lussagnet (et dans une moindre mesure au niveau du stockage d'Izaute).

La correction, proposée dans Manceau et al. (2018) et permettant que la calibration du modèle hydrodynamique ne soit pas biaisée par ces variations de charge non voulues, a été appliquée à la procédure de conversion. Par ailleurs, un léger lissage de la chronique initiale de pression

d'injection, par moyenne mobile (fenêtre de 1,5 pas de temps pour lzaute et de 2 pas de temps pour Lussagnet), a été ajouté pour renforcer l'atténuation de ces variations brutales de pression.

Les chroniques de débits d'injection d'eau équivalents au pas de temps mensuel sont fournies à l'Illustration 6.



Illustration 5 - Chroniques des pressions du réservoir et des volumes stockés, au droit des stockages de Lussagnet et d'Izaute (informations TEREGA)



Illustration 6 - Débits d'injection d'eau équivalents, au pas de temps mensuel, calculés pour les stockages de Lussagnet et d'Izaute
6. Intégration des points de prélèvements et de surveillance piézométrique

6.1. BASE DE DONNEES DES VOLUMES PRELEVES

La base de données des volumes prélevés annuellement, construite et consolidée dans le cadre du projet GAIA, a été utilisée. Cette base est notamment présentée dans les rapports de Wuilleumier et al. (2015, 2017) et André et al. (2019). Afin de préciser les variations des débits pompés au cours d'une année, des informations additionnelles ont été collectées concernant les volumes mensuels prélevés (André et al., 2019).

La version finale de cette base, présentée dans André et al. (2019), regroupe les ouvrages qui ont été réellement exploités, temporairement ou en continu, au cours de la période 1970-2016. Y sont listés 175 ouvrages captant le Crétacé supérieur, le Paléocène, les Sables infra-molassiques (SIM) et les calcaires de l'Éocène, mais quelques-uns sont associés à des niveaux plus superficiels (argiles à graviers du Bassin de Castres, voire intra-molassiques). A noter qu'aucun code aquifère n'a pu être attribué à 18 forages, faute, dans la plupart des cas, de disposer d'une coupe technique détaillée.

Le premier travail effectué a consisté à attribuer à tous les ouvrages de la base de données une couche du modèle hydrogéologique :

- Dans la version actuelle du modèle hydrogéologique, les ouvrages prélevant dans la nappe des SIM sont affectés par défaut aux Sables de Lussagnet (couche 3). De même, les ouvrages prélevant dans la nappe du Crétacé supérieur sont affectés par défaut au Crétacé supérieur ante-Campanien. Nous verrons plus tard que ces choix n'ont que très peu d'impacts dans la mesure où les données à disposition ne nous permettent pas de discriminer les propriétés hydrodynamiques au sein des SIM (i.e. entre Sables de Lussagnet et Grès à Nummulites), ni au sein du Crétacé supérieur (i.e. entre Campanien et ante-Campanien).
- Quelques ouvrages dont les données avaient été récupérées en phase de synthèse sont localisés en dehors de l'emprise du modèle hydrogéologique : il s'agit de 12 ouvrages captant le Crétacé supérieur : 10 dans le secteur des Petites Pyrénées - Plantaurel et 2 au sud de Dax. Ils ne sont donc pas considérés dans la version actuelle du modèle hydrodynamique.
- Les ouvrages captant des formations locales intra-molassiques ne sont pas pris en compte dans le modèle, du fait de la nature des formations molassiques à l'échelle régionale dans le modèle hydrodynamique (aquitard); en outre, les charges ont été imposées dans les formations molassiques et il ne serait donc pas logique d'y affecter des prélèvements. De même, les captages captant des formations superficielles non modélisées explicitement ne sont pas considérés.
- Certaines incohérences entre la base de données et le modèle géologique ont été notées, du fait vraisemblablement de la résolution du modèle (maille de 500 m x 500 m) : cela concerne notamment deux ouvrages de la commune de Montsoue (structure d'Audignon), captant a priori le Paléocène, qui n'est pas présent au droit de l'ouvrage dans le modèle géologique. Le Crétacé supérieur lui est substitué dans la mesure où Paléocène et Crétacé supérieur sont en connexion dans ce secteur oriental de la structure d'Audignon. Cela concerne également, au niveau de la même structure d'Audignon, l'ouvrage 09782X0010 qui est en limite extérieure de l'emprise du modèle (au niveau du cœur albien de la structure) :

cet ouvrage est déplacé « manuellement » dans la maille adjacente, afin de le réintégrer au modèle.

Les captages de la base de données des prélèvements, considérés ou non dans le modèle hydrodynamique, sont cartographiés à l'Illustration 8. Au final, 123 points de prélèvement sont intégrés dans le modèle hydrodynamique :

- 46 sont affectés à la couche 3 des Sables de Lussagnet ;
- 29 sont affectés à la couche 7 du Paléocène ;
- 48 sont affectés à la couche 9 du Crétacé supérieur ante-Campanien.

Les volumes prélevés associés à ces ouvrages ont été convertis en débits de prélèvement, à affecter aux mailles du modèle hydrodynamique : 89 mailles sont concernées.

Quand les ouvrages ne bénéficiaient pas de données mensuelles, les volumes annuels ont été transformés en volumes mensuels par lissage sur 4 mois, dans cette première approche (juinseptembre) pour les volumes agricoles, et sur 12 mois pour les autres.

L'Illustration 7 fournit les volumes annuels prélevés au sein du modèle hydrodynamique. Pour information, les volumes associés aux ouvrages non considérés dans le modèle sont également indiqués.



Illustration 7 - Volumes prélevés totaux issus de la base de données "prélèvement" et volumes prélevés dans le modèle hydrodynamique



Illustration 8 - Cartographie des points de prélèvement présents au sein de la base de données et modalités de prise en compte dans le modèle

6.2. DONNEES PIEZOMETRIQUES UTILISEES POUR LA CALIBRATION DU MODELE

Une base de données similaire à la base de données "prélèvement", mais recensant les données piézométriques disponibles dans le secteur d'étude a été construite (Wuilleumier, 2015). Cette base de données initiale comporte 114 piézomètres localisés au sein de l'emprise du modèle hydrodynamique :

- 11 captent des aquifères intra-molassiques, ou superficiels. Ils ne sont pas utilisés dans la suite pour la calibration du modèle, celui-ci ne tenant pas compte de ces nappes ;
- 66 captent les SIM : ils sont affectés par défaut (comme pour les points de prélèvement) à la couche 3 des Sables de Lussagnet ;
- 21 captent les calcaires du Paléocène : ils sont affectés à la couche 7 du Paléocène ;
- 16 captent les calcaires du Crétacé supérieur : ils sont affectés par défaut à la couche 9 du Crétacé supérieur ante-Campanien.

Parmi ces ouvrages, 9 sont exclus du modèle hydrodynamique lors de la phase de calibration, en plus des ouvrages captant des aquifères intra-molassiques ou superficiels :

- 7 ne présentent qu'une seule, voire aucune mesure piézométrique (pas de données finalement récupérées) ;
- Certains ont des comportements inexpliqués, sinon anomaliques, comme mis en évidence dans le rapport GAIA de Wuilleumier et al. (2015). C'est le cas des piézomètres :

ode Senac (10312X0001/F);

ode Ponson-Dessus (10304X0002/PNS1).

A noter également que certaines mesures piézométriques sont réalisées dans des puits de pompage et donc fortement influencées par les prélèvements, comme l'ouvrage de Gondrin (09533X0016/F) ou ceux de Bordes (10306X0036/F1, 10306X0033/F2, 10306X0034/F3 et 10306X0035/F4) (Wuilleumier et al., 2015). Ces ouvrages sont quant à eux conservés pour la phase de calibration du modèle, car ils sont en mesure d'apporter des informations essentielles, mais il s'agira de bien considérer ces fortes influences : le code de calcul MARTHE permet en effet par défaut le calcul de la charge hydraulique moyenne au sein d'une maille de taille donnée (500 m x 500 m pour le modèle GAIA). Les niveaux dynamiques mesurés au sein d'ouvrage en phase de pompage s'éloignent du niveau piézométrique moyen (ils sont inférieurs à ce niveau moyen) du fait du rabattement local induit par des pertes de charges dites linéaires et quadratiques. Lors de la calibration du modèle, il faudra donc comparer les charges calculées par le modèle hydrodynamique, hors des phases de pompage et après un délai suffisamment long pour que ces effets locaux soient suffisamment estompés.

Au final, le jeu de données comprend 94 piézomètres (62 dans les SIM, 18 dans le Paléocène et 14 dans le Crétacé supérieur), et près de 260 000 mesures individuelles. La première mesure disponible date du 15/04/1964, mais comme le montre l'Illustration 9, le nombre de mesures piézométriques disponibles augmente surtout après les années 1990. Ainsi, en 1970, on dénombre 53 mesures sur les 260 000 disponibles aujourd'hui ; en 1980, 1 021, et en 1990, 5 685.



Illustration 9 - Evolution du nombre de mesures piézométriques, dans le domaine d'étude, en fonction du temps



Illustration 10 - Cartographie des piézomètres présents au sein de la base de données et modalités de prise en compte dans le modèle

7. Prise en compte des effets de température

7.1. RAPPELS DU RAPPORT MANCEAU ET AL. (2018)

Les formations représentées dans le modèle hydrogéologique affleurent toutes dans le secteur d'étude, mais atteignent également des profondeurs importantes. Les eaux, portées à température de la roche environnante, peuvent donc atteindre, dans certains secteurs, des températures bien plus élevées que les températures couramment observées en hydrogéologie « de surface » ; les sources chaudes existant dans la région en sont d'ailleurs le témoin.

Le rapport Manceau et al. (2018) précise les impacts attendus sur les écoulements souterrains d'une hétérogénéité importante des champs de température :

- L'équation de Darcy, formulée avec la notion de charge hydraulique habituellement utilisée en hydrogéologie de proche surface, est :

$$\vec{V} = -K_0 \overrightarrow{grad}(h_0)$$

avec $K_0 = \frac{k\rho_0 g}{\mu_0}$ (perméabilité des hydrogéologues ou conductivité hydraulique, exprimée en m/s), h_0 la charge hydraulique (d'eau douce et froide, i.e. en conditions de proche surface) et \vec{V} la vitesse de Darcy en un point donné d'altitude *z* ;

 - Un champ hétérogène de température implique un champ hétérogène des propriétés des eaux, en particulier de leur densité et de leur viscosité (qui diffèrent donc des valeurs de surface ρ₀ et μ₀). L'équation de Darcy généralisée à cette nouvelle situation peut s'écrire de la manière suivante :

$$\vec{V} = -\frac{k\rho_0 g}{\mu} \left[\overrightarrow{grad}(h_0) - \frac{(\rho - \rho_0)}{\rho_0} \overrightarrow{grad}(z) \right]$$

Les impacts sur les écoulements sont doubles : ils sont, d'une part, liés aux variations de viscosité de l'eau, qui modifient la conductivité hydraulique, et d'autre part aux effets densitaires (flottabilité) qui s'ajoutent au gradient de charge hydraulique d'eau douce et froide.

7.2. CONSEQUENCES SUR LA MODELISATION HYDRODYNAMIQUE

Du fait des variations de densité et de viscosité des eaux attendues dans la zone d'étude, le modèle hydrodynamique GAIA est donc construit de sorte à prendre en compte leurs effets. Le code de calcul MARTHE tient donc compte de ces effets densitaires et de viscosité. Un champ de température doit être affecté au modèle, ainsi que des lois de viscosité et de densité de l'eau.

Précisons que :

- les calculs hydrodynamiques seront réalisés considérant le champ de température comme fixe au cours du temps ;
- les effets de la salinité des eaux sur leurs propriétés ne seront pas considérés dans le modèle, étant donnée leur minéralisation faible à modérée dans la plupart des secteurs de l'emprise du modèle ; toutefois, la salinité est considérée pour la conversion des charges mesurées (paragraphe 7.3).

Le champ de température intégré au modèle hydrodynamique été estimé à partir :

- de la profondeur du centre de chaque maille du modèle ;
- de la carte de gradient géothermique produite par Douez (2007). Cette carte ne recouvrait pas toute l'emprise du modèle, au niveau d'une zone proche de l'océan. Une valeur de 3 °C/100 m proche des valeurs disponibles aux limites de la carte de Douez (2007) a été imposé dans ce secteur ;
- des températures moyennes de surface, qui ont été estimées à partir des données SAFRAN (températures journalières depuis 1959).

Les valeurs obtenues sont consultables à l'Illustration 11.



Illustration 11 - Champ de température intégré au modèle hydrodynamique

7.3. CONSEQUENCES SUR LES DONNEES PIEZOMETRIQUES UTILISEES POUR LA CALIBRATION DU MODELE

Outre un calcul hydrodynamique adapté, l'existence d'un gradient de densité nécessite également certaines précautions quant à l'utilisation des mesures piézométriques.

La totalité des mesures piézométriques à disposition semble provenir de mesures directes du niveau d'eau dans l'ouvrage ou bien de mesures de pression par des capteurs localisés à faible profondeur. Cela signifie que, dans tous les cas de figure, la charge mesurée correspond exactement ou bien quasiment au niveau d'eau dans le piézomètre puisqu'aucune mesure de pression ne semble avoir été réalisée en fond de puits. Pour des piézomètres de faible profondeur, l'approximation d'une densité de l'eau dans le piézomètre, constante et égale à la densité de l'eau en surface, est acceptable. Pour les piézomètres plus profonds, cette approximation n'est plus valide dans la mesure où la densité dépend :

- de la température de la colonne d'eau. Pour les ouvrages non directement influencés par des prélèvements, l'hypothèse d'une colonne d'eau en équilibre avec la roche environnante et donc l'hypothèse d'un gradient de température quasiment linéaire, de la profondeur captée jusqu'au niveau d'eau, paraît raisonnable. Cette hypothèse est plus discutable pour les ouvrages dans lesquels ont lieu des prélèvements. Le gradient thermique est dans cette situation très difficile à estimer puisqu'il dépend des modalités selon lesquelles la colonne d'eau va se réchauffer lors de la mise en place du pompage puis se refroidir lorsqu'il s'arrête (voir André et al., 2019).
- de la salinité de la colonne d'eau. Selon André et al. (2019), la question de l'évolution du profil de salinité est entourée de nombreuses incertitudes.
- de la pression de la colonne d'eau. La pression imposée par le poids de la colonne d'eau sus-jacente à un point donné influe en effet sur la densité de l'eau : tout autre paramètre égal par ailleurs, plus la pression est forte, plus la densité sera élevée.

La procédure établie par Seguin et al. (2003), utilisée dans le cadre de GAIA par André et al. (2019), a été mise en œuvre pour toutes les chroniques piézométriques. Cette procédure consiste à convertir les mesures piézométriques en charge hydraulique, en condition de proche surface (eau douce, froide et pression atmosphérique) :

- dans un premier temps, le poids de la colonne d'eau sur toute sa hauteur et donc la valeur de la densité en tout point de la colonne. Cette dernière est estimée à partir d'un gradient linéaire de température et d'une salinité prise constante (si aucune autre information n'existe) à partir de la formule établie par Rowe et Chou (1970), reliant la masse volumique de l'eau à sa température, pression et salinité ;
- ensuite, est recherchée la hauteur d'une colonne d'eau équivalente de masse volumique constante et égale à la densité de l'eau, en condition de proche surface et ayant le même poids que celui calculé à l'étape précédente. Cette hauteur correspond à la charge hydraulique d'eau douce et froide équivalente.

Les conditions de température et de salinité considérées pour les chroniques à disposition sont celles présentées en Annexe 7 du rapport GAIA de André et al. (2019). Concernant les chroniques absentes de cette annexe, mais pour lesquelles des mesures piézométriques étaient disponibles, des valeurs mesurées ou bien estimées, à partir du gradient géothermique considéré dans le modèle, ont été prises en compte.

Au final, les conversions ont entraîné des modifications des charges relativement importantes comme le montre l'Illustration 12 : en particulier, 18 ouvrages voient leurs charges modifiées de plus d'1 m.



Moyenne des différences entre charge mesurées et charges converties

Illustration 12 - Différences entre charges piézométriques mesurées et converties en charge hydrauique d'eau douce et froide

NB. Afin de pouvoir comparer les charges calculées dans le modèle hydrodynamique et les mesures piézométriques converties en charge d'eau douce et froide, il est également nécessaire d'extraire les résultats du modèle en charge d'eau douce et froide. Le code de calcul MARTHE a ainsi été modifié pour permettre l'extraction de cette variable (modification disponible dans la version 7.8 d'août 2020).

8. Calibration du modèle

8.1. CHOIX DE MODELISATION ET PROCEDURE SUIVIE POUR LA CALIBRATION

Le chapitre 6 du rapport montre qu'un nombre relativement important d'observations piézométriques existe. Toutefois, aucune mesure n'est disponible avant 1964, alors que le premier mètre cube de gaz a été injecté au droit du site de Lussagnet en 1957. Il n'y a donc pas d'état « naturel » connu pour l'aquifère des SIM. Par contre, comme nous l'avons vu précédemment, beaucoup plus de données existent après les années 1990, surtout pour cette nappe des SIM. Les charges disponibles traduisent donc, dans leur grande majorité, les écoulements souterrains dans un système déjà influencé.

En matière de modélisation, une première étape de calibration qui consisterait à calibrer le modèle en régime permanent seul serait très peu contrainte, puisque l'état initial de ce système aquifère avant la mise en place des stockages est très peu connu. Il a donc été décidé :

- de mener les simulations directement en régime transitoire, en faisant l'hypothèse d'un régime stabilisé en début de simulation, juste avant la mise en place du stockage de Lussagnet (et donc obtenu par un calcul initial des charges en régime permanent) ;
- d'utiliser les injections de gaz comme « essais de pompage » régionaux, en calibrant le modèle depuis les stockages et en s'en éloignant progressivement.

Les choix additionnels suivants ont été faits quant aux modalités des simulations et de la calibration :

- la géométrie des différentes formations issues du modèle géologique est considérée comme stable et n'est donc pas modifiée dans la mesure du possible ;
- les failles ne sont pas modélisées en tant que telles dans le modèle hydrodynamique : la géométrie des couches (le modèle géologique) en tient compte, mais par défaut dans le code de calcul MARTHE, les failles sont considérées comme passantes. Des limites étanches sont donc intégrées au fur et à mesure de leur nécessité lors de la calibration ; les cas intermédiaires de failles, dites semi-étanches (ou semi-perméables), sont traitées par l'introduction de faibles valeurs de perméabilités dans les mailles du modèle ;
- étant donné le faible nombre d'observations avant 1980, un pas de temps annuel a été considéré comme suffisant pour mener à bien la phase de calibration, tout en évitant des simulations trop coûteuses en temps de calcul. La suite des simulations (entre le 01/01/1980 et le 31/12/2016, date des derniers prélèvements collectés) est menée au pas de temps mensuel.

8.2. EVALUATION DE LA QUALITE DE LA CALIBRATION

Le domaine d'étude étant d'une étendue très importante, la qualité de la calibration a été évaluée pour 18 différents secteurs (cartographiés en Illustration 13), associés :

- à l'aquifère des SIM :
 - stockage de Lussagnet stockage d'Izaute Nogaro est des stockages Eugénie-les-Bains / Geaune - Pécorade Lespielles - Garlin Barbotan : Uby & compartiment nord Castéra - Verduzan / Cézan - Lavardens secteur SIM-nord secteur SIM-sud secteur SIM-est
- et aux aquifères Eocène inférieur (llerdien) / Paléocène / Crétacé supérieur (qui ont des connexions importantes dans la majorité du domaine d'étude) :
 - Créon d'Armagnac Roquefort Audignon Préchacq - Gamarde anticlinaux d'Izaute et de Lacquy Landes de Siougos et système dacquois Paléocène - autres ouvrages

Etant donnée la disparité 1) des contextes hydrodynamiques (e.g. contexte de nappe captive avec une variation de charges supérieure à 100 m à proximité des stockages dans les SIM vs. contexte de nappe libre au droit des structures affleurantes) et 2) de densité spatiale et temporelle des informations disponibles, il apparaît en effet raisonnable d'adapter l'exigence attendue sur les résultats des calculs hydrodynamiques à chacun des différents secteurs. Classiquement, c'est la combinaison de la comparaison visuelle entre valeurs observées et simulées, et les calculs de critères statistiques résumant cette comparaison, qui permet d'évaluer le calage. Les statistiques seront donc adaptées à chaque secteur étudié.

Ainsi, de manière générale, pour un modèle d'extension régionale, même si la représentation fidèle de chaque chronique est l'objectif ultime, la représentation à cette échelle régionale de la distribution des charges reste le but premier. A cette fin, pour l'aquifère des SIM et pour les aquifères Eocène inférieur (Ilerdien) / Paléocène / Crétacé supérieur, seront produits des diagrammes de dispersion (voir les paragraphes 8.3.11 et 8.4.8) représentant les charges calculées vs. les charges observées : ce diagramme de dispersion permet de mettre en évidence un éventuel biais général dans les calculs hydrodynamiques et de comparer les différents secteurs en matière de calibration des charges.

Pour tous les secteurs, la qualité de la calibration des charges est évaluée visuellement pour la période 1980 - 2016 (étendue à 1957 pour certaines chroniques) ainsi que pour une période plus courte (adaptée à chaque secteur). En plus, nous proposons de calculer les critères statistiques suivants, même si toutes ces statistiques ne seront pas pertinentes pour tous les secteurs :

- le RMSE (racine carrée de l'écart quadratique moyen) : cet indicateur, quand il est faible, indique que les simulations sont similaires aux observations. Il est exprimé dans l'unité des charges, ce qui facilite son interprétation. Il ne permet toutefois pas de tenir compte des variabilités différentes des charges au sein du modèle (en particulier, il est plus délicat d'obtenir un RMSE faible quand cette variabilité est forte);
- le RMSE normé (RMSE divisé par l'amplitude des observations) : cet indicateur permet, à la différence du précédent, des comparaisons de RMSE, obtenu dans différents secteurs dont les variabilités des charges seraient différentes (e.g. dans des secteurs plus ou moins impactés par les variations de charges dues aux opérations d'injection/soutirage de gaz);
- le coefficient de Nash-Sutcliffe (ratio de l'écart quadratique moyen sur la variance des observations) : ce coefficient est normalisé (donc sans unité) et renseigne sur le pourcentage de la variance des observations, qui est expliqué par le calcul hydrodynamique, ce qui est adapté pour évaluer le calage de charges évoluant dans le temps. Une de ses limites, dans le cadre de la calibration de niveaux piézométriques, est son incapacité à traduire les situations où les évolutions entre observations et estimations seraient cohérentes à un décalage de charges près (ce décalage est appelé biais du modèle);
- le coefficient de Nash-Sutcliffe sans biais (calcul du coefficient de Nash avec élimination préalable du biais) : ce coefficient associé au précédent permet de bien juger de la pertinence des variations de charges, calculées par le modèle, dans le temps ;
- le coefficient de corrélation entre les observations et les simulations : cet indicateur est notamment utile pour indiquer l'intensité de la relation entre les mesures simulées et observées, c'est-à-dire si ces mesures varient « ensemble » ou « séparément » (par contre, il ne permet pas de comparer les amplitudes de ces variations). On peut également l'utiliser pour des chroniques à cyclicité importante (comme c'est le cas ici pour les chroniques influencées par les opérations de stockage/soutirage de gaz), afin de détecter un éventuel décalage entre les chroniques simulées et celles observées : nous proposons donc d'en déduire le décalage temporel entre les chroniques simulées et observées.

Des fiches présentant le calage sont ainsi produites pour tous les secteurs :

- en bleu, les observations piézométriques brutes,
- en noir, ces mêmes observations piézométriques, mises à l'échelle des pas de temps du modèle hydrodynamique (on considère la mesure piézométrique la plus proche de la date de fin du pas de temps),
- en orange, les charges simulées.



Illustration 13 - Découpage du domaine d'étude en différents secteurs

8.3. COMPARAISON ENTRE CHARGES SIMULEES ET CHARGES OBSERVEES : AQUIFERE DES SIM

8.3.1. Secteurs 1 et 2 : stockages de Lussagnet et d'Izaute

[Les résultats du modèle calibré pour ces secteurs sont fournis aux Illustration 14 et Illustration 15].

Les secteurs des stockages de Lussagnet et d'Izaute contiennent respectivement 5 et 4 piézomètres, dont les données couvrent une période continue de 1990 à nos jours. Au cours de cette période, les graphiques montrent une bonne restitution des charges au regard des variations de charges observées dans ces secteurs. Les cycles induits par les stockages sont en phase et d'amplitude cohérente au cours du temps.

Ce constat visuel est traduit :

- par un RMSE normé relativement faible : légèrement au-dessus de 10 % de la variation maximale de charge pour Lussagnet et de 5 % pour lzaute. Le RMSE peut paraître relativement élevé, avec des valeurs comprises entre 10 et 20 m, mais cela traduit la difficulté à reproduire exactement les montées et descentes en charge brusques, induites par les injections et soutirages de gaz à proximité ;
- par un coefficient de corrélation relativement haut : respectivement > 0,8 et > 0,9 pour les stockages de Lussagnet et d'Izaute et obtenus sans décalage de temps ;
- par un coefficient de Nash acceptable à élevé.

Les perméabilités associées sont respectivement de 2 Darcy (ou 2x10⁻⁵ m/s en eau douce et froide) pour le stockage de Lussagnet et de 5 Darcy pour le stockage d'Izaute. Ces valeurs sont cohérentes avec les valeurs disponibles pour ces stockages (2-5 D pour Lussagnet, 6-20 D pour Izaute, Elf Aquitaine, date inconnue), sachant que toute la hauteur associée aux Sables de Lussagnet et aux Grès à Nummulites a été considérée à ces valeurs de perméabilité dans le modèle.

Il est à noter que même si les pressions d'injection sont connues au droit des puits d'injection, celles-ci ne sont pas imposées directement au modèle. Ce sont des débits équivalents d'injection et d'extraction d'eau qui sont fixés, comme expliqué au chapitre 5. Le bon comportement du modèle dans ces secteurs, associé à des perméabilités estimées en cohérence avec les ordres de grandeur connus, traduit donc 1) un état initial avant injection relativement bien calculé et 2) des débits d'injection d'eau équivalents cohérents.

NB. On notera des variations de charge trop élevées au niveau de l'ouvrage du Houga (09526X0210/F), localisé à proximité du point d'injection considéré dans le modèle hydrodynamique. Ce phénomène s'estompe rapidement puisque les autres ouvrages du secteur de Lussagnet ne montrent pas de telles variations.

8.3.2. Secteur 3 : Nogaro

[Les résultats du modèle calibré pour ce secteur sont fournis à l'Illustration 16].

Ce secteur de Nogaro comporte 2 puits : Nogaro (09528X0002/F) et Nogaro 2 (09528X0026/F), dans lesquels ont été ou sont réalisés des prélèvements à des fins d'AEP. Ces deux ouvrages, en particulier le premier, sont intéressants pour la calibration du modèle parce qu'ils sont les seuls

proches des stockages, ayant pu enregistrer les variations de charge lors de la mise en place du stockage d'Izaute. Même si l'état initial des charges, avant la mise en opération d'Izaute, semble sous-estimé, la correspondance entre les variations de charge calculées par le modèle et les variations mesurées est tout à fait acceptable avec, en particulier, la dynamique des variations de charge lors de la création du stockage d'Izaute qui est correctement représentée par le modèle. On note également des variations de charge en phase entre les calculs et les observations.

Les statistiques obtenues dans ce secteur sont relativement semblables à celles obtenues au niveau des stockages, avec une bonne corrélation entre observations et simulations (> 0,9), un décalage nul entre les chroniques et des critères d'écart satisfaisants (RMSE normé de 10 %, Nash d'environ 0,8 ou plus avec un coefficient de Nash sans biais plus élevé, traduisant une légère sous-estimation des charges par le modèle).



Illustration 14 - Comparaison "charges simulées vs. charges observées" pour le secteur 1 du stockage de Lussagnet (orange : charges simulées ; bleu :charges observées ; noir :charges observées considérées dans le calcul des indicateurs)



Illustration 15 - Comparaison "charges simulées vs. charges obsevées" pour le secteur 2 du stockage d'Izaute (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)

Projet GAIA. Construction et calage du modèle hydrodynamique

Nash : 0.78 Nash sans biais : 0.82 iais · 0.8 Nash sans biais : 0.65 RMSE : 8.6 m RMSE normé : 5.6% ash sans biais : 0.94 Nash sans biais : 0.93 Nash sans biais : 0.93 RMSE : 8.5 m RMSE normé : 6.4% sans biais : 0.91



Illustration 16 - Comparaison "charges simulées vs. charges observées" pour le secteur 3 de Nogaro (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)

Projet GAIA. Construction et calage du modèle hydrodynamique

8.3.3. Secteur 4 : est des stockages

[Les résultats du modèle calibré pour ce secteur sont fournis aux Illustration 18 et Illustration 19].

Ce secteur regroupe 7 forages, localisés à l'est des stockages, à plus ou moins grande distance. Tous montrent une influence (nette ou supposée) des stockages sur les charges observées.

Les deux ouvrages les plus proches des stockages (Eauze - 09536X0030/F et Demu - 09536X0008/F, localisés entre 15 et 20 km d'Izaute) montrent des variations de charge plutôt bien représentées, même si les charges semblent sous-estimées à Demu quand elles semblent surestimées à Eauze : des hétérogénéités locales non capturées par le modèle pourraient expliquer ces différences non homogènes dans l'espace. On note quand même des oscillations en phase entre valeurs observées et simulées, des amplitudes de variation semblables et des tendances générales bien respectées (tendance à la baisse pour l'ouvrage de Demu notamment). Ces observations sont également valables pour le forage de Pléhaut (09545X0018/F), même si l'intervalle de temps, pour lequel la comparaison est possible, est très court.

L'ouvrage de Auch 2 (09814X0002/F), situé à 65 km à l'est d'Izaute, dispose de mesures piézométriques permettant la mise en évidence de la phase de démarrage du stockage d'Izaute. Le modèle retranscrit plutôt bien la dynamique des charges dans ce secteur, c'est-à-dire la baisse des charges jusqu'au début des années 1980, suivie d'une remontée, puis d'une seconde baisse. L'impact des stockages paraît toutefois légèrement surestimé par le modèle.

L'ouvrage de Lamazère (10071X0012/F), situé à une cinquantaine de kilomètres du stockage d'Izaute, est un forage géothermique (utilisé pour le chauffage de serres jusqu'en 1998) ; il capte des eaux à une cinquantaine de degrés, à 1 600 m de profondeur. Cet ouvrage était à l'arrêt seulement pendant une courte période estivale (mi-mai / mi-septembre, cf. Benhammouda et al., 1996), ce qui pose la question de la conversion des charges mesurées dans cet ouvrage profond : l'hypothèse d'un gradient de température quasiment linéaire, depuis la profondeur captée jusqu'au niveau d'eau, est en effet questionnable, d'autant plus que certaines mesures piézométriques à disposition ont été réalisées hors de cette période d'arrêt. Les graphiques associés à l'ouvrage de Lamazère (tracés sur l'Illustration 19) montrent donc, comme pour tous les autres ouvrages, les charges piézométriques converties à partir de la procédure précisée au paragraphe 7.3, mais également, en couleur bleu clair, les charges converties en faisant l'hypothèse d'un puits chaud à la température de 50°C ; hypothèse qui paraît plus raisonnable. On voit alors que le modèle hydrodynamique se rapproche bien de ces charges corrigées différemment.

Les évolutions piézométriques de l'ouvrage de Saint-Médard / Idrac-Respaillès (10072X0026/F), situé à un peu moins de 60 km d'Izaute, montrent une influence claire des stockages de gaz (bien plus importante que celle observée à l'ouvrage d'Auch 2, qui n'est pourtant pas situé beaucoup plus loin des stockages). Cet ouvrage montre également une évolution atypique des charges, avec une rupture se produisant en février 2005, une quasi-stabilité des charges au préalable de cet évènement, puis une baisse importante par la suite (Illustration 17). Le modèle hydrodynamique reproduit plutôt bien la dynamique générale de la nappe, au droit de cet ouvrage, et en particulier les oscillations dues aux opérations de stockage ; il s'agirait de comprendre les raisons du comportement atypique des charges observées pour aller plus loin dans l'analyse de la robustesse du modèle pour cet ouvrage.



Illustration 17 - Evolution des charges pour l'ouvrage de Saint-Médard / Idrac-Respaillès (10072X0026/F)

Le dernier ouvrage de ce secteur est l'ouvrage de Polastron (10082X0001/F), situé à plus de 85 km à l'est de la zone des stockages, et qui, à première vue, ne semble pas être directement influencé par ces derniers. Toutefois, au cours de la période 1980-2000, les résultats du modèle hydrodynamique tendent à montrer que la mise en place du stockage d'Izaute, au début des années 1980, ainsi que la remontée des charges moyennes à Izaute au début des années 1990, sont bien visibles au niveau de l'ouvrage de Polastron. Même si le modèle indique lui aussi une tendance à la baisse des niveaux piézométrique dans cet ouvrage, la baisse nette et linéaire, observée après le début des années 2000 dans cet ouvrage, pose question sur la fiabilité des mesures faites après cette date, puisque si l'impact des stockages est bien réel avant les années 2000, la remontée des charges moyennes au niveau d'Izaute du début des années 2000 devrait être visible comme le montre la chronique des charges simulées.



Illustration 18 - Comparaison "charges simulées vs. charges observées" pour le secteur 4 de l'est des stockages de gaz(1/2) (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)



Illustration 19 - Comparaison "charges simulées vs. charges observées" pour le secteur 4 de l'est des stockages de gaz(2/2) (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)

Projet GAIA. Construction et calage du modèle hydrodynamique

8.3.4. Secteur 5 : Eugénie-les-Bains / Geaune - Pécorade

[Les résultats du modèle calibré pour ce secteur sont fournis aux Illustration 21 et Illustration 22].

Ce secteur est caractérisé *via* 8 ouvrages, très proches les uns des autres (les ouvrages de Geaune - Pécorade étant par exemple tous localisés dans un rayon de moins de 2 km), avec une disponibilité de mesures depuis 1964. Les charges et leur variation sont globalement correctement représentées, y compris les mesures les plus anciennes : la chronique de l'ouvrage 09788X0003/F1 de Geaune Pécorade 1, la plus longue, traduit ce constat et montre que le modèle semble correctement capturer 1) les charges initiales, 2) leur évolution globale à la baisse au cours du temps et 3) leur évolution cyclique au gré des alternances des opérations de stockage de gaz.

On note toutefois une surestimation des charges par le modèle à mesure que l'on se rapproche d'Eugénie-les-Bains. Des échanges avec des aquifères ou des cours d'eau de surface, non considérés dans le modèle hydrodynamique, pourraient expliquer ces différences : la littérature mentionne en effet des sources (de faible débit ; Bel et al., 1989) ou des émergences diffuses le long du lit de la rivière "le Bahus", provenant soit des Sables infra-molassiques (Labat, 1998 ; Douez, 2007), soit d'aquifères-relais (Seguin, 2003). Le secteur est toutefois complexe et il semble difficile d'aller plus loin sans un modèle local.

Il est également à noter que des différences de charge relativement importantes existent entre des ouvrages proches : typiquement Geaune Pécorade 1, Geaune 2, Geaune 3 et Geaune 4, situés dans un rayon de moins d'1 km (cf. Illustration 20). Le modèle actuel, d'extension régionale et maillé au pas de 500 m, n'est logiquement pas en mesure de reproduire ces effets locaux, et constitue donc un comportement « moyen » de ce secteur. On note enfin des ouvrages directement influencés par un pompage (09788X0015/F par exemple), dont les niveaux dynamiques en phase de pompage ne peuvent être reproduits par le modèle.



Illustration 20 - Evolution des charges au niveau des ouvrages de Geaune Pécorade 1, Geaune 2, Geaune 3 et Geaune 4

Les indicateurs statistiques de calibration sont donc à analyser avec précaution. Les statistiques sont néanmoins relativement bonnes, avec des RMSE globalement assez faibles et des coefficients de Nash sans biais souvent autour ou supérieurs à 0,8. Les coefficients de corrélation sont quasiment tous au-delà de 0,9 et montrent que les déphasages entre les cycles de variations de charge, aux abords des stockages de gaz, et les cycles de ce secteur (déphasage de 3 mois environ) sont correctement retranscrits.



Illustration 21 - Comparaison "charges simulées vs. charges observées" pour le secteur 5 d'Eugénie-les-Bains / Geaune - Pécorade (1/2) (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)



Illustration 22 - Comparaison "charges simulées vs. charges observées" pour le secteur 5 d'Eugénie-les-Bains / Geaune - Pécorade (2/2) (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)

Projet GAIA. Construction et calage du modèle hydrodynamique

8.3.5. Secteur 6 : Lespielle - Garlin

[Les résultats du modèle calibré pour ce secteur sont fournis à l'Illustration 24].

Ce secteur est instrumenté par 5 piézomètres. Une des particularités est la différence de comportement entre l'ouvrage de Garlin Le Prince (10052X0006/F1) et les autres piézomètres, avec une charge plus faible et une influence des stockages de gaz plus forte à Garlin qu'ailleurs dans le secteur (Illustration 23). Cette différence de comportement est correctement traduite par le modèle, qui explique cette variation de charge par une zone faillée empêchant une connexion hydraulique directe entre ces deux sous-secteurs.

Les évolutions piézométriques au droit de l'ouvrage de Garlin Le Prince sont relativement bien représentées, mises à part une sous-estimation des oscillations annuelles et une surestimation des niveaux piézométriques, plus visible à partir des années 2000. Les indicateurs (RMSE normé de 15 %, Nash sans biais > 0,7 et coefficient de corrélation > 0,85) restent acceptables étant données les hétérogénéités de comportement dans ce secteur.

Le modèle paraît moins précis pour le sous-secteur de Lespielle : l'état initial des charges avant la mise en place du stockage d'Izaute semble sous-estimé et les cycles annuels calculés diffèrent quelque peu des observations. Toutefois, comme discuté au-dessus, des incertitudes importantes existent sur l'état initial, et les charges sont plus cohérentes une fois le stockage d'Izaute mis en place. De plus, les cycles observés dans les puits de Lespielle 1 & 2 sont une combinaison des oscillations de charges, dues aux opérations de stockage de gaz et de prélèvements estivaux, effectués au droit de ces deux anciens forages d'irrigation donnant lieu à des rabattements locaux qui ne peuvent être correctement retranscrits par le modèle maillé. A noter qu'après 2009, les prélèvements opérés dans ces deux ouvrages sont plus réguliers dans le temps (prélèvement pour l'AEP) et des chroniques mensuelles de prélèvements sont disponibles : on voit alors que le modèle reproduit plutôt bien les mesures piézométriques récentes (par exemple entre 2010 et 2015) réalisées dans le piézomètre de Lalongue.

Les charges mesurées et simulées de l'ouvrage de Lembeye 1 (10057X0001/LEE1) sont tracées à l'Illustration 24, malgré les doutes sur la représentativité de cet ouvrage, concernant en particulier la deuxième moitié de la chronique. Les effets des essais de pompage, qui ont eu lieu en 2009, ont en effet été ressentis durant près de 5 années (Wuilleumier et al., 2015), traduisant vraisemblablement un colmatage de l'ouvrage.

NB. Ce secteur des SIM a fait l'objet de réinterprétation de pompages d'essai, effectuée dans le cadre du projet GAIA (Wuilleumier et al., 2017), pour les ouvrages de Lespielle 1, Lespielle 2, Garlin Le Prince et Lalongue. Les résultats de cette réinterprétation ont permis :

- d'observer une compartimentation des SIM dans ce secteur, avec des limites pour chacun des ouvrages. Cette compartimentation est cohérente avec la zone faillée considérée dans le modèle et mentionnée ci-dessus ;
- d'estimer des transmissivités qui, transformées à l'aide de la géométrie du modèle, permettent une comparaison avec les perméabilités intégrées au modèle hydrodynamique. Cette comparaison montre une assez bonne cohérence entre mesure et modèle malgré la difficulté qu'il peut y avoir à comparer "perméabilité locale" et "perméabilité d'un modèle à vocation régionale". La perméabilité nouvellement interprétée à Lalongue est particulièrement importante, ce qui pourrait traduire un effet très local (les autres ouvrages proches ne montrant pas de telles valeurs) que le modèle ne peut traduire à son échelle.

Ouvrage	Perméabilité pompage essai interprétation initiale	Perméabilité pompage essai interprétation GAIA	Perméabilité dans le modèle hydrodynamique
10053X0002/F1 Lespielle 1	4.7x10⁻⁵ m/s	4.4x10⁻⁵ m/s	5x10⁻⁵ m/s
10052X0006 Garlin Le Prince	-	1.7x10 ^{-₅} m/s	1x10⁻⁵ m/s
10057X0003 Lespielle 2	0.7x10⁻⁵ m/s	1.91x10 ⁻⁵ m/s	5x10 ⁻⁵ m/s (à 1km de la zone à 1x10 ⁻⁵ m/s)
10052X0037/F Lalongue	7.6x10⁻⁵m/s	20.1x10 ^{-₅} m/s	5x10⁻⁵ m/s



Illustration 23 - Comportements hydrogéologiques dans le secteur de Lespielle-Garlin





Projet GAIA. Construction et calage du modèle hydrodynamique



Illustration 25 - Comparaison "charges simulées vs. charges observées" pour le secteur 7 de Barbotan (Uby & compartiment nord) (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)

Projet GAIA. Construction et calage du modèle hydrodynamique

8.3.6. Secteur 7 : Barbotan - Uby & compartiment nord

[Les résultats du modèle calibré pour ce secteur sont fournis à l'Illustration 25].

Ce secteur regroupe les nombreux forages existant autour de Barbotan. Cette structure anticlinale est constituée de différents compartiments faillés, avec un sub-affleurement des Sables infra-molassiques au niveau de la « cuvette » de Barbotan. Cette structure est relativement proche des stockages de gaz (20 km du stockage d'Izaute). Treize ouvrages avec mesures piézométriques sont recensés sur une petite surface : moins de 2 km séparent les ouvrages les plus éloignés d'Uby (09268X0055/F) et de Laiterie (09268X0037/F). Pourtant des comportements très différenciés apparaissent, traduisant toute la complexité de l'hydrodynamisme de cette structure. Douez et al. (2019) reprennent le schéma de fonctionnement proposé par Vallet (2010) et Labat (1998) pour expliquer les différents comportements :

- Une faille sépare le secteur en deux domaines : un domaine nord observé *via* les forages de Laiterie F4 (09268X0064/F) et F5 (09268X0065/F), qui semblent très peu influencés par les opérations de stockage et un domaine sud montrant des relations avec les stockages bien plus importantes, avec des charges pouvant varier de 60 m au droit du forage d'Uby.
- Les évolutions des charges observées dans le domaine sud ne sont pas homogènes quand on se rapproche de la faille et des sub-affleurements, ce qui est expliqué par différentes unités-réservoirs séparées par des formations argileuses.

La calibration du modèle dans ce secteur a consisté à représenter les 2 grands types de comportements hydrodynamiques du compartiment nord et du compartiment sud. L'hétérogénéité des comportements au sein du compartiment sud ne peut en effet pas être représentée par le modèle dans sa version actuelle : il y a, au niveau de la cuvette de Barbotan, 9 ouvrages dans un rayon de moins de 500 m, c'est-à-dire à une distance inférieure à la résolution du modèle actuel. Les ouvrages F4 et F5 figurent d'ailleurs parmi ces 9 ouvrages, et, au sens du modèle géologique et hydrodynamique, se situent donc au sud de la faille qui n'a pu être tracée qu'à la précision du modèle (500 m). Ces ouvrages ont donc été artificiellement déplacés dans la maille la plus proche, se situant dans le compartiment nord (il s'agit de la maille dans laquelle était déjà situé le forage de Laiterie) puisque l'analyse des chroniques indiquait une appartenance à ce secteur nord.

Au final, les piézomètres ayant servi à la calibration sont donc Uby pour le compartiment sud, Laiterie F4 et F5 pour le compartiment nord. Par un jeu de failles non passantes ou bien légèrement passantes, des résultats satisfaisants ont pu être obtenus : les charges calculées sont similaires aux observations à Uby (RMSE normé de 6 % ; coefficient de Nash et de corrélation > 0,9), et pour les piézomètres du compartiment nord, la dynamique à la baisse des charges observée et la faible influence des stockages sont correctement retranscrites par le modèle. A noter toutefois que les forts pompages pratiqués dans les ouvrages F4 et F5, notamment entre 1986 et 1989 (près de 350 000 m³ annuels), n'ont pas pu être intégrés au modèle sans considérer une contribution largement prédominante du compartiment sud dans ces volumes. Les forages F4 et F5 étant situés au droit de la zone faillée, il semble donc probable, au vu des résultats du modèle, que des échanges importants existent à ce niveau notamment quand de fortes sollicitations y ont lieu. La piézométrie à Laiterie, qui n'est peu voire pas sensible à ces pompages importants, semble venir corroborer cette hypothèse.

8.3.7. Secteur 8 : Castéra - Verduzan / Cézan - Lavardens

[Les résultats du modèle calibré pour ce secteur sont fournis à l'Illustration 26].

La structure de Cézan - Lavardens peut être définie comme un horst (compartiment soulevé) d'1 km environ, présentant des rejets importants au nord et au sud (voir la synthèse sur les exutoires de Douez et al., 2019). Cette structure est caractérisée par l'existence d'émergences naturelles à Castéra - Verduzan et à Lavardens, provenant de l'aquifère des SIM.

Deux piézomètres captent les Sables infra-molassiques au droit de Castéra - Verduzan (09545X0017/F - forage n°2 / 09545X0007/F - Fontaine de Coulom) ; un autre ouvrage (09546X0022/F - Le Masca) se situe au niveau de la structure anticlinale de Cézan - Lavardens.

Les chroniques piézométriques de Castéra - Verduzan sont assez chaotiques, mais le modèle semble bien retranscrire certaines caractéristiques de la dynamique, notamment la baisse des charges observées entre 1997 et 2000. Le modèle indique également une influence, mais modérée, de la cyclicité des opérations de stockage de gaz. Cela semble être confirmé par les observations, même s'il n'est pas possible de l'affirmer avec certitude. Des différences existent néanmoins : la plus importante étant la tendance à la baisse des charges depuis 2010, ce qui n'est pas retranscrit par les observations.

La piézométrie au droit de Le Masca est quant-à-elle corrélée aux précipitations (nappe libre ou semi-captive). Une recharge est en effet possible par l'intermédiaire des affleurements crétacés ou des Sables infra-molassiques au sein de la structure (Douez, 2007). Une recharge est donc appliquée, dans le modèle, aux niveaux de ces affleurements (la recharge est appliquée aux SIM dans le modèle, même si les calcaires crétacés pourraient jouer le rôle d'aquifères-relais). Une certaine corrélation existe entre les variations de charge observées et simulées, mais le modèle exagère la baisse des charges, dans ce secteur. Une recharge importante a été considérée pour prendre en compte des alimentations par des cours d'eau (ce qui est en adéquation avec l'exemple récent de la perte hydraulique du ruisseau la Coulègne ; Douez et al., 2019), mais la résolution actuelle du modèle ne permet pas d'aller plus loin dans la considération d'effets locaux.

8.3.8. Secteur 9 : secteur SIM-nord

[Les résultats du modèle calibré pour ce secteur sont fournis à l'Illustration 27].

Ce secteur regroupe tous les ouvrages captant les SIM et situés au nord de la flexure celtaquitaine : 4 piézomètres sont considérés pour la calibration des charges.

NB. L'ouvrage d'Auvillar (09293X0123) considéré initialement a finalement été exclu de la calibration du fait d'une détérioration du tubage (perforation à 400 mètres de profondeur et 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 du fait d'une remontée piézométrique atypique de presque 20 mètres entre 2004 et 2008 suggérant potentiellement une mise en communication de différents niveaux aquifères.

Des différences de charges très importantes existent entre les secteurs situés au sud et ceux situés au nord de la flexure. Par exemple, les ouvrages de Pléhaut (09545X0018) et de Beaucaire (09541X0021) présentaient respectivement des charges équivalentes d'eau douce de 101,27 m NGF et de 5,45 m NGF, alors qu'ils sont situés à moins de 10 km de distance. La seule solution, ayant permis de retranscrire cette situation dans le modèle hydrodynamique, est l'imperméabilisation de toute la flexure celtaquitaine, depuis Roquefort à l'ouest jusqu'à l'est de

Auch. Les charges obtenues après calcul sont cohérentes avec les observations dans les quatre piézomètres du secteur, ce qui montre notamment des conditions cohérentes aux limites nord des SIM. Quelques biais peuvent être notés mais, de façon générale, la dynamique de la nappe dans ce secteur est correctement reproduite. Dans le forage de Gondrin, qui est également un point de prélèvement, la calibration a été faite à partir des niveaux hauts atteints après arrêt de pompage, comme indiqué au paragraphe 6.2.


Illustration 26 - Comparaison "charges simulées vs. charges observées" pour le secteur 8 de Castéra - Verduzan / Cézan - Lavardens (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)



Illustration 27 - Comparaison "charges simulées vs. charges observées" pour le secteur 9 du nord de la nappe des SIM (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)

8.3.9. Secteur 10 : secteur SIM-sud

[Les résultats du modèle calibré pour ce secteur sont fournis à l'Illustration 30].

Ce secteur regroupe les 4 ouvrages de la zone de captage d'eau potable de Bordes. Ces ouvrages sont localisés dans un rayon de moins d'1 km au sud-est de Pau, non loin de la limite sud du modèle hydrodynamique et des affleurements des SIM, considérés comme une zone d'alimentation importante de la nappe. L'Illustration 28 montre l'évolution des charges pour les forages Bordes 3 (10306X0034/F3) et 4 (10306X0035/F4), situés dans la même maille du modèle : on y voit des variations similaires, mais une différence de cote piézométrique proche de 10 m, ce que le modèle n'est pas capable de restituer étant donné sa résolution (le modèle calcule la charge au centre de la maille de 500 m de coté). Malgré cela, le modèle représente plutôt correctement la dynamique piézométrique du secteur et notamment la baisse des charges observées entre le milieu des années 1980 et 2006. Ensuite, seules les mesures du forage Bordes 3 sont disponibles et montrent une augmentation des charges. Le modèle restitue également cette augmentation de charge (avec une possible surestimation de cette augmentation). Pour le moment, la recharge des SIM dans cette zone sud est considérée via une limite à potentiel imposé, avec une charge constante au cours du temps. Même si la calibration semble acceptable pour ce modèle hydrodynamique à l'échelle régionale, une prise en compte plus fidèle de l'alimentation locale de champ captant permettrait vraisemblablement d'améliorer la restitution.



Illustration 28 - Evolution des charges au niveau des ouvrages de Bordes 3 (10306X0034/F3) et 4 (10306X0035/F4)

L'ouvrage de Castelnau-Magnoac (10326X0009/F) est également localisé proche de la limite sud du modèle hydrodynamique, mais bien plus à l'est (au nord de Lannemezan). La calibration du modèle n'a pas permis de bien reproduire les charges observées : une baisse des charges est bien simulée, mais cette tendance est sous-estimée par le modèle, induisant un biais pour les charges qui augmentent avec le temps. De plus, les simulations prédisent une (légère) influence des opérations de stockage de gaz, invisible sur la chronique observée. Il faut toutefois signaler qu'un essai d'injection, réalisé en 1983 dans ce puits, a mis en évidence un colmatage très important rendant impossible la restitution de modifications rapides de la piézométrie, ce qui pourrait éventuellement expliquer la non-influence apparente des opérations de stockage (Wuilleumier et al., 2015).

8.3.10. Secteur 11 : secteur SIM-est

[Les résultats du modèle calibré pour ce secteur sont fournis à l'Illustration 31].

Dans ce secteur ont été regroupés les ouvrages piézométriques captant les SIM et situés les plus à l'est du domaine d'étude. Il est constaté peu d'homogénéité au sein des SIM et de leurs équivalents latéraux (argiles à graviers, etc) à l'échelle régionale (ceci est particulièrement le cas dans la zone située entre le nord de Carcassone et l'est de Auch), ce que semblent montrer à la fois la géologie (Lasseur et al., 2021) et les charges observées. Par exemple, l'ouvrage de Saint-Cricq (09824X0002/F) est un ancien forage géothermique, dont les données piézométriques disponibles ont été acquises à l'occasion d'une interruption temporaire de l'exploitation (1988-1989) et de son interruption définitive (après 1991) (Wuilleumier et al., 2015). L'exploitation géothermique et son interruption ont donné lieu à des variations de charges conséquentes (plus 25 m observés). L'ouvrage de Polastron, discuté dans le paragraphe 8.3.3 (Secteur 4 : est des stockages), est situé à une vingtaine de kilomètres de l'ouvrage précédent, et pourtant aucune conséquence de l'exploitation géothermique de Saint-Cricg ne semble clairement identifiable dans les charges de Polastron, contrairement aux impacts des stockages de gaz pourtant bien plus éloignés. Ceci plaiderait pour une compartimentation de l'aquifère des SIM au-delà de l'ouvrage de Polastron. C'est le schéma conceptuel qui a été choisi dans le modèle hydrodynamique : à l'est de l'ouvrage de Polastron, une limite étanche permettant cette compartimentation a été fixée plutôt qu'une limite arbitraire, étant donnée l'incertitude existant sur la localisation précise de la diminution des échanges vers l'est du domaine d'étude. Le schéma conceptuel établi pour ce secteur semble en cohérence avec la sectorisation en matière d'écoulements, proposée par André (2002), à partir de données géochimiques.

En plus de cette compartimentation, à l'est de Saint-Cricq, les SIM reposent directement sur des séries carbonatées du Jurassique (Lasseur et al., 2021 ; également, la carte paléogéographique anté-Tertiaire de la Synthèse géologie du bassin d'Aquitaine, BRGM et al., 1974), donnant lieu à de possibles communications. La calibration du modèle hydrodynamique au droit de l'ouvrage de Saint-Cricq semble venir confirmer cette hypothèse : le Jurassique n'est pas directement modélisé dans le modèle, mais cette calibration n'a pu être possible qu'en imposant une charge à la base des SIM, cette charge représentant un échange avec les aquifères du Jurassique. Avec ce modèle conceptuel, l'évolution des charges est correctement retranscrite au niveau de l'ouvrage de Saint-Cricq. La baisse des charges après les années 1995 n'est logiquement pas retranscrite, étant donné que les échanges avec le Jurassique sont représentés par un potentiel imposé fixe dans le temps. Une baisse des charges de cet aquifère viendrait corroborer un peu plus les hypothèses faites lors de la construction du modèle hydrodynamique. A noter que le calcul des prélèvements mensuels, à partir des volumes annuels, a été adapté à l'ouvrage de Saint-Cricq : Bel et Sourisseau (1990) mentionnent en effet un arrêt des pompages entre mai 1988 et août 1989 (avec une reprise en septembre).

NB 1. La chronique piézométrique à l'ouvrage Muret 104 (Illustration 29) est la plus longue chronique de données disponibles dans le secteur d'étude (Wuilleumier et al., 2015), avec un historique de plus de 54 ans. Cet ouvrage montre une certaine stabilité des niveaux piézométriques jusqu'en 1984, date à laquelle des essais de pompage ont été menés. Ne fournissant pas les débits escomptés (1,5 m³/h seulement), les essais ont été interrompus. Cet essai a provoqué une baisse des niveaux de quelques dizaines de centimètres et le niveau initial n'a pas été retrouvé par la suite. S'en est suivi une baisse des niveaux piézométriques atteignant plus de 3 m aujourd'hui. Un colmatage du puits a été conjecturé et selon Wuilleumier et al. (2015), ces problèmes sont notamment dus à la viscosité de la boue de foration utilisée, qui était adaptée à un objectif pétrolier. Etant donnés 1) les doutes sur l'évolution des niveaux mesurés et 2) la localisation de cet ouvrage à plus de 125 km du stockage d'Izaute, dans une zone où la continuité de la nappe des SIM pose question et où les charges de cet ouvrage évoluent vraisemblablement

selon des sollicitations très locales (voir discussion ci-dessus), aucune calibration n'a été menée pour cet ouvrage.



Illustration 29 - Evolution des charges dans l'ouvrage Muret 104 (10098A0004/F)

NB 2. L'ouvrage de Puymaurin 2 (10078X0001/F) n'a finalement pas été considéré dans ce secteur, ni dans les SIM. Les charges de cet ouvrage ne montrent en effet pas de lien particulier avec les stockages de gaz. De plus, cet ouvrage est d'ailleurs souvent associé à l'aquifère du Paléocène, plutôt qu'à celui des SIM (Roche, 1977 & 1982) et la coupe technique, après travaux de transformation en piézomètre (en 1970), indique une profondeur des crépines de 860 à 873 m NGF, niveau du Danien plutôt que celui des SIM (les SIM sont localisés autour de 400 m de profondeur). Il a donc été affecté au Paléocène (voir paragraphe 8.4.7).







Illustration 31 - Comparaison "charges simulées vs. charges observées" pour le secteur 11 de l'est de la nappe des SIM (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)

8.3.11. Conclusion intermédiaire n°1 : évaluation globale des charges simulées à l'échelle de la nappe des SIM

A l'échelle régionale, les charges simulées au sein des SIM reflètent les gradients de charge observés, comme le montre l'Illustration 32. Les statistiques calculées montrent également des simulations cohérentes avec les observations, notamment un coefficient de Nash « régional » de 0,97.



Illustration 32 - Diagramme de dispersion "charges observées vs. charges simulées" au sein des SIM

8.4. COMPARAISON ENTRE CHARGES SIMULEES ET CHARGES OBSERVEES : EOCENE INFERIEUR (ILERDIEN) / PALEOCENE / CRETACE SUPERIEUR

8.4.1. Secteur 12 : Créon d'Armagnac

[Les résultats du modèle calibré pour ce secteur sont fournis à l'Illustration 34].

L'anticlinal de Créon, contrairement aux autres anticlinaux de la ride Roquefort-Créon-Barbotan, se situe dans une zone topographiquement haute et constitue la ligne de partage des eaux superficielles entre la Douze au sud et l'Estampon au nord (Douez et al., 2019). Les terrains crétacés et jurassiques affleurent. Deux ouvrages permettent de suivre les niveaux piézométriques de la nappe du Crétacé supérieur au sud de la structure : Betbezer (06267X0014/PIEZO1) et Perillet (09267X0017/F). Ils fournissent des données depuis 1989.

Plusieurs éléments, dont l'altitude de la structure (> 100 m) par rapport aux charges mesurées dans les deux ouvrages et la présence de nitrates dans les eaux du Crétacé supérieur captées par le piézomètre de Betbezer (06267X0014/PIEZO1), laissent à penser que les affleurements crétacés permettraient une alimentation de la nappe.

Au final, le modèle reproduit bien l'anticlinal comme une zone d'alimentation. Les charges sont correctement représentées en appliquant aux affleurements une recharge moyenne de 50 mm/an. La méthode, certes simple, de prise en compte des variations temporelles de recharge par l'intermédiaire des chroniques de pluie efficace permet de bien reproduire la dépendance des charges à la pluviométrie, dans ce secteur.

8.4.2. Secteur 13 : Roquefort

[Les résultats du modèle calibré pour ce secteur sont fournis à l'Illustration 35].

L'anticlinal de Roquefort est quant à lui situé en zone basse, dans la vallée de la Douze. La Douze a creusé son lit dans les calcaires du Crétacé supérieur affleurants. Une étude spécifique de ce secteur a été réalisée dans le cadre du projet GAIA (Douez et al., 2019) et a abouti aux conclusions suivantes sur le fonctionnement hydrodynamique de la zone (voir Illustration 33) :

- au nord de la Douze, l'anticlinal est constitué à l'affleurement de formations carbonatées fortement karstifiées, datant du Crétacé supérieur. Des jaugeages différentiels (dans l'Estampon et le Ruisseau du Cros) ont montré l'existence d'une alimentation de la nappe phréatique par les cours d'eau. L'absence de sources dans cette zone a également été notée dès que l'on s'éloigne vers le nord du lit de la Douze. Cette partie nord paraît donc 1) constituer une zone de recharge pour la nappe du Crétacé supérieur et 2) drainée, au sud, par la vallée de la Douze (un écoulement en direction du nord pourrait également se produire);
- au sud de la Douze, ce sont essentiellement des formations géologiques du Tertiaire qui affleurent, caractérisées par la présence de sources, qui viennent alimenter indirectement la Douze *via* des cours d'eau de faibles extensions. Des sources du Crétacé supérieur alimenteraient également la Douze dans le fond de vallée, principalement en rive sud.



Illustration 33 - Proposition d'un schéma de fonctionnement hydrodynamique de la structure de Roquefort (d'après Douez et al., 2019)

Deux ouvrages permettent de caractériser la piézométrie de la zone : le forage F1 de Roquefort - Stade (09261X0008/F1) et le forage F1 d'Arue - ruisseau du Cros (09261X0058/F1), sachant que des captages ont également lieu à proximité de ces deux ouvrages (forages F2 et F3 de Roquefort - Stade (09261X0010/N2 et 09261X0123/F3), et forage F2 d'Arue (09261X0057/F2)).

D'après Platel (2001), les calcaires crétacés comprennent deux réservoirs distincts, même si certaines intercommunications restent possibles :

- le réservoir supérieur des calcaires du Maastrichtien/Santonien/Coniacien/Turonien : capté par les forages F1 de Roquefort et F1 et F2 d'Arue ;
- le réservoir inférieur des calcaires du Cénomanien moyen à inférieur : capté par les forages F2 de Roquefort et F1 d'Arue.

Dans le modèle hydrodynamique, le découpage est fait entre formations campanienne et antecampanienne ; par défaut, ces deux formations sont en connexion. Le modèle a donc été modifié de manière à représenter deux réservoirs distincts, avec, au niveau du Stade à Roquefort, les captages faits dans le réservoir inférieur et les mesures faites dans le réservoir supérieur, et inversement pour les forages d'Arue. Cela a été obtenu en affectant une faible perméabilité verticale aux couches 8 et 9 du modèle, par l'intermédiaire du coefficient d'anisotropie verticale de la perméabilité ajustable, dans le code de calcul MARTHE. Malgré ce fonctionnement hydrogéologique complexe, le modèle hydrodynamique régional calcule des charges cohérentes au niveau du forage F1 de Roquefort - Stade. Le calage est moins bon pour le forage F1 d'Arue, dont les charges sont sous-estimées, même si la tendance et les variations sont plutôt correctement restituées. Cette sous-estimation pourrait s'expliquer par 1) l'incertitude sur les niveaux mesurés dans cet ouvrage, qui capte à la fois le réservoir inférieur et le réservoir supérieur, et 2) des relations fortes avec les pertes locales de l'Estampon. Pour ce second point, un raffinement local de ce secteur, avec prise en compte des relations "nappe-rivières", permettrait de vérifier cette hypothèse ; le modèle actuel ne permettant pas d'aller plus loin dans la prise en compte de ces phénomènes locaux.



Illustration 34 - Comparaison "charges simulées vs. charges obsevées" pour le secteur 12 de Créon d'Armagnac (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)



Illustration 35 - Comparaison "charges simulées vs. charges obsevées" pour le secteur 13 de Roquefort (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)

8.4.3. Secteur 14 : Audignon

[Les résultats du modèle calibré pour ce secteur sont fournis aux Illustration 39, Illustration 40 et Illustration 41].

La structure d'Audignon est située à une trentaine de kilomètres à l'ouest des stockages de gaz. Cet anticlinal porte à l'affleurement les formations calcaires du Paléocène et du Crétacé supérieur (avec recouvrement alluvionnaire ou des Sables Fauves du Miocène) ainsi que des marnes albiennes en son cœur.

Une synthèse hydrogéologique de la structure, précisant le fonctionnement de cet hydrosystème, a été récemment produite (Cabaret et al., 2020) :

- Le réseau hydrographique (cours d'eau du Laudon, du Gabas et du Bahus) participe au drainage du réservoir au nord de la structure. Une partie des écoulements est restituée également au profit des sources du Marseillon au nord et de Peyradère à l'ouest. En ce sens, l'anticlinal d'Audignon constitue donc, dans sa partie nord et ouest, une zone d'exutoire des nappes du Crétacé et du Paléocène.
- Le rôle de la structure anticlinale comme zone d'alimentation des réservoirs profonds a également été mis en évidence : au droit de la structure anticlinale, le réservoir du Crétacé bénéficie d'une recharge sur quasiment l'ensemble de la structure, les secteurs favorables à l'infiltration se situant principalement dans ses parties centrale et méridionale. Au sud, les cours d'eau se retrouvent, lors de leur entrée dans l'anticlinal en position haute, favorisant ainsi des pertes au profit des réservoirs plus profonds. Des infiltrations diffuses et directes pourraient ainsi avoir lieu et participeraient à la recharge du Paléocène et du Crétacé.

La résolution du modèle hydrodynamique est certainement trop faible pour traduire ces relations complexes et locales entre les écoulements de surface et les écoulements plus profonds. On remarque néanmoins que les principales caractéristiques de la structure d'Audignon sont bien traduites par le modèle hydrodynamique. Le diagramme de dispersion spécifique à ce secteur (Illustration 36) montre en effet que les différences de charges piézométriques au sein de ce secteur sont bien retranscrites, à l'exception notable de l'ouvrage de Taulade (09783X0018/F1), qui montre des niveaux bas que le modèle n'a pu reproduire : les cartes piézométriques produites par Cabaret et al. (2020) laissaient d'ailleurs entrevoir cette « anomalie piézométrique ». L'existence de zones karstiques pourrait éventuellement expliquer ces faibles charges ; plusieurs essais de modélisation n'ont pas pu confirmer cette hypothèse. Les autres points du diagramme de dispersion, pouvant montrer des différences importantes entre observations et simulations, correspondent à des mesures de niveaux dynamiques en cours de pompage, non traduites par le modèle (voir discussion au paragraphe 6.2).



Illustration 36 - Diagramme de dispersion spécifique au secteur d'Audignon pour les nappes de l'Eocène inférieur (Ilerdien) / Paléocène / Crétacé supérieur

L'inspection visuelle de l'adéquation entre chroniques simulées et observées appelle les commentaires suivants :

- A l'extrême est de la structure, où la nappe du Paléocène est captive (ouvrages d'Eugénieles-Bains : 09784X0029/CHICOY & 09784X0020/F), les charges absolues et la tendance à la baisse sont correctement retranscrites (RMSE relativement faible). Les résultats pourraient éventuellement être plus précis si les chroniques de prélèvements mensuelles étaient disponibles.
- Toujours à l'est de la structure, au niveau des affleurements paléocènes, l'effet des précipitations sur les niveaux de la nappe du Paléocène est correctement retranscrit pour les ouvrages de Larcuchette (09783X0019/F) et Bahus-Juzanx (09783X0022/F); même si le premier ouvrage est directement influencé par les pompages et que le second ne bénéficie que d'une fréquence de mesures relativement faible et ne mesure pas les niveaux au-delà de 64 m NGF. Les niveaux modélisés dans ce secteur sont cohérents avec les observations.
- Dans la partie centrale, aux alentours de la source du Marseillon :
 - Les variations de charge directement observées pour les ouvrages de la source du Marseillon (09782X0023/F0 & 09782X0006/P1) ne peuvent pas être fidèlement

représentées par le modèle, qui considère la maille contenant la source comme une maille de débordement (à charge fixe si le débordement est effectif). Le modèle indique pour ce secteur un débordement continu et, du fait de sa résolution, ne peut traduire les variations locales se produisant au niveau des points de prélèvements.

- OUn très faible gradient hydraulique a pu être mis en évidence au sud de la source de Marseillon, sur les cartes piézométriques de Cabaret et al. (2020) : cela est confirmé par les charges observées aux ouvrages ASA (09782X0016/F3) et ASA 8 (09782X0013/F4) qui sont presque identiques (~ 50 cm d'écart), malgré une distance de plus de 4 km les séparant (voir Illustration 37). De fortes perméabilités ont été introduites dans le modèle du secteur, afin de reproduire un comportement karstique du Crétacé supérieur. Au final, la modélisation des évolutions des niveaux piézométriques est convenable au vu de la complexité des écoulements locaux dans ce secteur.
- Dans la partie ouest, deux comportements différents semblent exister entre Labaoucoume (09781X0011/F), qui capte le Crétacé supérieur, et les ouvrages Sourigues-F1 et Lacrouts-F2 de Maylis (09781X0013/F et 09781X0015/P219), et Sartou (09781X0007/F), qui captent le Paléocène (Illustration 38). De plus, le gradient hydraulique du Paléocène dans le secteur semble très faible, traduisant vraisemblablement une forte connexion entre les 3 ouvrages le captant : malgré leur profondeur importante (80-180 m pour F1 et 307-551 m pour F2), les forages de Maylis ont également été confrontés à des épisodes récurrents de turbidité, ainsi qu'à la survenue de nitrates ayant entraîné leur abandon par l'exploitant (Cabaret et al., 2020). Des circulations importantes (de type karstique) sont donc avancées pour expliquer ces observations. Dans le modèle, et au niveau de ce secteur, ces observations sont traduites 1) par une déconnexion entre Paléocène et Crétacé dans ce secteur et 2) par la mise en place d'une zone de perméabilité importante dans le Paléocène. Le modèle ainsi paramétré permet une représentation correcte de la différence de comportement entre Paléocène et Crétacé (valeur de charges et amplitude des variations au cours du temps). A noter toutefois que le modèle ne parvient pas à atteindre exactement la faible valeur des charges observées dans le Paléocène.



Illustration 37 - Evolution des charges au niveau des ouvrages ASA et ASA 8 d'Audignon



Illustration 38 - Evolution des charges pour les ouvrages Labaoucoume (09781X0011/F), F1 et F2 de Maylis (09781X0013/F et 09781X0015/P219) et Sartou (09781X0007/F)



Illustration 39 - Comparaison "charges simulées vs. charges obsevées" pour le secteur 13 d'Audignon (1/3) (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)



Illustration 40 - Comparaison "charges simulées vs. charges obsevées" pour le secteur 13 d'Audignon (2/3) (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)



Illustration 41 - Comparaison "charges simulées vs. charges obsevées" pour le secteur 13 d'Audignon (3/3) (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)

8.4.4. Secteur 15 : Préchacq - Gamarde

[Les résultats du modèle calibré pour ce secteur sont fournis à Illustration 42].

Préchacq et Gamarde sont deux sources thermales situées respectivement dans les vallées du Louts et de l'Adour. Les calcaires de l'Eocène inférieur (Ilerdien) et du Paléocène sub-affleurent du fait des structures de Thétieu (Préchacq) et de Louer (Gamarde). Deux piézomètres permettent de suivre l'évolution des charges hydrauliques de cet aquifère : la source Buccuron II de Gamarde-les-Bains (09507X0031/FBUC2) et le forage de Lavigne à Louer (09507X0048/F1). Les niveaux calculés dans le forage de Buccuron II traduisent une émergence à cet endroit, mais le modèle ne peut traduire les évolutions piézométriques observées dans cet ouvrage, localisé dans une maille à débordement. Quant au forage de Lavigne, même si les variations piézométriques liées aux évolutions de la recharge au cours du temps sont correctement reproduites par le modèle, les charges sont largement surestimées. Les charges au niveau de l'exutoire de la structure de Louer étant entre 15 et 16 m NGF, les charges du forage de Lavigne évoluant à une charge inférieure à 10 m NGF n'ont pu être expliquées. L'existence d'un autre exutoire, à une altitude plus faible, ou un fonctionnement hydrogéologique plus complexe que celui actuellement modélisé paraissent être les deux seules explications à cette mauvaise calibration.

8.4.5. Secteur 16 : anticlinaux d'Izaute et de Lacquy

[Les résultats du modèle calibré pour ce secteur sont fournis à Illustration 43].

L'ouvrage Izaute 101 est localisé dans la nappe du Paléocène, au droit de la structure d'Izaute, dans un secteur où les marnes éocènes sont très peu épaisses et assez sableuses (communication personnelle, Lasseur, 2020) et où théoriquement les SIM sont en connexion avec les aquifères sous-jacents. On remarque toutefois que les variations annuelles de charges, mesurées à lzaute 101, sont de l'ordre du mètre, alors qu'elles peuvent dépasser les 100 m dans les SIM sus-jacents. On note quand même que les charges moyennes, pour cet ouvrage, sont du même ordre de grandeur que celles des SIM autour des stockages de gaz. Ces observations plaident pour une médiocre mais réelle connexion entre les SIM et le Paléocène dans cette zone. Néanmoins, selon le modèle hydrodynamique, une connexion généralisée à tout l'aquifère de l'Eocène inférieur (llerdien) / Paléocène / Crétacé supérieur n'est pas envisageable puisqu'une telle connexion impliquerait, en régime permanent, des échanges et donc des charges bien trop élevées ailleurs dans cet aquifère. Il semble donc que l'ouvrage d'Izaute 101 capte les calcaires du Paléocène dans une zone isolée du reste de l'aquifère profond régional, dont la superficie est inconnue. C'est l'hypothèse qui a été prise en considération lors de la construction du modèle hydrodynamique. Au final, un calage n'a été possible que pour un coefficient d'emmagasinement spécifique important, dans cette zone isolée, traduisant vraisemblablement l'incertitude de la taille de cette zone (1e⁻⁵ m⁻¹). Toutefois, les résultats de la calibration montrent que le modèle conceptuel de fonctionnement sous-jacent est très acceptable puisque la dynamique des charges est bien transcrite : on retrouve en effet les fortes charges en valeur absolue, observées au droit d'Izaute 101, au regard du reste du Paléocène dans le secteur ; des tendances correctement reproduites (baisses plus ou moins importantes des charges selon la période considérée) ; ainsi que des variations cohérentes de charges cycliques liées aux opérations de stockage.

L'ouvrage de Lacquy 101 (09266X0004/LC101) a été discuté dans diverses études (par ex. Bel et al., 1989 ; Wuilleumier et al., 2015). Cet ancien forage pétrolier a été transformé en piézomètre par mitraillage du tubage en face des Sables de Lussagnet, mais l'annulaire n'étant pas cimenté entre les SIM et l'aquifère du Crétacé supérieur sous-jacent, les mesures piézométriques faites

dans l'ouvrage ont toujours questionné. L'évolution des charges piézométriques montre, depuis 1974, une tendance nette à la baisse avec des variations annuelles très faibles (décimétriques). De plus, on ne voit pas clairement la mise en charge du stockage d'Izaute, ce qui ne permettrait pas d'expliquer les faibles variations annuelles par les cycles des stockages.

Enfin, l'ouvrage de la route de Saint-Justin (09266X0104/F), réalisé en 2004 non loin de l'ouvrage Lacquy 101 (à environ 4 km) et captant les calcaires du Crétacé supérieur, montre des niveaux relativement similaires à ceux de Lacquy 101. Il semble donc que les niveaux piézométriques mesurés dans ces deux ouvrages soient représentatifs des niveaux piézométriques du Crétacé supérieur. Nous rappelons qu'au nord de ces ouvrages se trouvent la structure de Créon, se comportant comme une zone de recharge de ces calcaires (dôme piézométrique) avec des charges toujours en dessous de 80 m NGF, et celle de Roquefort, dont le comportement est globalement d'exutoire de cet aquifère (dépression piézométrique) avec des charges comprises entre 50 et 60 m NGF. Les charges plus élevés, observées dans la zone de Lacquy, sont logiquement difficilement reproduites par le modèle hydrodynamique, si on fait l'hypothèse d'une continuité des calcaires crétacés sans aucun autre échange. Lachassagne et al. (1998) évoquent des accidents tectoniques entre Lacquy et la structure de Roquefort-Créon pouvant expliquer ces différences. De plus, les ouvrages de Lacquy et de Saint-Justin sont situés au niveau d'un anticlinal, au droit duquel des communications avec les calcaires jurassigues pourraient exister, comme évoqué par Lachassagne et al. (1998): le log géologique de l'ouvrage Lacquy 1 (09266X0003/LC1), également situé dans cet anticlinal, montre que les calcaires du Cénomanien reposeraient sur des calcaires dolomitisés du Portlandien supérieur très fissurés. L'anomalie piézométrique dans ce secteur pourrait donc éventuellement s'expliquer par des arrivées d'eau depuis ces calcaires jurassigues. En l'absence de couche du Jurassigue dans le modèle hydrodynamique, le même type de modèle conceptuel que celui explicité dans le paragraphe 8.3.10 (Secteur 11 : secteur SIM-est) (pour l'ouvrage de Saint-Cricq) a été mis en œuvre : une charge imposée a été fixée au sein de l'anticlinal de Lacquy, représentant les échanges avec les calcaires du Jurassique. Selon cette hypothèse, les charges simulées se rapprochent des charges observées en valeurs absolues, même si des limitations existent : la charge constante imposée pour estimer les connexions avec le Jurassique ne permet pas de prendre en compte une évolution des charges au sein du Jurassique, et ainsi la tendance à la baisse des charges observées est sous-estimée. De plus, on remarque que les cycles annuels observés dans les deux ouvrages, de Lacquy 101 et de la route de Saint-Justin, ne peuvent être correctement reproduits : l'influence de la structure de Créon directement au sein de l'aquifère du Crétacé supérieur n'est que faiblement perceptible lorsque les échanges avec le Jurassique sont considérés. Toutefois, on pourrait envisager que ces cycles proviennent également d'une recharge des calcaires du Jurassique au sein de la structure haute de Créon, seule zone du secteur où le Jurassique affleure, hypothèse que le modèle, dans sa version actuelle, ne permet pas de tester.



Illustration 42 - Comparaison "charges simulées vs. charges obsevées" pour le secteur 15 de Préchacq - Gamarde (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)



Illustration 43 - Comparaison "charges simulées vs. charges obsevées" pour le secteur 16 relatif aux anticlinaux d'Izaute et Lacquy (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)

8.4.6. Secteur 17 : Landes de Siougos et système dacquois

[Les résultats du modèle calibré pour ce secteur sont fournis à l'Illustration 45].

Le site des Landes de Siougos est une structure anticlinale profonde, reconnue depuis 1955 ; le forage Mont-de-Marsan 1 (09512X0002) est un des deux forages de reconnaissance réalisés à l'époque (depuis transformé en piézomètre). Ce secteur a fait l'objet d'une demande, déposée en 1993, d'autorisation de stockage de gaz par Gaz de France, au sein du réservoir constitué par la base de l'Yprésien et le Paléocène (dénommé Dano-Paléocène à cette date). Six autres forages ont été forés dans cette zone d'intérêt au cours des années 1980 et 1990, avec pour certains un suivi piézométrique disponible (09511X0022/LS02, 09512X0033/LS04 et 09512X0034/LS07).

Deux forages, plus éloignés de la région des Landes de Siougos bénéficient également de mesures piézométriques : le forage de Toulouzette (09515X0027/TLZ1) captant les eaux du Paléocène et situé au sud, à proximité de la ride d'Audignon, et le forage de Gourbera 1 (09505X0034/GO01) situé au droit du synclinal bordant, sur son flanc nord, la structure de Dax, et captant les eaux du Crétacé supérieur.

Dans le cadre de cette demande, des travaux de synthèse géologique et hydrogéologique ont été menés, aboutissant à un modèle conceptuel, puis numérique, centré sur cette région des Landes de Siougos, avec 3 niveaux aquifères principaux : le réservoir R3 du Crétacé supérieur, le réservoir R2 des calcaires et dolomies du Paléocène-Yprésien, et les réservoirs R0 et R1 éocènes (Sables de Lussagnet et Grès à Nummulites).

Les réservoirs R0-R1 et R2 sont isolés par l'épaisse couche de marnes éocènes. Au niveau du dôme des Landes de Siougos, les réservoirs R2 et R3 peuvent être considérés comme déconnectés, mais des communications existent très rapidement dès Mont-de-Marsan : puisque des interférences ont été notées entre les forages des Landes de Siougos et les forages géothermiques de Mont-de-Marsan (parmi lesquels le forage GMM1 (09513X0021/GMM1) qui présente quelques mesures piézométriques), et que les faciès des eaux des deux réservoirs sont très similaires (Conrad, 1997).

Ces modèles conceptuel et numérique ont été jugés cohérents et établis à partir d'hypothèses probables, mais des incertitudes restaient présentes pour plusieurs points importants (Sauty, 1997) :

- la connexion entre les Landes de Siougos et le système dacquois. La formation du Dano-Paléocène ne semble pas permettre ces échanges, mais le Crétacé supérieur pourrait servir de relais :
 - oA noter que, depuis les différents travaux et expertises cités jusqu'à présent, des données relatives à l'ouvrage de Gourbera montreraient une connexion possible avec le système dacquois : Lachassagne et al. (1998) mentionnent des similarités chimiques entre les eaux captées à Gourbera et à Saint-Paul-les-Dax (forage SPDX1 qui appartient à l'ensemble dacquois), mais qui « demandent à être confirmées ». Le Fanic (2005) a pu mettre en évidence « de manière significative » l'influence de l'exploitation thermale à Dax sur les niveaux piézométriques mesurés à Gourbera.
 - De plus, les données piézométriques pendant la période de mesures communes montrent des évolutions similaires entre les ouvrages des Landes de Siougos et l'ouvrage de Gourbera, malgré la distance séparant ces ouvrages.

 la continuité hydrogéologique entre le réservoir du Sénonien et l'océan. Cette continuité nécessiterait une bonne perméabilité du réservoir jusqu'à d'éventuels exutoires en mer, après un transit au sein du plateau continental.

Concernant le premier point, et au vu des informations à disposition, le modèle hydrodynamique a été construit de sorte à autoriser des connexions entre le système dacquois et les Landes de Siougos, à l'ouest d'Audignon, là où le modèle géologique indique une connexion possible.

Le second point (connexion avec l'océan à l'ouest) a déjà été en partie discuté dans le paragraphe 4.1.1. Le secteur des Landes de Siougos est en fait le plus proche de l'océan et donc le plus à même de discuter si des connexions paraissent envisageables au vu des résultats du modèle.

Dans un premier temps, la configuration sans connexion avec l'océan a été testée. Sous ces conditions :

- Aux limites de ce secteur, les charges semblent être calculées de façon globalement acceptable : c'est-à-dire au sud-ouest à Dax (09771X0163/SPDX1), puis à Gourbera (09505X0034/GO01), au sud à Toulouzette (09515X0027/TLZ1), au nord-est au niveau des structures de la ride de Créon-Roquefort (voir paragraphes Secteur 12 : Créon d'Armagnac et Secteur 16 : anticlinaux d'Izaute et de Lacquy) ;
- Mais le très faible gradient piézométrique (quasiment nul) et les valeurs de charges observées relativement faibles, qui caractérisent la structure des Landes de Siougos au sein d'une zone plus grande qui, elle, présente des gradients piézométriques bien plus importants, n'ont pu être reproduits par le modèle hydrodynamique. Cette dépression piézométrique est d'ailleurs visible sur les cartes piézométriques réalisées dans le cadre du projet de stockage des Landes de Siougos (e.g. Armand et Capdeville, 1992, figure 1bis). Mais elle reste inexpliquée par le modèle dans sa version actuelle. Des variations verticales de faciès au sein du groupe Eocène inférieur (Ilerdien) / Paléocène / Crétacé supérieur hors structures pourraient éventuellement expliquer ces observations, mais les discussions ci-dessus montrent des connexions importantes entre Paléocène et Crétacé supérieur, rendant difficilement compréhensible l'établissement de plusieurs nappes à des charges et gradients piézométriques très différents.

Une analyse de sensibilité a ensuite été menée concernant la connexion de l'aquifère du Crétacé supérieur. Une seconde configuration où les faciès permettent une bonne connexion a été testée. Les conditions imposées aux limites du modèle (voir paragraphe 4.1.1) ont tendance à augmenter légèrement les charges hydrauliques simulées à l'ouest de l'aquifère du Crétacé supérieur dans ce secteur des Landes de Siougos, lorsque les connexions sont autorisées (entrée d'eau par l'océan). A noter également, que des tests complémentaires ont été réalisés afin de prendre en compte d'éventuelles communications, moins profondes, entre l'aquifère du Crétacé supérieur et l'océan *via* des aquifères-relais et des exutoires bien moins profonds : pour cela, et comme indiqué au paragraphe 4.1.1, la charge imposée aux limites du Crétacé supérieur est artificiellement baissée. La valeur de cette baisse est inconnue et plusieurs essais ont donc été effectués. Il s'avère que, même si cette baisse entraîne une meilleure calibration des puits des Landes de Siougos, sans pour autant expliquer les niveaux bas observés, elle entraîne également une moins bonne calibration d'autres ouvrages comme celui de Gourbera.

Au final, la première configuration, sans connexion avec l'océan au niveau des formations du Crétacé, a été conservée, permettant, en moyenne dans le secteur, la meilleure restitution des charges. La question des échanges avec l'océan n'est donc pas entièrement tranchée : toutefois, s'ils existent, ils ne semblent pas de grande ampleur.

8.4.7. Secteur 18 : Paléocène - autres ouvrages

[Les résultats du modèle calibré pour ce secteur sont fournis à l'Illustration 46].

L'ouvrage de Lannecaube (10052X0038/F) est situé à proximité du forage de Lalongue (voir paragraphe Secteur 6 : Lespielle - Garlin), au droit du dôme de Garlin, mais capte les calcaires du Paléocène. Cet ouvrage montre, depuis sa réalisation en 1995, une baisse importante des charges ; cette baisse a d'ailleurs été très importante entre 1996 et 1997 (109,09 m NGF en août 1996, 105,43 m NGF en mars 1997). De plus, on note pour cette chronique piézométrique des variations annuelles légères semblant être dues aux précipitations (par ex. l'une des augmentations les plus visibles est en fin 2000 - fin 2001), malgré la profondeur importante des horizons captés (537 m - 933 m) et donc le caractère très captif du Paléocène dans cette zone. Ces différentes observations peuvent donc poser question quant à la représentativité des niveaux piézométriques mesurés, mais aucun élément ne permet non plus d'exclure cet ouvrage de la calibration. Au final, le modèle hydrodynamique montre bien des niveaux piézométriques autour de 100 m NGF d'eau douce évoluant à la baisse, mais les niveaux ainsi que cette tendance sont sous-estimés par rapport aux observations.

L'ouvrage de Saint-André (10336X0002/F) est localisé à proximité de la limite sud de l'aquifère, dans une zone où un compartimentage structural est possible. Les charges très élevées de ce secteur (environ 290 m NGF d'eau douce, voir Illustration 44) notées très au-delà de toutes les mesures faites dans le secteur d'étude, quel que soit l'aquifère étudié, impliqueraient un gradient très élevé au sein du Paléocène, d'autant plus que l'ouvrage de Puymaurin (10078X0001/F), captant aussi le Paléocène, à 15 km au nord-est de Saint-André, montre des charges mesurées et corrigées inférieures à 180 m NGF d'eau douce. Cet ouvrage a donc été considéré comme ayant un comportement hydrodynamique très local, déconnecté du comportement régional de la nappe, ce qui expliquerait sa quasi-stabilité au cours des plus de 40 années de mesures. Le modèle hydrodynamique n'a donc pas été calibré par rapport à ce point de mesure.

Enfin, les charges simulées au droit de l'ouvrage de Puymaurin (10078X0001/F) sont sousestimées. Il faut noter que le faible nombre de points d'observation dans ce secteur oriental du domaine d'étude ne permet pas de bien comprendre les raisons de cette sous-estimation. Il est probable que la localisation de la recharge de la nappe associée au Paléocène et au Crétacé supérieur ne soit pas optimale, et qu'une partie de ces flux de recharge proviennent de secteurs plus proches de l'ouvrage de Puymaurin 2 que ceux considérés dans le modèle.



Illustration 44 - Evolution des charges de l'ouvrage de Saint-André (10336X0002/F)



Illustration 45 - Comparaison "charges simulées vs. charges obsevées" pour le secteur 17 des Landes de Siougos et du système dacquois (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)



Illustration 46 - Comparaison "charges simulées vs. charges obsevées" pour le secteur 18 relatifs aux autres ouvrages de l'aquifère du Paléocène (orange : charges simulées ; bleu : charges observées ; noir : charges observées considérées dans le calcul des statistiques de calage)

8.4.8. Conclusion intermédiaire n°2 : évaluation globale de la calibration des charges simulées à l'échelle des formations Eocène inférieur (llerdien) / Paléocène / Crétacé supérieur

A l'échelle régionale, les écoulements associés à la nappe de l'Eocène inférieur (Ilerdien) / Paléocène / Crétacé supérieur ne peuvent être entièrement compris par l'intermédiaire des observations piézométriques disponibles puisque ces dernières sont, pour la plupart, relatives aux structures affleurantes. Néanmoins, le diagramme de dispersion, tracé à l'Illustration 47 pour toute la nappe, montre que la distribution des charges observées est très correctement retranscrite par le modèle hydrodynamique, avec un coefficient de Nash « régional » de 0,94. Les secteurs pour lesquels un biais existe sont le secteur est (voir paragraphe Secteur 18 : Paléocène - autres ouvrages) et, dans une moindre mesure le secteur des Landes de Siougos (voir paragraphe Secteur 17 : Landes de Siougos et système dacquois).



Illustration 47 - Diagramme de dispersion "charges observées vs. charges simulées" au sein des formations de l'Eocène inférieur (Ilerdien), du Paléocène et du Crétacé supérieur

8.5. COHERENCE GLOBALE DES ZONES DE RECHARGE ET EXUTOIRES

Du fait de la non-prise en compte des formations superficielles et du réseau hydrographique dans la version actuelle du modèle, il n'est pas possible de calibrer ce dernier en utilisant les quantités d'eau débitées par les cours d'eau. Il est toutefois possible de discuter le modèle hydrodynamique sous l'angle des quantités rechargées et de la localisation estimée des exutoires des nappes profondes avant toute exploitation.

8.5.1. Localisation des exutoires dans le modèle hydrodynamique en régime permanent (régime naturel avant exploitation)

La localisation précise des exutoires dans le modèle hydrodynamique doit être considérée comme une localisation indicative d'une zone d'exutoire, dans la mesure où elle dépendra fortement des affleurements fournis par le modèle géologique au niveau des structures du domaine d'étude, dont la géométrie ne peut être qu'approximative à la résolution du modèle.

En régime permanent, c'est-à-dire considérant un état des nappes profondes stabilisé (avant toute sollicitation anthropique de l'aquifère), les mailles du modèle pour lesquelles un débordement existe sont situées :

* pour la nappe des SIM, au droit de 2 secteurs :

- au sud-est de la structure de Créon Barbotan, proche de Barbotan (Douez et al. (2019) mentionnent la présence de sources dans le passé et une exploitation qui se faisait par arthésianisme);
- au droit de la structure anticlinale de Cézan Lavardens, à proximité de la source du Masca ;

* pour la nappe sous-jacente Eocène inférieur (Ilerdien) / Paléocène / Crétacé supérieur, au droit de **7** secteurs, du nord au sud :

- au niveau de la structure de Roquefort et en particulier au niveau de la rivière Douze ;
- au niveau du diapir de Thétieu, à proximité des sources de Préchacq-les-Bains ;
- au niveau de la structure de Louer, à proximité des sources de Gamarde-les-Bains et de la rivière Louts ;
- au niveau de la structure d'Audignon :
 - oà l'ouest, à proximité de la source de Peyradère et de la partie aval de la Gouaougue ;
 - oau nord, à proximité de la source du Marseillon (Crétacé supérieur) et de la source de Saint-Vincent (Paléocène);
 - oà l'est, au niveau des rivières Gabas et Bahus qui drainent la nappe ;
- au niveau du diapir de Dax, à proximité des sources de Dax ;
- au niveau de la ride de Tercis Saubusse, à proximité des sources de Tercis-les-Bains ;
- au niveau du diapir de Bastennes-Gaujacq, à proximité de la source des Eschourdes.

Cette liste est cohérente avec la littérature, ce qui renforce la confiance dans la capacité du modèle à reproduire les écoulements. A noter toutefois que certaines sources, pour lesquelles des aquifères-relais (voire des fractures) participent aux résurgences, n'y figurent pas : c'est notamment le cas des sources d'Eugénie-les-Bains (avec un impact attendu sur les charges simulées, cf. paragraphe Secteur 5 : Eugénie-les-Bains / Geaune - Pécorade) et de Castéra - Verduzan. Une prise en compte des aquifères superficiels (*e.g.* pour Eugénie-les-Bains), voire un raffinement du modèle dans certaines zones d'intérêt (*e.g.* pour Castéra - Verduzan) permettrait d'améliorer encore le modèle sur ce point.

8.5.2. Discussion concernant les zones de recharges dans le modèle hydrodynamique

Les zones d'affleurement, lorsqu'elles sont situées au-dessus des niveaux piézométriques, participent théoriquement à l'alimentation, et la cohérence des zones d'infiltration et des quantités infiltrées peut alors aider à juger de la calibration du modèle.

Les résultats de la calibration du modèle (sections 8.3 et 8.4) ont permis de mettre en évidence que la plupart des chroniques piézométriques pour lesquelles une influence de l'infiltration était visible étaient plutôt bien traduites par le modèle hydrodynamique. Les zones d'infiltration sont donc bien appréhendées par le modèle ; c'est typiquement le cas au niveau de la structure de Créon-d'Armagnac qui est la seule zone d'alimentation et qui permet de vérifier la bonne combinaison, par le modèle, de la dynamique profonde et des sollicitations de surface.

Pour la question des quantités infiltrées au droit des différentes structures affleurantes du modèle, les simulations présentées ont considéré des quantités d'infiltration (*nb.* en régime permanent, car ensuite cette quantité est modulée en fonction des chroniques climatiques, *cf.* paragraphe 4.2) comprises entre 50 mm/an et 100 mm/an, ce qui se situe dans des ordres de grandeur cohérents, à condition que les surfaces d'affleurements soient correctement estimées. Seule la structure de Cézan - Lavardens bénéficie d'une recharge aux affleurements qui peut paraître incohérence à première vue (400 mm/an), mais qui traduirait d'éventuelles alimentations par des cours d'eau (discussion du paragraphe Secteur 8 : Castéra - Verduzan / Cézan - Lavardens).

Enfin, la question des alimentations par des affleurements des SIM et du Paléocène / Crétacé aux limites hautes du modèle a été traitée par le biais de potentiel imposé étant données les incertitudes importantes existant sur la localisation de ces zones d'affleurement. Les débits injectés par le biais de ces potentiels imposés traduisent donc la quantité d'eau nécessaire au modèle pour établir les simulations présentées qu'il s'agit donc de discuter :

- recharge de la nappe des SIM au sud de Pau : 21 500 m³/j entrant, soit 7,8 Mm³/an. En tenant compte de l'extension des SIM sous les conglomérats (communication personnelle, Lasseur, 2020), cela reviendrait à une infiltration équivalente depuis la surface de 34 mm/an. Ces volumes ne semblent pas aberrants d'autant plus que Wuilleumier et Douez (2016) précisent que, dans ce secteur, le modèle MSAG (Modèle Sud Adour-Garonne, Seguin, 2003) intègre une recharge de 8,6 Mm³/an (3,6 Mm³/an par un flux de recharge, associés à 5 Mm³/an par des limites à potentiel imposé).
- recharge de la nappe associée à l'aquifère du Paléocène / Crétacé supérieur : 67 900 m³/j entrant, soit 24,8 Mm³/an. Ces volumes importants ne sont pas aberrants au regard des volumes estimés par le modèle MSAG pour ce secteur oriental (présentés par Wuilleumier et Douez, 2016) : même si le volume d'apport total n'est pas directement donné, on peut l'estimer en additionnant les volumes échangés aux limites orientales du domaine (13,5 Mm³/an) aux volumes de recharge (20,2 Mm³/an, mais intégrant également une recharge des SIM), soit un volume (légèrement inférieur) à 33,7 Mm³/an.

Ces volumes importants traduisent des surfaces de recharge importantes, s'ils sont associés à de l'infiltration. La difficulté, mentionnée précédemment dans la section 4.2.2, est relative aux incertitudes associées aux surfaces contribuant à cette alimentation. Si on se réfère aux seuls affleurements du Crétacé supérieur et du Paléocène à l'extrême est du modèle, les surfaces en jeu sont trop faibles pour assurer une telle recharge. Il semble donc que le flux de recharge soit également lié à des affleurements extérieurs au modèle comme ceux du massif des Petites Pyrénées - Plantaurel. A noter que la recharge au niveau de ces secteurs pourrait également permettre une meilleure calibration des charges à l'est du secteur d'étude (voir discussion au paragraphe 8.4.7).

Au final, on peut conclure qu'aucun problème d'incohérence, à propos des quantités d'eau participant à la recharge des aquifères, n'a été noté.

8.6. PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES

8.6.1. Perméabilités

Les champs de perméabilité ayant abouti aux résultats de simulation présentés jusqu'à présent sont fournis à l'**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** pour les couches aquifères. A noter que :

- L'unité des perméabilités est celle de la perméabilité à l'eau (douce et froide) en m/s (la conversion en perméabilité intrinsèque (m²) se fait par un simple facteur multiplicatif 10⁻⁷ m.s.
- La perméabilité associée aux faciès non aquifères est de 10⁻¹² m/s.
- Les failles considérées comme étanches sont également indiquées sur l'illustration (on rappelle que la limite entre le secteur est des SIM et le reste des SIM est arbitraire).
- Certaines limites ont été considérées comme semi-étanches (c'est-à-dire de faible perméabilité, mais autorisant quand même des échanges).
- Les zones d'absence de marnes éocènes dans le modèle sont indiquées sur la carte à la couche 3. On rappelle que des incertitudes existaient lors de la modélisation géologique de cette couche et que la calibration du modèle hydrodynamique a été utilisée pour identifier ces zones d'absence pouvant entraîner des échanges entre la nappe des SIM et la nappe sous-jacente si les faciès le permettent (voir section 3.2.2).

On remarquera que la nappe des SIM bénéficie d'une hétérogénéité importante alors que les perméabilités associées aux formations de l'Eocène inférieur (Ilerdien), du Paléocène ou du Crétacé supérieur sont quasiment homogènes. Cela ne correspond pas à une réalité, mais s'explique par le fait qu'un nombre important d'observations existe pour la nappe captive des SIM, alors que les formations aquifères sous-jacentes ne peuvent être contraintes que par un nombre plus limité d'observations et essentiellement faites au droit de structures affleurantes où les charges sont également très sensibles aux paramètres de recharge et d'emmagasinement libre.

8.6.2. Emmagasinements captif et libre

Les coefficients d'emmagasinement captif spécifique ayant abouti aux résultats de simulation, présentés jusqu'à présent, sont fournis à l'Illustration 49 pour les couches aquifères. Ils sont généralement de 10⁻⁶ m⁻¹ (pour la majorité de l'aquifère des SIM) et de 2x10⁻⁶m⁻¹ (pour les aquifères sous-jacents), avec quelques zones présentant des valeurs plus importantes à 5x10⁻⁶ m⁻¹, voire 1x10⁻⁵m⁻¹ (cette dernière valeur a été seulement appliquée pour les calcaires de l'Eocène inférieur (Ilerdien) et du Paléocène, au droit de l'anticlinal d'Izaute, voir paragraphe 8.4.5).

Un coefficient d'emmagasinement libre uniforme de 1 % a été considéré pour l'ensemble des structures affleurantes du domaine, à l'exception des affleurements de la structure de Créon, où un coefficient un peu plus faible de 0,5 % a été nécessaire pour la calibration du modèle, ainsi que pour la petite surface d'affleurements au droit la structure de Cézan - Lavardens où un coefficient plus important de 10 % a été nécessaire. On rappelle, pour ce dernier secteur, qu'une recharge très importante a été nécessaire pour sa calibration (de qualité médiocre, cf. paragraphe 8.3.7) semblant traduire d'éventuels pertes par des cours d'eau.



Illustration 48 - Champ de perméabilité des couches aquifères après calibration du modèle hydrodynamique



Illustration 49 - Champ de coefficients d'emmagasinement spécifique des couches aquifères après calibration du modèle hydrodynamique
8.7. PIEZOMETRIE CALCULEE ET DIRECTIONS PRINCIPALES D'ECOULEMENT

Afin d'apprécier, à l'échelle régionale, les directions d'écoulement calculées par le modèle, des cartes de charges ont été calculées à la date du 1^{er} septembre 2014. Cette date correspond à une phase avancée d'opérations d'injection de gaz (avant le démarrage des opérations de soutirage). Les cartes de charges simulées sont fournies, en unité de charges d'eau douce équivalente, à l'Illustration 50. Les isopièzes de charges d'eau douce ne pouvant pas être directement utilisées pour établir les directions d'écoulement du fait de la prise en compte d'effets densitaires, les directions des vitesses d'écoulement directement calculées par le modèle ont été ajoutées aux cartes. Au sein de la nappe des SIM, s'établit un écoulement de direction principale nord / sud (et est / ouest dans une moindre mesure) sur lequel se superpose l'impact des stockages (hausse de pression à la date choisie), bien visible sur ces cartes établies à l'échelle régionale. La nappe sous-jacente qui s'établit au sein du Paléocène et du Crétacé supérieur est quant à elle caractérisée par un écoulement sud-est / nord-ouest, avec des impacts locaux des structures affleurantes.

NB. Les charges sont calculées sur toute l'extension du modèle, alors que la densité des ouvrages utilisés pour la calibration du modèle est très variable selon les secteurs et les nappes considérées : l'incertitude associée aux charges calculées dans des secteurs éloignés de tout point de calage est donc potentiellement importante.



Illustration 50 - Champ de charges d'eau douce calculées au sein des couches aquifères au 1/09/2014. Les flèches correspondent aux vecteurs vitesses calculés par le modèle fournissant les directions des écoulements souterrains

Projet GAIA. Construction et calage du modèle hydrodynamique

8.8. BILAN HYDRAULIQUE DES AQUIFERES PROFONDS DU SUD DU BASSIN AQUITAIN

L'Illustration 51 synthétise le bilan hydraulique annuel des nappes profondes modélisées. Outre les quantités échangées, on y voit l'évolution de ces quantités au cours du temps. Ainsi, on remarque l'augmentation des volumes prélevés jusqu'aux années 2000, ainsi que la diminution des sorties aux exutoires du modèle (structures affleurantes). L'infiltration due aux apports pluviométriques varie logiquement tous les ans, mais est globalement stable pendant la durée d'observation. Les volumes échangés aux limites sont, au global, positifs et restent également quasiment constants. Les volumes équivalents apportés/soustraits du modèle, du fait des opérations de stockage de gaz, sont globalement autour de l'équilibre annuellement, sauf lors de la première moitié des années 1980 avec la mise en charge du stockage d'Izaute. Au total, l'addition de ces différentes composantes du bilan se traduit par un déstockage des nappes d'eau souterraine se produisant quasiment tous les ans à partir des années 1970 : ce déstockage semble dû à l'augmentation des prélèvements que la recharge ne parvient pas à combler. On peut noter que :

- Les valeurs absolues de la recharge et du débordement au droit des structures sont certainement surestimées, puisqu'une partie de la recharge peut avoir tendance à directement sortir du modèle sous forme de débordement (ruissellement); c'est en particulier le cas pour la recharge qui atteint la couche des marnes éocènes non perméables (voir paragraphe 4.2.1). Ce sont donc les tendances qui sont pertinentes.
- Les échanges aux limites du domaine sont la somme de plusieurs termes dont l'évolution est tracée à l'Illustration 52 :
 - oles recharges des SIM au sud de Pau et du Crétacé au sud-est du domaine ;
 - oles échanges avec le nord du Bassin aquitain ;
 - oles échanges avec les calcaires du Jurassique sous-jacents, de faible ampleur ;
 - oles échanges entre les formations molassiques et la surface : ces échanges sont également peu importants en comparaison des autres termes.



Illustration 51 - Bilan hydraulique obtenu par le modéle calibré (en positif : les entrées du modèle ; en négatif : les sorties)



Illustration 52 - Termes des échanges aux limites à potentiel imposé du modèle hydrodynamique (en positif : les entrées du modèle ; en négatif : les sorties)

8.9. DISCUSSION SUR LES ECHANGES D'EAU PAR DRAINANCE, DEPUIS LES FORMATIONS MOLASSIQUES VERS LES SIM

Les bilans fournis à la section précédente sont ceux issus de la simulation ayant abouti à la meilleure correspondance, à l'échelle régionale, entre charges hydrauliques calculées et charges hydrauliques observées. Cette simulation « calibrée » reste toutefois soumise à différentes incertitudes inhérentes à toute modélisation hydrogéologique. Une des incertitudes porte sur les échanges entre formations molassiques et les SIM. Comme évoqué plus haut, dans la simulation de référence présentée dans ce rapport, une perméabilité homogène de 10⁻¹² m/s est affectée aux molasses. Une analyse de sensibilité, menée pour ce paramètre, montre qu'une valeur de perméabilité de 10⁻¹¹ m/s fournit des résultats très proches sur les charges calculées au droit des points d'intérêt, mis à part dans le secteur SIM-nord (ouvrages de Beaucaire et Gondrin notamment) où les dynamiques sont plus faibles, dans le compartiment nord de Barbotan et où les charges semblent surestimées. Une valeur de perméabilité de 10⁻¹⁰ m/s aboutit par contre à des charges surestimées par le modèle pour la quasi-totalité des points d'observations des SIM.

Les échanges (en régime permanent) entre les formations molassiques et les SIM sont de 0,16 Mm³/an, pour la simulation de référence ; ils sont d'1,4 Mm³/an, lorsque la perméabilité des molasses est augmentée à 10⁻¹¹ m/s. Cette plage d'incertitude sur les volumes échangés (pour ces deux simulations qui résultent de charges calculées acceptables) peut paraître, à première vue, importante en valeur absolue. Néanmoins, le modèle semble montrer que, dans ces deux situations, la part des échanges par drainance reste faible en comparaison avec les autres termes du bilan et ce, en dépit d'une surface d'échanges très importante (l'Illustration 53 fournit une comparaison entre les différents termes des échanges aux limites à potentiel imposé du modèle hydrodynamique, lorsque la perméabilité des molasses est considérée à 10⁻¹¹ m/s). Malgré les incertitudes existantes, la dynamique de ces échanges d'eau (hydrodynamisme) apparaît donc lente. Cette conclusion est en adéquation avec les précédents modèles hydrodynamiques du secteur qui, malgré leurs différences, aboutissaient tous à ce constat : on peut en effet noter la faible recharge imposée aux molasses dans le modèle MSIM (0,001 mm/j.) (voir Douez, 2007) et, dans le rapport dédié à la construction du modèle MSAG, il est dit que « les flux de drainance venant de l'Oligocène vers les SIM sont négligeables » (Schoen et al., 2000).

A noter que cette plage d'incertitude existant sur les volumes échangés pourra éventuellement être diminuée lorsque le modèle permettra une calibration avec les débits des cours d'eau et donc un bilan hydraulique plus robuste.

L'utilisation de la datation des eaux, menée dans le cadre du projet GAIA (André et al., 2019) n'a pas pu apporter d'éléments supplémentaires concernant ces échanges entre molasses et Sables infra-molassiques. Cette technique permet notamment d'évaluer des mélanges d'eau lorsque le contraste d'âge est important : ainsi des eaux singulièrement plus jeunes ont été rencontrées à Castéra - Verduzan montrant un apport d'eau récente et, dans une moindre mesure à Geaune. Ailleurs, les teneurs en carbone-14 ont été jugées comme faibles et homogènes, « rendant difficile une interprétation en termes de chemin d'écoulement uniquement basée sur ces valeurs ». En outre, il n'est pas certain qu'un contraste suffisant existe entre l'âge des eaux provenant des molasses et l'âge de celles provenant de la recharge aux affleurements de ces aquifères.

Enfin, le modèle permet une compréhension des phénomènes à l'échelle régionale, mais ne préjuge en rien de l'importance locale des échanges avec les formations molassiques, dans certains secteurs spécifiques. L'hydrogéochimie peut à ce titre apporter des informations éclairantes : on peut citer André et al. (2020 ; publication issue d'une partie des travaux présentés dans le rapport GAIA de Manceau et al., 2020) qui ont mis en évidence la composition atypique

des eaux au droit de l'ouvrage de Nogaro 2, avec des concentrations en sulfates qui pourraient provenir des molasses sus-jacentes et qui varient cycliquement en accord avec les évolutions de charges hydrauliques consécutives aux opérations de stockage / soutirage de gaz : ces observations pourraient être le signe d'échanges d'eau ponctuels plus importants et rapides que les échanges d'eau régionaux, dont la dynamique semble plus lente et de moindre ampleur. Néanmoins, à l'heure actuelle, il n'a pas été possible de confirmer si les processus de transfert de masse entre les molasses et les SIM sont d'ordre diffusif ou convectif. Si les variations de la chimie des eaux à Nogaro semblent indiquer des échanges rapides entre les deux horizons, ce processus n'a été observé sur aucun autre point d'observation du Bassin.



Illustration 53 - Termes des échanges aux limites à potentiel imposé du modèle hydrodynamique avec une perméabilité des molasses considérée à 10⁻¹¹ m/s (en positif : les entrées du modèle ; en négatif : les sorties)

9. Conclusion

Dans les chapitres précédents, ont été détaillées la construction du modèle hydrodynamique, sa calibration, principalement à l'aide des charges observées, ainsi que les hypothèses ayant permis d'aboutir à une simulation de référence.

Au final, le modèle hydrodynamique ainsi calibré reproduit de façon satisfaisante, à l'échelle régionale, les gradients de charges observées dans les différentes formations aquifères, y compris dans les secteurs proches de la flexure celtaquitaine où des gradients importants étaient notés. Plus localement, la piézométrie de la nappe des SIM semble bien reproduite dans la quasitotalité des secteurs bénéficiant de mesures. Ainsi, l'influence des opérations d'injection/soutirage de gaz sur les charges des SIM, se traduisant par des variations cycliques des niveaux piézométriques, est correctement retranscrite : à la fois en amplitude et en phase, à proximité d'Izaute et de Lussagnet, mais également en s'en éloignant. Les tendances à la baisse de ces niveaux, plus ou moins prononcées selon les secteurs concernés, sont également bien capturées par le modèle. Le modèle hydrodynamique est également cohérent avec la plupart des charges observées aux structures affleurantes, ce qui renforce la confiance dans les schémas conceptuels de fonctionnement, spécifiquement mis en place pour ces structures; cette remarque est également valable pour les structures non-affleurantes d'Izaute et de Lacquy, dont les comportements hydrodynamiques atypiques posent question. Les exutoires des nappes profondes connus dans le secteur sont également correctement localisés par le modèle hydrodynamique et le bilan hydraulique global du modèle traduit la baisse observée (par ex. par la perte d'artésianisme et le tarissement de sources dans certains secteurs) des volumes, à ces sorties, au cours du temps. Enfin, les zones de recharge et les quantités infiltrées (qu'elles aient été prises en compte par des flux de recharge imposés ou bien par des charges imposées) ne montrent pas d'incohérences qui pourraient traduire une surestimation ou une sous-estimation importante des volumes échangés et ainsi remettre en cause la validité du modèle.

Comme tout modèle hydrodynamique, *a fortiori* à cette échelle régionale, le modèle construit et présenté dans ce rapport est sujet à différentes incertitudes et limites. Au-delà des incertitudes liées aux données d'entrée (*e.g.* sur les prélèvements ou bien sur les pluies efficaces) qui ne sont pas spécifiques à ce modèle, la phase de calibration a permis de mettre en évidence différentes limitations :

- Tout d'abord, même si le modèle actuel reproduit une bonne partie des phénomènes locaux observés, sa résolution horizontale de 500 m x 500 m limite *de facto* la représentation de ces phénomènes. Dans des secteurs accidentés comme peuvent l'être les secteurs à enjeux du sud du Bassin aquitain, cette résolution est limitante et a nécessité des compromis et des approximations.
- Ensuite, la résolution verticale du modèle, c'est-à-dire le découpage du modèle en grands aquifères est également une approximation importante. Cette approximation, même si elle semble acceptable à l'échelle régionale, peut entraîner certaines imprécisions locales lorsque des variations verticales de faciès existent au sein d'un aquifère. En particulier, les nappes de l'Eocène inférieur (Ilerdien), du Paléocène et du Crétacé supérieur ont été considérées en connexion dans une grande partie de l'emprise du modèle, constituant dans ces secteurs une seule nappe. A l'échelle régionale, cette hypothèse est la plus raisonnable étant données les informations à disposition (elle n'est d'ailleurs pas remise en cause par les charges observées), mais la non-vérification de cette hypothèse localement pourrait être à l'origine de certains comportements atypiques observés, que le modèle ne reproduit pas très bien (e.g. secteur des Landes de Siougos).

- En outre, certaines limitations sont dues à des lacunes importantes de connaissances géologiques et hydrogéologiques de certains secteurs. Par définition, les secteurs (notamment les secteurs très profonds) pour lesquels les mesures piézométriques manquent sont sujets à des incertitudes importantes. On peut citer en guise d'exemple la partie est du domaine d'étude, à la fois pour les SIM et pour les aquifères sous-jacents. Concernant les SIM, il semblerait que ce secteur oriental soit plutôt isolé du reste de la nappe et donc des secteurs à enjeux. En revanche, pour les aquifères sous-jacents, les incertitudes portent sur un secteur vu comme essentiel à leur alimentation. Le modèle hydrodynamique actuel confirme l'importance de ce secteur oriental en matière d'alimentation des nappes profondes, mais le peu de mesures piézométriques ne permet pas de lever les doutes existants sur la localisation de ces zones d'alimentation.
- Enfin, les aquifères superficiels (et le réseau hydrographique) n'étant pas considérés dans la version actuelle du modèle hydrodynamique, une calibration utilisant les débits des cours d'eau n'a pas été possible. Même si le modèle a été discuté du point de vue de la cohérence des volumes échangés (bilan hydraulique), une calibration avec les débits des cours d'eau viendrait valider le bilan hydraulique du modèle d'une manière plus fiable.

Malgré ces limites, la construction du modèle hydrodynamique a pu permettre d'apporter des éléments aux différentes grandes questions auxquelles le programme GAIA s'est attaché à répondre. Ainsi :

- Le rôle d'exutoire ou bien d'aire d'alimentation des nappes profondes, que constituent les différentes structures affleurantes, a été discuté pour chacune d'entre elles.
- Le rôle de la flexure celtaquitaine, comme écran quasi-imperméable depuis Roquefort jusqu'à l'est de Auch, a été mis en évidence.
- L'importance de l'alimentation des nappes du Paléocène et du Crétacé supérieur à l'est du secteur d'étude a été soulignée. Même si les quantités infiltrées plaideraient pour un rôle du massif des Petites Pyrénées - Pantaurel dans cette alimentation, le modèle hydrodynamique ne peut, à lui seul, trancher cette question.
- La calibration du modèle hydrodynamique la plus acceptable a été obtenue sans connexion entre les aquifères du Crétacé supérieur et l'océan ; même si cette hypothèse ne peut être vérifiée, il semblerait que ces échanges, s'ils existent, ne soient pas de grande ampleur.
- Enfin, les termes du bilan hydraulique du modèle hydrodynamique montrent qu'à l'échelle régionale, une calibration acceptable des charges des SIM a pu être obtenue sans apports importants, depuis les molasses sus-jacentes, au regard des autres termes du bilan. A noter que 1) les volumes de ces apports restent toutefois difficiles à estimer précisément et 2) cette observation faite à l'échelle du modèle régional ne permet pas d'exclure l'existence de certaines communications locales préférentielles avec les formations molassiques.

10. Bibliographie

André L., Cabaret O., Douez O., Saplairoles 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 JC., Bourbon P., Wuilleumier A., Cyclic variations of sulfate and boron concentrations and isotopes in deep groundwaters in the Aquitaine Basin, France, Applied Geochemistry, Volume 123.

Barthélemy Y., Seguin J-J (2016) - Modélisation maillée des écoulements souterrains - Principes, démarche et recommandations. Rapport final. BRGM/RP-62549-FR, 140 p., 50 ill., 2 tabl., 3 ann.

Bel F., Moreau CF., Le Pochat G., Platel, JP. (1989) - Etude des exutoires de l'aquifère inframolassique autour du stockage de gaz d'Izaute. Rapport BRGM 89-SGN-689-MPY

Bel F., Sourisseau B. (1990) - Aquifère des sables inframolassiques en Midi-Pyrénées et Aquitaine - Etat des connaissances et surveillance piézométrique (mise à jour de décembre 1989). 15 pages, 7 figures, 19 annexes, 2 planches. R30901.

Benhammouda S., Bonnery H., Grech B., Mauroux B., Ricard J., Sourisseau B. (1996) - Aquifère des sables inframolassiques en régions Aquitaine et Midi-Pyrénées - Etat des connaissances et suivi piézométrique à fin 1995. 33 pages, 31 figures, 2 annexes. R39035.

BRGM / AGSO (2018) - Synthèse géologique et géophysique des Pyrénées.

BRGM, ELF-Re., ESSO-REP, SNPA (1974) - Géologie du Bassin d'Aquitaine. BRGM Orléans, Atlas de 26 pl.

Buscarlet E., Cabaret O., Saltel M. (2019) - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine -Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes - Modules 1.1 & 1.2 - Année 2. Rapport final BRGM/RP-68863-FR

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, 134 p., 110 ill., 4 ann.

Conrad (1997) - Projet de Stockage Souterrain de Gaz des Landes de Siougos (Landes). Annexe VIII Expertise géologique et hydrogéologique.

Dassargues A. (1995) - Modèles mathématiques en hydrogéologie. H*G*A, Bucarest 132 p. Technical report, 1995.

Douez (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, 101 p., 100 ill., 2 ann.

Durand Y., Brun E., Mérindol L., Guyomarc'h G., Lesaffre B., Martin E. (1993) - A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. Annals of Glaciology, Vol. vol.18, pp.65-71.

Elf Aquitaine (date inconnue) - Les Stockages Souterrains de Gaz Naturel du Sud-Ouest - Lussagnet et Izaute.

Hydro Assistance (2017) - Examen Endoscopique du forage « Auvillar » - 82340 Saint-Michel - BSS002CYQE (09293X0123/F). Référence rapport : HA_10-2017/18

lfremer (2012) - Caractéristique et état écologique. Golfe de Gascogne. Etat physique et chimique. Caractéristiques physiques. Variations spatio-temporelle de la température et de la salinité. https://archimer.ifremer.fr/doc/00329/44002/43574.pdf

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, 228 p.

Lachassagne P., Sourisseau B., Amraoui N., Izac JL. (1998) - Outil de gestion des systèmes aquifères du Sud du bassin Adour Garonne. Recueil des données hydrogéologiques : informations disponibles au sein de la Banque du Sous-Sol et synthèse bibliographique - Rapport BRGM R39941.

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

Le Moigne (2002) - Description de l'analyse des champs de surface sur la France par le système Safran. Note de centre GMME.

Manceau JC, Thiéry D., Seguin JJ., Wuilleumier A. (2018) - Projet GAIA - Travaux préliminaires à la modélisation hydrogéologique : prise en compte des effets diphasiques et thermiques. Rapport final. BRGM/RP- 67307-FR, 51 p., 39 ill., 2 ann.

Manceau JC., 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, 94 p., 64 ill., 4 tab., 2 ann.

Platel JP. (2001) - Nouvelle étude géologique et structurale de l'anticlinal de Roquefort (Landes). Etude de la fracturation. Interprétation des sondages récents Rapport BRGMIRP-51144-FR, 37 p., 6 figures, 4 cartes, 1 tableau.

Roche J. (1977) - Surveillance piézométrique des nappes profondes dans la région Midi-Pyrénées. Etat des relevés au 1^{er} août 1977. BRGM/77-SGN-396-MPY.

Roche J. (1982) - Surveillance piézométrique des nappes profondes dans la région Midi-Pyrénées. Etat des relevés au 3 août 1982. BRGM/82-SGN-583-MPY.

Rowe A.M., Chou, J.C.S. (1970) - Pressure-Volume-Temperature-Concentration Relation of Aqueous Nacl Solutions - Journal of Chemical and Engineering Data - Vol. 15 no 1.

Saplairoles M., Bardeau M., Chauvet C., André L., Wuilleumier A., avec la collaboration de Poux E. et Grandemange A. (2017) - Synthèse hydrogéologique et recharge des aquifères éocènes et paléocènes sur la bordure sud-orientale du Bassin aquitain et sur le piémont pyrénéen. Rapport final. BRGM/RP-65024-FR, 90 p., 50 fig., 18 tab., 11 ann.

Sauty (1997) - Projet de Stockage Souterrain de Gaz des Landes de Siougos (Landes). Annexe VII Rapport sur la modélisation des eaux souterraines.

Schoen R., Seguin J.J., Sourisseau B. (2000) - Outil de gestion des systèmes aquifères du Sud du bassin Adour-Garonne - Année 3 Modèle hydrodynamique -Calage en régime permanent. Rapport BRGMIRP-50241-FR, 37 pages, 39 figures, 17 tableaux, 3 annexes

Seguin J.J. (2003) - Outil de gestion des aquifères du Sud du Bassin Adour-Garonne -Année 4. Calage du modèle hydrodynamique en régime transitoire. Rapport BRGMIRP-52041-FR

Thiéry D. (2020) - Code de calcul MARTHE version 7.8 - Modélisation 3D des écoulements et des transferts dans les hydrosystèmes - Notice d'utilisation. Rapport BRGM/RP-69541-FR, 353 p., 161 fig.

Vallet L. (2010) - Modification du modèle Barbotan : Création du modèle « Barbotan 2 ». Aquila Conseil.

Vidal, J. P., Martin E., Franchistéguy L., Baillon M. and Soubeyroux J. M. (2010) - A 50-year highresolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system, Int.J.Climatol., 30(11), 1627-1644., doi:10.1002/joc.2003

Wuilleumier A., André L., Cabaret O., Abou Akar A., Bardeau M., Mazurier C., Sasseville P-L. (2015) - Projet GAIA - année 1. Collecte des données hydrogéologiques et hydrogéochimiques. Rapport final. BRGM/RP-64850-FR, 137 p., 98 ill., 9 tab., 19 ann.

Wuilleumier A., Cabaret O., Saltel M., avec la collaboration de Brossard S. et Thicoipé P. (2017) - Projet GAIA. Année 3. Avancement du volet hydrogéologique. Rapport final. BRGM/RP-66849-FR, 139 p., 96 ill., 37 tab., 9 ann.

Wuilleumier A., Douez O. (2016) - Projet GAIA. Inter-comparaison des modèles hydrodynamiques existants. Rapport final. BRGM/RP-65498-FR, 148 p., 117 ill., 15 tabl., 5 ann.

Yurtsever Y, A. Zuber, P. Maloszewski, M. Campana, L. Harrington, G.A. end Tezcan, et L. Konikow (2001) - Environmental isotopes in the hydrological cycle. Principles and Applications. Vol.6 - Modelling. International atomic energy agency and united Nations educational, scientific and cultural organization. Technical report, 2001.

Annexe 1

Cartes de faciès associées aux couches 3, 4, 6 et 7 du modèle hydrogéologique



Carte associée à la couche 3 des Sables de Lussagnet



Carte associée à la couche 6 des Flyschs & calcaires yprésiens (llerdien)

Carte associée à la couche 7 du Paléocène







Liberté Égalité Fraternité **Centre scientifique et technique** 3, avenue Claude-Guillemin BP 36009 45060 – Orléans Cedex 2 – France Tél. : 02 38 64 34 34 www.brgm.fr