



Document public

Outil de gestion des aquifères du Sud du Bassin Adour-Garonne

Année 4

Calage du modèle hydrodynamique en régime transitoire

**Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service Public du BRGM 02PIR318**

BRGM/RP-52041-FR

Août 2003

J.J. Seguin

Agence de l'Eau
Adour Garonne



DRIRE
MIDI-PYRENEES

DRIRE
AQUITAINE



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots clés : - Modélisation - Sables infra-molassiques – Paléocène - Aquitaine

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

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 BRGM/RP-52041-FR

© BRGM, 2003, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Sommaire

	Pages
Introduction	4
1. Description du modèle du Sud du Bassin Adour-Garonne	5
1.1. Présentation générale	5
1.1.1. Délimitation	6
1.1.2. Représentation numérique	7
1.1.3. Logiciel utilisé	6
1.2 Géométrie du modèle	7
1.2.1. Modèle numérique de terrain (MNT)	7
1.2.2. Toits et murs des formations aquifères	7
1.2.3. Affleurements	7
1.2.4. Failles	8
1.3 Conditions imposées	8
1.3.1. Conditions aux limites	8
1.3.2. Conditions internes	9
1.4. Recharge des nappes	10
1.4.1. Introduction dans le modèle	11
1.4.2. Zonation	11
2. Calage du modèle en régime transitoire	12
2.1. Données utilisées	12
2.1.1. Volumes de gaz injectés et soutirés	12
2.1.2. Prélèvements	16
2.1.3. Données piézométriques	27
2.2. Résultats: comparaison entre piézométrie calculée et mesurée	34
2.2.1. Nappe des Sables infra-molassiques	34
2.2.2. Nappes du Paléocène et du Crétacé	41
2.3. Résultats: perméabilités - emmagasinevements - recharge	44
2.3.1. Perméabilités	44
2.3.2. Emmagasinevements	44
2.3.3. Recharge	47
2.4. Simulation	47
Conclusion	48
Bibliographie	49

Liste des annexes

- Annexe 1 Historiques des prélèvements dans les nappes.
- Annexe 2 Conversion d'une mesure piézométrique influencée par la température et la minéralisation de l'eau en charge d'eau douce équivalente.
- Annexe 3 Comparaison des chroniques piézométriques mesurées et calculées.
- Annexe 4 Résultats de la simulation.

Liste des illustrations

FIGURES

- Figure 1 Evolution des volumes de gaz stockés à Lussagnet et Izaute.
- Figure 2 Chroniques simplifiées des volumes de gaz à Izaute et Lussagnet superposées aux chroniques complètes.
- Figure 3 Débits "équivalents-eau" injectés et soutirés à Izaute et Lussagnet.
- Figure 4 Evolution des prélèvements dans la nappe des Sables infra-molassiques.
- Figure 5 Localisation des forages exploitant la nappe des Sables infra-molassiques.
- Figure 6 Localisation des forages agricoles captant le Paléocène dans le secteur de l'anticlinal d'Audignon.
- Figure 7 Localisation des forages agricoles captant le Sénonien dans le secteur de l'anticlinal d'Audignon.
- Figure 8 Localisation des points du réseau piézométrique de la nappe des Sables.
- Figure 9 Localisation des points du réseau piézométrique des nappes du Paléocène et du Crétacé.
- Figure 10 Forages de Pécorade 101 et Pécorade 1: comparaison des droites de tendance ajustées sur la chronique mesurée et sur la chronique calculée.
- Figure 11 Forages de Lespielle et de Bordes 2: comparaison des droites de tendance ajustées sur la chronique mesurée et sur la chronique calculée.
- Figure 12 Nappe des Sables infra-molassiques: piézométrie calculée à fin Octobre 2000.
- Figure 13 Nappe du Paléocène: piézométrie calculée à fin Octobre 2000.
- Figure 14 Aquifère des Sables infra-molassiques: champ de perméabilités.
- Figure 15 Aquifère du Paléocène: champ de perméabilités.

TABLEAUX

- Tableau 1 Caractéristiques du maillage du modèle.
- Tableau 2 Superficie des affleurements des formations aquifères.
- Tableau 3 Répartition des mailles à recharge imposée.
- Tableau 4 Valeurs de la recharge des nappes obtenues par calage.
- Tableau 5 Forages exploitant la nappe des Sables infra-molassiques hors thermalisme (départements 40, 64 et 32).
- Tableau 6 Forages de la station thermale de Barbotan.
- Tableau 7 Forages agricoles captant le Paléocène dans la région d'Audignon.
- Tableau 8 Forages non agricoles captant le Paléocène dans la région d'Audignon.
- Tableau 9 Forages captant le Sénonien supérieur dans la région d'Audignon.
- Tableau 10 Forages captant le Sénonien inférieur dans la région d'Audignon.
- Tableau 11 Captages de la station thermale de Dax.
- Tableau 12 Captages de la station thermale de St-Paul-Lès-Dax.
- Tableau 13 Captages de la station thermale de Préchacq.
- Tableau 14 Captages de la station thermale de Saubusse.
- Tableau 15 Sables infra-molassiques: points du réseau piézométrique BRGM utilisés pour le calage du modèle.
- Tableau 16 Sables infra-molassiques: points du réseau piézométrique TOTAL-SGF utilisés pour le calage du modèle.
- Tableau 17 Paléocène et Crétacé: points du réseau piézométrique utilisés pour le calage du modèle.
- Tableau 18 Zones et valeurs de recharge obtenues après calage en régime transitoire.

Introduction

Sur financements de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et en dotation de crédits de Service Public attribuée au BRGM, la construction d'un modèle de gestion des nappes profondes du sud du bassin Adour-Garonne a été décidée en 1996. Le modèle doit permettre de gérer les ressources en eau de ces nappes au mieux des intérêts de tous les utilisateurs actuels et futurs (eau potable, irrigation, industrie, thermalisme, stockages de gaz).

Cet outil de gestion a été construit sur des concepts géologiques cohérents avec ceux des modèles existants de GDF et de TOTAL-SGF dont les finalités sont l'évaluation de l'impact sur les écoulements souterrains des stockages de gaz actuels de TOTAL-SGF à Izaute (32) et à Lussagnet (40) ou envisagés par GDF (Landes de Siougos, 40).

Une première phase (Bourgine et al., 1997, rapport BRGM R 39538) a été menée en concertation avec TOTAL, GDF, l'Institut de Géodynamique de Bordeaux III. Elle a permis de définir 8 systèmes aquifères (Miocène, Oligocène, Eocène moyen, Sables infra-molassiques, Eocène inférieur, Paléocène, Sénonien supérieur, Sénonien inférieur-Cénomaniens-Turonien), dont le toit et le mur ont été cartographiés par traitement géostatistique, en s'appuyant sur le modèle structural de la base du Tertiaire.

Dans une deuxième phase, (Bourgine et al., 1999, rapport BRGM R 40633), une synthèse hydrogéologique a été réalisée; une base de données géo-référencées intégrant l'ensemble des données collectées a été construite et des cartes thématiques ont été élaborées à partir de cette base (piézométrie, température, paramètres hydrodynamiques).

Au cours de l'année 3, le modèle numérique des nappes profondes a été construit sur la base des modèles conceptuels géologique et hydrogéologique élaborés lors des deux premières phases. Les résultats obtenus après calage en régime permanent sont exposés dans le rapport BRGM/RP-50241-FR.

On présente dans ce rapport les résultats du calage en régime transitoire après introduction des volumes de gaz injectés et soutirés à Lussagnet et Izaute dans l'aquifère des Sables infra-molassiques.

La quasi totalité des chroniques piézométriques disponibles concernent l'aquifère des Sables infra-molassiques et quelques unes l'aquifère du Paléocène. L'essentiel du travail a donc porté sur ces deux aquifères en se limitant à leur partie occidentale (à l'Ouest d'Auch).

1. Rappel - Description du modèle du Sud du Bassin Adour-Garonne

1.1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE

Le modèle est décrit en détail dans le rapport de l'année 3 du projet (rapport BRGM RP 50241-FR, 2000, Ref. 17). On rappelle ci-dessous ses principales caractéristiques.

1.1.1. Délimitation

Le modèle hydrodynamique construit simule les écoulements au sein de 6 couches aquifères et les échanges entre ces couches au travers de chacune des épontes ("semi-perméables") qui les séparent. Les niveaux aquifères pris en compte sont :

- l'Oligocène,
- les Sables infra-molassiques (auxquels une partie de l'Eocène moyen a été rattachée),
- l'Eocène inférieur,
- le Paléocène,
- le Sénonien supérieur,
- le groupement Sénonien inférieur et Cénomano-Turonien.

Les limites du maillage des couches correspondent, sur leur tracé Sud et Ouest, aux extensions des niveaux aquifères définies lors de l'élaboration du concept géologique (rapport BRGM R 39538, Réf. 12):

- au sud, le front nord pyrénéen et les affleurements des différentes couches;
- à l'Ouest, la façade atlantique (Oligocène, et partiellement Paléocène, Sénonien sup., Sénonien inf.) ou bien limites de faciès (Sables infra-molassiques, Eocène inférieur et partiellement Paléocène, Sénonien sup., Sénonien inf.).

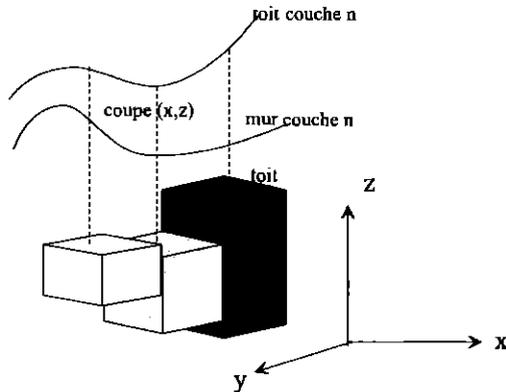
La partie orientale de ces aquifères est éloignée des zones d'intérêt (zones thermales, stockages de gaz, zones de prélèvements importants). Elle est mal connue. Elle n'a pas été intégrée dans le modèle et la limite Est du maillage des cinq premières couches passe à une dizaine de km à l'Est de Toulouse (coordonnée Lambert III Sud X = 540 km). Pour le Sénonien inférieur, d'extension aquifère très réduite à l'Est, cette limite passe en X = 502 km.

La limite Nord suit dans sa partie centrale, les rides anticlinales de Roquefort, Créon, Barbotan et Castera Verduzan. Elle ne dépasse pas la ligne E-O de coordonnée Y = 217 km correspondant à la limite Sud du modèle nord aquitain.

Les conditions imposées sur ces limites sont précisées au § 1.3.

1.1.2. Représentation numérique

Le modèle est construit suivant un schéma aux différences finies. Chacune des couches est représentée en plan par un maillage constitué de mailles carrées de 2 km x 2 km. Il est du type multicouche : chaque couche est discrétisée en mailles parallélépipédiques dont la face supérieure correspond au toit de la formation considérée et la face inférieure au mur de cette formation (schéma ci-dessous).



Les épontes ne figurent pas explicitement en tant que couches de calcul (modèle "quasi 3D") : les charges hydrauliques n'y sont pas calculées.

Le nombre de mailles dans chaque couche du modèle est donné dans le tableau ci-dessous :

Formation aquifère	Nombre de mailles	Superficie (km ²)
Oligocène	3 683	14 732
Sables infra-molassiques	2 917	11 668
Eocène inférieur	3 400	13 600
Paléocène	4 049	16 196
Sénonien supérieur	4 238	16 952
Sénonien inférieur	3 522	14 088
Total	21 809	

Tableau 1 – Caractéristiques du maillage du modèle

La superficie couverte va de 11700 km² pour les Sables infra-molassiques à près de 17000 km² pour le Sénonien supérieur.

1.1.3. Logiciel utilisé

Le modèle est supporté par le logiciel MARTHE développé au BRGM. Il s'agit d'un logiciel complet de modélisation hydrodynamique pouvant traiter toutes les configurations d'écoulements justiciables de la méthode des différences finies : en 2D (plan ou coupe verticale), en 3D ou en multicouche, en zone saturée et/ou non saturée, en régime permanent et/ou transitoire. Marthe permet de prendre en compte les échanges entre un réseau hydrographique et les nappes sous jacentes.

Des problèmes thermiques et densitaires peuvent être traités, couplés à l'hydrodynamique.

1.2 GÉOMÉTRIE DU MODÈLE

La géométrie du modèle hydrodynamique a été construite à partir des cotes du toit et du mur des formations aquifères, du modèle numérique de terrain, des affleurements et des principales failles (rapport 1999 BRGM 40633) [3].

1.2.1. Modèle numérique de terrain (MNT)

Le MNT au pas de 1 km a été moyenné au pas de 2 km pour correspondre à la taille des mailles du modèle. Dans les zones d'affleurement il a permis de fixer précisément (en tout cas à l'échelle de la maille) les cotes du toit de la formation affleurante et d'éliminer les effets de bord des interpolations réalisées pour construire la géométrie.

Le MNT permet de fixer les cotes dites de "débordement" (cf. §1.3) lorsque les nappes atteignent (ou sont susceptibles d'atteindre) la surface du sol (cas des sources en particulier).

1.2.2. Toits et murs des formations aquifères

La géométrie du modèle a été construite à partir de la cartographie du toit et du mur de chaque couche. La méthode utilisée est détaillée dans le rapport de l'année 1 (R 39538, réf. 12) : il s'agit d'une interpolation par krigeage des données des sondages avec analyse variographique préalable (modélisation des variogrammes) et prise en compte des failles et des affleurements. Couche par couche, l'interpolation permet d'affecter à chaque maille de la grille de calcul (mailles de 2 km de côté) une valeur de toit et une valeur de mur.

Pour s'assurer de la cohérence d'ensemble de la géométrie ainsi constituée par "empilement" des grilles de toits et de murs, des coupes verticales obliques par rapport au maillage ont été réalisées et comparées aux coupes suivant les mêmes directions, dans les modèles géologiques de TOTAL et de GDF (coupes présentées dans le rapport R 40633 de l'année 2, réf. 11) . Il a été vérifié en particulier :

- que les axes synclinaux et anticlinaux étaient bien reproduits;
- que les affleurements des couches du modèle correspondaient bien aux affleurements cartographiés ;
- que les rejets de failles étaient correctement estimés.

Après réajustements et ré-interpolations, les nouvelles grilles de valeurs ont été intégrées dans le modèle hydrodynamique.

1.2.3. Affleurements

La carte des affleurements des différentes formations a été utilisée pour définir au mieux (les affleurements étant souvent très morcelés) les mailles de recharge. La superficie de ces affleurements est très variable suivant la formation (tableau 2 ci-après) : de 18 km² pour le Sénonien inférieur à 180 km² pour le Sénonien supérieur.

Les affleurements (et donc les zones de **recharge directe** des différentes nappes) sont très réduits et ne représentent **au plus que 1% de la superficie du domaine modélisé** (cas seulement du Paléocène et du Sénonien supérieur).

Formation	Superficie en km ²	Superficie en % du domaine maillé
Oligocène	132	0.90
Sables infra-molassiques	74	0,6
Eocène inférieur.	115	0.85
Paléocène	173	1.07
Sénonien sup.	182	1.07
Sénonien inf.	18	0.13

Tableau 2 – Superficie des affleurements des couches aquifères

1.2.4. Failles

Hormis les failles qui jalonnent les rides anticlinales de Roquefort, Créon, Barbotan, Castéra-Verduzan et qui constituent la limite nord-ouest du modèle, des Sables infra-molassiques au Sénonien inférieur, les principales failles à l'intérieur du domaine, susceptibles d'avoir un rôle hydrogéologique majeur, sont :

- à l'Ouest, la faille Nord-Audignon (de direction N90°) qui se prolonge, en s'infléchissant vers le Sud-Est, par la faille de Larcis (de direction N120° à N150°) et se poursuit vers l'Ouest jusqu'à Pontonx, au nord de la structure de Louer;
- la faille de l'anticlinal de Garlin, immédiatement au sud de la faille de Larcis ;
- à l'Est, la faille de Muret, de direction Est-Ouest, qui souligne sur environ 60 km l'anticlinal de Muret ;
- au nord de Tarbes, la faille de Maubourguet de direction N150° (systèmes anticlinaux d'Antin-Maubourguet) ;

Les failles peuvent introduire une rupture de continuité des écoulements (barrière étanche), mettre en communication plusieurs couches aquifères (zone faillée très conductrice) ou bien jouer un rôle intermédiaire, induisant une zone de faible conductivité hydraulique.

1.3 CONDITIONS IMPOSÉES

Les conditions imposées sont résumées par les figures A4 à A9 en annexe 1 du rapport de l'année 3.

1.3.1 Conditions aux limites

Elles sont de 2 types, à charge imposée et à flux nul :

- 1) à charge imposée sur la façade atlantique pour les couches qui s'étendent jusqu'à l'océan : Oligocène, Paléocène, Sénonien supérieur et Sénonien inférieur. La charge à imposer n'étant pas connue (ce n'est pas nécessairement la charge 0 du niveau de l'Océan), elle a été déduite des mesures disponibles les plus rapprochées du littoral en tenant compte d'un gradient estimé. C'est éventuellement un paramètre qu'il est possible d'ajuster en cours de calage.
- 2) à charge imposée sur une partie de la limite Est du Sénonien inférieur, du Sénonien supérieur, du Paléocène et de l'Eocène inférieur.
- 3) à charge imposée sur la limite Nord-Est de l'aquifère des Sables infra-molassiques, établissant ainsi une communication avec la partie nord de cet aquifère (Montauban,

Moissac..., communication supposée compte tenu du tracé de la piézométrie dans ce secteur, cf. rapport BRGM R40790, réf. 6).

- 4) à charge imposée sur la limite Nord-Ouest de l'Oligocène établissant ainsi une continuité hydraulique avec la nappe Oligocène du domaine nord aquitain.
- 5) à charge imposée dans l'Oligocène sur le tracé de la Garonne et du Tarn (en communication avec les nappes alluviales).
- 6) à flux nul sur les limites latérales partout ailleurs. Il s'agit :
 - de limites de faciès au travers desquelles les flux échangés peuvent être considérés comme nuls ou négligeables (par exemple limite Ouest des Sables infra-molassiques et de l'Eocène inférieur) ;
 - de failles supposées étanches, par exemple les failles des rides anticlinales de Roquefort, Créon, Barbotan, Castera-Verduzan qui constituent la limite Nord-Ouest du modèle ;
 - de lignes de courant qui par définition, ne sont traversées par aucun flux et qui ont été définies d'après les orientations des écoulements.

Le modèle est donc très peu contraint par les charges imposées, peu nombreuses, très éloignées des zones d'intérêt (thermalisme, stockages de gaz) et par conséquent sans influence sur ces zones.

Les mises en pression se font essentiellement au niveau des affleurements de la bordure pyrénéenne.

1.3.2. Conditions internes

Il s'agit :

- des flux (exprimés en hauteur d'eau) correspondant à la recharge des nappes par infiltration et imposés dans les mailles occupées par des affleurements (§ 1.4 ci-après).
- de cotes de débordement dans les mailles où les couches affleurent et dans les mailles où se situent des émergences.

Remarque : *il y a débordement si la charge calculée est supérieure à la cote de l'affleurement. La différence est alors traduite en débit dit de débordement.*

1.4. RECHARGE DES NAPPES

La recharge par infiltration des différentes nappes ne peut être estimée a priori par un bilan classique fournissant la pluie efficace, c'est à dire la lame d'eau disponible pour le ruissellement et l'infiltration. Un tel bilan, dont les termes sont :

- les précipitations P
- l'évapotranspiration potentielle ETP
- la capacité maximale en eau du sol (la "réserve utile" RU)

fournirait des valeurs nettement supérieures aux valeurs effectives de recharge (le ruissellement serait d'ailleurs une inconnue). Les flux d'eau de surface subissent en effet des interceptions multiples (drainage superficiel, nappes alluviales,...) conduisant à une réduction notable des flux calculés a priori.

La recharge a donc été un paramètre de calage estimée au départ sur la base d'une lame d'eau de 100 mm/an modulée en fonction de la superficie des affleurements.

1.4.1 Mailles de recharge

Les mailles de recharge (figure A10 en annexe du rapport de l'année 3) ont été définies à partir de la carte des affleurements des différentes formations.

	Superficie des affleurements (km ²)	Nombre de mailles occupées	Superficie des mailles occupées (km ²)
Oligocène	132	60	240
Sables infra-molassiques	74	33	132
Eocène inférieur	115	33	132
Paléocène	173	75	300
Sénonien supérieur	182	49	196
Sénonien inférieur	18	3	12

Tableau 3 – Répartition des mailles à recharge imposée

Il peut y avoir des écarts importants entre la superficie réelle des affleurements et la superficie des mailles correspondantes, ce qui impose de distribuer le flux d'infiltration dans les mailles en fonction de la superficie réelle des affleurements .

Remarque : dans certains secteurs , des nappes alluviales peuvent alimenter par drainance des nappes profondes venant en contact avec elles (par exemples les Sables infra-molassiques au sud de Pau). Dans ces zones des mailles de recharge ont également été définies (recharge par "formation relais").

1.4.2. Zonation de la recharge

La recharge a été évaluée par calage à l'aide d'une zonation minimale au niveau des affleurements. Cette zonation a été rendue difficile en raison :

- de la coexistence dans la même maille des affleurements de deux ou trois couches : par exemple, très fréquemment en bordure des Pyrénées, le Sénonien supérieur, le Paléocène et l'Eocène.
- de la nécessité de ne pas hypothéquer le caractère captif de la nappe lorsque l'affleurement est réduit (une maille de recharge est en effet une maille dans laquelle la nappe est supposée libre et pour laquelle une possibilité de "débordement" existe).

De nombreux compromis ont donc dû être trouvés.

Remarque

La recharge par infiltration est exprimée en hauteur d'eau par unité de temps, par exemple en mm/an. Dans le cas présent, affecter dans une maille, qui est partiellement occupée par une zone d'affleurement, une hauteur d'eau de 10 mm/an par exemple ne signifie pas que les affleurements ne reçoivent que 10 mm/an. Cette hauteur d'eau est répartie sur l'ensemble de la maille, et elle fournit simplement un flux d'eau équivalent à ce que les seuls affleurements fourniraient en recevant une infiltration plus élevée.

Les zones de recharge et les valeurs attribuées à ces zones sont les suivantes:

	Nombre de zones définies	Valeurs en mm
Oligocène	3	20, 30 et 50
Sables IM	3	15, 40 et 100
Eocène inf.	3	75, 100 et 125
Paléocène	4	20, 75, 90 et 100
Sénonien sup.	3	15, 60 et 75
Sénonien inf.	1	50

Tableau 4 a – Valeurs de la recharge des nappes obtenues par calage
(Rapport de l'année 3)



2. Calage du modèle en régime transitoire

Le calage du modèle en régime transitoire a pour point de départ les différents champs de valeurs obtenus lors de la phase d'ajustement en régime permanent :

- perméabilités et coefficients d'emménagement de chaque couche,
- perméabilités des épontes,
- valeurs de la recharge par zones .

Il a été réalisé sur la période 1977-2000 avec des pas de temps variables (120 pas de temps au total), allant de 15 jours à 3 mois, définis en fonction des cycles de stockage-déstockage de gaz.

Le stockage d'Izaute a débuté en 1981 et celui de Lussagnet à la fin des années 1950. D'après les simulations réalisées par Total-SGF, un point de départ en 1977 suffit pour reconstituer en 3 ans le stock de Lussagnet et obtenir une mise en régime permettant de se raccorder aux historiques réels.

Les simulations ont été réalisées en convertissant les volumes de gaz en volumes d'eau équivalents (§ 2.1.1.2.)

2.1. DONNÉES UTILISÉES

2.1.1. Volumes de gaz injectés et soutirés

2.1.1.1. Volumes de gaz stockés à Lussagnet et Izaute

Les valeurs des volumes de gaz à Lussagnet et Izaute ont été fournies par TOTAL SGF:

- du 16/07/81 au 21/02/01 pour Izaute
- du 05/01/77 au 21/02/01 pour Lussagnet

L'évolution des volumes de gaz sur ces périodes (évolution fictive pour Lussagnet de 1977 à 1980) est retracée par la figure 1:

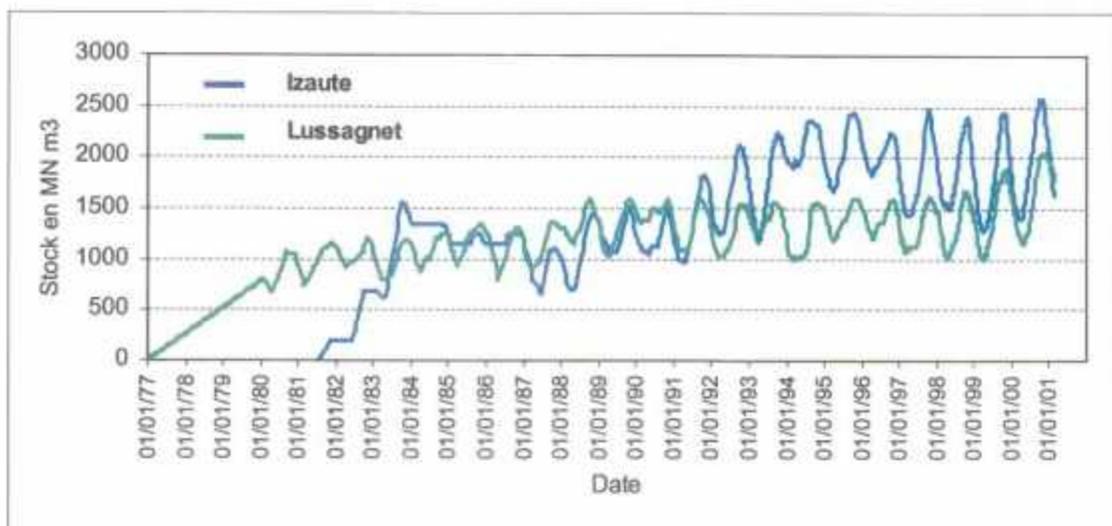


Figure 1 - Evolution des volumes de gaz stockés à Lussagnet et Izaute

A partir de ces valeurs, une chronique simplifiée utilisée pour le régime transitoire a été constituée:

- 123 valeurs pour Lussagnet (sur 927)
- 102 valeurs pour Izaute (sur 682)

Ces chroniques simplifiées reproduisent avec une bonne précision les chroniques complètes.(figure 2).

2.1.1.2. Volumes d'eau équivalents

Le passage à des volumes d'eau équivalents a été effectué en utilisant la formule suivante:

$$V_{\text{equiv}} = Z_f \cdot V_{\text{inj}} \frac{P_{\text{réf}}}{P_{\text{inj}}} \frac{T_{\text{sto}}}{T_{\text{réf}}}$$

V_{inj} est le volume de gaz injecté

P_{inj} est la pression d'injection

$P_{\text{réf}}$ est la pression de référence (1 bar)

T_{sto} est la température des stockages (40° C, soit 313 ° K))

$T_{\text{réf}}$ est la température de référence (0° C pour avoir des "normaux" m³ soit 273 ° K)

Z_f , facteur de compressibilité, tient compte du caractère "non parfait" du gaz injecté ($Z=1$ pour un gaz parfait). C'est une fonction polynomiale de la pression P :

$$Z = \alpha P^3 + \beta P^2 + \gamma P + \delta$$

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ sont des coefficients (dont les valeurs ont été fournies par GDF)

La température des stockages T_{sto} a été prise égale à 40°C.

Les débits équivalents stockés ou déstockés à chaque pas de temps sont représentés sur les graphiques de la figure 3.



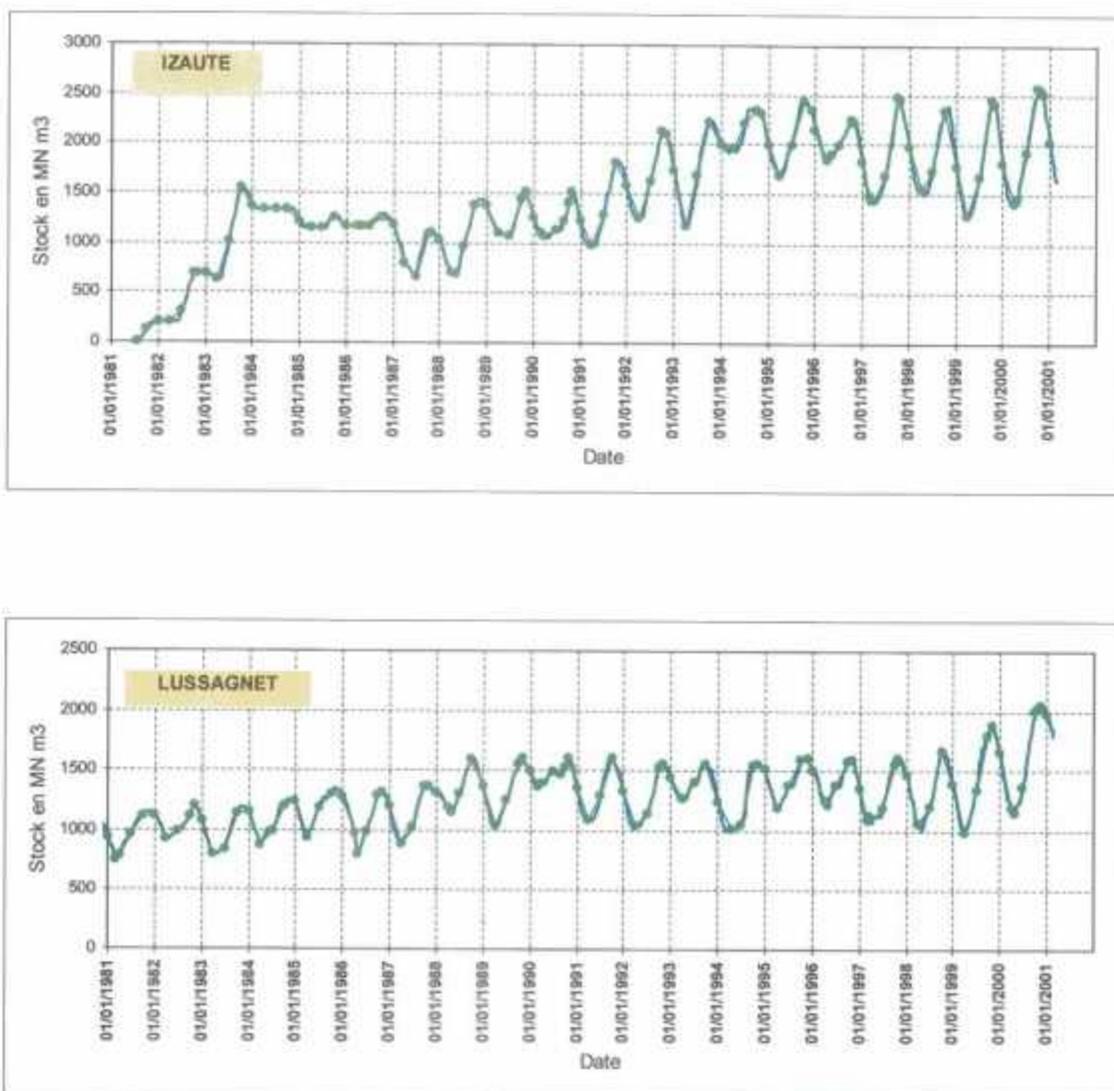


Figure 2 – Chroniques simplifiées des volumes de gaz à Izaute et Lussagnet superposées aux chroniques complètes

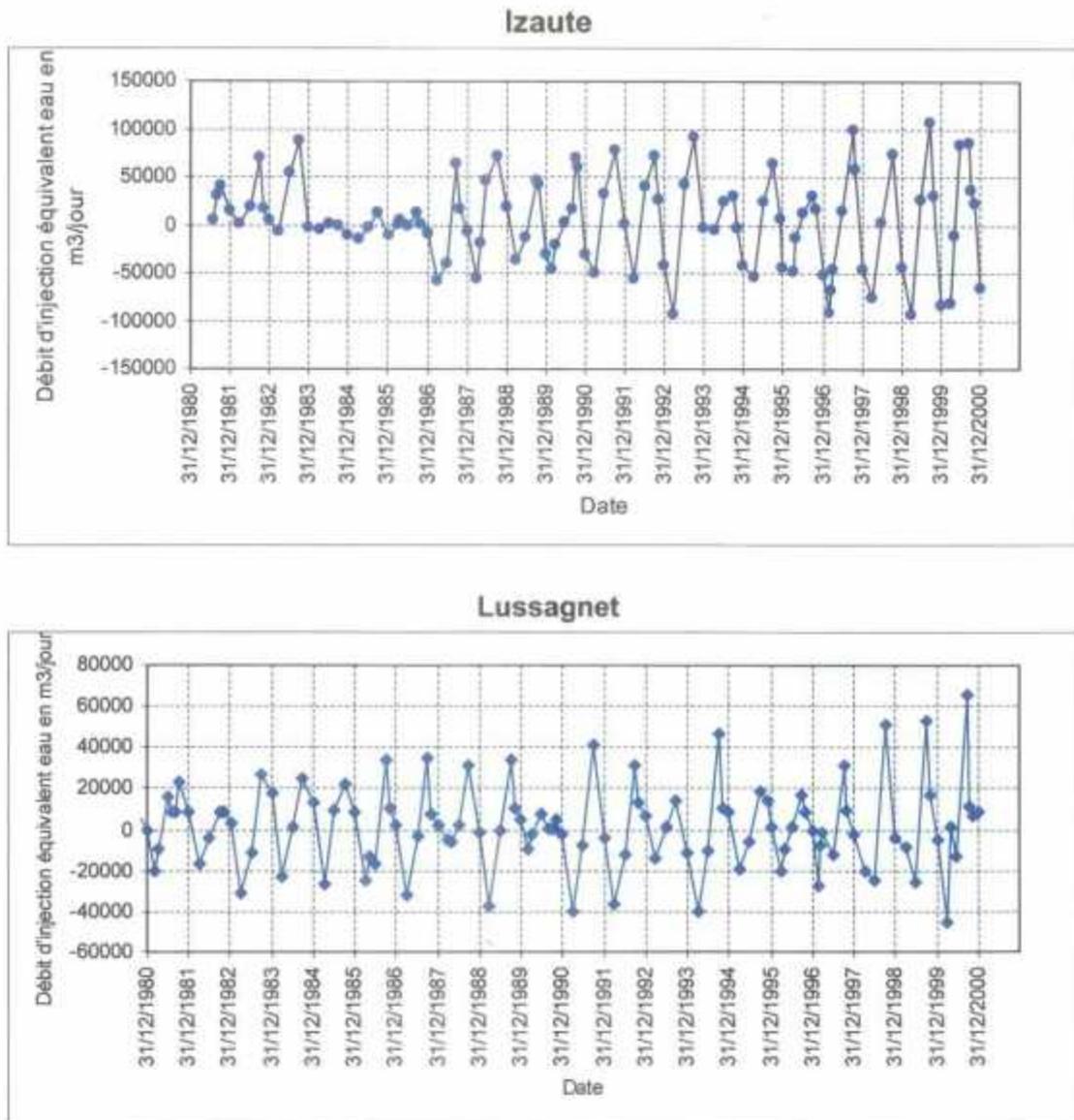


Figure 3 – Débits " équivalent-eau" injectés-soutirés à Izaute et Lussagnet

2.1.2. Prélèvements

2.1.2.1. Prélèvements dans la nappe des Sables infra-molassiques

Les volumes prélevés en 1999 (Rapport BRGM RP 50322-FR, 2000 - Réf. 7) sont de l'ordre de **12 millions de m³** sur 4 départements: 40, 64, 32 et 81; les Landes, les Pyrénées atlantiques et le Gers en totalisent 90 % et les deux premiers 61 %. En fonction de l'usage, ils se répartissent comme suit:

- eau potable 74 %
- irrigation 5 %
- thermalisme 8 %
- industrie et la géothermie 13 %

Si l'on ne tient pas compte de l'année 1994 (13,8 millions de m³, la valeur observée en 1999 correspond au maximum de l'historique. Depuis 1980, où ils étaient de l'ordre de 5 millions de m³, les prélèvements ont donc plus que doublé.

L'évolution des prélèvements annuels dans l'aquifère des sables infra-molassiques de 1980 à 1999 est représentée sur la figure 4.

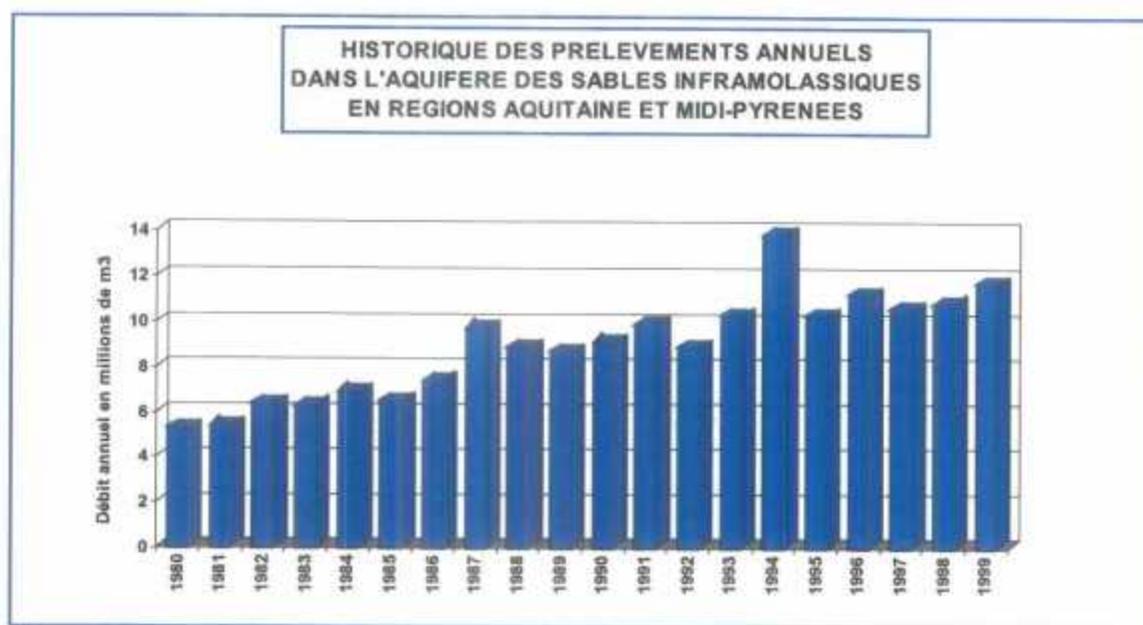


Figure 4 – Evolution des prélèvements dans la nappe de Sables infra-molassiques

La figure 5 précise la localisation des forages exploitant la nappe.

Les valeurs des prélèvements annuels, pour chacun de ces forages sont fournies en annexe 1.

Ces prélèvements sont introduits dans le modèle à partir de la date de mise en service des forages. Lorsqu'ils ne sont pas connus pour certaines années une estimation est faite sur la base des volumes annuels connus.

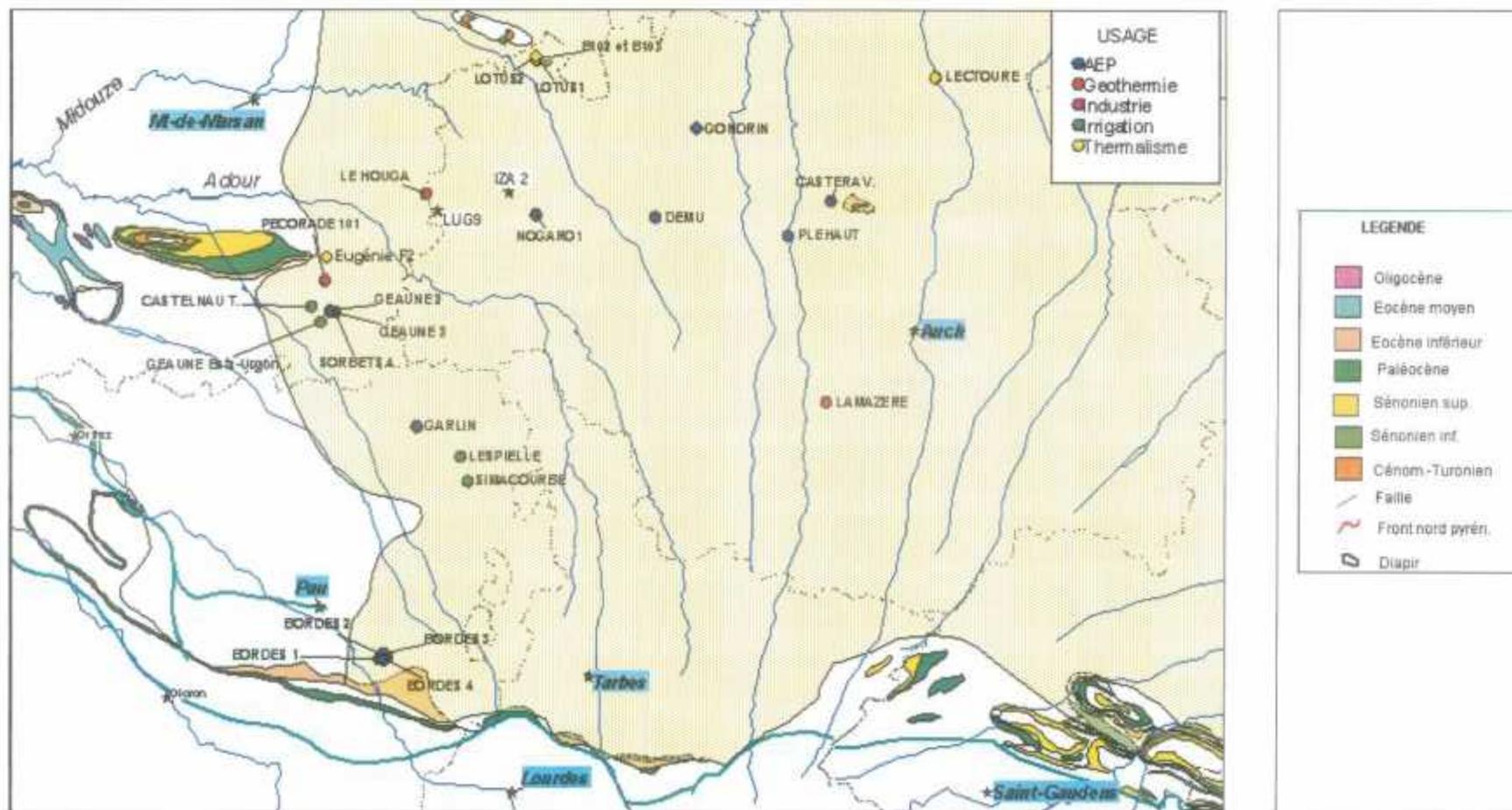


Figure 5 - Localisation des forages exploitant la nappe des Sables infra-molassiques (départements 40, 64 et 32)

N° BSS	Ouvrage	Dpt	Usage
0978-8X-0003	PECORADE 1 (GEAUNE 1)	40	AEP
0978-8X-0004	GEAUNE 2	40	AEP
0978-8X-0011	GEAUNE 3	40	AEP
0979-5X-0219	SORBETS (GEAUNE 4)	40	AEP
1005-2X-0006	GARLIN-BUROS	64	AEP
1030-6X-0036	BORDES 1	64	AEP
1030-6X-0033	BORDES 2	64	AEP
1030-6X-0034	BORDES 3	64	AEP
1030-6X-0035	BORDES 4	64	AEP
0952-8X-0063	NOGARO	32	AEP
0953-3X-0016	GONDRIN	32	AEP
0953-8X-0008	DEMU	32	AEP
0954-5X-0017	CASTERA-VERDUZAN	32	AEP
0954-5X-0018	PLEHAUT	32	AEP
0978-8X-0015	BATS-URGON (ASA Geaune)	40	Irrigation
1007-3X-0002	LESPIELLE 1	64	Irrigation
1005-7X-0003	LESPIELLE 2	64	Irrigation
0978-8X-0014	PECORADE 101	40	Industrie
0952-6X-0210	LE HOUGA	32	Industrie
0952-8X-0063	NOGARO	32	Industrie
1007-1X-0012	LAMAZERE	32	Géothermie

Tableau 5 - Forages exploitant la nappe des Sables infra-molassiques hors thermalisme (départements 40, 64 et 32).

Prélèvements des stations thermales

• Barbotan

A Barbotan, trois réservoirs sont différenciés dans l'aquifère des Sables infra-molassiques:

- un réservoir supérieur, nommé R1 (et subdivisé en R1 sup. et R1 inf.), affleurant sous l'établissement thermal. Il est constitué d'une succession d'horizons sableux et argileux;
- un réservoir R2, séparé de R1 par 4 à 7 m d'argile. Il affleure en bordure de la faille au nord de la station;
- un réservoir R3 non affleurant à Barbotan, constitué par des sables calcaires à Nummulites de l'Yprésien.

L'exploitation pour la station thermale sollicite les deux premiers réservoirs :

Utilisation	Forages	Réservoir capté
Exploitation thermique	B102	R2
	B103	R2
Besoins courants	Lotus 1	R1 sup
	Lotus2	R1 inf

Tableau 6 – Forages de la station thermale de Barbotan

Les valeurs des prélèvements annuels pour ces forages sont fournies en annexe 1.

• Eugénie les Bains

Trois forages sont actuellement en exploitation sur la station thermale d'Eugénie les Bains . Deux d'entre eux captent la nappe des Sables:

- forage EF2, délivrant de l'eau froide (19-20 °C), utilisé pour refroidir à 38°C l'eau du forage Christine-Marie au travers d'un échangeur ;
- forage Impératrice EF1 acheminant de l'eau froide (21-22 °C) aux buvettes de la station.

Le forage Christine-Marie, délivrant de l'eau chaude à 41-42 °C, capte le Paléocène.

Les estimations des prélèvements faites en 1995 pour EF1 et EF2 sont les suivantes:

Ouvrage	X	Y	Q 1995 (m3)
Eugénie EF1	380.934	158.68	16400
Eugénie EF2	380.960	158.65	25000

• Lectoure

Les prélèvements de la station thermale de Lectoure dans le Gers (0928-7X-0023) sont connus depuis 1994 (Annexe 1).

2.1.2.2. Prélèvements dans les nappes du Paléocène et du Sénonien dans la région d'Audignon

• **Paléocène: prélèvements agricoles**

La plus grande partie des forages agricoles dans le Paléocène sont situés dans le secteur d'Audignon (figure 6). Ces forages sont rassemblés dans le tableau 7 avec les valeurs de prélèvements (qui sont souvent des volumes autorisés et non les prélèvements réels).

N° BSS	Ouvrage	X	Y	Prélèvement (m3)
09781X0006	St Aubin (forage Lagrolet)	355.300	162.400	12000
09781X0007	St Aubin (forage Recourt)	354.475	162.200	18000
09781X0009	Maylis – St Germain	356.650	160.750	78000
09781X0011	Montaut (Labaoucorme)	357.100	162.450	21000
09781X0008	Montaut (Laheourere, GAEC Placers)	359.640	163.480	49500
09783X0017	Sarraziat (Bet)	370.475	159.700	30000
09783X0018	Sarraziat F1 (Le Bas)	371.800	159.280	112500
09783X0025	Sarraziat F2 (Taulade)	371.810	159.280	112500
09783X0023	Fargues (Menjouet)	373.150	162.550	18000
09783X0019	Fargues (Larcuchette)	374.700	161.300	112500
09783X0002	Montsoué (Destribois)	372.600	162.540	143400
09783X0027	Montsoué (Labarthe, forage CUMA)	372.600	162.540	56300
09783X0024	Montsoué (Bahus-Juzanx, forage 14)	372.950	162.250	91500
09783X0022	Montsoué (Bahus-Juzanx, forage 20)	373.350	161.600	115500
09784X0021	Fargues Gouaillard	375.950	160.050	87000
09784X0022	Fargues (Gardeli)	376.400	161.375	70500
09784X0023	Fargues (Le Perre)	375.600	160.925	85500
09784X0028	Buanes (La Violette)	378.125	161.425	202500
09784X0029	Eugénie-Chicoy (ASA de Classun)	380.030	159.800	127500
09784X0020	Eugénie – Moulin de Bougnères	380.250	159.500	27000

Tableau 7 – Forages agricoles captant le Paléocène dans la région d'Audignon

Pour les forages agricoles, on ne dispose pas d'historiques des volumes prélevés. Les valeurs disponibles ont été attribuées aux pas de temps du modèle correspondant aux périodes d'irrigation (Juin-Juillet-Août ou bien Juillet-Août-Septembre, suivant les pas de temps).

• **Paléocène: autres prélèvements**

N° BSS	Ouvrage	X	Y	Prélèvement (m3)
09781X0005	Maylis (Abbaye)	356.900	159.500	23000
09784X0018	Eugénie Christine Marie	380.944	158.676	230000

Tableau 8 – Forages non agricoles captant le Paléocène dans la région d'Audignon

Christine-Marie est le forage thermal d'Eugénie-les-Bains.

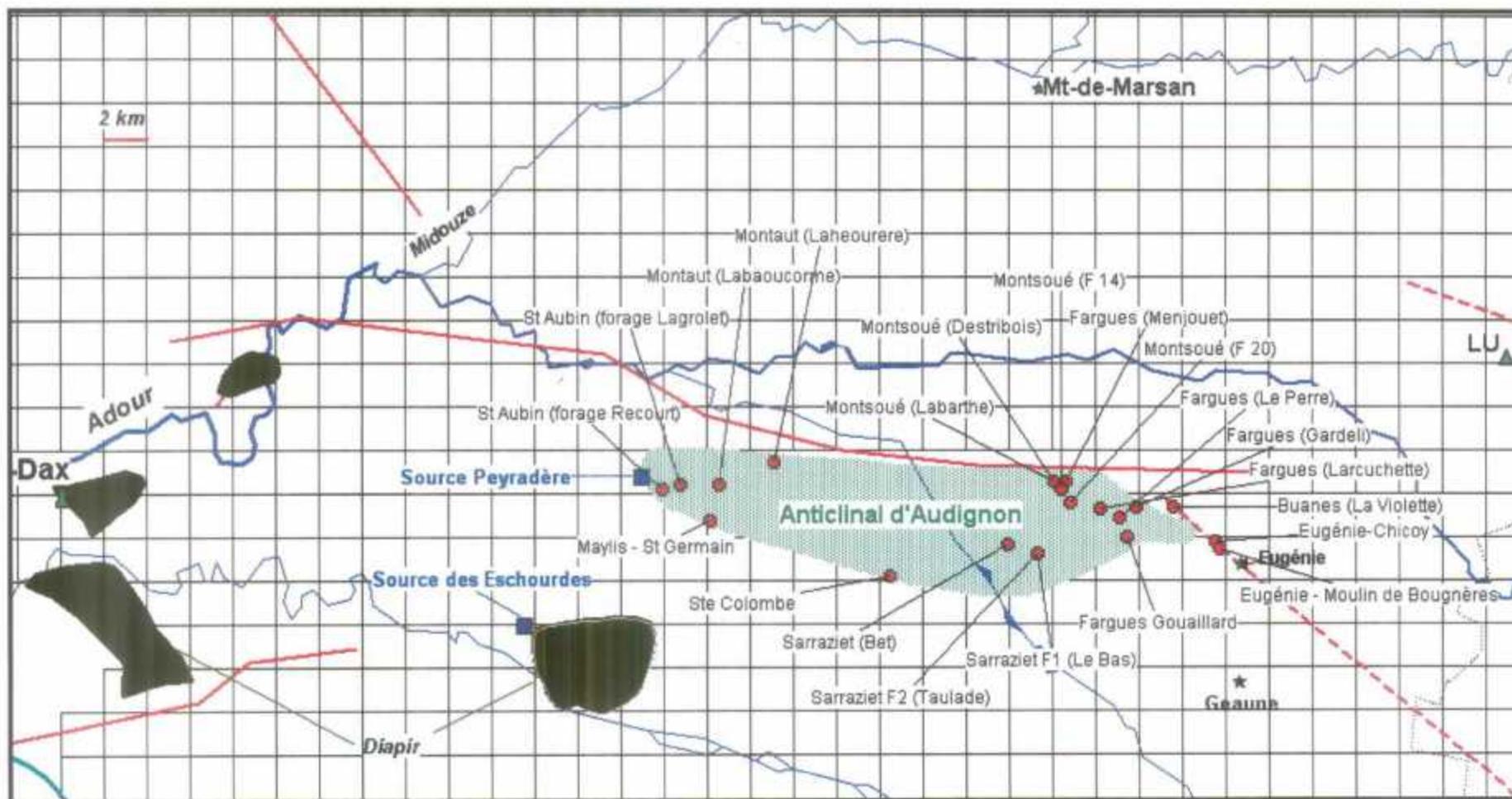


Figure 6 - Localisation des forages agricoles captant le Paléocène dans le secteur de l'anticlinal d'Audignon

• **Sénonien supérieur**

Les forages recensés sont destinés à l'irrigation (tableau 9 et figure 7)

N° BSS	Forages agricoles	X	Y	Prélèvement (m3)
09781X0008	Montaut	359.640	163.480	49500
09782X0020	Ste Colombe Lartigue	367.200	159.100	11250
09782X0019	Ste Colombe Lannebourdes	364.980	158.260	29250
09783X0002	Montsoue	372.660	162.860	143400

Tableau 9 – Forages captant le Sénonien supérieur dans la région d'Audignon

• **Sénonien inférieur**

Les forages sont essentiellement agricoles (tableau 10 et figure 7)

N° BSS	Forages agricoles	X	Y	Prélèvement (m3)
09782X0006	Audignon F3 (ASA)	362.025	161.675	90000
09782X0011	Eyres Moncube (F2)	366.350	162.275	180000
09782X0012	Eyres Moncube (F2 ter Daourat)	366.325	162.250	95000
09782X0013	Eyres Moncube (Eyr4)	366.975	162.180	220000
N° BSS	Forages AEP	X	Y	Prélèvement (m3)
09782X0010	Banos Couil	362.600	163.100	80000
09782X0024	Audignon Coulaou (Marseillon)	363.258	163.400	1 105 000

Tableau 10 – Forages captant le Sénonien inférieur dans la région d'Audignon

2.1.2.3. Les sources dans la région d'Audignon

Il existe dans le secteur d'Audignon de nombreuses sources. Les plus importantes, exutoires des nappes profondes du Paléocène et du Crétacé supérieur, sont les sources de Marseillon, de Peyradère et des Eschourdes.

• **Source de Marseillon** (09782X0006 X=363.24, Y=163.40, Z=43 m)

Elle est située au nord du village d'Audignon, dans la vallée du Laudon. Elle donne naissance au ruisseau de Marseillon. L'aquifère qui l'alimente est celui du Crétacé supérieur (Sénonien). La source est captée depuis 1968 pour alimenter St Sever et les communes voisines.

Les débits sont très perturbés par les pompages AEP effectués sur le forage voisin, particulièrement en période estivale. Les variations journalières sont de grandes amplitudes.

La source réagit rapidement aux épisodes pluvieux (cf "*Traitement des chroniques de débits et de piézométrie relatives à l'aquifère profond nord-pyrénéen dans la région de Mont de Marsan*, réf. 20). En 1990, les variations maximales de débit induites par la pluie ont été évaluées à 1700 m³/j (20 l/s) pour un débit moyen de 4320 m³/j (50 l/s) . En 1991 et 1992, période de plus forte pluviométrie, le débit moyen de la source est passé à 7780 m³/jour (90 l/s).

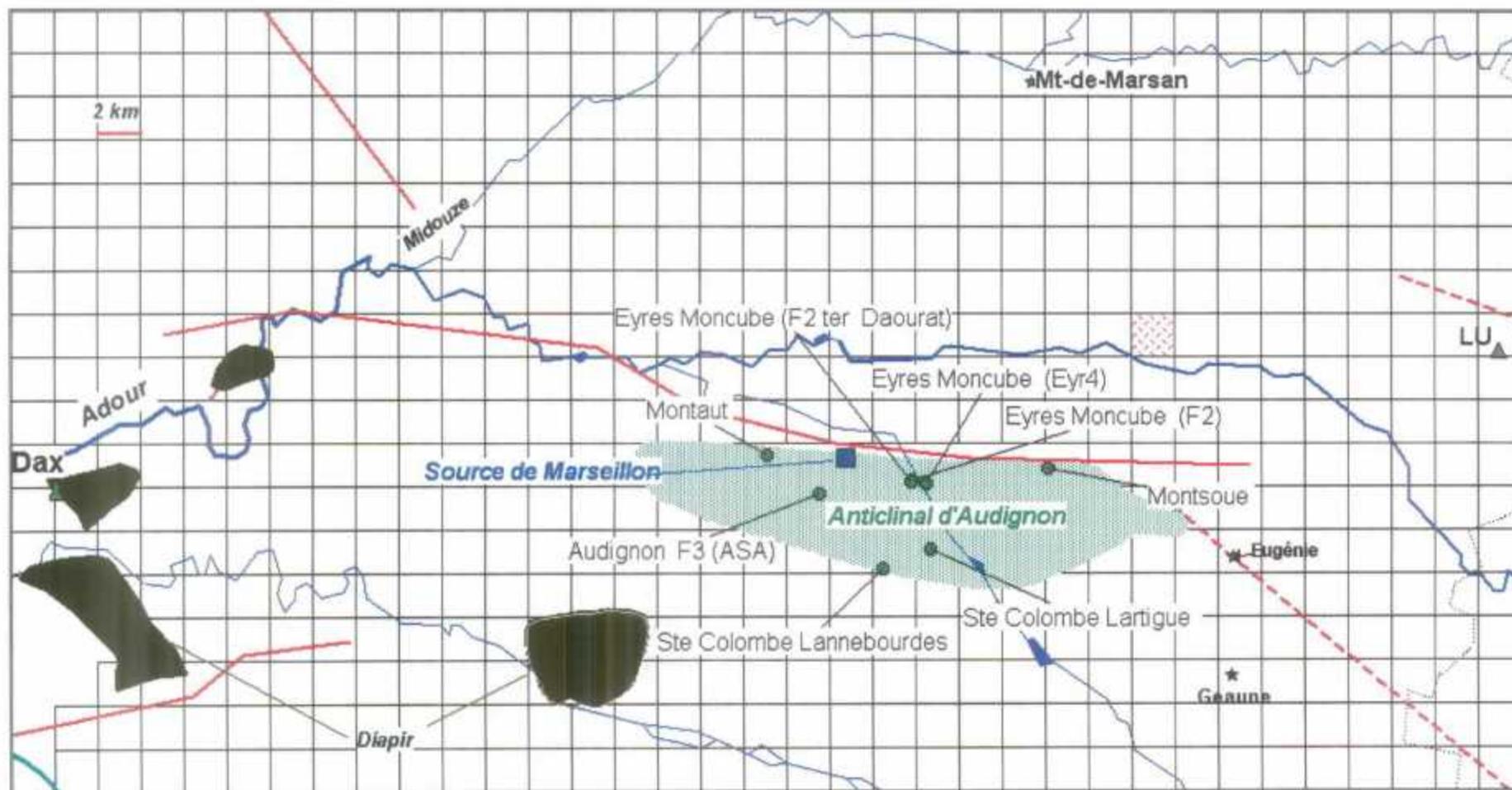


Figure 7 – Localisation des forages agricoles captant le Sénonien dans le secteur de l'anticlinal d'Audignon

• **Source Peyradère** (09781X0010, X=353.63 Y=162.92 Z=43 m)

Elle est située sur la commune de St Aubin dans les Landes. Son débit est de l'ordre de 17 000 m³/jour, soit 6 300 000 m³ (estimation 1995). Elle est alimentée par la nappe du Paléocène.

• **Source des Eschourdes** (09774X0022, X=348.08 Y=155.66, Z=35 m)

Elle est située sur la commune de Donzacq, dans la vallée du ruisseau des Bituminières. Il s'agit en fait d'un ensemble de sources sur une zone de 2500 m² environ, dont la source des Brouillous (09774X0026) captée pour l'AEP depuis 1979 par l'intermédiaire d'un forage de 20 m de profondeur.

Le débit de la source est important: le rapport "*Etude géologique et hydrogéologique autour du site des Landes de Siougos*" (40), réf. 3) mentionne un débit moyen de 634 m³/h (maximum de 986 m³/h), soit 5 550 000 m³ par an.

Les prélèvements AEP estimés en 1995 sont de l'ordre de 6000 m³/jour soit un volume annuel de 2 190 000 m³.

Ces sources ont été introduites dans le modèle sous la forme d'exutoires à cote de débordement (il y a débordement si la charge hydraulique calculée est supérieure à la cote de débordement).

2.1.2.4. Prélèvements dans les nappes du Paléocène et du Sénonien dans la zone thermale de Dax

Comme la région d'Audignon, la région de Dax est l'aire d'émergence naturelle (niveau de base) des nappes profondes du Paléocène et du Crétacé.

Les circulations souterraines sont favorisées par de forts gradients thermiques locaux qui ont donné naissance à d'importantes sources thermo-minérales captées depuis l'époque gallo-romaine. Par la suite, leur exploitation a été fortement intensifiée par pompage dans des forages.

Par ailleurs, plusieurs émergences diffuses sont plus ou moins masquées par les alluvions du fleuve Adour.

Les stations thermales sont celles de Dax, Saint-Paul-lès-Dax, Tercis-les-Bains, Saubusse, Gamarde, Préchacq-les-Bains.

Les températures sont parfois supérieures à 60 °C: Fontaine Chaude à Dax, forage SPDX1 à Saint-Paul-lès-Dax.

Comme à Audignon, toutes les sources ont été traitées en "cotes de débordement".

• **Forages de Dax**

Ouvrage	X Lambert III Sud	Y Lambert III Sud	Z (m)	Température. fond °C	Température. surface °C
Boulogne 2	325.90	162.72	6.22	56	56
Baignots 4	326.02	162.63	6.77	55	55
Fne Chaude	326.90	162.40	7.4	61.2	61.2
Place Course	327.08	162.39	9.16	62	62
Elvina	327.26	162.42	7.5	62	62
St Christophe	327.40	162.65	7.25	57	57
Roth	327.40	162.40	5.91	57	14
Stade	327.30	162.55	5.59	53	14

Tableau 11 – Captages de la station thermale de Dax

Les prélèvements à Dax en 1995 s'élevaient à 2 372 000 m³. Il ont été affectés à la nappe du Sénonien supérieur.

• **Forages de St Paul-Les-Dax**

Ouvrage	X	Y	Z (m)	Température. fond °C	Température. surface °C
	Lambert III Sud	Lambert III Sud			
SPDX1	325.77	164.05	9.3	66	14
Sébastopol	321.66	165.77	34.8	47	47

Tableau 12 – Captages de la station thermale de St Paul-Les-Dax

Le forage de SEBASTOPOL 1bis (0976 4X 0005) était exploité en 1996 à un débit moyen de 157 m³/h, correspondant à un volume annuel de 1375000 m³. C'est le débit ponctuel le plus élevé dans le réservoir thermal en Bas-Adour. Le forage a été affecté au Paléocène.

Le forage SPDX1 (0976 1X 0163) autorisé pour la géothermie à un débit de 60 m³/h n'était pas encore exploité en 1998.

• **Forages de Préchacq**

La station thermale de Préchacq est exploitée par 5 forages et un puits, à un débit global de l'ordre de 90 à 100 m³/h (2160 à 2400 m³/j). En 1995, les prélèvements s'élevaient à 820 500 m³, affectés au Paléocène.

Ouvrage	X	Y	Z (m)	Température. fond °C	Température. surface °C
	Lambert III Sud	Lambert III Sud			
Montaigne	336.8	167.98	9	58	58
La Hire	336.68	168.11	9	59	59
Darroze	336.78	168	9	58.5	58.5
T5 Eau froide	336.68	168.21	9	27	27
L'Avenue	337.21	168.26	10	20	20

Tableau 13 – Captages de la station thermale de Préchacq.

La plupart des ouvrages sont peu profonds (de 15 à 30 m). La température de l'eau thermale à Montaigne, La Hire, Darroze est très élevée, de 55 à 57°C.

• **Forages de Saubusse**

Trois ouvrages sont exploités de façon assez irrégulière avec un débit 60 m³/h en haute saison et à moins de 30 m³/h entre les mois de fermeture qui vont de décembre à février

Ouvrage	X	Y	Z (m)	Température. fond °C	Température. surface °C
	Lambert III Sud	Lambert III Sud			
Berar	316.080	159.95	10	32	32
Hourat	316.075	159.92	10	38	38
Raja	316.08	159.79	8	37	37

Tableau 14 – Captages de la station thermale de Saubusse.

Le forage BERAR (0976.3X.0078) est exploité à 10 m³/h, 6 à 13 h/j. Le niveau de l'eau le 21 juillet 1997 était à 4,76 m, et la température de 32°C.

Le forage HOURAT (0976.3X.0079) est exploité en continu à 8 m³/h toute l'année et 24h/24. Le niveau de l'eau le 21 juillet 1997 était à 10,30 m.

Le forage RAJA (0976.3X.0086) est exploité 5 à 20 h/j entre 10 et 60 m³/h. Le niveau de l'eau le 21 juillet 1997 était à 6,30 m.

Les prélèvements en 1995 étaient estimés à 70 000 m³.

• Forages de Tercis

Deux ouvrages sont en exploitation sur cette station située au sud de la ride anticlinale de Tercis, dans le prolongement vers l'ouest de la structure diapirique de St-Pandelon.

- La source de la Bagnère 1 (0976 4X 0033). Le 22.07.97, le débit était de l'ordre de 15 à 20 m³/h et la température de 37,8°C.
- Le forage de la Bagnère 2 (0976 4X 0053) réalisé en 1991 présente un artésianisme de 3 à 4 m³/h évacué en surverse dans le ruisseau voisin.
Il est exploité environ 7 h/jour.

Les prélèvements en 1995 étaient estimés à 61500 m³, affectés au Sénonien inférieur.

2.1.2.5. Autres prélèvements dans les nappes du Paléocène et du Sénonien

Les principaux sont :

- Roquefort (09261X0010) forage AEP avec prélèvements dans le Sénonien supérieur de 427222 m³ en 1995
- Arue F2 (09261X0057) forage AEP avec prélèvements dans le Sénonien inférieur de 56776 m³ en 1995
- Gousse-les-Gourgues (09506X0060) forage agricole avec prélèvements dans le Paléocène de 87600 m³ en 1995
- Gousse Ladebat (09506X0059) forage thermo mineral avec prélèvements dans le Paléocène de 27000 m³ en 1995

Ainsi que les forages géothermiques de Mont de Marsan **GMM1** et **GMM2**. Il n'y a pas d'historique de prélèvements sur ces forages dont le premier fonctionne depuis 1977 et le second depuis 1981.

En 2000, les prélèvements à GMM1 étaient de 1 786 809 m³ avec la répartition suivante:
6077 m³/j au 1^{er} trimestre, 4377 m³/j au 2^{ème}, 3679 m³/j au 3^{ème}, 5448 m³/j au 4^{ème}

En 1995, sur GMM2, les prélèvements étaient de 264 000 m³.

GDF (1994, réf. 21) fait état de prélèvements du même ordre:

sur GMM1: 6000 m³/j en hiver, 3600 m³/j en été

sur GMM2: 1680 m³/j en hiver, 0 en été.

Remarque:

Le forage AEP d'Hagetmau (09782X0008) est affecté à l'Eocène inférieur. Les prélèvements étaient de 350 400 m³ en 1995 (Rapport BRGM RP-50241-FR, réf. 17).

2.1.3. Données piézométriques

L'insuffisance des points de mesure dans les différentes nappes, leur répartition irrégulière (la plupart étant situés à l'ouest, dans la zone des émergences et des stockages de gaz), le non synchronisme des mesures recensées (certaines datant des années 1950) et l'unicité fréquente de la mesure (une seule mesure effectuée sur le point) ne permet pas de considérer les cartes élaborées au cours de l'année 2 (rapport R40633) comme des références pour le calage du modèle (il n'existe d'ailleurs pas de carte pour l'Eocène inférieur et le Sénonien inférieur). La carte de la nappe des Sables infra-molassiques, pour laquelle les points de mesures sont plus nombreux et mieux répartis, demeure hypothétique dans le tracé de certaines isopièzes (des alternatives étant tout aussi plausibles).

Pour ces raisons, le calage en régime transitoire se limite donc à la seule prise en compte des chroniques disponibles qui serviront de base de comparaison avec les chroniques simulées.

2.1.3.1. Réseaux de suivi piézométrique

Les points de mesures utilisés pour le calage en transitoire du modèle appartiennent aux différents réseaux de suivi des nappes profondes du sud du bassin, réseaux gérés par le BRGM, par TOTAL-SGF (données transmises au BRGM en 2001), par GDF (données transmises au BRGM en 2001) et par le Conseil Général des Landes (CG 40).

Les mesures sont faites soit sur des piézomètres, soit sur des forages en exploitation, à des fréquences diverses, qui ont varié au cours des années: trimestre, mois, semaine ou encore enregistrement en continu (limnigraphe ou module d'acquisition automatique).

• Sables infra-molassiques

Le réseau comporte les points suivants (figure 8):

- BRGM : 29 points (12 points en Aquitaine et 17 en Midi-Pyrénées);
- TOTAL-SGF: 13 points + 3 suivis également par le BRGM (Pecorade 1, Geaune 2, Geaune 3)

Soit un total de 42 points (En 1983, le réseau ne comportait que 10 points, dont 2 en Aquitaine).

Remarque: 2 points du réseau TOTAL sont depuis 2001 intégrés dans le réseau géré par le CG 40 (Castenau-Tursan et le forage ELB2 à Eugénie).

• Nappe du Paléocène et du Crétacé

Le nombre de forages de suivi est beaucoup plus restreint (figure 9):

- 6 captent l'aquifère du Paléocène
 - 4 du réseau GDF
 - 1 du réseau BRGM
 - 1 du réseau du Conseil Général des Landes
- 2 captent l'aquifère du Sénonien, suivis par le BRGM (Lacqy 101 et Betbezer)
- 1 capte le Cénomaniens (Gourbera, suivi par GDF)

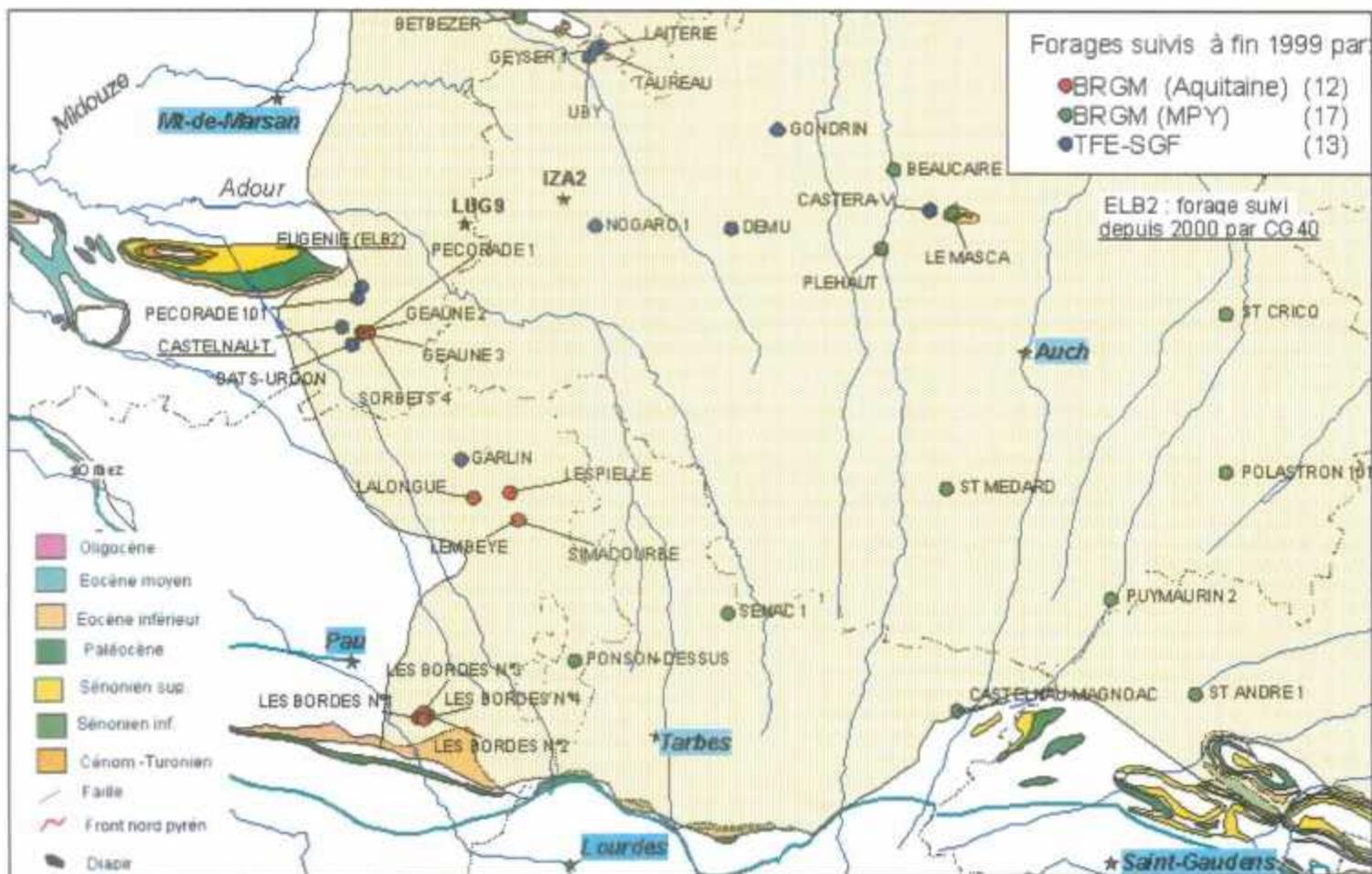


Figure 8 – Réseau piézométrique de la nappe des Sables infra-molassiques (excepté Betbezer, au nord, qui capte le Crétacé)

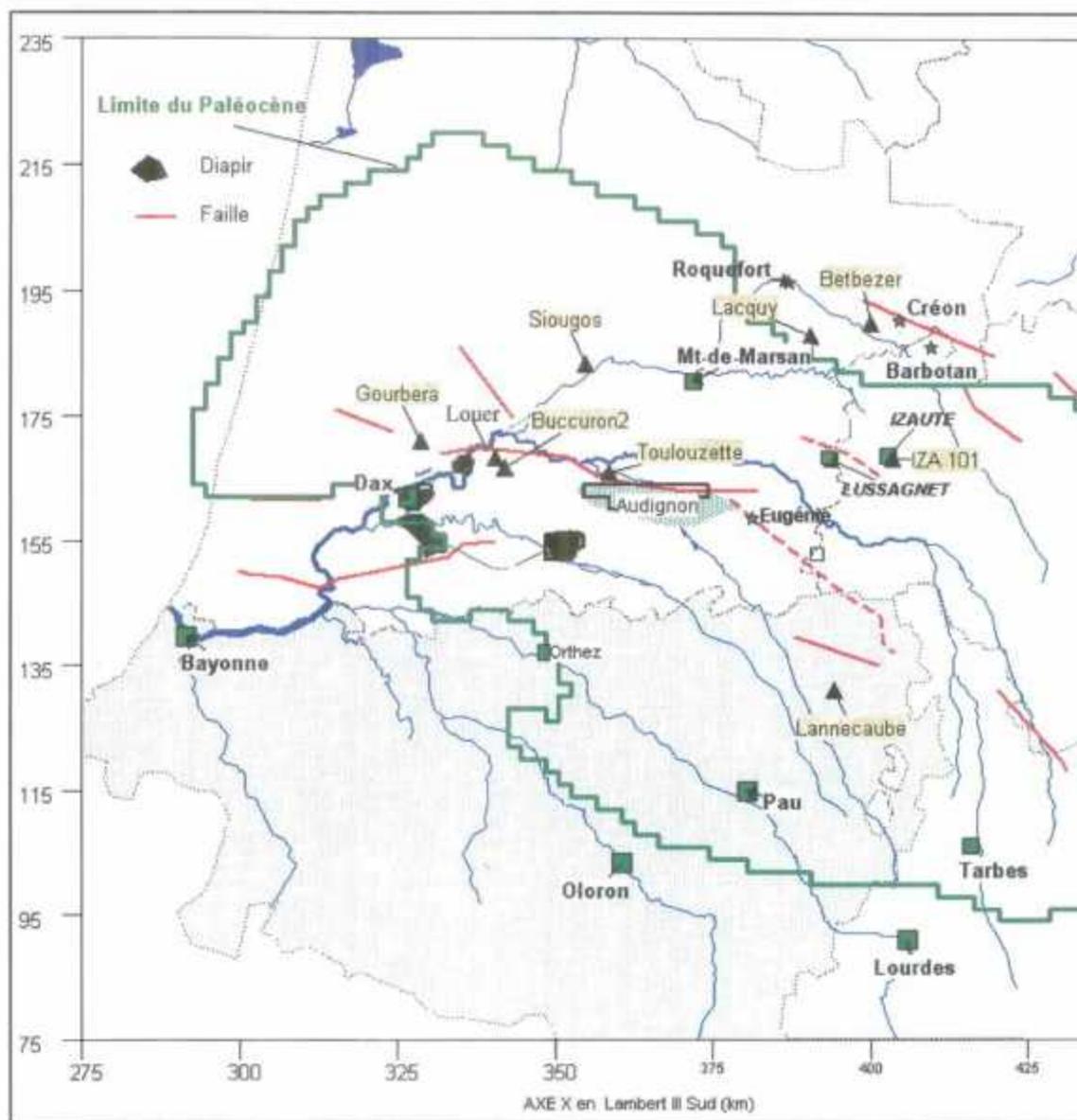


Figure 9 – Réseau piézométrique des nappes du Paléocène et du Crétacé

Le forage de Lacquy capte deux systèmes aquifères. Il est essentiellement représentatif du Crétacé.

Trois points du réseau BRGM sont également suivis par TFE : Pecorade 1, Geaune 2, Geaune 3 (tableau 6)

Tous les points du réseau TFE ont un module d'acquisition numérique hormis Pecorade 101 (trimestre) et Castelnau Tursan (semaine)

2.1.3.2. Points de mesure utilisés pour le calage du modèle

La complexité de certaines structures géologiques, en particulier celles correspondant aux stations thermales de Dax, Barbotan, Audignon, nécessite un traitement en soi à l'aide d'un maillage fin adapté à ces structures (par exemple, modèle de Barbotan utilisé par TOTAL-SGF avec des mailles de 25 m de côté). Certains points n'ont donc pas été retenus pour le calage.

Les points utilisés sont au nombre de 32 (tableaux 15, 16, 17) :

- 26 pour l'aquifère des Sables infra-molassiques
15 du réseau BRGM (12 en Aquitaine et 3 en Midi-Pyrénées)
11 du réseau TFE-SGF
- 4 pour l'aquifère du Paléocène: 2 du réseau GDF, 1 du réseau TOTAL, 1 du réseau BRGM
- 1 pour le Sénonien, suivi par le BRGM (Lacquy 101)
- 1 pour le Cénomaniens (Gourbera, suivi par GDF)

N° BSS	Nom ouvrage	Usage	Dpt	X Lamb. III Sud	Y Lamb. III Sud	Z sol	Prof. en m	Début des mesures
0978-8X-0003	Pecorade 1	AEP non exploité	40	381.80	153.20	107.0	423.5	1984
0978-8X-0004	Geaune 2	AEP	40	381.75	153.35	102.5	487.0	1984
0978-8X-0011	Geaune 3	AEP	40	382.00	153.22	115.0	482.0	1984
0979-5X-0219	Sorbets 4 (Geaune 4)	AEP	40	382.52	153.25	120.0	535.0	1993
1005-2X-0037	Lalongue	projet AEP	64	394.60	133.85	180.0	322.0	1994
1007-3X-0002	Lespielle 1	Irrigation	64	398.93	134.50	162.0	415.0	1984
1005-7X-0003	Lespielle 2 (Simacourbe)	Irrigation	64	399.86	131.28	178.0	510.1	1984
1030-6X-0033	Bordes 2	AEP	64	389.35	108.70	230.0	100.0	1989
1030-6X-0034	Bordes 3	AEP	64	389.85	109.05	227.6	106.0	1989
1030-6X-0035	Bordes 4	AEP	64	389.85	108.29	226.9	100.5	1989
1030-6X-0036	Bordes 1	AEP	64	389.22	105/40	218.7	85.0	1995
1005-7X-0001	Lembeye	Piézo.	64	399.83	131.30	177.0	3316	Fév-96
09546X0022	Le Masca	Piézo.	32	450.30	167.23	140.0	58	Fév-98
1007-8X-0001	Puymaurin 2	Piézo.	32	468.64	122.06	220.7	3822	Mai-71
0982-4X-0002	Saint Criq	Piézo.	32	491.99	155.39	153.0	1035	Fév-92

Tableau 15 – Sables infra-molassiques: points du réseau piézométrique du BRGM utilisés pour le calage du modèle.

*Outil de gestion des systèmes aquifères du Sud du bassin Adour-Garonne
Année 4 – Calage du modèle hydrodynamique en régime transitoire*

N° BSS	Nom ouvrage	Usage	Dpt	X Lamb. III Sud	Y Lamb. III Sud	Z sol	Prof. en m.	Début des mesures
0926-8X-0055	Uby	Piézo.	32	408.12	185.38	102.1	596	Nov-94
0926-8X-0045	Geyser 1	Piézo.	32	408.86	186.28	117.1	120	Mai-88
0926-8X-0035	Taureau	Piézo.	32	408.87	186.30	118.4	68	Juil-87
0952-8X-0002	Nogaro 1	Industrie	32	408.85	165.75	92.0	928	Avr-95
0954-5X-0017	Castera-Verduzan	AEP	32	447.30	167.63	113.0	230	Mai-96
0953-6X-0008	Demu	AEP	32	424.66	165.45	155.0	781	Août-95
0953-3X-0016	Gondrin	AEP	32	430.04	176.97	106.0	728	
0978-8X-0015	Bals-Urgon (ASA Geaune)	Irrigation	40	380.57	151.90	88.0	476	Nov-94
0978-8X-0014	Pecorade 101 (Geaune)	Industrie	40	381.17	157.32	91.0	554	1988
0978-4X-0010	Castelnau-Tursan	Irrigation	40	379.40	153.95	111.0	372	1987
1005-2X-0006	Garlin	AEP	64	393.21	138.36	147.0	650	Mai-95

Tableau 16 – Sables infra-molassiques: points du réseau piézométrique de TFE-SGF utilisés pour le calage du modèle.

N° BSS	Nom ouvrage	Usage	Dpt	X Lamb. III Sud	Y Lamb. III Sud	Z sol	Prof. en m.	Début des mesures	Suivi
0952-7X-0021	Izaute 101	Piézo.	32	403.47	168.30	137.0	752	1994	TFE-SGF
1005-2X-0038	Lannecaube	Projet AEP	64	394.28	131.15	165.0	933.0	1993	BRGM
0951-1X-0022	Landes de Siougos 2	Piézo.	40	354.90	183.45	51.0	1295	juin 87	GDF
0951-5X-0027	Toulouzette 1	Piézo.	40	358.61	165.88	33.0	3042	1998	GDF
0926-6X-0004	Lacquy	Piézo.	40	390.62	187.78	107.7	4002	1973	BRGM
0950-5X-0034	Gourbera 1	Piézo.	40	328.70	171.00	55.0	2208	juin 98	GDF

Tableau 17 – Paléocène et Crétacé: points des réseaux piézométriques utilisés pour le calage du modèle.

2.1.3.3. Cas particulier des zones thermales

• Dax

La zone thermale de Dax est caractérisée par des structures géologiques complexes mises en place sous la poussée du front nord-pyrénéen qui a favorisé des montées diapiriques. Les formations qui surmontaient les séries salifères du Trias, dont les calcaires et dolomies du Jurassique, du Crétacé supérieur et du Paléocène ont été fortement redressées et fracturées.

La géologie est caractérisée par de nombreux diapirs et anticlinaux:

- anticlinal de Louer-Montfort en Chalosse à cœur paléocène ;
- diapir de Thétieu, sous les alluvions de l'Adour ;
- diapir de Dax ;
- anticlinal de Sébastopol et diapir de Magescq ;
- diapir de Bénesse - Saint-Pandelon, prolongé par le pli-faille injecté de sel de Tercis Saubusse ;
- anticlinal de Saint-Lon à cœur cénomanien ;
- gros diapir de Bastennes-Gaujacq.

Les formations calcaires et dolomitiques du Paléocène et du Crétacé constituent le réservoir aquifère thermal de la région de Dax. Celui ci représente le principal exutoire des nappes profondes s'étendant sur plus de 10 000 km² jusqu'aux affleurements de superficie restreinte de la bordure pyrénéenne au Sud et au delà de Toulouse à l'Est. Les circulations souterraines sont favorisées par de forts gradients thermiques locaux qui ont donné naissance aux de nombreuses sources thermo-minérales captées depuis l'époque gallo-romaine.

L'interprétation de la piézométrie et la comparaison des différentes mesures disponibles sont rendues difficiles en raison des particularités du réservoir thermal:

- dont les eaux se déversent naturellement par le biais de sources ou sont exploitées par forages,
- qui contient des eaux de températures et de minéralisations différentes, influençant la piézométrie (notamment la température),
- qui est exploité en plusieurs endroits et à des débits fortement variables selon les saisons,
- qui est localement recouvert par les alluvions de l'Adour, ou par le fleuve lui-même, et donc susceptible d'être influencé par les fluctuations de niveaux de la nappe alluviale et du fleuve.

Enfin, les mesures sont effectuées dans des conditions variables, en puits chauds ou en puits froids.

Pour intégrer ce contexte hydrodynamique local "chaud" dans la problématique des écoulements régionaux ("froids") et dans l'optique d'une modélisation classique de ceux-ci (c'est à dire sans couplage thermique), il est possible de calculer des charges d'eau douce équivalentes à une température donnée à partir des mesures faites en puits "chauds" (en exploitation) ou "froids" (en équilibre thermique avec l'encaissant).

Ces calculs ont été réalisés dans le cadre des actions de Service Public du BRGM qui ont été conduites de 1996 à 1999 sur les eaux thermales et minérales de la région du Bas Adour en liaison avec la DRIRE Aquitaine et la DNETM. Ils sont détaillés dans le rapport BRGM R40539 et intégrés dans ce rapport en annexe 2.

● **Barbotan**

Il s'agit d'un anticlinal à flanc Sud très redressé avec un affleurement très réduit des Sables infra-molasiques. Dans cette formation des Sables, trois réservoirs peuvent être différenciés séparées par des passées argileuses (cf § 2.1.2.1), chacun avec leurs caractéristiques hydrodynamiques et chimiques propres.

● **Eugénie**

La station d'Eugénie est située sur la structure anticlinale d'Audignon. Il s'agit d'un anticlinal faillé d'axe Est-Ouest, déversé vers le nord, qui s'étend sur une trentaine de km entre Mugron et Aire-sur-l'Adour. Le flanc nord est traversé par une grande faille inverse de direction N90° au delà de laquelle les couches s'enfoncent vers le synclinal Nord Audignon avec un fort pendage, pouvant atteindre 60°. Les rejets varient de 100 m à 800 m. Sur le flanc Sud, les pendages sont plus faibles, de 12° à 15°.

Sur le flanc est, à la hauteur de la station thermale d'Eugénie-les-Bains, une faille inverse décale de 50 m environ la partie occidentale, surélevée, de la partie orientale, effondrée ; elle interrompt sans doute la continuité des réservoirs aquifères : à l'Est, les calcaires de Sarraziet (Ilerdien) sont en effet abaissés à la hauteur des couches du Paléocène. A l'Est de cette faille, les Sables infra-molassiques et les Grès à nummulites se biseautent sous la molasse.

Dans le secteur d'Eugénie, sous les formations superficelles et molassiques, on rencontre trois réservoirs aquifères:

Aquifère des couches de Lapèche : il s'agirait d'un **aquifère relais** de celui des sables infra-molassiques, celui-ci se biseauterait en effet à l'approche de la structure d'Audignon. Il est situé sous les formations molassiques et son mur est constitué par les marnes de Donzac qui l'isoleraient de l'aquifère du Paléocène sous jacent. Les couches de Lapèche affleurent à l'Ouest du bourg.

Aquifère du Paléocène : il correspond aux couches d'Arcet (Paléocène) à faciès dolomitique et on lui rattache aussi les calcaires de Sarraziet (Eocène inférieur, d'âge Ilerdien). Il est caractérisé par une alternance de niveaux poreux et fissurés. Le mur en est constitué par des formations calcaréo-marneuses qui sont absentes sur le flanc Est, où il entre donc en communication avec l'aquifère du Crétacé.

Cet aquifère paléocène est capté par le forage Christine-Marie d'Eugénie et a été atteint par les forages agricoles de l'ASA de Classun et du Moulin de Bougnères.

Il est rencontré à une profondeur de 30 à 50 m à l'aval du Moulin de Bougnères et s'enfonce vers l'Est, vers -200 - 250 m dans le compartiment d'Eugénie.

Aquifère du Crétacé supérieur : il est présent dans des formations calcaires et dolomitiques qui affleurent au cœur de l'anticlinal.

● **Conclusion**

Toutes ces structures géologiques sont caractérisées par une hydrodynamique complexe (nombreuses sources, communications entre couches, influence de la température). Leur modélisation nécessite le recours à des modèles locaux avec un maillage fin (maillage de 25 m par exemple pour le modèle " Barbotan " de TOTAL qui subdivise également la formation des Sables en 3 réservoirs) . Ces modèles locaux seraient en relation avec le modèle régional.

Dans le cas du présent modèle, par exemple, les captages de Dax occupent tous la même maille du modèle, de même pour ceux de Préchacq, ce qui ne permet pas une approche discriminante. De même ce modèle ne peut rendre compte que très approximativement de l'hydrodynamique de la cuvette de Barbotan et de la zone thermale d'Eugénie.

2.2. RÉSULTATS: COMPARAISON ENTRE PIÉZOMÉTRIE CALCULÉE ET PIÉZOMÉTRIE MESURÉE

2.2.1. Nappe des Sables infra-molassiques

Les graphiques sont reportés en annexe 3.

2.2.1.1. Secteur Nord-Est des stockages

- *Forage de Nogaro*

Sur ce forage les fluctuations sont importantes, dépassant parfois 70 m (75 m en 1999, 68 m en 2000).

La courbe calculée s'ajuste bien sur la courbe observée. Les écarts sur l'amplitude sont en général faibles, inférieurs à 5 % de l'amplitude observée, à l'exception de l'année 1999 (75 m pour la mesure et 64 m pour le calcul).

- *Forage de Dému*

Plus éloigné des stockages que Nogaro, le forage de Dému présente des fluctuations de moindre ampleur, de l'ordre de 30 à 40 m (35 m en 1999, 40 m en 2000).

Comme pour Nogaro, la courbe calculée s'ajuste bien sur la courbe observée. Les amplitudes sont bien restituées en 1996, 1997, 1999 et 2000.; l'année 1998 fait exception (écart de 5 m sur 30 m).

- *Forage de Castera Verduzan*

L'ajustement est satisfaisant à partir de 1992. La chute des niveaux observée en 1997 provient d'un pompage (hors AEP) d'une vingtaine de m³/h destiné à l'alimentation du lac de Castera (arrêt fin 2000). Depuis Novembre 1999, un forage thermique débite à 6 m³/h.

- *Forage de Le Masca*

Ce forage, sur la commune de Jegun (Gers), à 4 km environ au Sud-Est de Castéra Verduzan, a été réalisé en Septembre 1997. Il est utilisé comme piézomètre et est équipé d'un enregistreur en continu .

Il est situé sur une structure anticlinale amenant localement les Sables infra-molassiques à une trentaine de m de la surface du sol (sous recouvrement argilo-marneux d'âge Miocène à Oligocène).

Sa profondeur est de 57.8 m. Les sables sont traversés entre 34.2 et 56.9 m de profondeur (soit une épaisseur de 22.7 m).

Situé non loin du forage de Castera, la piézométrie calculée lui est similaire avec également une baisse des niveaux calculés en 1997 (forage influencé). La chronique observée est trop courte pour corroborer les calculs.

- *Forage de Gondrin*

Les mesures disponibles se limitent à l'année 1997. Les calculs révèlent une piézométrie caractérisée par des fluctuations de 15 à 25 m d'amplitude.(en cohérence apparente avec les mesures de 1997). Elles sont de moindre ampleur qu'à Demu, Gondrin étant plus éloigné de la zone des stockages.

2.2.1.2. Secteur Sud-Ouest des stockages

• Forage Pecorade 101

L'amplitude des variations piézométriques annuelles était d'une dizaine de mètres jusqu'en 1996. En 1997, elle avait dépassé 18 mètres. Elle est de l'ordre de 20 m depuis, alors que le forage a très peu été exploité.

Il y a une bonne adéquation entre calculs et mesures sur les dix dernières années.

La tendance globale à la baisse, sur la période considérée, est également bien reproduite (figure 10 pour la comparaison des droites de tendance sur mesures et sur calculs).

Remarque: cette droite de tendance représente la composante linéaire des séries et ne doit pas être interprétée comme une tendance au sens prévisionnel.

• Forage de Castelnau Tursan)

La constat est le même que celui fait pour Pécorage 101: amplitude des fluctuations de l'ordre d'une dizaine de m jusqu'en 1996, dépassant 20 m depuis (24 m en 2000).

Il y a une bonne adéquation entre calculs et mesures avec des écarts sur les amplitudes faibles, sauf en 1992 (4m) et 1993 (6m).

• Forage ELB02

La chronique de mesures est courte. L'amplitude des fluctuations qui était de 12 m en 1998 passe à 23 m en 1999 et à 25 m en 2000.

Il y a un bon accord entre mesures et calculs.

• Forages Pécorage 1 (Geaune 1) et Geaune 2

Ces forages étant proches l'un de l'autre, les deux chroniques sont très semblables. Comme à Castelnau Tursan et à Pecorage 101, l'amplitude des fluctuations augmente à partir de 1997, dépassant 20 m en 2000.

Les chroniques calculées (identiques) s'ajustent bien aux observations à partir de 1989.

• Forage de Bats Urgon (ASA de Geaune)

Les mesures disponibles intègrent des niveaux dynamiques (en pompage) à partir de 1994.

De 1988 à 1991, une baisse piézométrique de l'ordre de 15 mètres est enregistrée (de 135 m à 120 m). A partir de 1992 et jusqu'à fin 1994 une stabilisation à 120 m des niveaux moyens est observée (niveaux les plus hauts à 125 m). En 1995 les niveaux baissent et jusqu'en 1998, les niveaux les plus hauts ne dépassent pas 120 m. A partir de 1999 les niveaux remontent et atteignent 125 m fin 2000/

Les fluctuations dues aux stockages amplifiées par les pompes pour l'irrigation sont d'environ 10 mètres jusqu'en 1995 mais augmentent ensuite et atteignent 20 m en 1999 et 2000 (hors niveaux dynamiques), comme pour les forages voisins mentionnés ci-dessus.

La chronique calculée reproduit assez fidèlement ces variations de 1991 à 2000 (De 1988 à 1990, les niveaux calculés sont plus bas que les niveaux mesurés).

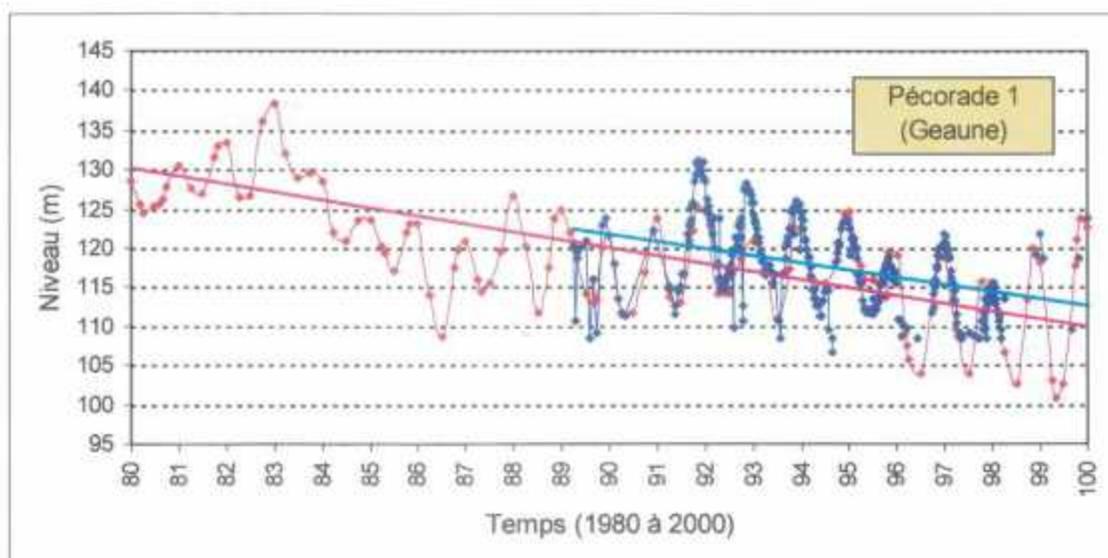
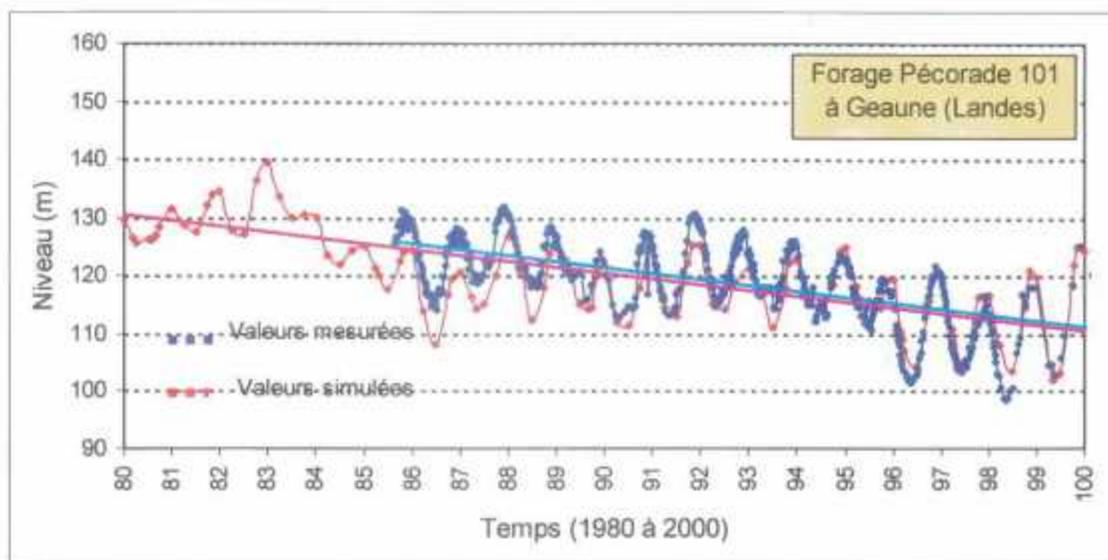


Figure 10 – Forages de Pécorade 101 et Pécorade 1: comparaison des droites de tendance ajustées sur la chronique observée (en bleu) et sur la chronique calculée.

Remarque: ces droites de "tendance" représentent la composante linéaire des séries sur la période considérée et ne doivent pas être interprétées comme une tendance au sens prévisionnel.

2.2.1.3 Secteur Sud de Geaune

• *Forage Lespielle 1*

Les niveaux baissent régulièrement de 1984 à 1998, passant de 155 m à 135 m, soit une baisse de 20 m. entre 1984 et 1998. En 1999 et 2000, les niveaux semblent se stabiliser. La distance aux stockages augmentant, l'amplitude des fluctuations est plus atténuée qu'aux forages de Geaune, de l'ordre de 5 à 6 m.

Depuis 1984, la chronique calculée reproduit bien cette tendance à la baisse (figure 11) ainsi que les fluctuations (hors niveaux dynamiques).

Les droites de tendance ajustées sur la chronique observée et sur la chronique calculée sont quasiment confondues.

• *Forage Lespielle 2 (Simacourbe)*

Les évolutions piézométriques sont pratiquement identiques à celles enregistrées sur le forage 1 de Lespielle qui est proche : baisse régulière des niveaux de 1984 à 1998 qui passent de 156 m à 137 m et fluctuations de l'ordre de 5 m.

La chronique calculée s'ajuste correctement aux mesures (à l'exception des années 1986 et 1987 où les niveaux calculés sont plus bas).

• *Forage de Lalongue*

Cet ouvrage n'est pas exploité depuis sa réalisation en 1993. Depuis le début des mesures, une baisse régulière des niveaux est observée jusqu'en 1998 (de 142 m à 134 m), semblant s'interrompre en 1999 et 2000 comme aux forages de Lespielle.

L'ajustement aux mesures est très correct de 1995 à 2000.

• *Forage de Garlin*

La baisse des niveaux moyen est de 30 mètres entre 1984 et 1998. A partir de 1995 l'enregistrement de niveaux dynamiques introduit dans la chronique des fluctuations de grande amplitude. La chronique calculée reproduit correctement la baisse de 30 m et s'ajuste correctement sur les niveaux les plus hauts. Les amplitudes calculées de 1995 à 2000 sont de l'ordre de 10 m, en cohérence avec celles mesurées avant l'enregistrement des niveaux dynamiques.

• *Forage 1 Esso à Lembeye*

Entre 1980 et 1992 la chronique observée est caractérisée par des fluctuations de niveaux qui disparaissent par la suite. De 1994 à 1998 les niveaux se stabilisent à 140 m. En 1998, les niveaux perdent 2 m et en 1999 1 m supplémentaire.

De 1980 à 2000, la baisse des niveaux est de 13 m (de 150 m à 137 m). La chronique calculée reproduit correctement cette baisse mais conserve des fluctuations de 1992 à 2000.

2.2.1.4. Secteur de Pau

A l'extrême Sud, à Angais les Bordes quatre ouvrages participent à l'alimentation en eau potable de Pau. Du fait de pollution en 1996 par des nitrates provenant probablement du drainage de la nappe alluviale du Gave de Pau, peu éloigné, les prélèvements ont été diminués et mieux répartis entre les ouvrages, l'essentiel de la production venant des forages 3, 4 et 2, dont les niveaux remontent de 2 mètres environ. En 1999, le forage 1 est remis en exploitation, et les autres voient leur volume augmenter ou se stabiliser, ce qui provoque une baisse de plus de 2 mètres sur les 4 ouvrages à la fin de l'année.

Les données disponibles (volumes annuels) ne permettent pas de reproduire les fluctuations intra-annuelles. Néanmoins, la chronique calculée (les forages sont dans la même maille du modèle) reproduit bien l'évolution générale de la piézométrie aux forages Bordes 1, 2 et 3 (annexe 3 et figure 11).

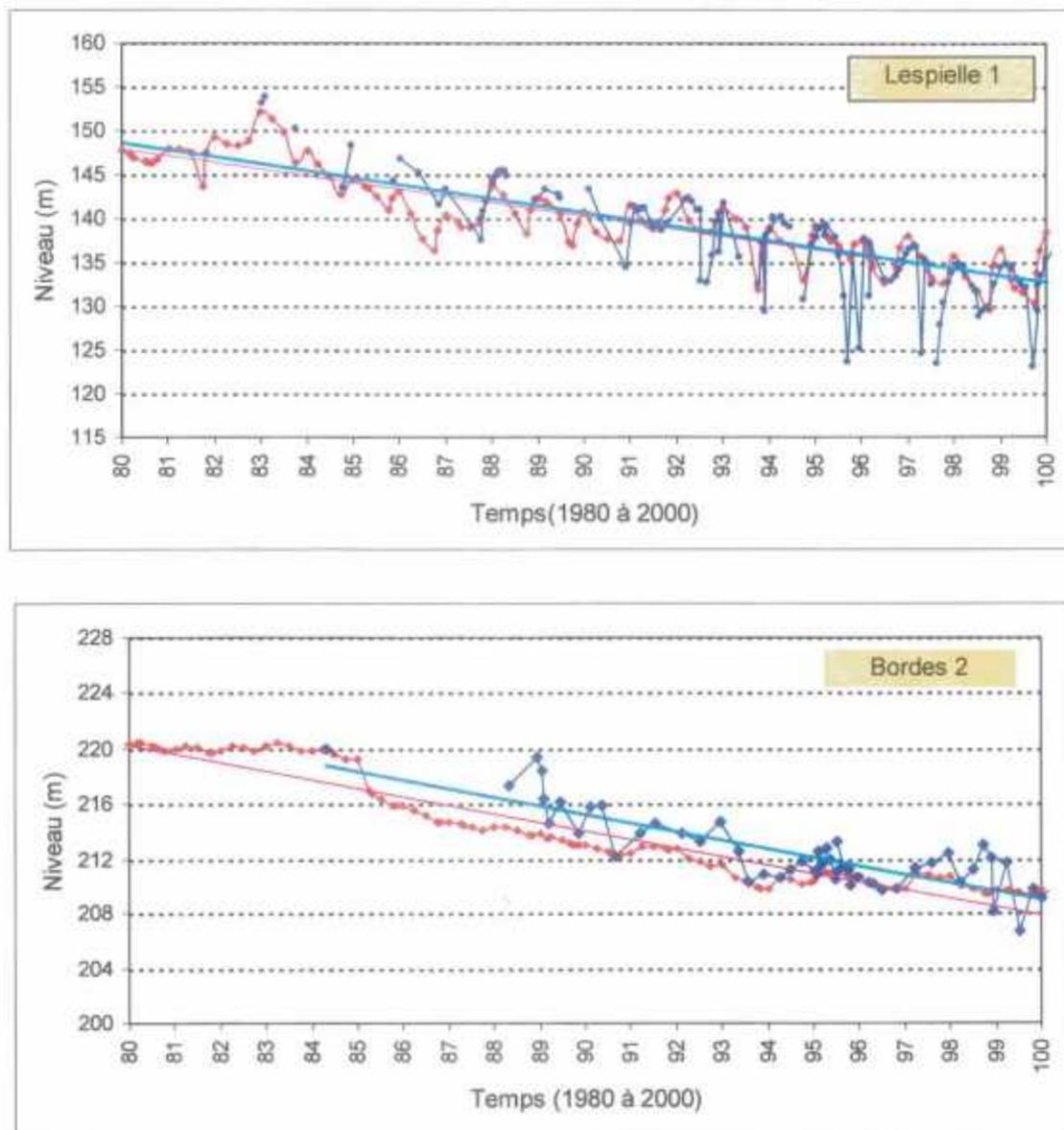


Figure 11 – Forages Lespielle 1 et Bordes 2: comparaison des droites de tendance ajustées sur la chronique observée (en bleu) et sur la chronique calculée (rouge).

Remarque: ces droites de "tendance" représentent la composante linéaire des séries sur la période considérée et ne doivent pas être interprétées comme une tendance au sens prévisionnel.

2.2.1.5. Secteur de Barbotan, au nord des stockages

- *Forage Uby*

Les niveaux enregistrés à Uby sont caractérisés par des fluctuations de forte amplitude, entre 30 m et 40 m jusqu'en 1996, en augmentation depuis: 45 m en 1997, 53 m en 1999, 47 m en 2000.

La chronique calculée se cale assez bien sur les observations mais des écarts sur les amplitudes s'observent certaines années.

- *Forages Taureau et Geysier 1*

Situés au Nord d'Uby, dans la cuvette de Barbotan, ces deux forages captent deux réservoirs distincts dans la formation des Sables infra-molassiques (§ 2.1.2.1): réservoir R1inf pour le forage Taureau et réservoir R2 pour le forage Geysier.

Le présent modèle ne rend pas compte de cette situation; de plus ces 2 forages, très proches l'un de l'autre, sont situés dans la même maille du modèle.

Malgré cette complexité locale, le modèle reproduit assez bien les chroniques de mesures en amplitude et en tendance, en particulier la chronique du forage Taureau.

2.2.1.6. A l'Est d'Auch

- *Forage de Puymaurin*

Le forage est caractérisé par une baisse continue et régulière du niveau au rythme moyen de 0,15 m/an depuis 1980 (78.5 m en 1980, 75 m en 2000). Cette évolution s'accroît légèrement depuis juin 1994. Depuis le début des mesures (travaux de transformation du forage pétrolier en piézomètre en 1971), le niveau d'eau dans le forage n'a pas cessé de descendre.

L'étanchéité du bouchon mis en place à cette occasion doit être vérifiée pour s'assurer de la fiabilité des mesures (rapport BRGM RP50322 FR, Réf. 7). De plus, le faciès hydrochimique correspondrait davantage à des eaux provenant de l'aquifère Paléocène.

Quoi qu'il en soit, la chronique calculée reproduit bien cette tendance à la baisse sur la période 1995-2000 (mais elle est affectée d' "ondulations" de grande longueur d'onde reflétant l'influence, très amortie, des stockages).

- *Forage de Saint Cricq*

Les niveaux mesurés entre 1992 et 1998 correspondent à l'arrêt de l'exploitation du forage en décembre 1991. Le niveau d'équilibre, reproduit par le modèle, n'est atteint que 3 ans après, à la cote 121.6 m NGF. Depuis 1998, les niveaux amorcent une baisse (1.2 m en 3 ans) non restituée par le modèle.

2.2.1.7. Piézométrie d'ensemble

Une carte piézométrique de la nappe des Sables calculée à fin Octobre 2000 (il n'y a pas encore de déstockage) est présentée par la figure 12.

Cette carte met bien en évidence la zone de hautes pressions créées dans la nappe par les volumes de gaz stockés à cette période: niveaux piézométriques de 160 à 180 m autour de Lussagnet et d'Izaute.

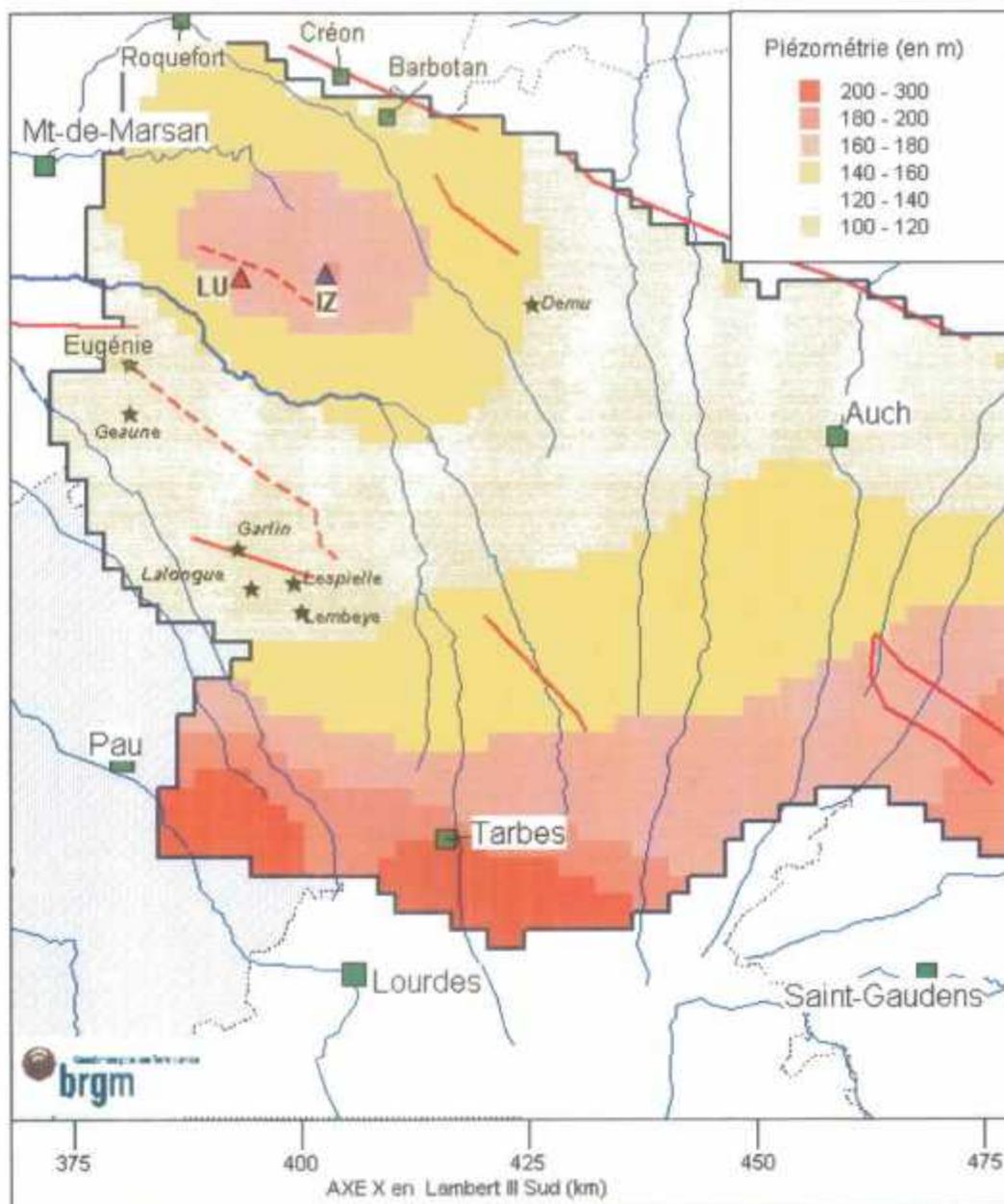


Figure 12 – Nappe des Sables infra-molassiques: piézométrie calculée fin Octobre 2000.

2.2.2. Nappes du Paléocène et du Crétacé

2.2.2.1. Paléocène

La carte piézométrique calculée est présentée par la figure 13. Dans le secteur d'Audignon, la piézométrie est conforme en orientation générale des écoulements et en valeurs à celle réalisée pour le compte du CG40 dans le cadre de l'étude hydrogéologique du secteur compris entre Saint Aubin et Buanes (Rapport ANTEA A 20380-Version B), comprise entre 70 m à l'extrémité Est de l'anticlinal et 40 m à l'extrémité Ouest.

• Forage IZA 101 à Izaute (0952 7X 0021)

Ce forage, géré par TOTAL, a une profondeur de 752 m. Les niveaux enregistrés mettent en évidence l'influence amortie et décalée des cycles de stockage-déstockage d'Izaute: Lorsque la pression augmente dans la nappe des Sables, elle diminue dans celle du Paléocène.

De début 1995 à fin 1999, les niveaux ont baissé de 6 m. Les fluctuations sont de l'ordre de 1 m.

Le calage n'est pas très bon: la baisse des niveaux n'est pas bien reproduite, et il y a un déphasage dans les cycles.

• Forage de Lannecaube (10025 2X 0038)

Il a été réalisé en 1995, sur la commune de Lannecaube pour le compte du Syndicat Mixte d'Alimentation en Eau Potable du nord-est de Pau.

Sa profondeur totale est de 933 m. Le Paléocène carbonaté a été rencontré entre 532 m et 932 m; il est dolomitisé de 875 m à 932 m. Il est capté en trou nu au delà de 537 m.

La température relevée lors des tests de pompage (1995) était de 42 °.

De début 1998 à fin 2000, les niveaux ont baissé de 2 m.

La chronique calculée est aussi caractérisée par une baisse depuis son début (4m entre 1980 et 2000) . De plus, elle a été légèrement influencée en 1984 par la mise en service d'Izaute.

Le calage n'est pas particulièrement mauvais, mais reste néanmoins incertain. Aucune correction de température n'a été faite (conversion en charge d'eau douce équivalente à 14 ° C).

• Forage Landes de Siougos 2 (0951 1X 0022)

Les mesures effectuées depuis 1987 par GDF mettent en évidence une baisse des niveaux: 32.9 m en Octobre 1987 (maximum de l'année), 30.5 m en Novembre 2000 (maximum de l'année). Cette baisse est entrecoupée de paliers où les niveaux se stabilisent: période de 3 ans de 1992 à 1994, puis baisse des niveaux en 1996 et 1997 et stabilisation de 1998 à 2000.

Les fluctuations observées sur la chronique (amplitudes de 40 à 50 cm) sont attribuées au fonctionnement cyclique des forages géothermiques de Mont de Marsan (GMM1 et GMM2). (cf étude CNRS, "Traitement des chroniques de débits et de piézométrie relatives à l'aquifère profond nord-pyrénéen dans la région de Mont de Marsan", ref. 20)

La chronique calculée s'ajuste imparfaitement aux mesures. Elle est aussi affectée de fluctuations effectivement liées au fonctionnement des forages GMM1 et GMM2, mais de moindre ampleur. D'autre part, les deux baisses de niveaux observées de 1997 à 1991 et de 1996-1997 ne sont pas reproduites. Elles peuvent résulter soit d'une modification du régime des pompages sur GMM1 et GMM2, soit d'une augmentation non connue de certains prélèvements dans le Paléocène.

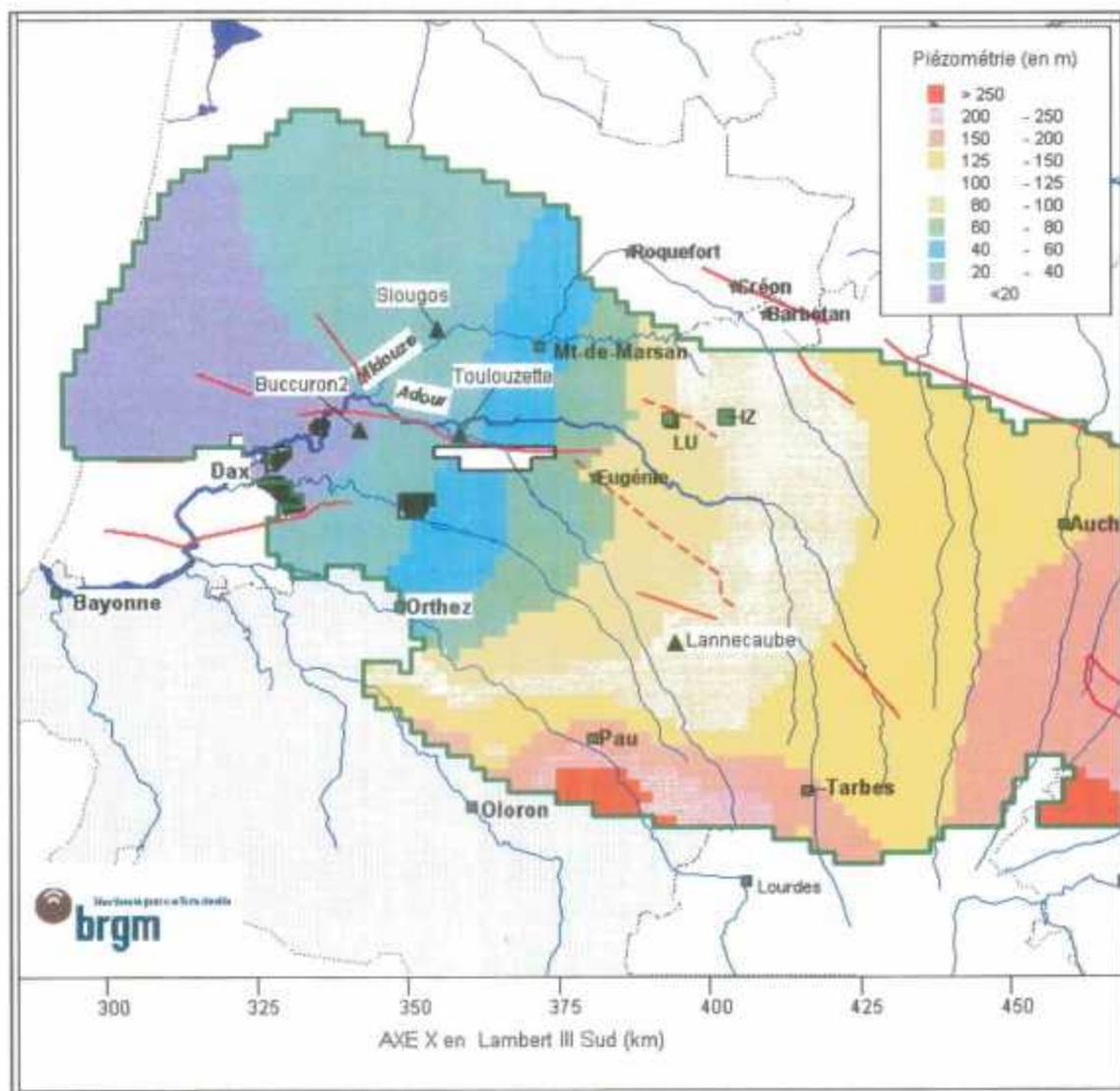


Figure 13 - Nappe du Paléocène: piézométrie calculée fin Octobre 2000

• **Forage Toulouzette 1 (0951 5X 0027)**

Cet ancien forage pétrolier réalisé en 1981 a été repris en 1995 par GDF pour en faire un piézomètre de contrôle du Paléocène. Le tubage a été perforé entre 1382.6 m et 1387.6 m dans le Paléocène.

L' aquifère du Paléocène est séparé de celui de l'Eocène par 191 m d'argiles et de marnes (Marnes de Donzacq et de Trabay).

Au moment des essais, le forage était artésien (jaillissant) avec un débit de 100 l/h. Les tests ont été réalisés avec un faible débit : 4.3 m³/h du 20 février au 2 Mars 1995.

La température reste constante, de 40°C.

Sur la courte chronique de mesures (1998 à 2000), les niveaux fluctuent légèrement entre 41 et 42 m. Le forage pourrait être influencé par les prélèvements agricoles en période estivale dans le secteur d'Audignon.

Une conversion en charge d'eau douce équivalente (à la température de 14 °C) a été faite. La correction calculée est de 4 m (cf annexe 2).

La chronique calculée est aussi affectée de légères fluctuations (de même amplitude) induites effectivement par les prélèvements agricoles. Elle est caractérisée de plus par une tendance à la baisse.

Elle se cale bien sur les niveaux "équivalents" (compris entre 38 et 39 m après conversion).

2.2.2.2. Crétacé

• **Forage de Lacquy (0926 6X 0004)**

Il s'agit d'un piézomètre situé dans le département des Landes et mis en service en 1973. Il est situé dans une zone où l'aquifère des Sables infra-molassiques et l'aquifère des calcaires du Sénonien sont superposés et le forage met en communication les deux nappes. Sa piézométrie serait plutôt représentative de celle du Crétacé

Les niveaux baissent régulièrement, d'une dizaine de par an (baisse de 3 m en 27ans, de 1974 à 2000). La baisse semble être un peu plus importante en 1999 et 2000 (faible rupture de pente).

La chronique de mesures est affectée de légères fluctuations qui seraient non pas en relation avec les cycles de stockages et déstockages de gaz mais avec l'évolution des niveaux de la nappe du Crétacé dans le secteur de Roquefort. Les calcaires Crétacé affleurent en effet au niveau de l'anticlinal et la nappe subirait l'influence des variations de niveau de la rivière Douze et des pompages saisonniers (rapport BRGM 89 SGN 689 MPY, référence 4).

La chronique calculée se cale bien en tendance sur les mesures (sauf en 1999 et 2000 où la rupture de pente n'est pas reproduite) mais reflète quant à elle l'influence, très amortie, des stockages de gaz (en particulier, la montée en pression à la mise en service d'Izaute (maximum calculé à mi-1984, avec un écart de 50 cm par rapport à la mesure à cette date).

• **Forage de Gourbera (0950 5X 0034)**

Il est situé à 10 km au nord de Dax et a été réalisé en 1996 pour GDF. L'aquifère capté est constitué par des formations calcaires et dolomitiques de la base du Crétacé supérieur (Cénomanién).

L'objectif est le contrôle de la piézométrie de cet aquifère profond dans le cadre du projet de stockage souterrain de gaz des Landes de Siougos.

Sa profondeur est de 2208.5 m. Il a été laissé en trou nu de 1893.88 à 2208.50 m.

Le toit du réservoir carbonaté est représenté par les argiles de l'Yprésien et par les marnes de l'Eocène dont l'épaisseur cumulée dépasse 850 m, formant un écran imperméable. L'Yprésien est surmonté par plus de 800 m de séries oligo-miocènes contenant à différents niveaux d'autres aquifères semi-profonds.

Les résultats des tests réalisés indiquent des très faibles perméabilités pour l'Yprésien, pour le Paléocène (7 à 8 m³/h), et pour les niveaux crayeux du Danien. La formation la plus productive serait contenue dans les dolomies cristallines du Crétacé supérieur, à partir de -2100 m, dans le Coniacien-Turonien : les débits air-lift en fin de foration allaient de 40 à 50 m³/h. La température de l'eau est assez constante, à 67 °C.

Sur la courte chronique de mesures (1998 à 2000), les niveaux fluctuent légèrement entre 20 et 21 m.

Une conversion en charge d'eau douce équivalente (à la température de 14 °C) a été faite (rapport BRGM R 40539, réf.10). La correction calculée est de 7.8 m.

La chronique calculée, affectée de légères fluctuations et d'une faible tendance à la baisse, se cale bien sur les niveaux "équivalents" compris entre 12 et 13 m après conversion.

2.3. RÉSULTATS: PERMÉABILITÉS – EMMAGASINEMENTS - RECHARGE

2.3.1. Perméabilités

Par rapport au régime permanent les champs de perméabilités ont été modifiés en zonations mais peu en valeurs. Les modifications ont été faites dans les aquifères et les zones où des chroniques piézométriques étaient disponibles: aquifères des Sables, du Paléocène et du Sénonien supérieur.

Pour l'aquifère des Sables infra-molassiques, les valeurs maximales ont été diminuées, passant de 5 10⁻⁴ m/s à 2 10⁻⁴ m/s.

Pour l'aquifère du Paléocène, les valeurs maximales ont été au contraire augmentées légèrement dans la région d'Audignon, passant de 3 10⁻⁴ m/s à 4 10⁻⁴ m/s.

• Sables infra-molassiques (figure 14)

La plage de variation s'étend de 0.2 10⁻⁵ m/s à 2 10⁻⁴ m/s. La valeur la plus fréquente est toujours de 2 10⁻⁵ m/s.

Les valeurs les plus fortes 10⁻⁴ m/s à 2 10⁻⁴ m/s se trouvent dans le secteur des forages de Geaune (2 10⁻⁴ m/s), de Lespielle (1.5 10⁻⁴ m/s et 10⁻⁴ m/s), des forages "Les Bordes" à l'Est de Pau (1.5 10⁻⁴ m/s).

On les rencontre aussi dans le secteur de Izaute-Nogaro (1.5 10⁻⁴ m/s) et dans la zone située entre Nogaro et Barbotan (10⁻⁴ m/s).

Dans la zone située entre les forages de Geaune et de Nogaro, la valeur de perméabilité est de 5 10⁻⁵ m/s.

• Paléocène (figure 15)

La plage de variation s'étend de 0.2.10⁻⁵ m/s (bordure pyrénéenne) à 4.10⁻⁵ m/s (région d'Audignon). La valeur la plus fréquente est toujours de 10⁻⁵ m/s.

Les valeurs les plus fortes, 10⁻⁴ m/s à 4 10⁻⁴ m/s sont uniquement affectées à une zone située entre Audignon et la station thermale de Préchacq. De part et d'autre de cette zone, les valeurs sont de 5 10⁻⁵ m/s, en particulier aux "Landes de Siougos".

2.3.2. Coefficients d'emménagement

Pour tous les aquifères, les coefficients d'emmagements spécifiques sont très généralement soit de 10⁻⁶ m⁻¹, soit de 2 10⁻⁶ m⁻¹ et localement de 510⁻⁶ m⁻¹.

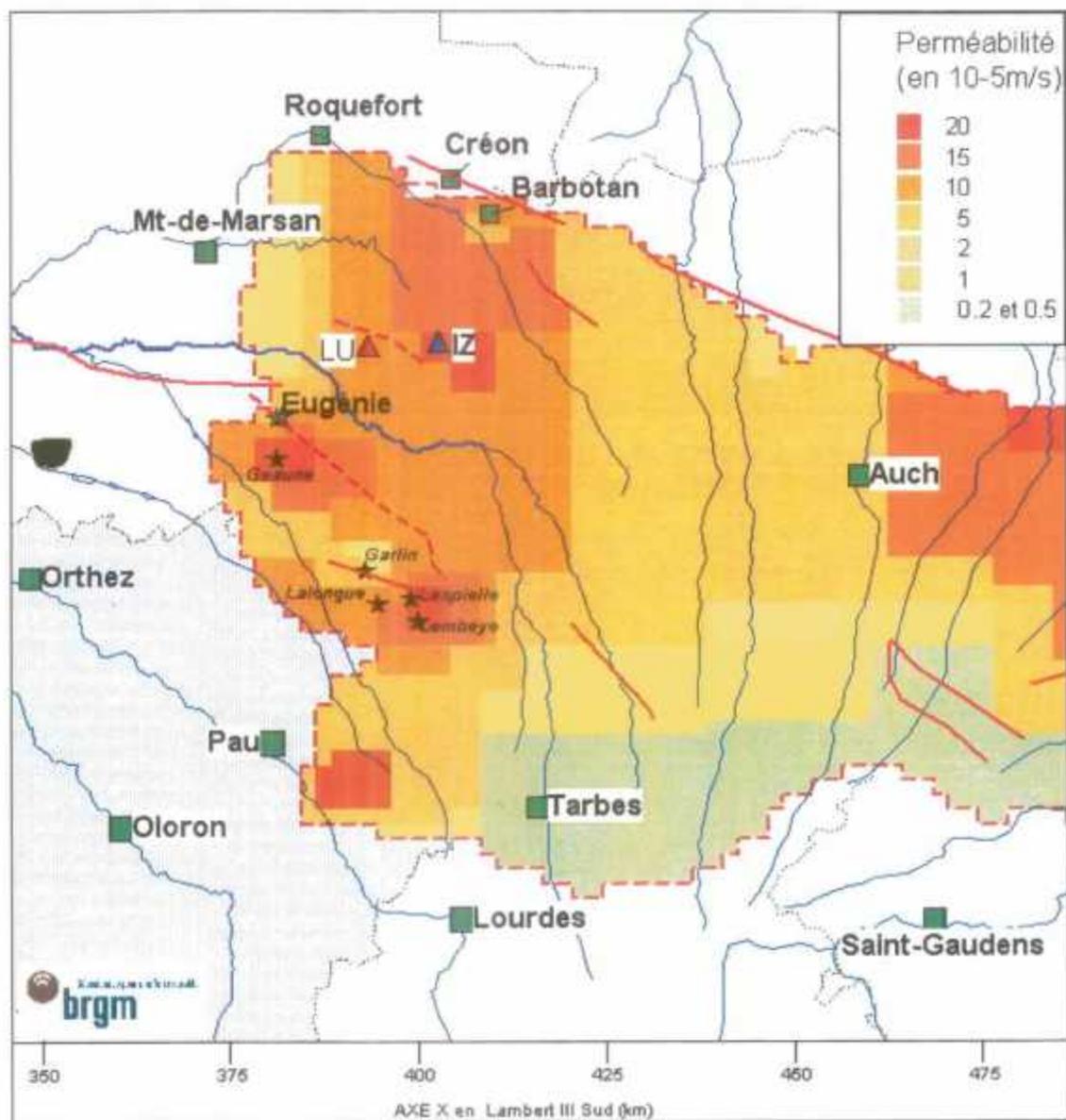


Figure 14 – Aquifère des Sables infra-molassiques: champ de perméabilités

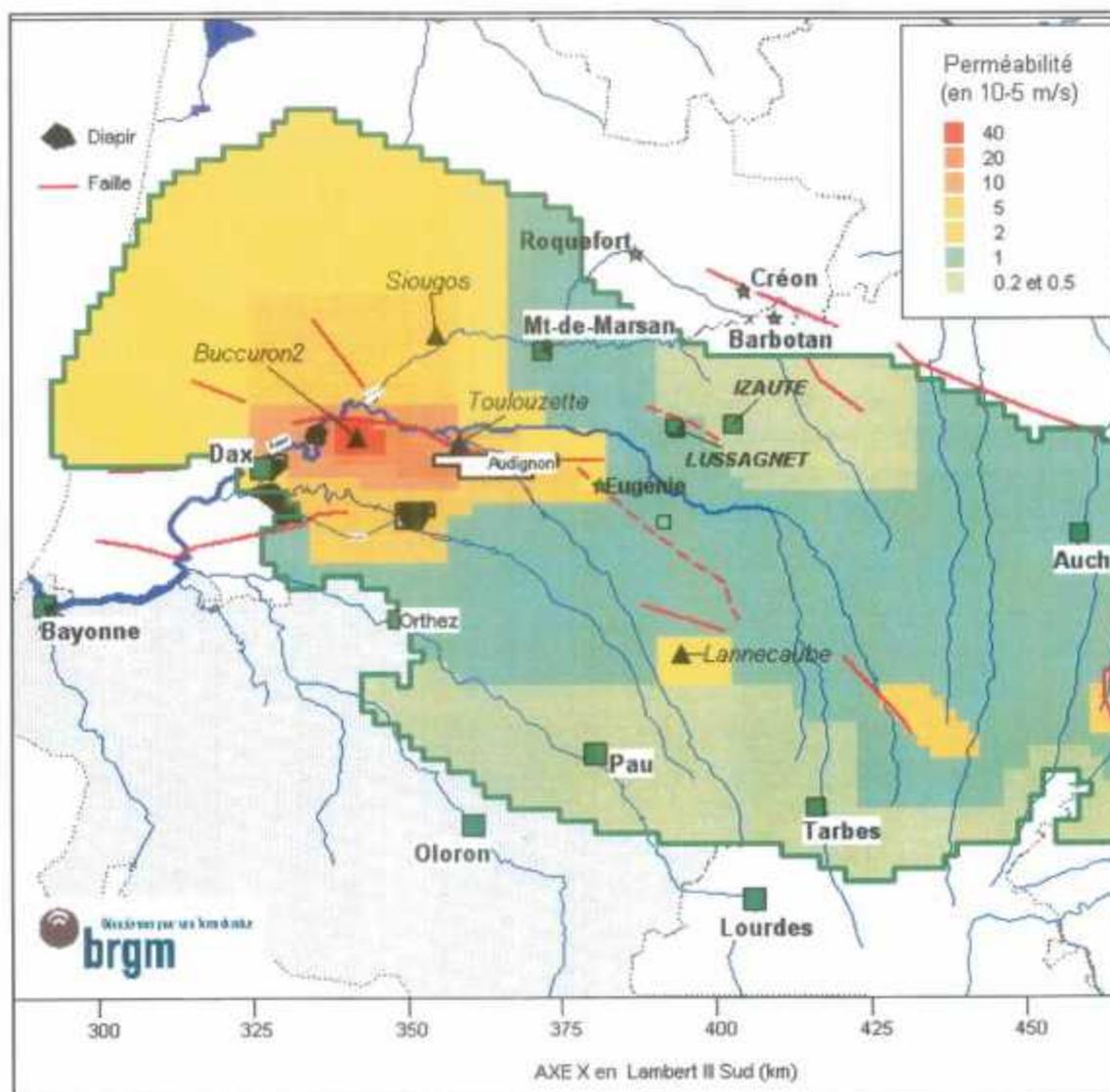


Figure 15 – Aquifère du Paléocène: champ de perméabilités.

2.3.3. Recharge

Les zones de recharge et les valeurs qui leur ont été affectées lors du calage en permanent ont été peu retouchées (tableau 18):

	Nombre de zones définies	Modifications	Valeurs en mm
Oligocène	3	inchangé	20, 30 et 50
Sables IM	5	Subdivision de zones. Recharge globalement diminuée	15, 60, 90, 100, 120
Eocène inf.	4	Subdivision de zone avec infiltration réduite	25, 75, 100 et 125
Paléocène	4	Infiltration diminuée sur une zone	20, 50, 75, 90
Sénonien sup.	3	inchangé	15, 60 et 75
Sénonien inf.	1	inchangé	50

Tableau 18 – Zones et valeurs de recharge obtenues après calage en transitoire

La plupart des points de calage sont éloignés des zones de recharge et les chroniques de ces points ne sont pas influencées par une variabilité inter-annuelle de la recharge; celle-ci a donc été maintenue constante chaque année mais elle a été attribuée aux pas de temps correspondant à l'automne et à l'hiver.

Globalement, la recharge moyenne de la nappe des Sables est de 8 800 000 m³/an (plus faible de 1 100 000 m³ que celle issue du permanent).

Les prélèvements sont donc actuellement supérieurs à la recharge calculée. Néanmoins, celle-ci reste incertaine compte tenu du peu d'information disponible pour l'évaluer.

2.4. SIMULATION

Une simulation a été réalisée sur 5 ans, au pas de temps trimestriel, de fin 2000 à fin 2005, en reportant sur ces 5 années les valeurs de prélèvements et d'injections-soutirages de gaz de l'année 2000 (ne disposant pas de ces données pour 2001 et 2002). Cette simulation constitue donc davantage un test sur l'évolution à court terme des nappes (en particulier la nappe des Sables, la mieux renseignée) en considérant une stationnarité des sollicitations (gaz et prélèvements) qu'une simulation prévisionnelle basée sur un scénario issu d'une démarche prospective.

Elle a été mise aussi à profit pour valider le calage du modèle à l'aide des données piézométriques acquises en 2001 et 2002 sur certains points du réseau et non utilisées dans la phase de calage.

Les graphiques illustrant l'évolution de la piézométrie jusqu'en 2005 sont reportés en annexe 4.

Ils mettent en évidence soit une stabilisation des niveaux déjà perceptible sur certains points en 1999 et 2000 (Lalongue, Les Bordes), soit une poursuite de la baisse dans les secteurs de Geaune, Pécorade, Bats Urgon, Garlin, Lespielle (annexe 4). Cette baisse est de l'ordre de 1 à 2 m en 5 ans.

Par ailleurs, ils montrent une bonne adéquation entre les valeurs de piézométrie acquises sur la période 2001-2002 et les valeurs calculées.



Conclusion

Cette quatrième phase de l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères profonds du Sud du Bassin Adour-Garonne confirme, par la difficulté du calage, la complexité des phénomènes hydrodynamiques sous la dépendance des structures géologiques, des communications entre couches, de la température.

De bonnes restitutions piézométriques ont été obtenues pour la partie occidentale de la nappe des Sables infra-molassiques.

La baisse des niveaux affectant cette nappe est surtout la conséquence de l'augmentation régulière des prélèvements depuis 20 ans (avec une tendance à la stabilisation ces dernières années). Mais ces prélèvements sont peut être aussi supérieurs à l'alimentation de la nappe par infiltration au niveau des affleurements: la modélisation fournit d'ailleurs une valeur moyenne de recharge annuelle de 9000000 de m³ alors que les prélèvements actuels sont de l'ordre de 12000000 de m³. Même si cette valeur de recharge doit être considérée avec prudence (faute de données en nombre suffisant pour l'évaluer précisément) la nappe des Sables est peut être en situation de déséquilibre durable (un rééquilibrage pourrait être assuré par un flux de drainance venant du Paléocène dans une zone située entre Auch et Toulouse, cf rapport de l'année 3, Réf. 17).

La simulation réalisée jusqu'en 2005 en maintenant constants les prélèvements de l'année 2000 montre que sur de nombreux points les niveaux dans les zones de pompage continuent à baisser (1 à 2 m en 5 ans suivant les points).

Pour les autres couches, sur une grande partie du domaine modélisé, des incertitudes demeurent sur les paramètres restitués par le modèle (perméabilités, emmagasinement, recharge).

La piézométrie de chaque couche est largement conditionnée par la présence ou l'absence d'épentes amortissant plus ou moins une influence subie. Par exemple, le fonctionnement saisonnier des forages géothermiques de Mont de Marsan semble influencer le forage des *Landes de Siougos* captant le Paléocène. Cette influence cyclique nettement perceptible sur la chronique de mesures est mal reproduite par le modèle (amplitude des fluctuations plus faible et déphasage). L'interprétation des fluctuations observées à Lacquy doit aussi être confirmée (influence des fluctuations de niveau de la nappe du Crétacé dans le secteur de Roquefort ?).

Localement, un retour à la géologie s'avère donc nécessaire.

Il est aussi nécessaire:

- de poursuivre l'acquisition de données sur les points du réseau actuel. La nappe des Sables, en baisse, doit faire l'objet d'un suivi régulier.
- de vérifier les aquifères effectivement captés par certains points (Puymaurin) et tenter d'expliquer le comportement de certains autres (Lembeye).
- d'implanter si possible quelques points de contrôle supplémentaire, en particulier dans le Paléocène en dehors de la région d'Audignon.
- de collecter systématiquement les prélèvements effectués dans les nappes, action indispensable en matière de gestion de la ressource.

Enfin, comme annoncé en année 3, pour mieux représenter les singularités locales (émergences de Dax, structures anticlinales d'Audignon et de Barbotan) des modèles locaux à maillages plus fins doivent être construits.

Bibliographie

1] ANDRE L. – 2002 – Contribution de la géochimie à la connaissance des écoulements souterrains profonds. Application à l'aquifère des Sables infra-Molassiques du Bassin Aquitain.

Thèse Université de Bordeaux 3 – Institut EGID.

2] ARMAND C., CAPDEVILLE J.P. – 1992 - Etude géologique et hydrogéologique régionale autour du site des Landes de Siougos (40).

Rapport BRGM R 34423 AQI- 4S 92.

3] ARMAND C., CAPDEVILLE J.P. – 1994 - Etude géologique et hydrogéologique autour du site des Landes de Siougos (40). Phase II . Volet géologie – Volet hydrogéologie.

Note technique BRGM N 1451 BOR 4S 94.

4] BEL F. MOREAU C.F. – 1989 – Etude des exutoires de l'aquifère inframolassique autour du stockage de gaz d'Izaute.

Rapport BRGM 89 SGN 689 MPY.

5] BENHAMMOUDA S., MAUROUX B. , SOURISSEAU B. 1996 – Aquifère des Sables infra-molassiques en régions Aquitaine et Midi-Pyrénées. Etat de connaissances et suivi piézométrique à fin 1995.

Rapport BRGM R40790

6] BENHAMMOUDA S., RICARD J., SCHOEN R., SEGUIN J.J., SOURISSEAU B. 1999 – Surveillance des systèmes aquifères des Sables infra-molassiques et Dano-Paléocène en régions Aquitaine et Midi-Pyrénées. Etat de connaissances et suivi piézométrique à fin 1998.

Rapport BRGM R40790.

7] BENHAMMOUDA S., SCHOEN R., SOURISSEAU B. 2000 – Surveillance des systèmes aquifères des Sables infra-molassiques et Dano-Paléocène en régions Aquitaine et Midi-Pyrénées. Etat de connaissances et suivi piézométrique à fin 1999.

Rapport BRGM RP50322-FR

8] BERARD P., SOURISSEAU B. – 1999 - Ressources thermales du Bas-Adour. Actualisation et régularisation des données, piézométrie, protection globale de la ressource.

Rapport BRGM R40011.

9] BERARD P., CHERY L., LOPOUKINE M., PLATEL J.P., SOURISSEAU B. 1997 : Synthèse des connaissances hydrogéologiques sur les ressources thermo-minérales du Bas-Adour. Rapport BRGM R39396.

10] BERARD P., LACHASSAGNE P., SEGUIN J.J., SOURISSEAU B. – 1999 - Synthèse des connaissances sur la ressource thermique du Bas-Adour. Recommandations de protection et de suivi.

Rapport BRGM R40539

- 11] BOURGINE B., CAPDEVILLE J.P., SCHOEN R., SEGUIN J.J., SOURISSEAU B. 1999 Outil de gestion des systèmes aquifères du Sud du bassin Adour-Garonne. Base de données géoréférencées et modèle conceptuel..
Rapport BRGM R40633.
- 12] BOURGINE B., CAPDEVILLE J.P., RAZIN P., SOURISSEAU B., VAIRON J. -1997 - Outil de gestion des systèmes aquifères du Sud du bassin Adour-Garonne. Concept géologique et hydrogéologique.
Rapport BRGM R39538.
- 13] CHAPOTIN D. – 1994 – Hydrogéologie des Sables infra-molassiques dans l'environnement des stockages.- Rapport SNEAP EP/P/F/GIS N° 93/562.
- 14] EYGUN P.J. – 1988 – Modélisation de la nappe aquifère infra-molassique.
Rapport SNEAP EP/S/DEL/ECS N° 88 7339.
- 15] LABAT N. - 1998 - Rôle de particularités sédimentaires et structurales sur le comportement de l'aquifère des Sables sous-molassiques soumis aux fluctuations induites par des stockages souterrains de gaz. Application à l'étude de leur influence sur l'hydrodynamisme des émergences locales. - Thèse Université de Bordeaux III.
- 16] LE POCHAT G., SOURISSEAU B. – 1993 – Note d'expertise sur l'état des connaissances autour des stockages d'Izaute et Lussagnet.
Rapport BRGM R 37559 SGN SP 93.
- 17] SCHOEN R., SEGUIN J.J., SOURISSEAU B. 2000 - Outil de gestion des systèmes aquifères du Sud du bassin Adour-Garonne. Modèle hydrodynamique – Etape de calage en régime permanent.
Rapport BRGM RP-50241-FR.
- 18] ANTEA – 2000 – Renforcement des ressources en eau potable des syndicats de Mugron, des Eschourdes et de Marseillon (40): étude hydrogéologique du secteur compris entre Saint Aubin et Buanes (2^{ième} phase). - Rapport ANTEA A 20380- Version B.
- 19] BEICIP – 1987 – Barbotan – Interaction de l'exploitation des stockages de gaz sur le comportement des aquifères. Volumes 1 et 2.
- 20] CNRS – 1993 – Traitement des chroniques de débits et de piézométrie relatives à l'aquifère profond nord-pyrénéen dans la région de Mont de Marsan.
Note technique BRGM N 0995 BOR 4S 93.
- 21]] GDF - 1994 - Demande d'autorisation de stockage de gaz combustible dans la région des Landes de Siougos. Etude d'impact, volume III : étude des effets du stockage de gaz sur l'hydrodynamisme des aquifères profonds.
Rapport GdF/DR/Dép. Réservoirs Souterrains.

ANNEXE 1

Historique des prélèvements dans les nappes

Prélèvements AEP(m³/an) dans la nappe des Sables infra-molassiques:

	BORDES 1	BORDES 2	BORDES 3	BORDES 4
1980				
1981				
1982				
1983				
1984				
1985				
1986	24586	1342687	1228071	90030
1987	123255	211455	696602	641466
1988	198512	205933	674531	815732
1989	290600	480062	809294	434641
1990	359086	799356	441806	744532
1991	118182	555308	851435	1097647
1992	280941	648930	1040842	314419
1993	285073	1210000	852777	543363
1994	117970	1042763	1306612	1098352
1995	60767	772506	1280867	963785
1996	0	690054	1359251	790293
1997	0	802388	1444495	1050292
1998	119213	584989	1177455	756253
1999	410114	681983	1276010	755660
2000	306077	700769	1386060	760611

	GARLIN	PECORADE 1	GEAUNE 2	GEAUNE 3	GEAUNE 4
1980		295404	2365500		
1981		383988	2418400		
1982		268340	2520800		
1983	51223	274029	2736100		
1984	52000	290298	2789200		
1985	78230	151502	206004	2812911	
1986	114316	0	1565623	1330000	
1987	159187	0	2507600	0	
1988	173029	0	2634900	0	
1989	169786	0	2262000	0	
1990	178310	0	2223600	2223600	
1991	275122	0	2100100	485712	
1992	319518	0	1935500	794624	187697
1993	304537	0	1888600	509800	588962
1994	309027	0	2122711	570345	423401
1995	306617	0	1103866	238379	390344
1996	264824	0	610365	692565	1345319
1997	270683	0	1213200	1247730	706923
1998	266764	0	1528175	686656	913797
1999	287387	0	1257347	877958	1069752
2000	293259	0	1319510	1187291	892047

Prélèvements AEP(m³/an) dans la nappe des Sables infra-molassiques

	GONDRIN	DEMU	CASTERA	PLEHAUT	NOGARO 2
1985					
1986					
1987	0				
1988	?				
1989	?				
1990	?				
1991	300000		0		
1992	468000	0	100000		
1993	468000	61500	100000		
1994	489000	180000	114702		
1995	281600	181000	109170		315500
1996	654900	185800	113685	0	310700
1997	625926	183400	91723	236831	206668
1998	626257	190392	109062	703770	547297 *
1999	602601	194064	107228	729190	342894
2000	600000	195000	135191	757450	?

* avec prélèvements industriels

Prélèvements agricoles (m³/an) dans la nappe des Sables infra-molassiques

	BATS URGON	LESPIELLE1	LESPIELLE2
1982		609140	244140
1983		294880	51220
1984		327750	77896
1985		224296	133094
1986		187651	141441
1987		261300	182728
1988	617870	178650	173000
1989	1172639	395200	66640
1990	1289530	400000	70000
1991	725464	320000	140000
1992	96123	61000	18450
1993	368490	250650	108500
1994	1142079	901684	374200
1995	434257	245000	738500
1996	705074	217590	120884
1997	86500	13600 ?	0
1998	141791	155112	0
1999	460628	51688 ?	43940 ?
2000	200000	59100 ?	47300 ?

Prélèvements industriels (m³/an) dans la nappe des Sables infra-molassiques

	PECORADE 101	LE HOUGA	NOGARO 2	LAMAZERE Géothermie
1986				271560
1987	365720			314300
1988	246752			210000
1989	194085			
1990	110280			
1991	130939	20500		60000
1992	166294	19800		243000
1993	183073	30159		243000
1994	179255	49644		193000
1995	98189		3600	324000
1996	77871	53232	222000	275400
1997	18144	33522	144699	275400
1998	1185	30975	cf AEP	275400
1999	1250	31333	344396	275400
2000	3000	30000	?	275400

**Prélèvements thermaux (m³/an) à Barbotan et à Lectoure
dans la nappe des Sables infra-molassiques**

	BARBOTAN B102 et B103	BARBOTAN LOTUS 1 et 2
1991-1	80176	
1991-2	152616	
1991-3	141791	
1991-4	160743	
1992-1	68696	
1992-2	169344	
1992-3	179281	
1992-4	174567	
1993-1	109866	
1993-2	195524	
1993-3	203316	
1993-4	168102	103268
1994-1	121454	83447
1994-2	182695	124481
1994-3	179312	127575
1994-4	147593	104470
1995-1	150178	97506
1995-2	192874	94403
1995-3	193203	86137
1995-4	147704	62644
1996-1	102983	58182
1996-2	161069	88047
1996-3	164046	99843
1996-4	113694	63185
1997-1	96652	52557
1997-2	120502	77142
1997-3	122732	52859
1997-4	106627	32548
1998-1	100000	50000
1998-2	130000	80000
1998-3	130000	70000
1998-4	117678	38893
1999-1	91039	63616
1999-2	138159	89271
1999-3	162318	86606
1999-4	148875	56655

Lectoure:

1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
263000	263000	216000	144400	194400	58440	

ANNEXE 2

Conversion d'une mesure piézométrique influencée par la température et la minéralisation de l'eau en charge d'eau douce équivalente

Pour particulariser le problème, on considère un piézomètre permettant d'effectuer des mesures au toit d'un aquifère thermal. On désigne par z_{toit} la cote du point de mesure, où la pression est p_{toit} , la température T_{toit} et la salinité C_{toit} (figure 1). La colonne d'eau dans ce piézomètre est supposée en équilibre thermique avec l'encaissant.

Soit z_{obs} la mesure de niveau effectuée dans le piézomètre. Le problème consiste à passer de la mesure z_{obs} à la hauteur équivalente H_d calculée avec une masse volumique de référence ρ_d :

$$H_d = \frac{p_{\text{toit}}}{\rho_d g} + z_{\text{toit}}$$

Il faut donc préalablement calculer la pression au toit de la nappe p_{toit} .

Calcul de la pression au toit de la nappe

Lorsque la colonne d'eau dans le piézomètre présente, entre le fond et la surface, une stratification thermique et chimique, la pression au toit de la nappe doit être calculée en tenant compte de la variation de la masse volumique en fonction des profils de température et de salinité. Il s'agit donc d'une sommation exprimée par :

$$p_{\text{toit}} = \int_{z_{\text{toit}}}^{z_{\text{obs}}} \rho(z) \cdot g \cdot dz = \int_{z_{\text{toit}}}^{z_{\text{obs}}} \rho(p(z), T(z), C(z)) \cdot g \cdot dz$$

1) Données nécessaires

• Géométrie

- Profondeur du toit de l'aquifère Pr_{toit} (ou bien la cote z_{toit} par rapport au plan de référence)
- Profondeur du niveau d'eau Pr_{niv} observé dans le forage (ou bien la cote z_{obs})

On en déduit la hauteur de la colonne d'eau observée au dessus du toit

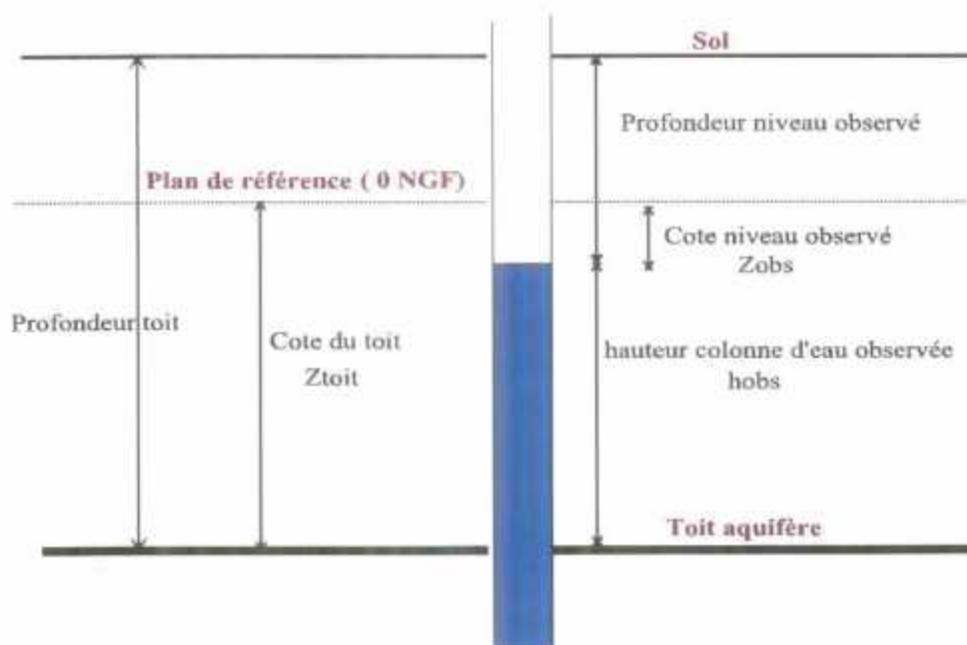
$$h_{\text{obs}} = Pr_{\text{toit}} - Pr_{\text{niv}} = z_{\text{toit}} - z_{\text{obs}}$$

• Température

- Température au toit de l'aquifère (T_{toit})
- Température de surface (T_{surf})

En l'absence de données sur le profil thermique dans la colonne, on peut admettre une variation linéaire de la température le long de la colonne entre T_{toit} et T_{surf} :

$$T(z) = \frac{T_{\text{toit}} - T_{\text{surf}}}{z_{\text{toit}} - z_{\text{obs}}} (z - z_{\text{obs}}) + T_{\text{surf}}$$



Z_{toit} cote du toit de la nappe captive

Z_{obs} cote mesurée de la surface libre de la colonne d'eau

h_{obs} hauteur de la colonne d'eau observée

h_{equ} hauteur de la colonne d'eau équivalente

$T(z)$ température à la cote z

$C(z)$ salinité à la cote z

$\rho(z)$ masse volumique à la cote z , variable en fonction de $T(z)$, $p(z)$ et $C(z)$

ρ_d masse volumique constante de la colonne d'eau équivalente

Schéma précisant les notations utilisées

•**Salinité**

S'il n'y a pas de données sur le profil de salinité, on prendra une valeur constante sur toute la hauteur du tubage, égale à celle mesurée ponctuellement (ou bien une valeur moyenne s'il y a quelques mesures).

2) Calcul de l'intégrale

On subdivise la colonne d'eau en n tronçons de hauteur Δz_i ($i = 1, n$) à chacun desquels on affecte la température T_i , la salinité C_i et la pression p_i mesurée à la cote moyenne z_i du tronçon :

$$\text{Int}(\rho) = \int_{z_{\text{toit}}}^{z_{\text{obs}}} \rho(z) \cdot dz = \sum_{i=1}^n \rho(T_i, C_i, p_i) \Delta z_i$$

Les formules disponibles pour le calcul de la masse volumique en fonction de la pression de la température et de la salinité sont présentées au paragraphe suivant.

Remarque : en principe, pour calculer la masse volumique à une cote donnée, il faut y connaître la pression, elle même fonction de la masse volumique, inconnue. Le calcul devrait donc être itératif. En fait, la dilatibilité de l'eau étant prépondérante sur la compressibilité (en termes de variation par rapport à un état donné), on peut prendre comme approximation de la pression celle qui équivaut à la hauteur de la colonne au dessus de la cote considérée, sans que cela ne nuise vraiment à la précision des calculs.

3) Masse volumique moyenne de la colonne d'eau équivalente :

$$\rho_m = \frac{1}{z_{\text{obs}} - z_{\text{toit}}} \int_{z_{\text{toit}}}^{z_{\text{obs}}} \rho(z) \cdot dz$$

Le calcul de la masse volumique en fonction de la pression, de la température et de la salinité peut être effectuée en utilisant la formule mise au point par A.M. Rowe et J.C.S. Chou (*Pressure-Volume-Temperature-Concentration Relation of Aqueous NaCl Solutions - Journal of Chemical and Engineering Data - Vol.15 n° 1-1970*).

La formule de Rowe et Chou (réf. 5), établie pour des solutions de NaCl et ajustée sur des données validées par la 3^{ème} "International Conference on Steam Tables", fournit le volume spécifique du fluide (en cm³/g):

$$\Omega(p, T, C) = \alpha(T) - p \cdot \beta(T) - p^2 \cdot \gamma(T) + C \cdot \delta(T) + C^2 \cdot \varepsilon(T) - C \cdot p \cdot X(T) - C^2 \cdot p \cdot \lambda(T) - \frac{C \cdot p^2 \cdot \eta(T)}{2}$$

La masse volumique est alors:

$$\rho(p, T, C) = \frac{1}{\Omega} \text{ en g/cm}^3$$

p est la pression exprimée dans cette formule en **kgf.cm²** (et non en m de hauteur d'eau)

S est la salinité en **kg NaCl / kg de solution** (et non en g/l)

T est la température absolue en **°K** (et non en °C)

Les différentes fonctions de la température sont :

$$\begin{aligned}\alpha(T) &= a(1,1) + a(1,2).T + a(1,3).T^2 + a(1,4)/T + a(1,5)/T^2 \\ \beta(T) &= a(2,1) + a(2,2).T + a(2,3).T^2 + a(2,4)/T + a(2,5)/T^2 \\ \gamma(T) &= a(3,1) + a(3,2).T \\ \delta(T) &= a(4,1) + a(4,2).T + a(4,3).T^2 \\ \epsilon(T) &= a(5,1) + a(5,2).T + a(5,3).T^2 \\ X(T) &= a(6,1) + a(6,2).T + a(6,3).T^2 \\ \lambda(T) &= a(7,1) + a(7,2).T + a(7,3).T^2 \\ \eta(T) &= a(8,1) + a(8,2).T + a(8,3).T^2\end{aligned}$$

les coefficients $a(i,j)$ sont donnés dans le tableau ci-dessous.

I	J	1	2	3	4	5
1		5.916365	-1.035794E-2	9.270048E-6	-1.127522E3	1.006741E5
2		5.204914E-3	-1.0482101E-5	8.328532E-9	-1.1702939	1.022783E2
3		1.18547E-8	-6.599143E-11			
4		-2.5166	1.11766E-2	-1.70552E-5		
5		2.84851	-1.54305E-2	2.23982E-5		
6		-1.4814 ^{E-3}	8.2969E-6	-1.2469E-8		
7		2.7141 ^{E-3}	-1.5391 ^{E-5}	2.2655 ^{E-8}		
8		6.2158 ^{E-7}	-4.0075 ^{E-9}	6.5972 ^{E-12}		

Le domaine de validité de la formule de Rowe et Chou est :

Température de 0 à 175°C
Salinité de 0 à 0.25 kg NaCl / kg de solution
Pression jusqu'à 350 kgf/cm² (soit 3.43 10⁷ Pa)

4) Calcul de la charge d'eau douce en fonction de la piézométrie observée.

La hauteur h_d de la colonne d'eau "douce" de masse volumique constante ρ_d , qui exerce la même pression (au toit de la nappe captée) que la colonne observée dont la masse volumique varie de la base de la colonne (le toit de la nappe captée) à la surface libre, de cote z_{obs} , est telle que:

$$\rho_d \cdot g \cdot h_d = p_{toit} = \int_{z_{toit}}^{z_{obs}} \rho(z) \cdot g \cdot dz = \rho_m \cdot g \cdot (z_{obs} - z_{toit}) = \rho_m \cdot g \cdot h_{obs}$$

D'où :

$$h_d = \frac{1}{\rho_d} \int_{z_{toit}}^{z_{obs}} \rho(z) \cdot dz = \frac{\rho_m}{\rho_d} h_{obs}$$

La charge d'eau douce équivalente au toit de la nappe est alors :

$$H_d = z_{\text{toit}} + \frac{1}{\rho_d} \int_{z_{\text{toit}}}^{z_{\text{obs}}} \rho(z) \cdot dz$$

ou encore, en introduisant la masse volumique moyenne ρ_m

$$H_d = z_{\text{toit}} + \frac{\rho_m}{\rho_d} h_{\text{obs}} = z_{\text{toit}} + \frac{\rho_m}{\rho_d} (z_{\text{obs}} - z_{\text{toit}})$$

soit, z_{obs} n'étant autre que la hauteur piézométrique H_{obs} par rapport au plan de référence:

$$H_d = \frac{\rho_m}{\rho_d} H_{\text{obs}} + \left(1 - \frac{\rho_m}{\rho_d}\right) z_{\text{toit}} \quad \text{[HD1]}$$

ou encore, connaissant la hauteur de la colonne d'eau dans le piézomètre ($h_{\text{obs}} = Pr_{\text{toit}} - Pr_{\text{niv}}$) et la piézométrie observée H_{obs} ($H_{\text{obs}} = z_{\text{obs}}$) :

$$H_d = h_d + (H_{\text{obs}} - h_{\text{obs}})$$

$$h_d = \frac{\text{Int}(\rho)}{\rho_d} \quad \text{[HD2]}$$

Application à l'aquifère thermal de Dax

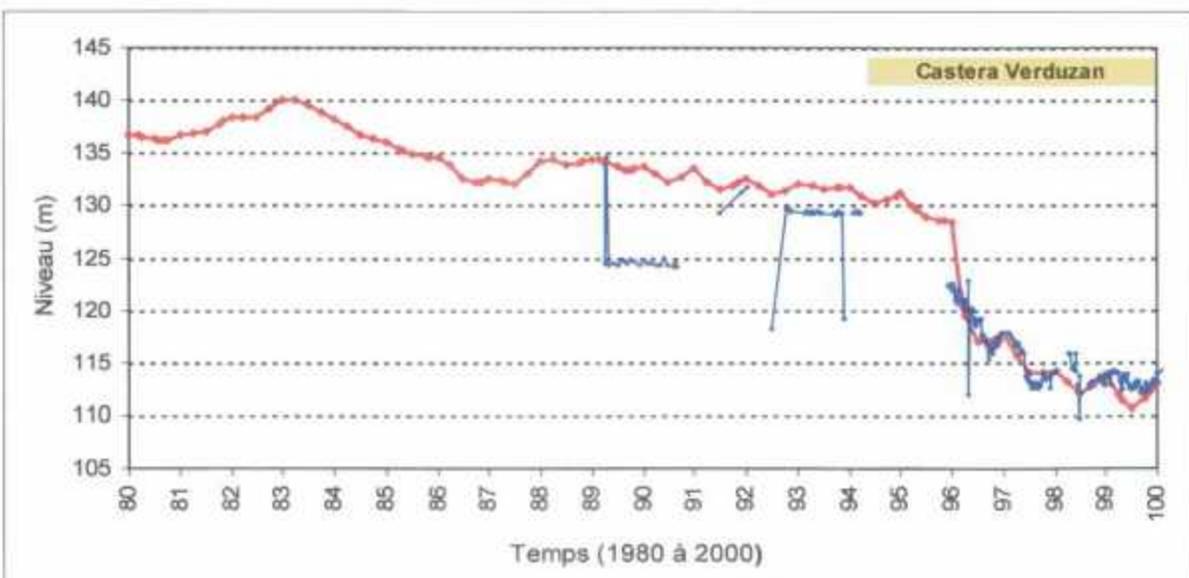
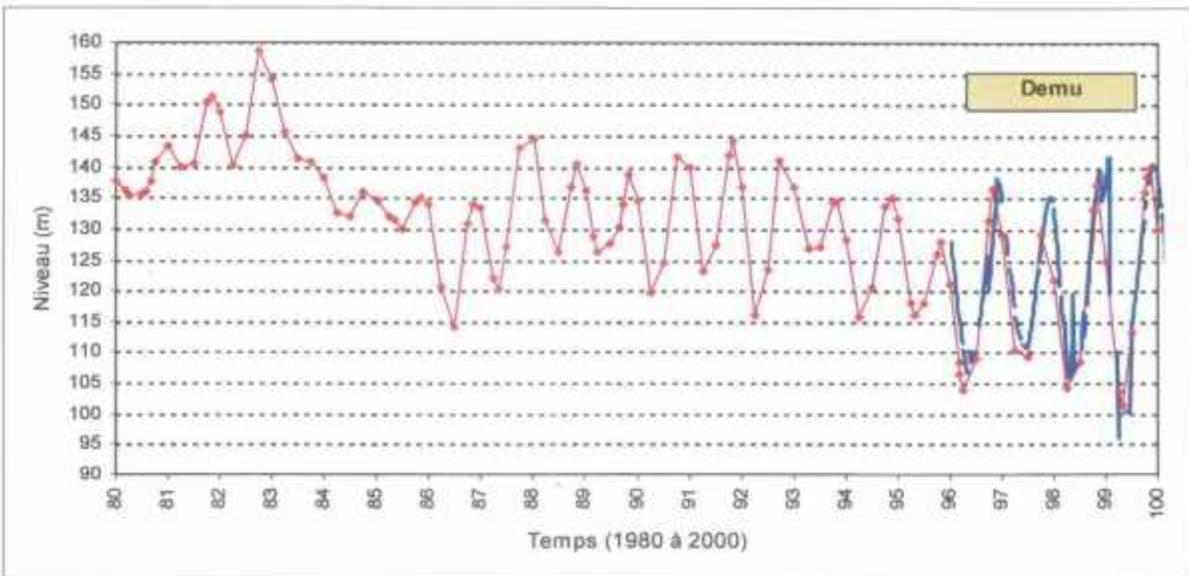
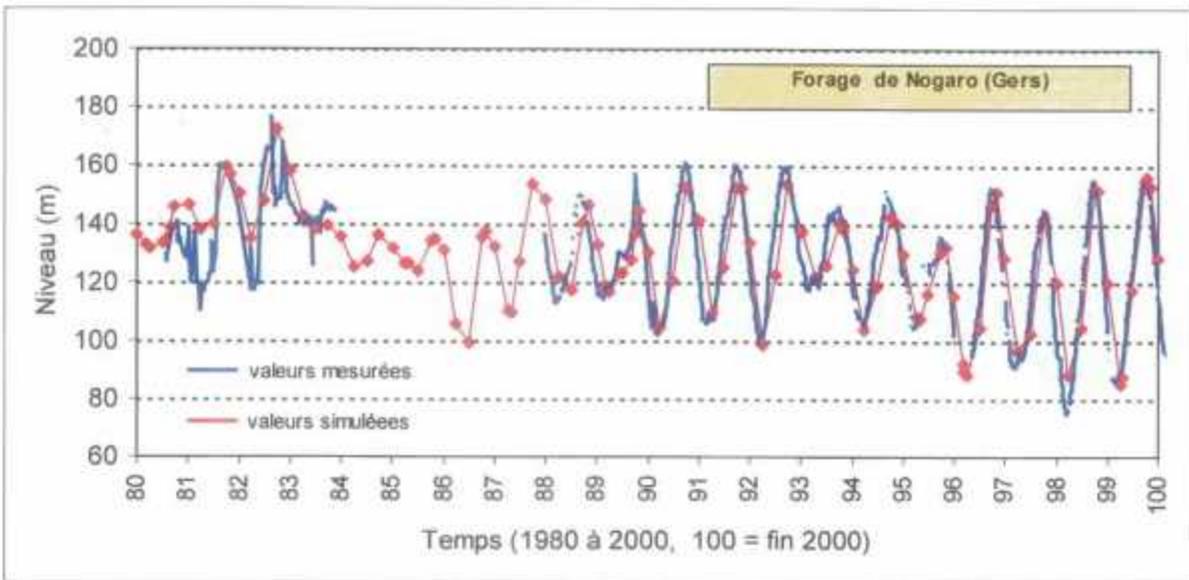
Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau ci-dessous pour les forages dont la température est supérieure à 30°C.

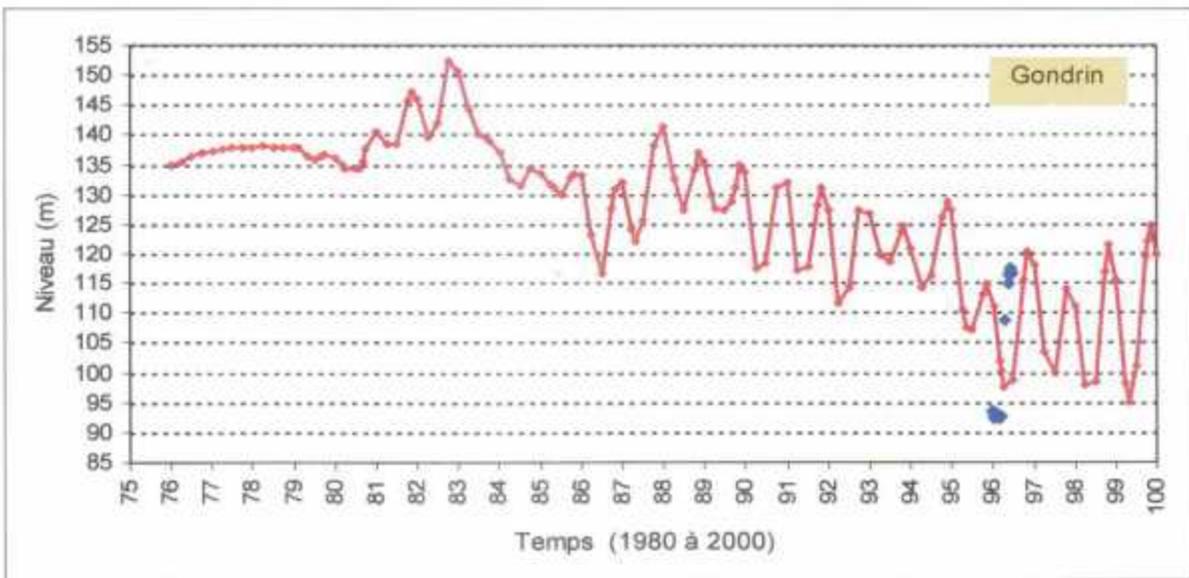
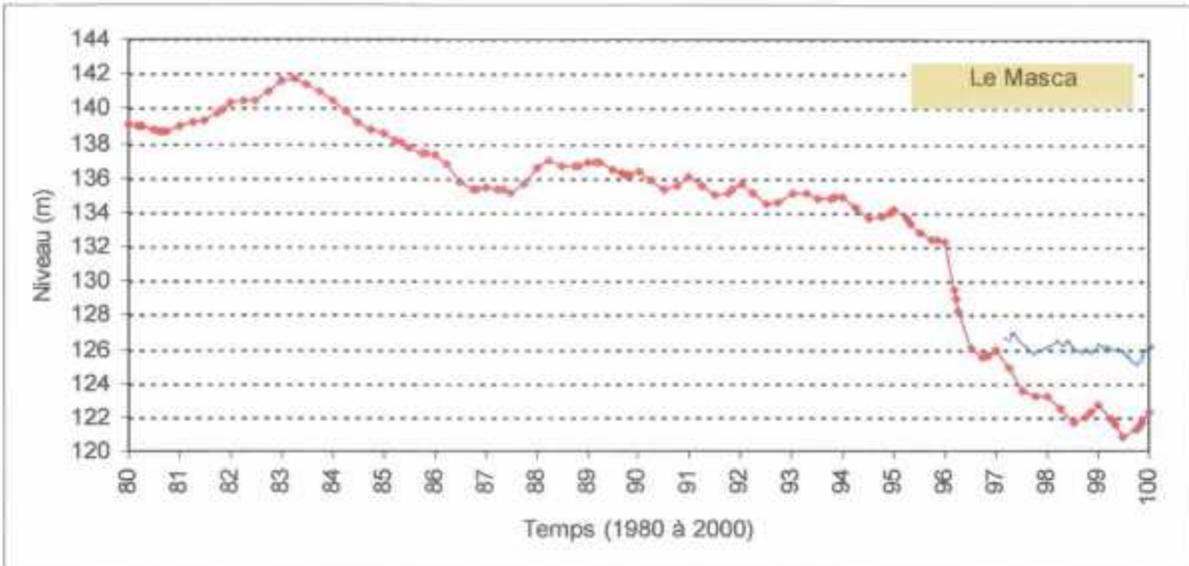
Ouvrage	X	Y	Mesure piézo (m)	Charge eau douce équivalente (m)
GDX1	323.68	3161.95	-13.51	-14.91
SPDX1	325.77	3164.05	-11.1	-17.62
Gourbera	328.7	3171	24.3	16.53
Sébastopol	321.66	3165.77	-0.2	-4.8
Boulogne 2	325.9	3162.72	5.02	-7.02
Baignots 4	326.02	3162.63	4.77	-5.97
Fne Chaude	326.9	3162.4	5.9	-8.40
PI Course	327.08	3162.39	6.66	-8.03
Elvina	327.26	3162.42	4.5	-9.71
St Christophe	327.4	3162.65	3.25	-8.44
Roth	327.4	3162.4	-1.59	-3.09
Stade	327.3	3162.55	-1.91	-4.14
Berar	316.08	3159.95	10	8.54
Hourat	316.08	3159.92	9.5	6.07
Raja	316.08	3159.79	7.5	4.34

ANNEXE 3 A

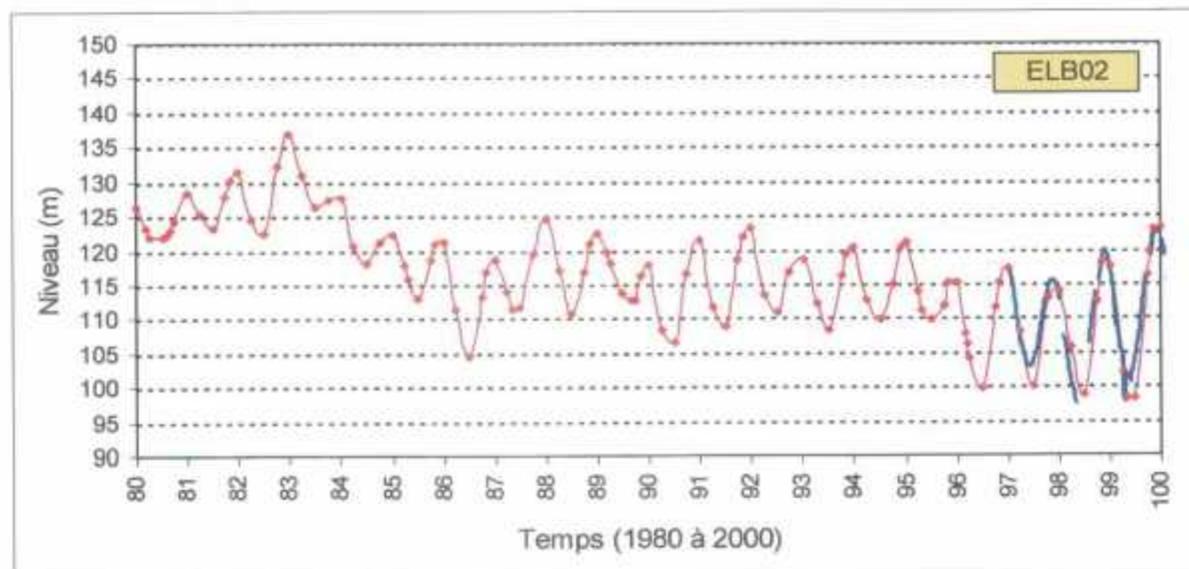
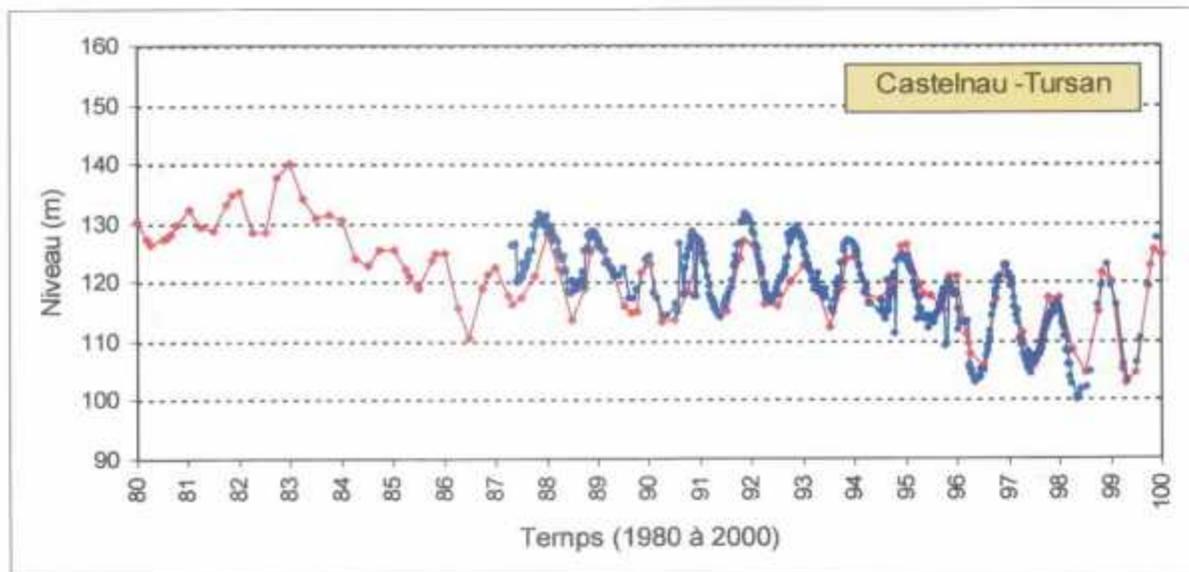
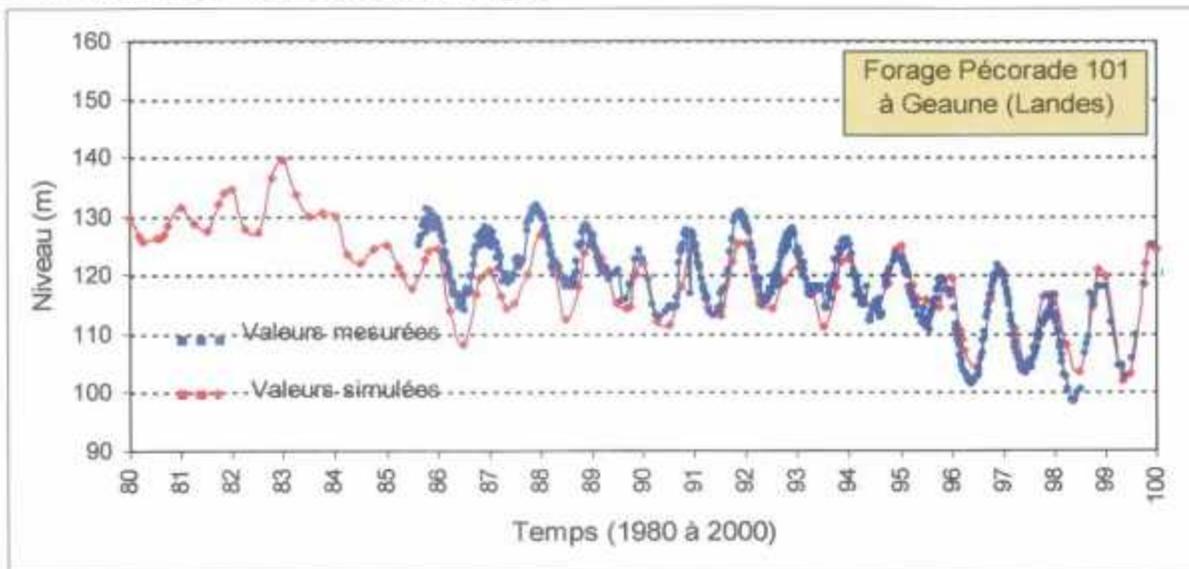
**Nappe des Sables infra-molassiques.
Comparaison des chroniques piézométriques
observées et calculées.**

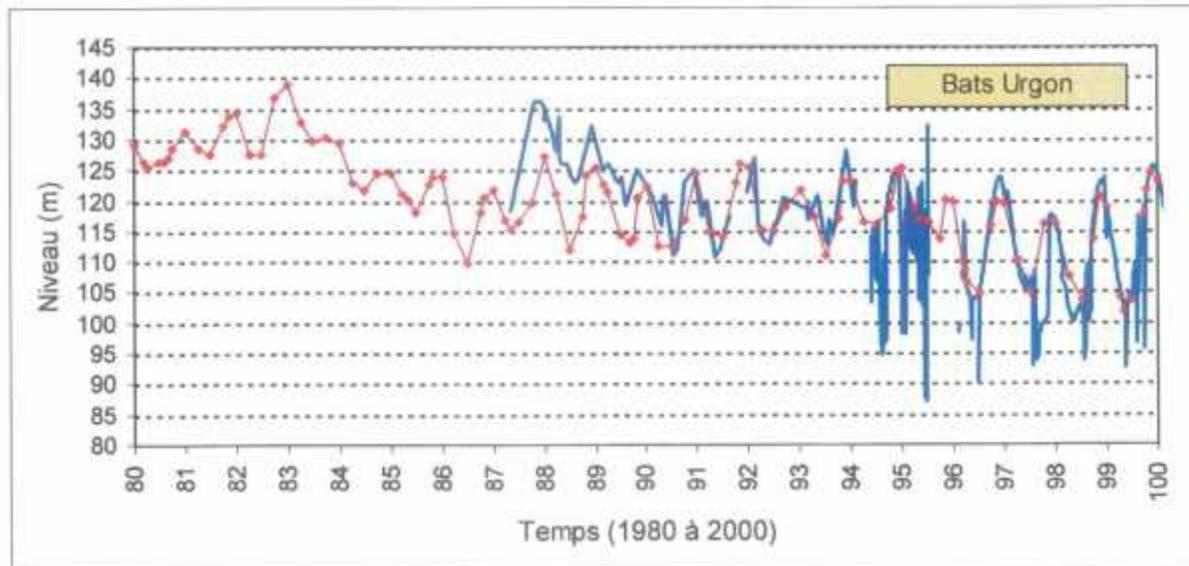
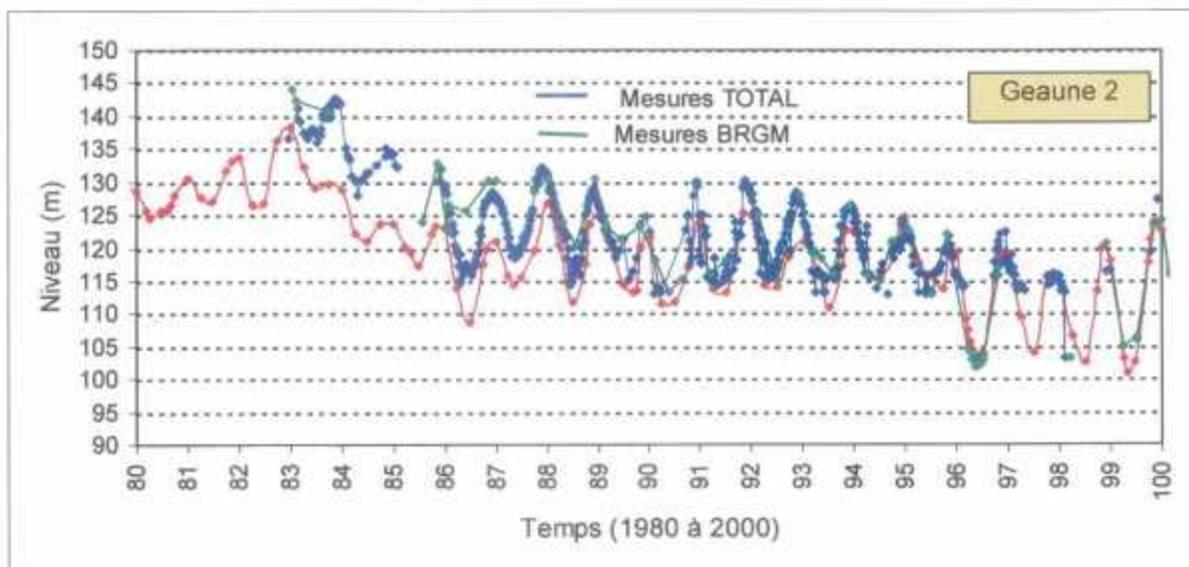
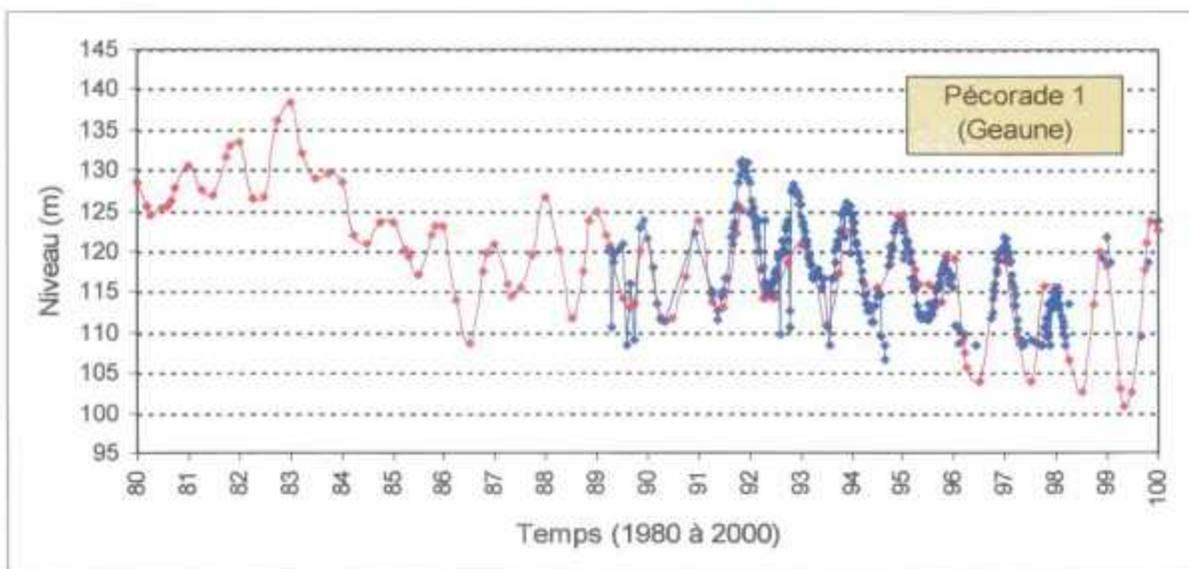
1 - Secteur Nord-Est des stockages



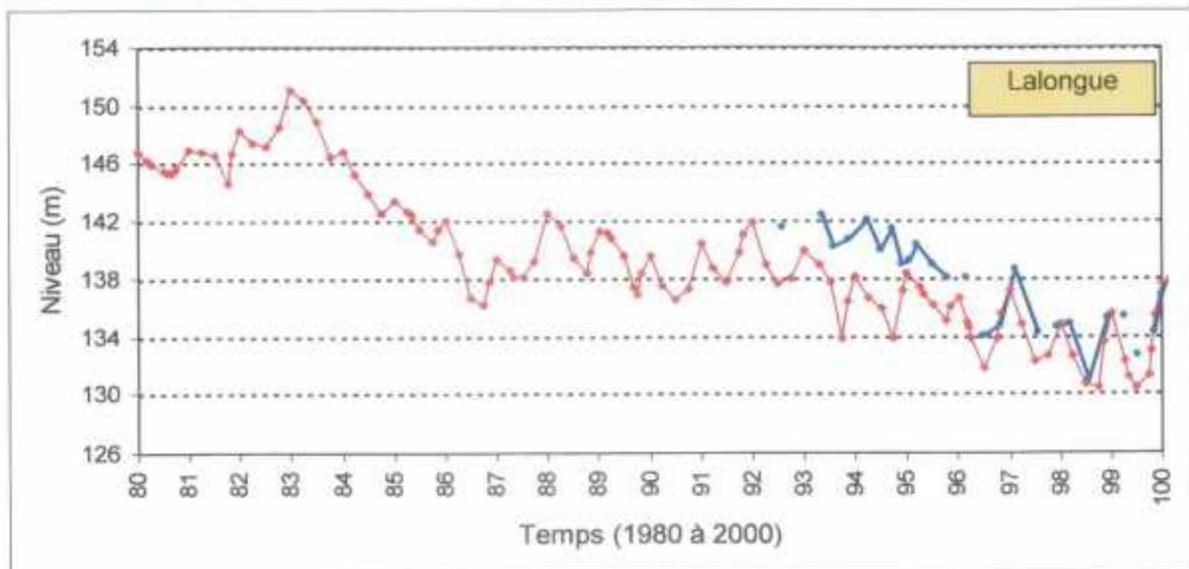
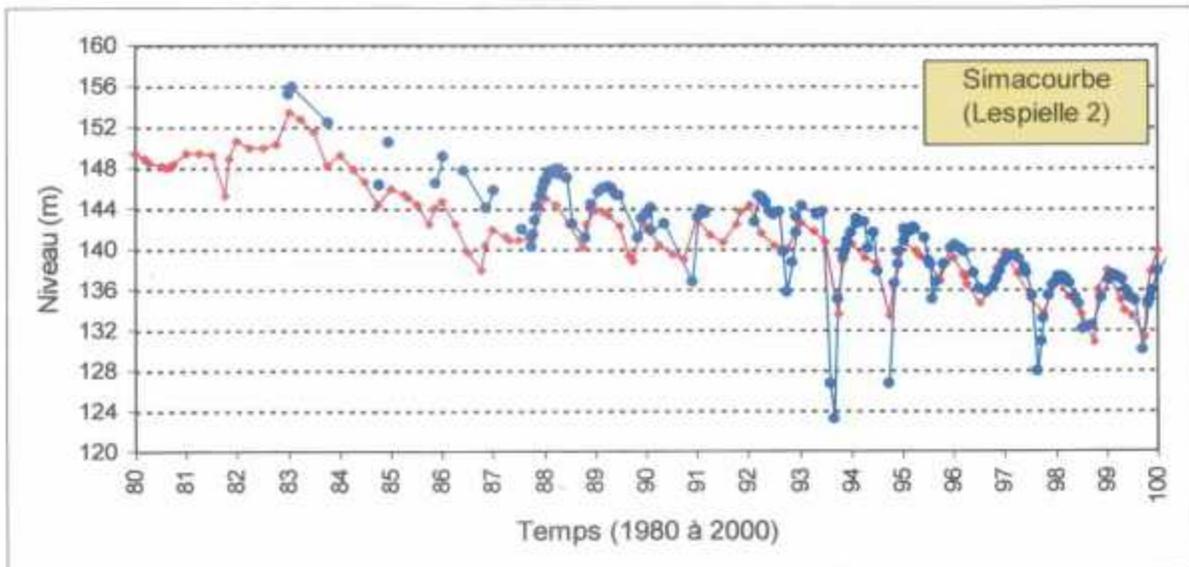
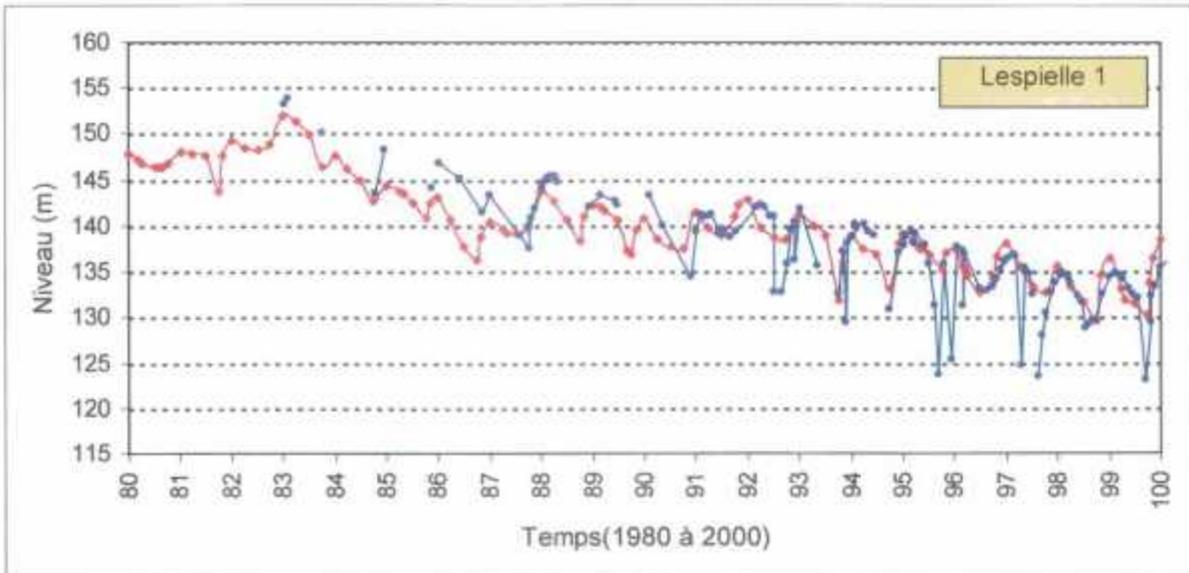


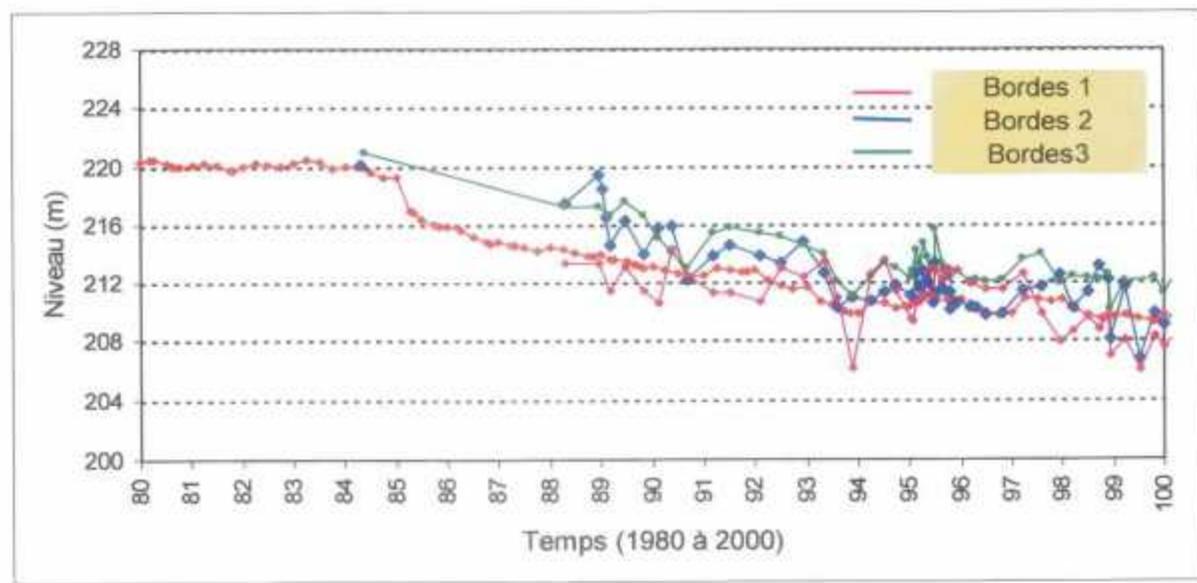
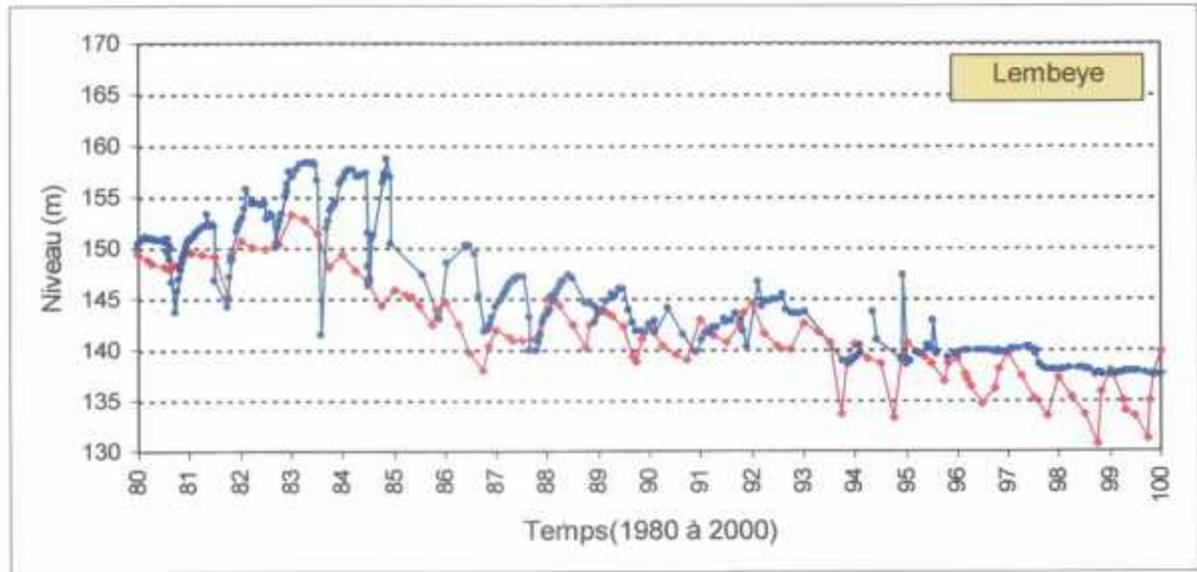
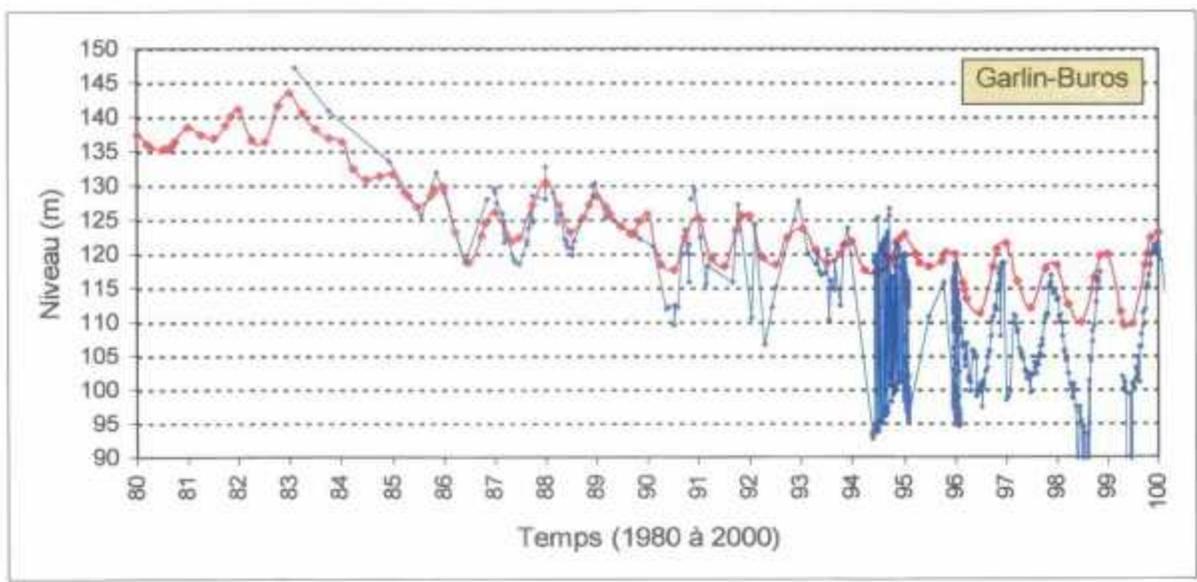
2 -Secteur Sud-Ouest des stockages



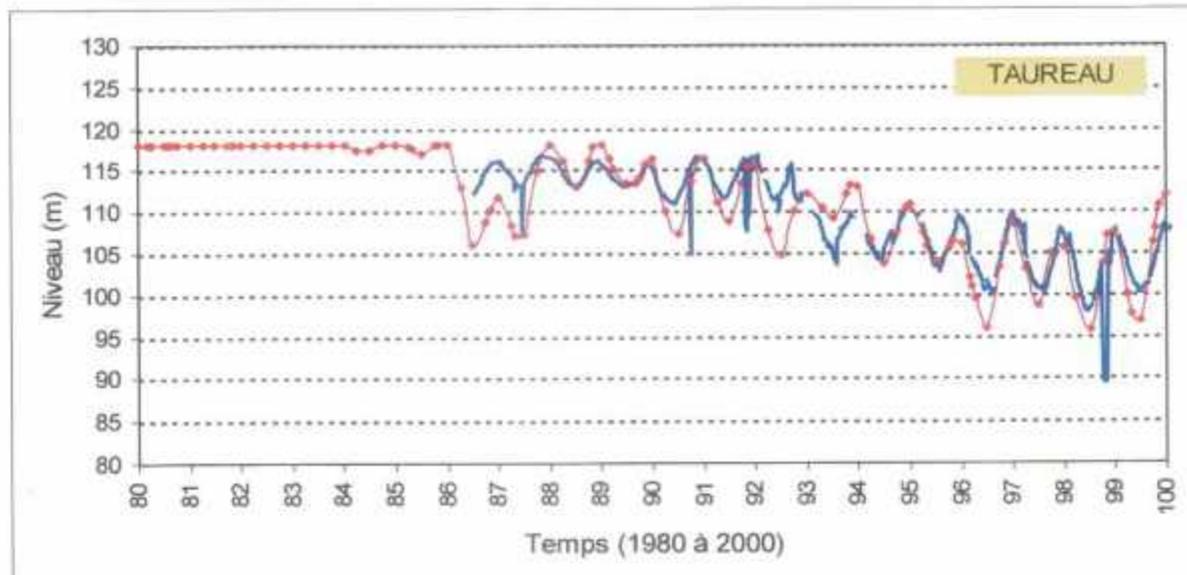
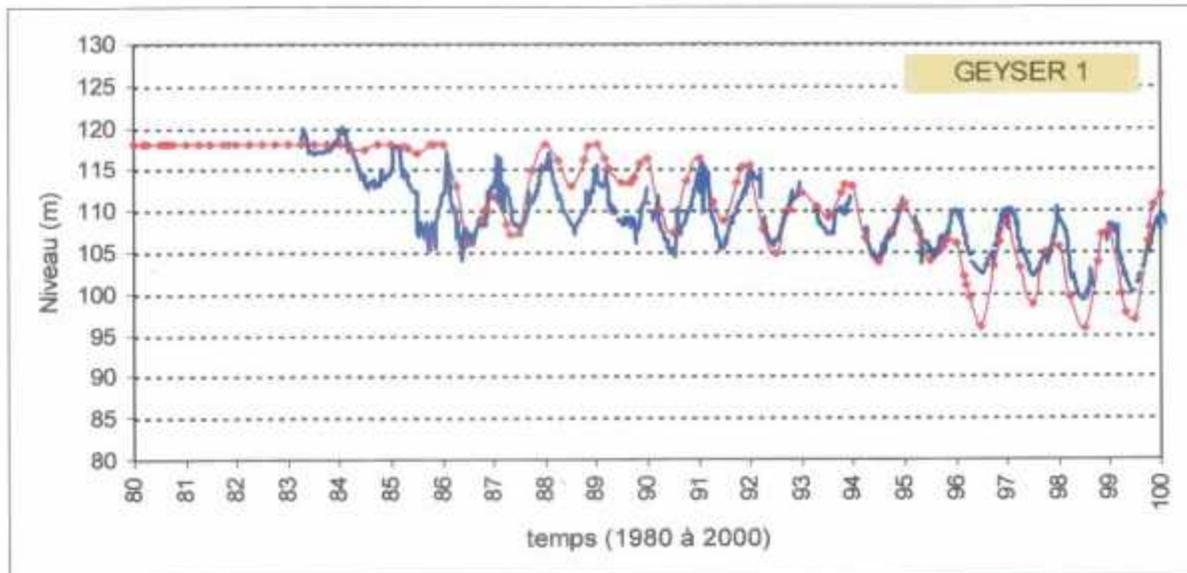
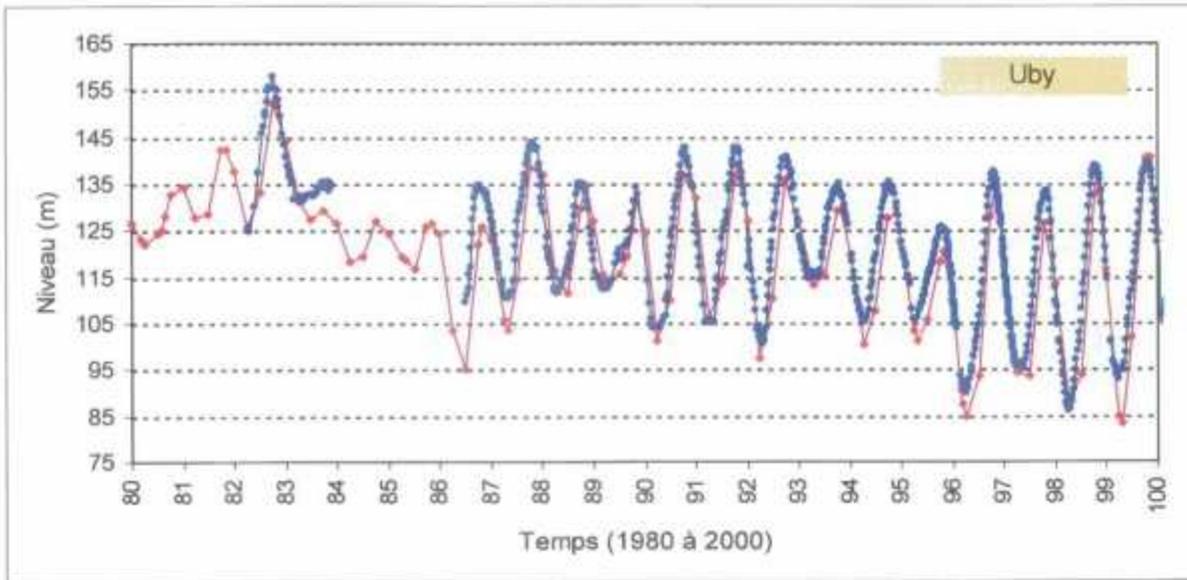


3- Secteur Sud de Geaune





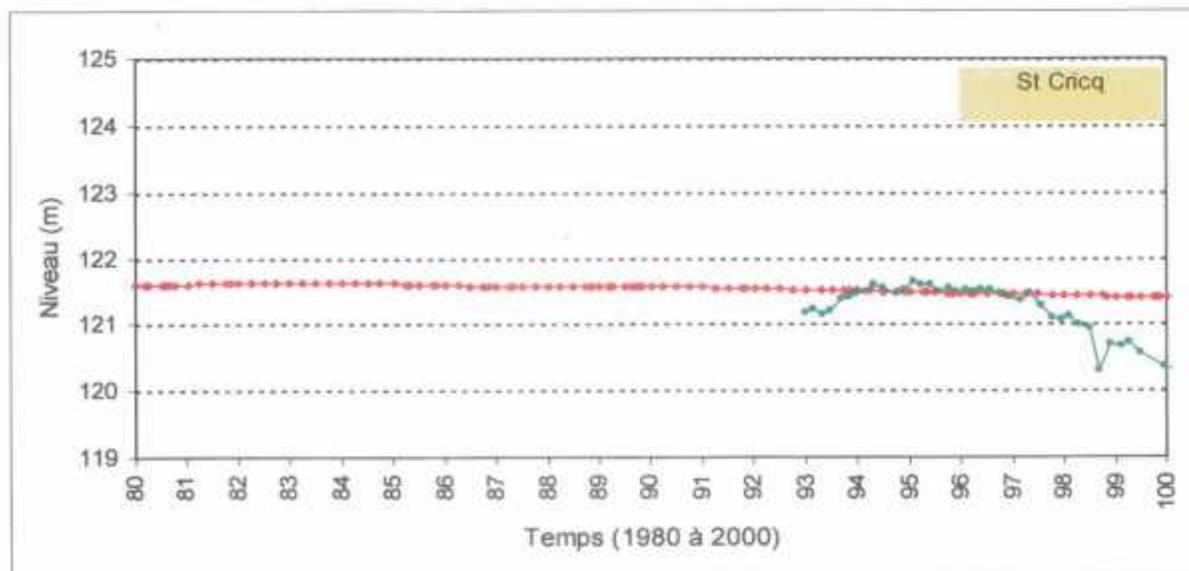
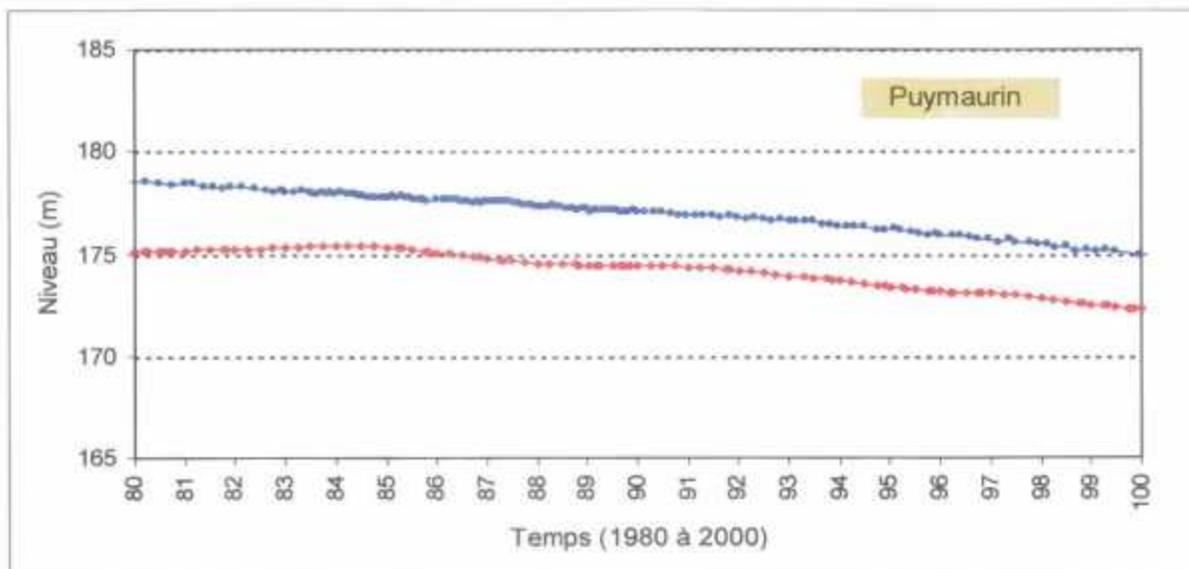
4- Au Nord des stockages – Barbotan

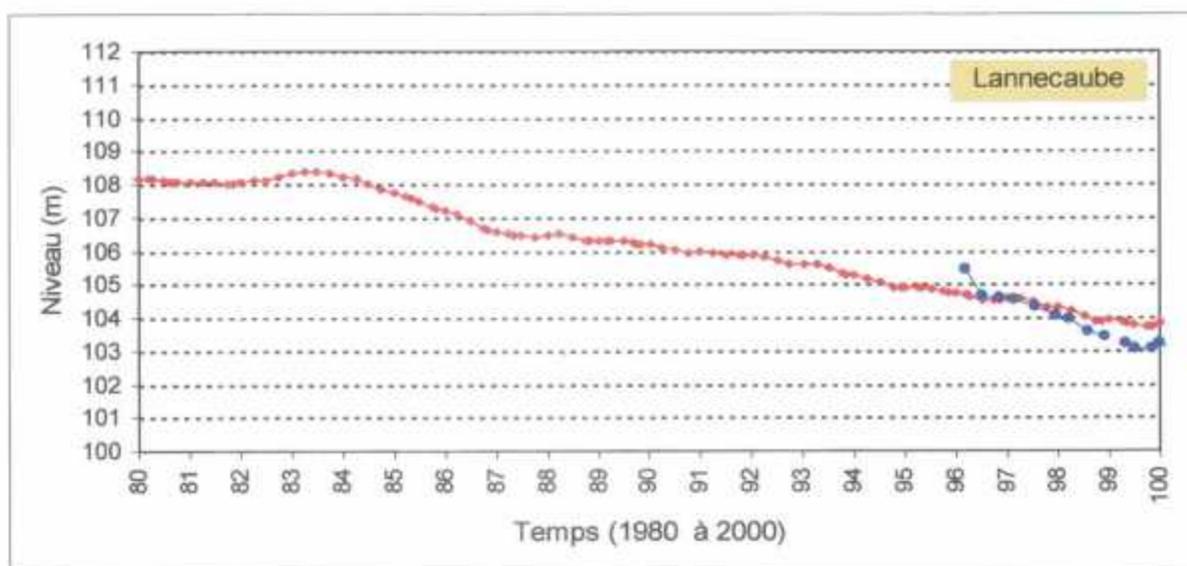
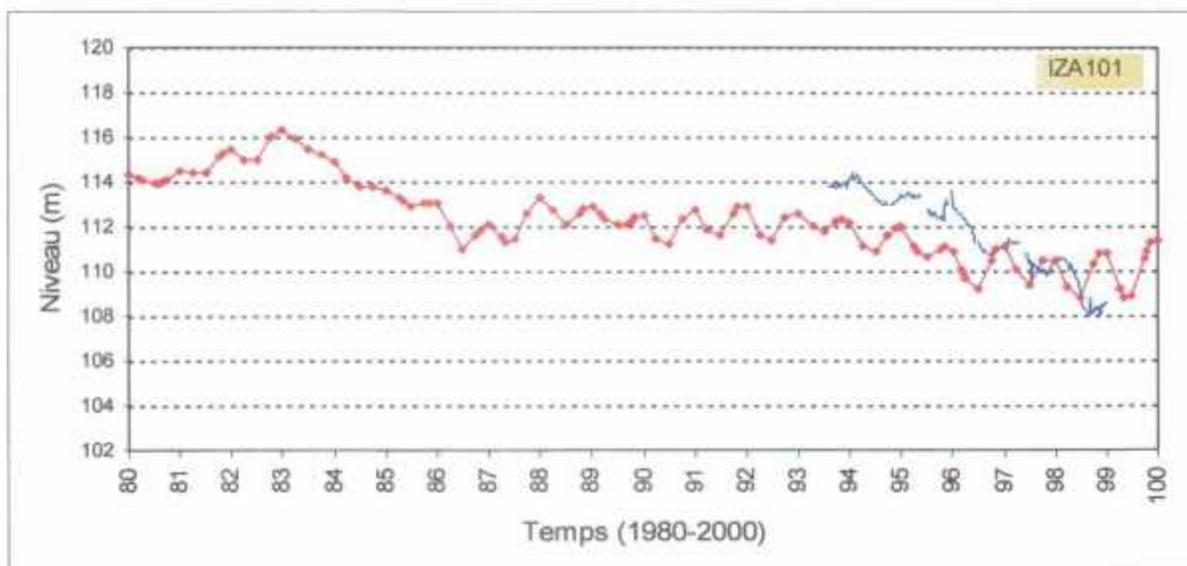


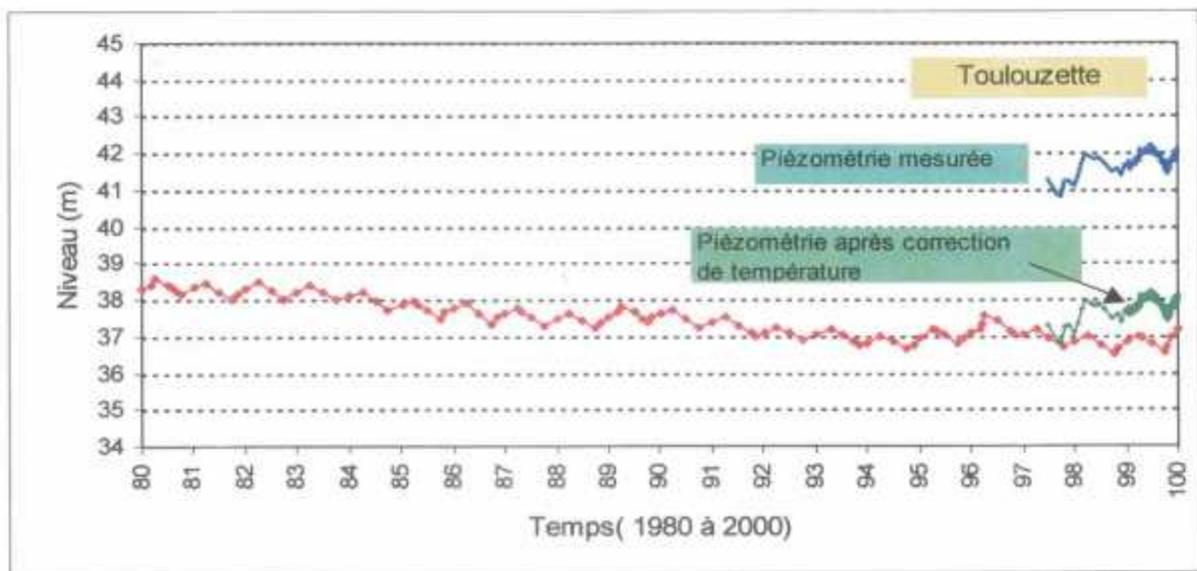
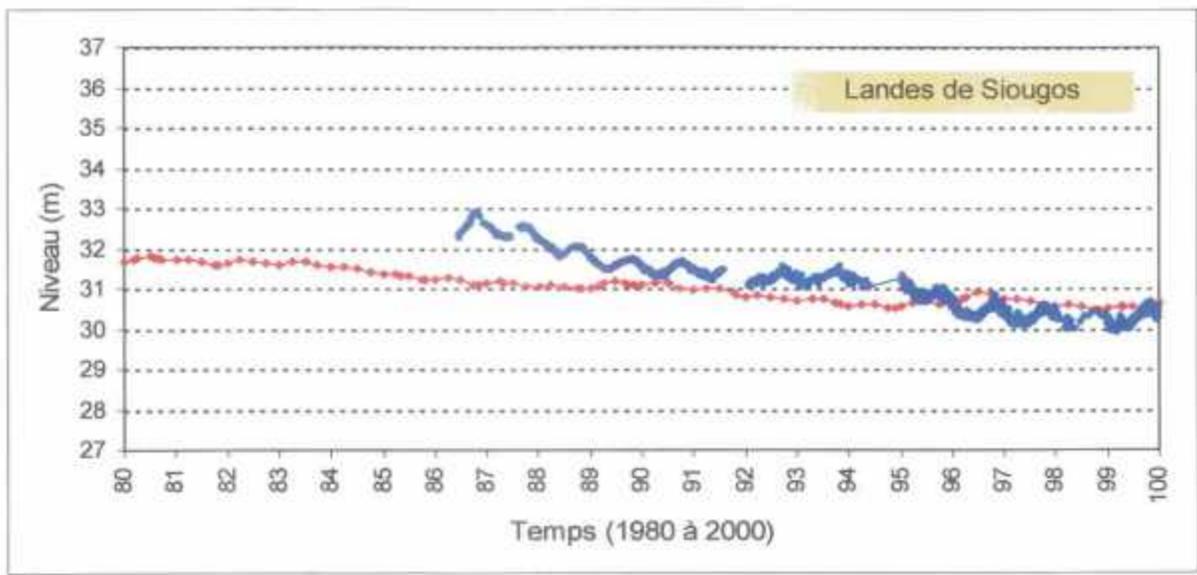
ANNEXE 3 B

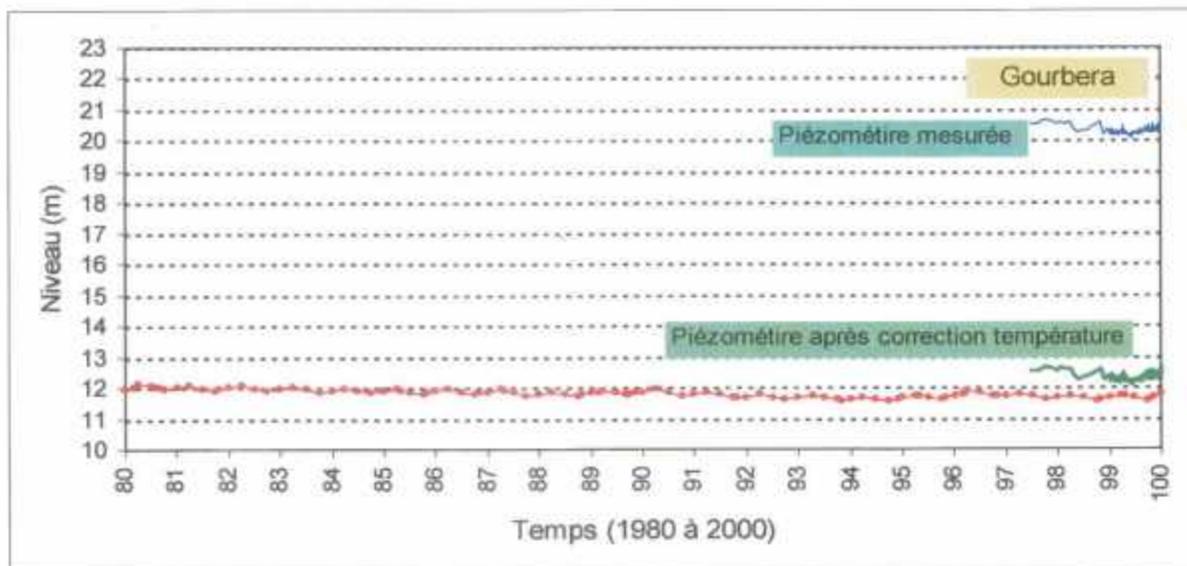
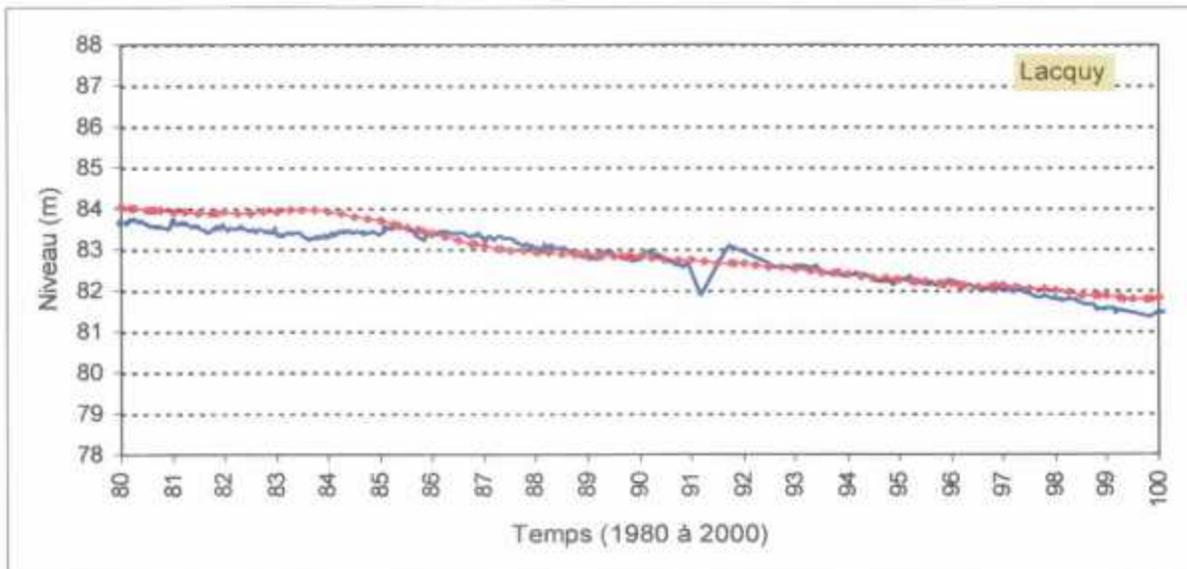
**Nappes du Paléocène et du Crétacé.
Comparaison des chroniques piézométriques
observées et calculées.**

1 – A l'Est d'Auch









ANNEXE 4

Résultats de la simulation réalisée

