

Document public

Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine

Caractérisation de la crête piézométrique de l'Eocène au sud de l'estuaire de la Gironde

- Module 2 - Année 1 -
Convention 2008-2013

Rapport final

BRGM/RP-57808-FR
décembre 2009



Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine

Caractérisation de la crête piézométrique de l'Eocène au sud de l'estuaire de la Gironde

- Module 2 - Année 1 -
Convention 2008-2013

Finalisation de la modélisation hydrodynamique Suivi du réseau de surveillance PZEM Rapport final

BRGM/RP-57808-FR
décembre 2009

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 08EAUK12



J.P. Platel, M. Saltel, N. Pédrón
avec la collaboration de
E. Fruh, L. Grabenstaetter et M. Goudin



Vérificateur :

Original signé par **B. Mauroux**

Approbateur :

Original signé par **Ph. Dutartre**

En l'absence de signature, et pour les rapports diffusés en version numériques, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM
Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001 : 2008



Mots clés : Hydrogéologie, Aquifère, Invasion saline, Piézomètres, Hydrochimie, Modélisation hydrodynamique, Éocène moyen, Quaternaire, Flandrien, Estuaire de la Gironde, Gironde, Aquitaine, France

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

J.P. Platel, M. Saltel, N. Pédron avec la collaboration de **E. Fruh, L. Grabenstaetter** et **M. Goudin** (2009) - Gestion des Eaux Souterraines en Région Aquitaine. Caractérisation de la crête piézométrique de l'Éocène au sud de l'Estuaire de la Gironde.- Module 2 - Année 1 – Convention 2008-2013. Finalisation de la modélisation hydrodynamique - Suivi du réseau de surveillance PZEM. BRGM/RP-57808-FR, 148 p., 45 fig., 13 tab., 6 annexes

© BRGM, 2009 ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

L'étude de la crête piézométrique de l'Eocène moyen au sud de l'Estuaire de la Gironde s'intègre dans le vaste programme de Gestion des nappes d'eaux souterraines de la Région Aquitaine qui se poursuit depuis 1996. Elle constitue le module 2 de l'actuelle Convention Régionale, passée entre l'Etat, la Région Aquitaine et le BRGM, avec le concours de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et, pour ce module, de celui du Conseil Général de la Gironde. Le présent rapport rend compte des résultats de l'année 1, qui concernent le suivi annuel optimisé du réseau de surveillance et la finalisation du modèle hydrodynamique.

Les programmes d'études précédents (1996-2001 et 2002-2008) avaient mis en évidence : d'une part, la grande importance des nappes anciennement salées quaternaires, principale source des chlorures dans le phénomène d'envahissement de la nappe éocène jusqu'à de grandes profondeurs, et d'autre part, dans la partie sud de l'estuaire et de la "crête piézométrique", une plus grande complexité de cet aquifère multicouche en termes de géométrie des réservoirs et de différences de pressions.

L'objectif de l'ensemble de l'étude est de mieux connaître la nature et la structuration des terrains éocènes dans le secteur compris entre Ambès et Blaye et les raisons de la persistance de la crête hydraulique, qui assure une protection de la nappe éocène vis-à-vis d'une éventuelle propagation de sa salure vers le sud.

Quatre principaux axes d'études et de travaux ont été définis en 2002 puis en 2005 :

- établir le **bilan des connaissances** géologiques et hydrogéologiques,
- poursuivre l'**extension du réseau de surveillance et d'alerte PZEM** vers le sud du Médoc et dans le Blayais **par la réalisation de piézomètres** (profonds et/ou courts) près de l'estuaire,
- poursuivre la **surveillance des pressions et de la qualité** des eaux **des différents aquifères** de l'Eocène moyen,
- aboutir à une synthèse avec **modélisation hydrodynamique des aquifères éocènes** du secteur.

Les **quatre premières phases du programme** avaient été consacrées à l'étude géologique du substratum de l'estuaire de la Gironde entre Ambès et Blaye, pour visualiser la complexité de l'aquifère multicouche, et à la réalisation de 14 piézomètres sur 11 sites. Elles avaient abouti d'une part à la meilleure connaissance de la géométrie des principaux réservoirs éocènes par la réalisation de cartographies géologiques détaillées et de coupes géologiques entre le sud de la presqu'île d'Ambès et le secteur de Blaye / Cussac. Elles avaient permis d'autre part de mieux caractériser les différences de faciès chimique des eaux et de pressions entre les réservoirs gréso-

sableux et calcaires du multicouche. Une modélisation avec calage en régime permanent des aquifères éocènes du secteur a été réalisée.

La cinquième phase, qui fait l'objet du présent rapport, est en partie consacrée au suivi du réseau de surveillance PZEM, dont les piézomètres sont tous équipés d'enregistreurs numériques. Des prélèvements d'eau pour analyse chimique y ont été effectués jusqu'à deux fois par an pour la plupart (en hautes eaux et basses eaux des nappes). Ces mesures et analyses constituent les données d'entrée qui alimentent les réseaux *Quantité "RPESTUEOCE"* et *Qualité "RQUESTUEOCE"* de la **base nationale ADES (Accès aux données sur les eaux souterraines)**.

Trois autres sites complémentaires sont également en piézométrie (Ludon, Ambès et l'Ile Nouvelle au deuxième semestre 2007).

Pendant les dix ans de **surveillance de la qualité** (1999 à 2009), la salinité dans les différents niveaux de la nappe de l'Éocène moyen a montré des variations suivant les secteurs géographiques. Dans le secteur nord-oriental du Médoc, avait d'abord été confirmée une **tendance générale à la salinisation progressive** de tous les réservoirs de l'Éocène près de Jau-Dignac-Loirac, l'augmentation de la teneur en NaCl étant **de l'ordre de 3 g/l sur 6 ans**. Cependant une certaine stabilisation de la teneur en sel s'observe depuis le début de 2006 autour de 4,5 g/l.

Plus au sud, les eaux salées du multicouche ont des salinités n'évoluant pas dans le temps à Saint-Christoly, alors que le secteur de Saint-Yzens montre les plus fortes variations, avec des salinités en NaCl pouvant varier de 0,2 à plus de 7,5 g/l. Les plus faibles teneurs ont été observées ces trois dernières années.

Dans le secteur de la crête piézométrique (Cussac, Beychevelle, Soussans, Plassac, Saint-Genès-de-Blaye), les eaux du réservoir profond sablo-gréseux sont partout très douces (20 à 52 mg/l de NaCl).

Celles des réservoirs supérieurs calcaires sont légèrement plus salées (28 à 80 mg/l) avec des teneurs exceptionnelles à Cussac-Fort-Médoc (336 mg/l). En particulier est constatée une augmentation progressive de la salinité à Soussans (de 53 à 75 mg/l) et une élévation brusque (mais momentanée ?) à Cussac (336 mg/l pendant les basses-eaux 2009).

La **surveillance des pressions** se poursuit depuis 1998 dans le Nord du Médoc et depuis 1999 dans la zone de crête, où elle a été densifiée à partir de 2003.

Dans tout le secteur septentrional de Jau et Saint-Christoly, la **nappe éocène** a des variations piézométriques identiques ; son niveau à marée haute pour un coefficient moyen de 70 ("MHc70") **se situe toujours sous le plan moyen des hautes mers de l'estuaire** s'établissant autour de + 2 NGF, la différence **atteignant 1,50 m pendant l'étiage**. Le niveau de la nappe poursuit une descente régulière depuis 2001 (niveau moyen actuel à + 1,50 NGF au maximum des hautes-eaux).

Dans le secteur de Saint-Yzens-Laména, le niveau se tient légèrement plus haut que plus au nord et une nette remontée du niveau amorcée en 2006 s'y poursuit en 2008 (niveau moyen actuel à + 2,30 NGF au maximum des hautes-eaux).

Dans le secteur central de Saint-Estèphe, la différence de niveau est souvent plus importante (plus de 1,60 m à l'étiage), car le plan moyen des hautes mers de l'estuaire est un peu plus élevé. Ce n'est que pendant les mois de hautes-eaux que le niveau MHc70 atteint tout juste le plan moyen des hautes mers de l'estuaire. Une légère remontée des niveaux est observée en 2007-2008, notamment en hautes eaux.

Dans le secteur de la crête piézométrique (Cussac, Beychevelle, Plassac, Segonzac), le niveau MHc70 de la ***nappe profonde des grès*** en rive occidentale est ***toujours nettement en charge*** par rapport au plan moyen de l'estuaire à marée haute établi autour de + 2,45 NGF. Là aussi, une légère tendance à la remontée des niveaux s'observe depuis les plus bas étiages de 2005-2006 (+2,40 NGF). En rive orientale, le niveau profond oscille autour de + 4,30 NGF, soit 1,85 m au dessus du plan de l'estuaire.

Le niveau de ***la nappe des calcaires*** à Fort-Médoc et à Beychevelle ***en rive occidentale, qui évolue toujours en-dessous du plan moyen des hautes mers de l'estuaire*** (jusqu'à 1,70 m plus bas pendant l'étiage), montre lui aussi une tendance à la hausse. Il en est de même en rive orientale, à Plassac et surtout à Segonzac.

Dans le secteur au sud de la crête piézométrique (Soussans), l'aquifère devient partout captif sous les calcaires argileux et les marnes de l'Éocène supérieur. L'influence de la dépression bordelaise se fait ressentir jusque dans le secteur de Soussans, ce qui entraîne un très bas niveau MHc70 de la nappe des calcaires (environ 1 m sous le plan de l'estuaire), alors que celui de la nappe des grès, en élévation depuis mi-2006 oscille à 50 cm en moyenne au-dessus de celui de l'estuaire.

Plus au sud dans la presqu'île d'Ambès et à Ludon, les niveaux de la nappe des grès sont encore plus bas (0 et - 4 NGF respectivement). Dans le dernier site une nette remontée s'observe là encore avec un niveau en basses-eaux beaucoup moins marqué que les années antérieures (- 1,50 NGF). Par contre sous Ambès, la tendance n'est pas nette, car si le niveau piézométrique atteint presque + 2 NGF en hautes-eaux, il reste à 0 NGF pendant les basses-eaux. On ne voit donc pas encore les effets de la mise en service du réseau d'eau industrielle de substitution.

En conclusion, la tendance générale à une légère baisse des pressions, qui se poursuivait presque partout depuis 2001, s'est inversée ces dernières années dans le secteur de la crête et au sud (+ 0,50 m depuis 2005). Ce n'est pas le cas dans le secteur le plus au nord du Médoc (Jau et Saint-Christoly).

L'autre objectif entrant dans le cadre de cette étude était la **finalisation de la modélisation hydrodynamique** pour aboutir à une meilleure compréhension des facteurs à l'origine de la persistance de la crête piézométrique de l'Éocène moyen dans le secteur de l'estuaire de la Gironde.

Le travail de modélisation s'est déroulé en deux phases :

- **1^{ère} phase** : optimisation du calage en régime permanent par une meilleure spatialisation de la recharge.
- **2^{ème} phase** : transcription du modèle en régime transitoire sur la période de 1995 à 2005.

Cette dernière étape nécessite l'intégration et la validation de l'ensemble des données spatio-temporelles (prélèvements, recharge, conditions aux limites). Les simulations sont réalisées en utilisant un pas de temps annuel de 1995 à 1999, et trimestriel de 2000 à 2005 de manière à pouvoir cerner plus précisément le champ des coefficients d'emmagasinement.

Il est confirmé par les différentes simulations réalisées que les éléments structuraux (anticlinal de Blaye-Listrac, affleurements de l'Eocène moyen) jouent un rôle prépondérant dans l'établissement et le maintien de cette crête piézométrique. Par ailleurs, la phase du calage du modèle a permis de confirmer l'importance de la définition précise des potentiels imposés aux limites du modèle.

En effet, le secteur sud entre Arsac et Ambès, est fortement influencé par les charges imposées en bordure méridionale du modèle, reflet de l'évolution de la dépression piézométrique sous l'agglomération bordelaise. L'analyse de sensibilité a montré que **le régime d'exploitation dans le secteur de Bordeaux correspond au facteur principal susceptible d'influencer le positionnement et la cote de la crête**. Les simulations réalisées à l'aide du modèle régional Nord-aquitain montrent que la combinaison de facteurs défavorables (augmentation de la sollicitation du réservoir éocène par rapport à l'actuel et conditions climatiques défavorables sur de longues périodes) pourrait compromettre la persistance de la crête piézométrique.

Sommaire

1. Introduction.....	13
1.1 CADRE GÉNÉRAL DU PROJET	13
1.2 RAPPELS DE LA PROBLÉMATIQUE ET DES OBJECTIFS DE L'ÉTUDE.....	13
1.3 PROGRAMME D'ÉTUDE DE L'ANNÉE 1 DE LA CONVENTION 2008-2013	14
2. Surveillance de la pression des nappes éocènes en rive médocaine et dans le secteur de la "crête" piézométrique	16
2.1. SUIVI PIÉZOMÉTRIQUE DU RÉSEAU DE SURVEILLANCE PZEM EN RIVE MEDOCAINE	18
2.2. SUIVI PIÉZOMÉTRIQUE DU RÉSEAU DE SURVEILLANCE PZEM DANS LE SECTEUR DE LA « CRETE PIEZOMETRIQUE »	22
2.2.1. Doublet de piézomètres de Cussac (PZEM 5 et PZEM 6)	22
2.2.2. Doublet de piézomètres de Soussans (PZEM 8 et PZEM 9)	22
2.2.3. Piézomètre d'Arcins (PZEM 10)	23
2.2.4. Piézomètres de Saint-Julien-Beychevelle (PZEM 13 et PZEM 14).....	23
2.3. SUIVI PIÉZOMÉTRIQUE DU RÉSEAU DE SURVEILLANCE PZEM DANS LE BLAYAIS (RIVE DROITE DE L'ESTUAIRE)	29
2.3.1. Piézomètre de Plassac (PZEM 7)	29
2.3.2. Doublet de piézomètres de Saint-Genès (PZEM 11 et PZEM 12)	29
2.3.3. Piézomètre de l'île Nouvelle (PZEM 15)	29
2.4. SUIVI PIÉZOMÉTRIQUE DANS LE NORD DE LA DÉPRESSION PIÉZOMÉTRIQUE BORDELAISE.....	35
2.5. EVOLUTIONS COMPARÉES DES NIVEAUX À MARÉE HAUTE.....	35
2.6. ÉTATS PIÉZOMÉTRIQUES DES NAPPES DE L'ÉOCÈNE MOYEN DANS LE SECTEUR DE LA "CRÊTE"	38
3. Surveillance hydrochimique de la qualité des eaux des nappes éocènes en rive médocaine et dans le secteur de la "crête" piézométrique	41
3.1. OPTIMISATION DE LA SURVEILLANCE HYDROCHIMIQUE.....	41
3.2. ÉVOLUTIONS HYDROCHIMIQUES RÉCENTES DANS LES QUALITOMÈTRES DU RÉSEAU PZEM EN RIVE MÉDOCAINE	42

3.2.1. Qualitomètre PZEM 1 de Jau-Dignac	42
3.2.2. Qualitomètre PZEM 2 de Saint-Christoly	42
3.2.3. Qualitomètre PZEM 3 de Saint-Yzens	43
3.2.4. Qualitomètre PZEM 4 de Saint-Estèphe	43
3.3. ÉVOLUTIONS HYDROCHIMIQUES RÉCENTES DES EAUX DE LA NAPPE DE L'ÉOCÈNE MOYEN DÉTRITIQUE DANS LE SECTEUR DE LA "CRÊTE" PIÉZOMÉTRIQUE.....	47
3.3.1. Qualitomètre PZEM 5 de Cussac-Fort-Médoc.....	47
3.4. ÉVOLUTIONS HYDROCHIMIQUES RÉCENTES DES EAUX DE LA NAPPE DE L'ÉOCÈNE MOYEN DÉTRITIQUE CALCAIRE DANS LE SECTEUR DE LA "CRÊTE" PIÉZOMÉTRIQUE.....	47
3.4.1. Qualitomètre PZEM 6 de Cussac-Fort-Médoc.....	47
3.4.2. Qualitomètre PZEM 8 de Soussans	50
3.4.3. Qualitomètre PZEM 10 d'Arcins.....	50
3.4.4. Qualitomètre PZEM 14 de Beychevelle	50
3.5. ÉVOLUTIONS DE LA SALINITÉ DANS LES SECTEURS DU MÉDOC NORD- ORIENTAL DEPUIS LA MISE EN SERVICE DU RÉSEAU.....	54
3.5.1. Faciès chimiques des eaux des nappes de l'Éocène moyen le long de l'estuaire de la Gironde	54
3.5.2. Analyse des chroniques des teneurs en chlorure de sodium dans les secteurs salés du Médoc oriental	54
3.5.3. Analyse des chroniques des teneurs en chlorure de sodium dans les autres secteurs du Médoc et du Blayais.....	55
4. Modélisation hydrodynamique.....	59
4.1. RÉGIME PERMANENT : RAPPEL DES CARACTÉRISTIQUES DU MODELE	59
4.1.1. Géométrie du modèle	59
4.1.2. Conditions aux limites.....	63
4.1.3. Termes puits/source	63
4.2. RÉGIME PERMANENT : OPTIMISATION DE LA RECHARGE.....	65
4.2.1. Pédologie de la zone d'étude	65
4.2.2. Création de zone de sol.....	67
4.2.3. Réajustement du calage du modèle en régime permanent	68
4.3. MODELE TRANSITOIRE.....	73
4.3.1. Construction du modèle	73
4.3.2. Calage du modèle en régime transitoire	85
4.3.3. Analyse de sensibilité	90
4.3.4. Conclusions sur la modélisation	94

5. Conclusions	97
5.1. CONSTITUTION DU RÉSEAU <i>PZEM</i> DE SURVEILLANCE	97
5.2. ÉVOLUTIONS PIÉZOMÉTRIQUES	97
5.3. ÉVOLUTIONS HYDROCHIMIQUES	98
5.4. MODÉLISATION HYDRODYNAMIQUE.....	99
6. Bibliographie.....	101

Liste des Figures

Figure 1 – Carte de localisation de l'étude	15
Figure 2 - Carte de localisation comparée des piézomètres du réseau PZEM de surveillance spécifique de la nappe éocène et des réseaux départementaux de la Gironde à cette même nappe	17
Figure 3 – Evolution du niveau moyen de la nappe de l'Eocène moyen dans le piézomètre de Jau (PZEM 1)	19
Figure 4 – Evolution du niveau moyen de la nappe de l'Eocène moyen dans le piézomètre de Saint-Christoly (PZEM 2)	20
Figure 5 – Evolution du niveau moyen de la nappe de l'Eocène moyen dans le piézomètre de Saint-Yzans (PZEM 3) Période janvier 1998 à décembre 2008	21
Figure 6 – Evolution du niveau moyen de la nappe de l'Eocène moyen dans le piézomètre de Saint-Estèphe (PZEM 4)	24
Figure 7 – Evolution du niveau moyen de la nappe de l'Eocène moyen dans le piézomètre de Cussac (PZEM 5 et 6).....	25
Figure 8 – Evolution du niveau moyen de la nappe de l'Eocène moyen dans les piézomètres de Soussans (PZEM 8 et 9)	26
Figure 9 – Evolution du niveau moyen de la nappe de l'Eocène moyen dans le piézomètre d'Arcins (PZEM 10)	27
Figure 10 – Evolution du niveau moyen de la nappe de l'Eocène moyen calcaire dans les piézomètres de Beychevelle (PZEM 13 et PZEM 14)	28
Figure 11 – Evolution du niveau moyen de la nappe de l'Eocène moyen calcaire dans le piézomètre de Plassac (PZEM 7)	31
Figure 12 – Evolution du niveau moyen de la nappe de l'Eocène moyen dans les piézomètres de Saint-Genès de Blaye (PZEM 11 et 12).....	32
Figure 13 – Evolution du niveau moyen de la nappe de l'Eocène moyen grés-sableux dans le piézomètre de Ludon-Médoc (08032X0001/F1)	33
Figure 14 - Evolution du niveau moyen de la nappe de l'Eocène moyen grés-sableux dans le piézomètre d'Ambès (07796X0025/F)	34
Figure 15 - Evolutions comparées des piézométries des nappes de l'Eocène moyen à marée haute de coefficient moyen (70) de 1998 à 2008 – rive médocaine .	36
Figure 16 - Evolutions comparées des piézométries des nappes de l'Eocène moyen à marée haute de coefficient moyen (70) de 1998 à 2008 – rive orientale	37
Figure 17- Carte piézométrique de la nappe des grès de l'Eocène moyen – Etat à fin 2008	39
Figure 18- Carte piézométrique de la nappe des calcaires de l'Eocène moyen – Etat à fin 2008	40
Figure 19 - Evolution sur 10 ans de la teneur en chlorure de sodium dans la nappe de l'Eocène surveillée par les trois qualitomètres salés du Médoc nord-oriental	56

Figure 20 - Evolution sur 10 ans de la teneur en chlorure de sodium dans les deux réservoirs à eaux douces de la nappe de l'Eocène moyen des onze qualitomètres du Médoc oriental et du Blayais	57
Figure 21 : Localisation de la zone modélisée	60
Figure 22 : Visualisation 3D du modèle hydrogéologique numérique – Couches 1 à 9	62
Figure 23 : Visualisation 3D du modèle hydrogéologique numérique – Topographie et bathymétrie en m NGF	62
Figure 24 : Visualisation des zones météorologiques – Modèle Eocène-Estuaire en régime permanent – paramètre : Zones météo	64
Figure 25 : Carte des grandes unités pédologiques de l'Aquitaine caractérisées par leur réserve en eau facilement utilisable (d'après la cartographie au 1/500 000 réalisée par la X.R.A et l'INRA)- Rapport BRGM/RP-52042-FR)	66
Figure 26 : Visualisation des 17 nouvelles zones météorologiques – Modèle Eocène-Estuaire en régime permanent – paramètre : Zones météo	67
Figure 27 : Hauteurs piézométriques restituées pour le réservoir éocène détritique	69
Figure 28 : Hauteurs piézométriques restituées pour les réservoirs éocènes calcaires	70
Figure 29 : Comparaison entre les charges hydrauliques simulées/mesurées en régime permanent et étiage 2004	71
Figure 30 : Evolution des prélèvements de l'Eocène moyen de 1995 à 2005	74
Figure 31 : Evolution des prélèvements en fonction du type d'usage de 1995 à 2005	75
Figure 32 : Répartition mensuelle des prélèvements AEP sur la CUB (données Lyonnaise des eaux)	77
Figure 33 : Coefficients de répartition trimestrielle des volumes prélevés en usage AEP de 2000 à 2005	77
Figure 34 : Pluies efficaces calculées sur la station de Mérignac de 1995 à 2005 (Météo France)	78
Figure 35 : Conditions aux limites pour l'aquifère de l'Éocène moyen détritique	81
Figure 36 : Situation géographique des marégraphes d'Ambès et de Fort Médoc	83
Figure 37 : Localisation des points d'observation	84
Figure 38 : Comparaison entre les niveaux observés et simulés	86
Figure 39 : Chroniques piézométriques dans le réservoir de l'Éocène moyen calcaire	87
Figure 40 : Charges simulées sur le secteur de la crête dans le réservoir de l'Éocène moyen détritique	88
Figure 41 : Charges simulées au nord de la dépression bordelaise dans le réservoir de l'Éocène moyen détritique	89
Figure 42 : Représentation du transect sud-est-nord-ouest dans la nappe de l'Eocène moyen Détritique	90
Figure 43 : Distribution de la piézométrie simulée sur un transect sud-est-nord-ouest en fonction de la variation des débits de pompage	91
Figure 44 : Distribution de la piézométrie simulée sur un transect sud-est-nord-ouest en fonction de la variation des charges imposées en bordure sud du modèle	92

Figure 45 : Distribution de la piézométrie simulée sur un transect sud-est-nord-ouest en fonction de la variation de la recharge des aquifères 93

Liste des tableaux

Tableau 1 - Résultats des analyses hydrochimiques des eaux prélevées dans le qualitomètre PZEM 1 de Jau-Dignac depuis 2007 jusqu'à 2009.....	44
Tableau 2 - Résultats des analyses hydrochimiques des eaux prélevées dans le qualitomètre PZEM 3 de Saint-Yzans en 2007 et 2008	45
Tableau 3 - Résultats des analyses hydrochimiques des eaux prélevées dans le qualitomètre PZEM 4 de Saint-Estèphe depuis 2006 jusqu'à 2009	46
Tableau 4 - Résultats des analyses hydrochimiques des eaux prélevées dans le qualitomètre PZEM 5 de Cussac depuis 2007 jusqu'à 2009	48
Tableau 5 - Résultats des analyses hydrochimiques des eaux prélevées dans le qualitomètre PZEM 6 de Cussac depuis 2007 jusqu'à 2009	49
Tableau 6 - Résultats des analyses hydrochimiques des eaux prélevées dans le qualitomètre PZEM 8 de Soussans depuis 2007 jusqu'à 2009	51
Tableau 7 - Résultats des analyses hydrochimiques des eaux prélevées dans le qualitomètre PZEM 10 d'Arcins depuis 2007 jusqu'à 2008	52
Tableau 8 - Résultats des analyses hydrochimiques des eaux prélevées dans le qualitomètre PZEM 14 de Saint-Julien de Beychevelle depuis 2006 jusqu'à 2008.....	53
Tableau 9 : Succession stratigraphique des formations modélisées	61
Tableau 10 : Mailles à potentiels imposés du modèle en régime permanent	63
Tableau 11 : Bilan du modèle en régime permanent (en m ³ /s).....	72
Tableau 12 : Cote des repères des marégraphes	82
Tableau 13 : Ouvrages sélectionnés pour l'analyse de sensibilité.....	91

Liste des annexes

Annexe 1 - Evolutions des niveaux des nappes de l'Eocène moyen dans les piézomètres du réseau de surveillance PZEM - Période janvier 2005 à décembre 2008 ...	103
Annexe 2 - Cartes piézométriques de l'année 2004 des formations calcaires et grésos-sableuses de l'Eocène moyen	115
Annexe 3 - Géométrie du toit du réservoir supérieur des calcaires de l'Eocène moyen dans la zone de la crête piézométrique entre Bordeaux et Blaye	119
Annexe 4 - Géométrie du toit du réservoir supérieur des grès et des sables de l'Eocène moyen dans la zone de la crête piézométrique entre Bordeaux et Blaye	123
Annexe 5 - Chroniques piézométriques et localisation	127
Annexe 6 - Paramètres hydrodynamique du modèle du secteur de la crête piézométrique en régime transitoire	137

1. Introduction

1.1 CADRE GÉNÉRAL DU PROJET

Le projet de caractérisation de la crête piézométrique de l'Éocène moyen au sud de l'Estuaire de la Gironde s'intègre dans un vaste programme de Gestion des nappes d'eaux souterraines de la région Aquitaine qui se poursuit depuis 1996 et dont il constitue le module 2 de l'actuelle convention régionale. Par financement pluriannuel sur crédits publics, la Région Aquitaine et le BRGM, avec le concours de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et pour ce module de celui du Conseil Général de la Gironde, ont décidé de poursuivre un ensemble d'études et d'actions engagées lors du précédent contrat pluriannuel (après accord des Ministères en charge de l'Industrie et de l'Environnement). Elles s'inscrivent dans les cadres de la Loi sur l'Eau, du SDAGE du Bassin Adour-Garonne et du SAGE *Nappes profondes de Gironde*, dans la perspective d'une gestion durable des ressources, de l'optimisation des usages et du respect des écosystèmes.

1.2 RAPPELS DE LA PROBLÉMATIQUE ET DES OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Depuis plus de cinquante ans, la nappe de l'Éocène moyen (à inférieur) est fortement exploitée dans le département de la Gironde et présente actuellement au droit de l'agglomération bordelaise un important creux piézométrique lié à cette intense exploitation (avec des niveaux ayant été localement plus bas que -30 NGF – Corbier et *al.*, 2008).

Au nord-est du Médoc, le long de la partie aval de l'estuaire, la qualité des eaux de l'Éocène est fortement dégradée par une salure importante, dépassant couramment 4 g/l de chlorure de sodium (et même exceptionnellement 19 g/l dans le secteur de Saint-Yzens). Depuis le début de la surveillance par le BRGM, on a constaté que le front de salinisation avait localement tendance à progresser lentement vers l'ouest. L'origine et les facteurs régissant ce phénomène ont d'abord été expliqués dans les études réalisées entre 1997 et 2001 dans le cadre des deux précédentes convention régionales, s'intéressant aux *Relations entre l'estuaire de la Gironde et la nappe de l'Éocène moyen*, étude ayant fait l'objet des rapports BRGM R 39328, R 40113, R 40729, RP-50467-FR et RP-51177-FR (Platel et *al.*, 1997, 1998, 1999, 2001 ; Schnebelen et *al.*, 2000, 2002).

Elle s'est poursuivie par l'étude de la *Caractérisation de la crête piézométrique de la nappe de l'Eocène au sud de l'estuaire* par laquelle a été mise en évidence l'individualisation, au droit du secteur de Blaye-Cussac-Lamarque, d'au moins deux aquifères séparés dans le secteur précité (Figure 1), le plus profond grés-sableux et les supérieurs calcaires, présentant des niveaux piézométriques et des faciès hydrochimiques différents. Cette étude a fait l'objet des rapports BRGM/RP-52514-FR, 53657-FR, 55240-FR et 56418-FR (Platel et *al.*, 2003, 2005, 2006 et 2008).

La zone de piézométrie supérieure à + 2,5 NGF, qui existe dans le secteur de l'anticlinal de Blaye-Listrac constitue une crête piézométrique, barrière hydraulique qu'il est nécessaire de maintenir car elle assure une protection de la nappe de l'Éocène vis-

à-vis d'une éventuelle propagation de la salure vers le sud, correspondant aux domaines les plus exploités pour l'AEP. Le maintien des conditions actuelles, voire leur amélioration, est un des objectifs implicites des mesures 3-9 et 3-10 du SAGE "*Nappes profondes de Gironde*", qui reconnaissent que la bordure de l'Estuaire est une zone à risque identifié de salinisation de la nappe éocène (carte CM3-9 du SAGE – Corbier *et al.*, 2005).

L'objectif de l'étude est donc de mieux connaître et de surveiller les aquifères de l'Éocène dans leur partie où les pressions sont les plus élevées au nord de Bordeaux, afin de comprendre les mécanismes susceptibles d'assurer une protection contre les risques de salinisation de l'aquifère au droit de la région bordelaise.

1.3 PROGRAMME D'ÉTUDE DE L'ANNÉE 1 DE LA CONVENTION 2008-2013

Cette dernière phase de l'étude comprend la poursuite de la surveillance des pressions et de la qualité des eaux par le réseau d'alerte PZEM de la quinzaine de piézomètres-qualitomètres, dont la construction a débuté il y a plus de 10 ans et s'est achevée dans la phase 3 de la précédente convention.

Des propositions d'optimisation de la gestion du réseau (sectorisation et adaptation de la fréquence de la surveillance hydrochimique notamment) ont été rendues nécessaires en vue de l'intégration de la surveillance de ce réseau dans le programme "*Contrôle qualité et gestion des nappes en Gironde*" sous maîtrise d'ouvrage du Conseil général de la Gironde cofinancé par le BRGM.

Cette nouvelle phase d'étude devait voir la finalisation de la synthèse hydrodynamique en affinant les résultats de la modélisation, dont les premiers résultats devaient être confirmés par l'amélioration du calage en régime permanent et par la réalisation d'un calage en régime transitoire avec notamment la prise en compte plus fine des conditions aux limites du modèle local (à partir du modèle régional Nord-Aquitain MONA).

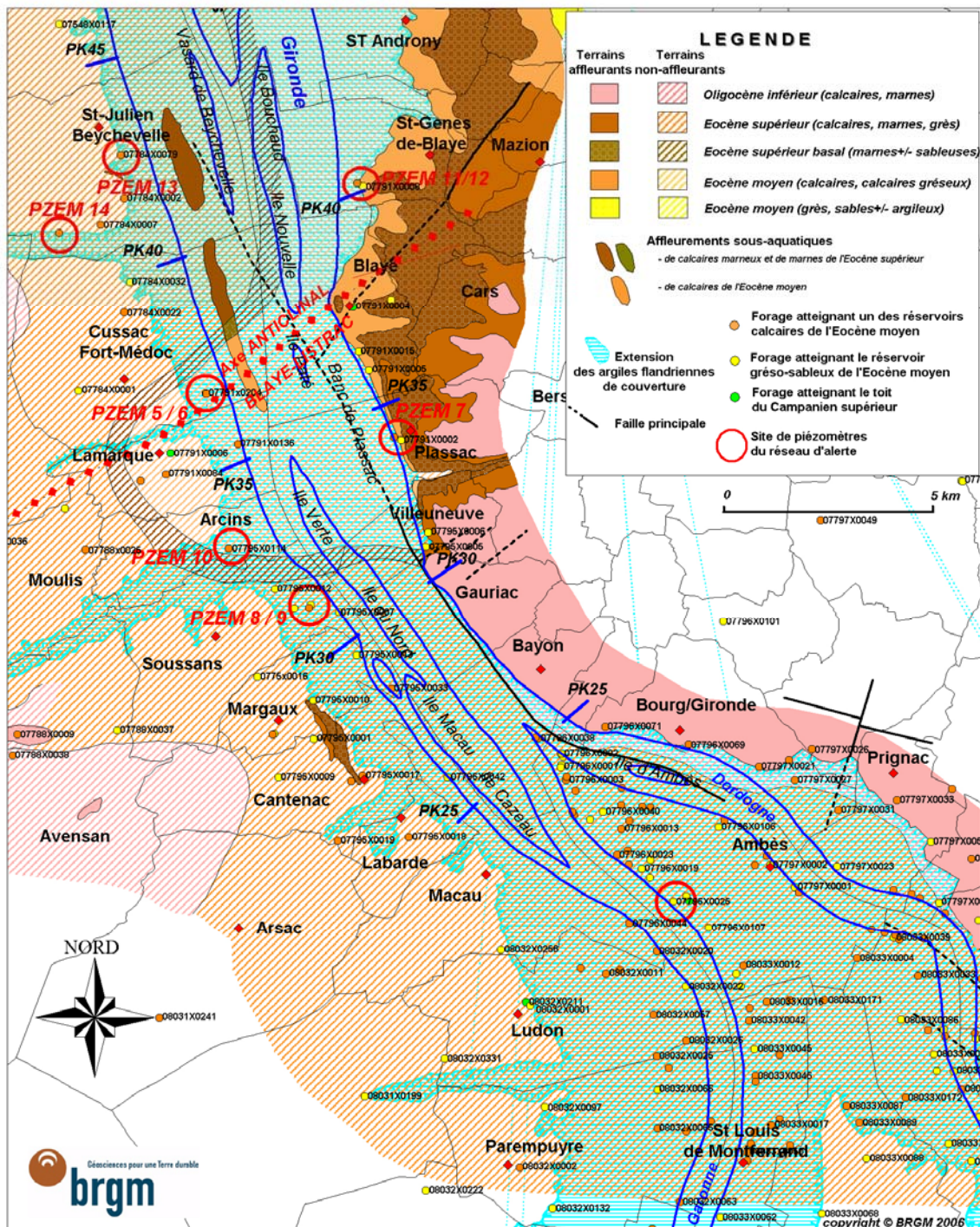


Figure 1 – Carte de localisation de l'étude

2. Surveillance de la pression des nappes éocènes en rive médocaine et dans le secteur de la "crête" piézométrique

Le **réseau de surveillance piézométrique PZEM** de l'Éocène moyen, créé dès 1997 dans le secteur estuarien de la Gironde et complété chaque année jusqu'en 2006, est constitué par les ouvrages qui fournissent les données d'entrée au réseau Quantité "**RPESTUEOCE**" de la base ADES. Il est finalement **composé de 14 piézomètres**, dont 6 en doublets, **répartis sur 11 sites** ().

Les 4 ouvrages les plus au nord (PZEM 1 à PZEM 4) sont situés le long de la rive médocaine de l'Estuaire entre Jau et Saint-Estèphe et captent la totalité des aquifères de l'Éocène moyen.

Les 10 autres piézomètres, correspondant à la partie du réseau qui surveille plus particulièrement la zone de "crête" piézométrique dans le secteur de Blaye-Cussac, permettent une analyse plus fine des évolutions de pression et des variations de salinité dans cette zone, car ils ne captent qu'une partie des nappes éocènes, soit les réservoirs calcaires, soit le réservoir grés-sableux. Ils sont réalisés soit en doublets, sur les sites des PZEM 5/6, PZEM 8/9 et PZEM 11/12, soit en piézomètres simples qui ne surveillent que la nappe des calcaires, la plus vulnérable : ces derniers sur les sites des PZEM 7, PZEM 10, PZEM 13 et PZEM 14.

Ce dispositif de surveillance est **complété par 3 sites** :

- d'une part au sud, dans le secteur entre la crête et la dépression piézométrique bordelaise, par l'ancien forage communal de Ludon-Médoc (08032X0001/F1) et par un forage de la centrale thermique d'Ambès (07796X0025/F) ;
- d'autre part sur la zone de crête elle-même par le piézomètre de l'Île Nouvelle (PZEM 15) récemment exécuté par le Port Autonome de Bordeaux dans le cadre de la surveillance des travaux de déroctage de la passe de Cussac (Platel, 2008).

Tous les ouvrages, dont les têtes de tubage ont été nivelées, étaient jusqu'en 2008 équipés d'enregistreurs de pression en continu de type *Madofil* (IRIS-Instruments). Les enregistrements de pression ont été calés avec un pas d'acquisition de 60 minutes. L'enregistrement brut est traité selon la méthode déjà exposée dans les rapports précédents pour isoler le signal de pression de la nappe à marée haute de celui à marée basse et rendre ainsi plus lisibles les courbes piézométriques.

Les types de représentation des évolutions piézométriques figurées dans ce rapport sont identiques à ceux des années précédentes avec :

- une courbe piézométrique semi-diurne du **niveau moyen des nappes** pour chaque point du réseau PZEM et des sites complémentaires (Figure 3 à

Figure 14), les courbes à marée haute et marée basse étant reportées en annexe 1,

- un diagramme des évolutions des **pressions** moyennes des nappes éocènes à **marée haute pour un coefficient moyen (70) "MHc70"** dans tous les points du

réseau PZEM, permettant de comparer directement les différences de niveaux entre eux et avec ceux du plan d'eau de l'estuaire au moment le plus défavorable (Figure 15 et Figure 16).

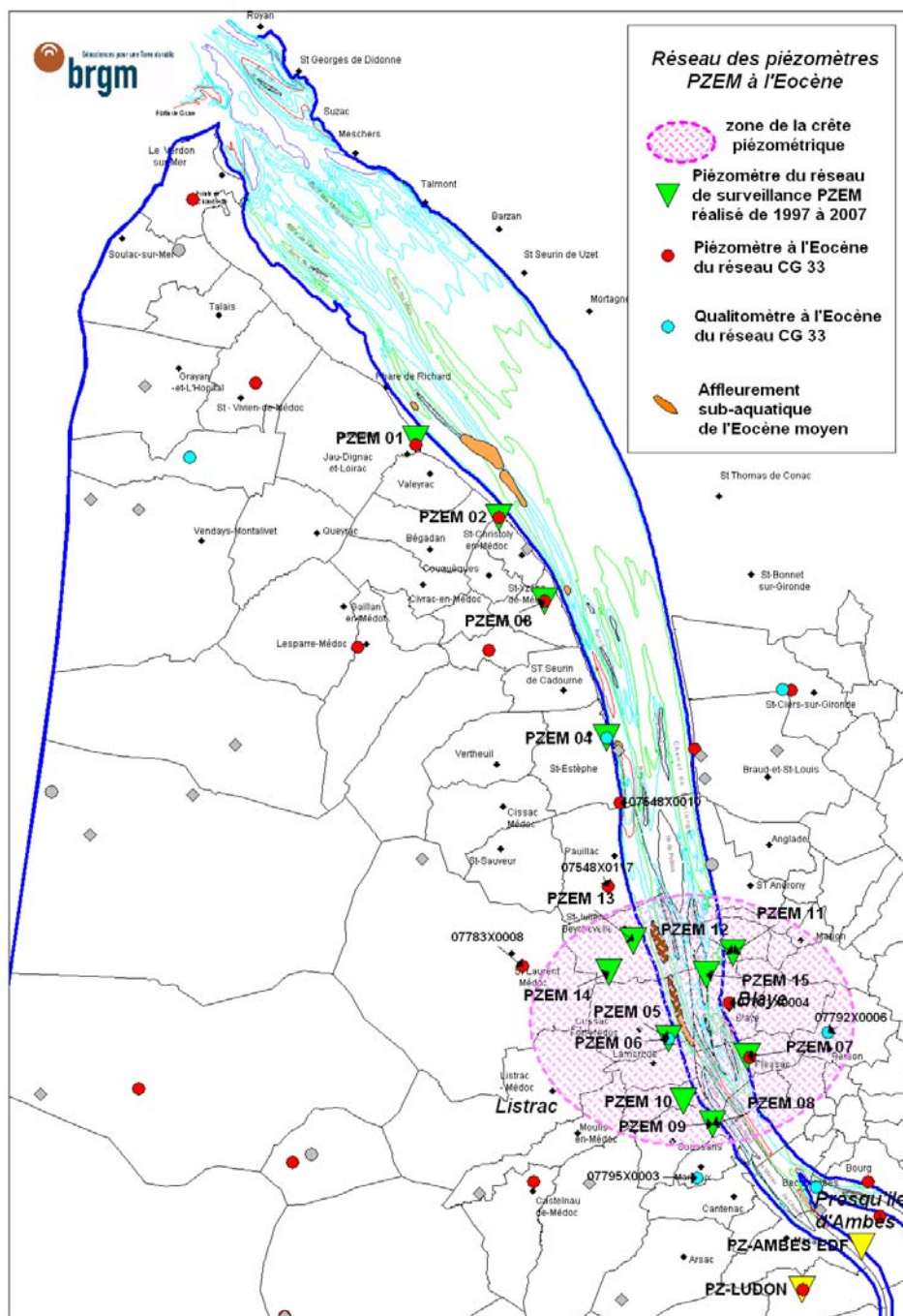


Figure 2 - Carte de localisation comparée des piézomètres du réseau PZEM de surveillance spécifique de la nappe éocène et des réseaux départementaux de la Gironde à cette même nappe

2.1. SUIVI PIÉZOMÉTRIQUE DU RÉSEAU DE SURVEILLANCE PZEM EN RIVE MEDOCAINE

Pendant l'année 2008, les piézomètres PZEM 1 à 3 du **secteur nord** ont montré des évolutions des **niveaux moyens** de la nappe éocène (prise dans son ensemble) comparables aux années précédentes (Figure 3 à Figure 5). Dans ce secteur, **la cote piézométrique moyenne de la nappe est toujours plus élevée que celle du niveau moyen de l'estuaire**.

Dans les sondages de Jau (**PZEM 1**) et de Saint-Christoly (**PZEM 2**), la plus haute pression est atteinte tardivement entre la mi-avril et la mi-mai. La durée de baisse de niveau, longue de 6 mois, est assez semblable à celles des années passées et les basses-eaux se produisent au début du mois d'octobre.

Une légère remontée générale s'est produite partout dans ce secteur lors des basses-eaux 2008, revenant aux niveaux des années 2001-2002 (+ 0,65 et + 0,50 NGF respectivement) soit 50 cm environ au-dessus du niveau moyen du plan d'eau.

La différence entre hautes-eaux et basses-eaux de la nappe éocène est toujours faible dans tout le secteur le plus au nord (0,70 m environ).

Dans le secteur de Saint-Yzens de Médoc (**PZEM 3**), une remontée est aussi observée en 2008 (+1,45 NGF en basses-eaux) ramenant la nappe au niveau habituel des années 1999 et 2001. La différence entre hautes-eaux et basses-eaux de la nappe éocène est de plus en plus marquée vers le sud, autour du PZEM 3 avec 1,25 m.

Dans le **secteur central** de Saint-Estèphe, **la cote piézométrique moyenne de la nappe est très généralement plus élevée** que celle du niveau moyen de l'estuaire, **sauf au moment des basses-eaux** (excepté en 2001, 2002, 2004 et 2008). Le piézomètre **PZEM 4** enregistre une évolution inversée des variations annuelles de pression de la nappe éocène (Figure 6), la montée de la nappe se faisant lentement sur les 8 mois de la fin d'été, d'automne et d'hiver et la baisse se produisant rapidement en fin de printemps et pendant l'été. Les hautes-eaux de la nappe durent plus longtemps qu'au nord, se produisant vers la fin avril. Depuis le début de la surveillance, les basses-eaux généralement prononcées se produisent toujours à mi-août - début septembre (basses-eaux de 1998 à 2000, 2003 et 2005 : + 0,25 NGF seulement). Une nette élévation a été constatée en 2008.

La plus grande différence de niveau qu'au nord entre hautes-eaux et basses-eaux est expliqué par le fait que ce secteur est nettement plus habité et donc par la proximité des points de prélèvement AEP et privés (exploitations viticoles). Cependant en 2002, 2004 et 2008, cette amplitude est beaucoup moins prononcée que dans les années 1998 et 1999 (1 m contre plus de 2 m). Peut-être faut-il y voir les effets d'une moindre consommation estivale pour l'AEP et l'agriculture.

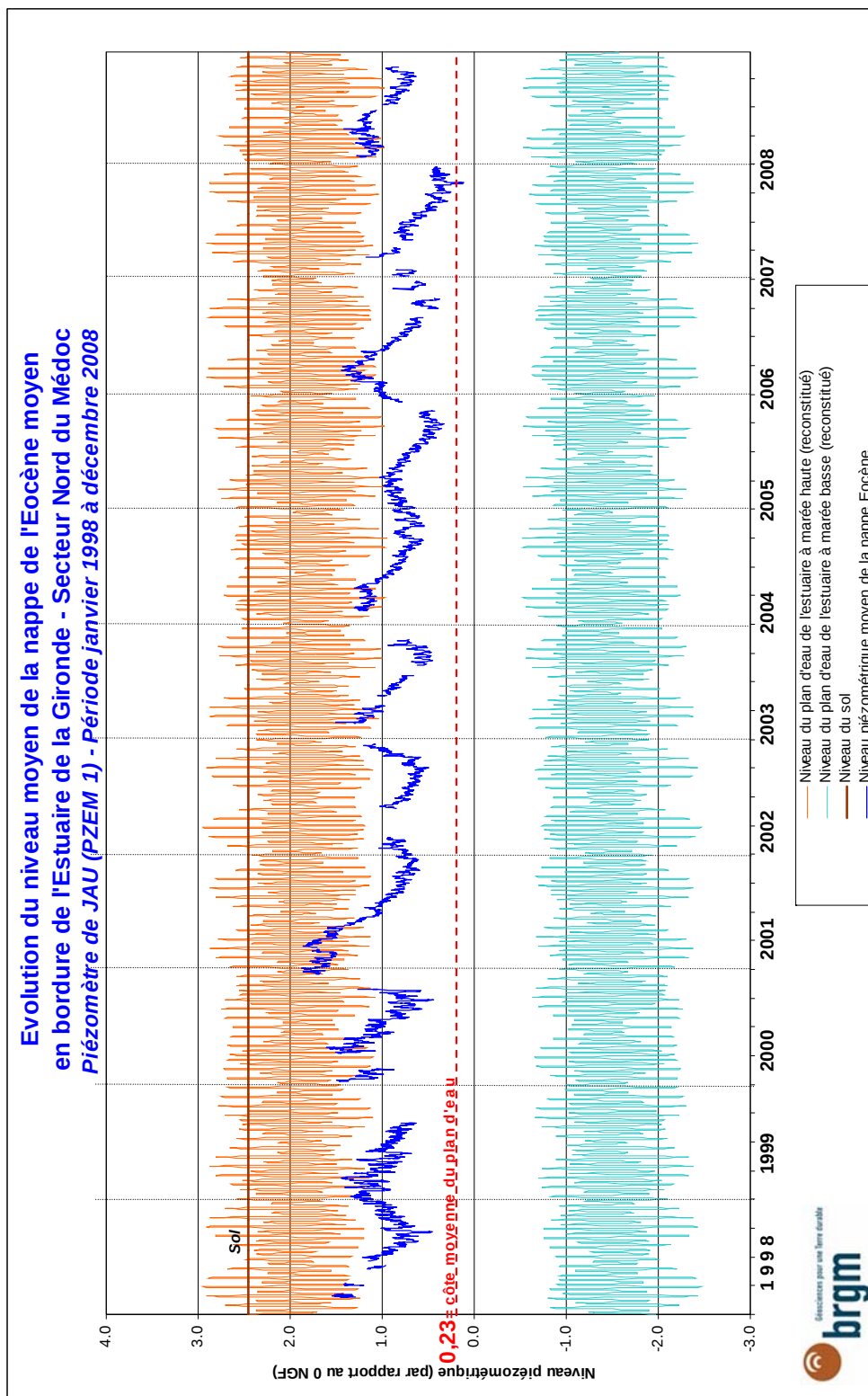


Figure 3 – Evolution du niveau moyen de la nappe de l'Eocène moyen dans le piézomètre de Jau (PZEM 1)
 Période janvier 1998 à décembre 2008

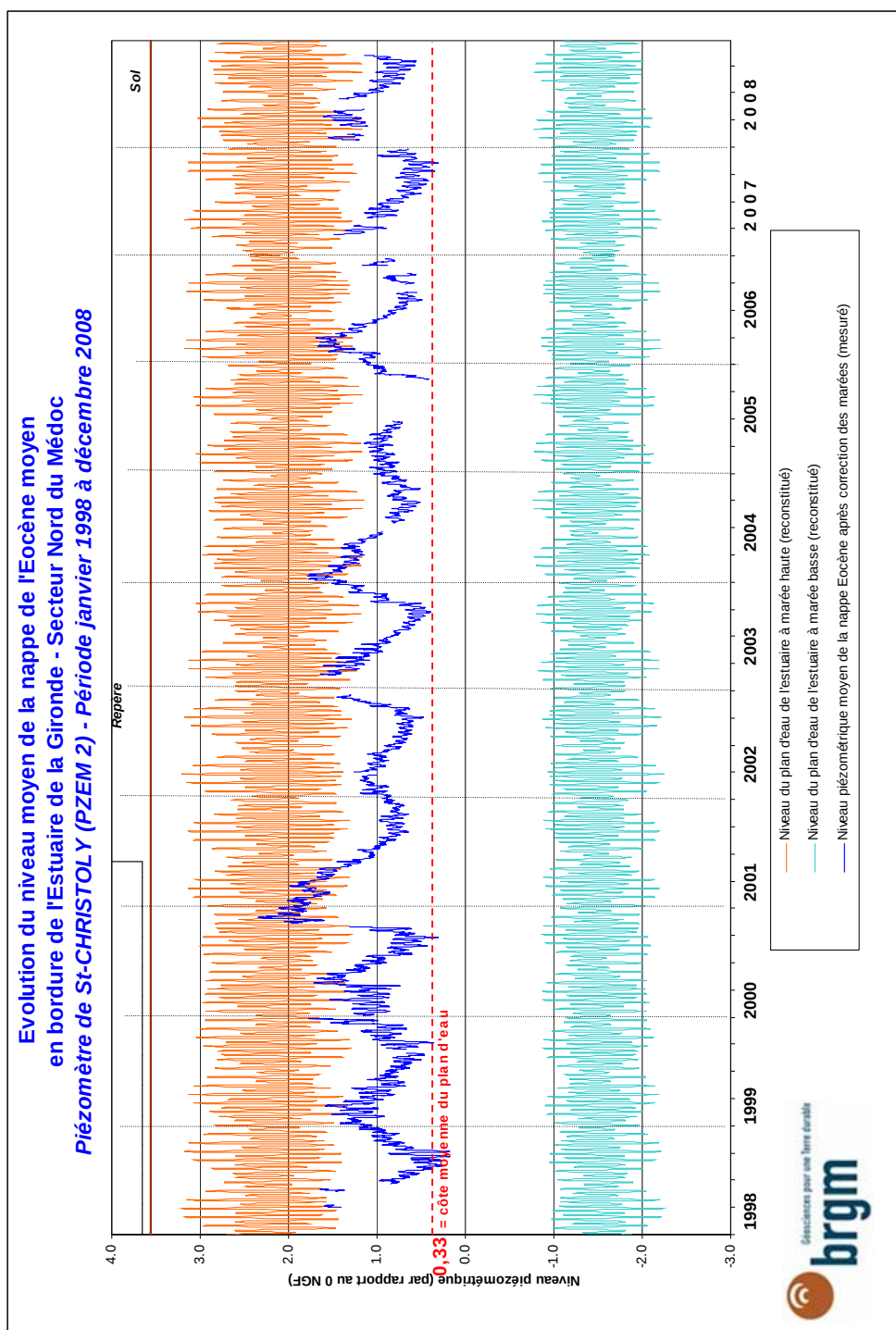


Figure 4 – Evolution du niveau moyen de la nappe de l'Eocène moyen dans le piézomètre de Saint-Christoly (PZEM 2)
 Période janvier 1998 à décembre 2008

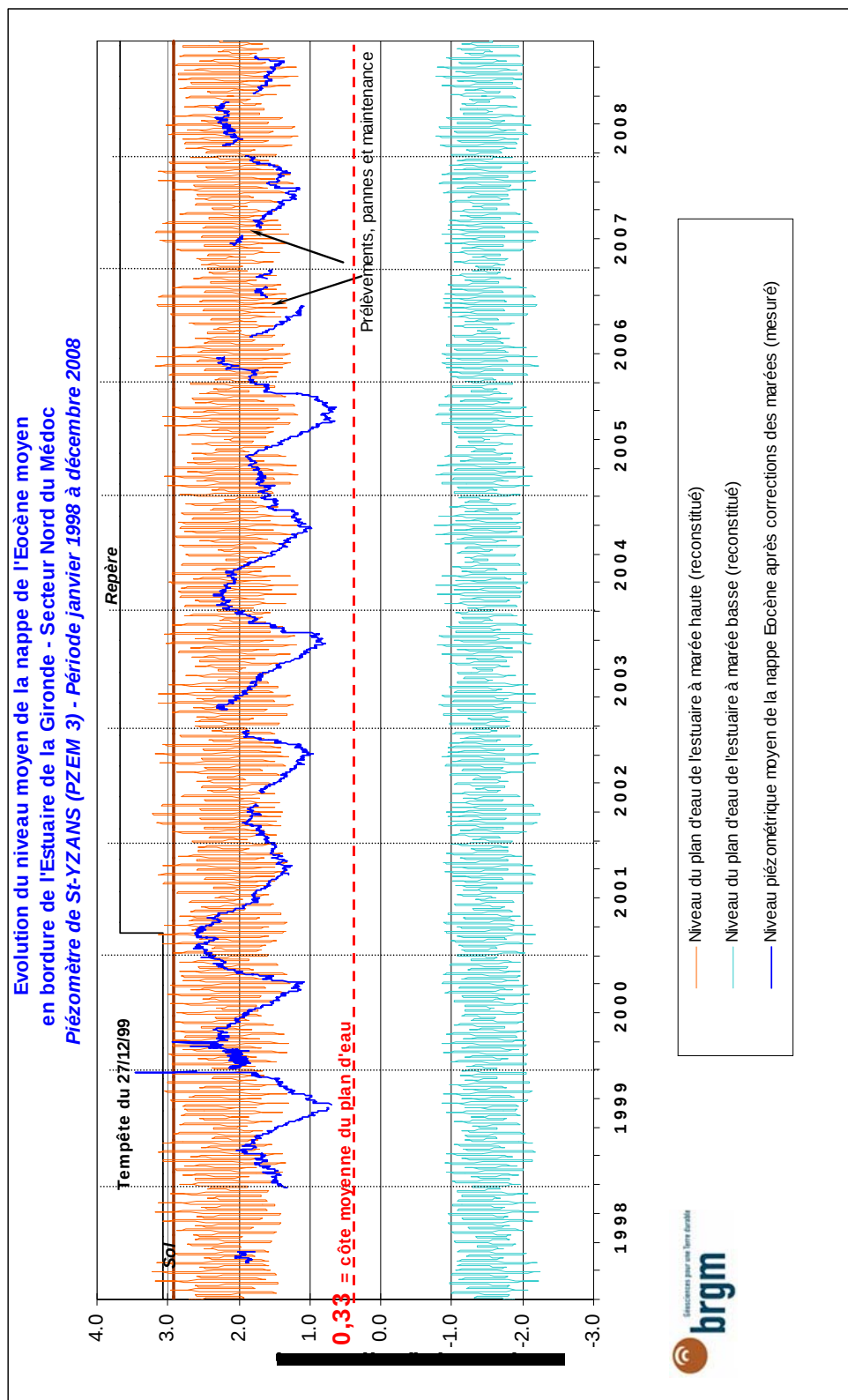


Figure 5 – Evolution du niveau moyen de la nappe de l'Eocène moyen dans le piézomètre de Saint-Yzans (PZEM 3) Période janvier 1998 à décembre 2008

2.2. SUIVI PIÉZOMÉTRIQUE DU RÉSEAU DE SURVEILLANCE PZEM DANS LE SECTEUR DE LA « CRETE PIEZOMETRIQUE »

Dans le secteur de la "crête piézométrique", la surveillance distincte des aquifères calcaire et grés-sableux permet de confirmer des différences d'évolution de niveau entre les nappes de l'Éocène moyen, grâce à des chroniques comparées d'une durée de 4 à 6 ans au droit de Cussac-Fort-Médoc, de Saint-Genès-de-Blaye et de Soussans.

2.2.1. Doublet de piézomètres de Cussac (PZEM 5 et PZEM 6)

La différence de pression entre les deux aquifères varie de 1,00 à 1,30 m suivant les périodes. Dans ce secteur, ***la cote piézométrique moyenne de la nappe est toujours largement plus élevée que celle du niveau moyen de l'estuaire*** (plus de 1,50 m pour la nappe inférieure et 0,75 m pour la nappe des calcaires).

La nappe de l'Eocène grés-sableux captée par le **PZEM 5** de Fort-Médoc présente une évolution comparable à celle du secteur central de Saint-Estèphe, avec des hautes-eaux étalées pendant le mois de mars à début-mai et des basses-eaux prononcées de la fin-août à mi-septembre (Figure 7). Récemment la plus forte pression de cette partie profonde de la nappe a été en 2007 de + 3,65 NGF environ ; la plus faible cote est redescendu à + 2,50 NGF en fin septembre 2008. La différence entre hautes-eaux et basses-eaux est assez constante (1,00 m environ).

La nappe de l'Eocène calcaire captée par le **PZEM 6** présente une évolution identique (crue en fin avril pour atteindre un étiage en fin-août - Figure 7). En 2008 comme en 2007, le plus haut niveau moyen de cette partie supérieure de la nappe a été de + 2,35 NGF environ ; la plus faible cote atteinte en 2008 est de + 1,50 NGF environ, indiquant des basses-eaux moins marquées que les années 2005 et 2006. La différence entre hautes-eaux et basses-eaux est du même ordre de grandeur (0,85 m) que pour la nappe profonde.

2.2.2. Doublet de piézomètres de Soussans (PZEM 8 et PZEM 9)

Dans ce secteur sud de l'étude, ***la cote piézométrique moyenne de la nappe est toujours plus élevée que celle du niveau moyen de l'estuaire*** (a minima plus de 0,50 m pour la nappe inférieure et 0,25 m pour la nappe des calcaires). De 2004 à 2006 la différence de pression entre les deux aquifères variait habituellement de 0,10 m en basses-eaux à 1,00 m en hautes-eaux, mais en 2007-2008 la différence s'est révélée de plus en plus constante et grande (0,80, puis 1,10 m environ)

La nappe du réservoir grés-sableux captée par le **PZEM 9** présente une évolution comparable à celle du sommet de la "crête", avec des hautes-eaux très étalées de février à mai et des basses-eaux de juillet à septembre (Figure 8).Le niveau est en constante élévation : en 2005-2006, la plus forte pression moyenne de cette partie profonde de la nappe a été de + 2,70 NGF à mi-avril et la plus faible cote atteinte a été

de + 0,86 NGF à fin août, mais en 2007-2008 la pression a atteint + 3,00 NGF à mi-juin et n'est pas descendu en-dessous de + 1,25 NGF en octobre. La différence entre hautes-eaux et basses-eaux qui était nettement plus grande (1,90 m) que celle relevée le long de la rive médocaine et sur la zone de la "crête", se réduit depuis 2 ans à 75 cm. A la différence des années 2004 à 2006, les basses eaux de 2007-2008 ont été très peu marquées (+ 2,40 NGF environ).

La nappe de l'Eocène calcaire captée par le **PZEM 8** présente une évolution assez comparable avec les hautes-eaux en fin-avril, mais les basses-eaux plus tardives que pour la nappe profonde ne sont atteintes qu'entre mi-septembre et mi-octobre (Figure 8)

Le plus haut niveau moyen de cette partie supérieure de la nappe est situé à + 1,70 NGF environ à mi-avril ; la plus faible cote a été atteinte à mi-septembre (+ 0,66 NGF). La différence entre crue et étiage est bien moins grande que pour la nappe profonde (0,70 m environ). La tendance à une légère élévation est constatée depuis 2004.

2.2.3. Piézomètre d'Arcins (PZEM 10)

Sa réalisation date de l'automne 2006, mais il est déjà possible de connaître le contexte évolutif de la piézométrie de la nappe des calcaires dans ce secteur. La différence de piézométrie entre hautes-eaux et basses-eaux est assez peu importante (0,75 m environ). Le niveau est faiblement artésien à un peu plus de + 4 NGF en hautes eaux en avril-mai très étalées jusqu'en fin juin, et se tient + 3,30 NGF en basses eaux en octobre-novembre.

2.2.4. Piézomètres de Saint-Julien-Beychevelle (PZEM 13 et PZEM 14)

Les piézomètres de Beychevelle permettent de surveiller le niveau de la nappe des calcaires sur la retombée septentrionale de la "crête" piézométrique. Dans ce secteur, ***la cote piézométrique moyenne de la nappe est généralement plus élevée*** que celle du niveau moyen de l'estuaire, ***sauf au moment de l'étiage***.

La nappe du réservoir calcaire captée par les **PZEM 13** et **PZEM 14** présente une évolution très comparable entre elles et avec celle connue à Saint-Estèphe, les hautes-eaux culminant à mi-avril et les basses-eaux étant atteintes entre mi-juillet et mi-septembre (Figure 10). Le plus haut niveau moyen de cette partie de la nappe est respectivement situé entre + 2,40 et + 3,10 NGF environ à mi-avril ; la plus faible cote a été atteinte en début septembre 2005 (- 0,30 NGF). Mais une tendance à la remontée en basses-eaux s'est nettement ressentie en 2007-2008 avec un niveau vers + 1,00 NGF. La différence actuelle entre hautes-eaux et basses-eaux (1,30 m) est moins forte que celle observée en 2005 et 2006.

Cependant l'enregistreur du PZEM 14 est tombé en panne en avril 2008, et conformément aux dispositions convenues avec le Conseil général, n'a pas été remplacé.

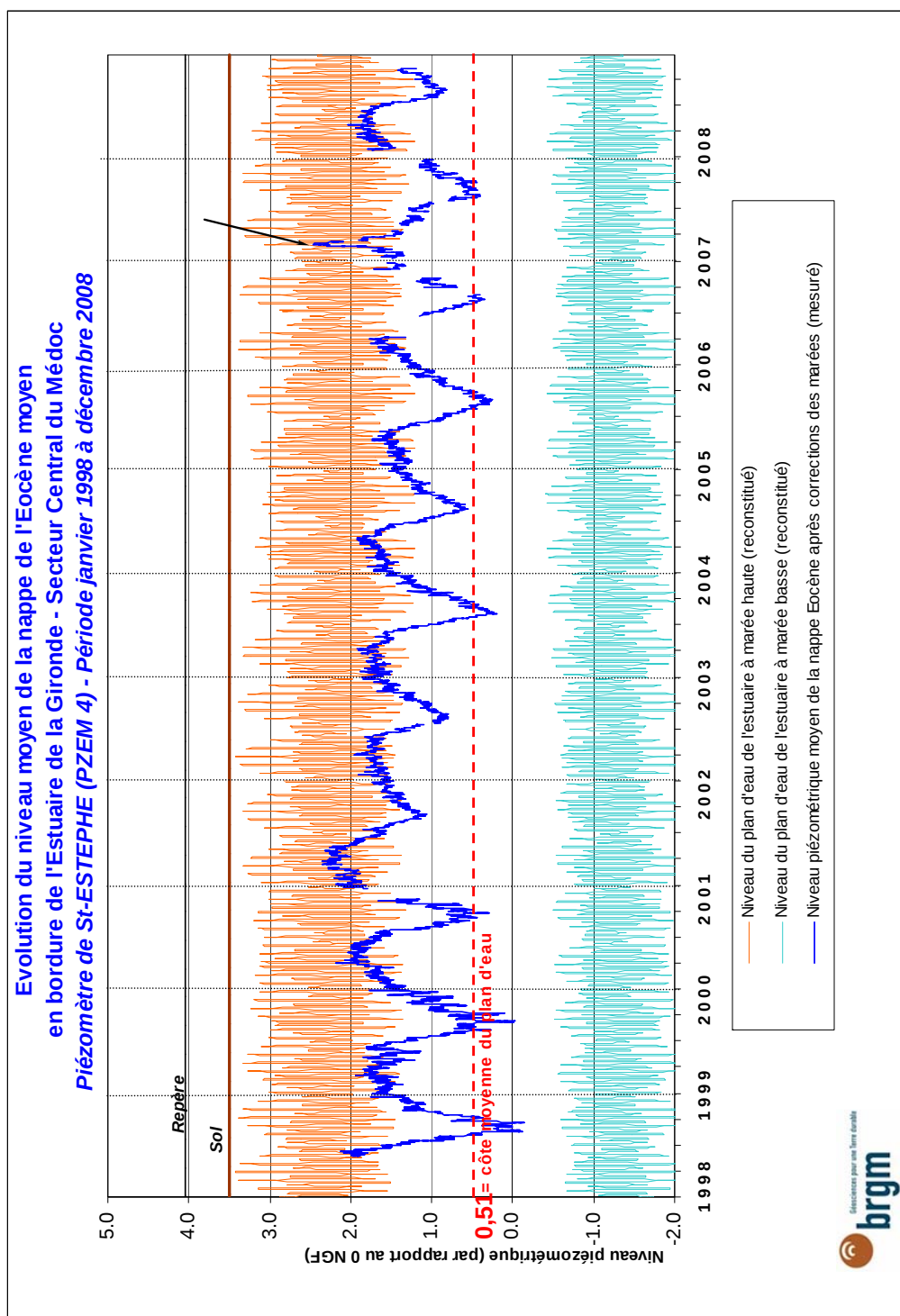


Figure 6 – Evolution du niveau moyen de la nappe de l'Eocène moyen dans le piézomètre de Saint-Estèphe (PZEM 4)

Période janvier 1999 à décembre 2008

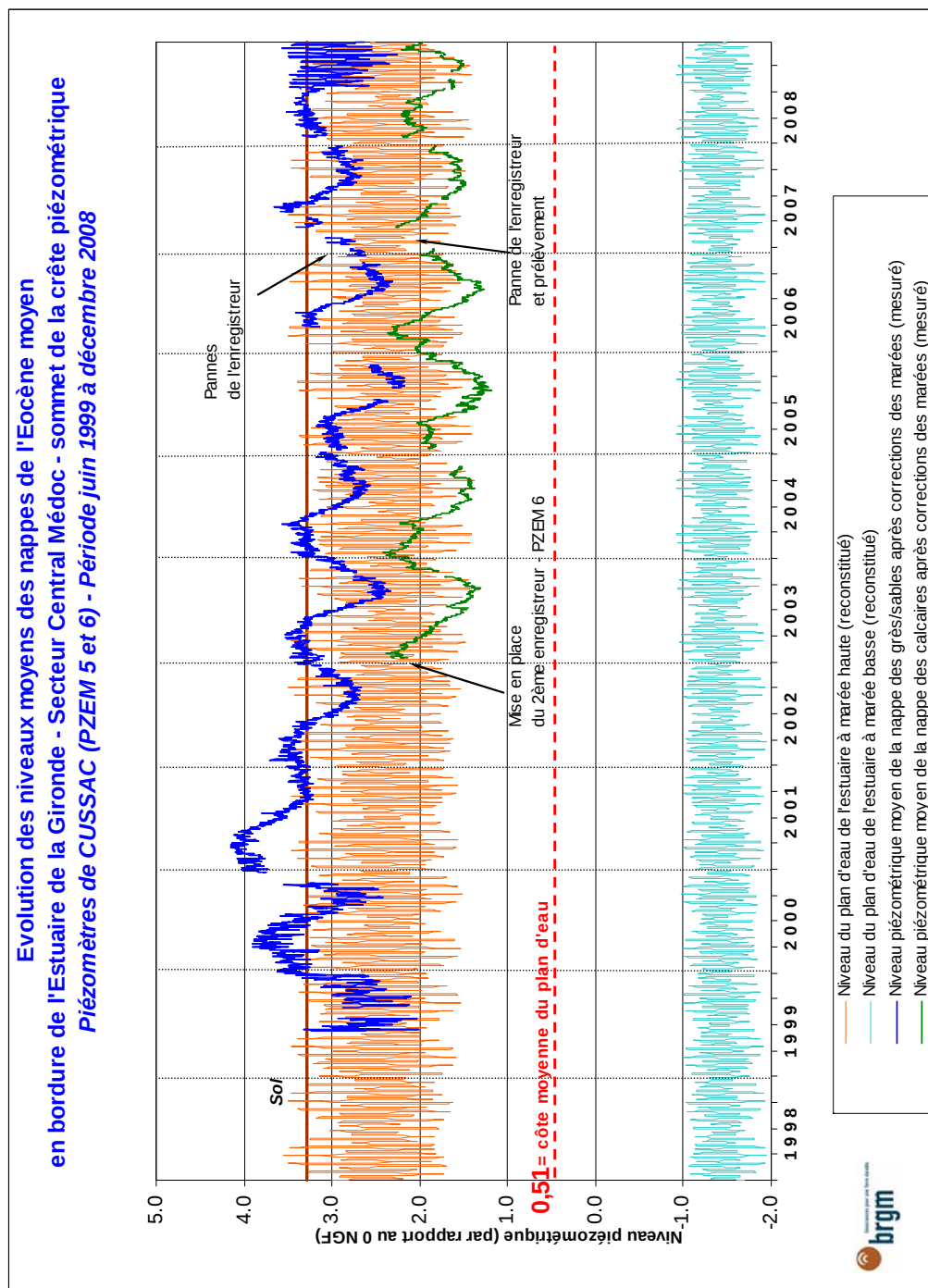


Figure 7 – Evolution du niveau moyen de la nappe de l'Eocène moyen dans le piézomètre de Cussac (PZEM 5 et 6)
 Période janvier 1999 à décembre 2008

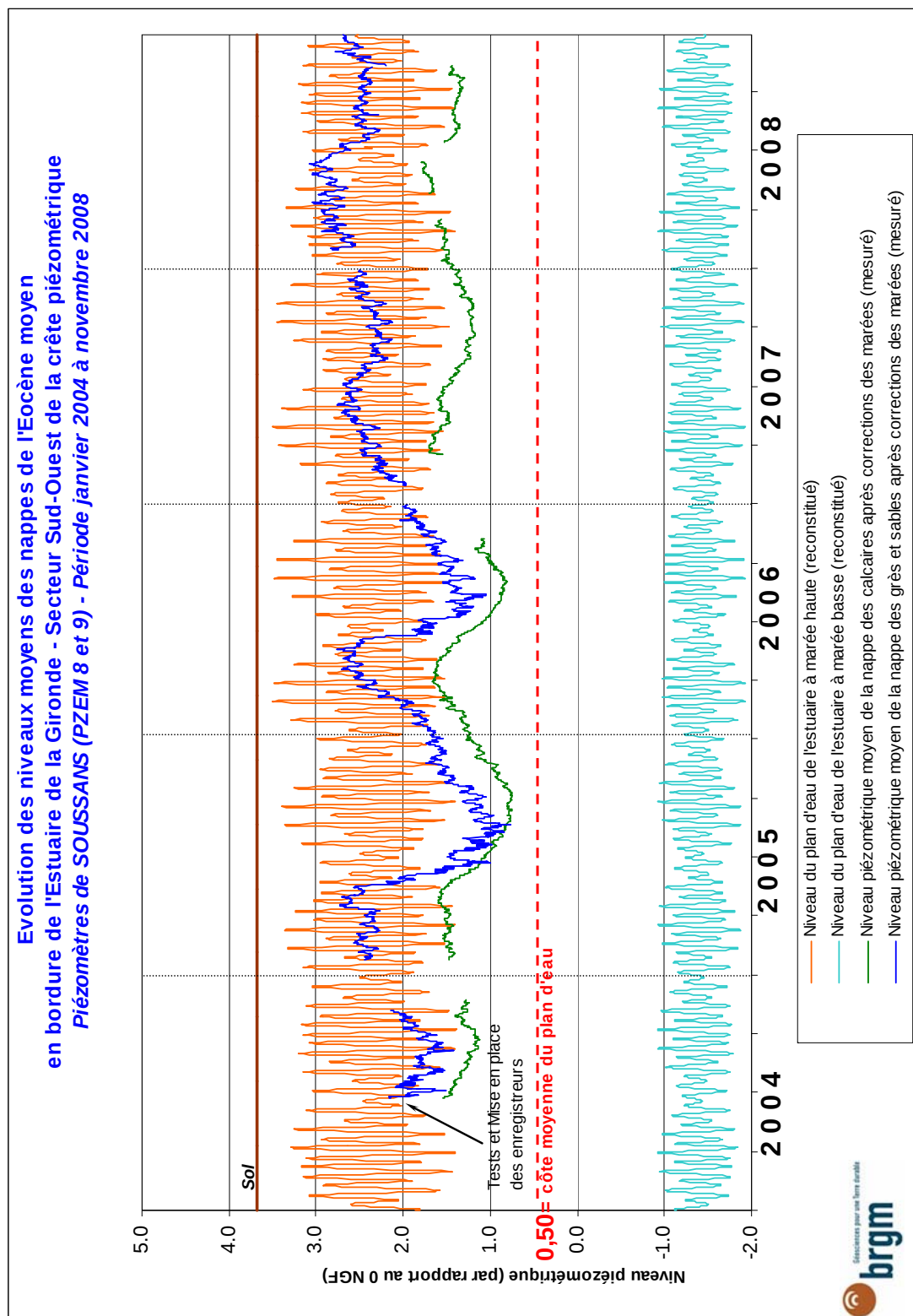


Figure 8 – Evolution du niveau moyen de la nappe de l'Eocène moyen dans les piézomètres de Soussans (PZEM 8 et 9)
 Période janvier 2004 à décembre 2008

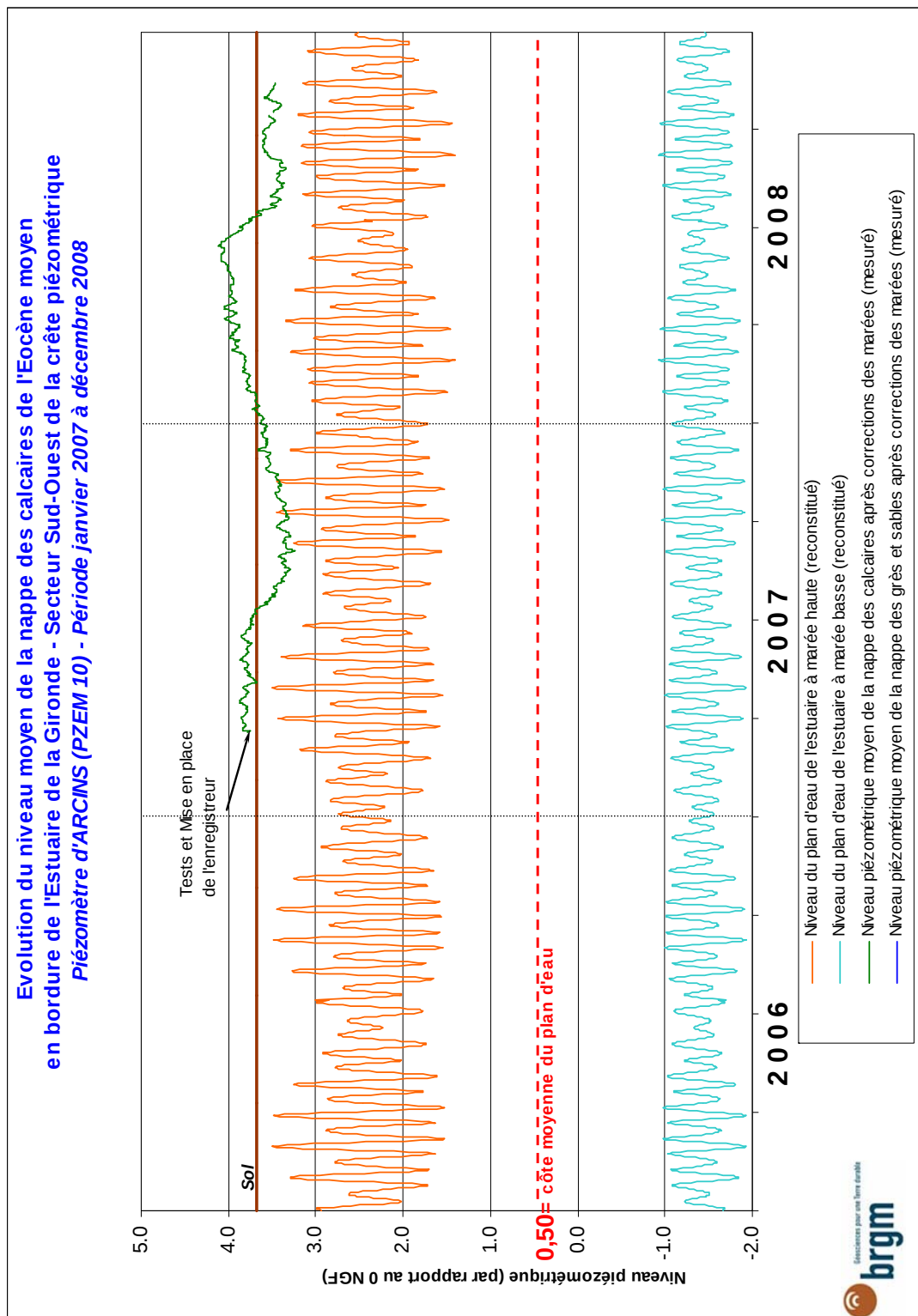


Figure 9 – Evolution du niveau moyen de la nappe de l'Eocène moyen dans le piézomètre d'Arcins (PZEM 10)
 Période janvier à décembre 2008

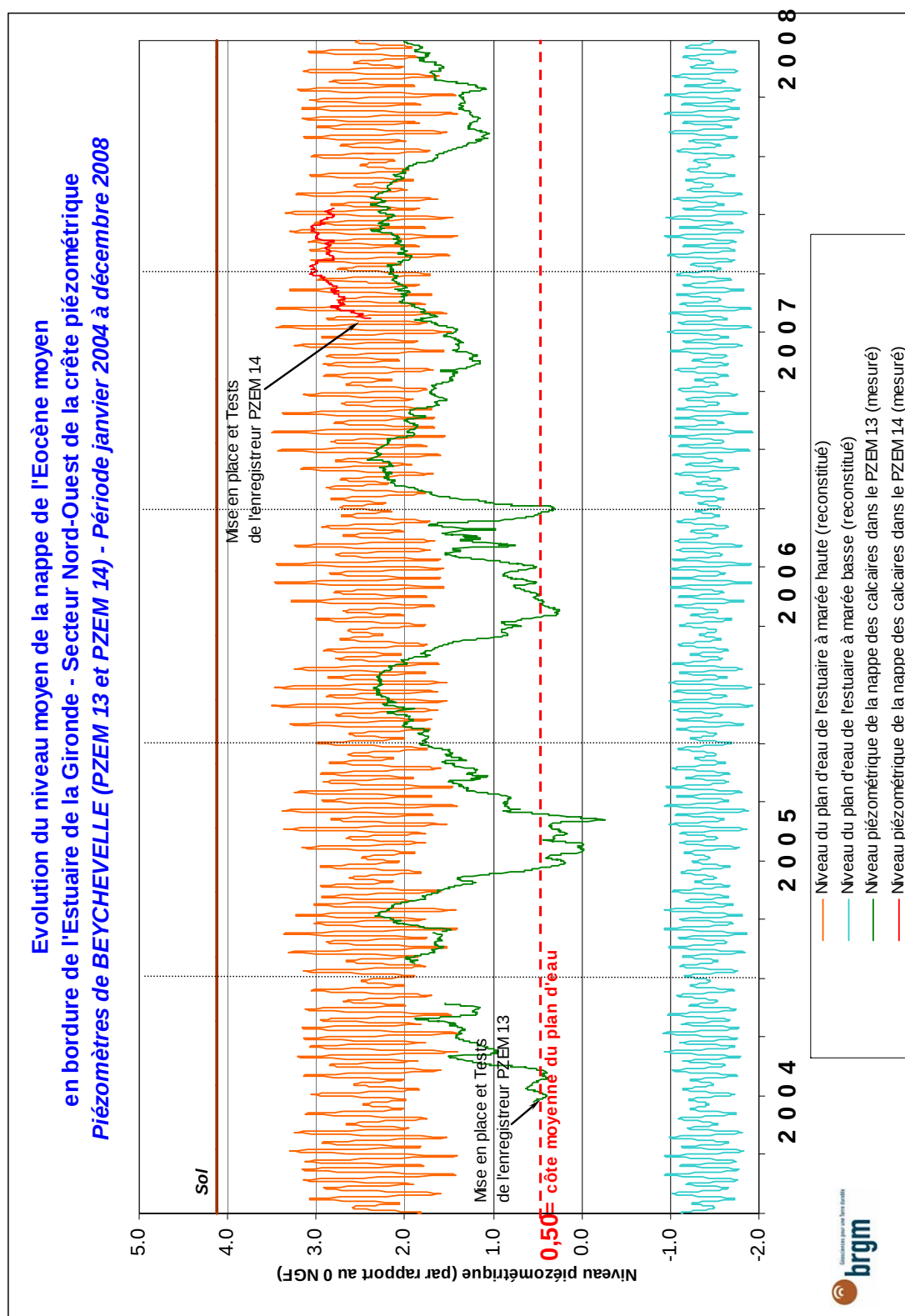


Figure 10 – Evolution du niveau moyen de la nappe de l'Eocène moyen calcaire dans les piézomètres de Beychevelle (PZEM 13 et PZEM 14)
 Période janvier 2004 à décembre 2008

2.3. SUIVI PIÉZOMÉTRIQUE DU RÉSEAU DE SURVEILLANCE PZEM DANS LE BLAYAIS (RIVE DROITE DE L'ESTUAIRE)

2.3.1. Piézomètre de Plassac (PZEM 7)

La différence entre hautes-eaux et basses-eaux est du même ordre de grandeur (1,30 m) que dans la zone de la "crête". Dans ce secteur sud-oriental, ***la cote piézométrique moyenne de la nappe est toujours plus élevée que celle du niveau moyen de l'estuaire.***

L'enregistrement piézométrique montre une évolution comparable à celui du secteur de Cussac (PZEM 5 et 6), avec des hautes-eaux qui s'étalent du mois de mars à début mai et des basses-eaux de la fin août à mi-septembre. Le plus haut niveau moyen de l'année 2008 a atteint + 3,30 NGF et le plus bas n'a été que +2,80 NGF avec une différence saisonnière de 50 cm, presque trois fois plus faible qu'en 2003 (Figure 11).

2.3.2. Doublet de piézomètres de Saint-Genès (PZEM 11 et PZEM 12)

Dans ce secteur nord-oriental, ***la cote piézométrique moyenne de la nappe est toujours plus élevée que celle du niveau moyen de l'estuaire.***

La nappe du réservoir grés-sableux captée par le **PZEM 12** présente une évolution habituelle du sommet de la "crête", avec des hautes-eaux très étalées d'avril à début mai et des basses-eaux au mois d'août (Figure 12). En 2008 la plus forte pression moyenne de cette partie profonde de la nappe a été de + 4,50 NGF début mai ; la plus faible cote moyenne n'est pas descendu en dessous de + 3,40 NGF à mi-octobre, l'étiage étant plus tardif d'un mois et demi cette année-là. La différence entre hautes-eaux et basses-eaux, généralement habituelle de la zone de la "crête", a été là aussi plus faible cette année (0,50 m).

La nappe du réservoir calcaire captée par le **PZEM 11** présente une évolution assez semblable (Figure 12). En 2008 le plus haut niveau moyen de cette partie supérieure de la nappe était situé à + 3,80 NGF environ ; la plus faible cote à mi-août n'est pas descendue en dessous de + 2,97 NGF ; la différence entre hautes-eaux et basses-eaux est là encore comparable (1,40 m) à celle de la zone de la "crête". La différence de pression entre les deux aquifères est faible, variant de 0,10 à 0,50 m suivant les périodes.

2.3.3. Piézomètre de l'Île Nouvelle (PZEM 15)

Le site de l'Île Nouvelle (commune de Blaye), qui avait été retenu par le groupe d'experts de la Commission Locale de l'Eau de la Gironde (CLE, 2007) pour surveiller la crête piézométrique au centre de l'estuaire pendant les travaux de déroctage des calcaires de l'Éocène moyen de la passe de Cussac (15 juillet – 07 septembre 2007), est venu en complément temporaire de la surveillance renforcée à cette période sur les

secteurs de Cussac, Arcins et de Soussans. Il se trouve presque en face du site de Saint-Genès de Blaye et capte la même nappe que le PZEM 11 et le PZEM 6.

Les données n'ont été enregistrées que de la mi-juin à la fin décembre 2007. L'enregistrement des variations piézométriques de la nappe de l'aquifère calcaire captée par le **PZEM 15** présente une évolution assez particulière, car ce piézomètre est situé au milieu de l'estuaire et les variations de pression du plan d'eau s'exercent donc de chaque côté de l'île induisant une très grande amplitude journalière. La **cote piézométrique moyenne est presque toujours située à plus de 2 m au-dessus du niveau moyen de l'estuaire** (Platel, 2008 – BRGM/RP-56377-FR).

La différence de pression dans la nappe entre la marée haute et la marée basse est la plus forte connue sur tout le réseau PZEM, variant de 1,50 à 2,00 m suivant les coefficients. Le plus haut niveau moyen s'est situé à + 3,00 NGF environ en juin-juillet ; la plus faible cote en période de basses-eaux atteinte début septembre n'est pas descendue en dessous de + 2,40 NGF ; la différence entre hautes-eaux et basses-eaux est assez faible (0,50 m).

Ce site n'est plus instrumenté depuis 2008, car il n'a pas pu être équipé à cause de son usage comme captage d'eau pour l'antenne environnementale du Conseil général sur l'île Nouvelle.

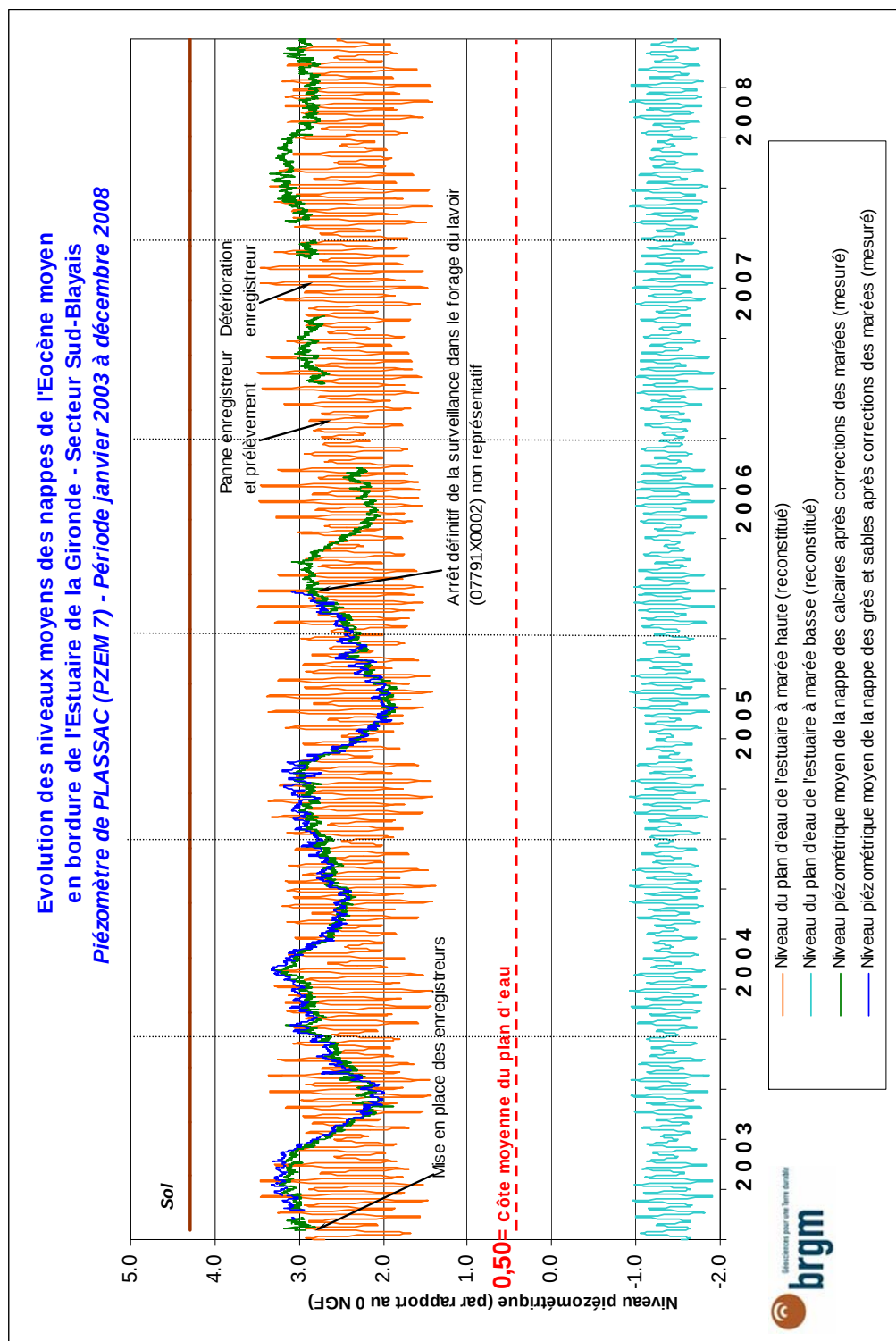


Figure 11 – Evolution du niveau moyen de la nappe de l'Eocène moyen calcaire dans le piézomètre de Plassac (PZEM 7)
 Période janvier 2003 à décembre 2008

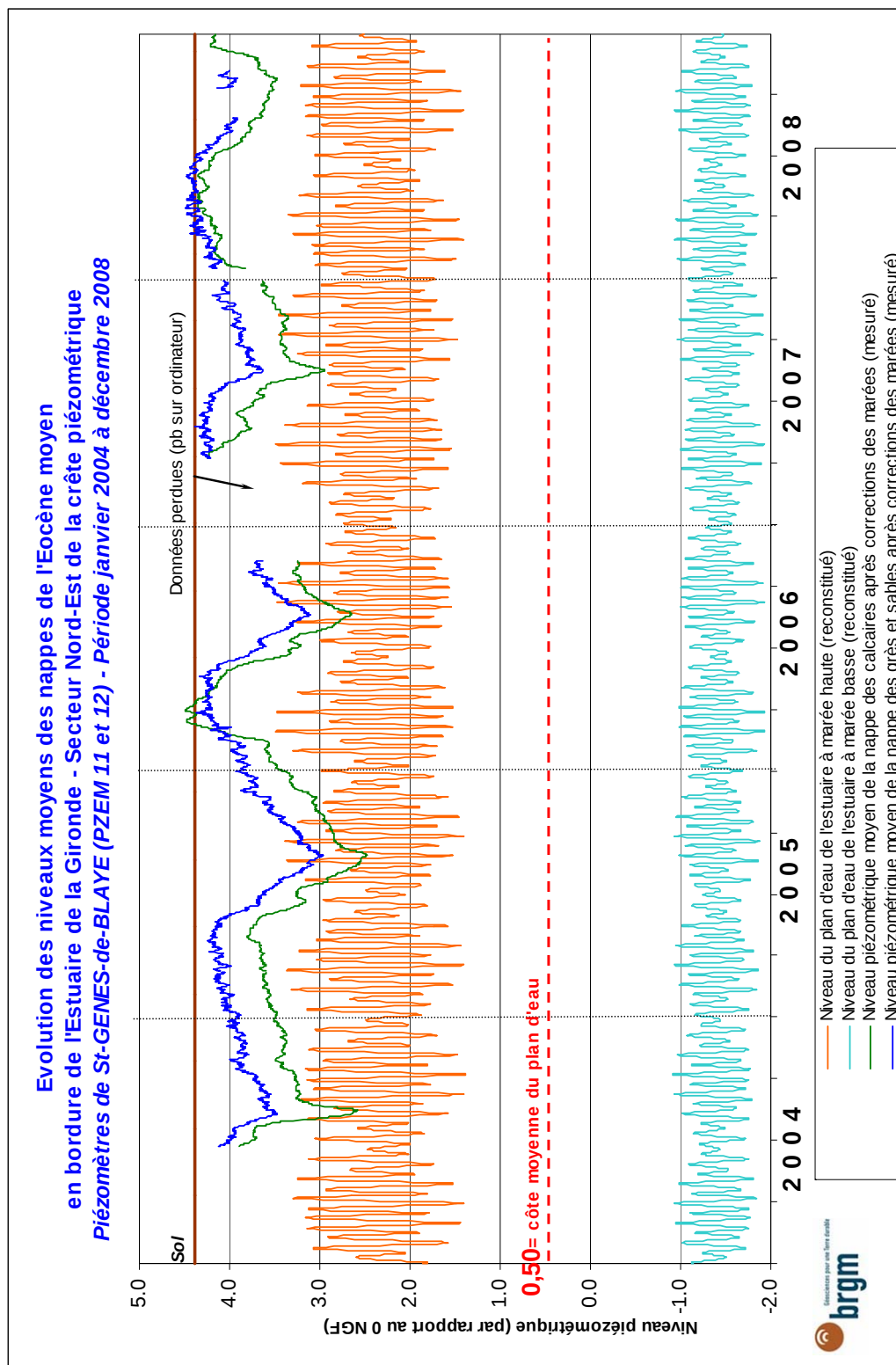


Figure 12 – Evolution du niveau moyen de la nappe de l'Eocène moyen dans les piézomètres de Saint-Genès de Blaye (PZEM 11 et 12)

Période janvier 2004 à décembre 2008

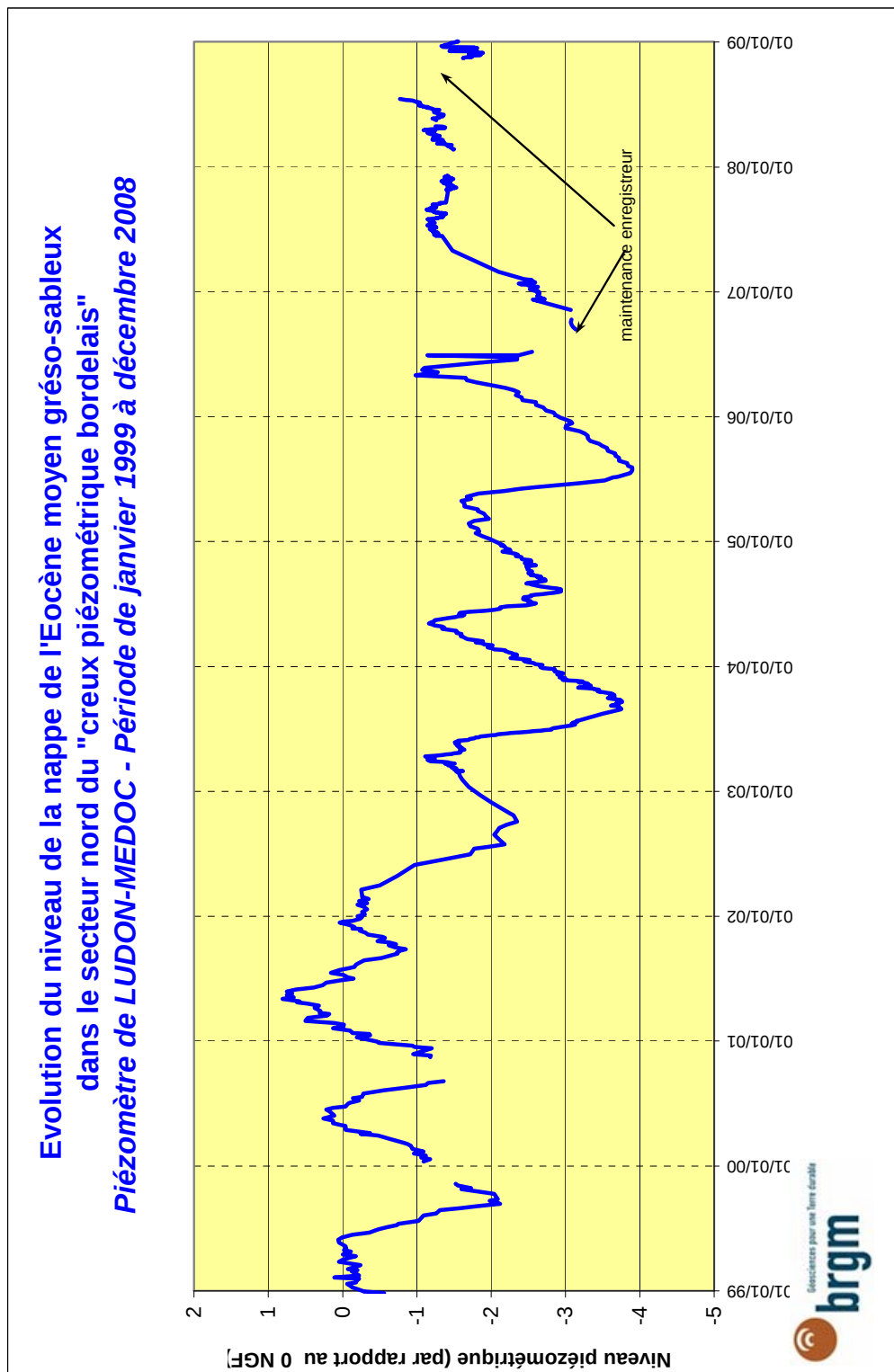


Figure 13 – Evolution du niveau moyen de la nappe de l'Eocène moyen grés-sableux dans le piézomètre de Ludon-Médoc (08032X0001/F1)

Période janvier 1999 à décembre 2008

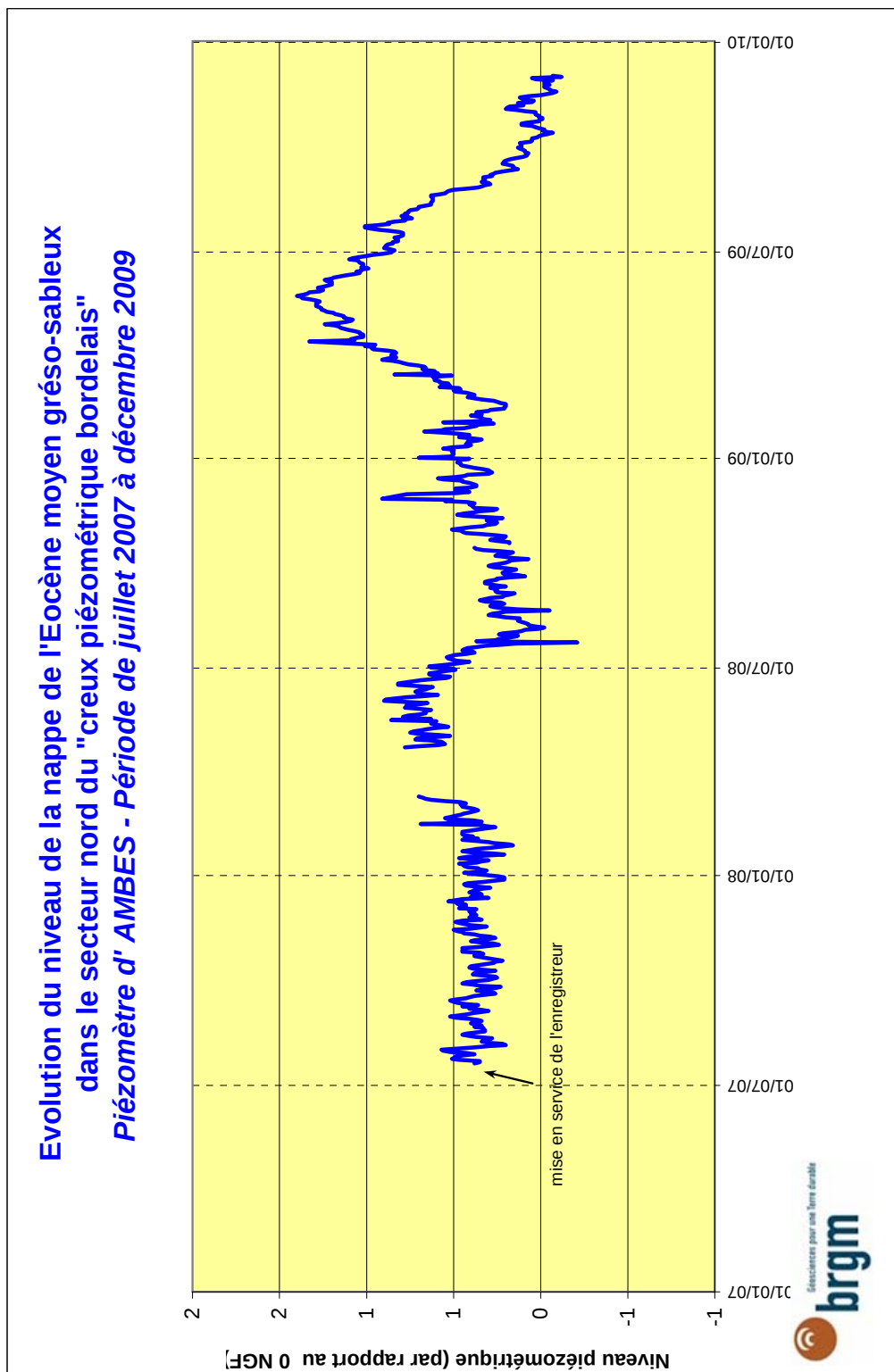


Figure 14 - Evolution du niveau moyen de la nappe de l'Eocène moyen grés-sableux dans le piézomètre d'Ambès (07796X0025/F)

Période juillet à décembre 2009

2.4. SUIVI PIÉZOMÉTRIQUE DANS LE NORD DE LA DÉPRESSION PIÉZOMÉTRIQUE BORDELAISE

Les mesures ont été réalisées dans le forage communal de Ludon-Médoc (n° BSS 08032X0001/F1) et dans celui de l'ancienne centrale thermique d'Ambès (07796X0025/F) qui captent la nappe des sables et des grès (Figure 13 et Figure 14).

L'ouvrage de Ludon est équipé depuis novembre 1998 par un enregistreur de type *Madofil* au pas de temps journalier, ce qui permet de préciser les caractéristiques de l'évolution piézométrique de la nappe des sables éocènes dans cet endroit. C'est pendant l'année 2005 qu'ont été enregistrés les niveaux les plus bas de ces 15 dernières années. Le niveau en basses-eaux est remonté vers -3 NGF et son niveau en hautes eaux s'est maintenu vers -1 NGF au cours de l'année 2007. Une nette remontée s'observe ensuite avec un niveau en basses-eaux beaucoup moins marqué que les années antérieures (- 1,50 NGF).

Après son diagnostic d'état en 2006 et la convention passée entre EDF et le Conseil général de la Gironde, l'ouvrage 07796X0025/F d'Ambès a été équipé depuis juillet 2007 par un enregistreur de type *Madofil* puis de type *Orphéus Mini OTT* au pas de temps journalier. Il a été nivelé et la cote du repère se situe à 5,27 m NGF. Les plus bas niveaux d'eau oscillent autour du 0 NGF. La tendance d'évolution n'est pas nette, car si le niveau piézométrique atteint presque + 2 NGF en hautes-eaux, il reste à 0 NGF pendant les basses-eaux. On ne voit donc pas encore les effets de la mise en service du réseau d'eau industrielle de substitution.

2.5. EVOLUTIONS COMPARÉES DES NIVEAUX À MARÉE HAUTE

Comme les moments pendant lesquels les plus forts risques d'intrusion saline sont les quelques heures de la journée autour de la haute mer, les figures 15 et 16 permettent de comparer les variations annuelles des pressions des nappes éocènes à **marée haute pour un coefficient moyen de 70 (niveau MHc70)** dans tous les points du réseau PZEM. La période de l'année à plus fort aléa est bien sûr celle de l'étiage en fin d'été ; les détails des évolutions annuelles ne seront pas repris ici, ayant été déjà commentés dans les rapports précédents (Platel *et al.*, 2005, 2006).

Il faut souligner qu'après une hausse en 1998-1999, **la tendance générale** correspondait à une légère baisse des pressions pendant les années 2001-2005, puis que les années **2006-2008 sont à nouveau caractérisées par une nette remontée des niveaux**. C'est l'évolution générale actuelle pour les deux types d'aquifère dans les secteurs de Jau, Saint-Yzans, Saint-Estèphe, Beychevelle, Soussans, et Plassac. C'est notamment le cas pour l'aquifère inférieur des grès dans celui de Cussac-Fort-Médoc (- 0,70 m en 5 ans, puis +0,50 / 0,60 m en 3 ans), mais surtout dans le secteur de Soussans et de Ludon où la pression moyenne a, dans le même temps, chuté de 2,5 m puis remonté de plus de 1 m.

Evolutions piézométriques comparées des nappes de l'Eocène moyen à marée haute de coefficient moyen (MHC70) dans les secteurs de la rive médocaine de l'estuaire de la Gironde surveillés par les piézomètres du Réseau PZEM

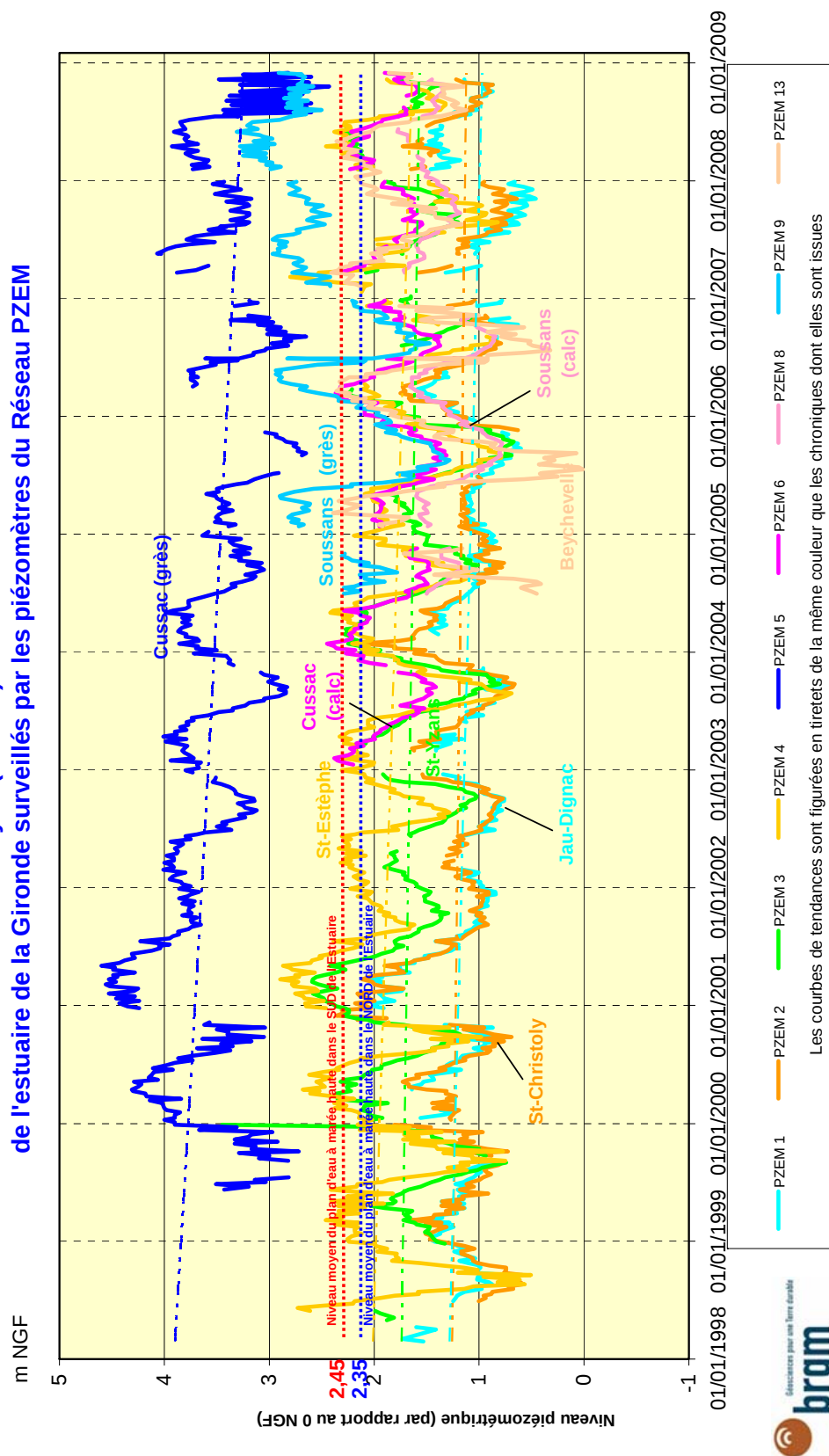


Figure 15 - Evolutions comparées des piézométries des nappes de l'Eocène moyen à marée haute de coefficient moyen (70) de 1998 à 2008 – rive médocaine



haute de coefficient moyen (70) de 1998 à 2008 – rive orientale

2.6. ÉTATS PIÉZOMÉTRIQUES DES NAPPES DE L'ÉOCÈNE MOYEN DANS LE SECTEUR DE LA "CRÊTE"

Les deux cartes piézométriques dressées pour les nappes des grès et des calcaires de l'Éocène moyen dans le secteur de la "crête" ont été mise à jour avec les données de l'année 2008. Les valeurs utilisées pour la construction de ces cartes correspondent aux minima observés sur les chroniques en période de basses eaux.

Concernant la carte piézométrique de la **nappe inférieure grés-sableuse** (Figure 17), les niveaux varient entre - 1,9 NGF dans le secteur de Ludon-Médoc au nord de Parempuyre et + 11,65 NGF à Castelnau-de-Médoc. La crête semble se maintenir. Les valeurs observées sur son axe au point 07791X0204 (Cussac- PZEM 5) atteignent +2,3 m NGF. Cette valeur d'étiage est en hausse par rapport aux mesures effectuées aux mêmes périodes depuis 2005.

D'une manière générale, au nord de la "crête piézométrique", les niveaux restent stables comme le montre la chronique du point 07555X0040, situé près de la centrale nucléaire du Blayais. Au sud de la "crête", une hausse généralisée de la piézométrie est observée, notamment dans le secteur d'Ambès et de Ludon où les niveaux sont montés de + 0,5 et + 1,80 m respectivement. A Soussans (PZEM 9) la tendance générale est à la hausse (étiage 2006 : 1,3 m NGF ; étiage 2007 : 1,9 m NGF ; étiage 2008 : 2 m NGF). Il en va de même au point 08032X0001 situé à Ludon-Médoc ou à Ambès.

Pour la **nappe supérieure calcaire** (Figure 18), les niveaux varient entre -0.8 NGF au nord à Saint-Estèphe et près de + 8,4 m NGF près de Saint-Laurent-du-Médoc. L'évolution de la piézométrie paraît peu importante en comparaison aux cartes réalisées les années précédentes. Néanmoins, le nombre limité de points de mesure dans le réservoir de l'Éocène moyen calcaire ne permet pas de retranscrire avec précision la complexité des écoulements.

La tendance à la hausse observée en 2007 dans le sud-est du secteur d'étude vers la presqu'île d'Ambès et le Bourgeais semble se confirmer en 2008. Ainsi, les niveaux semblent s'être stabilisé au point 07796X0069 (Commune de Bourg sur Gironde). Cette évolution est à mettre en relation avec la forte diminution des pompages industriels après la mise en service des ressources de substitution (-250 000 m³/an environ pour les ouvrages de Cofrablack – 07796X0040/F et 07796X0102/F et Hydro-Agri - 07796X0107/F).

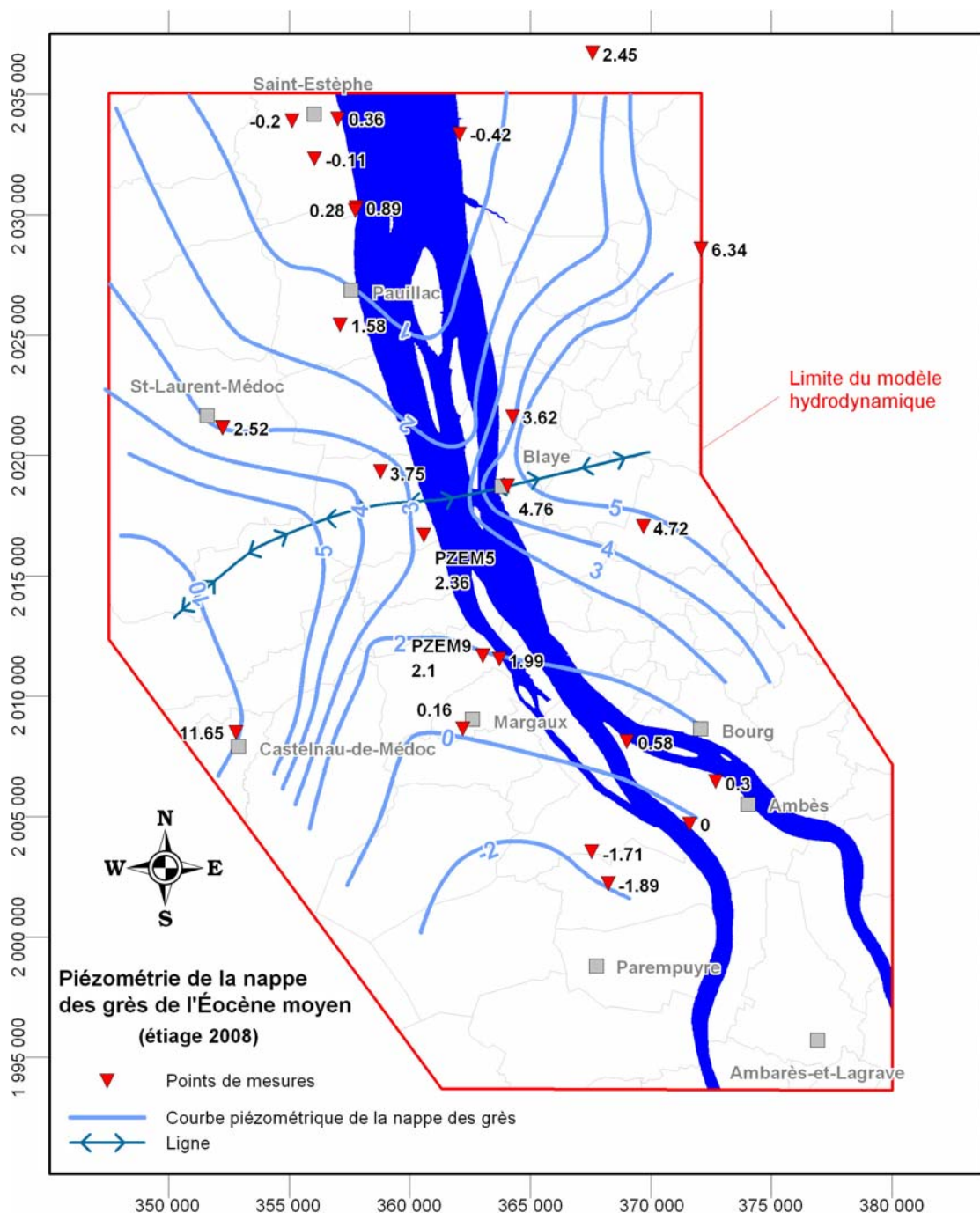


Figure 17- Carte piézométrique de la nappe des grès de l'Eocène moyen – Etat à fin 2008

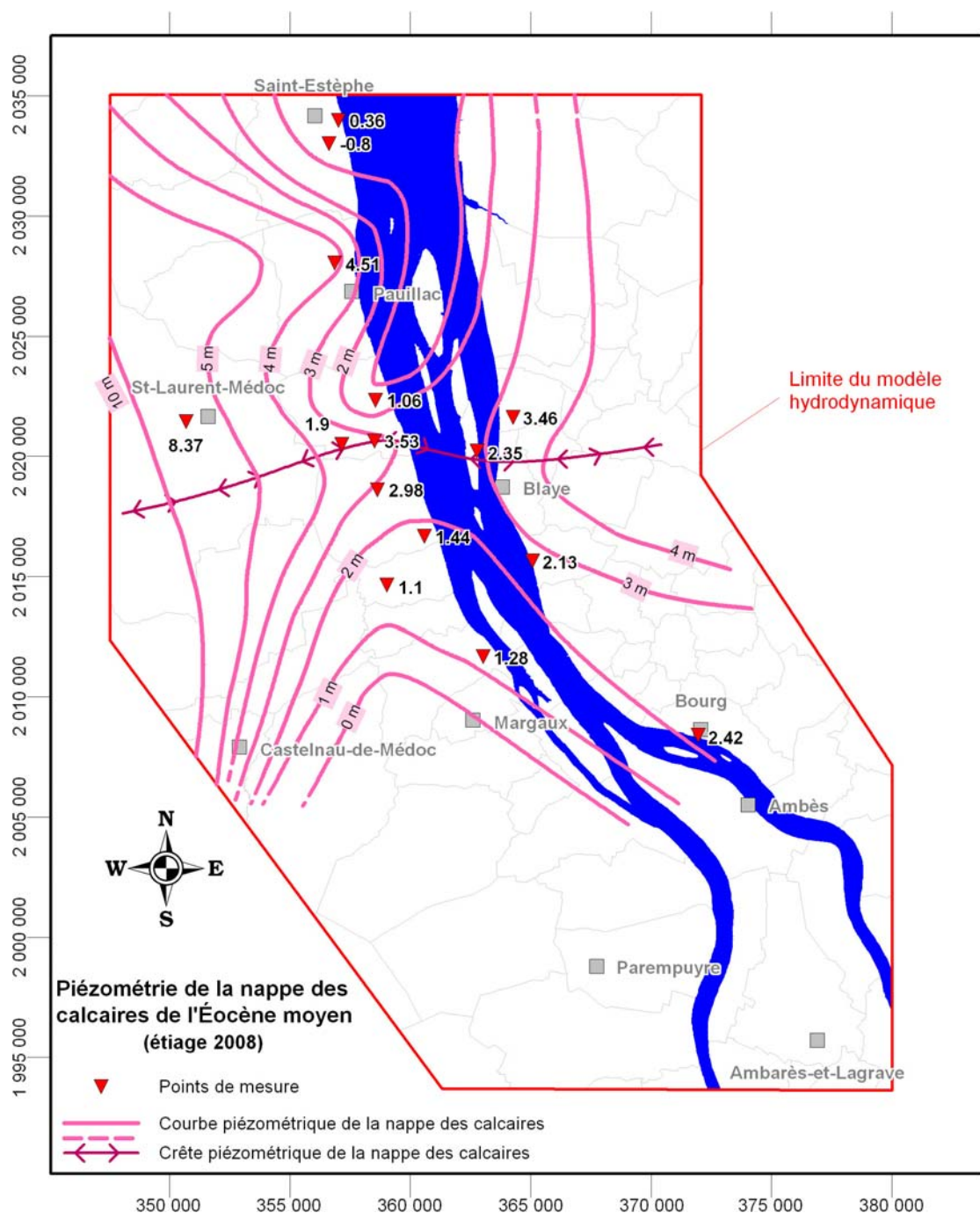


Figure 18- Carte piézométrique de la nappe des calcaires de l'Eocène moyen – Etat à fin 2008

3. Surveillance hydrochimique de la qualité des eaux des nappes éocènes en rive médocaine et dans le secteur de la "crête" piézométrique

Plus d'une vingtaine de campagnes semestrielles de prélèvements et d'analyses hydrochimiques ont été effectuées depuis 1999 dans les 5 premiers piézomètres du réseau PZEM de surveillance et d'alerte et jusqu'à 12 campagnes ont été menées dans certains des sondages plus récents. Elles ont fourni les données d'entrée au réseau Qualité "**RQESTUEOCE**" de la base ADES.

L'ensemble des prélèvements a été effectué au moment des plus fortes marées de l'année (entre septembre et novembre). Celles-ci correspondent en effet à des périodes de risque majeur d'invasion d'eaux saumâtres de l'estuaire actuel vers la nappe, du fait de la surcote des eaux estuariennes par rapport à la nappe.

Pendant les trois premières années de la surveillance, jusqu'à 5 niveaux en profondeur de prélèvements et d'analyses avaient été testés dans certains piézomètres (PZEM 1 à 5). Depuis l'automne 2003, un seul niveau est prélevé dans chaque piézomètre pour restreindre les coûts d'analyses de surveillance, car il avait été constaté au cours de ces 3 premières années que la chimie des eaux évoluait de manière semblable sur la verticale d'un même piézomètre.

3.1. OPTIMISATION DE LA SURVEILLANCE HYDROCHIMIQUE

Dans la mesure où le suivi du réseau PZEM (Figure 2) a été intégré à partir de fin 2008 dans le cadre du réseau départemental de suivi de la quantité et de la qualité des nappes d'eaux souterraines de la Gironde (convention CG 33 – BRGM), une réflexion avait été menée pour modifier le programme de prélèvements pour analyses, dans le but de minimiser les coûts d'une surveillance hydrochimique systématique jugée superflue ou redondante (Platel et al., 2008).

Seules ne sont plus analysées en 2009 de manière systématique que les eaux de **5 piézomètres-qualitomètres en rive médocaine**, une seule fois par an à la période des basses-eaux de la nappe, selon la méthodologie habituelle pour y doser les éléments majeurs; ce sont ceux de :

- Jau-Dignac - *Port de Goulée* (**07306X0066/PZEM 1**), car la teneur en sel y a augmenté régulièrement pendant plusieurs années;
- Saint-Estèphe – *Port de la Chapelle* (**07548X0234/PZEM 4**) pour servir de point d'alerte à l'ensemble des aquifères éocènes qui sont captés dans ce secteur pour l'AEP;
- Cussac - *Fort-Médoc* (**07791X0204/PZEM 5**) pour servir de point d'alerte à l'aquifère profond grésos-sableux qui est aussi capté dans ce secteur pour l'AEP;
- Cussac - *Fort-Médoc* (**07791X0205/PZEM 6**), car la teneur en sel, bien que faible, y est la plus élevée de l'aquifère des calcaires et que ce qualitomètre se situe juste devant les affleurements sous-aquatiques de la Passe de Cussac ;

- Soussans - Le Port (07795X0105/PZEM 8), car il capte l'aquifère des calcaires, en étant situé le plus au sud du réseau vers la dépression de Bordeaux et qu'il présente depuis le début de sa surveillance en 2004.

A noter que les PZEM 4 et PZEM 5 ont déjà été sélectionnés depuis plusieurs années comme points d'observation dans le cadre du suivi patrimonial de la qualité des nappes souterraines en Gironde.

Tous les autres qualitomètres ne sont plus actuellement prélevés, le choix ayant été décidé au niveau du suivi du réseau de surveillance des nappes de la Gironde. Toutefois si le besoin s'en faisait sentir, il serait toujours possible de prélever les eaux de ces ouvrages selon la méthodologie habituelle.

Les commentaires les plus marquants ci-après, ***portant sur les prélèvements de ces seuls cinq qualitomètres***, ne tiennent compte que des données acquises entre octobre 2007 et octobre 2009, auxquels s'ajoutent les commentaires relatifs à l'année 2008 pour les qualitomètres PZEM 3, 10 et 14.

Les précédents résultats de tous les points de prélèvements ont déjà été reportés et commentés au fur et à mesure dans les rapports antérieurs ; ils ne sont pas repris ici.

3.2. ÉVOLUTIONS HYDROCHIMIQUES RÉCENTES DANS LES QUALITOMÈTRES DU RÉSEAU PZEM EN RIVE MÉDOCAINE

3.2.1. Qualitomètre PZEM 1 de Jau-Dignac

Après une ***augmentation de presque 3 g/l de chlorure de sodium pendant 5 ans*** entre 2000 et 2005, la qualité des eaux de ce qualitomètre présente à partir de 2006 une stabilisation concernant la teneur en chlorures (Tableau 1).

Les eaux du qualitomètre de Jau sont caractérisées par un faciès de type chloruré-sodique avec des minéralisations élevées, comprises entre 5,3 et 5,7 g/l en 2004 et 2005, légèrement supérieures à celles mesurées les années passées. ***Les salinités exprimées en NaCl ont culminé à 4,6 g/l depuis les basses-eaux de 2006***, avec une teneur très légèrement plus basse (4,3 g/l) en octobre 2007.

Comme les années passées, chlorures, sulfates, sodium, calcium, magnésium, potassium et ammonium présentent des teneurs très excessives par rapport aux seuils des normes de potabilité en vigueur.

3.2.2. Qualitomètre PZEM 2 de Saint-Christoly

Aucune évolution notable des paramètres physico-chimiques n'est observée depuis des années dans ce secteur, les eaux ayant un faciès hydrochimique particulièrement constant. Les eaux de Saint-Christoly présentent le même faciès chloruré-sodique que celles du qualitomètre de Jau. Les minéralisations sont élevées, variant de 5,6 à 5,8 g/l. ***A ces minéralisations élevées correspondent des salinités NaCl comprises entre 4,2 et 4,3 g/l.***

C'est pourquoi, comme annoncé dans les conclusions du rapport de l'année 3 (Platel *et al*, 2006), il n'y a pas eu de prélèvement pour analyses depuis 2006.

3.2.3. Qualitomètre PZEM 3 de Saint-Yzans

A la suite de valeurs à l'étiage 2005 parmi les plus fortes observées : minéralisation de 8,2 g/l et salinité de 6,3 g/l, une nouvelle nette tendance à la baisse de la salinité a été constatée dans l'évolution des paramètres physico-chimiques depuis 2006 et 2007 révèlent maintenant une forte baisse des teneurs en NaCl (0,7 à 0,8 g/l) à peine plus fortes que celles de 2001 (Tableau 2).

Les eaux du qualitomètre de Saint-Yzans ont le même faciès hydrochimique chloruré-sodique que ceux des ouvrages situés plus au nord et présentent des teneurs excessives en de nombreux éléments par rapport aux normes de potabilité en vigueur.

En plus de la présence marquée d'eau saumâtre dans les réservoirs de l'Éocène moyen, ces résultats confirment à nouveau l'influence importante et rapide de la recharge météorique par la zone d'affleurement calcaire de l'anticlinal de Couquèques tout proche. C'est pourquoi, les eaux de ce qualitomètre n'ont plus été prélevées après l'automne 2008.

3.2.4. Qualitomètre PZEM 4 de Saint-Estèphe

Les eaux de ce qualitomètre reflètent l'eau de l'aquifère éocène très peu ou pas contaminée par des eaux saumâtres. Une légère tendance à la baisse des valeurs des paramètres physico-chimiques avait été régulièrement observée depuis 2000 jusqu'en 2005. Mais après les valeurs très anormales relevées en septembre 2006 (Tableau 3), la tendance est maintenant à une légère augmentation de salinité (de 0,45 à 0,62 g/l), revenant vers les teneurs d'il y a 10 ans. Le secteur central autour de Saint-Estèphe et Pauillac contient donc toujours des eaux douces

Le faciès hydrochimique des eaux est bicarbonaté-calcique, avec une minéralisation comprise entre 260 et 330 mg/l (400 mg/l en 2006). La salinité en NaCl est actuellement de 62 mg/l, mais une teneur exceptionnelle de 87 mg/l a été enregistrée pendant les basses-eaux 2006.

Analyses			21/03/07	26/10/07	17/10/08	16/10/09
Profondeurs de prélèvement			42 m	42 m	42 m	42 m
Norme						
Température	°C <25°C	¹	15.9	16.1	16.1	16.1
pH	U 6,5 - 9		7.02	7.13	7.17	7.20
Conductivité à 25°C	µS/cm	2 000 ¹	8 750	8 860	9 800	9 640
Potentiel redox	mV	*	non mesuré	144	non mesuré	non mesuré
O ₂ dissous	mg/l	* ¹	non mesuré	0.32	0.16	non mesuré
Cations						
Calcium	mg/l	100 ²	164.0	168.0	170.0	164.0
	meq/l		8.2	8.4	8.5	8.2
Potassium	mg/l	12 ¹	66.0	60.1	54.0	54.0
	meq		1.7	1.5	1.4	1.4
Magnésium	mg/l	50 ¹	183.0	179.0	201.0	204.0
	meq/l		15.1	14.7	16.5	16.8
Sodium	mg/l	150 ¹	1 457.0	1 500.0	1 620.0	1 640.0
	meq/l		63.3	65.2	70.4	71.3
Ammonium	mg/l	0.5	4.6	4.4	4.8	4.1
Silice	mg/l	20 ¹	12	12.3	11	12
Anions						
Carbonates	mg/l		0	0	0	0
Hydrogénocarbonates	mg/l	*	387.0	372.7	372.0	373.0
	meq/l		6.3	6.1	6.1	6.1
Sulfates	mg/l	250 ¹	280.0	300.0	307.0	316.0
	meq/l		5.8	6.3	6.4	6.6
Nitrates	mg/l	50 ¹	<0,25	<0,25	<1	<1
Nitrites	mg/l	0.10 ¹			<0,03	<0,03
Chlorures	mg/l	200 ¹	2 780.0	2 820.0	2 980.0	2 990.0
	meq/l		78.3	79.4	83.9	84.2
Iodures	µg/l	** ³				
Bromures	mg/l	0.025 ³				
Fluorures	mg/l	1.2 ¹	0.1	0.1	<0.1	<0.1
Métaux - métalloïdes						
Fer	mg/l	0.2 ¹	3.3	3.0	2.8	2.5
Manganèse	µg/l	50 ¹	110	83	107	90
Aluminium	µg/l	200 ¹			<0,10	<0,10
Baryum	µg/l	100 ¹				
Arsenic	µg/l	50 ¹				
Lithium	µg/l	** ³				
Bore	µg/l	1000 ¹			440	429.0
Sélénium	µg/l	10 ¹				
Strontium	µg/l	**				
Minéralisation***	g/l	1.5 ¹	5.32	5.40	5.70	5.74
Salinité en NaCl	g/l	0.35 ¹	4.24	4.32	4.60	4.63
Les normes indiquées sont celles relatives à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine						
* : pas de valeur guide pour les eaux souterraines						
** : pas de données adéquates pour une valeur guide pour la santé						
*** : minéralisation calculée à partir des éléments communs à toutes les analyses						
¹ : réglementation française (décret modifié n° 89-3 du 3 janvier 89)						
² : directive du Conseil des communautés européennes (directive du 15 juillet 1980)						
³ : directive de l'OMS (1994)						
Les teneurs supérieures aux normes sont représentées avec un fond vert clair						
 Résultats des analyses hydrochimiques des eaux prélevées dans le piézomètre PZEM 1 de Jau-Dignac (années 2007 à 2009)						

Tableau 1 - Résultats des analyses hydrochimiques des eaux prélevées dans le qualitomètre PZEM 1 de Jau-Dignac depuis 2007 jusqu'à 2009

Analyses				21/03/07	26/10/07	17/10/08
Profondeurs de prélèvement				20 m	20 m	20 m
Norme						
Température	°C	<25°C	¹	15.3	15.3	15.2
pH		6,5 - 9		7.02	7.34	6.88
Conductivité à 25°C	µS/cm	2 000	¹	3 620	2 070	2 410
Potentiel redox	mV	*		non mesuré	233	211
O ₂ dissous	mg/l	* ¹			0.9	0.4
Cations						
Calcium	mg/l	100	²	161.0	144.0	149.0
	meq/l			8.1	7.2	7.5
Potassium	mg/l	12	¹	15.5	9.8	8.9
	meq/l			0.4	0.3	0.2
Magnésium	mg/l	50	¹	79.5	60.9	64.0
	meq/l			6.5	5.0	5.3
Sodium	mg/l	150	¹	379.0	225.0	247.0
	meq/l			16.5	9.8	10.7
Ammonium	mg/l	0.5		0.2	0.2	0.2
Silice	mg/l	20	¹	13.1	13.3	12.0
Anions						
Carbonates	mg/l			<3	0	<1
Hydrogénocarbonates	mg/l	*		386.0	366.6	344.0
	meq/l			6.3	6.0	5.6
Sulfates	mg/l	250	¹	158.0	110.0	119.0
	meq/l			3.3	2.3	2.5
Nitrates	mg/l	50	¹	<0,25	<0,25	<0,25
Nitrites	mg/l	0.10	¹			
Chlorures	mg/l	200	¹	815.0	498.0	557.0
	meq/l			23.0	14.0	15.7
Iodures	µg/l	** ³				
Bromures	mg/l	0.025	³			
Fluorures	mg/l	1.2	¹	0.2	0.2	<0.1
Métaux - métalloïdes						
Fer	mg/l	0.2	¹	1.20	1.00	0.85
Manganèse	µg/l	50	¹	43	29	30
Aluminium	µg/l	200	¹			30
Baryum	µg/l	100	¹			
Arsenic	µg/l	50	¹			
Lithium	µg/l	** ³				
Bore	µg/l	1000	¹			100
Sélénium	µg/l	10	¹			
Strontium	µg/l	**				
Minéralisation***	g/l	1.5	¹	1.99	1.41	1.49
Salinité en NaCl	g/l	0.35	¹	1.19	0.72	0.80
Les normes indiquées sont celles relatives à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine						
* : pas de valeur guide pour les eaux souterraines						
** : pas de données adéquates pour une valeur guide pour la santé						
*** : minéralisation calculée à partir des éléments communs à toutes les analyses						
¹ : réglementation française (décret modifié n° 89-3 du 3 janvier 89)						
² : directive du Conseil des communautés européennes (directive du 15 juillet 1980)						
³ : directive de l'OMS (1994)						
Les teneurs supérieures aux normes sont représentées avec un fond vert clair						
 Résultats des analyses hydrochimiques des eaux prélevées dans le piézomètre PZEM 3 de Saint-Yzans (en 2007 et 2008)						

Tableau 2 - Résultats des analyses hydrochimiques des eaux prélevées dans le qualitomètre PZEM 3 de Saint-Yzans en 2007 et 2008

Analyses		07/09/06	24/10/07	15/10/08	19/10/09
Profondeurs de prélèvement		25 m	25 m	25 m	25 m
Norme					
Température	°C <25°C ¹	17,0	17,0	16,9	16,8
pH	6.5 - 9	7.60	7.50	7.58	7.32
Conductivité à 25°C	µS/cm 2000 ¹	534	360	384	446
Potentiel redox	mV *	197	162	non mesuré	78
O ₂ dissous	mg/l * ¹		0.46	0.28	0.27
Cations					
Calcium	mg/l 100 ²	51.7	37.0	41.0	43.0
	meq/l	2.6	1.9	2.1	2.2
Potassium	mg/l 12 ¹	3.1	2.9	3.3	3.1
	meq	0.1	0.1	0.1	0.1
Magnésium	mg/l 50 ¹	13.3	11.0	11.0	12.0
	meq	1.1	0.9	0.9	1.0
Sodium	mg/l 150 ¹	40.6	20.0	23.0	28.0
	meq/l	1.8	0.9	1.0	1.2
Ammonium	mg/l 0.5	0.1	0.1	0.1	0.1
Silice	mg/l 20 ¹	14		12	
Anions					
Carbonates	mg/l	0	0	0	0
Hydrogénocarbonates	mg/l *	217.9	171.0	176.0	188.0
	meq/l	3.6	2.8	2.9	3.1
Sulfates	mg/l 250 ¹	25.5	16.0	16.0	19.0
	meq/l	0.5	0.3	0.3	0.4
Nitrates	mg/l 50 ¹	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25
Nitrites	mg/l 0.10 ¹	<0,01	<0,01	<0,01	<0,03
Chlorures	mg/l 200 ¹	46.5	25.0	26.0	34.0
	meq/l	1.3	0.7	0.7	1.0
Iodures	µg/l ** ³				
Bromures	mg/l 0.025 ³				
Fluorures	mg/l 1.2 ¹	0.3	0.5	0.4	0.4
Métaux - métalloïdes					
Fer	mg/l 0.2 ¹	0.21	0.27	0.25	0.20
Manganèse	µg/l 50 ¹	6	12	9	8
Aluminium	µg/l 200 ¹		2	<0,1	<10
Baryum	µg/l 100 ¹				
Arsenic	µg/l 50 ¹		<1		
Lithium	µg/l ** ³				
Bore	µg/l 1000 ¹		66	70	58
Sélénium	µg/l 10 ¹		<10		
Strontium	µg/l **				
Minéralisation ***	g/l 1.5 ¹	0.40	0.28	0.30	0.33
Salinité en NaCl	g/l 0.35 ¹	0.09	0.05	0.05	0.06
Les normes indiquées sont celles relatives à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine					
* : pas de valeur guide pour les eaux souterraines					
** : pas de données adéquates pour une valeur guide pour la santé					
*** : minéralisation calculée à partir des éléments communs à toutes les analyses					
¹ : réglementation française (décret modifié n° 89-3 du 3 janvier 89)					
² : directive du Conseil des communautés européennes (directive du 15 juillet 1980)					
³ : directive de l'OMS (1994)					
Les teneurs supérieures aux normes sont représentées avec un fond vert clair					
 Résultats des analyses hydrochimiques des eaux prélevées dans le piézomètre PZEM 4 de Saint-Estèphe (de 2006 à 2009)					

Tableau 3 - Résultats des analyses hydrochimiques des eaux prélevées dans le piézomètre PZEM 4 de Saint-Estèphe depuis 2006 jusqu'à 2009

3.3. ÉVOLUTIONS HYDROCHIMIQUES RÉCENTES DES EAUX DE LA NAPPE DE L'ÉOCÈNE MOYEN DÉTRITIQUE DANS LE SECTEUR DE LA "CRÊTE" PIÉZOMÉTRIQUE

3.3.1. Qualitomètre PZEM 5 de Cussac-Fort-Médoc

Aucune évolution notable des paramètres physico-chimiques n'est observée par rapport aux résultats des campagnes précédentes dans les eaux de ce qualitomètre

Les eaux prélevées à 38 m de profondeur dans le qualitomètre de Cussac ont un faciès hydrochimique bicarbonaté-calcique (Tableau 4). La minéralisation est moyenne, de l'ordre de 400 mg/l, supérieure à celle du qualitomètre de Saint-Estèphe.

Les teneurs en chlorure de sodium sont faibles et très constantes autour d'une concentration moyenne de 49 mg/l. Les éléments chimiques présentent des teneurs inférieures aux seuils des normes de potabilité, seules les teneurs en fer étant supérieures à la norme dans toutes les analyses depuis 2002 (de 0,24 à 0,33 mg/l).

Les résultats des deux dernières analyses confirment l'absence totale d'eau saumâtre dans les eaux de la nappe inférieure grés-sableuse de l'Éocène moyen au droit du secteur de Cussac. Mais les teneurs élevées en fluorures (jusqu'à 1,2 mg/l) et assez élevées en hydrogénocarbonates illustrent l'extension résiduelle du domaine minéralisé de la nappe éocène au droit de la "barrière" de l'anticlinal de Blaye-Listrac.

3.4. ÉVOLUTIONS HYDROCHIMIQUES RÉCENTES DES EAUX DE LA NAPPE DE L'ÉOCÈNE MOYEN DÉTRITIQUE CALCAIRE DANS LE SECTEUR DE LA "CRÊTE" PIÉZOMÉTRIQUE

3.4.1. Qualitomètre PZEM 6 de Cussac-Fort-Médoc

Alors qu'une légère tendance à la baisse des teneurs des éléments physico-chimiques, a été observée en 2005 (210 mg/l en moyenne) par rapport aux résultats des analyses depuis 2003, et s'est maintenue jusqu'en octobre 2008, la dernière analyse d'octobre 2009 révèle une eau plus saumâtre dont la salinité en NaCl atteint 336 mg/l.

Les eaux prélevées dans le qualitomètre PZEM 6 de Cussac présentent un faciès hydrochimique bicarbonaté calcique à tendance sodique (Tableau 5). La minéralisation varie de 730 à 950 mg/l, soit le double de la valeur observée pour les eaux de la nappe profonde à Cussac. De 2005 à 2008, la salinité en NaCl a fluctué entre 180 et 260 mg/l, fonction respectivement des périodes de hautes et basses eaux.

Ces analyses prouvent l'existence d'une légère contamination des eaux de la nappe supérieure de l'Éocène moyen calcaire par une eau saumâtre au droit de Fort-Médoc.

Analyses			26/10/07	14/10/08	19/10/09
Profondeurs de prélèvement			38 m	38 m	38 m
Température	°C	Norme <25°C ¹	15	12.8	15.9
pH		6.5 - 9	7.45	7.23	7.15
Conductivité à 25°C	µS/cm	2000 ¹	493	492	453
Potentiel redox	mV	*	147	212	77
O ₂ dissous	mg/l	* ¹	0.40	1.13	0.18
Cations					
Calcium	mg/l	100 ²	51.5	50.0	52.0
	meq/l		2.6	2.5	2.6
Potassium	mg/l	12 ¹	5.4	5.5	5.5
	meq		0.1	0.1	0.1
Magnésium	mg/l	50 ¹	18.8	19.0	20.0
	meq		1.5	1.6	1.6
Sodium	mg/l	150¹	27.4	27.0	29.0
	meq/l		1.2	1.2	1.3
Ammonium	mg/l	0.5	0.11	<0,05	0.1
Silice	mg/l	20 ¹	11.9	11.0	11.0
Anions					
Carbonates	mg/l		0	0	0
Hydrogénocarbonates	mg/l	*	242.1	233.0	239.0
	meq/l		4.0	3.8	3.9
Sulfates	mg/l	250 ¹	40.1	37.0	40.0
	meq/l		0.8	0.8	0.8
Nitrates	mg/l	50 ¹	<0,25	<1	<1
Nitrites	mg/l	0.10 ¹		<0,03	<0,03
Chlorures	mg/l	200¹	22.3	21.0	23.0
	meq/l		0.6	0.6	0.6
Iodures	µg/l	** ³			
Bromures	mg/l	0.025 ³			
Fluorures	mg/l	1.2 ¹	1.0	1.0	1.1
Métaux - métalloïdes					
Fer	mg/l	0.2 ¹		2.9	0.27
Manganèse	µg/l	50 ¹		14	7
Aluminium	µg/l	200 ¹		10	<0,1
Baryum	µg/l	100 ¹			
Arsenic	µg/l	50 ¹			
Lithium	µg/l	** ³			
Bore	µg/l	1000 ¹		120	118
Sélénium	µg/l	10 ¹			
Strontium	µg/l	**			
Minéralisation***	g/l	1.5¹	0.41	0.39	0.41
Salinité en NaCl	g/l	0.35¹	0.05	0.05	0.05

Les normes indiquées sont celles relatives à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine

* : pas de valeur guide pour les eaux souterraines

** : pas de données adéquates pour une valeur guide pour la santé

*** : minéralisation calculée à partir des éléments communs à toutes les analyses

¹ : réglementation française (décret modifié n° 89-3 du 3 janvier 89)

² : directive du Conseil des communautés européennes (directive du 15 juillet 1980)

³ : directive de l'OMS (1994)

Les teneurs supérieures aux normes sont représentées avec un fond vert clair



Résultats des analyses hydrochimiques des eaux prélevées dans le piézomètre PZEM 5 de Cussac depuis 2007 jusqu'à 2009

Tableau 4 - Résultats des analyses hydrochimiques des eaux prélevées dans le qualitomètre PZEM 5 de Cussac depuis 2007 jusqu'à 2009

Analyses		21/03/07	30/10/07	16/10/08	20/10/09
Profondeurs de prélèvement		16 m	16 m	16 m	16 m
Norme					
Température	°C <25°C ¹	14,9	14,9	15	14,9
pH	6.5 - 9	7.12	7.07	7.06	6.90
Conductivité à 25°C	µS/cm 2000 ¹	950	1 072	1110	1 452
Potentiel redox	mV *	non mesuré	non mesuré	non mesuré	non mesuré
O ₂ dissous	mg/l * ¹	0.2	0.41	0.37	0.89
Cations					
Calcium	mg/l 100 ²	112.0	106.0	106.0	122.0
	meq/l	5.6	5.3	5.3	6.1
Potassium	mg/l 12 ¹	10.5	6.4	6.5	6.8
	meq	0.3	0.2	0.2	0.2
Magnésium	mg/l 50 ¹	29.5	28.4	28.0	34.0
	meq	2.4	2.3	2.3	2.8
Sodium	mg/l 150 ¹	96.5	87.9	87.0	125.0
	meq/l	4.2	3.8	3.8	5.4
Ammonium	mg/l 0.5	1.7	1.4	1.5	2.1
Silice	mg/l 20 ¹	13.6	14.1	13.0	14.1
Anions					
Carbonates	mg/l	0	0	0	0
Hydrogénocarbonates	mg/l *	425.7	400.3	394.0	400.3
	meq/l	7.0	6.6	6.5	6.6
Sulfates	mg/l 250 ¹	56.4	55.1	47.0	55.1
	meq/l	1.2	1.1	1.0	1.1
Nitrates	mg/l 50 ¹	0,25	<0,25	<1	<1
Nitrites	mg/l 0.10 ¹			<0,03	<0,03
Chlorures	mg/l 200 ¹	162.0	137.0	139.0	211.0
	meq/l	4.6	3.9	3.9	5.9
Iodures	µg/l ** ³				
Bromures	mg/l 0.025 ³				
Fluorures	mg/l 1.2 ¹	0.3	0.3	0.3	0.3
Métaux - métalloïdes					
Fer	mg/l 0.2 ¹	3.4	3.3	3.1	0.02
Manganèse	µg/l 50 ¹	100	98	107	121
Aluminium	µg/l 200 ¹			<10	10
Baryum	µg/l 100 ¹				
Arsenic	µg/l 50 ¹				
Lithium	µg/l ** ³				
Bore	µg/l 1000 ¹			100	89
Sélénium	µg/l 10 ¹				
Strontium	µg/l **				
Minéralisation***	g/l 1.5 ¹	0.89	0.82	0.81	0.95
Salinité en NaCl	g/l 0.35 ¹	0.26	0.22	0.23	0.34
Les normes indiquées sont celles relatives à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine					
* : pas de valeur guide pour les eaux souterraines					
** : pas de données adéquates pour une valeur guide pour la santé					
*** : minéralisation calculée à partir des éléments communs à toutes les analyses					
¹ : réglementation française (décret modifié n° 89-3 du 3 janvier 89)					
² : directive du Conseil des communautés européennes (directive du 15 juillet 1980)					
³ : directive de l'OMS (1994)					
Les teneurs supérieures aux normes sont représentées avec un fond vert clair					
		Résultats des analyses hydrochimiques des eaux prélevées dans le piézomètre PZEM 6 de Cussac depuis 2007 jusqu'en 2009			

Tableau 5 - Résultats des analyses hydrochimiques des eaux prélevées dans le qualitomètre PZEM 6 de Cussac depuis 2007 jusqu'à 2009

3.4.2. Qualitomètre PZEM 8 de Soussans

Les eaux du secteur le plus méridional du réseau sont aussi caractérisées par un faciès hydrochimique de type bicarbonaté calcique (Tableau 6). Le pH qui s'était élevé jusqu'à 8,3 entre 2004 et 2005 est redescendu à des valeurs plus proches de la neutralité (7,7 à 7,4). Une augmentation légère mais progressive de certaines teneurs en éléments chimiques est à noter depuis le début de la surveillance en mars 2004, puisque la salinité en NaCl a augmenté de 40 % environ.

La minéralisation actuelle est de l'ordre de 450 mg/l, proche de celle observée dans le forage PZEM 5 de Cussac. La concentration en NaCl, en augmentation depuis mars 2006, puis stabilisée en octobre 2008, est actuellement de 72 mg/l. Il n'y a actuellement pas d'explication à cette augmentation progressive, qui peut n'être que passagère mais il est nécessaire de surveiller l'évolution hydrochimique dans ce qualitomètre.

3.4.3. Qualitomètre PZEM 10 d'Arcins

Le pH mesuré sur les eaux prélevées à 30 m de profondeur est proche de la neutralité (7,5). Les eaux sont caractérisées par un faciès hydrochimique de type bicarbonaté calcique. La minéralisation est de l'ordre de 350 mg/l, soit un peu moins que celle observée dans la forage PZEM 5 de Cussac. La salinité a légèrement baissé entre 40 et 34 mg/l de NaCl. En 2008, la plupart des éléments chimiques ont présenté des teneurs faibles, inférieures aux seuils des normes de potabilité, comme les sulfates (21 mg/l), les chlorures (16 à 20 mg/l), le sodium (18 à 20 mg/l), le magnésium (15 mg/l) et le potassium (7 à 8 mg/l).

Ces derniers résultats confirment l'absence totale d'eau saumâtre provenant de l'estuaire dans les eaux de la nappe supérieure calcaire de l'Éocène moyen au droit du qualitomètre d'Arcins.

3.4.4. Qualitomètre PZEM 14 de Beychevelle

Le pH mesuré sur les eaux prélevées à 30 m de profondeur, en périodes de basses-eaux de 2006 et 2007, très proche de la neutralité autour de 7,2, a baissé à 6 en 2009. L'eau présente un faciès hydrochimique de type bicarbonaté calcique. Sa minéralisation est de l'ordre de 580 mg/l. La salinité varie de 61 à 68 et 58 mg/l de NaCl.

En 2008, la plupart des éléments chimiques ont présenté des teneurs faibles, inférieures aux seuils des normes de potabilité, comme les sulfates (21 mg/l), les chlorures (35 mg/l), le sodium (23 mg/l), le magnésium (21 mg/l) et le potassium (3,5 mg/l). Seuls le fer et le manganèse ont été très au-dessus de leur norme de potabilité en 2007 avec 14 et 0,096 mg/l respectivement).

Ces derniers résultats confirment l'absence totale d'eau saumâtre provenant de l'estuaire dans les eaux de la nappe supérieure calcaire de l'Éocène moyen au droit de secteur près du marais de Beychevelle.

Analyses			21/03/07	24/10/07	16/10/08	20/10/09
Profondeurs de prélèvement			40 m	40 m	40 m	40 m
Norme						
Température	°C	<25°C ¹	16.1	15.7	15.7	15.7
pH		6,5 - 9	7.60	7.72	7.57	7.44
Conductivité à 25°C	µS/cm	2000 ¹	620	532	564	605
Potentiel redox	mV	*	non mesuré	239	non mesuré	93
O ₂ dissous	mg/l	* ¹	non mesuré	4.35	0.31	0.19
Cations						
Calcium	mg/l	100 ²	45.2	43.1	43.0	49.0
	meq/l		2.3	2.2	2.2	2.5
Potassium	mg/l	12 ¹	8.6	8.1	8.5	7.9
	meq		0.2	0.2	0.2	0.2
Magnésium	mg/l	50 ¹	16.9	16.2	17.0	18.0
	meq		1.4	1.3	1.4	1.5
Sodium	mg/l	150 ¹	44.1	45.9	48.0	45.0
	meq/l		1.9	2.0	2.1	2.0
Ammonium	mg/l	0.5	0.21	0.09	0.25	0.22
Silice	mg/l	20 ¹	11.7	12.7	11.7	12.0
Anions						
Carbonates	mg/l		0	0	0	0
Hydrogénocarbonates	mg/l	*	221.0	204.4	214.0	234.0
	meq/l		3.6	3.4	3.5	3.8
Sulfates	mg/l	250 ¹	65.1	72.7	77.0	69.0
	meq/l		1.4	1.5	1.6	1.4
Nitrates	mg/l	50 ¹	<0,25	<0,25	<1	<1
Nitrites	mg/l	0.10 ¹			<0,03	<0,03
Chlorures	mg/l	200 ¹	25.6	27.2	27.0	27.0
	meq/l		0.7	0.8	0.8	0.8
Iodures	µg/l	** ³				
Bromures	mg/l	0.025 ³				
Fluorures	mg/l	1.2 ¹	1.8	1.7	1.7	1.9
Métaux - métalloïdes						
Fer	mg/l	0.2 ¹	0.1	0.1	0.1	0.1
Manganèse	µg/l	50 ¹	<1	1	<2	<2
Aluminium	µg/l	200 ¹			50	10
Baryum	µg/l	100 ¹				
Arsenic	µg/l	50 ¹				
Lithium	µg/l	** ³				
Bore	µg/l	1000 ¹			300	304
Sélénium	µg/l	10 ¹				
Strontium	µg/l	**				
Minéralisation ***	g/l	1.5 ¹	0.43	0.42	0.43	0.45
Salinité en NaCl	g/l	0.35 ¹	0.07	0.07	0.08	0.07
Les normes indiquées sont celles relatives à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine						
* : pas de valeur guide pour les eaux souterraines						
** : pas de données adéquates pour une valeur guide pour la santé						
*** : minéralisation calculée à partir des éléments communs à toutes les analyses						
¹ : réglementation française (décret modifié n° 89-3 du 3 janvier 89)						
² : directive du Conseil des communautés européennes (directive du 15 juillet 1980)						
³ : directive de l'OMS (1994)						
Les teneurs supérieures aux normes sont représentées avec un fond vert clair						
 Résultats des analyses hydrochimiques des eaux prélevées dans le piézomètre PZEM 8 de Soussans depuis 2007 jusqu'en 2009						

Tableau 6 - Résultats des analyses hydrochimiques des eaux prélevées dans le qualitomètre PZEM 8 de Soussans depuis 2007 jusqu'à 2009

Analyses			22/03/07	29/10/07	14/10/08
Profondeurs de prélèvement			30 m	30 m	30 m
Température	°C	Norme <25°C ¹	15	15	
pH		6.5 - 9	7.45	7.48	7.60
Conductivité à 25°C	µS/cm	2000 ¹	430	425	446
Potentiel redox	mV	*		168	
O ₂ dissous	mg/l	* ¹		0.35	
Cations					
Calcium	mg/l	100 ²	48.1	49.3	45.0
	meq/l		2.4	2.5	2.3
Potassium	mg/l	12 ¹	8.3	7.2	7.6
	meq		0.2	0.2	0.2
Magnésium	mg/l	50 ¹	16.2	15.9	15.0
	meq		1.3	1.3	1.2
Sodium	mg/l	150¹	19.9	18.6	18.0
	meq/l		0.9	0.8	0.8
Ammonium	mg/l	0.5	0.2	0.18	0.10
Silice	mg/l	20 ¹	10.35	10.65	9.9
Anions					
Carbonates	mg/l		< 3		
Hydrogénocarbonates	mg/l	*	223.3	224.6	220.0
	meq/l		3.7	3.7	3.6
Sulfates	mg/l	250 ¹	21.9	21.8	21.0
	meq/l		0.5	0.5	0.4
Nitrates	mg/l	50 ¹	< 0.25	0.3	0.3
Nitrites	mg/l	0.10 ¹	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Chlorures	mg/l	200¹	18.4	17.4	16.0
	meq/l		0.5	0.5	0.5
Iodures	µg/l	** ³			
Bromures	mg/l	0.025 ³			
Fluorures	mg/l	1.2 ¹	2.0	2.0	1.9
Métaux - métalloïdes					
Fer	mg/l	0.2 ¹	0.17	0.1	0.13
Manganèse	µg/l	50 ¹	2	2	3
Aluminium	µg/l	200 ¹			120.0
Baryum	µg/l	100 ¹			
Arsenic	µg/l	50 ¹			
Lithium	µg/l	** ³			
Bore	µg/l	1000 ¹			140.0
Sélénium	µg/l	10 ¹			
Strontium	µg/l	**			
Minéralisation***	g/l	1.5¹	0.36	0.35	0.34
Salinité en NaCl	g/l	0.35¹	0.04	0.04	0.03

Les normes indiquées sont celles relatives à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine

* : pas de valeur guide pour les eaux souterraines

** : pas de données adéquates pour une valeur guide pour la santé

*** : minéralisation calculée à partir des éléments communs à toutes les analyses

¹ : réglementation française (décret modifié n° 89-3 du 3 janvier 89)

² : directive du Conseil des communautés européennes (directive du 15 juillet 1980)

³ : directive de l'OMS (1994)

Les teneurs supérieures aux normes sont représentées avec un fond vert clair



Résultats des analyses hydrochimiques des eaux prélevées dans le piézomètre PZEM 10 de Arcins depuis 2007 jusqu'à 2008

Tableau 7 - Résultats des analyses hydrochimiques des eaux prélevées dans le qualitomètre PZEM 10 d'Arcins depuis 2007 jusqu'à 2008

Analyses			13/11/06	24/10/07	15/10/08
Profondeurs de prélèvement			30 m	30 m	30 m
Norme					
Température	°C	<25°C ¹	14,9	14,8	15,1
pH		6.5 - 9	7.17	7.20	6.01
Conductivité à 25°C	µS/cm	2000 ¹	680	680	679
Potentiel redox	mV	*	259	331	non mesuré
O ₂ dissous	mg/l	* ¹	1.28	1.94	15.40
Cations					
Calcium	mg/l	100 ²	99.2	95.6	100.0
	meq/l		5.0	4.8	5.0
Potassium	mg/l	12 ¹	3.5	3.5	3.5
	meq		0.1	0.1	0.1
Magnésium	mg/l	50 ¹	21.0	20.2	21.0
	meq		1.7	1.7	1.7
Sodium	mg/l	150 ¹	23.7	22.8	23.0
	meq/l		1.0	1.0	1.0
Ammonium	mg/l	0.5	0.1	0.69	0.06
Silice	mg/l	20 ¹	15.25	15.3	14.0
Anions					
Carbonates	mg/l		< 3	0	0
Hydrogénocarbonates	mg/l	*	379.6	380.2	367.0
	meq/l		6.2	6.2	6.0
Sulfates	mg/l	250 ¹	21.9	21.7	21.0
	meq/l		0.5	0.5	0.4
Nitrates	mg/l	50 ¹	< 3	<0,25	<1
Nitrites	mg/l	0.10 ¹	< 0,01		< 0,03
Chlorures	mg/l	200 ¹	37.7	36.9	35.0
	meq/l		1.1	1.0	1.0
Iodures	µg/l	** ³			
Bromures	mg/l	0.025 ³			
Fluorures	mg/l	1.2 ¹	0.2	<0.1	0.1
Métaux - métalloïdes					
Fer	mg/l	0.2 ¹	0.68	14.00	0.70
Manganèse	µg/l	50 ¹	8	96	5
Aluminium	µg/l	200 ¹			90.0
Baryum	µg/l	100 ¹			
Arsenic	µg/l	50 ¹			
Lithium	µg/l	** ³			
Bore	µg/l	1000 ¹			<50
Sélénium	µg/l	10 ¹			
Strontium	µg/l	**			
Minéralisation ***	g/l	1.5 ¹	0.59	0.58	0.57
Salinité en NaCl	g/l	0.35 ¹	0.06	0.06	0.06
Les normes indiquées sont celles relatives à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine					
* : pas de valeur guide pour les eaux souterraines					
** : pas de données adéquates pour une valeur guide pour la santé					
*** : minéralisation calculée à partir des éléments communs à toutes les analyses					
¹ : réglementation française (décret modifié n° 89-3 du 3 janvier 89)					
² : directive du Conseil des communautés européennes (directive du 15 juillet 1980)					
³ : directive de l'OMS (1994)					
Les teneurs supérieures aux normes sont représentées avec un fond vert clair					
 Résultats des analyses hydrochimiques des eaux prélevées dans le piézomètre PZEM 14 de Beychevelle depuis 2006 jusqu'à 2008					

Tableau 8 - Résultats des analyses hydrochimiques des eaux prélevées dans le qualitomètre PZEM 14 de Saint-Julien de Beychevelle depuis 2006 jusqu'à 2008

3.5. ÉVOLUTIONS DE LA SALINITÉ DANS LES SECTEURS DU MÉDOC NORD-ORIENTAL DEPUIS LA MISE EN SERVICE DU RÉSEAU

3.5.1. Faciès chimiques des eaux des nappes de l'Éocène moyen le long de l'estuaire de la Gironde

Les commentaires sur les faciès chimiques des eaux des différentes nappes de l'Éocène moyen ont déjà été largement développés dans les rapports antérieurs de la même étude. Nous renvoyons le lecteur au rapport de l'année 2 pour de plus amples détails et plus particulièrement à son § 4.4.3. illustré par le diagramme de Piper de sa figure 33 (Platel et al., 2005 – BRGM/RP-53657-FR).

3.5.2. Analyse des chroniques des teneurs en chlorure de sodium dans les secteurs salés du Médoc oriental

La Figure 19 présente l'évolution sur 10 ans (de 1999 à 2009) de la teneur en chlorure de sodium dans les différents niveaux de la nappe de l'Éocène moyen dans les trois qualitomètres à eaux salées du secteur nord-est du Médoc (PZEM 1, 2 et 3).

Pour le secteur au nord du Médoc, les analyses faites à partir du qualitomètre **PZEM 1** de Jau-Dignac montrent une évolution variable de la salinité avec des augmentations suivies de baisses de la salinité. Mais il a surtout enregistré une **tendance générale à la salinisation progressive de tous les réservoirs analysés dans le secteur nord-oriental du Médoc, l'augmentation de la teneur en NaCl ayant été de l'ordre de 1 g/l tous les 2 ans jusqu'en 2004.** La stabilisation de la salinité autour de 4,6 mg/l, observée en 2005 semble perdurer, la **teneur actuelle** en NaCl étant justement de **4,6 g/l.**

Le secteur de Saint-Yzans (surveillé par le qualitomètre **PZEM 3**) présente également une évolution très variable. Lors des mesures effectuées en mars et septembre 2001, ainsi qu'en mars 2003, les salinités étaient très faibles et similaires pour les différents niveaux prélevés. Lors des autres périodes, les salinités étaient plus élevées et des différences notables entre les différents niveaux apparaissaient. Ce qualitomètre montre les plus fortes variations dans le temps avec des salinités en NaCl pouvant varier de 0,2 à plus de 7,5 g/l. Il faut noter, qu'après une tendance générale à la hausse de la salinité pendant les années 2004 et 2005, elle est de nouveau à la baisse et enregistre une pseudo-stabilisation (momentanée ?) vers 0,8 g/l.

Enfin, comme il a été confirmé que depuis le début de la surveillance le secteur intermédiaire de Saint-Christoly (forage **PZEM 2**) présente une eau de salinité constante, n'évoluant pas dans le temps (4,3 g/l en moyenne), ce qualitomètre n'a pas été prélevé depuis 2006.

3.5.3. Analyse des chroniques des teneurs en chlorure de sodium dans les autres secteurs du Médoc et du Blayais

Parmi tous les autres secteurs surveillés par les qualitomètres réalisés sur l'ensemble du réseau depuis 1997 jusqu'à 2009, tant en Médoc qu'en Blayais, celui de Cussac est le seul qui présente une faible salinisation au niveau de la nappe des calcaires captée par le PZEM 6 de Fort-Médoc. De 2003 à mars 2005, la teneur en NaCl y semblait constante autour de 270 mg/l de NaCl, mais elle a légèrement baissé autour de 200 mg/l en fin 2005, pour osciller entre les valeurs précitées à chaque cycle hautes-eaux - basses-eaux et présente une élévation en 2008 et 2009 à 336 mg/l.

Il faut rappeler que tous les autres secteurs de l'aquifère des calcaires renferment des eaux dont les teneurs sont comprises entre 28 mg/l et 80 mg/l (Figure 20). Les raisons de la plus forte salinité autour de Cussac s'expliquent par la situation particulière de cette zone au sommet de la structure anticlinale, la formation de l'Éocène moyen étant en relation directe avec les alluvions sous-flandriennes légèrement saumâtres ; à l'inverse, les sites de Soussans et Beychevelle, assez proches, ont des eaux douces à cause de la protection du même aquifère par la couverture des marnes de l'Éocène supérieur. Les secteurs d'Arcins et de l'Île Nouvelle nouvellement surveillés sont très peu minéralisés (23 à 40 mg/l), bien que l'aquifère soit directement recouvert par les argiles du Flandrien.

Dans le réservoir calcaire de Soussans après une baisse stabilisée depuis 2005 jusqu'à octobre 2008, il faut cependant noter une concentration en NaCl en augmentation à l'automne 2009 ; la teneur y est actuellement de 72 mg/l. Il n'y a actuellement pas d'explication à cette augmentation progressive.

Enfin, les eaux du réservoir profond sablo-gréseux sont partout très douces (20 à 52 mg/l de NaCl) dans tout le secteur de la "crête" piézométrique élargie (Cussac, Beychevelle, Soussans, Plassac, Saint-Genès-de-Blaye).

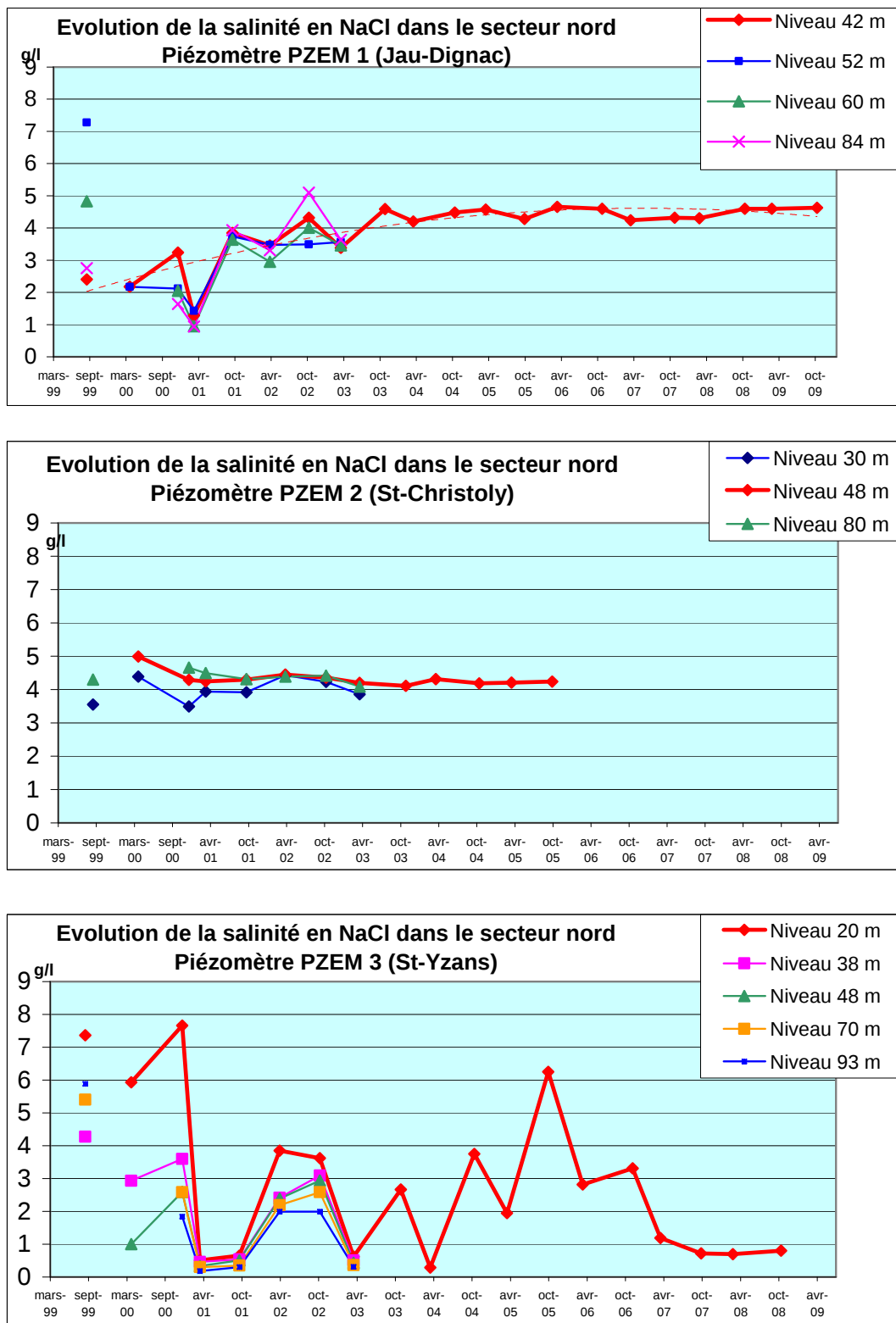


Figure 19 - Evolution sur 10 ans de la teneur en chlorure de sodium dans la nappe de l'Eocène surveillée par les trois qualitomètres salés du Médoc nord-oriental

Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine
Caractérisation de la crête piézométrique de l'Eocène au sud de l'Estuaire de la Gironde
- Module 2 - Année 1 -

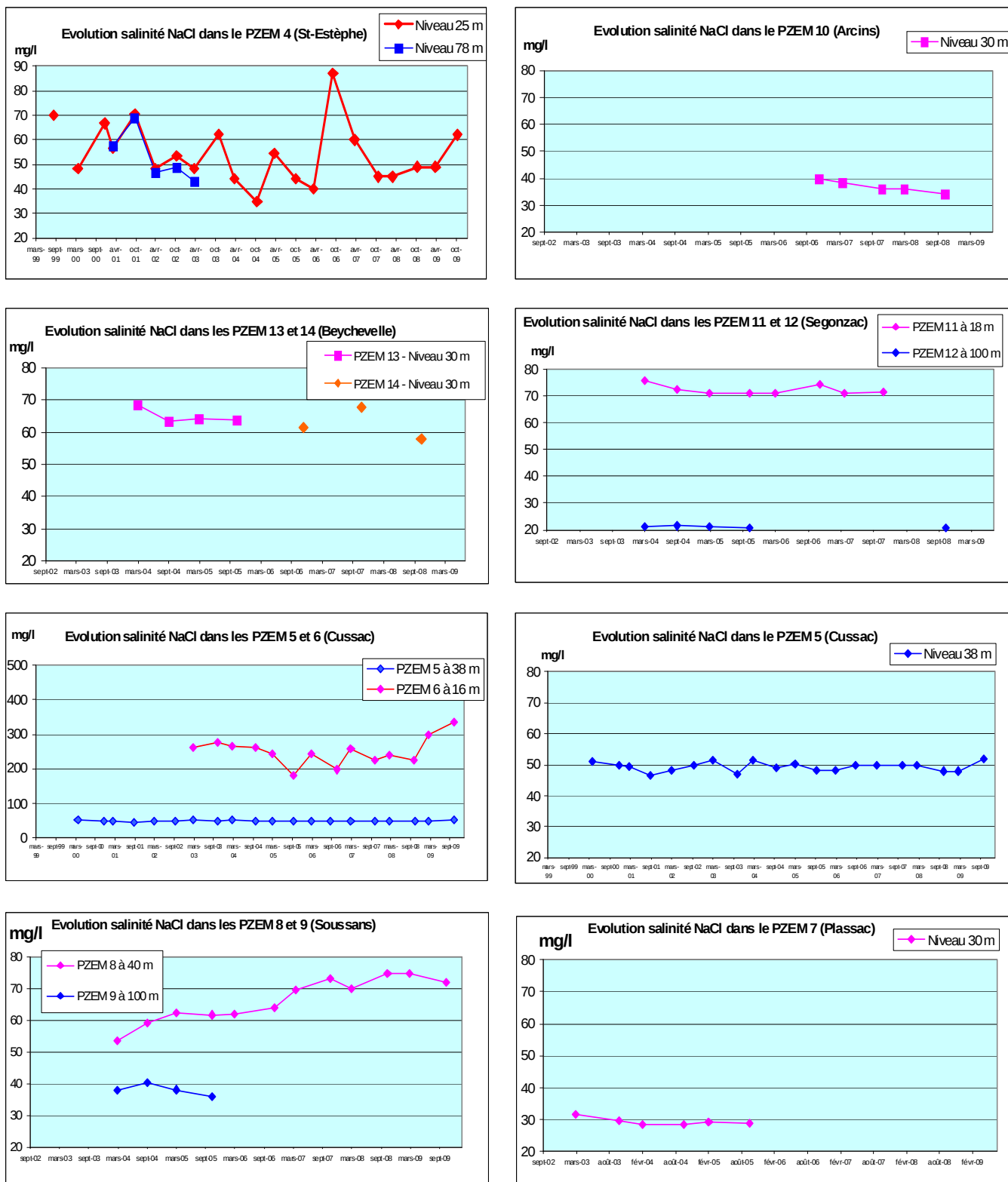


Figure 20 - Evolution sur 10 ans de la teneur en chlorure de sodium dans les deux réservoirs à eaux douces de la nappe de l'Eocène moyen des onze qualimètres du Médoc oriental et du Blayais

4. Modélisation hydrodynamique

L'objectif du modèle réalisé en 2006 (Platel et al., 2006) est d'étudier et d'apporter des éléments de réponse sur les raisons de la persistance de la ligne de partage des eaux localisée au droit de l'anticlinal de Blaye-Listrac qui assure une protection de la nappe éocène vis-à-vis d'une éventuelle propagation de la salure vers le sud.

Cette approche par modélisation hydrodynamique a permis de retrouver une image très proche des cartes piézométriques tracées pour les aquifères éocènes. Le calage des charges hydrauliques en régime permanent ayant été obtenu dans la majorité des secteurs.

Un bilan hydrologique ainsi qu'une analyse de sensibilité simplifiée ont été réalisés sur la zone d'étude. Les premiers résultats tendent à montrer la persistance de la « crête » sous l'effet de la variation des différents paramètres testés. Les éléments structuraux de la zone (anticlinal de Blaye, zone d'affleurement en rive droite, superposition des terrains de type multicouche) apparaissent bien comme des éléments essentiels de cette configuration piézométrique.

Le modèle construit utilise le code de calcul **MARTHE** (Modélisation d'Aquifères par maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements) développé par le BRGM (actuellement version 4.3) via l'interface **WinMarthe** version 7 (Thiéry, 1990 ; Thiéry, 2006). Le schéma de résolution utilise les différences finies avec un maillage parallélépipédique.

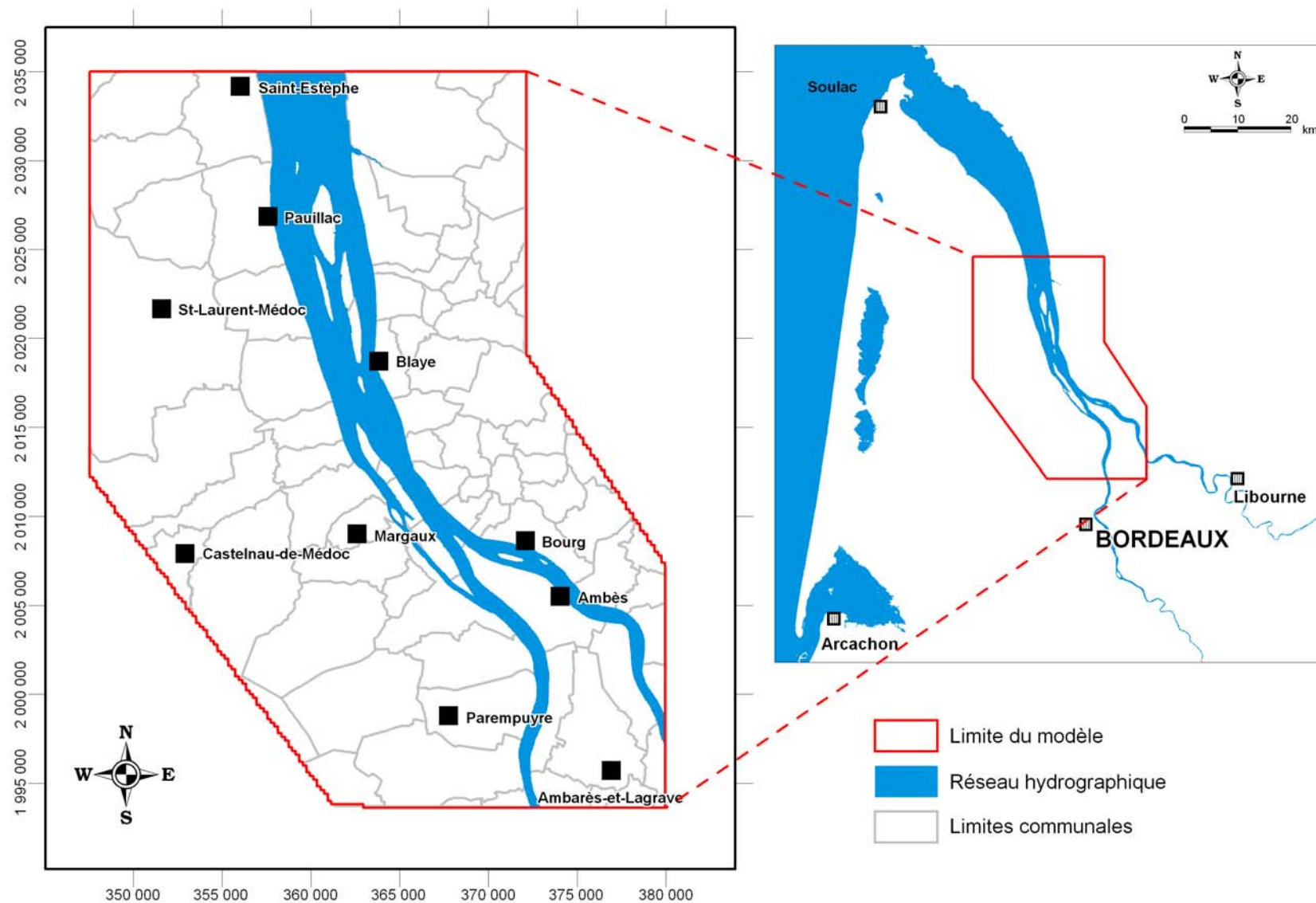
4.1. RÉGIME PERMANENT : RAPPEL DES CARACTÉRISTIQUES DU MODELE

4.1.1. Géométrie du modèle

Le modèle géologique, base de la géométrie du modèle hydrodynamique a été élaboré via le logiciel **GDM**, développé par le BRGM, et de son composant de modélisation géologique multicouche **Multilayer**.

Ces outils permettent d'interpoler les toits et les murs des formations considérées et de combiner ces surfaces en contrôlant la cohérence par rapport aux données d'entrée (log de forages, contacts géologiques à l'affleurement,...).

Le territoire modélisé est centré sur la zone de la crête piézométrique et s'étend de Saint-Estèphe au nord à Blanquefort au sud, sur environ 20 km de large. L'étendue du modèle permet d'intégrer une partie des affleurements de l'Éocène moyen détritique au nord-est de la zone d'étude ainsi que les formations de l'Éocène moyen calcaire qui affleurent à Blaye et dans le lit de l'estuaire de la Gironde. L'extension de la zone d'étude est présentée en Figure 21.



Le modèle a été élaboré à partir du modèle numérique de terrain (IGN 2005) au pas de 50 m ré-échantillonné au pas de 200 m, taille du maillage retenue pour la modélisation de la zone.

Les bathymétries de l'Estuaire de la Gironde, de la Garonne et de la Dordogne ont été extraites des cartes hydrographiques éditées en 1999 par le Port Autonome de Bordeaux (PAB).

Les données géologiques utilisées pour la retranscription de la géométrie des réservoirs proviennent :

- des sondages,
- des contacts géologiques des formations affleurantes extraits des cartes géologiques régulières à l'échelle 1/50 000,
- des cartes des toits des formations éocènes et des cartes isopaques des horizons imperméables élaborées au cours du projet.

La stratigraphie des neuf formations modélisées est établie comme suit :

	Formations	Description
1	FLAN	Flandrien
2	QUAT	Quaternaire alluvial
3	AUTR	Formation de recouvrement
4	EPES	Eponte Eocène supérieur
5	EMC2	Eocène moyen Calcaire 2 (EMC2)
6	EPO2	Eponte EMC1/EMC2
7	EMC1	Eocène moyen Calcaire 1 (EMC1)
8	EPO1	Eponte EMDT/EMC1
9	EMDT	Eocène moyen Détritique (EMDT)

Tableau 9 : Succession stratigraphique des formations modélisées

Les toits et murs des différentes formations ont été interpolés par krigeage avec variogramme linéaire isotrope.

La formation de l'Éocène supérieur a été considérée comme imperméable. Les formations de recouvrement regroupent les réservoirs Oligocène, Miocène et les terrasses Quaternaires non différenciées.

La géométrie du modèle est illustrée par les visualisations 3D ci-dessous (Figure 22 et Figure 23).

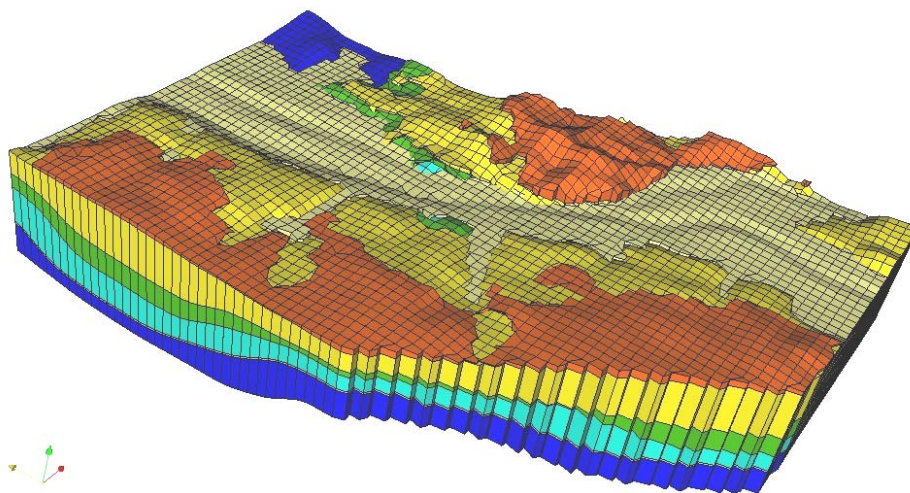


Figure 22 : Visualisation 3D du modèle hydrogéologique numérique – Couches 1 à 9

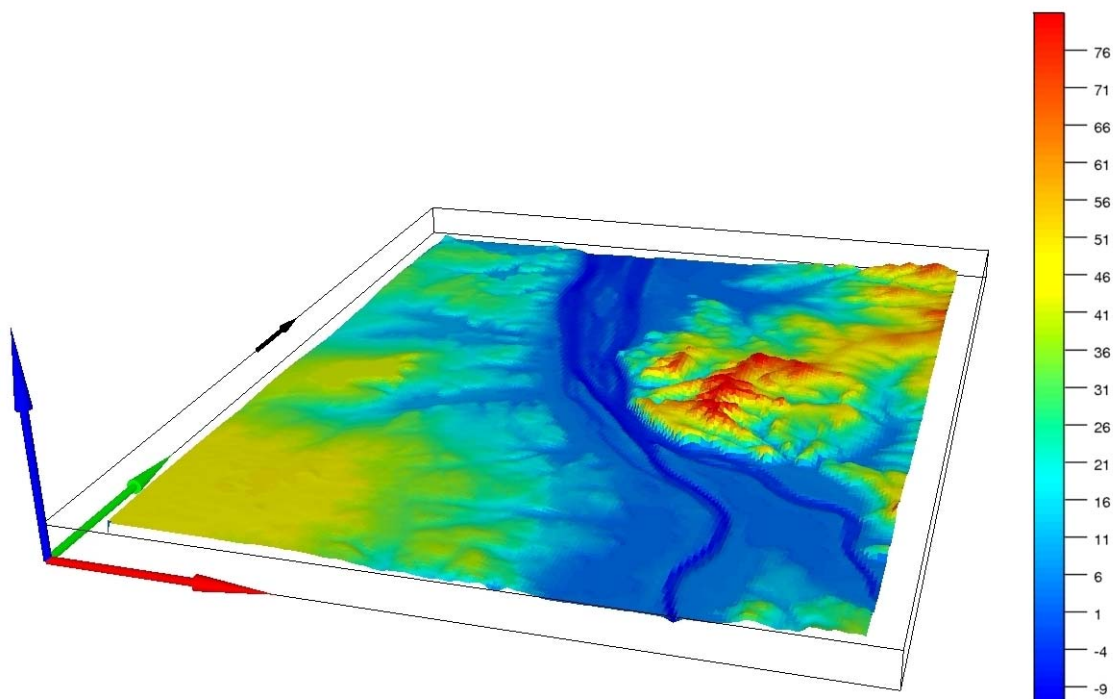


Figure 23 : Visualisation 3D du modèle hydrogéologique numérique – Topographie et bathymétrie en m NGF

4.1.2. Conditions aux limites

Elles sont définies comme toutes conditions hydrodynamiques, de flux ou de potentiels, permanents ou variables, imposées au sein d'un système aquifère. Leurs définitions nécessitent la description quantitative du système.

Deux types de conditions aux limites sont prises en considération dans le modèle, **les potentiels imposés** en bordure de modèle et le couplage avec le **réseau hydrographique**.

Le couplage avec le réseau hydrographique est élaboré en première approche en prenant une cote du plan d'eau à 0,5 m NGF. L'épaisseur du colmatage est prise à 1 m dans le Flandrien et 0,5 m au droit des affleurements des formations calcaires EMC1 et EMC2 et de l'éponte éocène supérieure. La perméabilité du fond de l'estuaire est fixée à 10^{-9} m/s.

En ce qui concerne les potentiels imposés, les charges simulées par le **Modèle Nord Aquitain** (MONA version V31-2003), pour les couches Oligocène et Eocène moyen sont intégrées sur les bordures du modèle local pour la couche de recouvrement (AUTR) et celle de l'Eocène moyen Détritique (EMDT).

La carte piézométrique établie en 2004 sur la zone d'étude (cf. Annexe 2) a été choisie pour fixer les charges en potentiels imposés pour la couche calcaire EMC1.

Le tableau ci-dessous résume la répartition des mailles à potentiels imposées sur les couches EMDT et AUTR du modèle (Tableau 10).

Couche du modèle	Mailles à potentiels imposés
Formation de recouvrement	471
Eocène moyen calcaire 1 (EMC1)	1910
Eocène moyen détritique (EMDT)	1349

Tableau 10 : Mailles à potentiels imposés du modèle en régime permanent

4.1.3. Termes puits/source

La recharge et les prélèvements font partie du terme puits/source de l'équation générale de l'écoulement. Ces paramètres permettent d'envisager l'apport théorique des précipitations dans la modélisation pour le premier et la reprise due à l'exploitation des nappes profondes pour le deuxième.

Les prélèvements moyens annuels de l'année 2004 ont été pris en compte dans les couches de l'Eocène moyen Détritique (EMDT) et les deux couches de l'Eocène moyen Calcaire (EMC1 et EMC2).

Les volumes annuels prélevés en 2004 ont été intégrés pour chaque ouvrage référencé sur la zone d'étude.

Six zones de données météorologiques ont été mises en place en fonction des zones d'affleurement des différents terrains (Figure 24). Chaque zone correspond à un

secteur homogène du point de vue de la recharge des terrains. La phase de calage permet de fixer la recharge sur chacune des zones.

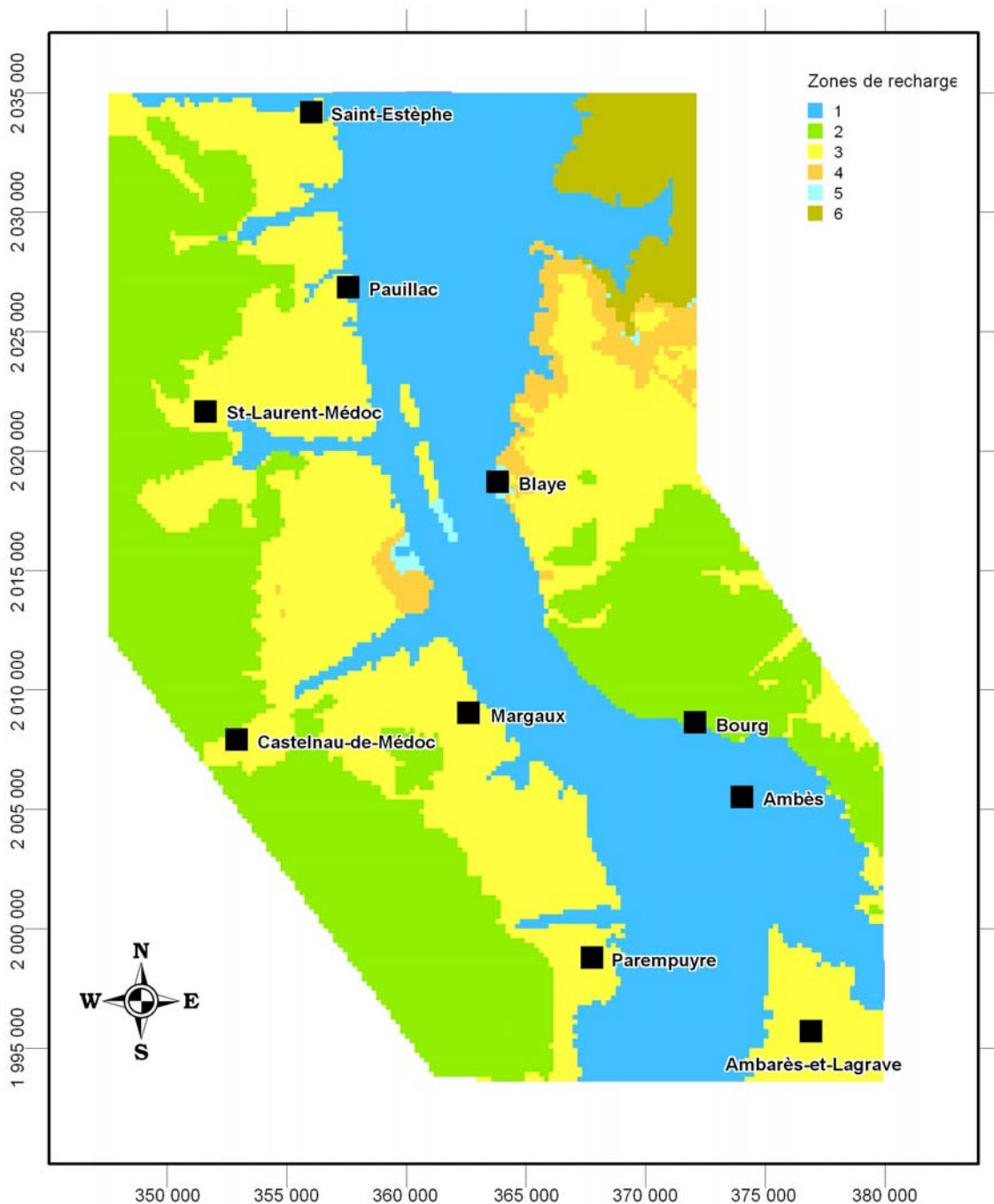


Figure 24 : Visualisation des zones météorologiques – Modèle Eocène-Estuaire en régime permanent – paramètre : Zones météo

4.2. RÉGIME PERMANENT : OPTIMISATION DE LA RECHARGE

La spatialisation de la recharge sur la zone d'étude est effectuée en prenant en considération les variations pédologiques de la zone.

Un bilan entre la pluie et l'Évapotranspiration Potentielle (ETP) peut être réalisé dans chaque « zone de pluie » du modèle. Dans le cas de notre étude et par soucis de simplification, le bilan Pluie/ETP ne sera pas effectué au sein du modèle. La variable hydroclimatique prise en considération, appelée « Flux_Pluie » correspond à la recharge directe des aquifères par les précipitations.

Ainsi, spatialiser les zones de recharge directe des aquifères par la prise en compte de la pédologie de la zone d'étude permet d'approcher plus précisément le fonctionnement hydroclimatique.

Il est à noter que compte tenu de la dimension de la zone d'étude et de l'étendue des affleurements de l'Eocène moyen Détritique et Calcaire, la recharge demeure un paramètre d'apport probant.

4.2.1. Pédologie de la zone d'étude

Les grandes unités pédologiques peuvent être caractérisées par leur **R**éserve **F**acilement **U**tilisable (**RFU**).

Les propriétés de rétention hydrique des sols font que toute l'eau stockée dans la **R**éserve **U**tile (**RU**) n'est pas disponible pour les plantes.

La quantité d'eau réellement disponible pour les plantes est appelée la réserve facilement utilisable (RFU). La RFU dépend, non seulement de la profondeur racinaire, mais aussi de la densité de l'enracinement et de la structure du sol.

Une étude effectuée par le BRGM (Seguin et al., 2002), réalisée dans le cadre de la cartographie de la vulnérabilité des systèmes aquifères aquitains utilise une cartographie précise des grandes unités pédologiques caractérisées par leur RFU établie par l'INRA (Figure 25).

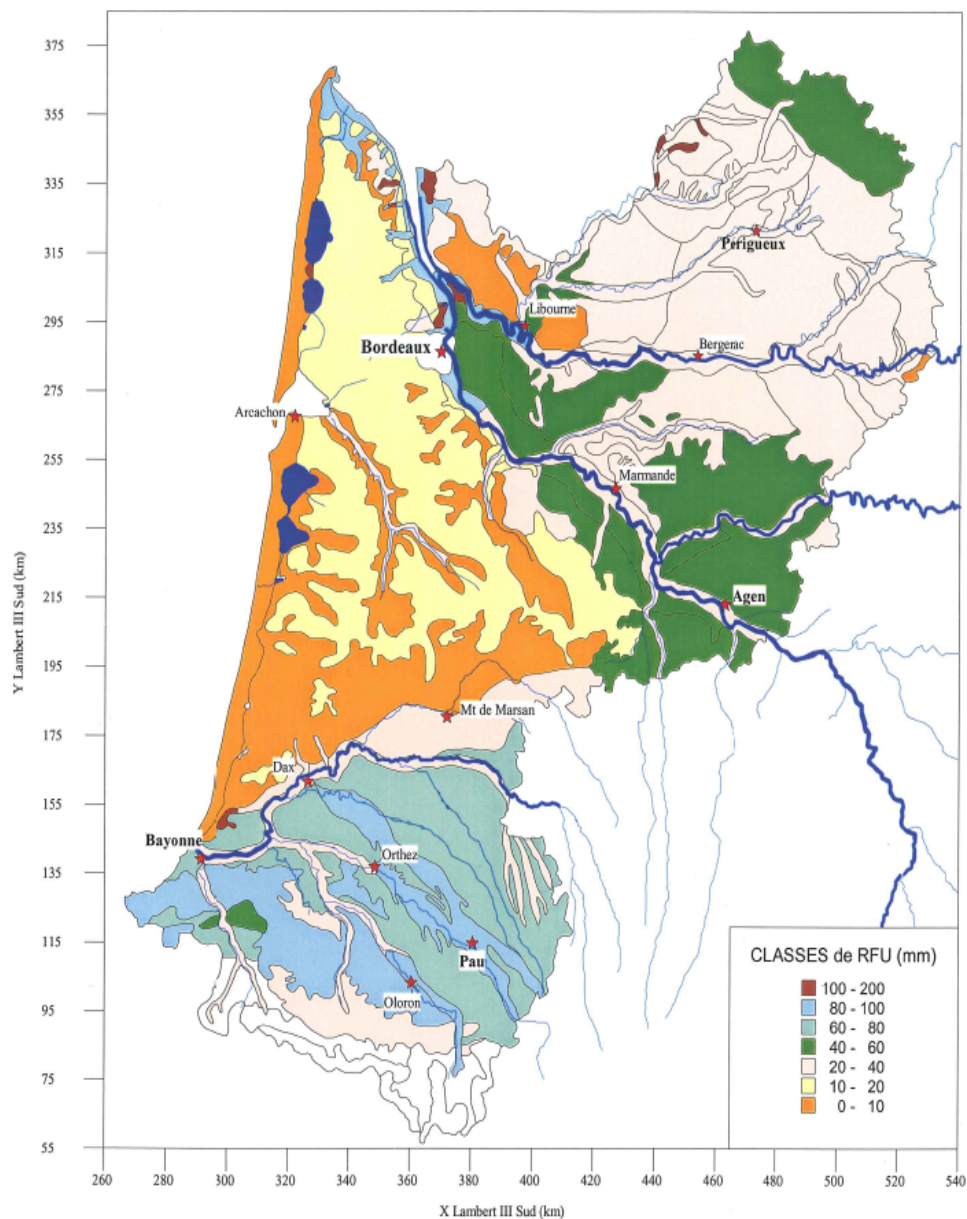


Figure 25 : Carte des grandes unités pédologiques de l'Aquitaine caractérisées par leur réserve en eau facilement utilisable (d'après la cartographie au 1/500 000 réalisée par la X.R.A et l'INRA)- Rapport BRGM/RP-52042-FR)

La RFU correspond d'une manière simplifiée aux 2/3 de la réserve utile du sol considéré et nous permet par conséquent d'évaluer la capacité des terrains affleurants à stocker l'eau dans les premiers horizons du sol.

Il est alors possible, à partir de données brutes de pluies efficaces sur la zone, d'apprécier ou tout au moins d'approcher la percolation de l'eau des premiers horizons du sol vers les nappes sous-jacentes.

Les données de précipitation sont enregistrées sur la station de Mérignac pour l'année 2004, année de référence du modèle en régime permanent. La recharge reste néanmoins un paramètre de calage pour le modèle établi en régime permanent. Il n'est pas envisageable d'établir manuellement un bilan hydrologique où les valeurs de percolation peuvent être introduites comme valeurs brutes au modèle. La cartographie pédologique du secteur permet ensuite de densifier le nombre de zones de recharge et d'adapter les valeurs de celles-ci à l'hétérogénéité de la pédologie.

4.2.2. Création de zone de sol

Sous le logiciel de modélisation MARTHE, les zones météorologiques sont affinées en prenant en compte à la fois la nature géologique des terrains affleurants ainsi que les grandes unités pédologiques en présence (Figure 26).

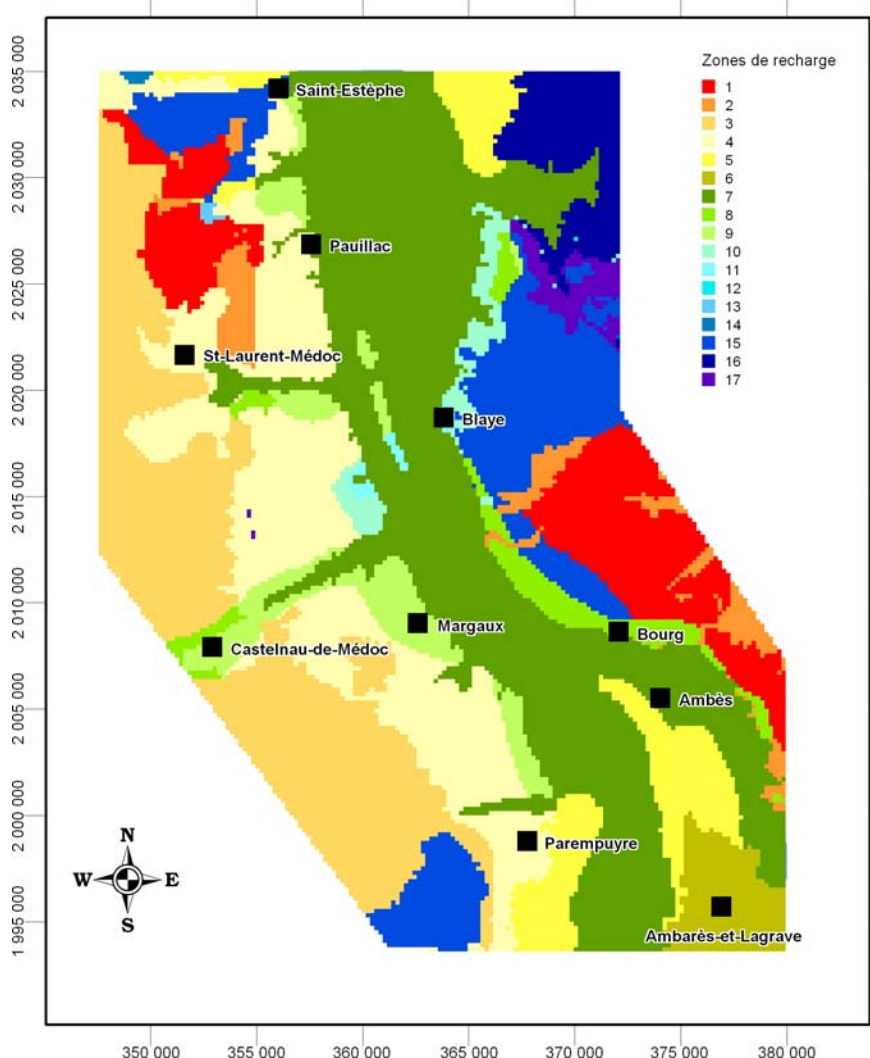


Figure 26 : Visualisation des 17 nouvelles zones météorologiques – Modèle Eocène-Estuaire en régime permanent – paramètre : Zones météo

Ainsi, 17 zones de recharge sont créées : 5 correspondent aux terrains affleurants du Flandrien, des formations de recouvrement (3) et de l'éponte de l'Éocène supérieure.

Les affleurements de l'Éocène moyen Calcaire 1 (EMC1) présentent une unique zone à faible Réserve Facilement Utilisable, compte tenu de la faible extension de ceux-ci. Il en est de même pour les terrains de l'Éocène moyen Calcaire 2 (EMC2) qui comptent seulement 3 zones de recharge différentes. Les terrains détritiques affleurants au nord-est de la zone d'étude et dont l'extension est légèrement plus grande compte 4 zones de recharge variable.

Un réajustement du calage du régime permanent à partir de ces nouvelles données de recharge a permis d'affiner les résultats. D'une façon générale, si la réserve utile est faible, la percolation sera favorisée suite à des pluies efficaces importantes sur la zone. A contrario, si cette réserve est forte, la capacité du sol à contenir l'eau sera d'autant plus importante et la percolation vers les nappes sous-jacentes en sera diminuée.

4.2.3. Réajustement du calage du modèle en régime permanent

Le réajustement du calage en régime permanent a pour objectif de s'assurer du bon fonctionnement du modèle suite à des modifications apportées sur les zones de recharge et d'ajuster la recharge du système sur celles-ci afin de retranscrire au mieux le comportement hydrodynamique du système.

Le calage en régime permanent permet une première évaluation des paramètres de calage du modèle mais ne constitue pas une référence absolue. Seul le passage du modèle en régime transitoire permet de préciser les paramètres et de cerner le champ des coefficients d'emmagasinement.

La recharge a été ajustée par essai-erreur pour réduire les différences entre charges observées et charges simulées à des valeurs acceptables.

La qualité du calage d'un modèle en régime permanent s'apprécie à partir de quatre notions, les cartes piézométriques restituées, la comparaison valeurs observées/valeurs simulées, le bilan quantitatif du modèle et l'analyse de sensibilité.

a- Restitution des cartes piézométriques

La comparaison entre la distribution des isopièzes modélisées et celles issues des mesures permet d'apprécier la cohérence des écoulements restitués par le modèle. Globalement, les hauteurs piézométriques simulées par le modèle semblent conformes aux cartes piézométriques établies (Annexe 2).

La structure de la crête piézométrique est bien retranscrite par les deux grands axes d'écoulement nord et sud, à la fois pour le réservoir détritique (Figure 27) et pour les réservoirs calcaires (Figure 28). Les ordres de grandeur des charges hydrauliques ainsi que l'opposition des deux directions d'écoulement sont bien respectées.

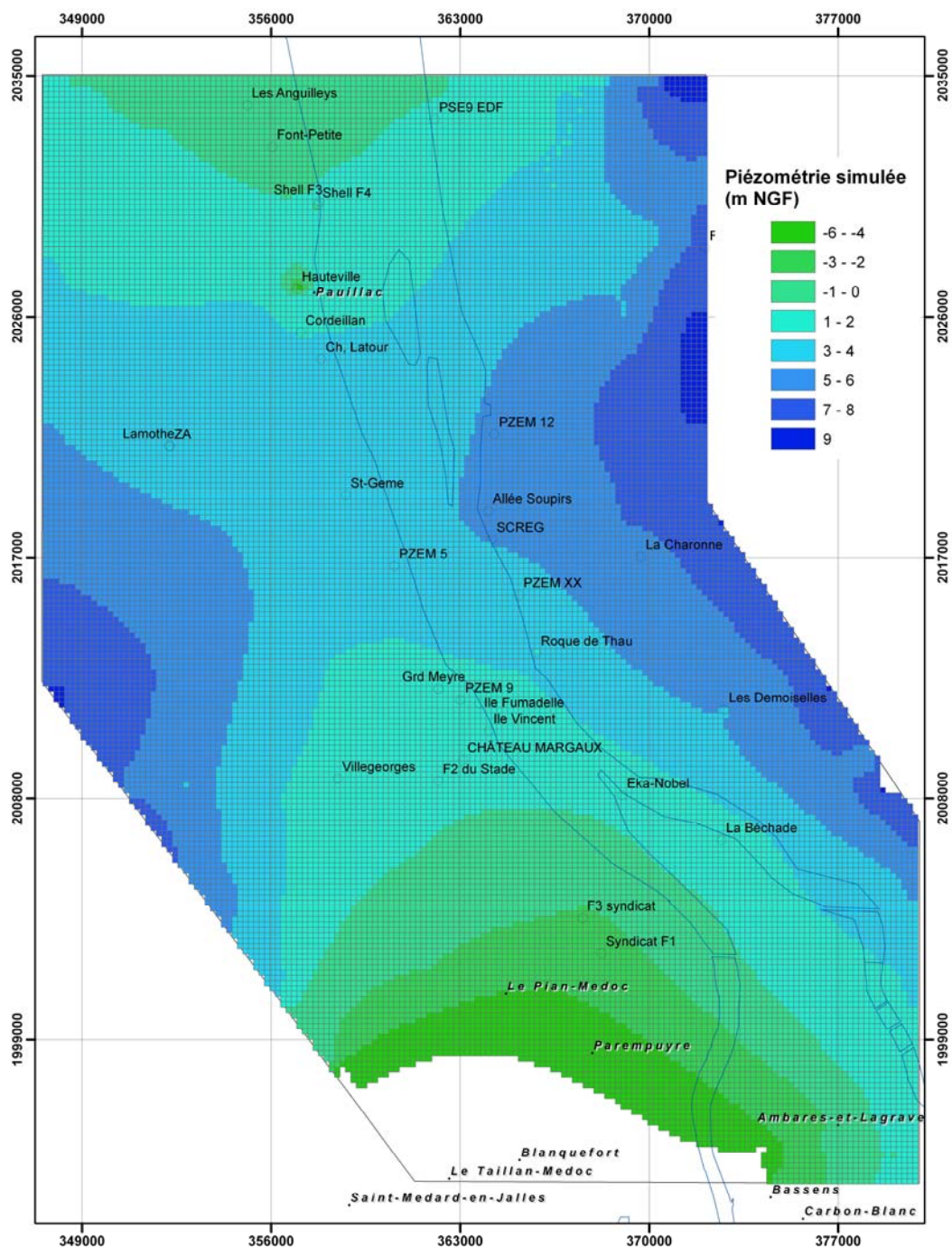


Figure 27 : Hauteurs piézométriques restituées pour le réservoir éocène détritique

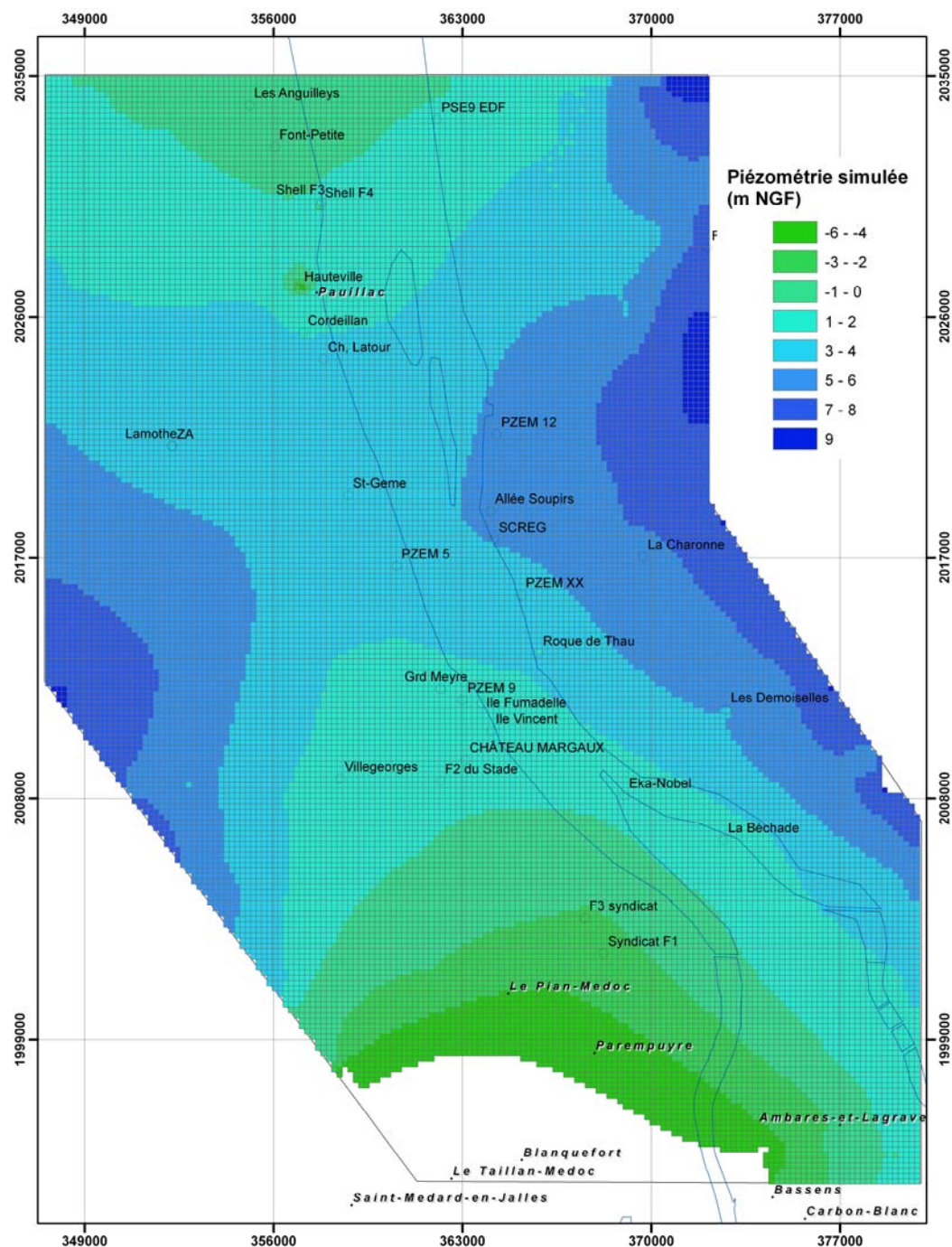


Figure 28 : Hauteurs piézométriques restituées pour les réservoirs éocènes calcaires

b- Comparaison Valeurs observées / Valeurs simulées

Les hauteurs piézométriques restituées par le modèle présentent une corrélation satisfaisante avec les valeurs mesurées sur l'ensemble des points de contrôle.

La spatialisation a permis une légère amélioration du calage en régime permanent. Le coefficient de corrélation obtenu entre les valeurs mesurées et les valeurs observées est en effet de 0,93.

Le modèle est calé avec une convergence interne de 10^{-6} , représentant la variation moyenne de charge entre deux itérations de calcul. L'erreur produite par rapport à celle-ci est de 0,78% et paraît tout à fait convenable. D'une manière générale, les hauteurs piézométriques restituées présentent une corrélation satisfaisante avec les valeurs mesurées (Figure 29)

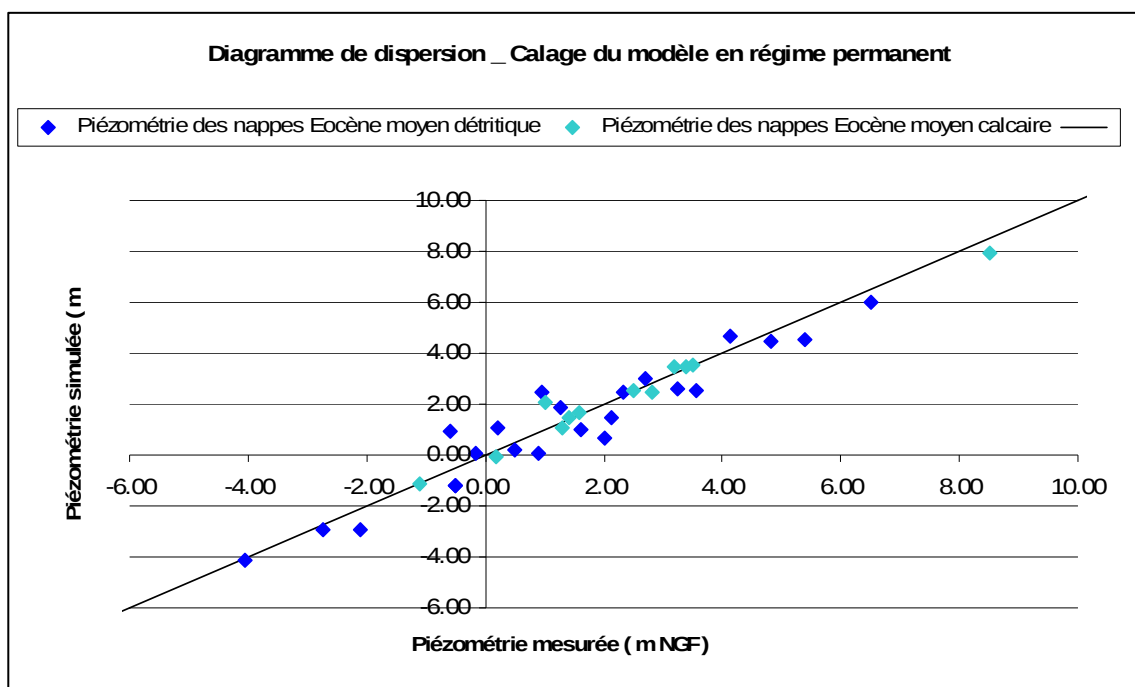


Figure 29 : Comparaison entre les charges hydrauliques simulées/mesurées en régime permanent et étiage 2004

Les écarts sont compris entre -1.33 m et 1.52 m, ce qui reste acceptable pour un calage en régime permanent. Les écarts les plus forts sont rencontrés sur 4 forages :

- 07791X0135 – Cazau (Lamarque);
- 07783X0008 – Lamothe (St Laurent du Médoc);
- 07788X0037 – Villegeorges (Avensan);
- 07795X0010 – Château Margaux (Margaux).

Bien que tous situés en Médoc, ces piézomètres ne sont pas regroupés dans une même zone, et cette hétérogénéité spatiale démontre qu'il ne s'agit pas d'un problème lié aux caractéristiques hydrodynamiques d'une partie du modèle.

Des erreurs de nivellement ou de simples anomalies dans les mesures piézométriques pourraient être à l'origine des écarts observés.

c- Fonctionnement quantitatif du système

A l'issue de la phase de calage, le bilan hydrologique en régime permanent s'établit comme suit (Tableau 11) :

Débits Entrant /Charges Imposées = 2.366
Débits Sortant /Charges Imposées = -1.992
Débits Entrant dans les Mailles= 9.669E-03
Débits Sortant des Mailles = -0.3973 (dont-0.3837 Imposé)
Débit d'Infiltration/Évaporation = 0.5995
Débit de Débordement/Suintement= -0.5575
Débits Rivière -> Nappe = 1.014E-03 entrant et -2.867E-02 sortant

Bilan de système : ENTREES – SORTIE = 0

Tableau 11 : Bilan du modèle en régime permanent (en m³/s)

Le modèle permet d'établir un bilan de flux pour chacun des aquifères du modèle en intégrant les entrants et les sortants ainsi que les échanges au travers des épontes. Les échanges verticaux entre aquifères constituent une part importante dans le bilan de chaque nappe.

Ce bilan permet de vérifier la cohérence du modèle (cohérence des flux d'échanges) et l'équilibre du bilan (bilan nul).

d- Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité a été établie sur le même schéma que précédemment (Rapport BRGM-RP55240-FR – Platel et al 2006). Le fonctionnement global du modèle n'ayant pas été modifié, la restitution du modèle vis-à-vis des variations des paramètres dits sensibles est identique, et les conclusions de l'analyse de sensibilité effectuée en 2006 sont donc conservées.

4.3. MODELE TRANSITOIRE

Les premiers résultats obtenus suite à la modélisation de la crête piézométrique de l'Eocène en régime permanent ont permis d'appréhender le comportement hydrodynamique du système considéré.

La réalisation du calage en régime transitoire doit permettre de préciser ce comportement et de mettre en évidence les facteurs influençant la persistance de la crête piézométrique.

La construction du modèle en régime transitoire nécessite l'ajustement des données d'entrée variant à chacun des pas de temps considérés : conditions aux limites, prélèvements, recharge. Par ailleurs, l'intégration de l'ensemble des chroniques piézométriques permet de confronter les valeurs mesurées, servant de référence, à celles calculées par le modèle.

L'ensemble de ces étapes passe par la mise en forme des fichiers d'entrée spécifiques au logiciel MARTHE et par une phase de vérification de ces données, indispensable pour s'assurer de la fiabilité du modèle.

4.3.1. Construction du modèle

a- Discrétisation temporelle

En régime transitoire, le temps est subdivisé en un ensemble de périodes de durée choisie pendant lesquelles les conditions sont considérées comme constantes. L'utilisation de ces différentes périodes permet de modifier certains paramètres au cours de la modélisation (prélèvements, recharges, potentiels imposés, cote du réseau hydrographique entre autres). Idéalement, l'utilisation de pas de temps courts est recommandée car elle permet de prendre en considération des variations hydroclimatiques plus fines du secteur modélisé.

Néanmoins, la définition du pas de temps est aussi basée sur la finesse des données disponibles sur la zone (piézométrie, prélèvement et recharge entre autres).

Dans ce modèle, la période retenue pour la réalisation du calage en régime transitoire s'étend de 1995 à 2005. Cette période est discrétisée avec des pas de temps variables. Le pas de temps annuel est utilisé lors de la période d'initialisation de 1995 à 1999 puis un pas de temps trimestriel est retenu de 2000 à 2005.

Le pas de temps trimestriel permet de prendre en compte plus finement les fluctuations saisonnières (climat, piézométrie) ainsi que les différents régimes d'exploitation de la ressource.

La succession des phases de « hautes eaux » et de « basses eaux » permet de cerner beaucoup plus précisément le champ des coefficients d'emmagasinement captifs et libres.

Au final, 28 pas de temps ont été créés. Chaque pas de temps correspond à des variations temporelles des différents paramètres d'apports et de prélèvements dans les réservoirs éocènes. Sous le logiciel MARTHE, le fichier nommé « pas de temps » regroupe l'ensemble des paramètres temporels du modèle. Il est également possible d'intégrer à ce fichier, et à chaque pas de temps, les valeurs des paramètres qui évoluent.

b- Terme puits/source

Prélèvements dans les formations éocènes

Chaque année, un recensement des prélèvements est réalisé dans le cadre du contrôle qualité et quantité des nappes d'eaux souterraines de Gironde. Ainsi, la collecte de l'ensemble des données disponibles sur la zone a permis de faire le point sur l'ensemble des prélèvements ayant lieu dans les formations éocènes du secteur considéré. In fine, 122 forages ont été répertoriés sur le secteur, 59 exploitant la nappe de l'Eocène détritique, 19 et 21 exploitant respectivement les nappes de l'Eocène calcaire 1 et 2. Pour chaque pas de temps, un fichier des débits de pompage est créé et incorporé au modèle.

La Figure 30 présente l'évolution des prélèvements de 1995 à 2005 dans chacune des formations de l'Eocène moyen du secteur étudié.

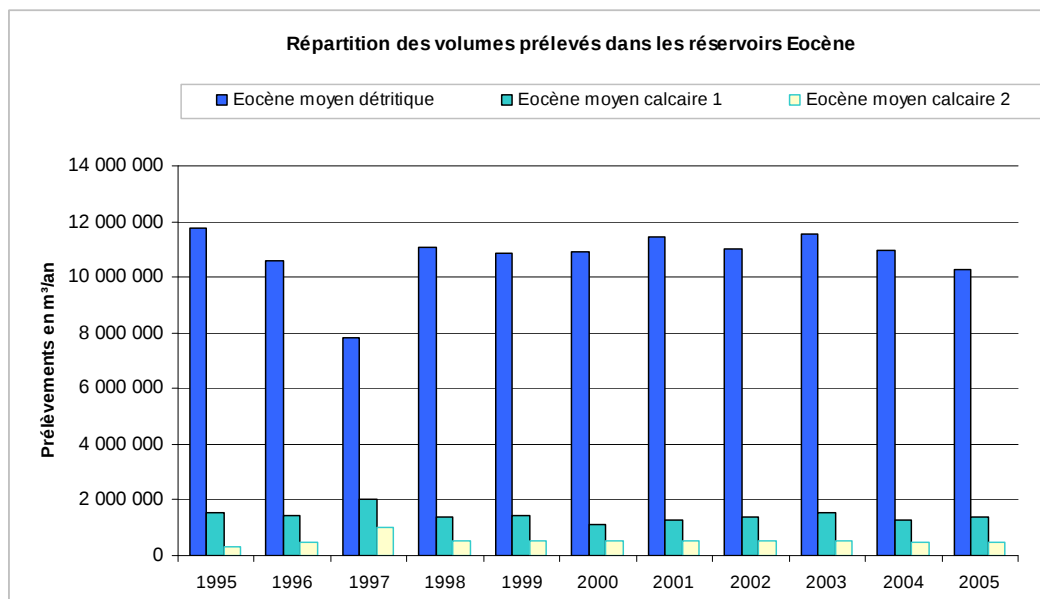


Figure 30 : Evolution des prélèvements de l'Eocène moyen de 1995 à 2005

Les prélèvements dans les formations éocènes sont majoritairement localisés dans le réservoir détritique qui présente les conditions d'exploitation les plus favorables dans le secteur estuarien. Sur la zone d'étude les volumes soutirés peuvent être très variables d'une année à l'autre.

Les prélèvements effectués dans les formations de l'Eocène moyen calcaire représentent moins d'un cinquième des volumes prélevés dans les formations détritiques.

Les données de prélèvements dans les différents réservoirs sont disponibles dans la Banque du Sous-Sol en volume annuel pour chacun des forages de prélèvements référencé sur la zone d'étude. Le fait de disposer de données en volume annuel ne pose évidemment pas de problème durant les 5 premiers pas de temps du modèle (1995-1999). Cependant, concernant les pas de temps trimestriels, les données doivent nécessairement être adaptées à la discrétisation temporelle retenue. Pour ce faire, les débits doivent être répartis trimestriellement. Notons que les données de prélèvements sont introduites dans le modèle en m³/j. Plusieurs types de forage de prélèvements sont référencés sur la zone, des forages d'alimentation en eau potable, agricoles, industriels, individuels et collectifs.

La répartition trimestrielle du volume annuel est établie en fonction des différents usages sur la période de 1995 à 2005 (Figure 31).

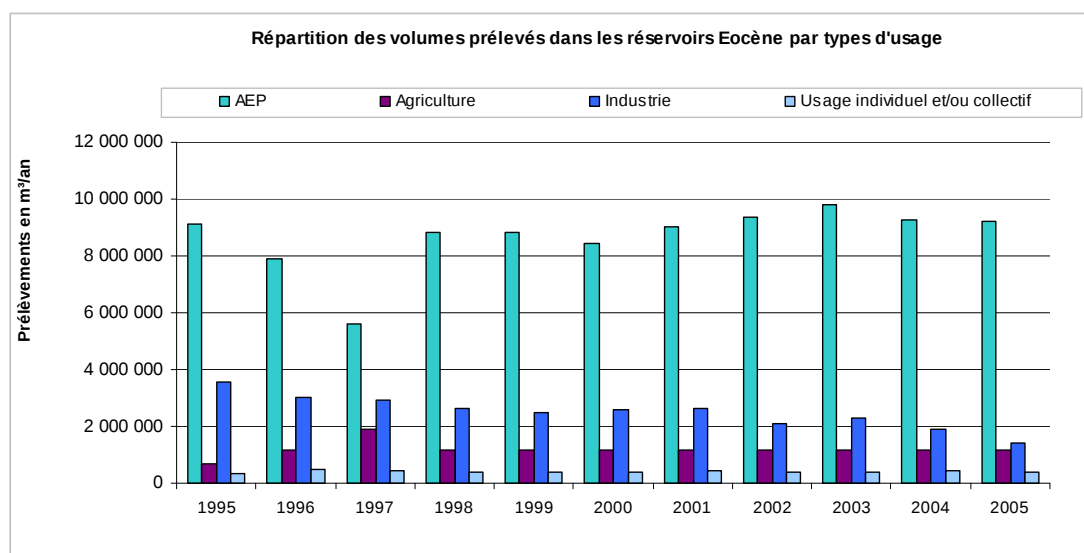


Figure 31 : Evolution des prélèvements en fonction du type d'usage de 1995 à 2005

- 28 forages individuels ou collectifs ont été répertoriés sur la zone estuarienne. Ce sont des ouvrages destinés à capter l'eau nécessaire aux besoins usuels d'une famille. Ils comprennent :

- les usages alimentaires et liés à l'hygiène (boisson, préparation d'aliments, soins corporels, lavage du linge et de la vaisselle, etc.) pour lesquels l'eau doit respecter les limites de qualité réglementaire fixées par le code de la santé publique (eaux destinées à la consommation humaine) ;
- les autres usages domestiques (lavage des sols et des véhicules, alimentation des toilettes, arrosage extérieur).

Les volumes sont relativement modestes, compris entre 0,3 et 0,5 Mm³/an dans le secteur d'étude. Les débits journaliers pour ces deux types de forages d'eau sont considérés comme relativement constants tout au long de l'année. Ainsi, le volume annuel prélevé pour les forages à caractère individuel ou collectif est équitablement réparti sur les quatre trimestres.

- 25 forages industriels ont été répertoriés sur la zone d'étude. Les volumes sont en général plus importants et peuvent atteindre près d'1 Mm³/an par exemple pour l'ouvrage de prélèvement de l'entreprise Michelin située à Bassens.

De même que pour les ouvrages à caractère individuel ou collectif, les forages industriels sont considérés avec des débits de prélèvements relativement constants au cours de l'année.

- 32 ouvrages agricoles ont été répertoriés sur la zone d'étude. Les volumes prélevés sont en général modestes, mais ils peuvent être grossièrement répartis dans le temps. En effet, les volumes prélevés par les exploitations agricoles sont intimement liés à la saison et au stade végétatif des plantes.

Ainsi, les prélèvements des trimestres 1 et 4 sont considérés comme nuls. Pendant le deuxième trimestre, correspondant aux mois de début de croissance des plantes, les prélèvements sont considérés comme modestes, proches de 25% du volume annuel prélevé. En pleine période sèche, soit pendant le troisième trimestre, sont considérés des prélèvements équivalents à 75% du volume annuel.

Cette répartition trimestrielle des débits de prélèvements agricoles permet alors de retranscrire au mieux l'évolution piézométrique des nappes sollicitées.

Il est à noter que certains des forages peuvent ne pas répondre à ces règles générales de répartition des débits, ainsi pendant la phase de calage cette répartition pourra être modifiée localement.

- Les forages d'alimentation en eau potable sont au nombre de 37 sur la zone d'étude et représentent la plus grande part des prélèvements. Ils correspondent à un volume annuel total de 9,8 Mm³ (valeur maximale relevée pendant l'année 2003).

La répartition trimestrielle des prélèvements a été effectuée à partir des données de l'ensemble des ouvrages de la Communauté Urbaine de Bordeaux.

Ces données issues du système de télésurveillance des forages de la Lyonnaise des eaux ont été fournies par le Syndicat Mixte d'Etude et de Gestion de la Ressource en Eau de Gironde (SMEGREG).

La Figure 32 fait état de la répartition mensuelle des prélèvements de la Communauté Urbaine de Bordeaux (CUB) de 1995 à 2005.

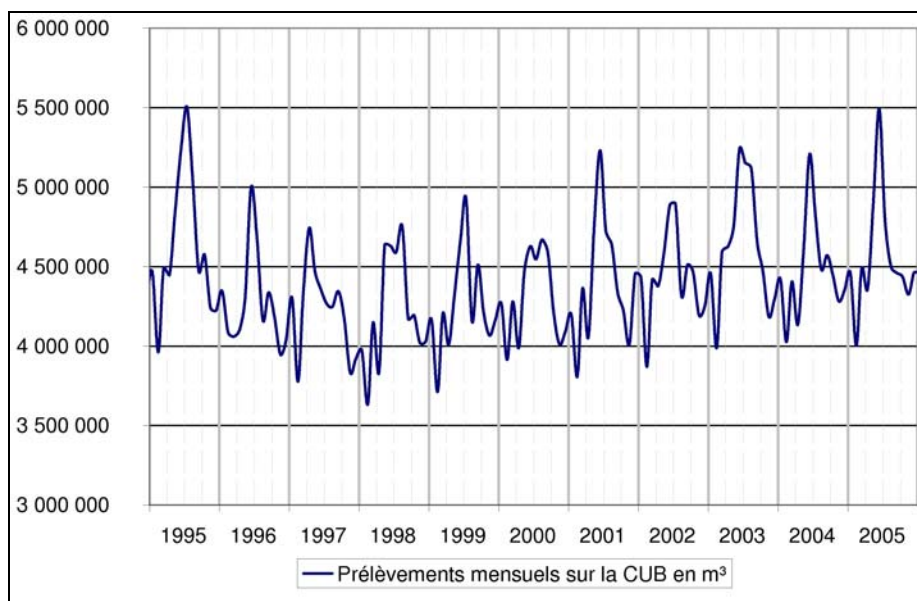


Figure 32 : Répartition mensuelle des prélèvements AEP sur la CUB (données Lyonnaise des eaux)

Une nette tendance dans la répartition des prélèvements se dégage. La consommation pour l'AEP augmente généralement de Mai à Septembre. Pour chaque trimestre, un coefficient de répartition est établi en calculant la proportion de chaque volume trimestriel prélevé par rapport au volume annuel. Ainsi, des coefficients de répartition sont établis pour chaque trimestre sur l'ensemble des années concernées (Figure 33).

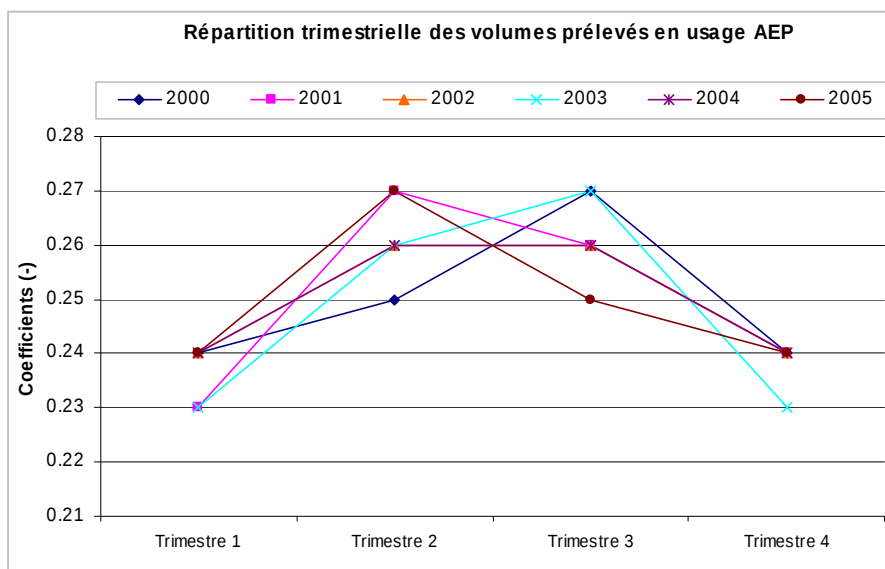


Figure 33 : Coefficients de répartition trimestrielle des volumes prélevés en usage AEP de 2000 à 2005

Les volumes de prélèvements des forages d'eau sont alors répartis sur les pas de temps trimestriels selon le schéma défini.

Alimentations des formations éocènes.

Rappelons que le terme « recharge » utilisé dans ce présent rapport correspond à la réalimentation directe des réservoirs aquifères.

La recharge des aquifères a été ajustée durant la phase de calage du modèle en régime permanent pour l'année 2004. La spatialisation effectuée sur les zones de recharge a permis de prendre en compte les capacités de rétention du sol et ainsi de spatialiser la recharge en accord avec le fonctionnement hydroclimatique du système.

Sur les secteurs définis, deux types de données sont disponibles : les pluies efficaces sur la station de Mérignac (Figure 34) ainsi que la recharge directe des aquifères définie lors du calage du modèle en régime permanent pour l'année 2004.

Les pluies efficaces ont été calculées en réalisant un bilan entre précipitations et évapotranspiration en considérant une réserve utile de 100 mm.

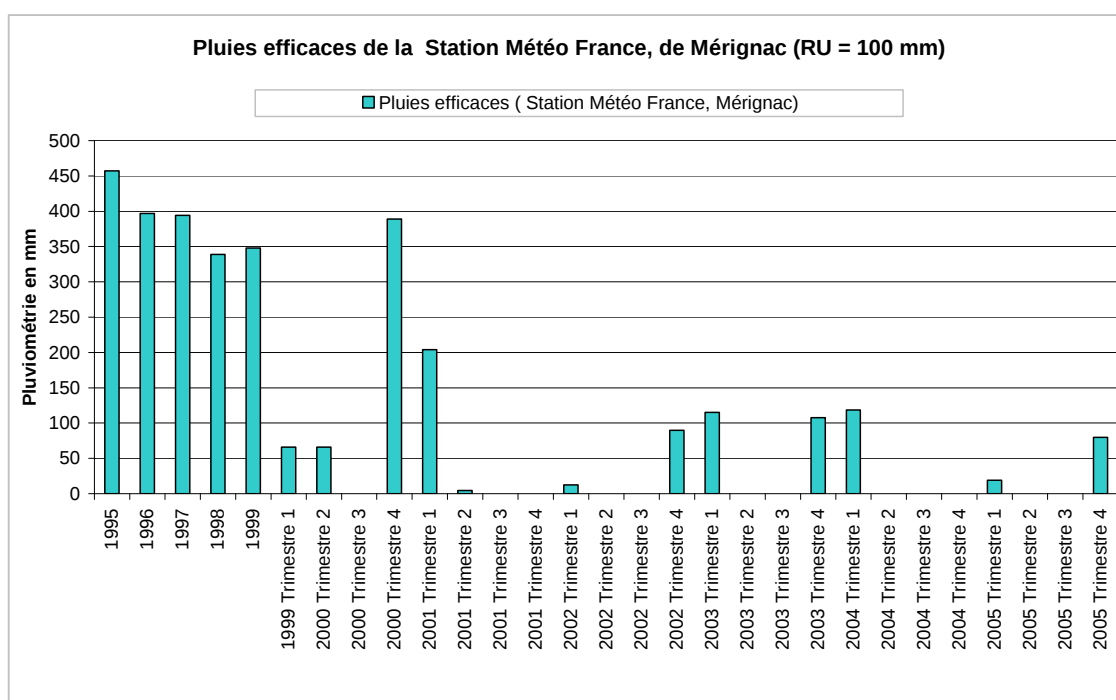


Figure 34 : Pluies efficaces calculées sur la station de Mérignac de 1995 à 2005 (Météo France)

La recharge année par année et trimestre par trimestre des couches du modèle a été évaluée, par secteur, en prenant comme référence la pluie efficace moyenne de la station météorologique de Mérignac calculée sur la période 1995-2005 (avec une RU maximale de 100 mm).

A partir des valeurs de recharge obtenues en régime permanent, les valeurs année par année, pour chaque zone pédologique, sont déterminées à partir de la loi de recharge générale ci-dessous :

$$R_{z,k} = \frac{P_{eff}(k)}{\overline{P_{eff}}} \overline{R_z}$$

$R_{z,k}$: Valeur de recharge de l'année k affectée à la zone météorologique z,

$\overline{R_z}$: Valeur de recharge du régime permanent pour la zone météorologique z,

$P_{eff}(k)$: Pluie efficace de l'année k calculée pour la station météorologique considérée,

$\overline{P_{eff}}$: Pluie efficace moyenne calculée sur la période 1995-2005 pour la station météo de Mérignac.

Dans ce contexte, lors du calage du modèle en régime transitoire, les valeurs de recharge ne demeurent plus un paramètre de calage et ce dans le but de donner éventuellement une composante prédictive au modèle. Il sera néanmoins possible de fixer des valeurs seuil à partir desquelles la recharge du modèle obéira à une loi différente ou encore de définir des valeurs d'écrtage pour retranscrire au mieux les écoulements lors d'années exceptionnelles du point de vue climatique (très humide ou très sèches).

Concrètement, les valeurs de recharge les plus importantes introduites dans le modèle se retrouvent dans les zones d'affleurement des réservoirs éocènes composés de sables et de calcaires correspondant à une RFU faible. Pour chacun des pas de temps annuel ou trimestriel, les variations de la recharge sont intégrées directement au fichier « pas de temps ». Par conséquent, une variation dans la loi de recharge entraîne nécessairement la modification d'une partie ou de l'ensemble des valeurs définissant la recharge sur les différentes zones et pas de temps du modèle.

Dans le souci d'optimiser le processus de calage du modèle, un programme sous Visual Basic est alors créé. Il permet d'intégrer au fichier pas de temps l'ensemble des éléments constitutifs du modèle, à savoir :

- Les dates et durées de chaque pas de temps défini dans le modèle,
- Les valeurs de recharge à chaque pas de temps calculées à partir de la loi de recharge intégrée au programme,
- Les fichiers répertoriant les prélèvements pour chaque forage pas de temps par pas de temps.

Pendant la phase de structuration du modèle, ce programme évolue pour intégrer les nouveaux éléments au fichier « pas de temps ».

c- Conditions aux limites

Les conditions aux limites se présentent dans le modèle sous la forme de charges ou de flux imposés, de flux nul, de conditions d'échanges Nappe-Estuaire et de cotes de débordements.

Les charges imposées permettent de prendre en compte les conditions d'échanges (entrées/sorties) aux limites du modèle local. Elles reflètent entre autre l'influence de la dépression Bordelaise à l'Eocène dans ce secteur. L'analyse de sensibilité effectuée sur le modèle en régime permanent a montré que l'abaissement des charges dans la zone bordelaise est un facteur susceptible d'abaisser le niveau piézométrique de la crête sous la cote moyenne du plan d'eau de l'estuaire. Les conditions aux limites fixées par les potentiels imposés sont donc une composante importante du modèle local.

En régime permanent, les limites du modèle local pour les aquifères de l'Oligocène (couche AUTR) et de l'Eocène moyen détritique (couche EMDT) étaient imposées à partir des charges simulées par le modèle MONA (année 2004). Les bordures des couches représentant les aquifères de l'Eocène moyen calcaire (EMC1 et EMC2) avaient été fixées à partir des cartes piézométriques établies en 2004, année de référence du régime permanent (Annexe 2).

En régime transitoire, la définition des potentiels imposés a grandement évolué. Concernant les aquifères de l'Eocène moyen calcaire (EMC1 et EMC2), les potentiels imposés ont été supprimés, l'objectif étant de contraindre le moins possible les écoulements. Pour l'aquifère détritique, trois types de limites ont été intégrées (Figure 35) :

- Au sud, des **potentiels imposés** ont servi à retranscrire l'influence de la dépression bordelaise. Les valeurs de charges ont été définies pour chaque pas de temps à partir des chroniques piézométriques des forages situées de part et d'autre de la limite du modèle local.
- Sur les limites nord-ouest et nord-est du modèle, les potentiels imposés ont été remplacés par des **flux imposés** pour permettre des fluctuations plus importantes de la charge aux abords de ces limites.
- Au nord, aucune limite n'a été fixée ce qui correspond à une **condition à flux nuls**.

Le couplage avec le réseau hydrographique permet de simuler les échanges latéraux ou verticaux entre les eaux de surface et les réservoirs profonds. En outre, les affleurements calcaires présents au droit de l'estuaire appuient l'intérêt de considérer le réseau hydrographique sur la zone d'étude.

En régime permanent, le couplage avait été fait en fixant la cote moyenne du plan d'eau de l'Estuaire à 0,5 m NGF.

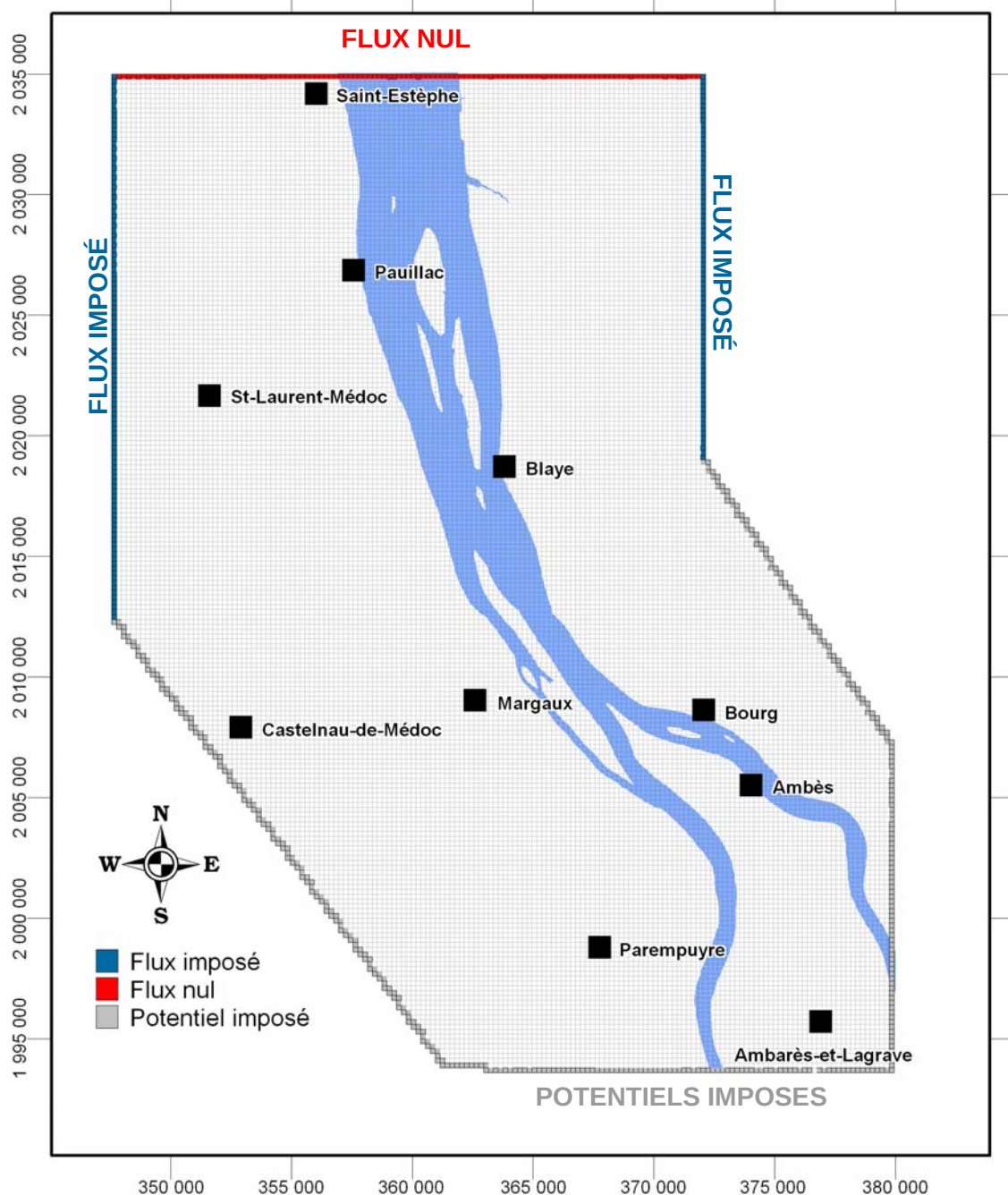


Figure 35 : Conditions aux limites pour l'aquifère de l'Éocène moyen détritique

Les variations de la cote du plan d'eau de l'estuaire ont été intégrées au modèle en régime transitoire à partir des données marégraphiques historiques des stations d'Ambès et de Fort-Médoc (Source : Port Autonome de Bordeaux). Les hauteurs d'eau en cm, référencées par rapport au 0 étiage du lieu, échantillonnées au pas de 5 minutes, ont été fournies pour les années 1995 à 2005.

La référence des mesures, appelée étiage, correspond à une moyenne des niveaux atteints par les plus grandes basses mers observées pendant une période donnée (Tableau 12).

Station marégraphique	Hauteur du zéro étiage par rapport au zéro IGN 69	Point kilométrique (PK)
Ambès	-2.002	25.35
Fort Médoc	-2.296	37.40

Tableau 12 : Cote des repères des marégraphes

Un premier traitement des données marégraphiques a été réalisé pour obtenir des valeurs journalières ramenées à la cote NGF. Les chroniques journalières des hauteurs d'eau de la Gironde (Figure 36) montrent peu de différences entre les mesures des marégraphes d'Ambès et Fort-Médoc. En effet, les différences observées entre ces deux points sont de l'ordre de la dizaine de centimètres. La largeur du fleuve et l'influence importante de la marée dans ce secteur expliquent les faibles amplitudes observées. Il est néanmoins possible de distinguer certaines années des écarts entre basses et hautes eaux de l'ordre de 50 cm.

Etant donné les faibles variations observées, la cote de la Garonne sera conservée identique dans le modèle d'une année sur l'autre de 1995 à 1999. La cote du plan d'eau ayant été interpolée à partir des valeurs moyennes des marégraphes pour retranscrire l'écoulement général de l'amont vers l'aval.

De 2000 à 2005, étant donnés les faibles écarts observés entre hautes eaux et basses eaux, seule une moyenne par trimestre est considérée pour retranscrire les variations saisonnières de la Gironde. Il aurait été plus précis d'établir une moyenne trimestrielle de la cote du plan d'eau pour chacun des pas de temps, cependant l'analyse de sensibilité effectuée sur le modèle en régime permanent a montré que la variation de la cote du plan d'eau de l'estuaire a peu d'influence sur les niveaux piézométriques de la zone d'étude. Une augmentation du niveau de 3 m avait entraîné une hausse piézométrique quasi uniforme sur les piézomètres considérés représentant seulement quelques centimètres par rapport au niveau de référence. L'impact de l'insertion de variations trimestrielles du plan d'eau dans le modèle sera vraisemblablement limité.

L'épaisseur de colmatage (1 m et 0,5 m au droit des affleurements calcaires et de l'éponte supérieure) et la perméabilité du lit de l'estuaire fixées en régime permanent ont été conservées.

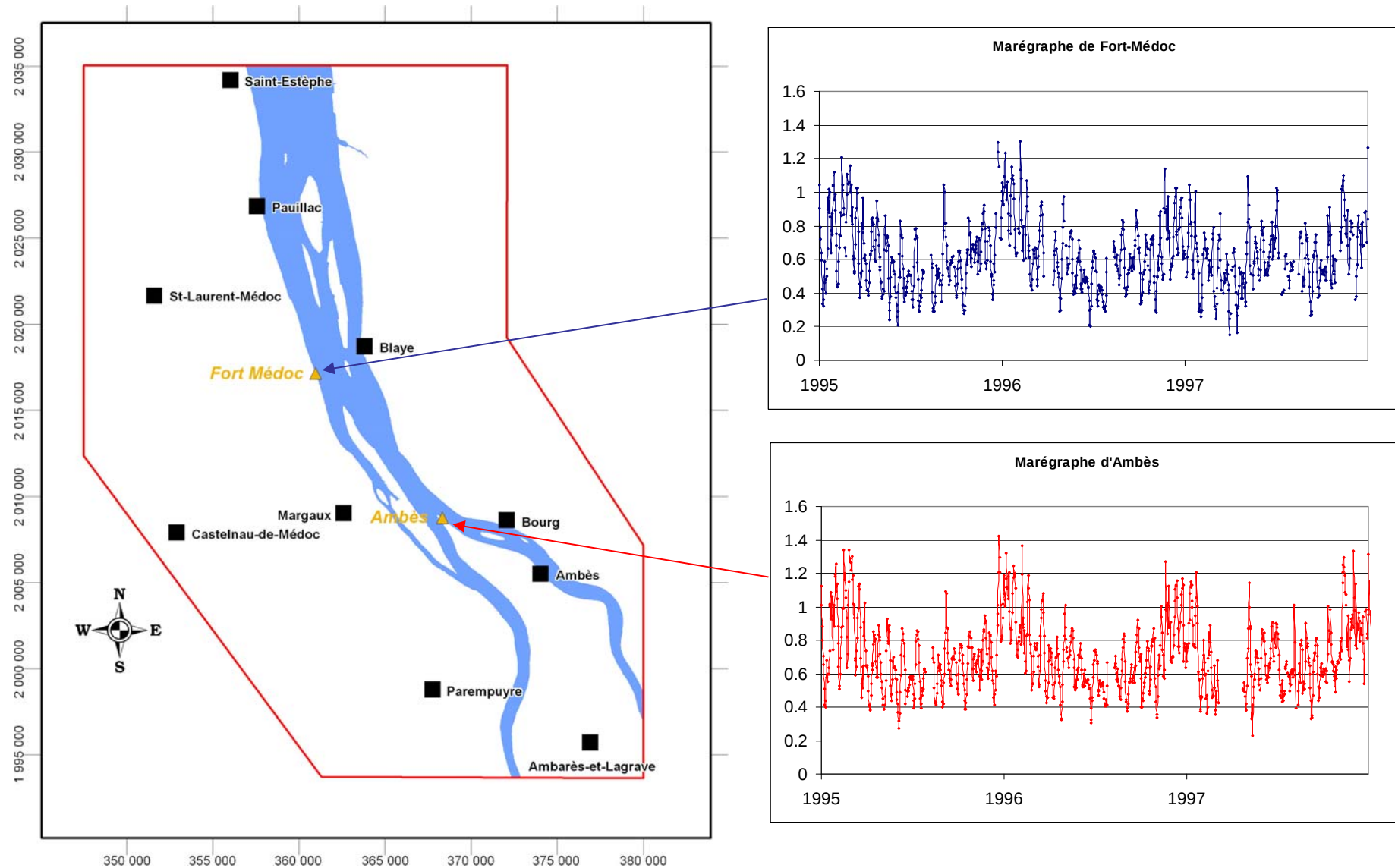


Figure 36 : Situation géographique des marégraphes d'Ambès et de Fort Médoc

d- Points d'observation

Le calage doit s'appuyer sur des chroniques piézométriques de référence que le modèle doit restituer au mieux en respectant à la fois les niveaux observés, la pente, la phase et l'amplitude des variations. La collecte de l'ensemble des mesures piézométriques disponibles sur la zone a été effectuée à partir d'une extraction des données bancarisées dans la BDES (Base de Données sur les Eaux Souterraines) du BRGM pour un total de 66 points (Figure 37).

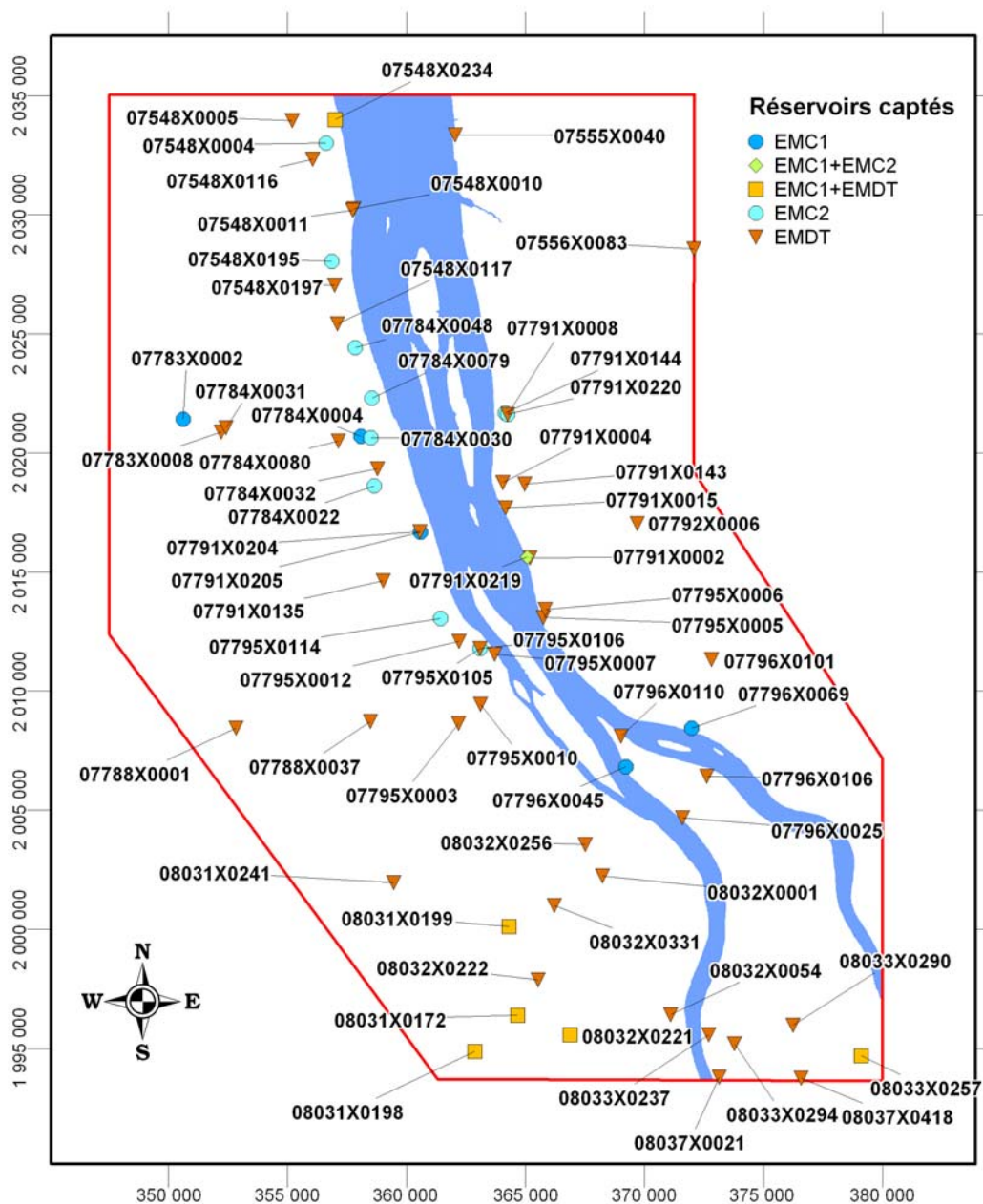


Figure 37 : Localisation des points d'observation

Sur l'ensemble de ces points, seuls 53 forages présentant une chronique suffisamment étoffée ont été retenus. On décompte 42 points de contrôle dans la formation de l'Eocène moyen Détritique (EMDT). Concernant, les formations calcaires EMC1 et EMC2, seuls 11 forages sont suffisamment représentatifs pour observer l'évolution des charges dans ces réservoirs. L'ensemble des chroniques piézométriques retenues est présenté en annexe 5.

Notons que les différentes chroniques n'ont pas toutes la même densité de mesure (journalières, mensuelles, biannuelles voire annuelles). Les valeurs simulées par le modèle transitoire seront directement superposées aux chroniques pour permettre une comparaison précise de la simulation par rapport aux observations.

4.3.2. Calage du modèle en régime transitoire

a- Paramètres hydrodynamiques

Dans le modèle, les différents aquifères sont considérés comme des milieux isotropes, au sein d'une maille de calcul, les paramètres hydrodynamiques sont identiques dans toutes les directions de l'espace ($K_x = K_y = K_z$).

Il n'est pas aisé d'extrapoler les valeurs de transmissivité issues de l'interprétation de pompages d'essai, qui explorent un volume de terrain limité (extension latérale et épaisseur), et de transposer les valeurs de perméabilités correspondantes dans le modèle.

Cependant, l'analyse du champ de transmissivité permet en première approche d'identifier les zones plus ou moins productives des réservoirs. Les perméabilités recalculées à partir des épaisseurs captées permettent également de cerner le champ des perméabilités et ainsi de guider les affectations au moment de la phase de calage (cf. Annexe 6).

Ainsi, les données issues des dossiers de près de 175 forages captant les aquifères de l'Eocène moyen dans le Nord du Bassin aquitain ont été utilisées. Les perméabilités mesurées varient dans une large gamme allant de $2.10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ à $1.10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$. Les valeurs de perméabilité peuvent être regroupées en deux ensembles, centrés autour de $1.10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ et $1.10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$. Il semble que la distribution de ces valeurs soit en liaison avec le faciès des formations aquifères de l'Eocène moyen capté en forage (Larroque, 2004).

Marthe nécessite de définir dans chaque maille deux coefficients d'emmagasinement :

- le coefficient d'emmagasinement à surface libre : c'est en quelque sorte une porosité efficace ; il est utilisé quand une maille (quelque soit la couche) n'est pas entièrement saturée (ce coefficient est celui qui serait déduit d'un pompage d'essai dans une région où la nappe est libre) ;
- le coefficient d'emmagasinement captif pour lequel il est possible d'introduire soit le coefficient d'emmagasinement spécifique soit le coefficient d'emmagasinement captif des hydrogéologues (Thiéry, 2004).

Dans le modèle, les valeurs de porosité efficace sont affectées aux zones d'affleurement des différents réservoirs dans le cadre du paramètre « emmagasinement libre ». Les différentes valeurs de la porosité efficace sont issues des gammes définies dans la littérature en fonction de la géologie des formations.

Les mesures de coefficient d'emmagasinement sont peu nombreuses. Néanmoins, les données issues des pompages d'essai dans les nappes de l'Éocène moyen donnent des valeurs d'emmagasinement spécifique comprises entre 6.10^{-7} m^{-1} et 1.10^{-4} m^{-1} . Aussi, ces ordres de grandeur ont été respectés lors du calage du modèle en régime transitoire.

b- Chroniques piézométriques

Les simulations en régime transitoire ont été réalisées sur la période de 1995 à 2005. La comparaison des chroniques calculées et mesurées est présentée pour chaque aquifère (Annexe 5). L'exemple présenté en Figure 38 illustre le format de restitution des données avec en bleu les mesures brutes observées, en vert la moyenne annuelle des niveaux piézométriques observés et en rouge les niveaux calculés par le modèle au droit du piézomètre.

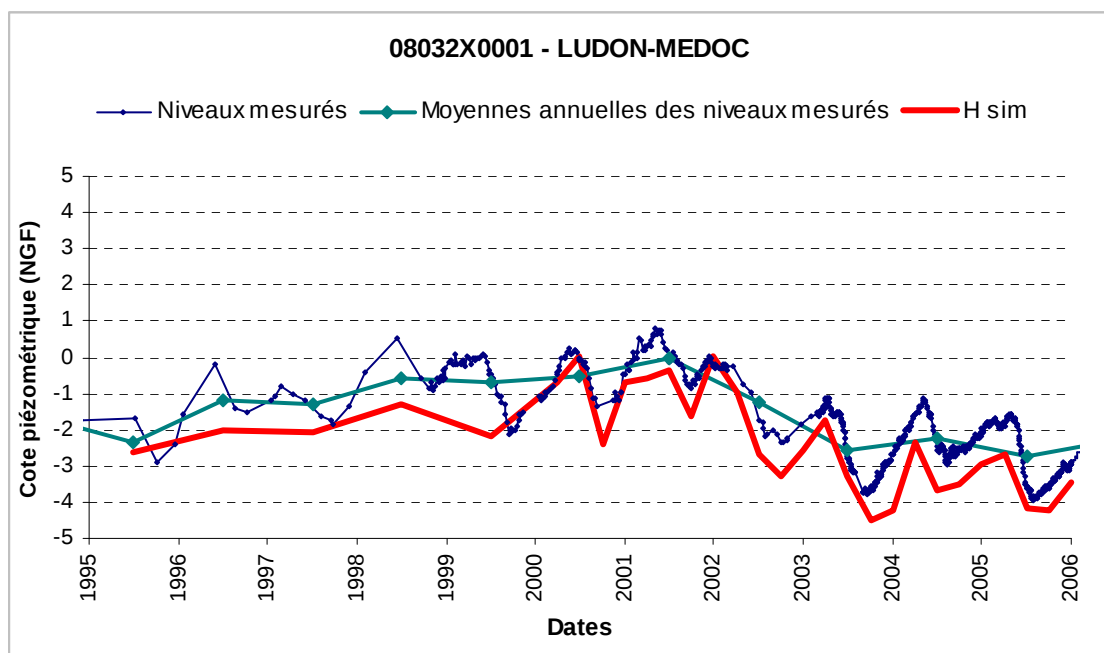


Figure 38 : Comparaison entre les niveaux observés et simulés

L'ajustement apparaît visuellement satisfaisant sur la plus grande partie des chroniques de calage pour les 3 nappes considérées (Annexe 5). La plupart des chroniques sont reproduites convenablement en termes de niveaux et d'amplitudes de variation.

Seules quelques chroniques retracent l'évolution de la piézométrie dans les réservoirs de l'Éocène moyen calcaire EMC1 et EMC2 (Figure 39).

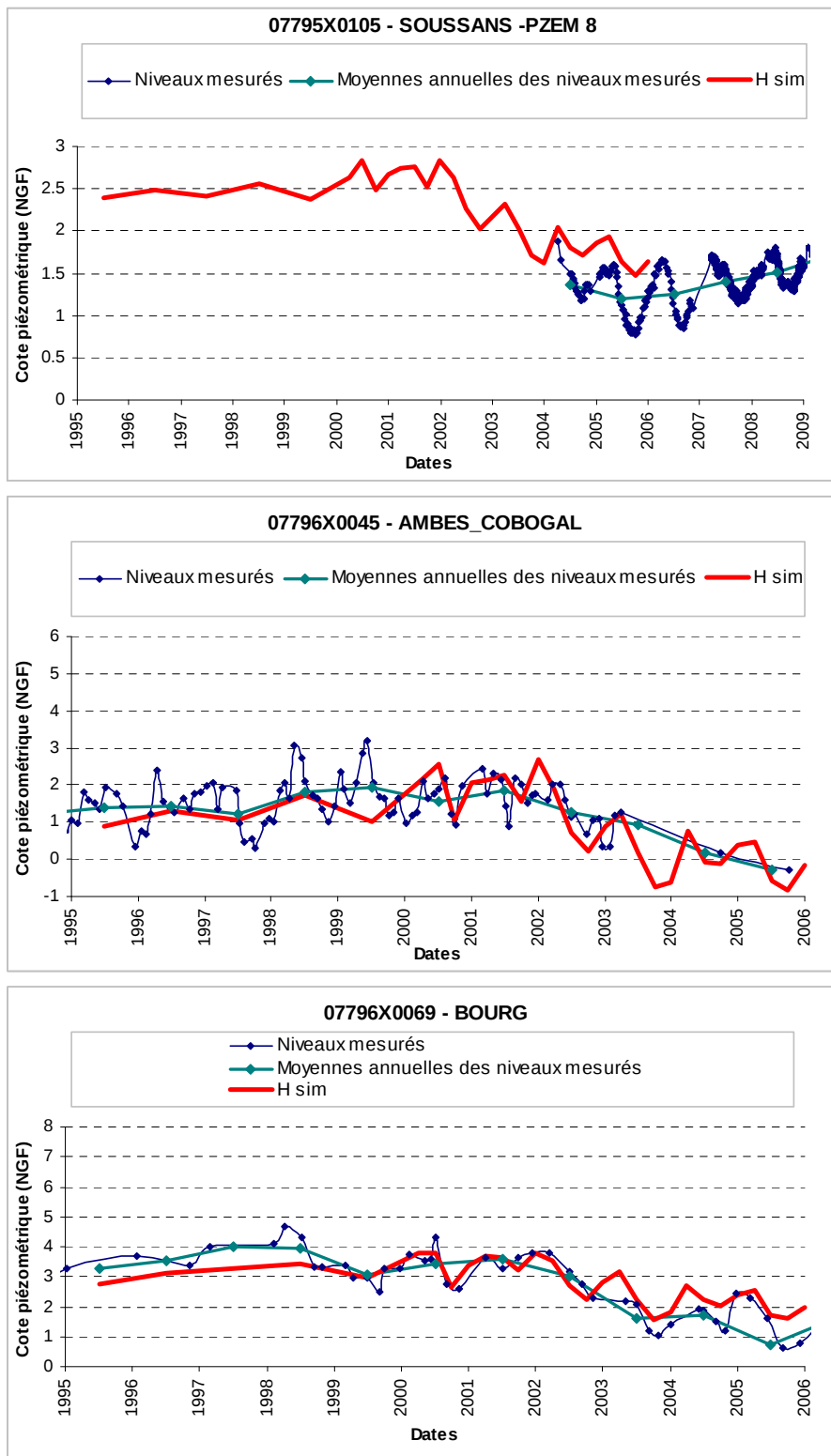


Figure 39 : Chroniques piézométriques dans le réservoir de l'Eocène moyen calcaire

Ces chroniques montrent un calage satisfaisant des charges simulées au pas de temps annuel comme au pas de temps trimestriel.

L'aquifère détritique de l'Éocène moyen est caractérisé par un plus grand nombre de points d'observation. Lors du calage, une attention particulière a été apportée à la bonne restitution des charges dans le secteur de la crête (Figure 40).

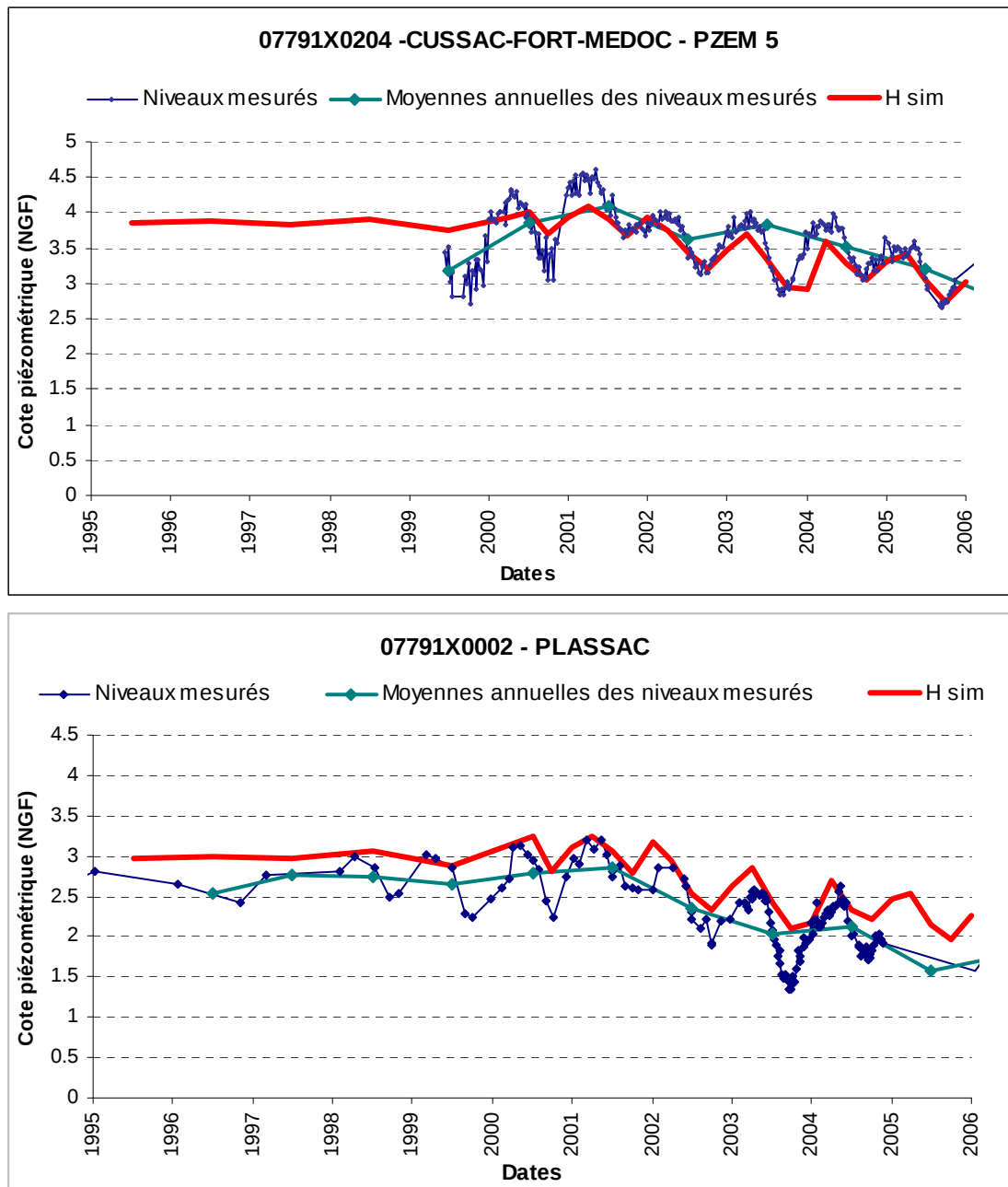


Figure 40 : Charges simulées sur le secteur de la crête dans le réservoir de l'Éocène moyen détritique

Le creux piézométrique généré par les prélèvements effectués au droit de l'agglomération bordelaise est restituée dans le modèle par l'intermédiaire des potentiels imposés. Ces derniers influencent de manière importante l'évolution de la piézométrie dans ce secteur et participent grandement à la bonne restitution des charges dans ce secteur (Figure 41).

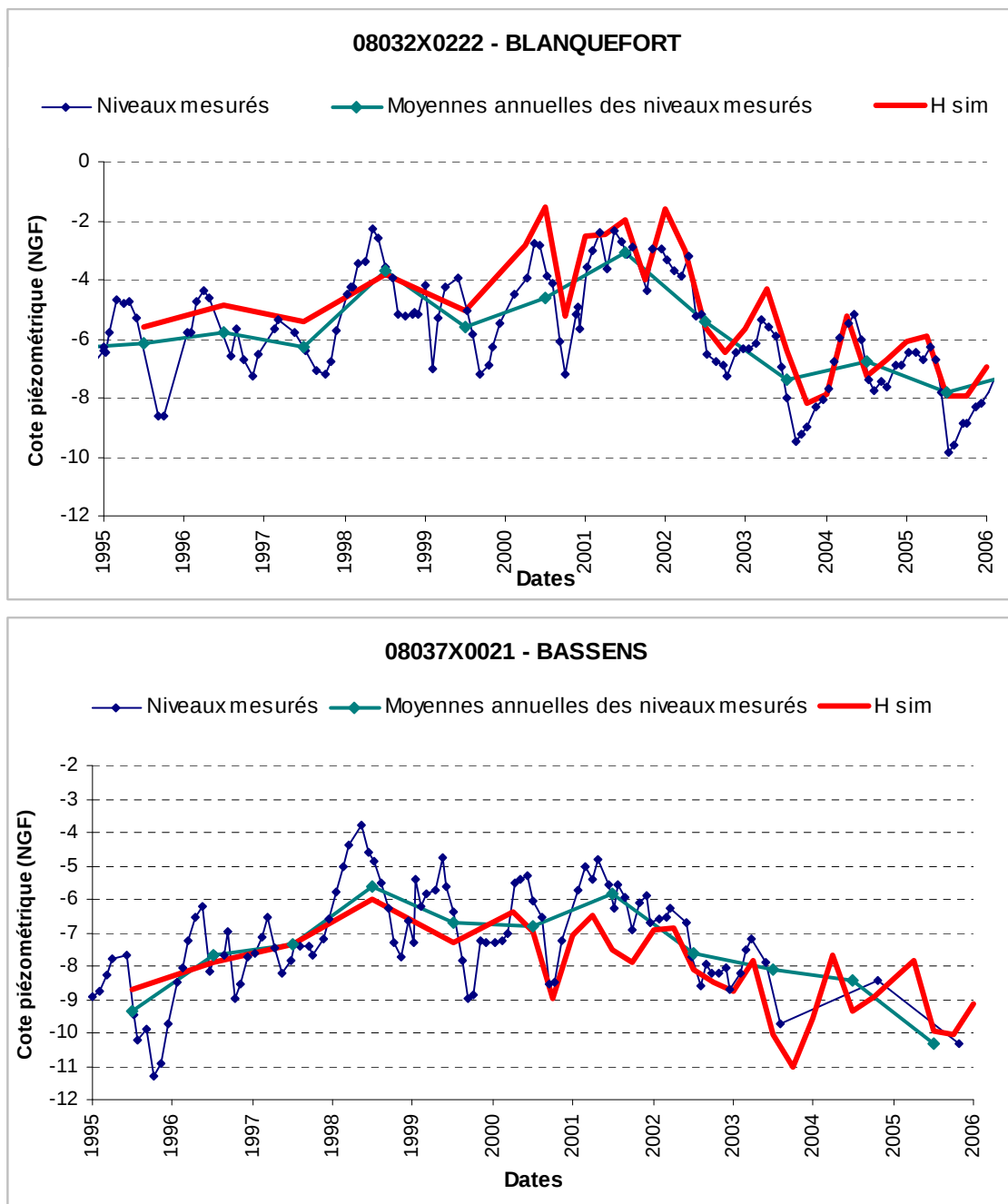


Figure 41 : Charges simulées au nord de la dépression bordelaise dans le réservoir de l'Eocène moyen détritique

4.3.3. Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité réalisée ici s'inscrit dans une logique de compréhension du comportement du modèle vis-à-vis des différents paramètres testés. Son but n'est pas de tester la robustesse du modèle. Elle consiste à faire varier un paramètre, toute chose étant égale par ailleurs, et à observer les conséquences sur les résultats de la simulation. Ainsi, les tests ont porté sur les débits de pompages, les conditions aux limites et la recharge appliquée sur les zones affleurantes.

L'objectif étant de comprendre la persistance de la crête piézométrique, les effets engendrés par la variation des paramètres sur la piézométrie simulée dans la couche EMDT (la plus stratégique du point de vue de l'Alimentation en Eau Potable) ont été analysés suivant un transect sud-est-nord-ouest (Figure 42). En effet, cette configuration permet de caractériser précisément l'allure et la piézométrie de la crête.

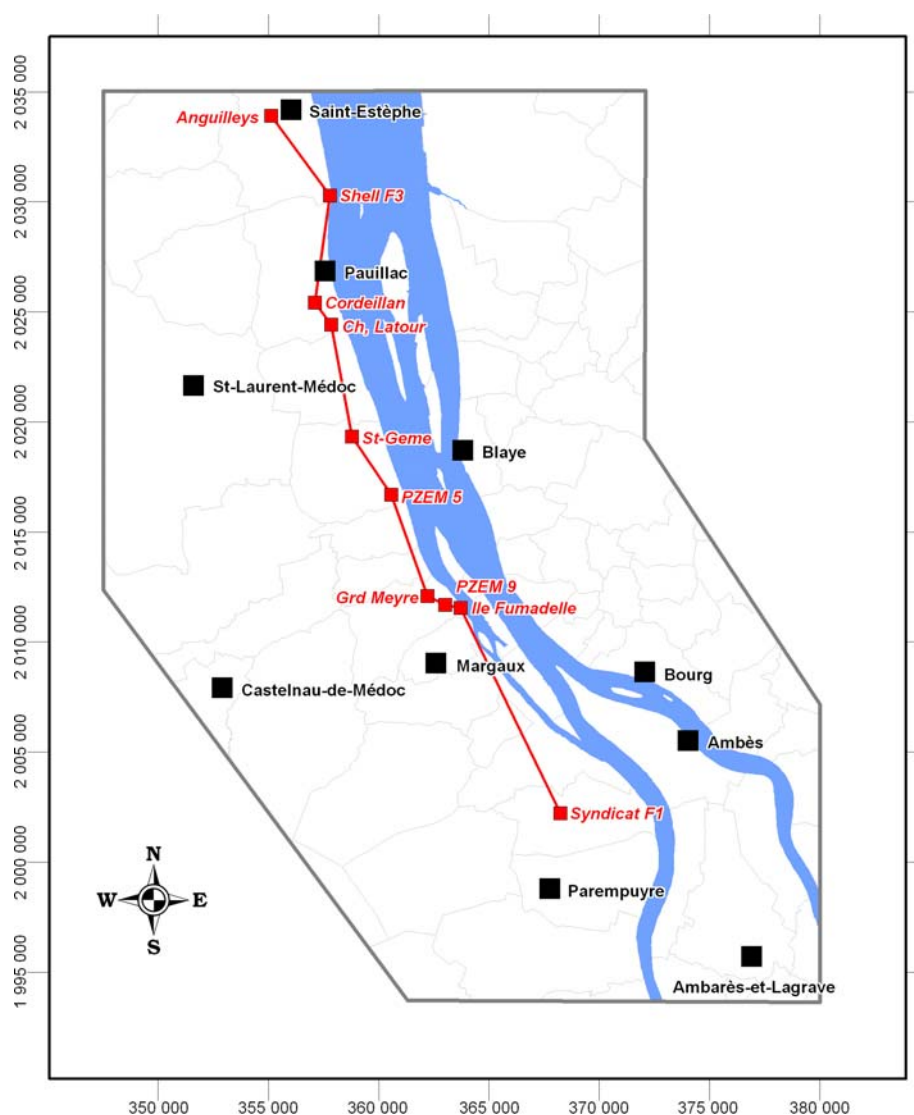


Figure 42 : Représentation du transect sud-est-nord-ouest dans la nappe de l'Eocène moyen
 Détritique

Les forages retenus pour l'analyse de sensibilité sont énumérés dans le tableau suivant (Tableau 13).

Numéro BSS	Commune	Nom	X (Lambert II)	Y (Lambert II)	Nappe captée	Distance au forage de Ludon (m)
07548X0005	Saint-Estephe	Anguilley	355119	2033902	EMDT	34281
07548X0010	Saint-Estephe	Shell F3	357783	2030296	EMDT	29950
07548X0117	Pauillac	Cordeillan	357114	2025427	EMDT	25725
07784X0048	Pauillac	Ch, Latour	357853	2024415	EMDT	24495
07784X0032	Cussac	St-Geme	358784	2019332	EMDT	19541
07791x0204	Cussac	PZEM 5	360580	2016688	EMDT	16361
07795X0012	Soussans	Grd Meyre	362202	2012094	EMDT	11564
07795X0106	Soussans	PZEM 9	363022	2011683	EMDT	10796
07795X0007	Soussans	Ile Fumadelle	363712	2011551	EMDT	10362
08032X0001	Ludon	Syndicat F1	368237	2002230	EMDT	0

Tableau 13 : Ouvrages sélectionnés pour l'analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité est réalisée à partir d'une simulation de référence (modèle calé). L'importance de la sensibilité du modèle à tel ou tel paramètre est évaluée en modifiant les variables considérées sur la période de 2000 à 2005. Les moyennes des charges simulées aux pas de temps trimestriels sont ensuite utilisées pour observer les éventuels écarts entre les différentes simulations.

a- Débit de pompage

Une variation de débits de pompage est appliquée de manière uniforme sur les forages captant les trois réservoirs de l'aquifère Eocène moyen dans l'emprise du modèle local. L'ensemble des débits est doublé pour la première simulation puis divisé par deux pour la seconde.

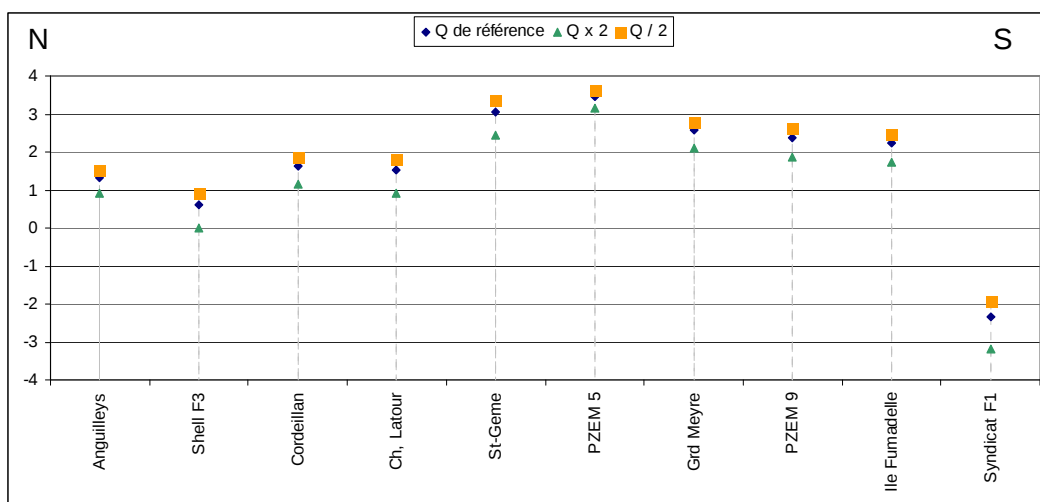


Figure 43 : Distribution de la piézométrie simulée sur un transect sud-est-nord-ouest en fonction de la variation des débits de pompage

La distribution de la piézométrie en fonction de la variation des débits de pompage montre qu'un accroissement des prélèvements dans l'ensemble des forages entraîne une baisse globale des niveaux piézométriques (Figure 43). Néanmoins, l'accroissement des prélèvements sur la zone d'étude n'a aucune conséquence sur la structure même de la crête. Il apparaît également que la diminution de la charge est plus modérée sur l'axe de la crête (PZEM 5 - Cussac) par rapport aux autres points d'observation. Toutefois, le niveau d'exploitation de la nappe dans le secteur pouvant être considéré comme faible, il est normal de constater un impact modéré de l'augmentation des prélèvements.

Dans cette même logique, la diminution des débits ne semble induire qu'une faible élévation du niveau piézométrique. Les différences observées sont deux fois moins importantes par rapport à celles constatées pour l'augmentation des prélèvements.

b- Charges imposées et influence de la dépression bordelaise

Le test réalisé ici, vise à restituer l'impact de la dépression bordelaise sur la crête piézométrique. Pour ce faire, les potentiels imposés aux limites sud du modèle ont été soit abaissés de 2 à 4 m soit augmentés de 2 m.

La Figure 44 présente la distribution de la piézométrie en fonction de la variation des niveaux piézométriques imposés en bordure sud du modèle.

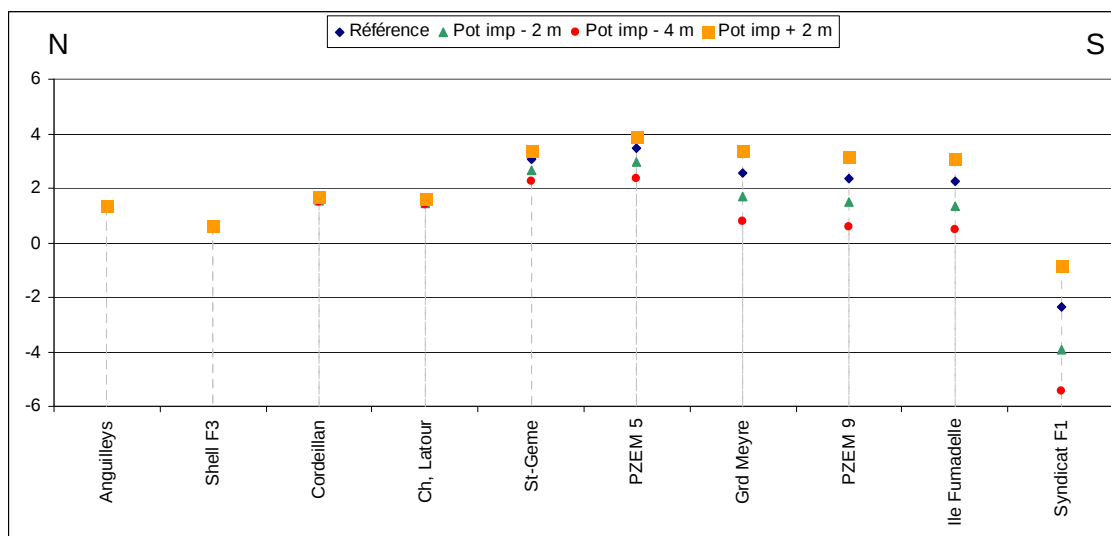


Figure 44 : Distribution de la piézométrie simulée sur un transect sud-est-nord-ouest en fonction de la variation des charges imposées en bordure sud du modèle

Les limites nord du modèle, correspondant à des flux imposés, il est normal de voir s'atténuer dans cette direction l'influence des variations appliquées plus au sud. Néanmoins, ces résultats montrent la forte sensibilité du modèle à ce paramètre qui influence grandement la valeur des charges restituées.

A noter cependant que malgré les variations appliquées, la structure de la crête semble persister. Toutefois plus les valeurs des potentiels sont abaissées et plus la position de la crête semble se déplacer vers le nord.

c- Recharge des aquifères

Les variations appliquées à la recharge pour ce test ont été réalisées en multipliant puis en divisant la recharge initiale par 2 (Figure 45).

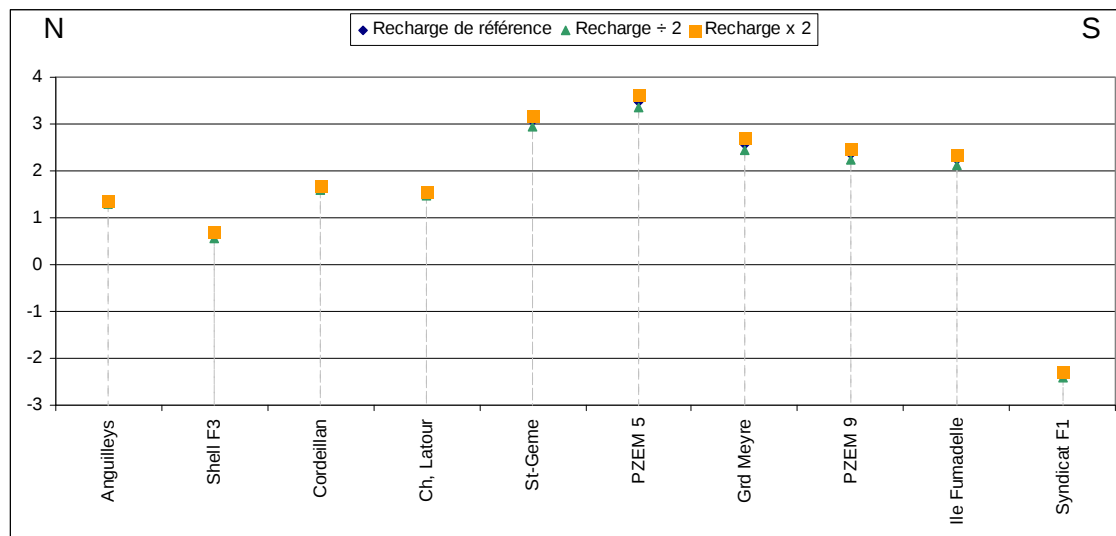


Figure 45 : Distribution de la piézométrie simulée sur un transect sud-est-nord-ouest en fonction de la variation de la recharge des aquifères

La recharge du système aquifère a une influence négligeable sur la distribution des niveaux piézométriques le long du transect sud-est-nord-ouest dans la nappe de l'Eocène moyen Détritique.

Ce phénomène peut s'expliquer par la faible extension des affleurements de l'Eocène moyen détritique considérée dans le modèle.

L'ensemble des formations pouvant participer à la recharge du réservoir n'étant pas intégré dans le modèle, ce sont les flux imposés définis aux limites qui servent à représenter les apports dans ce secteur. Ces flux sont déduits de cartes piézométriques (transformation de potentiels imposés en flux imposés) qui ne constituent pas des références absolues (faute de piézomètres suffisants dans ces secteurs) et sont maintenus constants à chaque pas de temps (ce qui constitue une approximation). Ce mode de représentation des écoulements n'est donc pas tout à fait satisfaisant car il ne permet pas la prise en compte directe de la globalité des facteurs régissant la recharge du réservoir considéré. Un modèle plus régional de type MONA permettrait de considérer l'ensemble de ces éléments.

4.3.4. Conclusions sur la modélisation

La première phase de la modélisation avait abouti en 2006 à l'élaboration d'un modèle hydrogéologique détaillé de ce secteur à fort enjeu (discrétisation à la maille de 200 m et prise en compte des trois réservoirs de l'Eocène moyen) et d'ébaucher le travail de modélisation par un calage en régime permanent satisfaisant.

Les résultats issus de ces travaux semblaient accréditer l'hypothèse selon laquelle la persistance de la crête piézométrique serait liée au contexte structural (Anticlinal de Blaye-Listrac, zones d'affleurement de l'Eocène moyen). Néanmoins, les données spatio-temporelles peuvent influencer de façon importante cette structure piézométrique. L'augmentation des prélèvements et la diminution des charges dans la zone bordelaise sont susceptibles d'abaisser le niveau piézométrique de la crête sous la cote moyenne du plan d'eau dans l'estuaire et de provoquer son déplacement vers le nord.

Le calage du modèle en régime transitoire (sur la période 1995 à 2005) et la prise en compte plus fine des conditions aux limites du modèle local avaient pour objectif de valider ou d'infirmer les premiers éléments mis en évidence préalablement.

La restitution des charges simulées par rapport aux charges modélisées montre un calage satisfaisant avec une bonne restitution des amplitudes au pas de temps trimestriel.

En régime transitoire les analyses de sensibilité ont porté sur trois paramètres : la recharge, les débits pompés et les conditions aux limites.

Le modèle en régime transitoire semble peu sensible aux variations appliquées à **la recharge**. Ceci peut s'expliquer par le fait que la totalité des affleurements participant effectivement à la réalimentation des réservoirs de l'Eocène moyen ne sont pas représentés dans le modèle. Les flux imposés définis aux limites servent à retranscrire de façon schématique les apports dans ce secteur. Cette configuration n'est pas idéale car la recharge du réservoir des nappes n'est pas intégrée directement. Par ailleurs, il faut garder à l'esprit que plusieurs facteurs sont susceptibles d'influencer la sensibilité du modèle vis à vis de la recharge. Ainsi, la perméabilité du lit de la Gironde qui va conditionner les échanges entre l'estuaire et les formations sous-jacentes, peut modifier le comportement des piézomètres d'observations situés en rive gauche vis-à-vis des variations appliquées à la recharge.

L'accroissement des prélèvements effectués dans les forages de la zone d'étude induit une baisse générale des niveaux piézométriques qui reste modérée compte tenu du niveau de prélèvements peu important sur la zone même de la crête. Les contraintes appliquées (prélèvements x 2) ne semblent pas affecter la structure même de la crête. En outre, la diminution de la charge s'avère plus modérée sur son axe (PZEM 5 - Cussac) qu'au droit des autres points d'observation.

L'abaissement des potentiels imposés au sud, traduisant l'influence de la dépression bordelaise, affecte fortement les charges du modèle dans sa partie méridionale. Malgré les variations appliquées, la structure de la crête semble persister.

Cependant plus les valeurs des potentiels sont abaissées et plus la position de la crête tend à se déplacer vers le nord. A noter que la constance des flux imposés sur les limites nord du modèle contribue à limiter l'influence des charges imposées au sud dans ce secteur.

Pour mémoire, les projections réalisées à l'aide de **MONA** pour appuyer la définition des volumes prélevables dans les grandes nappes captives du nord du Bassin aquitain (Gomez et al., 2010), ont permis de confronter différents scénarii de recharge et d'évolution des prélèvements et de mesurer l'impact de leur évolution sur les nappes du système aquifère Nord-Aquitain à l'horizon 2050. Le scénario le plus défavorable combinant une évolution de la recharge basée sur les travaux du GIEC (diminution de plus de 50 % de la recharge par rapport à l'actuel) et une hausse des prélèvements établie à partir des projections d'augmentation de la population fournies par l'INSEE (augmentation de 38% des prélèvements dans la nappe de l'Éocène moyen) se traduit par une baisse généralisée des niveaux piézométriques. Dans le secteur de l'Estuaire de la Gironde, les baisses observées impactent fortement la structure de la crête (près de 4 m de baisse entre 2007 et 2025). Tout en considérant toutes les incertitudes et les limites qui la caractérisent (cf. Rapport BRGM/RP-57878-FR), cette simulation, montre que la combinaison de facteurs défavorables mentionnés plus haut (augmentation de la sollicitation du réservoir éocène par rapport à l'actuel et accumulation d'années caractérisées par une recharge faible) pourrait compromettre à moyen terme la persistance de la crête piézométrique.

En substance, la construction du modèle et les différents tests réalisés ont confirmé que l'existence de la crête piézométrique avait pour origine le contexte structural de la zone d'étude, à savoir l'anticlinal de Blaye-Listrac et les zones d'affleurement de l'Eocène moyen. Elle constitue une barrière hydraulique contre les entrées d'eau saumâtre depuis les zones d'affleurements sous-aquatiques dans l'estuaire tant que son niveau piézométrique demeure supérieur à la cote de la Gironde. Plusieurs variables sont néanmoins susceptibles d'abaisser ce niveau, à savoir les prélèvements existant dans ce secteur dans les formations de l'Éocène moyen ainsi que l'importance de la dépression sous l'agglomération bordelaise.

La définition fine de la géométrie des réservoirs (au pas de 200 m) constitue une réelle plus-value qui a grandement contribué à une meilleure compréhension des différents facteurs à l'origine de la persistance de la crête piézométrique. Il faut néanmoins garder à l'esprit les limites du modèle local. En effet, des incertitudes persistent sur les paramètres hydrodynamiques de différents horizons (épontes du multicouche de l'Éocène moyen, argiles du Flandrien,...). Des paramètres tels que la perméabilité de colmatage du lit de la Gironde ne sont pas connus avec exactitude et peuvent influencer directement l'importance des flux d'échange nappes/rivières. Par ailleurs, si le réservoir de l'Éocène moyen détritique est bien connu car décrit dans de nombreux forages, les informations concernant l'Éocène moyen calcaire sont moins abondantes.

Enfin, les analyses de sensibilité ont montré le rôle prépondérant qu'ont les prélèvements de l'agglomération bordelaise (représenté par les potentiels imposés) sur la distribution des charges dans des secteurs plus éloignés comme celui de l'estuaire de la Gironde. Il apparaît donc que le modèle construit pour étudier une problématique locale (maintien de la crête piézométrique) n'est pas suffisamment étendu pour englober les différents facteurs affectant directement le phénomène étudié.

Un modèle plus régional comme MONA, malgré ces limitations actuelles (mailles de 2 km de côté, définition d'un seul réservoir pour l'Éocène moyen,...), est suffisamment vaste pour intégrer les différents paramètres liés à la problématique qui nous intéresse. Il pourrait donc être utilisé, en première approche, pour mesurer l'impact des prélèvements dans la nappe de l'Éocène sur l'évolution de la crête piézométrique. Les éléments récents de compréhension issus du modèle local devront permettre d'améliorer le modèle régional pour accroître davantage sa représentativité dans ce secteur à enjeu.

5. Conclusions

La caractérisation géologique et hydrogéologique de la zone élargie de la "crête piézométrique" de l'Éocène moyen au sud de l'Estuaire de la Gironde s'intègre dans le programme de *Gestion des nappes d'eaux souterraines de la Région Aquitaine* qui se poursuit depuis 1996, dont elle en constitue le module 2.

Le présent rapport rend compte des résultats de la dernière année du programme d'étude qui était consacré à la poursuite de la surveillance de la qualité des eaux et des niveaux dans les différents secteurs et à la finalisation de la construction du modèle hydrodynamique. Une simplification du programme de surveillance hydrochimique, proposée l'année précédente a été mise en œuvre, compte tenu des évolutions constatées depuis le début des études et en fonction des enjeux et risques des différents secteurs.

5.1. CONSTITUTION DU RÉSEAU *PZEM* DE SURVEILLANCE

Commencée en 1997 pour constater les différences et l'évolution des caractéristiques hydrogéologiques et hydrochimiques entre les nappes des réservoirs grés-sableux et calcaires, la réalisation de **14 piézomètres - qualitomètres** (en doublet ou isolé) du réseau *PZEM* a été terminée sur **11 sites**. Ils se répartissent sur la rive médocaine de l'estuaire de la Gironde (du nord au sud : Jau-Dignac, Saint-Christoly, Saint-Yzans et Saint-Estèphe) et sur la zone élargie des crêtes piézométriques, régulièrement répartis en rive gauche (Beychevelle nord et sud, Cussac, Arcins et Soussans) et en rive droite (Plassac et Saint-Genès-de-Blaye). Tous les sites sont maintenant équipés d'enregistreurs numériques de pression.

Ce dispositif de surveillance est **complété par 3 sites** :

- d'une part sur la zone de crête elle-même par le piézomètre de l'île Nouvelle récemment exécuté par le Port Autonome de Bordeaux pour surveiller les éventuels effets des travaux de déroctage des calcaires de l'Éocène moyen au fond de la passe de Cussac,
- d'autre part au sud, dans le secteur entre la crête et la dépression piézométrique bordelaise, par l'ancien forage communal de Ludon-Médoc (08032X0001/F1) et par un forage de la centrale thermique de la presqu'île d'Ambès (07796X0025/F), afin d'évaluer les effets de la mise en service du réseau d'eau industrielle superficielle en substitution à l'exploitation des nappes de l'Éocène moyen.

5.2. ÉVOLUTIONS PIÉZOMÉTRIQUES

Pendant cette phase d'étude, la surveillance des pressions dans l'Éocène moyen s'est poursuivie sur toute la rive médocaine et autour de la zone de "crête".

Avec des chroniques suffisamment longues, plus de 10 ans pour certaines, on constate qu'après une tendance générale à une légère baisse des pressions des nappes éocènes presque partout entre 2000 et 2005, les niveaux remontent nettement en 2006 et 2007, sauf dans le secteur le plus au nord du Médoc (Jau-Dignac et Saint-

Christoly) où la baisse se poursuit. Cette élévation est surtout bien nette en rive droite de l'estuaire, où le niveau de la nappe des grès s'est élevé de 50 cm depuis 2004 et celui de la nappe des calcaires de 75 cm.

Il est bien confirmé que **les aquifères inférieur grés-sableux et supérieur calcaire ne présentent pas la même pression sur la zone élargie de "crête piézométrique"** (cf. Fig. 30 du rapport RP-53657-FR), la sous-pression de la nappe des calcaires étant souvent supérieure à 0,1 bar et parfois à 0,2 bar. Cet axe hydraulique est **en étroite relation avec la présence de l'anticlinal de Blaye-Listrac**, qui fait affleurer les calcaires et les grès éocènes autour de Blaye, par lesquels se fait la **recharge hydraulique** des deux aquifères, **participant ainsi au maintien des hautes pressions**.

Compte tenu des coûts de réalisation et d'équipement de l'ensemble des piézomètres et de l'intérêt du suivi au regard des enjeux, **il est fortement souhaitable de maintenir la surveillance piézométrique sur la plupart des ouvrages**, notamment dans la zone de la crête hydraulique, dans le cadre du réseau départemental de suivi de la quantité et de la qualité des nappes d'eaux souterraines de la Gironde (convention CG 33 – BRGM), comme indiqué dans le tableau 10 du rapport de l'année 4 (BRGM/RP-56418-FR). Cette recommandation a déjà été faite dans le rapport de suivi départemental de l'année 2006 (BRGM/RP-55893-FR). Les piézomètres PZEM 1 à 5 font d'ailleurs partie de ce réseau depuis plusieurs années.

5.3. ÉVOLUTIONS HYDROCHIMIQUES

Pendant les dix ans de **surveillance régulière de la qualité** (2000 à 2009), la salinité dans les différents niveaux de la nappe de l'Éocène moyen a montré des variations différentes. Dans le secteur nord-oriental du Médoc, il est de plus en plus confirmé une **tendance générale à la salinisation progressive** de tous les réservoirs de l'Éocène près de Jau-Dignac-Loirac, l'augmentation de la teneur en NaCl étant **de l'ordre de 3 g/l entre 2000 et 2004** (Fig. 19). En 2006 une certaine stabilisation de la salinité est cependant apparue avec une teneur de NaCl autour de **4,6 g/l**, et elle semble pour l'instant perdurer.

Dans le secteur du synclinal de Pauillac, une tendance à la baisse de la salinité, déjà très faible des eaux à faciès bicarbonaté-calcique, avait été progressivement constatée, mais la tendance s'inverserait actuellement, avec 62 mg/l à Saint-Estèphe.

Dans le secteur de la "crête" piézométrique élargie, les eaux à faciès bicarbonaté-calcique du réservoir profond sont partout très douces (20 à 52 mg/l de NaCl).

Pour l'aquifère des réservoirs calcaires, tous les secteurs renferment des eaux à faciès bicarbonaté-calcique dont les teneurs, très basses, sont comprises entre 28 mg/l et 80 mg/l. Le seul secteur qui présente toujours une faible salinisation de la nappe des calcaires tant en Médoc qu'en Blayais, est celui de Cussac surveillé par le piézomètre PZEM 6 à Fort-Médoc. Jusqu'en 2004, elle était constante autour de 270 mg/l de NaCl, Cependant la légère baisse de la teneur en sel amorcée en 2005 (atteignant moins de 200 mg/l) ne semble pas se maintenir puisqu'une teneur à 336 mg/l a été constatée en 2009.

Cette plus forte salinité s'explique par la situation de Cussac au sommet de la structure anticlinale, la formation karstifiée de l'Éocène moyen étant en relation directe avec les alluvions sous-flandriennes légèrement saumâtres ; à l'inverse, les sites de Beychevelle et de Soussans, assez proches, ont des eaux douces à cause de la protection de ce même aquifère par la couverture des marnes de l'Éocène supérieur.

Cependant, dans ce dernier site au sud de la crête, la concentration en NaCl est actuellement de 72 mg/l, en augmentation depuis mars 2006, puis stabilisée en octobre 2008. Il n'y a actuellement pas d'explication à cette augmentation progressive, qui peut n'être que passagère mais qu'il est nécessaire de surveiller.

5.4. MODÉLISATION HYDRODYNAMIQUE

Cette modélisation est destinée à mieux comprendre les facteurs à l'origine de la persistance de la crête piézométrique de l'Eocène moyen dans le secteur de l'estuaire de la Gironde et fait suite au travail réalisé en régime permanent (Platel et al., 2006 - BRGM/RP 55240-FR). Le calage du modèle en régime transitoire et la prise en compte plus fine des conditions aux limites du modèle local ont pour objectif de valider ou d'infirmer les premiers éléments mis en évidence préalablement.

Le modèle élaboré en régime transitoire au pas de temps annuel de 1995 à 1999 et au pas de temps trimestriel de 2000 à 2005, a permis de préciser le champ des perméabilités et de définir les coefficients d'emmagasinement.

La restitution des charges simulées par rapport aux charges modélisées montre un calage satisfaisant avec une bonne restitution des amplitudes au pas de temps trimestriel.

Les analyses de sensibilité effectuées en régime transitoire sont venues confirmer les conclusions de l'analyse établie en régime permanent. Les tests réalisés dans cette phase de la modélisation concernent trois paramètres : la recharge, les débits pompés et les conditions aux limites.

La sensibilité du modèle à la recharge semble limitée. Ceci peut s'expliquer par le fait que la totalité des affleurements participant effectivement à la recharge des réservoirs de l'Éocène moyen ne sont pas représentés dans le modèle. Pour compenser cet état de fait, le modèle est contraint dans ce secteur par des flux imposés. Ceci ne permet pas une prise en compte directe de la globalité des facteurs régissant la recharge de la nappe de l'Éocène moyen détritique. Un modèle plus global serait mieux adapté pour considérer l'ensemble de ces éléments

L'augmentation simulée des débits dans les forages présents sur le modèle a induit, comme c'était déjà le cas dans le cadre de l'analyse effectuée en régime permanent, une baisse générale des niveaux piézométriques. Cependant, l'accroissement des prélèvements n'a aucune conséquence sur la structure même de la crête. En outre, la diminution de la charge s'avère plus modérée sur l'axe de la crête (PZEM 5 - Cussac) par rapport aux autres points d'observation.

L'abaissement des potentiels imposés au sud, qui traduit l'influence de la dépression bordelaise, affecte fortement les charges du modèle dans sa partie méridionale. Malgré les variations appliquées, la structure de la crête semble persister en dépit de la diminution des charges. Cependant plus les valeurs des potentiels sont abaissées et plus la position de la crête tend à se déplacer vers le nord.

En substance, la construction du modèle et les différents tests réalisés ont confirmé que l'existence de la crête piézométrique avait pour origine le contexte structural de la zone d'étude, à savoir l'anticlinal de Blaye-Listrac et les zones d'affleurement de l'Eocène moyen.

La crête piézométrique constitue une barrière hydraulique contre les entrées d'eau saumâtre depuis les zones d'affleurements sous-aquatiques dans l'estuaire à partir du moment où son niveau piézométrique demeure supérieur à la cote de la Gironde. Plusieurs variables sont néanmoins susceptibles d'abaisser ce niveau, à savoir les prélèvements existant dans ce secteur dans les formations de l'Eocène moyen ainsi que l'importance de la dépression sous l'agglomération bordelaise.

Ce dernier paramètre a montré le rôle prépondérant qu'ont les prélèvements de l'agglomération bordelaise sur la distribution des charges dans des secteurs plus éloignés comme celui de l'estuaire de la Gironde.

Il apparaît donc, en dépit des apports sur la compréhension des phénomènes hydrodynamiques sur la zone considérée que le modèle construit pour étudier une problématique locale (maintien de la crête piézométrique) n'est pas suffisamment étendu pour englober les différents facteurs affectant directement le phénomène étudié. Un modèle plus régional de type MONA, avec une prise en compte la plus fine possible de la géométrie des réservoirs sur le secteur considéré paraît plus adapté pour intégrer tous les éléments relatifs à cette problématique.

A noter que la définition de niveaux piézométriques à ne pas dépasser doit se baser préférentiellement sur les cotes de la Gironde observées sur le secteur d'intérêt. Ainsi, le traitement des données marégraphiques historiques des stations d'Ambès et de Fort-Médoc (Source : Port Autonome de Bordeaux) a permis de préciser la cote moyenne de la Gironde sur le secteur de la crête piézométrique. Les moyennes journalières sont comprises entre 0,6 et 1 m NGF selon les périodes de hautes eaux et basses eaux. Néanmoins, la marée induit une amplitude de variation beaucoup plus importante pouvant faire évoluer la cote de la Gironde entre -2 et +4 m NGF.

La révision du SAGE Nappes Profondes de Gironde, dont l'approbation est prévue pour la fin de l'année 2011, sera l'occasion d'actualiser les volumes maximum prélevables objectifs (VMPO) dans les nappes profondes visées par celui-ci. A cette occasion, le modèle Nord-Aquitain sera utilisé pour simuler et analyser l'impact de différents scénarii de prélèvements et de recharge sur l'évolution des niveaux piézométriques des grandes nappes profondes du nord du Bassin aquitain. Cette démarche plus globale pourra servir de première approche pour définir les règles de gestion visant à préserver l'intégrité de la crête piézométrique de la nappe de l'Eocène moyen.

6. Bibliographie

Commission Locale de l'Eau du SAGE Nappes profondes de la Gironde (2007) - Avis sur la compatibilité du projet d'amélioration du chenal de navigation du PAB avec les objectifs du SAGE Nappes profondes de Gironde (CR SMEGREG du 10 mai 2007 de la réunion du groupe d'experts hydrogéologues auprès de la CLE).

Corbier P., Abou-Akar A., Mazurier C. avec la collaboration de **Capéran F., Grabenstaetter L. et Fondin A.** (2008) - Contrôle qualité et gestion des nappes d'eau souterraine en Gironde. Etat des connaissances à fin 2007. *Rapport BRGM/RP-56793-FR*, 292 pages, 86 fig., 6 annexes.

Corbier P., Capdeville J.P., Pedron N., Platel J.P. et Winckel A., avec la collaboration de **Lopez B.** (2005) – SAGE Nappes profondes de la Gironde – Atlas des zones à risques. *Rapport BRGM/RP-53756-FR*, 178 pages, 82 fig., 4 annexes.

Gomez E., Pédrón N. avec la collaboration de Buscarlet E. (2010) Utilisation du Modèle Nord-Aquitain (MONA) pour appuyer la définition des volumes prélevables dans les aquifères profonds du Nord du Bassin aquitain. *BRGM/RP-57878-FR*, 41 pages, 49 figures, 3 annexes.

Larroque F. (2004). Gestion globale d'un système aquifère complexe, Application à l'ensemble aquifère multicouche médocain. Thèse de doctorat, Université Michel de Montaigne - Bordeaux 3.

Pédrón N. (2005) - Gestion des Eaux souterraines en Aquitaine - Module 4 - : Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes. Année 2. *Rapport BRGM/RP-53659-FR*, 96 p., 43 fig., 8 tab., 8 annexes

Pédrón N., Platel J.P., Bourguine B. (2006) - Gestion des Eaux souterraines en Aquitaine - Module 4 - : Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes. Année 3. *Rapport BRGM/RP-55242-FR*, 56 p., 24 fig., 3 annexes

Pédrón N., Platel J.P., Bourguine B. avec la collaboration de Loiseau J.B., (2008) - Gestion des Eaux souterraines en Aquitaine - Module 4 - : Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes. Année 4. *Rapport BRGM/RP-56614-FR*, 99 p., 49 fig., 6 annexes

Platel J.P. (2008) – Suivi piézométrique et hydrochimique de la nappe de l'Éocène au cours des travaux d'approfondissement de la Passe de Cussac (estuaire de la Gironde). Etude réalisée à partir des données du sondage PZEM 15 de l'Île Nouvelle. - *Rapport BRGM/RP-56377-FR*, 37 p., 12 fig., 1 annexe

Platel J.P., avec la collaboration de Capéran F., Grabenstaetter L. et Abou Akar A. (2008) - Gestion des Eaux souterraines en Aquitaine - Module 2 - : Caractérisation de la crête piézométrique de l'Éocène au sud de l'estuaire de la Gironde. Année 4 – Suivi du réseau de surveillance PZEM. *Rapport BRGM/RP-56418-FR*, 68 p., 21 fig., 10 tab., 1 annexe.

Platel J.P., Dubreuilh J., Bonnery H., Sourisseau B., avec la collaboration de Benhammouda S., Besse A., Lejeune F. (1997) - Gestion des Eaux souterraines en Aquitaine - Année 1- Opération sectorielle : Relations entre l'estuaire de la Gironde et la nappe de l'Éocène. Synthèse des connaissances géologiques. Etat des connaissances hydrogéologiques. *Rapport BRGM R 39328*, 118 p., 55 fig., 1 annexe, 5 planches h.t.

Platel J.P., Mauroux B., Bonnery H., Sourisseau B., avec la collaboration de Benhammouda S. et Dufour P. (1998) - Gestion des Eaux souterraines en Aquitaine - Année 2- Opération

sectorielle: Relations entre l'estuaire de la Gironde et la nappe de l'Éocène. Réalisation des piézomètres. Etat des connaissances hydrochimiques. *Rapport BRGM R 40113*, 82 p., 43 fig., 5 annexes, 4 planches h.t.

Platel J.P., Bonnery H., Chéry L., Mauroux B., Seguin J.J., Sourisseau B., avec la collaboration de Benhammouda S. et Dufour P. (1999) - Gestion des Eaux souterraines en Aquitaine - Année 3- Opération sectorielle : Relations entre l'estuaire de la Gironde et la nappe de l'Éocène. Réalisation d'un piézomètre complémentaire – Mise en place du réseau de surveillance et protocole d'actions – Synthèse des connaissances. *Rapport BRGM R 40729*, 88 p., 39 fig., 6 annexes

Platel J.P., Pédron N., Winckel A., avec la collaboration de Benhammouda S. et Dufour P. (2003) - Gestion des Eaux souterraines en Aquitaine - Module 2 - : Caractérisation de la crête piézométrique de l'Éocène au sud de l'estuaire de la Gironde. Année 1 – Connaissances géologiques et hydrogéologiques. Réalisation des premiers piézomètres. *Rapport BRGM/RP-52514-FR*, 113 p., 45 fig., 3 annexes

Platel J.P., Winckel A., Pédron N., avec la collaboration de Benhammouda S. et Dufour P. (2005) - Gestion des Eaux souterraines en Aquitaine - Module 2 - : Caractérisation de la crête piézométrique de l'Éocène au sud de l'estuaire de la Gironde. Année 2 – Extension du réseau de piézomètres en doublets – Suivi du réseau de surveillance PZEM. *Rapport BRGM/RP-53657-FR*, 111 p., 33 fig., 12 tab., 3 annexes

Platel J.P., Pédron N., Gomez E. et Winckel A., avec la collaboration de Benhammouda S. et Capéran F. (2006) - Gestion des Eaux souterraines en Aquitaine - Module 2 - : Caractérisation de la crête piézométrique de l'Éocène au sud de l'estuaire de la Gironde. Année 3 – Finalisation et suivi du réseau de surveillance PZEM. Modélisation hydrodynamique. *Rapport BRGM/RP-55240-FR*, 166 p., 37 fig., 15 tab., 6 annexes

Schnebelen N., Platel J.P., Bonnery H., Sourisseau B., avec la collaboration de Benhammouda S. et Dufour P. (2000) - Gestion des Eaux souterraines en Aquitaine – Année 4- Opération sectorielle: Relations entre l'estuaire de la Gironde et la nappe de l'Éocène. Suivi du réseau d'alerte. *Rapport BRGM/RP-50467-FR*, 56 p., 23 fig., 2 annexes

Schnebelen N., Platel J.P., Petelet-Giraud E., Dubreuilh J., avec la collaboration de Benhammouda S. et Dufour P. (2002) - Gestion des Eaux souterraines en Aquitaine - Année 5 - Opération sectorielle: Relations entre l'estuaire de la Gironde et la nappe de l'Éocène. Suivi du réseau d'alerte. *Rapport BRGM/RP-50467-FR*, 113 p., 37 fig., 3 annexe

Seguin J., Baudry D. et Platel J.P. (2002). Cartographie de la vulnérabilité des systèmes aquifères de l'Aquitaine - BRGM/RP-52042-FR. Rapport technique, BRGM.

Thiéry D. (1990). Logiciel MARTHE Modélisation d'Aquifère par maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Écoulements - R-32210. Rapport technique, BRGM.

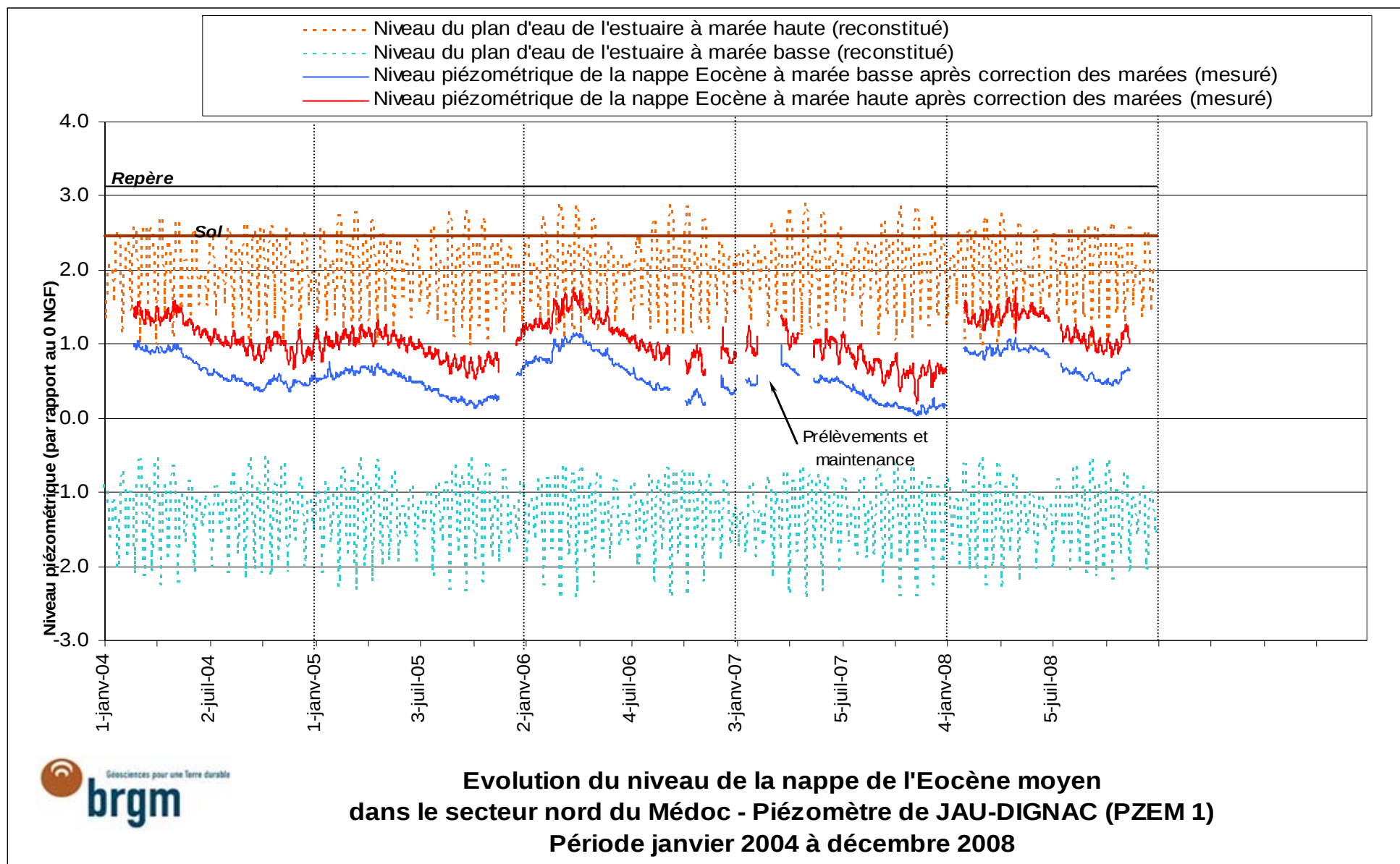
Thiéry D. (2004). Définition des coefficients d'emménagement captif dans le code MARTHE - Note technique NT EAU 2004/05. Rapport technique, BRGM.

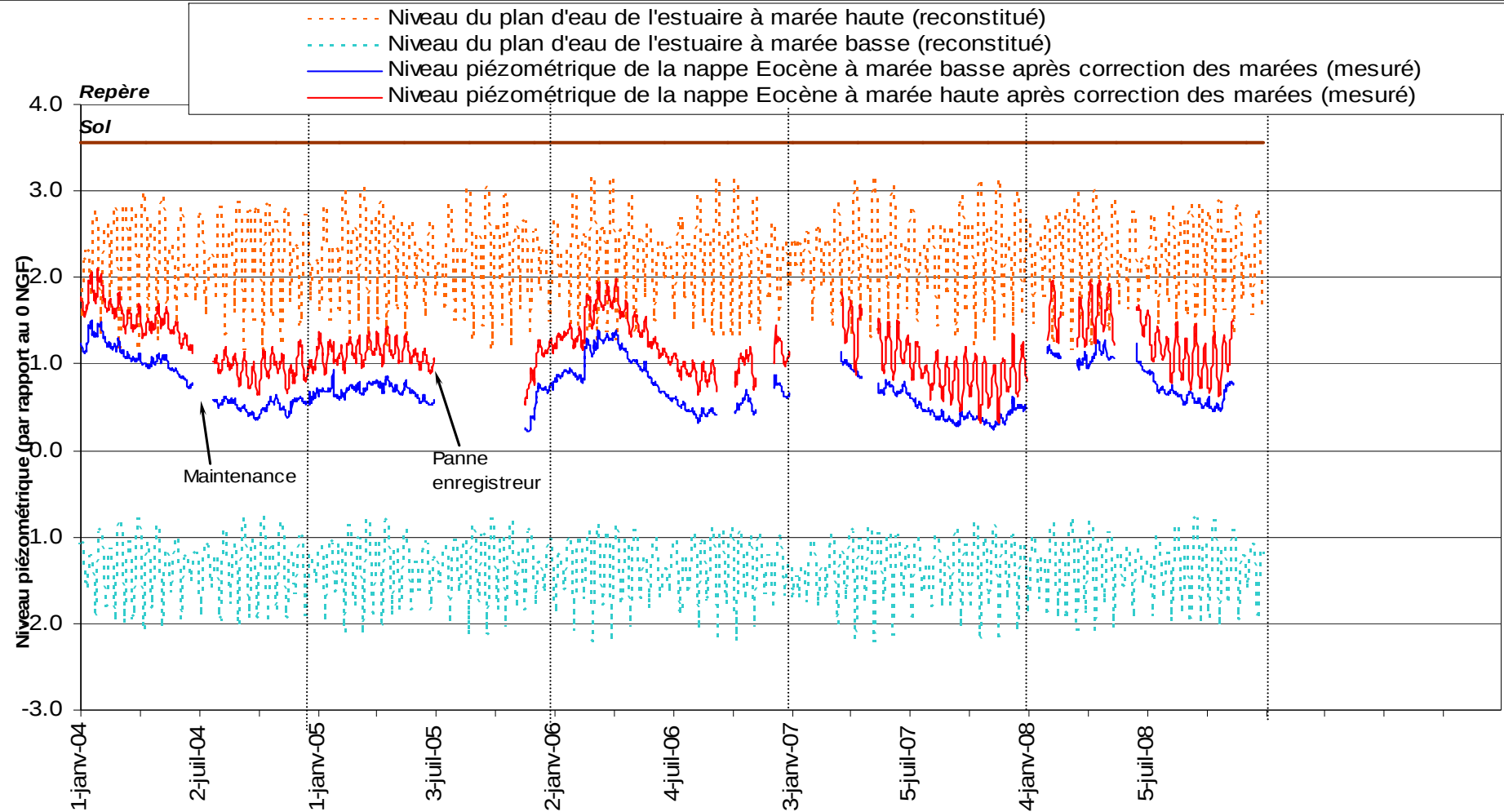
Thiéry D. (2006). Didacticiel du pré-processeur WinMarthe v4.0 - Rapport final - BRGM/RP - 54652-FR. Rapport technique, BRGM.

Annexe 1

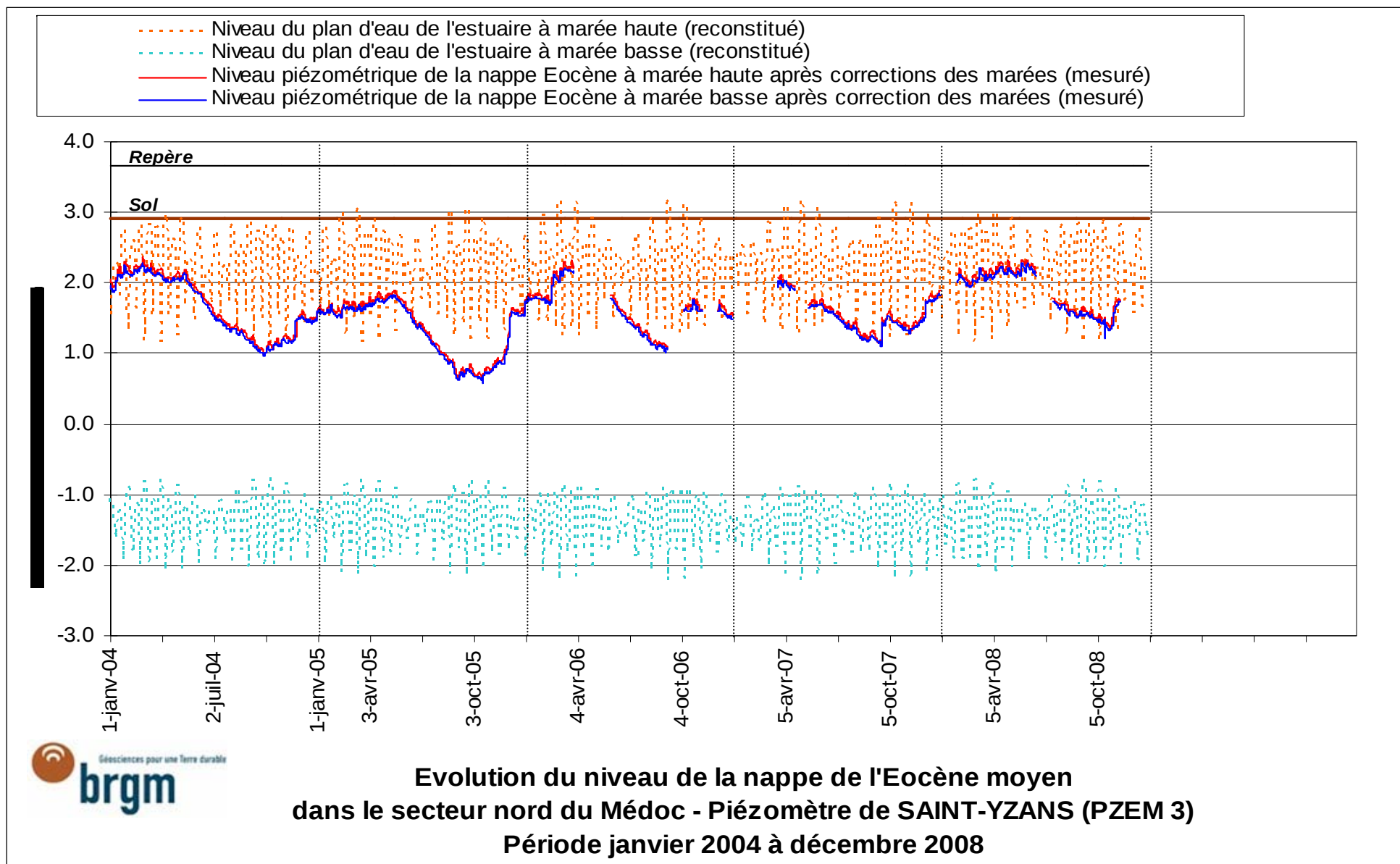
Evolutions des niveaux des nappes de l'Éocène moyen dans les piézomètres du réseau de surveillance PZEM

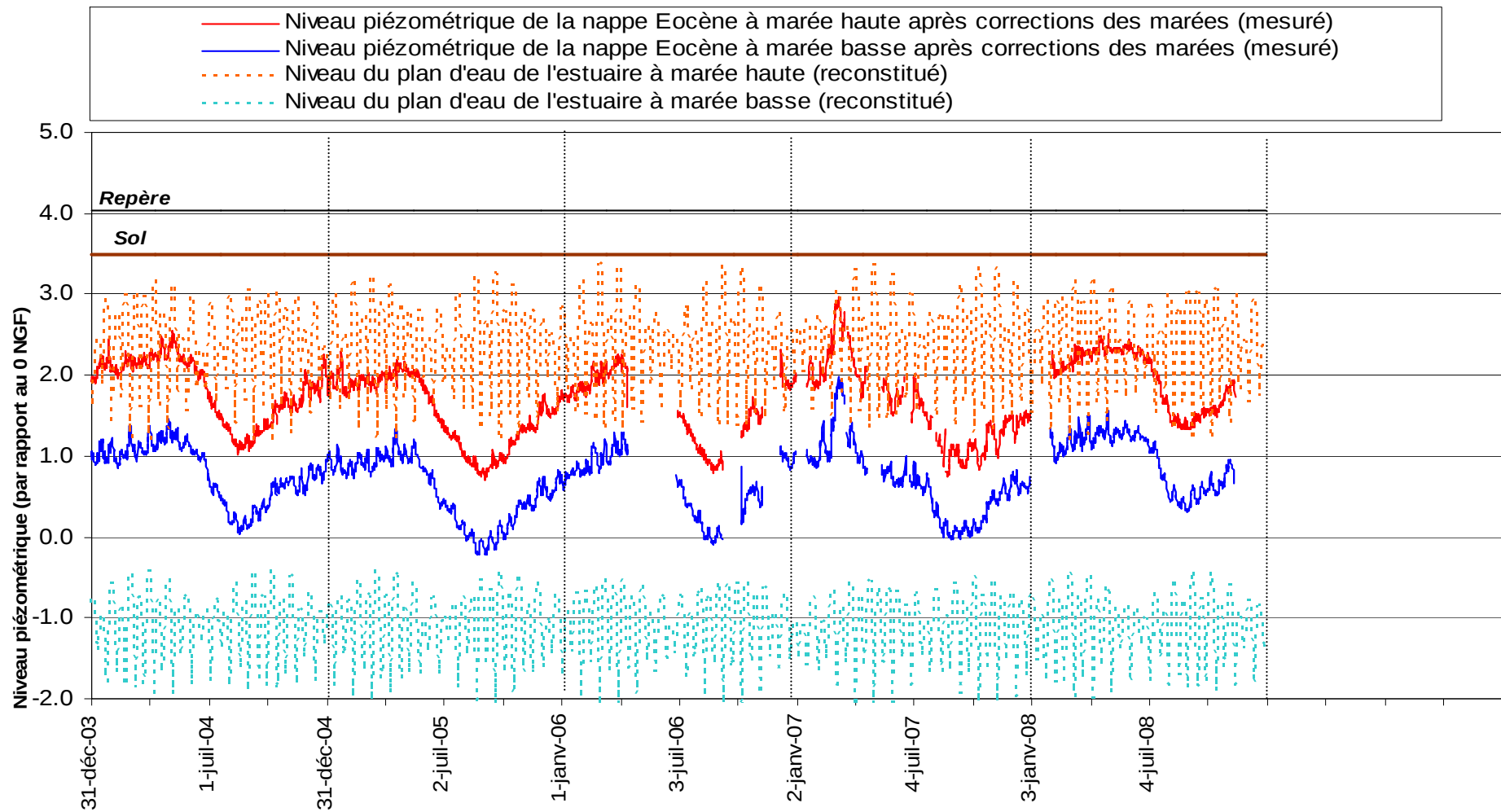
Période janvier 2004 à décembre 2007



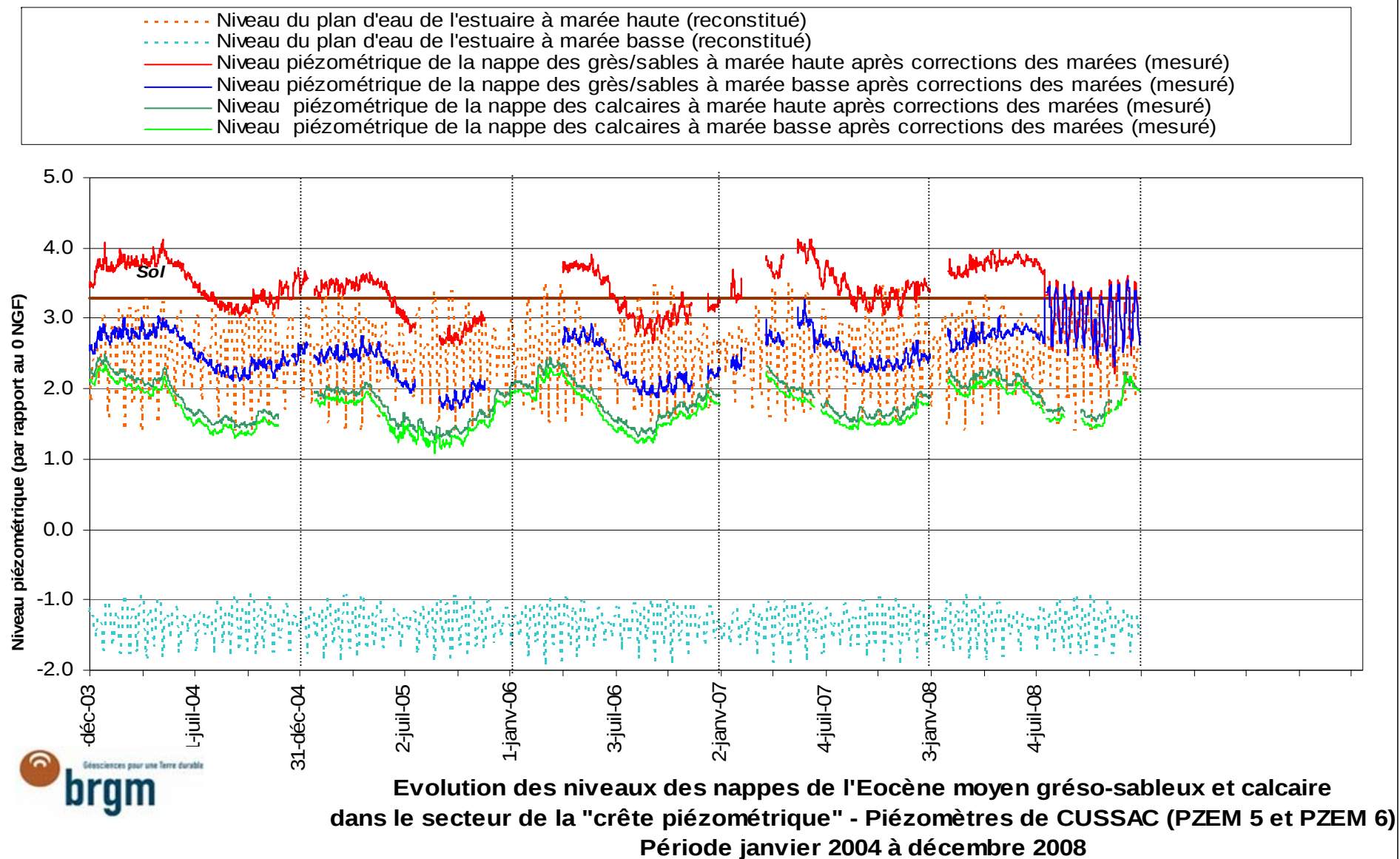


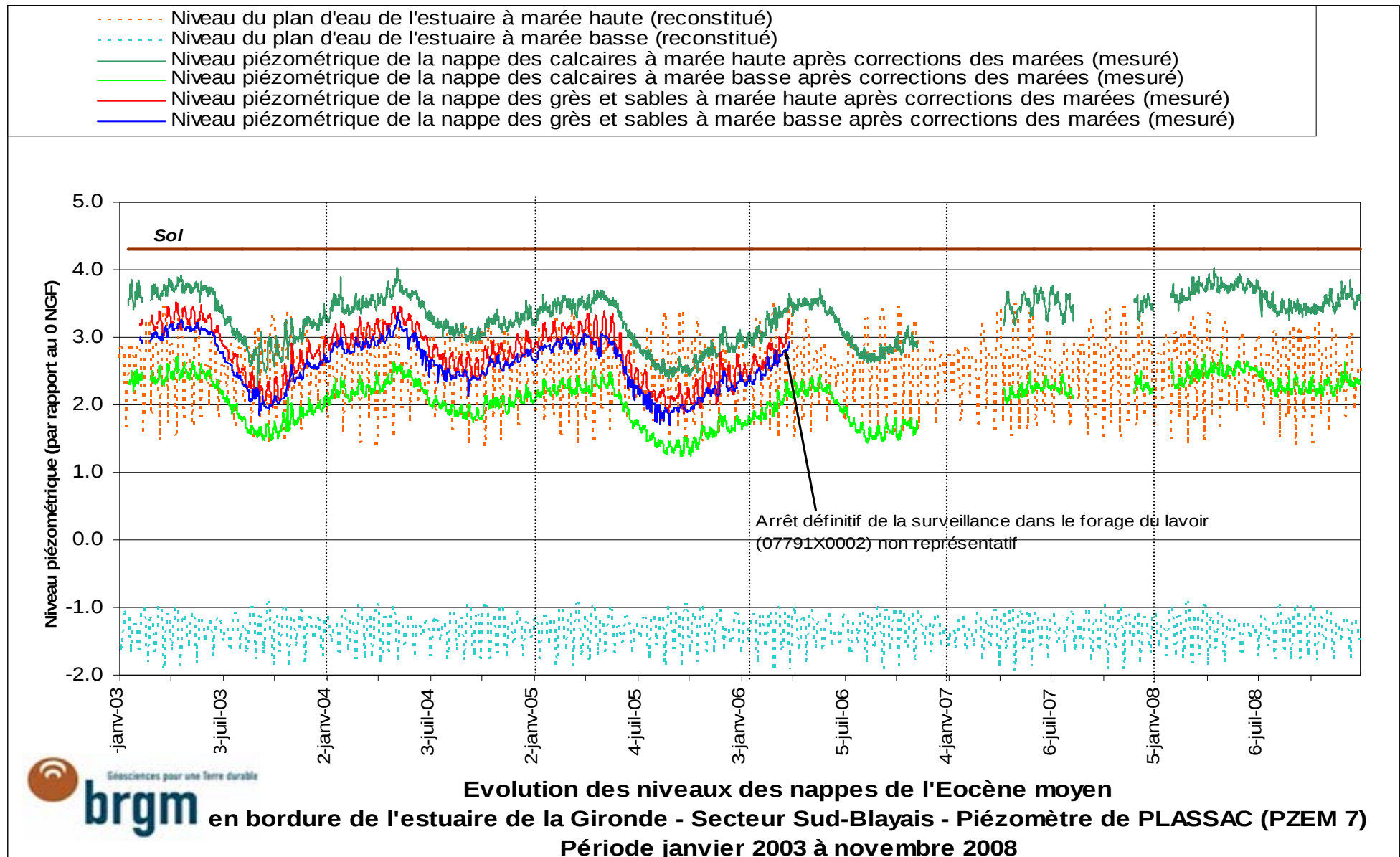
**Evolution du niveau de la nappe de l'Eocène moyen
 dans le secteur nord du Médoc - Piézomètre BRGM de ST-CHRISTOLY (PZEM 2)
 Période janvier 2004 à décembre 2008**

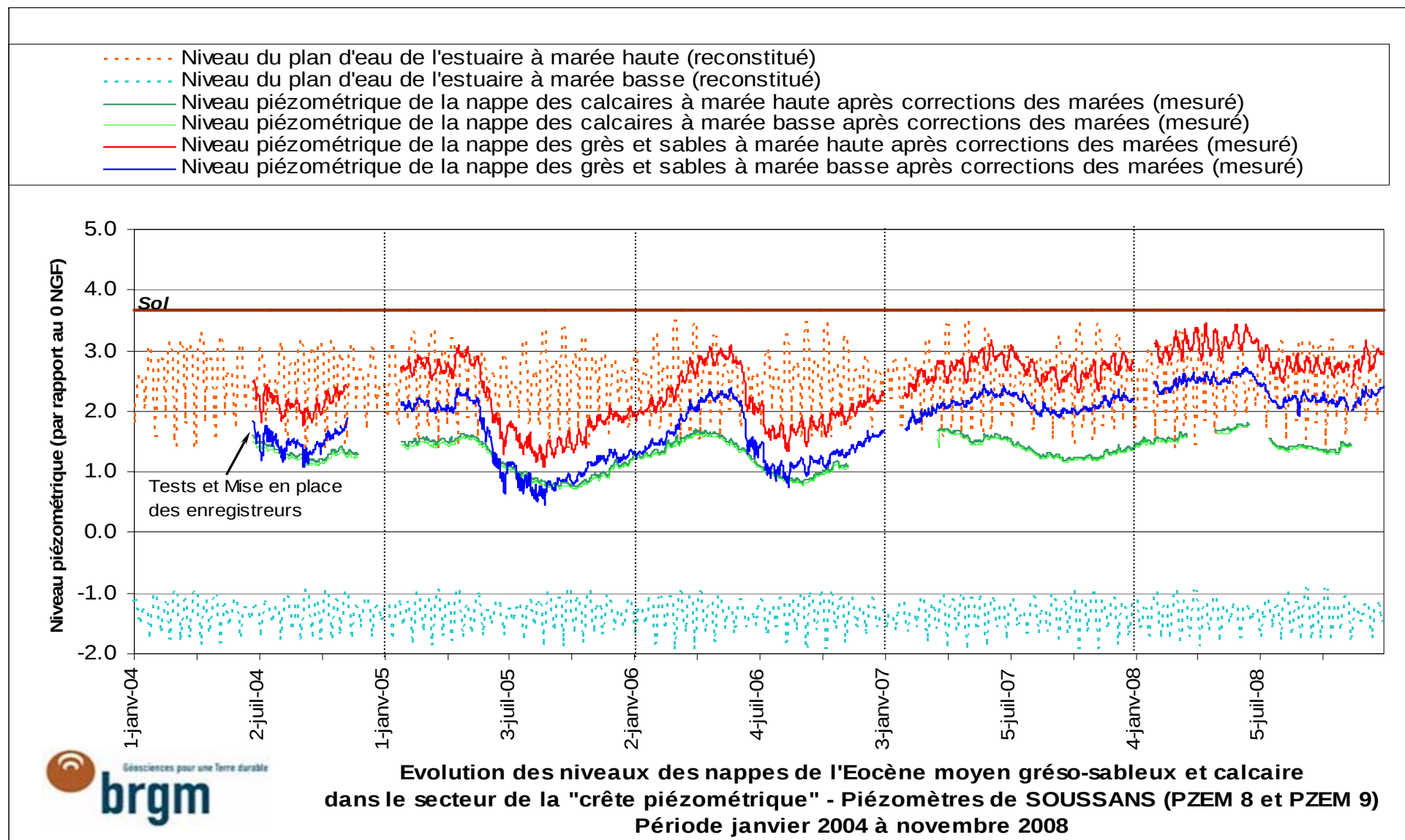


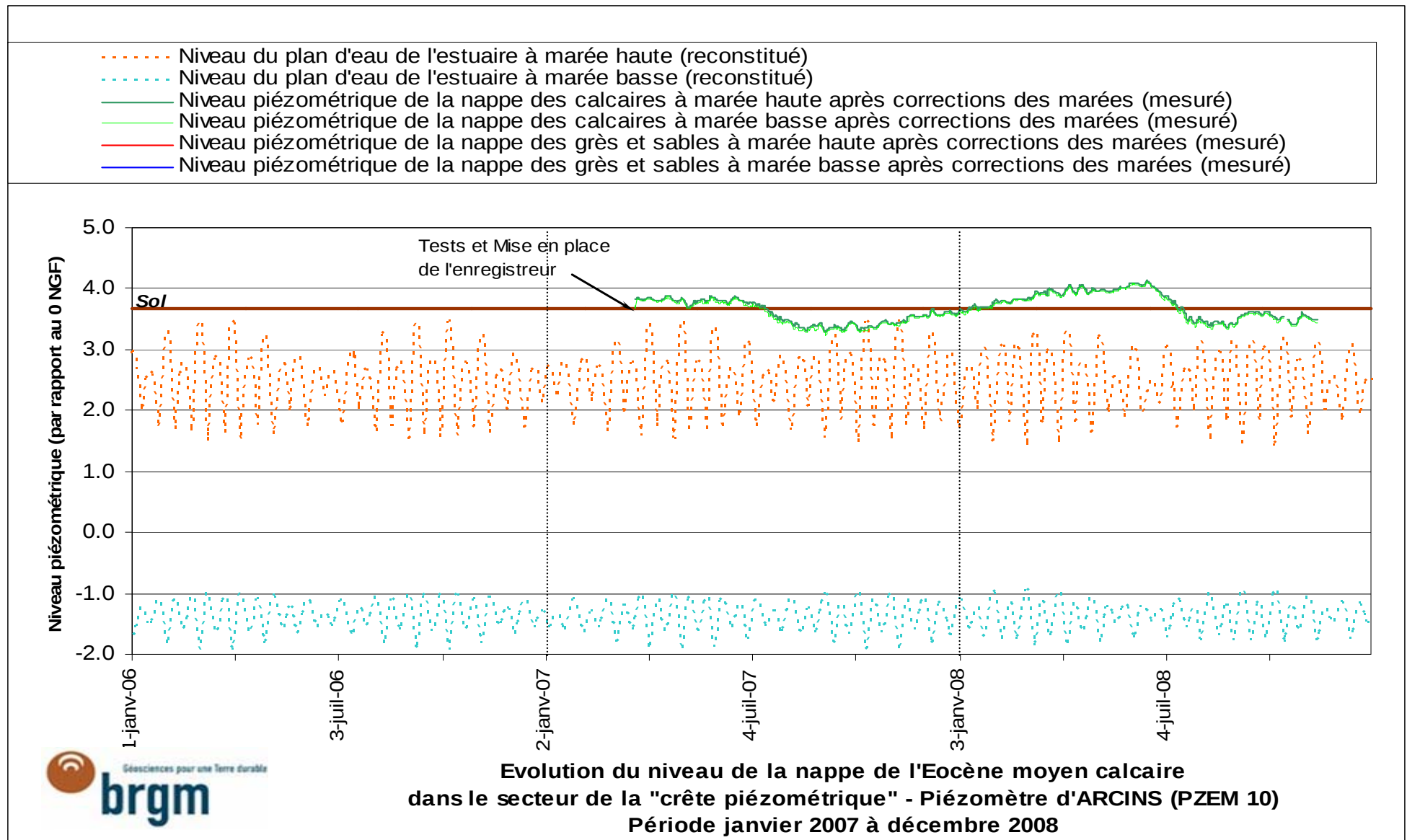


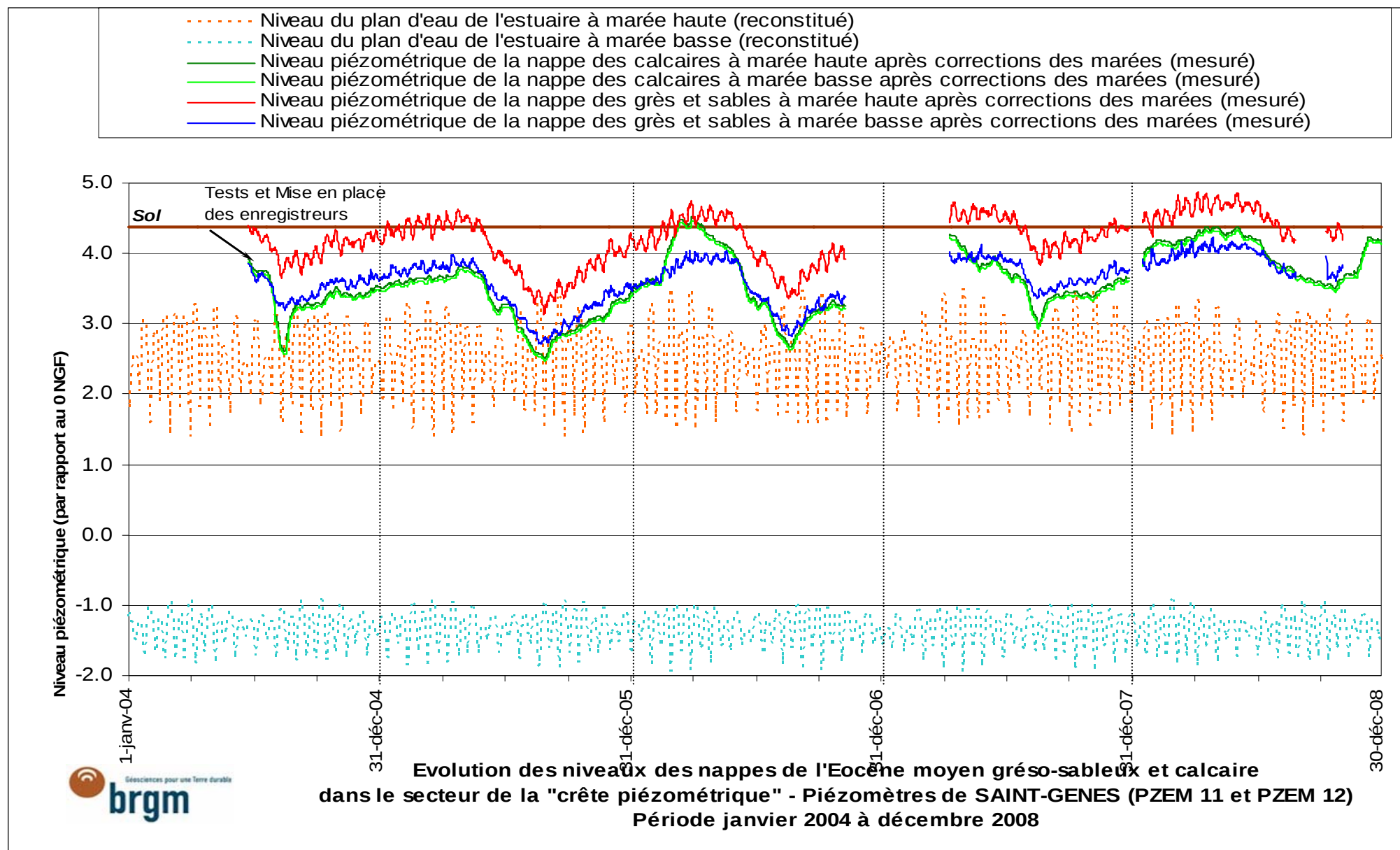
**Evolution du niveau de la nappe de l'Eocène moyen
 dans le secteur central du Médoc - Piézomètre de SAINT-ESTEPHE (PZEM 4)
 Période janvier 2004 à décembre 2008**

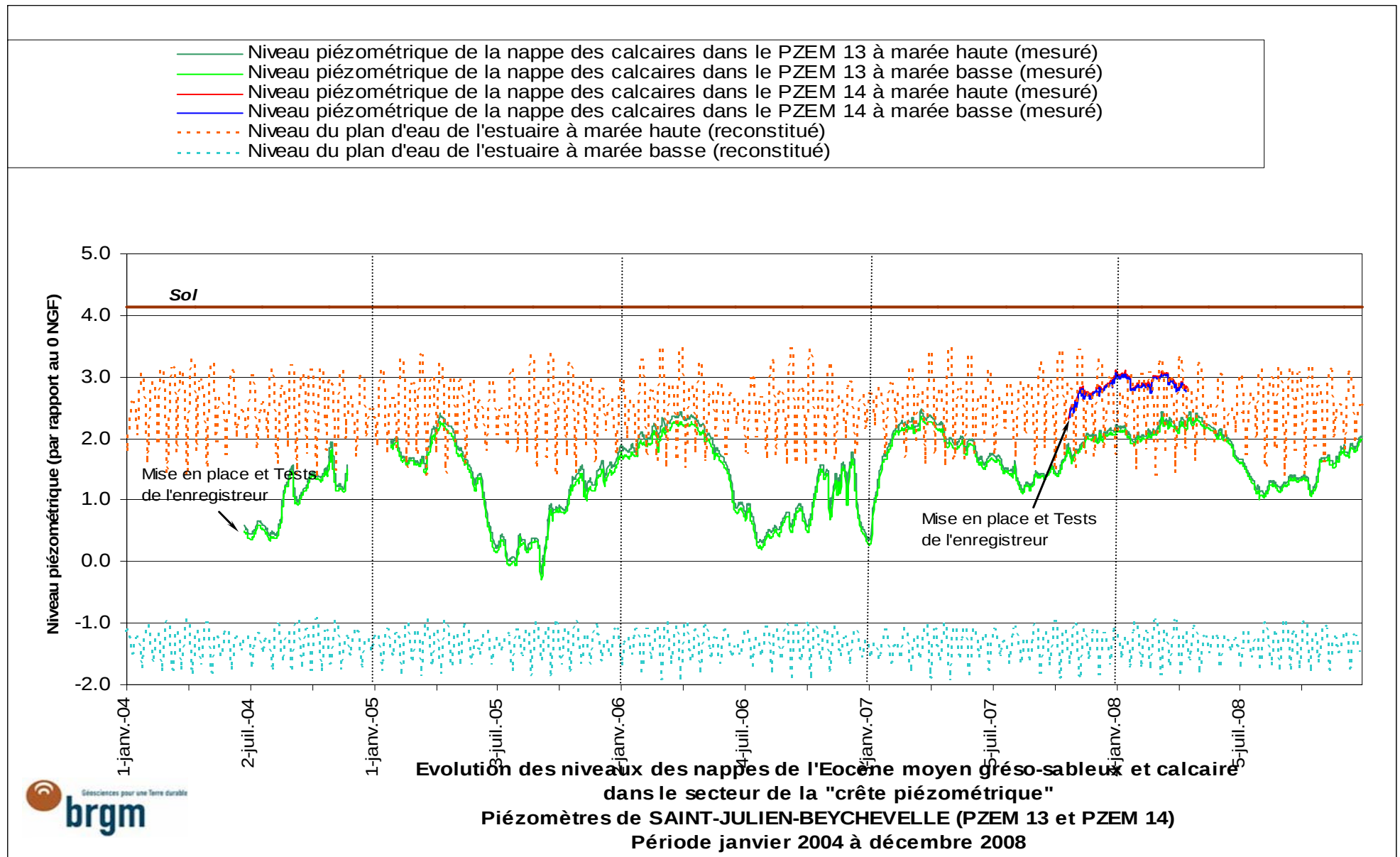






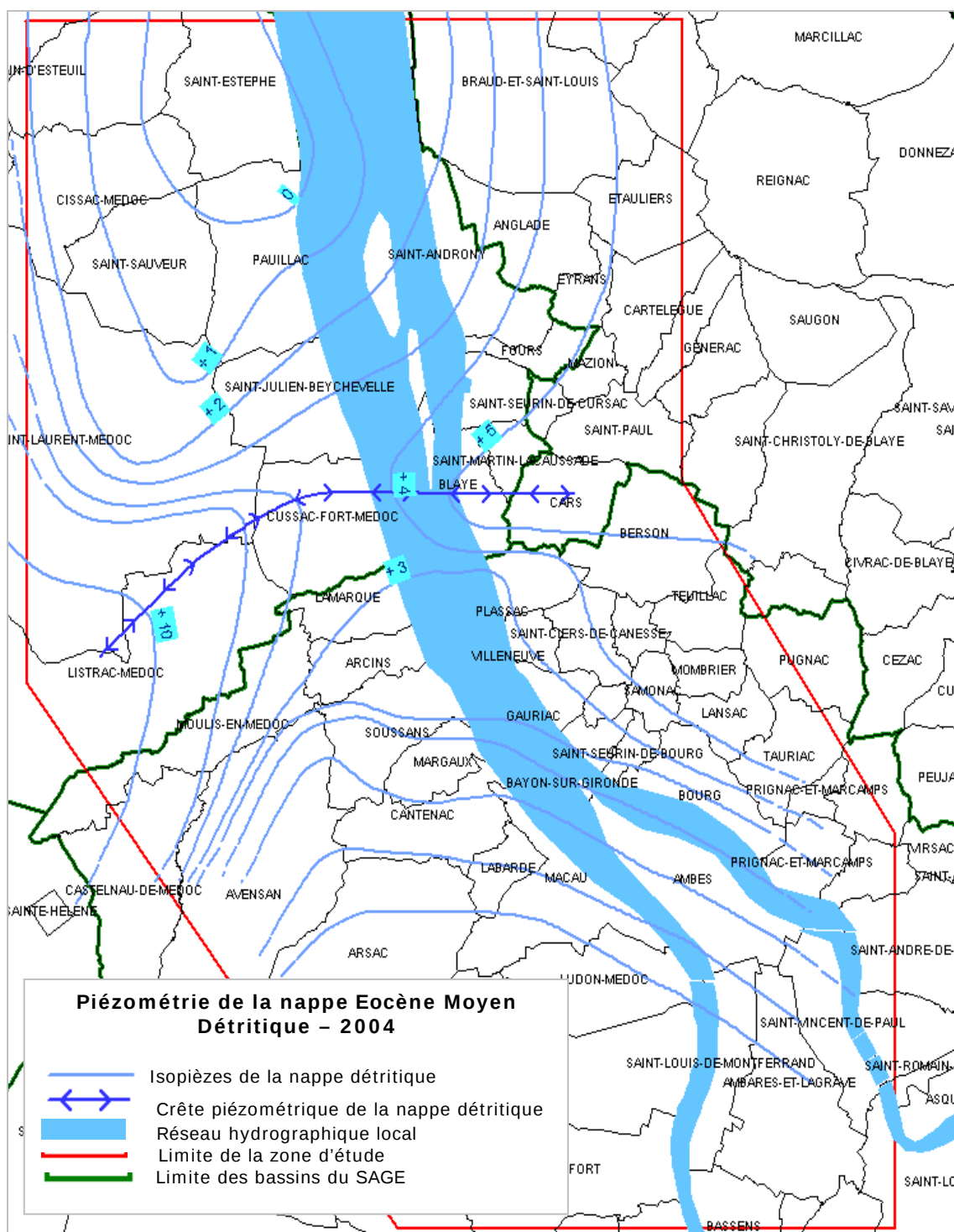


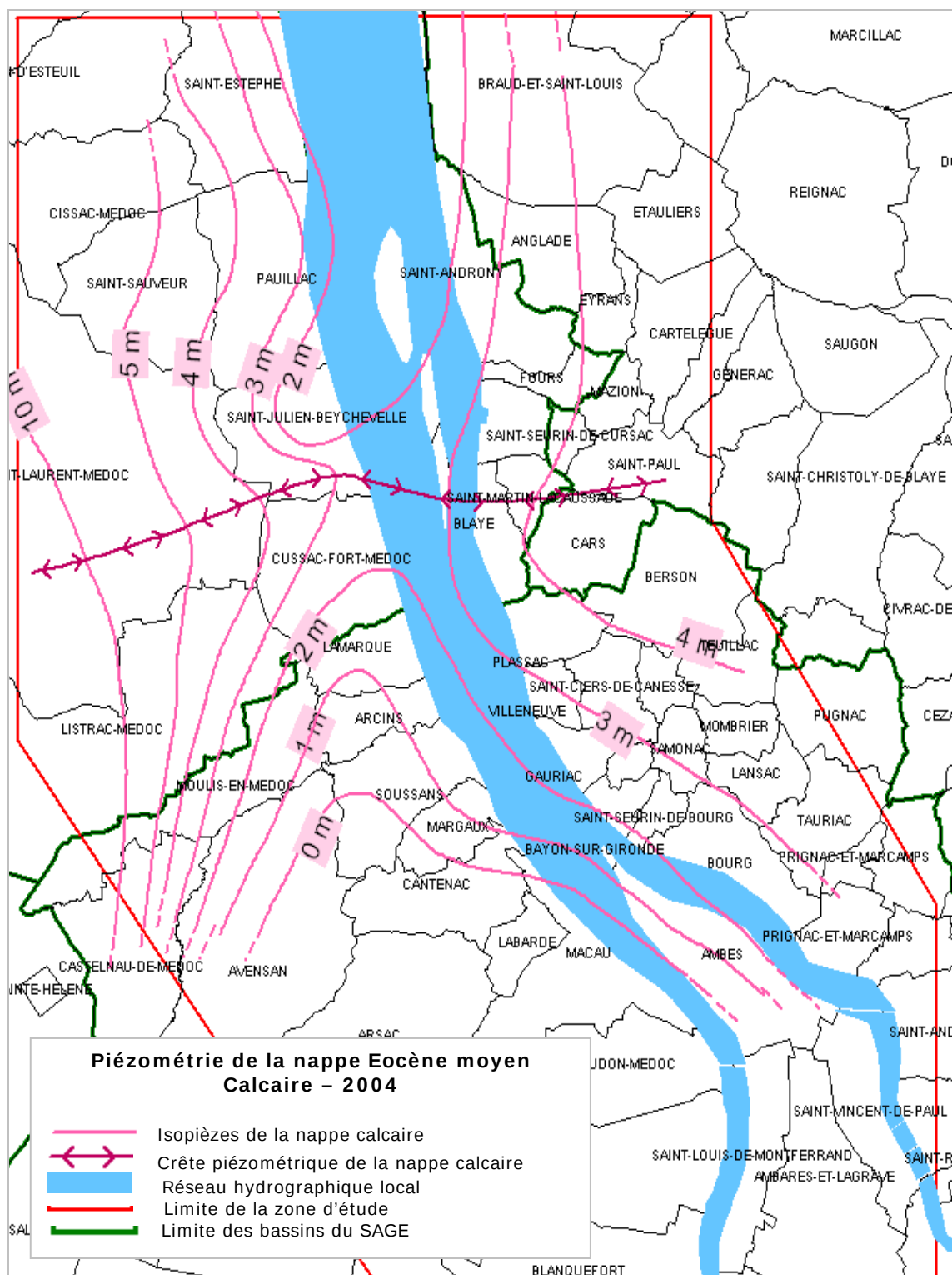




Annexe 2

Cartes piézométriques de l'année 2004 des formations calcaires et grés-sableuses de l'Eocène moyen

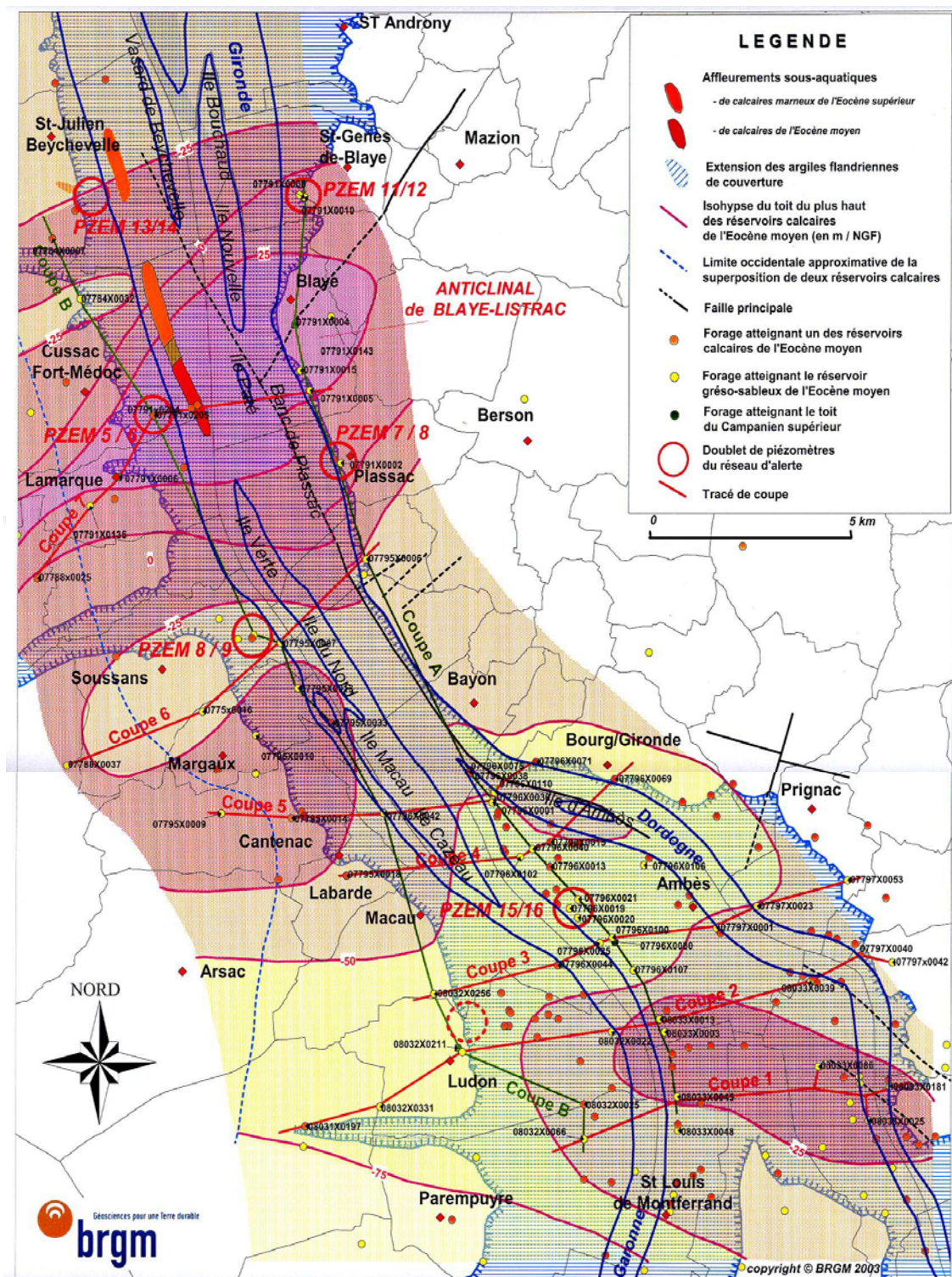




Annexe 3

Géométrie du toit du réservoir supérieur des calcaires de l'Eocène moyen dans la zone de la crête piézométrique entre Bordeaux et Blaye

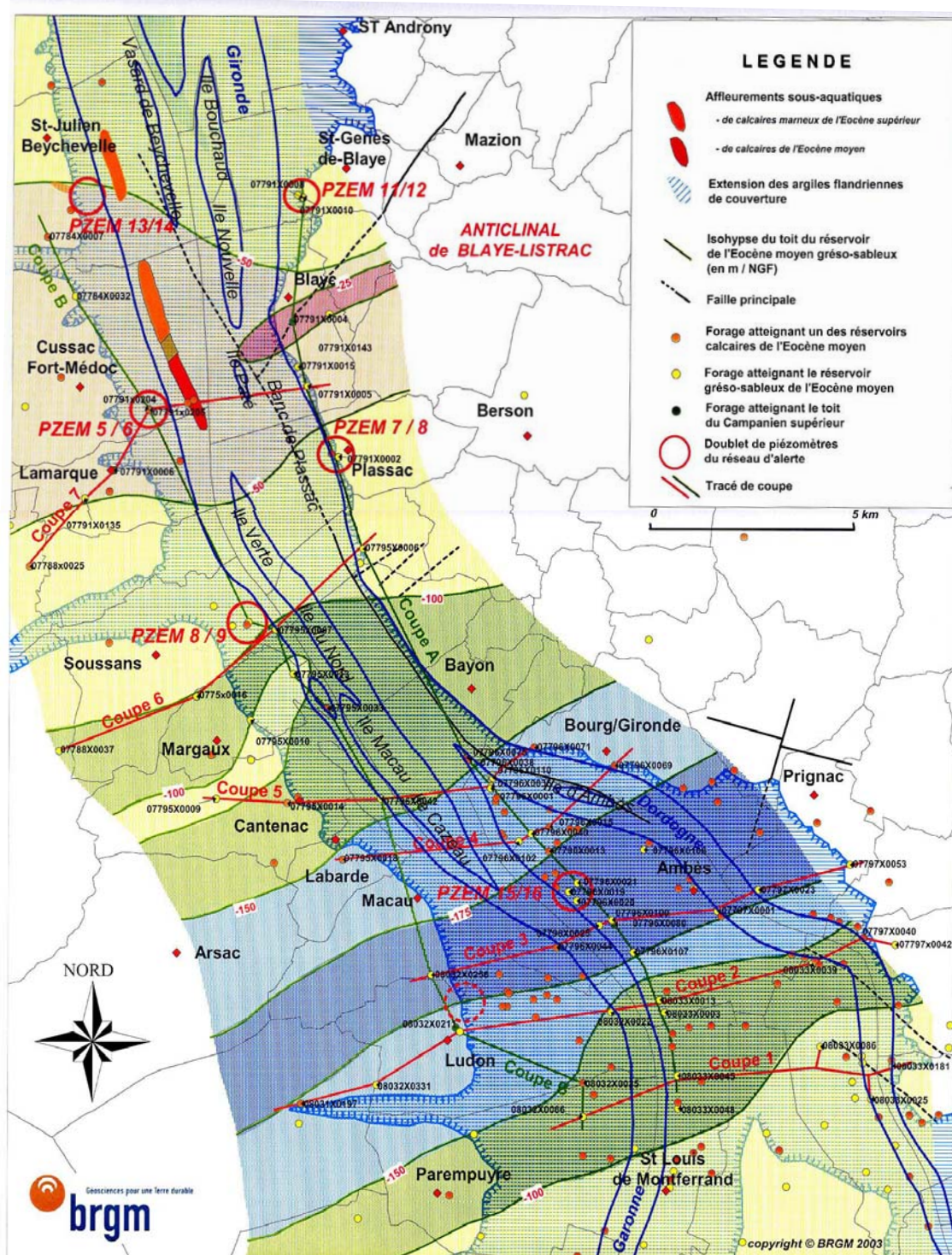
Rapport BRGM RP-52514-FR



Annexe 4

Géométrie du toit du réservoir supérieur des grès et des sables de l'Eocène moyen dans la zone de la crête piézométrique entre Bordeaux et Blaye

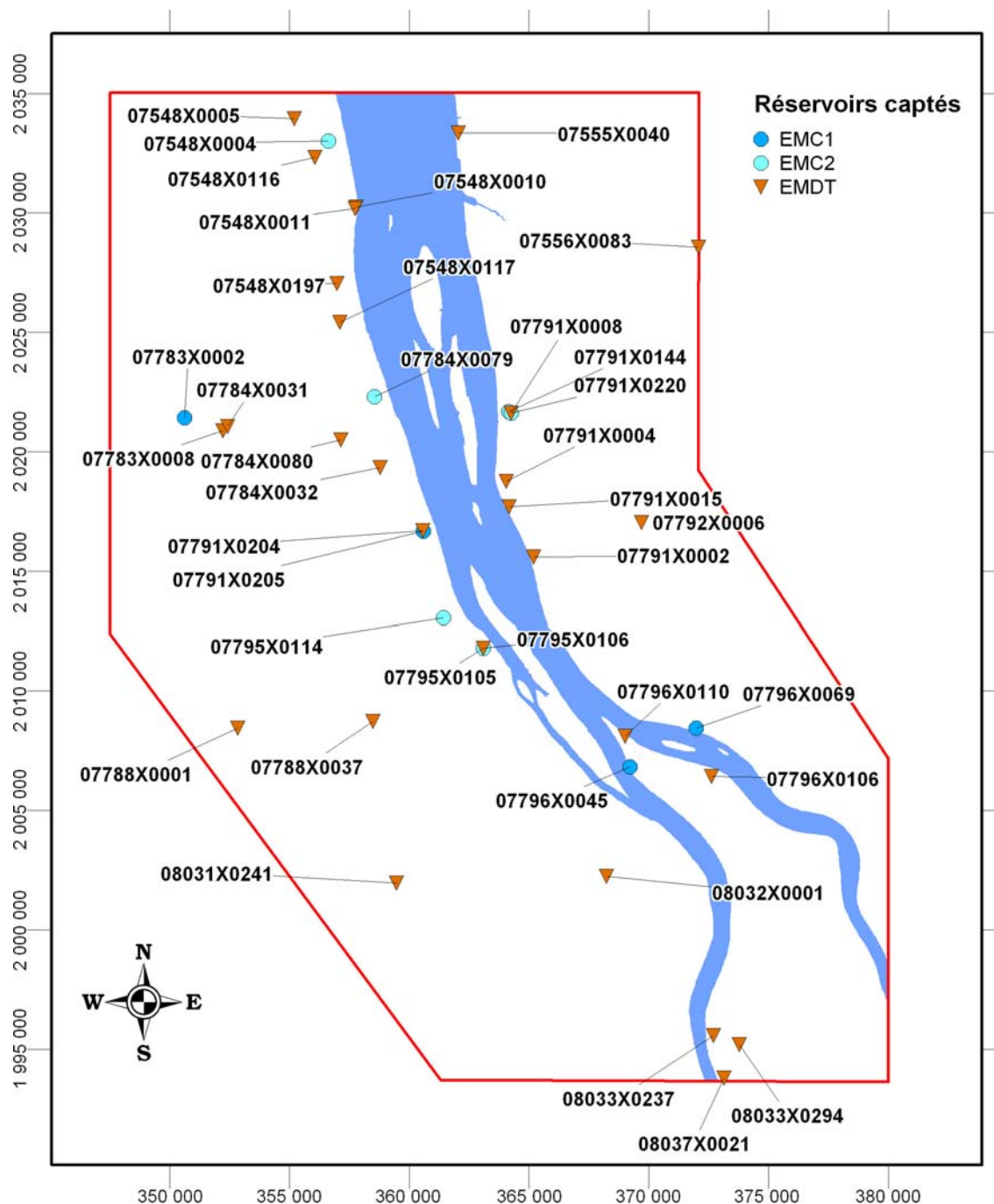
Rapport BRGM RP-52514-FR



Annexe 5

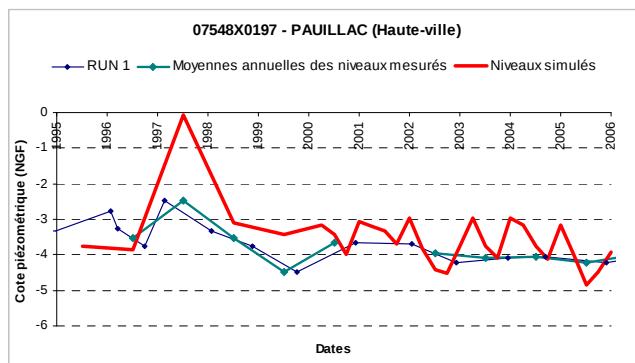
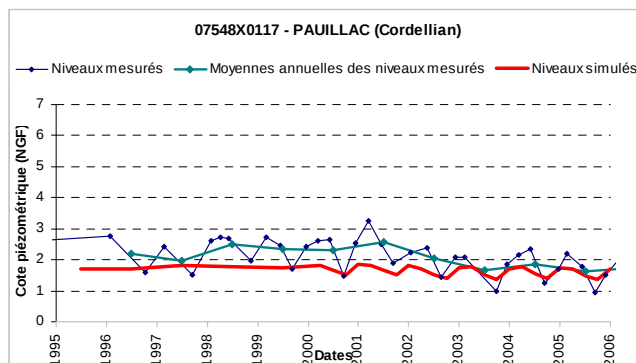
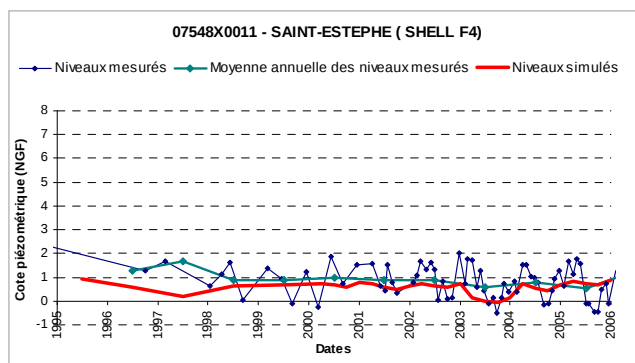
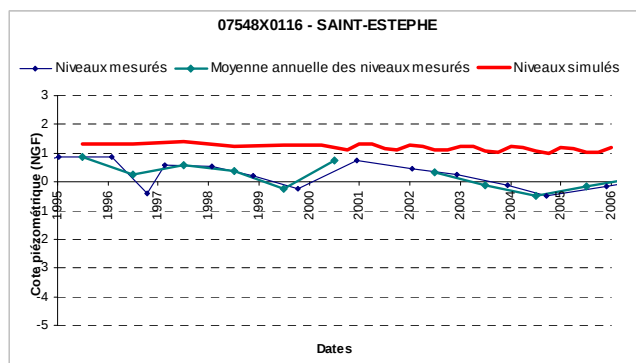
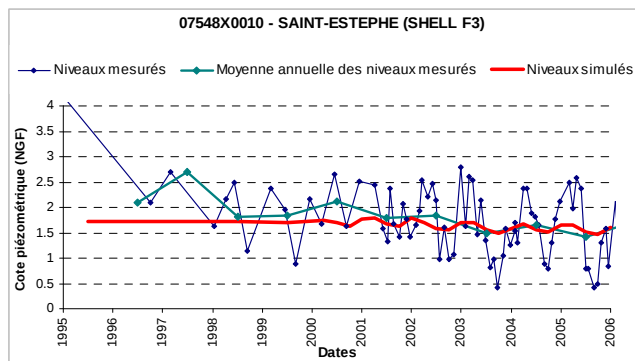
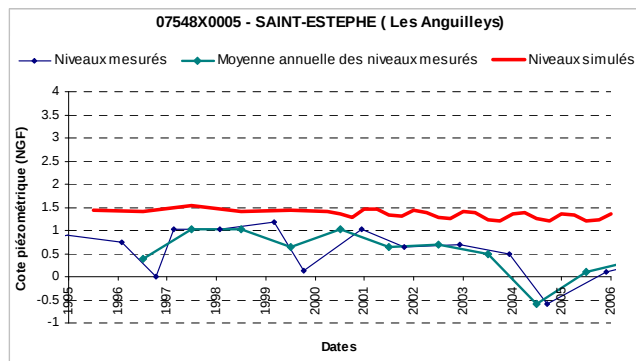
Chroniques piézométriques et localisation

Chroniques piézométriques et localisation

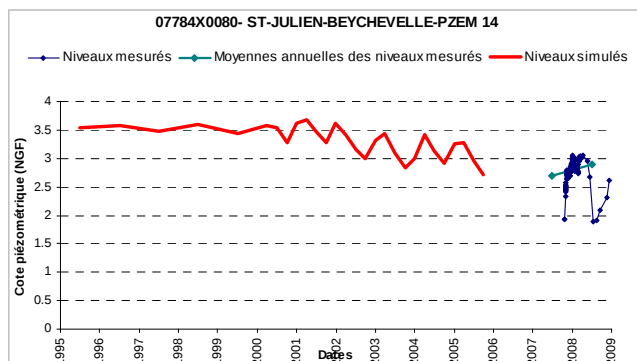
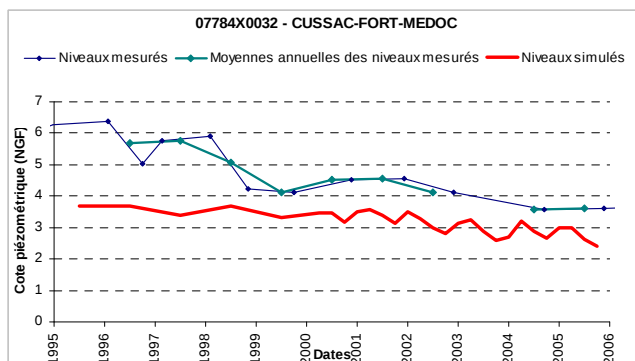
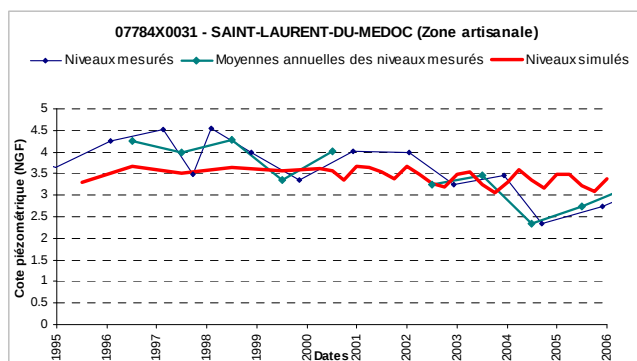
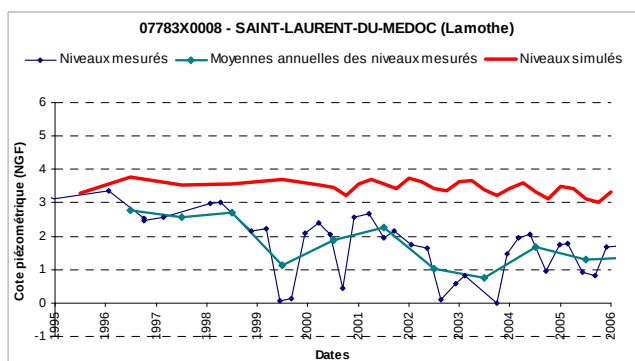
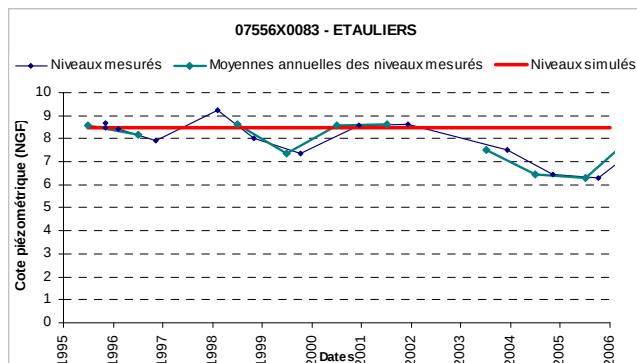
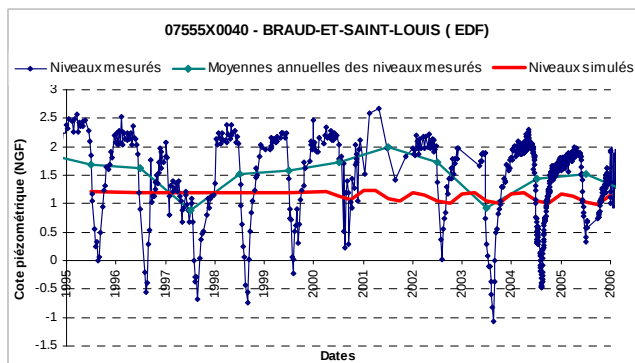


Localisation des piézomètres retenus pour le calage du modèle en régime transitoire

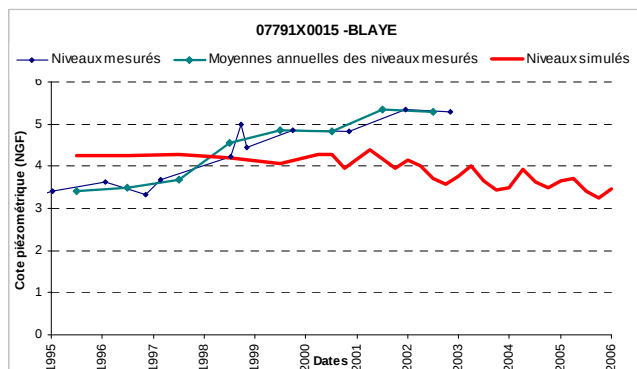
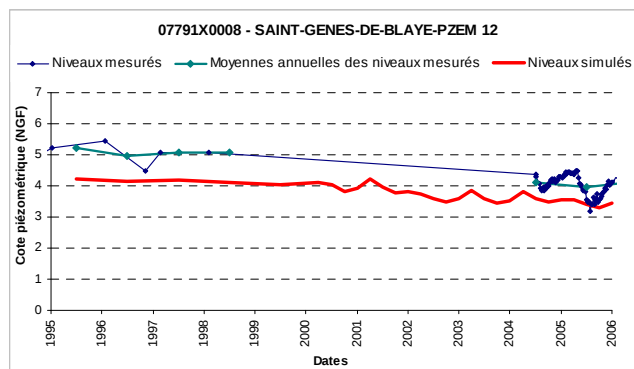
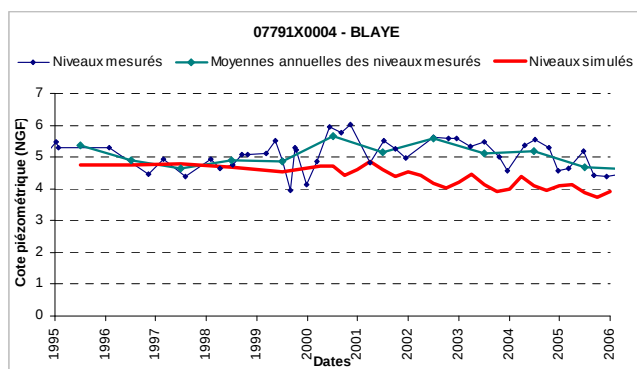
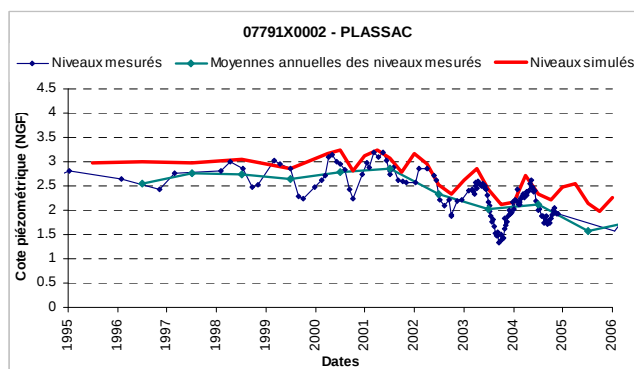
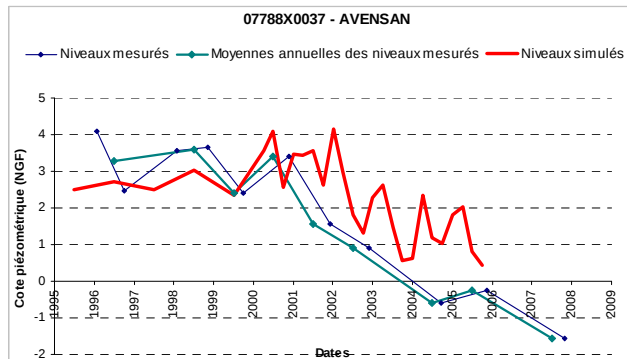
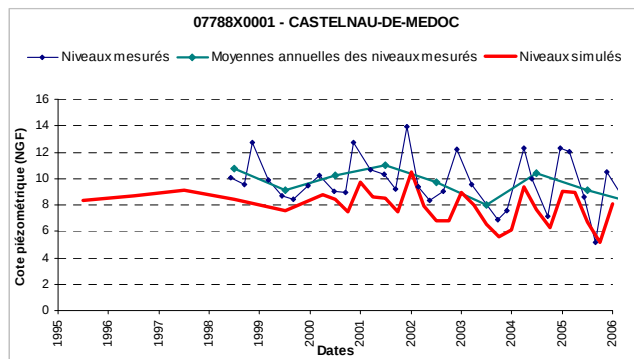
Eocène moyen Détritique



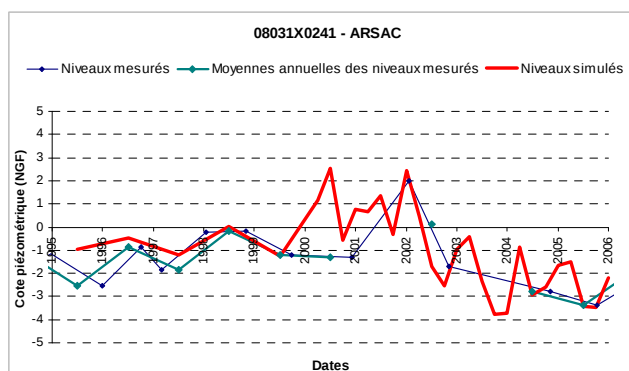
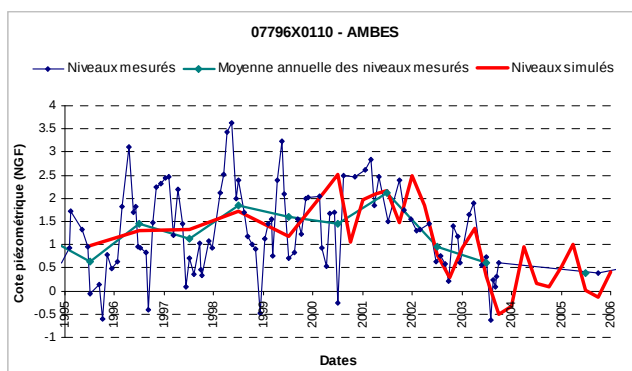
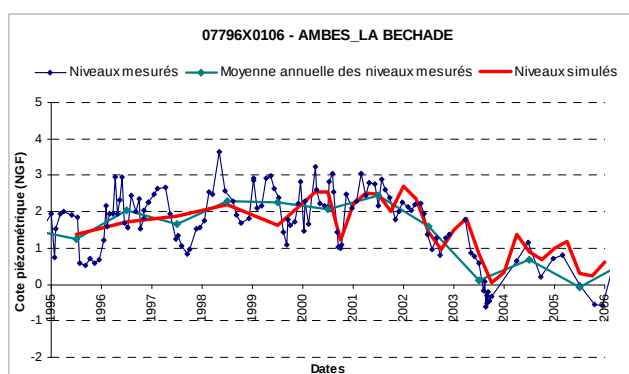
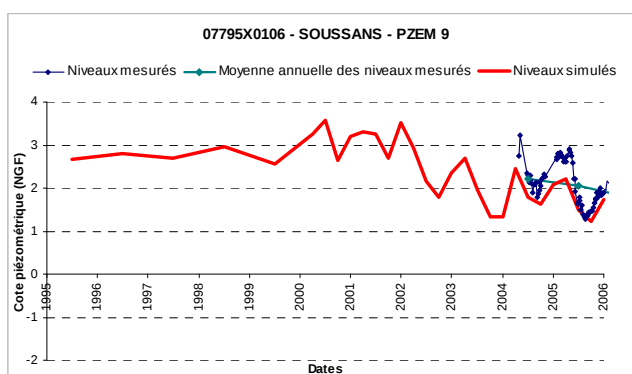
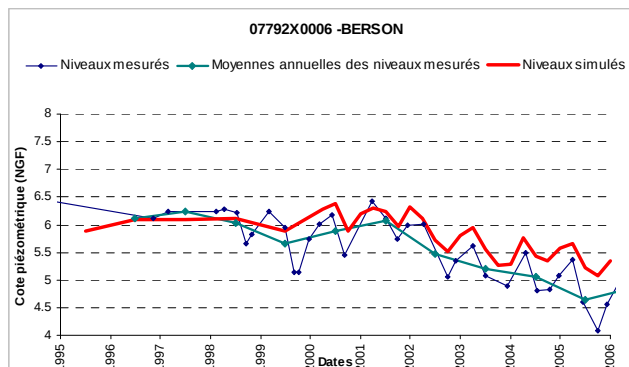
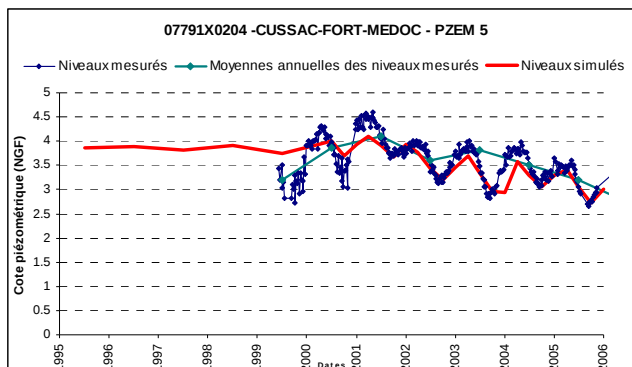
Eocène moyen Détritique



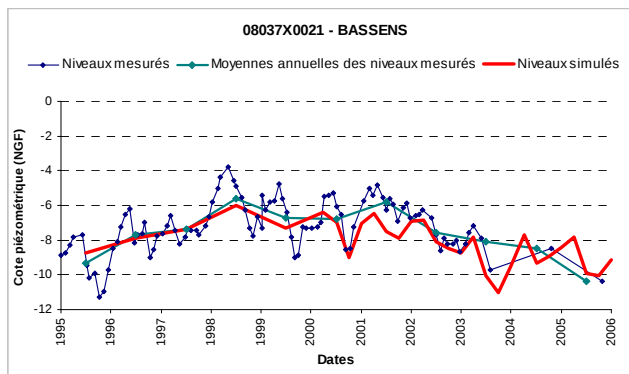
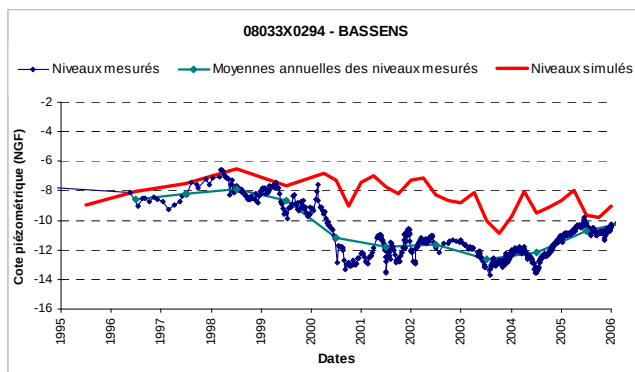
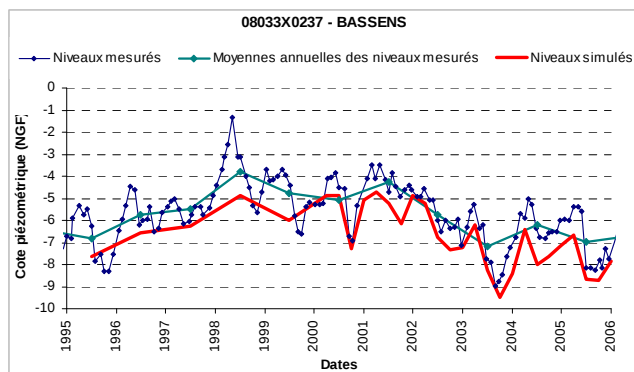
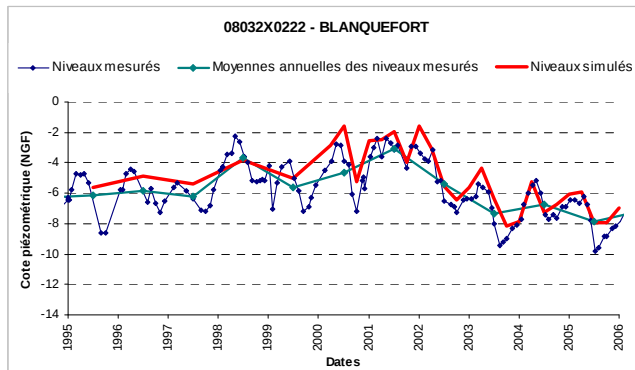
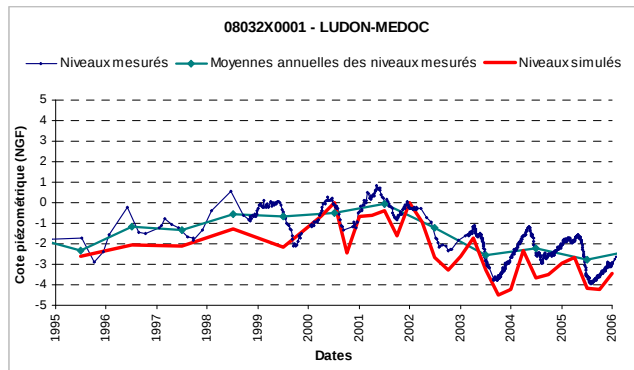
Eocène moyen Détritique



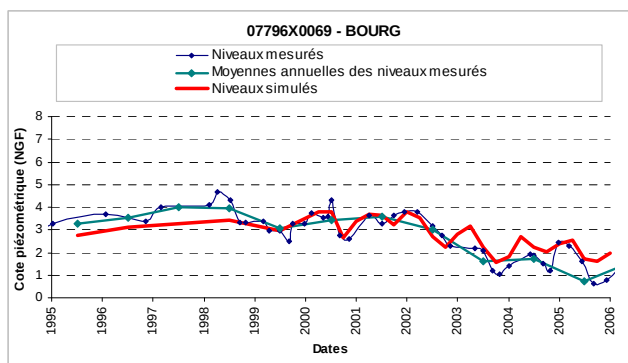
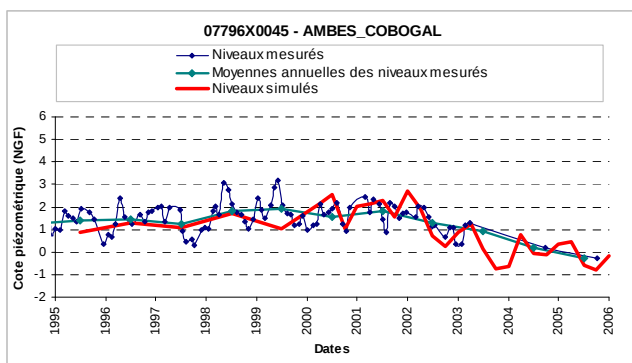
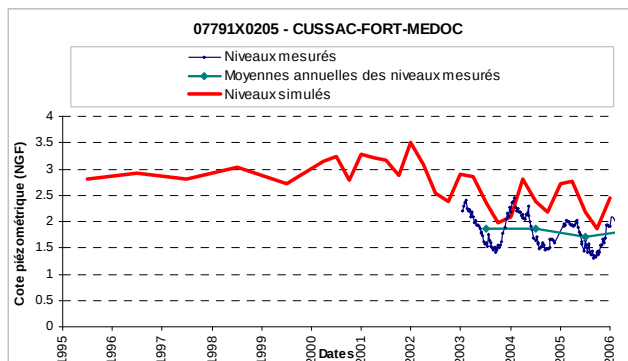
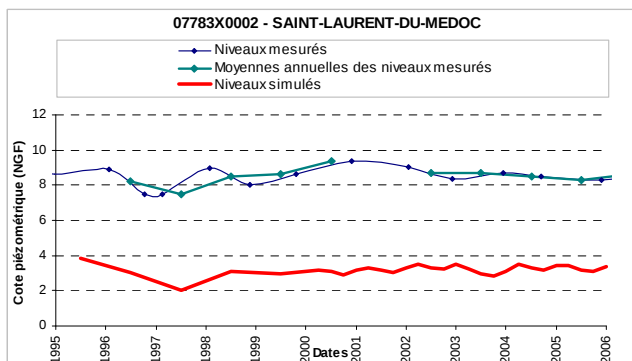
Eocène moyen Détritique



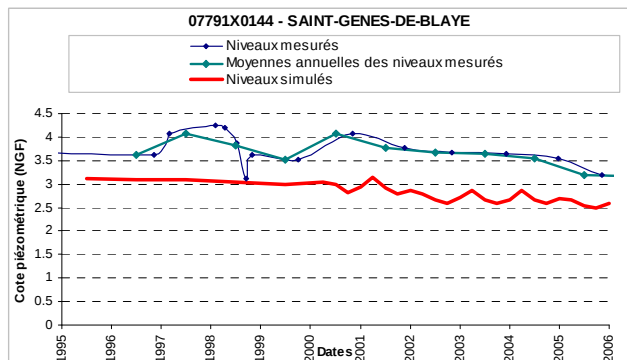
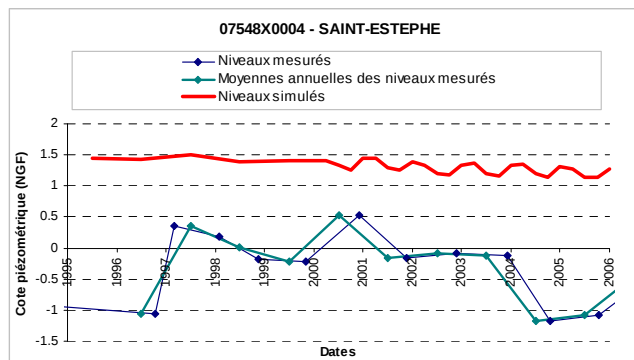
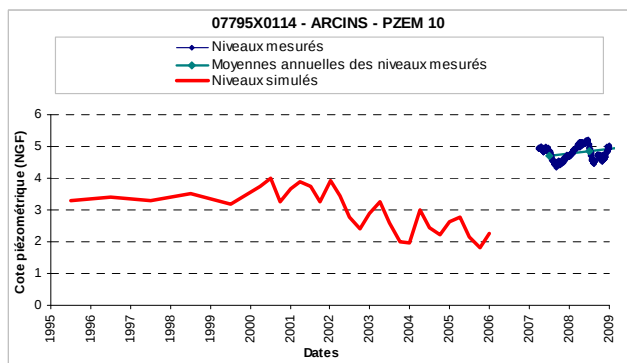
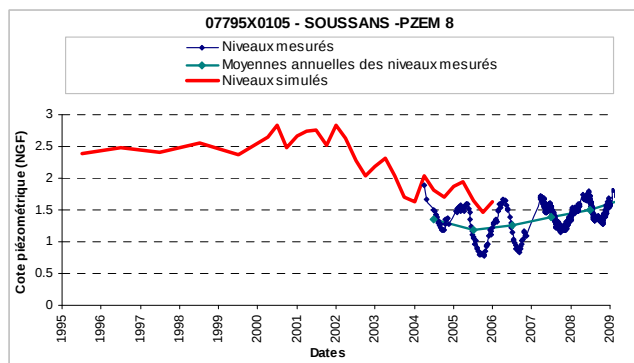
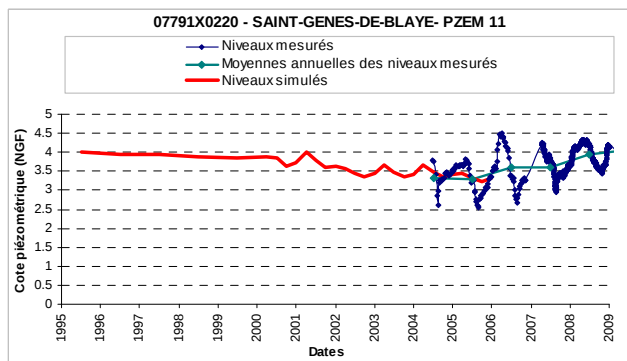
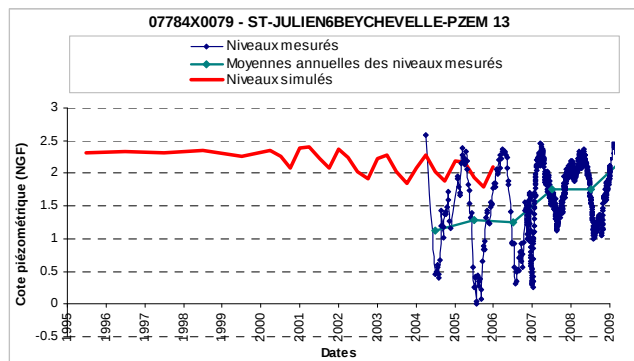
Eocène moyen Détritique



Eocène moyen calcaire 1

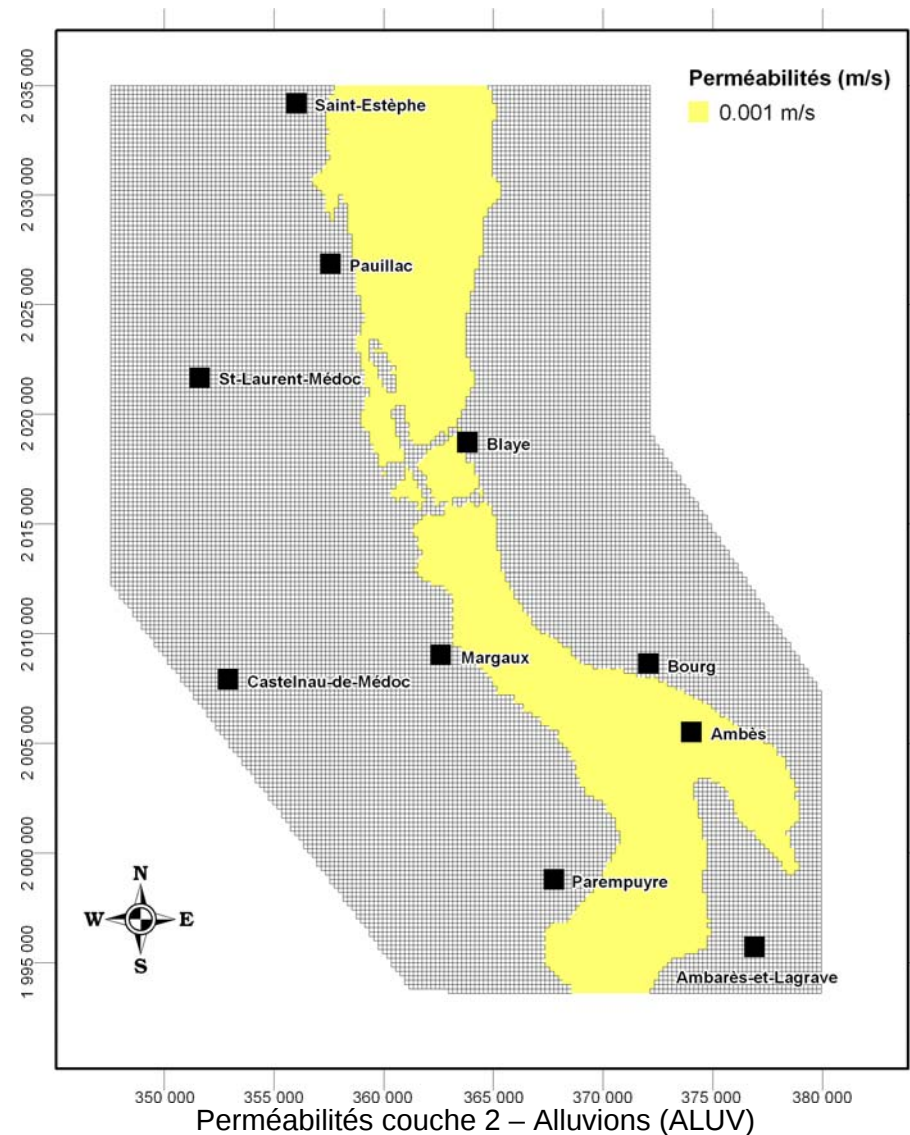
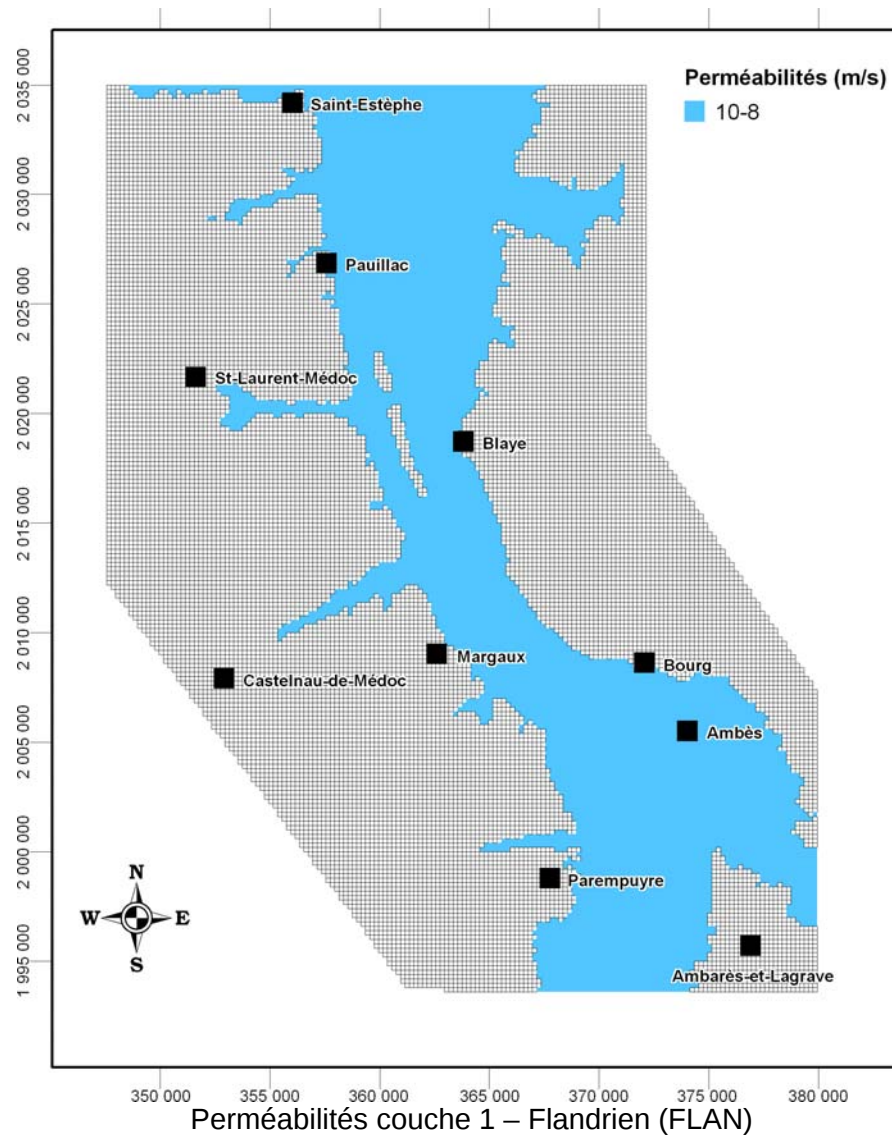


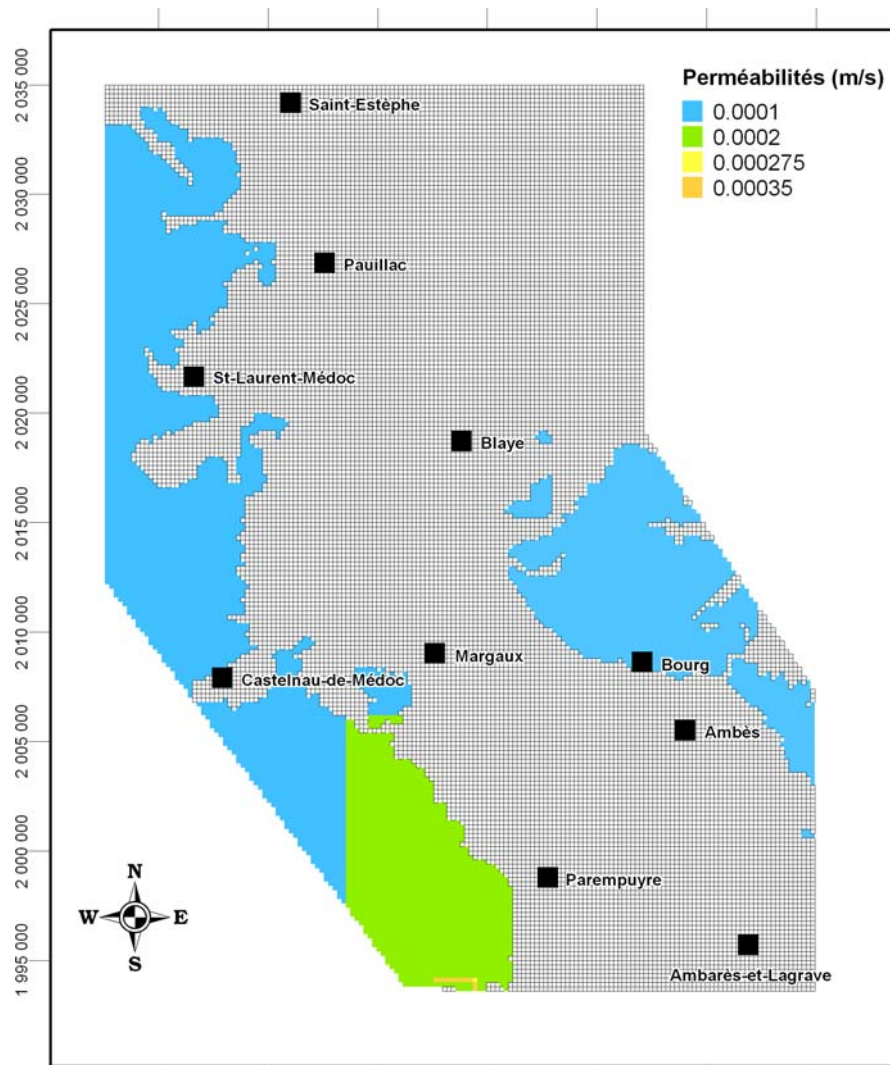
Eocène moyen calcaire 2



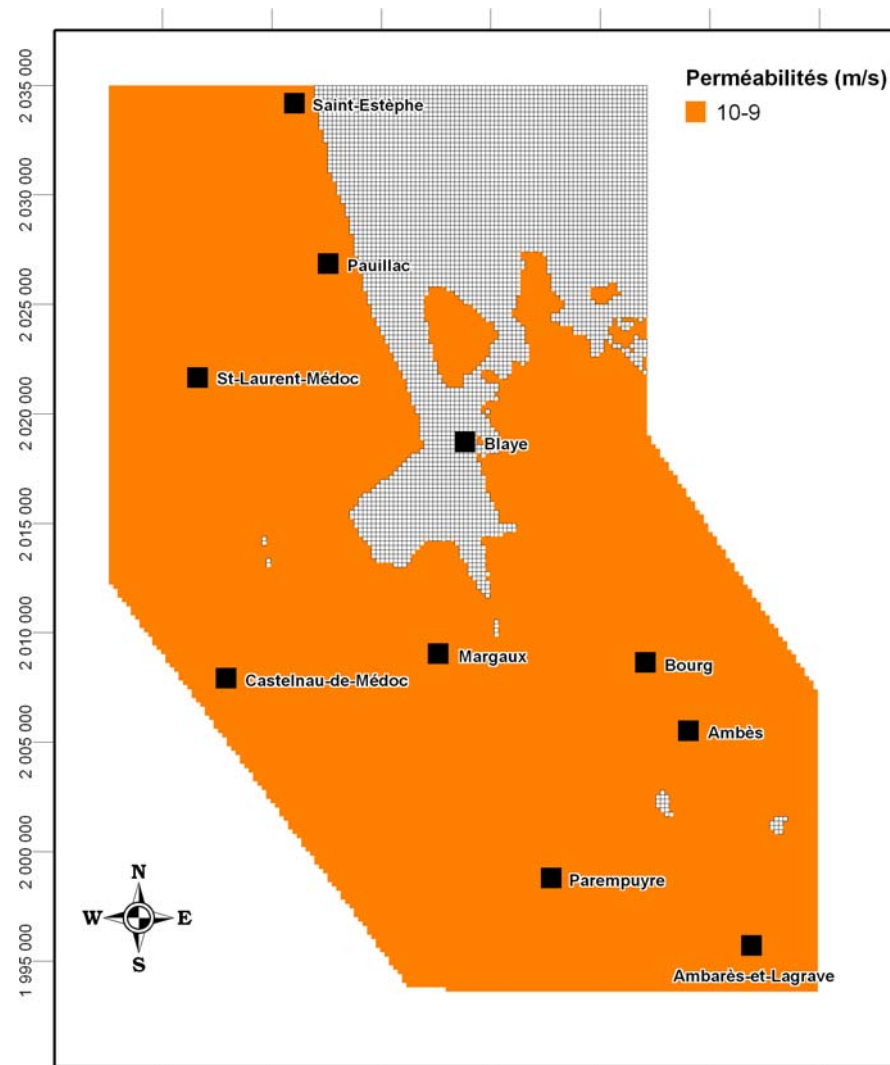
Annexe 6

Paramètres hydrodynamique du modèle du secteur de la crête piézométrique en régime transitoire

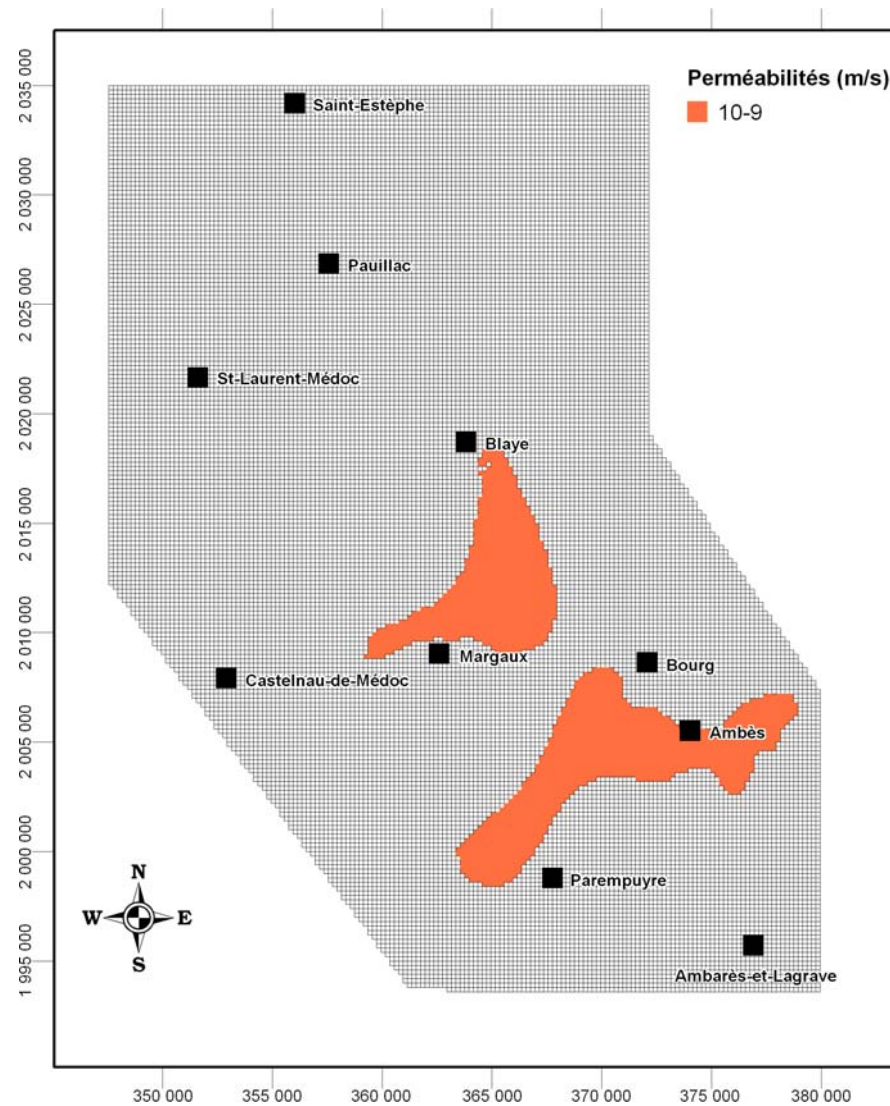
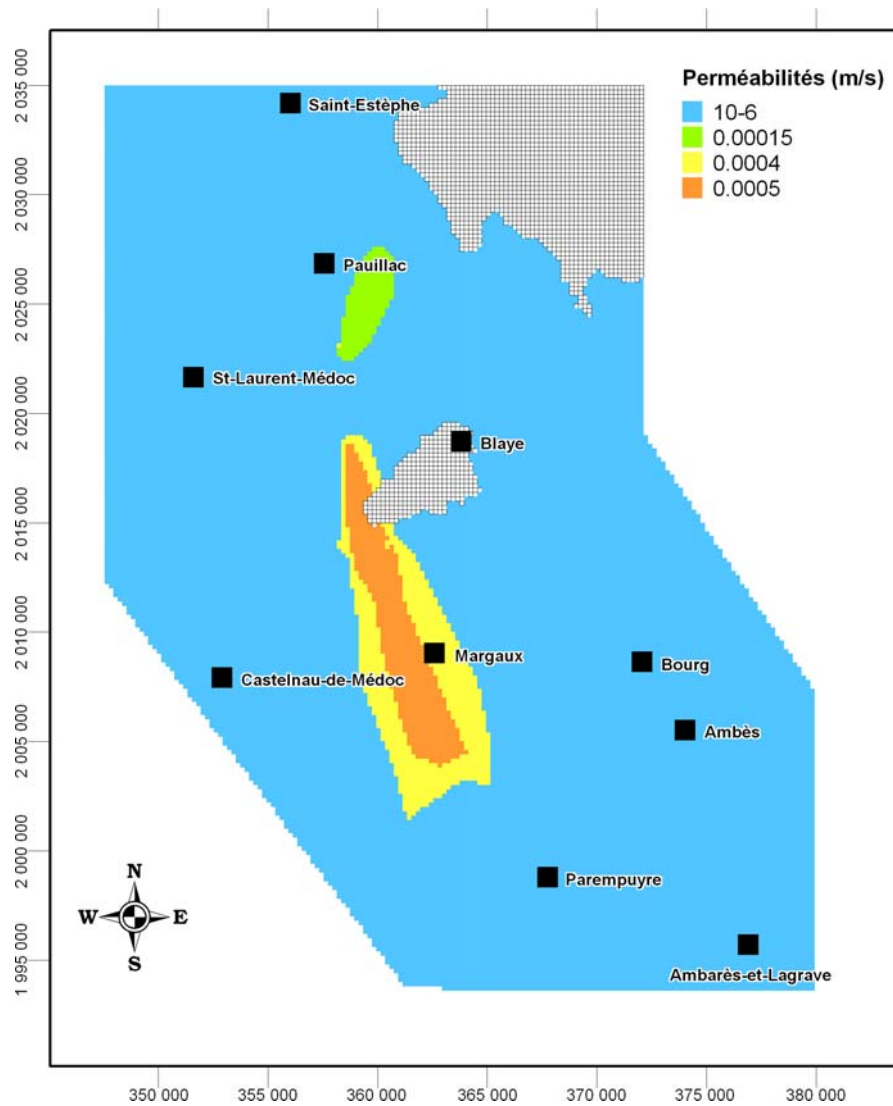


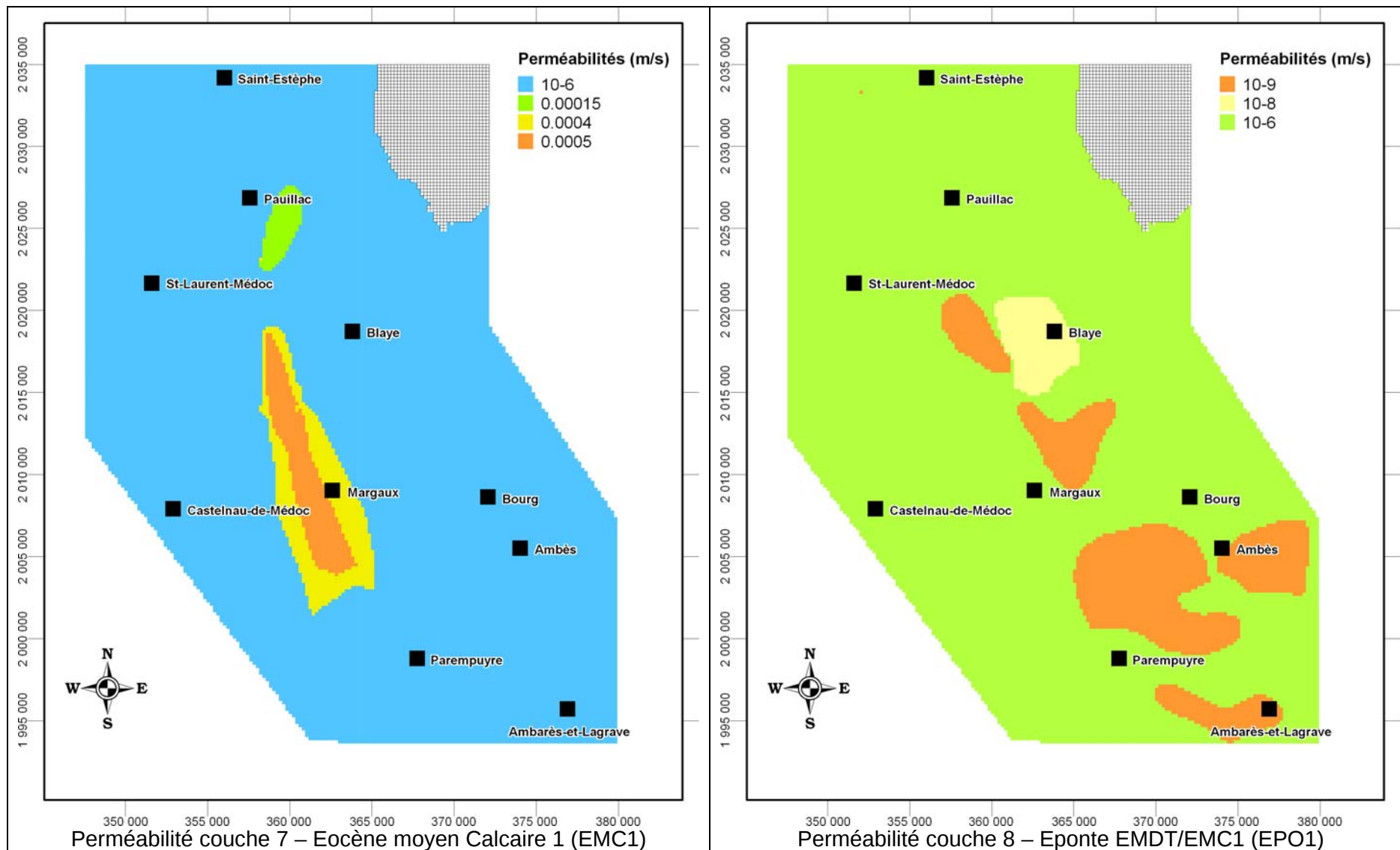


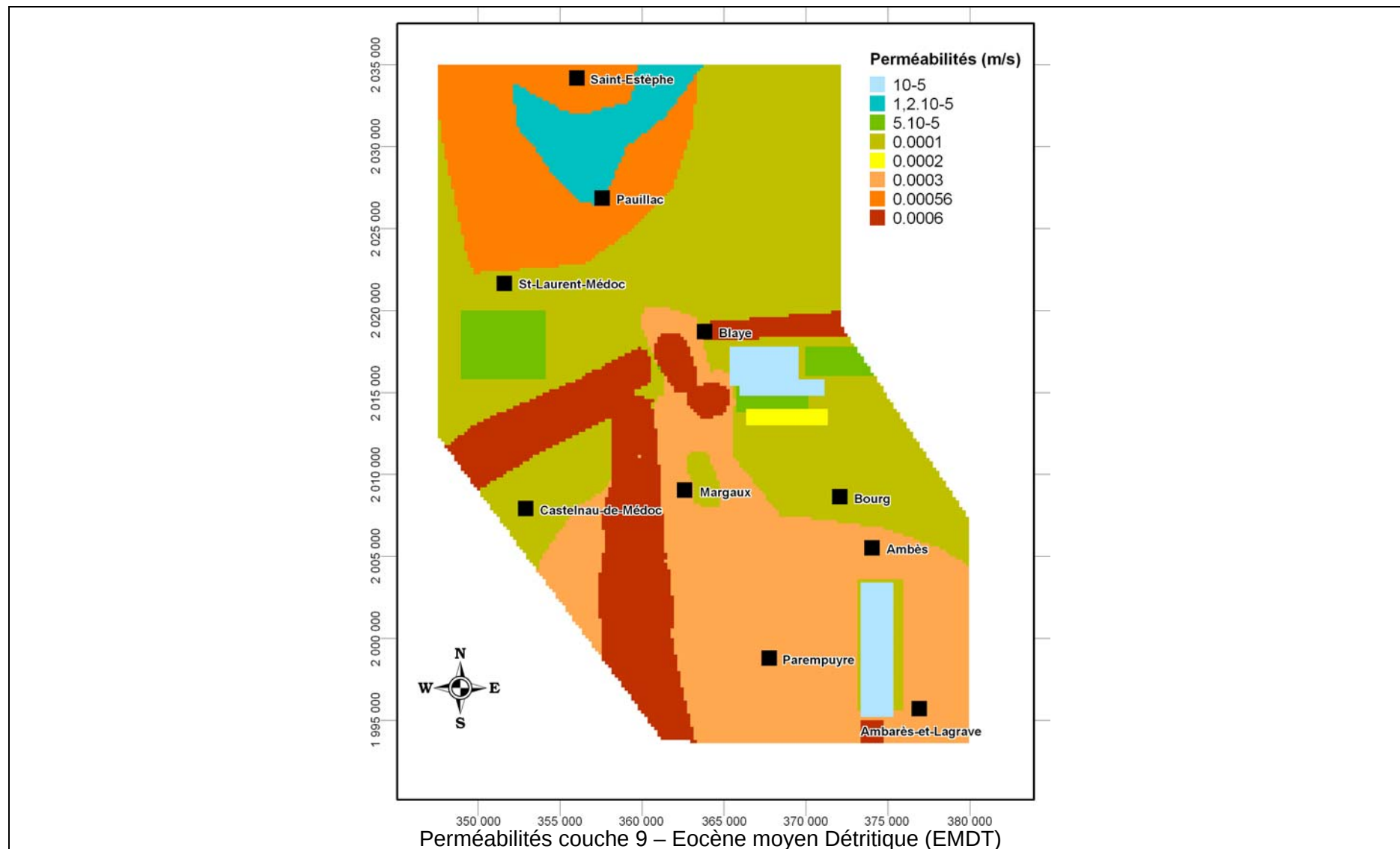
Perméabilité couche 3 – Formations de recouvrement (AUTR)

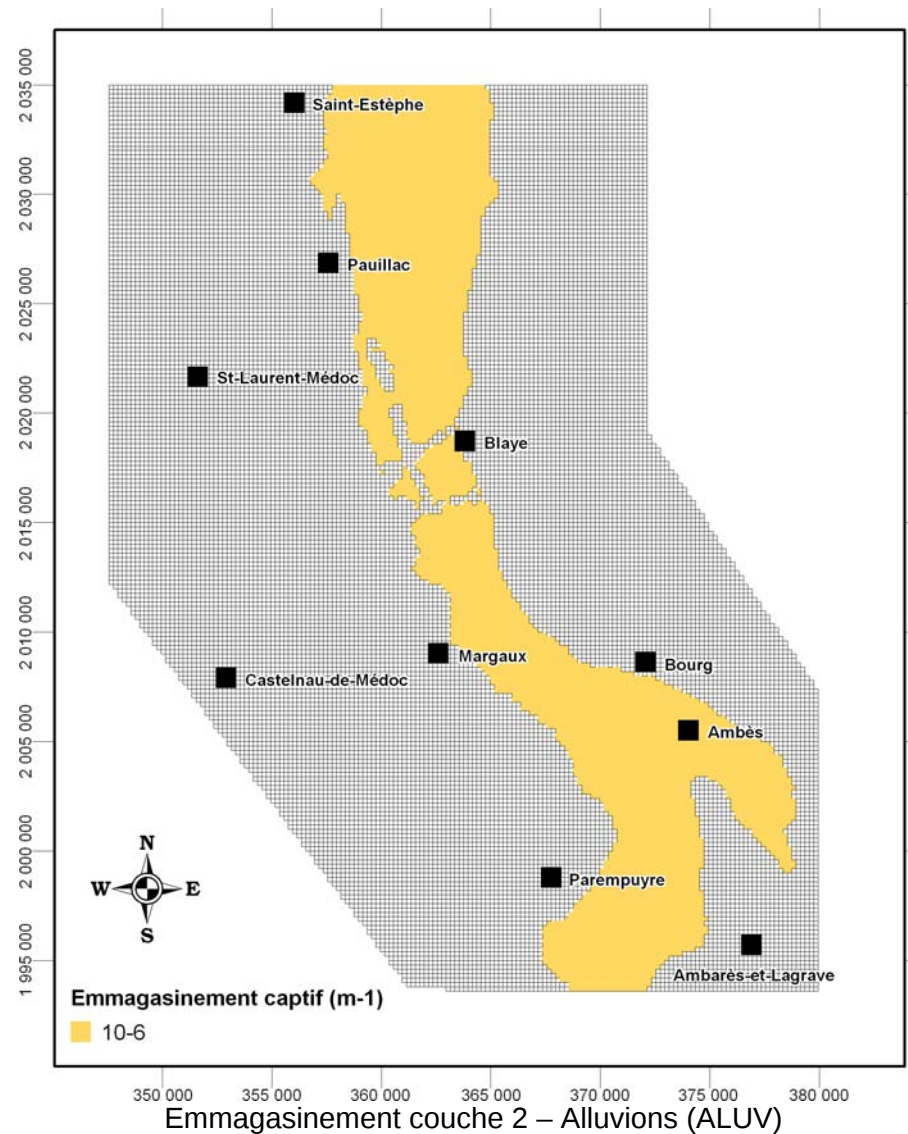
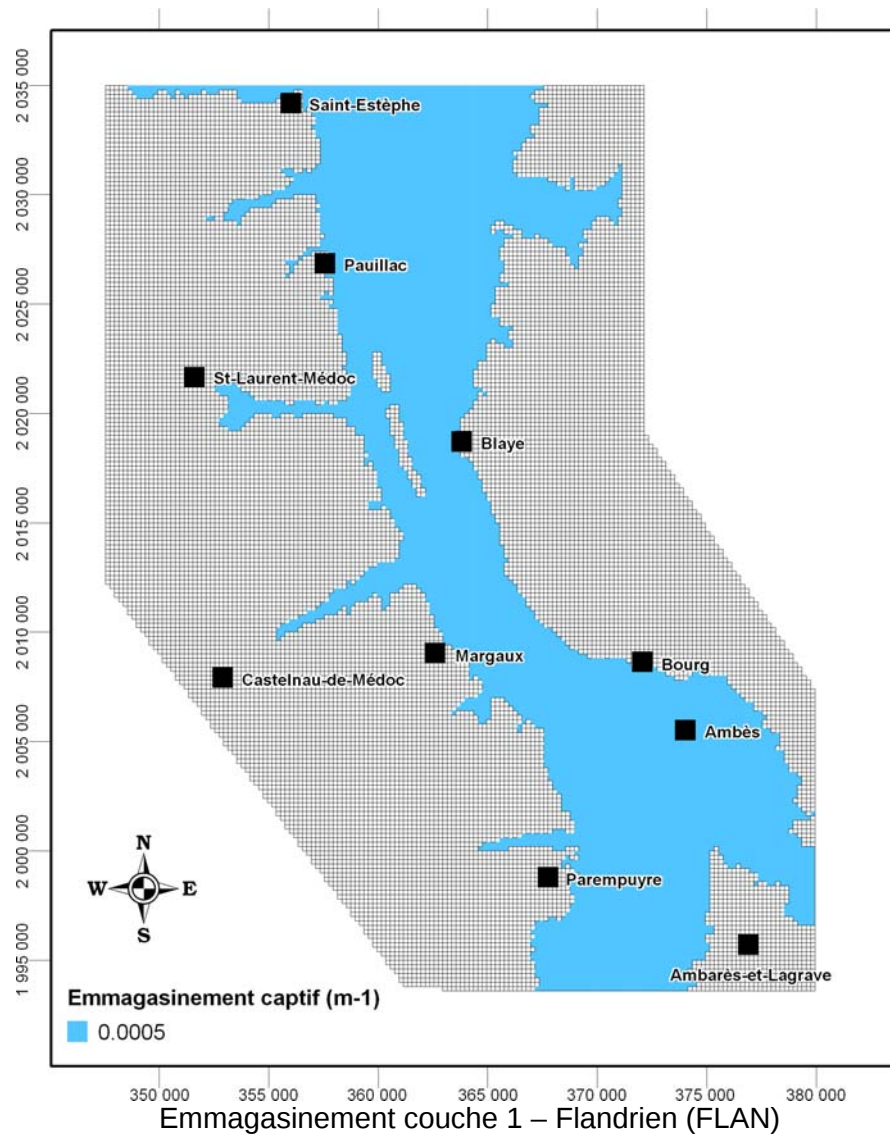


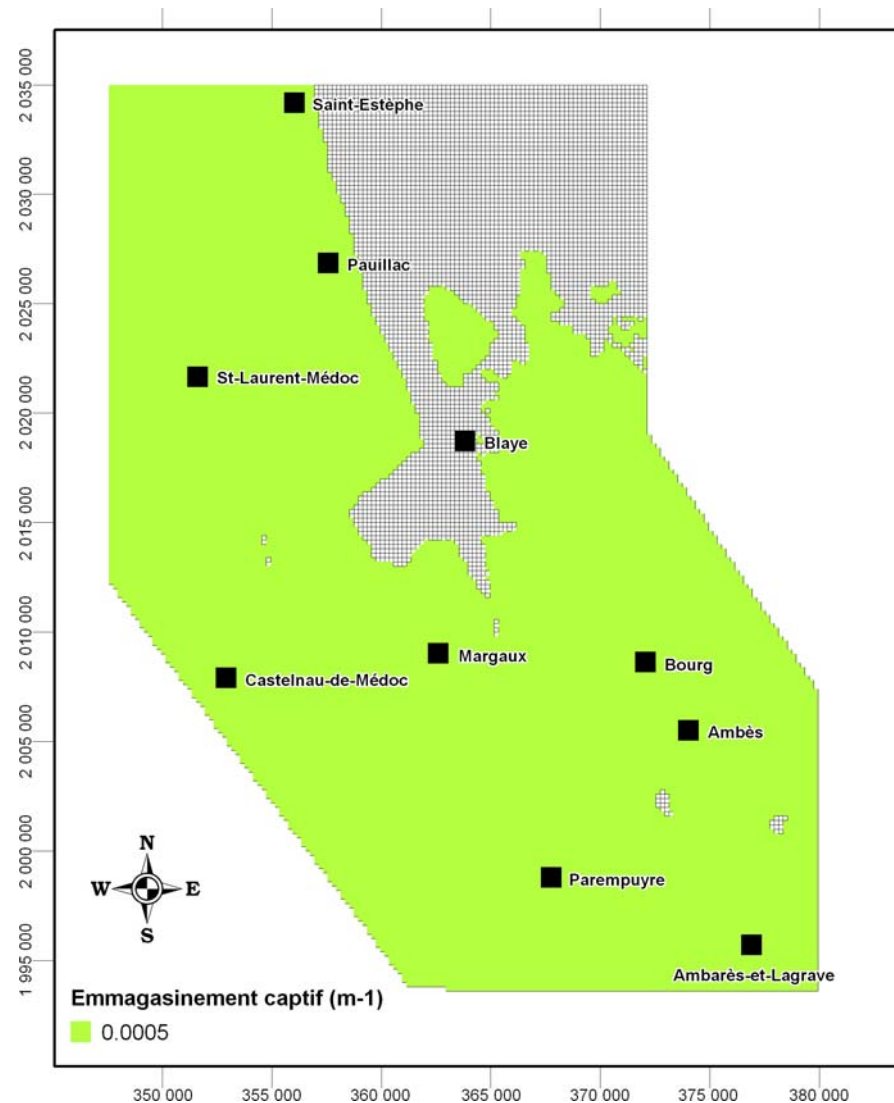
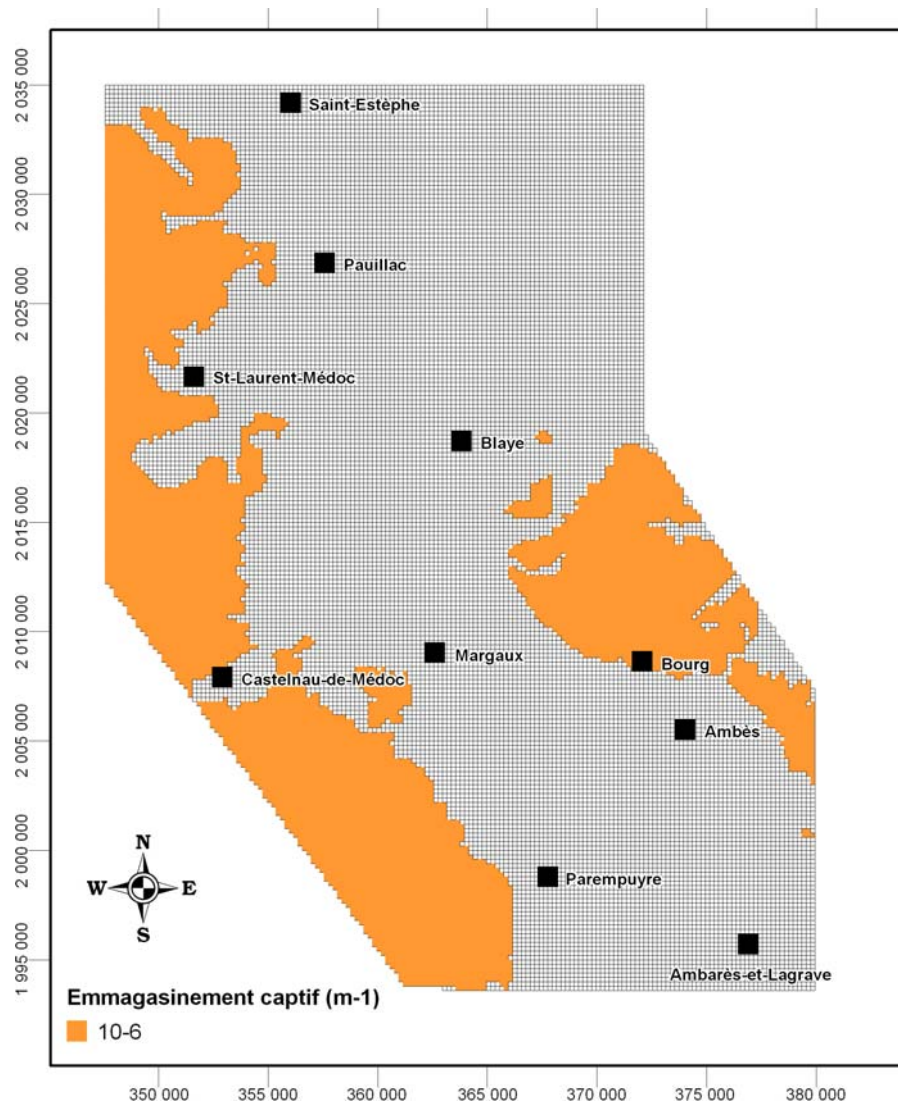
Perméabilité couche 4 – Eponte Eocène Supérieur (EPES)

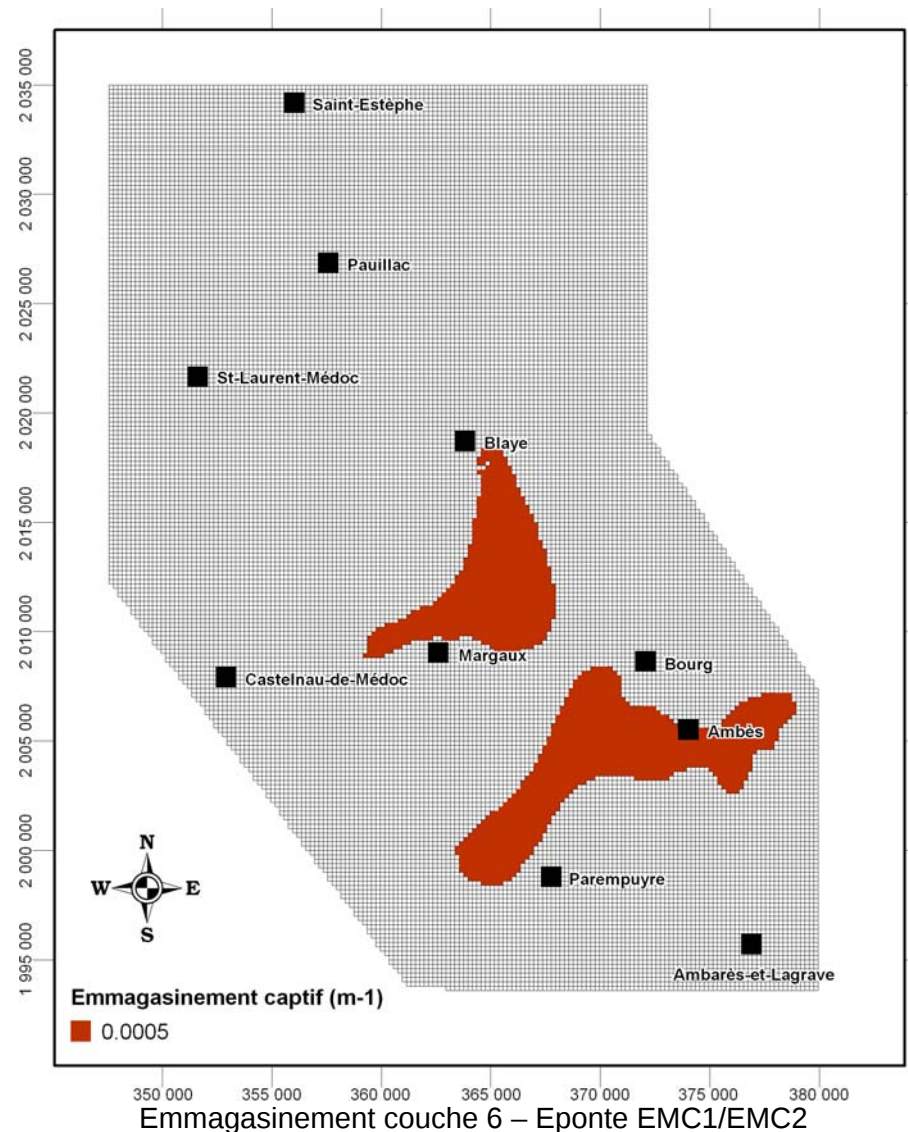
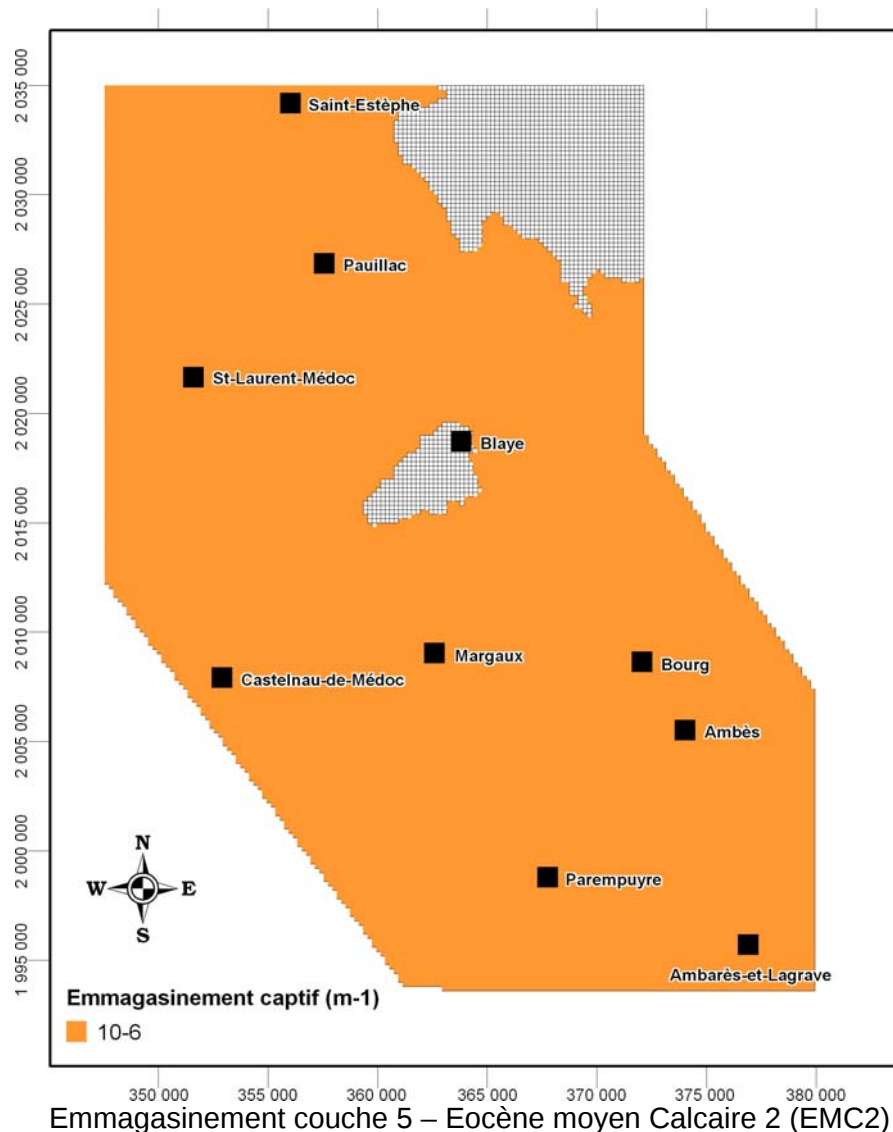


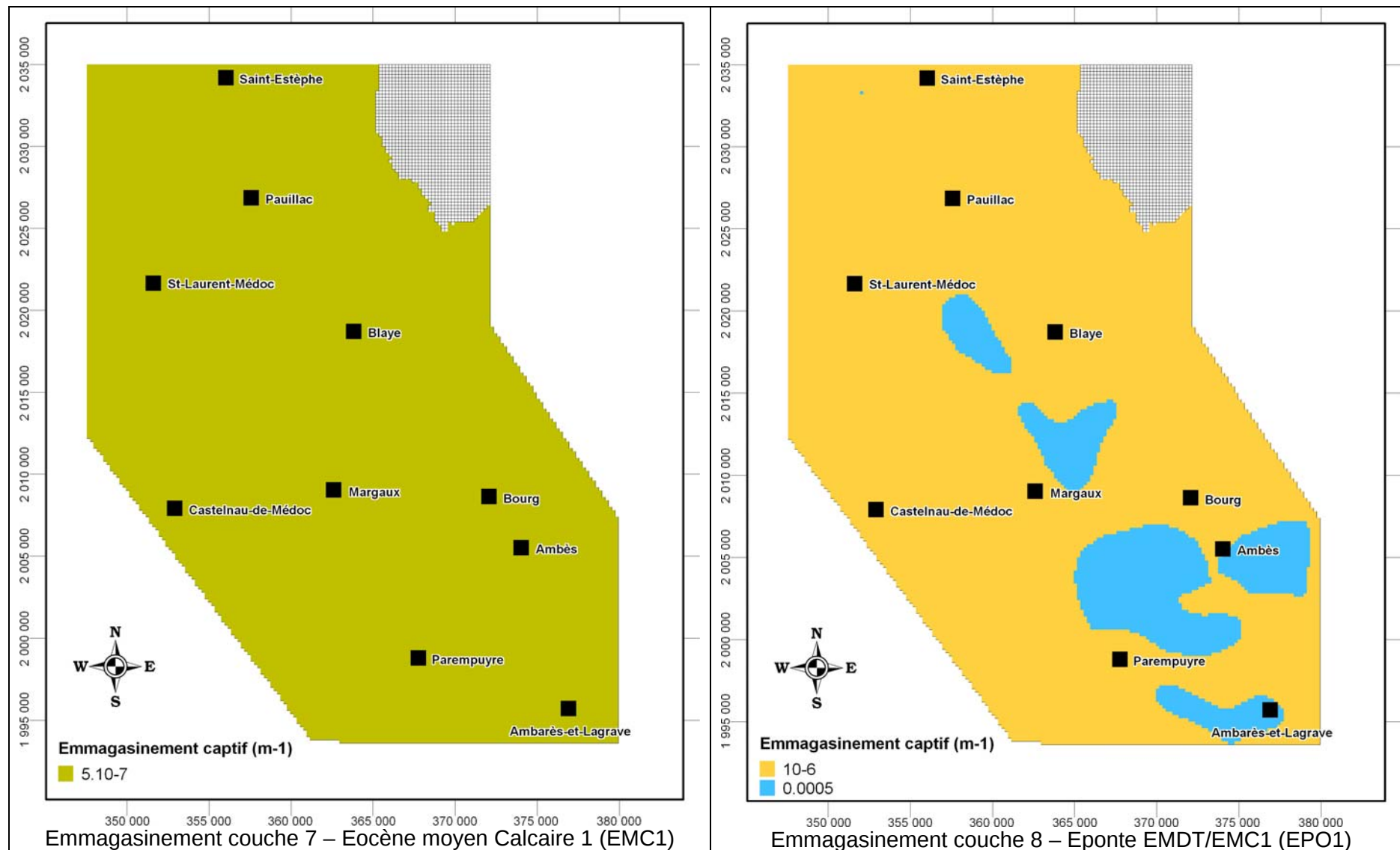


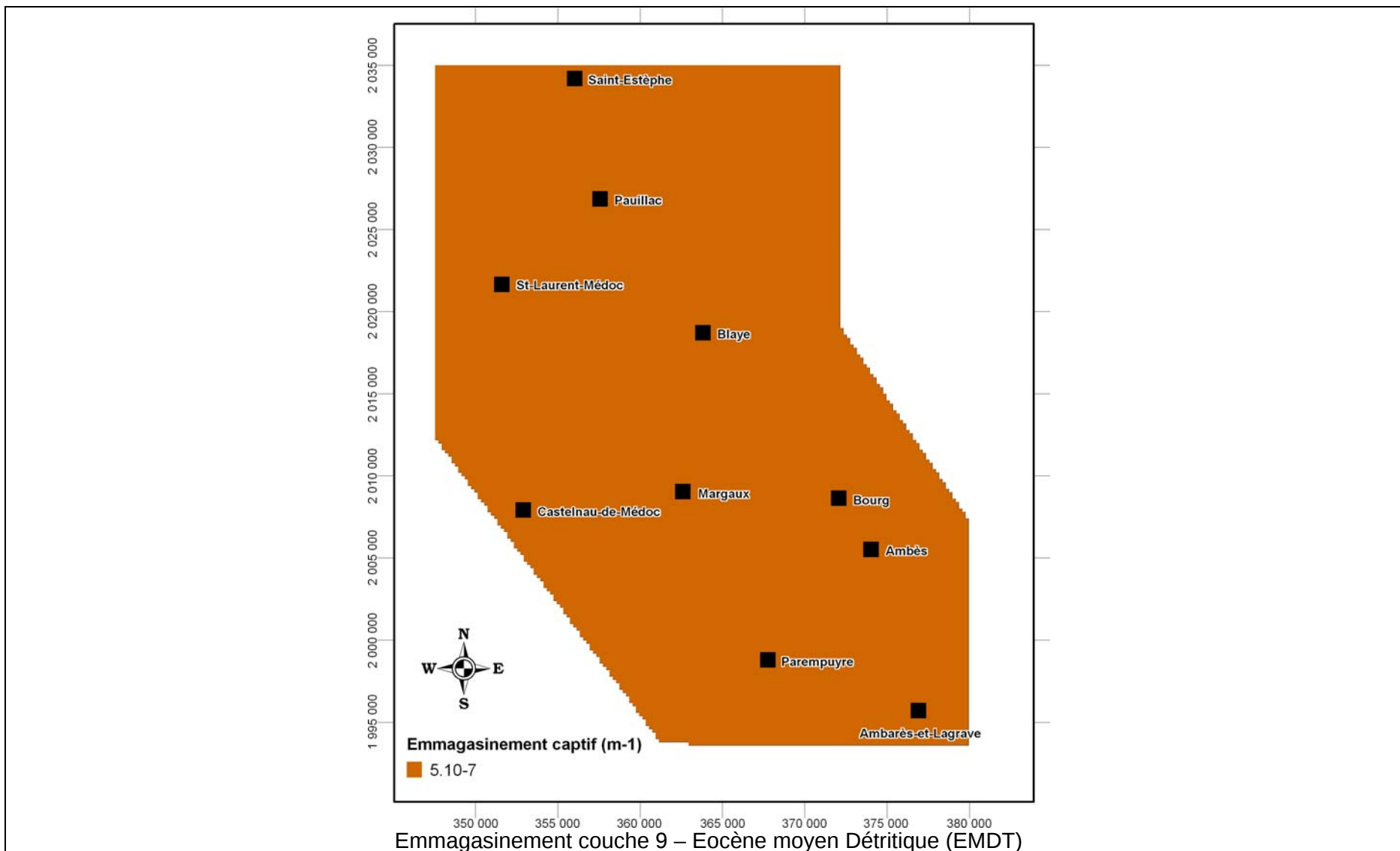














Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

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

Service Géologique Régional Aquitaine

Parc Technologique Europarc
24, Avenue Léonard de Vinci
33600 – Pessac - France
Tél. : 05 57 26 52 70