Document public

SAGE Nappes profondes de Gironde
Atlas des zones à risques

BRGM/RP-53756-FR
Novembre 2005

Document public

SAGE Nappes profondes de Gironde
Atlas des zones à risques

BRGM/RP-53756-FR
Novembre 2005

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2005 05 EAUF 10

P. Corbier, J.P. Capdeville, N. Pedron, J.P. Platel et A. Winckel
avec la collaboration de
B. Lopez

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : B. MAUROUX	Nom : J. DUBREUILH
Date :	Date :
Signature :	Signature **:**

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

Mots clés : bassin d'Arcachon, Crétacé, dénoyage, Entre-deux-Mers, Eocène, estuaire, « bourrelet », crête, Gironde, contamination, salinisation, minéralisation, Miocène, modélisation hydrodynamique, Oligocène, paléogéographie, piézométrie, pompages, qualité, réseaux, risques, SAGE, vulnérabilité

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : Corbier P., Capdeville J.P., Pedron N., Platel J.P., Winckel A., avec la collaboration de Lopez B. (2005) - SAGE Nappes profondes de Gironde – Atlas des zones à risques, 180 pages, 82 illustrations, 4 annexes.

© BRGM, 2005, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

La réalisation de l'Atlas des zones à risques, prévue par la mesure 3-10 des « Orientations du SAGE », a permis d'établir un bilan des connaissances sur 5 zones caractérisées par une problématique hydrogéologique.

Chaque zone (à l'exception de celles de « l'Estuaire » et du « Bourrelet » qui ont été regroupées) a fait l'objet d'une description géologique et hydrogéologique. Les aspects théoriques liés à la problématique et l'état des connaissances par rapport à l'aléa ont ensuite été présentés. Lorsque cela a été possible, des cartes de vulnérabilité et de risques ont été proposées. En dernier lieu, un bilan des prélèvements et un inventaire des points de mesure ont été réalisés.

Au final, les investigations menées ont permis de mettre en évidence que :

- des risques de salinisation existaient dans la zone de « l'Estuaire » et du « Bourrelet » mais qu'ils étaient davantage liés à la présence d'eaux fossiles saumâtres ou salées contenues dans les terrasses sous-flandriennes qu'à celles de l'estuaire actuel.

- le risque d'augmentation de la minéralisation des eaux issues de l'Eocène de l'Entre-Deux-Mers était lié à la présence de faciès évaporitiques dans l'Eocène moyen et l'Eocène supérieur mais que ce risque n'était pas gérable de façon globale.

- le risque d'intrusion d'eaux salées dans les aquifères profonds du bassin d'Arcachon ne concernait que l'aquifère de l'Helvétien mais que cet aquifère n'était pas contaminé à l'aplomb du bassin.

- les risques de dénoyage de l'aquifère oligocène étaient liés à l'augmentation des pompages, qu'ils concernaient principalement le secteur de Saucats-Léognan et dans une moindre mesure, celui de Mérignac et que la superficie dénoyée entre 1980 et 2004 représentait 60 km^2 environ.

Le bilan des prélèvements a, quant à lui, mis en évidence de grosses disparités entre les zones du « Bourrelet », de « l'Estuaire », du Bassin d'Arcachon, de l'Oligocène bordelais et du « Domaine minéralisé » avec des volumes moyens annuels respectifs de 1,4, 5, 11, 70 et 75 millions de m^3 sur la période 1999-2004.

Les investigations menées ont aussi mis en évidence un manque d'éléments de référence pour assurer la gestion des risques précédemment mentionnés.

La conclusion du rapport précise les études qui pourraient être mises en œuvre pour améliorer l'état des connaissances sur 4 des 5 zones identifiées et ainsi assurer une gestion plus cohérente des risques identifiés.

Sommaire

1. Introduction 13

2. Contexte géologique 17

3. Zones de « l'Estuaire » et du « Bourrelet » 23

3.1. PROBLEMATIQUE ET LIMITES DES ZONES D'ETUDE 23

3.2. DESCRIPTION GEOLOGIQUE 23
3.2.1. Lithostratigraphique et dynamique des dépôts 23
3.2.2. Evolution structurale du secteur 29

3.3. DESCRIPTION HYDROGEOLOGIQUE 33
3.3.1. Identification des réservoirs et de leurs épontes 33
3.3.2. Description détaillée de l'aquifère concerné par l'aléa 36

3.4. PROBLEMATIQUE 41
3.4.1. Historique 41
3.4.2. Aspects théoriques 43
3.4.3. Etat des connaissances par rapport à l'aléa 47

3.5. DESCRIPTION DE LA VULNERABILITE 54

3.6. EVALUATION DU RISQUE 56

3.7. DESCRIPTION DES POINTS DE MESURE ET DES USAGES 59
3.7.1. Zone de l'estuaire 59
3.7.2. Zone du « bourrelet » 61

3.8. BILAN ET PERSPECTIVES 69

4. Zone du domaine minéralisé 71

4.1. PROBLEMATIQUE ET LIMITES DE LA ZONE D'ETUDE 71

4.2. DESCRIPTION GEOLOGIQUE 71
4.2.1. Eocène inférieur 71
4.2.2. Eocène moyen 72
4.2.3. Eocène supérieur 73

4.3. DESCRIPTION HYDROGEOLOGIQUE 79

4.3.1. Identification des réservoirs 79
4.3.2. Description détaillée de l'aquifère concerné par l'aléa 80

4.4. PROBLEMATIQUE 83
4.4.1. Aspects théoriques 83
4.4.2. Etat des connaissances par rapport à l'aléa 86

4.5. DESCRIPTION DE LA VULNERABILITE 100

4.6. EVALUATION DU RISQUE 102

4.7. DESCRIPTION DES POINTS DE MESURE ET DES USAGES 102
4.7.1. Prélèvements 103
4.7.2. Autres points de mesure 103

4.8. BILAN ET PERSPECTIVES 104

5. Zone du bassin d'Arcachon 109

5.1. PROBLEMATIQUE ET LIMITES DE LA ZONE D'ETUDE 109

5.2. DESCRIPTION GEOLOGIQUE 111
5.2.1. Le Crétacé 111
5.2.2. Le Paléocène 111
5.2.3. L'Eocène 112
5.2.4. L'Oligocène 112
5.2.5. Le Miocène 113
5.2.6. Le Plio-Quaternaire 113
5.2.7. Structure 113

5.3. DESCRIPTION HYDROGEOLOGIQUE : 116
5.3.1. Identification des réservoirs présents dans la zone d'étude 116
5.3.2. Description détaillée de l'aquifère concerné par l'aléa 118

5.4. PROBLEMATIQUE 126
5.4.1. Aspects théoriques 126
5.4.2. Etat des connaissances par rapport à l'aléa 129

5.5. DESCRIPTION DE LA VULNERABILITE 133

5.6. EVALUATION DU RISQUE 133

5.7. DESCRIPTION DES POINTS DE MESURE ET DES USAGES 133
5.7.1. Prélèvements 134
5.7.2. Autres points de mesure 135

5.8. BILAN ET PERSPECTIVES 139

6. Zone de l'Oligocène bordelais.....141

6.1. PROBLEMATIQUE ET LIMITES DE LA ZONE D'ETUDE 141

6.2. DESCRIPTION GEOLOGIQUE.....141
6.2.1. L'Oligocène inférieur basal (Rupélien basal).....141
6.2.2. L'Oligocène inférieur (Rupélien).....141
6.2.3. L'Oligocène supérieur (Chattien) et le Miocène inférieur (Aquitanien basal)144
6.2.4. Evolution structurale du secteur 146

6.3. DESCRIPTION HYDROGEOLOGIQUE.....149
6.3.1. Identification des réservoirs.....149
6.3.2. Description détaillée de l'aquifère.....150

6.4. PROBLEMATIQUE.....156
6.4.1. Aspects théoriques.....159
6.4.2. Etat des connaissances par rapport à l'aléa.....160

6.5. DESCRIPTION DE LA VULNERABILITE.....166

6.6. EVALUATION DU RISQUE 166

6.7. DESCRIPTION DES POINTS DE MESURE ET DES USAGES 168
6.7.1. Prélèvements.....168
6.7.2. Autres points de mesure.....169

6.8. BILAN ET PERSPECTIVES 173

7. Conclusion 175

Liste des illustrations

Illustration 1 : Zones géographiques du SAGE 13

Illustration 2 : Aquifères du SAGE 14

Illustration 3 : Carte géologique simplifiée du département de la Gironde ……...21

Illustration 4 : Carte géologique en écorché sous les alluvions quaternaires du secteur de l'Estuaire de la Gironde 24

Illustration 5 : Carte géologique en écorché sous les alluvions quaternaires du secteur du « Bourrelet » 25

Illustration 6 : Superposition des terrains de l'Eocène moyen dans le secteur de l'estuaire de la Gironde..... 27

Illustration 7 : Coupes transversales dans l'estuaire de la Gironde 31

Illustration 8 : Coupes transversales dans la zone du « bourrelet » 32

Illustration 9 : Coupe de corrélation des réservoirs de l'Eocène moyen passant par les différents piézomètres de contrôle ……..……..34

Illustration 10 : Piézométrie de l'Eocène moyen dans le secteur de l'estuaire de la Gironde (étiage 2003)..... 38

Illustration 11 : Carte des isohypses du toit du réservoir de l'Eocène moyen..... 39

Illustration 12 : Carte piézométrique établie à partir des mesures effectuées fin 2004 40

Illustration 13 : Teneurs en sel de l'estuaire de la Gironde 44

Illustration 14 : Schémas théoriques de fonctionnement dans la zone de l'estuaire et du bourrelet..... 46

Illustration 15 : Evolution des niveaux de la nappe éocène sur les différents piézomètres du réseau PZEM pour MHc 70……..……..……..…….49

Illustration 16 : Evolution des teneurs en sel sur PZEM1, PZEM 2 et PZEM 3..... 50

Illustration 17 : Représentation schématique du processus de contamination dans le secteur de Queyzans..... 51

Illustration 18 : Evolution de la pression de la nappe de l'Eocène moyen au droit de la crête piézométrique de Cussac-Blaye depuis la fin du 19ème siècle 53

llustration 19 : Evolution sur 6 ans des niveaux des nappes de l'Eocène moyen dans le secteur de crête piézométrique (Piézomètres PZEM 5 et PZEM 6 de Cussac) 53

Illustration 20 : Carte de vulnérabilité à la pénétration de chlorures dans l'aquifère de l'Eocène moyen 55

Illustration 21 : Carte du risque de salinisation dans les nappes de l'Eocène moyen 57

Illustration 22 : Evolution des teneurs en chlorures sur 3 forages 58

Illustration 23 : Bilan volumique sur la zone « Estuaire»..... 60

Illustration 24 : Bilan volumique sur la zone « Bourrelet » 62

Illustration 25 : Synthèse des données concernant les prélèvements effectués sur la zone “Estuaire” 63

Illustration 26 : Localisation des points de mesure des niveaux d’eau sur la zone « Estuaire » 64

Illustration 27 : Localisation des points de mesure de la qualité sur la zone "Estuaire" 65

Illustration 28 : Synthèse des données concernant les prélèvements effectués sur la zone du “Bourrelet” 66

Illustration 29 : Localisation des points de mesure des niveaux d’eau sur la zone du “Bourrelet” 67

Illustration 30 : Localisation des points de mesure de la qualité sur la zone du "Bourrelet" 68

Illustration 31 : Localisation des faciès évaporitiques et des mangroves aux différentes époques de l’Eocène 75

Illustration 32 : Nature des dépôts aux différentes époques de l’Eocène 76

Illustration 33 : Log synthétique de la carte géologique Coutras à 1/50000 77

Illustration 34 : Coupe synthétique de l’Eocène Nord-Aquitain entre la Gironde et le Lot 78

Illustration 35 : Caractéristiques géométriques de l’aquifère éocène issues du Modèle Nord-Aquitain 81

Illustration 36 : Piézométrie de la nappe éocène pour l'année 2003 84

Illustration 37 : Résultats de l’ACP réalisée sur les 523 analyses complètes des eaux de la nappe de l'Eocène moyen 89

Illustration 38 : Conductivité des eaux et paléogéographie à la fin du Cuisien (Eocène inférieur) 90

Illustration 39 : Teneurs en ions majeurs (chlorures, sodium, sulfates et calcium) sur fond paléogéographique à la fin du Cuisien (Eocène inférieur) 91

Illustration 40 : Teneurs en fer et en fluor sur fond paléogéographique à la fin du Cuisien (Eocène inférieur) 93

Illustration 41 : Répartition des points sélectionnés dans le cadre de l’étude de l’évolution de la minéralisation 95

Illustration 42 : Iillustration des différents types d’évolutions observés d’après Corbier *et al.,* 2005 98

Illustration 43 : Localisation des 12 points sélectionnés pour faire l’objet d’une caractérisation chimique 99

Illustration 44 : Bilan volumique sur la zone du domaine minéralisé 103

lllustration 45 : Synthèse des données concernant les prélèvements effectués sur la zone du domaine minéralisé 105

Illustration 46 : Localisation des points de mesure des niveaux piézométriques sur la zone du domaine minéralisé” 106

Illustration 47 : Localisation des points de mesure de la qualité sur la zone du domaine minéralisé 107
Illustration 48 : Limite de la zone d'étude 109
Illustration 49 : Succession et nature des formations dans le secteur du bassin d'Arcachon 110
Illustration 50 : Esquisse structurale du toit du Crétacé dans le secteur d'Arcachon 114
Illustration 51 : Coupe nord-sud du bassin de Parentis 115
Illustration 52 : Coupes géologiques dans le secteur du Bassin d'Arcachon 119
Illustration 53 : Limites des transgressions aquitanienne et helvétienne 122
Illustration 54 : Géométrie de l'aquifère de l'Helvétien 121
Illustration 55 : Caractéristiques hydrogéologiques de l'Helvétien 124
Illustration 56 : Schéma théorique de l'intrusion d'un biseau salé dans une nappe captive 127
Illustration 57 : Coupe schématique est-ouest de l'aquifère helvétien à l'ouest du Bassin d'Arcachon 130
Illustration 58 : Schéma illustrant le calcul du débit de la nappe 130
Illustration 59 : Coupe schématique est-ouest de l'aquifère helvétien (Miocène supérieur) à l'ouest du Bassin d'Arcachon et représentation des positions calculées du biseau salé 130
Illustration 60 : Bilan volumique sur la zone « Arcachon » 135
Illustration 61 : Synthèse des données concernant les prélèvements effectués sur la zone « Arcachon » 136
Illustration 62 : Localisation des points de mesure des niveaux piézométriques sur la zone "Arcachon" 137
Illustration 63 : Localisation des points de mesure de la qualité sur la zone « Arcachon » 137
Illustration 64 : Localisation du secteur d'étude 142
Illustration 65 : Coupe lithostratigraphique synthétique de l'Oligocène et de ses terrains de recouvrement dans la région bordelaise 143
Illustration 66 : Faciès du membre B de l'Oligocène 145
Illustration 67 : Coupes des terrains oligocènes et miocènes au Sud de Bordeaux 147
Illustration 68 : Nature de l'aquifère oligocène en fonction de la distance à la Garonne 150
Illustration 69 : Caractéristiques géométriques et piézométrie 2003 de l'aquifère de l'Oligocène 151
Illustration 70 : Altitude du toit (schéma de gauche) et épaisseur (schéma de droite) de l'aquifère oligocène 152
Illustration 71 : Localisation des points de prélèvement actuels et piézométrie en 1999 154
Illustration 72 : Evolution de la piézométrie de la nappe des calcaires de l'Oligocène 155
Illustration 73 : Evolution des prélèvements sur les sources de la zone d'étude 155

Illustration 74 : Evolution des volumes prélevés sur les forages AEP situés entre Léognan et Saucats ……..156

Illustration 75 : Oligocène – Différence entre la piézométrie de l'année 2000 et le toit du réservoir dans la zone d'extension de l'éponte supérieure (Chattien, Aquitainien basal) et présentation de quelques chroniques piézométriques représentatives.....163

Illustration 76 : Evolution du dénoyage de l'aquifère oligocène entre 1980 et 2004 164

Illustration 77 : Coupes hydrogéologiques schématiques et piézométries (1980, 1989 et 2004) 165

Illustration 78 : Carte d'évaluation simplifiée du risque à l'aléa « dénoyage » 167

Illustration 79 : Bilan volumique sur la zone « Sud Bordeaux ».....169

Illustration 80 : Synthèse des données concernant les prélèvements effectués sur la zone « Sud Bordeaux ».....170

Illustration 81 : Localisation des points de mesure des niveaux d'eau sur la zone "Sud Bordeaux".....171

Illustration 82 : Localisation des points de mesure de la qualité sur la zone « Sud Bordeaux ».....172

Liste des annexes

Annexe 1 : Cartographie des points de prélèvement

Annexe 2 : Caractéristiques des points de prélèvement et volumes prélevés sur la période 2000-2004

Annexe 3 : Inventaire des points de suivi quantitatif

Annexe 4 : Inventaire des points de suivi qualitatif

1. Introduction

Les Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) sont des instruments de gestion et de planification mis en place pour concilier l'utilisation des ressources en eau et la protection des milieux aquatiques.

Le SAGE "Nappes profondes de Gironde" a été approuvé par arrêté préfectoral en novembre 2003 après une phase préliminaire ayant identifié une dégradation qualitative et quantitative de la nappe éocène (évolution de la baisse piézométrique sous l'agglomération bordelaise notamment) et une dépendance du département vis-à-vis des nappes profondes pour la satisfaction de ses besoins en eau.

A l'échelle du département, un découpage fondé sur des limites physiques (sous-bassins hydrogéologiques) et ajusté aux frontières administratives a permis de définir 5 zones géographiques et 18 unités de gestion (cf. illustration 1).

Les aquifères concernés par le SAGE correspondent aux nappes du Miocène, de l'Oligocène, de l'Eocène et du Crétacé qui, à eux seuls, permettent de couvrir 98% des besoins en eau potable de la Gironde (cf. illustration 2).

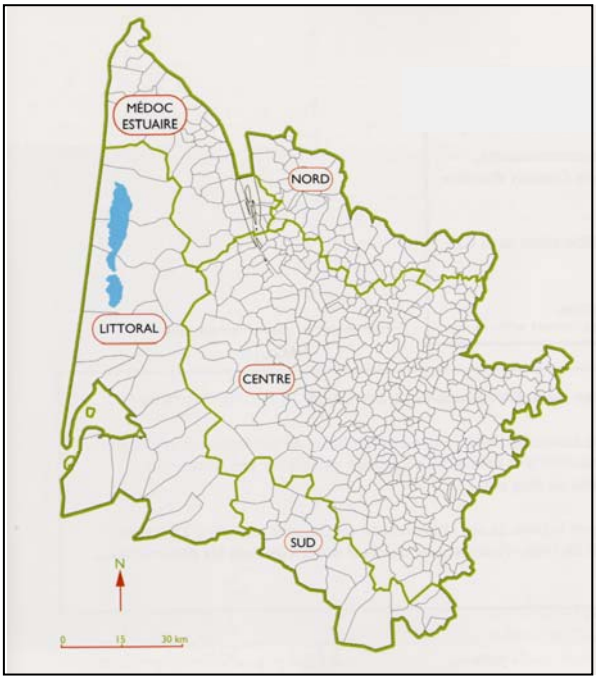


Illustration 1 : Zones géographiques du SAGE

(d'après "Les orientations de gestion du SAGE Nappes Profondes de Gironde")

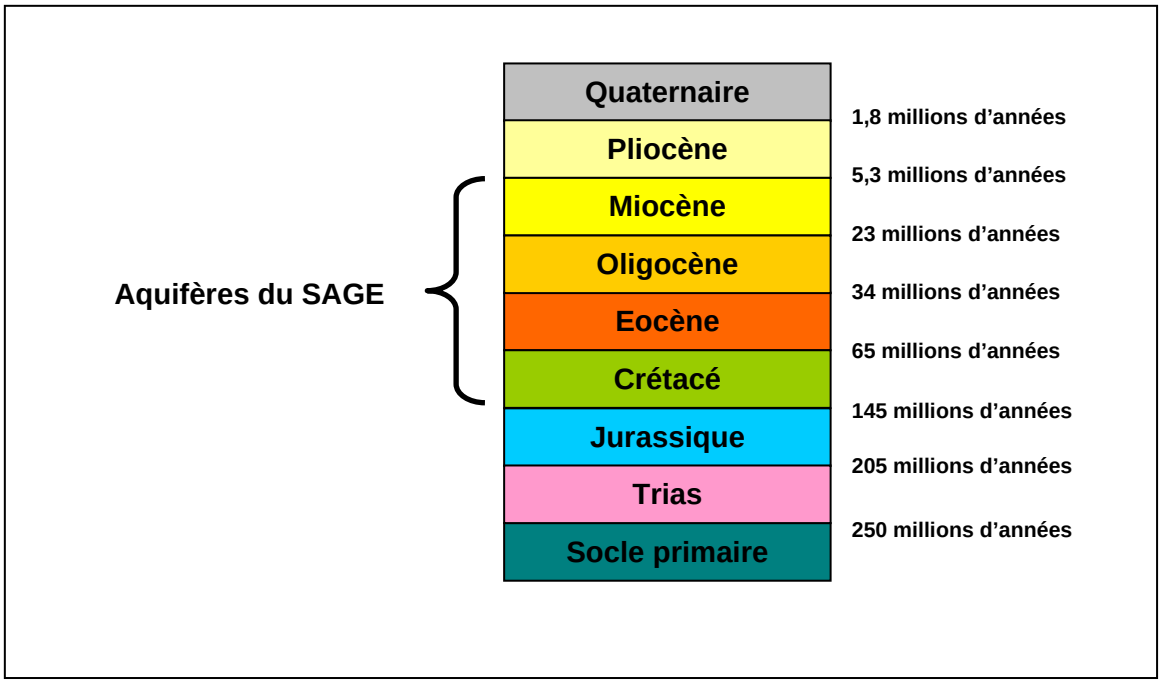


Illustration 2 : Aquifères du SAGE

Le document « Orientations du SAGE » définit un certain nombre de mesures visant à améliorer la gestion quantitative et qualitative des ressources. La mesure 3-10 prévoit en particulier la réalisation, dans un délai de un an après l'approbation du document, d'un atlas des zones à risques qui devra préciser pour chacune des zones identifiées :

- la description du risque et des mécanismes qui y contribuent,
- l'extension spatiale de la zone,
- les points de prélèvement concernés et les usages qui y correspondent,
- la liste des communes concernées,
- le réseau de points de contrôle de la zone,
- les valeurs de piézométrie de crise (PCR) en chacun de ces points,
- les valeurs de piézométrie objectif d'étiage (POE) déclenchant un plan d'intervention.

C'est dans ce contexte que le SMEGREG (Syndicat Mixte d'Etudes pour la Gestion de la Ressource en Eau du Département de la Gironde) a demandé au BRGM de réaliser l'atlas des zones à risques sans toutefois traiter les problèmes de piézométrie de crise et objectif d'étiage qui seront abordés dans une deuxième phase.

La première phase doit en fait permettre de caractériser 5 zones identifiées comme à risques et correspondant :

- à l'estuaire de la Gironde de la Pointe de Grave jusqu'à Lamarque (risque de contamination de l'aquifère éocène par des eaux saumâtres ou salines),
- à la zone dite du « bourrelet piézométrique » centrée sur l'axe Blaye/Cussac (risque de contamination de l'aquifère éocène par des eaux saumâtres ou salines),
- à la zone dite du « domaine minéralisé » située dans l'Entre-Deux-Mers (risque d'augmentation de la minéralisation des eaux de la nappe de l'Eocène inférieur à moyen),
- au pourtour du bassin d'Arcachon (risque de contamination des aquifères profonds par des eaux salines),
- à la rive gauche de la Garonne entre Bordeaux et Langon (risque de dénoyage de l'aquifère oligocène).

Après une description du contexte géologique général de la Gironde (chapitre 2), chaque zone (à l'exception de « l'estuaire » et du « bourrelet » qui ont été regroupées) fait l'objet d'un chapitre comportant :

1) une description de la zone d'étude et de la problématique,
2) une description du contexte géologique,
3) une description du contexte hydrogéologique (identification des réservoirs et description détaillée de l'aquifère concerné par l'aléa),
4) une présentation des aspects théoriques et de l'état des connaissances par rapport à la problématique,
5) une cartographie de la vulnérabilité de la zone,
6) une cartographie du risque et une estimation des délais d'apparition,
7) une description des points de prélèvement et des autres points de mesure,
8) un bilan.

2. Contexte géologique

Le département de la Gironde qui constitue le territoire d'application du SAGE se situe dans la partie septentrionale du bassin d'Aquitaine dont l'évolution géodynamique peut être résumée de la façon suivante :

• Période hercynienne

Les dépôts du Cambrien et du Dévonien sont en majorité d'origine marine avec quelques venues terrigènes et volcano-sédimentaires.

L'examen des isobathes représentant le toit du socle montre un enfoncement depuis le Massif central vers les Pyrénées. Le socle se trouve à 1500 mètres de profondeur au nord du département de la Gironde alors qu'il atteint des profondeurs de l'ordre de 7000 mètres à Parentis, au nord-ouest du département des Landes.

• Individualisation du bassin au Permo-Trias (245 Ma)

En Aquitaine, le bassin prend forme à la suite des importantes cassures qui commencent à morceler la Pangée en grands continents.

La réponse sédimentaire à la phase d'extension du début de l'ère secondaire se traduit par une séquence de comblement (Curnelle, 1983). Les parties les plus déprimées recueillent en effet des venues détritiques intermittentes, plus ou moins grossières, de type cônes alluviaux et plaines d'épandage, qui se mettent en place sous un climat semi-aride tandis que latéralement, des faciès évaporitiques s'organisent.

Un épisode continental, scellé par des argiles bariolées, fait place à un processus lagunaire durant le début du Lias, qui dans un premier temps va déposer des calcaires dolomitiques (dolomie de Carcans) puis accumuler une importante série salifère, la zone à anhydrite.

L'ampleur de la tension crustale est encore telle que certains accidents se propagent jusqu'à la lithosphère, induisant des remontées d'ophite tholéitique ou de tuf volcanique à l'intérieur des couches évaporitiques.

Le département de la Gironde se situe au nord des dépôts salifères du Trias, la partie septentrionale du département n'enregistrant d'ailleurs pas de sédimentation triasique.

• Mise en place de la plate-forme carbonatée jurassique

Les conditions évaporitiques perdurent jusqu'au Lias inférieur puis une plateforme carbonatée se met en place suite à un contexte de mer ouverte à l'ouest (proto-atlantique).

Une barrière oolitique, graveleuse et récifale se développe d'Angoulême à Tarbes et vient séparer un domaine de plate-forme externe à l'ouest, d'une plate-forme interne à l'est. Le territoire girondin se situe alors à la limite de la zone récifale et de la plate-forme externe.

• **Régression**

Au Jurassique supérieur, une zone de haut fond de direction N110 (le Seuil des Landes) se met en place et va séparer deux sous-bassins (Parentis et Adour-Mirande) aux taux de subsidence différents.

La différence de vitesse d'enfoncement des deux sous-bassins va occasionner des dépôts de plateforme externe sur la partie nord (Parentis) et une sédimentation à tendance plus confinée dans la partie sud (Adour-Mirande).

La période qui précède l'ouverture de l'Atlantique Nord au Crétacé inférieur (-110 millions d'années) est marquée par une régression marine. L'exondation qui dure pendant 40 millions est à l'origine de l'altération et de la karstification des couches jurassiques nord-aquitaines. La sédimentation marine se trouve alors restreinte aux deux zones déprimées déjà citées.

• **Mise en place de la plate-forme crétacée**

A l'échelle de la région, la transgression marine du Crétacé inférieur submerge progressivement la topographie pré-existante et permet l'installation d'une barrière récifale sur le tracé du Seuil des Landes et le dépôt d'une épaisse sédimentation albo-aptienne au niveau du sillon pyrénéen.

La surcharge apportée par l'accumulation de ces turbidites, ajoutée aux contraintes structurales associées à l'ouverture du golfe de Gascogne, favorise des remontées diapiriques en Chalosse et au sud des Landes de Gascogne (Mauriaud, 1987).

Au Crétacé supérieur, le passage d'une phase extensive à une phase compressive favorise le développement d'une paléogéographie constituée du nord au sud par :

- une première plate-forme carbonatée sur laquelle se trouve le territoire correspondant au département de la Gironde,
- un bassin flexural en voie de remplissage par le flysch au pied des Pyrénées,
- une seconde plate-forme carbonatée, installée sur le substratum paléozoïque, sensiblement au niveau de la haute chaîne pyrénéenne actuelle.

• **Comblement cénozoïque**

L'installation et le renforcement du cycle compressif entraîne de nouvelles modifications paléogéographiques avec la mise en place de dépôts continentaux à l'est du sillon pyrénéen et de dépôts marins sur la façade occidentale.

Dès le début du Tertiaire, le climat chaud et humide favorise et amplifie les phénomènes d'altération et de karstification au niveau des surfaces exondées.

La tectogenèse des Pyrénées relance les phénomènes d'érosion. Les produits d'altération du domaine carbonaté vont alors s'ajouter à ceux provenant du démantèlement des reliefs cristallins ou métamorphiques du Massif central et de la Montagne noire, pour participer au comblement du bassin.

Le domaine marin est alors installé à l'ouest d'une ligne passant par Royan, Langon et Mirande. L'anticlinal de Villagrains–Landiras au nord-ouest et plus au sud ceux de Roquefort, Castéra-Verduzan et de Muret ressortent sous forme de terres émergées.

Au Cuisien (Eocène inférieur), des franges de colonisations végétales de type mangrove se mettent en place à l'interface eau douce - eau salée et marquent la limite de la partie aérienne des édifices deltaïques.

Pendant l'Éocène moyen le littoral adopte un tracé plus rectiligne qu'auparavant. L'île de Villagrains-Landiras perdure alors que celle de Muret disparaît. Les surfaces jusque là colonisées par la mangrove se réduisent considérablement, alors qu'une phase d'altération affecte les dépôts émergés.

Durant l'Éocène supérieur, les plissements anticlinaux qui ont enregistré les contraintes compressives pyrénéennes, sont peu à peu recouverts par les sédiments continentaux du complexe molassique, selon un processus de comblement d'avant-pays.

Au début de l'Oligocène, quelques réajustements favorisent l'avancée de plateformes marines dont la plus importante permet la mise en place du calcaire à astéries sur quasiment tout le département de la Gironde (Gayet, 1985).

Au Miocène basal, de vastes étendues lacustres et palustres permettent, l'édification des calcaires de l'agenais. Les faciès d'épandages fluvio-lacustres parviennent jusqu'en Gironde. Puis, deux autres pulsions marines interviennent : l'une à la base du Miocène (Marnes à Ostrea aginensis) et l'autre au sommet (Langhien - Serravallien).

Au Pliocène, des mouvements de faible amplitude verticale vont encore entraîner de légères flexures au sein des calcaires lacustres du Miocène moyen dans la partie sud de l'Aquitaine (Crouzel, 1957).

Les massifs bordiers fournissent du matériel détritique de démantèlement qui, par l'intermédiaire des distributaires, aboutit à la seule zone encore déprimée : les Landes-de-Gascogne (Dubreuilh *et al.,* 1995). Ces couloirs de transit détritiques seront mis à profit par le réseau fluviatile quaternaire lorsqu'il va se structurer et s'inscrire plus ou moins profondément dans le substratum en réponse aux nouvelles variations du niveau marin.

♦ ♦ ♦ ♦ ♦

L'agencement des terrains tel qu'il apparaît sur l'illustration 3 est directement hérité de l'évolution géodynamique complexe décrite précédemment et correspond à un système où :

- les couches les plus anciennes (Eocène, Oligocène) affleurent au nord et à l'est du département,
- les terrains miocènes n'affleurent quasiment que dans la partie sud-est du département,
- les terrains pliocènes occupent plus de la moitié du département.

Durant les 250 millions d'années qui se sont écoulés entre la période hercynienne et les derniers comblements cénozoïques, les conditions de dépôt ont constamment évolué, modifiant sans cesse la nature des sédiments qui constituent aujourd'hui le sous-sol du département.

Sur le plan vertical, il en résulte une géologie relativement variée où les faciès d'origine continentale alternent avec des faciès marins.

Sur le plan structural, le pendage général des couches est orienté vers le sud-ouest et le département de la Gironde se trouve encadré par deux structures anticlinales (la grande structure charentaise de Jonzac et l'antiforme de Villagrains-Landiras) qui amènent le Crétacé à l'affleurement.

Pour chaque zone à risques identifiée, le contexte géologique sera reprécisé en détails et les implications hydrogéologiques qui en découlent, exposées.

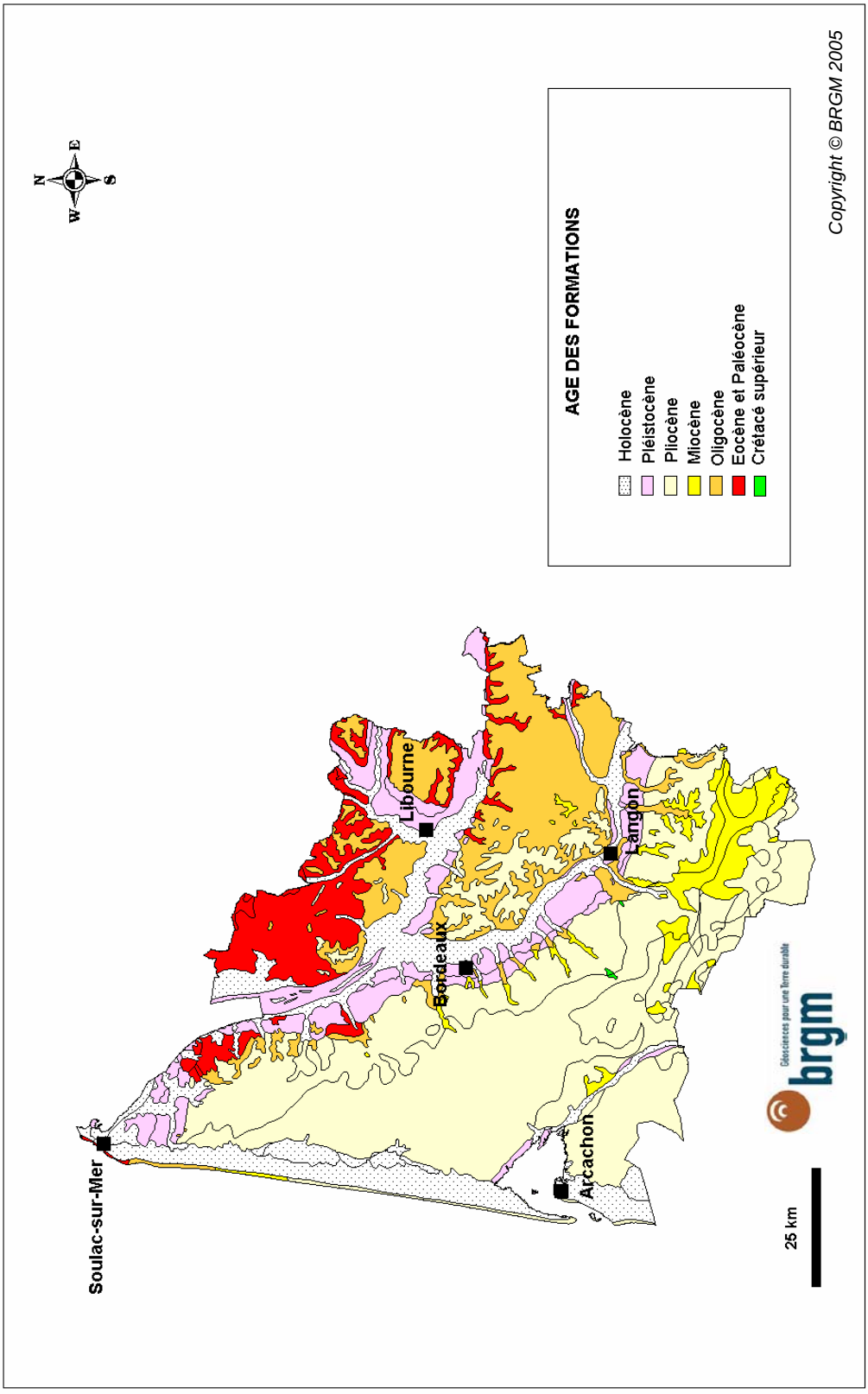


Illustration 3 : Carte géologique simplifiée du département de la Gironde

3. Zones de « l'Estuaire » et du « Bourrelet »

3.1. PROBLEMATIQUE ET LIMITES DES ZONES D'ETUDE

La problématique consiste à étudier les risques de contamination de l'aquifère de l'Eocène inférieur à moyen par des eaux saumâtres ou salées le long de l'estuaire de la Gironde, d'une part de la Pointe de Grave à Lamarque (zone « Estuaire ») et d'autre part, sur une zone centrée sur un axe Lamarque-Plassac (zone dite du « Bourrelet » en raison de la présence d'une crête piézométrique orientée SO-NE dans ce secteur).

Les données présentées dans ce chapitre sont issues des travaux de recherche qui sont menés depuis plusieurs années par le BRGM.

3.2. DESCRIPTION GEOLOGIQUE

3.2.1. Lithostratigraphique et dynamique des dépôts

Seuls les terrains affleurants sur les zones précédemment mentionnées seront décrits dans cette partie. Parmi tous les dépôts, les niveaux de l'Eocène moyen ont fait l'objet d'une description plus détaillée dans la mesure où la création et l'extension du réseau de piézomètres PZEM (cf. illustrations 4 et 5) a permis d'obtenir de nombreuses informations.

Crétacé supérieur

Les couches de la fin du Crétacé supérieur affleurent sur les coteaux de la rive droite de l'estuaire depuis St-Bonnet-sur-Gironde jusqu'à son embouchure (cf. illustrations 4 et 7).

Dans cette région, située sur le flanc occidental de l'anticlinal de Jonzac, les terrains crétacés présentent un pendage orienté vers l'ouest-sud-ouest et forment une série de falaises qui s'alignent sur près de 50 km (coupes 4 et 6 de l'illustration 7).

L'ensemble du Campanien est constitué par des calcaires bioclastiques jaunes très fossilifères (Campanien supérieur) surmontant une alternance de calcaires crayeux blancs, de calcaires marneux et de marnes verdâtres (Campanien inférieur et base du Campanien supérieur).

Il présente une épaisseur totale de 160 m et surmonte les terrains du Santonien supérieur qui n'apparaissent qu'à St-Dizant-du-Gua.

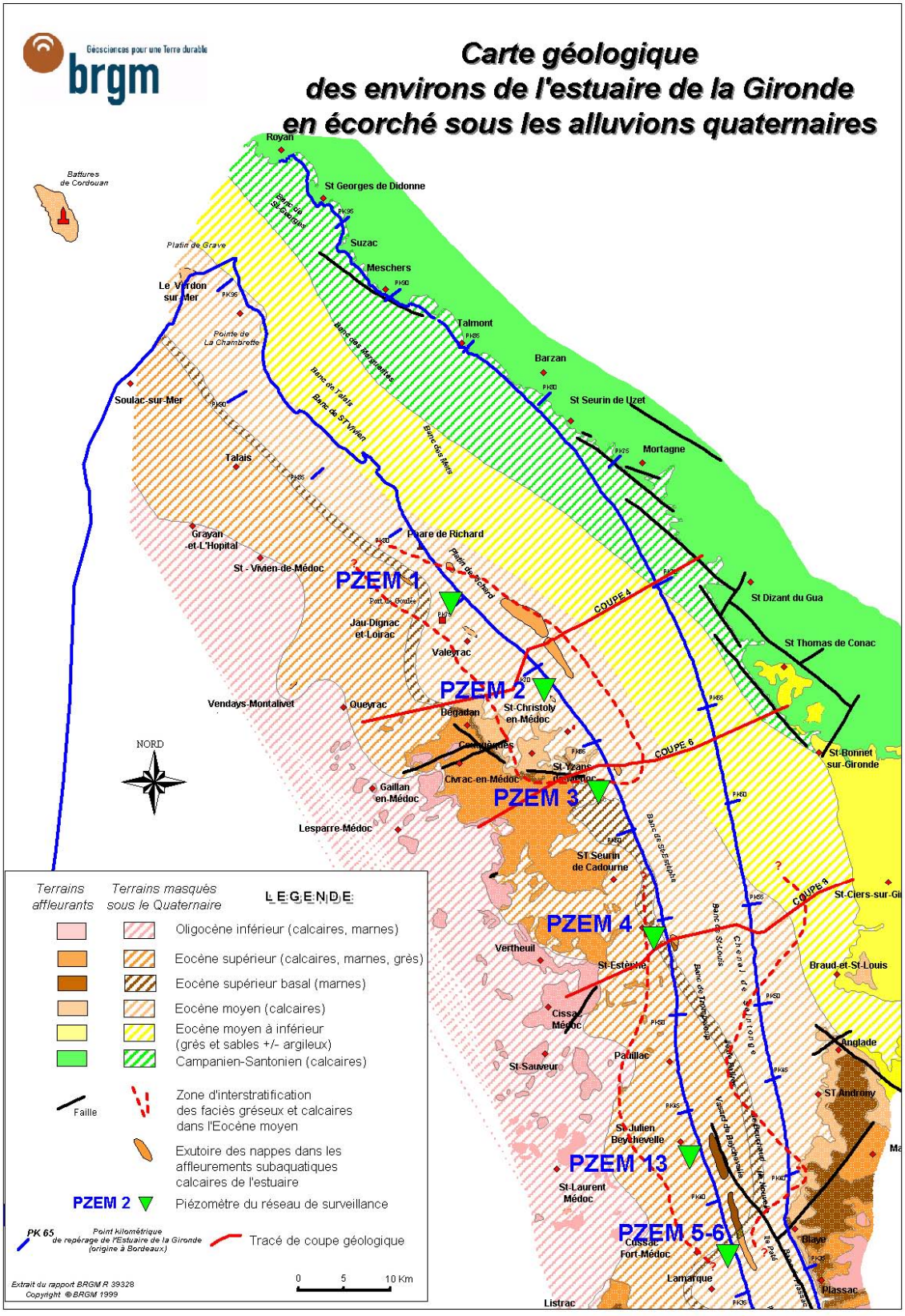


Illustration 4 : Carte géologique en écorché sous les alluvions quaternaires du secteur de l'Estuaire de la Gironde (d'après Platel et al., 1997, simplifié)

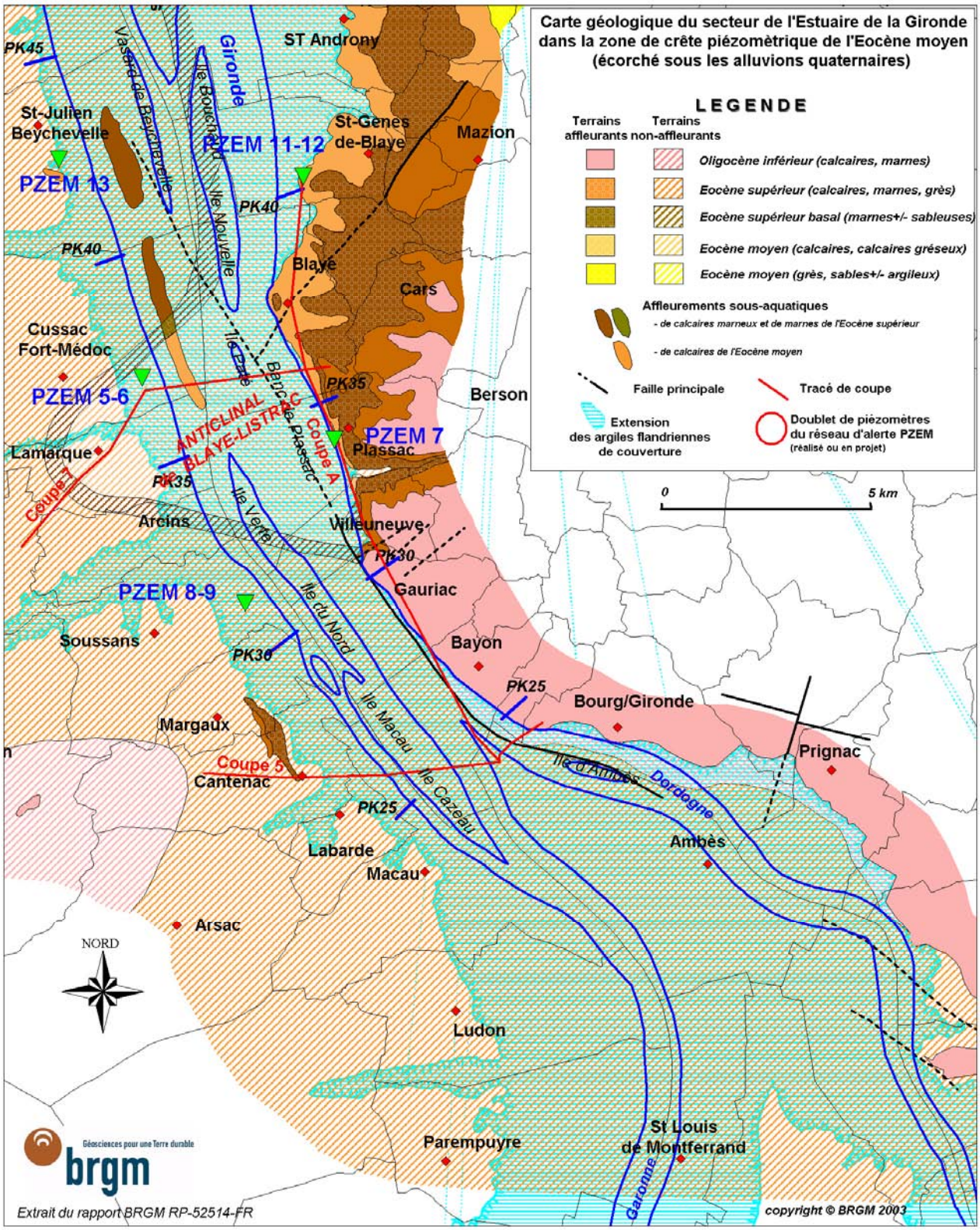


Illustration 5 : Carte géologique en écorché sous les alluvions quaternaires du secteur du « Bourrelet »(d'après Platel et al., 2003, simplifié)

Eocène inférieur

Sur les deux zones, la série assez complexe du Paléocène/Eocène inférieur se subdivise en trois unités :

- l'unité détritique inférieure dont la puissance augmente vers l'est,
- l'unité argilo-carbonatée et détritique moyenne (100 à 150 m),
- l'unité détritique supérieure (60 à 80 m) constituée de sables argilo-glauconieux.

Elle a été regroupée avec la formation de l'Eocène moyen sur l'illustration 4.

Eocène moyen

Dans toute la Gironde occidentale et le Médoc, les formations de l'Eocène moyen peuvent être subdivisées en deux unités lithostratigraphiques : l'Eocène moyen détritique et l'Eocène moyen carbonaté.

Précédemment dénommées *membres* dans les premiers rapports du BRGM sur l'Eocène du Médoc, ces unités ont été élevées au rang de *formation* suite aux investigations menées dans le cadre de la mise en place du réseau PZEM (Platel *et al.,* 1997, 1998, 1999, 2003, 2005 ; Schnebelen *et al.,* 2000, 2002).

Chaque formation est constituée de plusieurs membres : les membres 1 à 6 constituent l'Eocène moyen "*détritique*" alors que les membres 7 à 10 composent l'Eocène moyen "*calcaire*" incluant parfois la partie sommitale du membre 6 (cf. illustration 6).

☞ **Eocène moyen détritique (membres 1 à 6 - 50 à 250 m)**

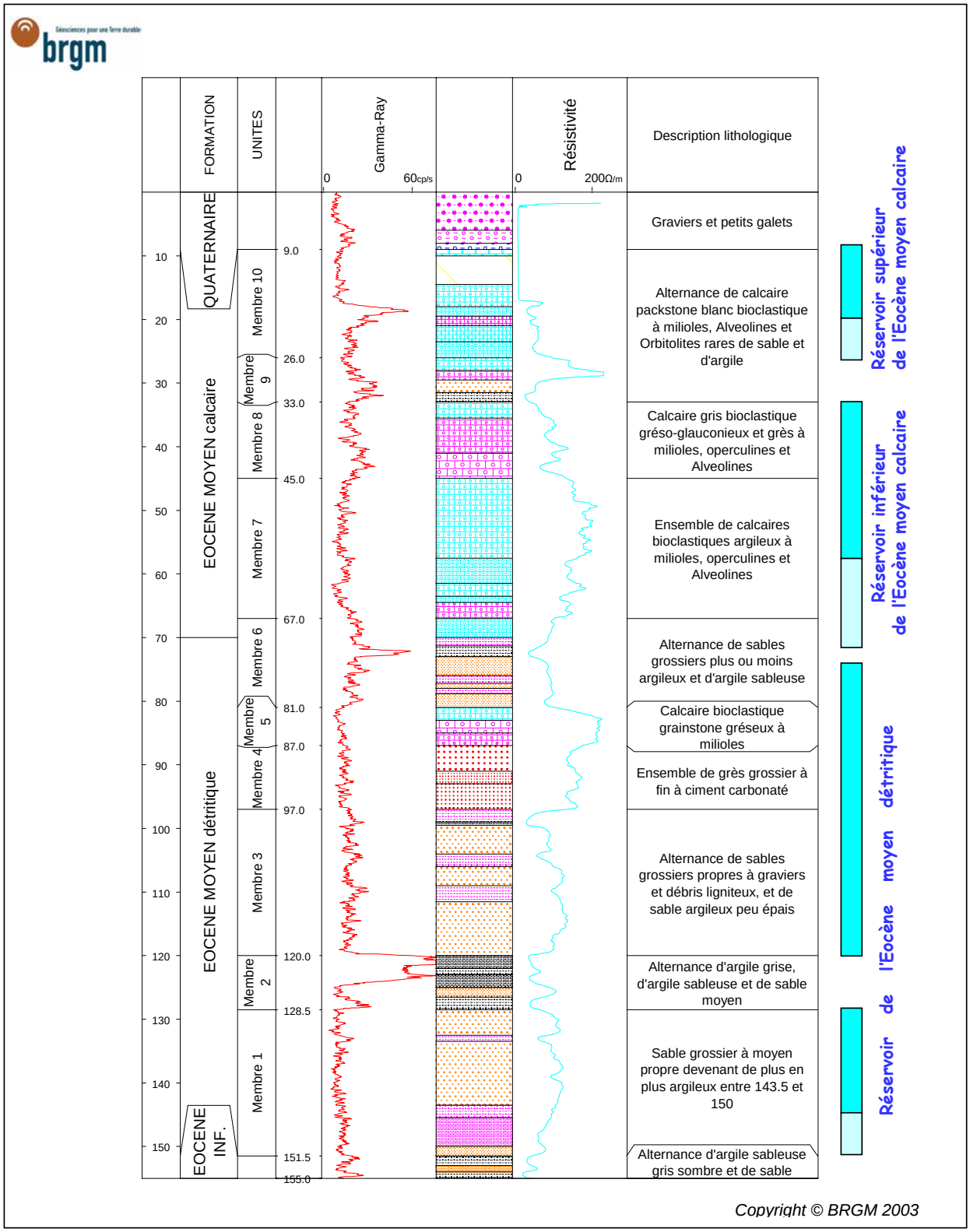
L'Eocène moyen détritique constitue une bonne partie du substratum tertiaire dans les parties aval et médiane de l'estuaire (cf. illustration 4 et coupes 4 et 6 de l'illustration 7) alors qu'il n'affleure que sur une toute petite partie, au nord de Mazion, sur la zone du « bourrelet » (cf. illustration 5).

Il correspond à la formation des "**Sables inférieurs**" (du Bordelais) ou des "**Sables éocènes**" et est constitué de grès plus ou moins friables. Sa base est souvent très grossière et parfois riche en débris ligniteux alors que son sommet se caractérise par la présence de niveaux plus calcaires.

☞ **Eocène moyen carbonaté (membres 7 à 10 - 30 à 150 m)**

L'Eocène moyen calcaire constitue une bonne partie du substratum tertiaire de l'estuaire dans ses parties médiane et amont (cf. illustrations 4 et 5, coupe 8 de l'illustration 7 et coupe 7 de l'illustration 8).

Il correspond à la formation du "**Calcaire de Blaye**" (Lutétien) qui se présente sous la forme de calcaires blancs à gris bioclastiques très fossilifères entre lesquels s'intercalent localement de nombreux niveaux silicoclastiques.



Copyright © BRGM 2003

Illustration 6 : Superposition des terrains de l'Eocène moyen dans le secteur de l'estuaire de la Gironde (d'après Platel et al., 2003)

Eocène supérieur

Les niveaux de l'Eocène supérieur sont surtout présents en rive gauche de la Gironde (cf. coupes de l'illustration 7) et constituent aussi la majeure partie du substratum tertiaire de l'estuaire au sud du « bourrelet » (cf. coupe 5 de l'illustration 8).

Ils présentent une grande variabilité verticale et latérale mais leur base est généralement constituée par des faciès argilo-marneux peu épais.

Dans le secteur de Blaye et dans le Médoc, la série est faite de séquences peu épaisses de marnes et d'argiles vertes à grises passant à des calcaires bioclastiques très fossilifères. Ce sont de bas en haut les "**Calcaires de Bégadan**", les "**Calcaires de Saint-Yzans**", les "**Marnes à *Ostrea bersonensis***", les "**Calcaires de Saint-Estèphe**" et les "**Calcaires argileux à *Sismondia***". L'ensemble de la série marine, déposée dans un environnement de baie, présente une puissance de 25 à 60 m.

Il est à noter que dans le Sud-Saintonge, le Blayais et le Bourgeais, des faciès continentaux peuvent s'intercaler ou remplacer certaines formations carbonatées littorales par passage latéral de faciès.

Oligocène

Les terrains oligocènes sont présents en rive gauche de l'estuaire et en rive droite sur la zone du « bourrelet » (cf. coupes 6 et 8 de l'illustration 7 et coupe 5 de l'illustration 8).

Ils débutent par quelques mètres de marnes gris-bleues à petits foraminifères qui passent latéralement dans le Bourgeais à la partie supérieure gréso-sableuse des "**Molasses du Fronsadais**".

Au dessus, la formation du "**Calcaire à astéries**" qui date du *Rupélien* (ex *Stampien*") présente une épaisseur d'environ 60 m. Dans ce secteur de la Gironde, la formation est principalement constituée par des calcarénites (calcaires granulaires) bioclastiques.

Quelques mètres de marnes silteuses terminent la série marine.

Quaternaire

L'extension des formations quaternaires est représentée par des hachures sur les illustrations 4 et 5. Ces formations qui occupent quasiment tout le fond de l'estuaire se sont déposées au Pléistocène et à l'Holocène.

☞ ***le Pléistocène***

Au cours des glaciations du Pléistocène, les lits majeurs des cours d'eau se sont encaissés et ont balayé les terrains tendres du Tertiaire jusqu'aux reliefs calcaires crétacés de la rive droite (Dubreuilh *et al.,* 1995).

Il en résulte un ensemble de terrasses constituées de galets plus ou moins grossiers, de sables et de graviers, ainsi que des couches d'argiles, qui s'étagent :

- sur 8 niveaux (entre 0 m NGF pour les plus anciennes et - 45 m NGF pour les plus récentes) au sud de l'embouchure de la Gironde (Rapport BRGM 39328),

- sur 6 niveaux (entre + 25 m NGF pour les plus anciennes et - 35 m NGF pour les plus récentes) dans le secteur de Blaye-Cussac (Rapport BRGM 52514).

Les coupes sériées des illustrations 7 et 8 permettent de visualiser une partie de ces terrasses et leur agencement.

☞ ***l'Holocène (Flandrien)***

C'est probablement vers 8000 à 6000 BP que la mer a commencé à envahir l'estuaire, s'infiltrant d'abord dans les paléocours puis submergeant les terrasses pléistocènes les unes après les autres (Feral, 1970).

Toutes les zones basses des rives charentaises et médocaines ont alors été comblées par le ***bri*** (**Argiles à scrobiculaires**), vases argilo-silteuses constituées par les limons de la Garonne et de la Dordogne et par d'autres produits d'érosion.

La presqu'île d'Ambès (cf. coupe 5 de l'illustration 8), le marais de St-Ciers (cf. 8 de l'illustration 7) et les marais situés entre Jau-Dignac, St-Vivien et le Verdon-sur-Mer correspondent aux plus grandes zones d'affleurement de ces argiles.

C'est ainsi que 5 à 40 m d'argile compacte peuvent localement « cacheter » des nappes d'eau saumâtres ou salées fossiles contenues dans les alluvions pléistocènes et/ou les niveaux calcaires ou gréseux de l'Eocène moyen.

La présence de ces nappes a été mise en évidence à St-Yzans où les eaux du piézomètre de Petite Vignale se caractérisent par des teneurs en sel de l'ordre de 20 g/l et un âge de 5250 BP +/- 50 (Schnebelen *et al.,* 2000).

3.2.2. Evolution structurale du secteur

Pendages

Le pendage régional des couches est dirigé vers le sud-ouest. Il est de l'ordre de 0,5 % à 1,2 % mais peut localement être plus important, en particulier dans le secteur de Saint-Christoly/Bégadan (cf. coupe 4 de l'illustration 7).

Failles

De rares failles de direction générale NW-SE (N130°/150°E) sont connues dans les terrains crétacés et tertiaires de la rive droite (cf. illustration 7).

Un accident expliquerait l'abaissement des terrains oligocènes du Bourgeais par rapport aux séries de la rive gauche et aux affleurements de l'Eocène supérieur de Margaux.

Sur la zone du « bourrelet », un accident de direction N45°E a été décelé entre Mazion et St-Genès (cf. illustration 8). Il est supposé se poursuivre sous la ville de Blaye.

Enfin, deux autres petites failles recoupent les terrains oligocènes près de la vallée du Moron à Prignac mais se perdent sous le marais.

Structuration souple

☞ ***l'anticlinal de Couquèques***

L'anticlinal de Couquèques se situe au nord du Médoc. Il s'allonge selon la direction N 135° E et présente un cœur constitué de calcaires lutétiens. Le piézomètre PZEM 2 de St-Christoly (coupe 4 de l'illustration 7) se situe au niveau de son apex et a intercepté le toit des terrains gréseux de l'Eocène moyen détritique à - 45 NGF environ.

Plus au nord, les terrains quaternaires masquent complètement les affleurements éocènes. Près de Valeyrac, des calcaires ont toutfois été mis en évidence autour du Platin de Richard lors de la campagne Armor 69 (Landry, 1969).

☞ **l'*anticlinal de Blaye-Listrac***

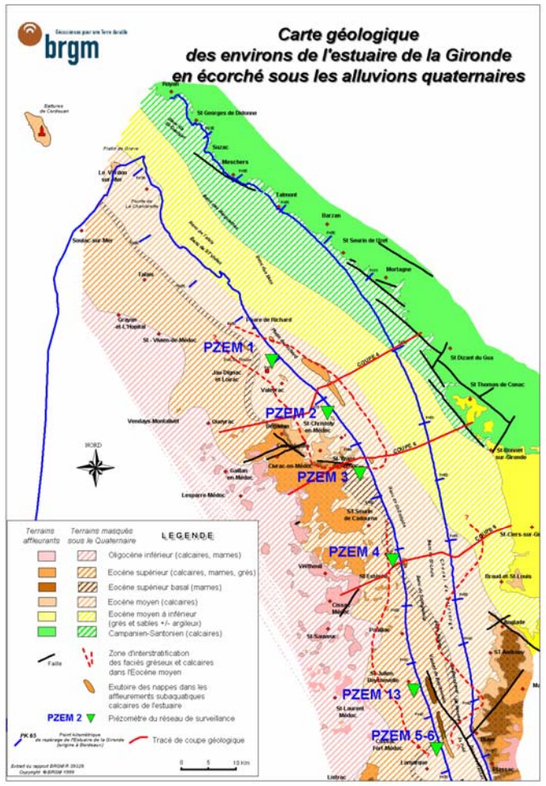
L'anticlinal de Blaye-Listrac présente un axe orienté N 60°E et s'étend sur 15 km de long en traversant l'estuaire au niveau de l'île Paté (cf. illustration 5 et coupe A de l'illustration 8). Son coeur lutétien affleure principalement à Blaye (falaise de la Citadelle) et à Listrac (carrière de Peyrelebade).

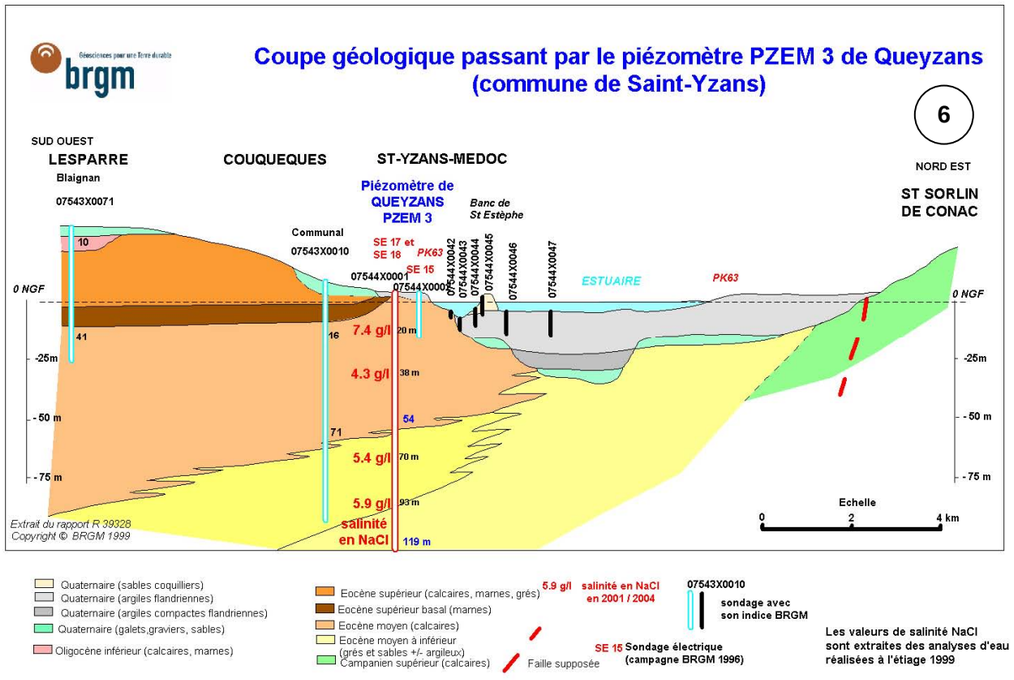
☞ ***le synclinal de Pauillac***

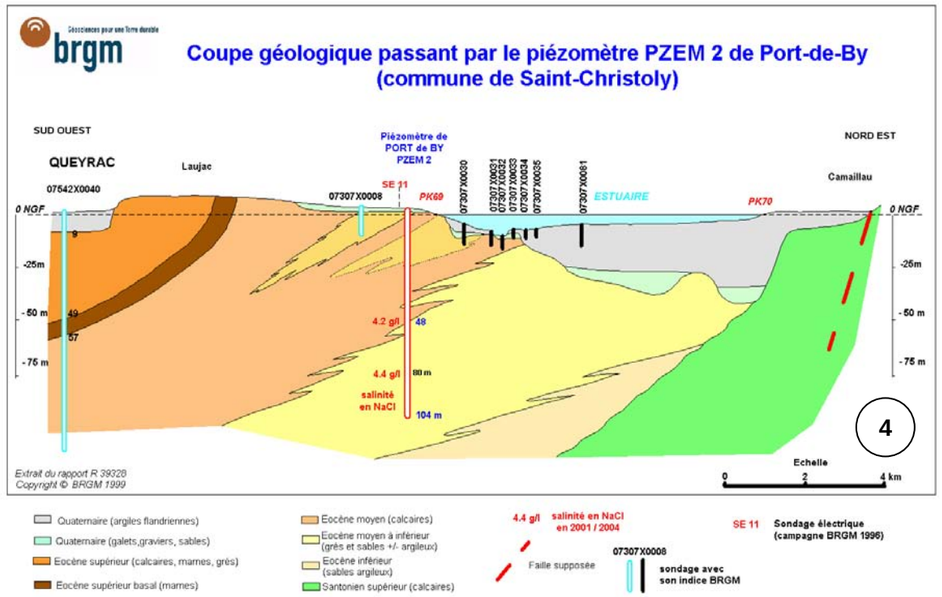
Entre les deux structures anticlinales décrites précédemment, les couches s'enfoncent pour dessiner un synclinal évasé à flancs peu pentés, dont le centre se situe entre Pauillac et St-Estèphe.

☞ ***le synclinal d'Ambés***

Plus au sud, les couches s'enfoncent régulièrement sous la presqu'île d'Ambès pour y dessiner un synclinal assez évasé à flancs peu pentés (cf. coupe 5 de l'illustration 8).







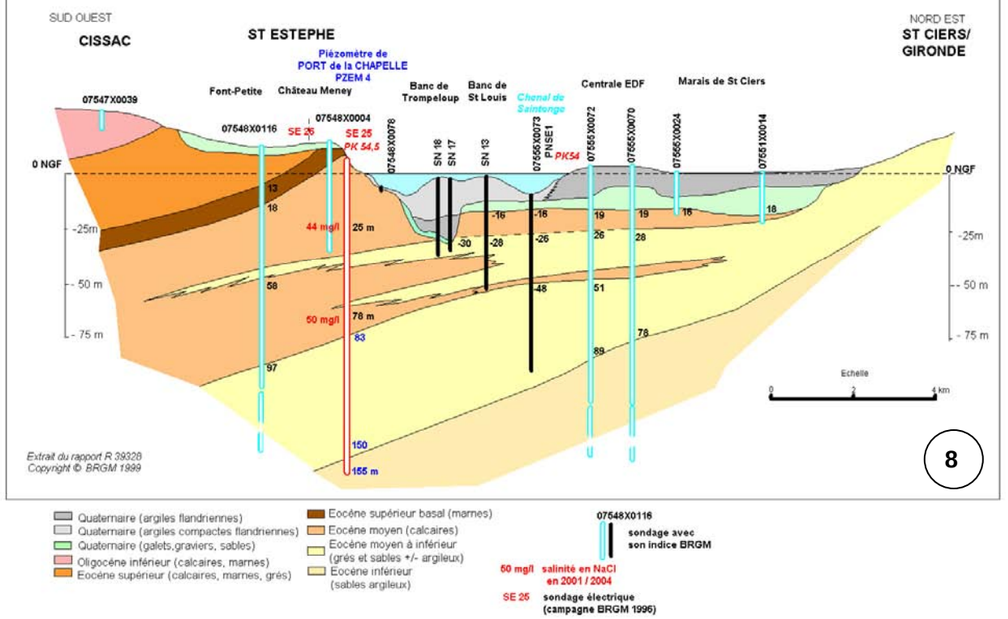
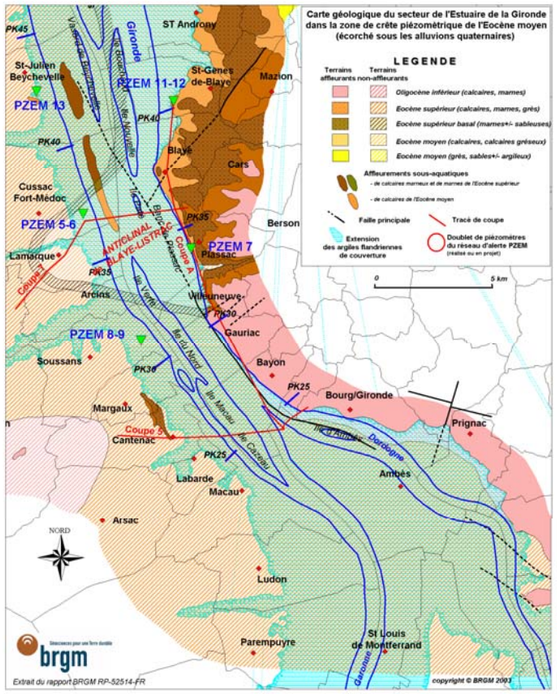
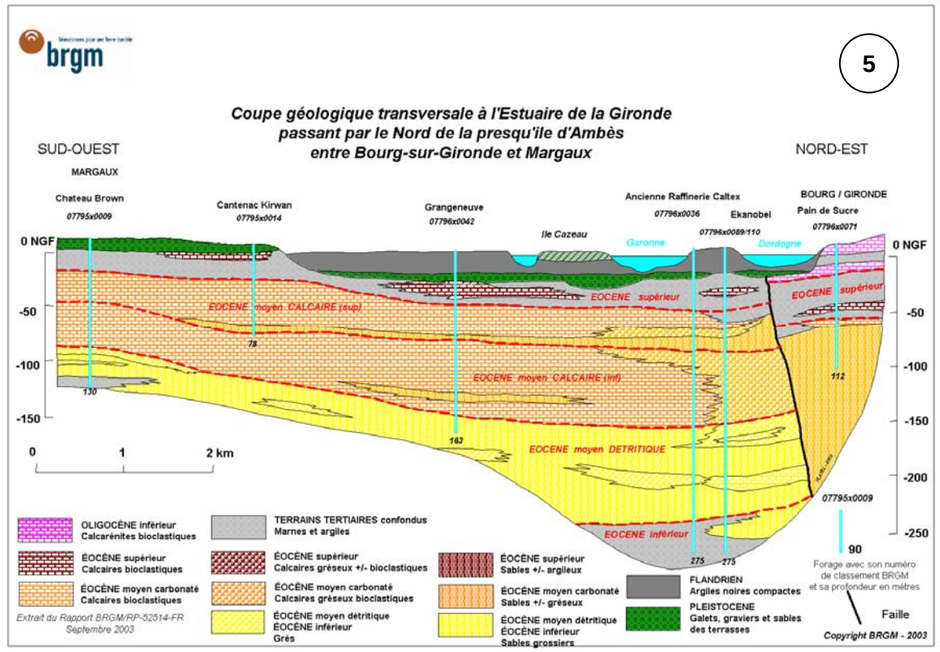
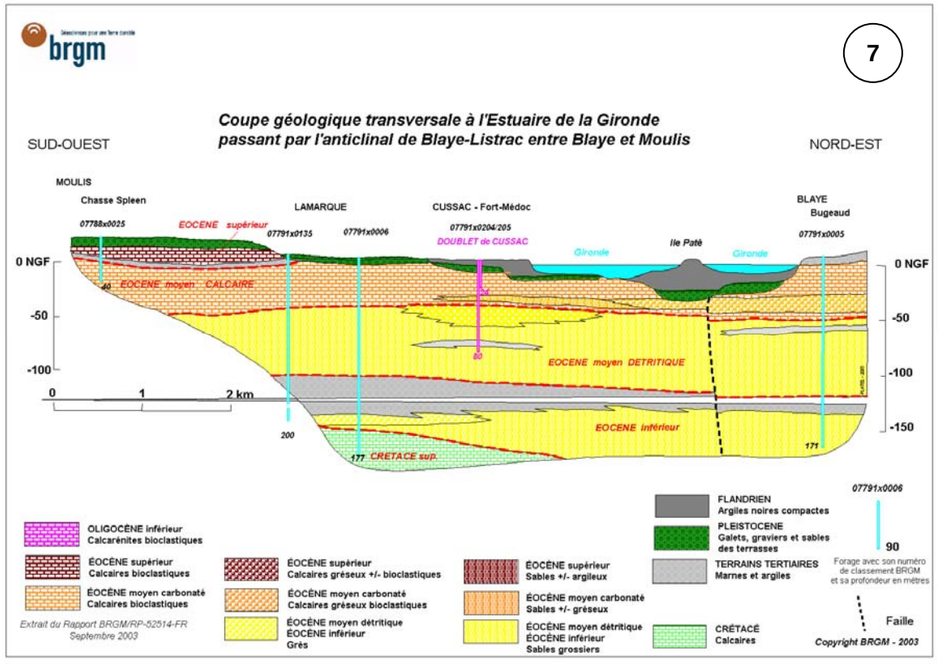


Illustration 7 : Coupes transversales dans l'estuaire de la Gironde (d'après Platel et al., 1999)







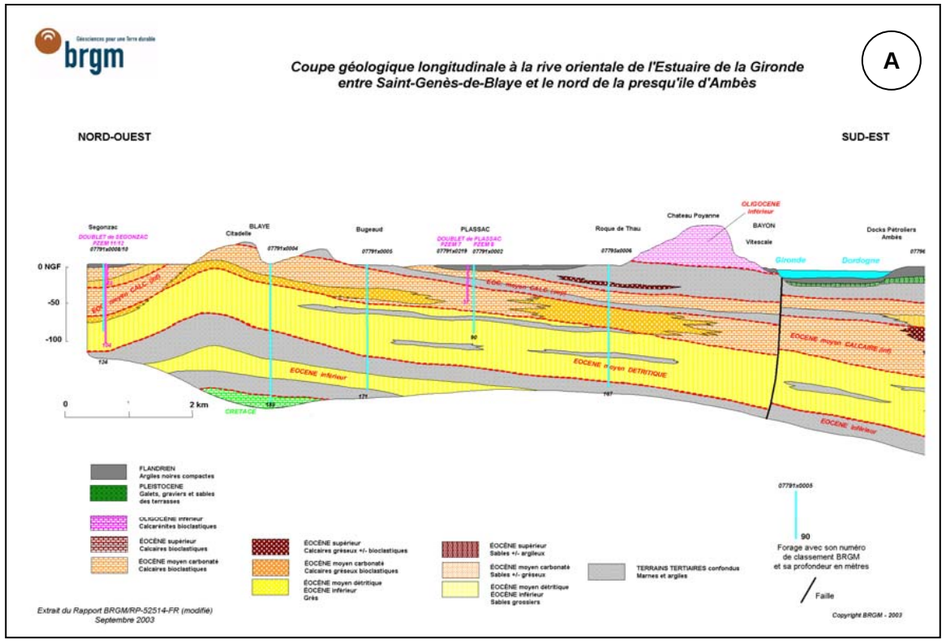


Illustration 8 : Coupes transversales dans la zone du « bourrelet », (d'après Platel et al., 2003)

3.3. DESCRIPTION HYDROGEOLOGIQUE

3.3.1. Identification des réservoirs et de leurs épontes

La problématique consiste à étudier les risques de contamination de l'aquifère de l'Eocène moyen par des eaux saumâtres ou salées le long de l'estuaire et dans le secteur du « bourrelet ».

L'illustration 9 qui représente une coupe de corrélation passant par les piézomètres du réseau de surveillance PZEM montre bien la nature multicouche de l'aquifère de l'Eocène moyen qui se caractérise aussi par de faibles pendages vers le sud-est et un épaississement des dépôts à partir de Saint-Estèphe.

L'aquifère de l'Eocène moyen ainsi que les niveaux sous et sus-jacents sont décrits dans les paragraphes suivants. Les commentaires s'appuient sur les coupes sériées des illustrations 7 et 8.

Eponte imperméable de l'Eocène inférieur

Les marnes silto-sableuses de l'Eocène inférieur ont été atteintes par les sondages les plus profonds vers - 100 à - 120 NGF dans le secteur du Phare de Richard et de St-Yzans, vers - 190 NGF dans le synclinal de Pauillac et vers - 250 NGF dans le synclinal d'Ambès.

Elles constituent l'éponte imperméable du système aquifère éocène, qui est noté avec le code 214 dans la version 1 de la base de données du Référentiel Hydrogéologique Français, et peuvent localement présenter une épaisseur de plus de 150 m.

Réservoir des grès et des sables de l'Eocène moyen

La formation des Sables inférieurs de l'Eocène moyen constitue le réservoir principal du système Eocène moyen. Elle est constituée par deux réservoirs gréso-sableux qui présentent chacun une épaisseur de 10 à 15 m.

Vers le sud, ce sont les membres 1, 3 et 4 qui constituent les meilleurs aquifères alors qu'au nord, le membre 2 et le sommet du membre 3 sont constitués par des assises continues d'argiles plus ou moins silteuses qui forment des imperméables et isolent le niveau sableux inférieur (cf. illustration 6). **De ce fait, ce dernier n'est jamais en contact avec les eaux de l'estuaire actuel.**

Le membre 5, seul niveau calcaire de l'Eocène moyen "détritique" (cf. illustration 6), est toujours bien identifié en rive gauche du fleuve et constitue un réservoir souvent très productif bien que peu épais (65 % du débit à Port-de-Goulée et 30 % du débit à Queyzans).

Partout les sables et les grès passent progressivement à des calcaires gréseux puis à des calcaires vers l'ouest.

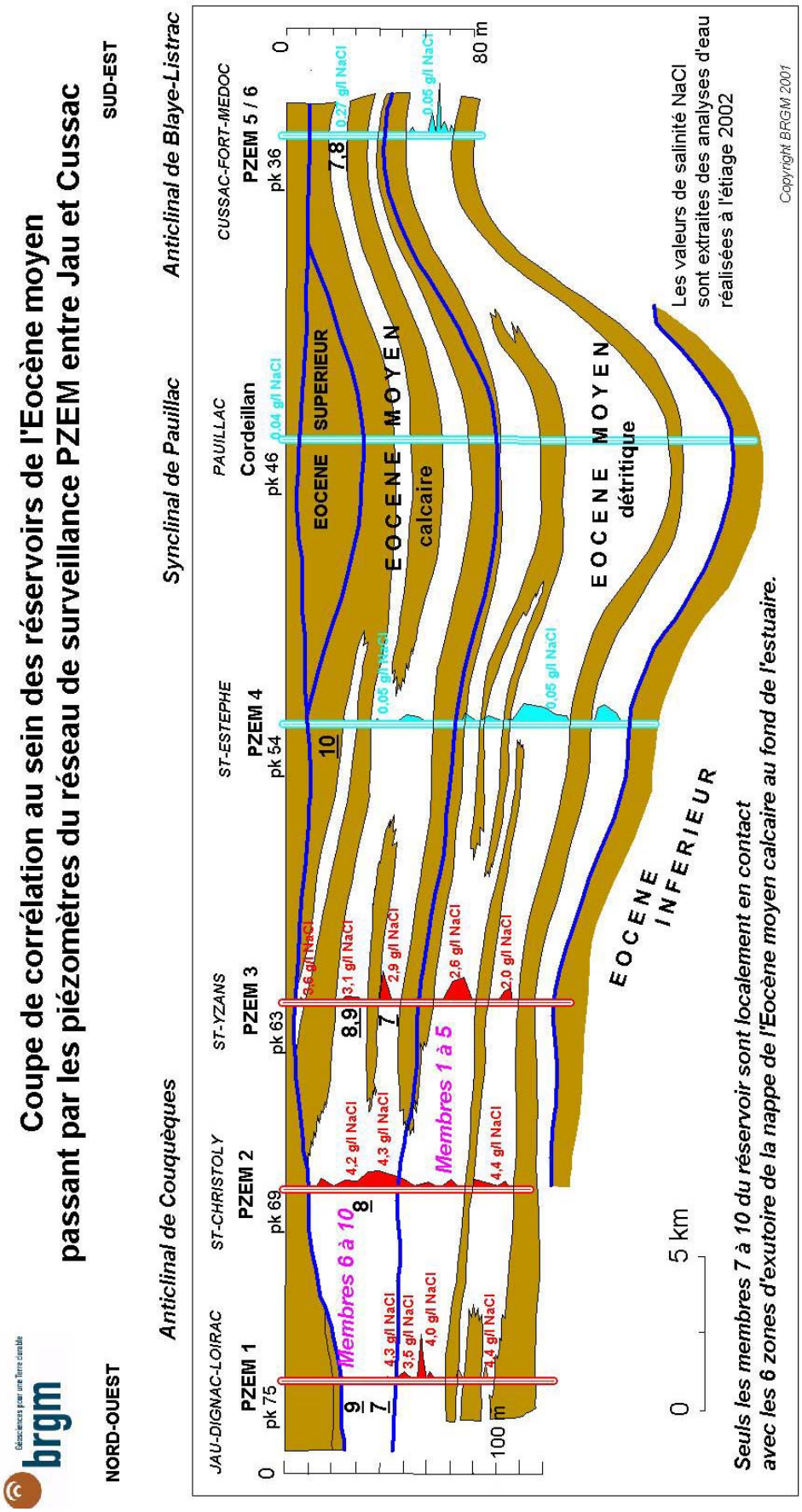


Illustration 9 : Coupe de corrélation des réservoirs de l'Eocène moyen passant par les différents piézomètres de contrôle (d'après Platel, 2001, modifiée)

Réservoirs des calcaires de l'Eocène moyen

Depuis Jau jusqu'au sud de St-Christoly, les membres 4 à 10 de l'Eocène moyen se présentent comme un réservoir unique d'une soixantaine de mètres d'épaisseur. A partir de St-Yzans et jusqu'au secteur de Cussac-Lamarque, il se subdivise en plusieurs petits réservoirs de 10 à 20 m d'épaisseur. Plus au sud, le réservoir se présente sous la forme de deux niveaux carbonatés séparés par des niveaux marneux à l'est d'une ligne Arsac-Margaux-Cussac et plutôt en communication à l'ouest.

Il est à noter que dans cette dernière zone, la pression des réservoirs calcaires qui se trouvent au sommet (membre 8) est inférieure de 0,1 à 0,2 bar en moyenne par rapport à celle des réservoirs sableux (membres 4 à 6).

Dans la zone de l'estuaire, le membre calcaire 7 est, quant à lui, puissant et productif (32 % du débit à Port-de-By et 20 % du débit à Queyzans). **Il est en relation plus ou moins directe avec 6 des 8 principaux "affleurements rocheux" subaquatiques situés au fond du chenal de grande navigation.** Ces affleurements sont situés du nord au sud :

- dans ou à proximité des passes de Richard, de Goulée et de By (points kilométriques 77,6 et 68,4),

- dans la passe de Laména devant St-Yzans au PK 63,2,

- dans la passe de St-Estèphe au PK 53,9,

- dans la passe de Cussac devant Fort-Médoc entre les PK 35,9 et 37,8.

Les membres 8, 9, 10 peuvent aussi être en contact direct avec les eaux de l'estuaire actuel.

Terrains de recouvrement tertiaires et quaternaires

Les réservoirs calcaires de l'Eocène moyen sont surmontés soit par des terrains à dominante marneuse ou argileuse correspondant aux formations de l'Eocène supérieur, soit par des alluvions aquifères ou des argiles imperméables quaternaires.

☞ **Eocène supérieur**

L'éponte sommitale de l'aquifère de l'Eocène moyen est constituée de bas en haut par les marnes à *Ostrea cucullaris*, les Calcaires et argiles de Plassac et les Marnes à *Ostrea bersonensis* ou les Calcaires argileux à *Sismondia*. Ces terrains du *Priabonien* constituent un ensemble imperméable dont l'épaisseur peut être supérieure à 50 m.

A partir de Saint-Estèphe et à l'exception de certains secteurs bien précis (anticlinal de Blaye-Listrac, Ile Margaux,…), cet ensemble compact isole l'aquifère de l'Eocène moyen des terrains quaternaires dans la partie amont de l'estuaire.

☞ **Pléistocène**

Les terrasses graveleuses de l'estuaire ancien ont été décrites dans le paragraphe 3.2.1. Celles d'entre elles qui se situent en dessous du plan d'eau actuel font partie du système qu'il convient d'étudier.

Au nord et dans la partie centre-est du Médoc, au moins 3 niveaux d'alluvions dont les cotes de base s'étagent entre 0 et - 45 NGF ont été identifiés. Elles reposent souvent sur les niveaux calcaires de l'Eocène moyen mais peuvent directement surmonter les niveaux sableux (cf. coupes de l'illustration 7).

Plus au sud et en particulier dans le secteur de la presqu'île d'Ambès, au moins 4 niveaux d'alluvions dont les cotes de base s'étagent entre 0 et - 25 NGF ont été identifiés. Elles reposent presque toujours sur des marnes mais peuvent être en contact avec les calcaires de l'Eocène supérieur ou de l'Eocène moyen (cf. coupes 5 et 7 de l'illustration 8).

Baignées par des eaux salées au nord et saumâtres au sud durant la période flandrienne, ces assises graveleuses plus ou moins perméables du fait de leur lithologie grossière renferment de petits aquifères fossiles (eaux âgées de plus de 5000 ans) dont la salinité peut atteindre plusieurs grammes par litre (20 g/l dans le piézomètre de *Petite Vignale* à St-Yzans).

☞ **Flandrien**

Les dépôts du Flandrien, dont l'extension est bien représentée sur l'illustration 5 se présentent sous la forme d'argiles et de siltites argileuses. Au sud du Bec d'Ambès, leur épaisseur n'est que de 10 mètres mais localement, les formations peuvent présenter une épaisseur supérieure à 20 m et parfois atteindre 40 m au nord de la Gironde.

Ces dépôts constituent presque partout un imperméable au dessus des nappes d'eaux fossiles contenues dans les alluvions pléistocènes et dans le sommet des réservoirs calcaires et gréseux de l'Eocène moyen.

3.3.2. Description détaillée de l'aquifère concerné par l'aléa

Dans la zone de l'estuaire, l'aléa (la contamination par des eaux saumâtres ou salées) concerne l'ensemble des niveaux de l'Eocène moyen. Les niveaux calcaires de l'Eocène moyen peuvent en effet être directement en contact avec les eaux de l'estuaire et les terrasses pléistocènes peuvent directement reposer sur les niveaux calcaires ou sableux de ce même aquifère.

L'illustration 10 correspond à l'état de la piézométrie au cours de l'étiage 2003.

Il apparaît que le niveau piézométrique des nappes éocènes varie entre + 2,5 et 0 m NGF et que les écoulements sont dirigés vers le nord-est dans la partie médocaine.

Dans ces conditions, l'écoulement naturel de la nappe pourrait s'opposer à une éventuelle pénétration d'eaux saumâtres ou salées en provenance de l'estuaire actuel.

Les suivis piézométriques effectués sur les ouvrages situés au nord du Médoc (PZEM 1, PZEM 2 et PZEM 3) ont aussi permis de montrer que :

- les plus hautes pressions étaient atteintes au tout début de l'année (en principe lors de la deuxième quinzaine de janvier) et les plus basses, en septembre,

- la différence de niveaux entre crue et étiage était très faible pour PZEM 1 et PZEM 2 (1 m à 1,30 m environ) et un peu plus marquée pour PZEM 3 (1,50 m).

Plus au sud, dans le secteur de St-Estèphe, les données enregistrées sur PZEM 4 attestent d'une évolution différente de la pression de la nappe éocène, les niveaux les plus hauts s'observant entre la fin du mois de mars et le début du mois de mai et les niveaux les plus bas, au cours du mois d'août.

Dans le secteur du bourrelet piézométrique, l'agencement des terrains (cf. coupe 7 de l'illustration 8) fait que seul l'aquifère calcaire de l'Eocène moyen est concerné par l'aléa.

Sur l'illustration 11, les ondulations de ce réservoir se remarquent bien avec un toit qui culmine vers + 30 NGF sur l'axe de l'anticlinal, s'enfonce vers - 30 NGF près de Soussans, remonte légèrement au sud de Margaux, plonge autour de - 65 NGF sous l'ancienne raffinerie Esso, s'élève vers - 20 NGF au nord de St-Louis-de-Montferrand puis plonge finalement vers Bordeaux.

Avant la réalisation du piézométrique PZEM 5 de Fort-Médoc (Rapport BRGM 40729), on ne savait pas que les réservoirs de l'Eocène moyen se caractérisaient par des pressions différentes.

Depuis cette date, de nouveaux ouvrages de surveillance ont été réalisés et les coupes des ouvrages les plus anciens ont été réinterprétées.

Il est donc désormais possible d'établir une piézométrie pour la partie gréso-sableuse de l'aquifère et une autre piézométrie pour la partie calcaire.

L'illustration 12 représente la carte des pressions de l'aquifère calcaire établie à partir des mesures effectuées fin 2004.

Il apparaît que sur le secteur étudié, le niveau de la nappe varie entre - 2 et + 10 NGF. De façon générale, l'écoulement des eaux se fait vers l'estuaire puis vers le nord dans la partie septentrionale et vers le sud dans la partie méridionale.

La crête piézométrique s'allonge selon une direction est-ouest et est axée sur les communes de Blaye, de Cussac-Fort-Médoc et de St-Julien-Beychevelle.

Au point le plus bas de l'ensellement, la piézométrie est inférieure à + 3 NGF.

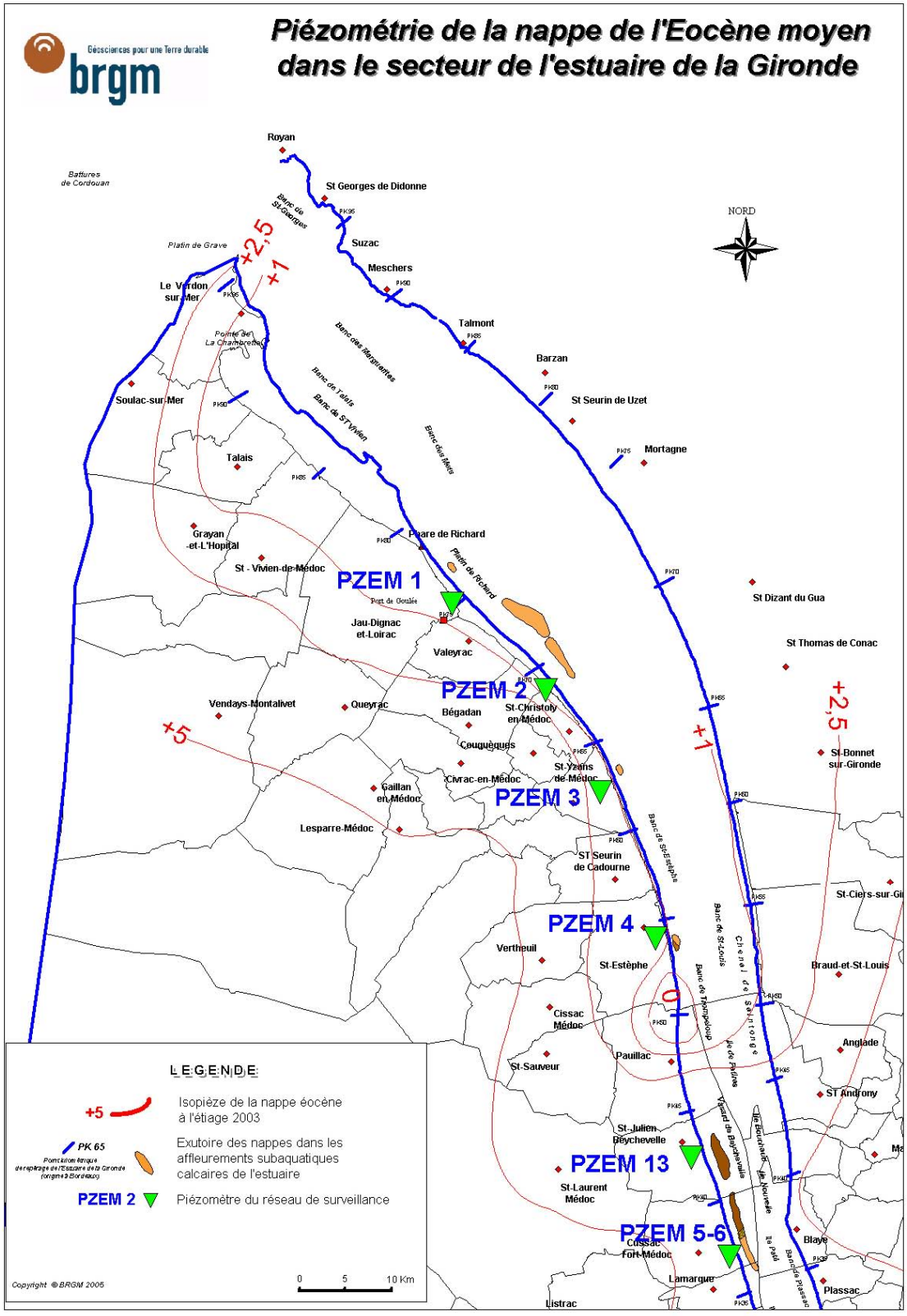


Illustration 10 : Piézométrie de l'Eocène moyen dans le secteur de l'estuaire de la Gironde (étiage 2003)

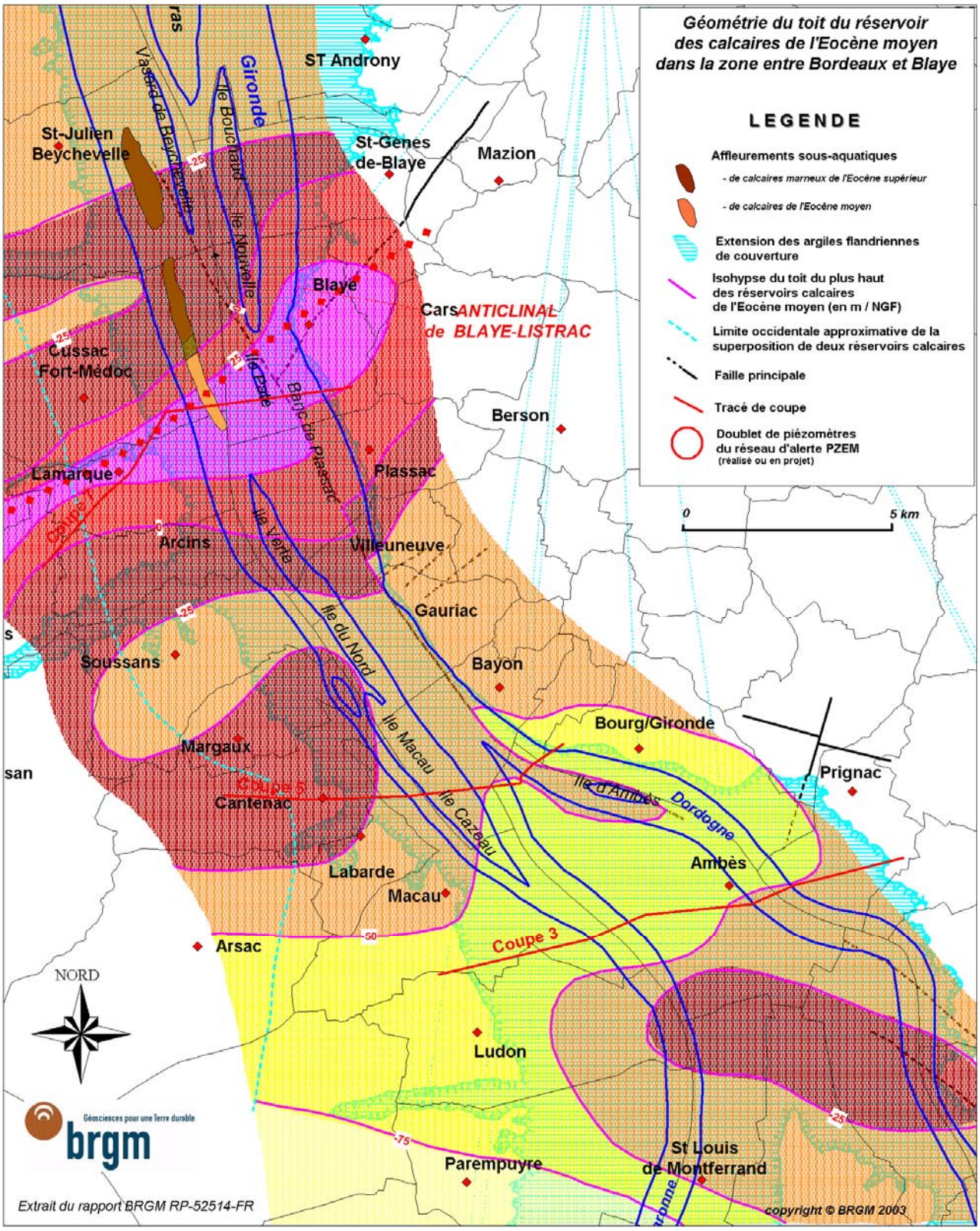


Illustration 11 : Carte des isohypses du toit du réservoir de l'Eocène moyen (d'après Platel et al., 2003)

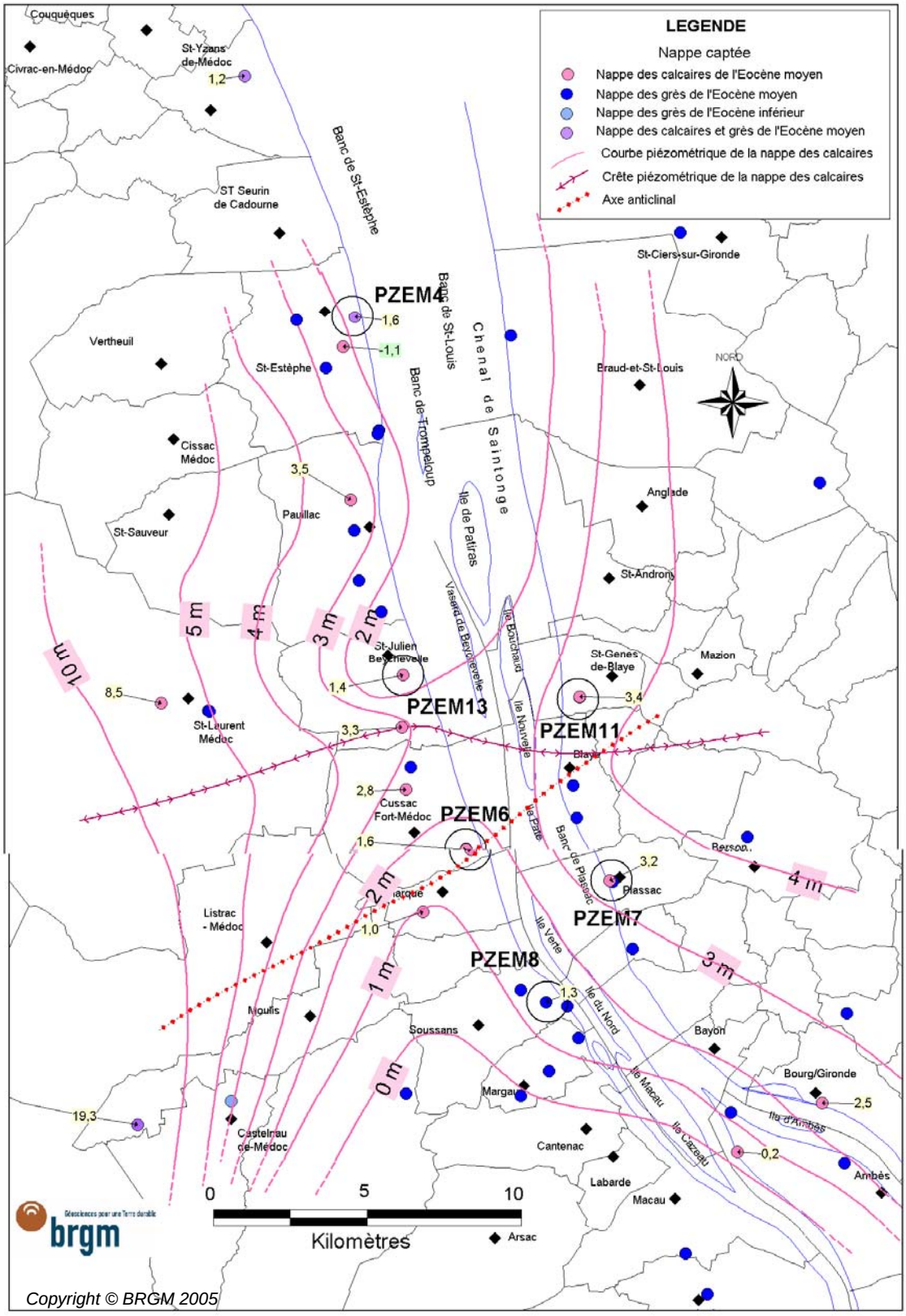


Illustration 12 : Carte piézométrique établie à partir des mesures effectuées fin 2004 (d'après Platel et al., 2005)

La crête piézométrique correspond à l'axe de l'anticlinal Blaye-Listrac dans le secteur de Blaye mais elle est décalée de 3 à 5 km par rapport à cette même structure en rive gauche de l'estuaire. La présence d'affleurements calcaires dans le secteur de Blaye est très certainement à l'origine de cette dissymétrie.

Il est à préciser que l'écoulement de la nappe inférieure gréso-sableuse dont la pression est plus importante que celle de la nappe sus-jacente se fait à peu près dans les mêmes directions. Le gradient, influencé par les prélèvements sur les communes de St-Estèphe et de Pauillac, est toutefois un peu plus fort.

La crête piézométrique de cette nappe est aussi approximativement centrée sur la commune de Cussac avec des niveaux de l'ordre de + 3,5 m NGF au point le plus bas.

3.4. PROBLEMATIQUE

3.4.1. Historique

Le problème de la contamination de la nappe de l'Eocène moyen par des eaux saumâtres ou salines dans le nord de la Gironde, et dans l'est du Médoc en particulier, a été soulevé dès la fin des années cinquante par la communauté scientifique bordelaise.

En effet, après la deuxième guerre mondiale, l'industrialisation s'étant fortement accrue autour de l'agglomération bordelaise et de ses sites portuaires, les besoins en eau ont nettement augmenté. C'est la nappe captive de l'Eocène moyen qui a été le plus sollicitée à cause de sa forte productivité et de sa bonne qualité physico-chimique.

- Dès 1955, c'est H. Schoeller, professeur à la Faculté des Sciences de Bordeaux, qui le premier constate que la pression de la nappe baisse régulièrement, supposant de ce fait une surexploitation. En 1958, le BRGM, en collaboration avec les laboratoires de géologie de la Faculté, dresse un *Inventaire des ressources hydrauliques de la Gironde* (I.R.H.G.). En 1960, M. Albinet[1] qui est l'auteur de la première étude universitaire détaillée sur la dépression piézométrique de l'aquifère éocène, précise que "*la limite de sécurité ne devait pas être loin d'être atteinte*"…représentant "*le niveau au-dessous duquel la nappe ne peut plus baisser sans risque d'envahissement par l'eau de mer*".

- Le 3 avril 1959, le *Comité départemental de protection des eaux souterraines de la Gironde* (C.D.P.E.S.G.) est créé et quelques jours après, les dispositions du décret-loi du 8 août 1935 sont étendues au département girondin pour réglementer les autorisations de forage dépassant 60 mètres de profondeur.

[1] "*Etude de la Nappe des Sables inférieurs d'Aquitaine*" par ALBINET M. – juin 1960 – *Travaux du Laboratoire d'Hydrogéologie-Géochimie ; Univ. Bordeaux, 77 p.*

- En 1962, les professeurs Schoeller et Vigneaux rappelaient le risque de salinisation de la nappe de l'Eocène dans des rapports publiés au BRGM (rapports DSGR 62 A10 et DSGR 62 A34 notamment). Ils notaient en plusieurs endroits du premier rapport[2] une "*possibilité de communication entre l'eau salée et celle des nappes*" et en conclusion, "*l'eau…est susceptible de se saler au cours d'une exploitation prolongée* ".

Peu après, un programme qui définit les études à entreprendre par les laboratoires de la Faculté des Sciences et le Service Géologique du BRGM pour connaître "*la possibilité d'invasion de la nappe des Sables inférieurs*" (de l'Eocène moyen) "*par les eaux marines*" est proposé au C.D.P.E.S.G[3]. Il apparaît alors "*nécessaire de déterminer s'il existe des zones de salure différente*" et de rechercher la "*cause de la concentration*".

- En 1964, le premier rapport synthétique de l'I.R.H.G. (rapport DSGR 64 A38[4]), qui dresse un état piézométrique et hydrochimique de la nappe éocène en Gironde contient des cartes de faciès chimiques (répartition des teneurs en chlorures, sulfates, sodium, magnésium, etc.) mettant déjà en évidence des zones nettement envahies par le sel, notamment dans tout le Nord-Médoc (teneurs supérieures à 250 mg/l de chlorures à St-Vivien-de-Médoc). Le Prof. Schoeller souligne à nouveau dans cette étude que "*au débouché de l'estuaire… la possibilité d'invasion saline* [dans la nappe éocène] *est beaucoup plus marquée*" et surtout que le rapport entre les teneurs en chlorures et en sodium, comparable à celui de l'océan dans le secteur de Lesparre – Blaye, "*évoque un mélange possible avec l'eau de mer remontant dans l'Estuaire par la marée,…*". *Les* résultats de cette étude hydrochimique confirment une "*tendance à l'invasion par l'eau de mer, du coté estuaire au nord du Médoc*".

- En 1964, le site expérimental de Saint-Christoly, évoqué dans le rapport précédent, est mis en place pour étudier d'éventuelles communications entre les eaux saumâtres de la Gironde et les réservoirs de la nappe éocène au travers du fond de l'estuaire. La méconnaissance des zones d'affleurements calcaires subaquatiques et la rapide arrivée de sel dans l'ouvrage de pompage fait alors exclure toute relation avec l'estuaire actuel et privilégier l'hypothèse d'une contamination par l'eau saumâtre d'une nappe alluviale locale.

- En 1967 et 1969, deux campagnes de sondages électriques dont l'objectif était de reconnaître l'existence et l'extension des zones d'invasion d'eau saumâtre ou salée dans les formations tertiaires et plio-quaternaires sont réalisées, à la demande de l'Admistration, par la CGG. Elles mettent en évidence des zones d'invasion saline dans

---

[2] "*Ressources en eau de la commune de Pauillac*" par BOURGEOIS M., RICOUR J., SCHOELLER H. et VIGNEAUX M. – mai 1962 - *Rapp. BRGM DSGR 62 A10*

[3] "*Programme des études à entreprendre en Gironde sur la nappe des Sables Inférieurs (Eocène moyen) en vue de prévenir une éventuelle invasion d'eaux marines*" par BOURGEOIS M., MARGAT J., SCHOELLER H. et VIGNEAUX M. – décembre 1962 - *Rapp. BRGM DSGR 62 A34*

[4] "*Etude de la nappe des sables éocènes en Gironde. Compte-rendu des observations effectuées en 1963 et début 1964*" par BELLEGARDE R. BOURGEOIS M., CAMUS G., CAMUS R. et SCHOELLER H. – avril 1964 - *Rapp. BRGM DSGR 64 A38*

tout l'extrême nord du Médoc, ainsi que près de Valeyrac - Port de Goulée et entre Laména et St-Seurin-de-Cadourne.

Le problème de la contamination de la nappe de l'Eocène moyen dans l'est du Médoc était donc connu depuis plusieurs dizaines d'années quand le BRGM a entrepris une nouvelle étude sur les relations entre la nappe de l'Eocène moyen et l'estuaire de la Gironde en 1997.

Au début de l'étude, les eaux de la Gironde représentaient la source la plus probable de contamination et le réservoir éocène était supposé assez homogène d'un point de vue hydrodynamique. Les caractéristiques géométriques, hydrogéologiques et hydrochimiques des aquifères du Médoc oriental étaient, quant à elles, méconnues.

Au fil des travaux de reconnaissance et de surveillance, programmés sur plusieurs années, il s'est progressivement avéré que le fonctionnement du système était complexe avec plusieurs sources possibles de contamination (les eaux de l'estuaire actuel et les eaux contenues dans les terrasses sous-flandriennes) et un compartimentage important des réservoirs sur le plan vertical.

3.4.2. Aspects théoriques

Avant d'aborder le fonctionnement théorique du système dans la zone de l'estuaire puis du bourrelet, il convient de préciser que dans les paragraphes suivants, les eaux ont été qualifiées de saumâtres lorsque leurs teneurs en **sels** étaient comprises entre 1 et 10 g/l et de salées lorsque ces mêmes teneurs étaient supérieures à 10 g/l.

L'illustration 13 qui représente la salinité des eaux de l'estuaire pour un coefficient de marée de 70 en période d'étiage du fleuve montre que les teneurs en chlorure de sodium s'échelonnent de 0 à 30 g /l.

En considérant que 80% de la minéralisation (donc de la teneur en sels) est induite par les chlorures et le sodium dans une eau salée, l'illustration 13 indique que des eaux douces, saumâtres (teneur en NaCl comprise entre 1 et 8 g/l) et salées (teneur en NaCl supérieure à 8 g/l) coexistent dans l'estuaire dans certaines conditions.

Dans la mesure où des variations synchrones de la pression et de la conductivité des eaux sont observées à tous les niveaux des réservoirs (Platel *et al.,* 2003), il est considéré que la marée joue un rôle de moteur vis à vis du phénomène de contamination et que le sel provienne de l'estuaire ou des terrasses sous-flandriennes.

De façon théorique, l'aléa sera d'autant plus fort que le différentiel de pression entre le niveau de l'estuaire et celui de la nappe sera important. Dans ces conditions, il devrait donc être maximum au moment où la nappe présente ses niveaux les plus bas, par très fort coefficient de marée et à l'étale de marée haute.

Des schémas de fonctionnement théorique ont été établis pour la zone de « l'estuaire » et du « bourrelet ».

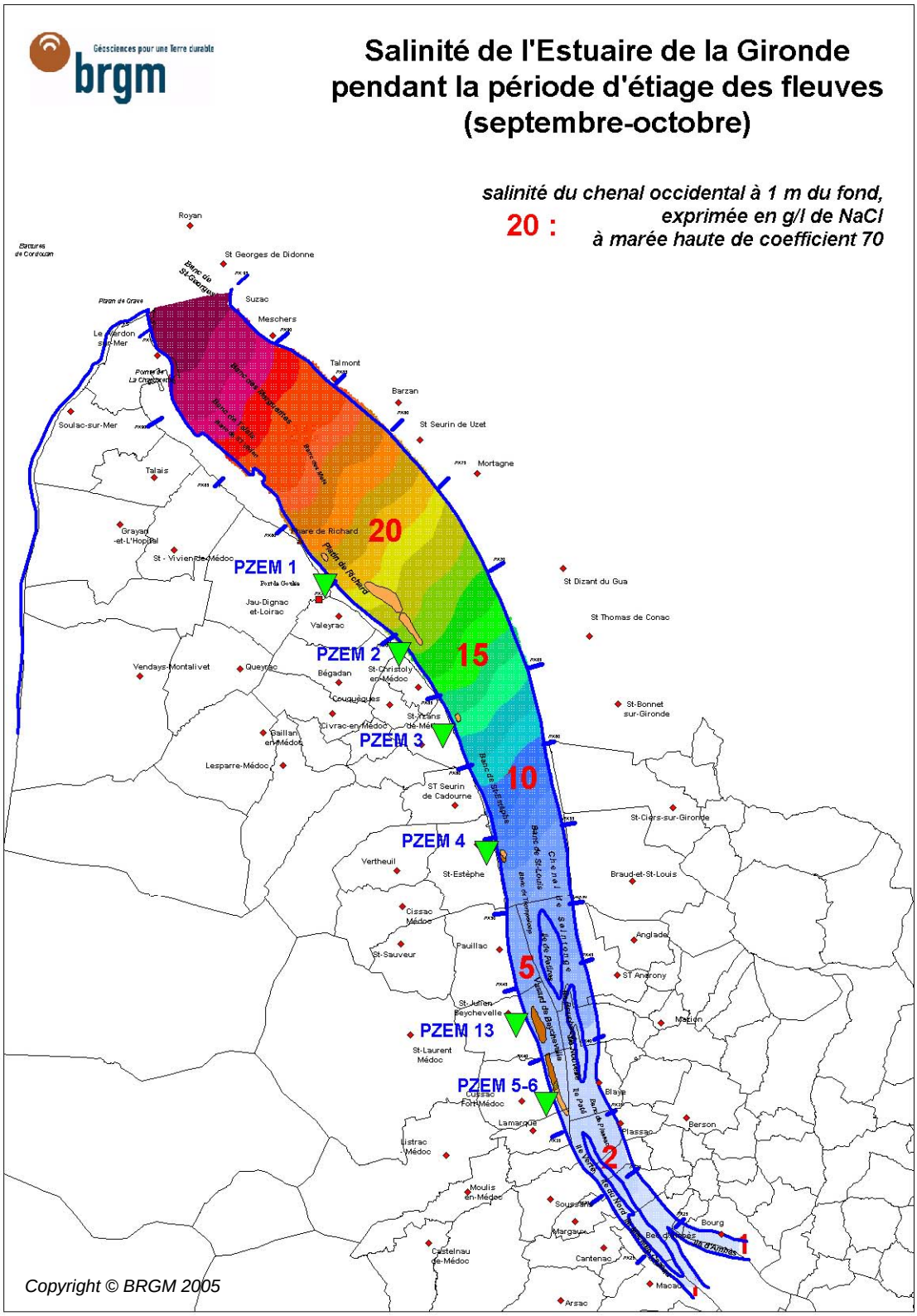


Illustration 13 : Teneurs en sel de l'estuaire de la Gironde (d'après Platel, 2001)

Zone de l'estuaire

Dans cette zone, les niveaux les plus bas de la nappe sont observés en septembre-octobre. C'est aussi la période de l'année où l'eau de l'estuaire actuel est la plus salée.

Le schéma général de fonctionnement qui conditionne l'aléa (la contamination) et qui est représenté en haut de l'illustration 14 a été établi avec :

- un marnage de 3,95 m (valeur représentative d'une marée de coefficient 70),
- une cote de + 0,55 m NGF pour le niveau de l'eau dans l'estuaire (valeur calculée à partir des nouvelles cotes d'étiage de l'estuaire communiquées par le Port Autonome de Bordeaux),
- les cotes d'eau moyennes enregistrées à marée haute et à marée basse sur la période 1999-2005 dans le piézomètre PZEM 2 de Port-de-By à St-Christoly (nappe des calcaires),
- des teneurs en sel variant de 4 g/l (en période de crue et à marée haute pour un coefficient moyen) à 17 g/l (dans les mêmes conditions mais en période d'étiage) pour les eaux de l'estuaire au droit du PK70.

Dans le secteur de Saint-Christoly où les nappes des calcaires et des sables sont en parfaite communication, il apparaît que la pression de la nappe est inférieure à celle du plan d'eau pendant 38 à 51% du temps, en fonction de l'état de la nappe.

Pendant cette période, les eaux de l'estuaire sont donc susceptibles de contaminer le réservoir de l'Eocène moyen alors que le reste du temps, l'eau de la nappe sort en pression par l'exutoire du chenal de navigation de la Passe de By ou par drainance ascendante dans les nappes alluviales.

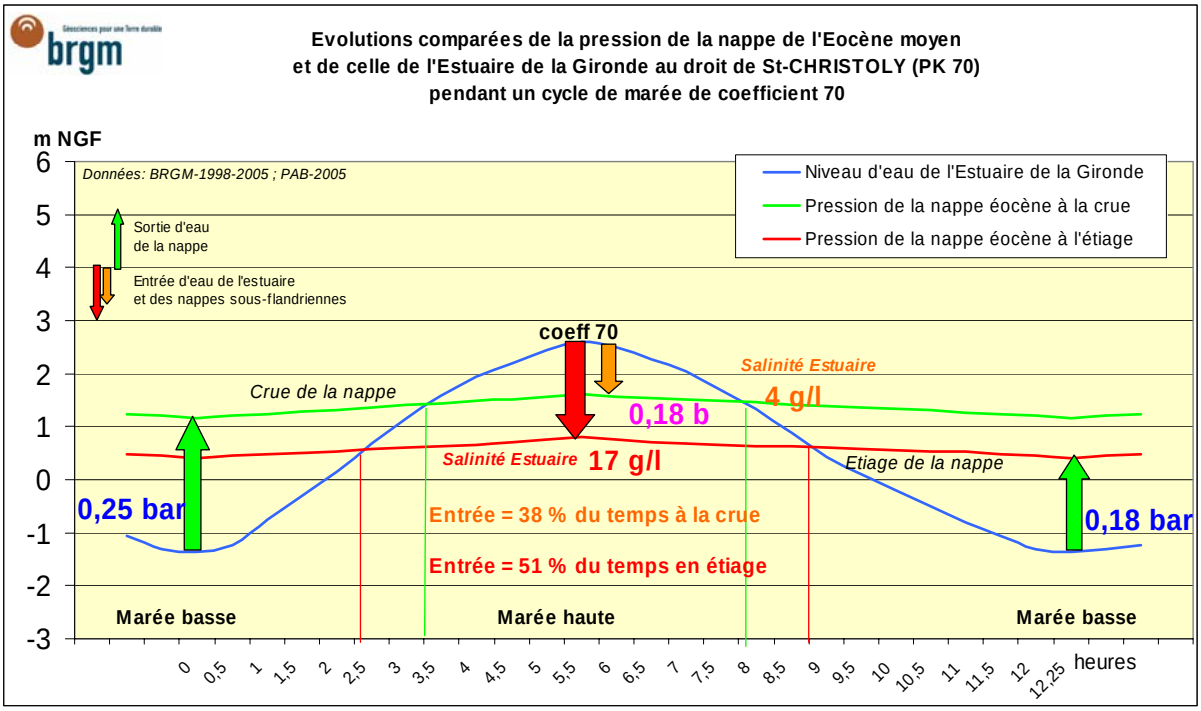
La contamination de l'aquifère de l'Eocène moyen par les eaux saumâtres ou salées des terrasses pléistocènes est, quant à elle, conditionnée par l'agencement des terrains et par des mécanismes (différentiels de pression, convection, diffusion…) qui restent pour l'instant mal connus.

Zone du bourrelet

Dans cette zone, les niveaux les plus bas de la nappe sont aussi observés en septembre-octobre.

Le schéma général de fonctionnement qui conditionne l'aléa (la contamination) et qui est représenté en bas de l'illustration 14 a été établi avec :

- un marnage de 4,05 m (valeur représentative d'une marée de coefficient 70),
- une cote de + 0,35 m NGF pour le niveau de l'eau dans l'estuaire (valeur calculée à partir des nouvelles cotes d'étiage de l'estuaire communiquées par le Port Autonome de Bordeaux),



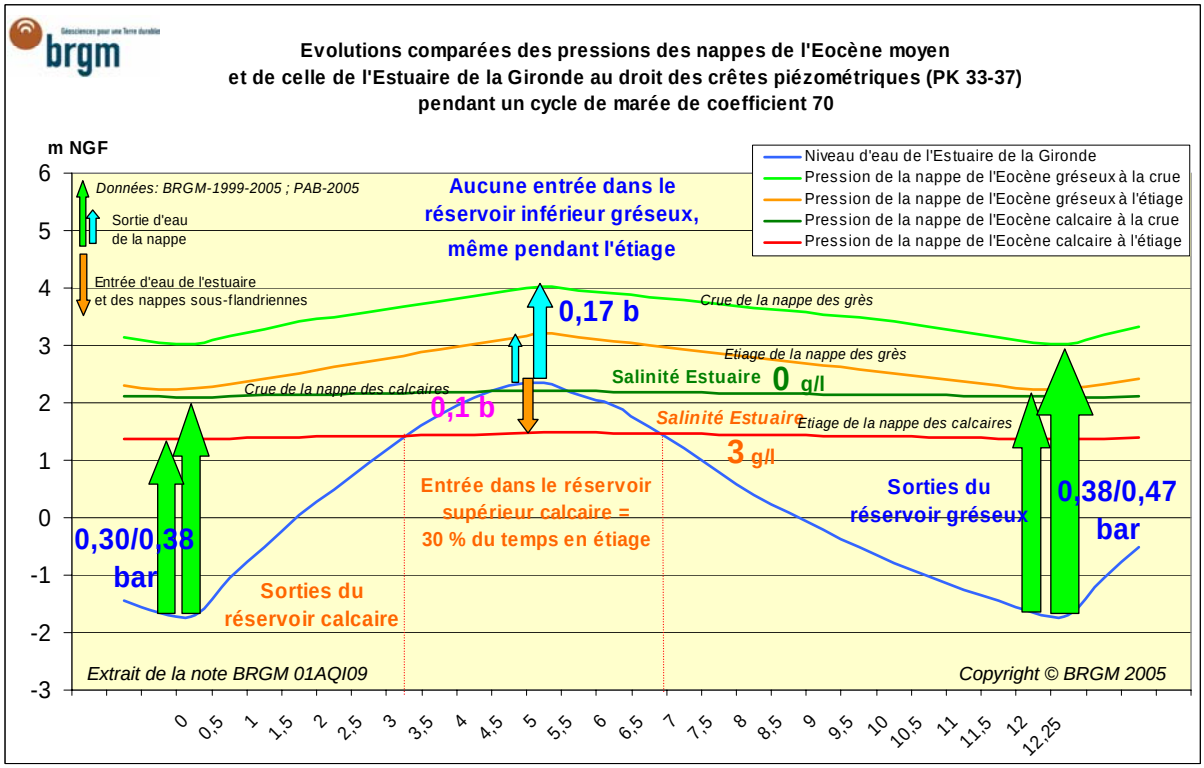


Illustration 14 : Schémas théoriques de fonctionnement dans la zone de l'estuaire et du bourrelet (d'après Platel, 2001, modifié)

- les cotes d'eau moyennes enregistrées à marée haute et à marée basse sur la période 2000-2005 dans le piézomètre PZEM 5 de Fort-Médoc à Cussac (nappe des grès),

- les cotes d'eau moyennes enregistrées à marée haute et à marée basse sur la période 2003-2005 dans le piézomètre PZEM 6 de Fort-Médoc (nappe des calcaires),

- des teneurs en sel variant de 0 g/l (en période de crue et à marée haute pour un coefficient moyen) à 3 g/l (dans les mêmes conditions mais en période d'étiage) pour les eaux de l'estuaire au droit du PK37.

Il apparaît que la nappe captive des grès est toujours en surpression par rapport au plan d'eau de l'estuaire, ce qui confirme que l'aléa est nul pour cet aquifère.

Il n'en va pas de même pour la nappe des calcaires dont la pression est inférieure à celle du plan d'eau pendant 8 à 30% du temps en fonction de l'état de la nappe.

Pendant cette période, les eaux de l'estuaire sont donc susceptibles de contaminer le réservoir alors que le reste du temps, l'eau de la nappe sort en pression soit par l'exutoire du chenal de navigation de la Passe de Cussac, soit par drainance ascendante dans les nappes alluviales.

La contamination de l'aquifère de l'Eocène moyen par les eaux saumâtres ou salées des terrasses pléistocènes est, comme dans le cas de l'estuaire, conditionnée par l'agencement des terrains et par des mécanismes (différentiels de pression, convection, diffusion…) qui restent pour l'instant mal connus.

3.4.3. Etat des connaissances par rapport à l'aléa

Zone de l'estuaire

☞ **Données piézométriques**

L'illustration 15 représente les variations annuelles des pressions des nappes éocènes sur tous les points du réseau PZEM. Comme l'aléa n'existe qu'à marée haute (cf. illustration 14), les valeurs présentées correspondent aux niveaux observés pour une marée haute de coefficient 70 (niveau MHc70).

Dans le secteur septentrional de Jau et St-Christoly (**PZEM 1 et 2**), la nappe éocène, prise dans son ensemble, présente des variations strictement identiques, son niveau MHc70 se situant toujours sous le plan moyen des hautes mers de l'estuaire sauf pendant les premiers mois de la crue exceptionnelle de 2001. La nappe se comporte de façon assez comparable dans le secteur de St-Yzans-Laména (**PZEM 3**) mais le niveau est légèrement plus haut que sur PZEM 1 et PZEM 2.

Dans le secteur central de St-Estèphe (**PZEM 4**), la différence entre les plus bas niveaux et le niveau moyen du plan d'eau est de l'ordre de 1.5 m. Ce n'est que pendant les 2 mois de crue que le niveau MHc70 peut éventuellement atteindre le niveau moyen de l'estuaire.

Il apparaît ainsi que l'aléa (contamination de l'aquifère par les eaux de l'estuaire) est plus important dans le secteur septentrional que dans le secteur central.

☞ **Données hydrochimiques**

Depuis 6 ans, des prélèvements réguliers d'échantillons d'eau à fin d'analyses sont effectués sur les 4 premiers piézomètres du réseau PZEM à diverses périodes de l'année : en période de crue et à l'étiage à l'occasion de très fortes marées hautes.

Il est à préciser que pendant les quatre premières années, ces prélèvements d'eau ont été effectués à différentes profondeurs dans chaque piézomètre afin de mettre en évidence d'éventuels gradients.

Il s'avère que de Jau à St-Yzans (**PZEM 1, 2 et 3**), les eaux éocènes se caractérisent par une absence totale ou quasi totale de tritium (alors que les eaux de l'estuaire présentent des teneurs de l'ordre de 7 UT) et par un faciès chloruré-sodique, même à grande profondeur. Les teneurs en sel évoluent de plus de façon identique dans les différents niveaux de chaque sondage (cf. illustration 16).

Chaque secteur présente toutefois des évolutions spécifiques.

Le piézomètre de Jau (**PZEM 1**) se caractérise par une teneur en sel de l'ordre de quelques g/l (entre 3,5 et 4,4 g/l à - 42 m en 2002) qui augmente régulièrement depuis le début du suivi (cf. illustration 16). Les prélèvements réalisés dans cet ouvrage ont aussi mis en évidence des pH proches de la neutralité et de faibles teneurs en oxygène dissous traduisant des conditions réductrices.

Le piézomètre de Saint-Christoly (**PZEM 2**) se caractérise aussi par une salinité importante (de l'ordre de 4 g/l) mais sur cet ouvrage, les teneurs sont relativement constantes (cf. illustration 16).

Un peu plus au sud, le piézomètre de Saint-Yzans (**PZEM 3**) présente des teneurs en sel dont la variabilité est probablement liée à la proximité des affleurements calcaires de Couquèques (cf. illustration 16). Il faut de plus remarquer que sur ce piézomètre, les teneurs en sel décroissent de façon nette et systématique avec la profondeur.

Encore plus au sud, le piézomètre de Saint-Estèphe (**PZEM 4**) se caractérise par un faciès bicarbonaté-calcique et par de faibles teneurs en NaCl qui sont d'ailleurs en diminution ces dernières années. Contrairement aux eaux des 3 premiers piézomètres qui présentent un rapport Na/Cl très proche de celui de l'eau de mer, les eaux du piézomètre PZEM 4 présentent un rapport Na/Cl plus important pouvant indiquer que le sodium et les chlorures n'ont pas la même origine que dans les 3 premiers cas.

De Jau à Saint-Yzans, les teneurs en sel mises en évidence dans les différents piézomètres montrent que les assises de l'Eocène sont contaminées par du sel. L'absence totale ou quasi totale de tritium dans les eaux laisse supposer que ce sel provient plutôt des eaux fossiles contenues dans les terrasses sous flandriennes que des eaux de l'estuaire actuel. Les mécanismes qui peuvent être à l'origine de la contamination sont schématisés sur l'illustration 17.

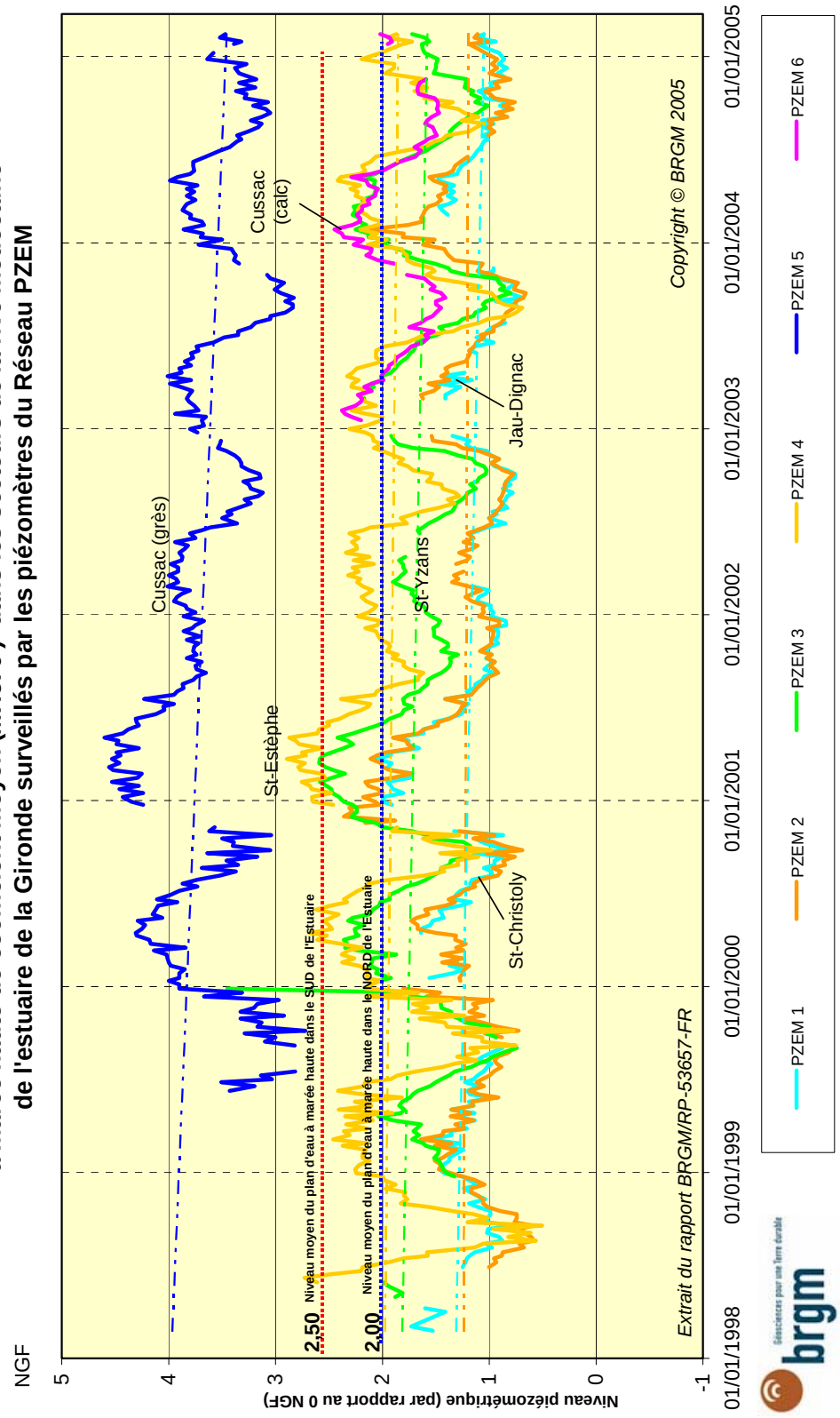
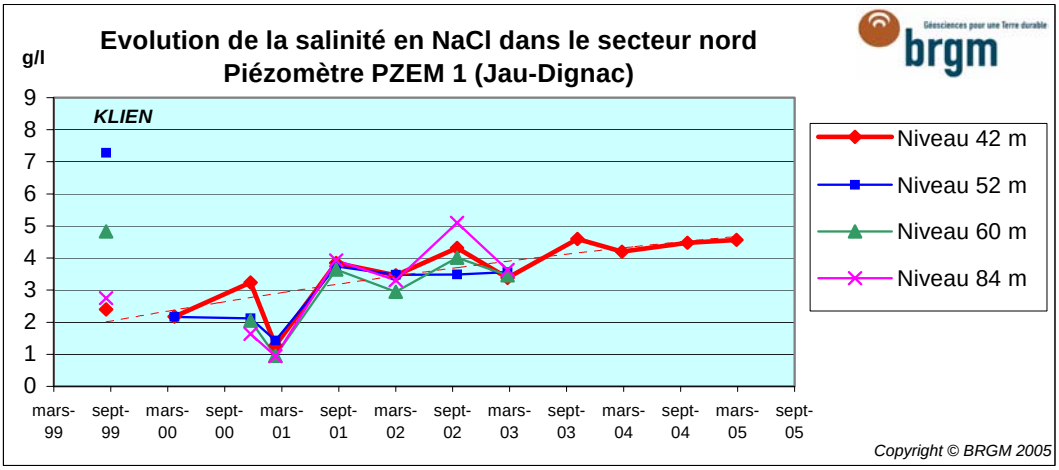
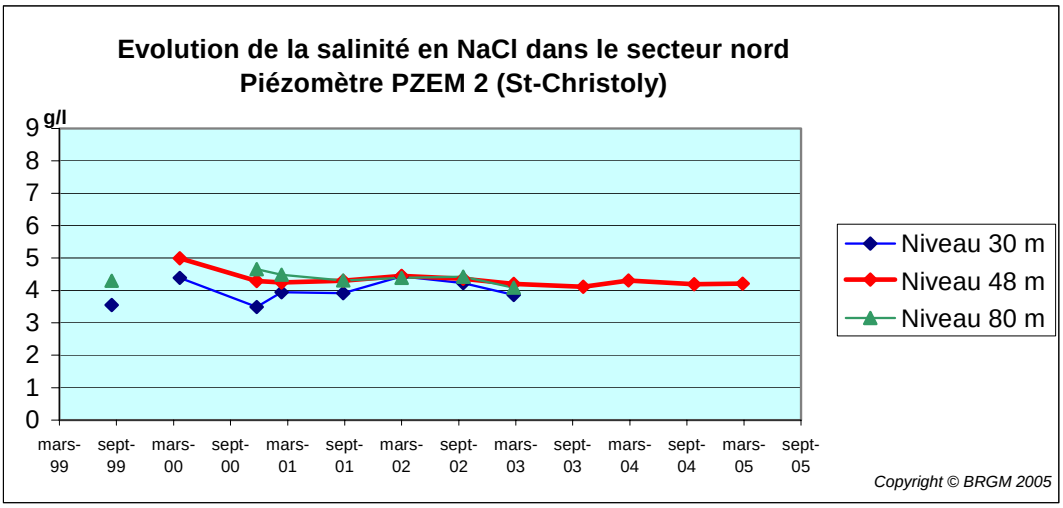
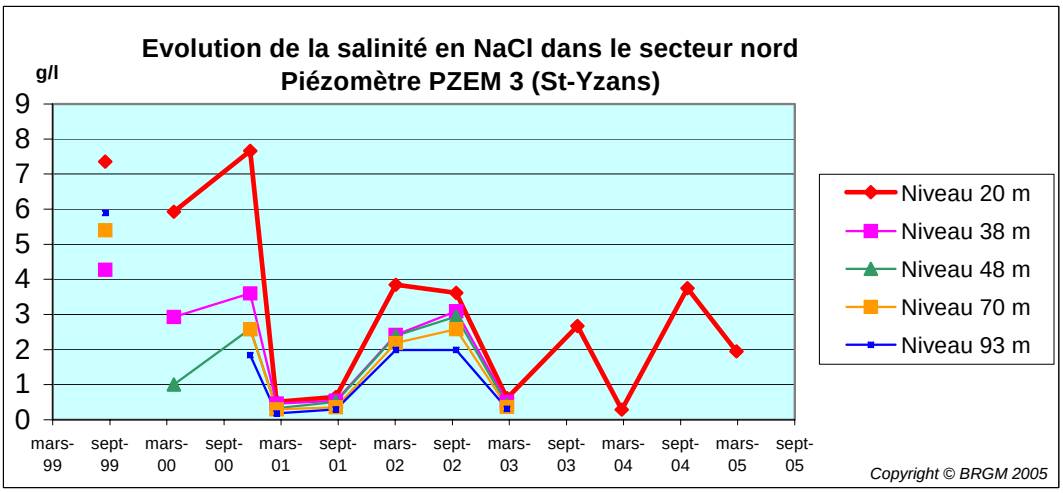


Illustration 15 : Evolution des niveaux de la nappe éocène sur les différents piézomètres du réseau PZEM pour MHc70 (d'après Platel et al., 2005)

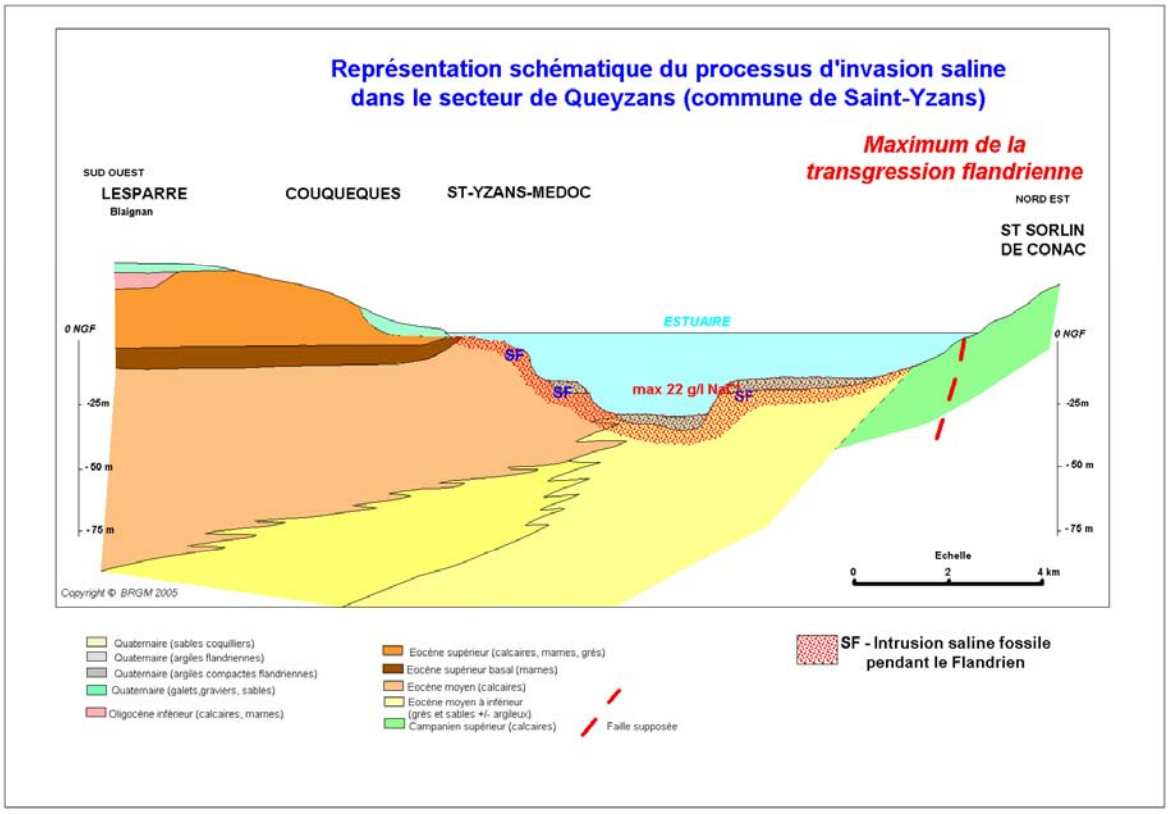


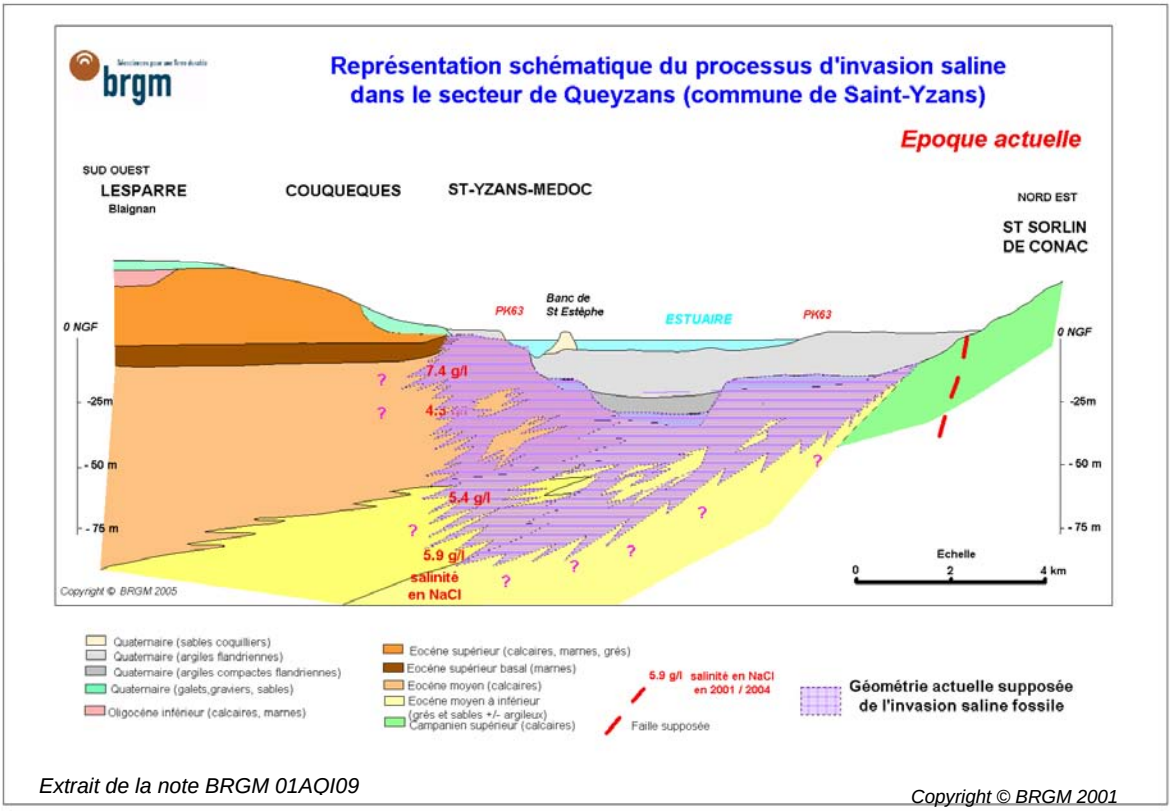




Extrait du rapport BRGM/RP53657-FR

Illustration 16 : Evolution des teneurs en sel sur PZEM1, PZEM 2 et PZEM 3 (d'après Platel et al., 2005, complété)





Extrait de la note BRGM 01AOI09

Copyright © BRGM 2001

Illustration 17 : Représentation schématique du processus de contamination dans le secteur de Queyzans (d'après Platel, 2001, simplifié)

Zone du bourrelet

☞ Données hydrochimiques

Les prélèvements réguliers effectués depuis 2 ans en période de crue et d'étiage sur les piézomètres du réseau PZEM situés dans le secteur du bourrelet (Cussac, Beychevelle, Soussans, Plassac, St-Genès-de-Blaye) ont montré :

- que les eaux du réservoir profond sablo-gréseux présentaient des faciès bicarbonaté-calciques et qu'elles se caractérisaient par de faibles teneurs en NaCl (20 à 52 mg/l),

- que les eaux des réservoirs calcaires supérieurs présentaient des teneurs comprises entre 28 et 80 mg/l à l'exception du piézomètre PZEM 6 de Cussac se caractérisant par des teneurs de l'ordre de 270 mg/l.

Compte tenu de l'agencement des terrains, les eaux saumâtres contenues dans les formations pléistocènes constituent la source de contamination la plus probable. Dans le secteur de Cussac, les formations de l'Eocène moyen sont en effet en relation directe avec les alluvions sous-flandriennes alors que dans les secteurs de Soussans et de Beychevelle, l'aquifère est isolé des alluvions par les marnes de l'Eocène supérieur.

☞ Données piézométriques

L'illustration 18 établie avec des mesures effectuées sur plusieurs forages permet de mettre en évidence la chute générale des niveaux de la nappe de l'Eocène dans le secteur d'étude.

A la fin du 19ème siècle, le niveau de la nappe éocène se situait vers +13 à + 15 NGF dans le secteur de Cussac-Beychevelle, les forages des châteaux vinicoles débitant naturellement grâce à un fort artésianisme.

La chute de pression apparaît de façon manifeste dès les années 1950 avec l'augmentation des prélèvements et s'accélère dans les années 1970. Le niveau moyen dans le sondage de Plassac est alors de + 4 NGF.

Après un palier d'une quinzaine d'années, l'augmentation des prélèvements s'est accompagnée d'une nouvelle baisse des niveaux. Ces derniers ont atteint + 1,7 NGF lors de l'étiage 1991.

Depuis cette époque, le niveau moyen de la nappe des calcaires se maintient aux alentours de + 2,70 NGF en rive droite et autour de + 1,75 m NGF en rive gauche (piézomètre de Cussac PZEM 6).

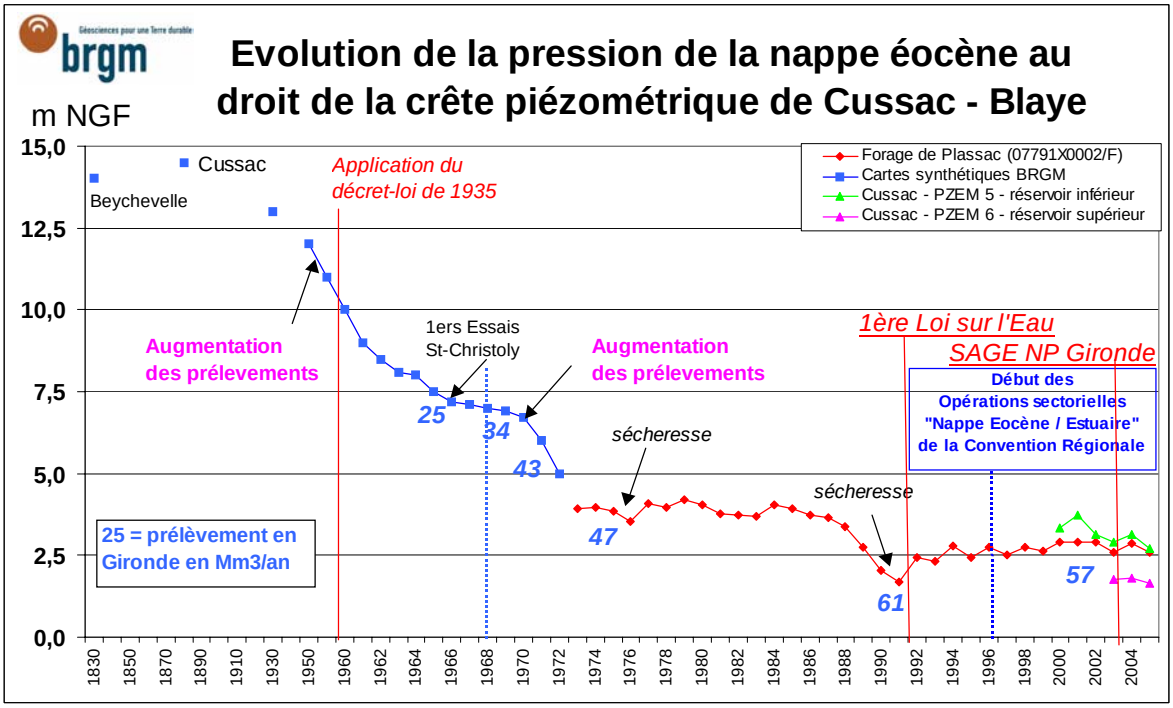


Illustration 18 : Evolution de la pression de la nappe de l'Eocène moyen au droit de la crête piézométrique de Cussac-Blaye depuis la fin du 19ème siècle (d'après Platel, 2001, complété)

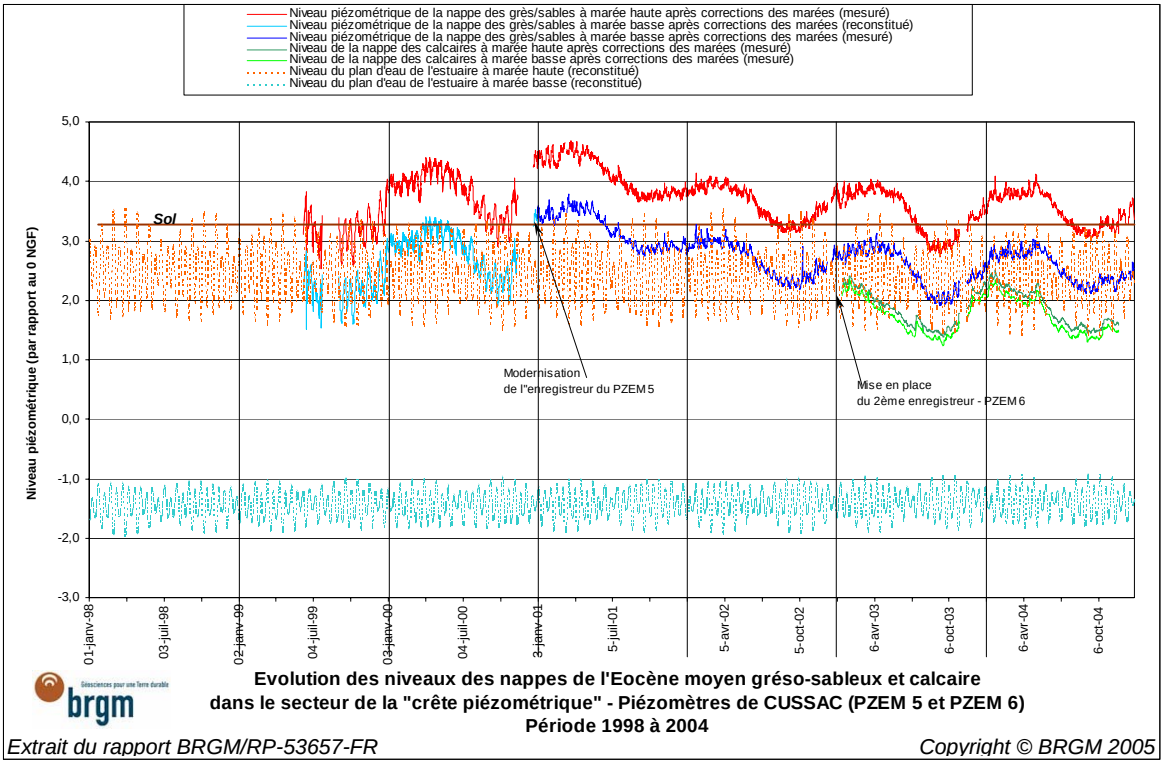


Illustration 19 : Evolution sur 6 ans des niveaux des nappes de l'Eocène moyen dans le secteur de crête piézométrique (Piézomètres PZEM 5 et PZEM 6 de Cussac) (d'après Platel et al., 2005, complété)

Dans un contexte où une contamination par les eaux de l'estuaire est possible et où des phénomènes de contamination par les eaux fossiles sous-flandriennes ont été mis en évidence (cas du piézomètre de Cussac), il apparaît nécessaire de veiller à ce que la pression de la nappe des calcaires ne baisse pas.

Les niveaux actuels de pression qui montrent une légère tendance à la baisse (cf. illustration 19) semblent en effet suffisants pour maintenir une situation qualitative satisfaisante.

Le problème réside dans le fait que le niveau de pression en dessous duquel les phénomènes de contamination à partir de l'estuaire ou des terrasses sous-flandriennes pourraient devenir plus importants reste à définir.

3.5. DESCRIPTION DE LA VULNERABILITE

Compte tenu des informations géologiques, hydrogéologiques et hydrochimiques recueillies depuis plusieurs années sur le secteur de « l'estuaire » et du « bourrelet », il a été possible d'établir une carte schématique de vulnérabilité vis-à-vis de la pénétration de chlorures dans l'aquifère (cf. illustration 20). Les risques de salinisation (présence avérée de chlorures) seront, quant à eux, estimés dans la partie suivante.

Il est à préciser que le terme de pénétration de chlorures a été préféré au terme d'intrusion dans la mesure où les mécanismes hydrodynamiques (différentiel de pression, convection, diffusion…) qui sont à l'origine de la contamination ne sont pas encore bien connus.

Les zones vulnérables correspondent :

-aux zones où l'aquifère de l'Eocène moyen n'est pas protégé par les marnes de l'Eocène supérieur,

-aux zones où les niveaux de l'Eocène moyen affleurent,

-aux zones où la piézométrie indique que des pénétrations sont probables.

Deux zones vulnérables se distinguent :

- une première située au sud de Saint-Seurin-de-Cadourne où les chlorures ne peuvent pénétrer que dans les niveaux calcaires de l'Eocène moyen,

-une seconde située au nord de Saint-Seurin-de-Cadourne où les chlorures peuvent pénétrer dans tous les réservoirs de l'Eocène moyen.

Il convient de noter qu'en l'état actuel des connaissances, la zone située au sud des piézomètres PZEM 5/6 (zone située au sud de la crête piézométrique) a pu être qualifiée de non vulnérable vis-à-vis d'une pénétration de chlorures dans l'aquifère.

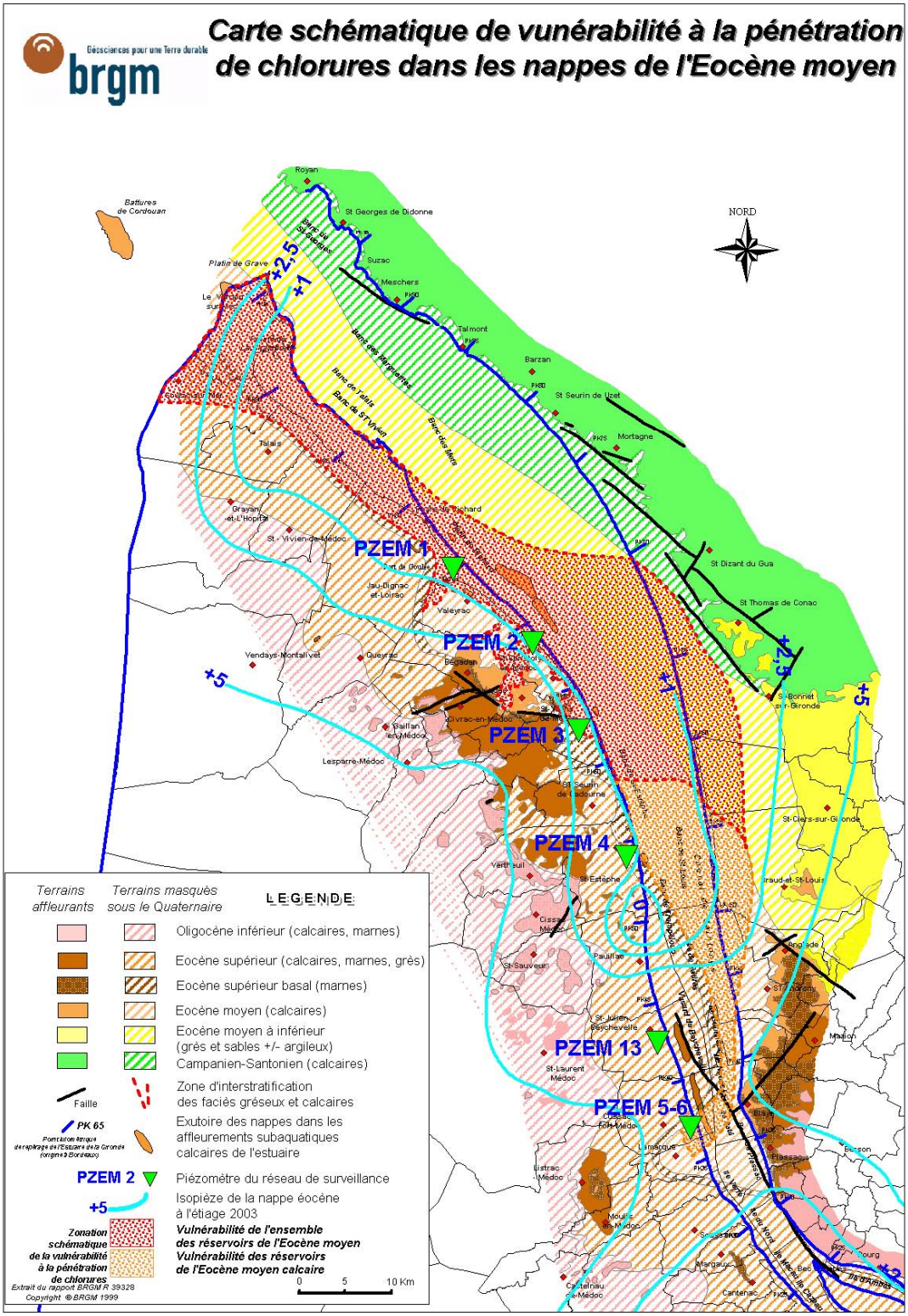


Illustration 20 : Carte de vulnérabilité à la pénétration de chlorures dans l'aquifère de l'Eocène moyen (d'après Platel et al., 1999, modifié)

3.6. EVALUATION DU RISQUE

La carte de risque de salinisation qui est représentée sur l'illustration 21 a été établie pour l'ensemble des deux zones à partir :

- des résultats des sondages électriques menés par la CGG en 1969 dont l'objectif était de repérer les zones contaminées par du sel (cf. partie 3.4.1),
- des teneurs en chlorures observées sur les ouvrages du réseau PZEM, sur les captages AEP et sur un certain nombre de forages supplémentaires,
- de l'évolution des teneurs en chlorures observée sur certains captages.

La carte met en évidence 3 zones :

- une zone de risque fort, constituée de 2 parties disjointes, où les teneurs en chlorures peuvent être supérieures à 10 g/l (au Verdon-sur-Mer et au sud de Saint-Yzans par exemple),
- une zone de risque moyen qui s'étend au-delà de l'isopièze + 2,5 NGF, où les teneurs en chlorures ne dépassent pas 500 mg/l,
- une zone de risque faible, constituée de 2 parties disjointes, où les teneurs en chlorures sont systématiquement inférieures à 200 mg/l.

A l'intérieur de ces 3 zones, il apparaît qu'un certain nombre de points présente une évolution de leurs teneurs en chlorures.

Si les gradients calculés sur les 3 graphiques de l'illustration 22 restent constants, les teneurs en chlorures pourraient atteindre en 2030 :

- des teneurs de l'ordre de 7,5 g/l sur le forage 07306X0066/PZEM1 situé en zone de risque fort (augmentation de plus de 5 g/l en 30 ans),

- des teneurs de l'ordre de 450 mg/l sur le forage 07305X0036/F2 situé en zone de risque moyen (augmentation de l'ordre de 80 mg/l en 30 ans),

- 80 mg/l sur le forage 07541X0028/F2 situé en zone de risque faible (augmentation de l'ordre de 10 mg/l en 30 ans).

Ces valeurs semblent montrer que le gradient est d'autant plus fort que la distance à l'estuaire est faible mais la présence de points ne présentant pas d'évolution significative des teneurs en chlorures à proximité des points précédents montre que les gradients calculés ne sont représentatifs que d'un environnement local.

Ils ne devront donc en aucun cas être utilisés pour établir des cartes de prévision.

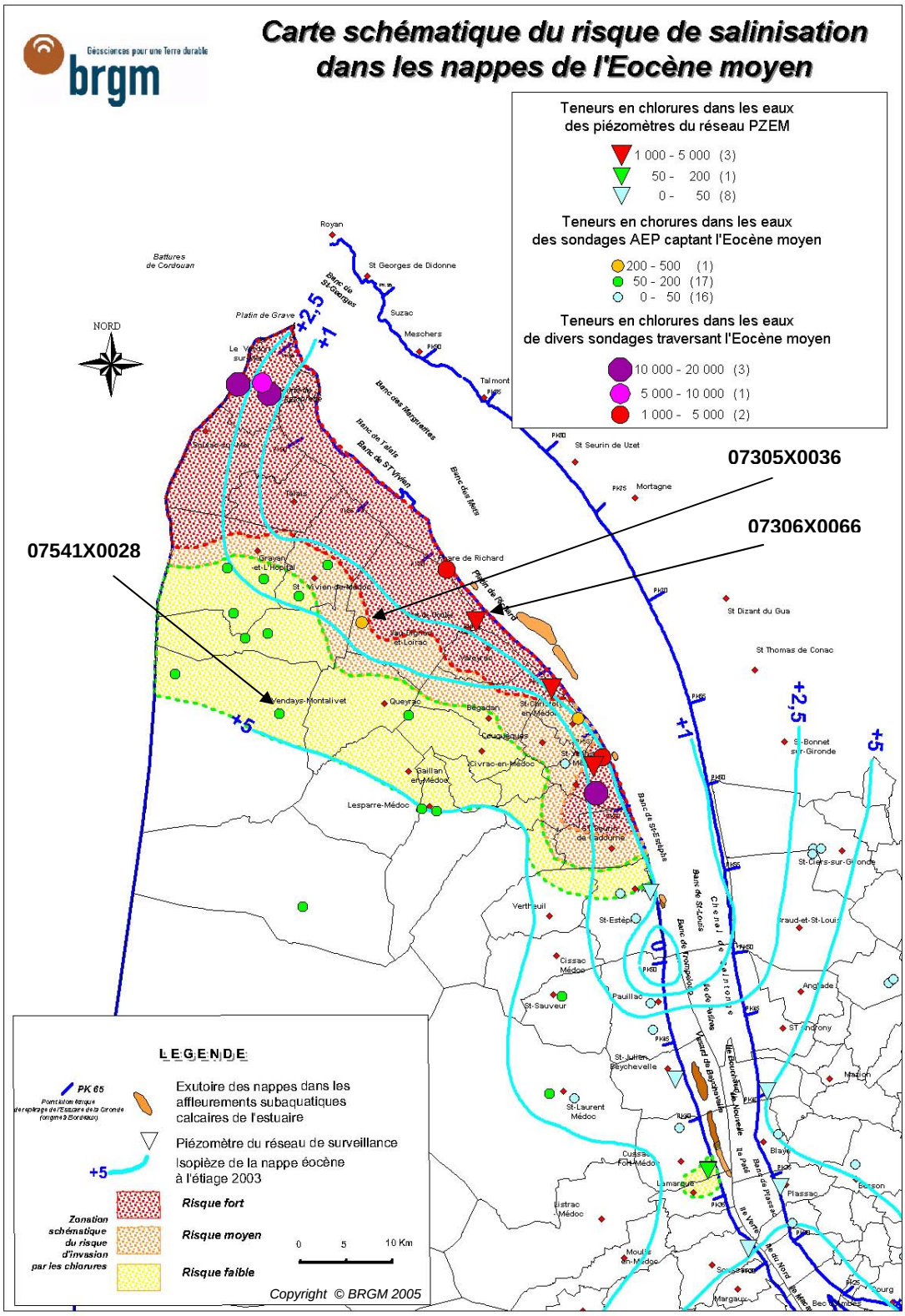


Illustration 21 : Carte du risque de salinisation dans les nappes de l'Eocène moyen

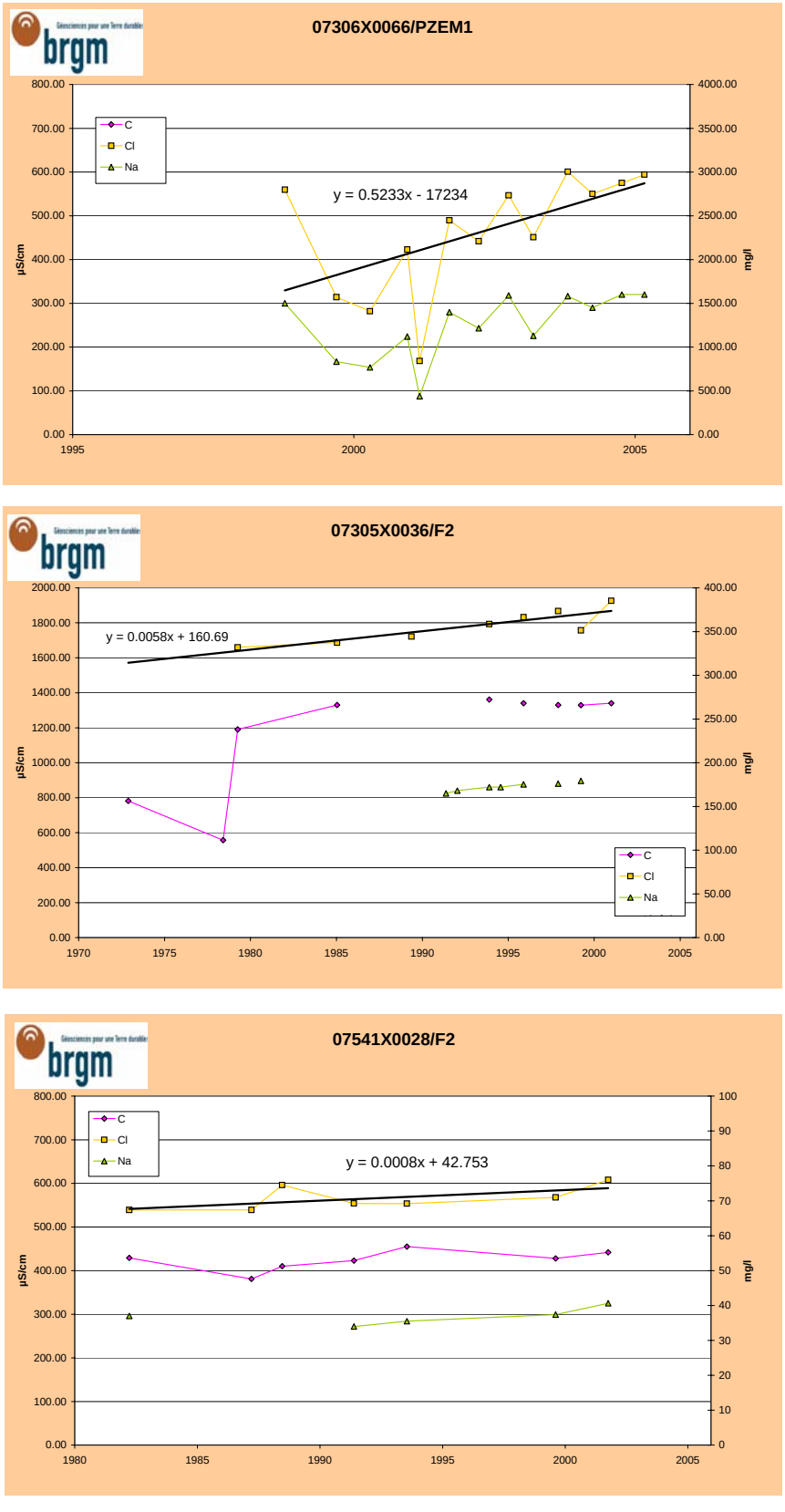


Illustration 22 : Evolution des teneurs en chlorures sur 3 forages

3.7. DESCRIPTION DES POINTS DE MESURE ET DES USAGES

3.7.1. Zone de l'estuaire

L'inventaire des points de prélèvement et des autres points de mesure a été réalisé sur le secteur défini en 3.1 qui s'étend de la pointe de Grave jusqu'à Lamarque.

La zone qui présente une superficie de 590 km^2 est limitée à l'ouest par l'isopièze + 5 NGF de 2003, courbe au delà de laquelle les forages captant les niveaux de l'Eocène moyen n'ont pas présenté d'augmentation de la conductivité lors de ces dernières années.

Il est à préciser que les points de prélèvement retenus et les volumes associés correspondent exclusivement à des ouvrages dont les niveaux captés ont été validés. Ces points ont fait l'objet d'une cartographie par aquifère et en fonction de leur usage dans l'annexe 1. Leurs caractéristiques ainsi que les prélèvements dont ils ont fait l'objet sur la période 2000-2004 sont précisés dans l'annexe 2.

Dans le cas des ouvrages captant plusieurs aquifères, un volume correspondant au volume global divisé par le nombre de nappes captées a été affecté à chaque unité.

Les autres points de mesure correspondent :

- pour l'aspect quantité, aux forages suivis dans le cadre de la « Surveillance et Gestion des nappes d'eaux souterraines en Gironde » (points appartenant au réseau départemental ou patrimonial suivis de façon continue ou mensuelle ou trimestrielle + points suivis de façon annuelle) et aux forages suivis de façon continue dans le cadre de la surveillance de l'état piézométrique de la nappe éocène en bordure de l'estuaire de la Gironde (cf. listes des points en annexe 3)

- pour l'aspect qualité, aux forages suivis dans le cadre du contrôle sanitaire (analyses réalisées sur eaux brutes), aux forages suivis dans le cadre de la « Surveillance et Gestion des nappes d'eaux souterraines en Gironde » (points appartenant aux réseaux patrimonial et départemental) et aux points suivis dans le cadre de la surveillance de la nappe éocène en bordure de l'estuaire de la Gironde (cf. listes des points en annexe 4)

Points de prélèvement

88 points de prélèvement ont été recensés sur la zone décrite précédemment.

La répartition de ces points entre les différents aquifères est représentée sur l'illustration 25. Il apparaît qu'en terme de nombre de points de prélèvement, l'Eocène moyen est l'aquifère le plus sollicité avec un total de 45 ouvrages. L'Eocène supérieur arrive en deuxième position avec un total de 22 points. Les ouvrages au Crétacé sont aussi relativement nombreux (14) : ils représentent 16 % des points.

En terme de volumes, les prélèvements effectués sur la période 2000-2004 dans l'Eocène moyen (près de 19 millions de m^3) représentent 72,3 %. Sur la même période, les prélèvements effectués dans l'Eocène supérieur (3,2 millions de m^3) et dans le Crétacé (2,4 millions de m^3) ne représentent respectivement que 12,5 et 9,4 % des prélèvements totaux (cf. illustrations 23 et 25).

Ces derniers s'élèvent à 26 millions de m^3 sur la période 2000-2004 et permettent de calculer une valeur moyenne annuelle de **5,2 millions de m^3**. Dans le détail, il apparaît que ces prélèvements ont régulièrement augmenté entre 2000 et 2003 et enregistré une légère baisse entre 2003 et 2004 (cf. illustration 23).

L'évolution des prélèvements en fonction de l'aquifère est représentée sur l'illustration 25. Il apparaît que les prélèvements effectués dans l'aquifère de l'Eocène moyen ont évolué comme les prélèvements totaux : ils ont augmenté entre 2000 et 2003 et légèrement diminué entre 2003 et 2004.

	Oligocène	EOS	EOM	EOI	Crétacé	Total
2000	68000	569037	3597947	167255	486155	4888394
2001	68000	665410.5	3592120.5	209174	487505	5022210
2002	68000	688989	3724591	284166	465094	5230840
2003	67990	643326.5	3911133.5	291834	533252	5447536
2004	67550	667102	3924043	211707	455241	5325643
Total 5 ans	339540	3233865	18749835	1164136	2427247	25914623
Pourcentage	1.31%	12.48%	72.35%	4.49%	9.37%	100.00%

Illustration 23 : Bilan volumique sur la zone « Estuaire»

En terme d'usage, les volumes prélevés pour l'AEP représentent 85 % des volumes totaux prélevés, ceux prélevés pour l'agriculture, près de 15 % (cf. illustration 25).

Les autres usages restent marginaux à l'échelle de la zone d'étude : les prélèvements destinés aux besoins individuels ne représentent par exemple que 0,17 % des volumes prélevés.

Autres points de mesure

Piézométrie

L'illustration 26 permet de visualiser la localisation des points suivis annuellement et des points suivis plus régulièrement sur la zone « Estuaire» (cf. annexe 3).

Il apparaît que la plupart des points suivis régulièrement sont implantés le long de l'estuaire. La plupart d'entre eux appartiennent au réseau spécifique de surveillance de l'état piézométrique de la nappe de l'Eocène en relation avec l'estuaire de la Gironde.

Qualité

L'illustration 27 permet de visualiser la localisation des points faisant l'objet d'analyses chimiques régulières. Elle met en évidence les 3 réseaux mentionnés précédemment.

Les fréquences d'analyses sont précisées dans les tableaux de l'annexe 4 pour les points du réseau « Estuaire » et de la « Surveillance et Gestion des nappes d'eaux souterraines en Gironde ».

La fréquence d'analyse des captages AEP varie, quant à elle, en fonction du volume prélevé mais aussi parfois en fonction des molécules recherchées. A titre d'indication, les volumes prélevés en 2004 ont été mentionnés dans le tableau relatif au réseau sanitaire en annexe 4.

3.7.2. Zone du « bourrelet »

L'inventaire des points de prélèvement et des autres points de mesure a été réalisé sur la partie méridionale du secteur défini en 3.1. Elle correspond au flanc sud du « bourrelet »et présente une superficie de 190 km^2.

La zone est limitée au nord par une ligne Blaye-Saint-Laurent-de-Médoc et s'étend jusqu'à Ambès, secteur où les formations de l'Eocène supérieur empêchent tout contact entre les niveaux de l'Eocène moyen et les terrasses sous-flandriennes et où d'éventuels phénomènes de contamination par effet densitaire ne sont plus possibles en raison de l'agencement des formations géologiques.

Les points de prélèvement et de suivi quantitatif et qualitatif ont été sélectionnés selon les mêmes critères que pour la zone de l'estuaire.

Prélèvements

37 points de prélèvement ont été recensés sur la zone décrite précédemment.

La répartition de ces points entre les différents aquifères est représentée sur l'illustration 28. Il apparaît qu'en terme de nombre de points de points de prélèvement, l'Eocène moyen est l'aquifère le plus sollicité avec un total de 24 ouvrages. L'Eocène supérieur arrive en deuxième position avec un total de 6 points.

En terme de volumes, les prélèvements effectués sur la période 2000-2004 dans l'Eocène moyen (près de 7 millions de m^3) représentent 96,2 % du total des paysages sur ce secteur. Sur la même période, les prélèvements effectués dans l'Eocène supérieur (32842 m^3) et dans le Crétacé (226053 m^3) ne représentent respectivement que 0,5 et 3,2% des prélèvements totaux (cf. illustrations 24 et 28).

Ces derniers s'élèvent à 7,1 millions de m^3 sur la période 2000-2004 et permettent de calculer une valeur moyenne annuelle de **1,4 millions de m^3**. Dans le détail, il apparaît que ces prélèvements ont augmenté entre 2000 et 2002, diminué entre 2002 et 2003 et réaugmenté entre 2003 et 2004 (cf. illustration 24).

L'évolution des prélèvements en fonction de l'aquifère est représentée sur l'illustration 28. Il apparaît que les prélèvements effectués dans l'aquifère de l'Eocène moyen ont évolué comme les prélèvements totaux : ils ont augmenté entre 2000 et 2002, diminué entre 2002 et 2003 et réaugmenté entre 2003 et 2004.

En terme d'usage, les volumes prélevés pour l'AEP représentent 96 % des volumes totaux prélevés (cf. illustration 28). Les autres usages restent marginaux à l'échelle de la zone d'étude avec des proportions respectives de 2,2 et 1 % pour les usages individuels et industriels.

	Oligocène	EOS	EOM	EOI	Crétacé	Total
2000	1500	750	1249119	0	37138	1288507
2001	1500	850	1430441	0	13235	1446026
2002	1500	6577	1593212	0	0	1601289
2003	1500	12473	1244731	0	68990	1327694
2004	1500	12192	1318131	150	106690	1438663
Total 5 ans	7500	32842	6835634	150	226053	7102179
Pourcentage	0.11%	0.46%	96.25%	0.00%	3.18%	100.00%

Illustration 24 : Bilan volumique sur la zone « Bourrelet »

Piézométrie

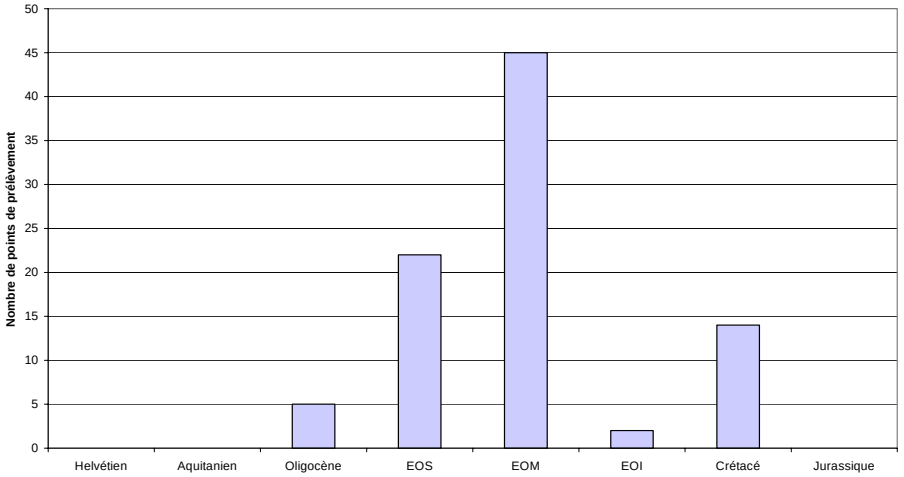
L'illustration 29 permet de visualiser la localisation des points suivis annuellement et des points suivis plus régulièrement sur la zone dite du « Bourrelet» (cf. annexe 3).

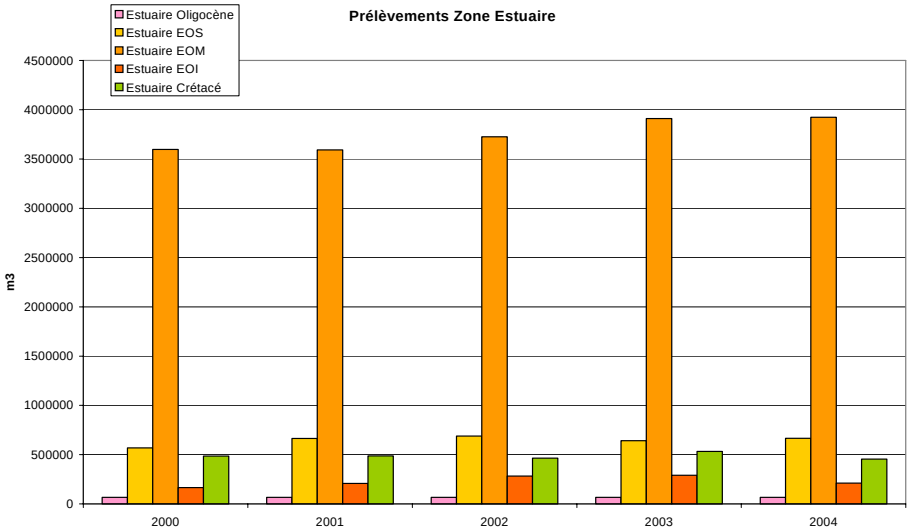
Parmi les 8 points suivis régulièrement, 6 correspondent à 3 double piézomètres réalisés dans le cadre de la mise en place du réseau spécifique de surveillance de l'état piézométrique de la nappe de l'Eocène en relation avec l'estuaire de la Gironde qui permettent de suivre simultanément les variations de pression dans les niveaux calcaires et gréseux de l'Eocène moyen.

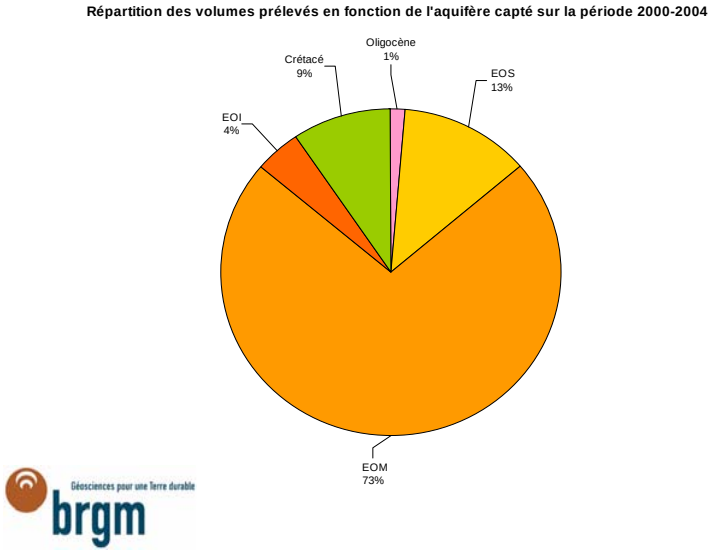
Qualité

L'illustration 30 permet de visualiser la localisation des points faisant l'objet d'analyses chimiques régulières sur la zone dite du « Bourrelet ».

Comme pour la zone de l'estuaire, les fréquences d'analyses sont précisées dans les tableaux de l'annexe 4 pour les points du réseau « Estuaire » et de la « Surveillance et Gestion des nappes d'eaux souterraines en Gironde. Les volumes prélevés sur les captages AEP en 2004 sont aussi mentionnés dans cette annexe.







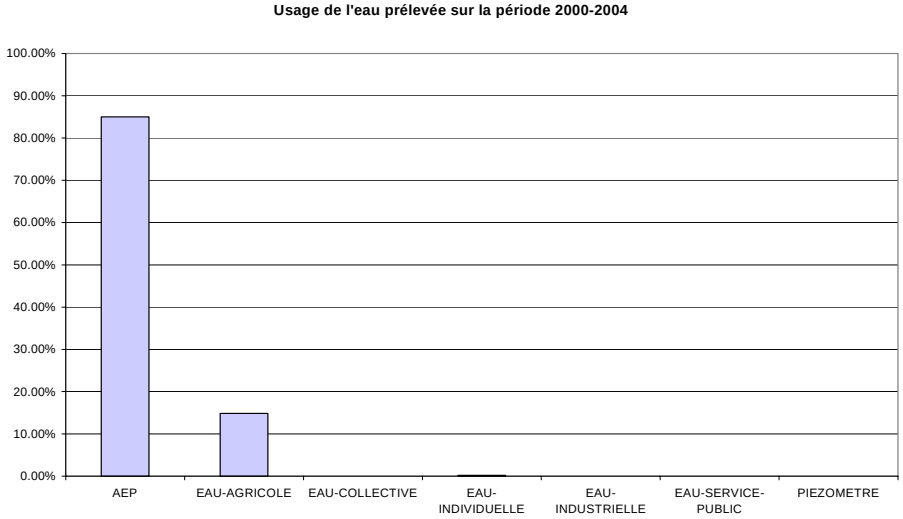
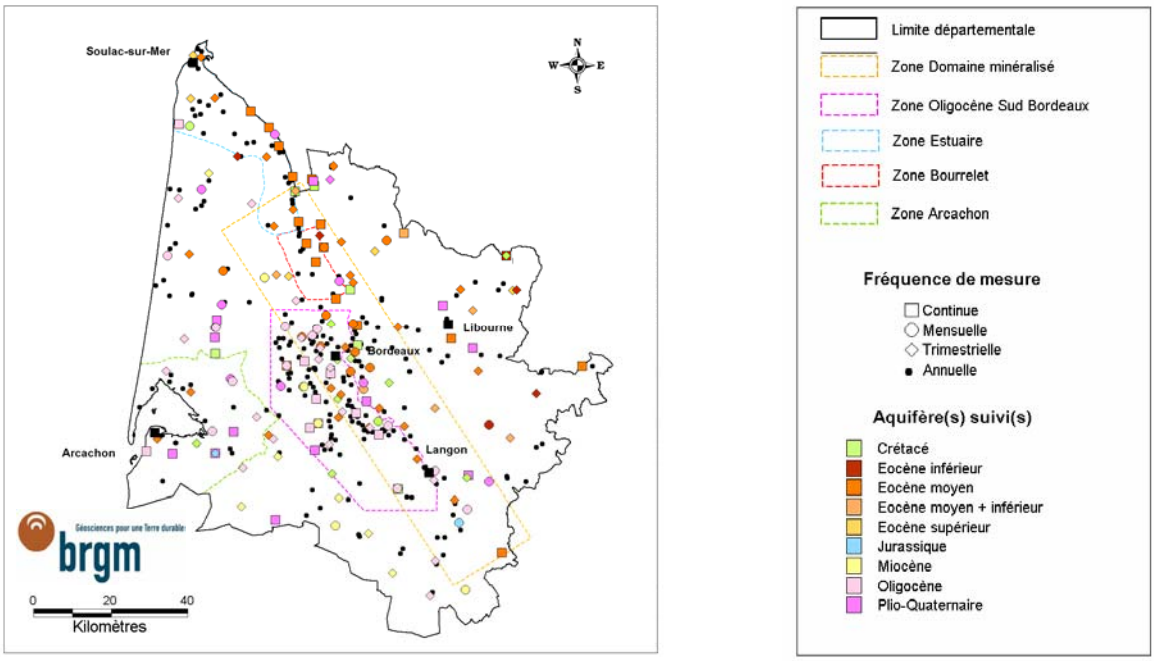


Illustration 25 : Synthèse des données concernant les prélèvements effectués sur la zone "Estuaire"



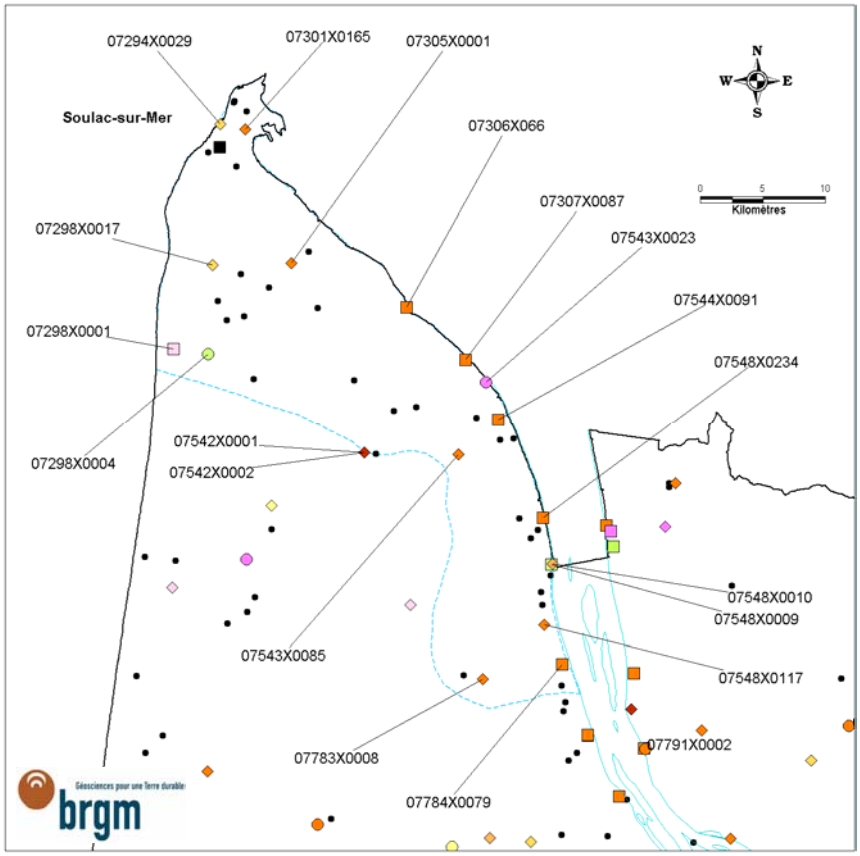


Illustration 26 : Localisation des points de mesure des niveaux d'eau sur la zone « Estuaire »

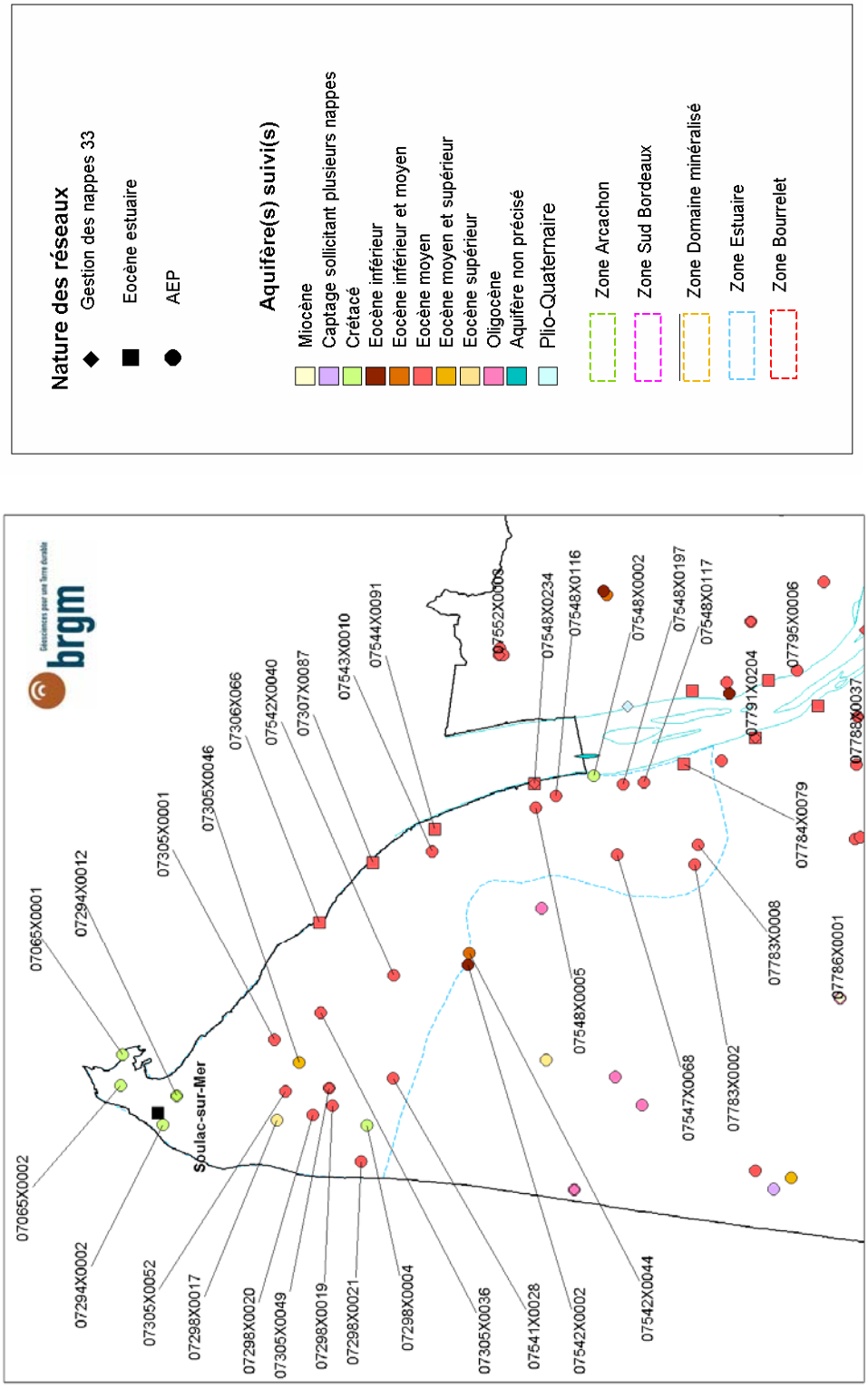
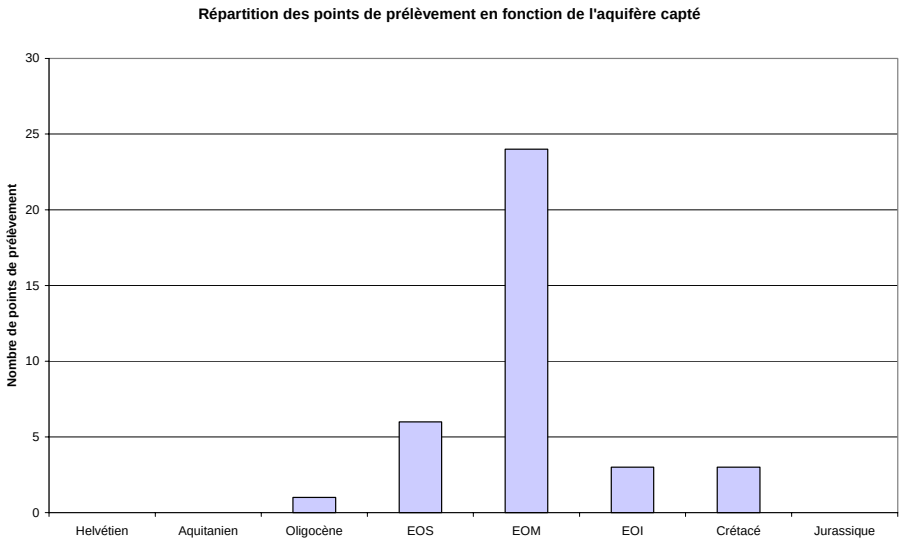
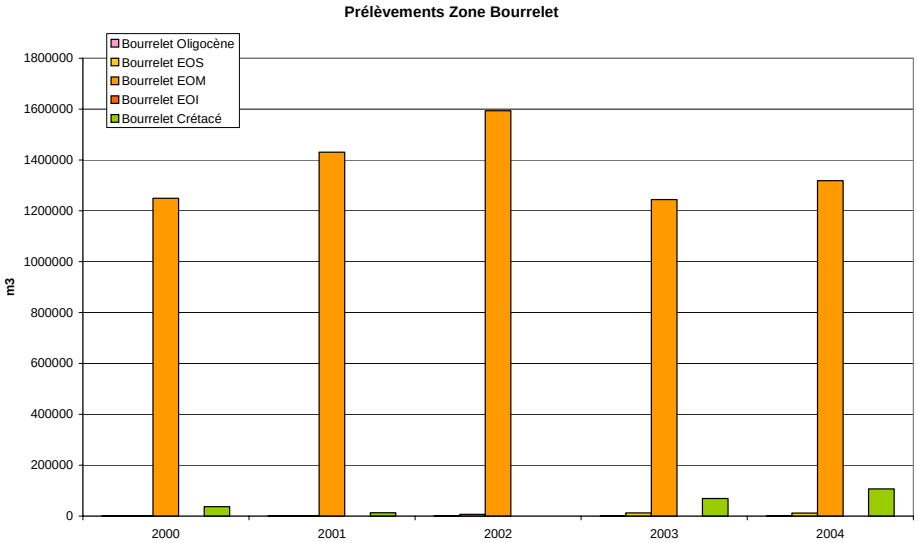
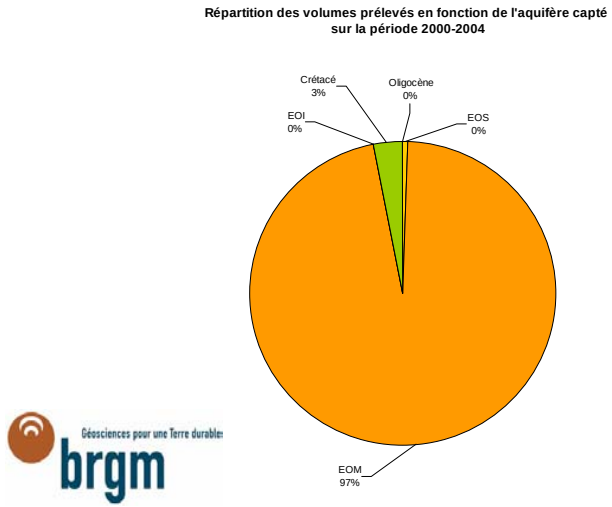


Illustration 27 : Localisation des points de mesure de la qualité sur la zone « Estuaire »







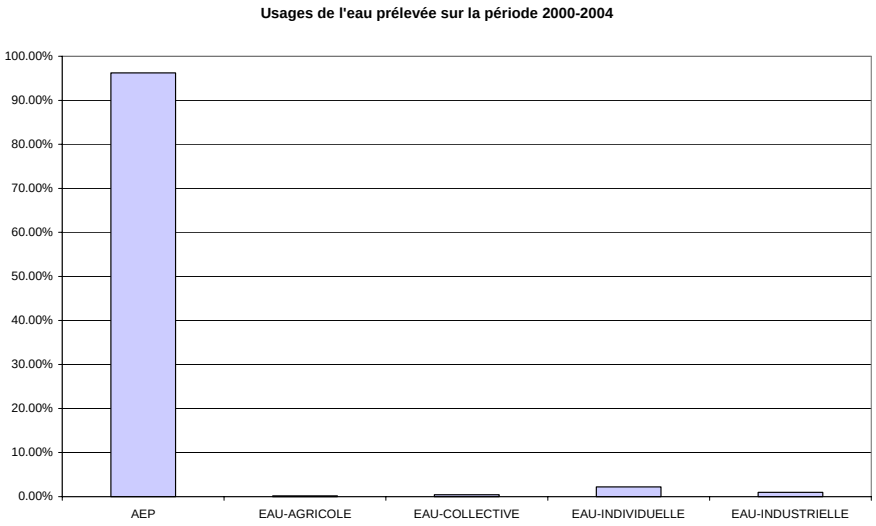


Illustration 28 : Synthèse des données concernant les prélèvements effectués sur la zone du "Bourrelet"

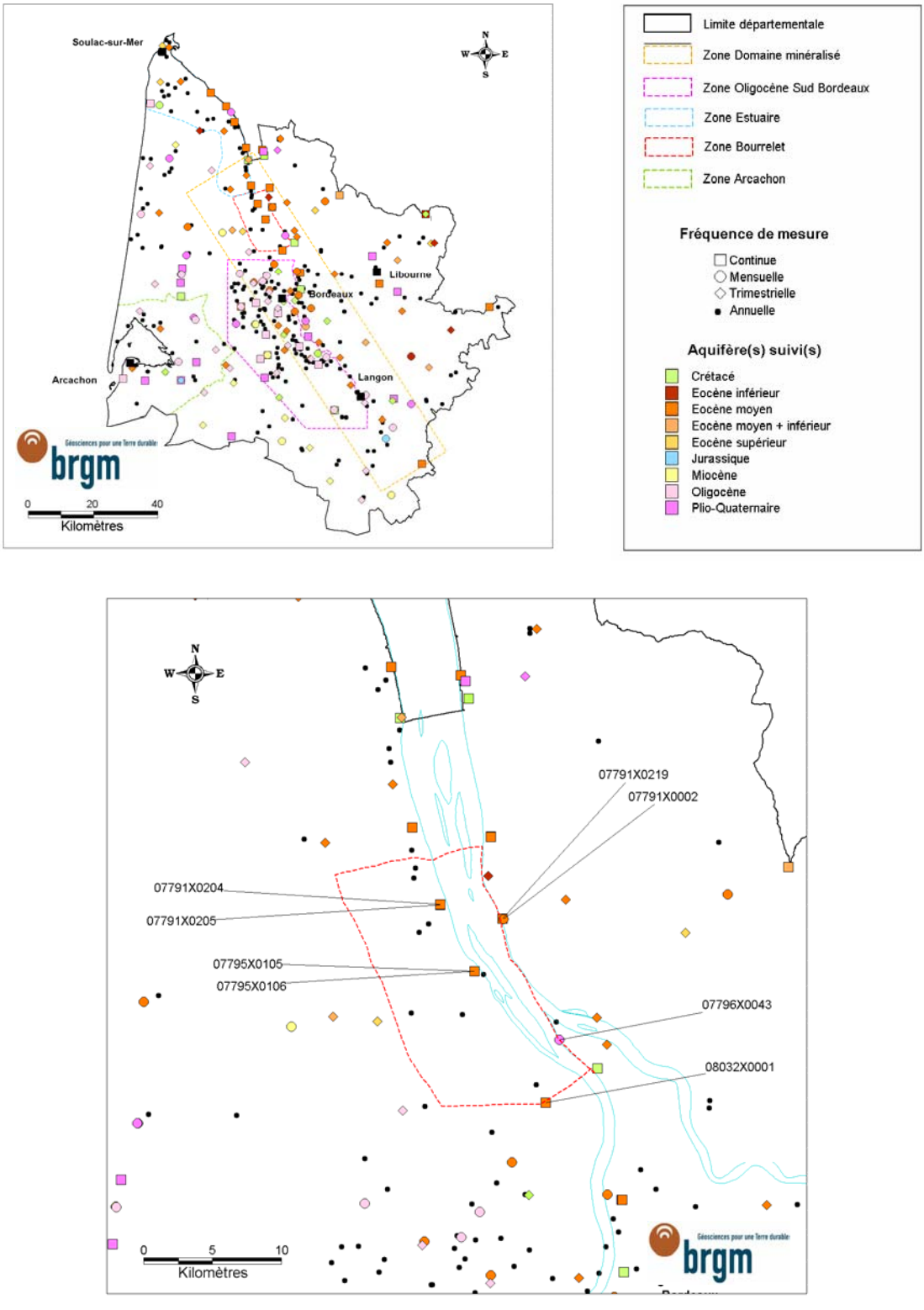
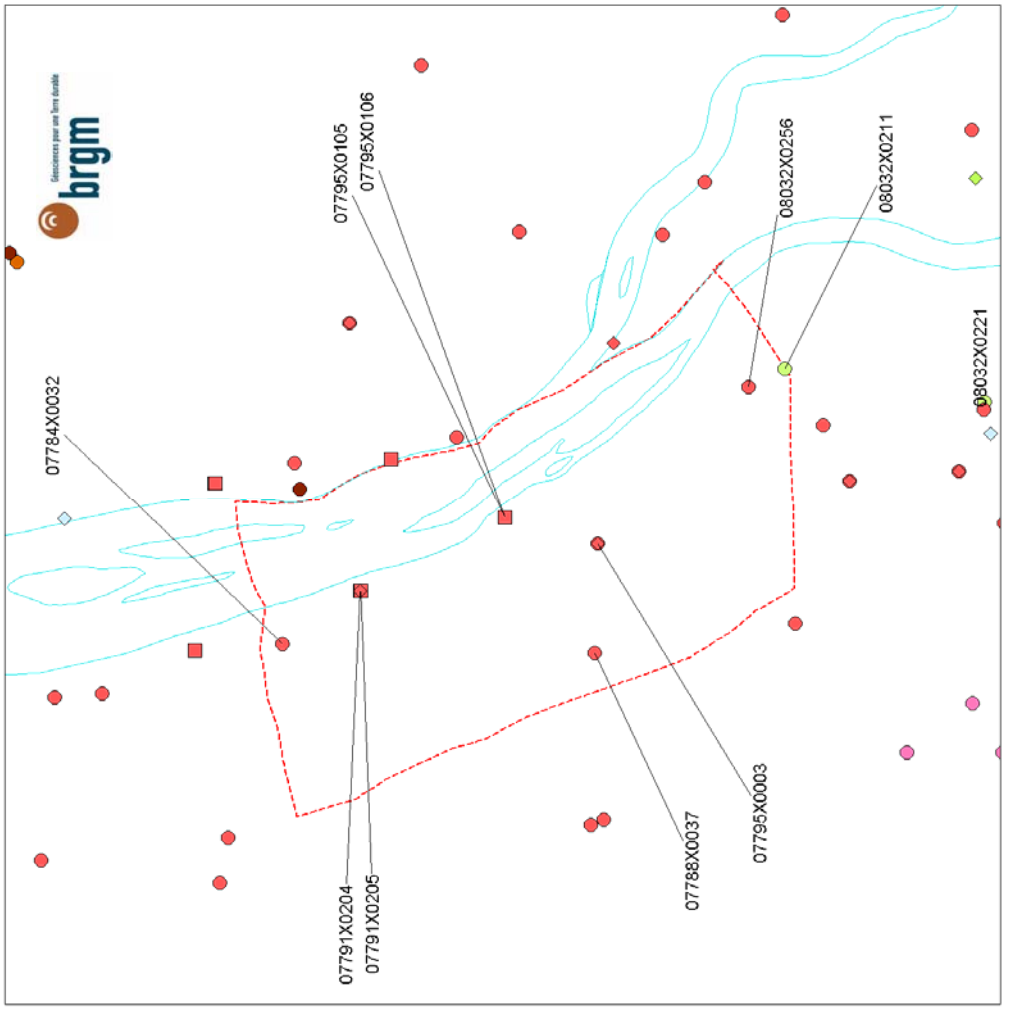


Illustration 29 : Localisation des points de mesure des niveaux d'eau sur la zone du "Bourrelet"



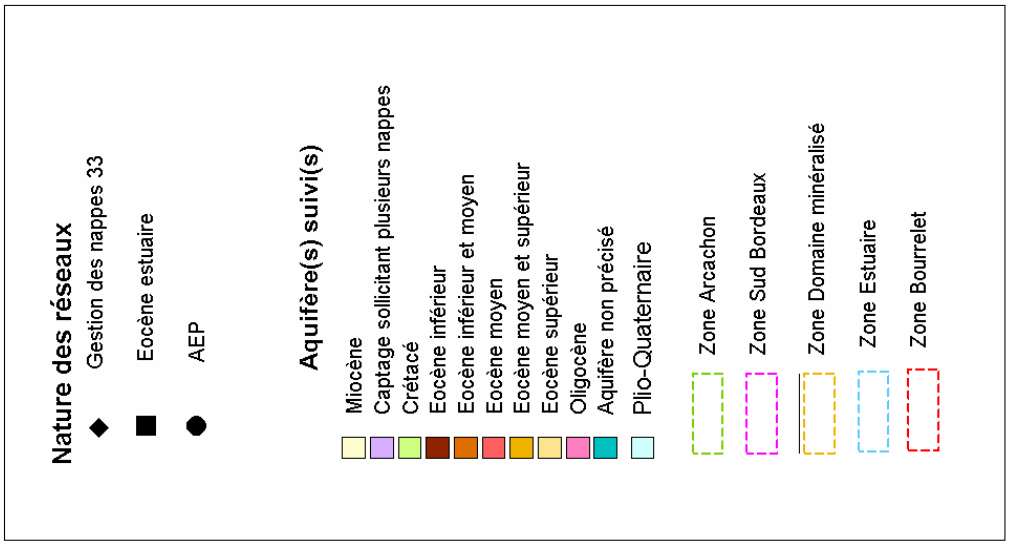


Illustration 30 : Localisation des points de mesure de la qualité sur la zone du « Bourrelet »

3.8. BILAN ET PERSPECTIVES

En l'état actuel des connaissances, il apparaît que la zone de l'estuaire se présente comme un secteur où :

- l'ensemble des niveaux de l'Eocène moyen peuvent potentiellement être contaminés par les eaux saumâtres ou salées de l'estuaire actuel ou par celles contenues dans les terrasses sous-flandriennes,

- une contamination par les eaux de l'estuaire n'est possible que pendant 38 à 51% du temps en fonction de l'état de la nappe,

- l'aléa d'une contamination par les eaux de l'estuaire est d'autant plus fort que l'on se déplace vers le nord,

- un certain nombre de points présentent une contamination avérée mais leurs eaux sont exemptes de tritium (alors que la teneur de l'estuaire est de l'ordre de 7 UT),

- de ce fait, la source la plus probable de contamination est représentée par les eaux contenues dans les terrasses sous-flandriennes.

Plus au sud, la zone du bourrelet se présente comme un secteur où :

- seuls les niveaux supérieurs calcaires de l'Eocène moyen peuvent potentiellement être contaminés par les eaux de l'estuaire actuel ou par les eaux saumâtres contenues dans les terrasses sous-flandriennes,

- une contamination par les eaux de l'estuaire n'est possible que pendant 8 à 30% du temps en fonction de l'état de la nappe,

- le seul point qui présente une teneur en sel significative est situé dans un contexte où les formations de l'Eocène moyen sont en relation directe avec les alluvions sous-flandriennes.

Compte tenu de ces observations, il semble donc que dans les 2 zones étudiées, le risque de salinisation de la nappe de l'Eocène moyen soit d'avantage lié à la présence d'eaux fossiles saumâtres ou salées dans les terrasses sous-flandriennes qu'à l'estuaire.

Les mécanismes hydrodynamiques (convection, diffusion…) qui sont à l'origine de cette contamination ne sont pour l'instant pas bien connus même s'il paraît évident que les marées jouent un rôle de moteur.

La baisse de la nappe éocène au cours de ces 50 dernières années pourrait être à l'origine de l'augmentation de la salinité observée sur quelques points du Médoc.

Dans la mesure où ce type de contamination est irréversible, il est normal que la stabilisation des niveaux observée depuis quelques années ne s'accompagne pas d'une diminution des teneurs en sel.

Au sud de Saint-Estèphe, il semble que les niveaux de pression soient suffisants pour maintenir une situation qualitative satisfaisante. Le problème réside dans le fait que le niveau de pression en dessous duquel les phénomènes de contamination pourraient devenir plus importants reste à définir.

Dans ces conditions, seul le maintien des niveaux à leur état actuel ou à un seuil supérieur peut être le garant d'un maintien de la qualité.

4. Zone du domaine minéralisé

4.1. PROBLEMATIQUE ET LIMITES DE LA ZONE D'ETUDE

La problématique consiste à étudier les risques d'augmentation de la minéralisation des eaux de l'Eocène et à les mettre en relation avec la présence de faciès spécifiques (zones de mangrove, niveaux évaporitiques) dans le système aquifère.

Pour être conforme au cahier des charges, l'étude portera sur le secteur de l'Entre-Deux-Mers mais la zone d'étude sera replacée dans un contexte plus général lorsqu'il s'agira d'étudier la mise en place de ces faciès.

4.2. DESCRIPTION GEOLOGIQUE

La présence de faciès minéralisés dans l'Eocène est étroitement liée à la paléogéographie dont l'évolution, sur l'ensemble du Bassin Aquitain, est décrite dans les paragraphes suivants et représentée sur l'illustration 31.

Il est à préciser que pour faciliter le repérage, la forme actuelle de la côte a été rajoutée sur les différents schémas. Il faut aussi noter que les diapirs qui se sont mis en place au Trias et au Lias inférieur dans le sud du bassin ont aussi été figurés.

4.2.1. Eocène inférieur

A l'Eocène inférieur, la mer qui s'était retirée de la plate-forme nord-aquitaine à la fin du Crétacé supérieur, va revenir à plusieurs reprises pour se retirer de nouveau à la fin de la période cuisienne.

Deux horizons stratigraphiques remarquables illustrent l'évolution paléogéographique au cours de l'Eocène inférieur : l'Ilerdien supérieur et le Cuisien supérieur.

☞ **L'Ilerdien supérieur** :

La région nord-aquitaine possède à cette période la physionomie d'une plaine marécageuse, vers laquelle convergent deux grands émissaires venant du nord / nord-est et de l'est, et un troisième venant du sud-est (Dubreuilh, 1987).

La plaine deltaïque est le siège d'une végétation arborescente qui se développe sur les levées sablo-argileuses. Dans les zones calmes abandonnées par le réseau fluviatile, des argiles kaoliniques se sédimentent et se trouvent associées à des accumulations ligniteuses formées par des bois de flottation.

La zone de talus deltaïque est, quant à elle, le siège d'une sédimentation sableuse où se mêlent d'abondants débris végétaux amenés par les distributaires.

☞ **Le Cuisien supérieur** :

Après l'importante transgression marine du Cuisien inférieur, une régression s'amorce dès la fin du Cuisien moyen, pour atteindre son maximum vers la fin de l'Eocène inférieur.

A cette époque, le système deltaïque septentrional reste très actif et la plaine deltaïque, parcourue par un réseau structuré de chenaux distributaires, avance fortement sur le domaine marin. Ce type de delta, à dynamique fluviale prépondérante, possède une configuration générale dite en « patte d'oiseau ».

Dans la partie amont de la plaine deltaïque, des argiles sableuses vertes, associées à une faune d'organismes fouisseurs, se déposent. Plus en aval, la basse plaine deltaïque, soumise à l'influence de la marée, présente une végétation caractéristique d'un environnement de mangrove (*Nypa*, palmiers et phytoplancton marin abondant).

C'est dans la zone de mangrove (cf. illustration 31) qui matérialise la limite entre l'eau douce et l'eau salée que les taux de sédimentation et de production de matière organique sont les plus importants. L'enfouissement très rapide de cette abondante production biologique crée de plus des conditions propices à la formation de concrétions de pyrite et de gypse dans les sédiments.

Par rapport à l'Ilerdien supérieur, le Cuisien correspond à une période où les faciès laguno-marins de plaine deltaïque tidale et de front de delta se sont considérablement développés et où les émissaires responsables de l'édification du système deltaïque nord-aquitain se sont mieux structurés.

4.2.2. Eocène moyen

Durant l'Eocène moyen, la région nord-aquitaine est globalement sous l'emprise d'une transgression marine qui voit deux avancées majeures séparées par un bref épisode régressif. L'appareil fluvio-deltaïque nord-aquitain est alors freiné dans sa progression mais une frange littorale laguno-marine subsiste avec une végétation de mangrove qui continue de se développer (Dubreuilh, 1987).

A la fin du premier épisode transgressif (au Lutétien supérieur), le domaine nord-aquitain se découvre et laisse place à une sédimentation de type pré-évaporitique, attestée par la présence d'argiles d'origine diagenétique (attapulgite et sépiolite), de recristallisations de métahalloysite et de gypse.

Le système deltaïque reconnu à l'Eocène inférieur subsiste mais il est nettement tronqué dans sa partie aval qui ne présente plus une configuration en « patte d'oiseau » mais une côte assez rectiligne.

De façon intermittente, on observe au cours de cette période, l'arrivée de décharges torrentielles, constituées de matériaux terrigènes très grossiers (sables, graviers et gros galets), qui transitent par les distributaires. Ces torrents de boue et de roches,

érodent fortement les berges et entraînent la végétation qui se retrouve fossilisée au sein des dépôts.

Dans la partie amont de la plaine deltaïque, au niveau des zones légèrement surélevées abandonnées par les émissaires, des argiles vertes sableuses se déposent par décantation entre les crues.

Dans la partie basse de la plaine deltaïque et jusqu'au niveau du front de delta, une sédimentation laguno-marine caractérisée par une végétation de mangrove à *Nypa*, *Bombax* et sapotacées continue de se développer.

Par rapport à la paléogéographie au toit de l'Eocène inférieur (Cuisien), marquée par une certaine stabilité du niveau de la mer (phase régressive), la physionomie au toit de l'Eocène moyen est, au contraire, marquée par le caractère transgressif qui subsiste.

A cette époque, la dynamique fluviale n'est donc plus prépondérante et malgré les décharges considérables de matériaux détritiques, la partie aérienne du delta a fortement régressé. Les chenaux de marée sont nettement plus incisifs au niveau de la plaine deltaïque tidale et pénètrent plus loin à l'intérieur des terres.

4.2.3. Eocène supérieur

A l'Eocène supérieur (Ludien), le domaine nord-aquitain acquiert une nouvelle physionomie (cf. illustration 31), principalement marquée par un alluvionnement intense dans un milieu de basse plaine d'inondation (Capdeville, 1987 ; Dubreuilh, 1987).

Ces dépôts, définis sous le terme général de « Molasses » sont constitués d'un matériau terrigène sablo-argileux, micacé et feldspathique, peu altéré à ciment carbonaté. La différence de composition avec les séries antérieures n'est pas fondamentale, mais ces faciès présentent une matrice carbonatée qui permet de les distinguer des formations du domaine fluviatile franc.

Le domaine de sédimentation des formations molassiques correspond à un milieu de marécages où des calcaires lacustres se déposent à la faveur de petites dépressions dans des conditions de sédimentation évaporitiques.

Vers la fin du **Ludien inférieur**, le domaine continental est envahi par des décharges sableuses correspondant aux Molasses inférieures qui, sédimentées au niveau de la basse plaine, constituent les premières assises molassiques.

Cette sédimentation se poursuivra durant tout le **Ludien moyen**. A la fin de cette période, la région sud-bergeracoise et le Périgord noir sont occupés par de vastes étendues lacustres où règne une sédimentation à caractère chimique et évaporitique.

A partir du **Ludien supérieur**, une nouvelle formation détritique envahit la région nord-aquitaine : il s'agit de la formation des Molasses du Fronsadais qui recouvre l'ensemble du domaine sud-occidental. Cette période, à tendance sèche bien

marquée, voit aussi le développement d'assises gypsifères, notamment dans le secteur de Sainte-Sabine (Périgord noir).

Le dépôt des Molasses du Fronsadais se poursuivra jusqu'au début de l'Oligocène. A la fin de l'Eocène supérieur, la région nord-aquitaine apparaît comme une vaste plaine d'épandage encombrée de sédiments où subsistent seulement quelques drains à faible compétence.

♦ ♦ ♦ ♦ ♦

Il apparaît donc que l'évolution de la géographie et des conditions climatiques au cours de la période éocène est à l'origine de faciès spécifiques qui pourront être considérés comme des zones potentiellement minéralisatrices.

Ces zones correspondent à la mangrove particulièrement bien développée de l'Eocène inférieur, à la mangrove de l'Eocène moyen dont l'extension est nettement moins importante et aux faciès évaporitiques de l'Eocène supérieur (cf. illustration 31).

D'un point de vue lithologique, les faciès de mangrove correspondent à des sables pyriteux organiques dont l'extension est représentée pour le Cuisien et l'Eocène moyen sur l'illustration 32.

Comme pour l'illustration précédente, le trait de côte actuel a été représenté. Les limites départementales ainsi que le cours actuel de la Garonne et de la Dordogne ont aussi été figurés pour faciliter le repérage.

Outre l'extension des zones de mangrove, l'illustration 32 met aussi en évidence la variabilité des faciès de l'Eocène dans l'espace et dans le temps.

Les illustrations 33 et 34 permettent de visualiser ces variations sous forme de log et de coupe.

Le log synthétique présenté sur la carte géologique de Coutras à 1/50000 (Dubreuilh,1982 ; illustration 33) est le seul log synthétique de référence implanté dans le domaine d'extension des mangroves de l'Eocène inférieur et de l'Eocène supérieur. On y repère en particulier les argiles vertes de l'Eocène moyen qui caractérisent la partie amont du delta.

La coupe présentée sur l'illustration 34 permet de visualiser les variations latérales de faciès des différents niveaux de l'Eocène. Ainsi, du nord-ouest vers le sud-est :

- l'Eocène supérieur reste argilo-marneux,
- l'Eocène moyen, sableux au nord-ouest, devient de plus en plus argilo-marneux lorsqu'on se dirige vers la Dordogne et le Dropt,
- l'Eocène inférieur présente des niveaux d'argiles et de marnes de plus en plus continus vers le sud-est.

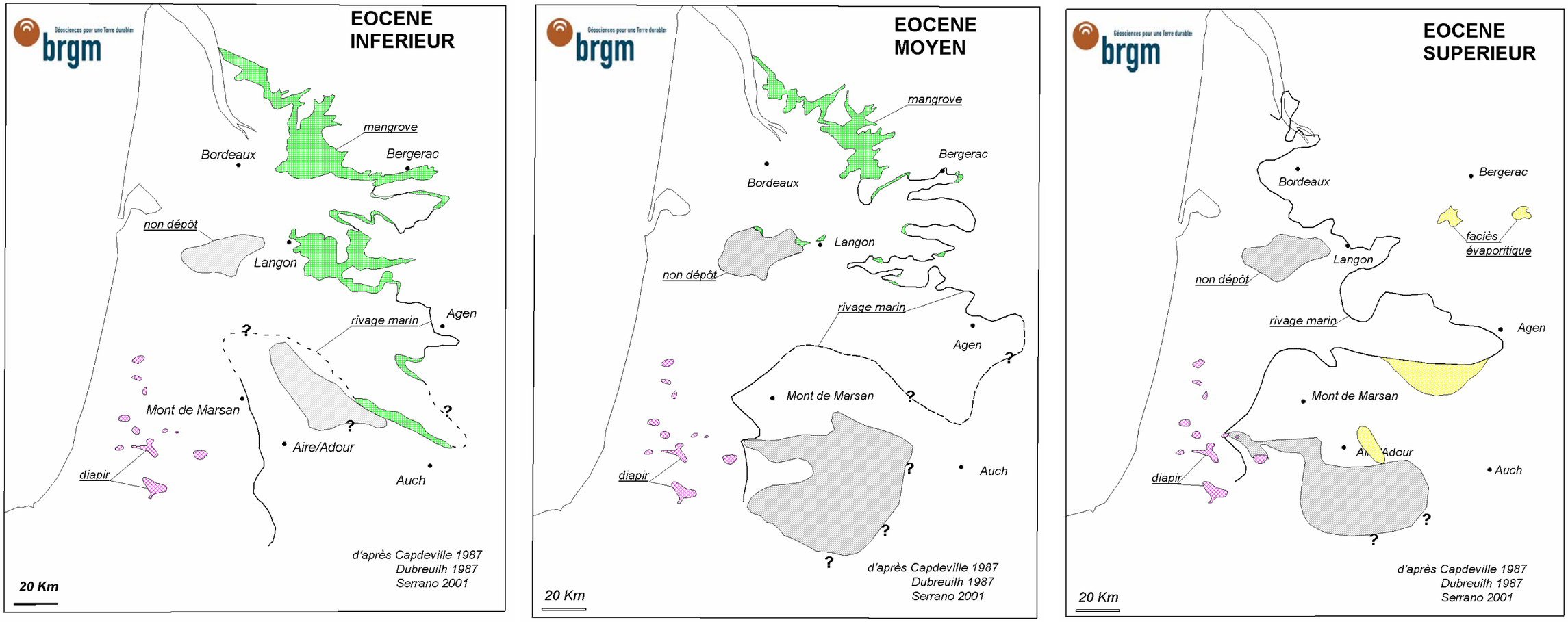
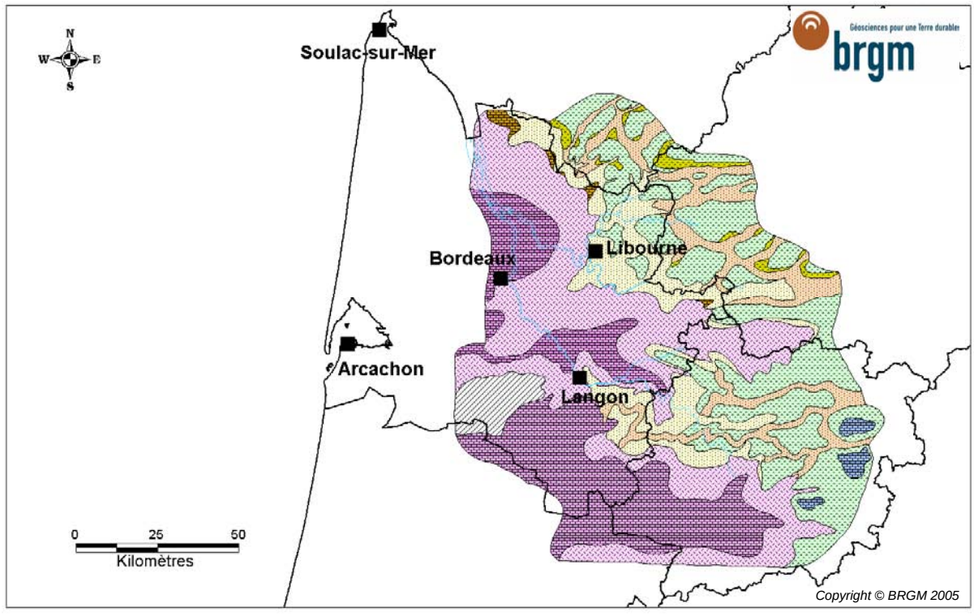
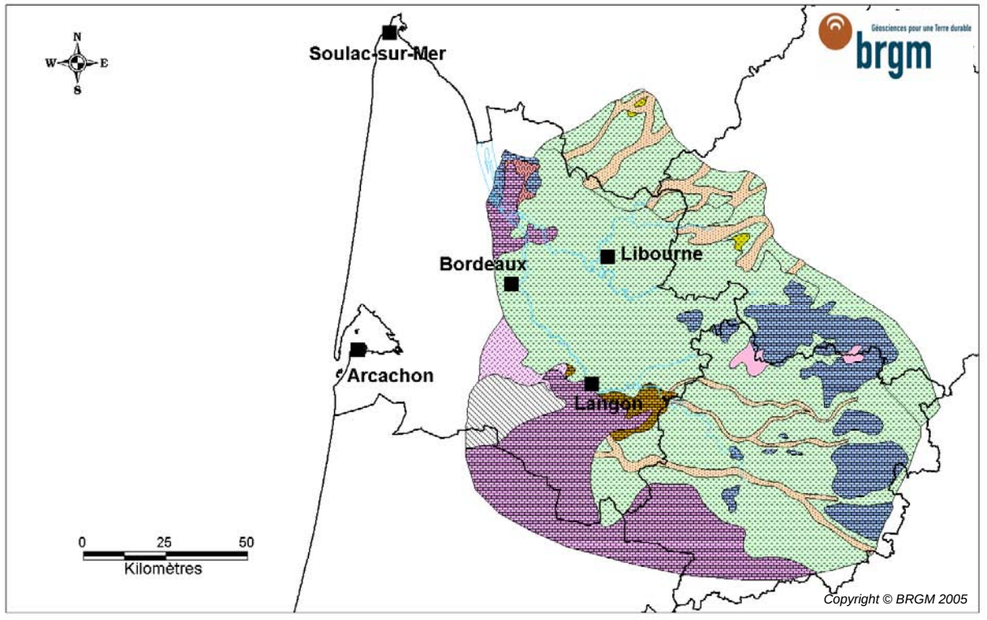


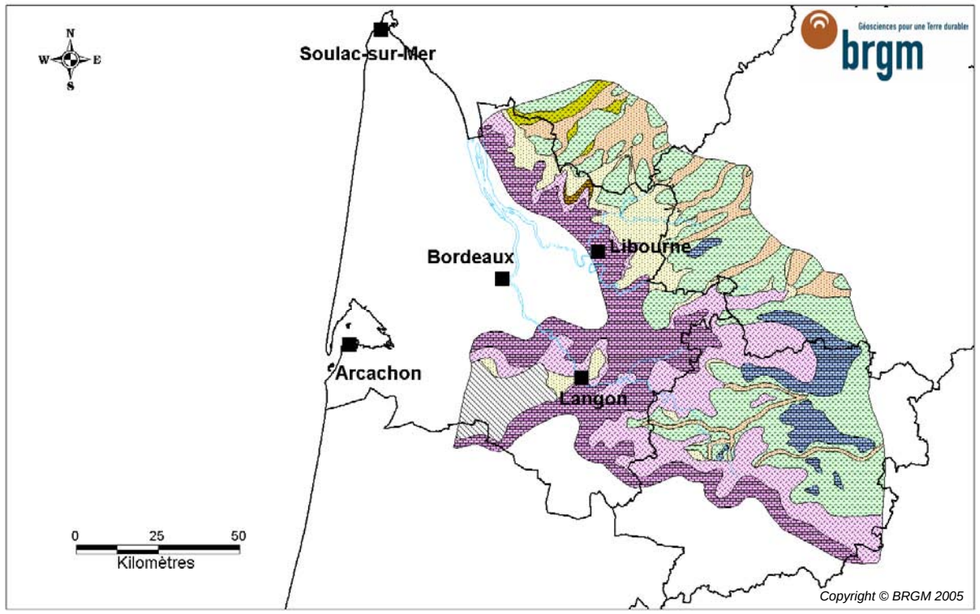
Illustration 31 : Localisation des faciès évaporitiques et des mangroves aux différentes époques de l'Eocène (d'après Capdeville,1987, Dubreuilh, 1987 et Serrano, 2001)



Cuisien - Eocène inférieur



Eocène supérieur



Eocène moyen

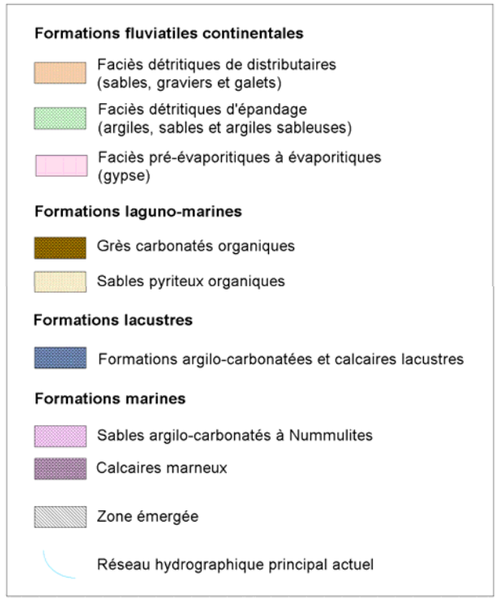


Illustration 32 : Nature des dépôts aux différentes époques de l'Eocène (d'après Dubreuilh, 1987 et Capdeville, 1987)

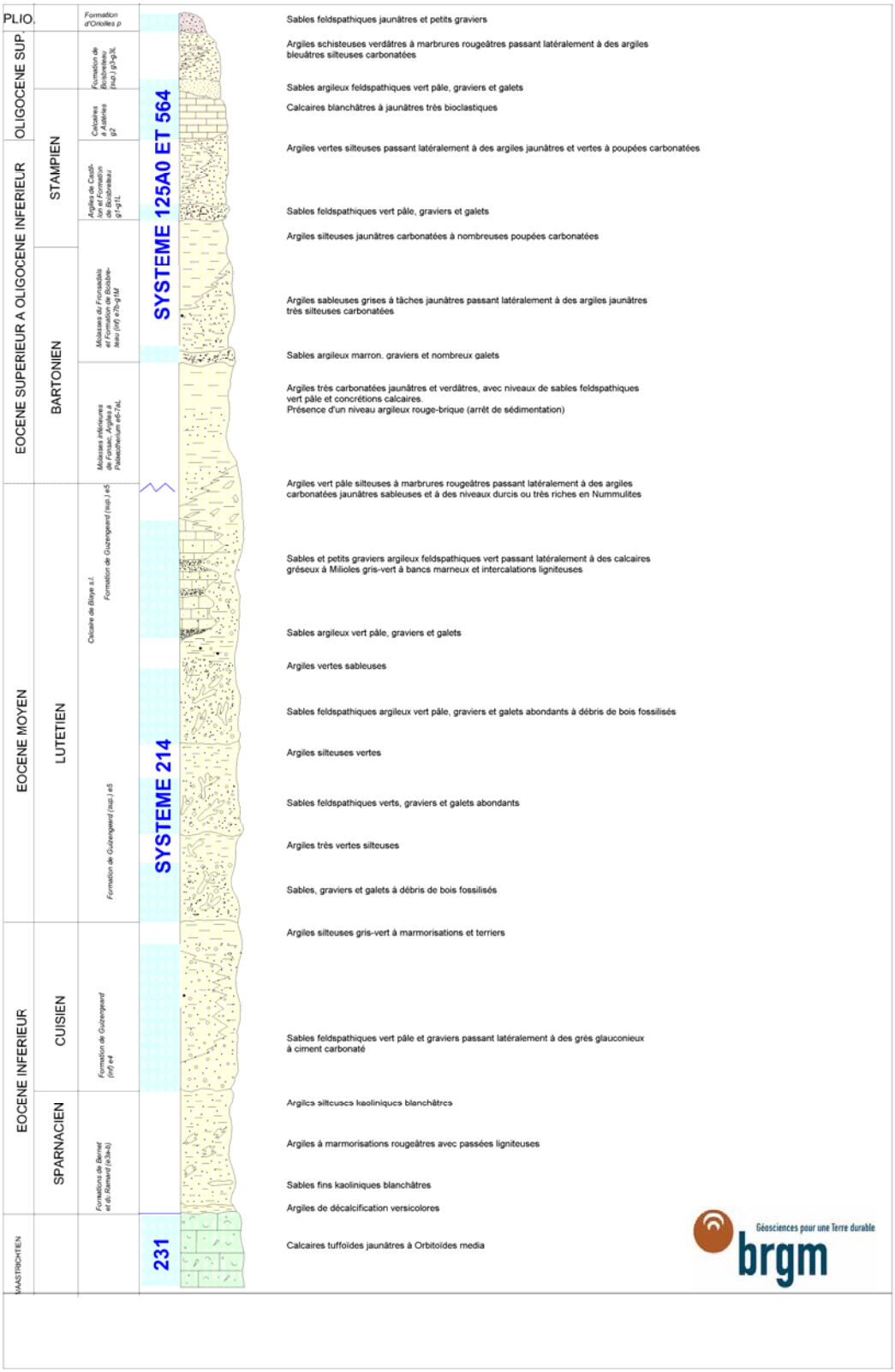


Illustration 33 : Log synthétique de la carte géologique Coutras à 1/50000 (d'après Dubreuilh, 1982, complété)

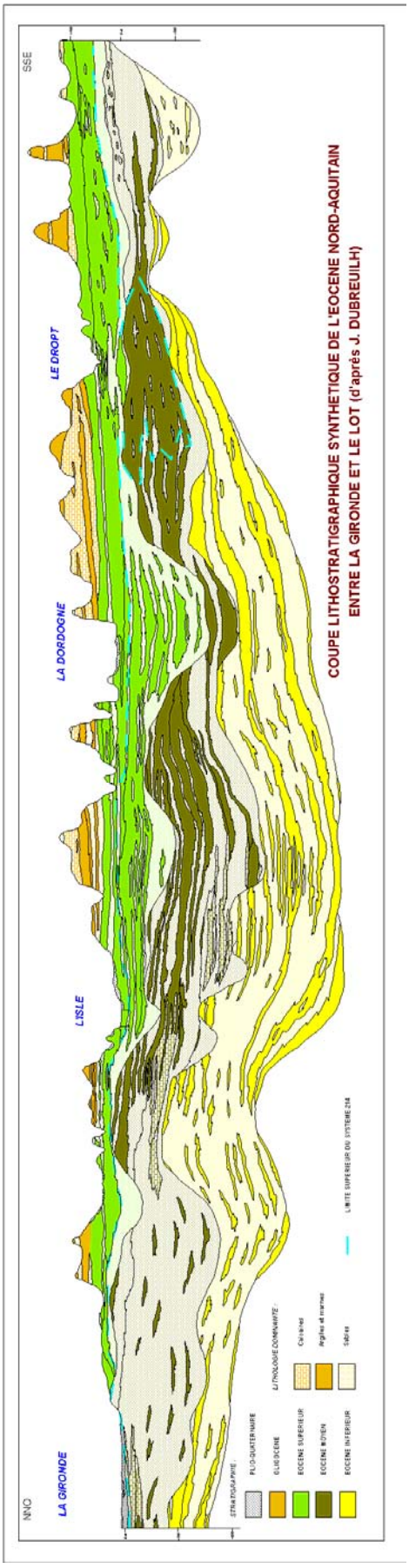


Illustration 34 : Coupe synthétique de l'Eocène Nord-Aquitain entre la Gironde et le Lot (d'après Dubreuilh, 1987)

4.3. DESCRIPTION HYDROGEOLOGIQUE

Pour cette partie, ont servi de base, les travaux récents menés dans le cadre du développement du modèle Nord-Aquitain (Pédron *et al.,* 2003) et les travaux de thèse de Larroque (2004).

4.3.1. Identification des réservoirs

L'aquifère de l'Eocène fait partie du système multicouche nord-aquitain. De façon globale, il est constitué de 3 niveaux différents :

- L'aquifère de **l'Eocène inférieur** est constitué par des sables fluviatiles qui passent à des calcaires de plate-forme marine lorsqu'on se déplace vers l'ouest.

- L'aquifère de **l'Eocène moyen** est constitué d'est en ouest par :

- les sables de l'Eocène inférieur à moyen (Formation détritique de Guizengeard) et les sables inférieurs du Bordelais qui s'étendent jusqu'au Médoc et à l'ouest de la Garonne,

- les calcaires de l'Eocène moyen (calcaires de Blaye…) qui correspondent au domaine de plate-forme marine (Bassin d'Arcachon, Médoc, Entre-deux-Mers).

- L'aquifère de **l'Eocène supérieur** comprend, d'est en ouest, la partie inférieure de la Formation de Boisbreteau constituée de sables argileux, les Sables fluviatiles du Libournais et les calcaires de plate-forme marine de l'Eocène supérieur. Les calcaires lacustres interstratifiés dans les molasses peuvent aussi localement être en relation avec le reste de l'aquifère.

A une échelle plus locale, l'illustration 33 permet de visualiser les niveaux aquifères identifiés dans la région de Coutras. Ces derniers correspondent aux niveaux sableux du Cuisien (Eocène inférieur), du Lutétien (Eocène moyen) et du Bartonien/Stampien (Eocène supérieur/Oligocène). Dans ce secteur, il semble donc que les niveaux aquifères soient exclusivement sableux et que le potentiel aquifère de l'Eocène inférieur et moyen soit bien plus important que celui de l'Eocène supérieur.

L'alimentation directe des aquifères de l'Eocène moyen et de l'Eocène inférieur est assurée par les zones d'affleurement situées vers les marges du bassin (flancs de l'anticlinal de Jonzac, petites vallées dans la Double et dans le Landais entre la Dordogne au sud et la Dronne au nord) alors que les affleurements susceptibles d'alimenter directement les assises de l'Eocène supérieur sont exclusivement localisés dans le Médoc.

Le réseau hydrographique peut également contribuer localement à l'alimentation des aquifères : la Dordogne alimente par exemple la nappe de l'Eocène inférieur à l'est de Bergerac.

Parallèlement à cette alimentation directe, les aquifères de l'Eocène peuvent être alimentés par drainance :

- flux descendants depuis l'Oligocène dans le Médoc et l'Entre-Deux-Mers,
- flux ascendants depuis la nappe du Crétacé terminal.

4.3.2. Description détaillée de l'aquifère concerné par l'aléa

Caractéristiques géométriques

Dans la partie nord du Bassin Aquitain, les 3 nappes de l'Eocène sont globalement limitées au nord et à l'est par les zones d'affleurement, au sud-ouest par les faciès pélagiques marneux et argileux du bassin de Parentis et au sud-est, par la zone haute de Montauban (passage à des formations molassiques).

Les épontes qui séparent les différents niveaux ne sont pas continues : il apparaît en effet que l'aquifère de l'Eocène supérieur est en connexion avec celui de l'Eocène moyen sur quasiment toute la frange littorale girondine alors que les formations de l'Eocène moyen sont en connexion avec les formations de l'Eocène inférieur au nord de Libourne, sur une bonne partie du territoire de l'Entre-Deux-Mers ainsi que dans le Bergeracois (cf. illustration 35).

Dans la mesure où les formations de l'Eocène moyen et de l'Eocène inférieur sont les plus productives, seules les cartes en isohypses du toit de l'Eocène moyen et du substratum de l'Eocène inférieur ont été représentées sur l'illustration 35. Des niveaux productifs se rencontrent à des profondeurs de plus en plus importantes lorsqu'on se déplace vers l'ouest et le sud-ouest.

L'épaisseur cumulée des formations aquifères de l'Eocène moyen et inférieur est très variable. Elle est de l'ordre de 100 à 300 m sur tout le domaine de l'Entre-Deux-Mers (cf. illustration 35).

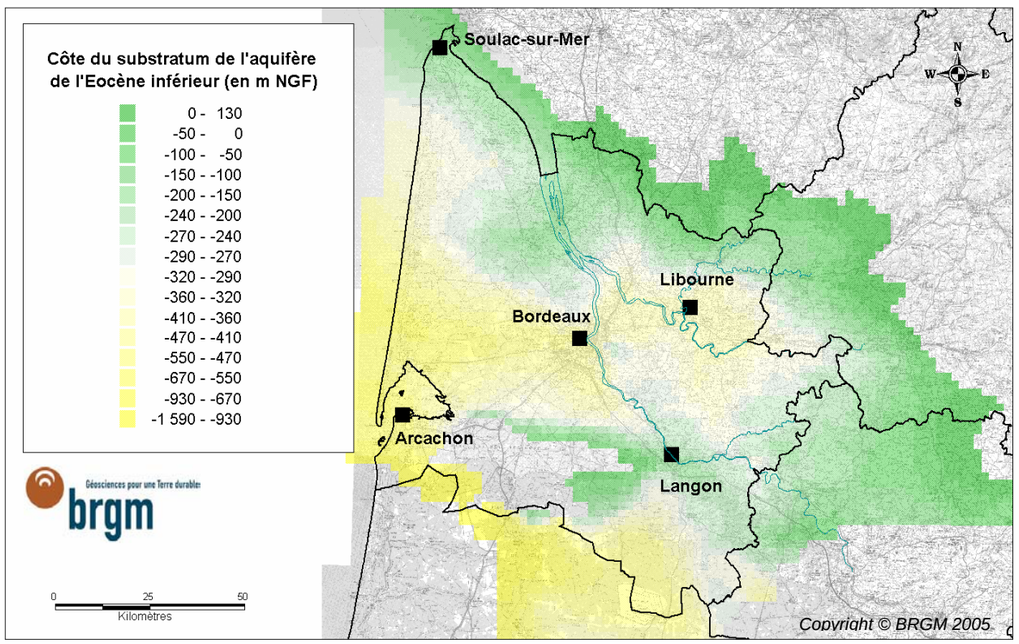
Caractéristiques hydrodynamiques

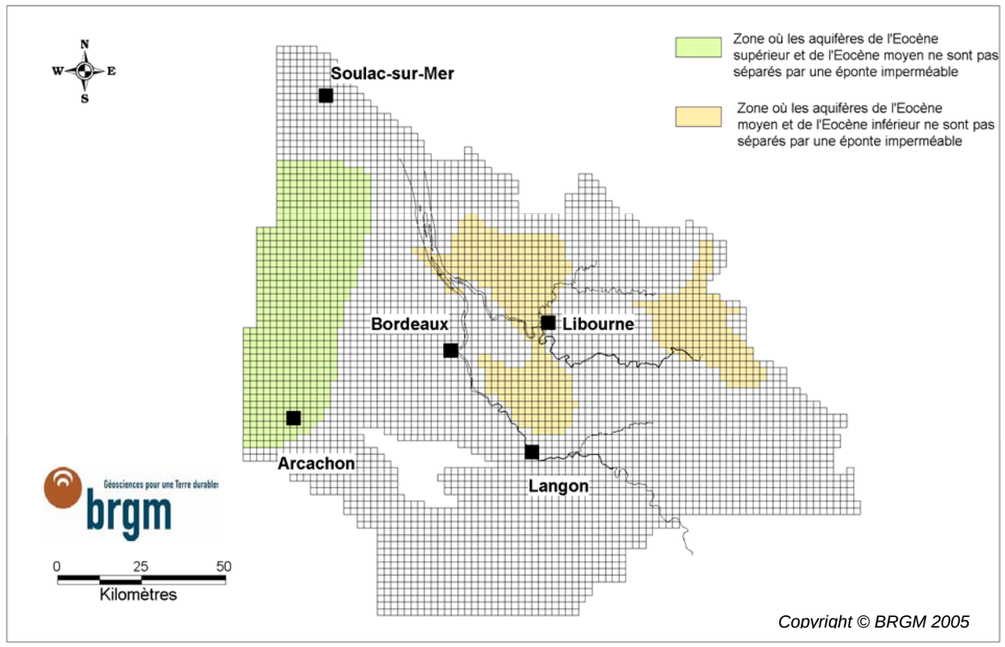
A l'image de l'hétérogénéité des faciès, les propriétés hydrauliques des aquifères éocènes sont variables.

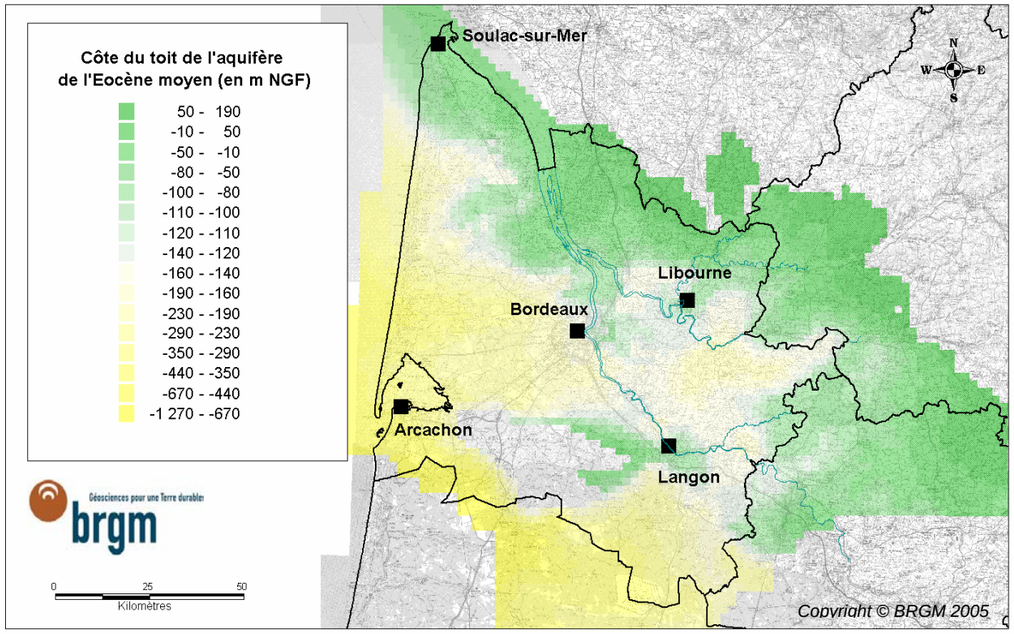
L'étude des transmissivités menée par Larroque en 2004 a mis par exemple en évidence une répartition bimodale de ce paramètre avec un premier mode centré sur la valeur de 5.10^{-4} m^2/s et un deuxième mode centré sur la valeur de 2.10^{-3} m^2/s.

Cette distribution souligne la présence de 2 sous-systèmes. Le premier de faible transmissivité correspond à la zone centrale de l'aquifère (Bec d'Ambès et frange ouest bordant la Gironde dans une moindre mesure) et le second, aux faciès calcaires de l'Eocène.

La faible transmissivité observée sur la première zone est en fait induite par la faible puissance (une vingtaine de mètres) des sables inférieurs.







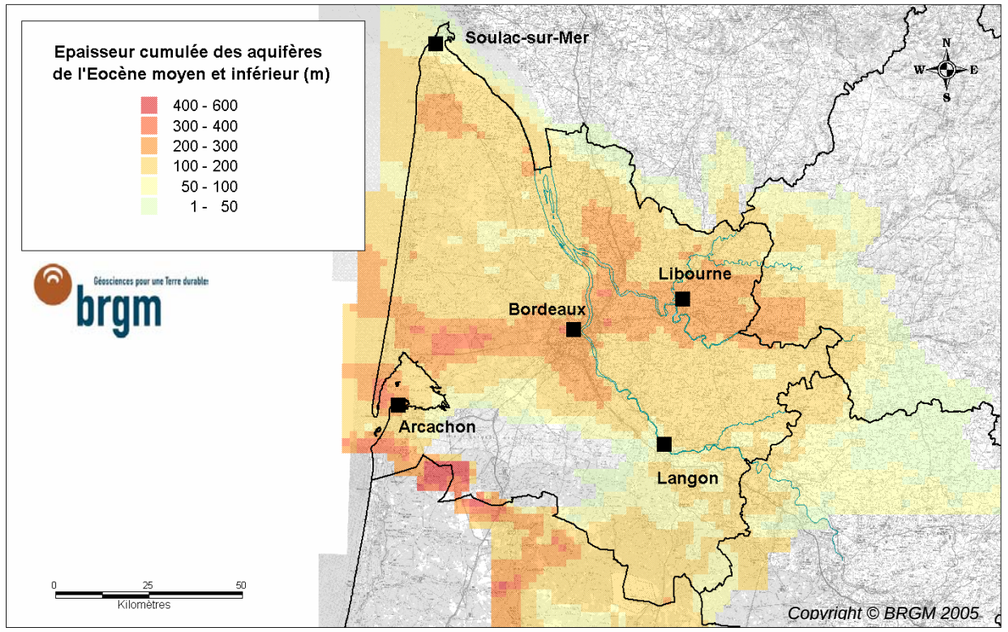


Illustration 35 : Caractéristiques géométriques de l'aquifère éocène issues du Modèle Nord-Aquitain (d'après Pédron et al., 2005)

Les valeurs de coefficient d'emmagasinement calculées à partir des résultats d'essai de pompage sont, quant à elles, comprises entre 10^{-5} et 10^{-4}, ce qui traduit la captivité du système.

Piézométrie

D'un point de vue de la piézométrie, l'interconnexion des niveaux rend possible, lorsqu'on raisonne à l'échelle globale, de ne représenter qu'une carte piézométrique pour l'ensemble des niveaux éocènes.

Les mesures effectuées dans le cadre de la « Surveillance et gestion des nappes d'eaux souterraines en Gironde » sont de plus quasiment toutes effectuées dans des ouvrages captant l'Eocène moyen à inférieur.

La carte de l'illustration 36 établie à partir de ces mesures, est donc représentative de ces 2 aquifères (Winckel *et al.,* 2004).

Il apparaît que la morphologie de la piézométrie de l'Eocène est caractérisée par l'existence d'un cône de dépression centré sur la région bordelaise. Déjà visible dans les années 1960, cette dépression qui existait probablement de façon naturelle n'a fait que s'amplifier au fur et à mesure de l'augmentation des pompages réalisés pour l'alimentation en eau potable.

Le secteur de l'Entre-Deux-Mers correspond au flanc nord-est de la dépression. Dans cette zone qui se situe au débouché des zones de mangrove de l'Eocène inférieur et moyen, le gradient dirigé vers le sud-ouest pourrait favoriser le transfert d'eaux minéralisées vers l'agglomération bordelaise.

4.4. PROBLEMATIQUE

4.4.1. Aspects théoriques

Acquisition de la minéralisation

La minéralisation des eaux souterraines peut s'acquérir :

☞ par lessivage des particules solides et dissolution des gaz contenus dans l'atmosphère

La minéralisation des précipitations atmosphériques en chlorures et en sulfates de calcium ou de sodium est toutefois souvent négligeable (2 à 5 mg/l). La source la plus importante de minéralisation est représentée par le CO_2 qui génère une fois dissous de l'acide carbonique et qui influence directement le pH de la solution aqueuse. Ce paramètre conditionne les équilibres physico-chimiques et en particulier les phénomènes de dissolution ou de précipitation des carbonates.

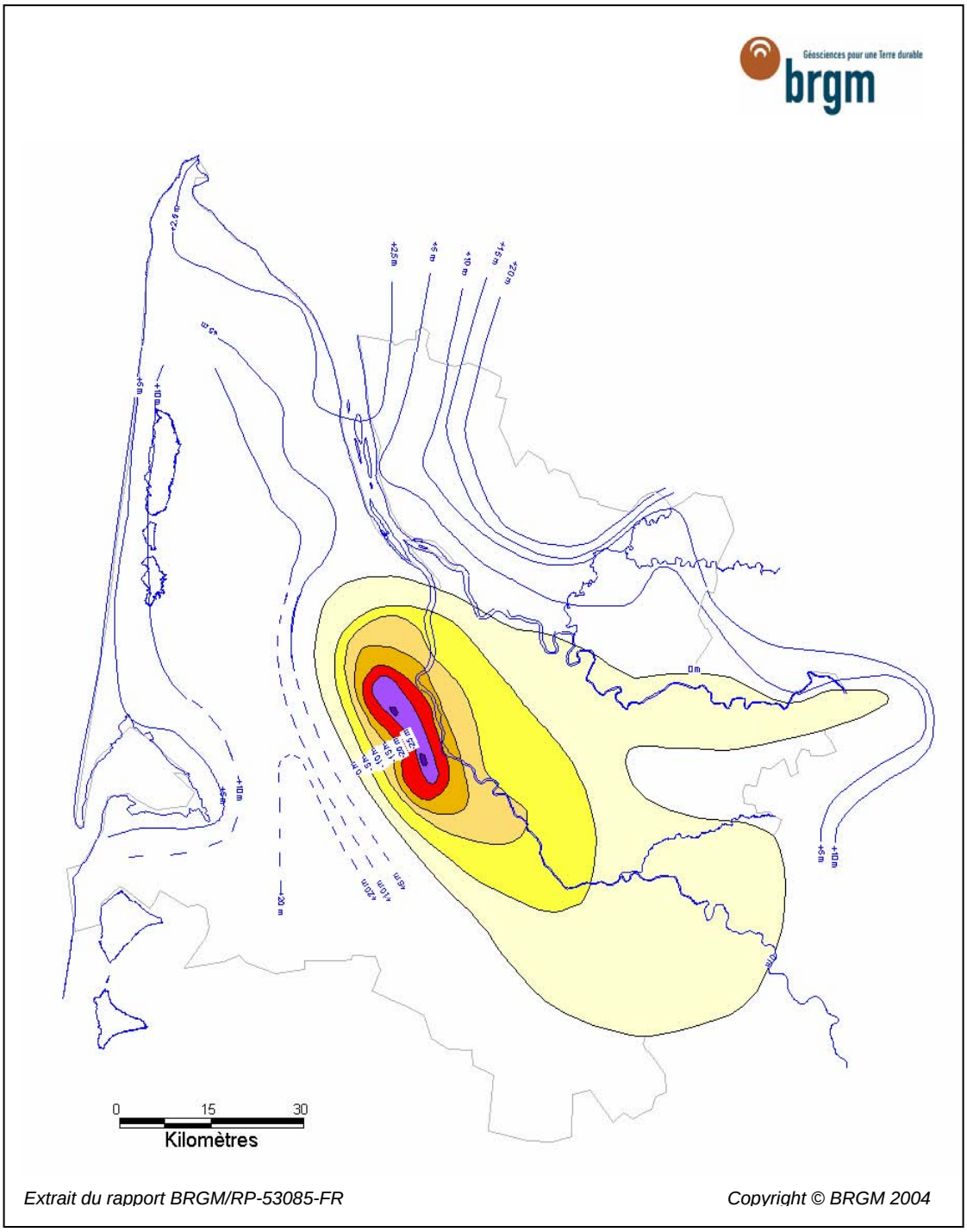


Illustration 36 : Piézométrie de la nappe éocène pour l'année 2003 (d'après Winckel et al., 2004)

☞ par lessivage des éléments non fixés par les appareils végétatifs des plantes dans l'horizon humique

Par oxydation des composés végétaux, les niveaux humiques peuvent générer des acides organiques, du CO2, des nitrates, mais aussi des chlorures non fixés et des sulfates. Le degré de fixation des cations au complexe argilo-humique (Cs>K>Na>NH4>H>Ca>Mg) favorise en particulier le transfert des ions calcium vers la nappe phréatique.

☞ par mise en solution de certains éléments de la frange capillaire

L'oxydation du carbone organique total et des sulfures situés dans la frange superficielle de la nappe conduit à une augmentation des teneurs en bicarbonates et en sulfates. L'oxydation des sulfures peut aussi engendrer des acides susceptibles de solubiliser les fluorures.

☞ par dissolution de certains des éléments du réservoir

Dans le réservoir, l'eau peut encore s'enrichir d'autres substances minérales. Leur quantité et leur qualité dépendent du type de minéraux présents dans la roche et de leur solubilité dans l'eau. La dissolution est aussi fonction des capacités chimiques de l'eau (pH, Eh, teneur en CO_2) mais aussi de ses propriétés physiques (température, pression) ou dynamiques (temps de résidence).

Teneurs anomaliques

Au niveau du domaine minéralisé, les éléments chimiques qui peuvent atteindre des seuils anomaliques sont :

- les sulfates qui peuvent résulter de la dissolution des évaporites de type gypse ou anhydrite (sulfate de calcium),

- les chlorures qui proviennent essentiellement de la dissolution de la halite,

- les carbonates et les bicarbonates issus de l'horizon humique ou de la dissolution des calcaires et des dolomies,

- le fer qui se présente sous forme d'ions ferreux (Fe++) et qui peut provenir de l'oxydation de la pyrite et des dégradations secondaires des altérites ferralitiques,

- le fluor qui est le plus souvent lié aux minéraux phosphatés de la sédimentation marine (de type apatite) et au lessivage des accumulations évaporitiques,

- les phosphates qui peuvent provenir du lessivage des concentrations à autunite et à chalcolite des gisements uranifères.

L'origine de ces minéralisations est à rechercher dans les faciès évaporitiques et les zones de mangrove représentées sur l'illustration 31.

☞ **les faciès évaporitiques**

Le dôme de Montauban-Castelsarrazin met en contact le Trias avec la base du Cénozoïque et constitue donc une source potentielle de minéralisation. Le dôme reste toutefois relativement éloigné du secteur de l'Entre-Deux-Mers.

Les diapirs qui correspondent à des évaporites du Trias et du Lias inférieur remobilisées constituent d'autres sources potentielles de minéralisation. Ils se situent essentiellement en Chalosse et dans le sud des Landes de Gascogne. On ne retrouve pas de telles intrusions salifères au nord de la ligne Roquefort-des-Landes, Castéra-Verduzan, Muret mais il est toutefois possible qu'au nord de cette ligne anticlinale, des échanges puissent s'effectuer avec la nappe infra-molassique.

Des conditions pré-évaporitiques à évaporitiques ont été mises en évidence surtout à l'Eocène supérieur sur une zone qui s'étend de Bergerac à Aire-sur-l'Adour en passant par Agen. Ces aires endoréïques à caractère confiné ont produit des argiles fibreuses associées à des produits gypseux dont la dissolution peut entraîner de fortes teneurs en sulfates et en calcium.

☞ **les mangroves**

Dans les systèmes deltaïques, la zone de transition eau douce-eau salée est marquée par une frange discontinue constituée par des dépôts sablo-argileux gris noirâtres très organiques et le plus souvent micacés.

Les analyses palynologiques réalisées sur les sédiments des mangroves éocènes de l'Aquitaine ont fait état d'une occupation végétale importante (Capdeville 1987, Dubreuilh 1987).

Les milieux réducteurs correspondant aux zones où la matière organique était enfouie sous les sédiments, se sont avérés propices à la formation de concrétions de pyrite et de gypse et définissent donc d'autres sources potentielles de minéralisation.

4.4.2. Etat des connaissances par rapport à l'aléa

Le diagnostic de l'accroissement de la salinité des nappes profondes de l'Eocène moyen en Gironde (Chéry *et al.,* 1994) et les travaux réalisés dans le cadre de la mise en place d'un réseau qualité sur la nappe de l'Eocène moyen à inférieur du domaine minéralisé (Corbier *et al.,* 2005) ont constitué les documents de référence pour cette partie.

Les travaux réalisés en 2005 ont comporté une caractérisation chimique des eaux du domaine minéralisé. Cette dernière a consisté à prendre en compte toutes les données chimiques disponibles concernant l'Eocène moyen et inférieur (analyses effectuées

pour le contrôle sanitaire et analyses effectuées dans le cadre de la « Surveillance et la Gestion des nappes d'eaux souterraines en Gironde ») et à les traiter.

Sur les 4725 analyses réalisées sur un peu plus de 200 forages, seules **523** se sont avérées complètes vis à vis des paramètres suivants : conductivité, calcium, magnésium, sodium, bicarbonates, sulfates, nitrates, chlorures, fer, manganèse, fluor et phosphates.

Les 523 analyses retenues ont fait l'objet d'une ACP (analyse en composantes principales) de façon à mettre en évidence les corrélations entre paramètres (cf. illustration 37). Le traitement a été effectué avec le logiciel STATISTICA sur des données centrées réduites de façon à donner le même poids à toutes les variables.

L'analyse en composantes principales a montré que la minéralisation des eaux de l'Eocène était influencée par un pôle évaporitique. La conductivité des eaux est en effet fortement conditionnée par les teneurs en sulfates, calcium, magnésium, chlorures et sodium qui semblent corrélées entre elles.

Afin de visualiser la variabilité des paramètres dans l'espace, des cartes représentant les résultats de l'analyse la plus récente sur la période 1990-2003 sur près de 300 points (captages AEP et points suivis dans le cadre de la Gestion des nappes profondes de Gironde) ont ensuite été réalisées (cf. illustrations 38, 39 et 40).

Ces cartes couvrent l'ensemble du département de la Gironde dans l'objectif d'offrir une vision globale de la variabilité des teneurs. Elles ont de plus été réalisées sur un fond paléogéographique de façon à voir si la minéralisation pouvait s'expliquer par la présence de faciès spécifiques.

La carte des **conductivités** (cf. illustration 38) a mis en évidence quelques points présentant de fortes valeurs le long de l'estuaire de la Gironde mais surtout trois domaines où les valeurs sont comprises entre 800 et 1500 µS/cm :

- un premier situé au nord et à l'est de Bordeaux ,
- un second situé entre Bordeaux et Langon, en rive droite de la Garonne,
- un troisième situé à l'est de Langon.

Deux domaines présentant de faibles conductivités s'individualisent aussi : un premier aux alentours de Libourne et un second, situé au sud-est de Bordeaux.

A première vue, la minéralisation ne semble pas spécialement corrélée avec la nature des faciès de l'Eocène inférieur puisqu'on retrouve toutes les gammes de conductivité dans les différents faciès.

Les faciès de mangrove se caractérisent par exemple par de faibles conductivités dans le secteur de Libourne alors qu'à l'est de Langon, les conductivités peuvent être supérieures à 1500 µS/cm dans le même type de faciès.

Les forages implantés au droit des formations marines (figurées en violet clair et foncé sur la carte) présentent aussi des conductivités très variables : très élevées au nord et à l'est de Bordeaux et beaucoup plus faibles au sud-est de l'agglomération bordelaise.

Lorsqu'on s'intéresse aux niveaux captés, il apparaît que les forages situés à l'est de Langon sollicitent pour la plupart les niveaux de l'Eocène inférieur alors que les forages situés à proximité de l'agglomération bordelaise captent plutôt l'Eocène moyen.

Il est donc possible que les forages situés à l'est de Langon interceptent les niveaux de sables pyriteux matérialisés sur la carte et que le lessivage de ces derniers soit à l'origine des fortes conductivités.

Dans la mesure où les forages situés près de Bordeaux captent principalement les niveaux de l'Eocène moyen, les faciès interceptés par les ouvrages ne correspondent pas à ceux qui sont cartographiés sur les illustrations 38, 39 et 40.

Entre la fin du Cuisien et la fin de l'Eocène moyen, les épisodes de transgression et de régression ont fait que la géométrie du delta et les environnements de dépôt ont constamment évolué.

A la fin du premier épisode transgressif (au Lutétien supérieur), le domaine nord-aquitain s'est par exemple découvert et a laissé place à une sédimentation de type pré-évaporitique, attestée par la présence d'argiles d'origine diagénétique, de recristallisations de métahalloysite et de gypse.

La présence de matière organique dans les sables et les grès du milieu de l'Eocène moyen (interceptés par les forages récents de Saint-Estèphe et de Soussans) laisse aussi supposer que les environs de Bordeaux correspondaient à un environnement de mangrove à cette époque là.

Dans ces conditions, les fortes minéralisations observées sur les forages situés au nord et à l'est de Bordeaux pourraient être liées à la présence localisée de faciès spécifiques dont l'extension ne correspond pas à celle donnée par la paléogéographie au toit de l'Eocène moyen (cf. illustration 31).

Enfin, compte tenu de la distribution des conductivités, on pourrait supposer que la faille de Bordeaux dont la branche principale passe par Langon, Bordeaux et le sud de l'Etang d'Hourtin-Carcans joue un rôle dans le confinement de la minéralisation mais dans la mesure où cette faille a principalement joué à la fin du Crétacé, il est difficile d'imaginer qu'elle puisse constituer un barrage hydraulique.

Il est par contre possible que le contraste de perméabilité mentionné dans le chapitre 4.3.2 puisse avoir une influence sur la répartition des teneurs anomaliques. Le compartiment situé au sud de la faille se caractérise en effet par des perméabilités nettement moins importantes que le compartiment nord, ce qui peut avoir pour conséquence de bloquer l'écoulement des eaux minéralisées.

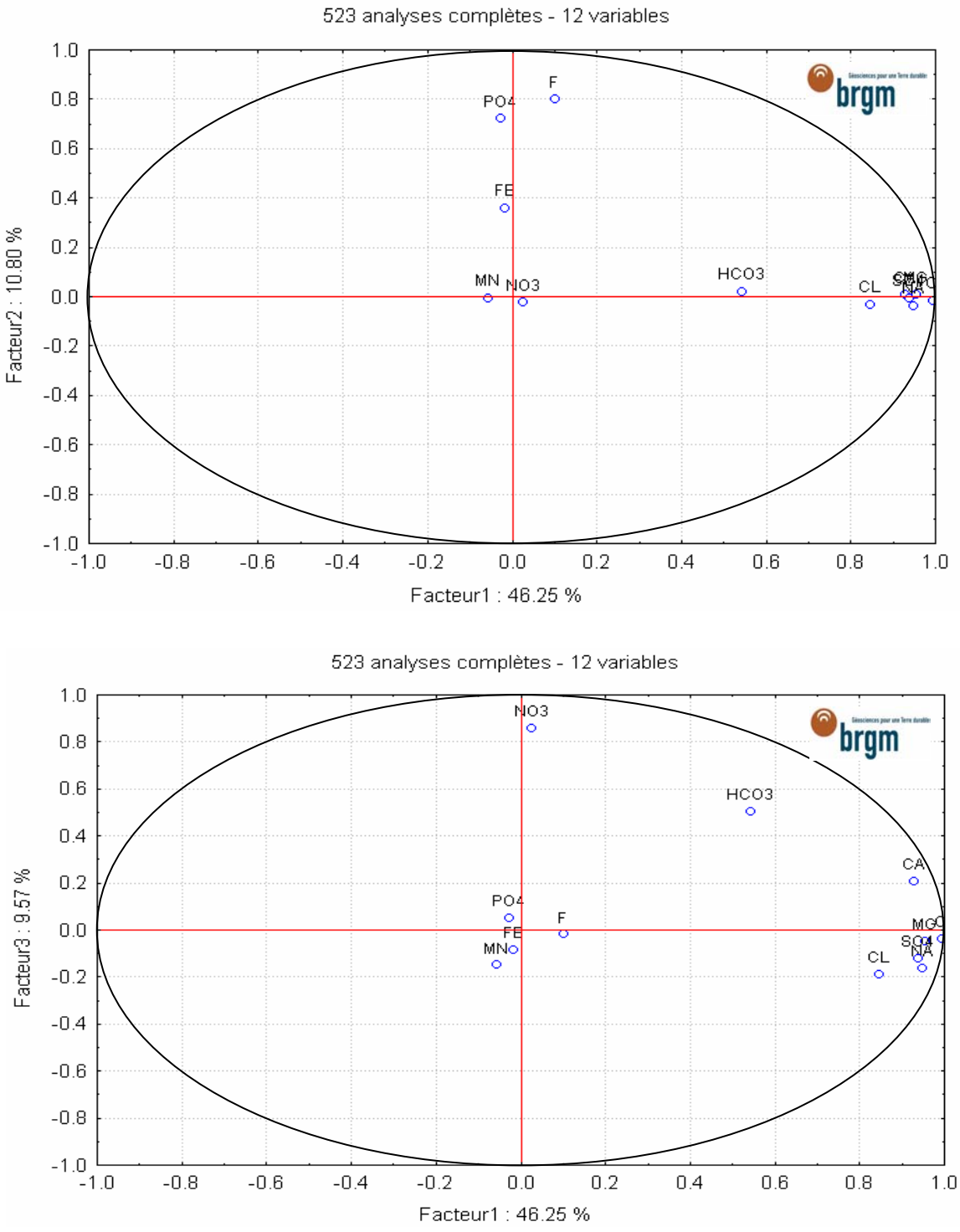


Illustration 37 : Résultats de l'ACP réalisée sur les 523 analyses complètes des eaux de la nappe de l'Eocène moyen (d'après Corbier et al, 2005)

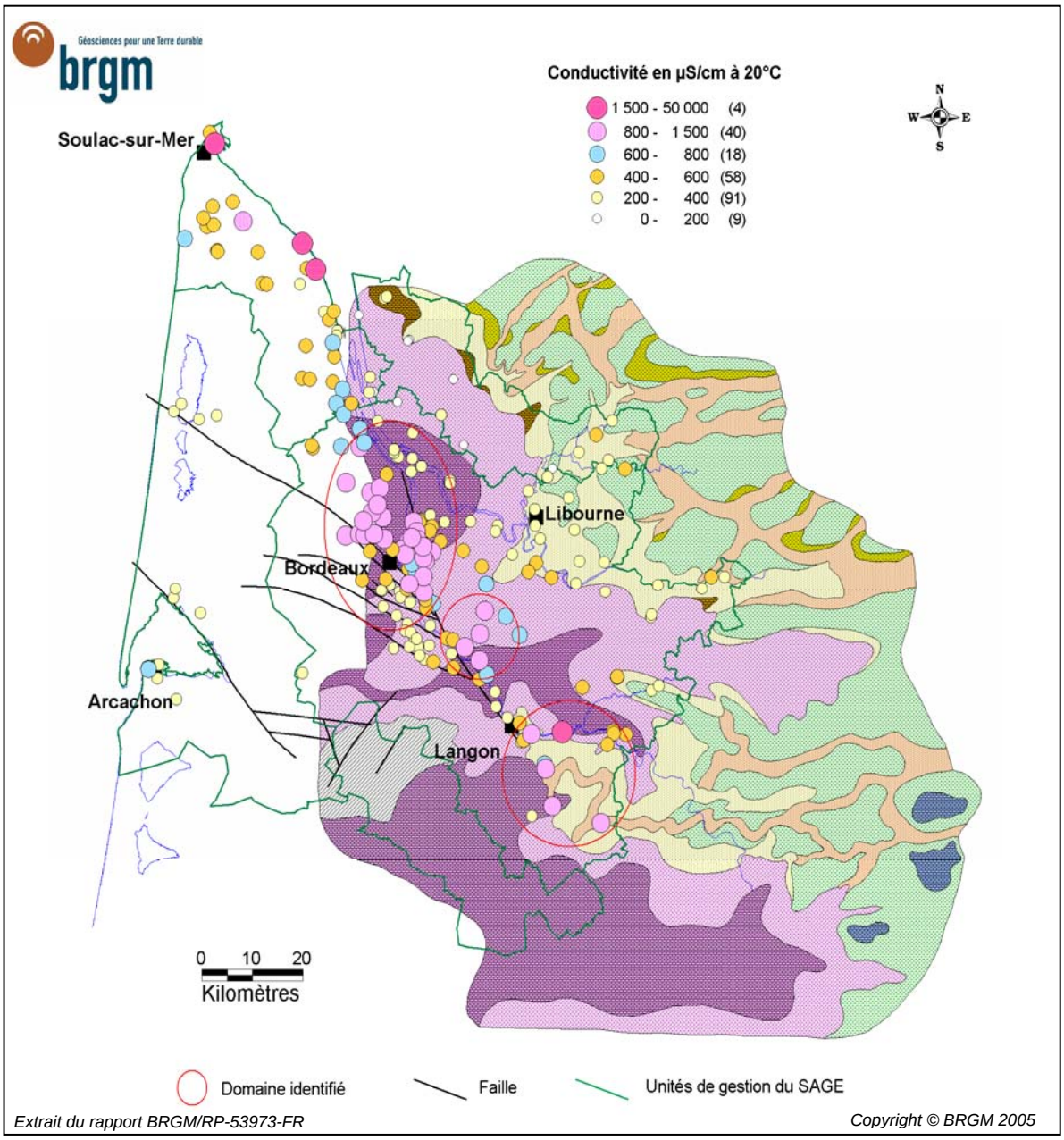
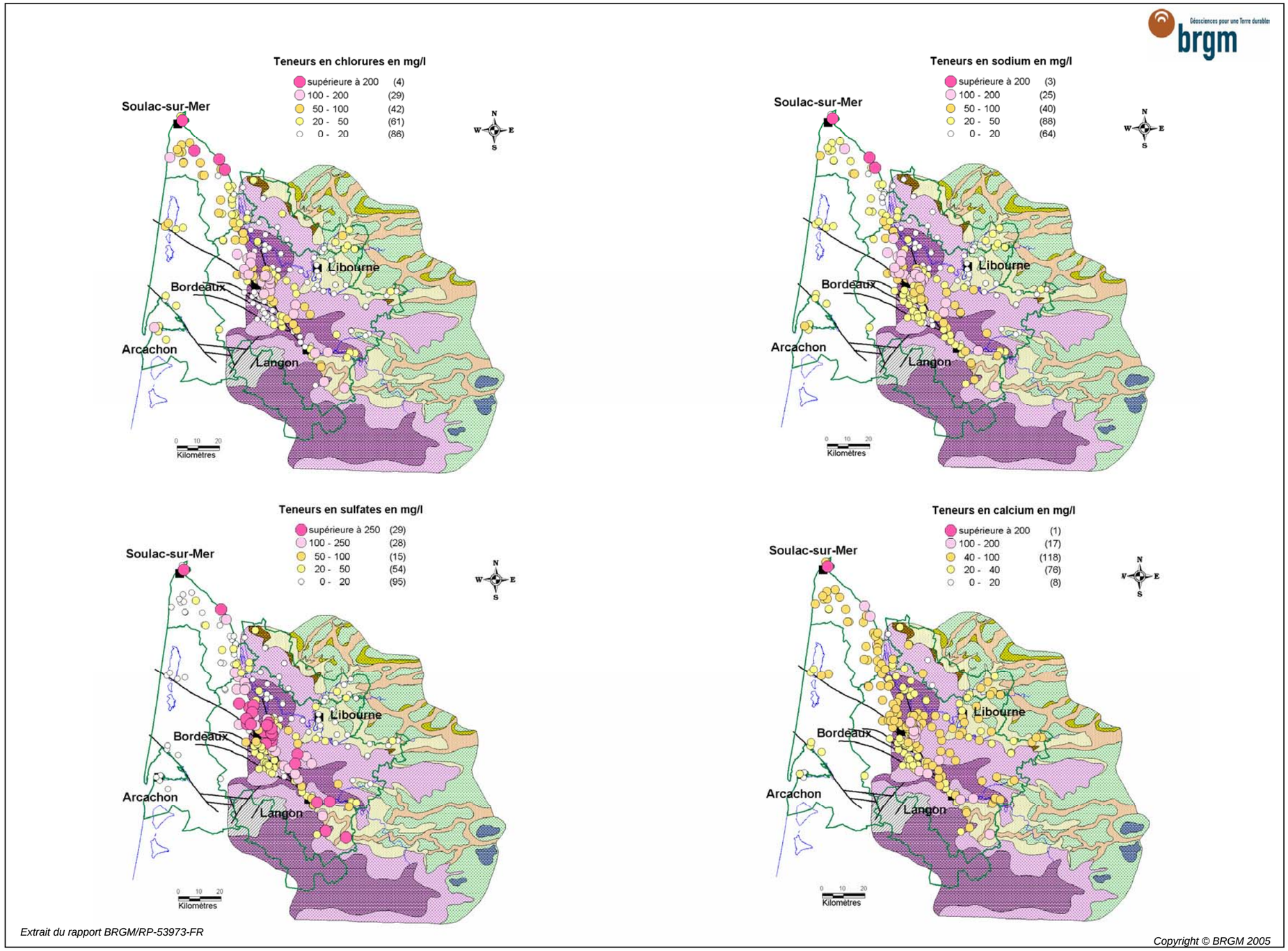


Illustration 38 : Conductivité des eaux et paléogéographie à la fin du Cuisien (Eocène inférieur) (d'après Corbier et al., 2005)



Extrait du rapport BRGM/RP-53973-FR

Copyright © BRGM 2005

Illustration 39 : Teneurs en ions majeurs (chlorures, sodium, sulfates et calcium) sur fond paléogéographique à la fin du Cuisien – (Eocène inférieur) (d'après Corbier et al., 2005)

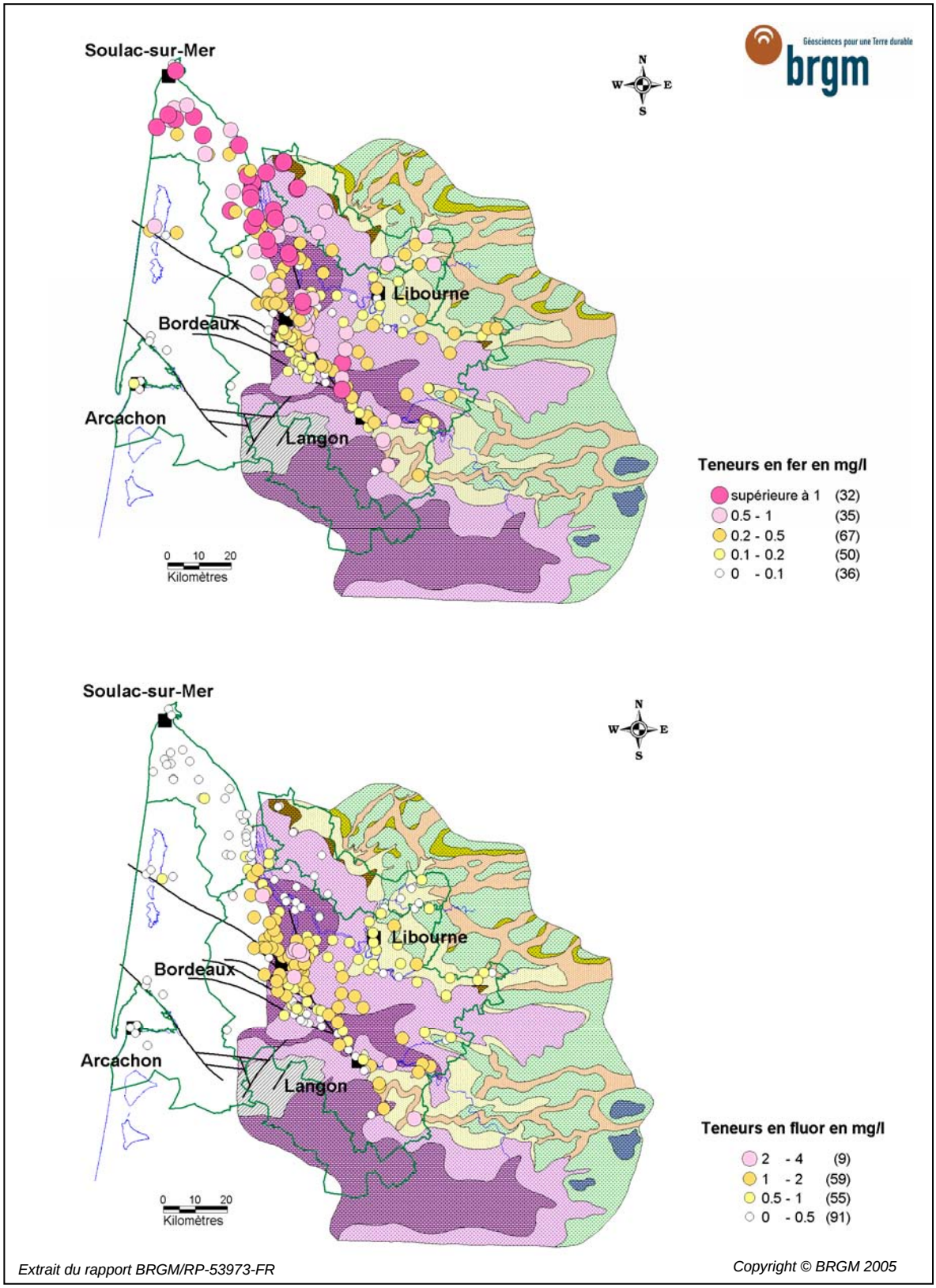


Illustration 40 : Teneurs en fer et en fluor sur fond paléogéographique à la fin du Cuisien (Eocène inférieur) (d'après Corbier et al., 2005)

L'examen des cartes de répartition des teneurs en ions majeurs (cf. illustration 39) a permis de noter que la répartition :

- des fortes teneurs en **chlorures** était assez semblable à celle des fortes conductivités et que deux secteurs se caractérisaient par de très faibles valeurs : la zone située aux environs de Libourne et la zone située au sud-est de Bordeaux en rive gauche de la Garonne. La plupart des valeurs restent toutefois inférieures à la limite de qualité des eaux brutes (200 mg/l),

- des teneurs en **sodium** était un peu moins contrastée que celle en chlorures et que la zone située aux environs de Libourne présentait comme dans le cas des chlorures, de faibles valeurs. A l'exception de 3 points situés dans le Médoc, tous les forages présentent des teneurs inférieures à la limite de qualité des eaux brutes (200 mg/l),

- des teneurs en **sulfates** était assez semblable à celle des fortes conductivités et des fortes teneurs en chlorures et que le secteur de Libourne se caractérisait pour ce nouvel élément aussi par de faibles teneurs. De nombreux points dont la plupart se situent dans la région bordelaise se caractérisent par des teneurs supérieures à la limite de qualité des eaux brutes (250 mg/l).

- des teneurs en **calcium** étaient relativement homogènes bien que les plus fortes valeurs s'observent le long de la faille de Bordeaux.

Globalement, les analyses en ions majeurs ont donc mis en évidence :

- un secteur amont centré sur Libourne peu minéralisé,

- une zone de forte minéralisation centrée sur la région bordelaise,

- quelques points à forte minéralisation en rive droite de la Garonne.

Les cartes représentant les teneurs en fer et en fluor (cf. illustration 40) ont, quant à elles, mis en évidence :

- une zone anomalique en **fer** dont l'extension est différente des précédentes puisqu'elle correspond au secteur compris entre Bordeaux et Soulac-sur-Mer. Les alentours de Libourne et l'axe de la Garonne se caractérisent aussi par de fortes teneurs,

- un domaine d'extension des fortes teneurs en fluor qui est plus étendu que celui des teneurs en sulfates même si les plus fortes valeurs se situent le long de la faille de Bordeaux.

Les cartes de répartition des teneurs en éléments majeurs, en fer et en fluor ont permis de mieux visualiser l'extension des différents domaines anomaliques. Il est apparu que :

- le secteur localisé au nord et à l'est de Bordeaux et se prolongeant le long de l'axe de la Garonne présentait de fortes teneurs en chlorures, sulfates, sodium, calcium, fer et fluor,

- le secteur centré sur Libourne se caractérisait par de faibles minéralisations mais par des teneurs en calcium, fer et fluor non négligeables,

- que le Médoc se caractérisait par de fortes teneurs en fer.

Bien qu'intéressantes, ces observations n'ont pas permis de formuler des hypothèses quant à l'origine de la minéralisation.

Seul le diagnostic de l'accroissement de la salinité des nappes profondes de l'Eocène moyen en Gironde basé sur les observations effectuées sur 28 ouvrages du domaine minéralisé (Chéry *et al.,* 1994) a permis d'aboutir à un certain nombre de conclusions à ce sujet.

Les analyses isotopiques en soufre 34 effectuées sur les sulfates dissous ont en effet montré que dans la plupart des cas, les sulfates provenaient du lessivage d'une saumure ou de surfaces évaporitiques mais pas de l'oxydation de sulfures.

L'origine spatiale de la minéralisation a, quant à elle, été attribuée aux niveaux triasiques du môle de Montauban sur la base des résultats des analyses isotopiques effectuées sur les sulfates dissous et des rapports Br/Cl, très proches de ceux observés dans le Trias du bassin de Paris.

Les auteurs du diagnostic préconisent toutefois que des reconnaissances géologiques complémentaires soient menées pour valider cette hypothèse.

Si l'on considère que la distance qui sépare le môle de Montauban au secteur minéralisé est trop importante pour que les niveaux triasiques de cette zone constituent la source la plus probable de contamination, on doit imaginer que les faciès pré-évaporitiques qui se sont mis en place à l'Eocène moyen mais pour lesquels aucune cartographie n'est disponible sont à l'origine des fortes minéralisations observées dans le domaine de l'Entre-Deux-Mers.

L'évolution de la paléogéographie pourrait de plus expliquer que ces faciès soient plus fréquents au nord de la faille de Bordeaux qu'au sud et que le contraste de perméabilité observé entre les deux compartiments soit à l'origine du confinement de la minéralisation.

Après la phase de caractérisation chimique, les travaux réalisés en 2005 ont consisté à sélectionner les forages captant les niveaux de l'Eocène moyen et faisant ou ayant fait, dans le passé, l'objet d'un suivi chimique régulier.

Au total, 94 points ont été sélectionnés pour réaliser une étude de l'évolution de la chimie en fonction de la piézométrie.

L'évolution temporelle de la conductivité et des ions majeurs (calcium, magnésium, bicarbonates, sulfates, sodium et chlorures) a été étudiée puis codifiée pour l'ensemble des points. 5 types de tendance ont pu être observées (cf. illustration 41) :

- une augmentation significative (au seuil de confiance de 5%) de plus de 3 paramètres (évolution de type a),

- une augmentation significative (au seuil de confiance de 5%) de 1 à 3 paramètres (évolution de type b),

- aucun élément ne variant significativement au seuil de confiance de 5 % (évolution de type c),

- une baisse significative au seuil de 5% observée pour 1 à 3 paramètres (évolution de type d),

- une baisse significative au seuil de confiance de 5% observée pour plus de 3 paramètres (évolution de type e).

Sur les 17 points d'eau présentant des évolutions significatives :

- 4 forages se caractérisent par plus de 3 paramètres évoluant significativement à la hausse et par une piézométrie relativement stable à l'exception d'un forage (baisse des niveaux d'eau notable),
- 4 forages se caractérisent par 1 à 3 paramètres évoluant significativement à la hausse et par une baisse nette des niveaux d'eau,
- 5 forages se caractérisent par 1 à 3 paramètres évoluant significativement à la baisse et par une baisse nette des niveaux d'eau,
- 4 forages se caractérisent par plus de 3 paramètres évoluant significativement à la baisse et par une baisse nette des niveaux d'eau à l'exception d'un forage.

Les évolutions nettes observées pour un à plusieurs paramètres sur ces 17 forages ont confirmé l'hypothèse de sources de contamination situées à proximité des ouvrages. En effet, les teneurs n'évolueraient pas de façon aussi significative si les sources de contamination étaient situées à plusieurs kilomètres ou dizaines voire centaines de kilomètres des forages (hypothèse d'une provenance du môle de Montauban).

L'évolution de la piézométrie a été considérée comme étant le seul phénomène pouvant être à l'origine de ces variations. Les observations précédentes ont été expliquées par les hypothèses suivantes :

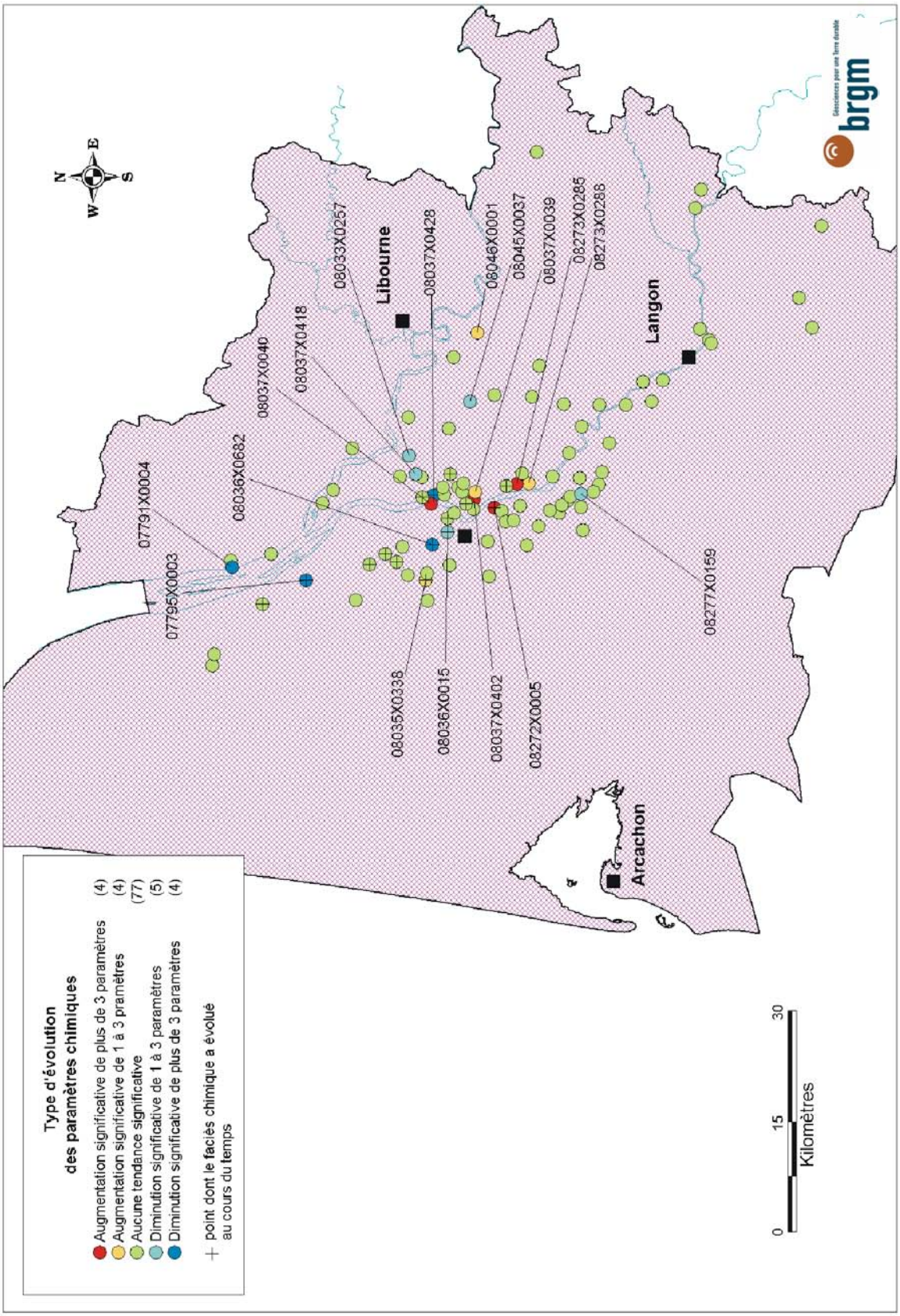


Illustration 41 : Répartition des points sélectionnés dans le cadre de l'étude de l'évolution de la minéralisation (d'après Corbier et al., 2005)

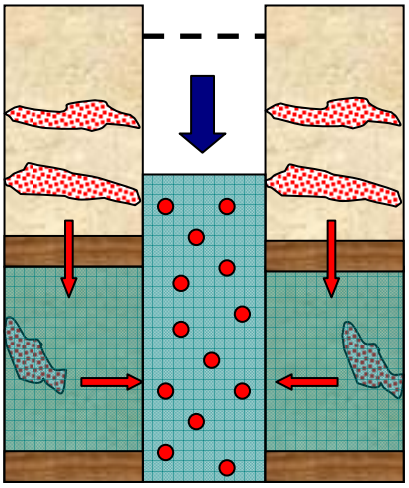


Schéma a

Baisse de la piézométrie et augmentation de la minéralisation : transfert d'eaux plus minéralisées en provenance de l'Eocène supérieur ou de l'Eocène moyen vers la zone de captage

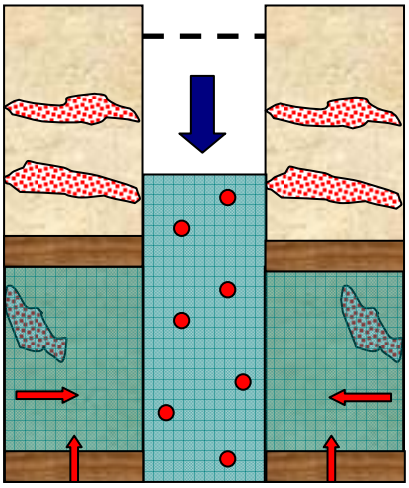


Schéma b

Baisse de la piézométrie et diminution de la minéralisation : transfert d'eaux moins minéralisées en provenance de l'Eocène moyen ou de l'Eocène inférieur vers la zone de captage

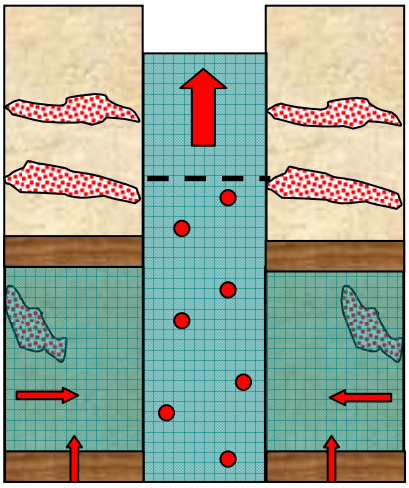


Schéma c

Augmentation de la piézométrie et diminution de la minéralisation : transfert d'eaux moins minéralisées en provenance de l'Eocène moyen ou de l'Eocène inférieur vers la zone de captage

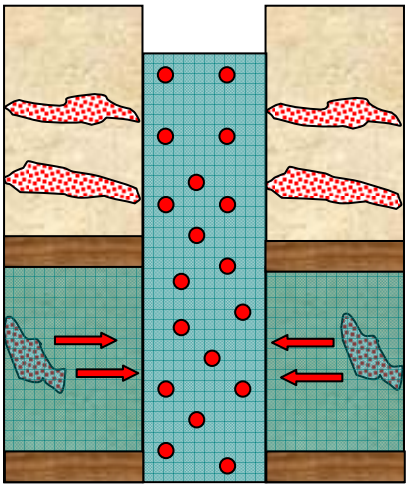


Schéma d

Piézométrie stable et augmentation de la minéralisation (+ diminution des pompages) : renouvellement de l'eau limité

Illustration 42 : Les différents types d'évolutions observés (d'après Corbier et al., 2005)

☞ l'augmentation de la minéralisation qui est observée parallèlement à la baisse des niveaux pour le 2° groupe de points pourrait s'expliquer par un transfert d'eaux plus minéralisées. Les pompages pourraient en effet favoriser les phénomènes de drainance depuis l'Eocène supérieur (réputé pour contenir des faciès évaporitiques) ou augmenter le lessivage des faciès évaporitiques contenus dans l'Eocène moyen (cf. schéma a de l'illustration 42),

☞ la diminution de la minéralisation qui est observée parallèlement à la baisse des niveaux pour le 3° groupe de points pourrait, quant à elle, s'expliquer par le transfert d'eaux moins minéralisées en provenance de l'Eocène moyen ou de l'Eocène inférieur (cf. schéma b de l'illustration 42),

☞ la même hypothèse peut être avancée pour expliquer la diminution de la minéralisation qui est observée parallèlement à la baisse des niveaux pour 3 des 4 points du 4° groupe. Dans le cas du dernier forage, les transferts peuvent s'opérer de la même façon mais la piézométrie augmente (cf. schéma c de l'illustration 42),

☞ si l'évolution de la piézométrie et des teneurs en ions majeurs du dernier forage peut s'expliquer par le schéma a de l'illustration 42, il n'en va pas de même pour les 3 autres ouvrages du groupe n°1 qui se caractérisent par une augmentation de la minéralisation alors que la piézométrie ne présente pas d'évolution significative.

L'examen des données relatives aux volumes prélevés sur ces 3 points a montré que les pompages avaient nettement diminué lors des 40 dernières années, ce qui a pu limiter le renouvellement de l'eau aux abords des zones minéralisatrices et ainsi induire une augmentation des teneurs (cf. schéma d de l'illustration 42).

◆◆◆◆◆◆

Les investigations récentes ont donc montré que plusieurs types d'évolution pouvaient être observés sur l'extension du domaine minéralisé. On a en effet pu identifier des points :

1) dont la minéralisation augmente alors que la piézométrie enregistre une tendance à la baisse (5 points sur 17),
2) dont la minéralisation augmente alors que la piézométrie ne montre pas d'évolution significative (3 points sur 17),
3) dont la minéralisation diminue alors que la piézométrie enregistre une tendance à la baisse (8 points sur 17),
4) dont la minéralisation diminue alors que la piézométrie enregistre une tendance à la hausse (1 point sur 17).

Il est aussi apparu que l'évolution de la minéralisation découlait de conditions locales et non de conditions générales (comme par exemple l'accentuation du creux piézométrique sous l'agglomération bordelaise).

Le fait que l'on puisse observer des évolutions de la minéralisation totalement opposées pour une même tendance piézométrique a confirmé cette hypothèse et montré qu'il pouvait être hasardeux de faire des prévisions sur l'évolution de la

minéralisation en fonction de celle de la piézométrie et par conséquent en fonction de l'augmentation ou de la diminution des pompages.

L'origine évaporitique de la minéralisation a, quant à elle, été confirmée par la nature des éléments qui présentent des variations significatives (conductivité, Cl, Ca, Mg, SO_4 pour les principaux). Le gypse ($CaSO_4$), la halite (NaCl) et les argiles fibreuses (riches en magnésium) associées aux faciès des calcaires lacustres de l'Eocène moyen constituent autant de sources probables pour ces éléments.

Enfin, il convient de noter que tant que les phénomènes de drainance entre les différents niveaux de l'Eocène ne sont pas mieux connus (travail en cours dans le cadre de la réactualisation du Modèle Nord-Aquitain), il est difficile de proposer d'autres explications que celles schématisées sur l'illustration 42 pour expliquer les variations de la minéralisation.

A l'issue du travail précédent, 12 points ont été sélectionnés pour faire l'objet d'une caractérisation chimique (cf. illustration 43) et pour être, à terme, intégrés au réseau départemental de suivi de la qualité au droit des zones sensibles définies par le SAGE « Nappes profondes de Gironde ».

Le choix de ces points a été guidé par trois critères principaux : leur localisation (l'objectif étant de couvrir l'ensemble du domaine avec des points de contrôle uniformément répartis) ; le type d'évolution qu'ils présentaient ; l'accessibilité et les facilités de prélèvement.

Parmi les 12 points d'eau sélectionnés, 3 correspondent à des ouvrages qui présentent une augmentation significative de la minéralisation, 7 correspondent à des points qui ne montrent aucune évolution ou une évolution non significative des paramètres et 2 correspondent à des points qui présentent une baisse significative de la minéralisation.

Les analyses effectuées au printemps 2005 ont montré que les eaux de ces ouvrages se caractérisaient par des conductivités relativement élevées, des teneurs en sulfates importantes qui confèrent à 10 des 12 points un faciès sulfaté (calcique ou sodique) et des teneurs en fer et en fluor élevées qui peuvent s'expliquer par des phénomènes de dénitrification et le lessivage d'accumulations évaporitiques.

4.5. DESCRIPTION DE LA VULNERABILITE

Dans la mesure où il a été démontré que les fortes minéralisations observées sur le domaine d'étude étaient liées à la présence de niveaux évaporitiques dans l'Eocène moyen et/ou l'Eocène supérieur, la carte de vulnérabilité correspondrait à l'extension de ces formations.

Ces formations s'étant déposées de façon non homogène et pouvant passer inaperçues lors de la réalisation d'un ouvrage, aucune cartographie de leur extension n'est disponible.

Dans ces conditions, il n'est donc pas possible de produire de carte de vulnérabilité.

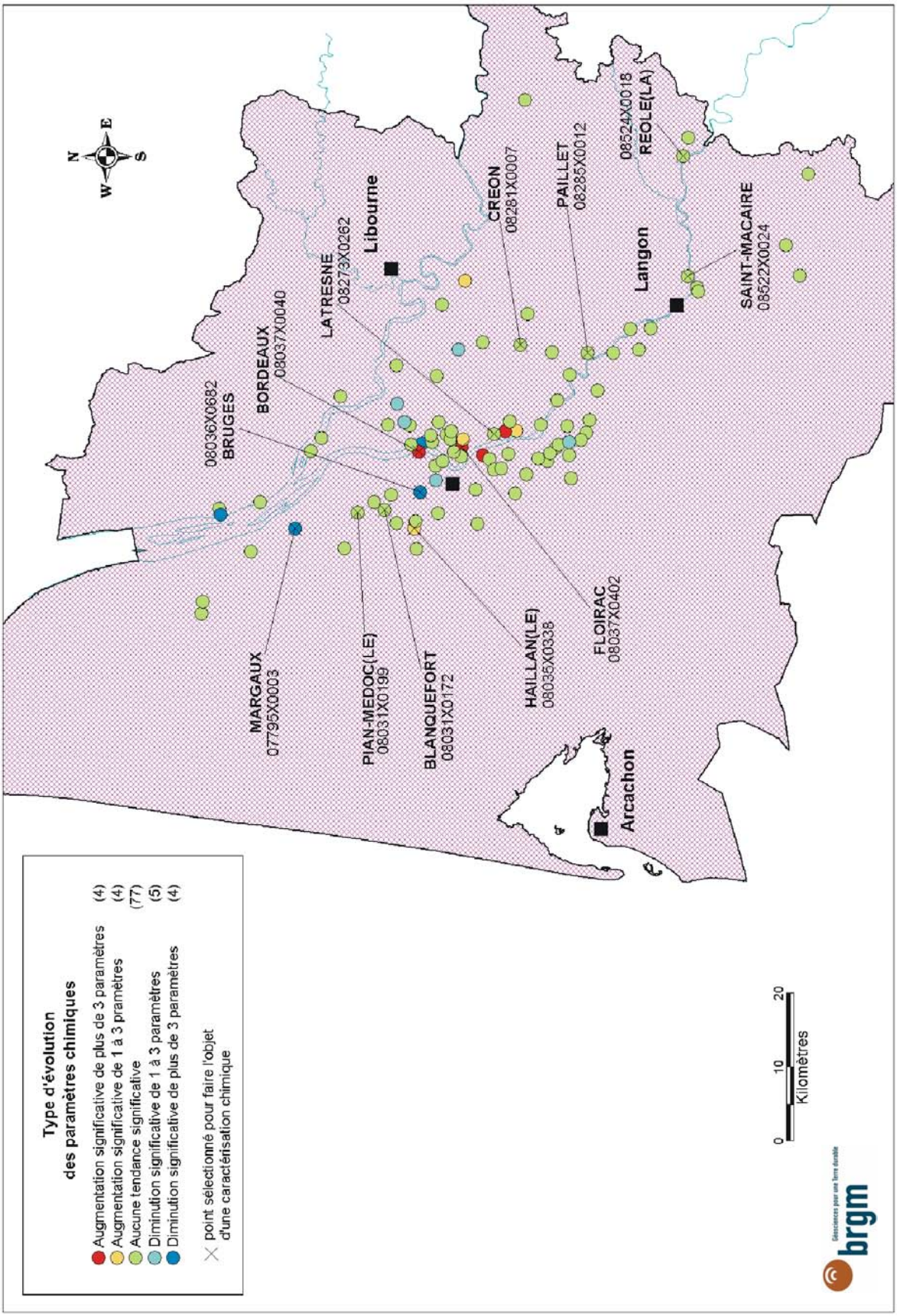


Illustration 43 : Localisation des 12 points sélectionnés pour faire l'objet d'une caractérisation chimique (d'après Corbier et al., 2005)

4.6. EVALUATION DU RISQUE

Le fait que des points proches les uns des autres puissent présenter une évolution des paramètres totalement différente et que la minéralisation puisse évoluer de façon différente pour une même tendance piézométrique constituent 2 arguments pour affirmer que le risque d'augmentation de la minéralisation des eaux de l'Eocène ne peut pas être géré de façon globale sur la zone d'étude.

Les graphiques établis pour les points présentant des évolutions significatives (rapport BRGM/RP-53973-FR) pourront, tout au plus, permettre d'évaluer les teneurs des eaux de ces forages à différents horizons si les tendances mises en évidence se maintiennent.

Le risque de solliciter une zone fortement minéralisée à l'occasion de la réalisation d'un nouvel ouvrage pourra par contre être évalué à partir des cartes de répartition de teneurs en ions majeurs, fer et fluor (cf. illustrations 39 et 40).

4.7. DESCRIPTION DES POINTS DE MESURE ET DES USAGES

L'inventaire des points de prélèvement et des autres points de mesure a été réalisé sur une bande de 110 km de long et de 25 km qui englobe la totalité des points présentant une conductivité supérieure à 600 µS/cm à l'exception des 5 points les plus septentrionaux (cf. illustration 46). La zone présente une superficie de 2620 km^2.

Il est à préciser que les points de prélèvement retenus et les volumes associés correspondent exclusivement à des ouvrages dont les niveaux captés ont été validés stratigraphiquement.

Ces points ont fait l'objet d'une cartographie par aquifère et en fonction de leur usage dans l'annexe 1. Leurs caractéristiques ainsi que les prélèvements dont ils ont fait l'objet sur la période 2000-2004 sont précisés dans l'annexe 2.

Dans le cas des ouvrages captant plusieurs aquifères, un volume correspondant au volume global divisé par le nombre de nappes captées a été affecté à chaque unité.

Les autres points de mesure correspondent :

- pour l'aspect quantité, aux forages suivis dans le cadre de la « Surveillance et la Gestion des nappes d'eaux souterraines en Gironde » (points appartenant au réseau départemental ou patrimonial suivis de façon continue ou mensuelle ou trimestrielle + points suivis de façon annuelle) et aux forages suivis de façon continue dans le cadre de la surveillance de l'état piézométrique de la nappe éocène en bordure de l'estuaire de la Gironde (cf. listes des points en annexe 3),

- pour l'aspect qualité, aux forages suivis dans le cadre du contrôle sanitaire (analyses réalisées sur eaux brutes), aux forages suivis dans le cadre de la « Surveillance et la Gestion des nappes d'eaux souterraines en Gironde » (points appartenant aux réseaux patrimonial et départemental) et aux points suivis dans le

cadre de la surveillance de la nappe éocène en bordure de l'estuaire de la Gironde (cf. listes des points en annexe 4).

4.7.1. Prélèvements

649 points de prélèvement ont été recensés sur la zone décrite précédemment.

La répartition de ces points entre les différents aquifères est représentée sur l'illustration 45. Il apparaît qu'en terme de nombre de points de points de prélèvement, l'Eocène moyen est l'aquifère le plus sollicité avec un total de 331 ouvrages. L'Oligocène arrive en deuxième position avec 217 ouvrages.

En terme de volumes, les prélèvements effectués sur la période 2000-2004 dans l'Eocène moyen (environ 158 millions de m^3) représentent 42,1 %. Ils sont un peu moins importants que les volumes prélevés dans les niveaux oligocènes (près de 193 millions de m^3) représentant 51,2 % des prélèvements totaux (illustrations 44 et 45).

Ces derniers s'élèvent à 376 millions de m^3 sur la période 2000-2004 et permettent de calculer une valeur moyenne annuelle de **75,2 millions de m^3**. Dans le détail, il apparaît que ces prélèvements ont augmenté entre 2000 et 2001, baissé entre 2001 et 2002, réaugmenté entre 2002 et 2003 et rebaissé entre 2003 et 2004 (illustration 44).

L'évolution des prélèvements en fonction de l'aquifère est représentée sur l'illustration 45. Les aquifères de l'Oligocène et de l'Eocène moyen sont ceux qui présentent les plus fortes variations lors de ces 5 dernières années.

	Miocène	Oligocène	EOS	EOM	EOI	Crétacé	Jurassique	Total
2000	1151340	37548043	37442	30709904.5	605198.5	3046925	30900	73129753
2001	1150869	40282622	19970	30058139	678766	2958884	0	75149250
2002	1066390	37477978	25619.5	32420773	842052.5	3055350	0	74888163
2003	1121169	37656005	31517.5	34744702.5	1079779.5	3199854.5	0	77833028
2004	999589	39675473	26030	30499923.5	780130.5	3153781	0	75134927
Total 5 ans	5489357	192640121	140579	158433442.5	3985927	15414794.5	30900	376135121
Pourcentage	1.46%	51.22%	0.04%	42.12%	1.06%	4.10%	0.01%	100.00%

Illustration 44 : Bilan volumique sur la zone du domaine minéralisé

En terme d'usage, les volumes prélevés pour l'AEP représentent 86 % des volumes totaux prélevés, ceux prélevés pour l'agriculture, un peu plus de 5 % (cf. illustration 45). Les autres usages restent marginaux à l'échelle de la zone d'étude.

4.7.2. Autres points de mesure

Piézométrie

L'illustration 46 permet de visualiser la localisation des points suivis annuellement et des points suivis plus régulièrement sur la zone du « Domaine minéralisé ».

Le secteur de Bordeaux présente la plus forte densité de points de mesure. Plus au sud et en particulier dans les environs de Langon, le nombre de points est nettement moins important même si l'on note une grande variété d'aquifères surveillés.

Qualité

L'illustration 47 permet de visualiser la localisation des points faisant l'objet d'analyses chimiques régulières sur la zone du « Domaine minéralisé ».

Les fréquences d'analyses sont précisées dans les tableaux de l'annexe 4 pour les points du réseau de la « Surveillance et la Gestion des nappes d'eaux souterraines en Gironde ».

La fréquence d'analyse des captages AEP varie, quant à elle, en fonction du volume prélevé mais aussi parfois en fonction des molécules recherchées. A titre d'indication, les volumes prélevés en 2004 ont été mentionnés dans le tableau relatif au réseau sanitaire en annexe 4.

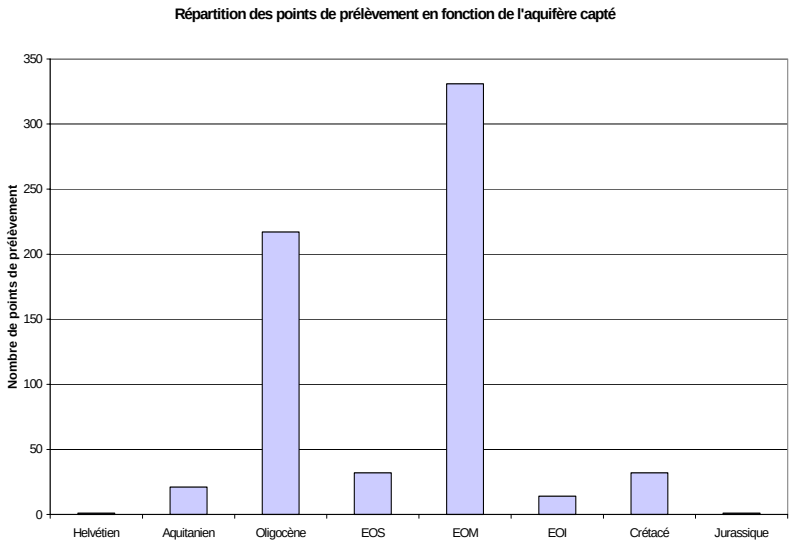
4.8. BILAN ET PERSPECTIVES

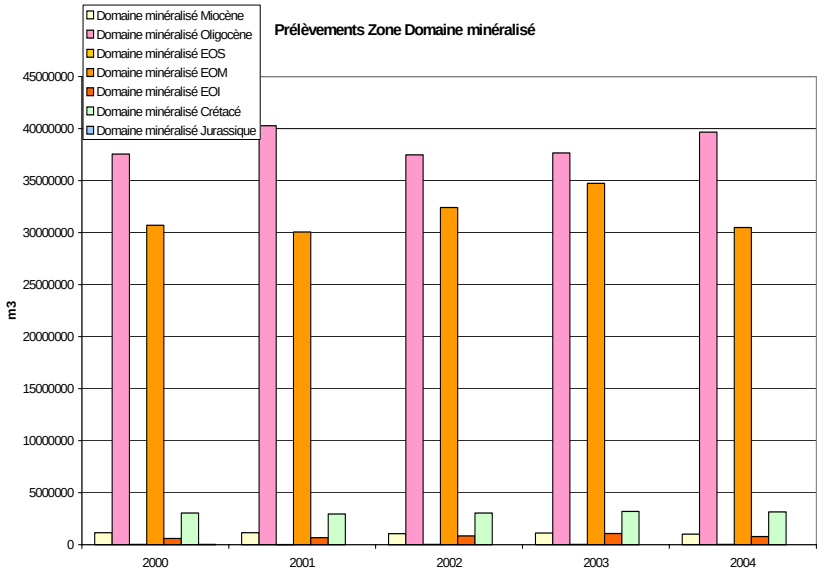
On retiendra que les faciès évaporitiques de l'Eocène moyen et/ou de l'Eocène supérieur pour lesquels aucune cartographie n'est disponible constituent la source de contamination la plus probable des eaux souterraines du domaine minéralisé.

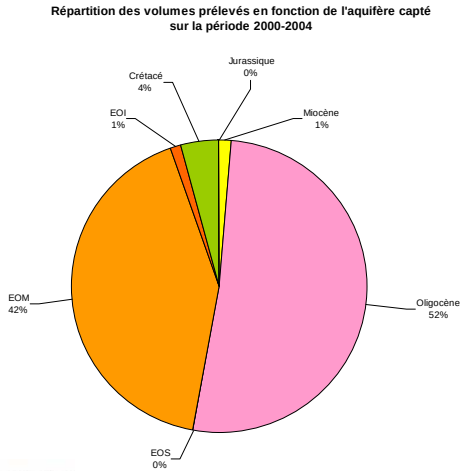
L'étude la plus récente menée sur le domaine minéralisé a montré que les risques d'augmentation de la minéralisation des eaux de l'Eocène ne pouvaient pas être gérés de façon globale sur l'ensemble de la zone. Des tendances à l'augmentation peuvent en effet être observées dans des contextes piézométriques très différents.

A titre expérimental, il pourrait être intéressant de déterminer avec précision la composition des terrains constituant les niveaux de l'Eocène supérieur et de l'Eocène moyen au droit d'un secteur réputé pour receler des ressources contaminées et de procéder ultérieurement à des prélèvements d'eau étagés de façon à mettre en relation la composition chimique de l'eau avec celle des terrains.

Les travaux qui visent à mieux connaître les phénomènes d'échange entre les différents niveaux de l'Eocène et qui sont menés dans le cadre de la réactualisation du Modèle Nord-Aquitain ainsi que les données qui seront acquises sur les points du réseau qualité devraient aussi permettre de mieux comprendre à court terme les phénomènes qui sont à l'origine de la contamination des eaux souterraines du domaine minéralisé.







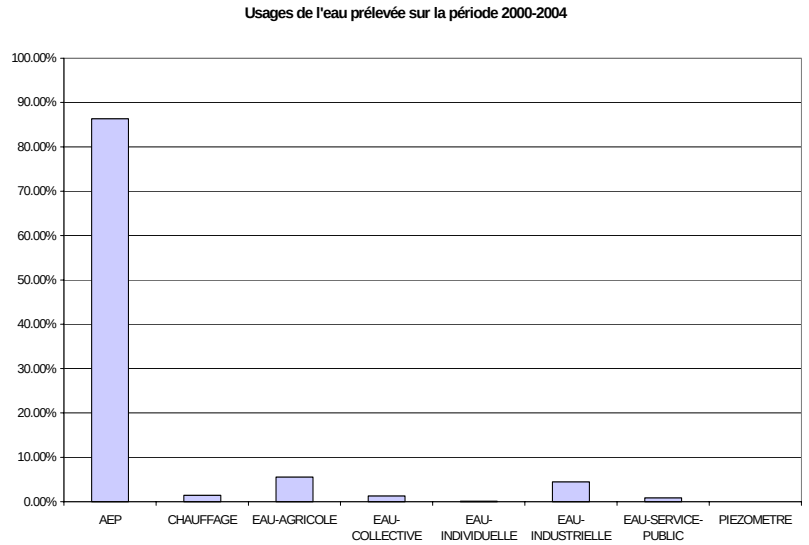
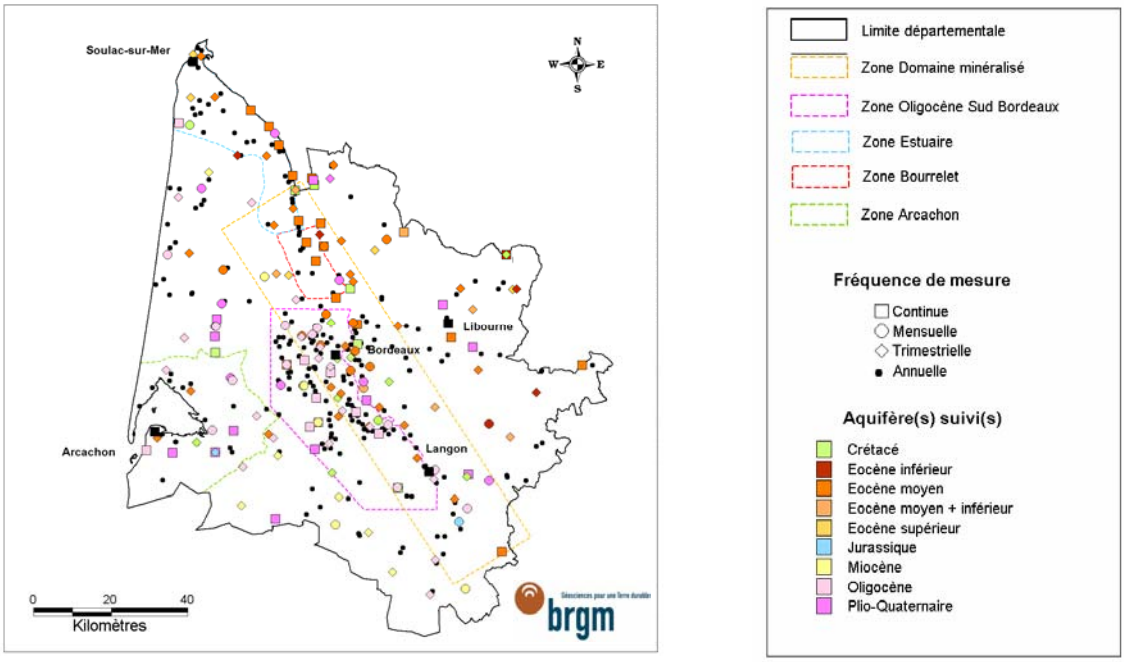
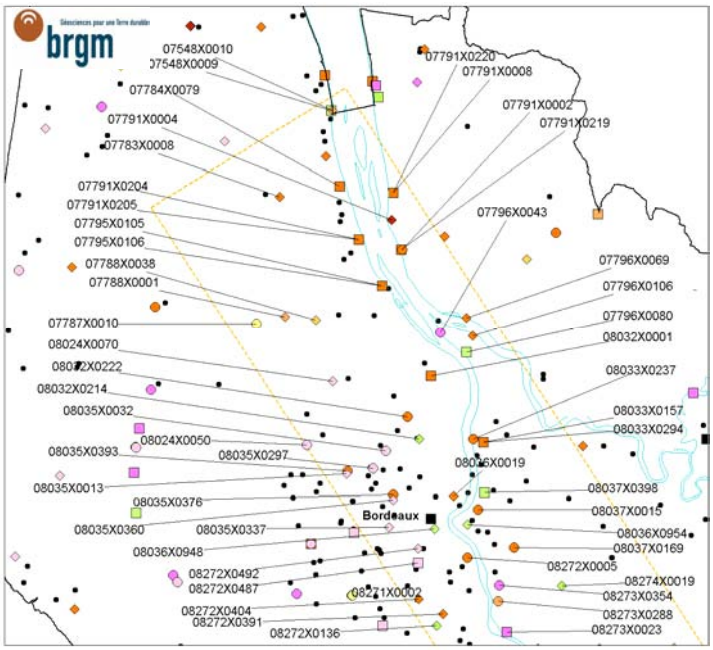


Illustration 45 : Synthèse des données concernant les prélèvements effectués sur la zone du domaine minéralisé





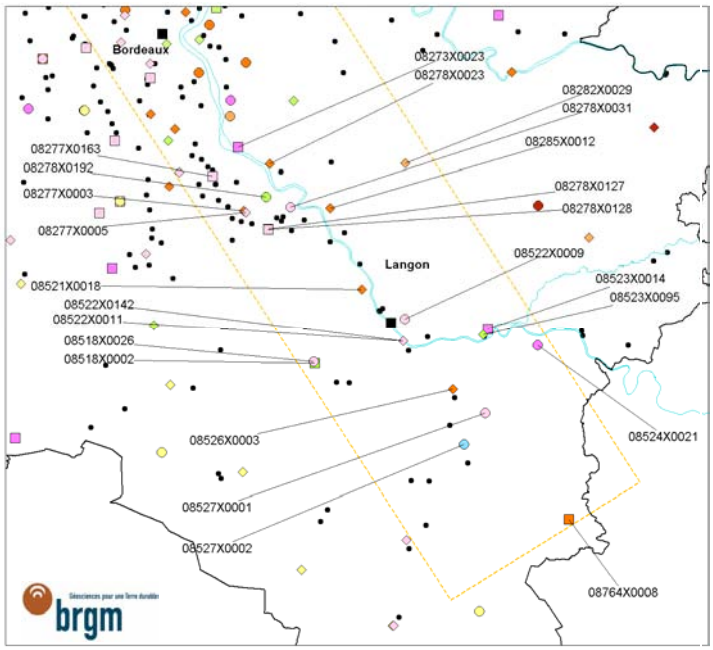


Illustration 46 : Localisation des points de mesure des niveaux piézométriques sur la zone du « domaine minéralisé »

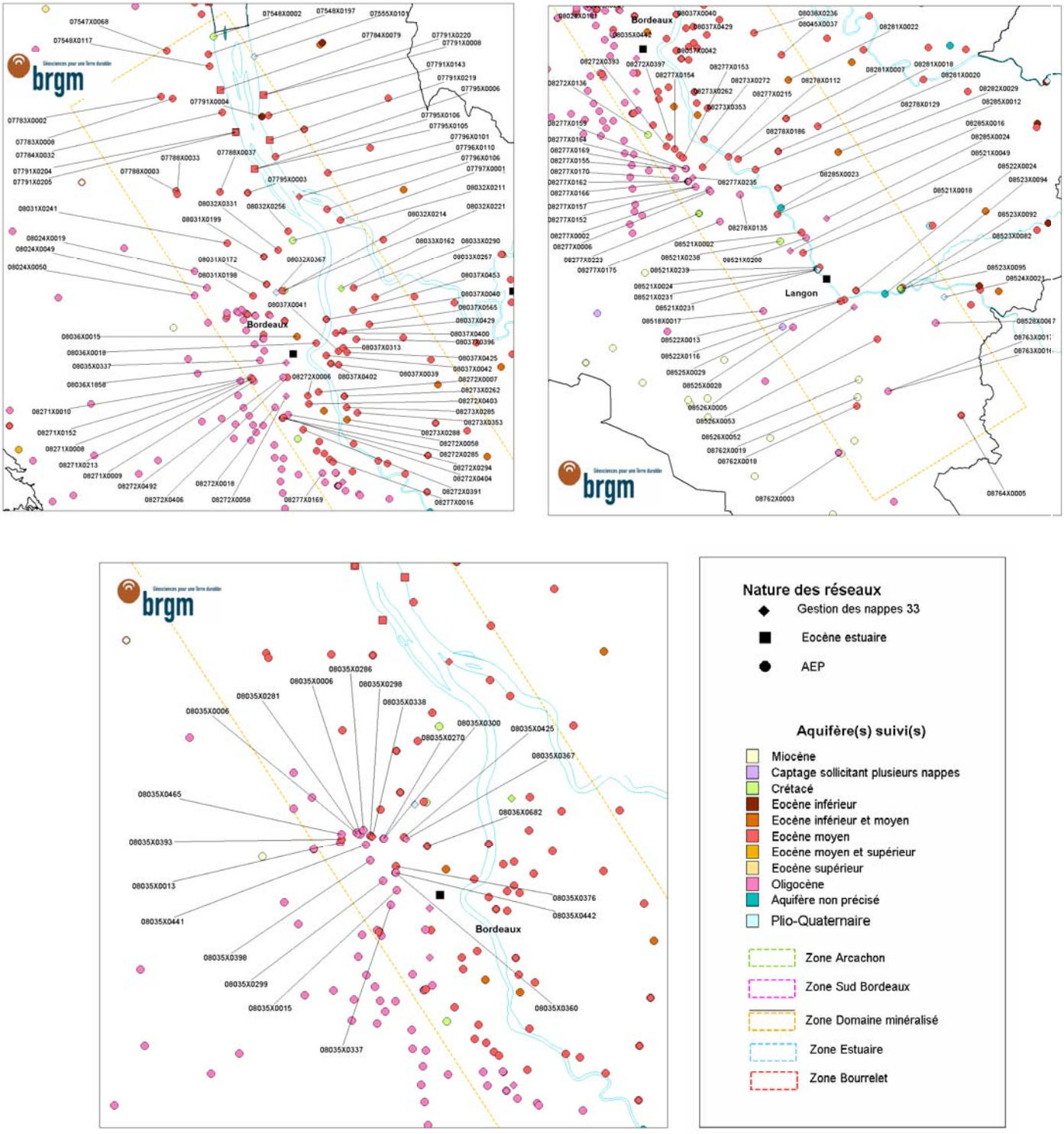


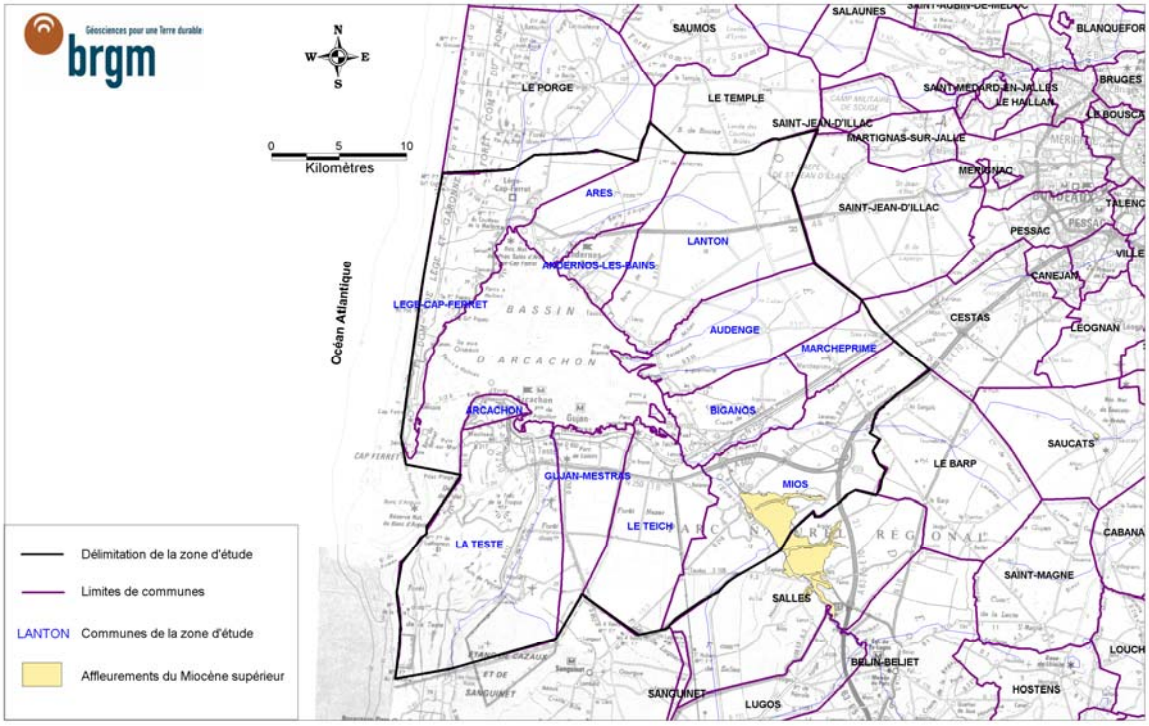
Illustration 47 : Localisation des points de mesure de la qualité sur la zone du « domaine minéralisé »

5. Zone du bassin d'Arcachon

5.1. PROBLEMATIQUE ET LIMITES DE LA ZONE D'ETUDE

La problématique consiste à étudier les risques de contamination des aquifères profonds par des eaux salées au droit du Bassin d'Arcachon.

La zone d'étude retenue correspond aux 12 communes situées sur le pourtour du bassin d'Arcachon (cf. illustration 48). Il s'agit par ordre alphabétique des communes d'Arcachon, d'Andernos-les-bains, d'Arès, d'Audenge, de Biganos, de Gujan-Mestras, de Lanton, de Lège, de la Teste-de-Buch, du Teich, de Marcheprime et de Mios.



Limite de la zone d'étude et communes associées

Illustration 48 : Limite de la zone d'étude

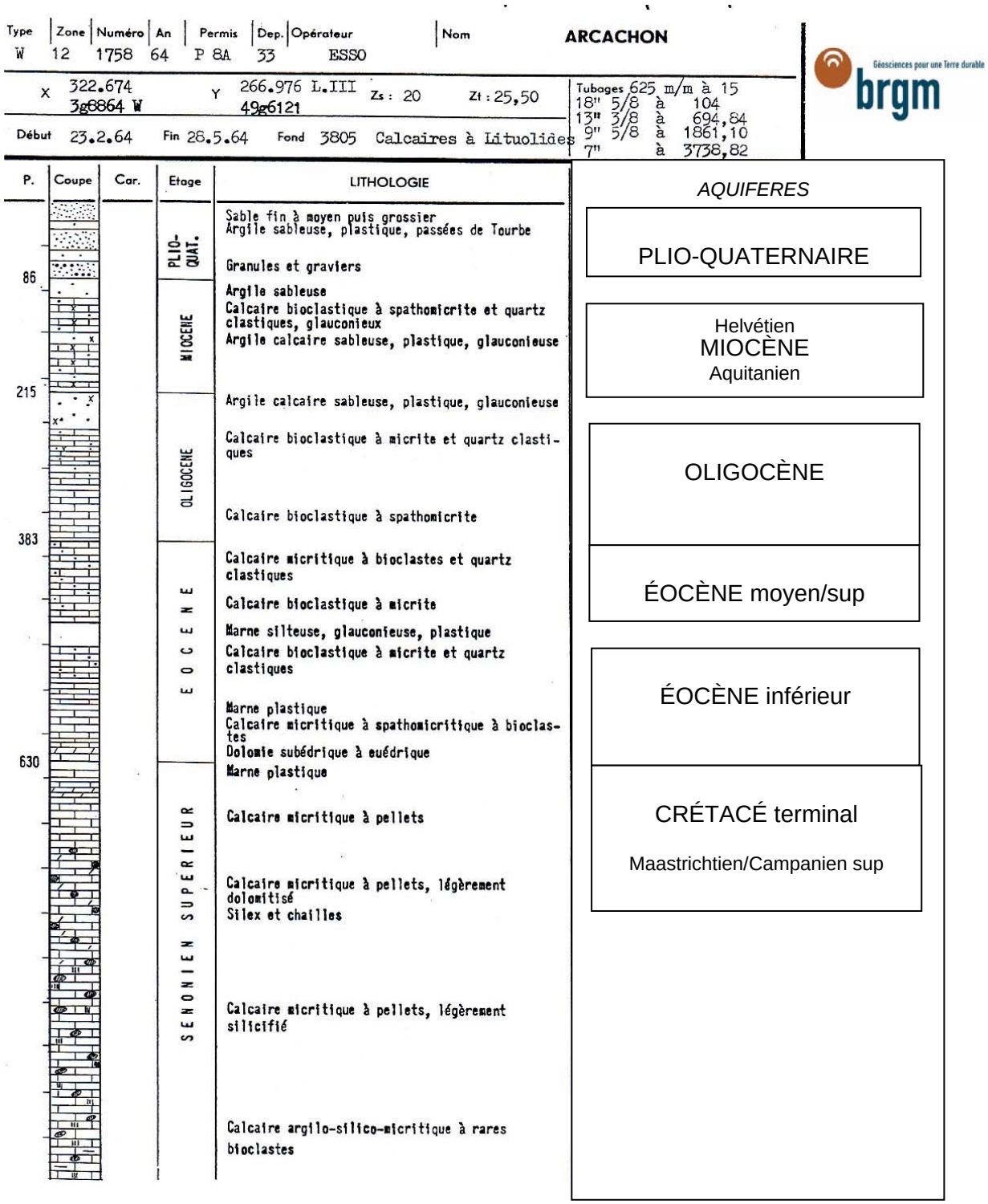


Illustration 49 : Succession et nature des formations dans le secteur du bassin d'Arcachon

5.2. DESCRIPTION GEOLOGIQUE

L'illustration 49 (coupe du sondage de recherche pétrolière Arcachon 1) montre la superposition des formations et des aquifères dans la région du bassin d'Arcachon depuis le Crétacé terminal jusqu'au Plio-Quaternaire.

5.2.1. Le Crétacé

Le Crétacé inférieur

Les dépôts sont très localisés lorsqu'ils correspondent aux niveaux carbonatés et gréseux de la barrière récifale mais beaucoup plus développés dans le bassin de Parentis où de nombreux gisements d'hydrocarbures sont exploités. Les réservoirs sont représentés par :

- les grès turbiditiques de l'Albien supérieur (Cazaux),
- les calcaires récifaux de l'Albien inférieur (Mimizan),
- les grès deltaïques de l'Aptien inférieur (Lugos),
- les carbonates de plate-forme du Barrémien (Parentis) ,
- les grès fluvio-deltaïques du Tithonien-Berriasien dans le Nord du bassin (Cazaux - Lavergne).

Le Crétacé supérieur

Cette époque est représentée par une série de formations puissante de plusieurs centaines de mètres de craie, de marnes et de calcaires de plate-forme, plus ou moins dolomitiques à leur sommet (cf. illustration 49). Seuls les terrains du Maastrichtien et du Campanien supérieur sont des réservoirs intéressants, car la porosité peut être notable du fait des phénomènes de karstification qui ont affectés ces derniers au début de l'ère tertiaire.

Les formations existant en dessous (Campanien inférieur, Santono-Coniacien, Turonien et Cénomanien) sont généralement constituées de terrains plus marneux ou crayeux.

5.2.2. Le Paléocène

Les premiers terrains du Cénozoïque correspondent à des argiles noirâtres à lentilles gréseuses, qui n'existent pas au sud-ouest de la zone étudiée (apports détritiques continentaux dans le bassin de Parentis) et à des marnes bariolées rougeâtres à verdâtres vers l'est (zone à sédimentation continentale de Bordeaux). Les terrains paléocènes n'existent pas dans le secteur d'Arcachon et de La Teste.

5.2.3. L'Eocène

L'Eocène inférieur

Cette période marque le retour à un régime marin avec une sédimentation de plate-forme carbonatée. Les calcaires francs à niveaux gréso-sableux (cf. illustration 49) sont toutefois entrecoupés de marnes qui prédominent au niveau du littoral actuel.

La puissance de l'Eocène inférieur varie de 50 à 150 mètres environ mais peut atteindre 200 m au niveau du bassin de Parentis.

L'Eocène moyen à supérieur

Ces dépôts, semblables à ceux de l'Eocène inférieur, témoignent d'un environnement de mer ouverte à l'ouest et de plate-forme carbonatée à l'est ; la limite entre les deux domaines passant sensiblement entre le Cap Ferret et la bordure nord-est de l'étang de Cazaux.

Dans le domaine de bassin, des marnes silteuses et glauconieuses et des marno-calcaires s'interstratifient. Sur la plate-forme, les calcaires gréseux et glauconieux prédominent. Les molasses du domaine continental, situées au sommet de la série, témoignent du début de la régression.

Comme pour l'Eocène inférieur, l'épaisseur des dépôts augmente du nord-est (20 à 100 mètres environ) vers le sud-ouest pour atteindre plusieurs centaines de mètres dans le bassin de Parentis.

5.2.4. L'Oligocène

Sur le secteur d'étude, l'Oligocène est un des étages reconnus les plus épais. Son épaisseur augmente régulièrement d'est en ouest : de 80 mètres de dépôts vers Belin, la série atteint près de 1000 mètres d'épaisseur sous Biscarrosse-plage.

L'Oligocène inférieur (Rupélien)

La mer poursuit la régression importante débutée à l'Eocène supérieur. Le domaine de plate-forme carbonatée se développe avec des faciès détritiques (grès et niveaux de marnes et d'argiles interstratifiés) puis des calcaires granulaires et bioclastiques plus ou moins gréseux et glauconieux (cf. illustration 49).

Dans le domaine de mer ouverte, à l'extrême sud-ouest de la zone d'étude, des marnes plastiques grisâtres se déposent sur plusieurs centaines de mètres.

L'Oligocène supérieur (Chattien)

L'Oligocène supérieur se présente sous la forme de calcaires sableux à nombreux bioclastes dans la zone d'Arcachon et de la Teste et de molasses et de calcaires de type agenais lorsqu'on se déplace vers l'est.

5.2.5. Le Miocène

Sur le domaine d'étude, la série miocène présente une épaisseur comprise entre 110 et 160 mètres.

Le Miocène inférieur (Aquitanien-Burdigalien)

Plusieurs faciès représentent cet ensemble dont l'épaisseur est comprise entre 70 et 100 m. La base correspond à des argiles carbonatées sableuses et glauconieuses alors que les parties moyennes et supérieures sont constituées de calcaires plus ou moins durs et de faluns très poreux en raison de la dissolution des coquilles fossilisées (cf. illustration 49).

Le Miocène moyen (Langhien-Serravallien ou « Helvétien »)

L'Helvétien se présente sous la forme de sables glauconieux verdâtres (Sables verts) (cf. illustration 49) et de marnes à huîtres mais les fluctuations du niveau de la mer ont pu entraîner une altération pédogénétique des sables qui se présentent alors sous le faciès de Sables fauves. A l'est, au niveau du domaine continental, les dépôts correspondent aux molasses de l'Armagnac.

Le Miocène supérieur (Tortonien-Messinien)

En domaine marin, des sables et des argiles à passées calcaires se déposent alors qu'en domaine continental, des faciès de plaine d'inondation (glaises bigarrées) se développent dans un contexte de marécages côtiers. Des dépôts conséquents de lignite s'accumulent aussi dans les dépressions.

5.2.6. Le Plio-Quaternaire

Ce n'est qu'au Pliocène que des sédiments détritiques commencent à se déposer sur la partie occidentale du bassin. Au Quaternaire ancien, la région d'Arcachon est pratiquement devenue continentale.

Au cours de l'Holocène, après la remontée flandrienne, les différents édifices dunaires de la façade atlantique s'édifient et donnent à la côte la physionomie que nous lui connaissons aujourd'hui (Dubreuilh *et al.,* 1992).

5.2.7. Structure

La région d'Arcachon présente une structure en demi-grabben s'affaissant vers l'océan. Deux grandes failles d'extension régionale encadrent le bassin (cf. illustration 50). La première, passant par le village du Teich, correspond sensiblement au lit de la Leyre et délimite vers l'ouest un bassin Crétacé de grande épaisseur. La deuxième de

même direction, passe au sud du Cap Ferret et se poursuit vers Cazaux et Lugos au sud-est.

Le lit de la Leyre sépare au final deux zones naturelles de morphologies différentes :

- une zone située à l'ouest de la rivière qui s'intègre dans la vaste plaine landaise recouverte en surface, par des sables éolisés, témoins de la fin du comblement du centre du Bassin d'Aquitaine (l'épaisseur des formations continentales peut atteindre 90 m)

- une zone située à l'est de la rivière et présentant une morphologie plus contrastée, avec les entailles de la vallée de la Leyre et de ses affluents, au fond desquelles affleurent des terrains anciens comme des faluns marins du Miocène moyen,

L'illustration 51 qui correspond à une coupe nord-sud permet de visualiser l'agencement des terrains (du socle aux niveaux les plus récents) dans le secteur du bassin d'Arcachon.

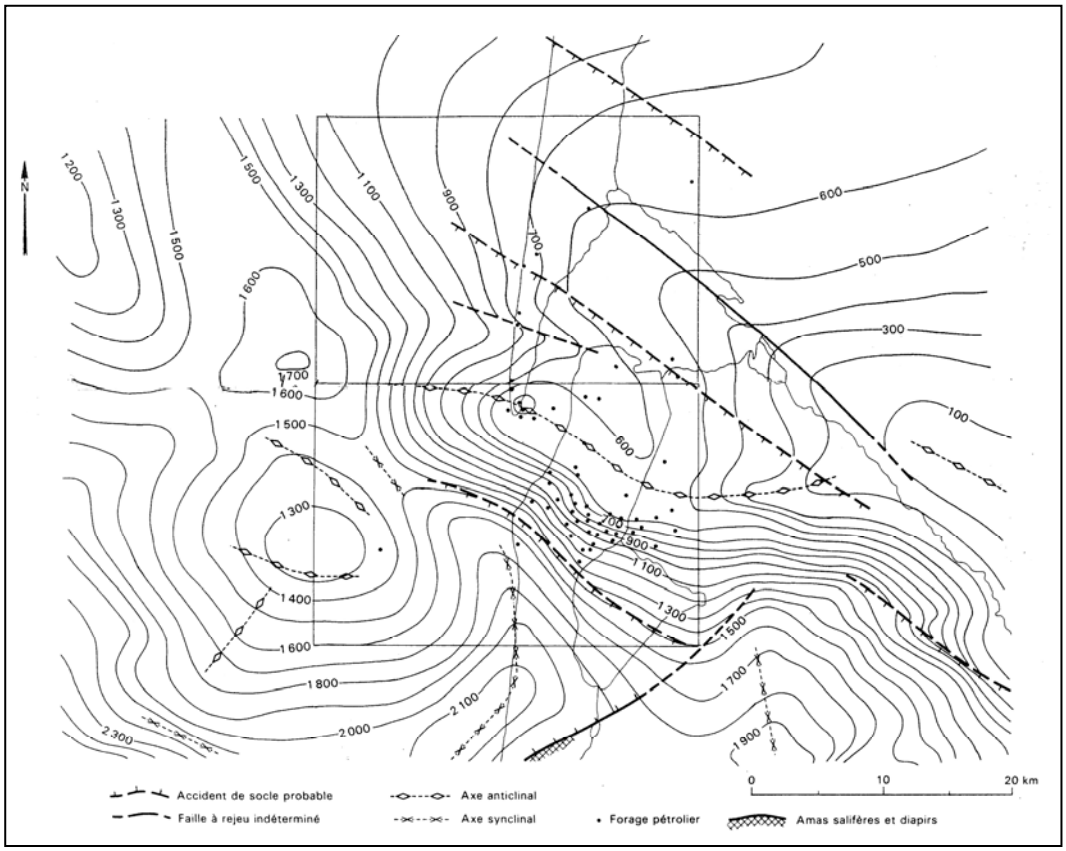


Illustration 50 : Esquisse structurale du toit du Crétacé dans le secteur d'Arcachon (d'après Karnay et al., 1992 et géophysique SNEA)

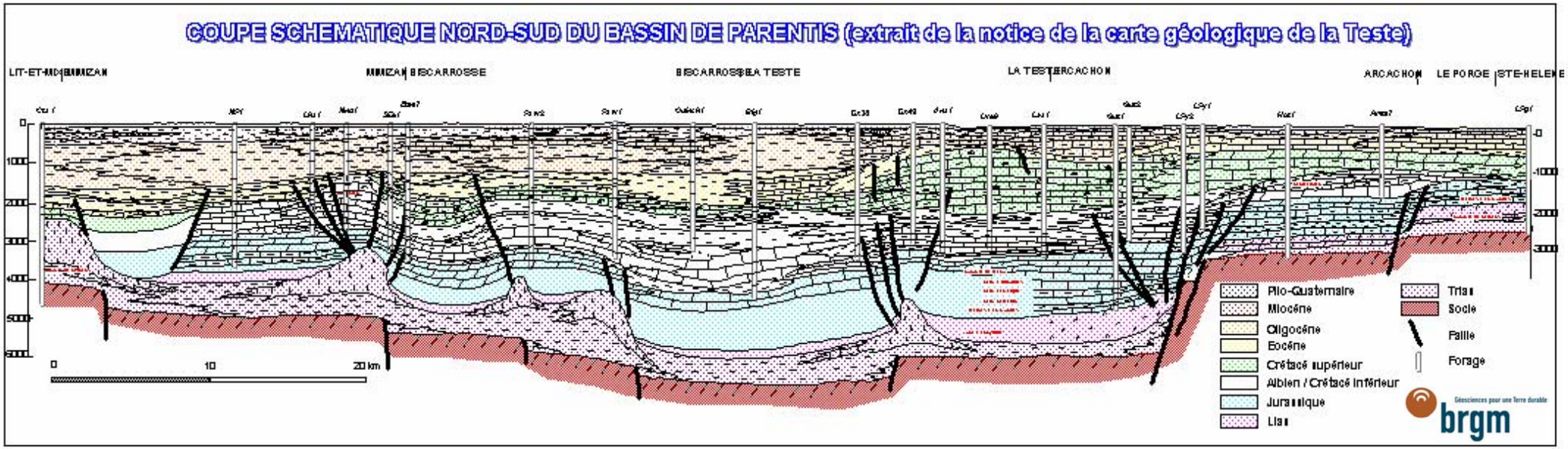


Illustration 51 : Coupe nord-sud du bassin de Parentis
(d'après Karnay et al., 1992)

5.3. DESCRIPTION HYDROGEOLOGIQUE :

5.3.1. Identification des réservoirs présents dans la zone d'étude

Les systèmes aquifères profonds retenus dans le cadre du SAGE « Nappes Profondes de Gironde » sont au nombre de 4. Il s'agit du Miocène, de l'Oligocène, de l'Eocène et du Crétacé.

Ces aquifères, captifs dans la région du Bassin d'Arcachon, présentent des caractères communs. En s'enfonçant vers le sud-ouest en direction du littoral atlantique, ils deviennent de plus en plus argileux ou marneux par passage latéral de faciès.

Ce passage latéral de faciès a pour conséquence de fermer les aquifères vers l'ouest et « d'oblitérer » les exutoires en mer des aquifères les plus profonds. Au niveau de la limite imperméable, on observe fréquemment une dégradation de la qualité des eaux (augmentation de la minéralisation) du fait du confinement.

Il existe des connections de différentes natures entre les niveaux aquifères : drainance descendante ou ascendante, connections liées à des discordances, à des phénomènes de karstification.

Sur le pourtour du Bassin d'Arcachon, les aquifères identifiés (cf. illustration 49) s'organisent comme suit :

Nappes du Plio-Quaternaire

C'est un aquifère multicouche dont les épontes présentent un caractère discontinu.

La nappe quaternaire, contenue dans les sables fins à moyens dont l'épaisseur atteint 35 à 40 mètres, présente des eaux de mauvaise qualité (fortes teneurs en fer et en matières organiques). Ces dernières sont toutefois exploitées en raison de leur grande accessibilité.

Les sables et les graviers de série du Pliocène (épaisseur de l'ordre de 25 à 30 m) qui sont séparés des sables de surface par des niveaux discontinus peu épais d'argiles et de lignites, constituent un important réservoir d'eau douce pouvant être alimenté par les aquifères sous-jacents lorsqu'ils sont en surpression (cas du Miocène). Les eaux sont acides, riches en fer et doivent être traitées pour l'AEP.

Ces deux nappes, drainées par les canaux et les rivières jouent un rôle primordial dans le soutien des étiages et dans l'alimentation des étangs côtiers et des nappes plus profondes.

Nappe du Miocène

Le Miocène est constitué de deux entités aquifères plus ou moins continues : les sables verts marins à glauconie et les grès calcaires coquilliers du Langhien-

Serravallien au sommet et les argiles et sables de l'Aquitanien et du Burdigalien à la base.

Les premiers présentent des paramètres hydrodynamiques acceptables et des eaux de bonne qualité, quoique parfois assez riches en fer .

Les niveaux sous-jacents passent à des sables et faluns lorsqu'on se rapproche de la côte puis à des calcaires au niveau du Cap Ferret. Ils peuvent localement être en communication avec les calcaires oligocènes sous-jacents et avec les sables fauves qui les surmontent.

Dans le secteur du bassin d'Arcachon, le Miocène est exploité depuis longtemps par de nombreux forages AEP et industriels. Les niveaux piezométriques se situent entre 5 et 10 mètres en dessous de ceux de la nappe du Plio-Quaternaire, sauf dans la zone orientale de l'étang de Cazaux-Sanguinet et sur le pourtour du Bassin d'Arcachon où le niveau de la nappe du Miocène est supérieur au niveau de la nappe plio-quaternaire. Certains ouvrages sont d'ailleurs artésiens jaillissants.

Nappe de l'Oligocène

Cet aquifère représenté par les calcaires du Rupélien est séparé de l'aquifère Miocène par une couche d'argile silteuse dont l'épaisseur peut atteindre 40 mètres. La zone réservoir est généralement située dans la moitié inférieure de la formation calcaire, la puissance de cette dernière pouvant dépasser 200 mètres. Des alternances de marnes peuvent toutefois isoler les niveaux inférieurs et scinder l'aquifère en deux. Ce niveau très producteur est largement exploité dans la région.

Nappe de l'Oligocène inférieur - Eocène moyen à supérieur

Les calcaires de la base de l'Oligocène sont en continuité hydraulique avec les formations de l'Eocène moyen à supérieur. Cet ensemble aquifère constitué, dans la région d'Arcachon, par des calcaires bioclastiques et gréseux à niveaux dolomitisés, représente la principale ressource en eaux souterraines de la Gironde.

Les meilleures productivités sont rencontrées dans les faciès gréso-sableux où les ouvrages présentent des débits globaux compris entre 100 et 160 m^3/h et des débits spécifiques pouvant atteindre 5 à 6 m^3/h par mètre de rabattement.

L'eau est de bonne qualité. Elle est en particulier commercialisée par la société des Abatilles dont les forages captent la base de l'ensemble.

Il est à noter que l'aquifère se biseaute vers l'est au niveau de la faille du Teich pour disparaître sous la Leyre (niveaux absents dans le forage 08502X0002 de Biganos).

Nappe de l'Eocène inférieur et du Crétacé terminal

Les calcaires gréseux à passées dolomitiques de l'Eocène inférieur sont en continuité hydraulique avec les terrains du Crétacé terminal (Maastrichtien et Campanien supérieur à faciès calcaréo-gréseux légèrement dolomitique). Cet aquifère est utilisé

pour l'AEP et quelques industries. Le mur de cet ensemble est représenté par un niveau de marnes calcaires crayeuses de 5 à 10 mètres d'épaisseur.

Nappe du Crétacé inférieur

Utilisées pour la géothermie haute température, les eaux du Crétacé inférieur s'individualisent en deux sous-ensembles aquifères : le Néocomien et l'Apto-Albien séparés par un niveau marneux.

Ces deux niveaux carbonatés ou gréseux présentent une porosité de fissures (karstiques) et/ou matricielle où les eaux fortement salées sont en contact avec les hydrocarbures.

L'Eyre et le Bassin d'Arcachon constituent un axe majeur de drainage lié à la faille du Teich qui favorise le transfert des fluides par drainance d'un horizon aquifère à l'autre.

♦ ♦ ♦ ♦ ♦

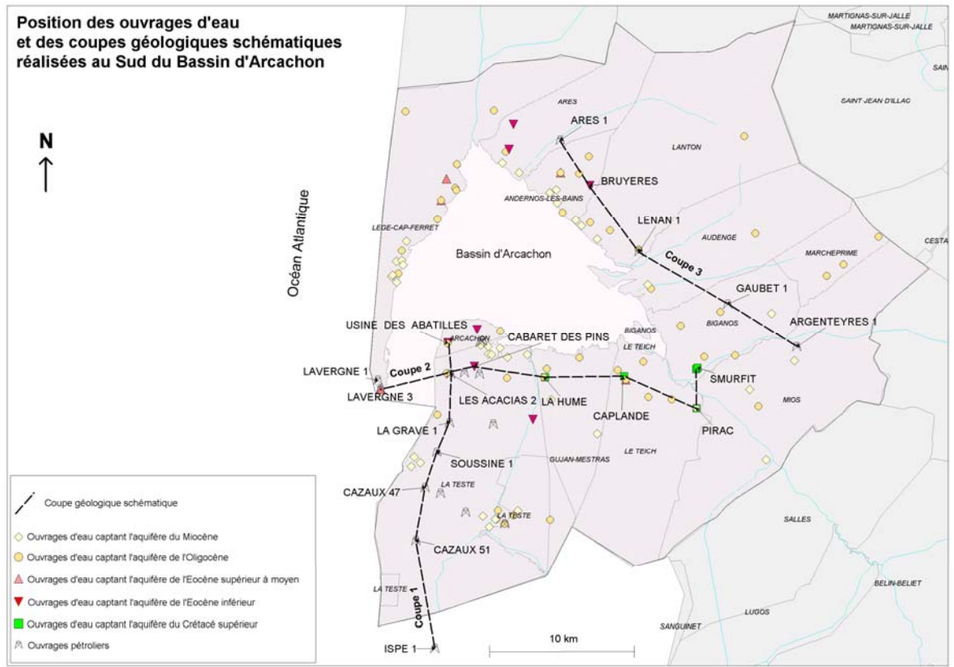
Les coupes nord-sud, nord-ouest sud-est et ouest-est de l'illustration 52 permettent de visualiser l'agencement spatial des aquifères décrits précédemment.

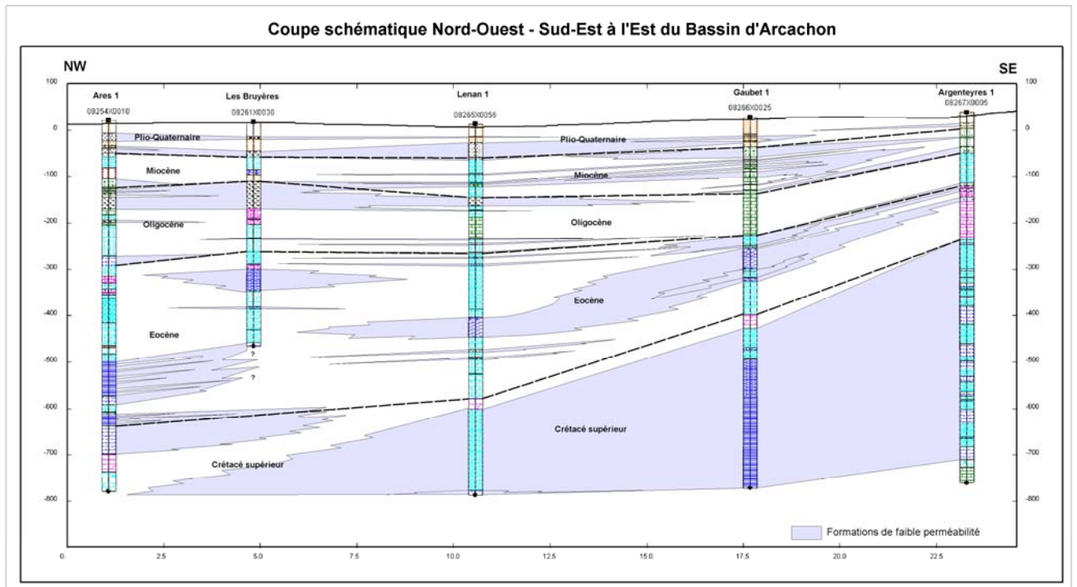
5.3.2. Description détaillée de l'aquifère concerné par l'aléa

Dans les secteurs proches des côtes, les nappes d'eau douce s'écoulent vers la mer et arrivent en contact avec l'eau marine salée qui peut envahir les réservoirs lorsque les exutoires en mer des aquifères ne sont pas « oblitérés » (cf. partie 5.3.1).

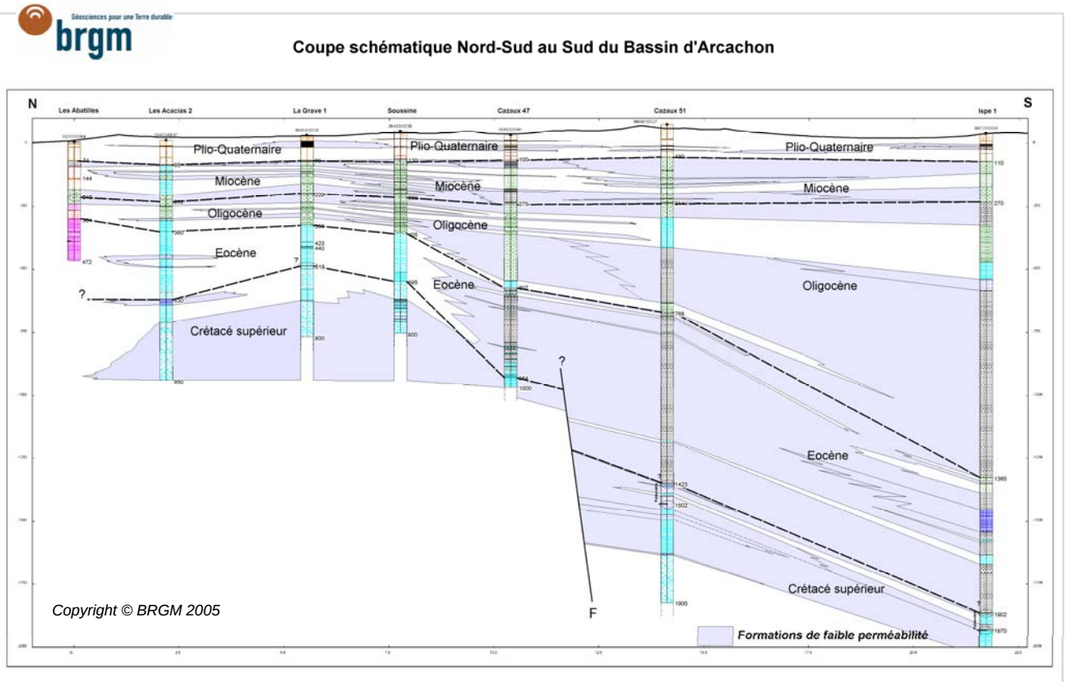
Dans la région littorale comprise entre Cazaux et le Porge, les exutoires en mer des aquifères profonds sont oblitérés en raison du passage latéral à des faciès marneux, à l'exception de ceux du Miocène et de l'Oligocène qui bénéficient du remplissage détritique récent de la fosse de Guagnot, prolongement du Gouf du Cap Ferret.

L'analyse des données concernant des forages pétroliers réalisés au large du Bassin d'Arcachon indique que seul l'aquifère miocène, et en particulier les grès calcaires coquilliers et les sables du sommet de l'Helvétien (Miocène moyen), est susceptible de présenter un exutoire au niveau du talus continental.

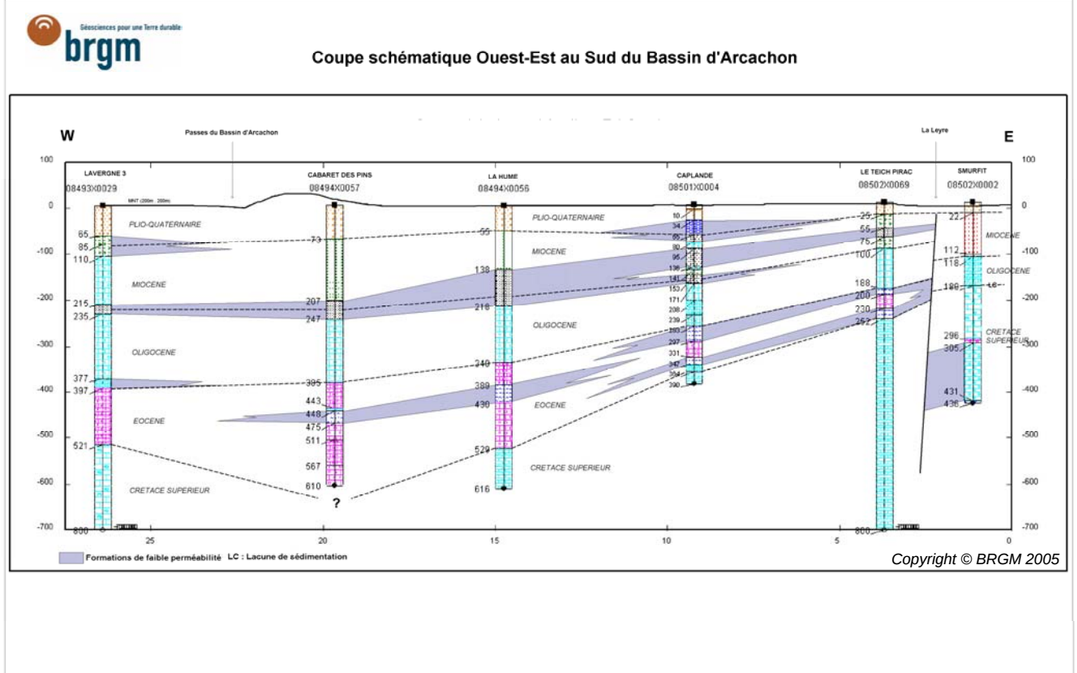




Copyright © BRGM 2005



Copyright © BRGM 2005



Copyright © BRGM 2005

Illustration 52 : Coupes géologiques dans le secteur du Bassin d'Arcachon

Les formations éocènes, oligocènes et miocènes inférieur traversées par le forage pétrolier off-schorre Aldebaran 1 sont en effet totalement argilo-marneuses sur une épaisseur de près de 1000 mètres alors qu'au dessus, les niveaux serravalliens (Helvétien) se présentent sous la forme d'une trentaine de mètres de calcaires gréseux coquilliers surmontés par un banc d'argile calcaire discontinu de 3 mètres d'épaisseur puis par une dizaine de mètres de sables.

L'Helvétien est donc le seul niveau pris en compte par le SAGE qui soit encore aquifère au niveau du plateau continental atlantique et au large du secteur d'étude.

L'étude des risques de contamination des aquifères littoraux du Bassin d'Arcachon par des eaux marines portera donc exclusivement sur la **nappe helvétienne**.

Géométrie des formations aquifères de l'Helvétien

Les formations de l'Helvétien correspondent à la deuxième transgression miocène dont l'avancée vers l'est a été moins significative que la transgression aquitanienne. La limite de dépôt de ces formations est figurée sur l'illustration 53.

L'horizon aquifère de l'Helvétien présente un pendage régulier vers l'ouest et une géométrie influencée par l'anticlinal de Villagrains-Landiras en bordure nord du paléo-bassin de Parentis (cf. illustration 54). La puissance des formations aquifères de l'Helvétien augmente d'est en ouest et deux dépressions séparées par l'axe anticlinal s'individualisent sur la zone d'étude : la première, au nord, centrée sur la commune de Lège-Cap-Ferret forme la fosse de Guagnot (épaisseurs de dépôts perméables pouvant dépasser 50 m) ; la seconde, au sud, est moins marquée (zone où l'épaisseur de l'aquifère ne dépasse pas 40 mètres) (cf. illustration 54). L'épaisseur de l'aquifère se réduit par contre à 5-10 mètres maximum au niveau de l'axe de l'anticlinal.

Caractéristiques hydrauliques de la nappe de l'Helvétien

La carte piézométrique figurée sur l'illustration 55 a été établie à partir de mesures effectuées lors des premiers semestres 1998, 1999 et 2000 et de mesures plus récentes effectuées dans le cadre de la « Surveillance et la Gestion des Nappes d'eaux souterraines en Gironde ». Même si les mesures n'ont pas été réalisées de façon synchrone, on peut considérer que l'état représenté correspond à un état de hautes eaux.

L'étude de la carte montre que les écoulements de l'aquifère helvétien sont dirigés vers l'Océan Atlantique et que la Leyre et le Bassin d'Arcachon forment un axe de drainage. Le remplissage détritique récent de la fosse de Guagnot guide aussi les écoulements de l'est du Bassin d'Arcachon vers le littoral.

La Leyre constitue par ailleurs une zone d'exutoire de l'aquifère étudié comme l'indiquent les flux de drainance représentés sur l'illustration 55.

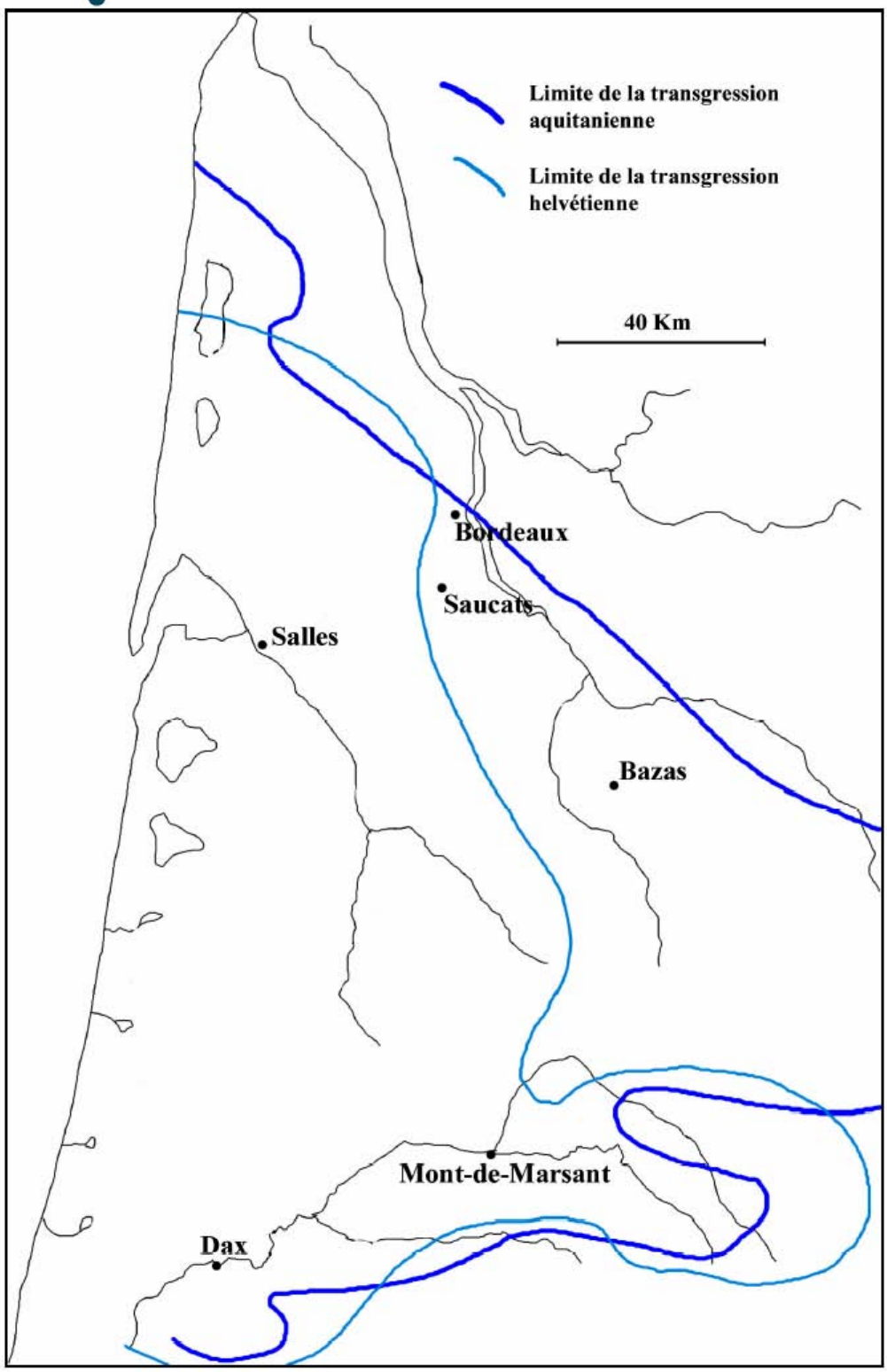
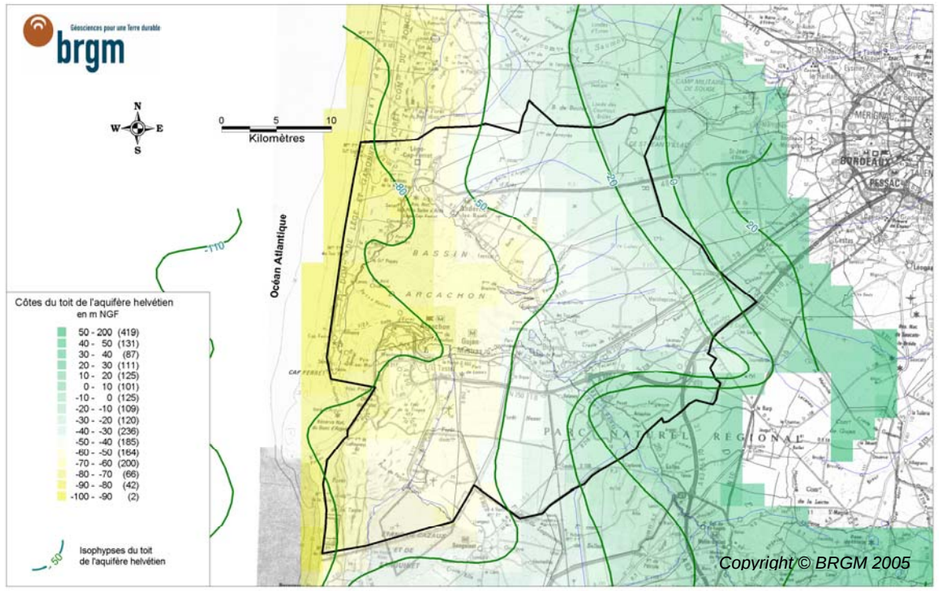
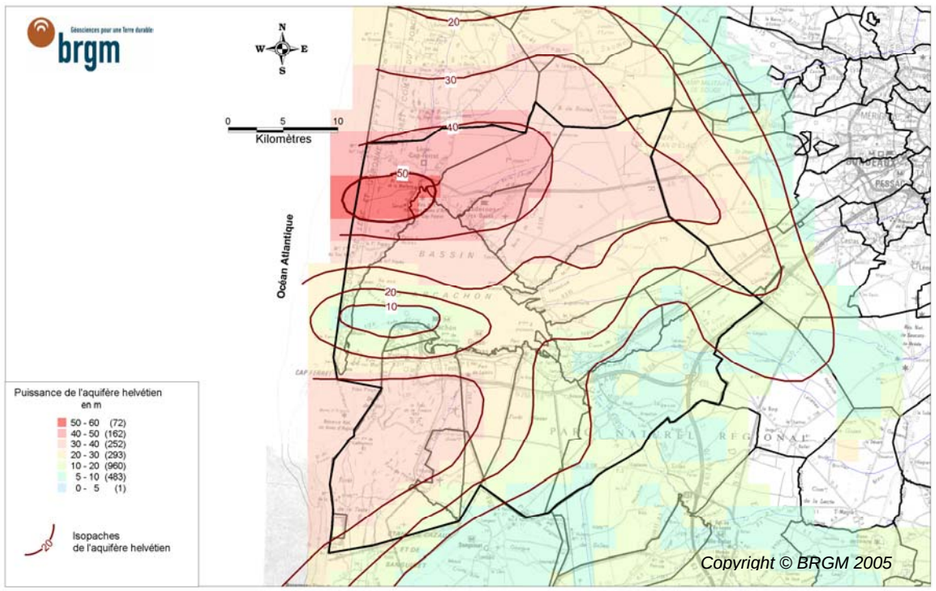


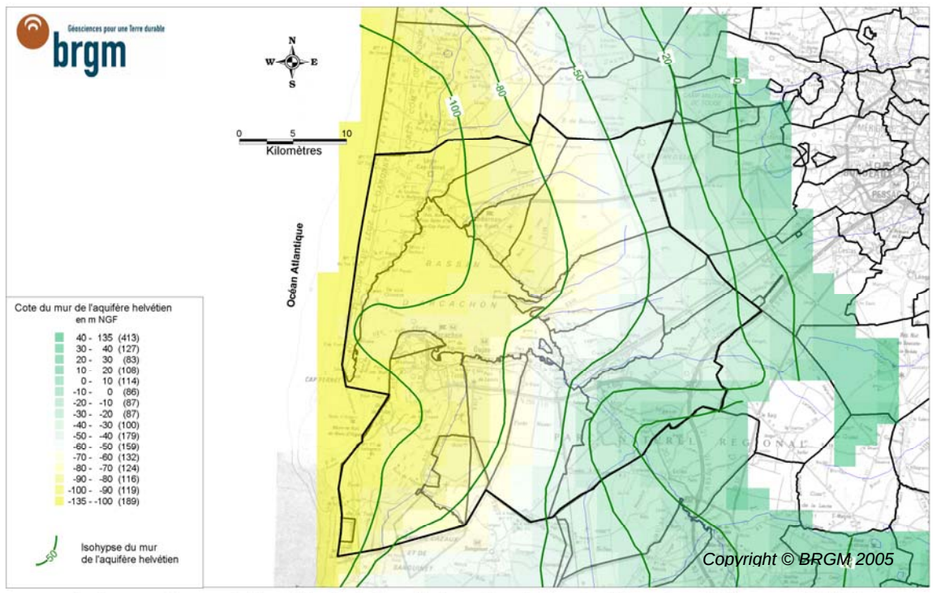
Illustration 53 : Limites probables des transgressions aquitanienne et helvétienne



Isohypses du toit de l'aquifère helvétien de la region du Bassin d'Arcachon (référence : 0 NGF)

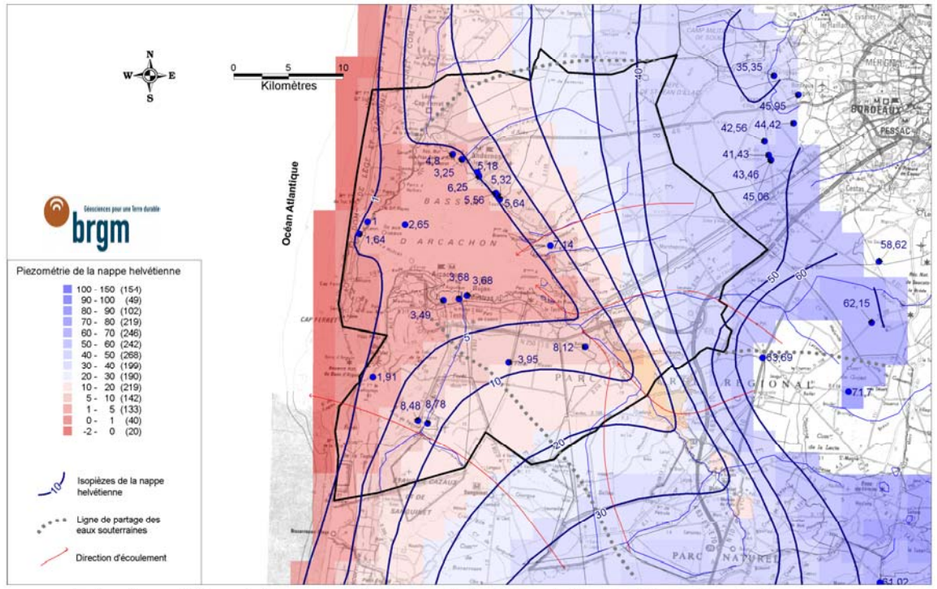


Isopaches de l'aquifère helvétien de la region du Bassin d'Arcachon

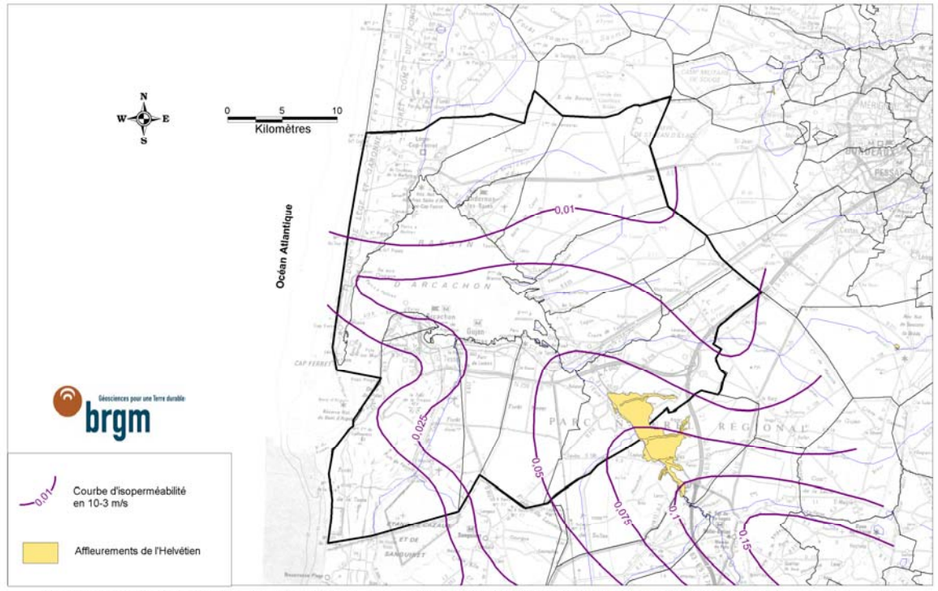


Isohypses du mur de l'aquifère helvétien de la region du Bassin d'Arcachon (référence : 0 NGF)

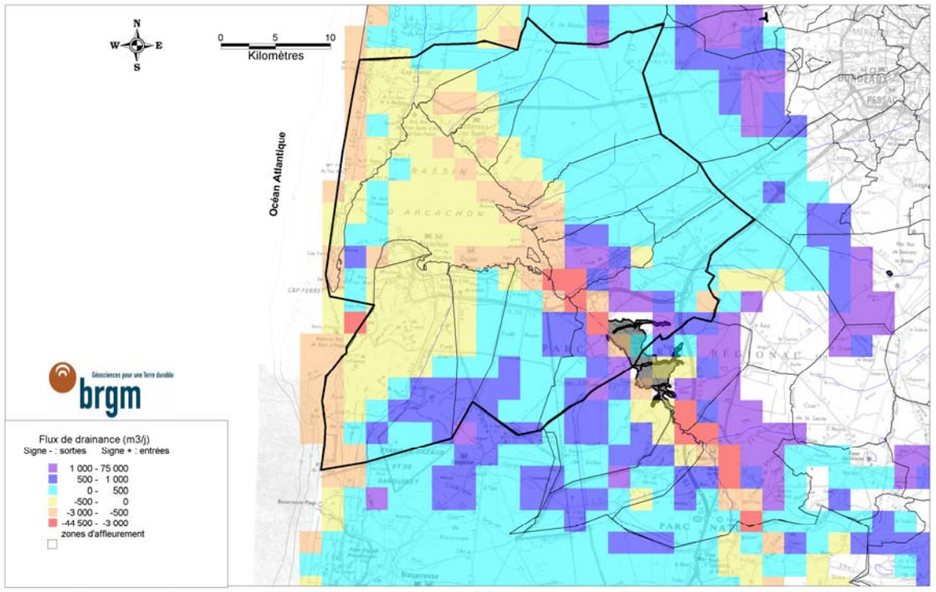
Illustration 54 : Géométrie de l'aquifère de l'Helvétien (d'après Pédron, 2005)



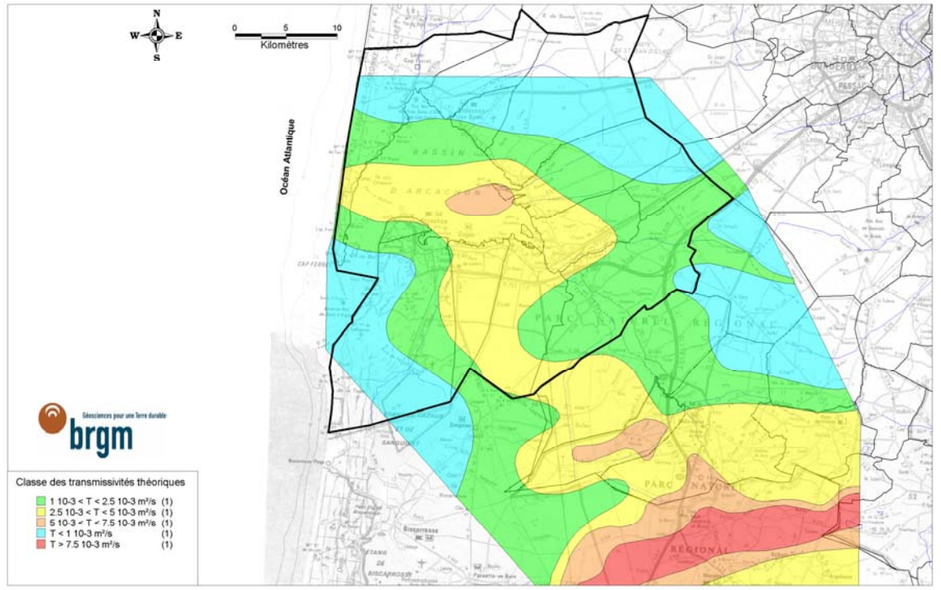
Carte piézométrique de la nappe helvétienne de la région du Bassin d'Arcachon (référence : 0 NGF)



Carte des perméabilités de Darcy dans la nappe du Miocène supérieur selon *Astié et Marionnaud, 1968*



Flux de drainance calculés entre l'Helvétien et le Plio-quaternaire (Modèle Nord-Aquitain, 2001)



Répartition des transmissivités théoriques dans l'aquifère du Miocène supérieur selon Astié et Marionnaud, 1968.

Illustration 55 : Caractéristiques hydrogéologiques de l'Helvétien (d'après Pédron et al., 2001

En Aquitaine, le Miocène est principalement alimenté par drainance descendante à partir des aquifères sus-jacents. Dans la zone du bassin d'Arcachon, le mode d'alimentation ne semble toutefois pas obéir à la même règle. Astié en 1964 et Chapoutot en 1965 ont en effet noté une augmentation du niveau piézométrique avec l'approfondissement de certains forages réalisés dans le secteur d'étude. Le Miocène serait donc alimenté par le l'Oligocène sous-jacent.

Cette hypothèse a été confirmée par le modèle Nord-Aquitain qui a permis de mettre en évidence des drainances ascendantes dans le lit de la Leyre et, dans une moindre mesure, à l'aplomb et au sud du Bassin d'Arcachon (cf. illustration 55). Il est à préciser que les résultats ne doivent être considérés que d'un point de vue qualitatif.

Les forages captant l'Helvétien en bordure nord-est du Bassin d'Arcachon sont faiblement artésiens jaillissants. La nappe est mise en charge soit par la présence d'un horizon imperméable au sommet du Miocène (Formation des Glaises bigarrées), soit par contraste de perméabilité avec la formation très peu transmissive des Sables fauves sus-jacents soit par un confinement de l'aquifère à l'approche du littoral (passage latéral à des faciès plus marneux ou blocage des écoulements du fait de la présence d'un biseau salé invasif).

L'étude de la répartition des perméabilités de Darcy et des transmissivités théoriques au sein de l'aquifère helvétien réalisée par Astié et Marionnaud en 1968 (cf. illustration 55) montre l'importance du remplissage détritique récent de la fosse de Guagnot. L'axe de drainage principal de la nappe globalement orienté sud-est nord-ouest correspond à une zone où les transmissivités sont supérieures à $2{,}5.10^{-5} m^2 s^{-1}$. Cet axe suit le trajet de la Leyre jusqu'au Bassin d'Arcachon où il bifurque pour s'orienter est-ouest en direction du Gouf de Cap Ferret. La répartition des perméabilités de Darcy suit ce schéma de drainage où K_m décroît de $0{,}15.10^{-3} ms^{-1}$ en amont de la zone d'étude à $0{,}01.10^{-3} ms^{-1}$ au niveau du littoral atlantique. La diminution de ces paramètres hydrodynamiques à l'approche du littoral peut s'expliquer par une variation latérale des faciès de l'Helvétien (augmentation de la fraction marneuse correspondant à des dépôts de mer ouverte).

En partant de l'hypothèse que l'axe compris entre le Gouf de Cap Ferret/fosse de Guagnot constitue la zone la plus transmissive de l'aquifère helvétien au niveau du plateau continental et en tenant compte du pendage des couches miocènes vers l'ouest, on peut supposer que s'il existe un exutoire de la nappe en mer, ce dernier est situé à l'est du Gouf de Cap Ferret, au niveau du talus continental.

C'est sur cette hypothèse que se sont appuyés les travaux de définition des risques de contamination de l'aquifère helvétien de la région du Bassin d'Arcachon.

5.4. PROBLEMATIQUE

5.4.1. Aspects théoriques

A cause de leur différence de densité, les eaux douces et les eaux salées se mélangent très mal et l'intrusion d'eau salée, plus dense, dans une nappe d'eau douce se présente, en plan, sous la forme d'un triangle que l'on appelle le **biseau salé**.

Pour aborder le problème des intrusions salines dans les aquifères d'eau douce débouchant en mer, on pose en général un certain nombre d'hypothèses. On considère par exemple que :

1) les deux fluides sont non miscibles, c'est à dire qu'il restent séparés par une interface nette. On néglige ainsi les phénomènes de diffusion qui peuvent se produire au niveau de l'interface et tendent à créer une zone de transition dans laquelle la densité du fluide varie progressivement de la densité de l 'eau douce à celle de l'eau de mer. L'expérience montre toutefois que cette zone de transition est le plus souvent réduite, ce qui justifie l'hypothèse,

2) les deux fluides ont la même viscosité,

3) les masses volumiques spécifiques des deux fluides sont les suivantes :

   ρ_s = 1.025 g/cm^3 pour l'eau de mer,

   ρ_d = 1.000 g/cm^3 pour l'eau douce.

Ces hypothèses étant admises, plusieurs modèles théoriques permettent d'évaluer la position de l'interface eau douce – eau salée dans un aquifère débouchant en mer.

Le modèle le plus simple énoncé par **Ghijben-Herzberg** ne concerne que les **nappes libres**. Il repose sur l'équilibre des pressions de l'eau douce et de l'eau salée et s'écrit :

$$H \times \rho_s = (H + h) \times \rho_d$$

Avec *h* : cote piézométrique de la nappe d'eau douce,

H : profondeur de l'interface eau douce/eau salée sous le niveau de la mer.

En prenant les valeurs de masse volumique spécifique énoncées ci-dessus, l 'équation se simplifie en :

$$H = 40 \times h$$

En pratique, dans le cas d'une nappe libre, en tout point du réservoir côtier, l'interface Ed/Es se situe donc sous le niveau de la mer, à une profondeur égale à 40 fois le niveau piézométrique de la nappe d'eau douce. Inversement, une baisse de pression de la nappe de 1 mètre fait remonter l'interface de 40 mètres.

Le modèle de **Hubbert**, tient quant à lui, compte de l'écoulement de la nappe vers la côte et fait intervenir h et h' qui représentent respectivement la charge d'eau douce et la charge d'eau salée par rapport au niveau de la mer.

$$H = \frac{(h \times \rho_d - h' \times \rho_s)}{\rho_s - \rho_d}$$

Dans le cas d'une **nappe captive** (cf. illustration 56), c'est le modèle de **Glover** qui s'applique. L'expression, plus complexe que la précédente, tient également compte de l'écoulement de la nappe vers la mer mais néglige l'existence d'une zone de diffusion entre l'eau salée et l'eau douce dont l'épaisseur peut être conséquente.

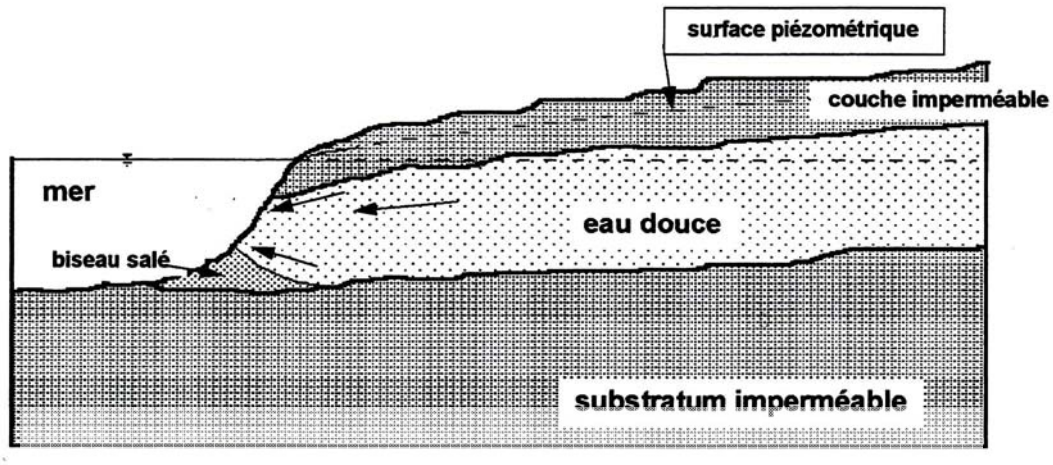


Illustration 56 : Schéma théorique de l'intrusion d'un biseau salé dans une nappe captive (d'après Daum et al., 1996)

La profondeur de l'interface eau douce-eau salée **y** sous le niveau de la mer en fonction de la distance **x** à la côte correspond à une portion de parabole (Verruijt 1968) d'équation :

$$y^2 = -\frac{2.Q_u.x}{\beta.K.(1+\beta)} + \frac{Q_u{}^2}{\beta^2.K^2} \times \frac{1-\beta}{1+\beta}$$

avec :

y : profondeur de l'interface, comptée positivement vers le haut à partir du niveau de la mer

x : distance à la côte, comptée positivement vers la mer à partir du rivage

K : perméabilité de Darcy

Q_u : débit de la nappe d'eau douce par unité de largeur

Si l'on tient compte de l'expression du débit par unité de largeur, on se rend compte que l'équation de la parabole ne fait plus intervenir la perméabilité :

$$Q_u = K.e.i$$

avec :

e : épaisseur de l'aquifère

i : gradient hydraulique

d'où :

$$y^2 = \frac{2.\cancel{K}.e.i.x}{\beta.\cancel{K}.(1+\beta)} + \frac{\cancel{K}^2.e^2.i^2}{\beta^2.\cancel{K}^2} \times \frac{1-\beta}{1+\beta} \quad \text{et} \quad y^2 = \frac{2.e.i.x}{\beta^2+\beta} + \frac{e^2.i^2}{\beta^2} \times \frac{1-\beta}{1+\beta}$$

La position du biseau salé est donc indépendante de la perméabilité du réservoir. En effet, ce facteur régissant l'aptitude du milieu à se faire traverser par un fluide est le même pour l'eau douce que pour l'eau salée. Ce sont donc uniquement la différence de densité entre les deux fluides non miscibles et l'écoulement de la nappe sous l'effet d'un gradient hydraulique qui déterminent la géométrie de l'interface eau douce - eau salée.

5.4.2. Etat des connaissances par rapport à l'aléa

Aucune information concernant les risques d'intrusion du biseau salé dans les aquifères du bassin d'Arcachon n'étant disponible en bibliographie, le travail a consisté à calculer la position théorique du biseau salé dans l'aquifère Miocène, seul aquifère du SAGE a priori concerné par cet aléa (cf. chapitre 5.3.2.).

En l'absence d'information précise sur la géométrie et la lithologie du Miocène du plateau continental jusqu'au talus, il a été supposé :

- que l'aquifère helvétien était homogène dans le sous-sol marin et qu'il présentait une perméabilité de Darcy (K_m) de 1.10^{-5} ms^{-1} (perméabilité la plus à l'ouest connue),

- que le toit de l'aquifère présentait une pente constante jusqu'au talus avec des valeurs comprises entre 1,2 ‰ et 3 ‰ (valeurs estimées à partir de données observées),

- que le mur de l'aquifère helvétien présentait une pente constante jusqu'au talus avec des valeurs comprises entre 3 ‰ et 7 ‰ (estimation basée sur des données observées),

- que le débit de la nappe restait constant entre la côte atlantique et le talus continental.

Ces différentes hypothèses ont permis de définir la géométrie théorique de l'aquifère helvétien jusqu'au talus et de localiser la zone exutoire au niveau du Gouf de Cap Ferret (cf. illustration 57). Il est à préciser que les pentes minimales ont été retenues pour définir la géométrie la plus défavorable (exutoire le plus proche de la côte).

Le débit de la nappe de l'Helvétien qui s'écoule vers l'exutoire supposé est donné par la formule de Darcy qui fait intervenir la perméabilité de Darcy K_m, la section de la nappe et le gradient hydraulique. Le débit de la nappe en A (cf. illustration 58) est estimé comme suit :

$$Q_{(m^3/s)} = K \frac{b_A + b_B}{2} \times L \times \frac{\Delta H}{\Delta x}$$

Pour calculer la position du biseau salé, il est nécessaire d'exprimer le débit de la nappe par unité de largeur. Le débit unitaire noté Q_u s'exprime en $m^3s^{-1}m^{-1}$.

$$Q_u = K \times i \times e$$

avec :

K : coefficient de Darcy

i : gradient hydraulique

e : épaisseur de la nappe

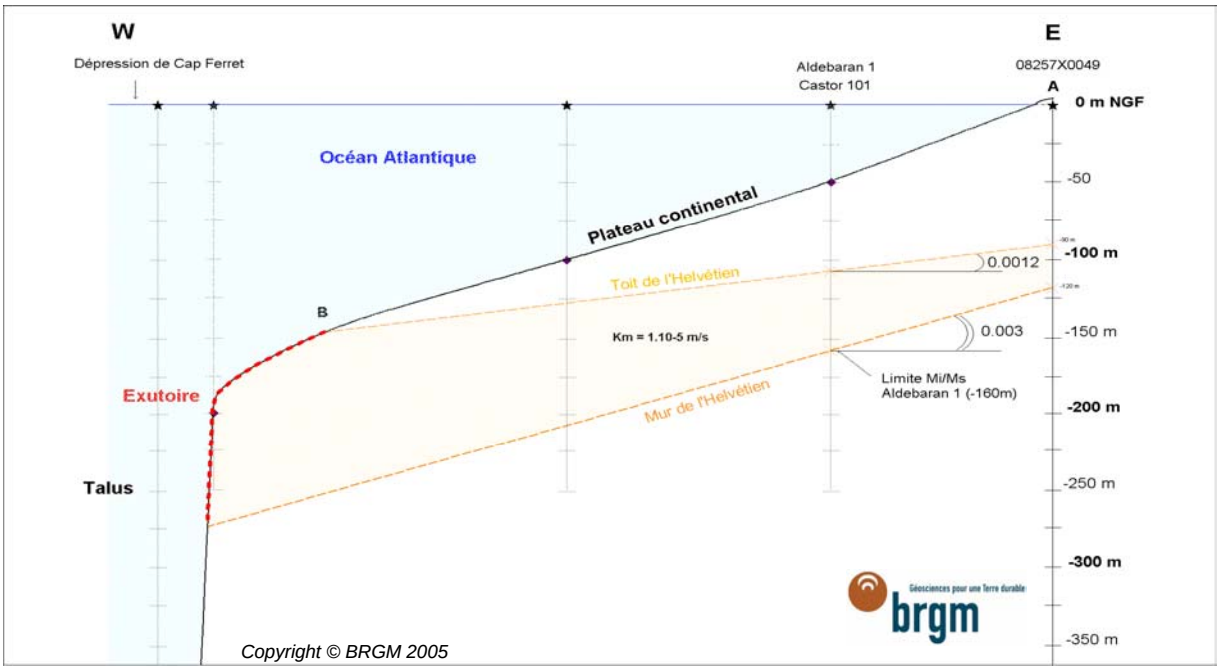


Illustration 57 : Coupe schématique est-ouest de l'aquifère helvétien à l'ouest du Bassin d'Arcachon

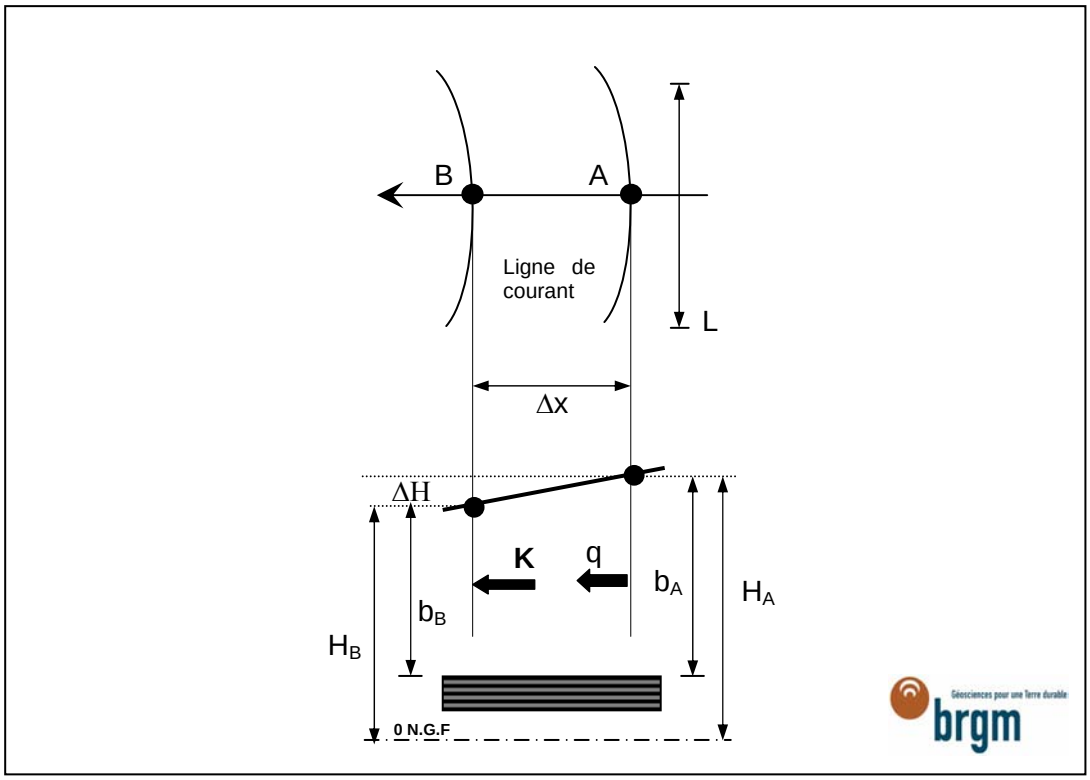


Illustration 58 : Schéma illustrant le calcul du débit de la nappe

Le forage d'indice national 08257X0049, de la Dune de l'Herbe (point A) situé sur la pointe du Cap Ferret capte l'Helvétien sur une hauteur de 30 m et présente un niveau piézométrique moyen de + 1,64 m NGF. A l'exutoire (point B), la nappe tend vers l'équilibre avec la mer. On a estimé qu'en ce point, la charge de la nappe helvétienne était de 0.

La distance qui sépare le forage d'indice 08257X0049 de l'exutoire supposé étant de 50 km et le coefficient de Darcy ayant été estimé, dans le secteur d'étude, à 1.10^{-5} ms^{-1} (Astié et Marionnaud, 1968), le débit unitaire de la nappe helvétienne a pu être estimé au point A, à :

$$\mathbf{Q_{uA} = 1.10^{-8}\ m^3 s^{-1} m^{-1}}$$

Remarque : L'épaisseur des formations helvétiennes augmentant d'est en ouest et le débit de la nappe étant supposé constant, on doit considérer que les valeurs de K_m et de T décroissent avec la distance à la côte, ce qui est couramment admis du fait de l'augmentation de la fraction marneuse des dépôts vers l'ouest.

Le modèle de Glover permet de calculer la position du biseau salé en tenant compte des flux d'eau douce qui constituent une force de répulsion vis à vis de l'intrusion d'eau salée. L'illustration 59 représente la forme du biseau salé pour un débit unitaire égal à celui calculé précédemment et pour des débits « extrêmes ».

Cette première approche analytique montre que l'extrémité du biseau salé se situerait à environ 25 km du littoral atlantique sous réserve que les hypothèses retenues concernant la géométrie et l'hydrodynamique de l'aquifère soient réalistes. On constate aussi qu'un débit 100 fois plus faible impliquerait un déplacement du biseau salé de 10 km vers le littoral. A l'inverse, un débit 100 fois plus important le repousserait quasiment au niveau de l'exutoire.

Cette méthode de calcul néglige toutefois les pertes de charge qui peuvent affecter le système, notamment si le toit de l'aquifère helvétien n'est pas un vrai imperméable.

Le modèle Nord-Aquitain mettant en évidence des phénomènes de drainance ascendante de l'Helvétien vers les aquifères plio-quaternaires sus-jacents dans les secteurs de la Leyre et du Bassin d'Arcachon, il est possible d'imaginer des phénomènes similaires plus vers l'ouest, au niveau du plateau continental.

Dans ces conditions, les pertes de charge liées aux mouvements ascendants pourraient favoriser la pénétration du biseau salé vers les terres.

Dans la mesure où l'ensemble de la réflexion a été menée en faisant un certain nombre d'hypothèses et d'approximations, il conviendra d'utiliser les résultats obtenus avec prudence. La validation pose de plus un souci supplémentaire dans le sens où la mise en œuvre de techniques géophysiques en domaine marin peut être plus compliquée que sur terre. La reconnaissance par forage des zones envahies par le biseau salé serait, quant à elle, très coûteuse.

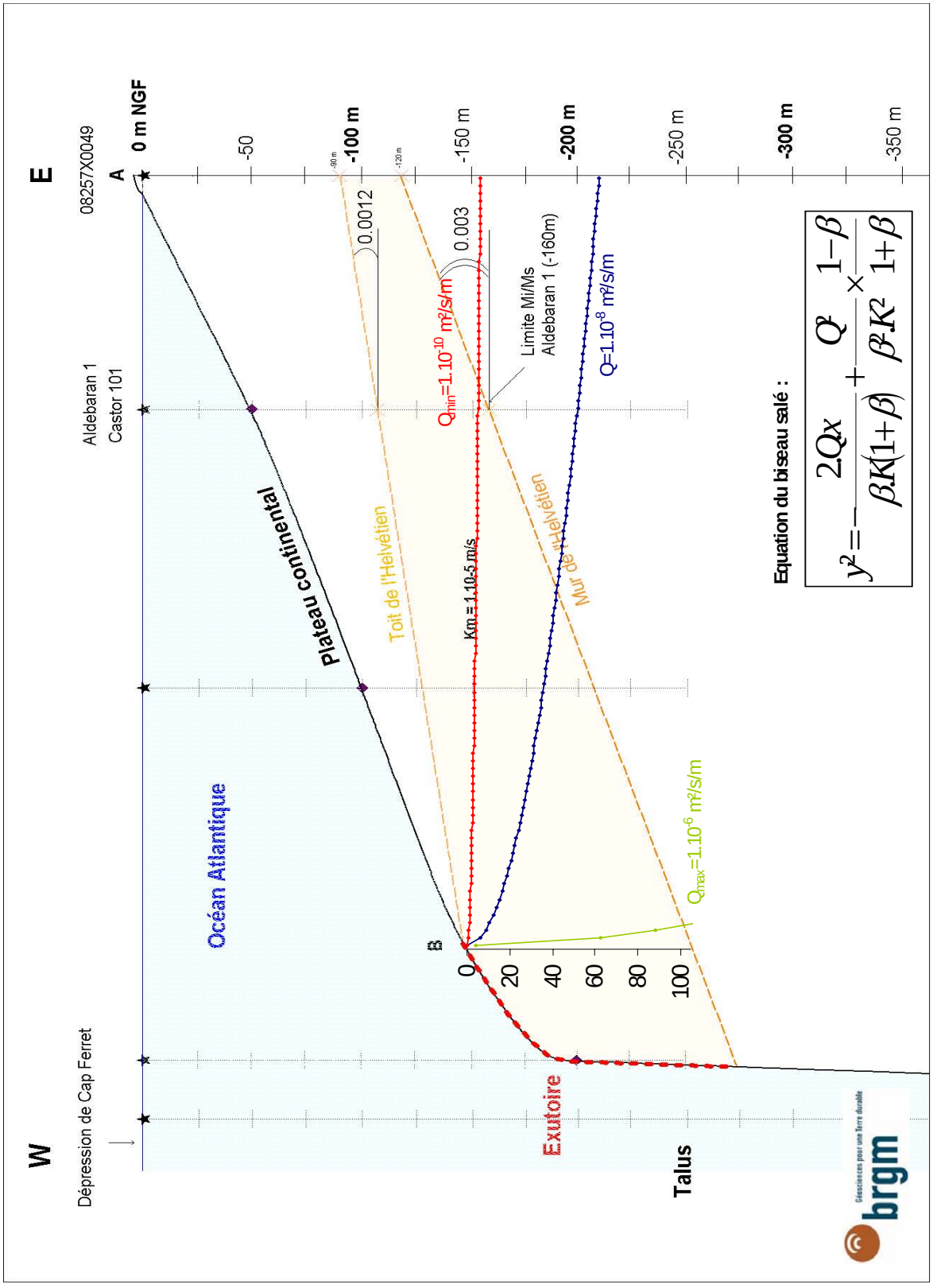


Illustration 59 : Coupe schématique est-ouest de l'aquifère helvétien (Miocène supérieur) à l'ouest du Bassin d'Arcachon et représentation des positions calculées du biseau salé

5.5. DESCRIPTION DE LA VULNERABILITE

Le tracé d'une carte de vulnérabilité vis à vis de phénomènes d'intrusion d'eaux salées dans l'aquifère de l'Helvétien ne présente pas de réel intérêt dans le sens où la carte correspondrait à une série de bandes parallèles à la côte avec une zone de plus faible vulnérabilité qui n'atteindrait pas le rivage.

Il est préférable de retenir qu'avec les hypothèses géométriques les plus défavorables, la position théorique de la pointe du biseau se situe à environ 25 km de la côte.

Les calculs montrent aussi que les eaux salées ne pénètreraient pas à l'aplomb des terres si le débit réel de la nappe était 100 fois inférieur à celui qui a été retenu. Il en va de même si le débit de la nappe venait à diminuer d'un facteur 100.

5.6. EVALUATION DU RISQUE

Les ouvrages qui captent l'aquifère de l'Helvétien et qui font l'objet d'un suivi chimique régulier ne sont pas nombreux sur la zone d'étude.

Les 2 ouvrages pour lesquels on dispose de 16 analyses au total se situent sur la commune de la Teste-de-Buch et sont inventoriés en BSS avec les indices nationaux 08498X0053 et 08498X0001 (cf. illustration 63).

Les eaux qu'ils captent sont faiblement minéralisées (conductivités de l'ordre de 230 µS/cm) et présentent des teneurs en chlorures et en sodium inférieures à 25 mg/l.

Bien que non représentative de l'ensemble de la zone d'étude, cette observation semble confirmer que l'aquifère de l'Helvétien n'est pas sujet à des phénomènes d'intrusion marine à l'aplomb du Bassin d'Arcachon.

Dans ces conditions, aucune carte de risque n'a été tracée.

5.7. DESCRIPTION DES POINTS DE MESURE ET DES USAGES

L'inventaire des points de prélèvement et des autres points de mesure a été réalisé sur le secteur défini en 5.1 qui englobe 12 communes et présente une superficie de 918 km^2.

Il est à préciser que les points de prélèvement retenus et les volumes associés correspondent exclusivement à des ouvrages dont les niveaux captés ont été validés.

Ces points ont fait l'objet d'une cartographie par aquifère et en fonction de leur usage dans l'annexe 1. Leurs caractéristiques ainsi que les prélèvements dont ils ont fait l'objet sur la période 2000-2004 sont précisés dans l'annexe 2.

Dans le cas des ouvrages captant plusieurs aquifères, un volume correspondant au volume global divisé par le nombre de nappes captées a été affecté à chaque unité.

Les autres points de mesure correspondent :

- pour l'aspect quantité, aux forages suivis dans le cadre de la « Surveillance et la Gestion des nappes d'eaux souterraines en Gironde » (points appartenant au réseau départemental ou patrimonial suivis de façon continue ou mensuelle ou trimestrielle + points suivis de façon annuelle, Winckel *et al.,* 2005) (cf. liste des points en annexe 3)

- pour l'aspect qualité, aux forages suivis dans le cadre du contrôle sanitaire (analyses réalisées sur eaux brutes) et aux forages suivis dans le cadre de la « Surveillance et la Gestion des eaux souterraines en Gironde (points appartenant aux réseaux patrimonial et départemental) (cf. liste des points en annexe 4)

5.7.1. Prélèvements

92 points de prélèvement ont été recensés sur la zone décrite précédemment.

La répartition de ces points entre les différents aquifères est représentée sur l'illustration 61. Il apparaît qu'en terme de nombre de points de points de prélèvement, l'Oligocène est l'aquifère le plus sollicité avec un total de 47 ouvrages. L'Helvétien qui a été identifié comme le seul aquifère profond pouvant être affecté par une intrusion saline arrive en deuxième position avec un total de 18 ouvrages.

En terme de volumes, les prélèvements effectués sur la période 2000-2004 dans l'aquifère helvétien (911000 m^3) ne représentent que 1,6 % du total des volumes pompés. Ils sont négligeables par rapport aux volumes prélevés dans les niveaux éocènes (25 millions de m^3) et oligocènes (23 millions de m^3) qui représentent respectivement 45,1 et 41,5 % des prélèvements totaux (cf. illustrations 60 et 61).

Ces derniers s'élèvent à 55 millions de m^3 sur la période 2000-2004 et permettent de calculer une valeur moyenne annuelle de **11 millions de m^3**. Dans le détail, il apparaît que ces prélèvements ont augmenté entre 2000 et 2001 et entre 2002 et 2003 et baissé entre 2001 et 2002 et entre 2003 et 2004 (cf. illustration 60).

L'évolution des prélèvements en fonction de l'aquifère est représentée sur l'illustration 61. A l'exception des prélèvements effectués dans l'aquifère jurassique qui ont enregistré une baisse de plus de 50%, aucune autre tendance significative globale ne peut être notée.

En terme d'usage, les volumes prélevés pour l'AEP représentent plus de 80 % des volumes totaux prélevés, ceux prélevés pour l'industrie, une dizaine de pourcents (cf. illustration 61). Les autres usages restent marginaux à l'échelle de la zone d'étude qui comporte toutefois quelques points de prélèvement spécifiques comme les forages à l'Oligocène et à l'Eocène de la société des Abatilles dont les eaux sont embouteillées (450000 m^3 prélevés sur la période 2000-2004).

	Helvétien	Aquitanien	Oligocène	EOS+EOM	Crétacé	Jurassique	Total
2000	167253.5	16267.5	4164270.68	4759517.32	753756	515668	10376733
2001	159790	450	4630884.3	5053197.5	923583.2	453738	11221643
2002	168038	373	4622995.42	5045487.38	1041234.2	318830	11196958
2003	187728	4293	5136024.02	4916049.38	1014583.6	298106	11556784
2004	228004	31396	4601135.42	5401126.58	954942	204361	11420965
Total 5 ans	910813.5	52779.5	23155309.84	25175378.16	4688099	1790703	55773083
Pourcentage	1.63%	0.09%	41.52%	45.14%	8.41%	3.21%	100.00%

Illustration 60 : Bilan volumique sur la zone « Arcachon »

5.7.2. Autres points de mesure

Piézométrie

L'illustration 62 permet de visualiser la localisation des points suivis annuellement et des points suivis plus régulièrement sur la zone « Arcachon ».

Il apparaît que la plupart des points suivis régulièrement sont implantés dans les aquifères du Plio-Quaternaire ou de l'Oligocène (cf. illustration 62).

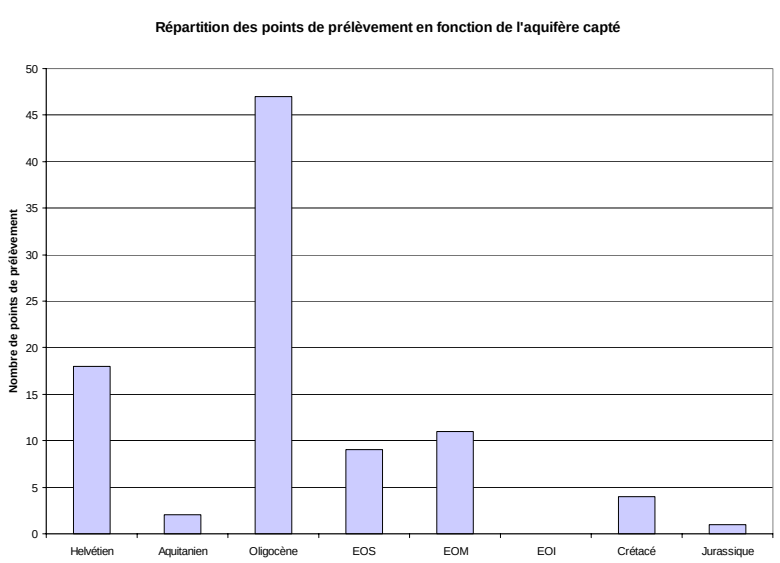
Il convient de noter qu'aucun de ces points n'est implanté dans le Miocène, seul aquifère profond ayant été identifié à risques vis à vis des intrusions d'eaux marines.

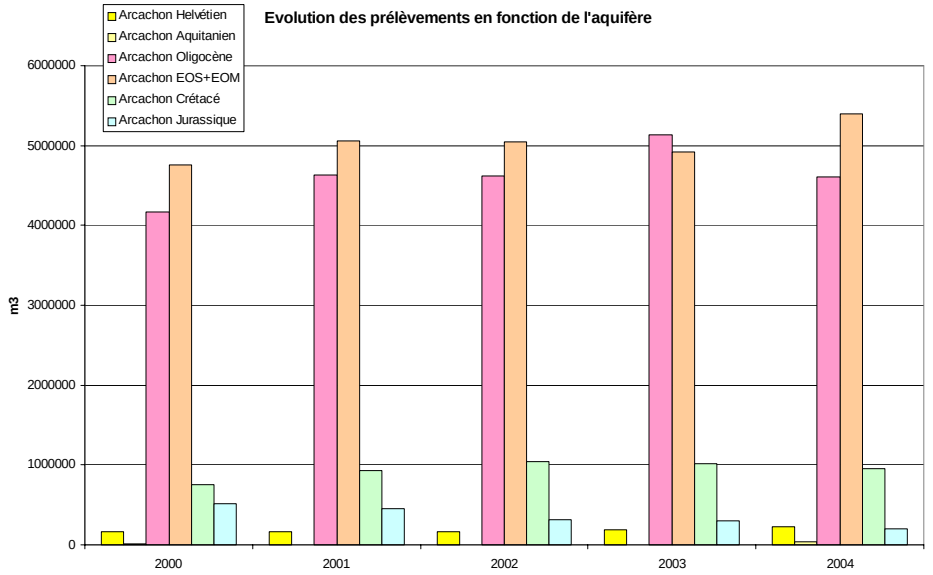
Qualité

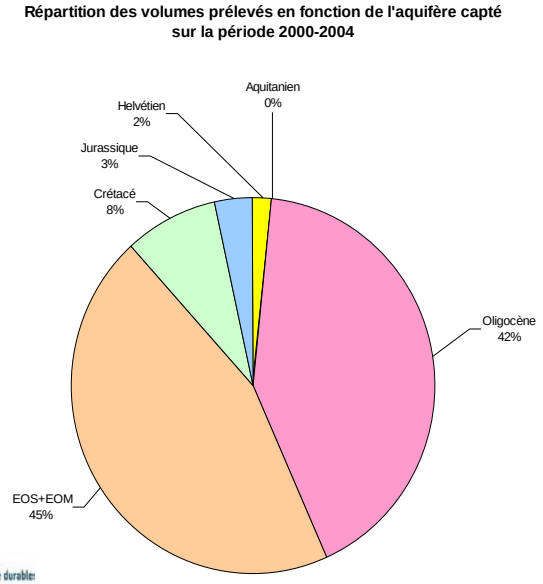
L'illustration 63 permet de visualiser la localisation des points faisant l'objet d'analyses chimiques régulières sur la zone « Arcachon ».

Les fréquences d'analyses sont précisées dans les tableaux de l'annexe 4 pour les points du réseau de la « Surveillancet et la Gestion des eaux souterraines en Gironde ».

La fréquence d'analyse des captages AEP varie, quant à elle, en fonction du volume prélevé mais aussi parfois en fonction des molécules recherchées. A titre d'indication, les volumes prélevés en 2004 ont été mentionnés dans le tableau relatif au réseau sanitaire en annexe 4.







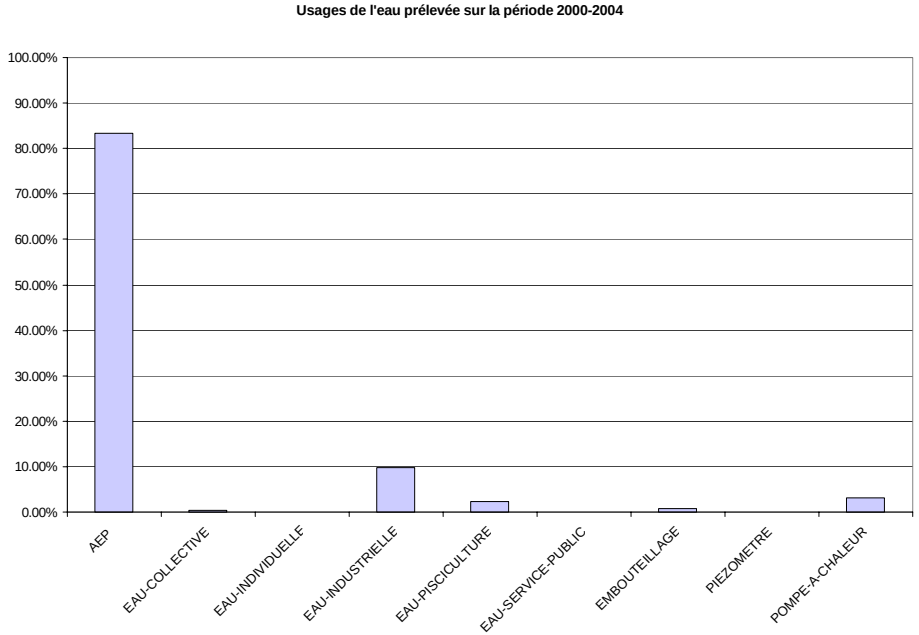
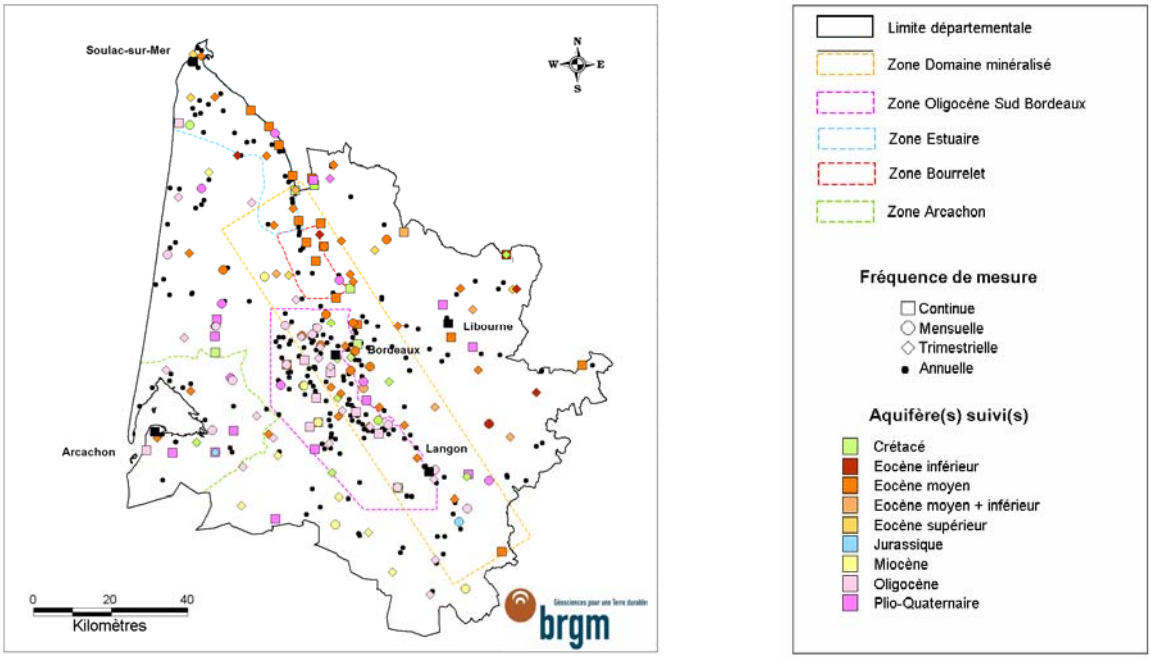


Illustration 61 : Synthèse des données concernant les prélèvements effectués sur la zone « Arcachon »



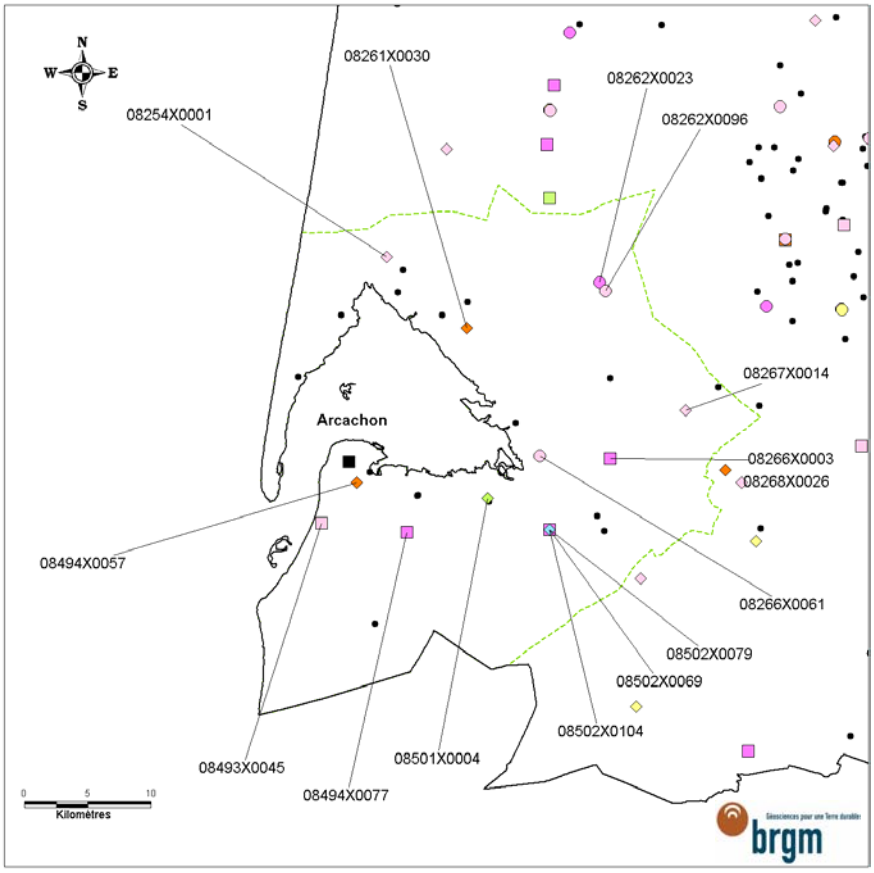


Illustration 62 : Localisation des points de mesure des niveaux piézométriques sur la zone « Arcachon »

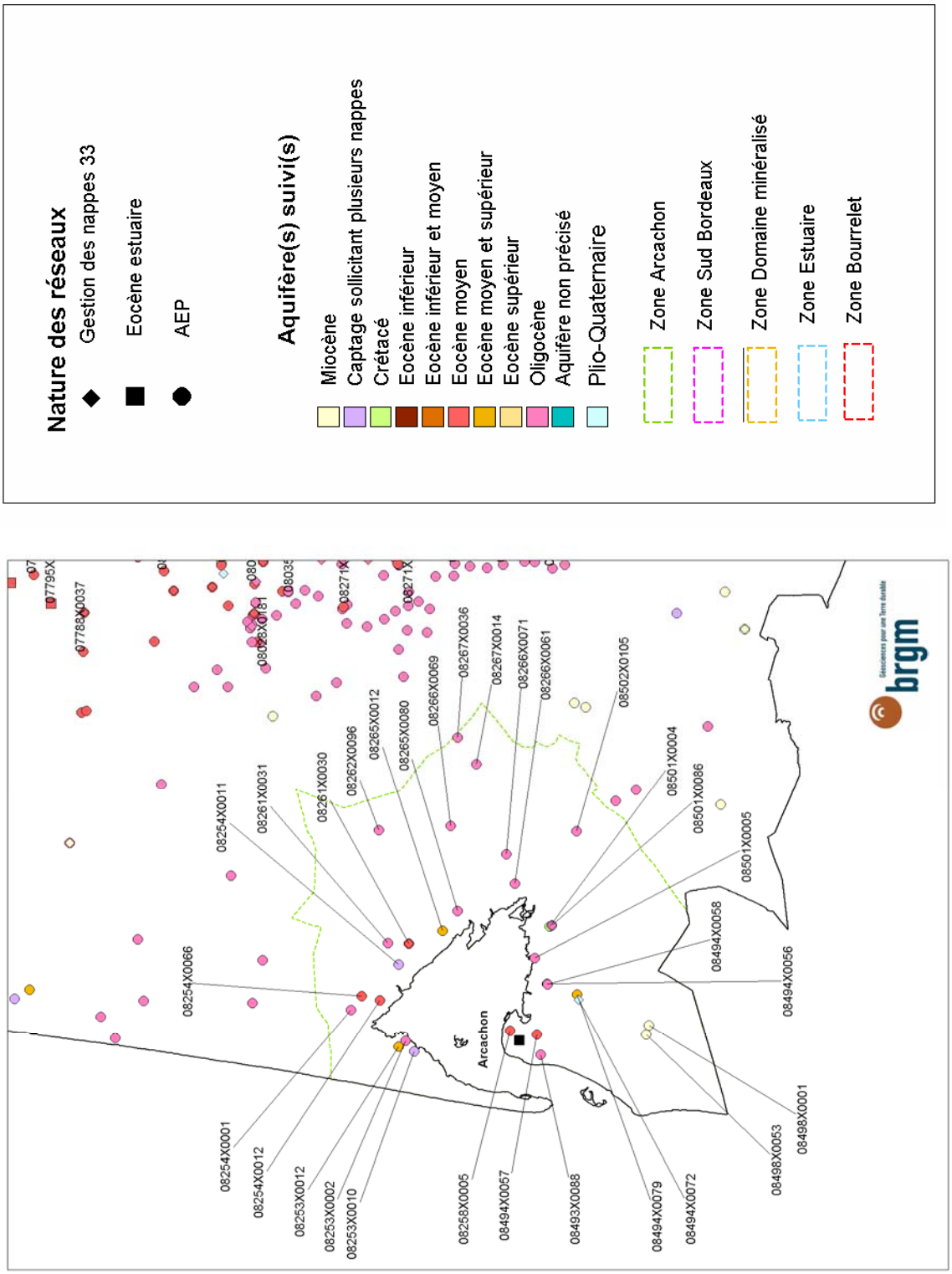


Illustration 63 : Localisation des points de mesure de la qualité sur la zone « Arcachon »

5.8. BILAN ET PERSPECTIVES

Compte tenu des informations géologiques disponibles, il est apparu que, parmi les aquifères profonds, seul celui de l'Helvétien était susceptible d'être contaminé par l'intrusion d'un biseau salé.

Le calcul de la position théorique de l'interface entre eau douce et eau salée a montré que l'extrémité du biseau devait se trouver à environ 25 km de la côte.

Dans des conditions plus pessimistes (débit de la nappe diminué d'un facteur 100), le biseau se trouverait encore à une quinzaine de kilomètres de la côte et ne concernerait donc pas les formations de l'Helvétien situées à l'aplomb du Bassin d'Arcachon.

L'absence de contamination observée sur 2 captages AEP de la Teste-de-Buch constitue un argument supplémentaire en la faveur d'une intrusion qui ne prendrait en compte que la partie « marine » de l'aquifère helvétien.

Les résultats ayant été obtenus en faisant un grand nombre d'hypothèses difficiles à valider, il conviendra de les utiliser avec prudence.

6. Zone de l'Oligocène bordelais

6.1. PROBLEMATIQUE ET LIMITES DE LA ZONE D'ETUDE

La problématique consiste à étudier les risques de dénoyage de l'aquifère oligocène induit par la baisse des niveaux piézométriques au sud de l'agglomération bordelaise et ses conséquences éventuelles.

La zone d'étude correspond à la rive gauche de la Garonne entre le nord de Bordeaux et Langon (cf. illustration 64).

6.2. DESCRIPTION GEOLOGIQUE

L'Oligocène est subdivisé en deux sous-étages : le **Rupélien** pour le niveau inférieur et le **Chattien** pour le supérieur.

L'illustration 65 montre la superposition des formations oligocènes et miocènes dans la région bordelaise. Tous les termes composant la série lithostratigraphique y ont été représentés mais l'érosion et les périodes de non-dépôt peuvent être à l'origine de lacunes dans certaines zones. Les 3 horizons distingués couramment dans l'Oligocène sont décrits dans les paragraphes suivants.

6.2.1. L'Oligocène inférieur basal (Rupélien basal)

La base des terrains oligocènes est constituée par la partie supérieure de la **Formation des Molasses du Fronsadais** (cf. illustration 65). Cette formation, d'origine fluviatile et palustre, est essentiellement composée d'assises argilo-carbonatées dans sa partie inférieure et de niveaux gréso-sableux dans sa partie supérieure. Elle présente une épaisseur de 30 à 40 mètres.

Les Molasses du Fronsadais sont surmontées par la **Formation de Castillon** qui est formée de calcaires micritiques gris rosé, alternant avec des marnes vertes et des niveaux argileux à nodules de calcaire, déposés en environnement lacustre. Son épaisseur est faible (environ 1 à 5 m) car elle a été érodée par la transgression marine du Rupélien.

6.2.2. L'Oligocène inférieur (Rupélien)

La **Formation du Calcaire à Astéries** s'est ensuite déposée (cf. illustration 65). Elle est constituée de trois membres, correspondant à deux phases de transgressions marines séparées par une phase régressive (Cassoudebat *et al.,* 1972; Pratviel *et al.,* 1972; Gayet, 1985 ; Platel, 2000).

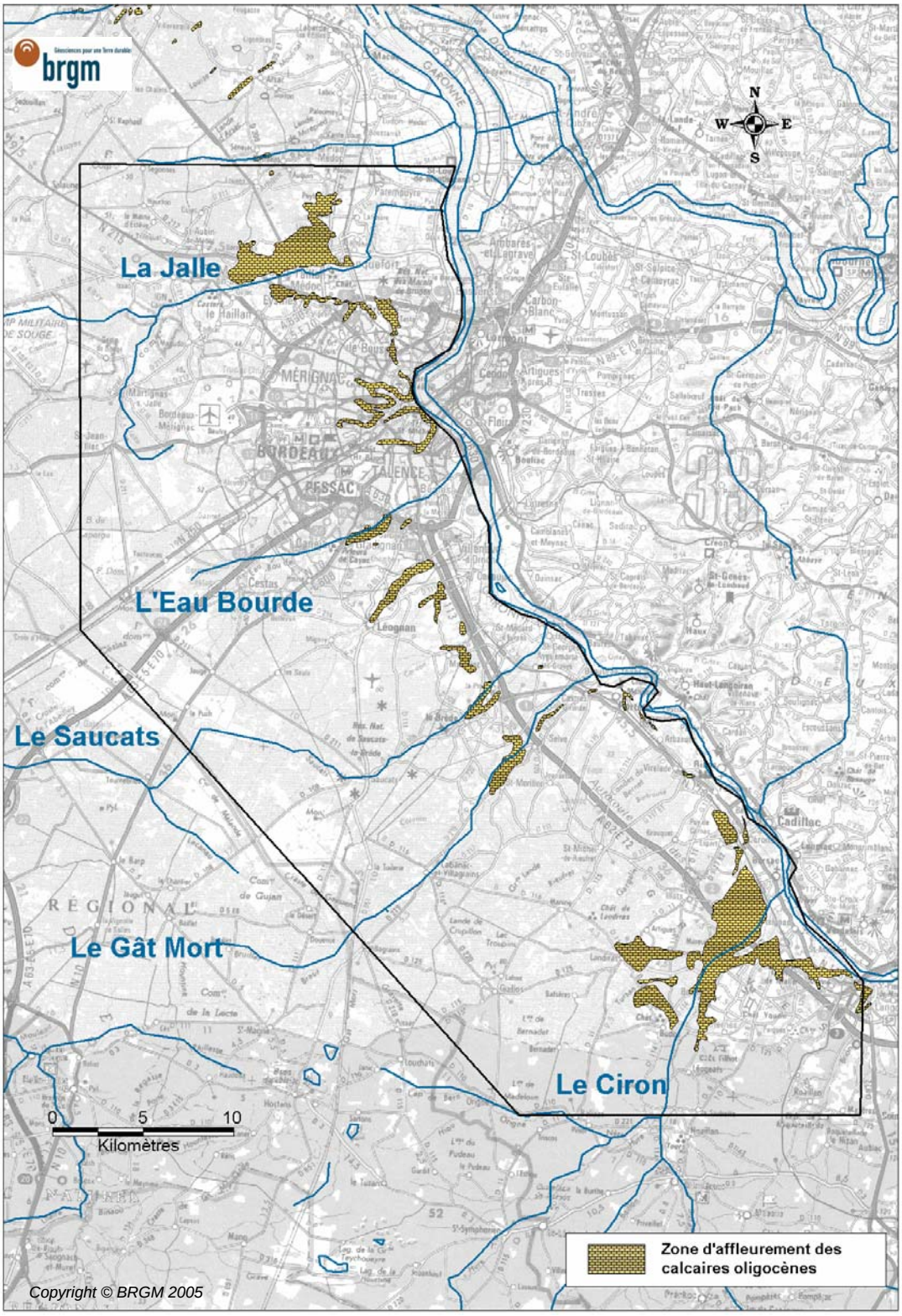
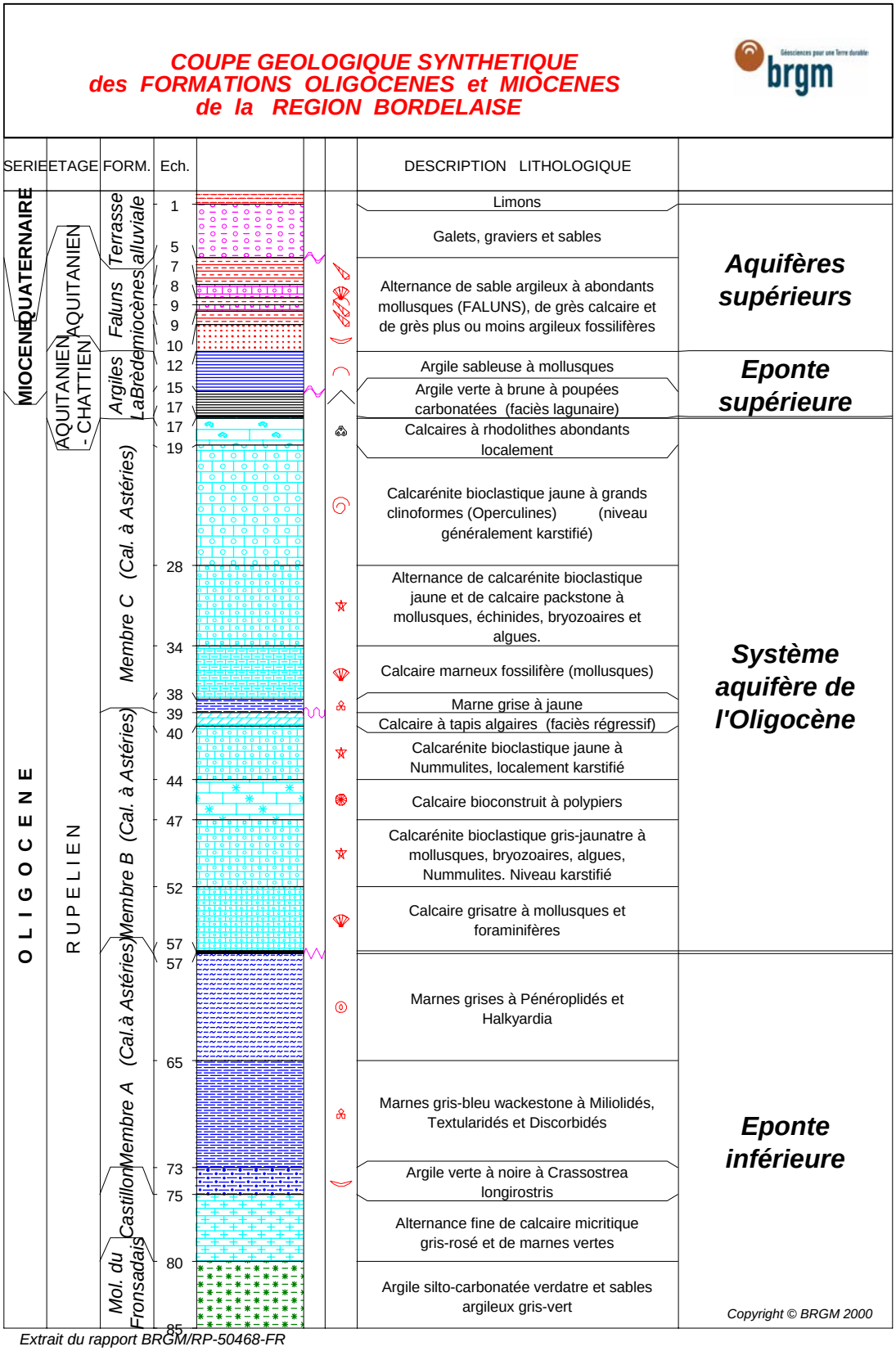


Illustration 64 : Localisation du secteur d'étude



Extrait du rapport BRGM/RP-50468-FR

Illustration 65 : Coupe lithostratigraphique synthétique de l'Oligocène et de ses terrains de recouvrement dans la région bordelaise (d'après Platel et al., 2000)

Membre A : il correspond à **l'éponte inférieure** de l'aquifère oligocène. C'est une assise de calcaires marneux fins, de teinte grise à gris-bleu, riches en foraminifères, qui s'est déposée dans des paléo-environnements de baie protégée ou de zones lagunaires (= ex *Sannoisien* des auteurs). Localement, cette assise peut débuter par un mince niveau d'argiles vertes à noires à *Crassostrea longirostris* (Gayet, 1985 ; Alvinerie *et al.,* 1977).

Vers l'ouest du secteur d'étude, ce membre est représenté par des marnes grises à pénéroplidés et *Halkyardia*, déposées en environnement de plate-forme proximale à moyenne et aussi appelées "Calcaires à *Archiacines*" par certains auteurs.

Membre B : l'assise médiane du Rupélien carbonaté est liée à une transgression plus affirmée que la précédente pendant laquelle se sont déposés, sur une vingtaine de mètres, des calcaires de type grainstone, bioclastiques, gris à jaunes (ou *calcarénites*) dont les éléments clastiques sont principalement des foraminifères, des bryozoaires, des polypiers, des algues et des mollusques (Alvinerie, *et al.,* 1977). Les faciès diffèrent toutefois en fonction des aires de sédimentation (cf. illustration 66).

La fin de la grande séquence A-B du Rupélien correspond à des assises massives de calcaires bioclastiques jaunes à nummulites à stratifications obliques qui progradent en direction de l'ouest. L'épisode régressif, qui termine le membre médian du Rupélien, se caractérise localement par un calcaire peu épais à tapis algaires.

Membre C : la base de ce membre est représentée par quelques mètres de marnes et de calcaire marneux. L'assise supérieure est surtout constituée par des calcaires grainstones bioclastiques gris blanc parfois jaunâtres, très fossilifères comprenant de nombreux débris d'échinodermes, de lamellibranches, de foraminifères et de bryozoaires. Ces calcaires massifs à stratifications obliques, qui représentent les couches progradantes déposées pendant le haut niveau marin, sont organisés en grands clinoformes. Au sommet du membre, des calcaires à rhodolites abondants se sont localement déposés.

6.2.3. L'Oligocène supérieur (Chattien) et le Miocène inférieur (Aquitanien basal)

L'**éponte supérieure** de l'aquifère oligocène est constituée par les assises imperméables du Chattien et de l'Aquitanien (cf. illustration 65).

Chattien : ce niveau est constitué de marnes et d'argiles (*Marnes de Sainte-Christine* ou *Argiles de La Brède* selon les auteurs) qui témoignent de la très importante régression marine connue au début du Chattien (baisse du niveau de l'océan mondial de 150 m environ). Leur épaisseur ne dépasse toutefois pas 5 mètres.

Le caractère lagunaire des dépôts est très marqué avec des faciès d'argiles vertes à nodules carbonatées (poupées) et de fréquentes marmorisations pédogénétiques ocres mais cet horizon est souvent absent dans les forages profonds ou à l'affleurement, du fait de l'érosion liée à la transgression miocène ou de la mise en place des terrasses alluviales de la Garonne.

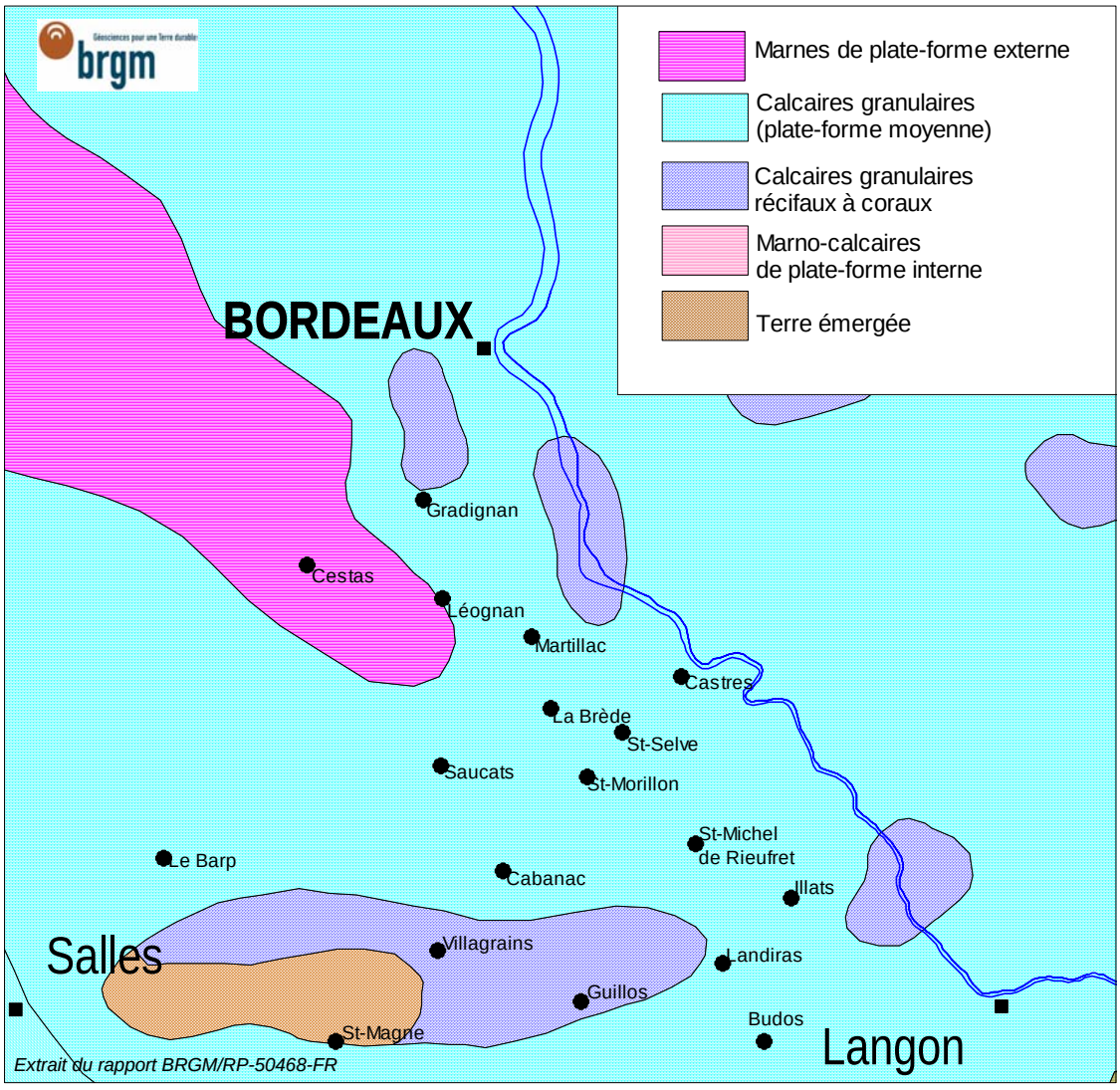


Illustration 66 : Faciès du membre B de l'Oligocène (d'après Gayet, 1985 et Platel et al., 2000)

Aquitanien basal : les argiles sableuses bleu verdâtre à mollusques qui représentent les faciès de la première transgression miocène, constituent la partie supérieure de l'éponte des réservoirs oligocènes. Elles n'existent cependant pas partout. Dans ce cas, l'éponte du réservoir est uniquement constituée par les argiles et les marnes du Chattien.

6.2.4. Evolution structurale du secteur

Depuis la fin des temps paléozoïques, le département de la Gironde n'a jamais été soumis à une forte activité tectonique. Seules de grandes failles compartimentent la zone située au sud-ouest de la Garonne et les terrains sédimentaires cénozoïques ne sont affectés que par quelques structures à grand rayon de courbure.

Les coupes 4, 5 et 7 de l'illustration 67 permettent de visualiser l'agencement des terrains dans le secteur d'étude et certaines de ces failles.

Failles

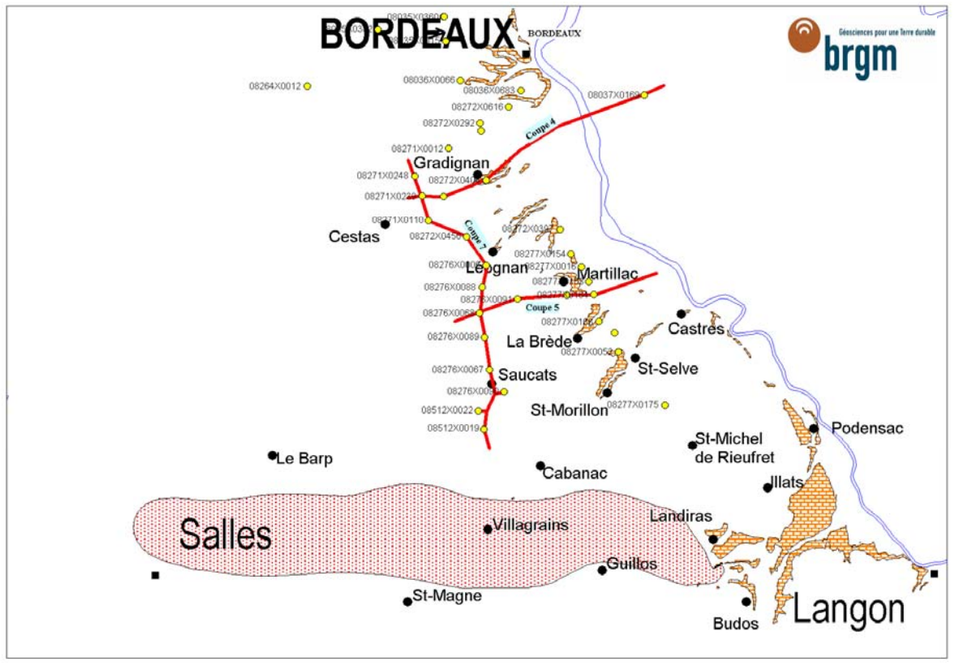
La ***faille de Bordeaux*** constitue le principal accident du secteur d'étude (cf. coupe 4 de l'illustration 67). Elle a été mise en évidence par les différences de cote des formations observées sous l'agglomération bordelaise.

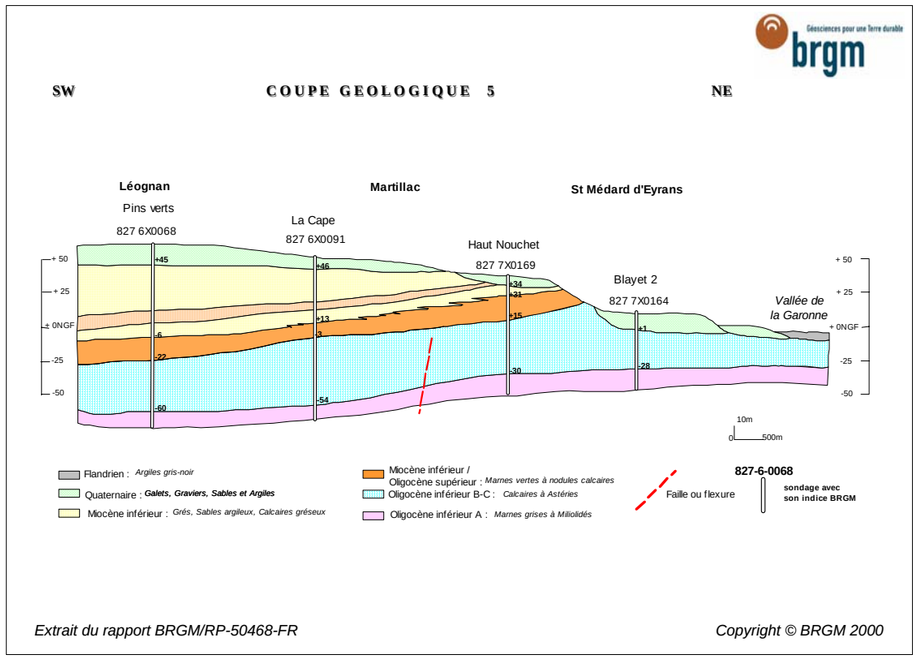
Son rejet au toit du Crétacé serait de 100 m au minimum (Platel, 1987). Son tracé passe le long de la vallée de la Garonne entre Langon et Bordeaux, puis s'infléchit vers le nord-ouest en direction de Sainte-Hélène-Brach. Cette grande faille normale a principalement joué en distension au Crétacé inférieur puis en compression à tendance décrochante à certaines périodes du Crétacé supérieur et durant l'Eocène.

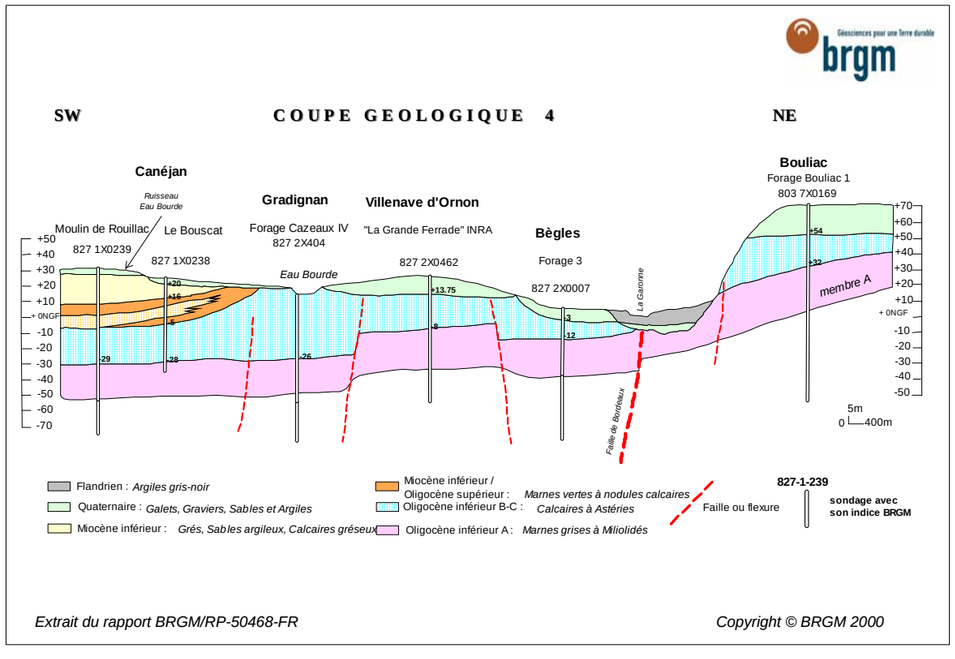
La faille étant ensuite de moins en moins active, la sédimentation n'a fait qu'en atténuer ses effets. Ainsi à l'Oligocène, la faille ne correspond qu'à une flexure à jeu syn-sédimentaire. Des différences d'altitude au niveau de formations synchrones entre le plateau de Bouliac et la ville de Bordeaux attestent par contre de rejeux miocènes.

Dans le bloc effondré situé au sud-ouest de la faille, il existe un réseau de failles subparallèles qui se présentent sous forme de faisceau et qui attestent d'un jeu décrochant (Platel, 1987). Elles délimitent des lanières constituées de horsts et de grabens à raccords obliques avec la faille majeure de Bordeaux.

Les zones basses se situent dans les secteurs de Bordeaux et de Beautiran-Léognan-Canéjan-Saint-Jean-d'Illac alors que les secteurs de Villenave-d'Ornon-Pessac-Mérignac et de Gradignan-Martignas correspondent à des zones hautes.







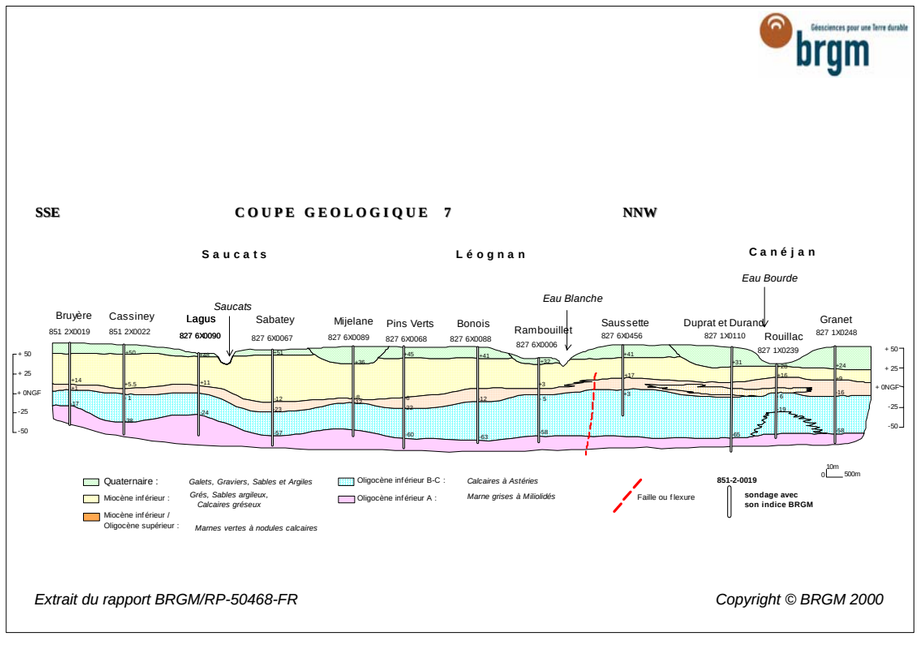


Illustration 67 : Coupes des terrains oligocènes et miocènes au Sud de Bordeaux (d'après Platel et al., 2000)

Anticlinaux

Le grand **anticlinal de Villagrains-Landiras** d'orientation ouest-est se situe au sud du secteur étudié (cf. illustrations 66 et 67). Il s'agit d'une structure majeure mais qui reste quasiment invisible sur le terrain.

Long d'une quinzaine de kilomètres, l'anticlinal est recoupé par des failles et apparaît très bien dans la morphologie du toit du Crétacé qui présente des pendages opposés importants.

Le cœur de la structure est constitué par des calcaires marneux du Campanien supérieur affleurant de façon très discrète dans le lit du Gat-Mort à Villagrains, et par les calcaires karstifiés du Maastrichtien supérieur qui affleurent dans le lit du ruisseau du Tursan (affluent du Ciron) à Landiras, près de Budos.

L'***anticlinal de Blaye-Listrac*** se trouve, quant à lui, au nord du secteur d'étude. Cette structure, assez peu visible à l'affleurement, s'allonge sur une vingtaine de kilomètres selon un axe ENE-WSW et se remarque très bien dans la morphologie du toit et du mur du Crétacé. Le cœur de la structure est constitué par des calcaires datant de l'Eocène moyen (falaise de la Citadelle de Blaye et carrière de Peyrelebade près de Listrac).

Ces deux anticlinaux datent de la phase orogénique pyrénéenne (fin de l'Eocène moyen) mais ont été affectés par des soulèvements postérieurs au cours ou à la fin de l'Oligocène avec non dépôts ou érosion des membres B et C, attestés entre autres par le sondage de Sivaillan à Moulis.

6.3. DESCRIPTION HYDROGEOLOGIQUE

6.3.1. Identification des réservoirs

Seuls les membres médian (Membre B) et supérieur (Membre C) de la **Formation des Calcaires à Astéries** du Rupélien carbonaté peuvent être considérés comme des réservoirs.

Ces calcaires affleurent en de nombreux endroits, en particulier en bordure de la Garonne et dans le lit de ses affluents où l'aquifère est libre (cf. illustrations 64 et 68). Du nord de Bordeaux jusqu'à Langon, ils constituent le substratum des terrasses anciennes de la Garonne avec lesquelles ils sont en connexion hydraulique (cf. illustration 68).

Plus à l'ouest, l'aquifère devient progressivement captif et plus épais. Il est alors compris entre les marnes du membre A (éponte inférieure) et les marnes ou les argiles de l'Oligocène supérieur (Chattien) qui constituent la base de l'éponte supérieure (cf. illustration 68).

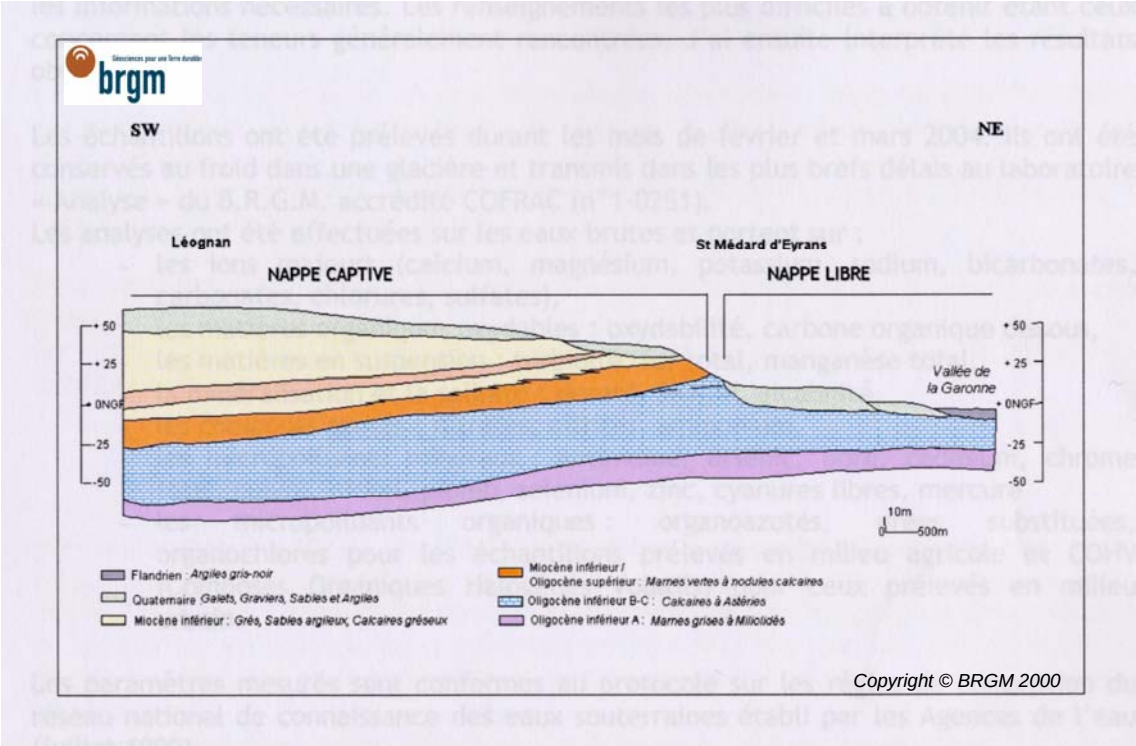


Illustration 68 : Nature de l'aquifère oligocène en fonction de la distance à la Garonne (d'après Platel et al., 2000, modifié)

6.3.2. Description détaillée de l'aquifère

Caractéristiques géométriques

L'illustration 69 qui représente la cartographie du toit, du mur et de l'épaisseur de l'aquifère oligocène à l'échelle des départements de la Gironde et des Landes et dont les schémas ont été établis avec les données du modèle nord-aquitain (version MONA V3.1-2003) (Pédron *et al.,* 2005), permet de visualiser le plongement de l'aquifère oligocène en direction du sud-ouest et les variations importantes de l'épaisseur qui atteint son maximum dans le bassin de Parentis.

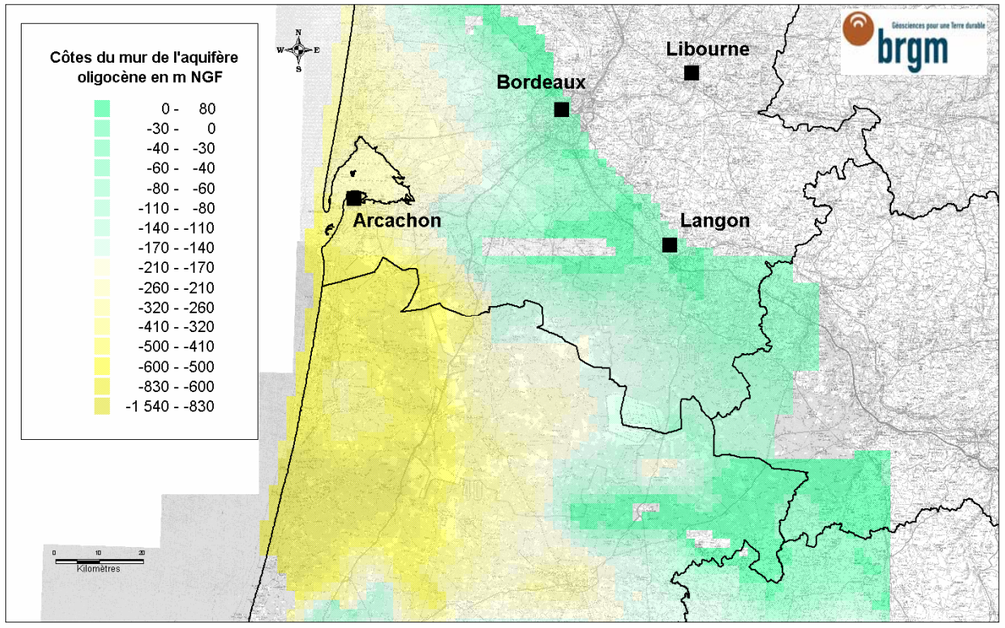
Le modèle géométrique établi en 2000 avec le logiciel GDM et intégrant plus de 400 coupes de forage a permis de mieux caractériser la géométrie de l'aquifère (Platel *et al.,* 2000 ; illustration 70).

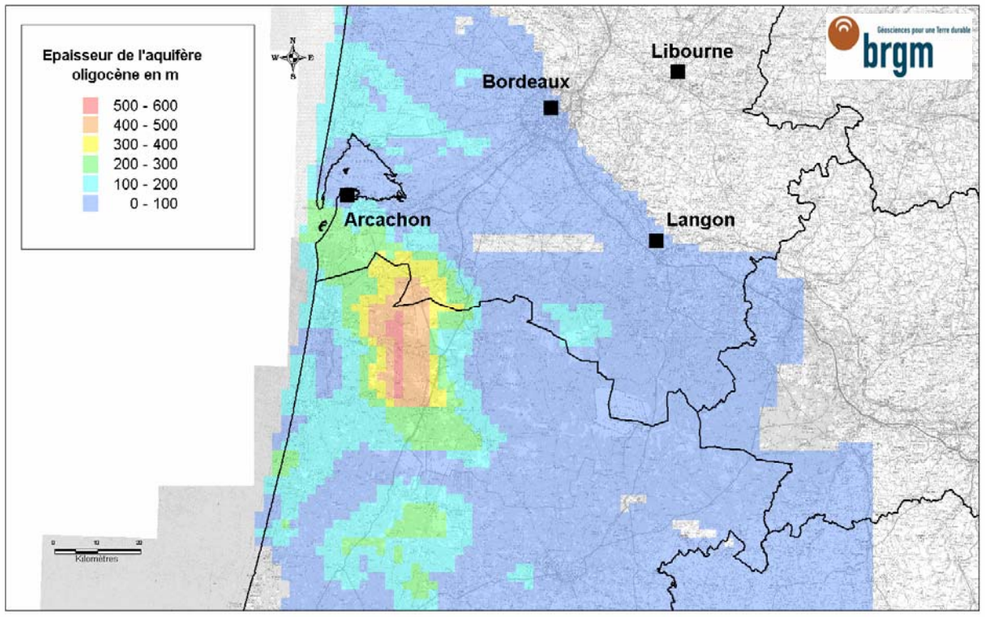
La carte de l'altitude du toit permet de distinguer plusieurs zones :

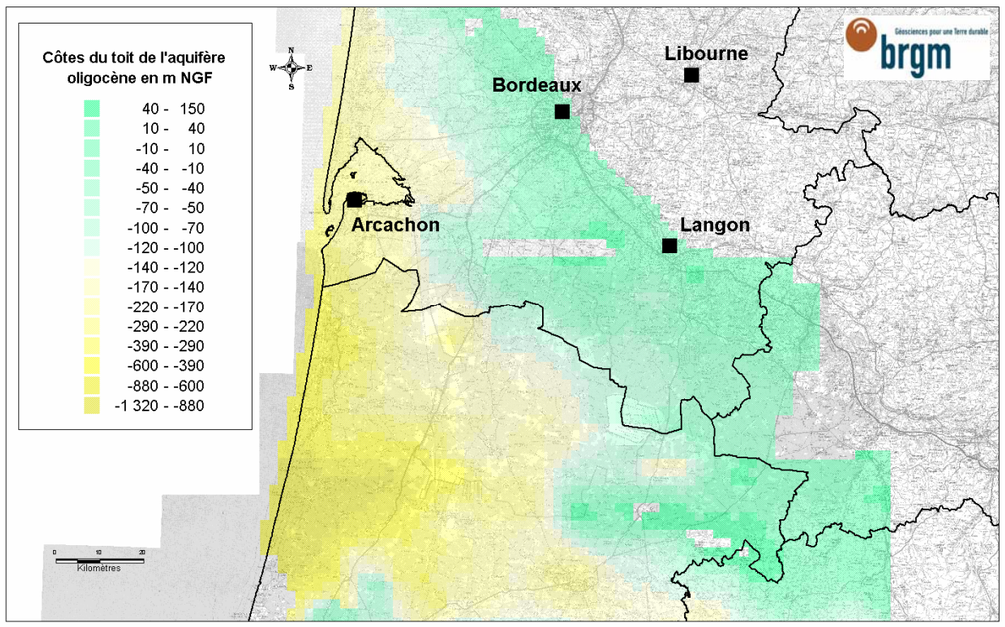
- des zones de faibles altitudes au droit de la vallée de la Garonne,

- des zones d'altitudes plus élevées entre les vallées de ses affluents,

- une zone d'approfondissement vers l'ouest où les calcaires de l'Oligocène se retrouvent sous les formations miocènes et quaternaires.







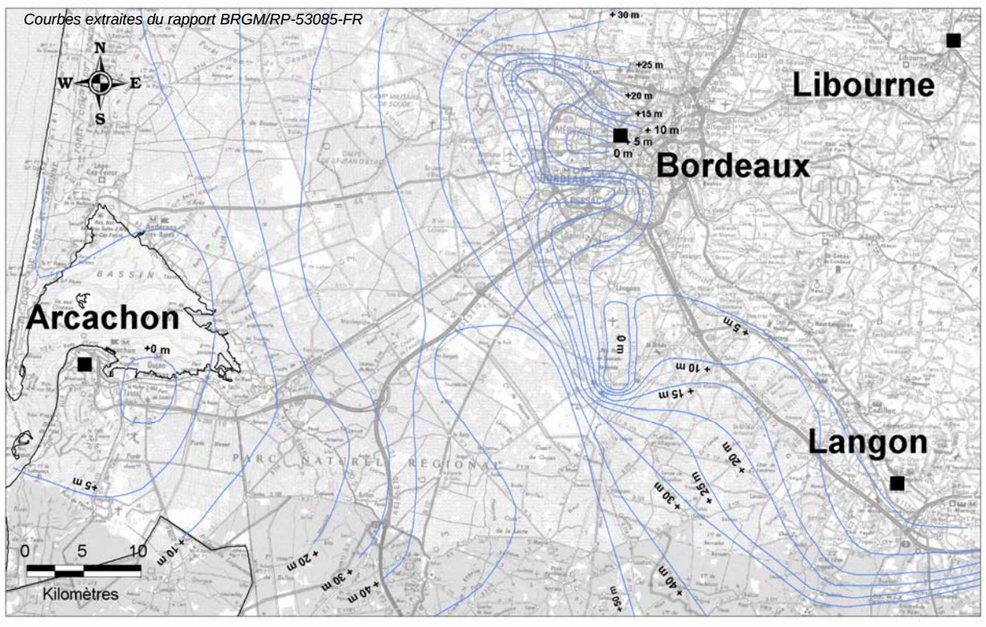
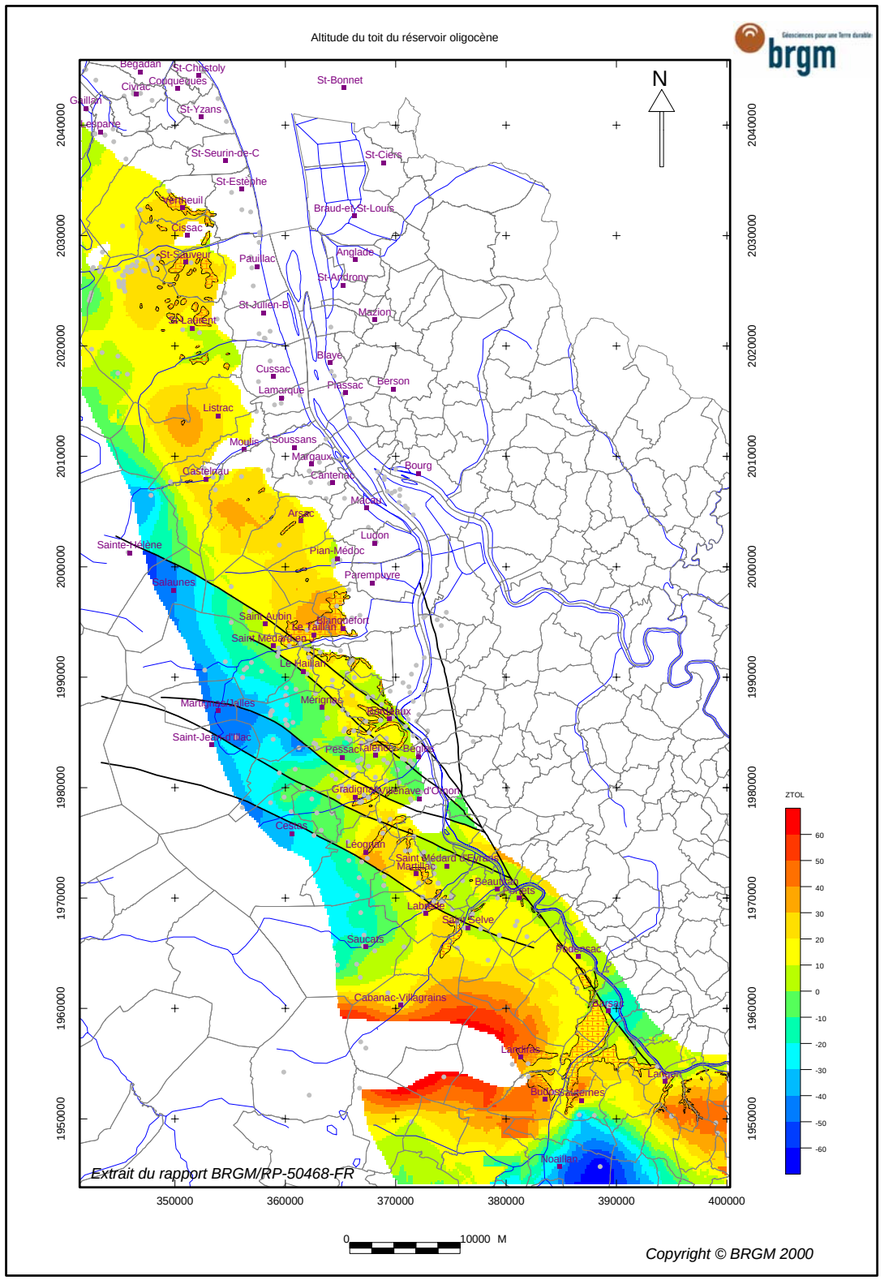


Illustration 69 : Caractéristiques géométriques et piézométrie 2003 de l'aquifère de l'Oligocène (d'après Pédron et al., 2005 et Winckel et al., 2005)



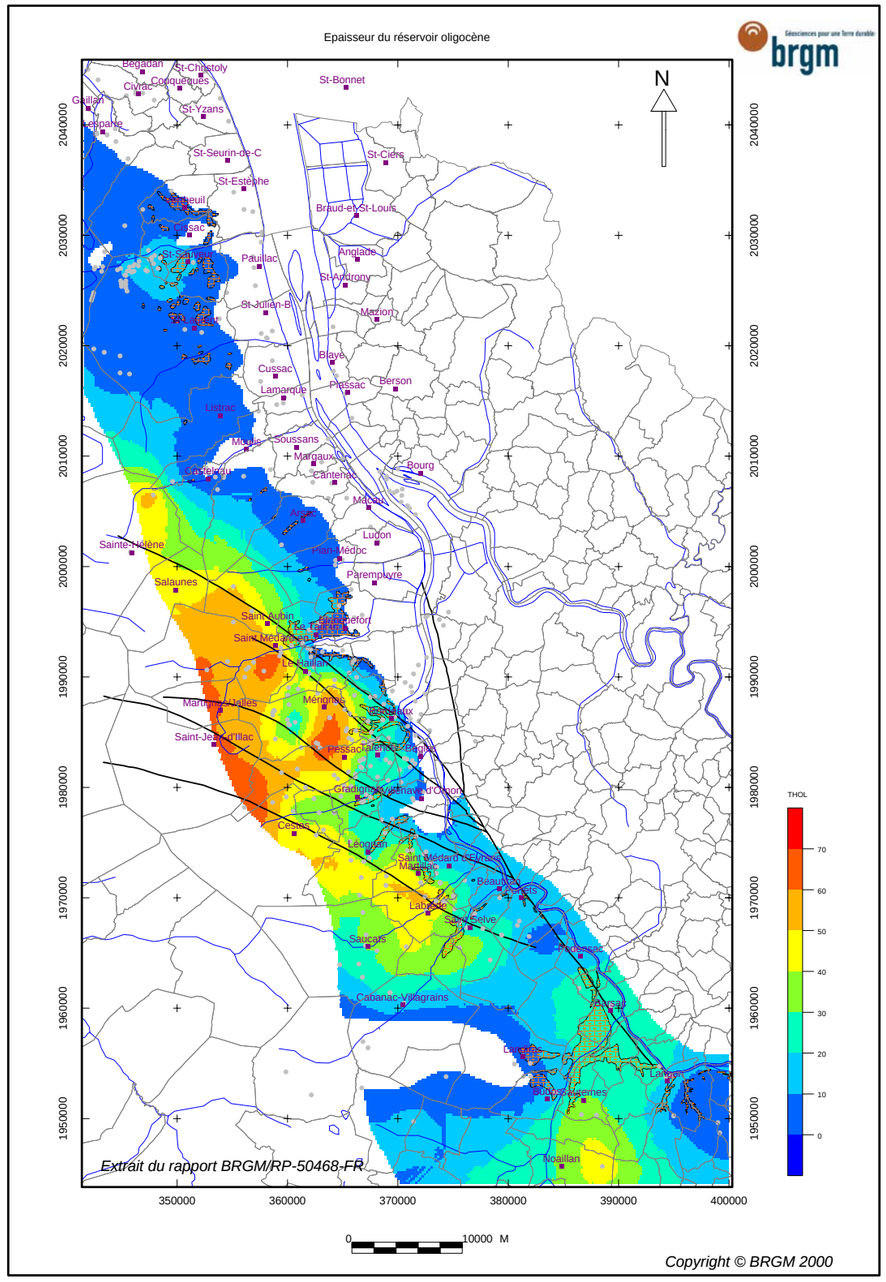


Illustration 70 : Altitude du toit (schéma de gauche) et épaisseur (schéma de droite) de l'aquifère oligocène (d'après Platel et al., 2000)

La deuxième carte de l'illustration 70 met, quant à elle, en évidence des épaisseurs de l'ordre de 10 à 30 m à proximité de la Garonne et des épaisseurs plus importantes vers l'ouest qui n'excèdent toutefois pas 80 m.

Caractéristiques hydrodynamiques

Dans ses travaux de thèse, Larroque (2004) a montré que sur une zone allant du Médoc jusqu'au Bassin d'Arcachon, les transmissivités se répartissaient selon deux groupes principaux :

- un premier, unimodal, centré sur la valeur de 3.10^{-4} $m^2.s^{-1}$,

- un second, bimodal, centré sur les valeurs de 2.10^{-3} $m^2.s^{-1}$ et 5.10^{-3} $m^2.s^{-1}$.

La majorité des maxima sont observées dans la partie sud-est, soit dans la partie qui est concernée par l'étude des risques de dénoyage.

Les valeurs de coefficient d'emmagasinement disponibles sont, quant à elles, peu nombreuses et concernent essentiellement les secteurs de Bordeaux et d'Arcachon. Elles sont de l'ordre de 1.10^{-5} à 3.10^{-4} pour la partie captive.

Piézométrie

La carte piézométrique établie avec les mesures réalisées en 2003 (cf. illustration 69) montre que le niveau de la nappe oligocène oscille entre 0 et + 30 NGF sur le secteur d'étude avec un écoulement global de la nappe de l'ouest vers l'est. Les zones d'affleurement du réservoir apparaissent comme des zones d'exutoire de la nappe.

Cette carte met également en évidence 2 dépressions. La première centrée sur l'agglomération bordelaise s'étire selon un axe ouest-est. La seconde, située entre Léognan et Saucats, s'étend, selon un axe nord-sud correspondant à la ligne des 100 000 m^3/jour (ensemble d'une dizaine d'ouvrages captés pour l'alimentation en eau potable de Bordeaux). Plus au sud, les isohypses mettent en évidence une alimentation de la Garonne par la nappe (cotes décroissantes de l'ouest vers l'est).

En 1999, le rôle drainant des affluents de la Garonne a pu être mis en évidence grâce à une campagne piézométrique spécifique ayant inclus un grand nombre d'ouvrages (cf. illustration 71). A proximité des ruisseaux de la Jalle et de l'Eau Bourde, la forme des isopièzes indique en effet que les circulations d'eau s'effectuent de la nappe vers les ruisseaux. Plus au sud, la piézométrie semble fortement influencée par les forages de la ligne des « 100 000 m^3/jour ».

Enfin, le recul de l'isopièze + 20 m NGF (cf. illustration 72) qui est observé depuis plusieurs années montre que le niveau de la nappe a sensiblement baissé d'où l'apparition de phénomènes de dénoyage et d'inversion des écoulements dans certains secteurs et en particulier au sud de Bordeaux.

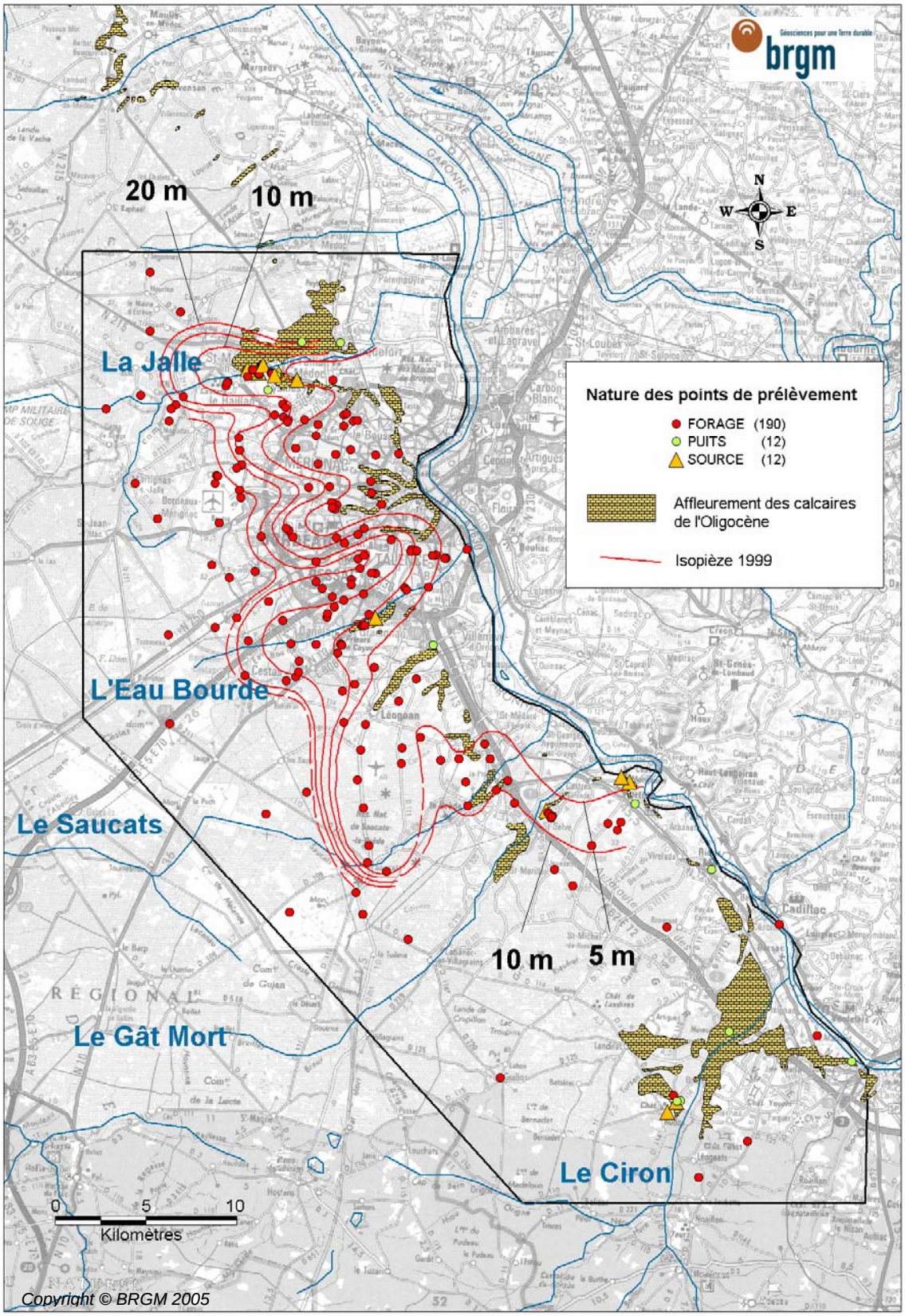


illustration 71 : Localisation des points de prélèvemen actuels et piézométrie en 1999

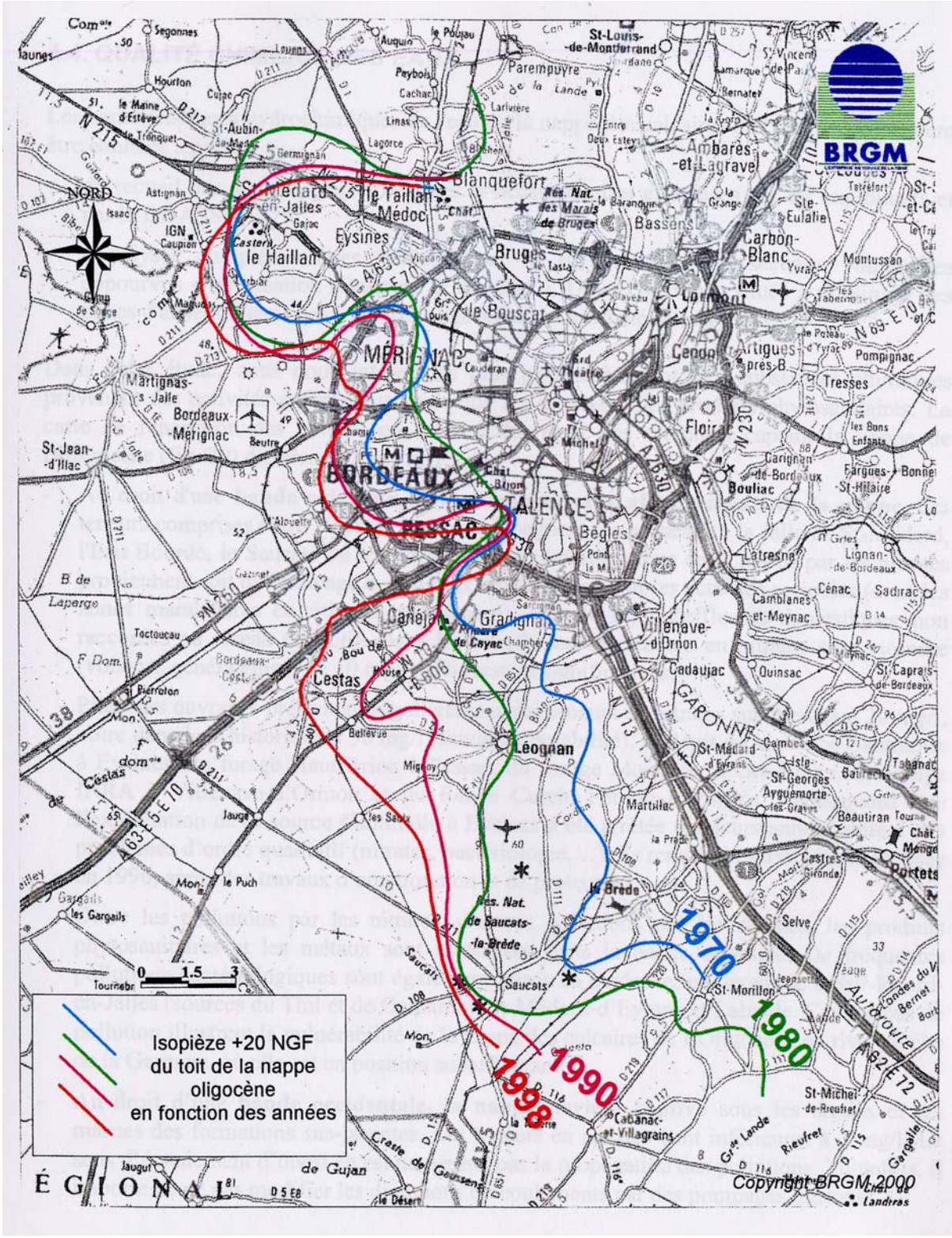


Illustration 72 : Evolution de la piézométrie de la nappe des calcaires de l'Oligocène (d'après Platel et al., 2000)

6.4. PROBLEMATIQUE

Avec l'Eocène, l'Oligocène constitue une des principales ressources en eau potable du département de la Gironde.

Les prélèvements réalisés pour l'AEP représentent un volume de l'ordre de 60 millions de m^3 sur la zone décrite en 6.1 (Winckel *et al.,* 2004). Ils sont effectués sur les forages, les puits et les sources représentés sur l'illustration 71.

La source de Budos, située au sud de la zone d'étude, est de loin la plus sollicitée avec un volume annuel de l'ordre de 10 millions de m^3 (cf. illustration 73). Au nord de Bordeaux, les prélèvements effectués sur les sources du Taillan, de Saint-Médard et du Thil (par l'intermédiaire du forage d'indice national 08035X0282) représentent un volume annuel de l'ordre de 7 millions de m^3. Plus au sud, les prélèvements effectués sur la source de Castres s'élèvent à 2 millions de m^3 par an.

Au total, les prélèvements effectués sur les sources représentent un volume de l'ordre de 20 millions de m^3 par an, soit 1/3 des prélèvements totaux effectués pour l'AEP sur la zone d'étude.

Il est à préciser que dans la plupart des cas, les installations de captage de ces sources permettent de solliciter plus que l'écoulement naturel de la nappe. Dans ces conditions, les prélèvements effectués sont aussi préjudiciables pour la nappe que les pompages réalisés dans des forages.

Dans la zone où le recul de l'isopièze + 20 m NGF est le plus marqué (cf. illustration 72), l'examen des débits prélevés sur les forages AEP montre que les prélèvements ont très fortement augmenté depuis 1970 (cf. illustration 74).

Après avoir dépassé 6 millions de m^3 en 1995, 1996 et 1997, les volumes prélevés ont un peu diminué. Ils oscillent entre 5 et 6 millions de m^3 depuis 1999.

Dans le détail, il apparaît que les forages d'indices nationaux 08276X0067 et 08276X0090, situés à proximité de Saucats sont les plus sollicités avec des volumes prélevés qui ont respectivement atteint 1,3 et 1,2 millions de m^3 en 2004.

Bien que les volumes totaux prélevés ne représentent qu'1/6 des volumes théoriques (ouvrages réalisés dans l'objectif de prélever 100 000 m^3/jour, soit un volume annuel de l'ordre de 36 millions de m^3), l'exploitation des ouvrages AEP situés entre Léognan et Saucats est problématique dans la mesure où :

- les ouvrages, situés à faible distance les uns des autres, s'influencent mutuellement, ce qui impose une utilisation alternée de ces derniers,

- elle a un très fort impact sur la piézométrie et engendre le dénoyage de certains secteurs.

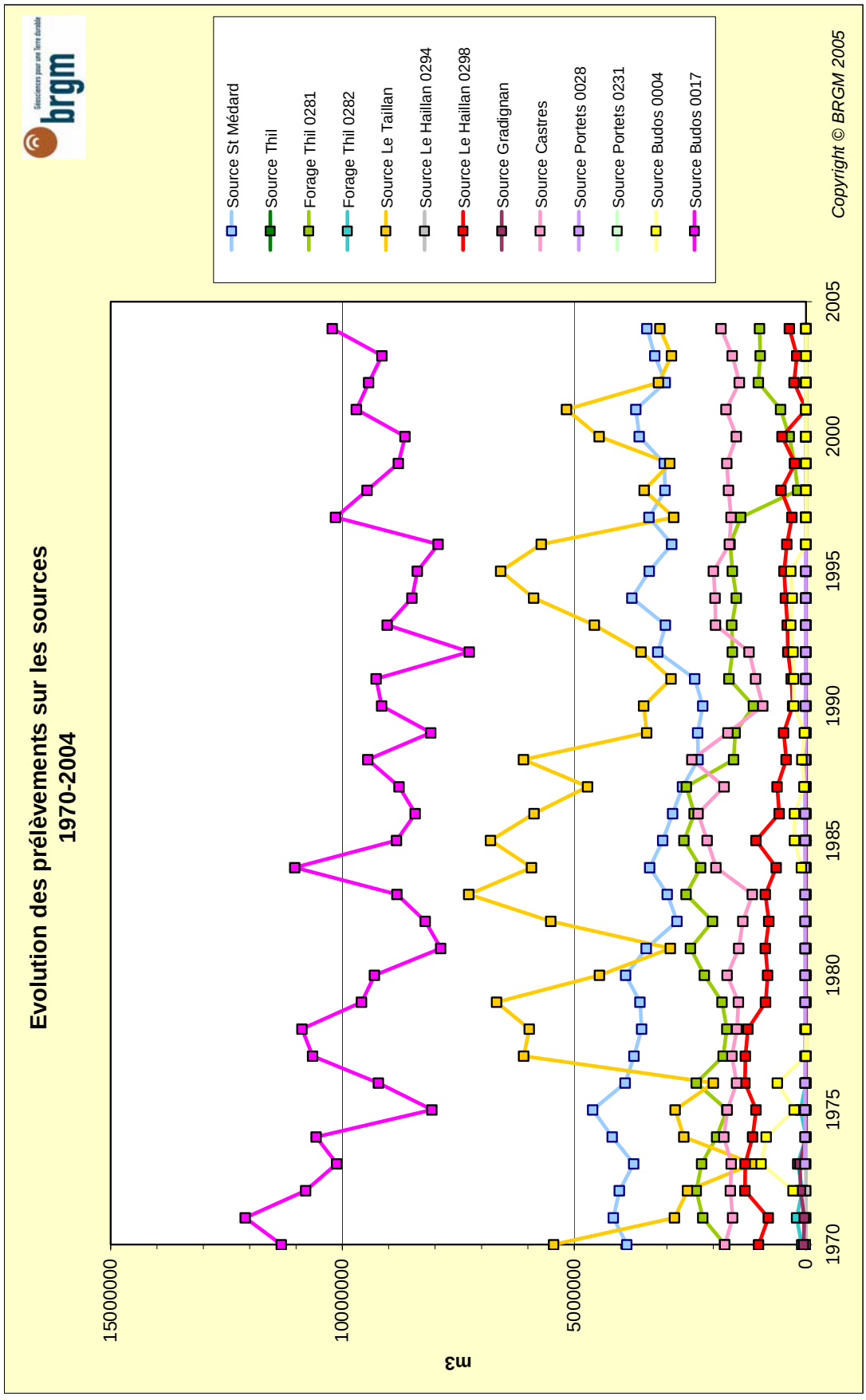


Illustration 73 : Evolution des prélèvements sur les sources de la zone d'étude

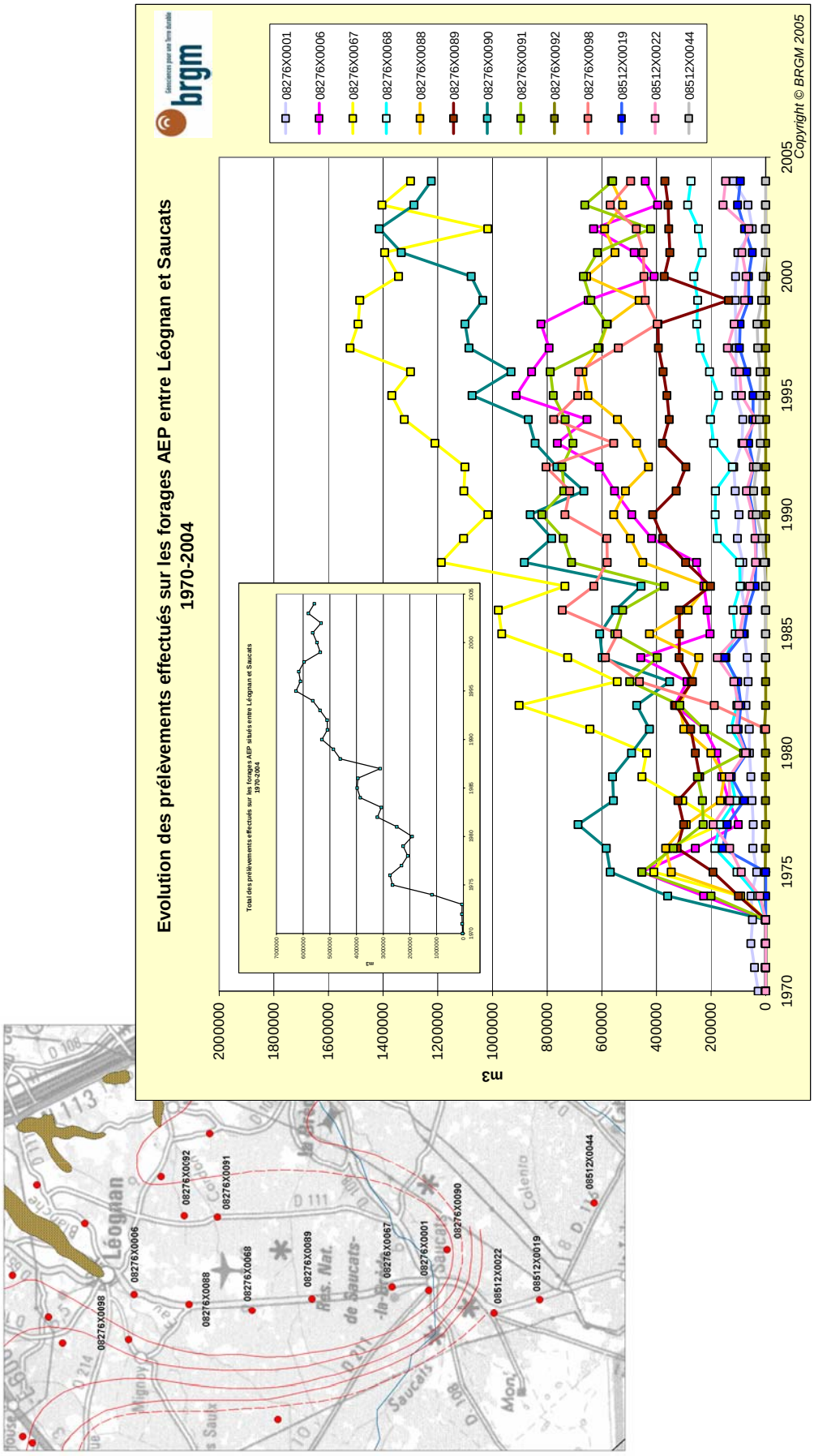


Illustration 74 : Evolution des volumes prélevés sur les forages AEP situés entre Léognan et Saucats

6.4.1. Aspects théoriques

Le dénoyage d'un aquifère captif correspond à la désaturation d'une partie du réservoir par abaissement du niveau piézométrique en dessous de la cote du substratum de l'éponte supérieure. Il traduit généralement une exploitation intensive de la ressource et peut avoir diverses conséquences.

Aspects quantitatifs

Le coefficient d'emmagasinement correspond au volume d'eau libéré par unité de surface pour un abaissement piézométrique donné. Il est de l'ordre de 1 à 20 % pour les nappes libres et de 0.01 à 0.1 % pour les nappes captives.

Pour un abaissement piézométrique donné, le volume d'eau libéré par une nappe libre pourra donc être 100 à 1000 fois supérieur à celui libéré par une nappe captive.

Compte tenu de cette observation, le passage d'un état captif à un état libre pourra se traduire par une diminution de la chute des niveaux et de l'influence entre forages.

Si le dénoyage d'un aquifère se traduit par une augmentation du coefficient d'emmagasinement, il s'accompagne aussi d'une diminution de la transmissivité du fait de la relation qui lie ce paramètre à l'épaisseur du réservoir saturé en eau ($T = K \times e$).

Dans ces conditions, il apparaît que le dénoyage peut avoir des conséquences néfastes sur l'exploitation de la ressource par forage.

Outre la modification des paramètres hydrodynamiques, la baisse des niveaux liée au dénoyage peut favoriser les phénomènes de drainance ascendante ou descendante depuis les aquifères sous et sus-jacents et provoquer des déséquilibres dans les aquifères « encadrants ».

Elle peut aussi induire une diminution du débit des sources et des cours d'eau alimentés par la nappe et provoquer des phénomènes d'inversion des écoulements.

D'un point de vue technique, la baisse des niveaux peut nécessiter le déplacement des pompes ou leur remplacement lorsque leurs caractéristiques (rapport débit-puissance) ne les autorisent plus à assurer le débit d'exploitation initialement défini.

L'approfondissement des ouvrages ou leur abandon (lorsque les modifications à apporter ne sont pas techniquement réalisables ou économiquement supportables) peuvent constituer d'autres solutions.

Aspects qualitatifs

Certains aspects qualitatifs découlent directement des aspects quantitatifs.

La chute du débit d'un cours d'eau, liée à une diminution de l'alimentation par des eaux souterraines, peut en effet engendrer une dégradation de la qualité de l'eau. C'est en particulier le cas quand le débit n'est plus suffisant pour assurer une bonne dilution de certains effluents (cas des rejets de station d'épuration par exemple).

L'inversion des sens d'écoulement et les phénomènes de drainance peuvent aussi conduire à la contamination de l'aquifère par des eaux de moins bonne qualité en provenance de la surface et/ou des réservoirs sous et sus-jacent et de ce fait, accroître la vulnérabilité de l'aquifère aux pollutions. De la même façon, les phénomènes de drainance peuvent entraîner le lessivage d'éléments minéraux naturels indésirables contenus dans les épontes (chlorures, sulfates….).

Enfin, la désaturation partielle ou globale d'un réservoir peut perturber les équilibres physico-chimiques au sein de la nappe. Parmi les phénomènes susceptibles de se produire suite à un dénoyage et pouvant altérer la qualité de l'eau, on citera les phénomènes d'oxydation (du fer par exemple), le développement de bactéries rendu possible par la présence d'un milieu aérobie ou l'arrêt des phénomènes de dénitrification.

Compte tenu des problèmes quantitatifs et qualitatifs pouvant être induits par le dénoyage d'un réservoir, il convient, tant que possible, de gérer les ressources en évitant que de tels phénomènes se produisent.

6.4.2. Etat des connaissances par rapport à l'aléa

Les études les plus récentes menées par le BRGM sur le réservoir oligocène de la région bordelaise (Platel *et al.,* 2000 ; Schnebelen *et al.,* 2002 ; Wincekl *et al.,* 2004) et les cartes piézométriques établies chaque année dans le cadre de la « Surveillance et la gestion des nappes d'eaux souterraines en Gironde » ont montré le fort impact des pompages effectués dans la zone des « 100 000 m^3/jour » et, dans une moindre mesure, dans le secteur de Mérignac-Pessac.

La baisse de la piézométrie qui en découle perturbe le fonctionnement hydraulique des affluents de la Garonne et en particulier celui du Saucats (cf. illustration 71). La chute du débit des sources qui jalonnent le cours d'eau à l'étiage et la forme des isopièzes qui indique que des phénomènes d'alimentation de la nappe par le cours d'eau sont possibles constituent des preuves de l'impact de ces pompages.

D'un point de vue qualitatif, l'étude portant sur la vulnérabilité de la nappe oligocène a permis de montrer que les nitrates contenus dans les puits et les forages situés à proximité des zones d'affleurement constituaient la principale source de pollution de la nappe (Schnebelen *et al.,* 2002).

La conclusion de cette étude souligne aussi la nécessité de ne pas modifier les directions d'écoulement par des pompages intensifs pour préserver la qualité des eaux dans les secteurs où la nappe est captive (teneurs en $NO3^-$ < 1 mg/l).

En l'absence de documents bibliographiques sur le dénoyage de l'aquifère oligocène et son évolution, la première étape du travail réalisé dans le cadre de cette étude a consisté à comparer les cotes piézométriques et celles du toit de l'aquifère.

Cette comparaison a été effectuée sur la zone d'étude entre Bordeaux et Langon en rive gauche de la Garonne, zone où la baisse de la piézométrie est la plus nette (cf. illustration 72).

Les données qui ont été comparées correspondent :

- au toit du réservoir oligocène issu du modèle géologique au pas de 200 m élaboré dans le cadre de l'étude sur la vulnérabilité de la nappe de l'oligocène en région bordelaise (cf. illustration 70),

- à la carte piézométrique « basses eaux » de l'année 2000 (Schnebelen *et al.,* 2002) élaborée dans le cadre de la même étude. Cette carte a été réalisée à partir de données synchrones relevées sur les forages en novembre 2000, en tenant compte des cotes piézométriques des exutoires des sources recensées en septembre et octobre 2000 et du compartimentage du réservoir sous l'action des principales failles,

- aux cartes piézométriques moyennes des années 1980, 1989 et 2004 (Winckel *et al.,* 2005). Ces cartes ont été entièrement réactualisées (prise en compte des données récentes de nivellement, des réaffectations géologiques, des cotes des exutoires des sources et du compartimentage du réservoir), uniformisées puis interpolées par krigeage au pas de 200 m selon la même méthodologie que celle employée pour la carte Basses Eaux 2000.

L'illustration 75 établie à partir de ces données montre, pour l'année 2000, les secteurs où la nappe est maintenue captive (en bleu) par l'éponte supérieure oligo-miocène. Les zones en rouge correspondent aux endroits où la cote de la nappe est inférieure au toit du réservoir sous recouvrement des terrains imperméables du Chattien et de l'Aquitanien inférieur. Une zone tampon (en jaune sur l'illustration 75) a volontairement été laissée de façon à tenir compte des incertitudes liées aux données et aux interpolations.

Les chroniques piézométriques (cf. illustration 75) sur lesquelles sont reportées les cotes du toit du réservoir oligocène au droit des forages concernés permettent de voir l'évolution dans le temps des niveaux statiques par rapport au toit de la formation. Quatre cas de figure se distinguent :

- les forages pour lesquels la captivité de la nappe semble permanente (ex : 08276X0067/F),

- les forages où des dénoyages locaux du réservoir se produisent au moment de l'exploitation du forage (ex : 08276X0091/F2),

- les forages pour lesquels le dénoyage semble avéré et continu dans le temps à partir d'une certaine date (ex : 08276X0090/F et 08035X0360/F1),

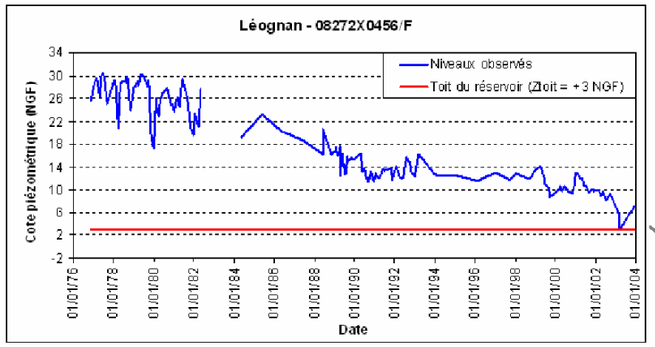
- les ouvrages situés dans la partie orientale du domaine pour lesquels la nappe oligocène semble avoir toujours été à surface libre sous le recouvrement imperméable oligo-miocène (08277X0175/F et 08272X0018/F).

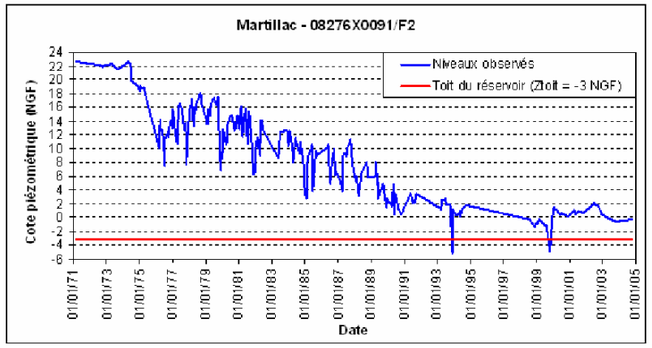
Pour voir l'évolution du dénoyage dans le temps et essayer de définir son emprise, des comparaisons entre la piézométrie des années 1980, 1989 et 2004, et le toit du réservoir oligocène on été réalisées (cf. illustration 76). Deux secteurs de dénoyage principaux se dégagent :

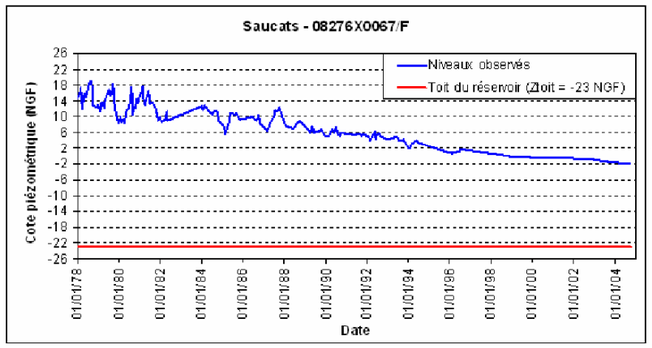
- le plus important concerne la zone située à l'est de l'axe nord-sud formé par « la ligne des 100 000 m^3/j » avec un recul très net de la ligne de captivité de la nappe vers l'ouest. **La superficie dénoyée correspondante est d'environ 50 km^2 entre 1980 et 2004**. La chronique piézométrique (cf. illustration 75) du forage de Saucats (08036X0090/F) et les deux coupes hydrogéologiques schématiques (cf. illustration 77) réalisées à partir du modèle oligocène au pas de 200 m sur lesquelles sont reportées les piézométries de 1980, de 1989 et de 2004 illustrent le propos. Le forage de Saucats, parmi les plus exploités du secteur, a vu son niveau piézométrique baisser continuellement entre 1970 (+ 22 m NGF) et aujourd'hui (- 2 m NGF) et passer sous le toit du réservoir en 1996.

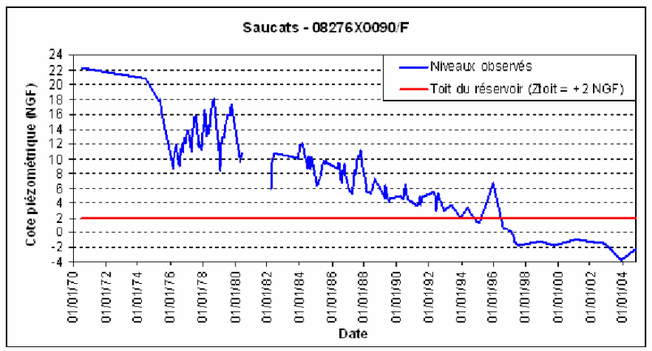
- le second, dans une moindre mesure, concerne le secteur situé aux abords de Mérignac avec **un dénoyage sur une surface estimée à 10 km^2 entre 1980 et 2004**.

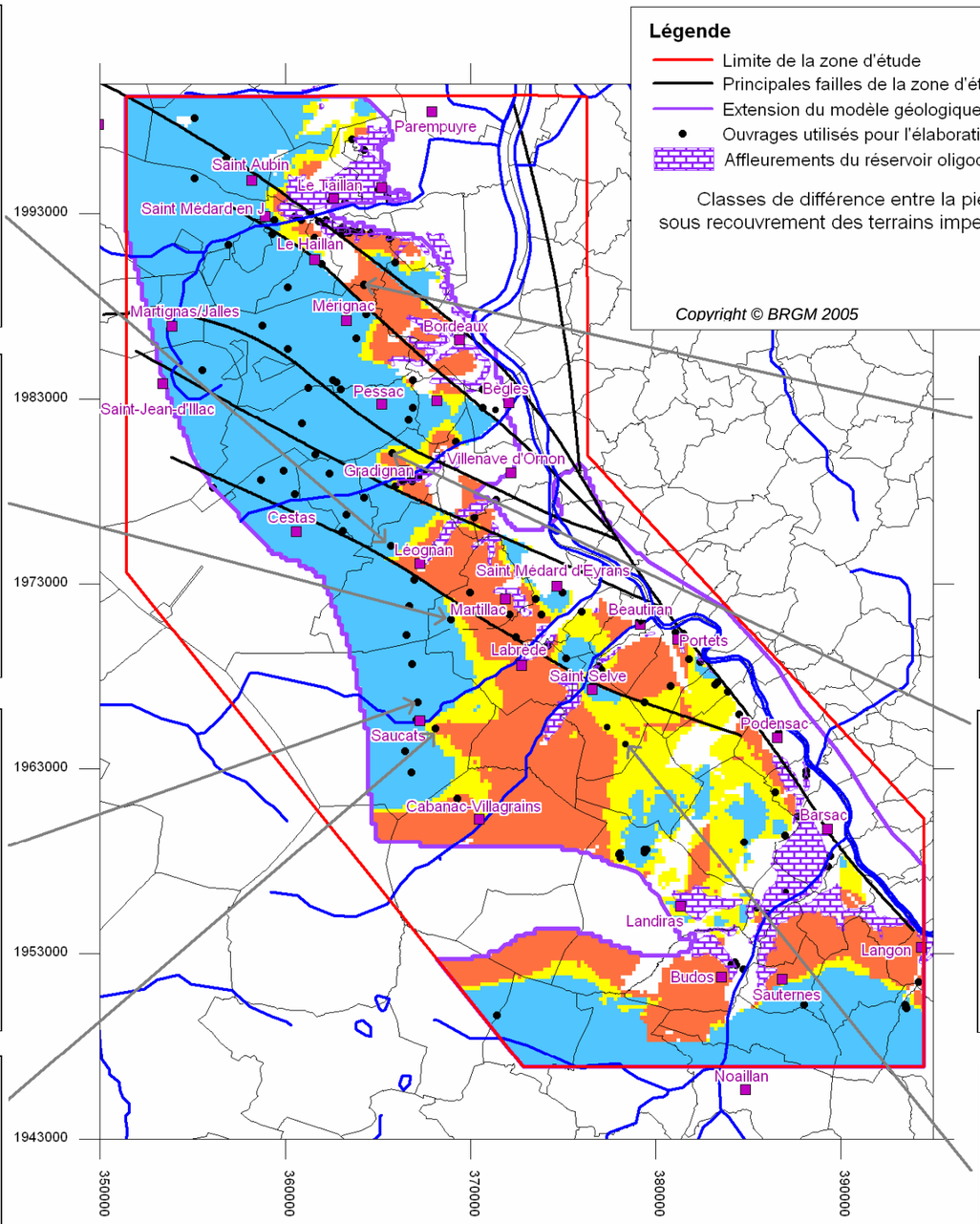
Ce travail constitue une première approche qui a permis d'apprécier l'ampleur du phénomène de dénoyage sur près de 25 ans et de calculer approximativement son emprise.

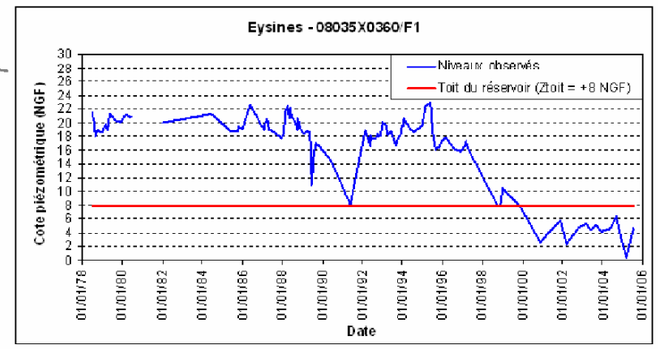


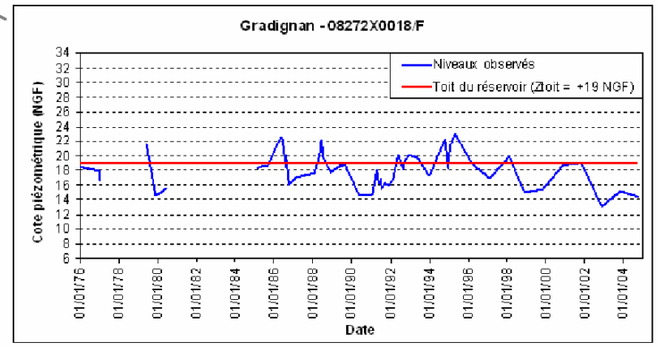












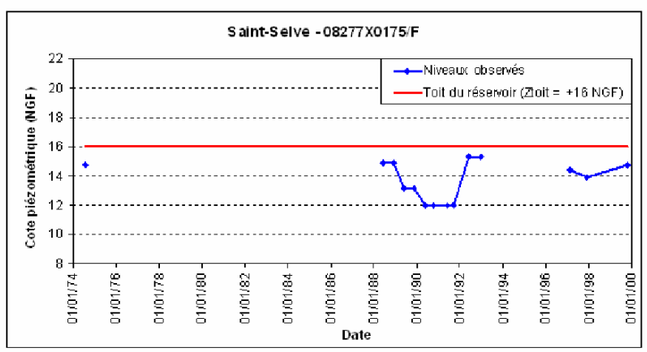
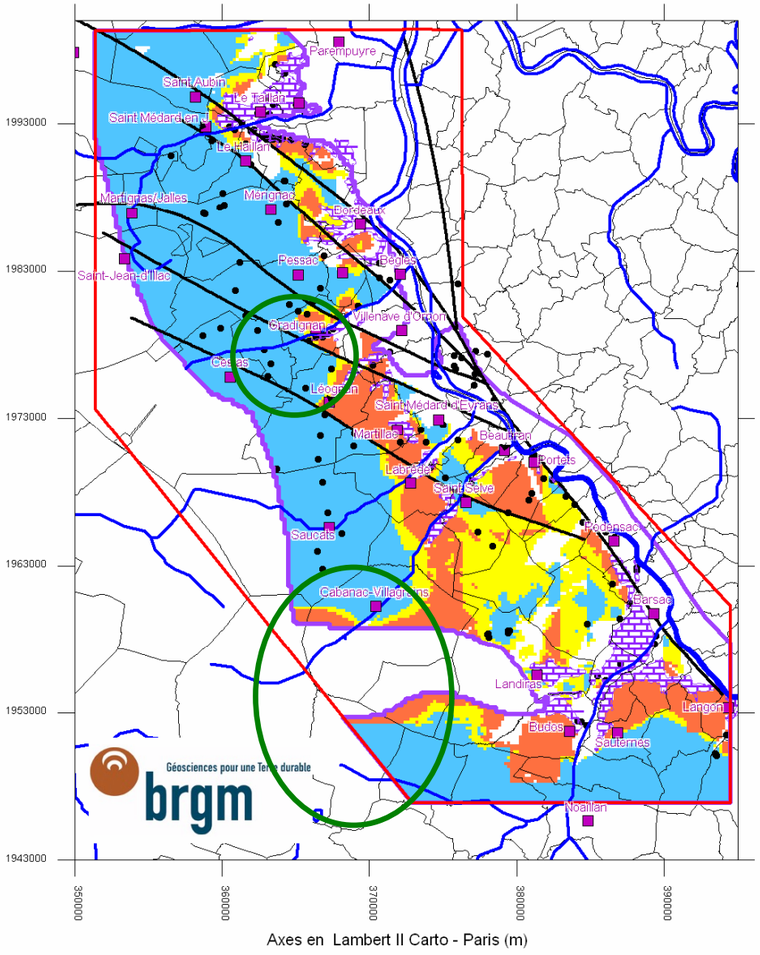
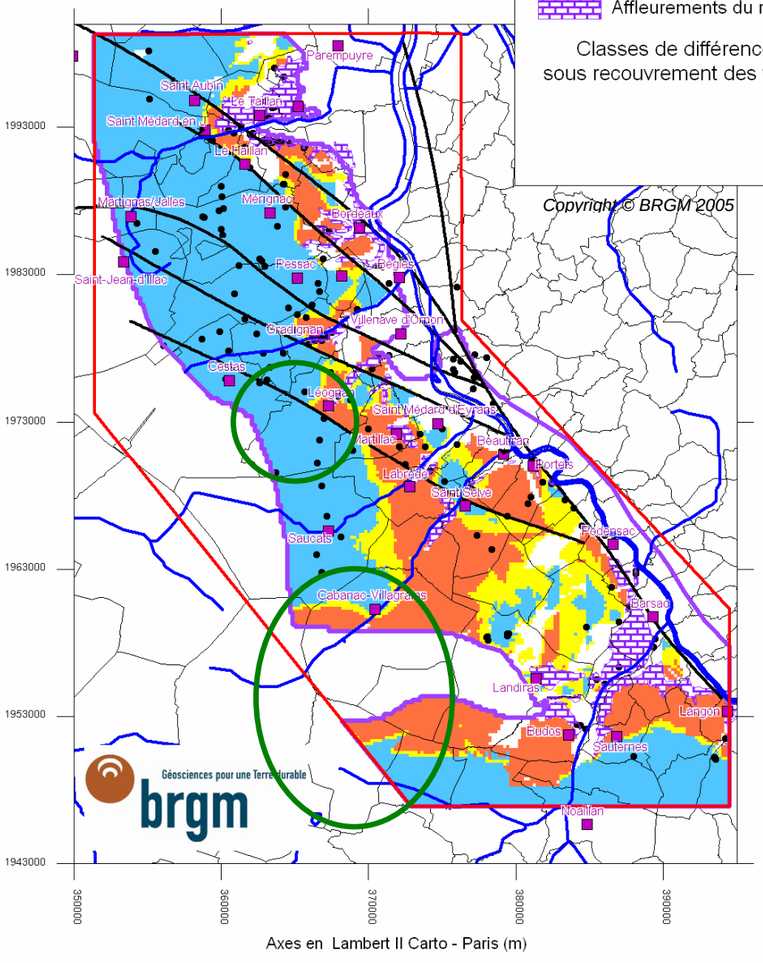


Illustration 75 : Oligocène - Différence entre la piézométrie "Basses Eaux 2000" et le toit du réservoir dans la zone d'extension de l'éponte supérieure (Chattien, Aquitanien basal) et présentation de quelques chroniques piézométriques représentatives



1980



1989

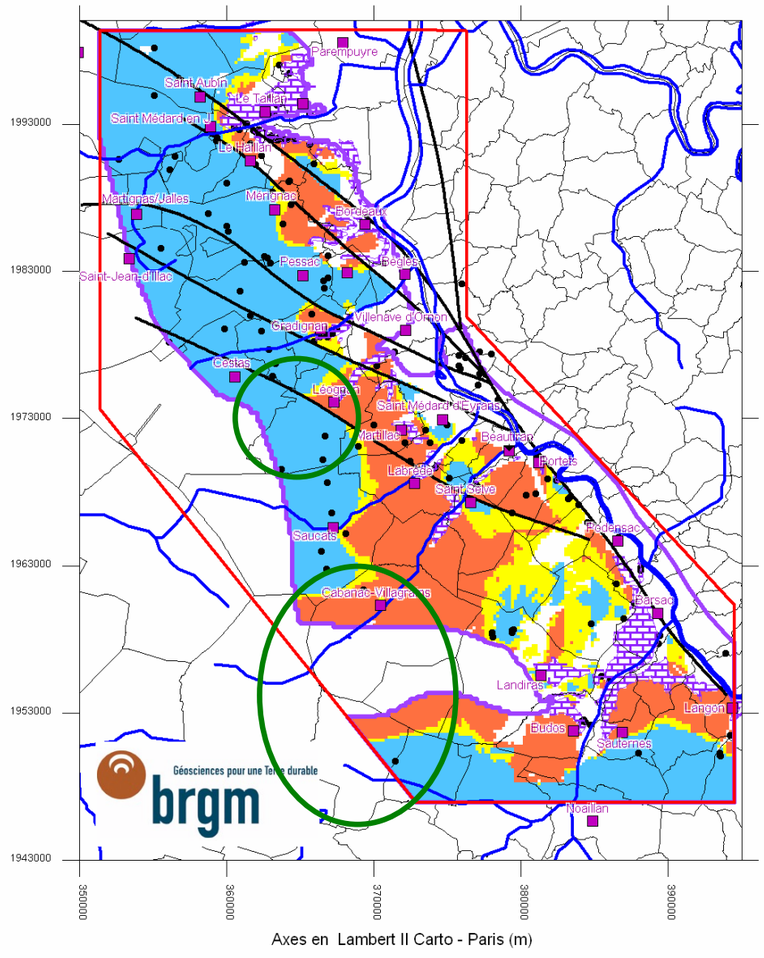
Légende

- Limite de la zone d'étude
- Principales failles de la zone d'étude
- Extension du modèle géologique de l'Oligocène au pas de 200 m sur la zone d'étude
- Ouvrages utilisés pour l'élaboration de la carte piézométrique de l'année considérée
- Affleurements du réservoir oligocène

Classes de différence entre la piézométrie de l'année considérée et le toit du réservoir oligocène sous recouvrement des terrains imperméables du Chattien et de l'Aquitanien basal (Eponte supérieure)

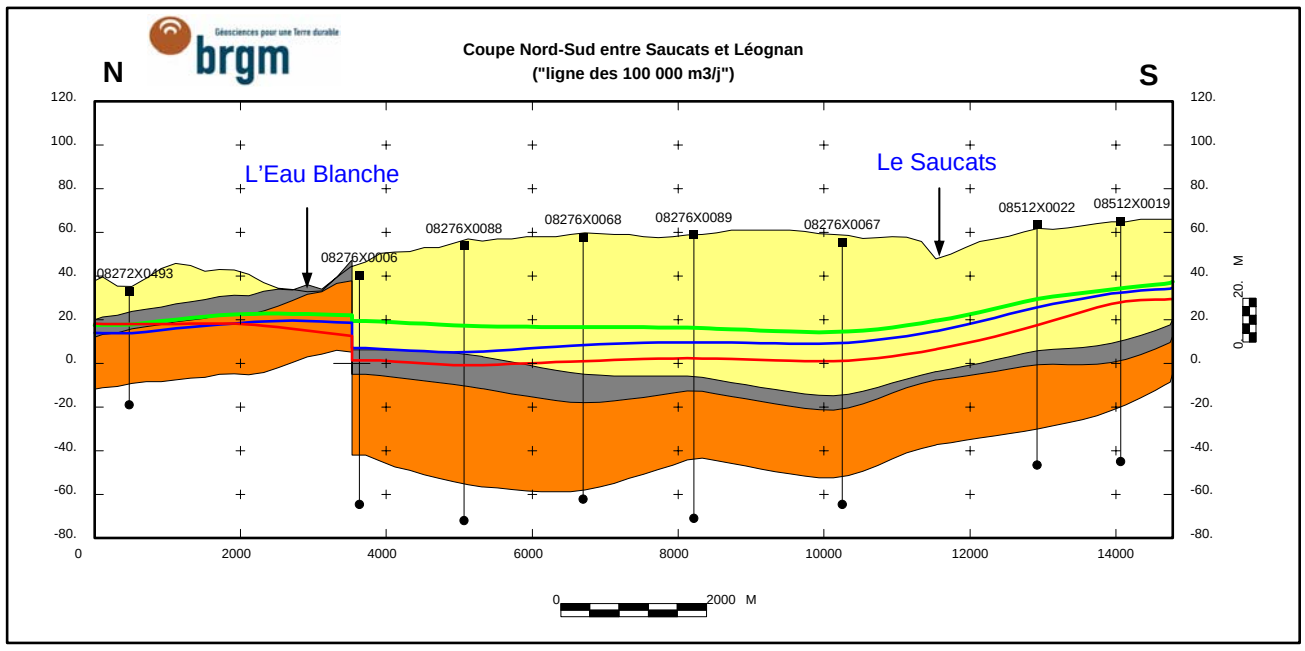
- > 2 m (Nappe captive)
- entre -2 m et +2 m
- < 2 m (Nappe libre)

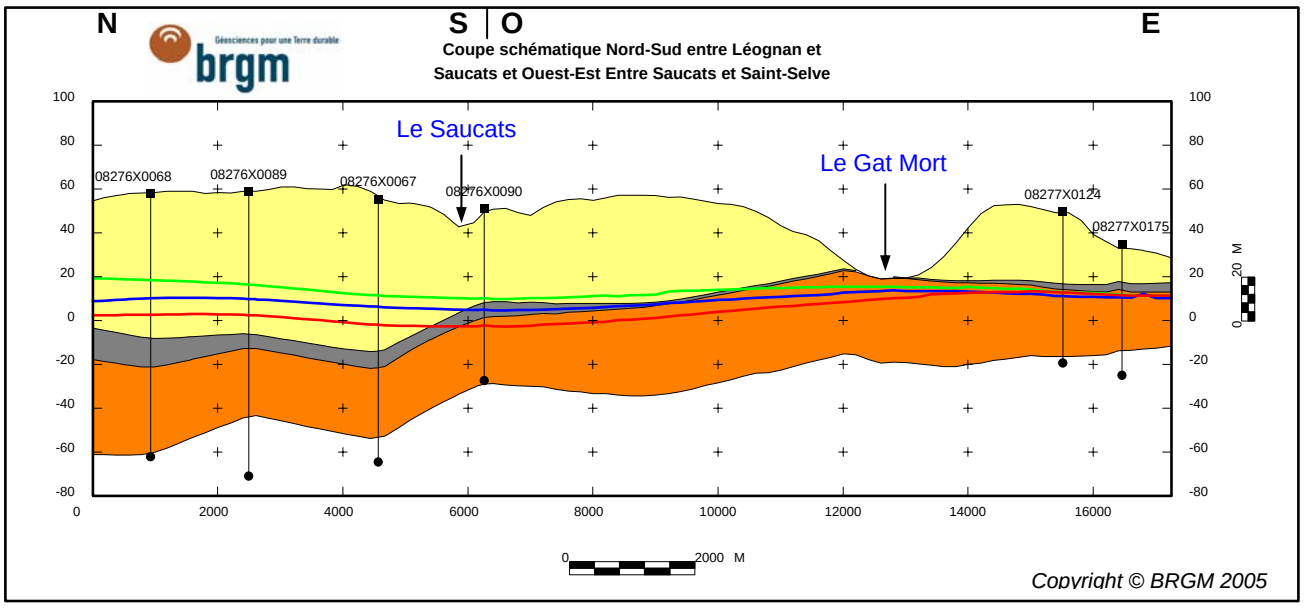
Copyright © BRGM 2005



2004

Illustration 76 : Evolution du dénoyage de l'aquifère oligocène entre 1980 et 2004





Légende

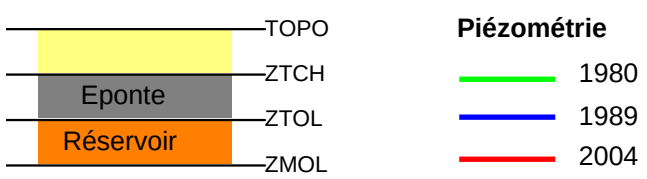


Illustration 77 : Coupes hydrogéologiques schématiques et piézométries (1980, 1989 et 2004)

6.5. DESCRIPTION DE LA VULNERABILITE

La vulnérabilité de l'aquifère oligocène à l'aléa « dénoyage » dépend de ses caractéristiques intrinsèques (cote du toit et épaisseur du réservoir, perméabilités…) mais elle dépend aussi des conditions d'exploitation et de recharge de la nappe donc d'un état piézométrique qui n'est pas immuable dans le temps.

Compte tenu de la variabilité de ce dernier paramètre, il a été décidé de ne pas établir de carte de vulnérabilité vis-à-vis de cet aléa.

6.6. EVALUATION DU RISQUE

L'évaluation du risque s'avère difficile dans la mesure où le dénoyage progressif du réservoir lié aux pompages tend à modifier le sens et la vitesse des écoulements et les coefficients d'emmagasinement de l'aquifère.

Dans ces conditions, seule l'utilisation d'un modèle permettrait de prendre en compte l'ensemble des paramètres intervenant dans le phénomène et d'établir une carte de risque précise.

Compte tenu de la taille de ses mailles (2 X 2 km), le modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes profondes (MONA V3.1-2003), n'a pas pu être utilisé.

Le modèle ne permettant pas de faire des simulations avec une finesse suffisante, il a été décidé d'établir une carte simplifiée de risque (illustration 78).

Cette dernière représente la différence d'altitude entre la carte piézométrique moyenne de l'année 2004 et le toit du réservoir sous forme de classes choisies arbitrairement ainsi que les ouvrages destinés à l'alimentation en eau potable qui constituent le principal enjeu vis-à-vis de l'aléa « dénoyage ».

Une différence inférieure à 5 m correspond à un risque de dénoyage élevé, une différence comprise entre 5 et 15 m, à un risque de dénoyage moyen et une différence supérieure à 15 m, à un risque faible.

Les zones grises et blanches ne font pas l'objet d'une classification vis-à-vis de l'aléa puisqu'elles correspondent respectivement aux zones dénoyées entre 1980 et 2004 et aux zones dénoyées avant 1980 ou aux zones où l'aquifère est à surface libre.

Cette carte constitue une première évaluation du risque et doit être utilisée comme telle. Elle a pour vocation de fournir des éléments de réflexion en vue de l'élaboration d'une véritable carte de risque qui intègrera plusieurs paramètres.

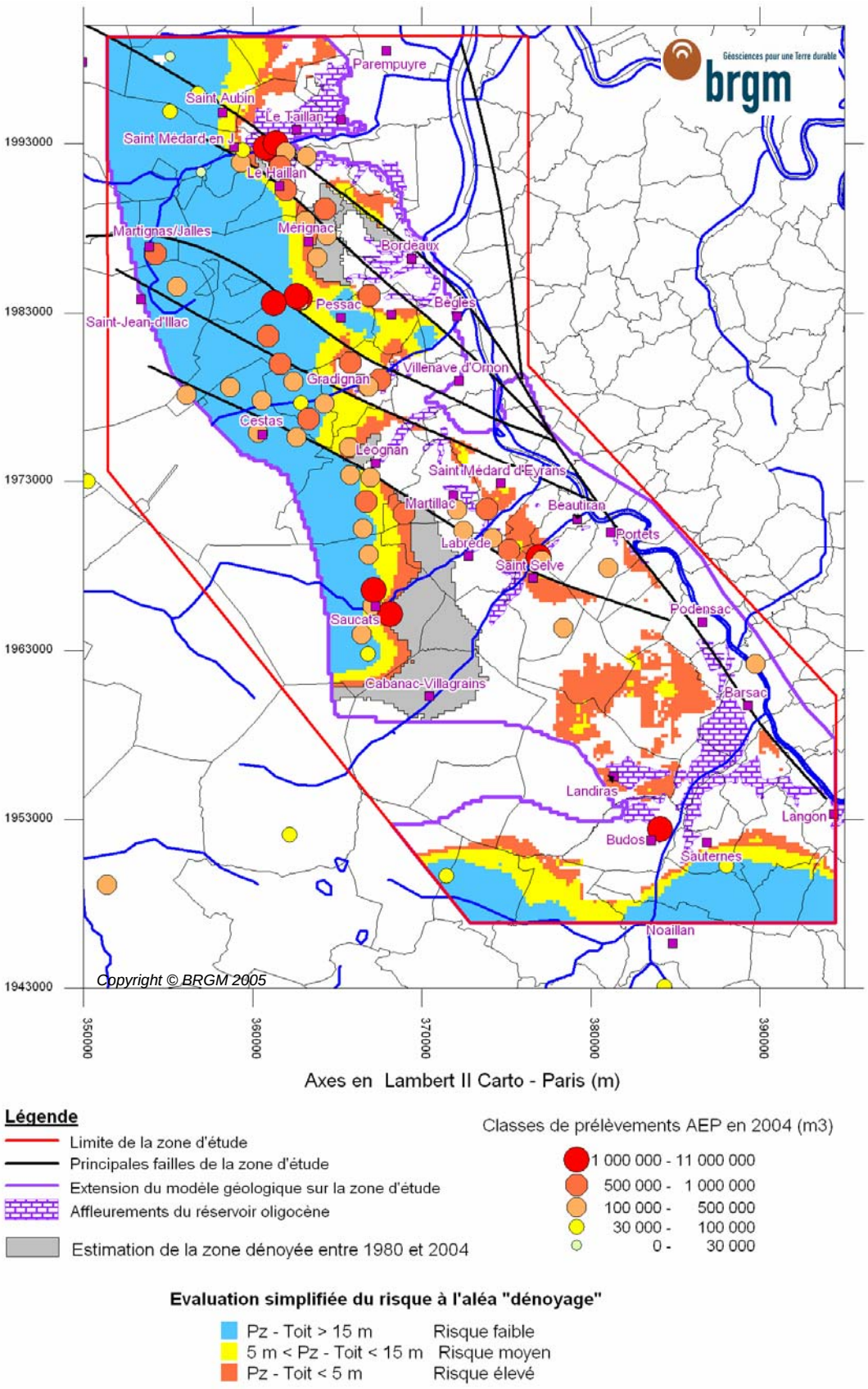


Illustration 78 : Carte d'évaluation simplifiée du risque à l'aléa « dénoyage »

6.7. DESCRIPTION DES POINTS DE MESURE ET DES USAGES

L'inventaire des points de prélèvement et des autres points de mesure a été réalisé sur un secteur un peu plus étendu que celui décrit en 6.1 pour englober le maximum de points de prélèvement. Ce dernier s'étend du nord de Bordeaux à Langon et présente une superficie de 1225 km^2.

Il est à préciser que les points de prélèvement retenus et les volumes associés correspondent exclusivement à des ouvrages dont les niveaux captés ont été validés.

Ces points ont fait l'objet d'une cartographie par aquifère et en fonction de leur usage dans l'annexe 1. Leurs caractéristiques ainsi que les prélèvements dont ils ont fait l'objet sur la période 2000-2004 sont précisés dans l'annexe 2.

Dans le cas des ouvrages captant plusieurs aquifères, un volume correspondant au volume global divisé par le nombre de nappes captées a été affecté à chaque unité.

Les autres points de mesure correspondent :

- pour l'aspect quantité, aux forages suivis dans le cadre de la « Surveillance et la Gestion des nappes d'eaux souterraines en Gironde » (points appartenant au réseau départemental ou patrimonial suivis de façon continue ou mensuelle ou trimestrielle + points suivis de façon annuelle) (cf. liste des points en annexe 3)

- pour l'aspect qualité, aux forages suivis dans le cadre du contrôle sanitaire (analyses réalisées sur eaux brutes) et aux forages suivis dans le cadre de la « Surveillance et la Gestion des nappes d'eaux souterraines en Gironde (points appartenant aux réseaux patrimonial et départemental) (cf. listes des points en annexe 4)

6.7.1. Prélèvements

413 points de prélèvement ont été recensés sur la zone décrite précédemment.

La répartition de ces points entre les différents aquifères est représentée sur l'illustration 79. Il apparaît qu'en terme de nombre de points de points de prélèvement, l'Oligocène est l'aquifère le plus sollicité avec un total de 214 ouvrages. Le Miocène et l'Eocène arrivent respectivement en 2° et 3° positions avec 92 et 88 ouvrages.

En terme de volumes, les prélèvements effectués sur la période 2000-2004 dans l'Oligocène (près de 242 millions de m^3) représentent 68,7 % du total des volumes pompés. Sur la même période, les prélèvements effectués dans le Miocène (près de 34 millions de m^3) et dans l'Eocène (près de 59 millions de m^3) ne représentent respectivement que 9,7 et 16,8 % des prélèvements totaux (cf. illustrations 78 et 79).

Ces derniers s'élèvent à 352 millions de m^3 sur la période 2000-2004 et permettent de calculer une valeur moyenne annuelle de **70 millions de m^3**. Dans le détail, il apparaît

que ces prélèvements ont régulièrement augmenté entre 2000 et 2003 et diminué entre 2003 et 2004 (cf. illustration 78).

L'évolution des prélèvements en fonction de l'aquifère est représentée sur l'illustration 79. Il apparaît que ce sont les aquifères oligocène et éocène qui ont enregistré les plus fortes variations lors de ces 5 dernières années.

	Miocène	Oligocène	Eocène	Crétacé	Total
2000	6268631	47319001.5	10051833.5	3516086	67155552
2001	6676217	49757652	9465795	3631091	69530755
2002	7109993	47170774	12735539	3786156	70802462
2003	7118872	48069308	14963221.5	3423636.5	73575038
2004	6926596	49496920.5	11768843.5	2762133	70954493
Total 5 ans	34100309	241813656	58985232.5	17119102.5	352018300
Pourcentage	9.69%	68.69%	16.76%	4.86%	100.00%

Illustration 79 : Bilan volumique sur la zone « Sud Bordeaux »

En terme d'usage, les volumes prélevés pour l'AEP représentent 88 % des volumes totaux prélevés (cf. illustration 79). A l'échelle de la zone d'étude, les autres usages sont nettement moins importants même si l'on peut noter la part non négligeable (2.8 %) des volumes destinés au chauffage par le biais de la géothermie.

6.7.2. Autres points de mesure

Piézométrie

L'illustration 80 permet de visualiser la localisation des points suivis annuellement et des points suivis plus régulièrement sur la zone « Bordeaux sud » dans le cadre de la « Surveillance et la Gestion des nappes d'eaux souterraines en Gironde ».

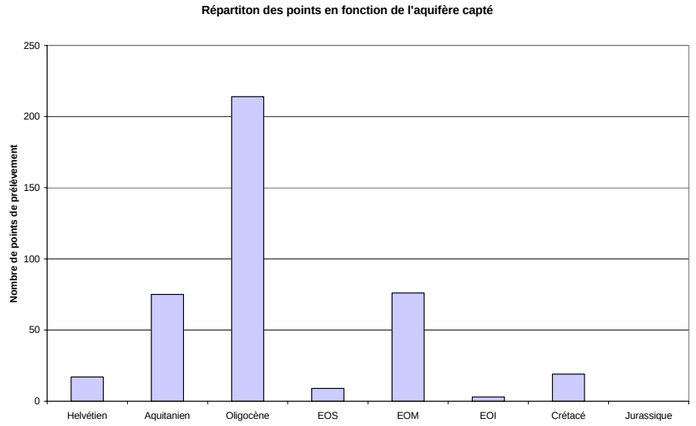
Il apparaît que la densité des points suivis régulièrement est assez homogène bien que les points soient un peu moins nombreux au sud de la zone.

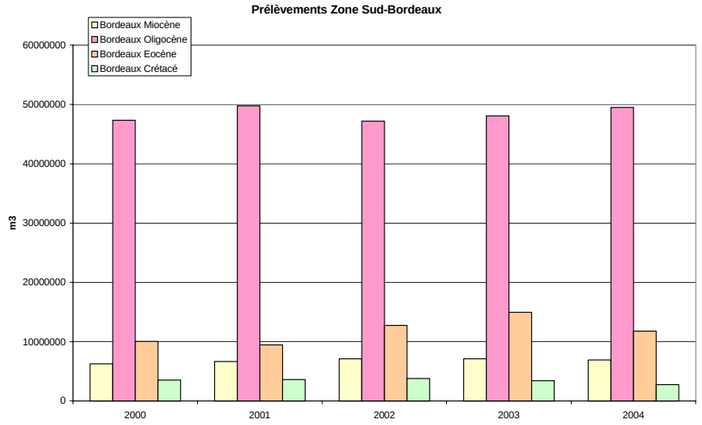
Qualité

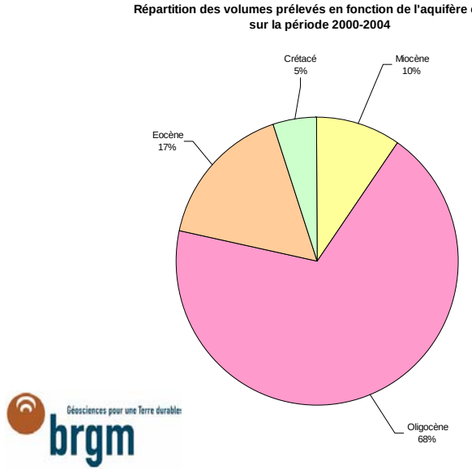
L'illustration 81 permet de visualiser la localisation des points faisant l'objet d'analyses chimiques régulières sur la zone « Bordeaux sud » dans le cadre de la « Surveillance et la Gestion des nappes d'eaux souterraines en Gironde ».

Les fréquences d'analyses sont précisées dans les tableaux de l'annexe 4 pour les points du réseau de la Gestion des nappes profondes de Gironde.

La fréquence d'analyse des captages AEP varie, quant à elle, en fonction du volume prélevé mais aussi parfois en fonction des molécules recherchées. A titre d'indication, les volumes prélevés en 2004 ont été mentionnés dans le tableau relatif au réseau sanitaire en annexe 4.







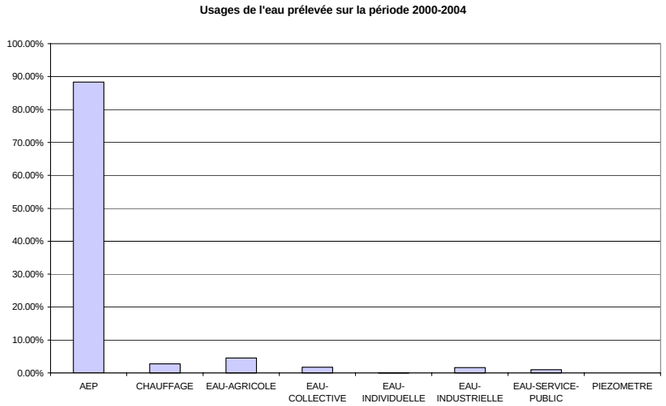


Illustration 80 : Synthèse des données concernant les prélèvements effectués sur la zone « Sud Bordeaux »

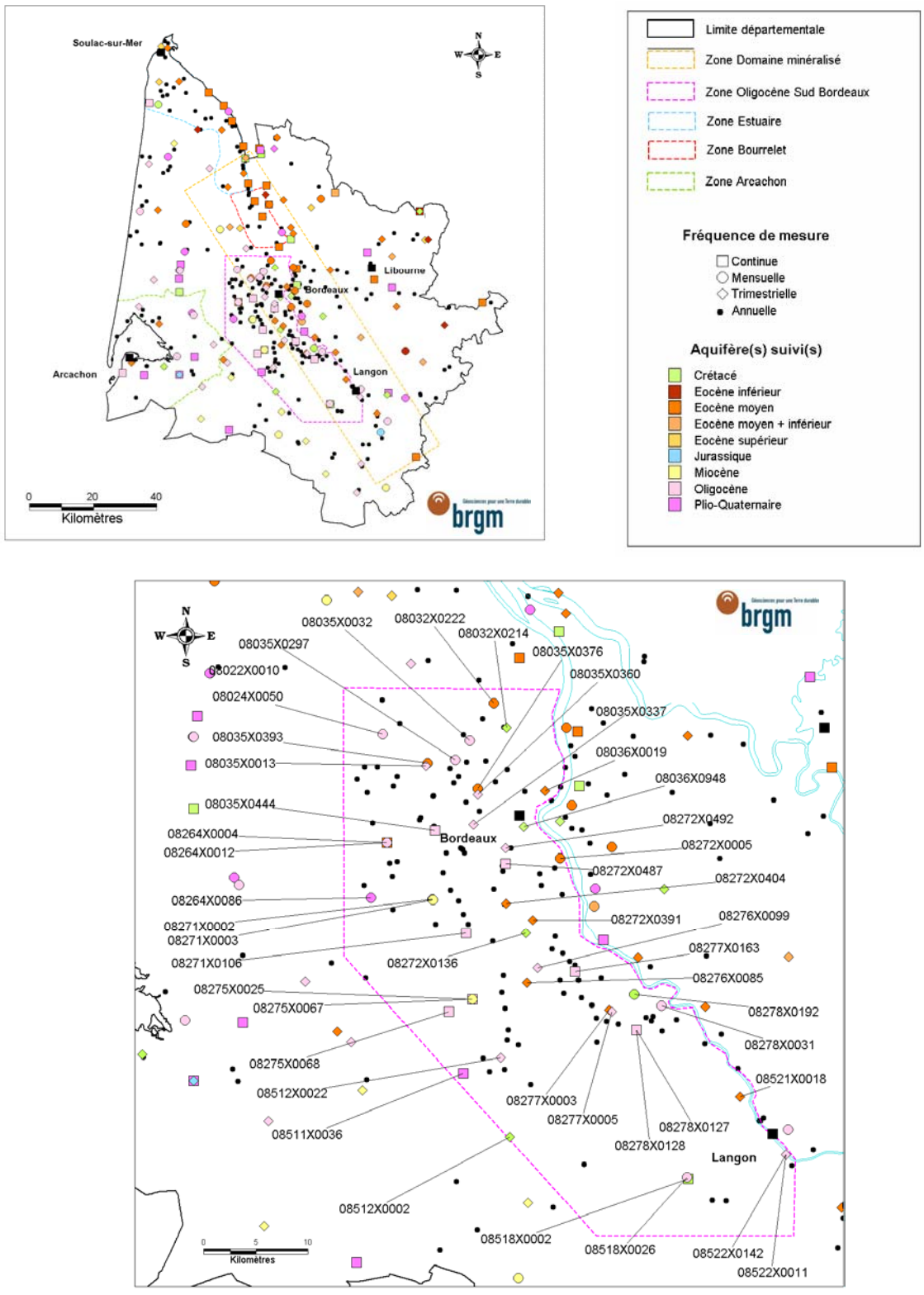


Illustration 81 : Localisation des points de mesure des niveaux d'eau sur la zone "Sud Bordeaux"

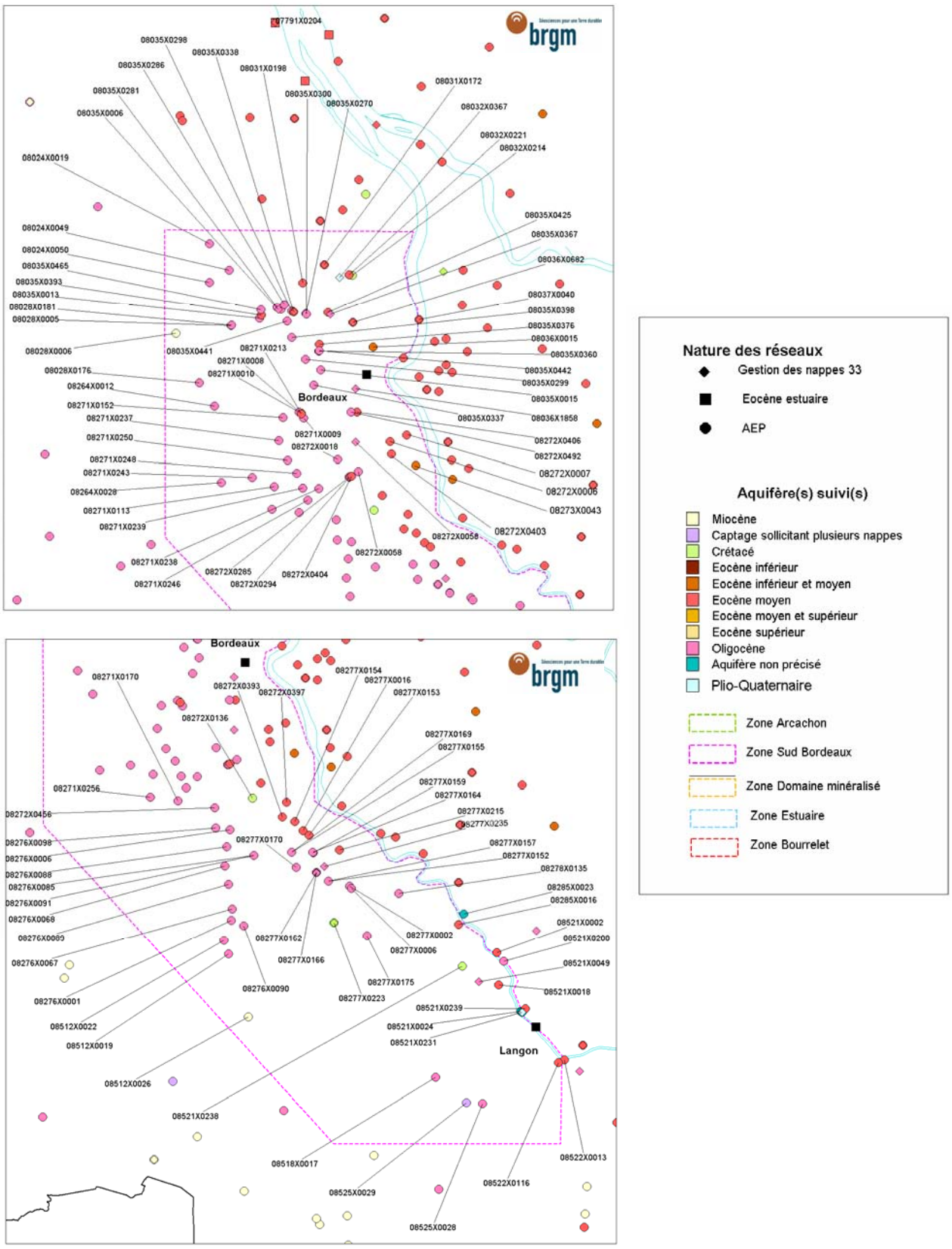


Illustration 82 : Localisation des points de mesure de la qualité sur la zone « Sud Bordeaux »

6.8. BILAN ET PERSPECTIVES

Avec l'Eocène, l'Oligocène constitue une des principales ressources en eau potable du département de la Gironde. Bien que les sources représentent une part importante des prélèvements (environ 1/3 des prélèvements totaux effectués pour l'AEP sur la zone d'étude), l'essentiel de la ressource en eau provient de l'exploitation de forages sollicitant la partie captive de l'aquifère. Cette exploitation intensive a conduit au dénoyage progressif du réservoir dans certains secteurs.

La comparaison effectuée entre les cartes piézométriques de 1980 et 2004, et le modèle géologique de l'Oligocène au pas de 200 m a permis d'identifier deux zones concernées par ce phénomène de dénoyage :

- la plus importante est située à l'est de la ligne de forages (dite des « 100 000 m^3/j ») localisés sur les communes de Léognan et Saucats,

- La seconde, de moindre ampleur, se trouve à proximité de Mérignac.

Le dénoyage du réservoir oligocène entre 1980 et 2004 dans ces deux secteurs correspond à une superficie cumulée de l'ordre de 60 km².

Le travail mené dans le cadre de cette étude a été effectué en première approche. Il n'a pas permis d'aboutir à la réalisation d'une carte de vulnérabilité de la nappe vis-à-vis de l'aléa et seule une carte d'évaluation simplifiée du risque a pu être élaborée.

Il conviendrait de poursuivre le travail sur les aspects quantitatifs par une modélisation hydrogéologique fine afin de mieux préciser les zones dénoyées et de quantifier les aspects qui en découlent (conditions d'exploitation de la nappe, drainances verticales depuis les réservoirs « encadrant » et impact sur le débit des sources et des cours d'eau). La réalisation de scénarios prospectifs permettrait d'évaluer plus précisément les zones à risque.

Compte tenu de l'existence du modèle géologique complet de l'Oligocène au pas de 200 m et du nombre important d'ouvrages disposant de chroniques piézométriques sur la zone d'étude, il serait envisageable d'intégrer ces données, sous la forme d'un « gigogne » dont le pas serait à définir, au sein du modèle régional Nord-Aquitain actuel. Cela permettrait de s'appuyer sur un outil ayant fait l'objet de nombreux développement par ailleurs (réservoirs « encadrant » de l'Eocène et du Miocène notamment).

Parallèlement, une étude détaillée des aspects qualitatifs en relation avec la problématique du dénoyage serait utile à la compréhension et à l'identification des risques liés à la modification des équilibres physico-chimiques.

7. Conclusion

Les investigations menées sur les 5 zones préalablement identifiées comme à risques par le SAGE ont permis de montrer que :

- des risques de salinisation existaient sur la zone de « l'Estuaire » et du « Bourrelet » mais qu'ils étaient plus liés à la présence d'eaux fossiles saumâtres ou salées contenues dans les terrasses sous-flandriennes qu'aux eaux de l'estuaire actuel,

- que le risque d'augmentation de la minéralisation des eaux issues de l'Eocène de l'Entre-Deux-Mers était lié à la présence de faciès évaporitiques dans l'Eocène moyen et l'Eocène supérieur mais que ce risque n'était pas gérable de façon globale,

- le risque d'intrusion d'eaux salées dans les aquifères profonds du bassin d'Arcachon ne concernait que l'aquifère de l'Helvétien mais que cet aquifère n'était pas contaminé à l'aplomb du bassin,

- les risques de dénoyage de l'aquifère oligocène étaient liés à l'augmentation des pompages et qu'ils concernaient principalement le secteur de Saucats-Léognan et dans une moindre mesure, celui de Mérignac.

Les investigations menées ont aussi mis en évidence un manque d'éléments de référence pour la gestion de ces risques.

Les niveaux de pression en dessous desquels les phénomènes de salinisation de la nappe éocène par les terrasses sous-flandriennes ou l'estuaire pourraient devenir plus importants restent, par exemple, à définir.

Une meilleure connaissance de l'extension des niveaux évaporitiques de l'Eocène moyen et supérieur et des mécanismes d'échange entre les différents niveaux aquifères de l'Eocène pourrait aussi permettre de mieux expliquer l'évolution des teneurs observées sur les forages.

Enfin, une modélisation hydrogéologique fine de l'Oligocène dans la région bordelaise permettrait de mieux préciser les zones dénoyées et de quantifier les aspects qui en découlent (conditions d'exploitation de la nappe, drainances verticales depuis les réservoirs « encadrant » et impact sur le débit des sources et des cours d'eau).

Il apparaît donc possible d'améliorer l'état des connaissances sur au moins 4 des 5 zones préalablement identifiées en vue d'une gestion plus cohérente du risque.

Bibliographie

Alvinerie J., Gayet J., Pratviel L., Dubreuilh J. (1977) – Carte géologique de la France (1/50 000), feuille Pessac (827) - Orléans : BRGM - Notice explicative 33 p. - Edit. BRGM

Astié H. (1964) – Etude hydrogéologique de la nappe du Miocène dans le sud-ouest du bassin d'Aquitaine. Thèse 3°cycle Univ. Bordeaux, 129 p.

Astié H., Marionnaud J.M. (1968) – Essai sur la répartition des transmissivités dans un aquifère captif hétérogène. Application à la nappe du Miocène dans la région du bassin d'Arcachon (Gironde). *Rapport BRGM 68 SGL 159 AQI,* 20 p., 11 fig.

Bellegarde R., Bonnery H., Hosteins L. (1980) – Gestion des nappes en Aquitaine. Compte-rendu annuel de surveillance 1980. Nappes des sables éocènes en Gironde et des calcaires oligocènes en rive gauche de la Gironde-Garonne. *Rapport BRGM 80 SGN 723 AQI,* 24 p., 25 fig., 2 pl.

Bonnery H., Sourisseau B. (1990) - Contrôle de la qualité et gestion des nappes d'eau souterraines en Gironde. Compte-rendu annuel de 1990. Etat fin 1989. *Rapport BRGM R 31553 AQI 4S 90,* 92 p., 101 fig., 12 ann.

Bonnet M., Moussie B., Sauty J. P. (1974) – L'exploitation des eaux en domaine littoral. Exemples des côtes du Bassin aquitain. Présentation du modèle INTRANS. *Rapport BRGM 74 SGN 368 AME,*55 p., 37 p.

Branellec M. (2004) - Etude de la qualité de la nappe de l'Oligocène à l'amont de Bordeaux. Rapport de stage BRGM, 33 p.

Capdeville J.P. (1987) - Synthèse paléogéographique et structurale des dépots fluvio-lacustres tertiaires du nord du Bassin Aquitain entre Lot et Dordogne. Thèse Doctorat d'Etat ès-Sciences, Bordeaux III. *Document BRGM* n°175 (1989), 295 p.

Capdeville J.P. (2003) : Carte géologique de la France (1/50 000), feuille Moissac (904) - Orléans : BRGM - Notice explicative 52 p. - Edit. BRGM

Cavelier C., Friès G., Lagarigue J.L., Capdeville J.P. (1997) : Sédimentation progradante au Cénozoïque inférieur en Aquitaine méridionale. *Géologie de la France, 1997-* n°4, p. 69-79.

C.G.G. (1969) - Reconnaissance par prospection électrique le long du littoral atlantique entre Soulac- Amélie et Cazaux et sur les rives de la Gironde. *Rapport CGG*, 34 p., 16 pl.

Chapoutot G. (1965) – Les eaux souterraines du Tertiaire dans la région du bassin d'Arcachon. Thèse 3°cycle Univ. Bordeaux, 102 p., 12 ann., 45 pl.

Chéry L., Dusseau P. et Sourisseau B. (1994) - Diagnostic de l'accroissement de la salinité des nappes profondes de l'Eocène moyen en Gironde. *Rapport BRGM R 37998 SGN SP 94*, 56 p.

Corbier P., Mazurier C., Mauroux B., Winckel A. (2005) – Contrôle qualité et gestion des nappes d'eaux souterraines en gironde - Année 2004 - investigations préalables à la mise en place d'un réseau qualité sur la nappe de l'Eocène inférieur à moyen du domaine minéralisé. *Rapport BRGM /RP-53973-FR*

Crouzel F. (1957) - Le Miocène continental du bassin d'Aquitaine. *Bull. Serv. Carte géol. Fr.,* t.LIV, N° 248, 264 p., 62 fig., 1 pl. h. t.

Curnelle (1983) – Evolution structuro-sédimentaire du Trias et de l'Infra-Lias d'Aquitaine. *Bull. Centres Rech. Explor. prod. Elf-Aquitaine*, **7**, 1, p. 68-79.

Daum J.R., avec la collaboration de **Bakalowicz M., Chery L., Longin G.** (1996) - Méthodes et moyens de contrôle des biseaux salés dans les aquifères littoraux. *Rapport BRGM R 38847,* 77 p., 27 fig., 5 tab.

Dubreuilh J., (1982) - Carte géologique de la France (1/50 000), feuille Coutras (780) Orléans-BRGM. Notice explicative 26 p. - Edit. BRGM

Dubreuilh J. (1987) : Synthèse paléogéographique et structurale des dépôts fluviatiles tertiaires du nord du bassin d'Aquitaine. Passage aux formations palustres, lacustres et marines. Thèse Doctorat d'Etat ès-Sciences, Univ. Bordeaux III, *Document BRGM* n°172 (1989), 461 p.

Dubreuilh J., Bouchet J.M. (1992) - Carte géologique de la France (1/50 000), feuille Arcachon (825). - Orléans : BRGM - Notice explicative 53 p. - Edit. BRGM

Dubreuilh J., Capdeville J.P., Farjanel G., Karnay G., Platel J.P, Simon-Coincon R. (1995) - Dynamique d'un comblement continental durant le Néogène et le Quaternaire : l'exemple du Bassin d'Aquitaine. *Géologie de la France*, 1995- n°4, p. 3 - 26

Feral A. (1970) - Interprétation sédimentologique et paléogéographique des formations alluviales de l'estuaire de la Gironde et de ses dépendances marines. Thèse 3° cycle Bordeaux I, 158 p.

Gayet J. (1985) - L'ensemble des environnements oligocènes nord-aquitains. Un modèle de plate-forme marine stable à sédimentation carbonatée. Thèse Doctorat d'Etat ès-Sciences, Bordeaux I (1980). *Mémoire de l'I.G.B.A.*, n° spécial, 541 p.

Karnay G., Dubreuilh J., Bouchet J.M. (1992) - Carte géologique de la France (1/50 000), feuille La Teste-de-Buch (849). - Orléans : BRGM - Notice explicative 52 p.- Edit. BRGM

Landry J. (1969) - Reconnaissance géologique dans l'estuaire de la Gironde - Résultats et interprétation des coupes lithologiques de sondages. *Rapport BRGM 69 SGL 137 AQI*, 31 p., 17 pl., 330 annexes

Larroque F. (2004) – Gestion globale d'un système aquifère complexe. Application à l'ensemble multicouche médocain. Thèse 3°cycle Univ. Bordeaux III, 254 p..

Pédron N., (2005) - Gestion des eaux souterraines en région Aquitaine - Développements et maintenance du modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes - Module 4 - Année 2. *Rapport BRGM/RP-53659-FR,*

Pédron N., Seguin JJ., Bichot F. (2001) - Gestion des eaux souterraines en Aquitaine - année 5 - Evaluation des ressources modélisation des aquifères du Miocène. Calage et simulations. *Rapport BRGM/RP-51176-FR,* 75 p., 48 fig., 18 tab.

Pédron N., Seguin J.J., Capdeville J.P. (2003) - Gestion des eaux souterraines en région Aquitaine - Développements et maintenance du modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes - Module 4 - Année 1. *Rapport BRGM/RP-52602-FR,* 56 p., 25 fig., 5 tab., 7 ann.

Platel J.P. (1987) - Le Crétacé supérieur de la plate-forme septentrionale du bassin d'Aquitaine. Stratigraphie et évolution géodynamique. Thèse Doctorat d'Etat ès-Sciences, Univ. Bordeaux III. *Documents BRGM*, n°164 (1989), 573 p.

Platel J.P. (2001) - SAGE Nappes Profondes – Gironde. Etat des connaissances à fin 2000 concernant les risques de salinisation de l'aquifère éocène moyen en Gironde. Suivi du réseau des piézomètres d'alerte. *Note BRGM 01 AQI 09*

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'Eocène. 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., 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'Eocène. 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'Eocène. Réalisation des piézomètres. Etat des connaissances hydrochimiques. *Rapport BRGM R 40113*, 82 p., 43 fig., 5 annexes, 4 planches h.t.

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'Eocène 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., Schnebelen N., Le Nindre Y. et Sourisseau B. (2000) - Gestion des Eaux souterraines en Aquitaine - Année 4 - Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise. Synthèse des connaissances géologiques - Etat des connaissances hydrogéologiques. *Rapport BRGM/RP-50468-FR*, 70 p., 36 fig., 5 cartes 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'Eocène au sud de l'estuaire de la Gironde. Année 2 – Extension du réseau de piézométres en doublets. Suivi du réseau de surveillance PZEM. *Rapport BRGM/RP-53657-FR*, 111 p., 33 fig., 12 tab., 3 annexes

Pratviel L. (1972) – Essai de cartographie structurale et faciologique du bassin sédimentaire ouest aquitain pendant l'Oligocène. Thèse Doctorat d'Etat ès-Sciences, Univ. Bordeaux, 2 tomes, 632 p.

Préfecture de la Gironde (2005) – SAGE Nappes Profondes de la Gironde. Les orientations de gestion. 64 p.

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'Eocène. Suivi du réseau d'alerte. *Rapport BRGM/RP-50467-FR*, 56 p., 23 fig., 2 annexes

Schnebelen N., Platel J.P., Le Nindre Y et Baudry D. (2002) – Opération sectorielle Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise / Nouvelles connaissances hydrogéologiques : Cartographie de la vulnérabilité aux pollutions. *Rapport BRGM/RP-51178 – FR*, 75 p.

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'Eocène. Suivi du réseau d'alerte. *Rapport BRGM/RP-50467-FR*, 113 p., 37 fig., 3 annexes

Serrano O. (2001) - Le Crétacé supérieur - Paléogène du bassin compressif nord-pyrénéen (bassin de l'Adour). Sédimentologie, stratigraphie, géodynamique. Thèse d'Université, Univ. Rennes 1, 181 p.

Winckel A., Mazurier C., Mauroux B., Dubreuilh J. avec la collaboration de **Dufour P. et Benhammouda S.** (2004) - Contrôle qualité et gestion des nappes d'eau souterraine en Gironde. Etat des connaissances à fin 2003. *Rapport BRGM/RP-53085-FR,* 169 p., 65 fig. ht.

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Aquitaine
Europarc
24 Rue Léonard de Vinci
33600 - Pessac - France
Tél. : 05 57 26 52 70