

CARISMEAU : Caractérisation isotopique et géochimique des masses d'eau dans le bassin Adour Garonne : interconnexions et hétérogénéités

Rapport de phase 1

BRGM/RP-55069-FR
Décembre 2006

Document public

CARISMEAU : Caractérisation isotopique et géochimique des masses d'eau dans le bassin Adour Garonne : interconnexions et hétérogénéités

Rapport de phase 1

BRGM/RP-55069-FR
Décembre 2006

Étude réalisée dans le cadre des projets de Recherche du BRGM 2006 - PDR06MPY01

Ph. Négrel, A. Colin, E. Petelet-Giraud, A. Brenot, R. Millot et S. Roy

Vérificateur :

Nom : INNOCENT Christophe

Date :

Signature :

(Ou Original signé par)

Approbateur :

Nom : DUTARTRE Philippe

Date :

Signature :

(Ou Original signé par)

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

Mots clés : aquifère, Eocène, Sables infra-molassiques, Paléocène, structure, lithologie, variation latérale de faciès, diagraphies, paramètres de terrain, validité des mesures, hétérogénéités, homogénéité, circulation, connexion, chimie, diagramme de Piper, éléments majeurs, rapports normés par rapport au sodium, indice de saturation, isotopes

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

NEGREL, Ph., COLIN, A., PETELET-GIRAUD, E., BRENOT, A., MILLOT, R. et ROY, S., 2006. CARISMEAU : Caractérisation isotopique et géochimique des masses d'eau dans le bassin Adour Garonne : interconnexions et hétérogénéités. Rapport de phase 1. Rapport BRGM/RP-55069-FR. 128 p., 62 ill.

Synthèse

Le projet Carismeau est un projet de recherche, financé par l'agence de l'eau Adour-Garonne et le BRGM, ayant pour objectif de caractériser les différentes masses d'eau souterraine profondes du bassin Adour-Garonne en précisant les hétérogénéités à l'intérieur d'une même masse d'eau et les interconnexions entre elles. La nappe des Sables infra-molassiques ainsi que les aquifères du Paléocène et de l'Eocène contenu dans les masses d'eau 5082 « Sables, calcaires et dolomies de l'Eocène-Paléocène captif du sud du bassin Adour-Garonne » et 5071 « Sables, graviers, galets et calcaires de l'Eocène nord du bassin Adour-Garonne », ont été étudiés afin de mieux comprendre leur fonctionnement hydrogéochimique et de confronter cette approche aux connaissances hydrogéologiques existantes.

Ce rapport présente l'avancée des travaux à la fin de novembre 2006, au terme de la première année de cette étude.

La compilation synthétique des connaissances hydrogéologiques et chimiques sur les aquifères considérés a permis de faire état de la dynamique, de la composition minéralogique ainsi que des variabilités chimiques des eaux connues pour ces niveaux aquifères.

Au printemps 2006, des diagraphies physico-chimiques des eaux souterraines ont été réalisées sur 8 forages et 42 points de prélèvements d'eau ont été réalisés afin de couvrir toute l'étendue spatiale des aquifères considérés. Ces diagraphies montrent des variations, mais il faut rester prudent quant à leur signification en termes d'hétérogénéités latérales ou de stratifications verticales des masses d'eau souterraine. En revanche les données concernant la chimie des eaux et les premiers résultats des analyses isotopiques des échantillons d'eau prélevés montrent une grande hétérogénéité au sein des niveaux aquifères. Les aquifères considérés présentent des signatures géochimiques contrastées allant d'eaux faiblement minéralisées à des eaux très minéralisées, ayant largement interagi avec des niveaux évaporitiques. Ces disparités ne peuvent être rattachées pour l'instant à des variabilités spatiales simples, mais la poursuite de l'étude, et notamment l'analyse de la deuxième campagne d'automne 2006, devraient permettre de dégager les facteurs de contrôle de la composition hydrogéochimique de ces aquifères.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Connaissances hydrogéologiques et chimiques	14
2.1. INTRODUCTION : MISE EN PLACE DU BASSIN D'AQUITAINE	14
2.1.1. Histoire géologique du bassin d'Aquitaine :	15
2.1.2. Schéma structural	20
2.2. LES AQUIFERES EOCENES DU BASSIN D'AQUITAINE	23
2.2.1. Description des formations aquifères de la partie Sud	23
2.2.2. Description des formations aquifères de la partie Nord	24
2.2.3. Dynamique de l'aquifère : carte piézométrique et fonctionnement hydrogéologique	30
2.2.4. Chimie : éléments majeurs et traces, données isotopiques	32
2.3. L'AQUIFERE DES SABLES INFRA-MOLASSIQUES	33
2.3.1. Description du faciès aquifère	33
2.3.2. Dynamique de l'aquifère : carte piézométrique et fonctionnement hydrogéologique	39
2.3.3. Chimie : éléments majeurs et traces, données isotopiques	41
2.4. L'AQUIFERE PALEOCENE (OU « DANO-PALEOCENE »)	44
2.4.1. Description du faciès aquifère	44
2.4.2. Dynamique de l'aquifère : fonctionnement hydrogéologique	45
2.4.3. Chimie : éléments majeurs et traces, isotopes	46
3. Les diagraphies physico-chimiques des eaux souterraines	49
3.1. OBJECTIF ET CONTEXTE	49
3.2. LA METHODE	50
3.2.1. Les outils des diagraphies :	50
3.2.2. Protocole	51
3.2.3. Les limites de la méthode	51
3.3. CAS D'APPLICATION	53
3.3.1. Les diagraphies de l'aquifère des Sables infra-molassiques :	55
3.3.2. Eocène moyen	65
3.3.3. Paléocène	67

3.3.4. Interprétation :	70
4. Chimie des eaux souterraines : campagne de prélèvement de mai 2006.....	77
4.1. PROTOCOLE ET ANALYSES	77
4.2. RESULTATS ET INTERPRETATION :	84
4.2.1. Les paramètres de terrain :	84
4.2.2. Validité des mesures chimiques effectuées en laboratoire	86
4.2.3. Diagramme de Piper : faciès chimique des eaux.....	87
4.2.4. Les relations inter-éléments	89
4.2.5. Rapports normés par rapport à Na	97
5. Approche isotopique des eaux souterraines : campagne de prélèvement de mai 2006	102
5.1. DESCRIPTION DES OUTILS UTILISES	102
5.1.1. Les isotopes stables de la molécule d'eau.....	102
5.1.2. Les isotopes du bore.....	102
5.1.3. Les isotopes du lithium.....	103
5.1.4. Les isotopes du soufre et de l'oxygène des sulfates.....	104
5.1.5. Les isotopes du strontium	105
5.1.6. Les isotopes du plomb	105
5.2. PREMIERS RESULTATS DE L'APPROCHE ISOTOPIQUE	106
5.2.1. Les isotopes du lithium ($\delta^7\text{Li}$)	106
5.2.2. Les isotopes du soufre et de l'oxygène des sulfates.....	108
5.2.3. Les isotopes du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)	110
5.2.4. Les isotopes du bore ($\delta^{11}\text{B}$)	112
6. Descriptif de la seconde campagne de prélèvements : octobre 2006	114
7. Communication	116
7.1. LE SITE WEB DU PROJET CARISMEAU	116
7.2. VALORISATION SCIENTIFIQUE.....	118
7.2.1. Valorisation au cours de la première année du projet (2006)	118
7.2.2. Valorisation au cours de la seconde année du projet (2007).....	118
8. Conclusion.....	119
9. Bibliographie	121

Liste des Illustrations

Illustration 1 : Carte de localisation des 42 points de prélèvement par masse d'eau et par aquifère (P =Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)	12
Illustration 2 : Localisation des points de prélèvement de la campagne de printemps 2006 (P =Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)	13
Illustration 3 : Paléogéographie schématique au Paléocène [extraite de Serrano et al., 2006]	17
Illustration 4 : Paléogéographie schématique à l'Eocène inférieur [extraite de Serrano et al., 2006]	18
Illustration 5 : Paléogéographie schématique à Oligocène [extraite de Serrano et al., 2006]	19
Illustration 6 : Paléogéographie schématique à Miocène [extrait de Serrano et al., 2006]	20
Illustration 7 : Schéma structural du Sud de l'Aquitaine (source ?)	21
Illustration 8 : carte de faciès de l'Eocène dans le bassin d'Aquitaine [d'après Astie et Chamayou (1977)]. Les points de prélèvement de cette étude sont représentés en rouge pour l'Eocène inférieur, en vert pour l'Eocène moyen et bleu pour l'Eocène supérieur.	25
Illustration 9 : coupe synthétique de l'Eocène dans le secteur de la Gironde [d'après Platel, 1997]	27
Illustration 10 : coupe Sud-Ouest Nord-Est effectuée dans l'estuaire de la Gironde, au Sud immédiat du point EM-1 (N° BSS : 07305X0001) [d'après Platel, 1997]	28
Illustration 11 : coupe Sud-Ouest Nord-Est effectuée dans l'estuaire de la Gironde, passant par le point ES-3 (N° BSS : 07542X0001) [d'après Platel, 1997]	29
Illustration 12 : coupe Sud-Ouest Nord-Est effectuée dans l'estuaire de la Gironde, à proximité du point EM-3 (N° BSS : 07547X0068) [d'après Platel, 1997]	29
Illustration 13 : coupe Sud-Ouest Nord-Est effectuée dans l'estuaire de la Gironde, passant par le point EM-4 (N° BSS : 07796X0110) [d'après Platel, 1997]	30
Illustration 14 : piézométrie, paramètres hydrodynamiques et minéralisation de l'Eocène moyen [Lachassagne et al., 1998]	31
Illustration 15 : zones d'infiltration, circulation et exutoires de l'aquifère Eocène du bassin Nord-Aquitain [Moussié, 1972]	32
Illustration 16 : écorché géologique sous la formation des Sables infra-molassiques dans la région Midi-Pyrénées [Kuhn et Roche, 1969]	34
Illustration 17 : répartition schématique des différents faciès de la formation des Sables infra-molassiques à l'Est du bassin : [d'après Kuhn, 1969]	35
Illustration 18 : coupe au niveau du forage SIM-1 (N° BSS : 09293X0123) [Roche, 1970]	36
Illustration 19 : coupe au niveau du forage SIM-7 (N° BSS : 09838B0203) [Roche, 1970]	37

Illustration 20: coupe au niveau du forage SIM-8 (N° BSS : 10098A0004) [Roche, 1970]	38
Illustration 21 : piézométrie, paramètres hydrodynamiques et minéralisation des sables Infra-molassiques [Lachassagne et al., 1998]	39
Illustration 22 : carte des schémas d'écoulement résultant des contraintes géochimiques [André, 2002]	41
Illustration 23 : répartition géographique des différents faciès des eaux de l'aquifère des Sables infra-molassiques [André, 2002]	42
Illustration 24 : représentation géographique des résultats isotopiques obtenus pour le soufre-34 des sulfates dissous dans les SIM [André et al., 2002]	43
Illustration 25 : distribution de l'activité en carbone-14 des eaux des Sables infra-molassiques [André, 2002]	44
Illustration 26 : Caractéristiques de la sonde multiparamétrique Idronaut ocean seven 303 utilisée lors du projet Carisneau [d'après : http://idronaut.it]	50
Illustration 27 : localisation des diagraphies effectuées par le BRGM pour le projet Carisneau – mai 2006 (P =Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)	52
Illustration 28 : campagne de prélèvement de mai 2006 ; descente d'une sonde Idronaut dans le forage SIM-8 (N° BSS : 10098A0004)	53
Illustration 29 : diagraphie SIM-1 (N° BSS : 09293X0123)	54
Illustration 30 : diagraphie SIM-2 (N° BSS : 09546X0022)	56
Illustration 31 : diagraphie SIM-3 (N° BSS : 10072X0026)	58
Illustration 32 : diagraphie SIM-4 (N° BSS : 10122X0055)	60
Illustration 33 : diagraphie SIM-8 (N° BSS : 10098A0004)	62
Illustration 34 : diagraphie EM-10	64
Illustration 35 : diagraphie P-3 (N° BSS : 10078X0001)	66
Illustration 36 : diagraphie P-4 (N° BSS : 09507X0048)	68
Illustration 37 : diagramme représentant la conductivité de l'eau en fonction de la température mesurées lors des diagraphies de la campagne mai 2006 (P =Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)	70
Illustration 38 : diagramme représentant la conductivité en fonction du pH mesurés lors des diagraphies de la campagne mai 2006 (P =Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)	73
Illustration 39 : diagramme représentant le potentiel électrique en fonction du pH mesurés lors des diagraphies de la campagne mai 2006 (P =Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)	74
Illustration 40 : diagramme représentant la conductivité électrique, en fonction du pourcentage d'O2 dissout par rapport à une eau saturée, mesurés lors des diagraphies de la campagne mai 2006 (P =Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)	75

Illustration 41 : diagramme représentant le potentiel rédox en fonction du pourcentage d'O ₂ dissout par rapport à une eau saturée, mesurés lors des diagraphies de la campagne mai 2006 (P =Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)	76
Illustration 42: éléments mesurés lors de la mission mai 2006	77
Illustration 43 : préleveur de fond utilisé lors de la campagne de mai 2006	79
Illustration 44: boîtiers pour mesure du potentiel rédox et de la conductivité	80
Illustration 45 : filtre à eau et échantillons de prélèvement	81
Illustration 46 : paramètres de terrain mesurés en surface pour les échantillons prélevés lors de la mission mai 2006 du projet Carismeau (P =Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)	82
Illustration 47 : a) diagramme TDS en fonction de la conductivité électrique de l'eau - b) diagramme somme des anions (Σ^-) en fonction de la somme des cations (Σ^+) - c) balance ionique en fonction de la somme des cations (Σ^+).	85
Illustration 48 : diagramme de Piper pour les points de prélèvement de la mission mai et juin 2006 – projet Carismeau (P =Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)	87
Illustration 49 : graphiques éléments majeurs versus chlorures pour les points de prélèvement de la mission mai et juin 2006, projet Carismeau (P =Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)	90
Illustration 50 : graphiques éléments majeurs versus chlorures pour les points de prélèvement de la mission mai 2006, projet Carismeau (P =Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)	94
Illustration 51 : graphiques binaires d'éléments majeurs pour les points de prélèvement de la mission mai 2006, projet Carismeau (P =Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)	96
Illustration 52: rapports molaires moyens normés par rapports à Na de Ca, Mg, HCO ₃ , SO ₄ et K dans des eaux drainant une mono-lithologie.	98
Illustration 53 : diagrammes binaires des éléments majeurs normés par rapport à Na (rapports molaires) – mission mai et juin 2006 du projet Carismeau (P =Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)	99
Illustration 54 : diagrammes binaires des éléments majeurs normés par rapport à Na (rapports molaires) – mission mai et juin 2006 du projet Carismeau (P =Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)	101
Illustration 55 : Relation entre la composition isotopique du lithium ($\delta^7\text{Li}$ en ‰) et la concentration en Li ($\mu\text{g/l}$). L'erreur analytique sur le $\delta^7\text{Li}$ est de ± 0.5 ‰. (P =Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)	107
Illustration 56: Relation entre la composition isotopique en soufre des sulfates ($\delta^{34}\text{S}$ en ‰) et la concentration en sulfates (mg/l). L'erreur analytique sur le $\delta^{34}\text{S}$ est de ± 0.2 ‰.	

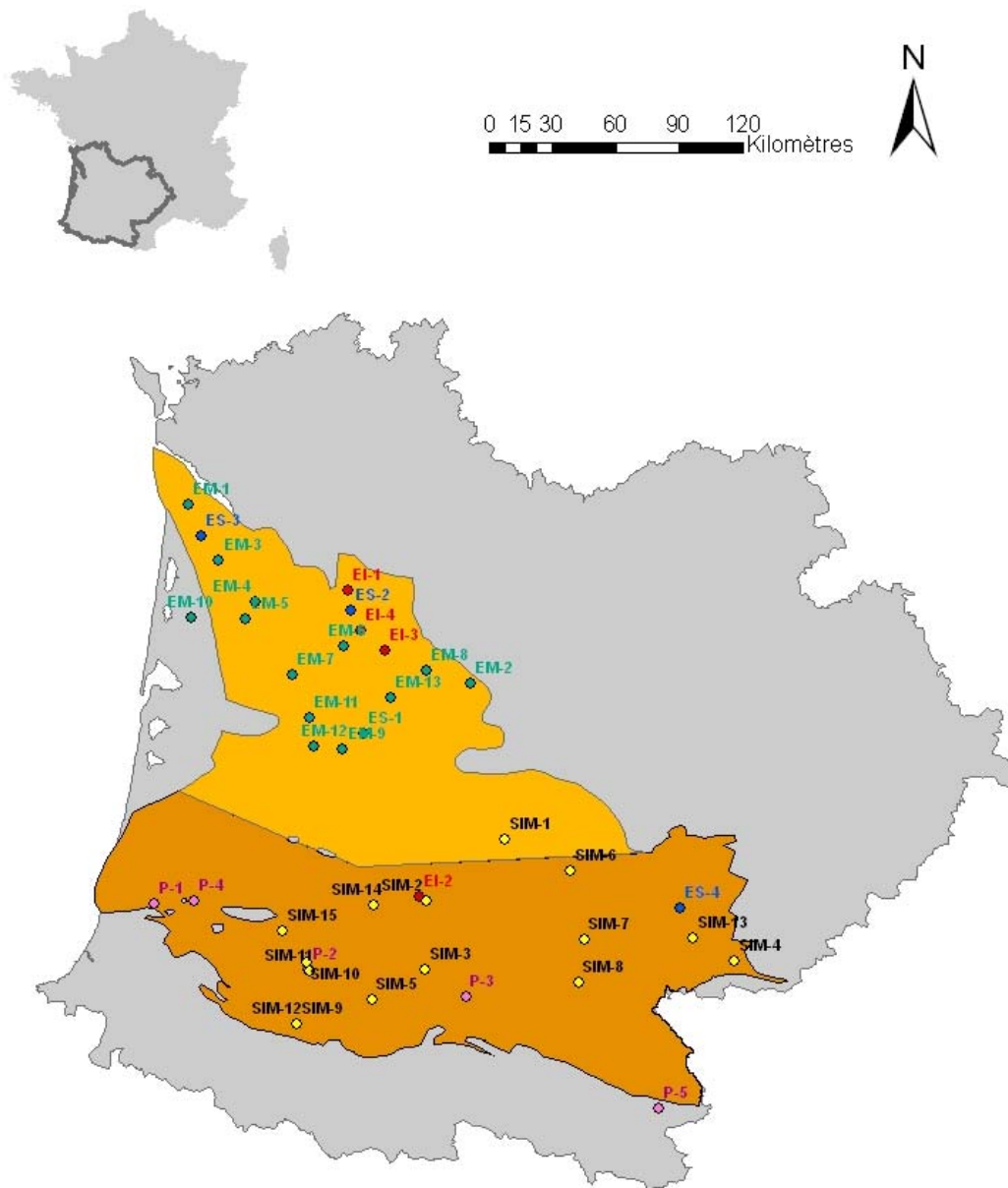
(P =Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)	109
Illustration 57 : Rapport isotopique du Sr en fonction de la teneur en Sr dans les différents aquifères, campagne de mai 2006 (P =Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)	111
Illustration 58 : Rapport isotopique du bore en fonction de la teneur en bore dans les différents aquifères, campagne de mai 2006 (P =Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)	112
Illustration 59 : Carte de localisation des points d'échantillonnage de la seconde campagne de prélèvements (octobre 2006) (P =Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)	114
Illustration 60 : Carte de localisation des diagraphies réalisées lors de la seconde campagne de prélèvements (octobre 2006). Légende identique à l'illustration 59	115
Illustration 61 : Structure du site web CARISMEAU (http://carismeau.brgm.fr)	116
Illustration 62 : Capture d'écran du site web, page d'accueil et communication	117

1. Introduction

Le projet Carismeau est un projet de recherche financé conjointement par l'agence de l'eau Adour-Garonne et le BRGM ayant pour objectif de caractériser les différentes masses d'eau souterraine profondes du bassin Adour Garonne en précisant les hétérogénéités à l'intérieur d'une même masse d'eau et les interconnexions entre elles. Il s'inscrit étroitement dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau. Ce projet vise à fournir :

- La caractérisation de la composition chimique des eaux souterraines, y compris la spécification des contributions découlant des activités humaines, à l'aide d'outils isotopiques permettant de caractériser les interconnexions et hétérogénéités des masses d'eau.
- Les caractéristiques de stratification de l'eau souterraine au sein de la masse d'eau
- Des estimations des directions et des échanges d'eau entre les masses d'eau souterraine.

Cette étude s'intéresse à la nappe des Sables Infra-Molassiques contenue essentiellement dans les masses d'eau 5082 « Sables, calcaires et dolomies de l'Eocène-Paléocène captif du sud du bassin Adour-Garonne » et 5071 « Sables, graviers, galets et calcaires de l'Eocène nord du bassin Adour-Garonne » (Illustration 1), ainsi qu'aux aquifères de l'Eocène et du Dano-Paléocène de ces mêmes masses d'eau. Deux campagnes de prélèvement ont été réalisées, la première en mai et juin 2006 et la seconde en octobre 2006. Lors de ces campagnes, des prélèvements d'eau pour des analyses chimiques et isotopiques ainsi que des diagraphies physico-chimiques ont été effectuées. Les points d'étude ont été répartis sur l'ensemble du territoire Adour-Garonne, dans les aquifères du Paléocène, de l'Eocène et des Sables Infra-Molassiques. Pour la campagne du printemps 2006, dont il sera propos dans le présent rapport, 42 points de prélèvement ont été retenus avec comme objectif de couvrir toute l'étendue spatiale des aquifères considérés. Dans la suite du rapport, les points de prélèvement sont désignés par un code dont les premières lettres rappellent le niveau aquifère auquel ils appartiennent : P pour Paléocène, EI pour Eocène inférieur, EM pour Eocène moyen, ES pour Eocène supérieur et SIM pour Sables Infra-Molassiques. La liste des points de prélèvement de la campagne du printemps 2006 et leur répartition géographique figurent respectivement sur l'illustration 1 et illustration 2.



Légende

- Points échantillonnés lors des campagnes de mai et juin 2006**
- Masse d'eau 5071
 - Masse d'eau 5082
 - Agence de l'eau Adour-Garonne
- Aquifères**
- Sables Infra-Molassiques
 - Eocène supérieur
 - Eocène moyen
 - Eocène inférieur
 - Paléocène

Illustration 1 : Carte de localisation des 42 points de prélèvement par masse d'eau et par aquifère (P = Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)

CARISMEAU : Caractérisation isotopique et géochimique des masses d'eau dans le bassin Adour
Garonne : interconnexions et hétérogénéités
Rapport de phase 1

Numero point de prélèvement	X Lamb 2 étendu	Y Lamb 2 étendu	INDICE_BSS	nom commune	lieu dit
P-1	321118	1865972	09764X0005	SAINT-PAUL-LES-DAX	SEBASTOPOL
P-2	394049	1835016	10052X0038	LANNECAUBE	BIGORRE
P-3	468423	1821865	10078X0001	MONBARDON	LIEU-DIT AUX TROIS CANTONS, PUYMAURIN 2 (PM2)
P-4	339962	1867078	09507X0048	LOUER	LAVIGNE
P-5	559869	1769123	10765X0112/F	LAVELANET	-
EI-1	412519	2013516	07804X0001	EGLISOTTES-ET-CHALAURES	COMMUNAL
EI-2	446498	1868838	09545X0005	CASTERA-VERDUZAN	THERMES
EI-3	430269	1985342	08057X0030	PORT-SAINTE-FOY-ET-PONCHAPT	GARRIGUES
EI-4	418769	1994689	10121X0013/F	MONTPEYROUX	-
EM-1	336906	2054367	07305X0001	SAINT-VIVIEN-DE-MEDOC	LA LOUBIE
EM-2	470649	1970020	08308X0018	SAINT-LEON-D'ISSIGEAC	LES GRANDES VIGNES
EM-3	351457	2027507	07547X0068	SAINT-SAUVEUR	SABLONNET
EM-4	369012	2008114	07796X0110	AMBES	EKA-NOBEL
EM-5	364322	2000106	08031X0199	PIAN-MEDOC(LE)	COMMUNAL - BOUCHAUD
EM-6	410882	1987148	08048X0048	SAINT-MAGNE-DE-CASTILLON	CHAPOUTERE
EM-7	386089	1973658	08281X0020	HAUX	CHAT_D'EAU
EM-8	449969	1975809	08301X0002	FLAUGEAC	FLAUGEAC
EM-9	410245	1938678	08764X0005	CAUVIGNAC	GRIGNOLS - RIPPES
EM-10	338592	2000734	08022X0008	SAINTE-HELENE	ETANG DE LA LEVADE
EM-11	394304	1953692	08522X0116	LANGON	LES SALIERES
EM-12	396466	1939918	08762X0018	BAZAS	LES POUILLES
EM-13	432944	1963126	08297X0001	AURIAC-SUR-DROPT	LES PIERRES
ES-1	419943	1945950	08535X0020	MARCELLUS	MUSCAT
ES-2	414117	2004351	07808X0006	SAINT-SEURIN-SUR-L'ISLE	SOCAR
ES-3	342777	2039195	07542X0001	LESPARRE-MEDOC	PRADAL
ES-4	569669	1863510	09586X0008/F	GRAUHLET	-
SIM-1	486904	1896122	09293X0123	SAINT-MICHEL	AUVILLAR
SIM-2	450101	1867116	09546X0022	JEGUN	FORAGE DU MASCA LAPEYRETTE
SIM-2	450101	1867116	09546X0022	JEGUN	FORAGE DU MASCA LAPEYRETTE
SIM-3	449425	1834775	10072X0026	IDRAC-RESPAILLES	PRES DE FLOURETTE - PIEZOMETRE DE ST. MEDARD
SIM-4	595819	1838570	10122X0055	LABRUGUIERE	LA BRUGUIERE
SIM-5	423927	1820321	10312X0001	SENAC	SENAC-1 SNC1
SIM-6	518190	1881573	09307X0131	BRESSOLS	INTERMARCHE (S2)
SIM-7	524440	1848886	09838B0203	BLAGNAC	FORAGE DE BLAGNAC, UTILISE POUR LA PISCINE
SIM-8	521745	1828286	10098A0004	EAUNES	MURET 104 (MU104)
SIM-9	388646	1808725	10306X0035	BORDES	BORDES 4 (Angais)
SIM-10	392892	1838283	10052X0006	BUROSSE-MENDOUSSE	GARLIN 1 (Burosse)
SIM-11	394277	1833763	10052X003	LALONGUE	LASSEPE (Lalongue)
SIM-12	388245	1809001	10306X0034	BORDES	BORDES 3 (Anga's)
SIM-13	576316	1849489	09857X0104	LALBAREDE	STATION DE POMPAGE
SIM-14	424459	1865290	09536X0008	DEMU	FORAGE AEP DE DEMU-MANCET
SIM-15	381504	1853200	09788X0004	PECORADE	PECORADE 2 (Geaune 2)

Illustration 2 : Localisation des points de prélèvement de la campagne de printemps 2006 (P = Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)

Ce rapport présente l'avancée des travaux à la fin novembre 2006, au terme de la première année de cette étude, notamment :

- Une première vision, issue d'une synthèse bibliographique, de l'état des connaissances hydrogéologiques et chimiques sur les aquifères du Paléocène, de l'Eocène inférieur, moyen et supérieur et des sables infra-molassiques.
- La présentation des diagraphies physico-chimiques des eaux souterraines réalisées lors de la campagne du printemps 2006 sur 8 forages.
- L'interprétation des données concernant la chimie des eaux et les premiers résultats des analyses isotopiques pour la campagne du printemps 2006.
- Le descriptif du déroulement de la 2^{ème} campagne de l'automne 2006.
- La valorisation du projet Carisneau (site web et communications scientifiques).

2. Connaissances hydrogéologiques et chimiques

Dans le district Adour-Garonne, les aquifères du Dano-Paléocène, de l'Eocène et des Sables infra-molassiques ont une grande importance économique. Ils représentent en effet une part importante des ressources en eau de ce secteur et leur eau est de bonne qualité. Cependant comme toute ressource en eau souterraine, l'exploitation de ces aquifères présente des risques. Prélever une quantité trop importante d'eau peut faire chuter le niveau de la nappe mais également favoriser la contamination de l'aquifère par des eaux de moins bonne qualité en contact hydraulique avec la nappe. C'est pourquoi il est important de connaître la géologie du bassin d'Aquitaine et notamment des couches aquifères, afin :

- d'évaluer la géométrie et l'extension de ces aquifères
- de préjuger d'éventuelles connections entre ces aquifères et d'autres aquifères connus, ainsi que de pré-localiser les exutoires et entrées d'eau
- de préjuger de la chimie de ces aquifères grâce à la connaissance de la lithologie des couches aquifères

Une synthèse des connaissances géologiques, mais aussi hydrauliques et chimiques centrée sur les aquifères éocène, paléocène et des Sables infra-molassiques et plus précisément sur les points sélectionnés pour les analyses chimiques et géochimiques dans le cadre du projet Carismeau, est présentée ci-après.

Cette synthèse servira d'aide à l'interprétation de ces analyses.

La synthèse présentée ci-après ne constitue qu'une introduction résumant de façon synthétique les connaissances actuelles sur le bassin d'Aquitaine. Elle a été réalisée dans l'objectif du projet et doit servir d'appui aux interprétations chimiques et isotopiques. Cette synthèse ne constitue en aucun cas un inventaire exhaustif détaillé et argumenté de l'état des connaissances géologiques et hydrogéologiques à l'échelle du district Adour-Garonne.

2.1. INTRODUCTION : MISE EN PLACE DU BASSIN D'AQUITAINE

Sous le contrôle de contraintes tectoniques et climatiques, différents environnements de dépôt se sont succédé lors de la mise en place du bassin d'Aquitaine. Il n'est pas question ici de retranscrire en détail l'histoire du bassin d'Aquitaine, mais de mieux comprendre grâce aux grandes lignes de cette histoire où et comment se sont

déposées les couches aquifères étudiées dans le projet Carismeau. On s'attachera en particulier à évaluer les variations latérales de la lithologie des couches aquifères et à décrire l'évolution des dépôts dans le temps. De plus la connaissance de la tectonique ayant affecté ce bassin est importante puisqu'elle peut générer des contacts entre couches d'âges différents ou entre différents niveaux aquifères ; elle peut également agir par le biais de structures anticlinales ou synclinales sur l'hydrologie de ces aquifères.

Cette introduction a été réalisée à partir d'informations sélectionnées notamment dans le guide géologique régional « Aquitaine occidentale » (Vigneaux, 1975), mais aussi dans la thèse de Kuhn (1969) et de André (2002) et la valorisation des données sismiques sur le bassin d'Aquitaine réalisée par Serrano et al. (2006). La description structurale du bassin utilise les sources précédentes mais s'inspire fortement de la synthèse de Bourguine et al. (1997) pour la partie Sud du bassin.

2.1.1. Histoire géologique du bassin d'Aquitaine :

A la fin de l'orogénèse hercynienne, le Massif Central et le Massif Armoricaïn qui viennent d'être créés s'enfoncent respectivement vers le Sud-Ouest et le Sud sous les sédiments nouvellement déposés. Sous l'action de contraintes tectoniques, au Sud du futur bassin d'Aquitaine un sillon longeant le front Nord-Pyrénéen se met en place. Ainsi, dans tout le futur bassin d'Aquitaine le socle hercynien se situe à des profondeurs importantes.

Permien et Trias

L'érosion des jeunes massifs hercyniens est active. Les sédiments qui s'accumulent dans le bassin d'Aquitaine sont constitués en grande partie des produits de cette érosion. Au Trias les premiers traits du bassin d'Aquitaine actuel s'esquissent ; un bombement se met en place selon la ligne E-W Toulouse-Arcachon qui va scinder le bassin en deux ensembles. Tandis que le Sud du bassin très subsident est le siège de faciès détritiques et salifères avec quelques intrusions ophitiques, au Nord du bassin se déposent des sables et des argiles rouges. La constance des niveaux salins dans tout le sud du bassin jouera un rôle important dans la tectonique salifère postérieure.

Lias – Jurassique moyen et supérieur

Le bassin d'Aquitaine est immergé. Une sédimentation carbonatée marine suivie d'une sédimentation argilo-marneuse se mettent en place. C'est aussi le début d'un bombement Nord-Sud entre l'ouest du Massif Central et le Béarn. Au Dogger, cet axe sera jalonné de récifs. Cette nouvelle barrière qui prend le relais de celle du Trias sépare le bassin en deux zones, une occidentale et une orientale. La partie occidentale est océanique avec des dépôts marno-calcaires, tandis qu'à l'Est les dépôts sont presque exclusivement carbonatés. On note des périodes saumâtres où se déposent des évaporites.

Jurassique terminal

Une sédimentation marno-calcaire se met en place sur l'ensemble du bassin. La barrière Nord-Sud s'est effacée et le bombement de Toulouse à Arcachon imposent à nouveau des environnements de dépôts sensiblement différents au Nord et au Sud. Une régression marine importante ferme les détroits du Poitou et de Rodez. Les Charentes ainsi isolées développent un environnement évaporitique.

Crétacé

On assiste à une régression marine très importante, qui sera le trait dominant pendant le Crétacé inférieur. La sédimentation devient très localisée au niveau des bassins de Parentis, de l'Adour et des Pyrénées. Elle est sablo-argileuse puis carbonatée. Le reste du bassin est soumis à une forte érosion. Au Crétacé supérieur, le niveau marin remonte significativement jusqu'à couvrir la quasi totalité du bassin. A ce stade l'Aquitaine septentrionale est une plate forme stable à la différence du sud de l'Aquitaine qui est affectée par une forte subsidence. Le sillon pyrénéen joue le rôle d'une fosse de réception qui va accueillir plus de 5000 m de flysch. Dès le Crétacé inférieur, la charge imposée par ces sédiments va déclencher une halocinèse mobilisant les couches salifères du Trias et Lias ; des remontées diapiriques ont lieu le long d'accidents le plus souvent distensifs.

Début du Tertiaire

Après la régression fini-Crétacée, la morphologie de l'Aquitaine permet de distinguer deux zones :

- La zone au Nord de la ligne Arcachon-Toulouse, qui s'enfoncé lentement. Cette partie est exondée.
- La zone Sud dont la partie Ouest est subsidente tandis que la partie Est reste stable d'un point de vue tectonique. Du sillon pyrénéen jusqu'au milieu des Landes, la subsidence est très importante, d'où le développement d'un environnement marin. C'est dans ce secteur que l'halocinèse se développe le plus fortement.

Le Tertiaire se caractérise surtout par le passage à un cycle compressif avec convergence oblique de la plaque ibérique vers la plaque européenne. Bourguin et al. (1997) ont proposé une actualisation des informations stratigraphiques pour le Sud du bassin d'Aquitaine. Les informations fournies sont résumées ci-après. Au début du Tertiaire, à l'Ouest du bassin d'Aquitaine se trouve l'Atlantique tandis qu'à l'Est se trouve la Téthys. Alors que l'Atlantique va s'ouvrir et s'agrandir, la fermeture de la Téthys, initiée au Trias, continue au cours du Tertiaire. La collision de la plaque ibérique au Sud ferme d'abord la Téthys à l'Est puis réduit la zone pyrénéenne vers l'Ouest du fait de la rotation anti-horaire de l'Ibérie. La déformation se déplace donc d'Est en Ouest, influençant la sédimentation qui devient progradante au Sud de l'Aquitaine. Les sédiments sont continentaux à dominante gréseuse à l'Est, tandis qu'à l'Ouest, toujours ouvert sur l'Atlantique, se dépose une sédimentation calcaire.

Paléocène

Sur le plateau nord aquitain, la sédimentation, essentiellement continentale sous la forme d'argiles et de marnes, reste faible. Au Sud, les dépôts sont plus importants et leur épaisseur augmente en direction du bassin flexural nord pyrénéen.

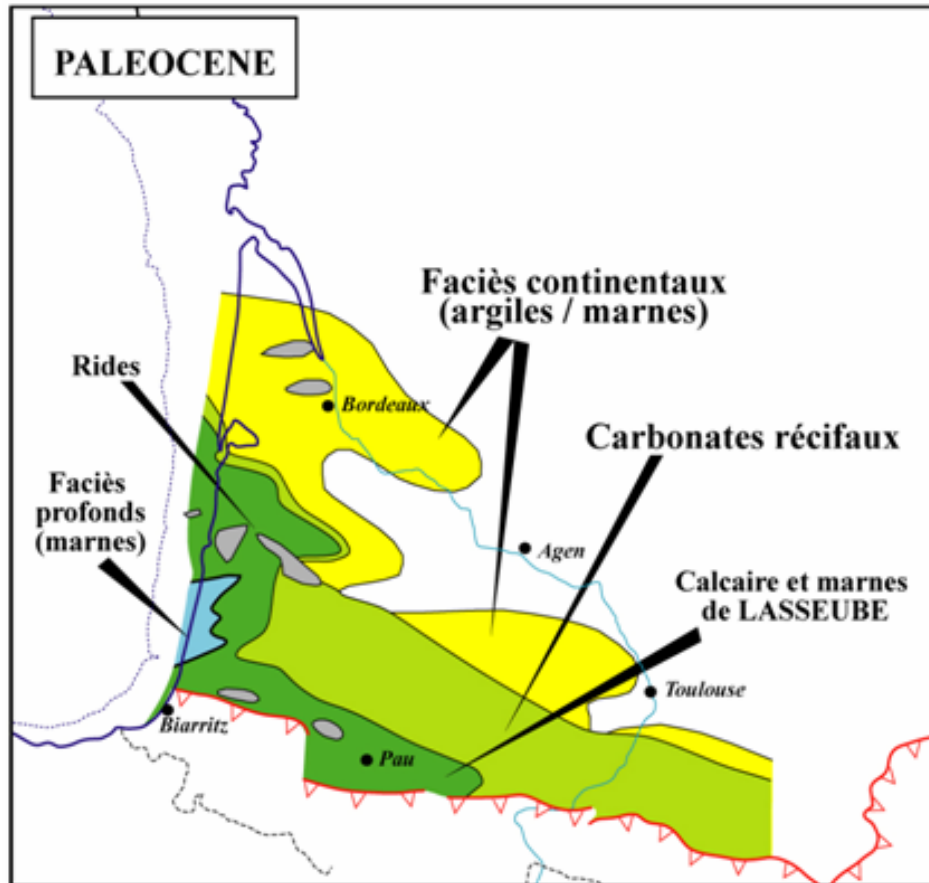


Illustration 3 : Paléogéographie schématique au Paléocène [extraite de Serrano et al., 2006]

Eocène et Oligocène

D'importants apports détritiques continentaux provenant des Pyrénées s'accumulent, notamment dans la partie orientale du Golfe. Cette sédimentation est associée à une subsidence considérable (plus de 2500 m de molasse dans le bassin de Pamiers). A l'Eocène inférieur la transgression augmente d'ampleur et la mer atteint le Médoc (sédimentation à dominante sableuse et calcaire). Le Sud du bassin d'Aquitaine se trouve en domaine océanique profond où des marnes se déposent. A l'Eocène moyen et supérieur, la partie résiduelle du bassin nord-pyrénéen, entre Pau et Biarritz, est comblée par des marnes bleues pélagiques. Au cours de l'Oligocène inférieur, la transgression augmente d'ampleur et la mer regagne une grande partie du territoire qu'elle avait abandonné durant l'Eocène supérieur. Le bassin nord-pyrénéen présente

une sédimentation néritique. Avec le remplissage du bassin nord-pyrénéen, la sédimentation terrigène atteint le Bassin de Parentis, qui se comble surtout à partir de l'Oligocène.

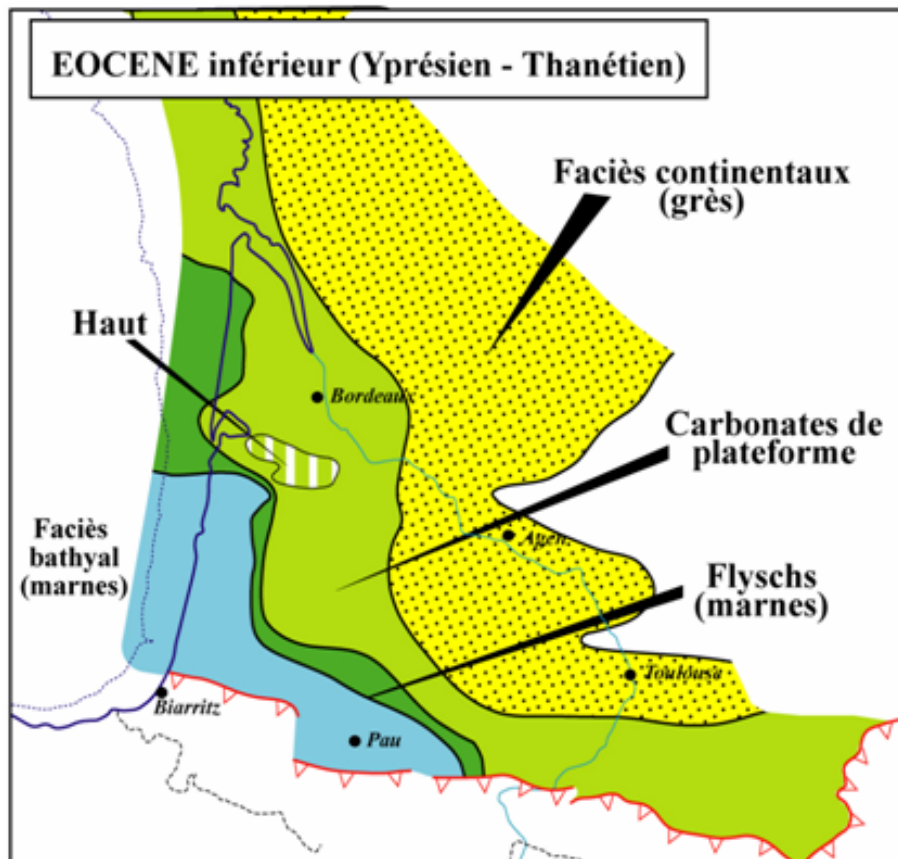


Illustration 4 : Paléogéographie schématique à l'Eocène inférieur [extraite de Serrano et al., 2006]

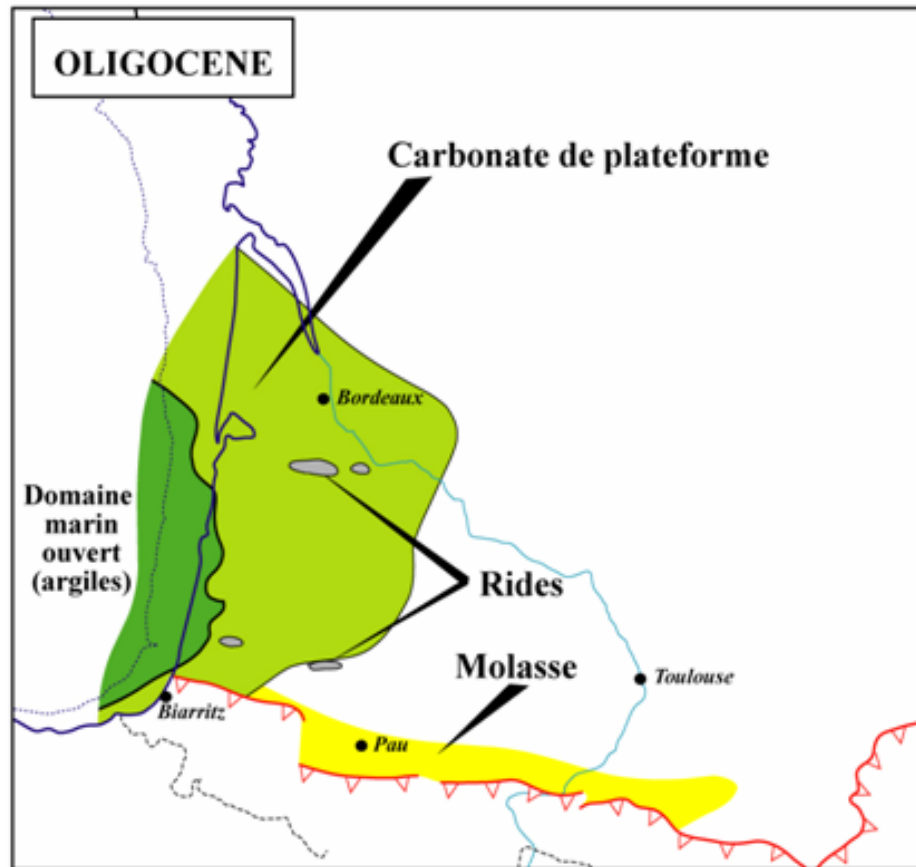


Illustration 5 : Paléogéographie schématique à Oligocène [extraite de Serrano et al., 2006]

Au **Miocène**, le domaine de sédimentation ne s'étend plus qu'au Sud de la Garonne : continental à l'Est et marin à l'Ouest. Le talus continental se situe à proximité du rivage des Landes. Au cours du Miocène supérieur et du Pliocène, il progresse vers l'Ouest et se positionne à 50-60 km de la côte landaise actuelle. La partie interne du Golfe, est rapidement comblée par les sables fluviaux. La mer atteint son maximum d'extension.

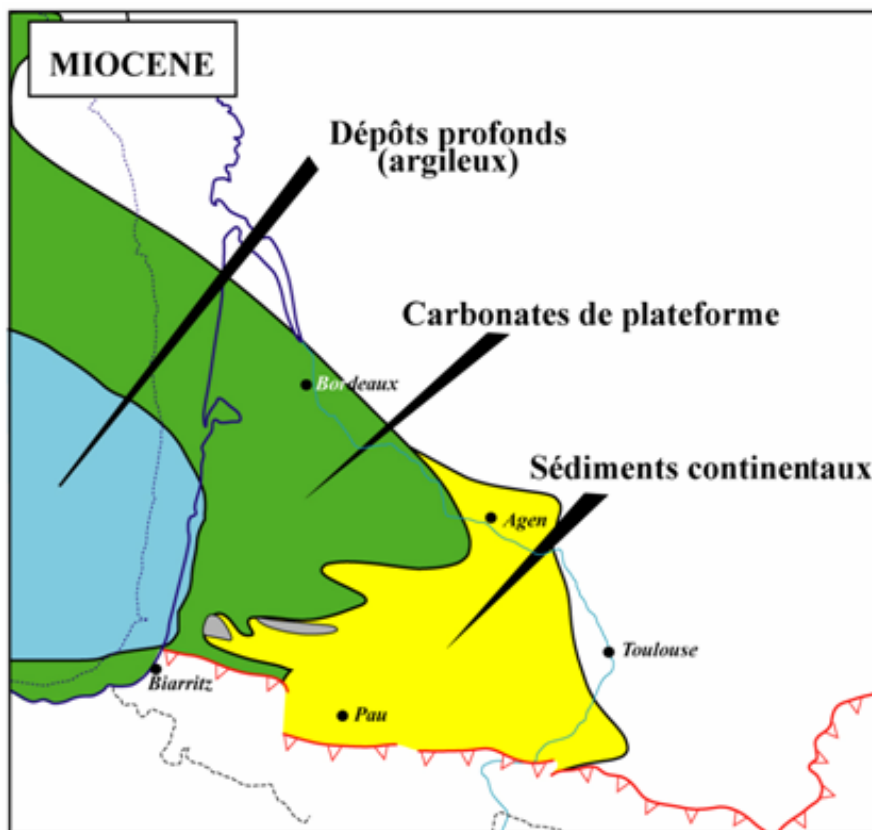


Illustration 6 : Paléogéographie schématique à Miocène [extrait de Serrano et al., 2006]

Après une forte régression marine c'est au Miocène moyen que se déposent les sables continentaux appelés « sables fauves » dans tout le bassin.

Suivent au **Quaternaire** des dépôts continentaux que nous ne détaillerons pas ici.

2.1.2. Schéma structural

Comme nous venons de le voir, le Bassin d'Aquitaine est constitué de deux sous bassins séparés par un accident majeur de direction globalement est-ouest suivant la ligne Toulouse – Arcachon.

L'illustration 7 présente le schéma structural du Sud du Bassin d'Aquitaine.

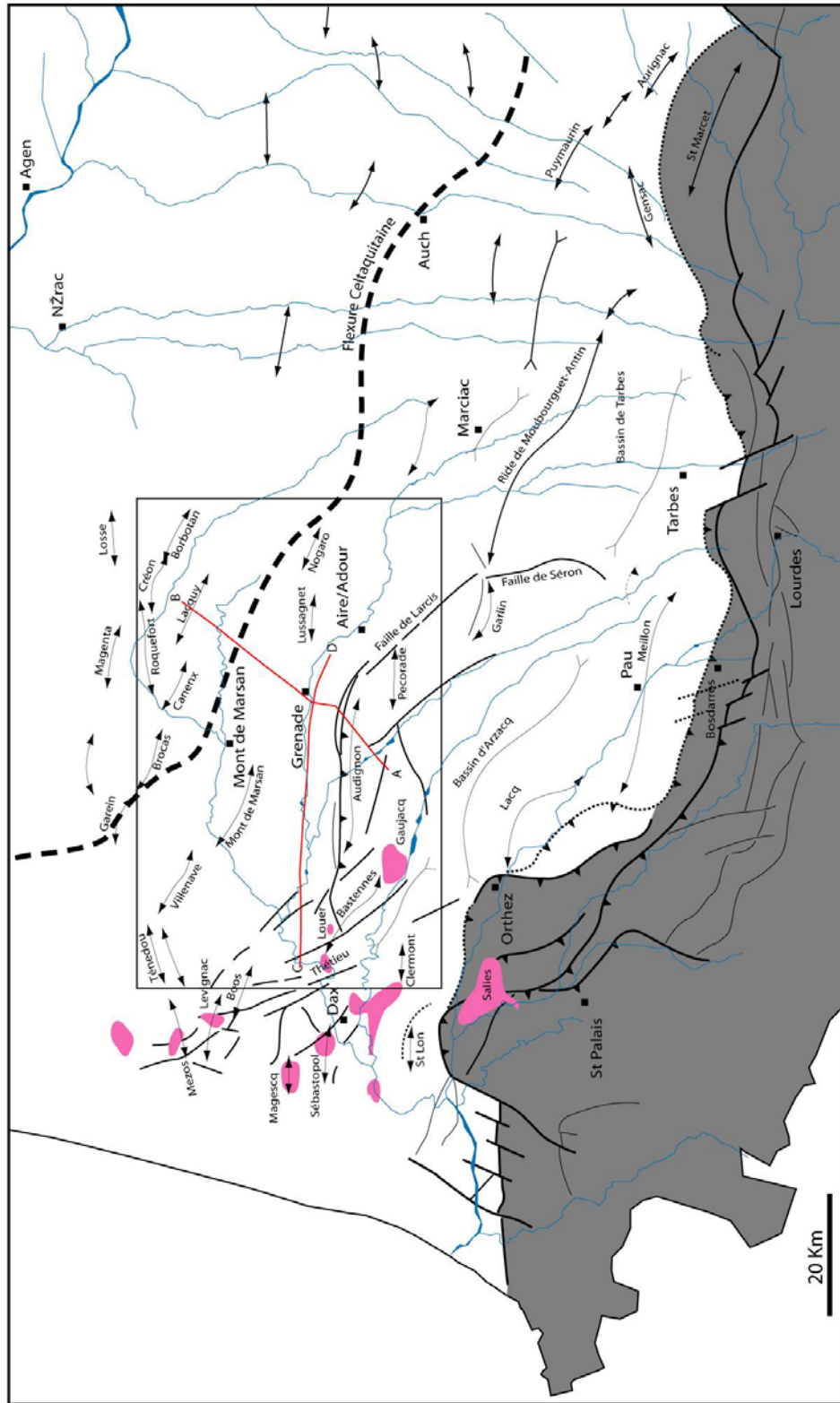


Illustration 7 : Schéma structural du Sud de l'Aquitaine (source ?)

- La tectonique du Sud du bassin a été fortement contrôlée par l'orogénèse pyrénéenne. On observe donc une déformation décroissante du Sud (front Nord pyrénéen) vers le Nord de ce secteur. Sous l'effet des contraintes, les dépôts triasiques évaporitiques ont été affectés, provoquant une halocinèse importante dans ce secteur.

L'impact de l'orogénèse pyrénéenne sur le sud du bassin peut être résumé ainsi :

- Crétacé inférieur : une extension tectonique est à l'origine de bassins subsidents tels que les bassins de Tarbes, Arzacq (Nord de Pau) ou de Parentis (entre Arcachon et Mont-de-Marsan). Au niveau des bordures de ces bassins, du sel triasique remonte le long de failles du fait de l'halocinèse. C'est la mise en place de diapirs et de rides salifères.
- Fin du Crétacé et Oligocène : déformation compressive. A l'extrême sud du bassin, se produisent des chevauchements du fait du raccourcissement global, ainsi qu'une inversion tectonique des bassins Crétacé inférieur et des anciennes rides salifères. Cette phase de déformation est particulièrement intense à l'Eocène moyen et supérieur.

Dans l'illustration 7 sont localisées les principales structures anticlinales et synclinales :

- Le chevauchement frontal Nord pyrénéen constitue une limite étanche des aquifères aquitains.
- La région de Lavelanet (point d'étude P-5, N° BSS : 10765X0112) et du Plantaurel présente de nombreuses ondulations anticlinales et synclinales, où les couches tertiaires sont peu profondes. Au Nord de cette région, la couverture plonge brusquement vers le Nord, amenant la base du Tertiaire jusqu'à 3000 m de profondeur près de Pamiers.
- Les anticlinaux de Puymaurin (P-3, N° BSS : 10078X0001) et Saint Médard (SIM-3, N° BSS : 10072X0026) plus au Nord sont parallèles au front Nord pyrénéen.
- A l'Ouest du bassin on peut observer l'anticlinal de Pau et le dôme de Lacq. Plus au Nord se trouvent l'anticlinal de Garlin (base du Tertiaire à 800 m de profondeur) et d'Audignon (Tertiaire affleurant). Toutes ces structures sont orientées NW-SE. Dans ce secteur un ensemble de dômes et de structures diapiriques sont alignés sur un axe NNE-SSE, dont le dôme de Dax et celui de Thétieu. A l'Est de cet axe se trouvent les anticlinaux de Louer (P-4, N° BSS : 09507X0048) et d'Audignon. A l'Ouest se trouvent un ensemble de plis E-W, dont celui de Sébastopol-Soustons (P-1, N° BSS : 09764X0005). D'importantes remontées diapiriques de sels triasiques se produisent au cœur de ces anticlinaux. Notons que l'on peut observer des synclinaux entre ces structures anticlinales où le Crétacé peut dépasser 2000 m d'épaisseur.
- Le Nord du bassin correspond à un domaine de plate forme continentale. Les déformations sont contrôlées par le socle hercynien, et donc pas toujours orientées selon les contraintes qui en sont la cause. Le Nord du bassin commence à se structurer au Jurassique, où la structure Villagrains-Landiras commence à se

dessiner. Mais la structuration de cette partie du bassin s'effectue majoritairement à l'Eocène moyen et à l'Oligocène. De nombreuses rides anticlinales voient le jour, sous l'effet des contraintes liées à l'orogénèse pyrénéenne.

Les aquifères étudiés dans le cadre de la campagne de prélèvements de mai-juin 2006 du projet Carisneau, à savoir les aquifères Eocène supérieur, moyen et inférieur, des Sables infra-molassiques et Paléocène sont décrites succinctement dans le paragraphe suivant. La description de ces aquifères consistera en une présentation des formations aquifères, suivie d'un résumé des connaissances actuelles concernant leur dynamique et leur chimie. Ces informations proviennent notamment des travaux de Kühn et al. (1969), de Platel et al. (1997) et de Lachassagne et al. (1998), ainsi que des thèses de Kuhn (1969), de Moussié (1972) et d'André (2002).

2.2. LES AQUIFERES EOCENES DU BASSIN D'AQUITAINE

2.2.1. Description des formations aquifères de la partie Sud

Les aquifères éocènes existent sur la majeure partie du bassin d'Aquitaine. On considère en effet qu'il présente une étendue de 150 km d'Est en Ouest et de 200 km selon la direction Nord-Sud.

En raison de l'alternance des dépôts, l'aquifère éocène est considéré comme un aquifère multicouche complexe. La succession des apports sédimentaires (détritiques et calcaires) au cours du temps entraîne une hétérogénéité verticale et horizontale des faciès et amène nécessairement des discontinuités dans les terrains imperméables mettant en relation hydraulique les différentes couches perméables. Ainsi suivant une section verticale, les couches aquifères alternent régulièrement avec des couches argileuses ou marneuses plus ou moins imperméables. Les différentes couches aquifères sont localement en contact ce qui rend souvent délicate l'individualisation des niveaux aquifères. Cependant on distingue trois niveaux : l'aquifère de l'Eocène inférieur, de l'Eocène moyen et de l'Eocène supérieur.

Concernant l'aquifère inférieur, son niveau piézométrique est encore rarement distingué de celui de l'aquifère des Sables Infra-Molassiques, qui sera présenté ensuite, de sorte que peu d'informations sont disponibles sur ce niveau. A sa base se trouvent les « grès à nummulites » et au sommet les « sables de Lussagnet » appartenant respectivement au faciès marin et deltaïque (Housse et Maget, 1977). Les sables de ce faciès ont une porosité plus importante que ceux de faciès continentaux.

Par la suite les termes « aquifère éocène » seront utilisés pour les aquifères éocènes moyen et supérieur, ces deux aquifères semblant être rarement individualisés dans les études.

A l'échelle du bassin, on observe une variation latérale de faciès importante. Il avait été noté précédemment qu'au cours du Tertiaire, la fermeture de la Téthys à l'Est avait amené une polarisation de la sédimentation avec des dépôts continentaux à l'Est tandis qu'à l'Ouest les dépôts étaient plus marins. Cette polarisation de la

sédimentation semble avoir affecté les dépôts éocènes. En effet, d'une manière générale, les corps sableux passent vers l'Ouest à des formations plus calcaires. Armand et al. (1990) localisent à l'Est de la ligne Pau – Langon - Mont de Marsan un aquifère essentiellement détritique à granulométrie grossière tandis qu'à l'Ouest se trouvent des calcaires gréseux. L'illustration 8 schématise les principaux faciès. On notera une augmentation vers la côte Atlantique de la teneur en argile, de telle sorte que la perméabilité de l'aquifère diminue significativement. En périphérie Nord et Est les formations passent successivement du faciès « Sables Sidérolithiques » aux faciès « argiles à graviers » (Est, non représenté), qui correspondent à des faciès d'altération. A l'extrême Sud du bassin se trouvent les « poudingues du Palassou », très poreux et renfermant des nappes libres.

Concernant la composition minéralogique générale des dépôts, les sables sont constitués presque exclusivement de quartz, mais contiennent également un peu de calcite de dolomite et de feldspaths; les dépôts carbonatés sont quelque peu gréseux, mais semblent ne pas être karstifiés (Housse et Maget, 1977). Cependant au Sud de Auch on notera une intense fracturation des calcaires de la ride Saint Médard – Puymaurin.

Malgré l'évolution progressive générale est-ouest des dépôts, on considère actuellement que les aquifères éocènes du Nord du bassin d'Aquitaine sont indépendants des aquifères éocènes du Sud du bassin. En effet le bassin de Parentis, la structure Villagrains – Landiras ainsi que la zone haute de Montauban constitueraient une barrière Est-Ouest imperméable par la nature marno-argileuse des formations concernées et diviseraient la partie nord de la partie sud du bassin (Bonnery et al. 1997).

Dans le cadre de cette étude, la majorité des forages captant les aquifères éocènes, pour lesquels des prélèvements ont été réalisés, sont situés dans la partie Nord du bassin d'Aquitaine. Ainsi cette partie sera décrite plus en détail par la suite.

2.2.2. Description des formations aquifères de la partie Nord

Le Nord du bassin d'Aquitaine, de forme générale triangulaire, est limité au Nord-Est par les affleurements crétacés de l'anticlinal de Jonzac et au Sud par les structures calcaires crétacés de la ride anticlinale de Villagrains-Landiras-Facture-Biganos. Il est ouvert à l'Ouest sur l'océan Atlantique (Moussié, 1972).

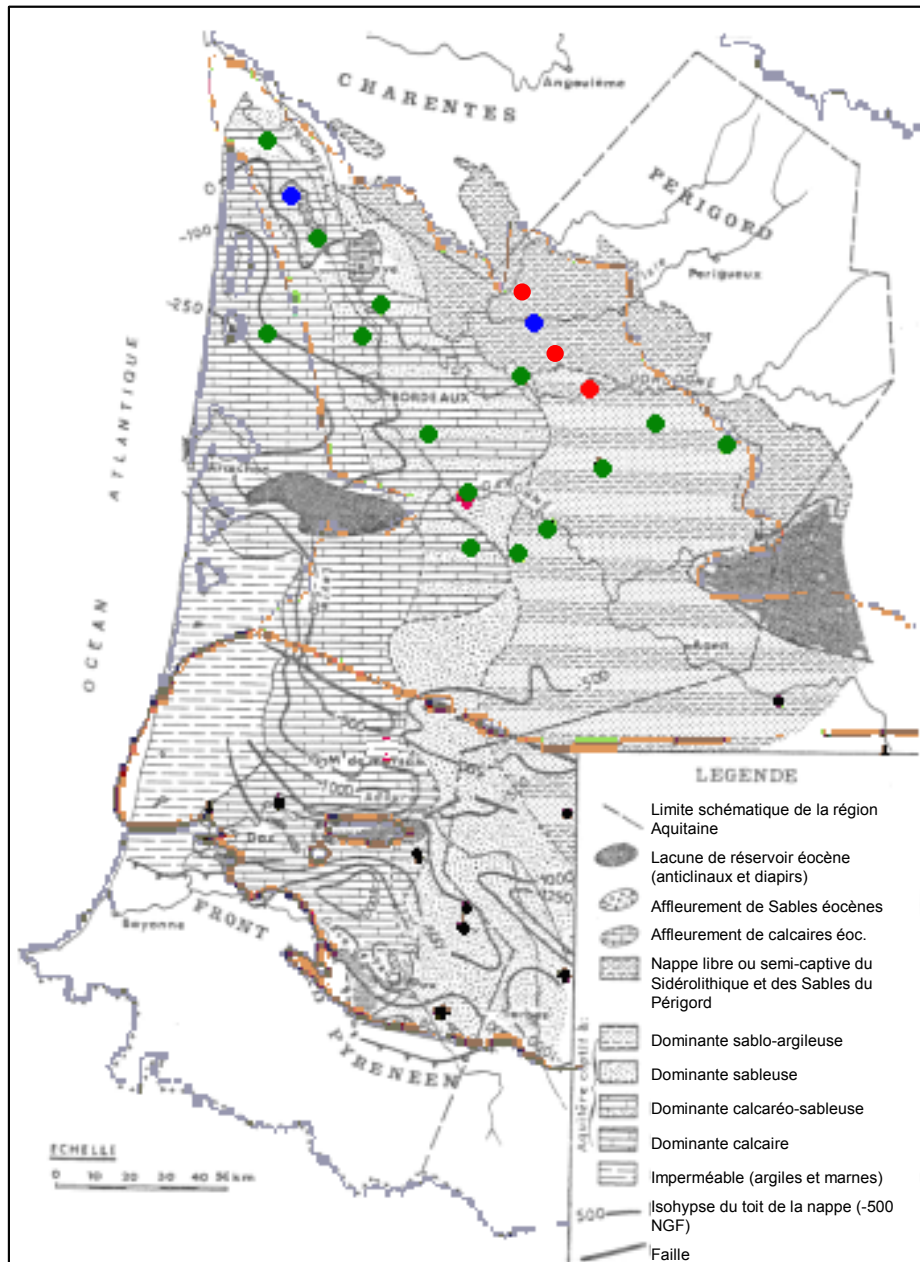


Illustration 8 : carte de faciès de l'Eocène dans le bassin d'Aquitaine [d'après Astie et Chamayou (1977)]. Les points de prélèvement de cette étude sont représentés en rouge pour l'Eocène inférieur, en vert pour l'Eocène moyen et bleu pour l'Eocène supérieur.

L'évolution générale des faciès dans l'espace a été donnée précédemment. Nous allons cependant la préciser pour la partie Nord du bassin. On peut en effet distinguer schématiquement deux types de dépôts (Platel et al., 1997) :

- les dépôts continentaux qui se situent entre les affleurements crétacés à l'Est et une ligne suivant la Gironde à quelques kilomètres de sa rive Est. On y trouve des sables

hétérométriques alternant avec des argiles dont la proportion augmente du Nord au Sud (sables et argiles du Périgord).

- les dépôts laguno-lacustres qui se trouvent à l'ouest dans le Bas Médoc ainsi que dans une bande de quelques kilomètres dans le Blayais à l'Est et vers Issigeac. De même dans la région du Bassin d'Arcachon. Les dépôts, de dominance calcaire, y sont marno-calcaires, calcaires, marneux, molassiques et dolomitiques. Dans le domaine du Bas Médoc se trouvent les points d'étude EM-1 (N° BSS : 07305X0001), EM-3 (N° BSS : 07547X0068), EM-4 (N° BSS : 07796X0110), EM-5 (N° BSS : 08031X0199), EM10 et ES-3 (N° BSS : 07542X0001).

L'ensemble des couches éocènes présente un pendage vers le Sud-Ouest.

Les corps sableux ou carbonatés de l'Eocène supérieur de la Gironde orientale (« sables fluviaux du Libournais ») constituent une unité aquifère indépendante (Astie et Chamayou, 1977), séparée de l'Eocène moyen par une épaisse couche argileuse.

L'aquifère éocène supérieur, se différencie de l'aquifère éocène moyen par l'épaisseur variable de ses dépôts. En effet l'épaisseur de l'Eocène moyen est généralement de 100 mètres. Par contre l'Eocène supérieur est d'épaisseur beaucoup plus variable, de 30 à 40 m en moyenne, il peut disparaître au niveau des structures anticlinales à l'Ouest ou dépasser 100 m d'épaisseur sous les structures synclinales à l'Est. Dans le Libournais, son épaisseur est constante et avoisine 60 mètres (Moussié, 1972).

La zone de l'estuaire de la Gironde a beaucoup été étudiée (Platel et al., 1997), étant donné le risque important de contamination de l'aquifère Eocène par l'eau salée de l'estuaire en cas de surexploitation. Au sud de l'estuaire (région de Blaye-Cussac), la nappe de l'Eocène moyen est localement drainée par l'estuaire de la Gironde. Les niveaux piézométriques y sont proche du 0 NGF, voire quelquefois en dessous dans les secteurs fortement exploités. Le long de cette partie de l'estuaire, la qualité des eaux de la nappe, bien que captive, est fortement dégradée par une invasion saline importante (Platel et al., 2003).

Une coupe lithostratigraphique synthétique du Tertiaire a ainsi été effectuée dans ce secteur par le BRGM (Platel, 1997) et est présentée Illustration 9. On notera le taux important d'argile dans la couche Eocène inférieur, qui peut isoler l'Eocène des niveaux inférieurs, empêchant toute communication de cet aquifère avec les aquifères sous-jacents. L'Eocène moyen est quant à lui constitué de grès à sa base et d'une alternance de grès et calcaire à son sommet dans le secteur de l'estuaire.

La coupe présentée Illustration 10 passe près du point EM-1 (N° BSS : 07305X0001). On note une contamination possible par l'eau de mer au niveau de la Gironde où l'Eocène moyen est peu protégé par des couches imperméables. La taille de cette fenêtre est néanmoins très réduite. L'Eocène affleurant il peut y avoir infiltration d'eau météorique.

La coupe présentée Illustration 11 passe par Lesparre-Médoc où se trouve le point ES-3 (N° BSS : 07542X0001). A ce niveau l'Eocène est protégé de la Gironde par les argiles flamandaises. L'Eocène affleurant, il peut y avoir infiltration d'eau météorique.

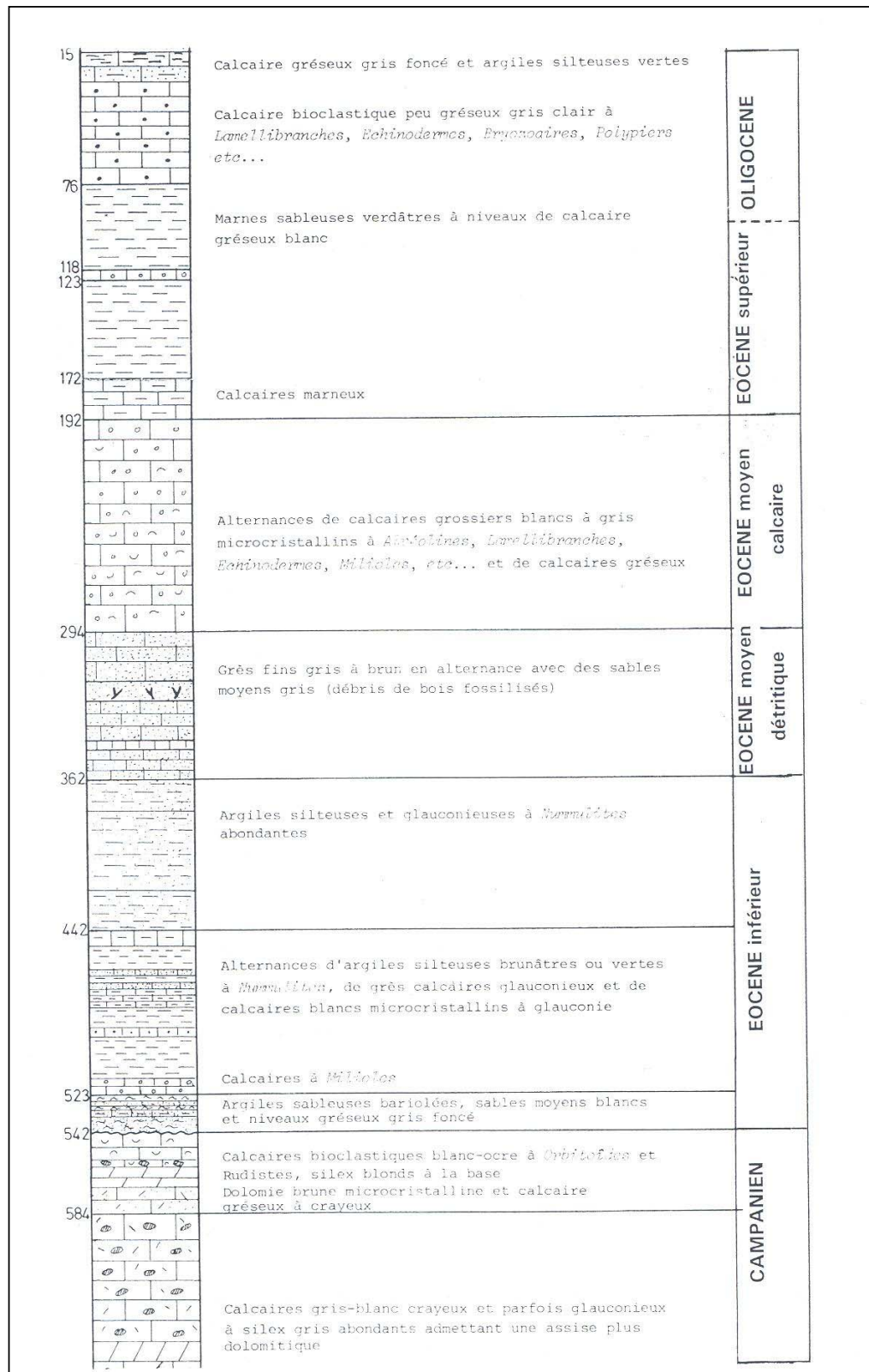


Illustration 9 : coupe synthétique de l'Eocène dans le secteur de la Gironde [d'après Platel, 1997]

La coupe présentée Illustration 12 a été tracée à proximité de Saint-Sauveur où se trouve EM-3 (N° BSS : 07547X0068). Ici la couche d'argiles flamandaises isolant l'aquifère Eocène des eaux de la Gironde est faible mais continue, sauf au droit de Château Meney. L'Eocène affleurant, il peut y avoir infiltration d'eau météorique.

La coupe présentée Illustration 13 passe par le Bec d'Ambès où se trouve EM-4 (N° BSS : 07796X0110). La nappe Eocène captive est protégée dans ce secteur par toute l'épaisseur de l'Eocène supérieur et des terrains quaternaires.

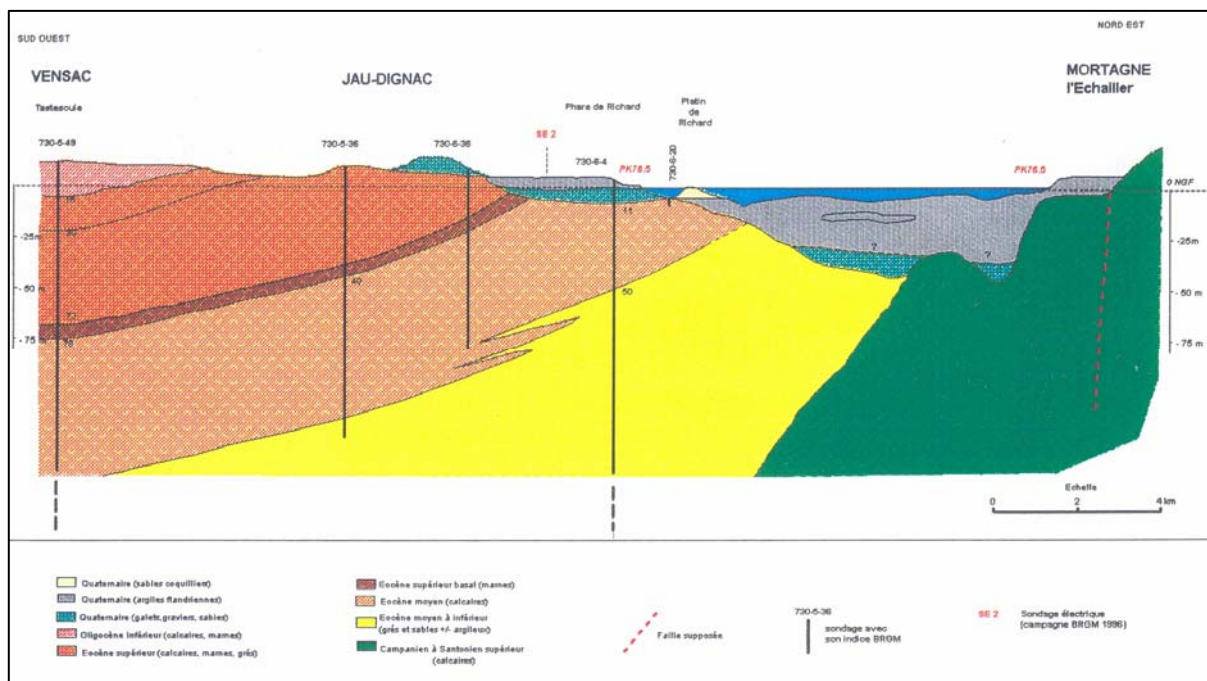


Illustration 10 : coupe Sud-Ouest Nord-Est effectuée dans l'estuaire de la Gironde, au Sud immédiat du point EM-1 (N° BSS : 07305X0001) [d'après Platel, 1997]

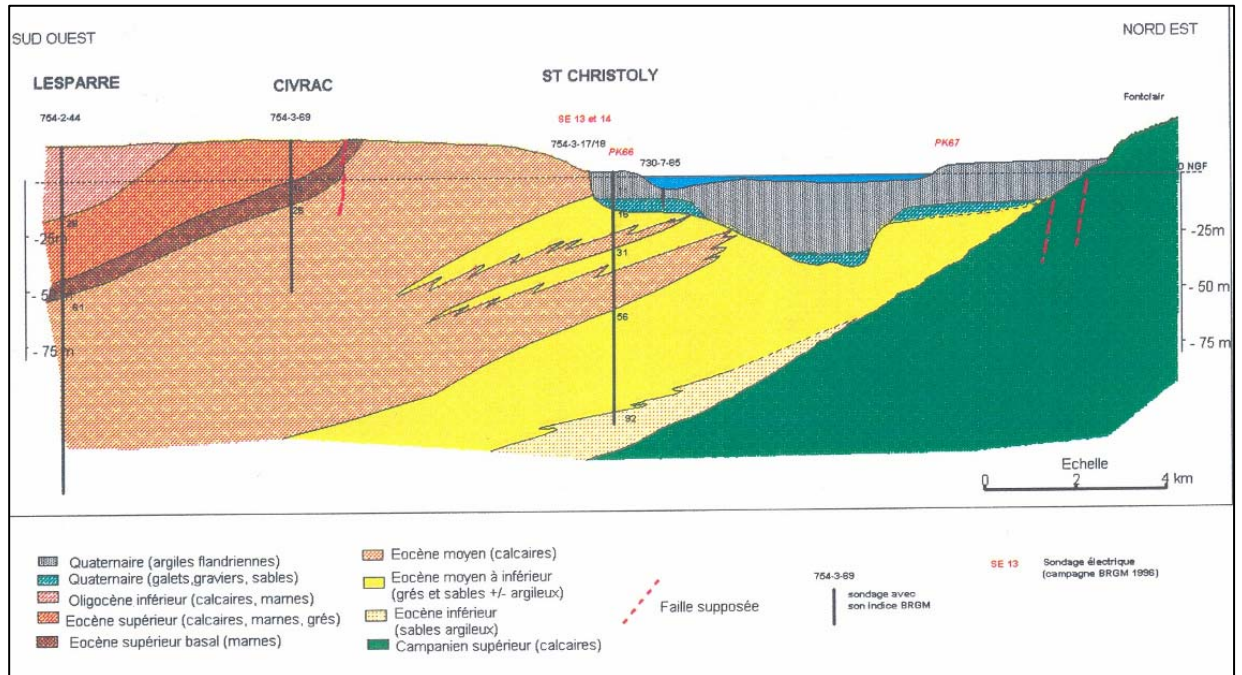


Illustration 11 : coupe Sud-Ouest Nord-Est effectuée dans l'estuaire de la Gironde, passant par le point ES-3 (N° BSS : 07542X0001) [d'après Platel, 1997]

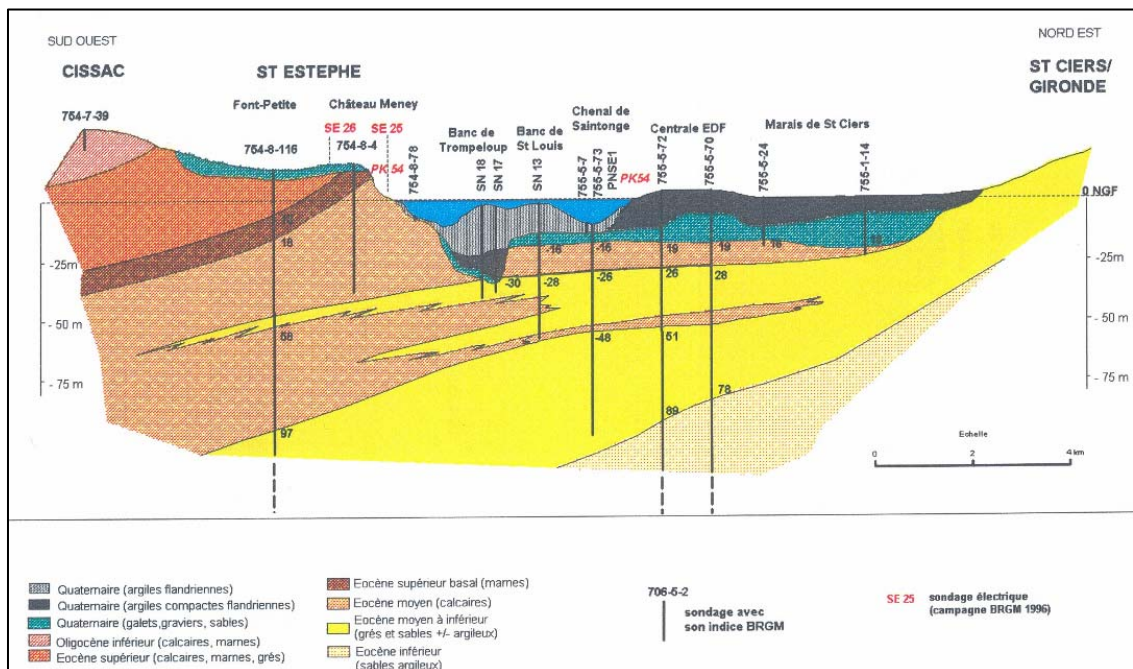


Illustration 12 : coupe Sud-Ouest Nord-Est effectuée dans l'estuaire de la Gironde, à proximité du point EM-3 (N° BSS : 07547X0068) [d'après Platel, 1997]

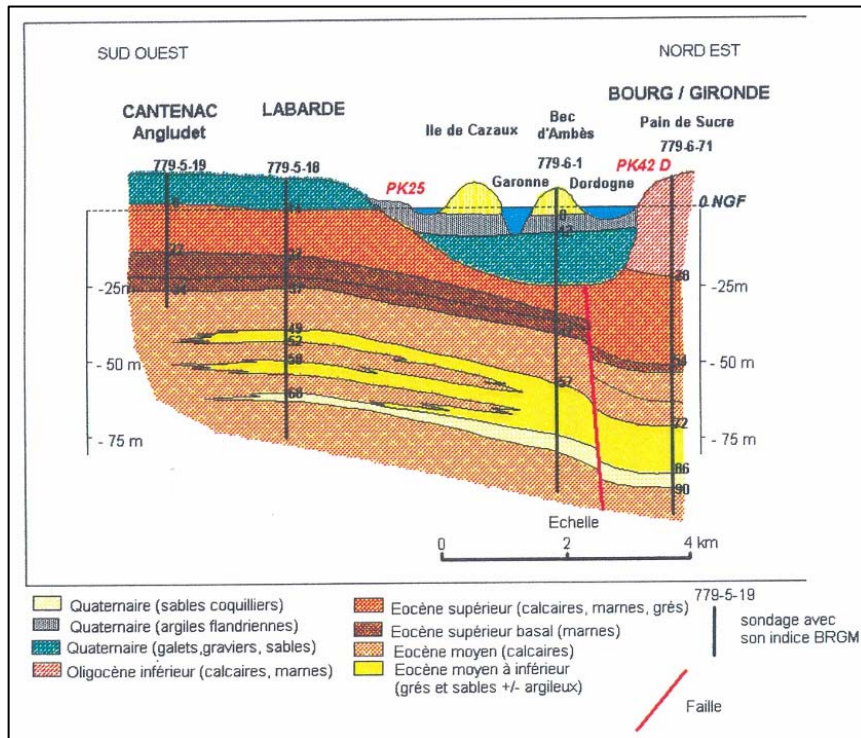


Illustration 13 : coupe Sud-Ouest Nord-Est effectuée dans l'estuaire de la Gironde, passant par le point EM-4 (N° BSS : 07796X0110) [d'après Platel, 1997]

L'ensemble de ces coupes fait apparaître qu'une faible partie de l'aquifère Eocène est au contact de l'eau salée de l'estuaire de la Gironde. De plus cet aquifère étant multicouche de nombreuses couches argileuses jouent le rôle de barrière. De plus si de l'eau salée entre dans l'aquifère sans trop se mélanger, le pendage des couches fera s'accumuler cette eau dense vers le Sud-Ouest.

2.2.3. Dynamique de l'aquifère : carte piézométrique et fonctionnement hydrogéologique

La carte piézométrique présentée Illustration 14 (Moussie et al., 1998) a été réalisée pour l'Eocène moyen. L'Eocène supérieur étant individualisé seulement au niveau des sables du Libournais, elle vaut pour les deux aquifères Eocène moyen et Eocène supérieur qui peuvent être considérés comme confondus.

Au vu de cette carte, l'aquifère Eocène présente un écoulement convergent vers un axe de drainage parallèle au cours moyen et inférieur de la Garonne, c'est à dire la ligne Agen-Marmande-Bordeaux. Cet axe d'écoulement a été confirmé par des calculs de transmissivité effectués à partir de mesures de débits. On note également que la perméabilité est plus élevée dans les aquifères du domaine oriental que dans ceux du domaine occidental. En effet à l'ouest on a une porosité de fissure dans les calcaires eocènes, alors qu'à l'est c'est une porosité d'interstice. On trouve des valeurs de perméabilité anormalement élevées également dans le Nord du Médoc du fait de la position affleurante des terrains tertiaires qui a accélérée la formation de microkarst (Moussié, 1972).

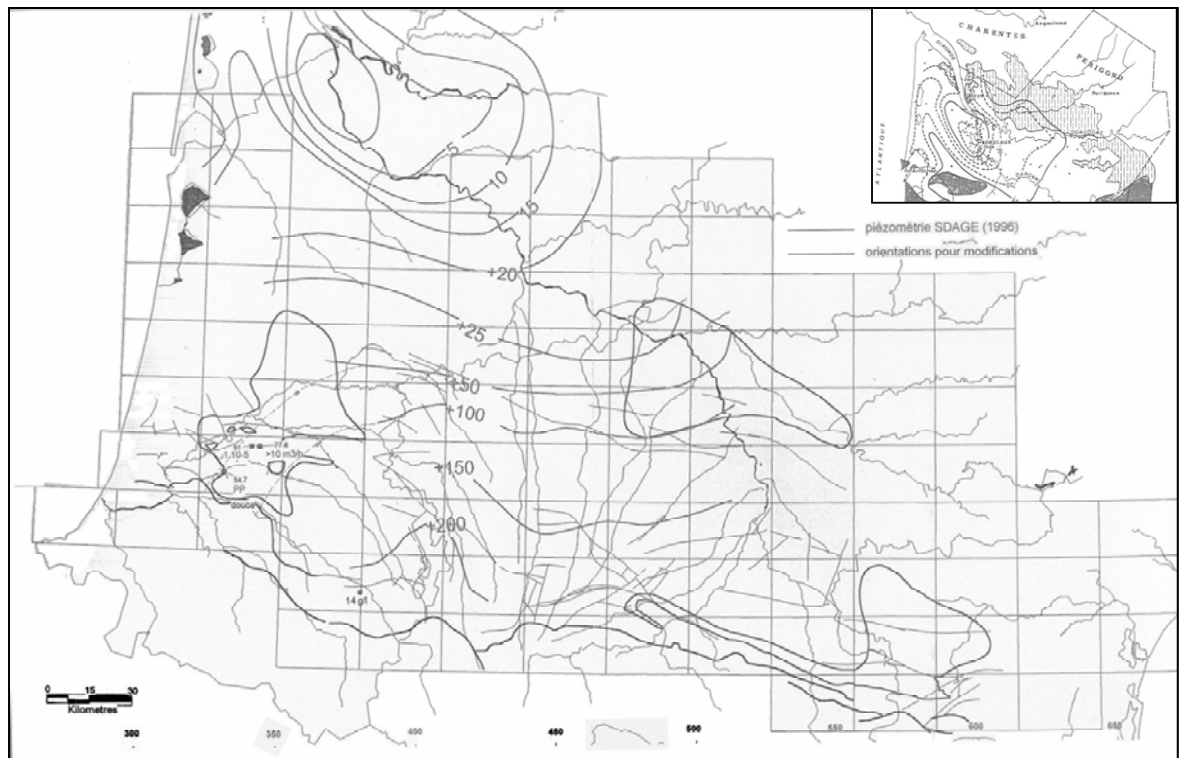


Illustration 14 : piézométrie, paramètres hydrodynamiques et minéralisation de l'Eocène moyen [Lachassagne et al., 1998]

A l'Est d'Arcachon on peut observer une crête piézométrique.

La carte piézométrique (Illustration 14) permet également de présupposer des zones d'alimentation de l'aquifère pour la partie sud, ainsi que les principaux exutoires (Lachassagne et al., 1998). Il semble que l'aquifère soit alimenté :

- Dans le Nord, l'alimentation s'effectue principalement par infiltration à partir des bordures : en bordure du Massif Central, puis par infiltration à travers les sables continentaux du Périgord et du Blayais ainsi qu'en bordure de la Montagne Noire. De même latéralement par les calcaires du Crétacé supérieur.
- Au niveau des affleurements de Blaye et Listrac, ainsi que de Conquèques, par infiltration le secteur étant de plus soumis à de fortes pluviométries.
- Dans le Sud l'alimentation se fait principalement par les aquifères sous jacents.

Par exemple au niveau d'Auch on observe une drainance per ascensum à partir des calcaires paléocènes qui sont en continuité hydraulique. La pression de la nappe paléocène est en effet beaucoup plus importante à ce niveau que celle de la nappe de l'Eocène, et de plus les calcaires crétacés et jurassiques sont fracturés et karstifiés. Comme la communication est très localisée, la différence de pression est conservée dans le temps.

Par contre la couverture argileuse au sommet des sables du Périgord empêche toute infiltration (Moussié, 1972). L'illustration 15 schématise l'alimentation de l'aquifère.

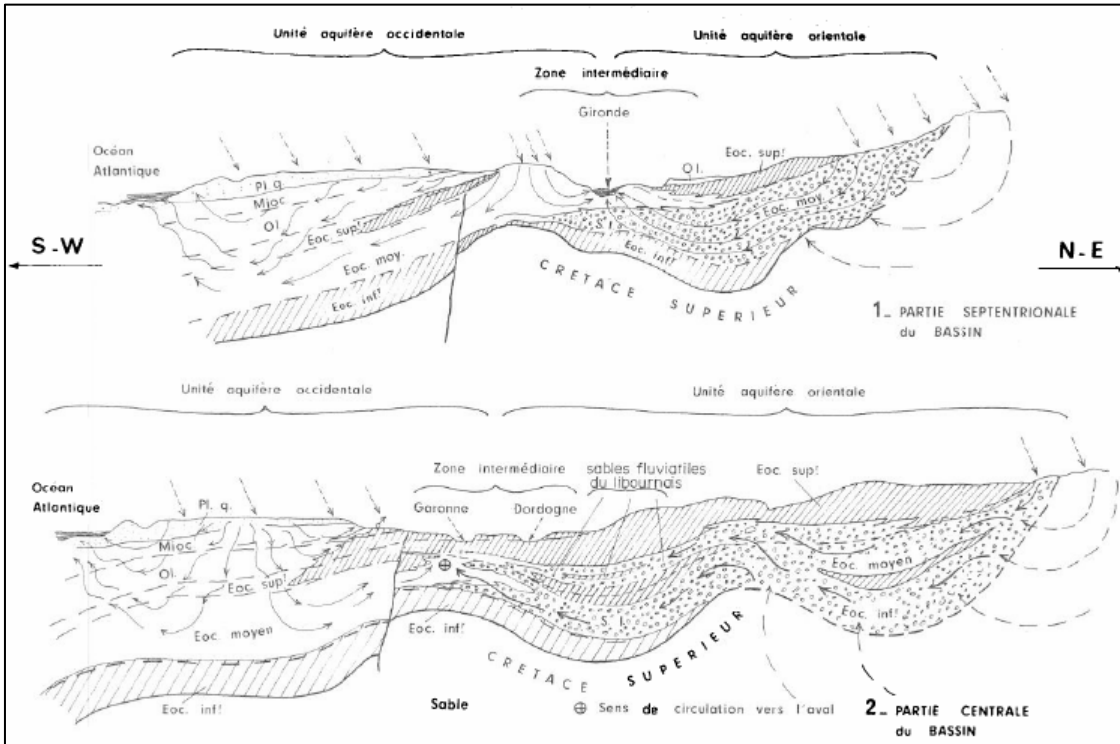


Illustration 15 : zones d'infiltration, circulation et exutoires de l'aquifère Eocène du bassin Nord-Aquitain [Moussié, 1972]

Les exutoires connus sont :

- l'estuaire de la Gironde au Nord
- l'anticlinal d'Audignon au Sud : l'aquifère éocène y alimente l'aquifère paléocène, car les pressions sont inversées par rapport à Auch.

2.2.4. Chimie : éléments majeurs et traces, données isotopiques

Les nappes de l'Eocène sont en général de bonne qualité chimique et peu minéralisées (Housse et Maget, 1977). La minéralisation est la moins forte dans la zone de faciès des sables littoraux (Gironde).

Les eaux présentent des faciès bicarbonatés calciques (sables de Lussagnet), bicarbonatés et sulfatés sodiques à plus forte teneur globale vers la Montagne Noire et la bordure pyrénéenne, chlorurée sodique à l'approche de la fermeture de l'aquifère sur le domaine pélagique à l'Ouest et près du sillon sous – pyrénéen et dans tout le Nord du Médoc.

Sur l'étendue des sables continentaux et sur la partie orientale des sables littoraux, l'eau présente des teneurs élevées en fer. On note également la présence de fluor au sein du corps sableux de la région bordelaise (en rive gauche) et de la région de Toulouse.

Dans la partie Nord du bassin d'Aquitaine, (Corbier et al., 2005), une zone allongée dans l'Entre-Deux-Mers montre une minéralisation relativement élevée (sulfates, calcium, potassium, fluor, chlorure, etc.) dont l'origine est à rattacher aux faciès évaporitiques de l'Eocène moyen et/ou supérieur..

Dans cet aquifère on trouve des eaux saumâtres au niveau de Lectoure-Moncrabeau (Gers) : soit on a des terrains salifères sous-jacents, soit des évaporites dans les Sables Infra-Molassiques ; de même à l'est de Bordeaux (Grignols) ou un domaine fortement minéralisé s'est développé depuis les années 1960 ; au Sud de Pau, une zone soumise aux pollutions nitratées est présente.

Les teneurs en chlorures sont comprises entre 20 et 50 mg/l (Platel, 1997) sauf en quelques points où elles peuvent atteindre localement des valeurs jusqu'à 7 g/l et même 20 g/l exceptionnellement en Médoc. Quelques forages abandonnés ont également procuré une eau saumâtre. Cependant de faibles parties de l'aquifère sont au contact d'eaux saumâtres, et l'aquifère multicouche présente des épontes imperméables.

2.3. L'AQUIFERE DES SABLES INFRA-MOLASSIQUES

2.3.1. Description du faciès aquifère

La formation des Sables infra-molassiques (SIM) s'est mise en place dès le début de l'Eocène. Elle n'a cependant pas été définie sur le critère de son âge mais sur sa position à la base des molasses tertiaires. Elle se caractérise par un niveau grossièrement détritique, originaire du Massif Central et des Pyrénées.

Au toit de l'aquifère des Sables infra-molassiques, les faciès molassiques tertiaires sont très variables. Il existe dans ce dépôt continental des marnes, du calcaire parfois gréseux, et quelquefois du grès micacé mais également des poudingues et des sables fins. On signale très souvent la présence de gypse et d'anhydrite à la base de la formation. L'extension spatiale de ces différents termes de la série molassique est très variable. Dans l'Albigeois se trouvent des bancs calcaires bien individualisés, alors qu'au centre du bassin ils sont plus épars. La proportion d'éléments détritiques augmente au fur et à mesure que l'on se rapproche des Pyrénées (Poudingue de Palassou à l'extrême Sud). La présence d'horizons marneux à la base de l'aquifère des Sables infra-molassiques rend cette formation quasiment imperméable à sa base.

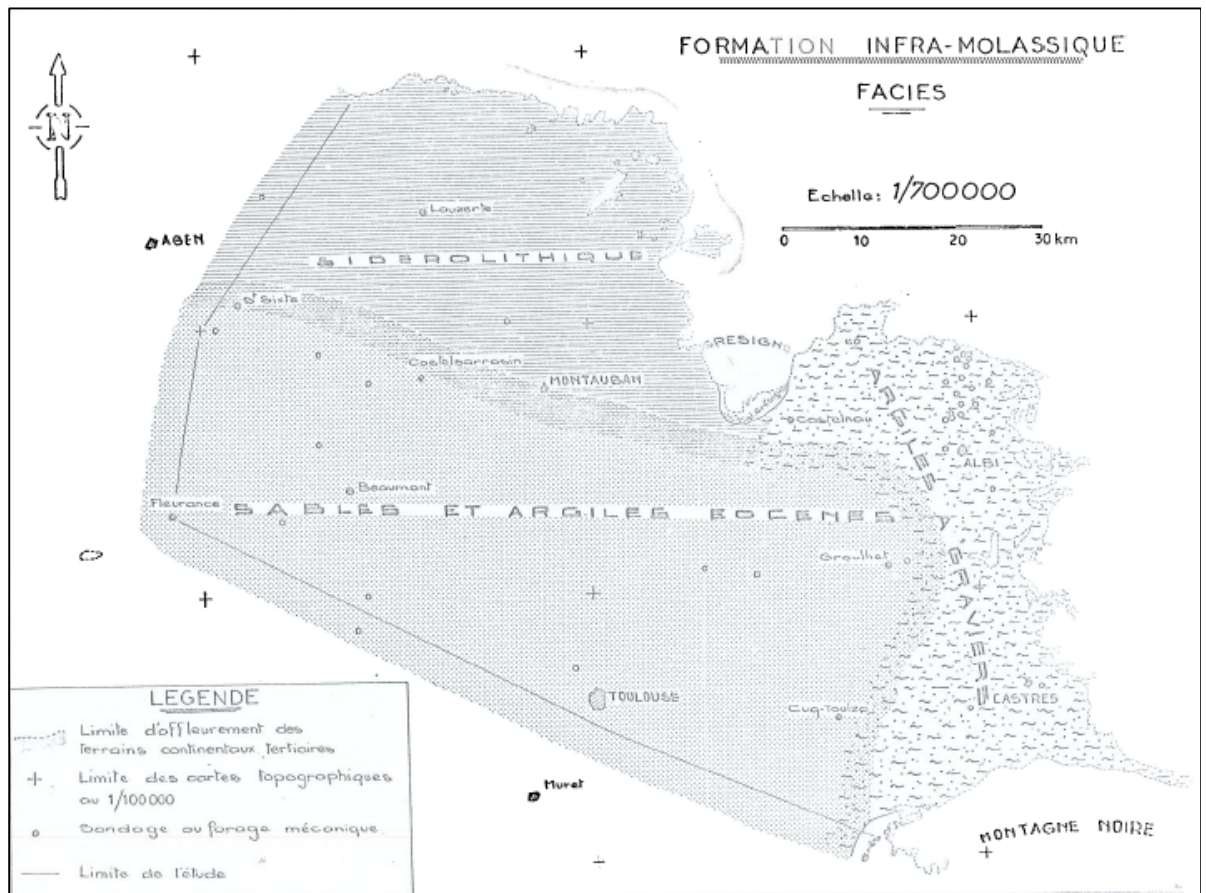



Illustration 17.  artition schématique des différents faciès de la formation des Sables infra-molassiques à l'Est du bassin : [d'après Kuhn, 1969]

Le faciès sidérolithique est constitué de lambeaux de la couverture éluviale d'altération latéritique de l'auréole sédimentaire du Massif Central, démantelée à l'Eocène moyen. Ces produits d'altération, ont été transportés vers des zones de dépôts à l'Ouest : le Périgord et la Gascogne gersoise et le piémont méridional du Bas Quercy. Ce faciès sidérolithique consiste en des argiles rouges à pisolithes de fer (goethite) et à graviers de quartz et des grès ferrugineux. Il renferme des bancs gypseux dans la région de Varen et des niveaux d'arkoses kaolinisées à Molles.

Les argiles à graviers ceignent la bordure orientale du bassin tertiaire, du promontoire de la Grésigne à la Montagne Noire. Vers Castres elles renferment des éléments de roches cristallines, des filons de quartz et des schistes anciens, vers Mazamet des argiles rouges. Dans l'Albigeois ce faciès est moins ferrugineux.

- Les sables et argiles continentaux des sables infra-molassiques sont en continuité de ceux d'altération précédemment cités et se poursuivent dans toute la région à l'Est de Auch. Ils possèdent beaucoup moins de fer et d'éléments détritiques grossiers. Le sable est essentiellement siliceux. La proportion d'argiles augmente vers l'Est.

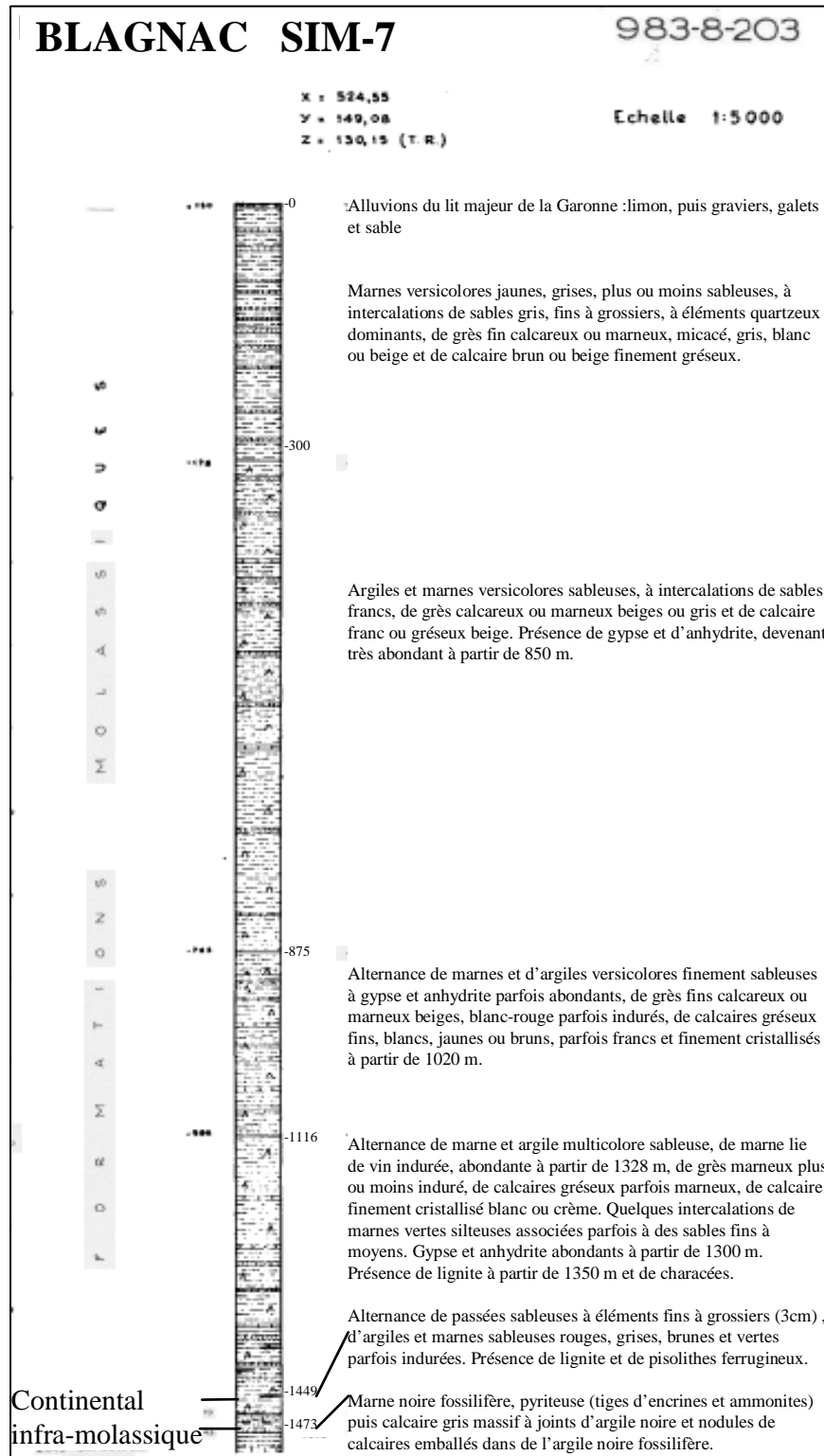


Illustration 19 : coupe au niveau du forage SIM-7 (N° BSS : 09838B0203) [Roche, 1970]

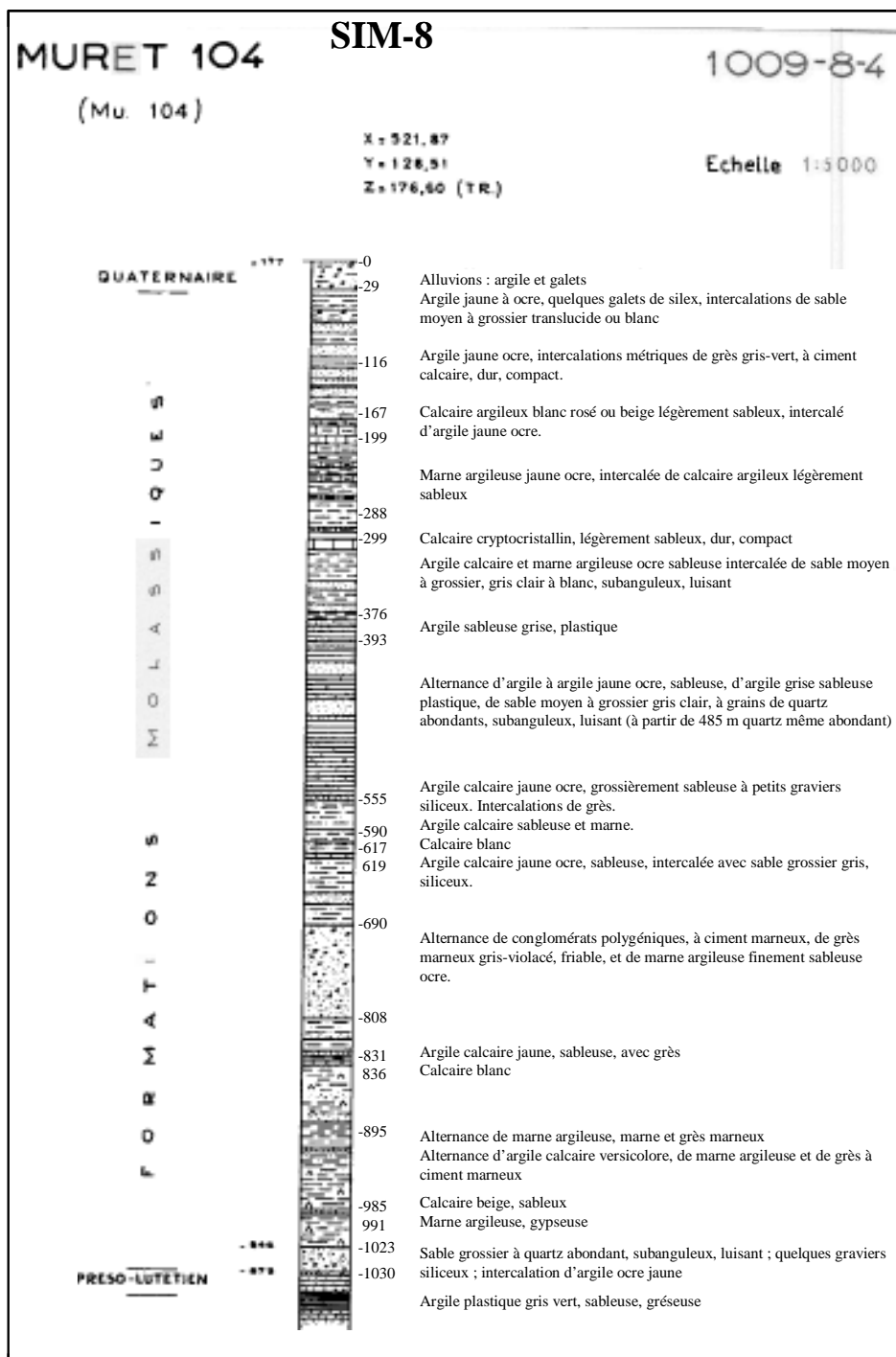


Illustration 20: coupe au niveau du forage SIM-8 (N° BSS : 10098A0004) [Roche, 1970]

Du gypse et de l'anhydrite se trouvent au sommet de la formation des SIM, dans le secteur de SIM-1 (N° BSS : 09293X0123) et SIM-7 (N° BSS : 09838B0203).

Le forage de Muret 104 (SIM-8, N° BSS : 10098A0004) se trouve au Sud de l'anticlinal de Muret, considéré comme un prolongement du promontoire cristallin de la Montagne noire qui peut éventuellement interrompre la continuité de la formation des SIM. Le forage se trouve à 2 km de l'axe de l'anticlinal. La coupe géologique issue du forage note la présence de gypse et d'anhydrite, en quantité variable, au sein de marnes dans la formation des SIM entre 991.5 et 1023 mètres de profondeur. Les Sables Infra-Molassiques sont constitués d'une alternance de couches de marnes parfois gypseuses ou dolomitiques, de grès plus ou moins micacés et de calcaires. On note également la présence de quelques éléments pyriteux.

2.3.2. Dynamique de l'aquifère : carte piézométrique et fonctionnement hydrogéologique

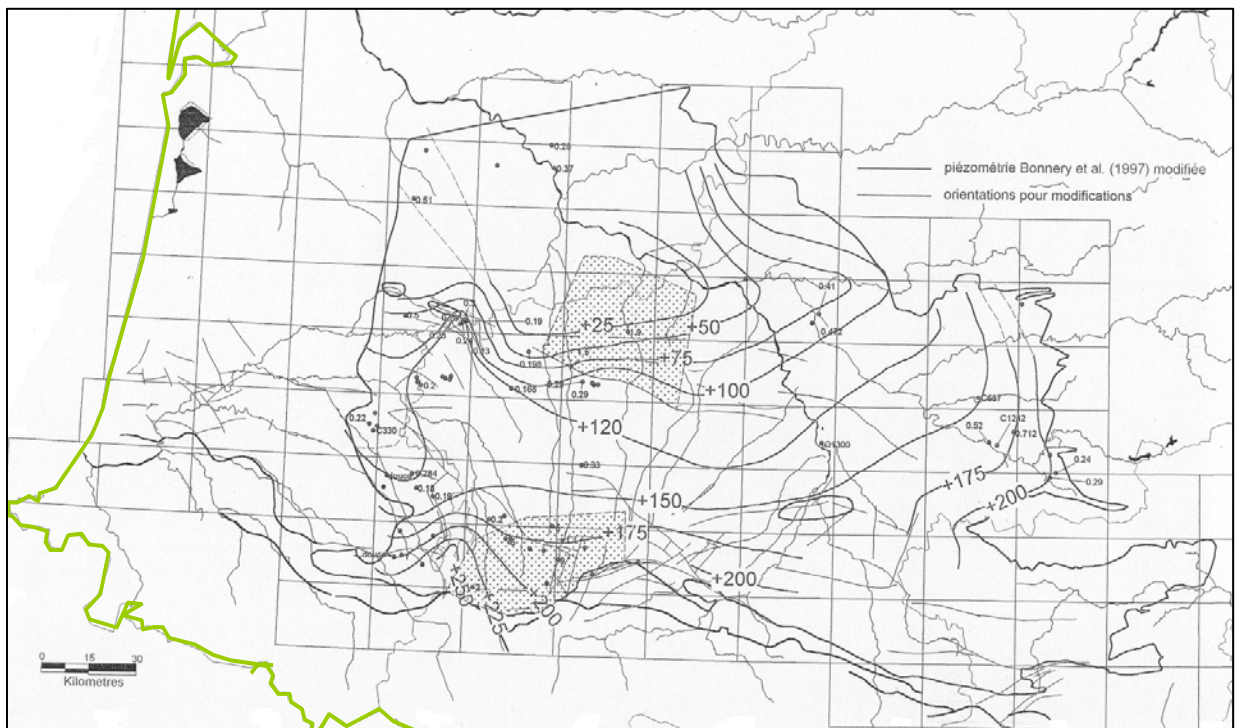



Illustration 21 : piézométrie, paramètres hydrodynamiques et minéralisation des sables Infra-molassiques [Lachassagne et al., 1998]

La carte piézométrique synthétique effectuée par Lachassagne et al. (1998) montre un écoulement global de la nappe vers le Nord et l'Ouest (déjà suggéré par Bel et al., 1994) et des gradients piézométriques resserrés sur un axe Est-ouest Castelsarrasin-Nogaro, au centre du bassin.

L'alimentation de l'aquifère s'effectuerait :

- par les affleurements des faciès sidérolithiques et la bordure du Massif central
- possiblement à travers les couches molassiques de faible perméabilité, en bordure pyrénéenne, notamment à Saint-Gaudens et dans la région du Béarn et de Bigorre. Dans la région de Pau, l'aquifère pourrait être alimenté à travers les molasses et poudingues de Jurançon par des nappes alluviales (Institut géodynamique de Bordeaux III et al., 1994). 
- Au niveau des affleurements : ride d'Audignon, Villagrains-Landiras
- Par le biais de l'aquifère paléocène. En effet entre Aire sur Adour et la Save ces aquifères ne sont plus séparés par des marnes (Housse et Maget, 1977)

Les exutoires principaux sont :

- Le sommet des anticlinaux à l'Est d'Audignon (Blavoux et al., 1993) et la ride de Roquefort Créon (Eygun et al., 1988)
- les aquifères sus et sous-jacents.

Dans la partie Sud du Lot et Garonne, les potentiels relativement élevés suggèrent l'absence de continuité hydraulique avec le compartiment Nord. Dans l'état actuel des connaissances, il n'est pas démontré qu'il puisse y avoir un apport de la nappe Infra-Molassique Nord Pyrénéenne vers le Sud du Lot-et-Garonne, par d'éventuels relais avec le système jurassique, même s'il est possible de tracer des lignes piézométriques qui convergent vers le système Garonne.

Des données isotopiques ont également permis (André, 2002) de préciser les écoulements de la nappe des SIM, comme le montre l'illustration 22.

André (2002) propose notamment que l'écoulement Sud/Nord à l'Ouest et au centre du bassin, est ralenti au contact des structures, tandis qu'au Nord et à l'Ouest l'écoulement serait plutôt Est-Ouest.

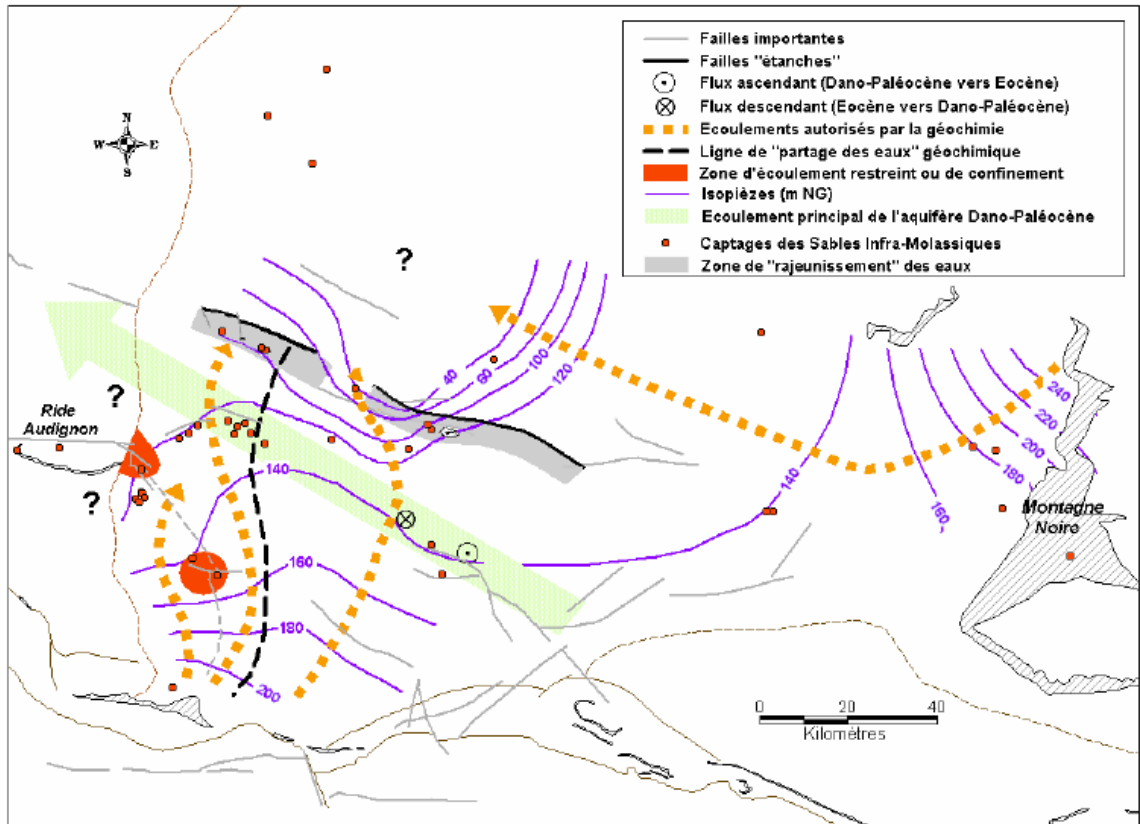


Illustration 22 : carte des schémas d'écoulement résultant des contraintes géochimiques [André, 2002]

2.3.3. Chimie : éléments majeurs et traces, données isotopiques

L'aquifère des Sables infra-molassiques est généralement de bonne qualité et peu minéralisé. Il est essentiellement bicarbonaté calcique. Cependant quelques zones sont bicarbonatées sodiques ou sulfatées sodiques. (André, 2002). La répartition de la composition chimique des eaux d'après André (2002) est donnée Illustration 23.

La cartographie des activités ^{14}C suggère la présence dans le centre du bassin (Eugénie, Lespielle, Nogaro) d'une zone d'eau très ancienne, le zone étant caractérisée par des activités plus élevées (Bourguin et al., 1997).

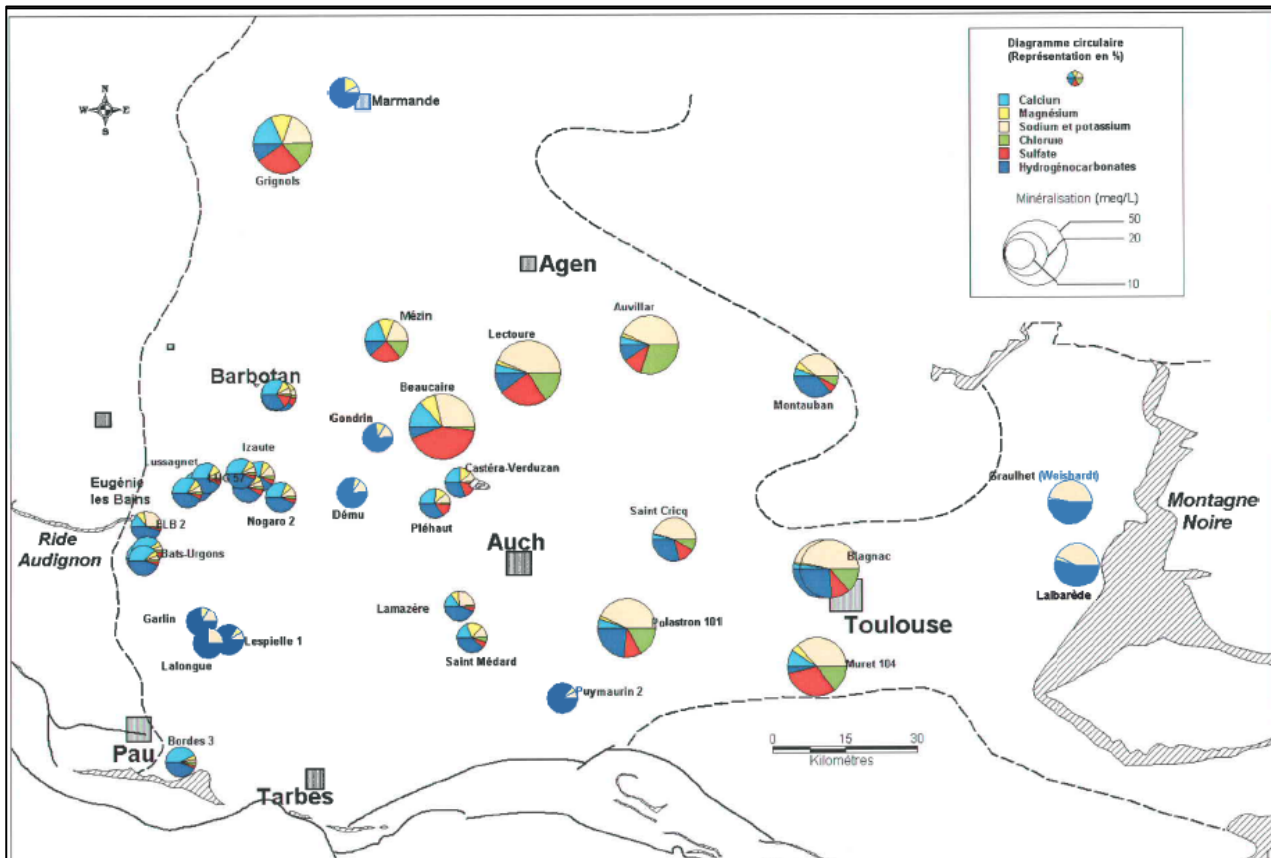


Illustration 23 : répartition géographique des différents faciès des eaux de l'aquifère des Sables infra-molassiques [André, 2002]

Le Nord et l'Est du bassin sont fortement minéralisés. On peut également noter que le Nord du bassin présente une forte proportion de chlorures. Au niveau du forage d'Auvillar (SIM-1, N° BSS : 09293X0123), la présence de deux eaux dans le forage, une douce et l'autre salée, toutes deux chlorurées sodiques pourrait s'expliquer par des remontées d'eau ayant lessivé les séries triasiques de l'Hettangien, le long d'accidents (Kuhn, 1969).

La quantité de sulfates augmente également du Sud au Nord. L'origine de ces sulfates reste actuellement hypothétique.

André (2002) a également analysé les isotopes du soufre. L'illustration 24 fait apparaître trois zones dans le bassin d'Aquitaine, une zone en bordure des Pyrénées où les valeurs de soufre-34 semblent montrer une infiltration d'eau de précipitation (zone A), une zone centrale et Est où le soufre semble hérité de la dissolution de gypse au toit de l'aquifère (zone B), et enfin une zone SW-NE semblant être contrôlée par l'oxydation de sulfites (zone C). Des processus de bioréduction interviendraient localement (zone D).

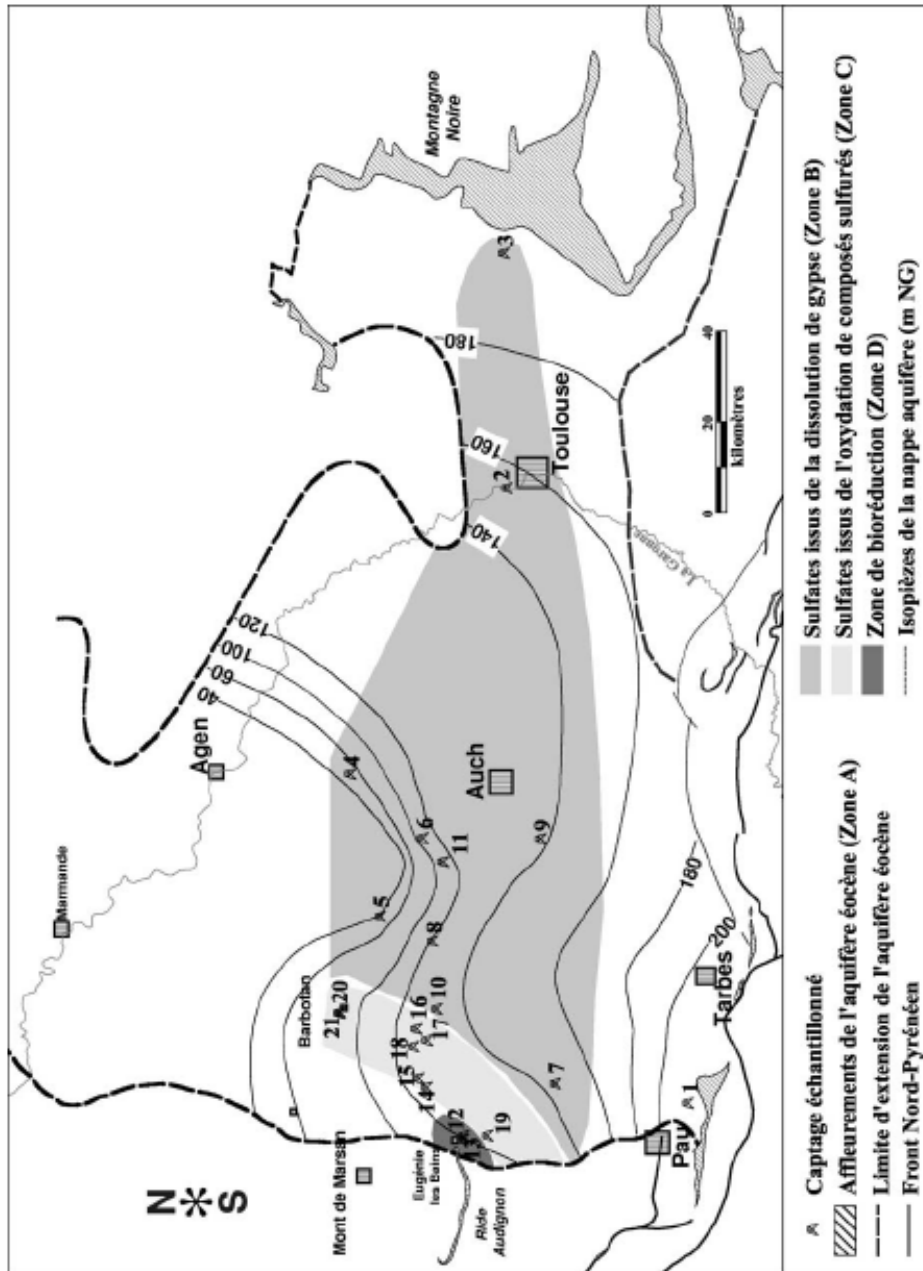


Illustration 24 : représentation géographique des résultats isotopiques obtenus pour le soufre-34 des sulfates dissous dans les SIM [André et al., 2002]

Afin de déterminer l'âge des eaux souterraines des Sables infra-molassiques et ainsi de mieux contraindre le temps de recharge de l'aquifère, des analyses ^{14}C ont été effectuées. En fonction de son activité, on peut approcher l'âge d'eaux compris entre 45 et 35 000 ans. Les résultats obtenus par André (2002) sont présentés dans l'Illustration 25. Il note qu'au niveau des zones d'affleurement les âges sont plus récents, ce qui est cohérent. Au Nord un vieillissement des eaux d'Est en Ouest est

délectable. Bourguine et al. (1997) suggèrent la présence au centre du bassin d'une zone entre Eugénie et Nogaro où les eaux sont particulièrement vieilles (>20 000 ans).

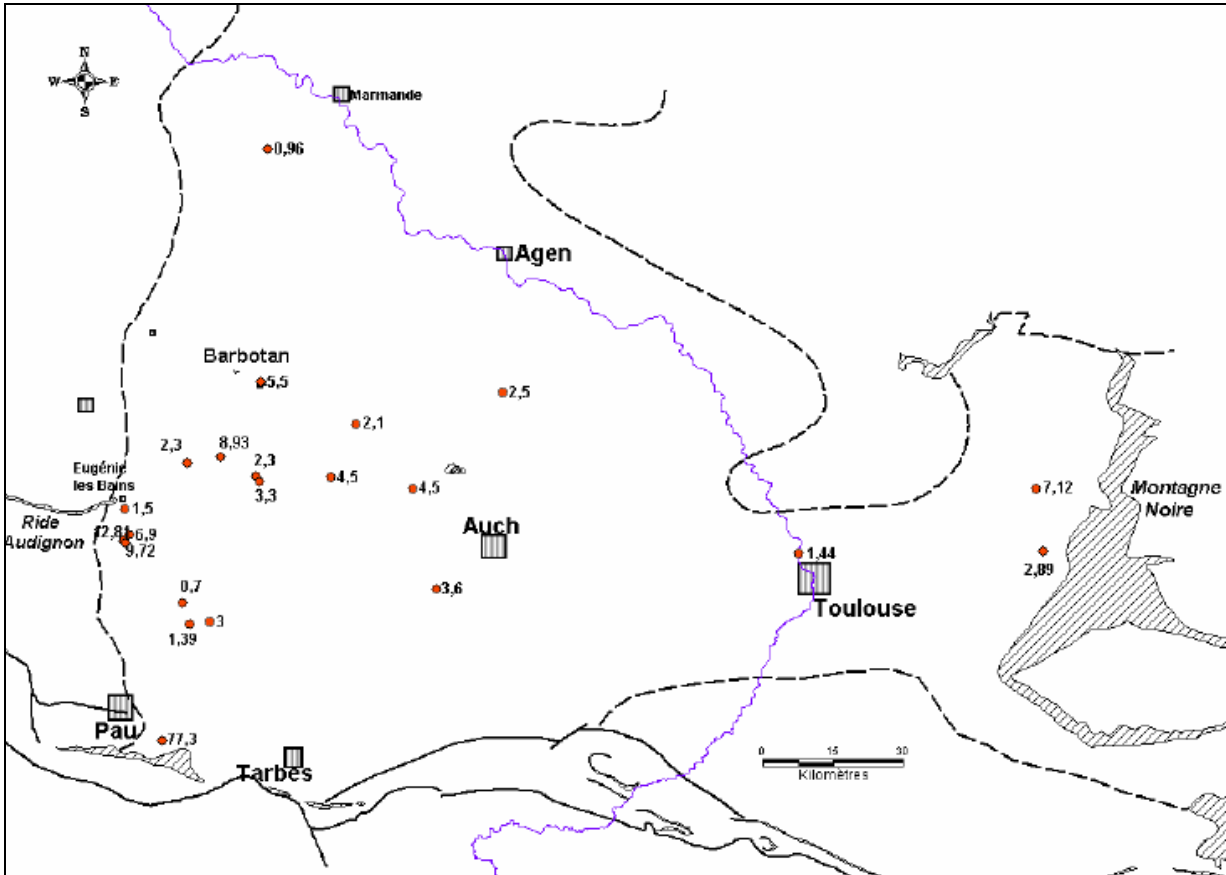


Illustration 25 : distribution de l'activité en carbone-14 des eaux des Sables infra-molassiques [André, 2002]

2.4. L'AQUIFERE PALEOCENE (OU « DANO-PALEOCENE »)

2.4.1. Description du faciès aquifère

La formation aquifère du « Dano-Paléocène » est présente uniquement dans la partie sud du bassin d'Aquitaine, c'est à dire très au Sud de la structure Villagrains – Landiras. On considère actuellement qu'elle constitue un seul réservoir (Housse et Maget, 1977). Cette formation, principalement calcaire et très karstifiée (sauf dans le bassin de Pamiers), contient également des grès et des dolomies.

La zone aquifère est parallèle à la chaîne pyrénéenne, sur 30 à 40 km de large, et limitée au nord par les faciès dolomitiques argileux continentaux et au sud par le passage aux flyschs argilo-gréseux du sillon sous-pyrénéen.

A l'Est le « Dano-Paléocène » est constitué des calcaires du Plantaurel (ANTEA, 1994) qui font plus de 150 mètres d'épaisseur. Il affleure souvent au niveau de structures synclinales et anticlinales. Dans la région de Lavelanet (point d'étude P-1, N° BSS : 09764X0005), les calcaires paléocènes se trouvent à plus de 400 m de profondeur (Roche, 1970). Ces calcaires sont karstifiés, comme l'attestent des phénomènes de marée terrestre (10 cm) en période d'étiage ; en effet ce phénomène est typique du passage d'écoulements de type karstiques à des écoulements régis par la loi de Darcy (Armand, 1994). Au dessus on trouve une épaisse couche de marne.

Dans le bassin de Mirande la formation est constituée de couches calcaréo-dolomitiques surmontées de corps détritiques grésosableux. A l'Ouest de Auch, l'aquifère est constitué de dolomies surmontées par des calcaires dolomitisés.

Entre Préchacq et Dax on a probablement un écoulement dans des zones karstiques riches en dolomies au vu du décalage des interférences observées dans ces deux forages. Dans la zone Garlin/Audignon on note une karstification et une dolomitisation très étendues (Armand, 1994).

La partie ouest de l'aquifère est peu karstifiée. On note la présence de nombreuses structures dans cette partie du bassin. On peut noter la structure d'Audignon, qui a sûrement l'influence la plus importante, ainsi que les structures de Bastenne-Gaujacq, de Créon, Roquefort et de Louer.

Il est également intéressant de noter la présence d'évaporites, potassiques à Dax et Préchacq, appauvries en brome sur Tercis et Saubusse, enrichies en bore à Gamarde.

2.4.2. Dynamique de l'aquifère : fonctionnement hydrogéologique

La piézométrie de cette formation aquifère laisse apparaître un écoulement de direction Sud-est / Nord-Ouest au sein du Dano-Paléocène. Son axe de drainance correspondrait à l'Adour.

C'est un réservoir très productif grâce à sa forte karstification, qui permet le stockage de quantités importantes d'eau.

Cet aquifère serait alimenté:

- en majorité par sa périphérie à l'Est-Sud-Est (Haute Garonne, Pamiers, Mirande) et au Sud (Pau). Dans le bassin de Pamiers (Ariège, près de P5), l'alimentation s'effectue à partir des affleurements des petites Pyrénées et du Plantaurel. Plus à l'Ouest le flysch du sillon sous-pyrénéen isole la structure et s'oppose à une alimentation par les affleurements. Cette alimentation se ferait à l'Est de Lussagnet par l'intermédiaire des Sables infra-molassiques qui alimenteraient le Dano-Paléocène lors de la disparition de la couverture argileuse yprésienne (Institut géodynamique de Bordeaux III, 1994). A ce niveau la charge hydraulique de l'aquifère des SIM est supérieure de 20 m à celle du « Dano-Paléocène ». Le long du front nord pyrénéen, près d'Oloron Sainte Marie et au Sud de Pau, une possibilité d'alimentation existe à travers le sillon sous-pyrénéen par le calcaire de

Lasseube, relayé par le calcaire gréseux du Crétacé supérieur et de l'Eocène moyen qui affleurent.

- au niveau de la structure d'Audignon notamment (âges carbone-14 attestant d'un mélange avec les eaux météoriques, Chery et al., 1997). Le mécanisme consisterait en une infiltration des précipitations sur les parties hautes karstifiées, y compris à travers les Sables fauves. L'eau serait restituée en aval soit par l'effet de drainage des cours d'eau, soit en complément du débit d'émergence de la nappe profonde dans les points bas de la structure. La structure Bastenne-Gaujacq, de Créon, Roquefort fonctionneraient de même. De même la structure de Louer, bien que son extension en réduise l'importance.

Un écoulement vers le Nord-Ouest existerait dans tout l'aquifère. On note l'existence probable de deux types d'aquifère : un poreux, de vitesse d'écoulement lente, et un fracturé (karst) où la vitesse d'écoulement serait beaucoup plus rapide, notamment à l'Ouest du domaine (Blavoux et al., 1993). Au contact des bordures évaporitiques de diapirs l'eau se minéraliserait et se réchaufferait. Des mélanges avec les eaux sus-jacentes existent.

Les exutoires sont principalement :

- émergence à l'Est au niveau des anticlinaux. De nombreux bas fonds humides sont présents sur les différentes structures hautes. Ils peuvent constituer des zones de drainage diffus (Audignon, Bastennes, Louer, Thétieu).
- en aval émergence au niveau des sources de Dax, Garmarde, Préchacq (sur la structure de Thétieu), Saubusse, Saint Paul les Dax et Tercis (Chery et al., 1997). Ce sont les exutoires les plus importants. De même la source de Gourgues sur la structure de Louer.

De manière générale, on note une baisse progressive de la piézométrie due à l'augmentation des prélèvements.

2.4.3. Chimie : éléments majeurs et traces, isotopes

Dans le domaine karstifié et dolomitisé, où l'aquifère peut avoir une bonne productivité, l'eau est douce et de bonne qualité chimique (Housse et Maget, 1977). Son faciès bicarbonaté calcique est à rapprocher de celui des eaux de l'Eocène.

Dans le bassin de Pamiers, la salinité est plus élevée et l'eau présente un faciès sulfaté ou chloruré. En bordure de la zone sous-pyrénéenne, les salinités augmentent très rapidement.

A l'Ouest, en bordure des diapirs et des failles injectées du Trias salifère, la salinité est parfois élevée, l'eau devient sulfatée ou chlorurée. En bordure de la zone sous pyrénéenne la salinité augmente très rapidement.

On note la présence d'un dôme à Louer favorable à des contaminations superficielles.
A proximité se trouve le diapir de Thétieu.

Certains points de cet aquifère montrent une contamination par les eaux récentes
(teneur en tritium supérieure à 2 UT) comme à Audignon (Bourguin et al., 1997).

3. Les diagraphies physico-chimiques des eaux souterraines

3.1. OBJECTIF ET CONTEXTE

L'objectif du projet Carismeau est de caractériser les différentes masses d'eau souterraine du district Adour-Garonne. Or pour caractériser de façon réaliste des masses d'eau de volume important, il est nécessaire d'avoir une approche tridimensionnelle de leurs caractéristiques tant chimiques que physiques.

Afin d'apporter une réponse à cet objectif, une série de diagraphies physico-chimiques a été réalisée lors de la mission de mai 2006. Les diagraphies physico-chimiques des eaux permettent l'acquisition en continu, en fonction de la profondeur, de paramètres de base des eaux. Elles sont donc un outil de caractérisation de la stratification verticale éventuelle de l'eau souterraine au sein de la masse d'eau. La comparaison des diagraphies obtenues en plusieurs points du district donnera un aperçu des hétérogénéités éventuelles des masses d'eau.

De plus, les diagraphies constituent un outil d'aide à la décision sur le terrain. En effet, afin de connaître les hétérogénéités latérales des masses d'eau souterraine profonde, une série de prélèvements d'eau en différents points du district en vue d'analyses chimiques et isotopiques a été décidée. Cependant, il est difficile et très coûteux de prélever de l'eau directement dans une masse d'eau profonde. C'est pourquoi l'eau est prélevée par le biais d'ouvrages déjà en place qui captent les masses d'eau profondes. Dans ces ouvrages de type forage crépiné, l'eau naturellement piégée dans une nappe captive, se retrouve au contact de l'atmosphère ; elle remonte alors donc dans le tubage par effet piézométrique. C'est dans cette colonne d'eau que sont effectués les prélèvements. Cependant, il est apparent que la partie surfacique de l'eau contenue dans cette colonne artificielle peut subir des modifications de ses propriétés au contact de l'atmosphère, mais également en raison de ruissellements accidentels d'eau de surface dans le forage, ou d'eau d'un aquifère plus superficiel à travers un tubage dont l'étanchéité serait déficiente. Ceci est particulièrement vrai lorsque l'on utilise un forage abandonné. Déterminer la profondeur à partir de laquelle les propriétés physico-chimiques de l'eau contenue dans le forage sont représentatives de la masse d'eau souterraine constitue donc un enjeu important. La réalisation de diagraphies physico-chimiques dans les forages avant prélèvement permet de détecter les variations des paramètres de base de l'eau en fonction de la profondeur. Les diagraphies sont donc un outil d'aide à la décision sur le terrain, qui permet de mieux cibler les zones d'échantillonnage.

Un inventaire des différents forages actuellement non exploités et de certains ouvrages pouvant être facilement déséquipés dans le bassin Adour-Garonne a été effectué par l'agence de l'Eau Adour-Garonne et le Service Géologique Régional (SGR) Midi Pyrénées. Parmi ces forages, ceux dans lesquels des diagraphies pouvaient être effectuées ont été listés. Au cours de la semaine du 15 au 19 mai 2006, le BRGM a effectué 9 diagraphies par sondes Idronaut, pouvant fonctionner jusqu'à 300 mètres de profondeur. Ces sondes

permettent, sur le terrain la mesure des paramètres suivants : Température, Potentiel rédox, pH, Conductivité électrique, Oxygène dissous.

Sur le terrain, lors de la deuxième campagne de prélèvement, il s'est avéré que le point noté initialement EM-10 ne capte pas les niveaux aquifères de l'Eocène moyen mais le plio-quaternaire et ne sera donc pas considéré dans la suite de l'étude.

3.2. LA METHODE

3.2.1. Les outils des diagraphies :

Deux sondes multiparamètres Idronaut (une ocean seven 303 et une ocean seven 302) ont été utilisées pour effectuer les diagraphies. Ce type de sonde permet la mesure simultanée de plusieurs paramètres physiques et chimiques en fonction de la profondeur d'eau (pH, température, conductivité et pourcentage d'oxygène dissout par rapport à une eau saturée en oxygène pour ces deux sondes et potentiel rédox en supplément pour la sonde ocean seven 303). Les caractéristiques de ces sondes sont données dans l' *Illustration 26*.

Caractéristique de la sonde Idronaut 303				
Paramètres	Gamme de valeurs	Précision	Résolution	Constante de temps
Température	-1...+50°C	0.005°C	0.001°C	50 ms
Conductivité				
Eau salée	0...64 mS/cm	0.005mS/cm	0.001mS/cm	50 mS/cm
Eau douce	0...6400 µS/cm	1 µS/cm	0.1 µS/cm	50 ms
Oxygène	0...50 ppm	0.1 ppm	0.01 ppm	3 s
	0...500 %sat	1 %sat	0.1 %sat	3 s
pH	0...14 pH	0.01 pH	0.001 pH	3 s
Potentiel rédox	-/+1000 mV	1 mV	0.1 mV	3 s

Illustration 26 : Caractéristiques de la sonde multiparamétrique Idronaut ocean seven 303 utilisée lors du projet Carismeau [d'après : <http://idronaut.it>]

Un câble de 100 mètres et un câble de 300 mètres adaptés à ce type de sonde ont permis de descendre ces dernières dans les ouvrages et de récupérer les informations en continu.

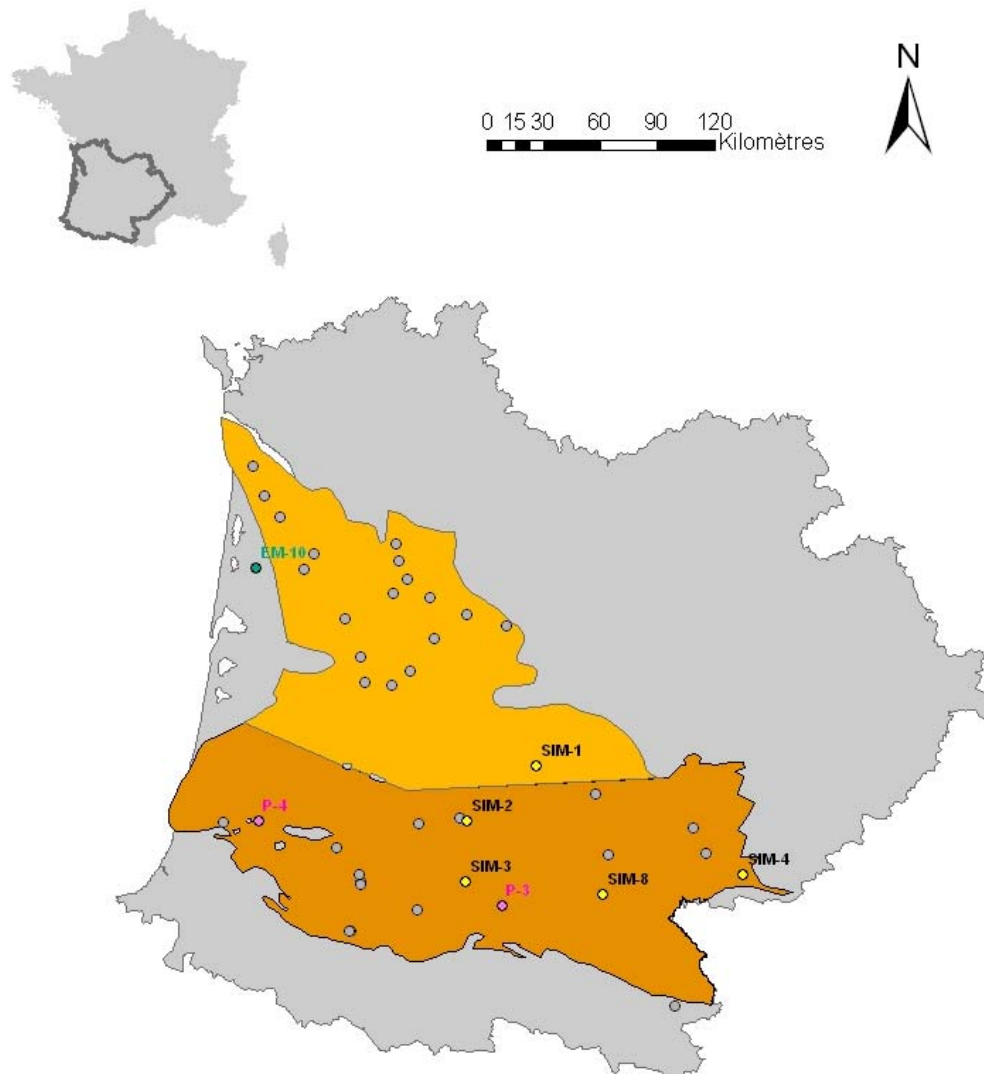
3.2.2. Protocole

La sonde est étalonnée avant la diagraphie. Elle est ensuite descendue à une vitesse de 3 à 5 mètres par minute dans le forage à l'aide du câble. Les mesures du pH, de la conductivité, de la Température, de la concentration massique en oxygène et éventuellement du potentiel rédox de l'eau sont alors effectuées en continu, à partir de la surface statique de l'eau.

3.2.3. Les limites de la méthode

La principale difficulté pour caractériser les masses d'eau souterraines, est liée à leur accès. Ceci est particulièrement vrai dans le cas des nappes d'eau souterraines du bassin Adour-Garonne, car elles se situent à des profondeurs relativement importantes, supérieures à 1000 mètres dans la région de Toulouse et Auch notamment. Si cette profondeur est un atout pour les préserver des pollutions anthropiques, il est néanmoins difficile d'effectuer des mesures directement dans la nappe. Quelques ouvrages, en place dans le district Adour-Garonne, sont équipés de crépines au niveau des masses d'eau profondes. Ces masses d'eau faisant partie d'aquifères captifs, l'eau remonte dans le forage jusqu'à la hauteur piézométrique de l'aquifère concerné. C'est dans cette colonne d'eau, supposée refléter les masses d'eau au contact des crépines, que sont effectuées les diagraphies, et non pas directement dans la nappe. Une possible contamination de la colonne d'eau par des eaux de ruissellement de surface ou d'infiltration à travers le tubage imparfaitement étanche est donc à prendre en compte. Les mesures ne sont donc pas forcément représentatives de la masse d'eau souterraine. De plus la longueur des câbles disponibles (300 mètres au maximum) et la configuration de la sonde (configurée jusqu'à 15 kbars) n'ont permis d'effectuer des mesures que sur les 150 premiers mètres de la colonne d'eau, ce qui ne permet pas toujours de détecter son éventuelle stratification verticale.

Par ailleurs, la réalisation des diagraphies est limitée par le nombre restreint de forages pouvant accueillir les sondes Idronaut, de nombreux forages étant équipés.



Légende

Points pour lesquels uniquement des prélèvements d'eau ont été réalisés



Points pour lesquels des diagraphies ont été réalisées (Niveaux aquifères associés)

- Sables Infra-Molassiques
- Eocène supérieur
- Eocène moyen
- Eocène inférieur
- Paléocène
- Masse d'eau 5071
- Masse d'eau 5082
- Agence de l'eau Adour-Garonne

Illustration 27 : localisation des diagraphies effectuées par le BRGM pour le projet Carismeau – mai 2006 (P = Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)

3.3. CAS D'APPLICATION

Sur les 42 forages où ont été effectués des prélèvements d'eau souterraine en vue d'analyses chimiques, seuls 9 ont permis la réalisation de diagraphies (Illustration 28).

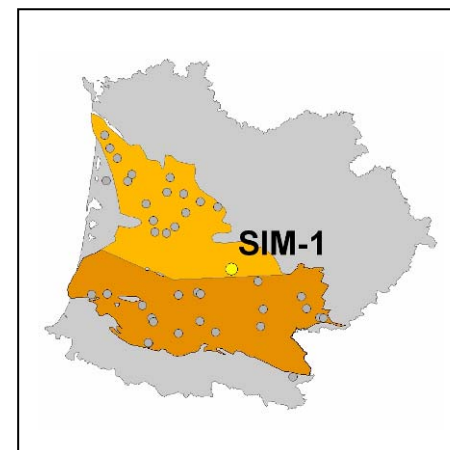
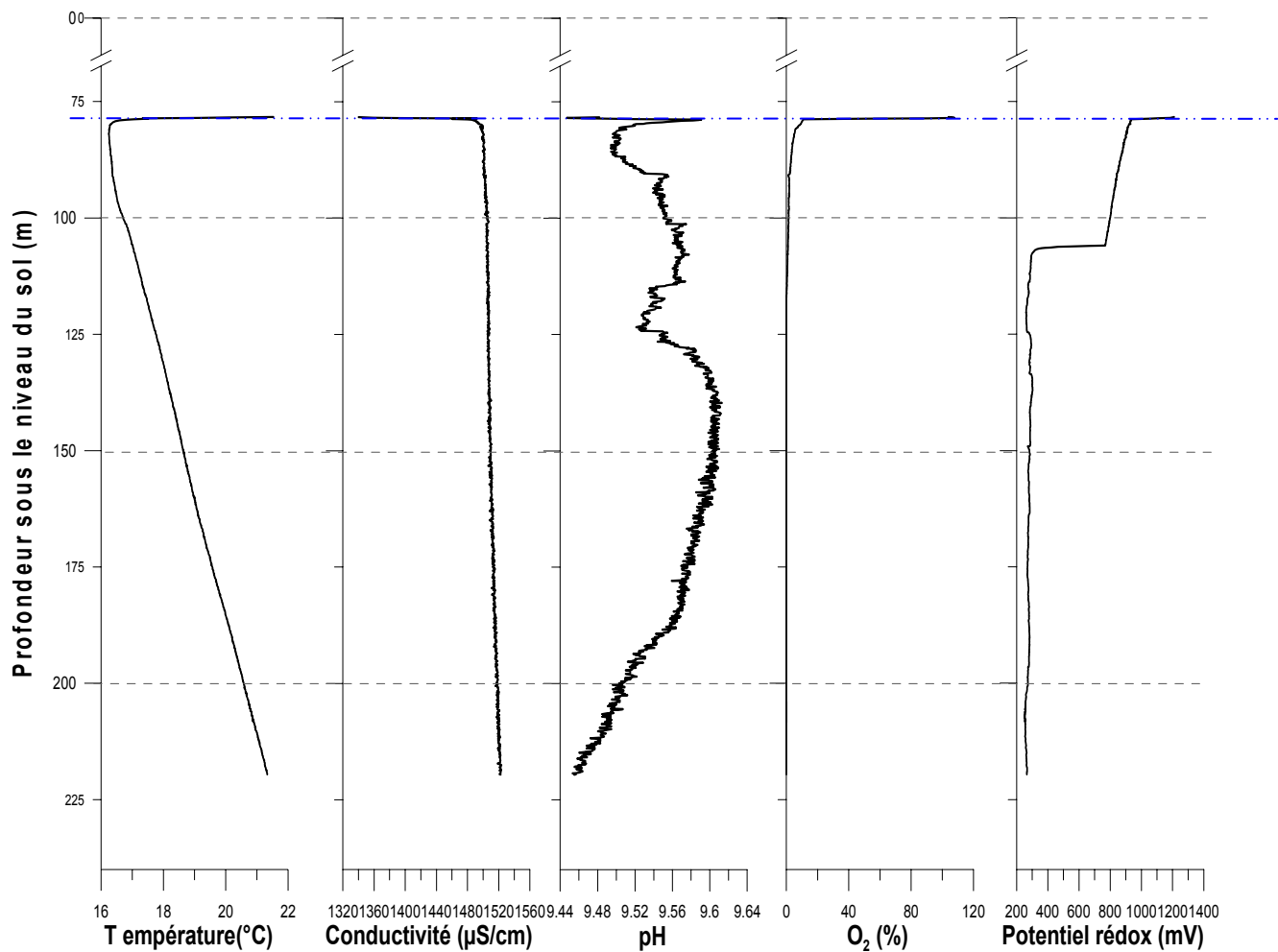


Illustration 28 : campagne de prélèvement de mai 2006 ; descente d'une sonde Idronaut dans le forage SIM-8 (N° BSS : 10098A0004)

Ces diagraphies par sonde Idronaut s'intéressent préférentiellement à l'aquifère des Sables infra-molassiques (5 diagraphies pour cet aquifère), mais une diagraphie a également été réalisée dans l'aquifère de l'Eocène moyen et deux dans l'aquifère Paléocène.

La localisation des forages dans lesquels ont été effectuées ces diagraphie est donnée Illustration 27.

Les résultats des diagraphies sont présentés ci après par aquifère. Pour chaque diagraphie le pourcentage d'oxygène dissous est calculé par rapport à une eau saturée en oxygène ; la conductivité a été corrigée à 25°C, avec une correction de 2% par degré Celsius ; le potentiel rédox, lorsqu'il a pu être mesuré, a été corrigé du potentiel de l'électrode et de la température.



--- Niveau piézométrique :
77,21 m

Illustration 29 : diagraphie SIM-1 (N° BSS : 09293X0123)

3.3.1. Les diagraphies de l'aquifère des Sables infra-molassiques :

- **Diagraphie SIM-1** : (Illustration 29)

Cette diagraphie a été réalisée dans la masse d'eau 5071 « Sables, graviers, galets et calcaires de l'Eocène nord du bassin Adour-Garonne », à l'intérieur d'un forage de 579.30 mètres de profondeur. Des crépines se trouvent entre 514.1 et 565 mètres de profondeur. La surface piézométrique de l'eau dans le forage se trouvait 77.21 mètres sous la surface du sol.

Les mesures ont été effectuées sur 140 mètres à partir du sommet de la colonne d'eau.

On observe une évolution linéaire de la température qui augmente de 3.75° tous les 100m. La conductivité électrique est quasiment constante avec des valeurs autour de 1500 μ S/cm. Cette conductivité caractérise une eau assez minéralisée.

Le pH est assez basique et varie peu, de 9.45 à 9.61. Cependant on peut noter des variations de pH de faibles amplitudes qui pourraient nous amener à distinguer deux parties sur la diagraphie : la première de 77 à 120 m et la deuxième de 120 à 220 mètres. Dans chacune de ces parties, le pH augmente progressivement pour se stabiliser autour d'une valeur puis diminue à nouveau progressivement. La diminution du pH se fait de façon beaucoup plus linéaire et importante dans la deuxième partie de la courbe et se poursuit donc peut être plus en profondeur.

Le pourcentage d'oxygène dissous dans l'eau, diminue très rapidement avec la profondeur pour passer sous le seuil des 2% dès 12.5 m et atteindre 0% dès 39 m sous le niveau piézométrique. De telles teneurs en oxygène marquent clairement une eau souterraine.

Le potentiel d'oxydoréduction présente quant à lui un profil en marche d'escalier, avec un saut de valeur d'environ 460 mV autour de 106 m. Jusqu'à 106 m le potentiel rédox diminue de façon linéaire depuis 930 mV jusqu'à 770 mV. Il passe alors de façon brutale (environ un mètre) à des valeurs de l'ordre de 310 mV. Il varie globalement par la suite entre 300 et 265 mV.

On peut noter que le saut de potentiel rédox intervient globalement à la profondeur où l'on entre dans une eau totalement anoxique. Par contre la corrélation avec la courbe de pH est moins évidente.

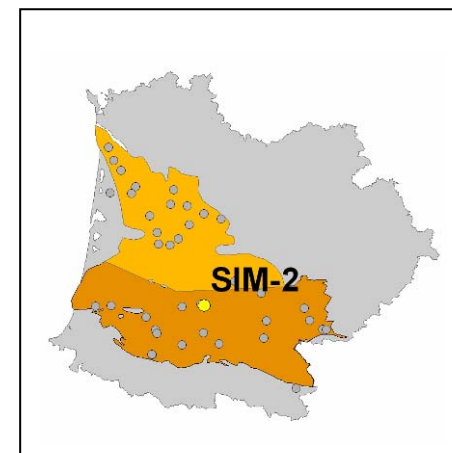
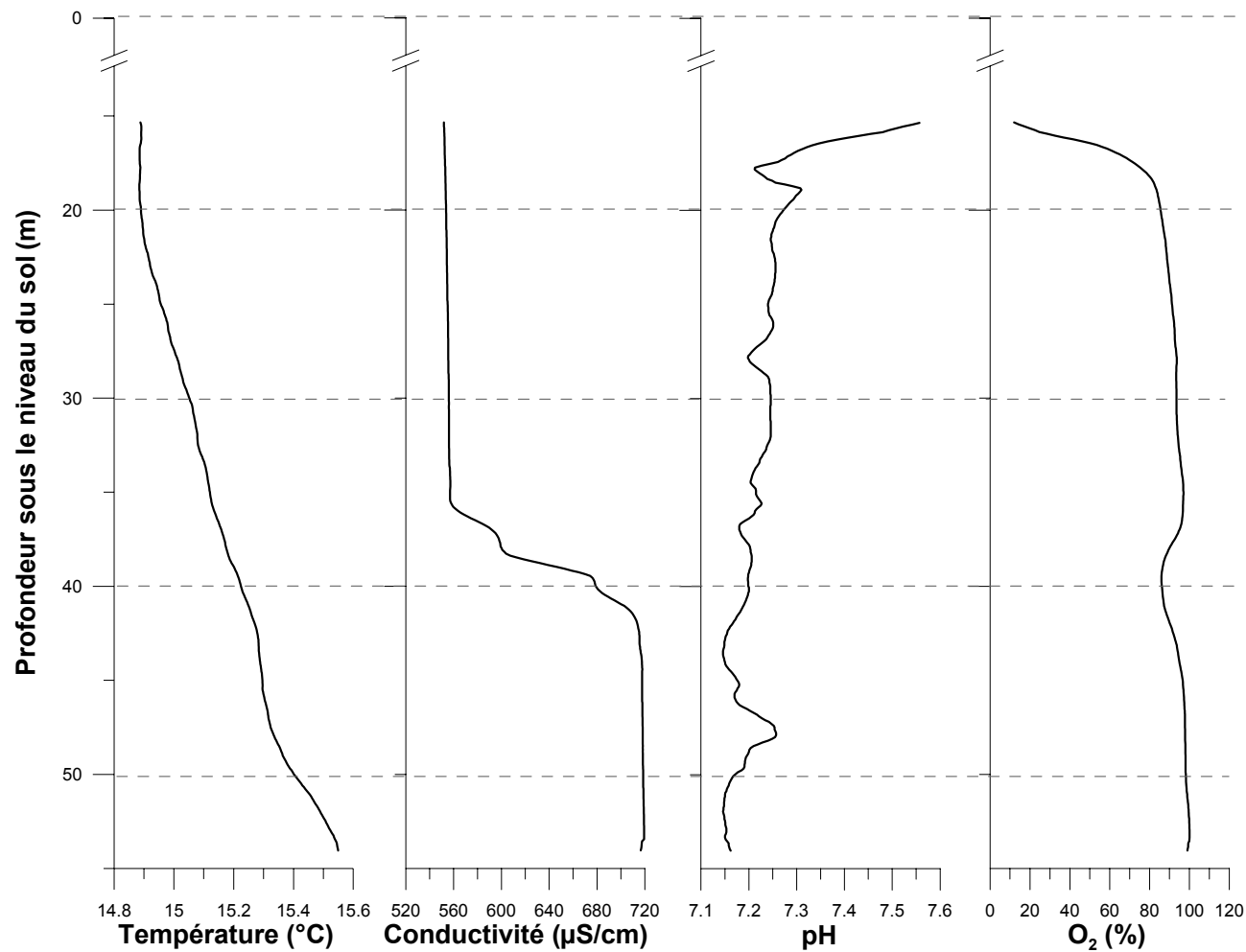


Illustration 30 : diagraphie SIM-2 (N° BSS : 09546X0022)

- **Diagraphie SIM-2** : (Illustration 30)

Cette diagraphie a été réalisée dans la masse d'eau 5082 « Sables, calcaires et dolomies de l'Eocène-Paléocène captif du sud du bassin Adour-Garonne », à l'intérieur d'un forage de 57.80 mètres de profondeur. La surface piézométrique de l'eau dans le forage se trouvait 14.16 mètres sous la surface du sol.

Les mesures ont été effectuées sur 40 mètres à partir du sommet de la colonne d'eau.

On observe une évolution quasi linéaire de la température qui augmente avec la profondeur de 0.8° au cours de la diagraphie.

Les valeurs de conductivité électrique se situent dans l'intervalle 552-717 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cette gamme de valeurs caractérise une eau faiblement minéralisée. L'allure de la courbe permet de diviser la colonne d'eau en deux parties : une première jusqu'à 35m de conductivité 550 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et une seconde après 42 m de conductivité 717 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Entre 35 et 42 mètres de profondeur on observe une évolution rapide de la conductivité de 550 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 717 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cette évolution se fait sous la forme de 3 petites « marches d'escalier ».

Le pH, dont les valeurs sont proches de la neutralité varie faiblement entre 7.3 à 7.1 environ.

Le pourcentage d'oxygène dissous mesuré dans l'eau, montre une évolution surprenante. Au contact de l'atmosphère on a 10% d'oxygène dissous dans l'eau. Ce pourcentage augmente très rapidement sous le niveau piézométrique pour atteindre 80% dès 5 m de profondeur d'eau. En fin de diagraphie on mesure des valeurs de l'ordre de 100%. Cette oxygénation de l'eau est surprenante pour une eau supposée souterraine. Nous pouvons noter également une légère baisse de ce pourcentage de l'ordre de quelques pour cents aux profondeurs correspondantes au saut de conductivité électrique.

On a donc pu mettre en évidence une évolution surprenante de la courbe de la conductivité électrique. L'augmentation nette de la conductivité électrique en profondeur traduit une augmentation du nombre d'ions en solution.

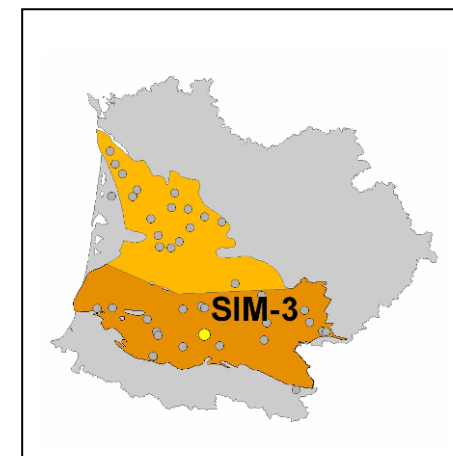
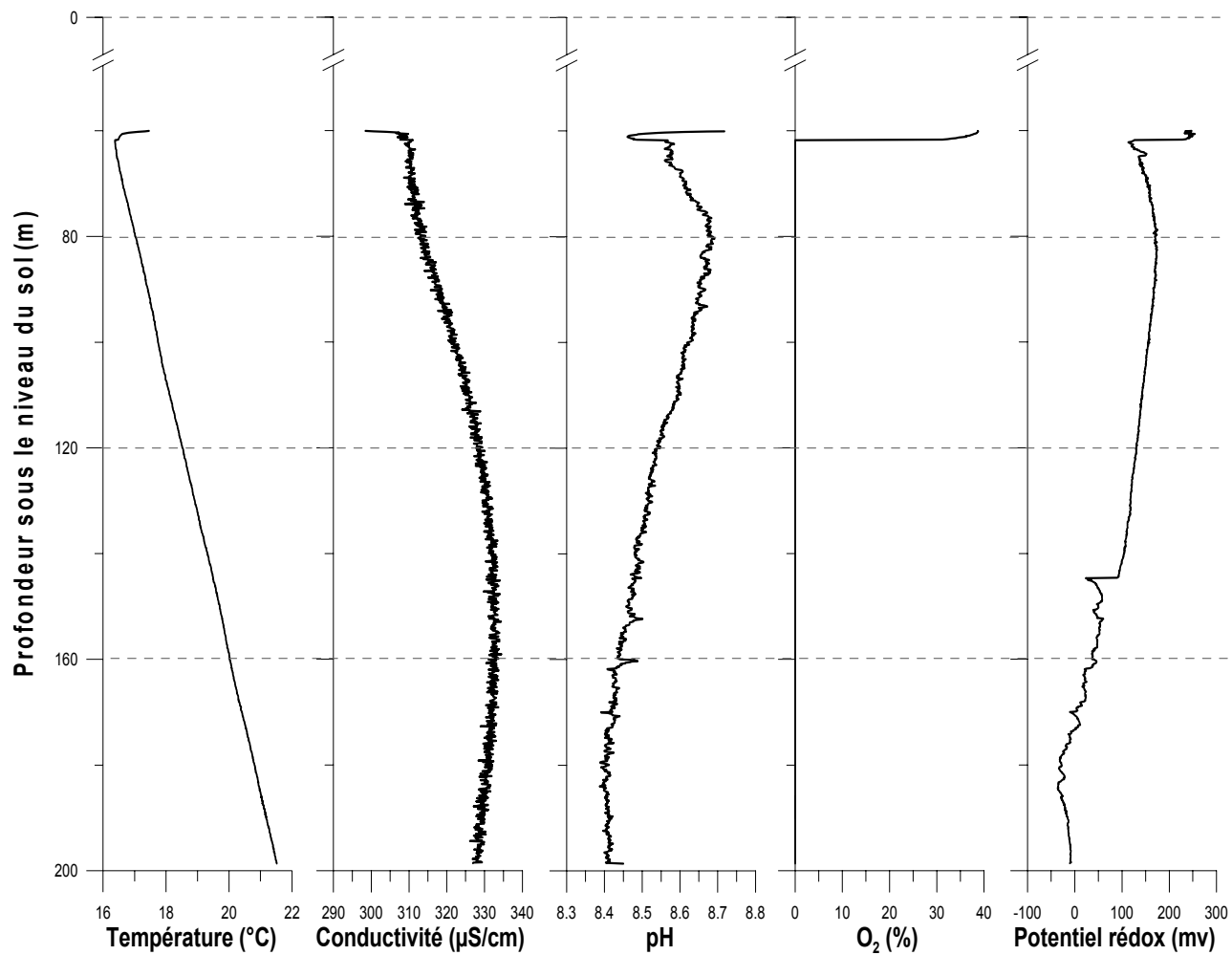


Illustration 31 : diagraphie SIM-3 (N° BSS : 10072X0026)

- **Diagraphie SIM-3:** (Illustration 31)

Cette diagraphie a été réalisée dans la masse d'eau 5082 « Sables, calcaires et dolomies de l'Eocène-Paléocène captif du sud du bassin Adour-Garonne », à l'intérieur d'un forage de 253 mètres de profondeur. Des crépines se trouvent entre 213 et 237 mètres. La surface piézométrique de l'eau dans le forage se trouvait 59.90 mètres sous la surface du sol.

Les mesures ont été effectuées sur 140 mètres à partir du sommet de la colonne d'eau.

On observe une évolution linéaire de la température qui augmente de 3.75° tous les 100m. La conductivité électrique augmente avec la profondeur de façon plus sigmoïdale depuis 298 $\mu\text{S}/\text{cm}$ jusqu'à 330 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valeur autour de laquelle elle semble se stabiliser. Cette gamme de conductivité caractérise une eau faiblement minéralisée.

Le pH est basique et varie peu, de 8.40 à 8.70. Il diminue progressivement dans les 1.8 premiers mètres sous le niveau piézométrique de 8.70 à 8.56. Puis il augmente dans les 20 mètres suivants jusqu'à obtenir sa valeur maximale de 8.70 et diminue progressivement par la suite jusqu'à se stabiliser autour de 8.40.

Le pourcentage d'oxygène dissous dans l'eau, présente des valeurs de l'ordre de 38% au niveau de la surface piézométrique puis chute brutalement 1.8m sous le niveau piézométrique pour passer en l'espace de 10 cm de 30% à 0%. L'absence d'oxygène à partir de cette profondeur marque une eau d'origine souterraine.

Comme pour l'oxygène, le potentiel d'oxydoréduction présente un saut de valeur 1.8 m sous le niveau piézométrique. En effet, l'eau en surface possède un potentiel rédox de 248 mV, typique d'une eau oxydante. Ce potentiel diminue progressivement jusqu'à 228 mV 1.8 m sous le niveau piézométrique. Puis il chute brusquement en l'espace de 10 cm pour passer à une valeur de 126 mV. Par la suite le potentiel d'oxydoréduction présente un profil proche de celui du pH. Il augmente dans les 20 mètres suivants de -112 mV jusqu'à sa valeur maximale de 175 mV, puis diminue progressivement plus en profondeur jusqu'à se stabiliser autour de -9 mV. Cette valeur négative est typique d'une eau légèrement réductrice.

On notera donc un changement des propriétés physico-chimiques de l'eau 1.8 m sous le niveau piézométrique : ce changement est brusque pour le pourcentage d'oxygène dissous qui devient nul au delà de cette profondeur ainsi que pour le potentiel d'oxydoréduction, qui indique une eau nettement moins oxydante ; il est visible sur le pH, mais se fait de façon plus progressive (effet tampon ?). On remarquera également la forme sigmoïdale des paramètres pH, conductivité et potentiel rédox, et une stabilisation de leurs valeurs en profondeur.

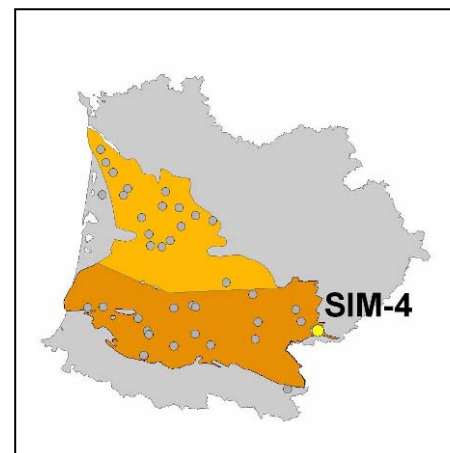
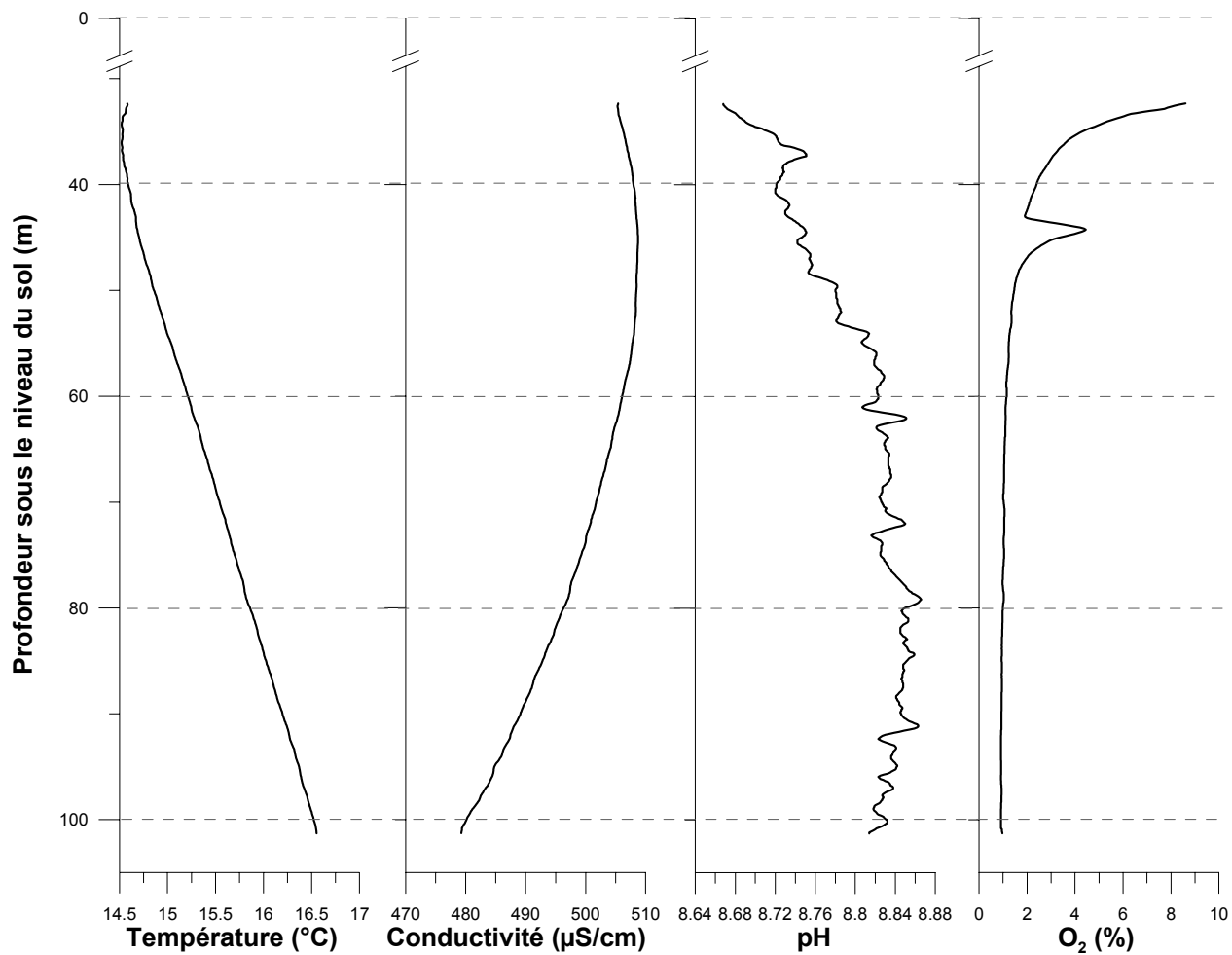


Illustration 32 : diagraphie SIM-4 (N° BSS : 10122X0055)

- **Diagraphie SIM-4 : (Illustration 32)**

Cette diagraphie a été réalisée dans la masse d'eau 5082 « Sables, calcaires et dolomies de l'Eocène-Paléocène captif du sud du bassin Adour-Garonne », à l'intérieur d'un forage de 177 mètres de profondeur. La surface piézométrique de l'eau dans le forage se trouvait 31.35 mètres sous la surface du sol.

Les mesures ont été effectuées sur 70 mètres à partir du sommet de la colonne d'eau.

On observe une évolution linéaire de la température qui augmente de 14.5°C à 16.5°C.

La conductivité électrique présente des valeurs comprises entre 479 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 508 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cet intervalle très restreint témoigne d'une minéralisation en quantité quasi constante sur toute la colonne d'eau. La courbe de forme convexe ne présente aucune rupture de pente. La conductivité augmente progressivement dans les 30 premiers mètres sous le niveau piézométrique puis diminue progressivement avec la profondeur.

Le pH est basique et varie peu, de 8.70 à 8.90. La courbe présente une forme similaire à celle de la conductivité mais atteint sa valeur maximale plus en profondeur, autour de 60 m sous le niveau piézométrique.

Le pourcentage d'oxygène dissous dans l'eau, varie de 8.6% à 1%. On note qu'il diminue rapidement avec la profondeur, mais se stabilise à 1% : il n'est jamais nul. On notera également un pic d'oxygène (4.4%) 13 mètres sous le niveau piézométrique.

Les diagraphies ne reflètent donc aucun changement brutal des propriétés physico-chimiques de la colonne d'eau étudiée. Les variations des paramètres mesurés sont de faible amplitude.

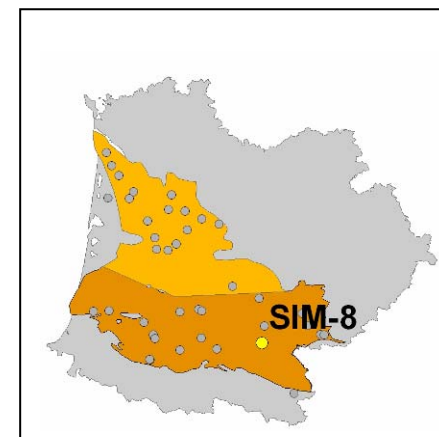
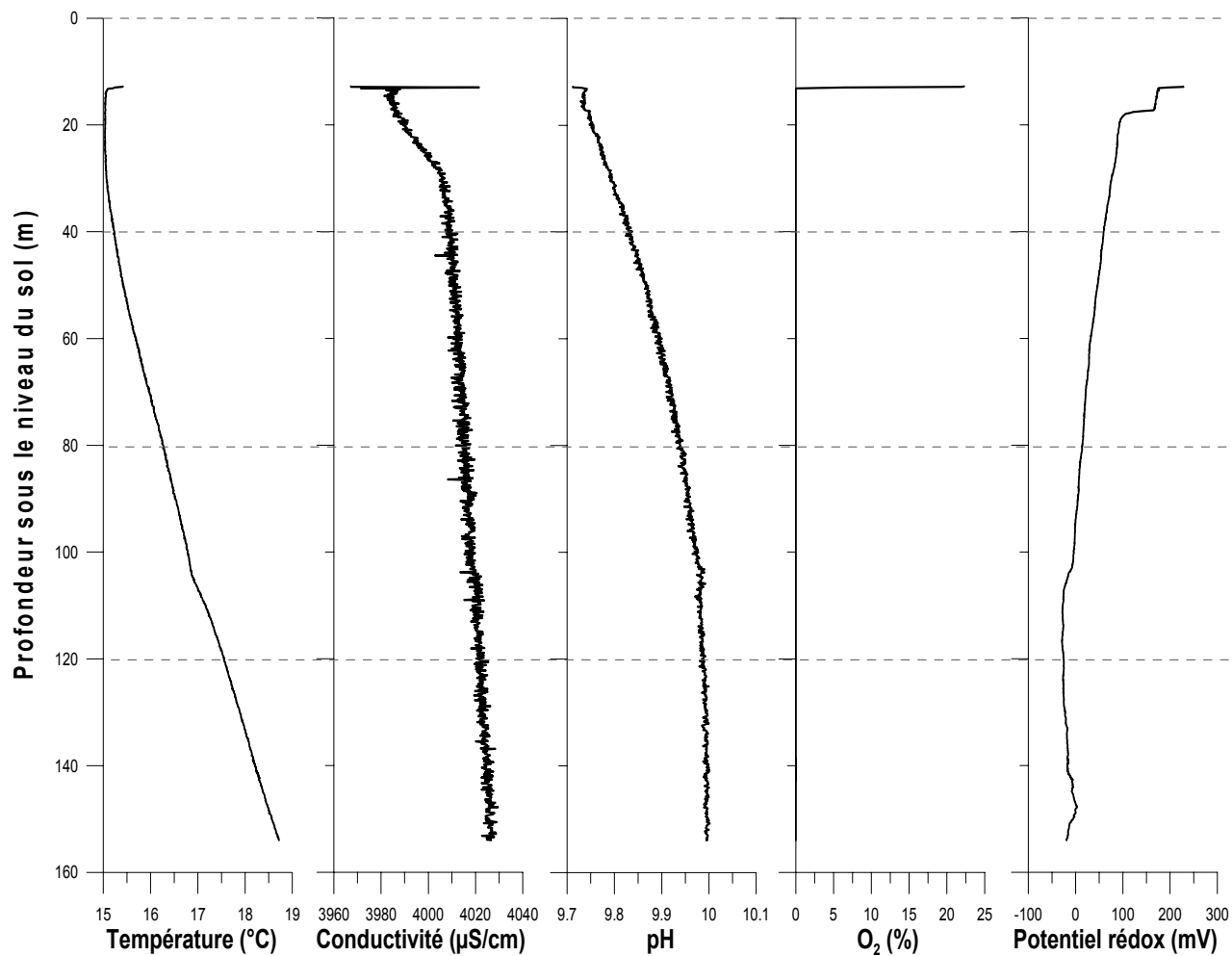


Illustration 33 : diagraphie SIM-8 (N° BSS : 10098A0004)

- **Diagraphie SIM-8 : (Illustration 33)**

Cette diagraphie a été réalisée dans la masse d'eau 5082 « Sables, calcaires et dolomies de l'Eocène-Paléocène captif du sud du bassin Adour-Garonne », à l'intérieur d'un forage de 1410 mètres de profondeur. Des crépines se trouvent entre 1031.6 et 1040 mètres. La surface piézométrique de l'eau dans le forage se trouvait 12.58 mètres sous la surface du sol.

Les mesures ont été effectuées sur 140 mètres à partir du sommet de la colonne d'eau, à une fréquence d'une mesure tous les 10 cm.

On observe une évolution linéaire de la température qui augmente de 15.4°C à 18.7°C.

La conductivité électrique présente des valeurs très élevées et augmente linéairement avec la profondeur selon deux pentes, depuis 3967 $\mu\text{S}/\text{cm}$ jusqu'à 4026 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Le changement de pente intervient vers 30 m de profondeur. Cette conductivité élevée reflète une eau très fortement minéralisée, de qualité médiocre pour la consommation.

Le pH est basique et augmente également progressivement avec la profondeur de 9.7 à 10. Cependant sa courbe suit une forme plus asymptotique et se stabilise peu à peu avec la profondeur.

Le pourcentage d'oxygène dissous dans l'eau, chute à 0 dès 60 cm sous le niveau piézométrique. Ceci reflète une eau d'origine souterraine.

Le potentiel rédox présente des valeurs oxydantes en surface (227 mV) mais chute très rapidement par l'intermédiaire de deux marches d'escalier, une à 172 mV à partir de 40 cm sous la surface d'eau et une seconde à 107 mV un peu moins de 5 m sous la surface de l'eau. Par la suite la diminution du potentiel rédox se poursuit avec la profondeur selon une courbe asymptotique qui se stabilise autour de -19 mV (eau réductrice).

Les courbes de la température et de la conductivité électrique présentent un changement de pente net vers 30 m de profondeur. Les courbes de la température, du pH et du potentiel rédox présentent un léger changement de pente à 105 m de profondeur.

Ces diagraphies ne reflètent pas de changement brusque des propriétés physico-chimiques de la colonne d'eau.

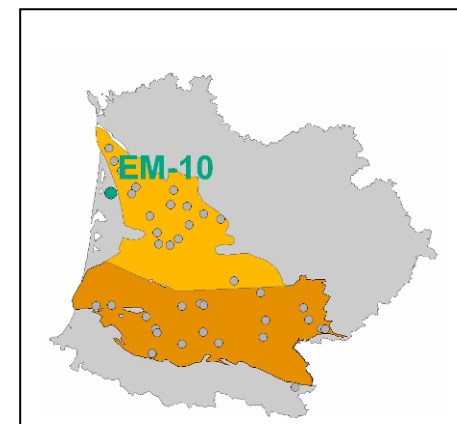
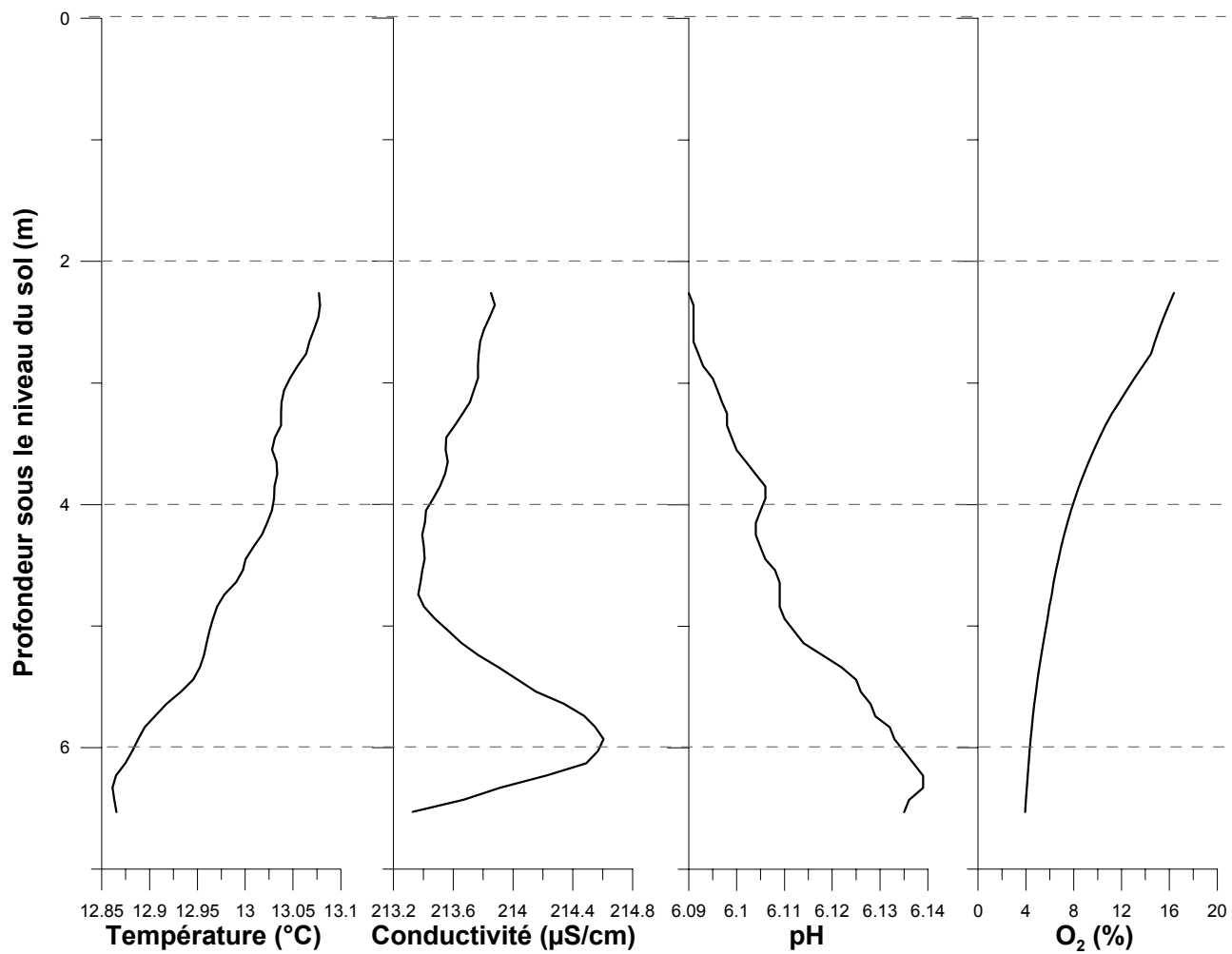


Illustration 34 : diagraphie EM-10

3.3.2. Eocène moyen

- **Diagraphie EM-10** : (Illustration 34)

Cette diagraphie devait être réalisée dans l'Eocène moyen, elle a en fait été réalisée dans un ouvrage atteignant l'aquifère du Plio-quaternaire. La surface piézométrique de l'eau dans le forage se trouvait 1.27 mètres sous la surface du sol.

Les mesures ont été effectuées sur seulement 4 mètres à partir de 1 mètre sous le niveau statique de l'eau, à une fréquence d'une mesure tous les 10 cm.

La température de l'eau varie entre 12.9°C et 13.1°C.

La conductivité électrique présente des valeurs de l'ordre de 214 µS/cm. Nous sommes donc en présence d'une eau très faiblement minéralisée.

Le pH est légèrement acide et varie dans l'intervalle 6.09-6.14.

Le pourcentage d'oxygène dissous dans l'eau, diminue progressivement avec la profondeur depuis 16.5% jusqu'à 4%. On n'atteint pas pour cette profondeur de diagraphie une eau anoxique.

Toutes les variations des paramètres observés visibles sur les diagraphies sont d'amplitude négligeable. La profondeur d'eau étudiée est trop faible pour observer une quelconque stratification de l'eau.

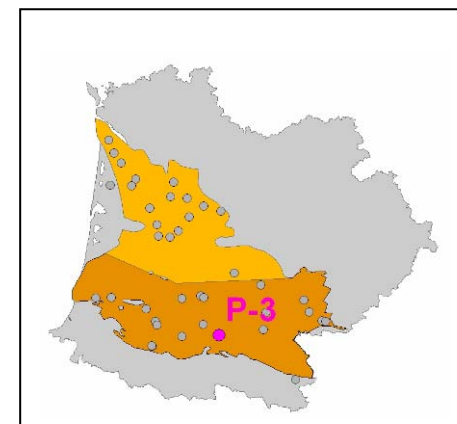
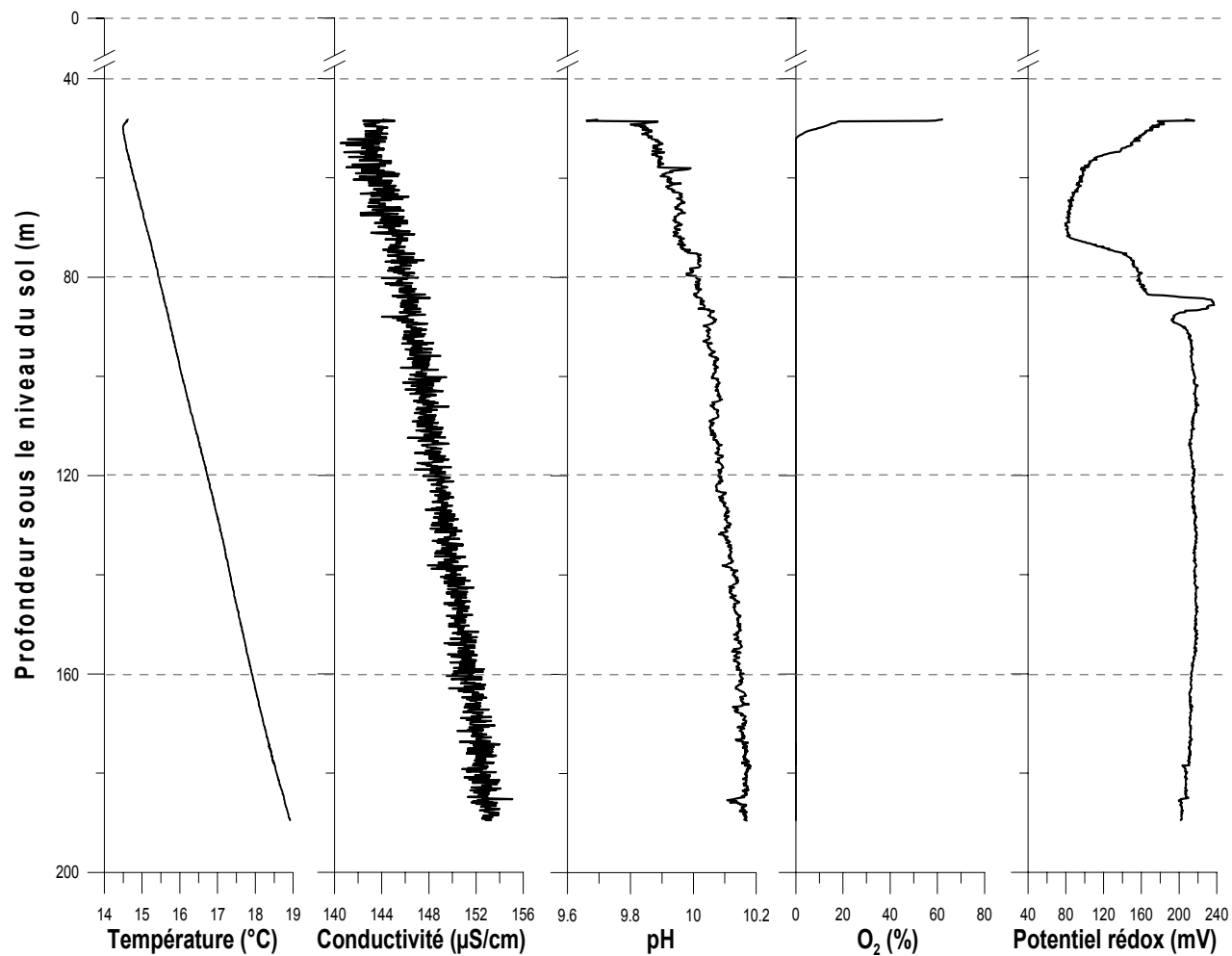


Illustration 35 : diagraphie P-3 (N° BSS : 10078X0001)

3.3.3. Paléocène

- **Diagraphie P-3** : (Illustration 35)

Cette diagraphie a été réalisée dans la masse d'eau 5082 « Sables, calcaires et dolomies de l'Eocène-Paléocène captif du sud du bassin Adour-Garonne », à l'intérieur d'un forage de 3821 mètres de profondeur. Des crépines se trouvent entre 860 et 873 mètres. La surface piézométrique de l'eau dans le forage se trouvait 48.10 mètres sous la surface du sol.

Les mesures ont été effectuées sur 140 mètres à partir du sommet de la colonne d'eau.

On observe une évolution linéaire de la température qui augmente de 14.6°C à 18.9°C.

La conductivité électrique augmente également linéairement avec la profondeur de 144 µS/cm jusqu'à 153 µS/cm. Elle reflète une eau assez faiblement minéralisée.

Le pH est basique et augmente lui aussi quasi linéairement avec la profondeur de 9.70 à 10.17. Cependant sa courbe suit une forme plus asymptotique et ses valeurs se stabilisent peu à peu avec la profondeur.

Le pourcentage d'oxygène dissous dans l'eau, diminue très rapidement avec la profondeur pour passer sous le seuil des 2% dès 3 m et atteindre 0% dès 4 m sous le niveau piézométrique. De telles teneurs en oxygène marquent clairement une eau d'origine souterraine.

Le potentiel d'oxydoréduction varie quant à lui entre 83 mV et +237 mV. Il semble cependant stabilisé autour de 210 mV au delà de 50 mètres sous le niveau piézométrique. Plus en surface le potentiel rédox présente un creux avec des valeurs pouvant atteindre 83 mV, typiques d'une eau peu oxydante. Entre ces deux ensembles on observe 35 m sous le niveau piézométrique un pic à 237 mV. On peut donc identifier une stratification dans la colonne d'eau : une eau peu oxydante surmontant une eau plus oxydante.

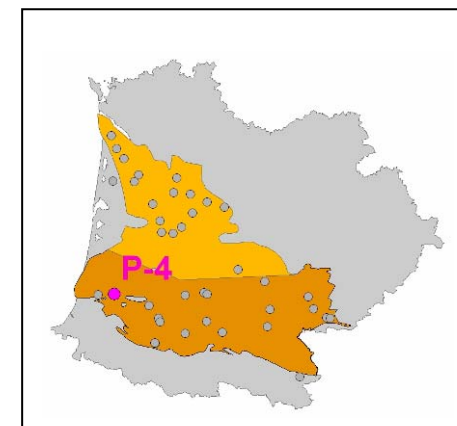
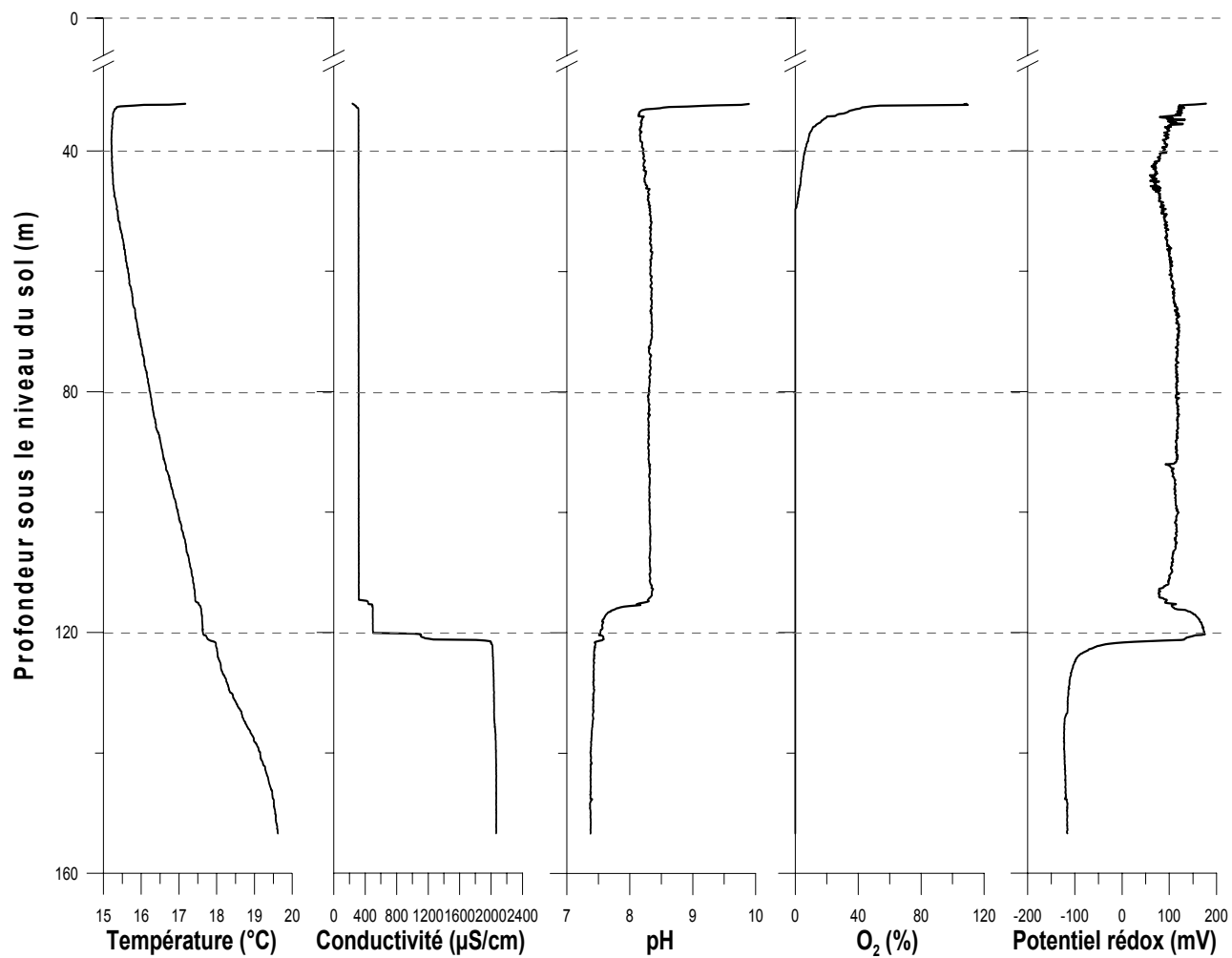


Illustration 36 : diagraphie P-4 (N° BSS : 09507X0048)

- **Diagraphie P-4 : (Illustration 36)**

Cette diagraphie a été réalisée dans la masse d'eau 5082 « Sables, calcaires et dolomies de l'Eocène-Paléocène captif du sud du bassin Adour-Garonne », à l'intérieur d'un forage de 252 mètres de profondeur. La surface piézométrique de l'eau dans le forage se trouvait 31.87 mètres sous la surface du sol. Les mesures ont été effectuées sur 120 mètres à partir du sommet de la colonne d'eau.

On observe une évolution pseudo linéaire de la température qui augmente avec la profondeur de 17.2°C à 18.6°C.

Les valeurs de conductivité électrique appartiennent à l'intervalle 260-2068 $\mu\text{S}/\text{cm}$. L'allure de la courbe permet de diviser la colonne d'eau en deux parties : une première jusqu'à 114m de conductivité 315 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et une seconde après 121 m de conductivité 2068 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Entre 114 et 121 mètres on observe une évolution rapide de la conductivité de 320 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cette évolution se fait sous la forme de petites « marches d'escalier », une première de petite amplitude se trouvant vers 115m mais c'est autour de 120m que l'augmentation est la plus importante.

Le pH est basique et suit une évolution quasi-symétrique de celle de la conductivité. Dans une première partie jusqu'à 115 m il est proche de 8.2, puis dans une seconde partie, au delà de 115 m il chute à 7.4. Ce saut de pH s'effectue au niveau du premier saut de conductivité mais n'apparaît plus après 116 mètres.

Le pourcentage d'oxygène dissous dans l'eau, diminue très rapidement avec la profondeur pour passer sous le seuil des 2% dès 15 m et atteindre 0% dès 17 m sous le niveau piézométrique.

Le potentiel rédox présente une courbe semblable à celle du pH. Ces valeurs sont comprises entre -123 et 175 mV. Dans un premier temps, jusqu'à 115 m le potentiel est de l'ordre de 115 mV, typique d'une eau oxydante, puis de 115 à 120 m il remonte jusqu'à 175 mV, et enfin au delà de 120 m il est de l'ordre de -120 mV, valeur caractérisant une eau réductrice.

Il est à noter que ces sauts de valeur interviennent dans la zone crépinée, c'est-à-dire dans une zone où l'eau est renouvelée en permanence par l'écoulement de l'aquifère.

On a donc pu mettre en évidence une corrélation surprenante entre la courbe du potentiel rédox, celle de la conductivité et celle du pH. Un saut de valeur à la fin du tubage du forage pour ces trois paramètres souligne une fois de plus clairement la nécessité de prélever directement dans la nappe d'eau pour connaître les propriétés physico-chimiques de l'eau. En effet l'eau prélevée dans le tubage a des propriétés radicalement différentes de celles de la nappe.

3.3.4. Interprétation :

Les diagraphies ont notamment été réalisées afin de détecter d'éventuelles hétérogénéités latérales ou stratifications verticales des masses d'eau souterraine. Nous considérerons donc les résultats obtenus précédemment sous deux angles :

- A l'aide des résultats de l'ensemble des diagraphies, nous tenterons d'avoir un aperçu des hétérogénéités latérales des masses d'eau.
- Au niveau de chaque forage, nous discuterons de la stratification verticale éventuelle de la masse d'eau captée.

Afin de mieux appréhender les variations spatiales des caractéristiques physico-chimiques des masses d'eau souterraine du district Adour-Garonne, des diagrammes superposant les résultats obtenus pour l'ensemble des forages ont été réalisés.

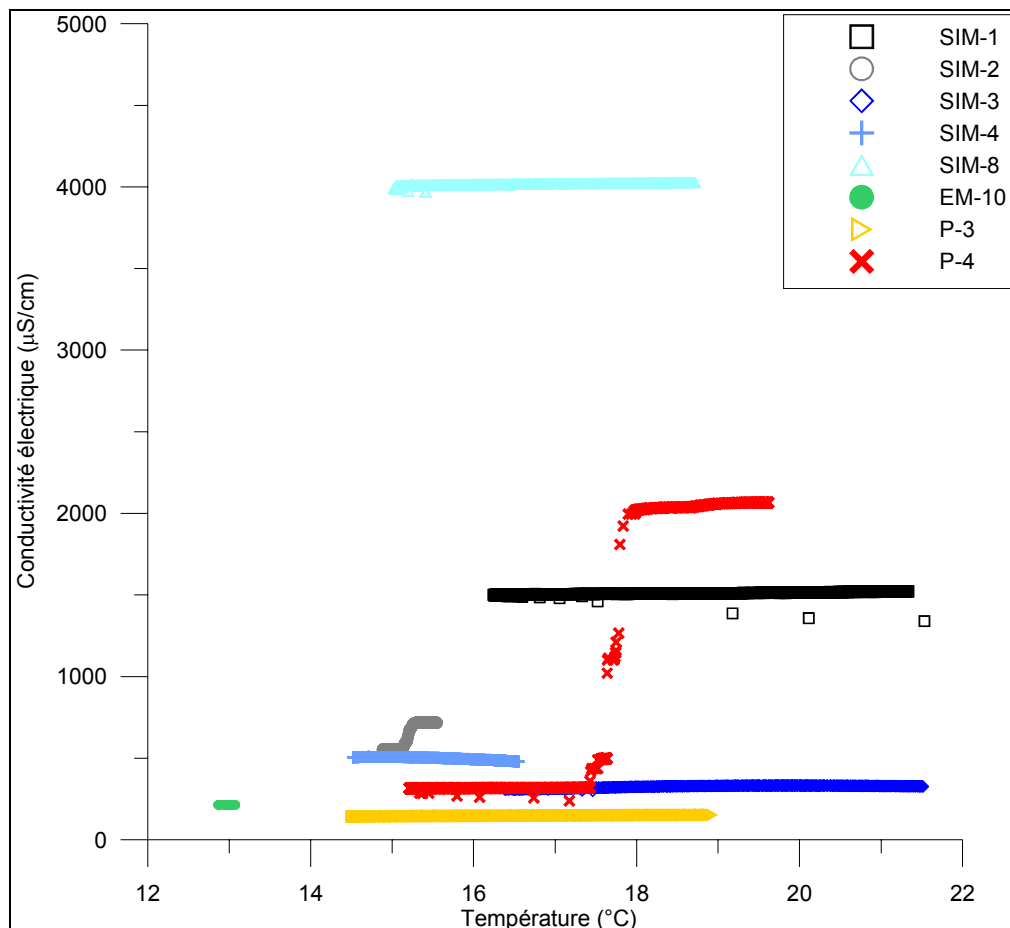


Illustration 37 : diagramme représentant la conductivité de l'eau en fonction de la température mesurées lors des diagraphies de la campagne mai 2006 (P = Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)

Le diagramme conductivité électrique – température présenté dans l'illustration 37, visualise tout d'abord les gammes de températures mesurées dans les différents forages. On remarque que toutes les mesures se trouvent entre 12.5 et 22°C, correspondant à des eaux de température normale. En effet, il a été vu précédemment que exception faite de EM-10, la température augmente de façon linéaire dans les forages avec la profondeur (augmentation de l'ordre de quelques degrés tous les 100 mètres), ce qui correspond à un réchauffement géothermique normal. Seul le forage EM-10 possède une eau dont la température baisse avec la profondeur, mais cette anomalie peut être facilement expliquée par la très faible tranche d'eau sur laquelle les mesures ont été effectuées (4 mètres). En effet en surface, l'eau peut subir un réchauffement du fait de la température extérieure.

Il est de plus clairement visible sur le diagramme que la conductivité électrique de l'eau d'un même forage est relativement constante, exception faite de SIM-2 (N° BSS : 09546X0022) et P-4 (N° BSS : 09507X0048).

Par contre on observe des différences de conductivité électrique importantes entre les forages puisque la conductivité varie dans l'intervalle 145-4030 $\mu\text{S/cm}$. Ainsi, les eaux des forages P-3 (N° BSS : 10078X0001), SIM-3 (N° BSS : 10072X0026), SIM-4 (N° BSS : 10122X0055), SIM-2 (N° BSS : 09546X0022) et une partie de l'eau du forage P-4 (N° BSS : 09507X0048) présentent des valeurs de conductivité plutôt faible ($<750 \mu\text{S/cm}$). On observe une conductivité comprise entre 1500 et 2100 $\mu\text{S/cm}$ pour l'eau de SIM-1 (N° BSS : 09293X0123) et la deuxième partie de P-4 (partie de la colonne d'eau de profondeur supérieure à 120 mètres). SIM-8 (N° BSS : 10098A0004) présente une conductivité de l'ordre de 4000 $\mu\text{S/cm}$. Ces trois gammes de conductivité électrique ne regroupent pas les eaux d'un même aquifère. S'affrontent alors deux hypothèses : soit l'eau présente dans les forages n'a pas les propriétés de l'eau souterraine, soit il existe des hétérogénéités importantes au sein de l'aquifère des Sables infra-molassiques et de l'aquifère Paléocène (l'Aquifère Eocène moyen ne faisant plus l'objet de discussion étant donné que l'on a une seule diagraphie dans celui-ci et qu'elle n'a été effectuée que sur 4 mètres).

Concernant l'aquifère des Sables infra-molassiques, se distinguent par leur conductivité électrique les eaux captées par les forages SIM-2 (N° BSS : 09546X0022), SIM-3 (N° BSS : 10072X0026) et SIM-4 (N° BSS : 10122X0055) de, d'une part, celle captée par le forage SIM-1 (N° BSS : 09293X0123), et, d'autre part, celle captée par le forage SIM-8 (N° BSS : 10098A0004). Ces premiers résultats confirment donc que cet aquifère est caractérisé par des salinités très hétérogènes. Notons au passage que le forage SIM-1 (N° BSS : 09293X0123) ne se trouve pas dans la même masse d'eau que les autres forages captant les SIM. Le saut de conductivité dans la colonne d'eau du forage SIM-2 (N° BSS : 09546X0022), décrit dans l'illustration 30, est apparent sur ce diagramme. Nous avons vu précédemment que ce saut n'influe en rien sur le pH et la teneur en oxygène. S'il est dû à des infiltrations de fluide à travers le tube du forage dans la première partie de la colonne d'eau, il est étonnant que le pH de l'eau et la teneur en oxygène ne soient en rien perturbés. Il est donc possible que l'on détecte ici une stratification de l'aquifère des Sables infra-molassiques. Le forage étant peu profond (57.80 mètres), on peut par ailleurs espérer que l'eau est peu perturbée. Cependant il est indiqué dans les caractéristiques du forage « tube en plastique, tube

en métal ». Il serait important de vérifier que le saut n'intervient pas au moment du changement de tube, ou lorsque l'on descend au niveau des crépines.

Concernant l'aquifère Paléocène, la conductivité nous a amené à distinguer l'eau captée par le forage P3 et présente jusqu'à 120 mètres dans le forage P-4 (N° BSS : 09507X0048), de l'eau située à plus de 120 mètres de profondeur dans le forage P-4. Il y a hétérogénéité de cet aquifère si les mesures effectuées en P-4 et en P-3 (N° BSS : 10078X0001) sont représentatives de l'aquifère. Or on observe pour la diagraphie P-4 un saut de pH couplé avec un saut de conductivité et de potentiel rédox autour de 120 mètres de profondeur. Ce saut a été mesuré dans la zone crépinée du forage. On peut alors émettre l'hypothèse que l'eau dans le forage est perturbée par des infiltrations fluides. Dans la zone crépinée, on se trouve directement dans l'aquifère. A ce niveau la perturbation liée au tubage n'a plus d'impact du fait de l'écoulement permanent de l'eau dans l'aquifère qui se renouvelle et garde ainsi ses propriétés originelles. Si cette hypothèse est valide, ce cas est très intéressant : il illustre l'intérêt des diagraphies pour aider dans le choix de la zone de prélèvement en vue d'analyses physico-chimiques. Si l'on considère que la conductivité de l'eau de l'aquifère Paléocène au niveau de P4 n'a été mesurée qu'au delà de 120 mètres de profondeur, alors on peut mettre ici clairement en évidence l'hétérogénéité de cet aquifère quant à sa salinité, 10 fois plus forte en P-4 qu'en P-3.

Le diagramme de l'illustration 38 représente la conductivité électrique dans les colonnes d'eau étudiées en fonction du pH.

Notons tout d'abord que, exception faite de EM-10 (pH de 6.10), l'eau étudiée est toujours basique. Les pH varient de 7.10 à 10.17. Généralement les gammes de pH pour un même forage sont très restreintes (de l'ordre de 0.5 unité pH). Seul le forage P-4 (N° BSS : 09507X0048) présente des eaux dont le pH est plus variable, ce qui peut être expliqué par l'hypothèse développée précédemment. Remarquons également que la conductivité électrique varie plutôt dans les forages à pH constant et inversement, ce qui prouve que ces deux facteurs sont indépendants, ou bien qu'il y a une différence de temps de réponse de ces deux paramètres à un changement physique ou chimique des propriétés de l'eau.

Sur le diagramme potentiel rédox – pH, présenté Illustration 39, il est visible que le potentiel électrique possède des valeurs négatives au niveau des forages P-4 (N° BSS : 09507X0048), SIM-3 (N° BSS : 10072X0026) et SIM-8 (N° BSS : 10098A0004). L'eau dans ces forages est donc réductrice sur une tranche d'eau. Les forages P-4, SIM-3, SIM-8 ainsi que en partie SIM-1 (N° BSS : 09293X0123) possèdent des valeurs comprises entre 0 et 400 mV. Seul le forage SIM-1 présente des valeurs de potentiel électrique très élevées dans la partie supérieure de sa colonne d'eau (jusqu'à 110 mètres), soit une eau très oxydante.

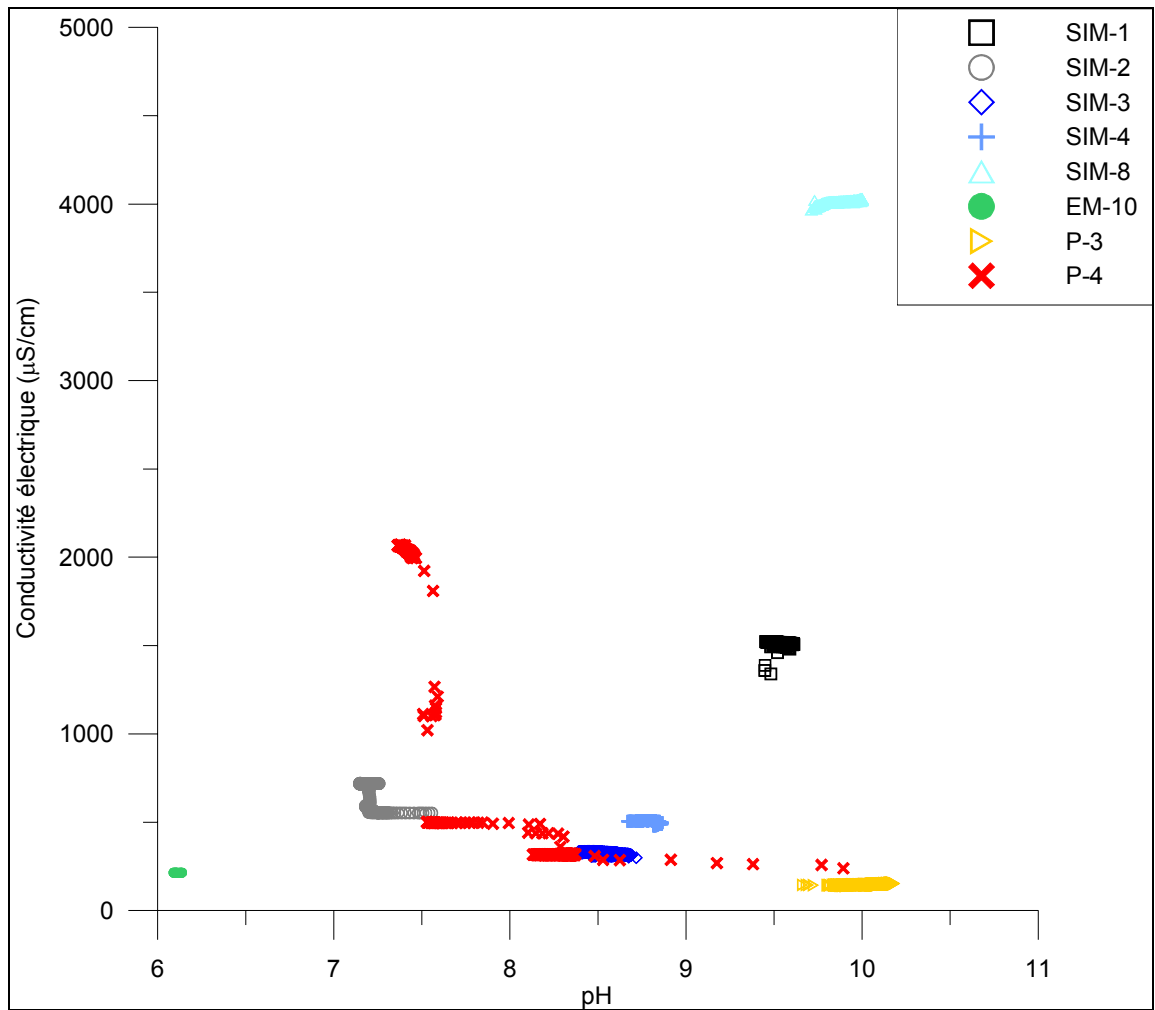


Illustration 38 : diagramme représentant la conductivité en fonction du pH mesurés lors des diagraphies de la campagne mai 2006 (P = Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)

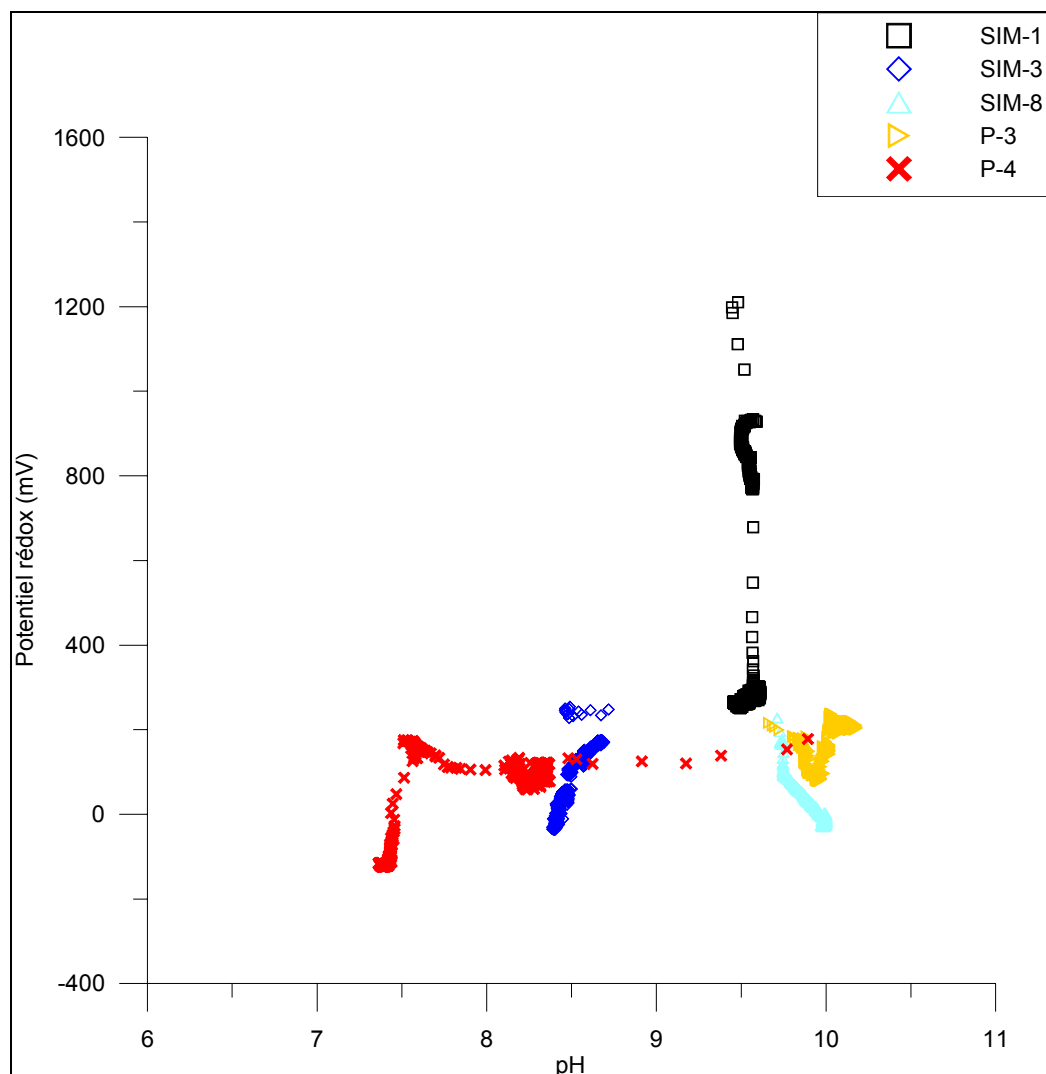


Illustration 39 : diagramme représentant le potentiel électrique en fonction du pH mesurés lors des diagraphies de la campagne mai 2006 (P = Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)

Ces résultats montrent une certaine hétérogénéité des potentiels redox et des pH dans l'eau souterraine du bassin Adour-Garonne. Cependant si on excepte la partie supérieure de la colonne d'eau du forage SIM-1 cette hétérogénéité reste faible pour le potentiel redox. Il est fort possible que les valeurs élevées du potentiel redox dans la partie supérieure de la colonne d'eau de SIM-1 soit simplement due à une contamination par une eau de surface, puisque le potentiel redox chute dès que l'on n'a plus d'oxygène dans cette eau.

Les deux diagrammes présentés Illustration 40 et Illustration 41 font apparaître que la conductivité électrique ainsi que le potentiel redox dans les forages varient lorsque la teneur en oxygène dans l'eau est de 0. Cependant il faut faire exception de SIM-1 (N° BSS : 09293X0123) et SIM-2 (N° BSS : 09546X0022). Nous avons pu constater dans

les diagraphies que la teneur en oxygène chutait dans les premiers mètres de la colonne d'eau pour atteindre 0 assez rapidement. Il est facilement explicable que la teneur en oxygène ne soit pas nulle en haut de la colonne d'eau : en effet l'eau est alors mise artificiellement au contact de l'atmosphère. Mais la présence d'oxygène peut également être due à des infiltrations d'eau superficielle. On peut donc considérer que l'eau a une origine profonde dès lors que sa teneur en oxygène est nulle. Cependant le cas de SIM-2 est plus surprenant, puisque sa teneur en oxygène augmente en profondeur jusqu'à être saturée, ce qui peut faire penser à une infiltration d'un aquifère plus superficiel que l'aquifère des SIM dans le forage.

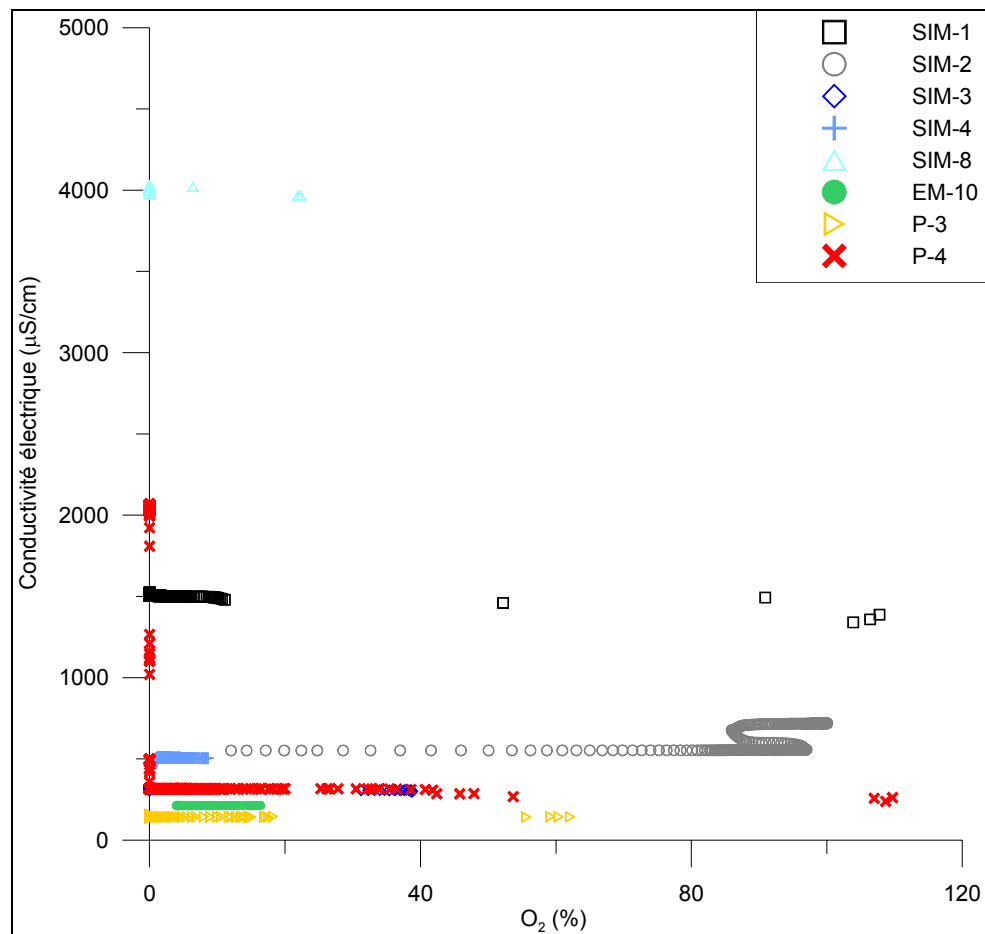


Illustration 40 : diagramme représentant la conductivité électrique, en fonction du pourcentage d'O₂ dissout par rapport à une eau saturée, mesurés lors des diagraphies de la campagne mai 2006 (P = Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)

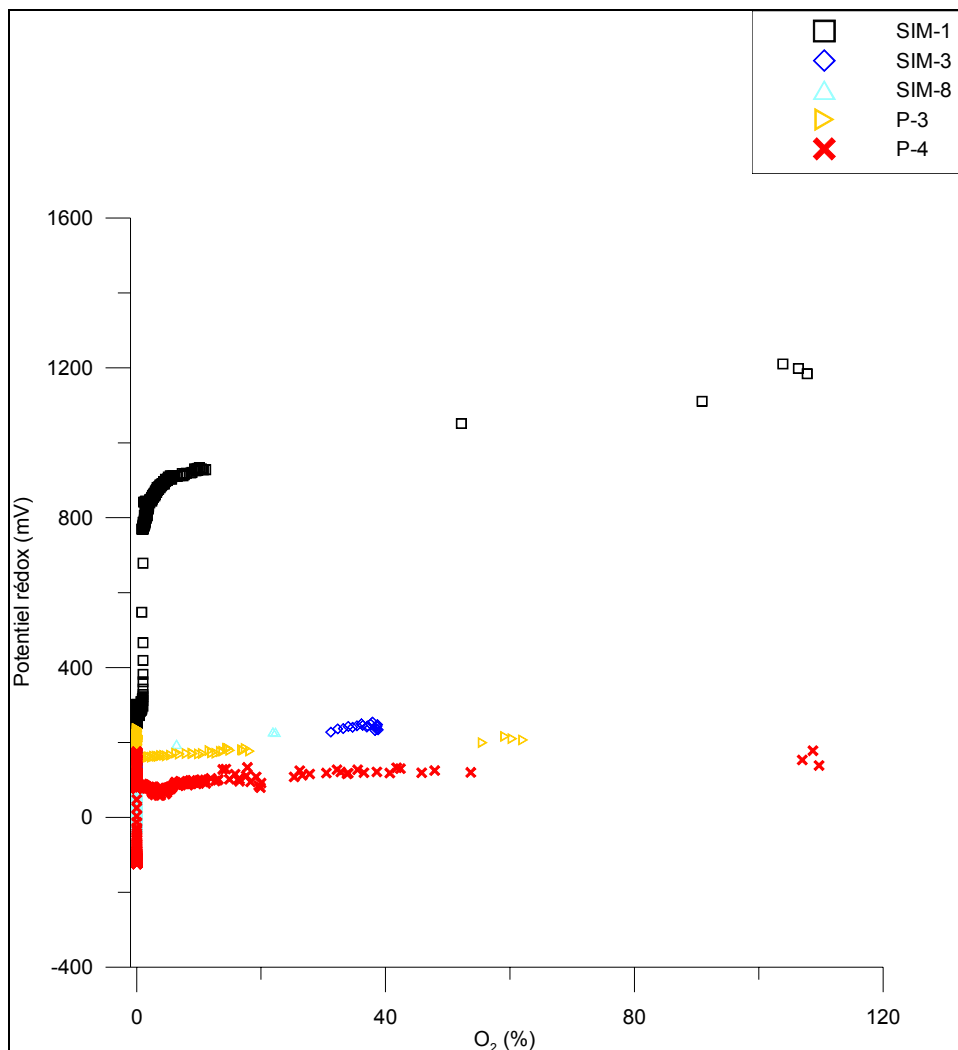


Illustration 41 : diagramme représentant le potentiel rédox en fonction du pourcentage d'O₂ dissout par rapport à une eau saturée, mesurés lors des diagraphies de la campagne mai 2006 (P = Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)

Ces diagraphies font apparaître une certaine hétérogénéité dans l'eau souterraine du bassin Adour-Garonne et ce notamment au niveau de la conductivité qui varie d'un facteur 35 sur ce secteur. Cependant il est difficile de distinguer les mesures représentatives des masses d'eau souterraines de celles dues à des perturbations par des infiltrations d'eau. En effet, ces diagraphies n'ont pas toujours été menées jusqu'à la masse d'eau à étudier du fait de sa profondeur souvent importante.

4. Chimie des eaux souterraines : campagne de prélèvement de mai 2006

Des prélèvements d'eau en période d'étiage ont été réalisés en mai et juin 2006 au niveau des points d'étude. Ils seront renouvelés en période de hautes eaux sauf pour le point EM-10 qui, après vérification sur le terrain, ne capte pas les niveaux aquifères de l'Eocène moyen mais du plio-quatenaire. Ce point a été remplacé par un prélèvement dans l'Eocène Moyen lors de la seconde campagne.

4.1. PROTOCOLE ET ANALYSES

Les analyses chimiques ont été effectuées sur les prélèvements d'eau souterraine réalisés et incluent les éléments majeurs et traces nécessaires aux interprétations des outils isotopiques, dont la liste est donnée dans l'illustration 42. Les paramètres de terrain (température, conductivité, pH, teneur en oxygène et potentiel rédox) ont également été mesurés.

Paramètres de terrain	Température, Conductivité, pH, Teneur en oxygène et Potentiel rédox
Chimie de base : éléments majeurs	NO_3^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , Br^- , F^- , PO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+
Éléments mineurs pour interprétation isotopique	Sr, B, Rb, Li, Pb
Isotopes	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{34}\text{S}$ (SO_4) et $\delta^{18}\text{O}$ (SO_4), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{11}\text{B}$, $\delta^7\text{Li}$, $^{206,207,208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$

Illustration 42: éléments mesurés lors de la mission mai 2006

a) le préleveur de fond :

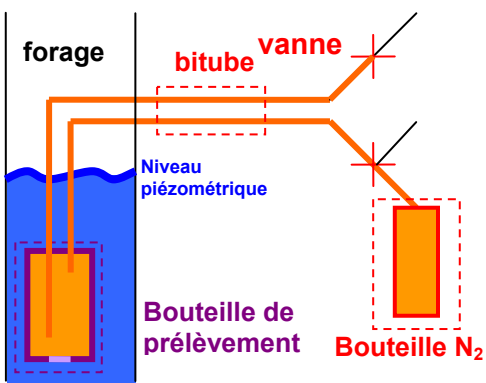
Certaines des eaux souterraines ont été échantillonnées à l'aide d'un préleveur de fond conçu par le BRGM. Dans les forages non équipés, ce préleveur permet un accès à l'eau jusqu'à 300 m de profondeur. Il autorise des prélèvements d'eau à des profondeurs définies par les diagraphies.

Son principe de fonctionnement est proche de ceux des pompes à membrane ou des pompes pneumatiques automatiques du commerce. Il est constitué :

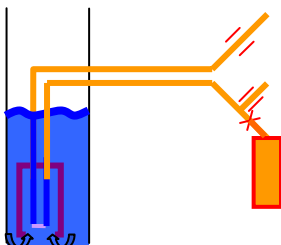
- d'un tube double (bitube) en rislan (plastique inerte) de 300 mètres de longueur, protégé par une membrane. Le diamètre du bitube a été calculé afin de résister

- à des pressions pouvant atteindre 300 bars : chaque tube a un diamètre intérieur de 4 mm. Il est enroulé autour d'un touret mobile,
- d'une bouteille de prélèvement en inox dans laquelle plongent l'extrémité inférieure du bitube. C'est le récipient d'échantillonnage. A cette bouteille est fixé un système de clapet anti-retour ouvert vers l'extérieur et un lest,
- d'une tête en laiton comprenant des vannes fixées à l'extrémité supérieure du bitube. A une des vannes est reliée une bonbonne d'azote (N_2), l'autre vanne permet la récupération de l'eau échantillonnée.

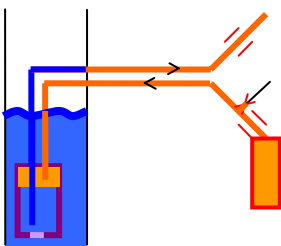
Les schémas ci-après résument la structure et le fonctionnement de ce préleveur de fond :



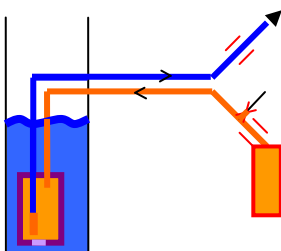
On injecte dans le bitube et la bouteille de prélèvement une pression d'azote (en orange sur le schéma) supérieure à la pression hydrostatique correspondant à la profondeur du prélèvement. Sous l'effet de la pression le clapet antiretour se ferme. La bouteille en inox lestée est alors descendue dans le forage jusqu'à la profondeur de prélèvement. L'eau ne rentre pas dans la bouteille grâce au clapet antiretour.



Les deux vannes de la tête du préleveur sont alors ouvertes. L'azote sort du préleveur dont la pression devient inférieure à la pression hydrostatique. Le clapet anti-retour s'ouvre et l'eau remonte dans les deux tubes jusqu'au niveau piézométrique.



On comprime alors l'eau contenue dans le préleveur en injectant de l'azote sous pression. Lorsque la pression dépasse la pression hydrostatique, le clapet antiretour se ferme, empêchant l'eau de sortir de la bouteille de prélèvement. L'azote pousse l'eau qui remonte dans l'autre tube.



Toute l'eau contenue dans le préleveur est ainsi évacuée et récupérée en surface.

Ce préleveur de fond fonctionne donc grâce à un cycle de compression - décompression.

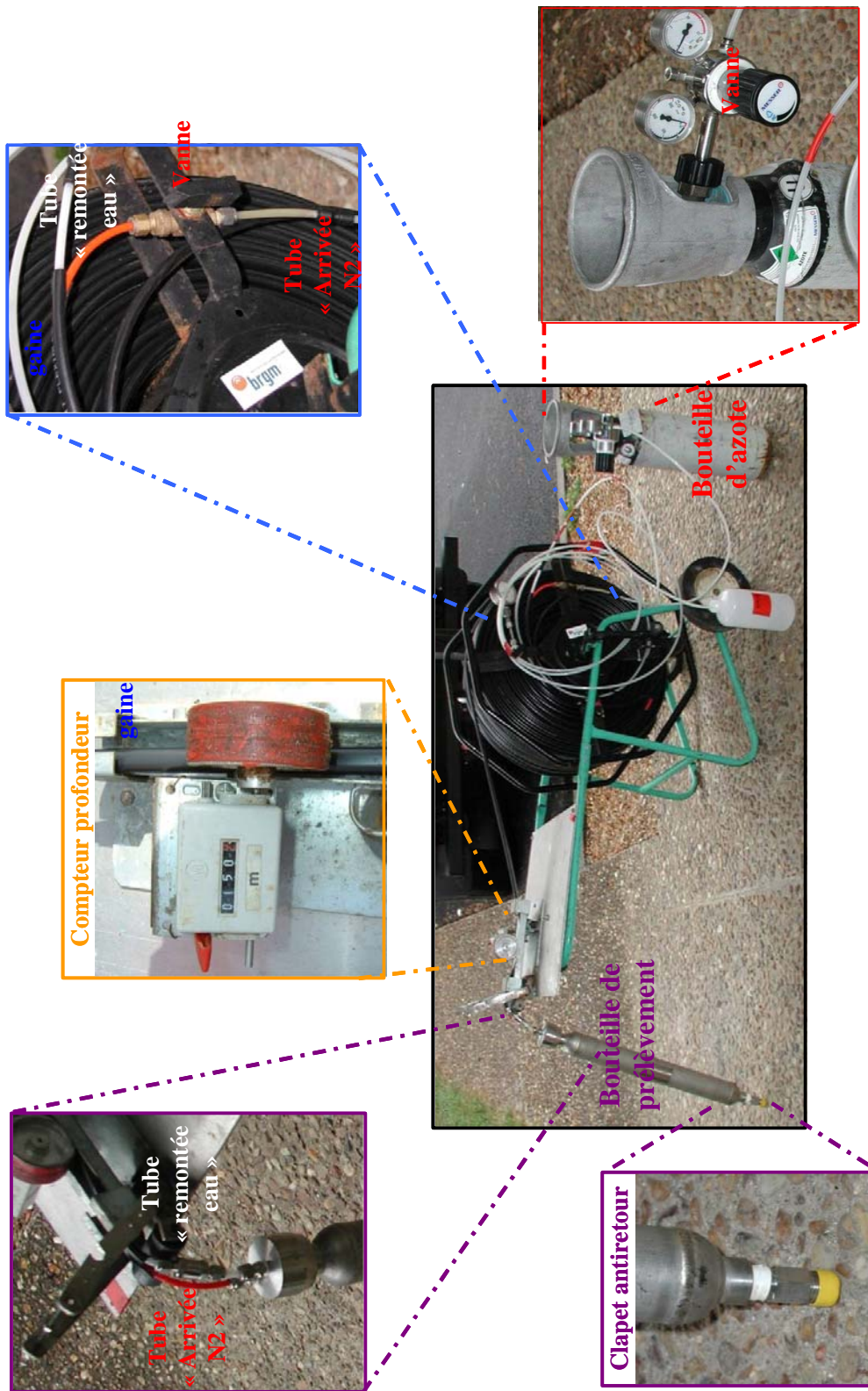


Illustration 43 : préleveur de fond utilisé lors de la campagne de mai 2006

On comprend l'importance de la disposition de l'extrémité de chacun des tubes dans la bouteille de prélèvement pour récupérer la totalité de l'eau qu'elle contient : l'azote étant plus léger que l'air, il se place en surface de la bouteille de prélèvement ; le premier tube par lequel on injecte l'azote doit donc se trouver au sommet de la bouteille et le second tube se prolonger jusqu'au fond de la bouteille afin que l'azote qui reste au dessus de l'eau ne puisse atteindre le second tube avant d'avoir poussé toute l'eau de la bouteille dans ce tube.

La taille de la bouteille ne doit de plus pas être trop faible afin de prélever suffisamment d'eau à une faible profondeur sous le niveau piézométrique.

b) mesure des paramètres de terrain :

Pour chaque prélèvement, les mesures de température, conductivité électrique, potentiel rédox, pH et teneur en O₂ ont été effectuées en surface le plus rapidement possible afin de limiter l'évolution rapide de ces paramètres par le contact avec l'atmosphère.



Illustration 44: boîtiers pour mesure du potentiel rédox et de la conductivité

c) conditionnement des prélèvements :

On a conditionné la quantité suivante d'eau prélevée :

- 100 cl d'eau filtrée à 0.45 µm pour l'analyse des anions
- 100 cl d'eau filtrée à 0.45 µm et acidifiée avec HNO₃ supra pur 17N pour l'analyse des cations
- 1 L d'eau filtrée à 0.45 µm pour l'analyse des isotopes du bore
- 2 L d'eau brute pour l'analyse des isotopes du soufre des sulfates et de δ¹⁸O
- 100 cl d'eau brute pour δ¹⁸O et deutérium
- 1 L d'eau brute pour l'analyse des isotopes du lithium



Illustration 45 : filtre à eau et échantillons de prélèvement

d) analyses chimiques et géochimiques :

Les analyses chimiques et géochimiques ont été effectuées par les laboratoires d'analyse du BRGM, accrédités COFRAC. Des instruments de mesure de tout premier ordre ont été utilisés.

Les éléments majeurs ont été mesurés par chromatographie ionique.

Les éléments traces ont été mesurés à l'aide de l'ICP-MS. C'est un spectromètre de masse à ICP (plasma d'argon porté à très haute température), doté de la haute résolution sur tous les collecteurs et installé dans une « salle blanche ».

Enfin les isotopes ont été mesurés au spectromètre de masse à flux continu. Les rapports isotopiques ont été mesurés par spectrométrie de masse à thermo-ionisation ou ICP-MS MC Neptune.

Le Système de Management de la Qualité (ou SMQ) du BRGM est intégralement applicable à la réalisation de ce projet.

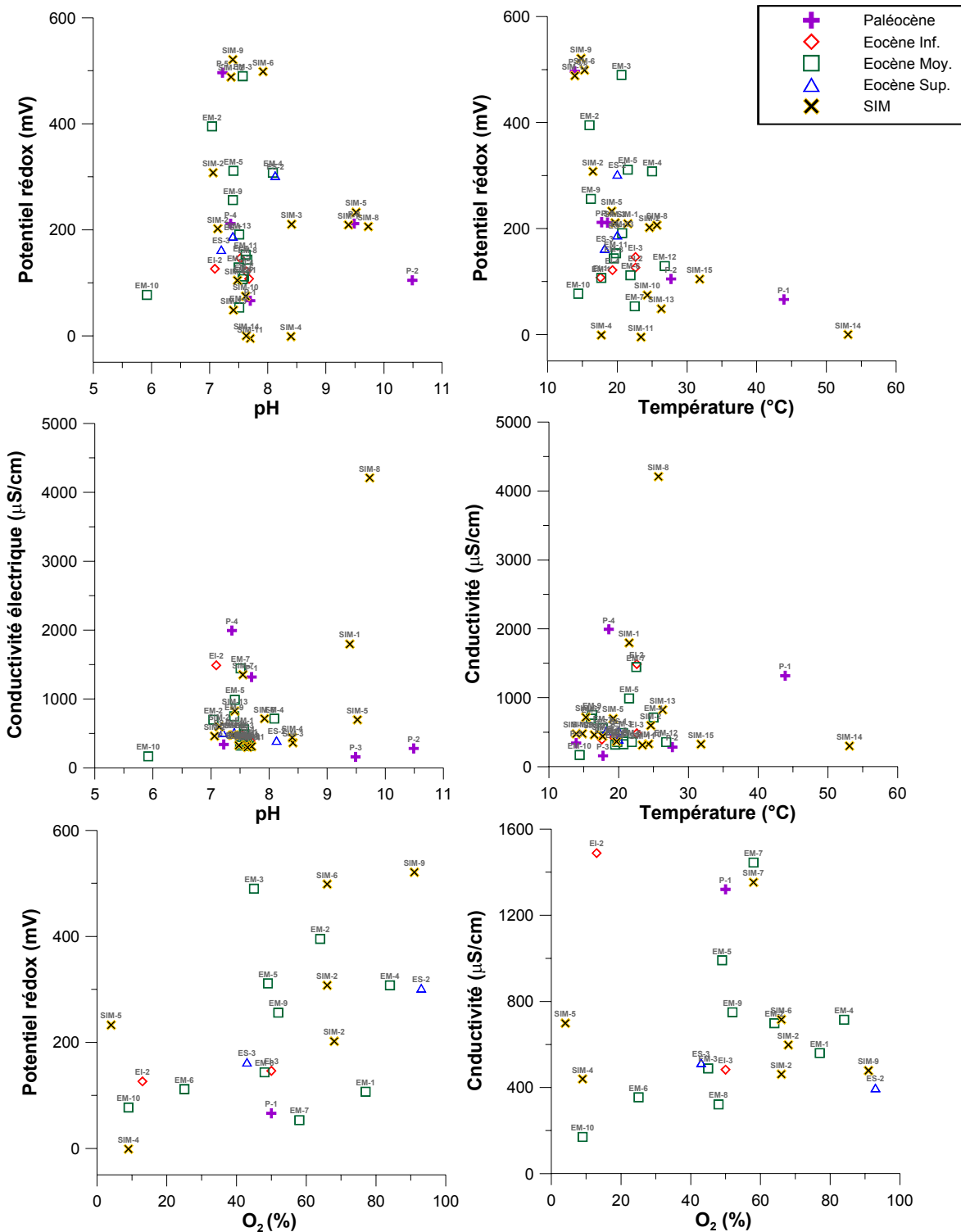


Illustration 46 : paramètres de terrain mesurés en surface pour les échantillons prélevés lors de la mission mai 2006 du projet Carismeau (P = Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)

4.2. RESULTATS ET INTERPRETATION :

A chaque aquifère a été attribué un label de couleur et forme différentes afin de rendre les graphiques présentés ci-après plus lisibles ; le code du point de prélèvement est indiqué directement sur les graphiques. L'échantillon EM-10 est représenté sur les graphiques mais ne sera pas discuté du fait qu'il n'appartient pas à la formation de l'Eocène moyen.

4.2.1. Les paramètres de terrain :

Les mesures sont présentées Illustration 46 sous forme de graphiques binaires. Les eaux des différents aquifères ont une température comprise entre 14°C et 32°C, excepté deux points qui s'individualisent : P-1 (N° BSS : 09764X0005) et SIM-14 (N° BSS : 09536X0008) avec respectivement une température de 44°C et de 53°C.

La conductivité électrique, qui reflète la minéralisation des eaux, présente une très forte dispersion, avec des valeurs comprises entre 160 et 4210 $\mu\text{S}/\text{cm}$: révélant une grande hétérogénéité au sein des aquifères. Un point, SIM-8 (N° BSS : 10098A0004) se distingue par sa conductivité très élevée. Sans lui, l'intervalle est réduit à 160-1994 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Concernant le pH, la majorité des points se caractérisent par une eau neutre à légèrement basique avec des valeurs comprises entre 7 et 8.5. Quelques eaux semblent basiques : SIM-1 (N° BSS : 09293X0123), SIM-5 (N° BSS : 10312X0001), SIM-8 (N° BSS : 10098A0004), P-3 (N° BSS : 10078X0001) présentent un pH autour de 9.5 tandis que P-2 (N° BSS : 10052X0038) atteint un pH 10.5.

Le potentiel rédox individualise des eaux faiblement réductrices (SIM-14 (N° BSS : 09536X0008), SIM-11 (N° BSS : 10052X0030) et SIM-4 (N° BSS : 10078X0027)) et des eaux assez oxydantes (SIM-9 (N° BSS : 10306X0035), SIM-6 (N° BSS : 09307X0131), SIM-12 (N° BSS : 10306X0034), P-5 (N° BSS : 10765X0112) et EM-3 (N° BSS : 07547X0068) autour de 500 mV). Tous les autres points caractérisent des eaux faiblement oxydantes, avec des valeurs comprises entre 75 et 300mV.

Si ces paramètres de terrain semblent individualiser les eaux de quelques points, les différents aquifères ne présentent pas de différences fondamentales à ce niveau.

Il convient de plus de ne pas interpréter trop hâtivement ces premiers résultats : le potentiel rédox notamment est connu pour évoluer rapidement, lorsque l'on ramène lors du prélèvement l'eau au contact de l'atmosphère. En effet, la dissolution d'oxygène dans l'eau peut faire monter significativement ce potentiel. Or le graphique potentiel rédox versus O_2 indique que les points pour lesquels on avait noté des valeurs élevées montrent aussi beaucoup d' O_2 dissous. A ce stade trois hypothèses persistent : soit l'eau a vu sa teneur en O_2 augmenter lors du prélèvement, modifiant le potentiel rédox de l'eau, soit l'eau prélevée à une trop faible profondeur n'est pas représentative de l'aquifère (cf. partie diagraphies), soit l'aquifère présente naturellement à ce niveau de

fortes teneurs en oxygène du fait d'infiltration d'eau de surface. Les points EM-3 (N° BSS : 07547X0068), EM-2 (N° BSS : 08308X0018), SIM-6 (N° BSS : 09307X0131), SIM-9 (N° BSS : 10306X0035) et P-5 (N° BSS : 10765X0112) se trouvant en périphérie d'aquifère, là où il est généralement considéré que l'aquifère se recharge par infiltration, cette dernière hypothèse est envisageable bien que non vérifiable pour le moment.

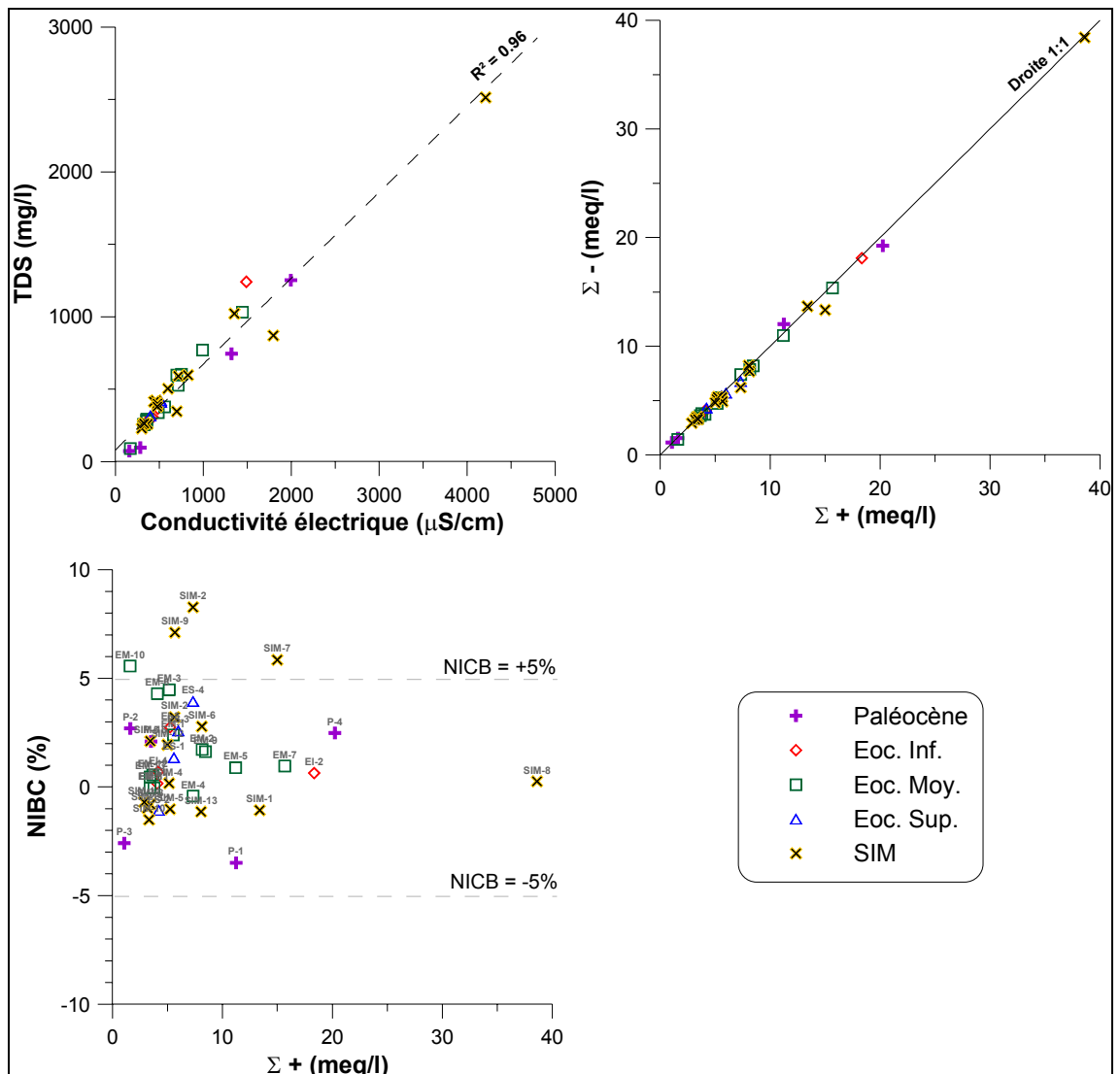


Illustration 47 : a) diagramme TDS en fonction de la conductivité électrique de l'eau - b) diagramme somme des anions (Σ^-) en fonction de la somme des cations (Σ^+) - c) balance ionique en fonction de la somme des cations (Σ^+).

4.2.2. Validité des mesures chimiques effectuées en laboratoire

Dans l'illustration 47 est présenté le graphique TDS (pour Total Dissolved Solids) en fonction de la conductivité électrique. Le TDS est la somme des concentrations en mg/l des cations et des anions mesurés en laboratoire. La conductivité électrique, mesurée sur le terrain est fonction de la salinité de l'eau ; il existe donc généralement une relation quasi-linéaire entre la conductivité électrique et le TDS calculé à partir des analyses chimiques de laboratoire. On observe ici une bonne corrélation entre ces paramètres ; aucun problème majeur lors du déroulement des analyses chimiques ou des mesures de conductivité ne semble donc devoir être suspecté.

Le diagramme [Somme des anions] en fonction de la [Somme des cations] en mEq/L montre un équilibre entre charges positives et charges négatives mesurées dans les eaux. Les analyses ont donc semble-t-il pris en compte l'essentiel des éléments majeurs présents dans l'eau. Ceci doit cependant être confirmé par l'étude de la balance électrique.

Celle-ci est illustrée par le NICB (pour Normalized Inorganic Charge Balance) qui

donne, selon la formule
$$\text{NICB} = \frac{\sum^+ - \sum^-}{\sum^+ + \sum^-} * 100$$
, la balance des analyses chimiques.

Le NICB correspond au pourcentage de charges positives excédentaires ou manquantes pour avoir un bilan des charges nul. Une eau ayant toujours un bilan de charges nul à l'équilibre, un excès de cations ou d'anions dénote d'une analyse chimique incomplète ou de mauvaise qualité. On considère que les analyses sont correctes pour un NICB compris entre -5% et +5%. Or nous pouvons remarquer les valeurs anormales des points SIM-2 (N° BSS : 09546X0022), SIM-7 (N° BSS : 09838B0203) et SIM-9 (N° BSS : 10306X0035) pour lesquels on observe un excès de cations. Nous considérerons donc les résultats obtenus pour ces trois points avec prudence.

Concernant le TDS, la majorité des points présentent des valeurs comprises entre 120 et 600 mg/L, ce qui caractérise des eaux faiblement à moyennement minéralisées. S'individualisent P-1 (N° BSS : 09764X0005) et EM-5 (N° BSS : 08031X0199) avec 750 mg/L, SIM-1 (N° BSS : 09293X0123) avec 870 mg/L, SIM-7 (N° BSS : 09838B0203) et EM-7 (N° BSS : 08281X0020) autour de 1050 mg/L, EI-2 (N° BSS : 09545X0005) et P-4 (N° BSS : 09507X0048) autour de 1275 mg/L et SIM-8 (N° BSS : 10098A0004) avec 2514 mg/L.

Il apparaît qu'au Sud du bassin, les points situés dans le département du Gers et à sa périphérie immédiate, notamment vers Pau ont une minéralisation relativement faible ; il faut cependant exclure de ce groupe le point EI-2 (N° BSS : 09545X0005). Au Sud-ouest, vers Mont de Marsan on trouve deux points de minéralisation relativement élevée (P-1, N° BSS : 09764X0005 et P-4, N° BSS : 09507X0048). Le Sud-est du secteur, dans la zone Montauban–Toulouse–Castres–Albi, possède des eaux de minéralisation moyenne à très élevée, excepté en SIM-4 (N° BSS : 10122X0055) et EI-4 (N° BSS : 10121X0013), avec une nette augmentation de la minéralisation selon une direction Nord-est – Sud-ouest. Le Nord du district présente une minéralisation plus

homogène, et moyenne à faible. Si l'on remonte la Gironde, il semble cependant que la minéralisation augmente progressivement.

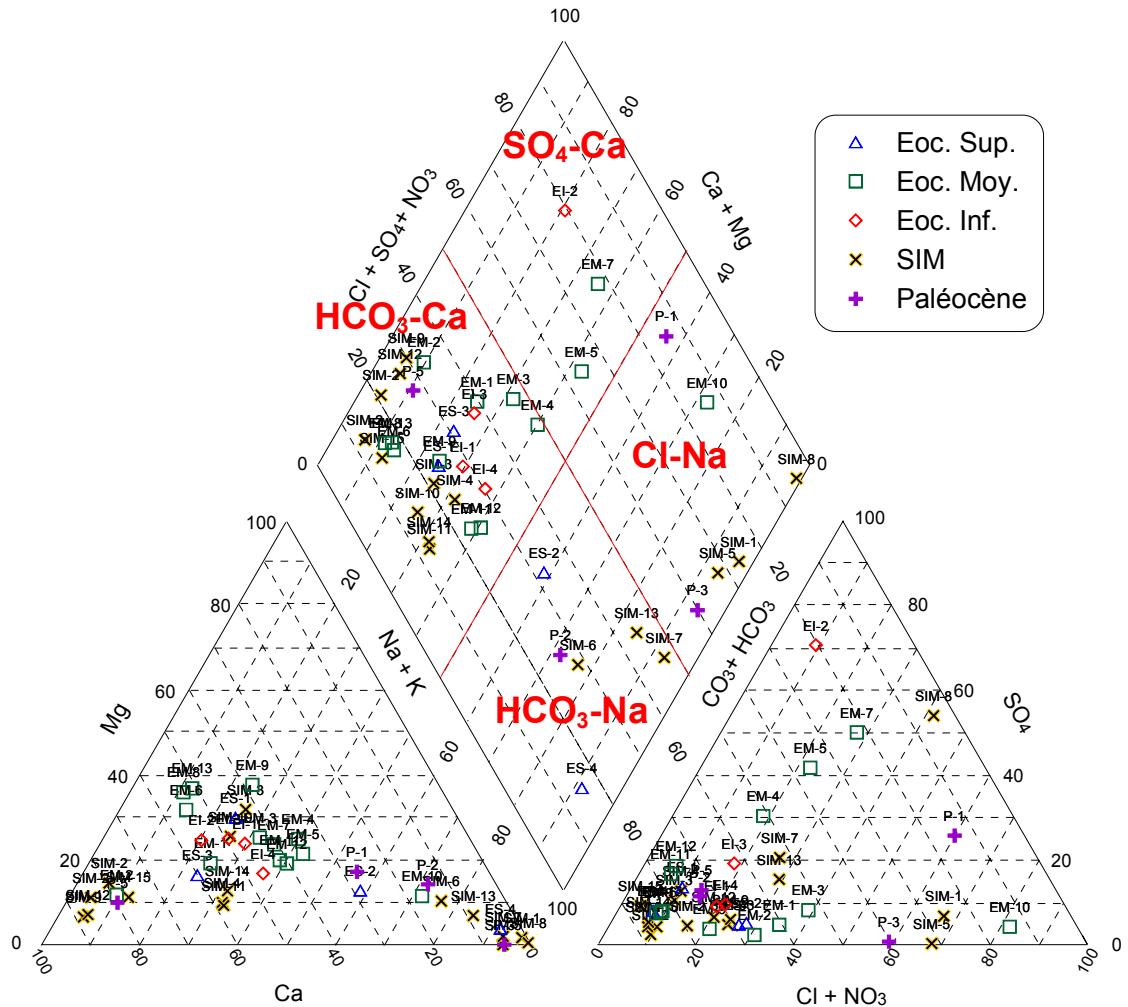


Illustration 48 : diagramme de Piper pour les points de prélèvement de la mission mai et juin 2006 – projet Carismeau (P = Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)

4.2.3. Diagramme de Piper : faciès chimique des eaux

Le diagramme de Piper Illustration 48 indique que la majorité des eaux présentent un faciès bicarbonaté-calcique.

- L'aquifère des SIM, bien que très majoritairement bicarbonaté-calcique, présente six points de faciès différent :

- SIM-6 (N° BSS : 09307X0131), SIM-13 (N° BSS : 09857X0104) et SIM-7 (N° BSS : 09838B0203) présentent un faciès bicarbonaté sodique.
- SIM-1 (N° BSS : 09293X0123), SIM- 8 et SIM-5 (N° BSS : 10312X0001) présentent un faciès chloruré sodique.

Ces faciès sont bien localisés dans l'espace, puisque le faciès chloruré sodique est globalement (SIM-5, N° BSS : 10312X0001 est plus au centre) situé à l'Est du faciès bicarbonaté calcique. Encore plus à l'Est se trouve le faciès bicarbonaté sodique.

- L'Eocène moyen est lui aussi principalement bicarbonaté-calcique. Cependant on observe une évolution depuis le point EM-1 (N° BSS : 07305X0001) jusqu'au point EM-7 (N° BSS : 08281X0020) en remontant la Gironde vers un faciès sulfaté-calcique. Les points EM-5 (N° BSS : 08031X0199) et EM-7 (N° BSS : 08281X0020) sont sulfatés calciques. On peut dès à présent suspecter la présence de dépôts évaporitiques de gypse croissants vers EM-7.
- L'Eocène supérieur est bicarbonaté-calcique également, excepté au point ES-2 (N° BSS : 07808X0006) qui est bicarbonaté sodique.
- L'Eocène inférieur est bicarbonaté-calcique mais présente un de ses points EI-2 (N° BSS : 09545X0005) de faciès nettement sulfaté-calcique.
- Le Paléocène est plus atypique puisqu'il ne présente pas de faciès dominant : P-5 (N° BSS : 10765X0112) est bicarbonaté-calcique, P-2 (N° BSS : 10052X0038) bicarbonaté-calcique, P-3 (N° BSS : 10078X0001) chloruré-sodique et P-1 (N° BSS : 09764X0005) chloruré-sodique mais à la limite du domaine sulfaté-calcique. Ces deux derniers points sont localisés près de Mont de Marsan, où se trouvent des dômes évaporitiques. Le point P-4 (N° BSS : 09507X0048) n'a pas été présenté étant donné qu'il possède en grande quantité des thiosulfates, élément que ne prend pas en compte le diagramme de Piper. Cependant, sans cet élément, il se positionnerait à proximité de P-1.

Il est intéressant de remarquer que les points ES-2 (N° BSS : 07808X0006) et EM-6 (N° BSS : 08048X0048) voisins géographiquement ont des faciès différents ; il semble donc qu'à ce niveau l'aquifère Eocène supérieur ne soit pas connecté à l'aquifère Eocène moyen. Par contre une connexion entre SIM et Eocène supérieur au niveau de ES-4 (N° BSS : 09586X0008) est envisageable, ce point étant de même faciès que les points SIM-7 (N° BSS : 09838B0203), SIM-13 (N° BSS : 09857X0104) et SIM-6 (N° BSS : 09307X0131) qui l'entourent.

On constate également un contraste important entre la chimie de EI-2 (N° BSS : 09545X0005) et SIM-2 (N° BSS : 09546X0022). EI-2 présente de plus une minéralisation largement supérieure aux points des SIM voisins. Une connexion à ce niveau entre SIM et Eocène inférieur peut être dès à présent raisonnablement exclue. Les points SIM-4 (N° BSS : 10122X0055) et EI-4 (N° BSS : 10121X0013), au contact géographique du faciès bicarbonaté-sodique des SIM, présentent un faciès classique bicarbonaté-calcique. Il y a peut être une individualisation de SIM-4 des autres points des SIM.

Concernant P-2 (N° BSS : 10052X0038) et P-3 (N° BSS : 10078X0001), si P-3 est peut être en contact avec les SIM puisqu'il présente le même faciès que SIM-5 (N°

BSS : 10312X0001), P-2 n'a pas le même faciès que les points des SIM qui l'entourent.

L'ensemble de ces hypothèses seront à confronter aux interprétations découlant des données isotopiques.

Un autre point intéressant est la relation existant entre faciès et minéralisation. En effet les points présentant un faciès autre que bicarbonaté-calcique ont généralement un TDS assez élevé (exception faite de P-2 et P-3), tandis que les points bicarbonatés calciques sont peu minéralisés. Or les eaux dominées par la dissolution de sulfates et de halite ont généralement des minéralisations élevées : au delà de 6.5 mEq/l pour les sulfates et au delà de 15 mEq/l pour la halite (Meybeck, 1986), alors que la dissolution de silicate donne des valeurs de 0.07 à 1 mEq/l et les carbonates de 1 à 6.6 mEq/l.

4.2.4. Les relations inter-éléments

3.3.4.1. Graphiques éléments majeurs versus chlorure :

On considère qu'il n'existe que deux sources de chlorures : l'eau de mer et l'halite. De plus dans l'eau de pluie se trouve uniquement du chlorure d'origine marine, les roches salines évaporitiques ne pouvant produire d'aérosols continentaux. Ainsi si une eau ne draine pas d'évaporites, sa teneur en chlorure est directement liée à celle de l'eau de pluie qui l'alimente (Meybeck, 1986, Berner & Berner, 1987). Les chlorures sont donc souvent utilisés comme élément de référence.

Dans l'illustration 49 et l'illustration 50 sont présentés sous forme de diagrammes binaires élément majeur versus chlorures, les résultats d'analyses chimiques de la mission mai et juin 2006 du projet Carismeau. La droite de dilution de l'eau de mer est représentée comme référence, à partir des données synthétisées par Berner et Berner (1987). Pour les éléments mineurs, tels le fluor, les nitrates ou le brome, une valeur moyenne a été utilisée.

- La meilleure corrélation entre les mesures et la droite de dilution de l'eau de mer est observée sur le graphique Br versus Cl.

Les concentrations en chlorures varient dans l'intervalle 0.14-15.41 mmol/L pour l'aquifère des SIM, 0.49-1.50 mmol/L pour l'aquifère Eocène supérieur, 0.25-4.25 mmol/L pour l'Eocène moyen, 0.80-1.65 mmol/L pour l'Eocène inférieur et enfin 0.22-10.37 mmol/L pour l'aquifère Paléocène (les points non représentés ont des concentrations en brome inférieures à la limite de détection).

On sait que les bromures sont des espèces peu réactives lors des interactions eau-roche. Ainsi une eau d'origine marine ne verra pas son rapport Br/Cl évoluer sauf en cas de précipitation de halite qui fait augmenter ce rapport (Valyashko, 1968).

L'alignement des points le long de la droite de dilution de l'eau de mer suggère une origine marine commune pour l'ensemble des eaux des aquifères. On notera cependant un léger décalage global des points en faveur des bromures.

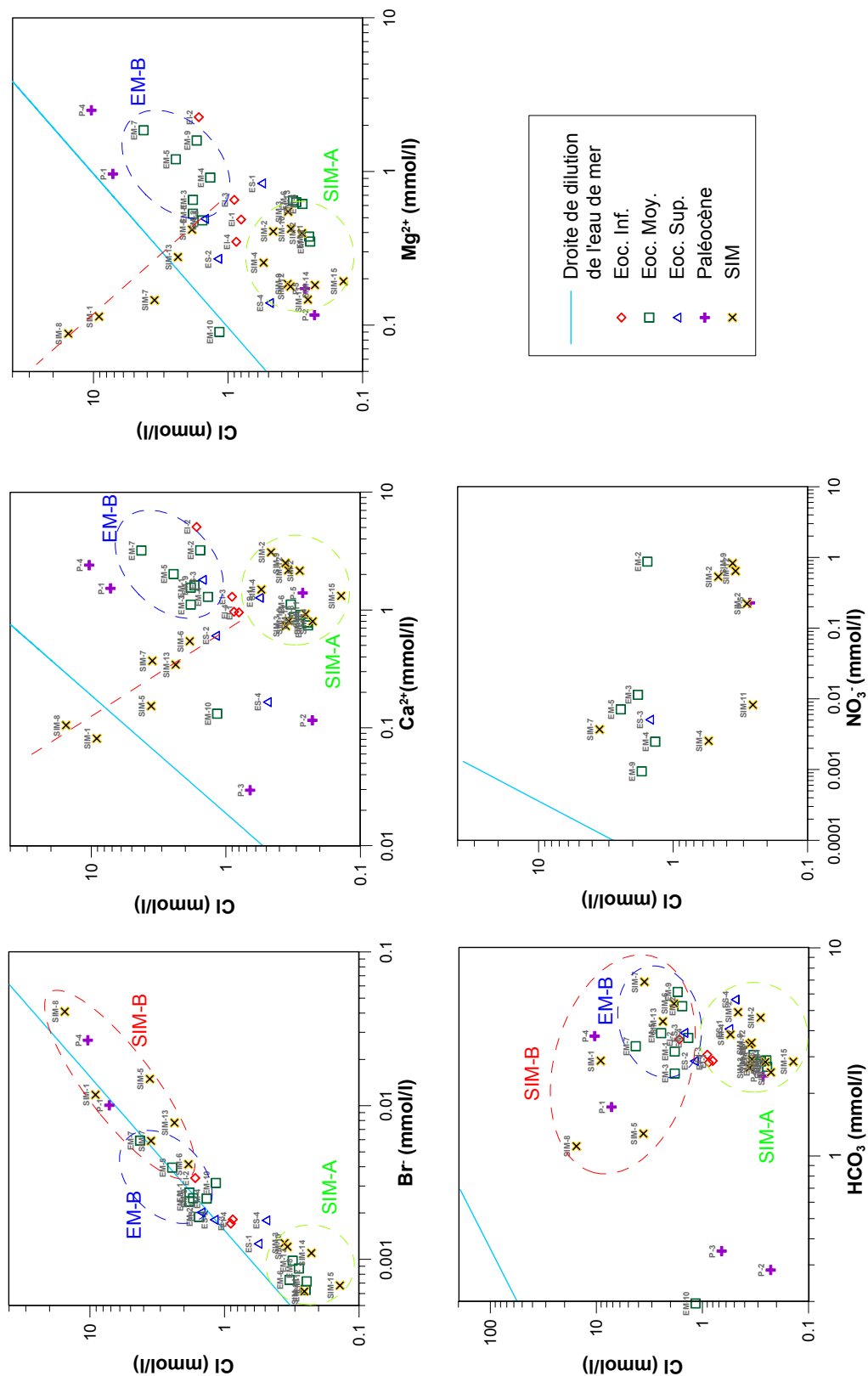


Illustration 49 : graphiques éléments majeurs versus chlorures pour les points de prélèvement de la mission mai et juin 2006, projet Carismeau (P = Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)

On remarque que les aquifères de l'Eocène moyen présentent une faible variabilité de concentration. Cependant on distinguera dès à présent deux groupes :

- groupe **EM-A** : EM-6 (N° BSS : 08048X0048), EM-8 (N° BSS : 08301X0002), EM-11 (N° BSS : 08522X0116) EM-12 (N° BSS : 08762X0018) et EM-13 (N° BSS : 08297X0001) qui présentent les plus faibles concentrations en chlorures et en bromures

- groupe **EM-B** : EM-1 (N° BSS : 07305X0001), EM-2 (N° BSS : 08308X0018), EM-3 (N° BSS : 07547X0068), EM-4 (N° BSS : 07796X0110), EM-5 (N° BSS : 08031X0199), EM-7 (N° BSS : 08281X0020) et EM-9 (N° BSS : 08764X0005), qui présente les plus fortes concentrations en chlorures et en bromures. Ces points sont essentiellement situés au niveau de l'estuaire de la Gironde, mais plus au centre de l'Aquitaine pour EM-2 (N° BSS : 08308X0018) et EM-9. Ce groupe est entouré en bleu sur les graphiques.

Concernant l'aquifère des SIM on peut également individualiser deux groupes :

- groupe **SIM-A** : SIM-2 (N° BSS : 09546X0022), SIM-3 (N° BSS : 10072X0026), SIM-4 (N° BSS : 10122X0055), SIM-9 (N° BSS : 10306X0035), SIM-10 (N° BSS : 10052X0006), SIM-11 (N° BSS : 10052X0030), SIM-12 (N° BSS : 10306X0034), SIM-14 (N° BSS : 09536X0008), SIM-15 (N° BSS : 09788X0004) présentant les plus faibles concentrations en chlorures. Ce groupe est entouré en vert sur les graphiques.

- groupe **SIM-B** : SIM-1 (N° BSS : 09293X0123), SIM-5 (N° BSS : 10312X0001), SIM-6 (N° BSS : 09307X0131), SIM-7 (N° BSS : 09838B0203), SIM-8 (N° BSS : 10098A0004), SIM-13 (N° BSS : 09857X0104) présentant les plus fortes concentrations en chlorures de l'aquifère. Ces points sont situés à l'Est du bassin, et présentent des faciès chloruré-sodique et bicarbonaté-sodique. Ils sont fortement minéralisés, excepté SIM-5. Ce groupe est entouré en rouge sur les graphiques.

Les eaux chlorurées-sodiques du Paléocène P-1 (N° BSS : 09764X0005) et P-4 (N° BSS : 09507X0048) présentent également de fortes concentrations en chlorures.

Un des points de l'Eocène inférieur, EI-2 (N° BSS : 09545X0005), est plus riche en chlorures que les autres points de l'aquifère. Il est de type sulfaté-calcique.

La relation entre variation de faciès, importance de la minéralisation et localisation géographique, a été précédemment mise en évidence. Elle a ici été reliée avec la variation de concentration en chlorures. Dans chacun des graphiques élément majeur versus chlorures qui seront par la suite présentés, les points vont forcément se regrouper selon leur concentration en chlorures, mais ceci ne sera plus évoqué.

- Un graphique nitrates versus chlorures a été réalisé. Les nitrates ont pour origine principale les pollutions anthropiques. Ce graphique servira donc par la suite de référence pour discuter une éventuelle pollution anthropique d'un aquifère en un autre élément chimique. Les points d'étude non présents sur ce graphique ont des teneurs en nitrates inférieures à la limite de détection.

- Les diagrammes Ca, Mg et HCO₃ versus Cl vont permettre de préciser les hétérogénéités détectées grâce aux concentrations en chlorures. Les concentrations en Ca varient entre 0.03 et 5.06 mmol/l pour l'ensemble des aquifères. Les concentrations en magnésium varient quant à elles entre 0 et 2.5 mmol/l, tandis que HCO₃ varie entre 0.2 et 6.9 mmol/l. Une forte concentration en Ca ou Mg peut être

notamment due à la dissolution de carbonates ou de sulfates dans l'eau. Cependant une part peut provenir de la dissolution d'aluminosilicates.

Sur les graphiques Ca et Mg versus Cl on peut observer que les points SIM-A sont bien localisés avec des concentrations en Ca et Mg plutôt élevées, tandis que les points SIM-B s'alignent selon une droite anticorrélée par rapport à l'eau de mer. Les points SIM-B s'éloignent des points SIM-A en s'enrichissant en Cl mais en perdant du Ca et du Mg. Les points du groupe SIM-B semblent donc contrôlés par un phénomène commun, plus ou moins intense selon les points (intensité maximale en SIM-8 (N° BSS : 10098A0004)). Cependant si les points SIM-B ont des concentrations en Ca beaucoup plus faibles que les autres points des SIM, leurs concentrations en Mg ne sont pas toujours plus faibles. Sur le graphique HCO₃ versus chlorure on observe de même que les points SIM-A présentent une gamme de concentration en HCO₃ beaucoup plus restreinte que SIM-B. Certains points de SIM-B sont appauvris en HCO₃ par rapport aux SIM, notamment SIM-8 et SIM-5 (N° BSS : 10312X0001).

Concernant l'Eocène moyen, la gamme de variation de la concentration en Ca, Mg et HCO₃ est beaucoup plus réduite. On notera cependant que EM-B est plus riche en Ca, Mg et HCO₃ que EM-A, ce qui peut laisser penser une influence de carbonates sur ces points. Ceci est en accord avec les connaissances lithologiques qui indiquent une augmentation de la proportion de calcaire vers l'ouest du bassin. Les points EM-5 (N° BSS : 08031X0199), et EM-7 (N° BSS : 08281X0020) sont parmi les plus enrichis en Ca et Mg, par contre ils n'ont pas une concentration en HCO₃ très élevée. Une influence de sulfates magnésiens et calciques peut donc être envisagée.

Nous noterons également la richesse en Ca et Mg des points P-1 (N° BSS : 09764X0005) et P-4 (N° BSS : 09507X0048).

- Sur le diagramme Na versus chlorures, nous notons une certaine corrélation avec la droite de dilution de l'eau de mer. Cependant la majorité des points sont enrichis en Na. En dehors des apports océaniques le sodium peut être amené par la dissolution d'halite ou par l'altération d'aluminosilicates sodiques. Or la dissolution de la halite amène un ion chlorure pour un ion sodium, ce qui ne peut avoir une influence importante par rapport à une eau marine (rapport molaire Cl/Na=1.17 pour la droite de dissolution de l'eau de mer). L'influence des aluminosilicates sodiques est donc plus réaliste.

Quelques points présentent cependant un enrichissement en chlorures par rapport à la droite de dissolution de l'eau de mer : SIM-4 (N° BSS : 10122X0055), SIM-2 (N° BSS : 09546X0022), SIM-9 (N° BSS : 10306X0035) et SIM-12 (N° BSS : 10306X0034) ; EM-1 (N° BSS : 07305X0001), EM-2 (N° BSS : 08308X0018), EM-3 (N° BSS : 07547X0068). Or on sait que les chlorures ne viennent en principe que des aérosols marins ou de la dissolution de la halite, ce qui ne peut expliquer ces résultats. Il est donc possible que l'on ait une pollution chlorée en ces points. Le diagramme NO₃/Cl donne de plus du crédit à cette hypothèse : les nitrates viennent principalement de pollutions lorsqu'ils sont en quantité importante. Or pour la majorité des points précédemment cités des nitrates ont été détectés, sauf pour EM-1 (N° BSS :

07305X0001). Cependant certains points riches en nitrates ne présentent pas d'excès en chlorures : il faut donc être prudent.

- Les sulfates proviennent généralement essentiellement de l'altération des sulfates de calcium et de magnésium (évaporites) ou de la pyrite. Ici les concentrations en sulfates varient dans l'intervalle 0.004-10 mmol/l. Les eaux sont enrichies en sulfates par rapport à l'eau de mer, excepté les points SIM-1 (N° BSS : 09293X0123) et P-3 (N° BSS : 10078X0001). On pourrait penser que cela provient d'une pollution anthropique en Cl, mais l'absence de nitrates en ces points ne soutient pas cette hypothèse.

Globalement les eaux riches en chlorures sont très minéralisées et également riches en sulfates, ce qui suggère un contrôle de ces points par l'interaction avec des évaporites. Notamment, les points EM-4 (N° BSS : 07796X0110), EM-5 (N° BSS : 08031X0199) et EM-7 (N° BSS : 08281X0020) sont riches en sulfates, mais également riches en Mg et Ca, ce qui conforte une dissolution de gypse et magnésite en ces points. Il est par ailleurs intéressant de noter que ces points sont alignés dans les trois graphiques calcium, magnésium et sulfate versus chlorure, ce qui souligne peut-être une circulation de ces eaux de EM-4 (N° BSS : 07796X0110) à EM-7 (N° BSS : 08281X0020) avec enrichissement progressif en évaporites ; leur disposition géographique rend cette hypothèse réaliste.

Pour l'Eocène inférieur, les diagrammes Ca, Mg, HCO₃ et SO₄ versus Cl soulignent un alignement de ces points avec des concentrations les plus élevées mesurées pour EI-2 (N° BSS : 09545X0005). Ce dernier est par ailleurs caractérisé par un faciès sulfaté-calcaïque et une forte minéralisation et a probablement interagi avec des couches évaporitiques.

Concernant les SIM, le groupe SIM-B est riche en sulfates, excepté SIM-5 (N° BSS : 10312X0001) qui s'individualise de l'ensemble de l'aquifère par sa très faible concentration en sulfates.

- Concernant le potassium, les concentrations varient dans l'intervalle 0-1.34 mmol/l. Les points sont généralement enrichis en K par rapport à l'eau de mer. Il est beaucoup moins évident d'observer sur ce graphique une corrélation entre K et Cl. Cependant dans les groupes EM-B et SIM-B on note globalement une augmentation simultanée de K et de Cl. Le point SIM-4 (N° BSS : 10122X0055) possède une concentration particulièrement élevée. Le potassium provient essentiellement de la dissolution des feldspaths, d'argile et micas. Il est donc probable que la lithologie évolue en ce point, ou bien que l'on ait un mélange avec un autre aquifère. Il est de plus intéressant de noter que le point EI-4 (N° BSS : 10121X0013), situé à proximité immédiate de SIM-4, possède une concentration beaucoup plus faible en K (facteur 10). Ceci ne joue pas en faveur d'une communication entre ces deux aquifères, contrairement à ce qui avait été suggéré précédemment.

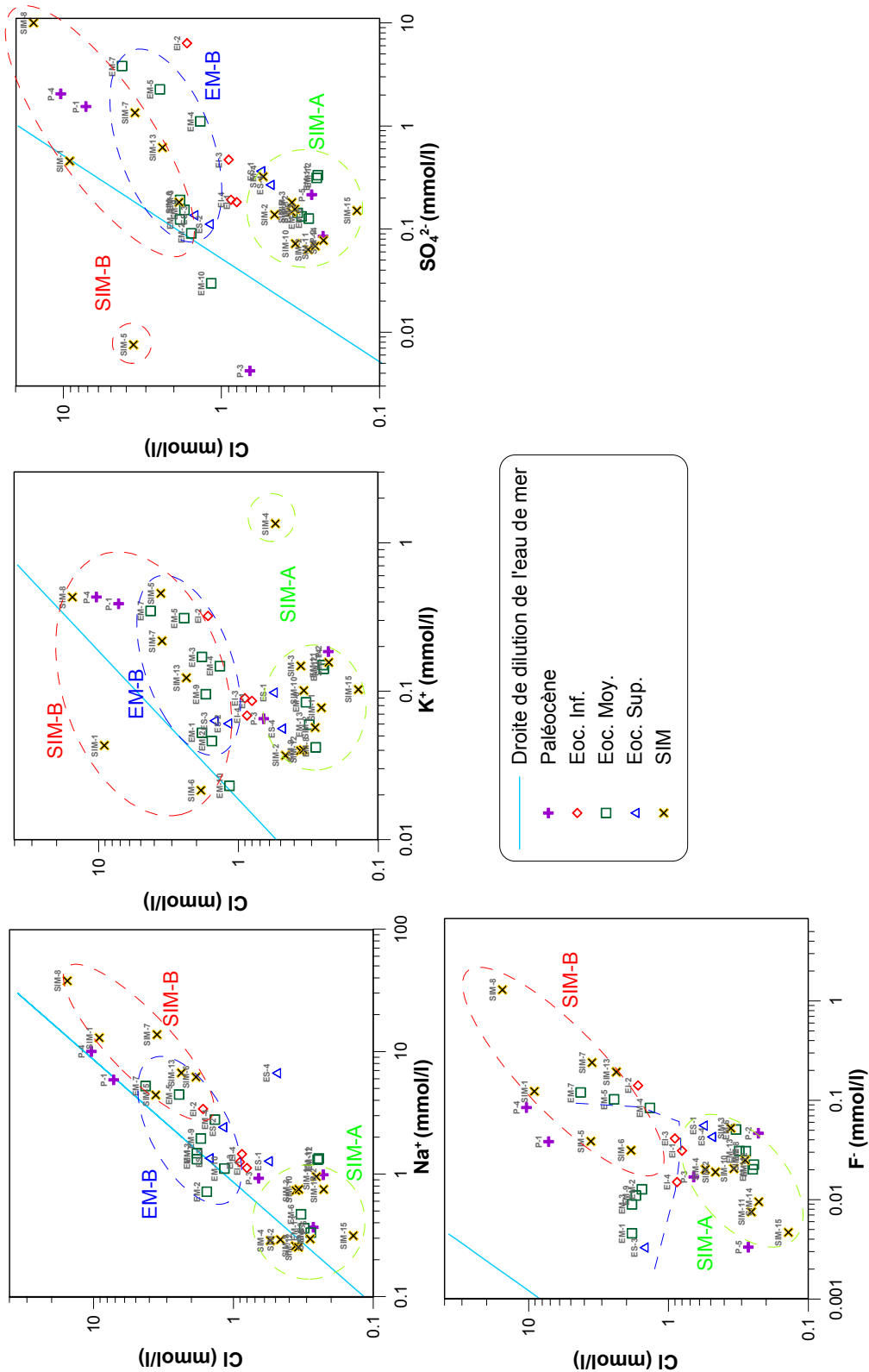


Illustration 50 : graphiques éléments majeurs versus chlorures pour les points de prélèvement de la mission mai 2006, projet Carismeau (P = Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)

- Les fluorures présentent généralement des concentrations constantes dans les eaux, autour de 0.0035 mmol/l, sauf celles contrôlées par les évaporites où leur concentration peut quadrupler (Meybeck, 1986). Cependant des pollutions fluorées peuvent exister. Ici on observe une variabilité particulièrement importante de cette concentration, entre 0.002 et 1 mmol/l. Le critère de Meybeck indiquerait ici un contrôle de la quasi totalité des eaux par des évaporites, ce contrôle étant particulièrement prononcé pour les eaux du groupe SIM-B, au niveau des points EM-4 (N° BSS : 07796X0110), EM-5 (N° BSS : 08031X0199) et EM-7 (N° BSS : 08281X0020) pour l'Eocène moyen, en P-1 (N° BSS : 09764X0005), P-2 (N° BSS : 10052X0038) et P-4 (N° BSS : 09507X0048) et en ES-1 (N° BSS : 08535X0020) et ES-4 (N° BSS : 09586X0008). Cependant presque tous les autres points ont également des valeurs bien supérieures à 0.0035mmol/l.

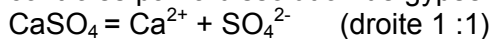
- On notera que le point P-4, possède 0.45 mmol/L de thiosulfates ($S_2O_3^{2-}$).

Pour les points du groupe SIM-B les concentrations en F et SO_4 indiquent un contrôle de ces points par le lessivage d'évaporites, bien que ces eaux soient relativement pauvres en Ca et Mg.

Seront présentés ci-après dans l'illustration 51 des diagrammes binaires inter-éléments sur lesquels sont portées les droites de dissolution des carbonates et sulfates susceptibles d'influencer la chimie de ces aquifères.

3.3.4.2 Diagrammes binaires inter-éléments

- Le diagramme sulfates versus Ca a été réalisé afin d'individualiser les points contrôlés par la dissolution de gypse ou d'anhydrite selon l'équation :



Cependant un point où tous les sulfates et une part du calcium proviennent de la dissolution de gypse mais dont une autre part du calcium provient de la dissolution de carbonates verra son point éloigné de la droite 1 :1 même si c'est la dissolution de gypse qui explique tout le SO_4 . Un point situé sur la droite 1 :1 peut également l'être par hasard. Seules des hypothèses seront donc formulées, à confirmer grâce aux analyses isotopiques.

Les points situés le plus près de la ligne 1 :1 sont les points P-2 (N° BSS : 10052X0038), P-1 (N° BSS : 09764X0005), P-4 (N° BSS : 09507X0048), EM-4 (N° BSS : 07796X0110), EM-5 (N° BSS : 08031X0199), EM-7 (N° BSS : 08281X0020), ES-4 (N° BSS : 09586X0008) et EI-2 (N° BSS : 09545X0005). Excepté les points P-2 et ES-4, tous ces points étaient déjà suspectés d'être contrôlés par la dissolution de gypse. Cette hypothèse est donc confirmée.

Concernant les points SIM-1 (N° BSS : 09293X0123), SIM-7 (N° BSS : 09838B0203), SIM-8 (N° BSS : 10098A0004) et SIM-13 (N° BSS : 09857X0104), ils sont plus riches en SO_4 qu'en Ca. Persistent trois hypothèses : soit leurs sulfates ont une autre origine que le gypse, soit seulement une part de leur sulfates provient d'une source autre, soit ces points ont été secondairement appauvris en Ca.

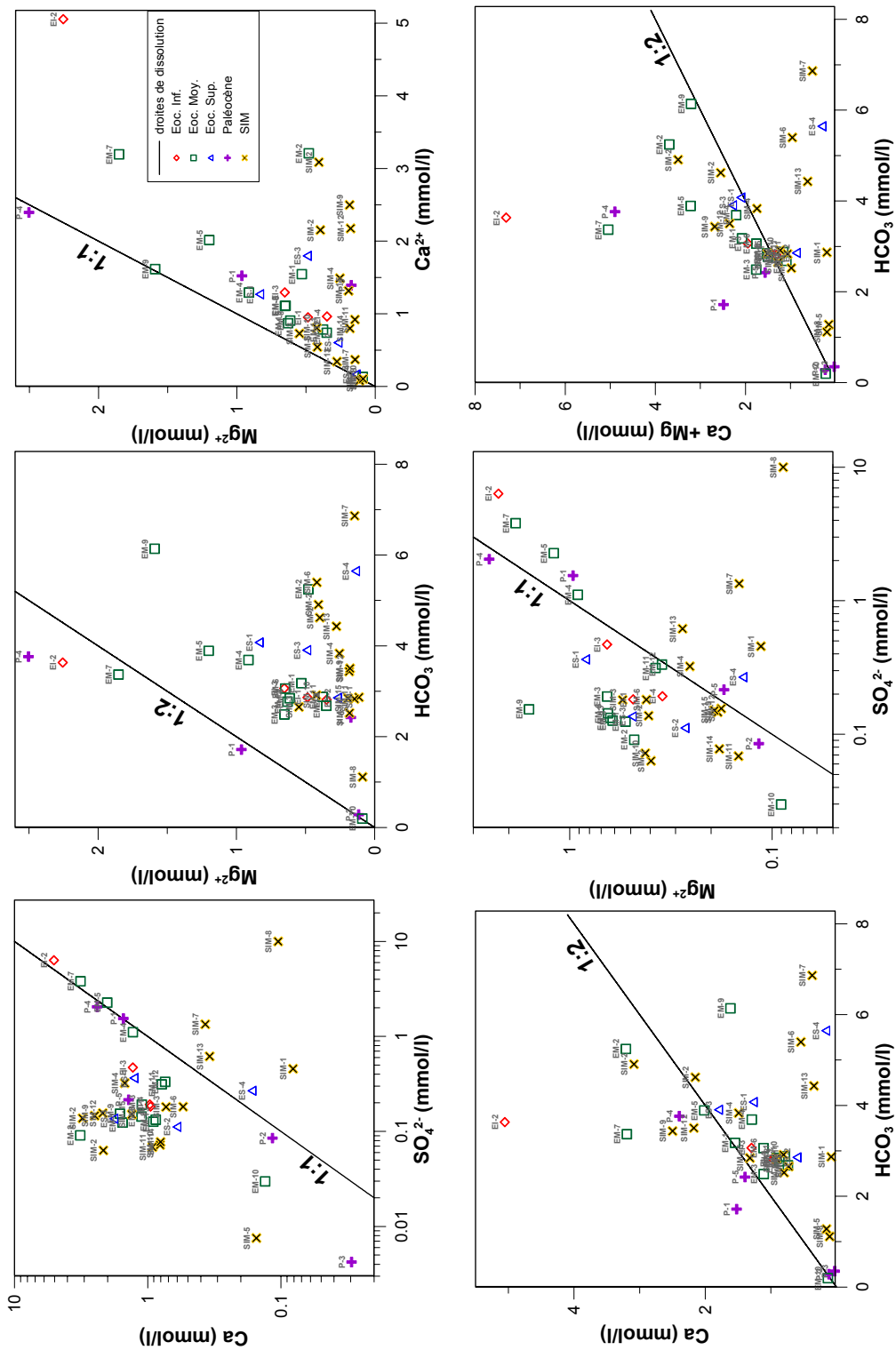


Illustration 51 : graphiques binaires d'éléments majeurs pour les points de prélèvement de la mission mai 2006, projet Carisneau (P = Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)

- Le graphe HCO_3^- versus Ca localise les points par rapport à la droite 1 : 2 qui correspond à l'équation : $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$ de dissolution de la calcite. Il apparaît au vu de ce graphe que les points SIM-8 (N° BSS : 10098A0004), SIM-5 (N° BSS : 10312X0001), SIM-1 (N° BSS : 09293X0123), SIM-13 (N° BSS : 09857X0104), SIM-6 (N° BSS : 09307X0131), SIM-7 sont très appauvris en calcium par rapport à cette droite. EI-2 (N° BSS : 09545X0005) n'est pas contrôlé par la dissolution de calcite ce qui conforte l'hypothèse de l'origine de son calcium par le gypse. Par contre le point P-5 (N° BSS : 10765X0112) notamment semble entièrement contrôlé par la dissolution de la calcite. Pour les autres points qui sont globalement autour de la droite, on ne peut vraiment juger pour chacun d'eux si la dissolution de la calcite joue beaucoup sur leur chimie, mais il semble que la dissolution de calcaires apparaît comme une source importante d'éléments dissous pour l'ensemble des aquifères.

- Le graphe Mg versus Ca a pour but de déterminer les points éventuellement contrôlés par la dissolution de la dolomite. En effet la dissolution de la dolomite obéit à l'équation : $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + 2 \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 4 \text{HCO}_3^-$ et aboutit donc à la mise en solution de Ca et Mg dans des proportions équivalentes. Or nous pouvons noter qu'une majorité des points est proche de la ligne 1:1. Sur le graphe Mg+Ca versus HCO_3^- , la droite 1:2 correspondant à la dissolution carbonates plus ou moins magnésiens rassemble également un grand nombre de points. Des points fortement influencés par la dissolution de la dolomite devront donc se trouver à proximité de ces deux droites. On remarquera que les points situés à proximité d'une des droites sont en général assez éloignés de l'autre. Il ne semble pas y avoir une influence prépondérante de la dolomite. Seul le point EM-9 (N° BSS : 08764X0005) semble contrôlé par la dolomite.

- Le diagramme HCO_3^- versus Mg traduit la dissolution de la magnésite, dont l'équation de dissolution est : $\text{MgCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Mg}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$. Il semble que les points P-1 (N° BSS : 09764X0005), EM-7 (N° BSS : 08281X0020), EI-2 (N° BSS : 09545X0005) et peut être P-4 (N° BSS : 09507X0048) soient contrôlés par cette dissolution.

- Le graphique sulfates versus magnésium traduit la dissolution des sulfates magnésiens : $\text{MgSO}_4 = \text{Mg} + \text{SO}_4$. Se rapprochent de cette droite 1 : 1 les points EM-11 (N° BSS : 08522X0116) et EM-12 (N° BSS : 08762X0018).

4.2.5. Rapports normés par rapport à Na

Nous avons précédemment mis en évidence l'influence importante de la lithologie sur la composition chimique de l'eau des aquifères. Or pour une même lithologie, en fonction du temps de transit qui conditionne le temps d'interaction eau-roche, du volume d'eau au contact des roches, et de l'évaporation éventuelle, un effet dilution-concentration peut donner des concentrations chimiques très différentes en différents points de l'aquifère. Afin de s'affranchir de cet effet lors de l'interprétation des données, une méthode consiste à normer les différents éléments chimiques par rapport à l'un d'entre eux (Négre et al., 1993 ; Gaillardet et al., 1997 et 1999). Ainsi sur un diagramme binaire, la droite de dilution correspondant à une lithologie se ramène à un point. Nous avons ici utilisé le sodium pour normer les analyses, étant donné que celui-

ci est produit essentiellement par la dissolution des aluminosilicates sodiques et à un degré moindre par la dissolution des évaporites. Il en résulte que les eaux drainant des roches carbonatées contiendront des quantités bien moindres de sodium, ce qui devrait nous permettre de différencier les eaux sous influence de roches silicatées de celles contrôlées par des roches carbonatées (Négre et al., 1993).

rapports molaires						
Pôle	Ca/Na	Mg/Na	HCO ₃ /Na	sulfates/Na	K/Na	origine des données
carbonates	50	10	120			Stallard (1980), Meybeck (1986), Negrel (1993)
calcaire pur	79	2.5	162.5	2.08	0.66	Meybeck (1986)
dolomie	270	230	915	50	1	Reeder et al. (1972), Stallard (1980), Meybeck (1984 et 1986)
évaporites	1+/-0.4	0.6 +/- 0.2	3+/-1			Meybeck (1986)
marnes à gypse	192.5	55	85	207.5	1	Meybeck (1986)
marnes à halite et gypse	0.5	0.5	0.6	0.66	0.02	Meybeck (1986)
silicates	0.35 +/- 0.15	0.24 +/- 0.12	2+/-1			Negrel et al. (1993), Gaillardet et al. (1999)
sables et grès quartzeux	0.33	0.22	1.33	0.44	0.11	Meybeck (1986)
marnes	16.6	2.8	39.2	0.4	0.2	Meybeck (1986)

Illustration 52: rapports molaires moyens normés par rapports à Na de Ca, Mg, HCO₃, SO₄ et K dans des eaux drainant une mono-lithologie.

Les rapports élémentaires X/Na, de l'élément X normalisés par rapport au Na, sont documentés dans la littérature (Illustration 52) pour les eaux interagissant avec des roches silicatées et des roches carbonatées. Cependant pour les eaux drainant des évaporites, ces rapports sont beaucoup plus difficiles à définir en raison de la diversité de composition et de solubilité des roches rencontrées. Ces rapports élémentaires X/Na, définissant les pôles carbonates, silicates et évaporites, sont reportés à titre indicatif sur l'illustration 52. Pour les sulfates et le potassium, les données reportées correspondent à celles de Meybeck (1986). Ces données acquises sur des petits bassins mono-lithologiques permettent de définir les pôles sables et grès quartzeux, marnes, calcaire pur et dolomite, marnes à gypse, marnes à halite et gypse reportés sur l'illustration 53. Dans le cadre de cette étude, ces pôles ne sont reportés qu'à titre indicatif, en effet ils ont été généralement définis pour les eaux de surface et ils ne recouvrent pas la diversité des lithologies rencontrées notamment pour les roches évaporitiques.

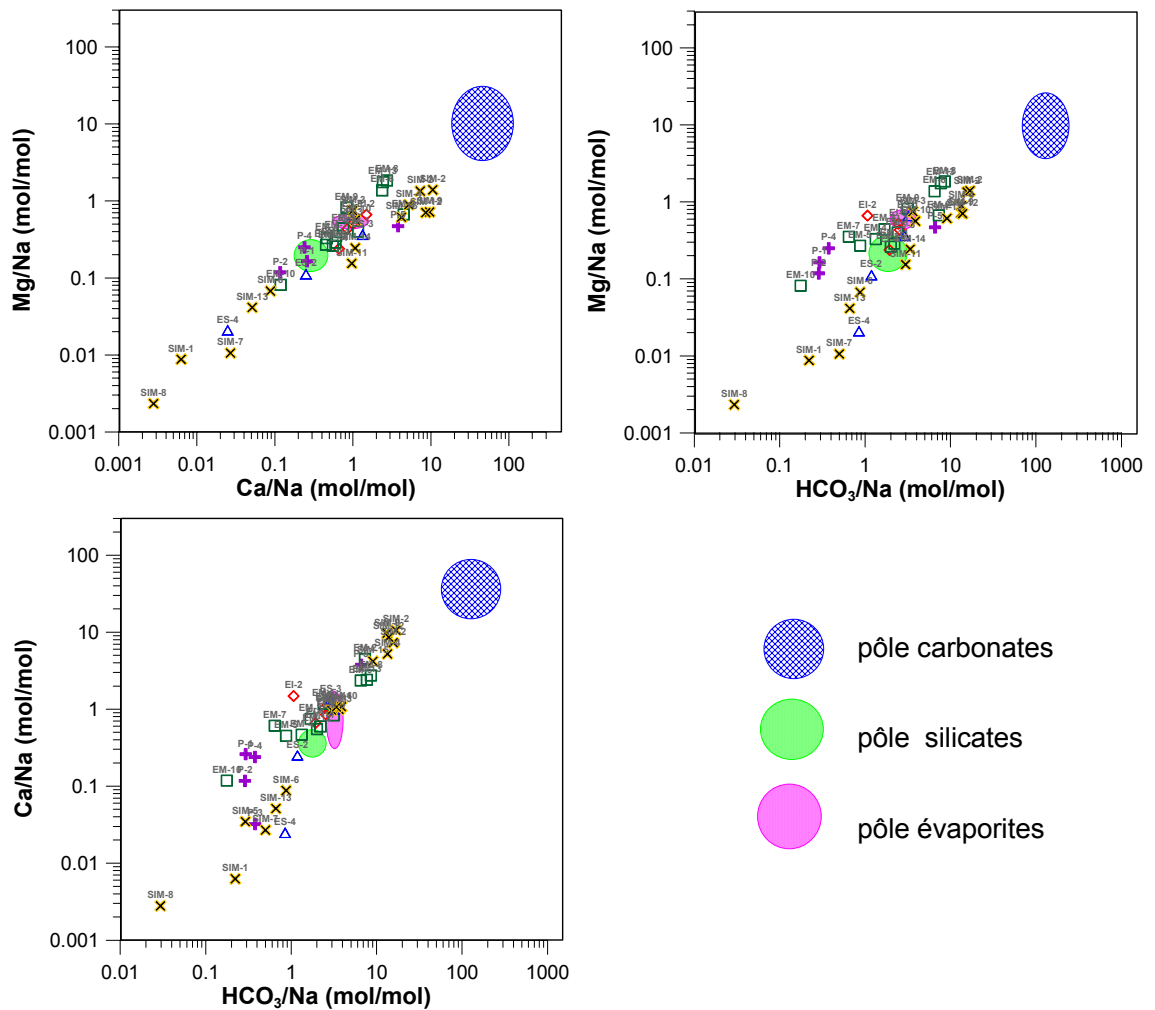


Illustration 53 : diagrammes binaires des éléments majeurs normés par rapport à Na (rapports molaires) – mission mai et juin 2006 du projet Carismeau (P = Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)

Sur l'illustration 53 sont représentés les diagrammes binaires normés Ca/Na et Mg/Na versus HCO_3^-/Na et Ca/Na versus Mg/Na. Il apparaît que les points s'alignent globalement suivant une droite passant par les pôles silicate, évaporite et carbonate définis dans la littérature. Des groupes s'individualisent en fonction de la participation des carbonates à leur chimie :

- pour les SIM le groupe SIM-A se scinde en deux, SIM-2 (N° BSS : 09546X0022), SIM-4 (N° BSS : 10122X0055), SIM-9 (N° BSS : 10306X0035), SIM-12 (N° BSS : 10306X0034) et SIM-15 (N° BSS : 09788X0004) chez qui les carbonates jouent un rôle plus important par rapport à SIM-11 (N° BSS : 10052X0030), SIM-10 (N° BSS : 10052X0006), SIM-14 (N° BSS : 09536X0008) et SIM-3 (N° BSS : 10072X0026).

- Pour l'Eocène moyen, les points EM-2 (N° BSS : 08308X0018), EM-13 (N° BSS : 08297X0001), EM-8 (N° BSS : 08301X0002) et EM-6 (N° BSS : 08048X0048) sont fortement influencés par les carbonates.
- Les autres points apparaissent influencés par un pôle évaporitique ayant une composition chimique proche de SIM-8 (N° BSS : 10098A0004). Ce résultat met en évidence que le pôle évaporitique défini dans la littérature n'est pas applicable pour rendre compte des lithologies en présence sur le Bassin Adour-Garonne. Par ailleurs, Il est possible que le pôle silicate, ayant des rapports élémentaires X/Na inférieurs au pôle carbonate (Meybeck, 1984) puisse également influencer sur la composition chimique de ces eaux même si ce signal risque d'être masqué par la dissolution de niveaux évaporitiques.

On notera également que sur les graphiques Mg/Na et Ca/Na versus HCO_3^-/Na , les points P-1 (N° BSS : 09764X0005), P-4 (N° BSS : 09507X0048), EI-2 (N° BSS : 09545X0005), EM-4 (N° BSS : 07796X0110), EM-5 (N° BSS : 08031X0199) et EM-7 (N° BSS : 08281X0020) s'éloignent légèrement du même côté de la droite silicates-carbonates. Ceci est peut être dû à l'influence d'un autre pôle évaporitique, ayant une composition chimique proche de P-1 et P-4 (dômes de sel de la région de Dax).

D'autres hypothèses peuvent être également envisagées pour expliquer les rapports élémentaires X/Na faibles, notamment des concentrations en sodium élevées en ces points, résultant des apports atmosphériques, soit un phénomène de précipitation des éléments Ca, Mg aboutissant à une baisse des concentrations en ces éléments dans les eaux (reprécipitation in situ de dolomie et de calcite).

Dans l'illustration 54 sont présentés les diagrammes binaires HCO_3^-/Na , Mg/Na et Ca/Na versus SO_4/Na ainsi que K/Na versus Ca/Na. Les mêmes groupes de points de prélèvement s'individualisent dans l'illustration 53 ce qui appuie les précédents résultats. On remarquera également sur les graphes Ca/Na, Mg/Na et HCO_3^-/Na versus SO_4/Na que le pôle évaporites à gypse et à halite et sable ou grès quartzeux, documentés dans la littérature, peuvent rendre compte de la composition des points EM-4 (N° BSS : 07796X0110), EM-5 (N° BSS : 08031X0199), EM-7 (N° BSS : 08281X0020), P-1 (N° BSS : 09764X0005), P-4 (N° BSS : 09507X0048), EI-2 (N° BSS : 09545X0005). Cependant on observe une dispersion beaucoup plus importante des points, et notamment pour les rapports SO_4/Na faibles. Les pôles documentés dans la littérature ne rendent, là encore, pas compte de la diversité lithologique présente sur le bassin Adour-Garonne. Pour les rapports SO_4/Na faibles deux pôles évaporitiques distincts semblent s'individualiser : le premier de composition proche de celles de SIM-8 (N° BSS : 10098A0004), et le second de composition proche de SIM-5 (N° BSS : 10312X0001) et P-3 (N° BSS : 10078X0001).

Ces premières interprétations seront par la suite approfondies en les confrontant aux analyses isotopiques afin de dégager une systématique cohérente pour l'ensemble des traceurs géochimiques concernant l'origine et les mélanges des eaux souterraines sur le bassin Adour-Garonne.

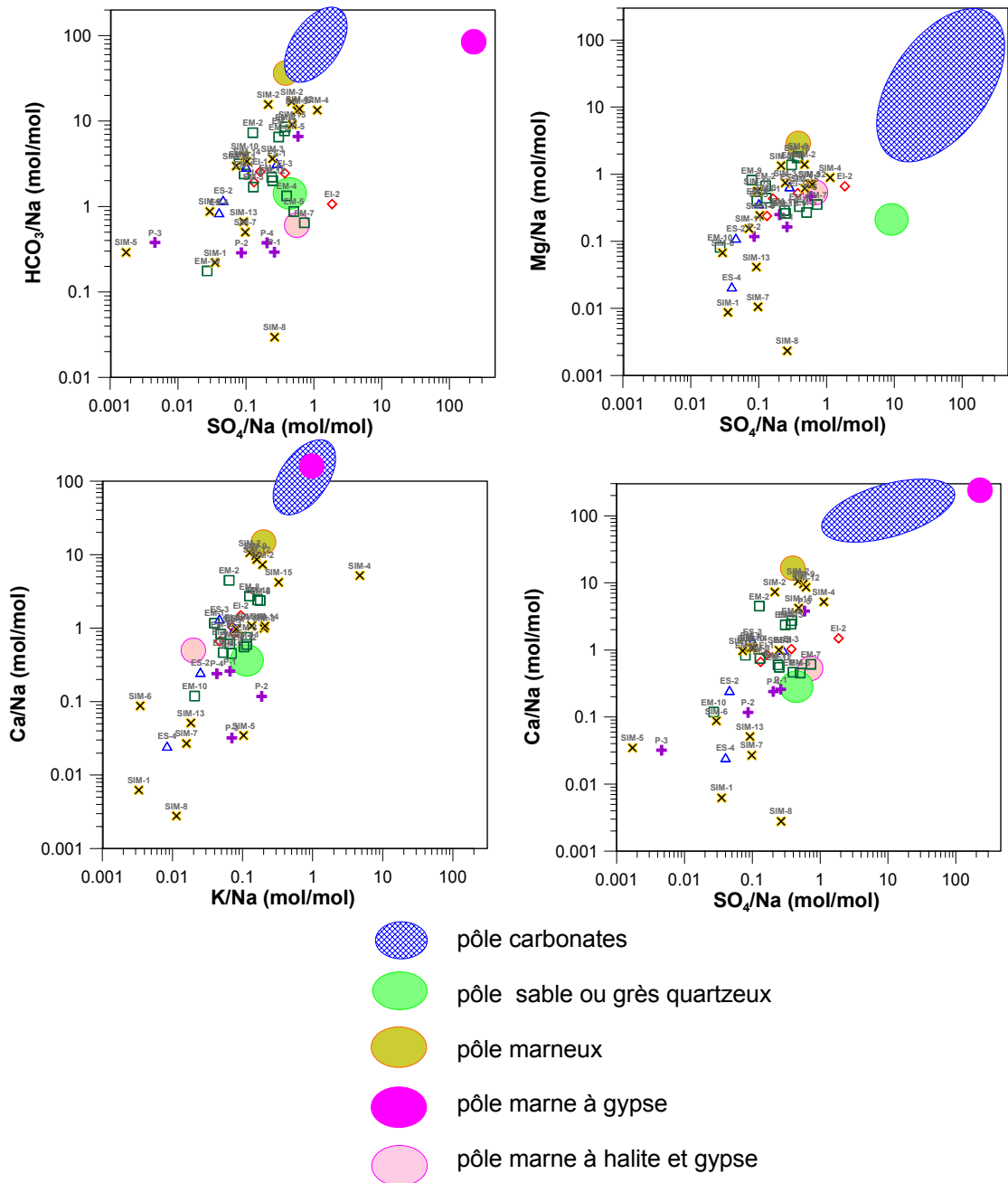


Illustration 54 : diagrammes binaires des éléments majeurs normés par rapport à Na (rapports molaires) – mission mai et juin 2006 du projet Carismeau (P = Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)

5. Approche isotopique des eaux souterraines : campagne de prélèvement de mai 2006

5.1. DESCRIPTION DES OUTILS UTILISES

5.1.1. Les isotopes stables de la molécule d'eau

Les isotopes stables de l'eau : le rapport des isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène est exprimé en unité ‰ de déviation par rapport à un standard de référence. On utilise la notation δ exprimée en parts pour mille selon $\delta = [(R_{\text{échantillon}} / R_{\text{étalon}}) - 1] \times 1000$ où R est le rapport isotopique, isotope lourd sur isotope léger (e.g. $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$). Le standard de référence est le SMOW (Standard Mean Ocean Water), pris à 0 ‰, qui est une eau de mer moyenne. En l'absence d'évaporation ou d'échange avec des gaz dissous, les isotopes stables de la molécule d'eau se comportent comme des traceurs conservatifs et reflètent le mélange des différentes recharges ayant alimenté les eaux souterraines considérées. L'histoire hydroclimatique d'un aquifère peut donc être reconstituée par l'abondance des isotopes stables lourds de l'oxygène (^{18}O) et de l'hydrogène (^2H) dont les signatures correspondent à des environnements et des épisodes hydroclimatiques spécifiques, ou des altitudes de recharge différentes. Sous certaines conditions (faible rapport eau/roche, temps de résidence long, température élevée du réservoir, échange avec CO_2 , évaporation, ...), les interactions eau – roche peuvent modifier la composition isotopique initiale de l'eau.

Les analyses des isotopes stables de la molécule d'eau sur la première campagne de mai 2006 sont en cours de réalisation, les résultats ne sont donc pas présentés dans le présent rapport.

5.1.2. Les isotopes du bore

Le bore est un élément en traces possédant deux isotopes stables ^{10}B et ^{11}B extrêmement solubles dans les fluides aqueux. De même que pour les isotopes stables de la molécule d'eau, on utilise la notation δ exprimée en parts pour mille selon $\delta^{11}\text{B} = [\{ (^{11}\text{B}/^{10}\text{B})_{\text{sample}} / (^{11}\text{B}/^{10}\text{B})_{\text{standard}} \} - 1] \cdot 10^3$. Le standard de référence est le NBS951. La grande différence relative de masse entre ces isotopes stables ainsi que la forte réactivité géochimique de cet élément entraînent un fractionnement isotopique naturel du bore de l'ordre de 90 unités delta. Les valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ les plus basses (-30 ‰) correspondent aux évaporites non-marines, tandis que le réservoir le plus enrichi en ^{11}B est représenté par les saumures des lacs salés d'Australie et par la Mer Morte en Israël ($\delta^{11}\text{B}$ jusqu'à +59 ‰). Le réservoir océanique présente une valeur de $\delta^{11}\text{B}$ mondialement constante de l'ordre de +39.5 ‰. Le bore présente ainsi un fort potentiel de signature isotopique en termes de mélange ou de processus spécifiques.

5.1.3. Les isotopes du lithium

Le lithium est un élément léger qui possède deux isotopes stables de masse 6 et 7, dont les abondances naturelles sont respectivement 7.5 % et 92.5 %. La composition isotopique du lithium d'un échantillon se note en déviation relative (en ‰) par rapport à un standard. Depuis peu, la communauté scientifique a adopté une notation commune en exprimant le rapport isotopique ${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$ de la manière suivante :

$$\delta^7\text{Li} (\text{‰}) = \left(\frac{({}^7\text{Li}/{}^6\text{Li})_{ech}}{({}^7\text{Li}/{}^6\text{Li})_{std}} - 1 \right) \times 10^3$$

Le standard de référence est un carbonate de lithium (L-SVEC, NIST RM8545) dont la valeur du $\delta^7\text{Li}$ est de 0 ‰ par définition (${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li} = 12.02 \pm 0.03$, Flesch et al., 1973).

La différence de masse relative entre les deux isotopes est considérable (17 %) et engendre des fractionnements isotopiques importants lors des réactions géochimiques qui se produisent à la surface de la Terre. La gamme de variation isotopique du lithium est de plus de 60 ‰ dans les différents matériaux géologiques. Les roches silicatées de la croûte ont une composition isotopique comprise entre -2 et +2 ‰, l'eau de mer ~ +31 ‰, les eaux de rivières ont des compositions intermédiaires entre +6 et +23 ‰ et les eaux thermo-minérales ont des compositions isotopiques qui varient entre -10 et +20 ‰.

Les isotopes du lithium sont considérés à juste titre comme un outil géochimique faisant partie de la famille « des nouveaux traceurs isotopiques ». Le comportement des isotopes du lithium lors des interactions eau/roche à basse et haute température est très mal connu à l'heure actuelle. Le lithium est un élément lithophile, fortement soluble et se trouve par conséquent enrichi considérablement dans les fluides ayant interagi avec les roches. Les concentrations en lithium des eaux ne sont contrôlées que par les processus d'interactions eux-mêmes (intensité d'interaction, température et assemblage minéralogique). Et les réactions d'oxydo-réduction, de complexation organique ou de spéciation n'ont aucun effet de contrôle vis-à-vis des concentrations de lithium dans les eaux.

A ce jour seules quelques études se sont intéressées à la composition isotopique en lithium dans les eaux souterraines. La gamme de valeurs du $\delta^7\text{Li}$ mesurée pour ces eaux est très large, allant de valeurs très faibles (<-10‰ ; Gellenbeck and Bullen, 1991), à des valeurs intermédiaires proches de celles mesurées pour les roches sédimentaires (-10‰ à +20‰ ; Tomascak et al., 1995, 1999, Tomascak and Banner, 1998) à des valeurs très élevées (>20‰ ; Hogan and Blum, 2003 ; Tomascak et al., 2003). Cette gamme reflète à la fois la diversité des sources de Li dissous et des processus de fractionnement intervenant pour les systèmes aquifères. Dans une étude sur les eaux souterraines près de New York, Hogan et Blum (2003) ont utilisé les isotopes du Li pour contraindre les mélanges entre l'eau de mer et les eaux douces. Par ailleurs, le Li d'origine anthropogénique présente une signature isotopique particulière (Qi et al., 1997), ce qui suggère la possibilité de tracer les sources de pollution dans les eaux (Bullen et Senior, 1992 ; Hogan et Blum, 2003). Ainsi la

composition isotopique en Li a le potentiel de mettre en évidence les sources de Li dissous, de tracer les flux de mélange, et d'étudier les tendances d'évolution de la composition chimique des eaux souterraines. Quoiqu'il en soit, en raison du peu d'études engagées à ce jour, l'amplitude du fractionnement isotopique et les facteurs de contrôle restent encore mal contraints.

5.1.4. Les isotopes du soufre et de l'oxygène des sulfates

Le soufre possède 4 isotopes stables, ^{32}S , ^{33}S , ^{34}S et ^{36}S d'abondances respectives 95 %, 0.76 %, 4.22 % et 0.014 %. Le soufre est impliqué dans plusieurs processus biogéochimiques et par ses divers degrés d'oxydation (-2 à +6), il est présent sous différentes formes (sulfates, sulfures...). L'étude des rapports isotopiques ($^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$) et ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) dans les sulfates dissous permet d'avoir une information sur l'origine de la minéralisation et les processus impliqués comme l'oxydation de sulfures, la réduction bactérienne des sulfates (Pearson et Rightmire, 1980, Krouse, 1980). De même que pour les isotopes stables de la molécule d'eau, on utilise la notation δ exprimée en parts pour mille selon δ (‰) = $[(R_{\text{échantillon}} / R_{\text{étalon}}) - 1] \times 1000$ où R est le rapport isotopique, isotope lourd sur isotope léger (e.g., $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$; $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) des sulfates. Le standard de référence est le SMOW (Standard Mean Ocean Water) pour le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ et le CDT (Cañon Diablo Troilite) pour le rapport $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$.

Dans les océans, le soufre existe essentiellement sous forme de sulfates, et les rapports isotopiques ($^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$) et ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) sont constants, pour une période géologique donnée, du fait d'un état de régime permanent entre les apports (eaux continentales, dissolution du SO_2 de l'air) et les pertes (précipitation d'évaporite, réduction des sulfates et précipitation des sulfures...). Actuellement la signature des océans est $\delta^{34}\text{S}(\text{SO}_4) = +20$ ‰ vs CDT et $\delta^{18}\text{O}(\text{SO}_4) = +9.45$ ‰ vs SMOW (Longinelli, 1989). Les teneurs isotopiques en sulfates de l'atmosphère sont en principe les mêmes que celles des océans mais les émissions volcaniques et industrielles, ainsi qu'une activité bactérienne à la surface des océans, entraînent un appauvrissement en isotopes lourds.

La dissolution des minéraux sulfatés n'amène aucun fractionnement isotopique mais leur précipitation entraîne un appauvrissement en isotopes lourds du sulfate restant en solution, qui se traduit par une droite de pente 0.5 sur le diagramme $\delta^{34}\text{S}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ (Krouse, 1980). La réduction de sulfates en sulfures conduit à l'enrichissement en isotopes lourds du sulfate résiduel (Krouse, 1980), avec un enrichissement 4 fois plus fort pour le soufre que pour l'oxygène ce qui se traduit par une droite de pente égale à 4 dans le diagramme $\delta^{34}\text{S}(\text{SO}_4)$ versus $\delta^{18}\text{O}(\text{SO}_4)$. Quant à l'oxydation des sulfures en sulfates, elle entraîne un léger appauvrissement en soufre-34 si elle se fait par voie biologique. Pour l'oxygène-18, la signature dépend de la part d'oxygène de l'eau, et d'oxygène de l'atmosphère et du fractionnement qui accompagne l'incorporation de l'oxygène atmosphérique.

La composition isotopique des sulfates permet de contraindre l'origine des sulfates dissous, le mélange des eaux de plusieurs niveaux aquifères (Dogramaci et al., 2001; Berner et al., 2002), et de caractériser l'écoulement des eaux souterraines (Lee and Krothe, 2003).

5.1.5. Les isotopes du strontium

Le rapport isotopique du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) d'un fluide est directement relié à celui du minéral ou à des associations minéralogiques avec lesquelles le fluide a interagi. Les effets de fractionnements isotopiques liés à la différence de masse ne sont pas détectables pour des éléments dont la masse est proche de 80. De plus, les effets de variations du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ liés à la décroissance radioactive du nucléide père (^{87}Rb) en nucléide fils (^{87}Sr) ne sont pas significatifs, compte tenu de la courte échelle de temps à laquelle ces processus sont étudiés en géochimie environnementale par rapport à la période de décroissance du rubidium.

Dans le cadre de l'étude des circulations de fluides, la nature a directement marqué ceux-ci. Dans une roche silicatée (granite...) les différents minéraux présentent des rapports chimiques Rb/Sr et donc des rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ différents en liaison avec leur formation. Lors des phénomènes d'interaction eau-roche, le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de la fraction de strontium libéré sera différent de la roche totale et typique du ou des minéraux altérés et ceci en liaison avec la "résistance" des minéraux vis-à-vis de l'agressivité du fluide. Globalement, le strontium solubilisé dans la roche et transporté vers l'extérieur du système formé par la roche est beaucoup moins radiogénique (c'est-à-dire de rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ plus faible) que le strontium dans la roche non altérée ; d'autre part, le strontium des argiles résiduelles est beaucoup plus élevé. Les variations isotopiques observées dans les fluides peuvent être issues du mélange de strontium de compositions isotopiques différentes provenant de différentes sources. Ainsi, dans le cas simple où deux sources de rapport isotopique ou chimique différents sont présentes, la composition du mélange peut être déterminée.

Les variations du rapport isotopique du strontium dans un hydrosystème donnent ainsi des informations sur (1) l'origine et les proportions de mélange des différents composants fluides ainsi que sur (2) la nature et l'intensité des processus d'interaction roche - eau liés notamment à l'altération et à l'érosion.

5.1.6. Les isotopes du plomb

Le plomb est un élément chimique présent en trace dans la quasi totalité des roches terrestres. Sa teneur moyenne dans la croûte continentale est couramment estimée à quelques 20 ppm ($\mu\text{g/g}$). Selon les roches, ces teneurs varient entre quelques ppm (calcaires) et environ 50 ppm (schistes noirs). C'est un élément qui possède un fort caractère chalcophile (affinité avec le soufre), c'est pourquoi dans les gisements, le Pb

apparaît principalement sous forme de sulfure (Galène, PbS). On le trouve également, mais dans une moindre mesure, en association avec des carbonates (Céruosite, PbCO₃) ou des sulfates (Anglésite, PbSO₄). Le plomb a 4 isotopes stables : ²⁰⁸Pb, ²⁰⁷Pb, ²⁰⁶Pb et ²⁰⁴Pb. Les isotopes 208, 207 et 206 sont dits radiogéniques car ils sont respectivement issus de la désintégration radioactive du ²³²Th, ²³⁵U et ²³⁸U. Le ²⁰⁴Pb, qui est utilisé pour la normalisation, est non radiogénique.

L'utilisation de ces désintégrations au travers des variabilités isotopiques permet de développer le concept de traceur isotopique. Les isotopes stables du plomb permettent une identification des différentes sources de Pb anthropogénique (essence, industries, aérosols, agriculture...). Les compositions isotopiques du plomb dépendent des concentrations originelles en Pb, U et Th et de l'âge de la formation géologique émettrice; la gamme de variations dans les compositions isotopiques des différentes sources géologiques est importante. Le plomb dispersé dans l'atmosphère par différents processus (incinération, combustion...) garde la composition isotopique du minerai dont il dérive. Ceci permet d'utiliser les isotopes du plomb pour discriminer les différentes sources de plomb, principalement anthropogéniques. La mesure des compositions isotopiques du Pb des eaux de consommation permet d'identifier les origines du Pb libéré. On peut ainsi montrer des relations directes entre le Pb des tuyaux et celui recueilli dans les eaux des robinets. Les rapports isotopiques du plomb mesurés dans les eaux peuvent renseigner sur l'origine du plomb, en particulier sur les zones d'émissions.

Les analyses des isotopes du plomb sur la première campagne de mai 2006 sont en cours de réalisation, les résultats ne sont donc pas présentés dans le présent rapport.

5.2. PREMIERS RESULTATS DE L'APPROCHE ISOTOPIQUE

A la fin novembre 2006 seules les analyses isotopiques en $\delta^7\text{Li}$, $\delta^{11}\text{B}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et $\delta^{34}\text{S}$ ont été réalisées pour la campagne du printemps 2006. Cette partie présente les premiers résultats obtenus sur ces systèmes isotopiques en s'appuyant sur un croisement simple entre signature isotopique et concentration élémentaire associée.

5.2.1. Les isotopes du lithium ($\delta^7\text{Li}$)

Pour l'ensemble des eaux souterraines échantillonnées, les teneurs en lithium sont très variables, comprises entre quelques dizaines de $\mu\text{g/l}$ et 250 $\mu\text{g/l}$ environ pour les eaux les plus concentrées (SIM-7 (N° BSS : 09838B0203), 8 et 13). Ces eaux ont des compositions isotopiques en lithium qui varient de +6,8‰ à +27,9 ‰, respectivement pour EM-2 (N° BSS : 08308X0018) et SIM-6 (N° BSS : 09307X0131) (Illustration 55). Cette gamme de valeurs est comprise dans celle documentée pour les eaux souterraines dans la littérature (Tomascak et al., 1995, 1999, Tomascak and Banner, 1998 ; Hogan and Blum, 2003 ; Tomascak et al., 2003). Par ailleurs, il n'existe pas de relation simple et directe entre la composition isotopique et la concentration en lithium (Illustration 55). La gamme de variation isotopique décrite par les eaux souterraines

(supérieure à 20 unités delta) est couverte aussi bien à basse, à moyenne qu'à haute teneur en lithium.

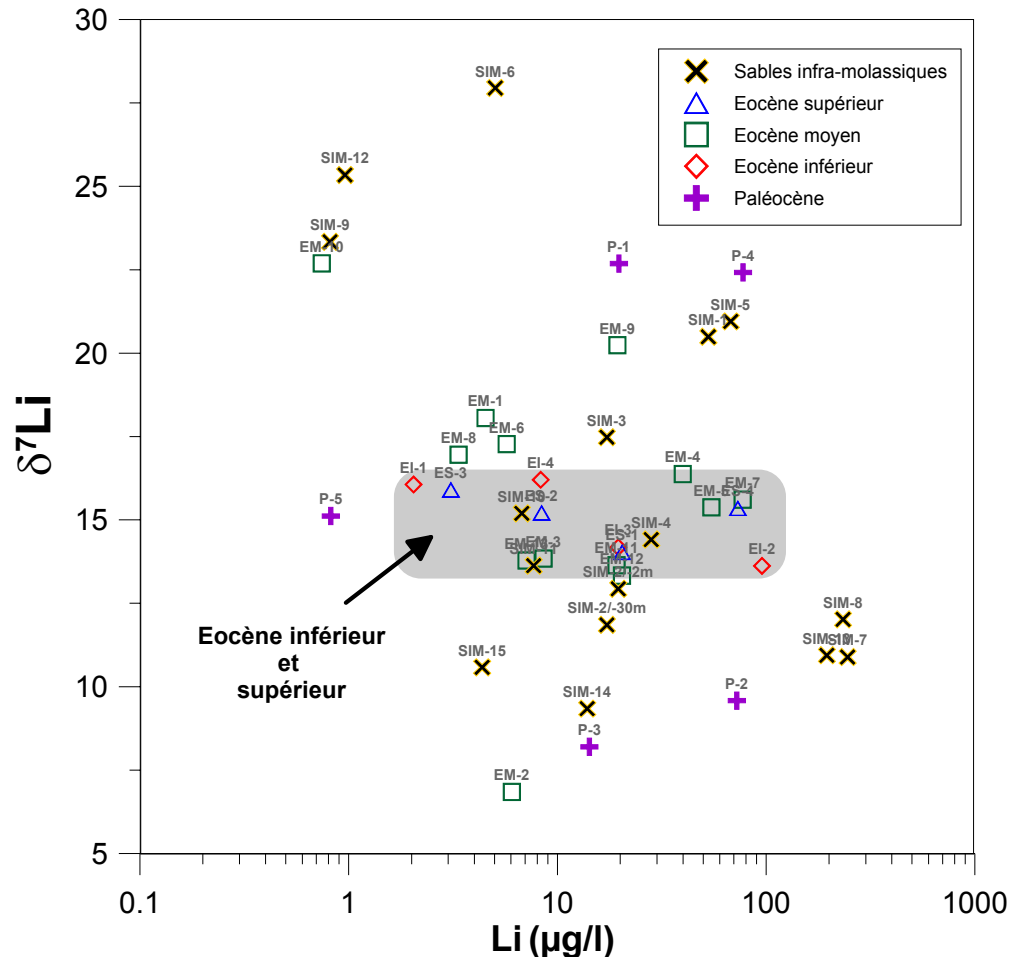


Illustration 55 : Relation entre la composition isotopique du lithium ($\delta^7\text{Li}$ en ‰) et la concentration en Li ($\mu\text{g/l}$). L'erreur analytique sur le $\delta^7\text{Li}$ est de ± 0.5 ‰. (P = Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)

Les eaux de l'aquifère de l'Eocène inférieur ont des valeurs $\delta^7\text{Li}$ comprises entre 13,6‰ à 16,2‰, respectivement pour EI-2 (N° BSS : 09545X0005) et EI-4 (N° BSS : 10121X0013) ; pour l'Eocène supérieur, les compositions isotopiques sont comprises entre 14,0‰ et 15,9‰, respectivement pour ES-1 (N° BSS : 08535X0020) et ES-3 (N° BSS : 07542X0001). Bien que les points de prélèvement des aquifères de l'Eocène inférieur et supérieur soient répartis sur l'ensemble du bassin Adour-Garonne, la gamme de composition isotopique en Li décrite est faible (environ 3 unités delta) pour des concentrations très variables en Li (1 à 100 $\mu\text{g/l}$). En revanche les gammes de valeurs $\delta^7\text{Li}$ décrites par les aquifères du Paléocène (8,2‰ à 22,7‰, respectivement P-3 (N° BSS : 10078X0001) et P-1, N° BSS : 09764X0005), de l'Eocène moyen (6,8‰ à 20,2‰, respectivement EM-2 (N° BSS : 08308X0018) et EM-9 (N° BSS :

08764X0005) et des Sables infra-molassiques (9,3‰ à 25,3‰, respectivement SIM-14 (N° BSS : 09536X0008) et SIM-6 (N° BSS : 09307X0131)) sont supérieures à 13 unités delta bien que l'étendue spatiale des points de prélèvement soit plus limitée que celle des aquifères de L'Eocène inférieur et supérieur.

Sur la base de la connaissance acquise grâce aux traceurs des processus d'interaction eau-roche, étudiés dans le cadre de cette étude, la forte variabilité de composition isotopique en Li sera discutée. L'objectif étant de mieux contraindre le rôle joué par la composante « source » (réservoir) et la composante « processus » (interaction) dans l'acquisition d'une signature isotopique en Li particulière. La forte variabilité observée pour les valeurs $\delta^7\text{Li}$ des eaux souterraines prélevées lors de la campagne CARISMEAU du printemps 2006 est donc très encourageante pour tester les potentialités du Li en tant que nouveau traceur en hydrogéochimie.

5.2.2. Les isotopes du soufre et de l'oxygène des sulfates

Les concentrations en sulfates mesurées pour la campagne du printemps 2006 sont très variables, de 0,41 µg/l pour P-3 (N° BSS : 10078X0001) jusqu'à 961 µg/l pour SIM-8 (N° BSS : 10098A0004). La composition isotopique $\delta^{34}\text{S}$ des sulfates dissous présente également une gamme de variation très large, de 1,3‰ pour SIM-4 (N° BSS : 10122X0055) à 40‰ pour SIM-1 (N° BSS : 09293X0123). Les disparités observées concernent tous les niveaux aquifères considérés (Paléocène, Eocène et Sables infra-molassique), quelque soit la localisation géographique du point de prélèvement (Illustration 56). Chery et al. (1998) reporte également une forte variabilité de composition isotopique $\delta^{34}\text{S}$ (10,8 à 39,8‰) pour les aquifères Paléocène, Eocène et Sables infra-molassique du Bas-Adour, sans pouvoir dégager une systématique propre à chaque niveau aquifère.

Les eaux souterraines présentant des concentrations supérieures à 100 µg/l ont des valeurs de $\delta^{34}\text{S}$ comprises entre 12,6‰ pour SIM-7 (N° BSS : 09838B0203) et 31,3‰ pour SIM-8 (N° BSS : 10098A0004). Les fortes concentrations mesurées suggèrent la mise en solution de niveaux évaporitiques présents dans les horizons associés aux systèmes aquifères considérés. En effet les coupes de forages des points de prélèvements SIM-7 et SIM-8 mettent en évidence la présence de gypse et d'anhydrite dans les sables infra-molassiques (Illustration 18 ; Roche, 1970). La valeur de $\delta^{34}\text{S}$ (12,6‰) mesurée pour SIM-7 est compatible avec la composition isotopique d'échantillons de gypse provenant du toit de l'aquifère des sables infra-molassique de composition isotopique moyenne $12,72 \pm 1,20$ ‰ CDT (André, 2002). Les valeurs de $\delta^{34}\text{S}$ mesurée pour P-1 (N° BSS : 09764X0005), EM-4 (N° BSS : 07796X0110), 5 et 7 (14,7 à 20,3‰) sont compatibles avec la signature des évaporite documentées dans la littérature pour le Paléocène et l'Eocène (17 à 22‰ ; Claypool et al., 1980). Par rapport à cette gamme, les valeurs $\delta^{34}\text{S}$ supérieures à 25‰ mesurées pour P-2 (N° BSS : 10052X0038) et 4, EM-3 (N° BSS : 07547X0068) et 10, SIM-1, 3 et 8 suggèrent fortement un fractionnement des isotopes du soufre lié à une réduction bactérienne des sulfates dissous de ces eaux souterraines (Nriagu, 1991 ; Bottrell et al., 2000 ; Berner et al., 2002). André (2002) a également mesuré des valeurs $\delta^{34}\text{S}$ très élevées

(33,2‰ et 35,8‰) pour les sables infra-molassiques prélevés à proximité de Geaune (40), ces signatures sont attribuées à une réduction bactérienne. Sur les forages où les diagraphies ont été réalisées, en raison de la grande profondeur des ouvrages et de l'absence de pompage régulier des eaux, le renouvellement complet de la colonne d'eau n'a pas été assuré. Pour ces forages, il est possible que la réduction bactérienne des sulfates dissous, qui justifie les valeurs $\delta^{34}\text{S}$ supérieures à 25‰ pour les eaux souterraines, soit favorisée par le faible renouvellement de l'eau au sein de ces forages.

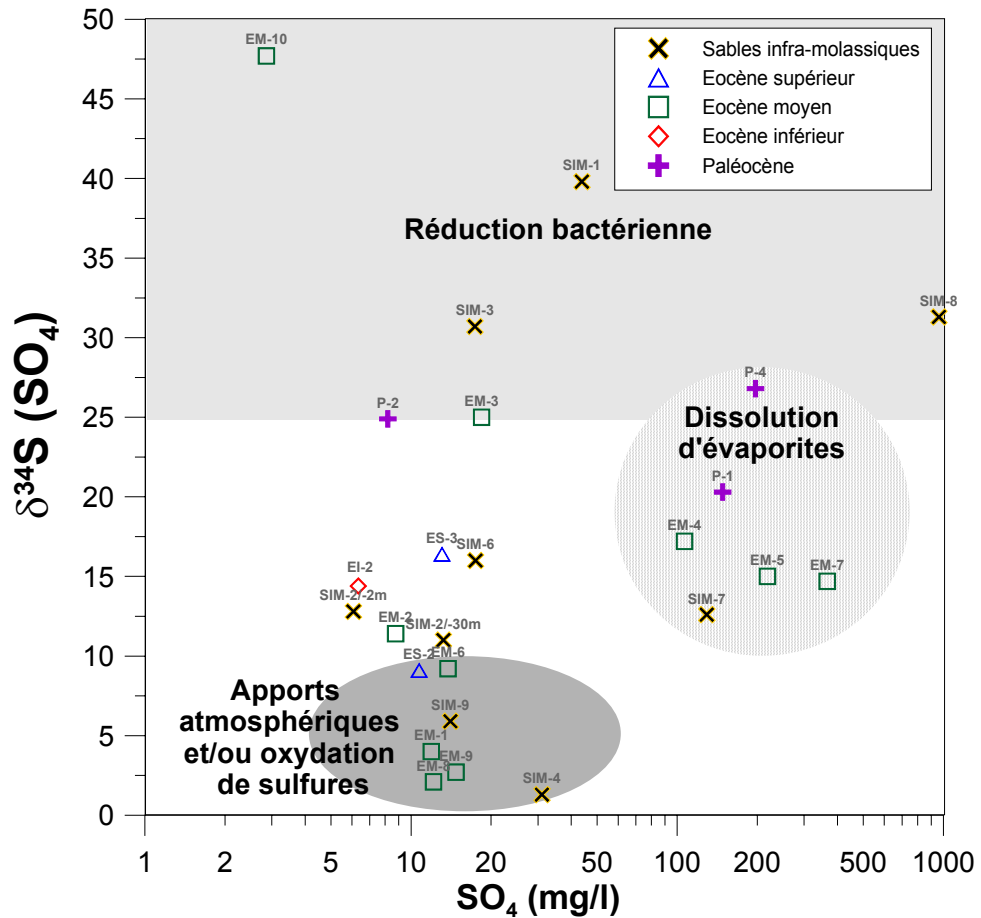


Illustration 56: Relation entre la composition isotopique en soufre des sulfates ($\delta^{34}\text{S}$ en ‰) et la concentration en sulfates (mg/l). L'erreur analytique sur le $\delta^{34}\text{S}$ est de ± 0.2 ‰. (P = Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)

Les points de prélèvement présentant des concentrations en sulfates inférieures à 31 $\mu\text{g/l}$ et une signature isotopique $\delta^{34}\text{S}$ inférieures à 10‰ (Illustration 56) suggèrent l'existence d'autres sources de sulfates dissous que la dissolution d'évaporites. Compte tenu des faibles concentrations en sulfates mesurées, il est possible que les apports atmosphériques constituent une source significative. Bien que la composition isotopique $\delta^{34}\text{S}$ des eaux de pluie n'ait pas été caractérisée localement, la gamme

observée pour les eaux souterraines (1,3 à 10‰) est compatible avec les valeurs documentées dans la littérature pour les apports atmosphériques (Nriagu and Coker, 1978 ; Thode, 1991 ; Buzek et al., 1991 ; Ohizumi et al., 1997 ; Panettiere et al., 2000 ; Querol et al., 2000). André (2002) a mesuré une composition isotopique de 4,9‰ pour SIM-9 (N° BSS : 10306X0035) contre 5,9‰ pour la campagne CARISMEAU du printemps 2006, la valeur mesurée par l'auteur est attribuée aux apports atmosphériques. Par ailleurs, la présence de pyrites dans les formations sédimentaires associées aux niveaux aquifères a été mise en évidence, notamment sur la coupe du forage SIM-7 (N° BSS : 09838B0203) (Roche, 1970). La gamme attendue de valeurs $\delta^{34}\text{S}$ pour les sulfures d'origine sédimentaire est comprise entre -50 et 10‰ dans la littérature (Thode, 1991). Ainsi l'oxydation de pyrites est une autre source possible de sulfates qui permet d'expliquer les valeurs $\delta^{34}\text{S}$ observées pour les eaux souterraines (1,3 à 10‰). Cette explication a également été formulée par André (2002) pour rendre compte des valeurs $\delta^{34}\text{S}$ comprises entre -20,1‰ et -0,4‰ pour l'aquifère des sables infra-molassiques dans la région de Mont-de-Marsan.

5.2.3. Les isotopes du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)

Les rapports isotopiques du strontium présentent une variabilité très importante à l'échelle de la zone d'étude (Illustration 57), ils sont compris entre 0.7076 (EI-2, N° BSS : 09545X0005) et 0.71185 (SIM-4, N° BSS : 10122X0055) pour des teneurs en Sr allant de 156 $\mu\text{g/l}$ (ES-3, N° BSS : 07542X0001) à 3419 $\mu\text{g/l}$ (EI-2). D'une manière générale, tous les échantillons se répartissent au sein d'un triangle dont les pôles sont caractérisés par (1) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ faible et teneur en Sr faible, (2) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ élevé et teneur en Sr faible et (3) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ faible et teneur en Sr élevée.

Les très fortes variations à la fois des signatures isotopiques et des teneurs en Sr s'observent à la fois entre les différents niveaux aquifères étudiés, mais aussi au sein d'un même niveau.

On note l'extrême variabilité observée au sein des SIM dont les valeurs couvrent pratiquement l'intégralité de la gamme décrite. Le point le plus radiogénique ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ le plus élevé) est SIM-4 (N° BSS : 10122X0055), il est issu de la bordure Est des formations infra-molassiques dans la région de Castres. A cet endroit, les SIM sont composées d'argiles à graviers qui contiennent des éléments de roches cristallines et des schistes anciens, qui peuvent expliquer un rapport isotopique de 0.71185. De même, l'échantillon SIM-1 (N° BSS : 09293X0123), situé plus au nord, est issu des faciès sidérolithiques des SIM, il présente aussi une signature $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ élevée (~0.7115) qui est compatible avec les valeurs des pisolites de fer dans la région de Bourges provenant de l'altération sidérolithique du massif central (Casanova et al., 2001a et 2001b).

Les teneurs les plus élevées en Sr sont observées pour les échantillons EM-7 (N° BSS : 08281X0020) et EI-2 (N° BSS : 09545X0005) avec des concentrations supérieures à 3 mg/l . Ces deux échantillons présentent les rapports isotopiques en Sr parmi les plus faibles observés. De telles teneurs en Sr associées à des rapports

isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ autour de 0.708 sont compatibles avec une dissolution d'évaporites d'âge Eocène (Koepnick et al., 1985). L'échantillon EM-7 (N° BSS : 08281X0020) présente aussi une forte teneur en sulfate avec une signature isotopique qui laisse aussi à penser à de la dissolution d'évaporites de type gypse.

Le troisième pôle est caractérisé par un $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ d'environ 0.708 et une teneur en Sr faible. A proximité de ce pôle, on trouve des échantillons de tous les niveaux aquifères étudiés sans pour autant pouvoir identifier une organisation spatiale ni stratigraphique des échantillons.

En première approximation, les isotopes du Sr révèlent donc une extrême variabilité des signatures, traduisant une grande hétérogénéité entre les aquifères étudiés mais aussi au sein d'une même formation aquifère.

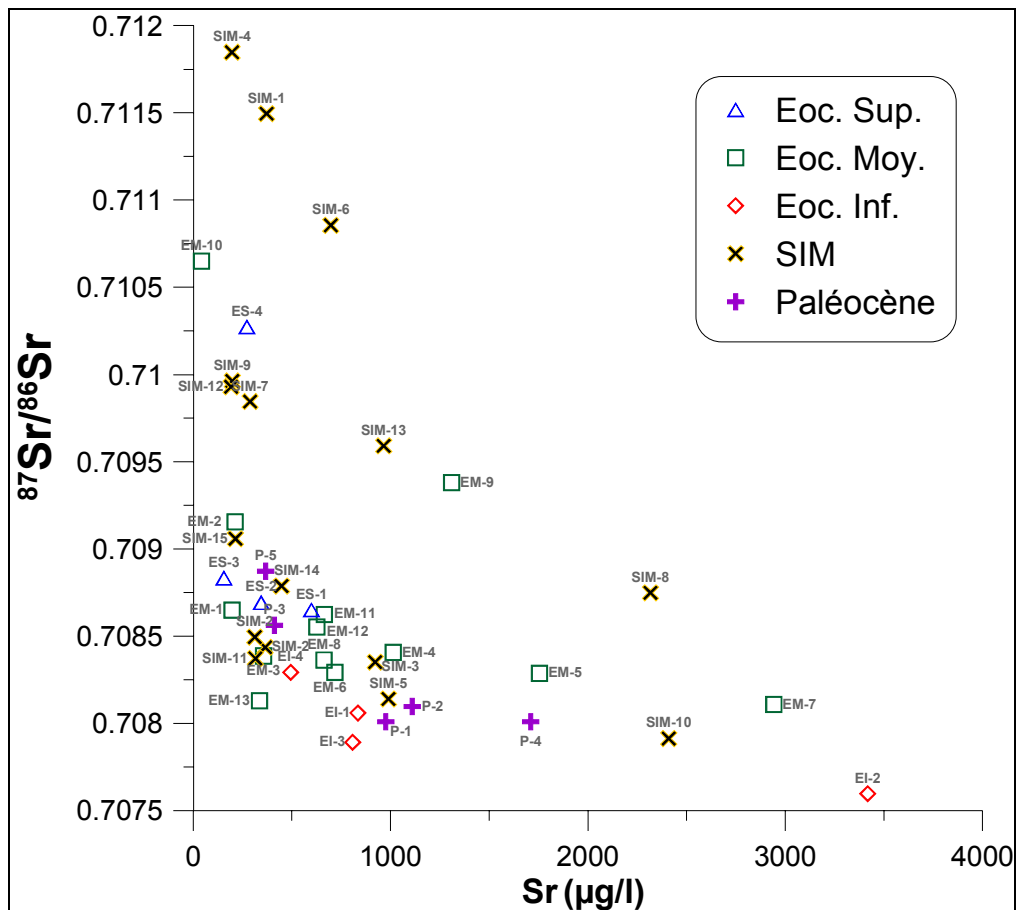


Illustration 57 : Rapport isotopique du Sr en fonction de la teneur en Sr dans les différents aquifères, campagne de mai 2006 (P = Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)

5.2.4. Les isotopes du bore ($\delta^{11}\text{B}$)

Les teneurs en bore varient entre 10 $\mu\text{g/l}$ (EM-2, N° BSS : 08308X0018 et SIM-15, N° BSS : 09788X0004) et 2550 $\mu\text{g/l}$ (SIM-8, N° BSS : 10098A0004) pour des rapports isotopiques $\delta^{11}\text{B}$ compris entre -18‰ (EI-1, N° BSS : 07804X0001) et 36.02‰ (SIM-9, N° BSS : 10306X0035) (Illustration 58). Ces variations isotopiques couvrent une très grande partie de la gamme de variation connue des isotopes du Bore.

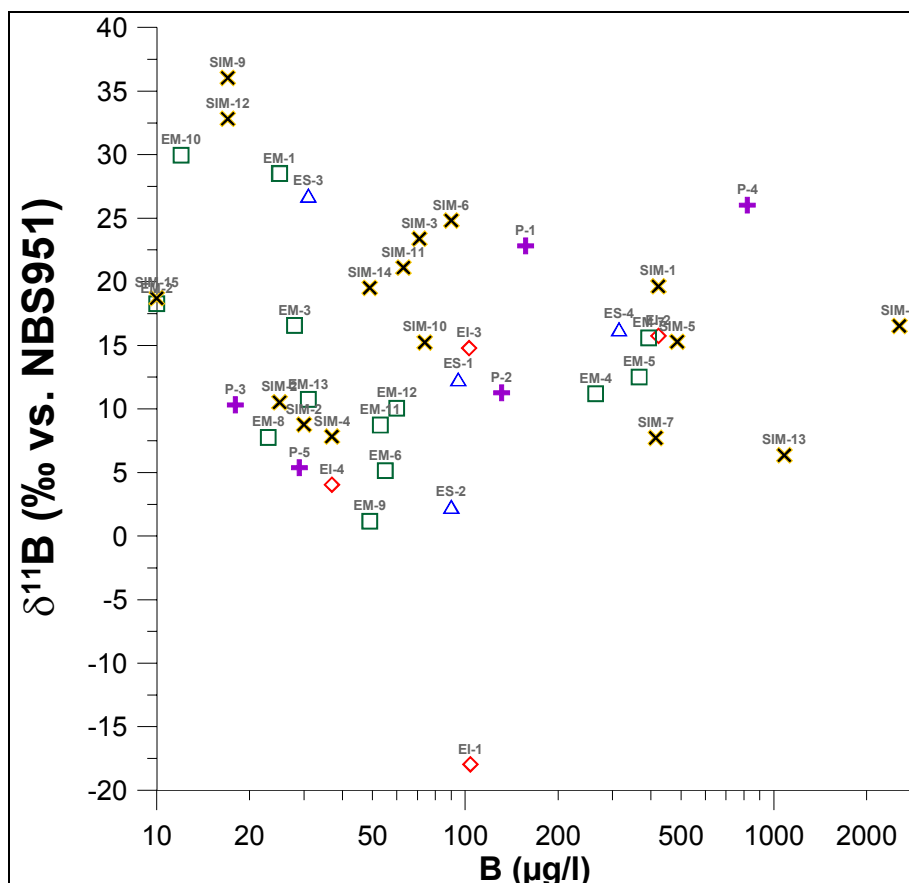


Illustration 58 : Rapport isotopique du bore en fonction de la teneur en bore dans les différents aquifères, campagne de mai 2006 (P = Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)

Un point s'individualise de façon notable, il s'agit de EI-1 (N° BSS : 07804X0001) issu de l'Eocène inférieur au nord de la zone d'étude. Sa signature $\delta^{11}\text{B}$ est de -18‰, valeur la plus faible mesurée à ce jour dans un aquifère en France. L'analyse a été tripliquée de façon à certifier la valeur analytique. Les rapport $\delta^{11}\text{B}$ les plus faibles connus en France sont celles des eaux alcalines des Pyrénées issues des granites (Mossadik, 1997) mesurées à -10‰ (Casanova et al., 2002). Des valeurs très négatives des rapports $\delta^{11}\text{B}$ sont en générales liées à de la désorption de bore depuis des formations argileuses. Des valeurs entre -10 et -15‰ ont été mesurées dans l'aquifère de Cornia en Toscane (Pennisi et al. 2006). On notera que les autres échantillons issus de la

même formation de l'Eocène inférieur, avec un fort taux d'argiles, ne présentent pas ce fractionnement isotopique conduisant à des valeurs de $\delta^{11}\text{B}$ très négatives.

La valeur la plus élevée mesurée dans la zone d'étude est proche de la valeur de l'eau de mer qui présente une valeur homogène à l'échelle du globe à 39.5 ‰. Les deux échantillons présentant les valeurs isotopiques les plus élevées sont issus des SIM (SIM-9 (N° BSS : 10306X0035) et SIM-12 (N° BSS : 10306X0034)) et ont été prélevés au niveau de la commune de Bordes dans la région de Pau. Ces valeurs proches de l'eau de mer pourraient être acquises par l'apport d'embrun marin via les pluies. De plus, les rapports isotopiques du Sr sont de l'ordre de 0.710, ce qui correspond aux valeurs mesurées dans des eaux de pluies de la région de Dax (Négrel, données non publiées).

Les teneurs en bore les plus élevées se situent dans les SIM sur la bordure est de la zone d'étude (SIM-13, N° BSS : 09857X0104) et au niveau de Toulouse (SIM-8, N° BSS : 10098A0004). L'échantillon SIM-4 (N° BSS : 10122X0055), situé à proximité de SIM-13 présente quant à lui une teneur en bore beaucoup plus faible avec une signature $\delta^{11}\text{B}$ de 3‰ compatible avec les éléments de roches cristallines contenues dans les argiles à graviers de la région de Castres.

6. Descriptif de la seconde campagne de prélèvements : octobre 2006

Du 16 au 26 octobre 2006, 41 points de la première campagne ont été à nouveau échantillonnés (Illustration 59) pour analyses chimiques, élémentaires (éléments majeurs et traces) et isotopiques (isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène de l'eau, du soufre et de l'oxygène des sulfates, isotopes du strontium, isotopes du bore et du lithium). Sur 7 de ces points, des diagraphies ont été réalisées (Illustration 60).

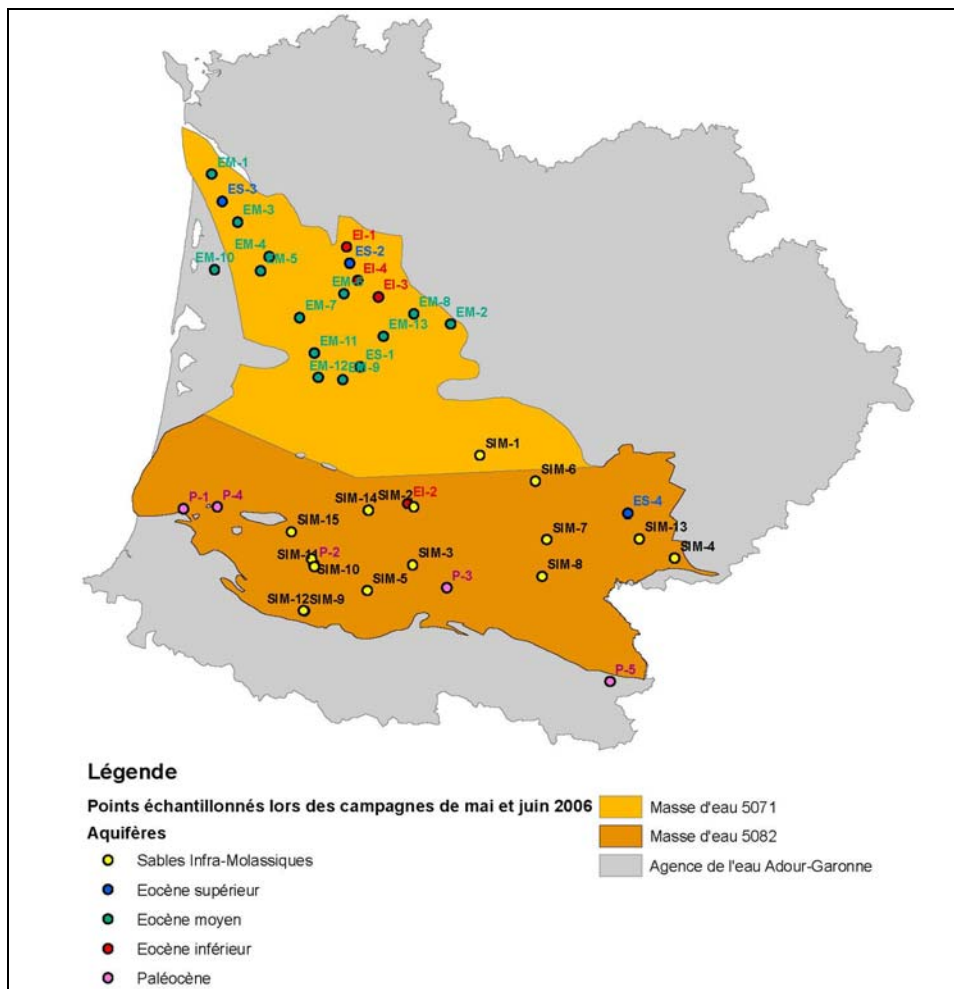


Illustration 59 : Carte de localisation des points d'échantillonnage de la seconde campagne de prélèvements (octobre 2006) (P = Paléocène, EM = Eocène moyen, EI = Eocène inférieur, ES = Eocène Supérieur, SIM = Sables Infra-Molassiques)

Le point EM-10 a été éliminé de la campagne d'automne 2006, en effet comme détaillé précédemment les eaux de ce forage ne correspondent pas aux systèmes aquifères considérés dans le cadre de cette étude. Ce point a été remplacé par un autre ouvrage voisin atteignant l'aquifère de l'Eocène moyen.

Les analyses chimiques élémentaires et isotopiques sont actuellement en cours et devraient s'achever, dans le courant du mois de janvier 2007.

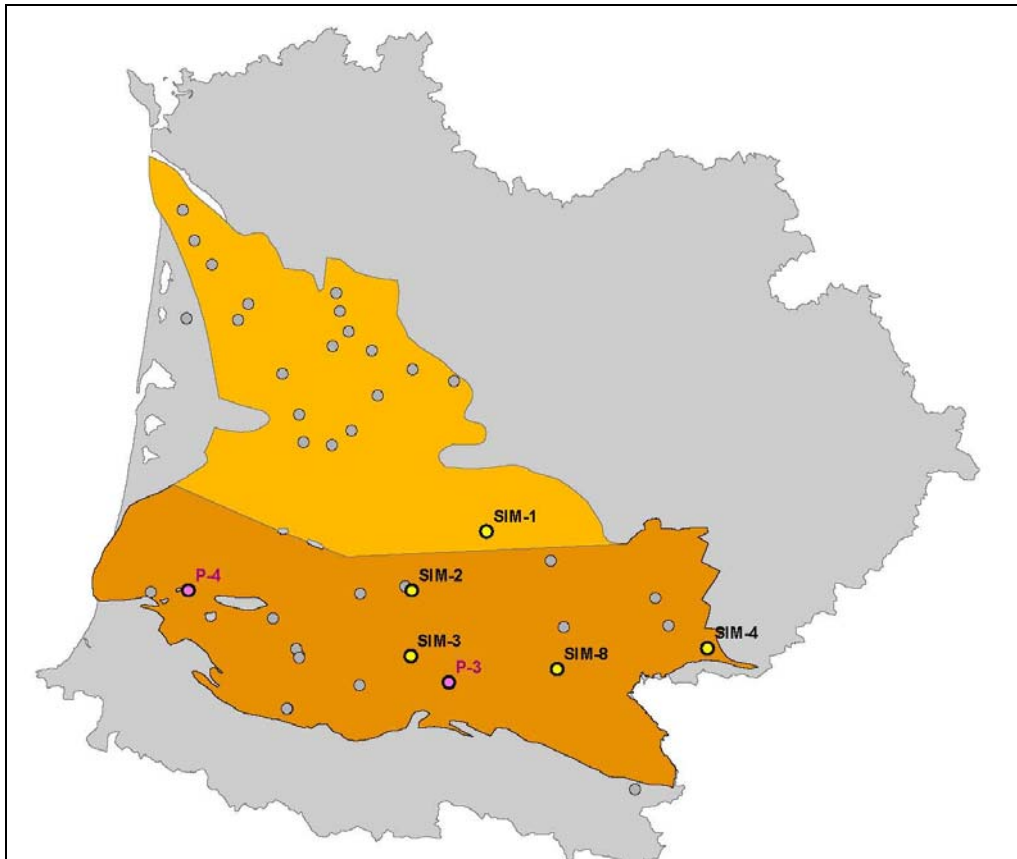


Illustration 60 : Carte de localisation des diagraphies réalisées lors de la seconde campagne de prélèvements (octobre 2006). Légende identique à l'illustration 59

7. Communication

7.1. LE SITE WEB DU PROJET CARISMEAU

En parallèle à des présentations scientifiques via les communications à Congrès (nationaux et internationaux) et les articles scientifiques proposés à des revues de rang 'A' (en langue anglaise), les résultats du projet sont valorisés afin d'être diffusés auprès d'un public très ouvert : du professionnel au citoyen utilisateur de la ressource en eau.

Pour ce faire, on s'appuie notamment sur un site WEB développé spécifiquement. Sur ce site (en français), figurent les objectifs du projet, les moyens mis en œuvre, et figureront les résultats, les préconisations pour une démarche élargie à l'ensemble des masses d'eau du Bassin, puis à l'ensemble du territoire français.

Il dispose d'une adresse spécifique (<http://carismeau.brgm.fr>) mais sera également adressable depuis les sites de l'Agence de l'Eau, du BRGM, ainsi qu'à partir des SIGES d'Aquitaine, de Midi-Pyrénées et de Poitou-Charentes.

La structure du site web est représentée dans l'illustration 61.

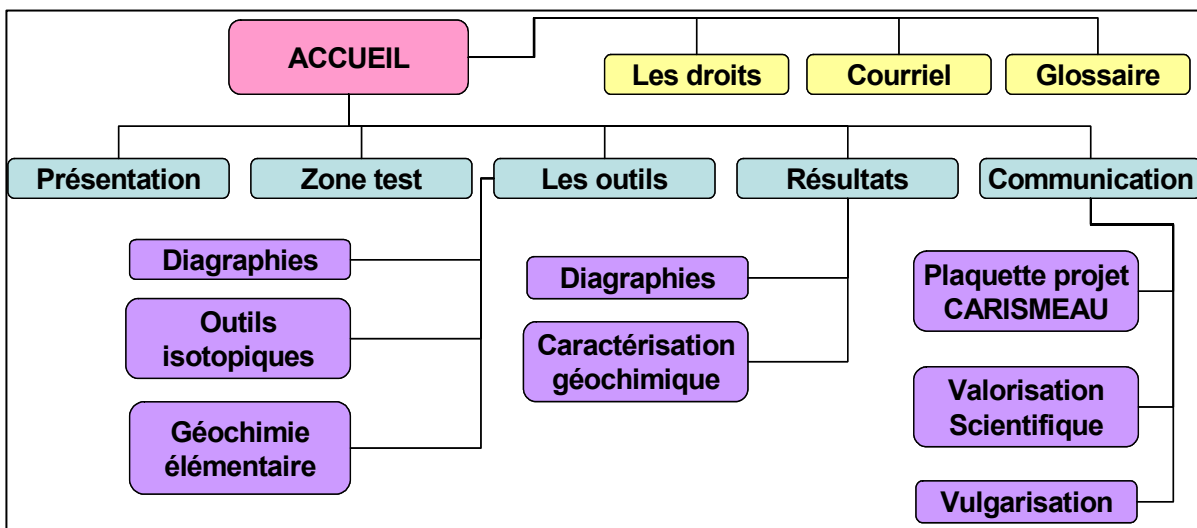


Illustration 61 : Structure du site web CARISMEAU (<http://carismeau.brgm.fr>)

Les figures de l'illustration 62 montrent l'ergonomie générale du site web avec les exemples de la page d'accueil et du haut de la page communication.

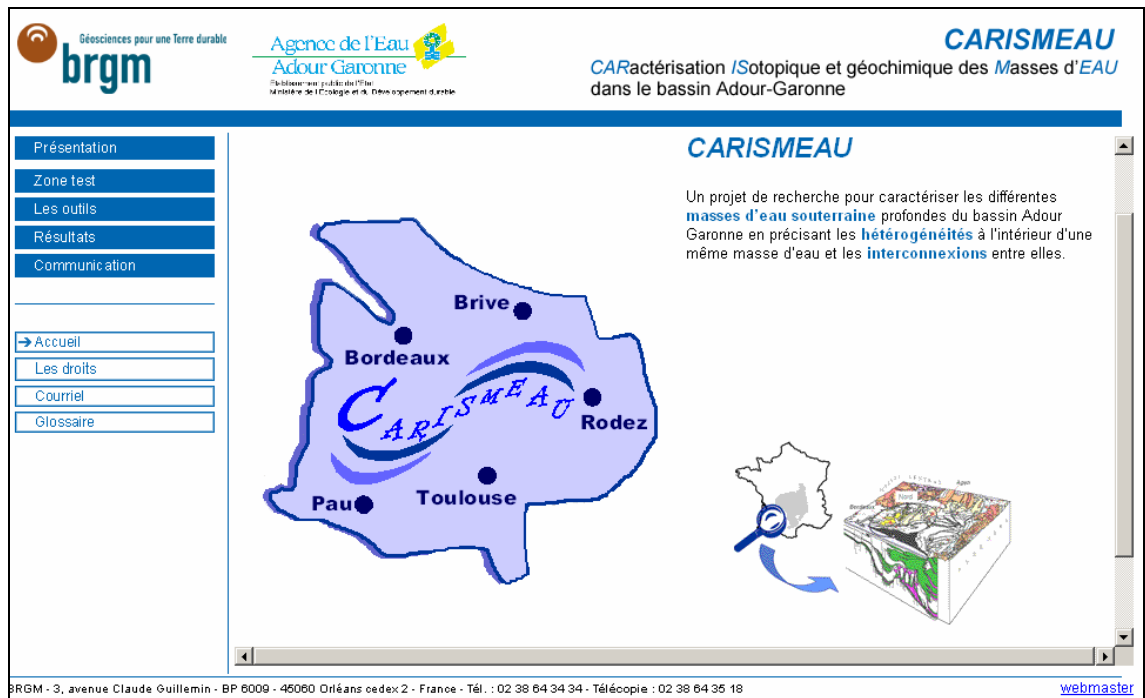


Illustration 62 : Capture d'écran du site web, page d'accueil et communication

7.2. VALORISATION SCIENTIFIQUE

7.2.1. Valorisation au cours de la première année du projet (2006)

Le projet CARISMEAU a fait l'objet de deux valorisations scientifiques lors de la première année du programme :

- le **Colloque International de l'AIH** à Dijon en mai 2006 :



- la **Groundwater Conference** à Vienne en juin 2006



Les résumés ainsi que les posters présentés sont téléchargeables à partir du site web du projet : <http://carismeau.brgm.fr>

7.2.2. Valorisation au cours de la seconde année du projet (2007)

Deux valorisations scientifiques sont dès à présent prévues pour l'année 2007 :

- l'International Symposium on Advances in Isotope Hydrology and its Role in Sustainable Water Resources Management à Vienne en mai 2007



International Symposium on Advances in Isotope Hydrology and its Role in Sustainable Water Resources Management (IHS-2007)

21 – 25 May 2007
Vienna, Austria

- Water Status Monitoring under the WFD (Water Framework Directive) Conference à Lille en mars 2007



Water Status Monitoring under the WFD
(Water Framework Directive) Conference

12-14 March 2007

Le Nouveau Siècle, Lille, France

8. Conclusion

Le projet Carismeau est un projet de recherche ayant pour objectif de caractériser les différentes masses d'eau **souterraine profondes** du bassin Adour Garonne en précisant les hétérogénéités à l'intérieur d'une même masse d'eau et les interconnexions susceptibles d'exister. La nappe des Sables infra-molassiques, contenue essentiellement dans les **masses d'eau 5082** « Sables, calcaires et dolomies de l'Eocène-Paléocène captif du sud du bassin Adour-Garonne » et **5071** « Sables, graviers, galets et calcaires de l'Eocène nord du bassin Adour-Garonne », ainsi que les aquifères du Paléocène et de l'Eocène constituent une part importante des ressources en eau exploitées sur le secteur. Ainsi la connaissance des fonctionnements hydrogéologiques et hydrogéochimiques de ces niveaux aquifères, qui ne sont que partiellement compris, présente une motivation forte dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau.

Ce rapport présente l'avancée des travaux à la fin 2006, au terme de la première année de cette étude :

La synthèse bibliographique des connaissances hydrogéologiques et chimiques sur les aquifères considérés a permis de faire état de la dynamique, de la composition minéralogique ainsi que des variabilités chimiques des eaux connues pour ces niveaux aquifères.

Les diagraphies physico-chimiques des eaux souterraines réalisées sur 8 forages lors de la campagne du printemps 2006 visaient à mettre en évidence d'éventuelles hétérogénéités latérales ou stratifications verticales des masses d'eau souterraine. Les résultats de ces diagraphies présentent des variations, principalement pour la conductivité qui varie d'un facteur 35. Cependant la difficulté d'interprétation des paramètres mesurés pour caractériser des éventuelles hétérogénéités au sein des masses d'eau est soulignée. En effet les diagraphies n'ont pas toujours été menées jusqu'au niveau optimum de la masse d'eau à étudier en raison de la trop grande profondeur et des perturbations liées à des infiltrations d'eau superficielles sont possibles. Ces remarques mettent en garde contre le risque de mesurer des paramètres non représentatifs de la masse d'eau souterraine considérée.

L'interprétation des données concernant la chimie des eaux et les premiers résultats des analyses isotopiques sur 42 points de prélèvement réalisés au printemps 2006 montrent une grande hétérogénéité au sein des niveaux aquifères. Les aquifères considérés présentent des signatures géochimiques contrastées allant d'eaux faiblement minéralisées à des eaux très minéralisées, ayant largement interagi avec des niveaux évaporitiques. Ces disparités ne peuvent être pour l'instant rattachées à des variabilités spatiales simples. L'analyse des échantillons de la deuxième campagne de prélèvement, réalisée en octobre 2006, et les analyses isotopiques

restantes pour la première campagne devraient s'achever courant du mois de janvier 2007 et permettront d'approfondir les interprétations engagées.

Le projet Carismeau a d'ors et déjà fait l'objet d'une valorisation scientifique lors du congrès 2006 de l'AIH à Dijon et la Groundwater Conference à Vienne fera l'objet de communications dans le cadre des futures conférences.

9. Bibliographie

André L. (2002).- Contribution de la géochimie à la connaissance des écoulements souterrains profonds – application à l'aquifère des Sables infra-molassiques du Bassin aquitain. – Thèse. – 204 pages, 6 annexes.

André L., Franceschi M., Atteia O. (2006).- Geochemical modelling in a regional deep aquifer and relations with groundwater flows. Aquitaine Basin, south-west of France.- colloque international – Gestion des grands aquifères – 30 mai- 1^{er} juin 2006, Dijon, France.

Armand C. (1994).- Etude géologique et hydrogéologique autour du site des Landes de Siougos (40). Phase II. Volet hydrogéologie. – Rapport BRGM N1451 BOR 4S 94.- 60 pages, 71 figures, 2 annexes, 0 planches.

Astie H. et Chamayou J. (1977).- La nappe Eocène dans la région économique Aquitaine – Les eaux souterraines et l'approvisionnement en eau de la France – BRGM – Colloque National, 27/28 oct 1977, 59-72

Bel F., Bonnery H., Sourisseau B. (1994).- Aquifère des sables infra-molassiques en régions Aquitaine et Midi-Pyrénées. Etat des connaissances et suivi piézométrique fin 1993.- Rapport BRGM R 38036 SGN SP 94.- 21 pages, 12 figures, 23 annexes, 3 planches.

Berner E.K. and Berner R.A. (1987).- The Global water cycle. Geochemistry and environment.- Prentice-Hall.- 397 pages.

Berner Z. A., Stüben D., Leosson M. A. and Klinge H. (2002).- S- and O-isotopic character of dissolved sulphate in the cover rock aquifers of a Zechstein salt dome. Applied Geochemistry 17, 1515-1528.

Bichot F. et Platel J.P. (1997). - Gestion des eaux souterraines en Aquitaine – Année 1 – Evaluation des ressources – Extension du modèle nord-aquitain : synthèse des données et concepts. Rapport BRGM R 39331, 25 p., 11 figures, 13 planches hors texte.

Blavoux B., Dray M., Fehri A., Olive P., Groning M., Sonntag C., Hauquin J.P., Pelissier G., Pouchan P. (1993).- Paleoclimatic and hydrodynamic approach to the Aquitaine basin deep aquifer (France) by means of environmental isotopes and noble gases.- Proceedings of International Symposium « Isotopes techniques in the study of past and current environmental changes in the atmosphere ». IAEA Vienna, 293-305.

Bonnery H., Gandolfi J.M., Mauroux B., Sourisseau B. (1997).- Aquifère des sables infra molassiques en régions Aquitaine et Midi-Pyrénées. Etat des connaissances et suivi piézométrique fin 1996.- Rapport BRGM R 39645.

Bottrell S.H., Moncaster S.J., Tellam J.H., Lloyd J.W., Fisher Q.J., Newton R.J. (2000).- Controls on bacterial sulphate reduction in a dual porosity aquifer system: the Lincolnshire Limestone aquifer, England. *Chemical Geology* 169, 461-470.

Bourgine B., Capdeville JP., Razin Ph., Sourisseau B., Vairon J., (1997).- Outil de gestion des systèmes aquifères du Sud du Bassin Adour-Garonne - Concept géologique et hydrogéologique, Rapport BRGM R 39538.

Bullen T.D., Senior L.A. (1992).- Lithogenic Sr and anthropogenic Li in an urbanized stream basin: isotopic tracers of surface-groundwater interaction. *EOS Trans, Am. Geophys. Union* 73, F130.

Buzek J., Cerny J. and Sramek A.G.(1991).- Sulphur isotope studies of atmospheric S and the corrosion of monuments in Praha, Czechoslovakia. In: Krouse, H.R, Grinenko V.A. (Eds.), *Stables Isotopes: Natural and Anthropogenic Sulphur in the environment*. SCOPE 43. Wiley, Chichester, 399-404.

Casanova J., Négrel Ph., Giot, D., Widory, D., Njitchoua, R. (2001a).- Signatures chimiques et isotopiques associées avec les ferricrètes, calcrètes et dépôts palustres dans la formation Eocène de Bourges. 8ème Congrès Français de Sédimentologie,, 12-14 novembre 2001, Orléans, 65-66.

Casanova, J., Négrel, Ph., Giot, D. (2001b).- Isotope signatures associated with ferricrusts, calcretes and palustrine deposits from the Early Eocene Bourges Formation, Central France. 4th International Symposium on Applied Isotope Geochemistry, June 2001, Menlo Park, California, USA, 97-99.

Casanova, J., Négrel, Ph., Petelet-Giraud, E., Kloppmann, W. (2002).- The evolution of boron isotopic signature of groundwaters through silicate weathering. 6th International Symposium on the Geochemistry of the Earth's Surface (GES), Honolulu (Hawaii, United States), May 20-24, Abstract Volume, 6, 7-12.

Chery L., Gadalia A., Conseil général des Landes, Gaz de France, Institut de géologique de Bordeaux III (1997).- Ressources thermo – minérales du Bas – Adour/ Synthèse géochimique et isotopique des eaux souterraines.- Rapport BRGM R39397.

Chery L. (1998).- Ressources thermominérales du Bas-Adour – Grille d'observation de la qualité des eaux (année 2) – Rapport BRGM R 40047. 56p.

Claypool G.E., Holser W.T., Kaplan I.R., Sakai H. and Zak I. (1980).- The age curve of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfates and their mutual interpretation. *Chemical Geology* 28, 199-260.

Corbier. P., Winckel. A., Mazurier. C., Mauroux. B., Platel. J.P., Benhammouda. S., Dufour. P., 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 final. BRGM/RP-53973-FR, 67p. 21 illustrations.

Dogramaci S.S., Herczeg A.L., Schiff S.L. and Bone Y. (2001).- Controls on $\delta^{34}\text{S}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of dissolved sulfate in aquifers of the Murray Basin, Australia and their use as indicators of flow processes. *Applied Geochemistry* 16, 475-488.

Eygun J.P., Bertrand J.Ph. (1988).- Modélisation de la nappe aquifère infra-molassique. Modèle mathématique. Calage de l'historique. Prévisionnel.- Rapport SNEA(P) EP/S/DEL/ECS JPE/N°88-7339.- 24 pages, 38 planches.

Gaillardet J., Dupre B., Allegre C.J. (1997).- Chemical and physical denudation in the Amazon river basin.- *Chemical Geology* 142, 141-173.

Gaillardet J., Dupre B., Louvat P., Allegre C.J. (1999).- Global silicate weathering and CO_2 consumption rates deduced from the chemistry of large rivers.- *Chemical Geology* 159, 3-30.

Gellenbeck D.J., Bullen T.D. (1991).- Isotopic characterization of strontium and lithium in potential sources of groundwater contamination in central Arizona. *ESO Trans, Am Geophys Union* 72, 178.

Hogan J.F. and Blum J.D. (2003).- Boron and lithium isotopes as groundwater tracers : a study at the Fresh Kills Landfill, Staten island, New York, USA. *Applied Geochemistry* 18, 615-627.

Housse B. et Maget Ph. (1977).- Potentiel géothermique du Bassin aquitain.- BRGM – SNEA ELF.- Compte rendu de fin de contrat d'une étude financée par la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique.- 167 pages, 4 annexes, 38 planches.

Koepnick, R.B., Burke, W.H., Denison, R.E., Hetherington, E.A., Nelson, H.F., Otto, J.B., and Waite, L.E. (1985).- Construction of the seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ curve for the Cenozoic and Cretaceous: Supporting data. *Chemical Geology (Isot. Geosci. Sect.)*, 58: 55-81.

Kuhn H. (1969). - La formation Infra-molassique dans la région Midi-Pyrénées : Partie Nord (Etude structurale et Hydrogéologique) – Thèse.- 183 pages.

Kuhn H., Roche J. (1969). – La nappe Infra-molassique dans la région Midi-Pyrénées 1 – Moissac, Rapport BRGM 69SGL035MPY.

Kuhn H., Maget P., Roche J. (1969). -La nappe Infra-molassique dans la région Midi-Pyrénées. Rapport synthétique.- Rapport BRGM 70 SGN 031 MPY.

Lachassagne P., Sourisseau B., Amraoui N., Izac J.L. (1998).- Outil de gestion des systèmes aquifères du Sud du Bassin Adour-Garonne. Recueil des données hydrogéologiques : informations disponibles au sein de la banque du Sous-Sol et synthèse bibliographique – Rapport R3994.1

Lee E. S. and Krothe N. C. (2003).- Delineating the karstic flow system in the upper Lost River drainage basin, south central Indiana: using sulphate and $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ as tracers. *Applied Geochemistry* 18, 145-153.

Maget Ph. (1969). - La formation Infra-Molassique dans la région Midi-Pyrénées : Partie Sud (Etude structurale et hydrogéologique) –Thèse– 242 pages.

Mauroux B. (1997).- Réseau de surveillance des niveaux de la qualité et des prélèvements – Inventaire des réseaux existants en Aquitaine Proposition pour la mise en place de réseaux en Dordogne et en Lot – et – Garonne. Rapport BRGM R 39330, 80 pages, 42 figures, 29 tableaux, 14 planches hors texte.

Meybeck M. (1984). Les fleuves et le cycle géochimique des éléments. PhD Thesis. Paris 6. 493 p.

Meybeck M. (1986).- Composition chimique des ruisseaux non pollués de France.- *Sciences Geologiques Bulletin* 39, 3-77.

Mossadik, H., 1997. Les isotopes du bore, traceurs naturels dans les eaux : mise au point de l'analyse en spectrométrie de masse à source solide et application à différents environnements. Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, France.

Moussie B. (1972).- Le système aquifère de l'Eocène moyen et supérieur du bassin nord-aquitain. Influence du cadre géologique sur les modalités de circulation. -Thèse- 100 pages.

Négre P., Allegre C.J., Dupre B., Lewin E. (1993).- Erosion sources determined by inversion of major and trace element ratios in river water: The Congo case.- *Earth Planetary Science Letters* 120, 59-76.

Nriagu J.O. and Coker R.D. (1978).- Isotopic composition of sulphur in precipitation within the Great Lakes Basin. *Tellus* 30, 367-375.

Nriagu J.O, Rees C.E., Mekhtiyeva V.L., Yu Lein A., Fritz P., Drimmie R.J., Pankina R.G., Robinson R.W., Krouse H.R. (1991).- Hydroshere – Groundwater. In: Krouse, H.R, Grinenko V.A. (Eds.), *Stables Isotopes: Natural and Anthropogenic Sulphur in the environment*. SCOPE 43. Wiley, Chichester, 229-242.

Ohizumi T. Fukuzaki N. and Kusakabe M. (1997).- Sulfur isotopic view on the sources of sulfur in atmospheric fallout along the coast of the sea of Japan. *Atmospheric Environment* 13, 1339-1348.

Panettièrè P., Cortecchi G., Dinelli E., Bencini A. and Guidi M. (2000).- Chemistry and sulfur isotopic composition of precipitation at Bologna, Italy. *Applied Geochemistry* 15, 1455-1467.

Parkhurst D.L., Appelo C.A.J. (1999).- User's guide to Phreeqc (version 2)- A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations.- *Water-Resources Investigations Report* 99-4259.

Pennisi, M., Bianchini, G., Muti, A., Kloppmann, W., Gonfiantini, R. (2006).- Behaviour of boron and strontium isotopes in groundwater-aquifer interactions in the Cornia Plain (Tuscany, Italy). *Applied Geochemistry* 21(7), 1169-1183.

Platel J.P. (1997).- Gestion des eaux souterraines en Aquitaine- Année 1 – Opération sectorielle. Relations entre l'estuaire de la Gironde et la nappe de l'Eocène. Rapport BRGM 39328.

Platel, JP., Pédron, N., Winkel, A., 2003. Gestion des eaux souterraines en région Aquitaine. 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. BRGM/RP-52514-FR, 113 p., 45 fig., 3 annexes.

Qi H.P., Coplen T.B., Wang Q.Z., Wang Y.H. (1997).- Unnatural isotopic composition of lithium reagents. *Analytical Chemistry* 69, 4076-4078.

Querol X., Alastuey A., Chaves A., Spiro B., Plana F. and Lopez-Soler A. (2000).- Sources of natural and anthropogenic sulphur around the Teruel power station, NE Spain. Inferences from sulphur isotope geochemistry. *Atmospheric Environment* 34, 333-345.

Reeder S.W., Hitchon B., Levinson A.A. (1972).- Hydrogeochemistry of the surface waters of the Mackenzie River Drainage Basin, Canada : 1. Factors controlling inorganic compositions.- *Geochimica Cosmochimica Acta* 26, 825-865.

Roche J. (1970).- Forage souterrain de Lavelanet (Ariège). Compte rendu final des travaux.- Rapport BRGM 70SGN 058 MPY, 29 pages.

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

Thode H.G. (1991).- Sulfur isotopes in nature and the environment: an overview. In: Krouse, H.R, Grinenko V.A. (Eds.), *Stable Isotopes: Natural and Anthropogenic Sulphur in the environment*. SCOPE 43. Wiley, Chichester, 1-26.

Tomascak P.B., Krogstad E.J., Prestegard K.L., Walker R.J. (1995).- Li isotope variability in groundwater from Maryland. *EOS Trans, Am. Geophys. Union* 76, S122.

Tomascak P.B., Banner J.L. (1998).- Lithium isotope hydrogeochemistry: a multi-collector ICP-MS study. *Geochemical Perspectives on Environmental Processes: New theoretical and Analytical Approaches to Sources, Transport, and Bioavailability of Trace Elements*, St. Louis, Conference Abstract.

Tomascak P.B., Tera F., Helz R.T., Walker R.J. (1999).- The absence of lithium isotope fractionation during basalt differentiation: new measurements by multicollector sector ICP-MS. *Geochimica Cosmochimica Acta* 63, 907-910.

Tomascak P.B., Hemming N.G., Hemming S.R. (2003).- The lithium isotopic composition of waters from the Mono basin, California. *Geochimica Cosmochimica Acta* 67, 601-611.

Stallard (1980).- Major elements geochemistry of the Amazon River system.- PhD Thesis.- MIT/Woods Hole Oceanographic Inst., WHOI-80-29.

Vigneaux M. (1975).- Aquitaine occidentale, Guides Géologiques régionaux- Masson et Cie Editeurs.- 223 pages.



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional MIDI-PYRENEES
Parc technologique du canal
3, rue Marie Curie - Bât. Aruba, BP 49
31527 Ramonville Saint Agne Cedex
Tél. : 05 62 24 14 51