

UNIVERSITE MICHEL DE MONTAIGNE - BORDEAUX III
INSTITUT EGID BORDEAUX 3

Thèse pour l'obtention du titre de
Docteur en Science et Technologie,
spécialité : Sciences de l'Eau
de l'Université Michel de Montaigne - Bordeaux III

présentée par

Nicolas LABAT

***Rôle de particularités sédimentaires et structurales sur le
comportement de l'aquifère des sables sous-molassiques soumis
aux fluctuations induites par des stockages souterrains de gaz***

***Application à l'étude de leur influence sur l'hydrodynamisme des
émergences locales***

Direction scientifique : Pierre POUCHAN
INSTITUT EGID - BORDEAUX III

Soutenue le 27 octobre 1998, devant la Commission d'Examen :

Président : Louis HUMBERT, Professeur, Université Michel de Montaigne - Bordeaux 3

Rapporteurs : Philippe ACKERER, Professeur, Université Louis Pasteur - Strasbourg
Georges BLANC, Ingénieur de Recherche, Institut Français du Pétrole

Examineurs : Karim CHAOUICHE, Ingénieur, ELF Aquitaine
Ghislain de MARSILY, Professeur, Université Pierre et Marie Curie - Paris 6
Pierre POUCHAN, Professeur, Université Michel de Montaigne - Bordeaux 3
Claude TALLEC, Directeur, Elf Aquitaine Gaz France Stockages

1998

Philippe

UNIVERSITE MICHEL DE MONTAIGNE - BORDEAUX III
INSTITUT EGID BORDEAUX 3

Thèse pour l'obtention du titre de
Docteur en Science et Technologie,
spécialité : Sciences de l'Eau
de l'Université Michel de Montaigne - Bordeaux III

présentée par

Nicolas LABAT

***Rôle de particularités sédimentaires et structurales sur le
comportement de l'aquifère des sables sous-molassiques soumis
aux fluctuations induites par des stockages souterrains de gaz***

***Application à l'étude de leur influence sur l'hydrodynamisme des
émergences locales***

Direction scientifique : Pierre POUCHAN
INSTITUT EGID - BORDEAUX III

Soutenue le 27 octobre 1998, devant la Commission d'Examen :

- Président : Louis HUMBERT, Professeur, Université Michel de Montaigne - Bordeaux 3
- Rapporteurs : Philippe ACKERER, Professeur, Université Louis Pasteur - Strasbourg
Georges BLANC, Ingénieur de Recherche, Institut Français du Pétrole
- Examineurs : Karim CHAOUCHE, Ingénieur, ELF Aquitaine
Ghislain de MARSILY, Professeur, Université Pierre et Marie Curie - Paris 6
Pierre POUCHAN, Professeur, Université Michel de Montaigne - Bordeaux 3
Claude TALLEC, Directeur, Elf Aquitaine Gaz France Stockages

1998

AVANT-PROPOS

Au moment de conclure ce travail, il m'est impossible de citer en une page le nom de tous ceux sans qui cette thèse n'aurait pu voir le jour. Ces trois dernières années m'ont appris qu'une thèse est finalement un travail d'équipe, dans lequel le rédacteur bénéficie des conseils pertinents de nombreux experts, des encouragements de son entourage professionnel ou familial, et abuse de la patience de ses amis les plus proches.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur le Professeur P. Pouchan pour m'avoir accueilli, depuis la Maîtrise, dans le laboratoire d'Hydrogéologie de l'Institut EGID-Bordeaux III. Son enseignement, son encadrement et son amitié furent les plus précieux encouragements à mon travail de thèse.

Je souhaite remercier le Professeur L. Humbert pour m'avoir admis au sein de cet Institut qu'il dirige avec un dynamisme exemplaire.

Ma reconnaissance s'adresse également à Monsieur le Professeur G. de Marsily pour l'attention bienveillante qu'il a portée à l'évolution et à l'orientation de mon travail.

Je n'oublierais pas Monsieur le Professeur P. Ackerer et Monsieur G. Blanc qui ont aimablement accepté de juger cette thèse. Je tiens à les en remercier.

J'exprime également ma gratitude à Messieurs F.R. Mouton et K. Chaouche qui ont été successivement les tuteurs de ce doctorat pour le groupe Elf Aquitaine. Tous deux m'ont témoigné sans détour leur soutien et leur amitié. Je ne saurais oublier Messieurs Y. Lebas et C. Tallec qui n'ont pas hésité à valoriser mon travail. Qu'ils soient ici sincèrement remercier de leur confiance de tous les instants.

Mes remerciements vont également aux ingénieurs et techniciens du groupe Elf Aquitaine et notamment Messieurs J.L. Lagarigue et D. Etchegoyen. Ils ont non seulement suivi avec intérêt mes travaux, mais ils m'ont également fait bénéficier de leur connaissance, de leur compétence et de leurs nombreuses idées.

Que tous les membres du Comité des Hydrogéologues des stockages d'Izaute et de Lussagnet et du Comité de Suivi National du stockage d'Izaute soient ici justement remerciés. Les nombreuses discussions, parfois passionnées, et leurs réflexions pertinentes m'ont permis d'améliorer sans cesse la qualité de ce travail.

Enfin je tiens tout particulièrement à remercier toute l'équipe de l'Institut EGID-Bordeaux III, le personnel enseignant et technique ainsi que les étudiants qui, par leur complicité et leur bonne humeur, m'ont permis de franchir les obstacles les plus imprévisibles de cette thèse.

Pour finir, je ne saurais oublier ma famille et mes proches. Ce travail est leur récompense pour leur soutien durant ces années d'étude au cours desquelles je n'ai pas toujours su répondre à leur attente.

Je dédie cette thèse à Céline, Théo et Rémi.

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS.....	2
INTRODUCTION.....	13
I. LE STOCKAGE DE GAZ NATUREL EN NAPPE PROFONDE.....	18
I.1. GÉNÉRALITÉS SUR LES STOCKAGES SOUTERRAINS DE GAZ NATUREL.....	19
I.1.1. <i>Historique</i>	19
I.1.2. <i>Aspects techniques</i>	20
I.1.3. <i>Intérêt des stockages souterrains</i>	24
I.2. SITES DE STOCKAGE ELF AQUITAINE.....	25
I.2.1. <i>Situation géographique - Cadre général</i>	25
I.2.2. <i>Cadre géologique sommaire</i>	26
I.2.3. <i>Caractéristiques techniques essentielles</i>	27
I.2.4. <i>Cadre hydrogéologique</i>	29
I.3. CYCLES DE STOCKAGE ET FLUCTUATIONS RÉGIONALES INDUITES.....	30
I.3.1. <i>Fonctionnement des stockages</i>	30
I.3.2. <i>Impacts possibles des stockages</i>	30
I.3.3. <i>Dispositif de suivi</i>	33
I.4. MODÉLISATION GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE.....	37
I.4.1. <i>Histoire géologique sommaire à l'échelle régionale</i>	37
I.4.2. <i>Cadre structural régional</i>	45
I.4.3. <i>Cadre hydrogéologique régional</i>	47
I.5. LES MODÈLES HYDRODYNAMIQUES.....	59
I.5.1. <i>Modèle hydrogéologique de l'ensemble du Bassin Aquitain (1974)</i>	59
I.5.2. <i>Modélisation en vue de l'impact des stockages de gaz au sein de l'aquifère sous-molassique (1983)</i>	61
I.5.3. <i>Nouvelle modélisation de la nappe aquifère sous-molassique (1988)</i>	63
I.5.4. <i>Modélisation en vue de l'impact du futur stockage de gaz des Landes de Siougos (1993)</i>	65
I.6. CONCLUSIONS.....	67

II. UN CADRE GEOLOGIQUE RENOVE	67
II.1. EVOLUTION DES CONNAISSANCES GÉOLOGIQUES DU BASSIN AQUITAIN OCCIDENTAL	68
II.1.1. <i>Historique des idées et concepts</i>	68
II.1.2. <i>Caractérisation de l'hétérochronisme des formations tertiaires</i>	75
II.1.3. <i>Schéma géologique inédit du Tertiaire Sud-aquitain</i>	75
II.2. RÉVISION DE L'AQUIFÈRE SOUS-MOLASSIQUE SELON UN MODÈLE GÉOLOGIQUE DE TYPE PÉTROLIER	79
II.2.1. <i>Méthodologie d'étude des réservoirs de type pétrolier</i>	79
II.2.2. <i>Analyse quantitative des données géologiques</i>	84
II.2.3. <i>Modèle réservoir maillé</i>	87
II.3. ETUDE GÉOLOGIQUE DES STRUCTURES ÉMERGENTES	102
II.3.1. <i>Le périclinal Est de l'anticlinal d'Audignon</i>	102
II.3.2. <i>Géologie de la structure de Barbotan</i>	109
II.4. CONCLUSION	115
III. Un cadre hydrogéologique revisité	117
III.1. RECHERCHE D'UN CADRE HYDRODYNAMIQUE RÉGIONAL ARGUMENTÉ	118
III.1.1. <i>Fluctuations induites majeures</i>	118
III.1.2. <i>Fluctuations naturelles mineures</i>	129
III.2. EVALUATION DE L'IMPACT HYDROGÉOLOGIQUE DES STOCKAGES SUR L'ANTICLINAL D'AUDIGNON	148
III.2.1. <i>Hydrogéologie de la région d'Eugénie-les-Bains</i>	148
III.2.2. <i>Evolution piézométrique</i>	151
III.2.3. <i>Régime hydrologique de la rivière Le Bahus</i>	153
III.3. COMPORTEMENT HYDRODYNAMIQUE ACTUEL DE LA STRUCTURE DE BARBOTAN	172
III.3.1. <i>Comportement de la nappe à la station thermique de Barbotan</i>	172
III.3.2. <i>Construction du modèle conceptuel</i>	181
III.3.3. <i>Simulations et prévisions</i>	189
CONCLUSION	206
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	214
BIBLIOGRAPHIE	222
ANNEXE 1	225
ANNEXE 2	227

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1 : stockages souterrains de gaz et réseau de transport français	21
Figure I.2 : coupe schématique d'une cavité saline	22
Figure I.3 : coupe schématique d'un stockage en nappe aquifère.....	23
Figure I.4 : localisation des stockages souterrains de gaz de Lussagnet et Izaute	25
Figure I.5 : cartes en isobathes au toit des sables sous-molassiques de la structure de Lussagnet	26
Figure I.6 : structure de Lussagnet (isobathes au toit des sables sous-molassiques - détail).....	28
Figure I.7 : structure d'Izaute (isobathes au toit des sables sous-molassiques - détail)	28
Figure I.8 : évolution du volume de gaz en stock sur Izaute et Lussagnet	31
Figure I.9 : zone d'influence observée des stockages et réseau de surveillance.....	34
Figure I.10 : évolution piézométrique au droit des stockages d'Izaute et de Lussagnet.....	35
Figure I.11 : évolution piézométrique dans la zone d'influence des stockage	35
Figure I.12 : charte lithostratigraphique sur la plate-forme aquitaine	38
Figure I.13 : paléogéographie du bassin aquitain au Crétacé supérieur.....	39
Figure I.14 : paléogéographie du bassin aquitain à l'Eocène	41
Figure I.15 : évolution du Bassin Aquitain au cours du Tertiaire	42
Figure I.16 : paléogéographie du bassin aquitain à l'Oligo-Miocène	44
Figure I.17 : schéma structural de la base du Tertiaire	46
Figure I.18 : toponymie des principaux bassins et ride de l'Aquitaine	47
Figure I.19 : schéma multicouche des aquifères interconnectés karstiques et poreux perméables dans le Bassin Aquitain	48
Figure I.20 : carte d'extension des faciès (aquifère éocène).....	50
Figure I.21 : cartes des zones de communications entre aquifères	51
Figure I.22 : carte piézométrique (aquifère éocène)	52
Figure I.23 : carte des transmissivités (aquifère éocène)	53
Figure I.24 : carte d'extension des faciès (aquifère dano-paléocène).....	55
Figure I.25 : carte des transmissivités et de la piézométrie (aquifère dano-paléocène).....	57
Figure I.26 : schéma de la structure multicouche modélisée	59
Figure I.27 : bilan en eau du système	60
Figure I.28 : maillage de la zone modélisée	62

Chapitre II

Figure II.1 : nomenclature lithostratigraphique du Tertiaire d'Aquitaine utilisé avant 1970	69
Figure II.2 : nomenclature d'après diagraphies en zone flysch	70
Figure II.3 : nomenclature d'après diagraphies en zone de plate-forme.....	71
Figure II.4 : profil sismique 79 LAQ 7 - système progradant tertiaire	72
Figure II.5 : nomenclature lithostratigraphique.....	73
Figure II.6 : modèle schématique du talus progradant yprésien	73
Figure II.7 : schéma sédimentaire du Tertiaire aquitain	74
Figure II.8 : corrélations lithostratigraphiques du bassin d'Arzacq.....	74
Figure II.9 : schéma géologique de la progradation Est - Ouest de la plate-forme d'Aquitaine occidentale au Paléogène inférieur.....	76
Figure II.10 : coupe géologique approximativement Nord - Sud de la vallée de l'Adour au bassin d'Arzacq	77
Figure II.11 : coupe géologique Ouest - Est de l'Est de la Garonne au Sud d'Orthez.....	77
Figure II.12 : représentation schématique d'un réservoir.....	79
Figure II.13 : séquence d'étude en ingénierie gisement.....	81
Figure II.14 : cartes en isobathes du bassin Aquitain et du bassin d'Arzacq	83
Figure II.15 : découpage vertical du modèle géologique.....	84
Figure II.16 : variogrammes des caractéristiques pétrophysiques du Danien et du Paléocène	90
Figure II.17 : variogrammes des caractéristiques pétrophysiques de l'Yprésien et du Lutétien	91
Figure II.18 : maillage du domaine d'étude	93
Figure II.19 : cartes des caractéristiques pétrophysiques du Danien	95
Figure II.20 : cartes des caractéristiques pétrophysiques du Paléocène.....	96
Figure II.21 : cartes des caractéristiques pétrophysiques de l'Yprésien	97
Figure II.22 : cartes des caractéristiques pétrophysiques du Lutétien	98
Figure II.23 : coupes régionales Nord - Sud	99
Figure II.24 : coupes régionales Sud Ouest - Nord Est	100
Figure II.25 : carte de transmissivité de l'aquifère éocène.....	101
Figure II.26 : extrait de la carte géologique de la région d'Eugénie-les-Bains	103
Figure II.27 : carte en isobathes de la base du Tertiaire autour de l'anticlinal d'Audignon.....	106
Figure II.28 : profil sismique interprété 84TUR5A.....	107
Figure II.29 : coupe géologique synthétique dans le secteur d'Eugénie-les-Bains	108
Figure II.30 : extrait de la carte géologique de Cazaubon	110
Figure II.31 : coupes sur le site des thermes de Barbotan levées par Capdeville	111
Figure II.32 : coupe géologique schématique de la structure de Barbotan.....	112
Figure II.33 : corrélations révisées entre les stockages et Barbotan	114

Chapitre III

Figure III.1 : puits observateurs dans la zone d'influence des stockages	118
Figure III.2a : chroniques piézométriques filtrées (région Nord).....	119
Figure III.2b : chroniques piézométriques filtrées (région Est)	119
Figure III.2c : chroniques piézométriques filtrées (région Ouest).....	120
Figure III.2d : chroniques piézométriques filtrées (région Sud)	120
Figure III.3 : fluctuation périodique dans un aquifère captif avec effet de surcharge sur l'aquifère sous-jacent	122
Figure III.4a : chroniques piézométriques ajustées et calées (région Nord)	124
Figure III.4b : chroniques piézométriques ajustées et calées (région Est).....	125
Figure III.4c : chroniques piézométriques ajustées et calées(région Ouest)	125
Figure III.4d :chroniques piézométriques ajustées et calées (région Sud)	126
Figure III.5 : Relation entre la sensibilité aux stockages TE et la distance.....	128
Figure III.6 : chroniques piézométriques corrigées de l'influence théorique des stockages.....	128
Figure III.7 : localisation des piézomètres utilisés dans la zone d'influence des stockages.....	130
Figure III.8 : chroniques piézométriques et barométriques observées	131
Figure III.9 : potentiel gravitationnel théorique.....	139
Figure III.10 : chroniques piézométriques corrigées de la dérive linéaire due aux stockages.....	140
Figure III.11 : spectres d'amplitude des transformées de Fourier de la piézométrie, de la pression atmosphérique et du potentiel gravitationnel W2.....	141
Figure III.12 : chroniques piézométriques et barométriques non périodiques (filtrées de l'effet des marées terrestres)	143
Figure III.13 : efficacité barométrique estimée par la méthode de Clark	144
Figure III.14 : relation porosité - coefficient d'emmagasinement spécifique en fonction de l'efficacité barométrique	146
Figure III.15 : relation module d'élasticité de l'aquifère - coefficient d'emmagasinement spécifique en fonction de l'efficacité barométrique.....	146
Figure III.16 : localisation des sources et forages dans le secteur d'Eugénie-les-Bains.....	149
Figure III.17 : évolution piézométrique des puits à Eugénie-les-Bains	152
Figure III.18 : comparaison de l'évolution piézométrique du puits ELB2 et des forages de la région Ouest de la zone d'influence	153
Figure III.19 : localisation des sections de jaugeage sur la rivière Le Bahus	154
Figure III.20 : situation des bassins versants de la Chalosse	156
Figure III.21 : orientation des thalwegs dans le bassin versant du Bahus	157
Figure III.22 : représentation schématique des entrées et sorties le long du Bahus entre le barrage de Miramont-Sensacq et Labarthe.....	158
Figure III.23 : influence de la gestion du barrage de Miramont sur les débits d'étiage (été 1995) ..	158

Figure III.24 : localisation des forages agricoles le long du Bahus	159
Figure III.25 : évolution piézométriques des forages agricoles suivis par le Conseil Général des Landes	160
Figure III.26 : comparaison de l'évolution de la pression en gaz dans les stockages et du régime hydrologique des rivières voisines	161
Figure III.27 : évolution des hauteurs limnimétriques dans la rivière Le Bahus.....	162
Figure III.28 : courbes de tarage des stations limnimétriques	163
Figure III.29 : hydrogrammes des stations de jaugeage	164
Figure III.30 : chronique de l'évolution des variations de débits spécifiques entre les stations limnimétriques d'Eugénie et de Classun	165
Figure III.31 : chroniques de l'évolution de la piézométrie de l'aquifère dano-paléocène et des variations du débit spécifique.....	165
Figure III.32 : évolution de la température dans la rivière Le Bahus.....	166
Figure III.33 : évolution de la conductivité dans la rivière Le Bahus	167
Figure III.34 : esquisse des iso-températures de l'aquifère dano-paléocène dans le bassin versant du Bahus	168
Figure III.35 : influence de la température atmosphérique sur la température de l'eau dans la rivière Le Bahus	169
Figure III.36 : influence de la pluviométrie sur la conductivité de l'eau dans la rivière Le Bahus ..	170
Figure III.37 : influence de l'aquifère dano-paléocène sur la conductivité de la rivière Le Bahus ..	170
Figure III.38 : coupe structurale sous les themes de Barbotan : identification des différents réservoirs	173
Figure III.39 : position des principaux forages dans le secteur de Barbotan et trajet probable de la faille.....	175
Figure III.40 : influence des stockages sur l'évolution piézométrique des puits de Barbotan	178
Figure III.41a : évolution piézométrique observée à Barbotan dans les 3 réservoirs	179
Figure III.41b : évolution piézométrique observée à Barbotan dans le réservoir R1	179
Figure III.41c : évolution piézométrique observée à Barbotan dans le réservoir R2	180
Figure III.41d : évolution piézométrique observée à Barbotan dans le réservoir R3 et le compartiment nord.....	180
Figure III.42 : schéma de maillage envisagé pour représenter une coupe méridienne à Barbotan ...	182
Figure III.43 : maillage du domaine d'étude	183
Figure III.44a : détail du maillage dans le réservoir R1 supérieur	184
Figure III.44b : détail du maillage dans le réservoir R1 inférieur.....	185
Figure III.44c : détail du maillage dans le réservoir thermal R2	185
Figure III.44d : détail du maillage dans le réservoir R3	186
Figure III.45 : évolution de la recharge au droit de l'affleurement de l'aquifère sous-molassique à Barbotan	188
Figure III.46 : comparaison des flux de recharge et de prélèvements	189

Figure III.47 : calage des chroniques piézométriques simulées	191
Figure III.48 : chronique piézométrique calée sur le puits Taureau	191
Figure III.49 : chronique piézométrique calée sur le puits Geysers1.....	192
Figure III.50 : chronique piézométrique calée sur le puits F3	192
Figure III.51 : chronique piézométrique calée sur les puits F4 et F5	193
Figure III.52a : répartition des paramètres hydrodynamiques dans le réservoir R1	193
Figure III.52b : répartition des paramètres hydrodynamiques dans le réservoir R2	194
Figure III.52c : répartition des paramètres hydrodynamiques dans le réservoir R3	194
Figure III.53 : influence des paramètres sur la qualité de la simulation.....	195
Figure III.54 : influence des paramètres sur la piézométrie simulée au puits Geysers1	195
Figure III.55 : simulation prévisionnelle de la piézométrie - programme de stockage 1998-1999...	196
Figure III.56 : simulation prévisionnelle de la piézométrie - absence de pompages à Barbotan.....	197
Figure III.57 : simulation prévisionnelle de la piézométrie non influencée par les stockages.....	197
Figure III.58 : progression du front de particules pendant l'activité thermique et l'exploitation des stockages.....	199
Figure III.59 : progression du front de particules en l'absence de pompages à Barbotan.....	200
Figure III.60 : progression du front de particules dans le cas d'une piézométrie non influencée par les stockages de gaz.....	201
Figure III.61 : progression des particules de la zone d'affleurement vers les forages Lotus en pompage	202
Figure III.62a : flux transitant entre les compartiments Nord et Sud	204
Figure III.62b : flux transitant entre les compartiments Nord et Sud dans le cas d'une absence de pompage à Barbotan.....	204
Figure III.62c : flux transitant entre les compartiments Nord et Sud dans le cas d'une absence d'influence des stockages de gaz	205

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I.1 : localisation des stockages souterrains de gaz naturel dans le monde (situation au 1 ^{er} janvier 1997).....	20
Tableau I.2 : réseau de surveillance de l'aquifère sous-molassique.....	34

Chapitre II

Tableau II.1 : caractéristiques pétrophysiques issues de l'interprétation quantitative des diagraphies.....	86
---	----

Chapitre III

Tableau III.1 : paramètres hydrodynamiques calculés avec la méthode tidale (point source à Lussagnet).....	127
Tableau III.2 : paramètres hydrodynamiques calculés avec la méthode tidale (point source à Izaute).....	127
Tableau III.3 : règles de calcul pour la méthode de Clark.	136
Tableau III.4 : amplitude et phase des principales ondes de marée dans les enregistrements barométriques et piézométriques	142
Tableau III.5 : efficacité barométrique	145
Tableau III.6 : caractéristiques hydrodynamiques calculées	145
Tableau III.7 : inventaire des sources et forages à Eugénie-les-Bains	149
Tableau III.8 : caractéristiques physiques des sous-bassins du Bahus	155
Tableau III.9 : températures observées dans les forages captant l'aquifère dano-paléocène dans le bassin versant du Bahus	167
Tableau III.10 : caractéristiques des différents réservoirs de Barbotan.....	174
Tableau III.11 : utilisation des différents puits de BARBOTAN en 1995 (informations fournies par la Chaîne Thermale du Soleil).....	174
Tableau III.12 : résultats des analyses isotopiques des puits Lotus1, Geysers2 et B102.....	176
Tableau III.13 : estimation des paramètres hydrodynamiques à partir des essais de débits	187
Tableau III.14 : estimation des paramètres hydrodynamiques par analogie avec la propagation d'une onde de marée dans un aquifère.....	187

LISTE DES SYMBOLES

- a : rayon de la Terre
 BE : efficacité barométrique
 BE_L : efficacité barométrique à long terme
 BE_S : efficacité barométrique à court terme
 BE_C : efficacité barométrique obtenue par la méthode de Clark
 dp_b : variation de pression barométrique
 dh_b : amplitude de la pression atmosphérique pour une fréquence particulière
 dh_w : amplitude du niveau piézométrique pour une fréquence particulière
 E_a : module d'élasticité moyen de l'aquifère
 E_s : module d'élasticité de la matrice rocheuse
 E_{tr} : flux d'évapotranspiration réelle
 E_w : module d'élasticité du fluide
 g : accélération de la gravité
 GR : valeur ponctuelle enregistrée par l'outil de diagraphie gamma (Gamma Ray)
 GR_{min} : valeur minimale enregistrée par l'outil Gamma Ray correspondant à un réservoir propre
 GR_{max} : valeur maximale enregistrée par l'outil Gamma Ray correspondant à un horizon argileux
 h : baisse ou élévation de la piézométrie
 \bar{h} : niveau piézométrique moyen
 h_0 : $\frac{1}{2}$ amplitude de l'onde à l'origine
 $h_F(t)$: niveau piézométrique filtré au temps t
 $h(t)$: niveau piézométrique au temps t
 $h'(t)$: niveau piézométrique ajusté au temps t
 \bar{h}, \bar{l} : nombres caractéristiques de la Terre ou nombres de Love
 K : perméabilité
 n : porosité de l'aquifère
 p : pression hydrostatique
 P : flux des précipitations
 Q_{imp} : flux importés ou rejetés dans la rivière
 $Q_{écoul}$: flux issus du ruissellement
 Q_{exp} : flux exportés ou prélevés directement dans le système
 Q_s : flux d'origine souterraine
 r_e : distance du centre de la Terre au point d'observation
 S_s : coefficient d'emmagasinement spécifique
 t : temps
 t_0 : période de la fluctuation
 t_L : temps de retard d'une onde
 TE : sensibilité à la marée (« Tidal Efficiency ») de l'aquifère
 V_a : volume total
 V_s : volume de la fraction solide
 V_w : volume de l'espace poreux
 VSH : teneur en argile
 $W2$: potentiel gravitationnel théorique de la marée terrestre
 x : distance du puits d'observation à la zone de contact entre l'aquifère et la limite source
 \bar{Z} : niveau moyen de l'onde de marée
 $Z(t)$: niveau de la marée au temps t

- α : compressibilité de la matrice poreuse
- β : compressibilité de l'eau
- Δ_a : dilatation totale de l'aquifère
- Δ_b : dilatation causée la marée barométrique
- Δ_e : dilatation causée la marée terrestre
- Δ_o : dilatation causée la marée océanique
- Δt : temps de parcours de l'onde enregistrée par l'outil Sonic
- Δt_{ma} : temps de parcours de l'onde dans la matrice rocheuse
- Δt_{fl} : temps de parcours de l'onde dans le fluide
- Δt_{sh} : temps de parcours de l'onde dans l'argile
- ϕ_a : différence de phase entre le potentiel de marée théorique et la dilatation de l'aquifère
- ϕ_e : différence de phase entre le potentiel de marée théorique et la dilatation de la marée terrestre
- ϕ_b : différence de phase entre le potentiel de marée théorique et la dilatation de la marée barométrique
- ϕ_o : différence de phase entre le potentiel de marée théorique et la dilatation de la marée océanique
- ϕ_w : angle de phase de l'oscillation piézométrique
- γ : poids spécifique de l'eau
- $\gamma(h)$: fonction variogramme
- ρ : masse volumique du fluide
- ν : coefficient de Poisson
- ω : fréquence angulaire d'une onde particulière de marée terrestre

INTRODUCTION

Les nappes profondes du Bassin Aquitain constituent une ressource de dimension stratégique pour plusieurs secteurs économiques. Leur qualité chimique souvent proche des normes de potabilité, leur accessibilité sur l'ensemble du bassin avec une réserve s'élevant à plusieurs milliards de mètres cubes, sont autant de critères qui nécessitent aujourd'hui une gestion tantôt pragmatique tantôt rigoureuse.

L'exploitation de ces nappes en Aquitaine est particulièrement diversifiée. Elle intéresse les secteurs de l'alimentation en eau potable, de l'irrigation pour l'agriculture, du thermalisme, de la géothermie et des stockages souterrains de gaz. Les différents acteurs exprimant leurs besoins en terme de qualité ou de quantité, selon leur activité, sont conscients de leur influence sur l'évolution de la ressource et de son exploitabilité.

Pour des raisons économiques, les forages qui sollicitent les différents aquifères se concentrent dans les secteurs où ils sont les moins profonds. Cette démarche oblige souvent les différents exploitants à conduire leur activité dans des aquifères communs et dans des secteurs géographiques voisins.

L'utilisation par la société Elf Aquitaine est d'un type particulier puisqu'elle consiste à injecter du gaz sous pression dans un aquifère, le gaz déplaçant l'eau, et à le soutirer en fonction des besoins saisonniers des consommateurs. De ce fait Elf Aquitaine n'est pas un réel consommateur d'eau mais plutôt un utilisateur de l'espace souterrain. Cette activité est déployée au droit des structures souterraines des sables sous-molassiques à Lussagnet (Landes) depuis 1957, et à Izaute (Gers) depuis 1982.

Le régime d'exploitation des stockages se traduit par une phase d'injection estivale suivie d'une période de soutirage durant l'hiver. Bien que l'emprise du stockage proprement dit soit très limitée, son exploitation engendre une fluctuation des pressions dans la nappe dont l'extension atteint plusieurs dizaines de kilomètres autour des sites.

L'étude des variations piézométriques a conduit à des simulations par modèles qui ont été progressivement améliorés : le premier modèle fut élaboré par le BRGM (Vandenbeusch & Roche⁹⁹, 1983), auquel lui succéda le simulateur SCORE (Eygun & Bertand⁴⁵, 1988). Inspiré de synthèses géologiques régionales (BRGM *et al.*¹⁹, 1973 ; BEICIP⁹, 1984) le modèle SCORE représente

l'aquifère comme un système monocouche fermé. Cette représentation s'est révélée peu satisfaisante puisque le contexte géologique et hydrogéologique réel montre l'existence d'au moins une émergence connue au droit de la structure de Barbotan et d'une émergence probable dans la région d'Eugénie-les-Bains sur le périclinal Est de l'anticlinal d'Audignon qui n'ont pu être intégrées dans ce modèle. Par ailleurs les différentes synthèses hydrogéologiques (Vouve, Cazal, Plaud, Pouchan¹⁰⁰, 1969 ; Housse & Maget⁵², 1977) et d'autres modèles hydrodynamiques (Besbes *et al.*¹⁴, 1974) ont mis l'accent sur les communications entre les différents aquifères profonds du bassin, toutes choses non prises en compte par le modèle SCORE d'Elf Aquitaine. De nos jours, des interprétations géologiques et géophysiques nouvelles remettent en cause le cadre géologique, et notamment sédimentaire, qui avait été admis comme représentatif pour cette partie du Bassin Aquitain.

Elf Aquitaine a décidé de se doter d'un nouveau modèle de simulation utilisant le code ECLIPSE dans lequel les particularités géologiques et hydrogéologiques du bassin seront mieux représentées. Ce travail de thèse sert de support à la modélisation dynamique puisqu'il propose un cadre géologique et hydrogéologique rénové dans l'environnement des stockages qui prend en compte non seulement l'aspect multicouche de l'environnement des sites de stockage de gaz mais aussi les ouvertures que constituent les émergences thermales ou diffuses le long des vallées périphériques.

Le premier chapitre de cette thèse est consacré à la présentation détaillée de l'état des connaissances au moment d'entamer ce travail ainsi qu'à l'exposé de la problématique. Après un rappel historique des différentes techniques de stockage souterrain de gaz naturel et de leur intérêt économique, les stockages d'Izaute et de Lussagnet sont décrits dans leur site géologique et hydrogéologique régional. Le régime d'exploitation saisonnier des stockages est explicité avec son impact piézométrique à l'échelle régionale ; ce qui permet de définir, à partir du réseau de surveillance, la « zone d'influence des stockages ».

Les contextes géologique et hydrogéologique dans la zone d'influence des stockages sont ensuite présentés tels que les décrivent les études de synthèse (BRGM *et al.*¹⁹, 1972 ; BEICIP⁹, 1984 ; Vouve *et al.*¹⁰⁰, 1969 ; Housse & Maget⁵², 1977). Il s'agit d'énoncer les principales caractéristiques sédimentaires et structurales de cette zone. Les modèles hydrodynamiques existants sont enfin examinés afin de déterminer quelles ont été les hypothèses et les caractéristiques géologiques retenues pour chaque modèle. Tous les modèles régionaux évoqués sont présentés selon le concept multicouche. L'aspect tridimensionnel au sens de Toth^{96, 97} (1963 ; 1995) n'a pas jusqu'ici été envisagé.

En conclusion, on mettra l'accent sur les limites des connaissances géologiques et hydrogéologiques au sein de la zone d'influence des stockages et les lacunes des différents modèles hydrodynamiques. On notera la nécessité de préciser et de proposer un cadre géologique et hydrogéologique actualisé dans lequel les particularités que constituent les émergences thermales ou diffuses sont prises en compte.

Le deuxième chapitre est consacré à l'exposé des méthodes et des outils qui ont permis de dresser un cadre géologique rénové.

Le grand nombre d'incertitudes géologiques a nécessité la mise en place de nouvelles investigations et interprétations stratigraphiques et géophysiques. Les premiers résultats ont montré la faiblesse des conceptions admises et ont conduit à proposer une vision géologique nouvelle pour le bassin tertiaire, en particulier dans l'environnement des stockages.

C'est ainsi qu'un nouveau modèle sédimentaire a été construit en s'appuyant sur les données géophysiques à l'échelle du bassin. Localement, au droit des émergences thermales, le cadre géologique a pu être détaillé en utilisant l'ensemble des données sédimentaires, stratigraphiques et géophysiques.

Ce travail, étape importante située en amont d'une modélisation hydrodynamique, n'est encore qu'une image provisoire qu'il reste à conforter et/ou à corriger en tenant compte d'observations hydrogéologiques susceptibles de valider le tout.

Dans le dernier chapitre, l'étude hydrogéologique est consacrée à l'analyse des fluctuations induites et naturelles pour déterminer des caractéristiques hydrodynamique globales dans la zone d'influence des stockages.

On s'est efforcé par l'utilisation de l'effet des stockages (propagation de l'onde périodique de pression) de déterminer les caractéristiques moyennes globales de la nappe de manière indépendante de celles obtenues généralement par les essais de puits qui ne fournissent que des valeurs localisées et mal réparties.

L'enregistrement en plusieurs points des effets de la pression atmosphérique et de marées terrestres conduit à la détermination de la compressibilité globale ou locale du système envisagé, c'est à dire à une valeur du coefficient d'emménagement en appréciant la diffusivité. Ces valeurs de diffusivité moyenne et de constante de temps peuvent ainsi être introduites et utilisées dans la construction du modèle à l'échelle souhaitée.

Dans le cas particulier de l'étude de la structure de Barbotan, les données évoquées ci-dessus sont confrontées aux données locales fournies par les tests en pompage, ce qui permet entre autres de montrer que la structure appartient au système sous-molassique (s.s.). Son analyse fine s'intègre dans une démarche de changement d'échelle.

La zone thermale d'Eugénie-les-Bains et du Bahus est considérée comme une série d'émergences discrètes, voire diffuses, de l'aquifère sous-molassique (s.l.). Les observations et les mesures y sont peu nombreuses et ont empêché jusqu'à ces derniers temps une étude approfondie, semblable à celle de Barbotan.

Le Conseil Général des Landes ayant évoqué la contribution éventuelle des émergences diffuses des nappes profondes à l'entretien des débits d'étiage des cours d'eau de la structure d'Audignon et en particulier la rivière le Bahus, c'est par le biais de l'étude des écoulements de ce bassin versant que nous avons tenté d'aborder la relation nappe - surface - rivière dans cette région.

CHAPITRE I

LE STOCKAGE DE GAZ NATUREL EN NAPPE PROFONDE

I.1. GÉNÉRALITÉS SUR LES STOCKAGES SOUTERRAINS DE GAZ NATUREL

I.2. SITES DE STOCKAGE ELF AQUITAINE

I.3. CYCLES DE STOCKAGE ET FLUCTUATIONS RÉGIONALES INDUITES

I.4. MODÉLISATION GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

I.5. LES MODÈLES HYDRODYNAMIQUES

I.6. CONCLUSIONS

I. LE STOCKAGE DE GAZ NATUREL EN NAPPE PROFONDE

Les stockages souterrains de gaz naturel gérés par Elf Aquitaine à Lussagnet (Landes) et à Izaute (Gers) constituent des éléments régulateurs indispensables dans un réseau d'approvisionnement national tributaire des importations et de la production de quelques gisements français déjà anciens (Lacq, Saint Marcet...). En effet, outre leur fonction stratégique, les stockages souterrains assurent l'ajustement quotidien et saisonnier des ressources en gaz face aux besoins des consommateurs.

L'implantation, le développement et l'exploitation de tels stockages entraînent des perturbations piézométriques dans l'aquifère utilisé et d'éventuels désordres physico-chimiques. Afin d'évaluer l'impact des stockages sur l'aquifère profond et surtout sur ses résurgences utilisées pour le thermalisme, un réseau de suivi piézométrique et qualitatif a été implanté dans leur zone d'influence.

La gestion des stockages dans un contexte hydrogéologique régional où opèrent d'autres utilisateurs de l'aquifère pour le thermalisme, l'eau potable et l'irrigation, est à envisager par le biais d'une modélisation hydrodynamique. Ainsi plusieurs modèles ont été construits depuis une vingtaine d'années selon l'amélioration des connaissances tant géologiques qu'hydrogéologiques locales et/ou régionales.

Après un rappel sommaire des techniques et de la fonction des stockages souterrains de gaz naturel ainsi qu'une brève description des stockages de Lussagnet et d'Izaute, ce chapitre abordera l'état des connaissances géologiques et hydrogéologiques dans le Bassin Aquitain et dans la proximité des sites de stockages. Les modèles de simulation des stockages et du bassin seront examinés avec les hypothèses de simulation et éventuellement les lacunes liées à la complexité et au déficit de connaissances géologiques et hydrogéologiques.

I.1. Généralités sur les stockages souterrains de gaz naturel

I.1.1. Historique

C'est en Amérique du Nord que fut réalisé en 1916 le premier stockage souterrain de gaz naturel, en utilisant un ancien gisement de gaz de l'état de New York, après des essais menés en Ontario en 1915 (Choquel²⁹, 1996). Jusque dans les années 50, le gaz naturel fut stocké selon cette technique dans d'anciens gisements de gaz et, parfois même, de pétrole épuisés. Mais devant la nécessité d'approvisionnement croissant des grands centres industriels et urbanisés du Nord-Est des Etats-Unis, d'autres techniques de stockage ont vu rapidement le jour dont celle du stockage en nappe aquifère en 1946 dans le Kentucky. Le stockage en cavité saline a été expérimenté dans le Michigan en 1961, et la première cavité spécialement destinée à cet usage a été créée en 1963 dans le Saskatchewan.

Au cours des vingt dernières années de nombreux stockages souterrains de gaz ont été mis en service dans le monde et en France. Il existe à l'heure actuelle 554 sites de stockage souterrain de gaz dans le monde (tableau I.1). Les sites en gisements épuisés sont de loin les plus nombreux (425), suivis des sites en aquifères (82), de ceux en cavités salines (44) et enfin des mines désaffectées (3) (Choquel²⁹, 1996).

En France, la découverte du gisement de gaz naturel de Lacq et son exploitation entraînent une modification du réseau de distribution. Du fait de la croissance d'exploitation de Lacq et de la multiplication des sources de gaz naturel (Algérie, Mer du Nord, Russie...) il fallut trouver une solution pour le stockage de gaz, face à l'augmentation des volumes à transporter qui ne pouvait plus être absorbée par la capacité « gazométrique » des conduites. La solution du stockage souterrain en nappe aquifère fut envisagée dès 1954. En 1956 le gaz provenant des cokeries minières et sidérurgiques de Lorraine est injecté à Beynes (Ouest de la région parisienne) dans le premier stockage souterrain français. En 1957, le stockage de gaz de Lussagnet est implanté dans le département des Landes non loin de l'usine de Lacq et près d'une grande artère de distribution (Socrate⁹¹, 1959).

Actuellement Gaz de France exploite 13 stockages souterrains dont dix en nappe aquifère et trois en cavités salines. Elf Aquitaine exploite pour sa part deux stockages en nappe aquifère : à Lussagnet dans les Landes et à Izaute dans le Gers (figure I.1).

	Gisements convertis	Aquifères	Cavités salines	Mines abandonnées	Total
Amérique du Nord	361	40	33	1	435
Canada	24	—	7	—	38
Etats-Unis	337	40	26	1	386
Europe de l'Ouest	30	24	20	2	76
Autriche	5	—	—	—	5
Belgique	—	1	—	1	2
Danemark	—	1	1	—	2
<i>France</i>	—	12	3	—	15
Allemagne	12	10	15	1	38
Italie	8	—	—	—	8
Espagne	2	—	—	—	2
Grande-Bretagne	1	—	1	—	2
Europe de l'Est	51	15	1	—	67
Bulgarie	1	—	—	—	1
République tchèque	3	1	—	—	4
Croatie	1	—	—	—	1
Hongrie	4	—	—	—	4
Ex-URSS	33	14	1	—	48
Pologne	4	—	—	—	4
Roumanie	4	—	—	—	4
Slovaquie	1	—	—	—	1
Australie	1	—	—	—	1
Total monde	443	79	54	3	579

Tableau I.1 : localisation des stockages souterrains de gaz naturel dans le monde (situation en 1997)

I.1.2. Aspects techniques

Les différentes techniques de stockage souterrain ont été largement développées depuis les années 50. On en connaît à l'heure actuelle quatre types.

I.1.2.1. Stockages en gisement naturel de gaz ou de pétrole épuisé

Le gaz est injecté pour y être confiné dans des conditions presque identiques à celles où se trouvaient les hydrocarbures avant leur mise en production. Seuls les gisements qui présentent des

caractéristiques de réservoir (perméabilité élevée) permettant une utilisation en modulation saisonnière seront retenus pour ce type de stockage.



Figure I.1 : stockages souterrains de gaz et réseau de transport français

I.1.2.2. Stockage en cavités minées ou en mines abandonnées

Les vides créés par l'exploitation de mines ou carrières souterraines peuvent être aménagés en stockage à condition de répondre à de stricts critères de stabilité et surtout d'étanchéité.

La stabilité est calculée en fonction des propriétés géomécaniques des roches encaissantes. L'étanchéité est assurée par un confinement hydraulique dans lequel la partie utilisée de la mine est située, en fonction des caractéristiques du gaz stocké, à une profondeur telle que tous les écoulements du massif sont dirigés vers la cavité (Pantin⁷⁸, 1988).

I.1.2.3. Stockage en cavité saline lessivée

Le stockage est constitué d'un ensemble de cavités individuelles creusées par dissolution à l'eau douce dans une formation salifère (figure I.2). La forme de la cavité sera fonction des caractéristiques géomécaniques du sel. Elle est suivie aux différentes étapes du lessivage et en cours d'exploitation car elle détermine la stabilité du stockage.

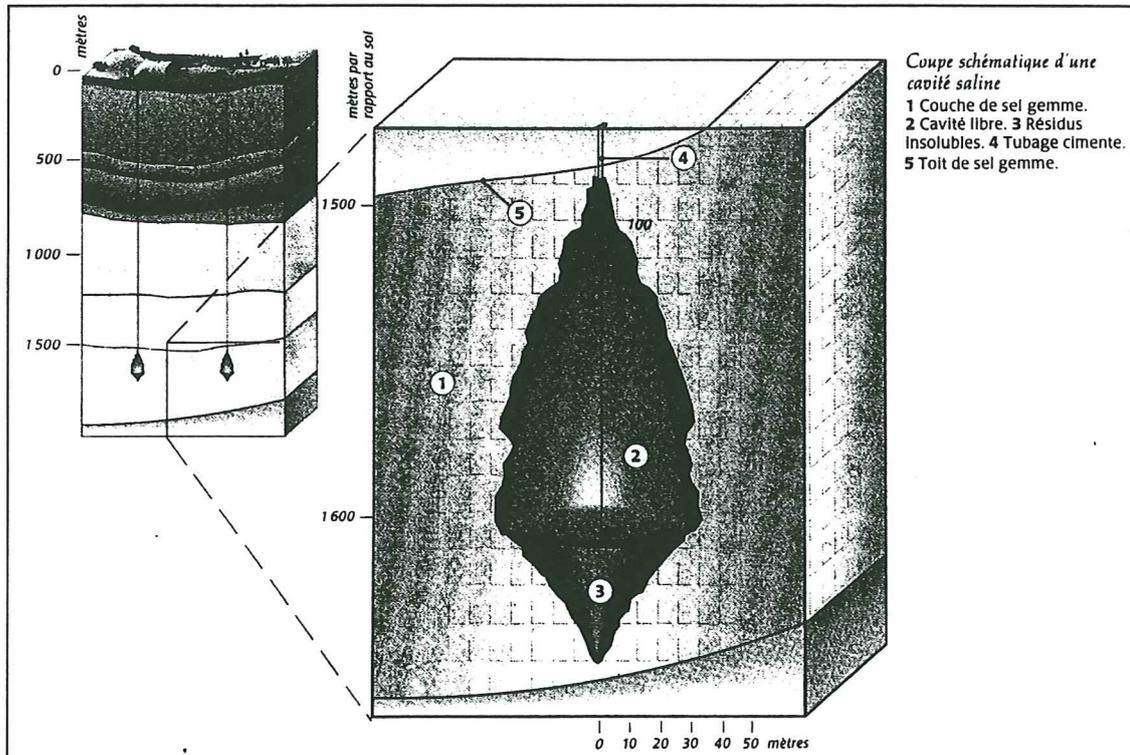


Figure I.2 : coupe schématique d'une cavité saline

L'étanchéité du stockage est garantie par les propriétés intrinsèques du sel. Par cette technique on peut créer des cavités individuelles de 200 000 à 300 000 m³ ayant des pressions d'exploitation en gaz variant de 240 à 80 bars pour des cavités creusées à 1500 m de profondeur. Le volume de gaz stocké peut atteindre quelques dizaines de millions de m³(n)¹ (Lecoanet *et al.*⁶⁴, 1988 ; Pantin⁷⁸, 1988 ; Blondin & Ferrier¹⁶, 1994).

Ces stockages sont utilisés pour répondre à des besoins de pointe précis et particulièrement brefs. A l'instar d'une « bouteille de gaz », les stockages en cavités salines peuvent être vidés en quelques jours.

¹ Volume de gaz dans les conditions thermodynamiques standards de surface : pression d'une atmosphère, température de 0°C.

I.1.2.4. Stockage en nappe aquifère

Ce type de stockage est l'équivalent d'un gisement de gaz naturel dont la réserve de gaz est constituée artificiellement par injection dans le sous-sol (figure I.3). Le stockage se fait dans une structure géologique fermée, surmontée de roches imperméables de « couverture » qui en assurent l'étanchéité verticale. Les couches de terrains réservoirs doivent présenter des caractéristiques hydrodynamiques (porosité et perméabilité) proches de celles connues dans les gisements naturels.

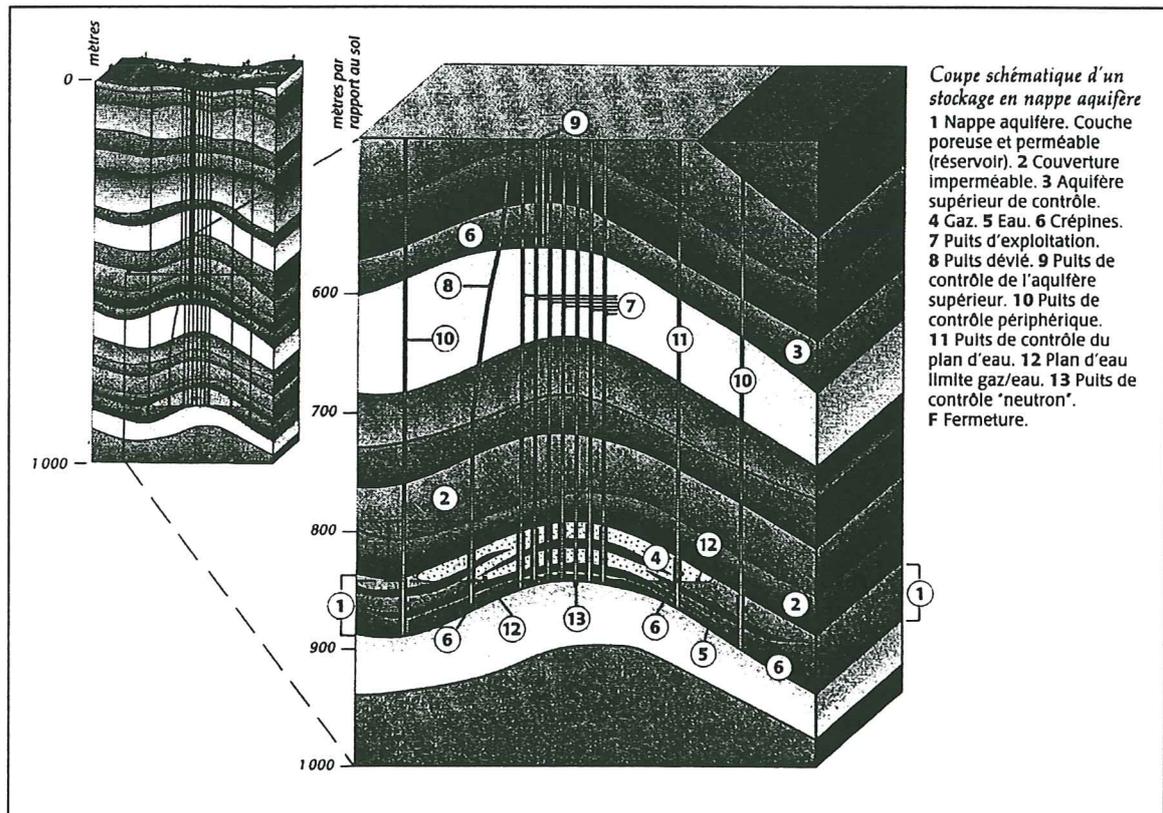


Figure I.3 : coupe schématique d'un stockage en nappe aquifère

Lors de la phase d'injection, le gaz sous pression imprègne la roche poreuse, en déplaçant partiellement tout en comprimant l'eau présente initialement, d'une zone haute de la formation vers la périphérie. La pression de la bulle de gaz, fonction de la profondeur du stockage, doit être limitée pour ne pas entraîner une migration du gaz à travers la couverture.

Lors de la phase de soutirage, la décompression du gaz permet sa production et l'eau interstitielle reprend naturellement sa place. Ces mouvements d'eau constituent la « respiration du stockage ».

Le volume de pores libre au gaz détermine la capacité maximale du réservoir sachant que le plan d'eau (interface gaz/eau) ne doit jamais descendre en dessous de l'isobathe de fermeture de

la structure, qu'il est rarement horizontal, que la pression maximale autorisée est limitée, que les pores de la roche ne sont jamais entièrement remplis par le gaz car il y subsiste une quantité d'eau résiduelle, ce qui se traduit par une saturation en gaz limitée. Le volume de gaz utile, que l'on peut soutirer ou injecter d'une saison à l'autre, représentera environ la moitié du volume total mis en place dans le réservoir à son stade final de développement. Le gaz définitivement immobilisé dans les pores de la roche ne participant pas à la respiration du stockage est le « gaz coussin » (Choquel²⁹, 1996 ; Blondin¹⁷, 1995).

De grande capacité, les stockages en nappe aquifère sont utilisés pour faire face à une demande régulière.

1.1.3. Intérêt des stockages souterrains

Les stockages souterrains ont apporté une solution satisfaisante au problème posé par l'emploi de l'énergie gaz dans une chaîne d'approvisionnement particulièrement rigide depuis le producteur jusqu'aux consommateurs. Les approvisionnements du pays se font à partir de contrats signés avec des fournisseurs étrangers, contrats qui stipulent un débit constant d'approvisionnement de gaz pendant pratiquement toute l'année.

Les stockages servent à l'ajustement saisonnier et journalier des ressources face à la consommation. Celle-ci subit, en cours d'année, d'importantes variations liées aux variations saisonnières météorologiques. Le caractère aléatoire de ces variations impose à l'exploitant de posséder une capacité de stockage suffisante pour assurer la demande des consommateurs qui peut excéder fortement le niveau des approvisionnements. Le stockage d'importantes quantités de gaz pendant l'été devra répondre à la consommation hivernale.

Outre leur fonction vis à vis de la modulation saisonnière, les stockages souterrains assurent une fonction stratégique. Compte tenu de l'éloignement des sources d'approvisionnement et des risques de défaillances techniques des chaînes correspondantes, ils sont appelés à jouer un rôle important pour la prévention des difficultés liées à une réduction accidentelle des fournitures (Choquel²⁹, 1996).

Ils permettent également une meilleure saisie des opportunités du marché gaz en autorisant une modulation pluriannuelle adaptée au développement de nouvelles chaînes d'approvisionnement. Les réservoirs souterrains peuvent enfin être utilisés pour stocker d'éventuels excédents de fourniture ou pour réguler la production d'un gisement comme ont pu être associés le gisement de Lacq et le stockage de Lussagnet.

I.2. Sites de stockage Elf Aquitaine

En France, les sites propices aux stockages souterrains de gaz en nappe aquifère se situent dans les deux grands bassins sédimentaires : le Bassin Parisien et le Bassin Aquitain. Dans ce dernier, les structures géologiques profondes sont nombreuses et peuvent constituer des stockages souterrains potentiels placés près des zones de consommation ou à proximité des canalisations de transport. Elf Aquitaine exploite actuellement deux stockages souterrains en nappe aquifère dans le Sud-Ouest. : Lussagnet et Izaute.

I.2.1. Situation géographique - Cadre général

Le stockage souterrain de gaz naturel de Lussagnet se situe au coeur du Bassin Aquitain, dans le département des Landes, à une vingtaine de kilomètres au Sud-Est de Mont-de-Marsan (figure I.4). Depuis 1957, il est destiné à couvrir, en complément de la production de Lacq et des petits gisements des environs, les besoins en gaz du grand Sud-Ouest, de Bordeaux à Perpignan.

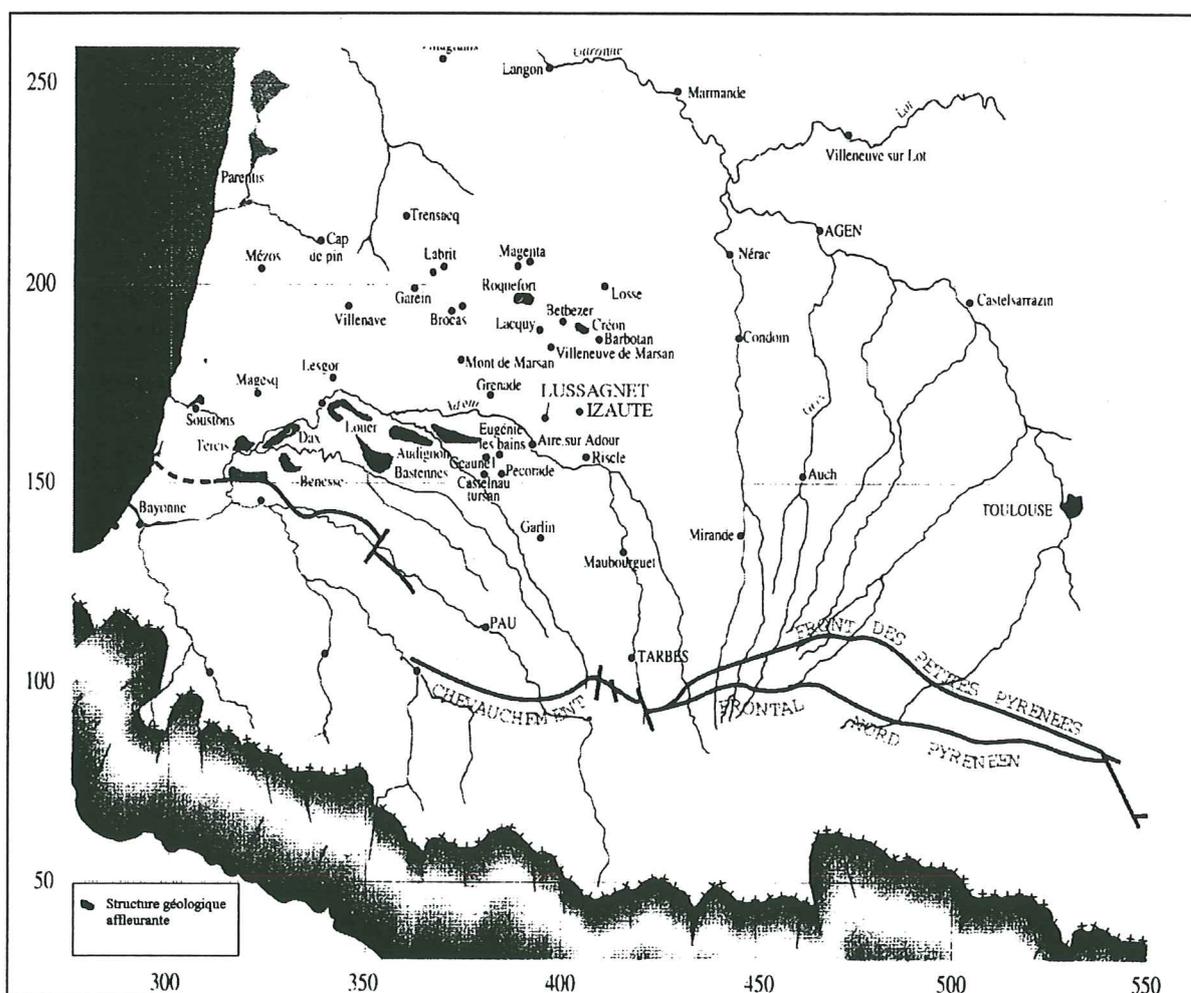


Figure I.4 : localisation des stockages souterrains de gaz de Lussagnet et Izaute

Le stockage d'Izaute est implanté dans le département du Gers, près de Nogaro (figure I.4). Situé à seulement une dizaine de kilomètres à l'Est du stockage de Lussagnet, il sert à couvrir les besoins du Sud de la France, via l'artère du Midi (figure I.1).

I.2.2. Cadre géologique sommaire

La structure antiforme de Lussagnet a été reconnue en 1956 par le forage LU001, à la suite d'une campagne sismique. Plusieurs campagnes de détail ont été réalisées en 1970, 1974 et 1978, ainsi que 66 puits afin de mieux préciser la forme de la structure et la position des accidents qui l'affectent.

Cette structure est représentée comme un anticlinal limité sur son flanc Nord par des failles inverses de direction N100° (figure I.5). Ces failles s'amortissent assez rapidement à l'Ouest et à l'Est. Elles semblent être prises en écharpe par des accidents N140° qui définissent sa fermeture. A la crête à - 420 mNGF, soit 545 m/sol, se place un petit panneau délimité par deux failles inverses de direction N30°. Un accident de même direction et de faible rejet a également pu être identifié à l'Ouest de la structure. L'anticlinal est dissymétrique avec un pendage moyen compris entre 5 et 10° sur le flanc Sud-Ouest tandis qu'il atteint 20° sur le flanc Nord-Est. La fermeture de la structure se situe environ à la cote -800 mNGF dans l'ensellement qui la sépare avec celle d'Izaute (figure I.5).

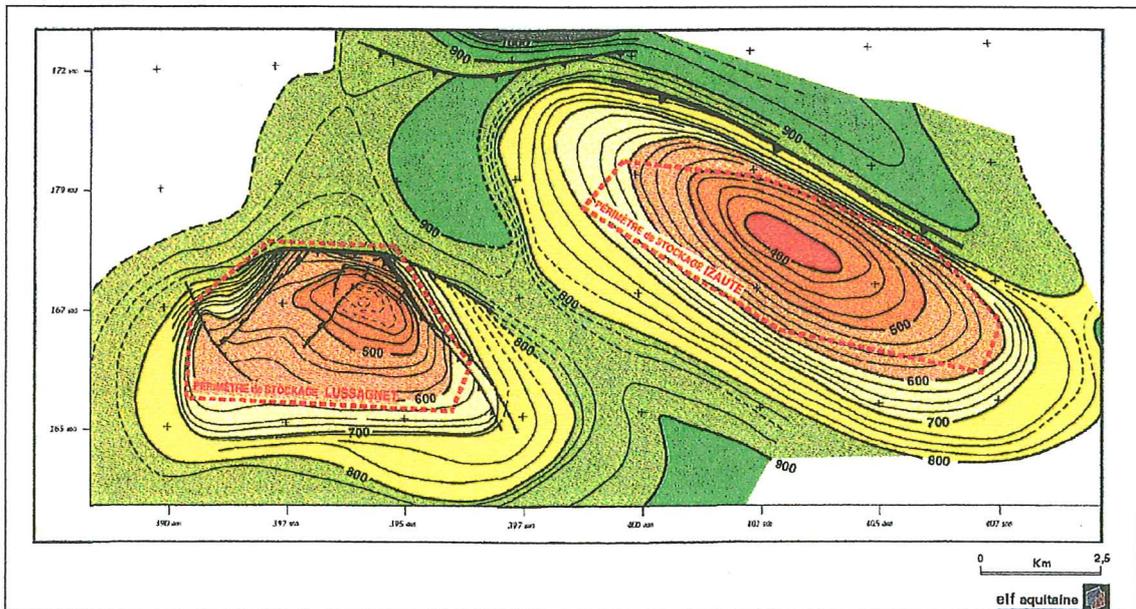


Figure I.5 : cartes en isobathes au toit des sables sous-molassiques de la structure de Lussagnet

Sur Izaute, le schéma structural est issu de l'interprétation de 3 lignes sismiques et de l'implantation de 25 puits. Le stockage se présente comme une structure dissymétrique d'axe N145°, bordée au Nord par un synclinal de direction N145° tournant à N90° dans la partie Nord-

Ouest. Le flanc Sud est un monoclinale faiblement penté. Le flanc septentrional est recoupé par une faille inverse à vergence Nord de direction N145°. La structure culmine à -380 mNGF.

Le réservoir est constitué, dans les deux cas, par la formation dites des « Sables Sous-molassiques » d'âge régional Eocène inférieur (Yprésien) à Eocène moyen (Lutétien). Il repose sur les « Grès à Nummulites » d'âge Yprésien. La couverture des stockages est assurée par les formations continentales argilo-calcaires plus ou moins gréseuses de la « Molasse d'Armagnac ».

L'étude des carottes prélevées sur 13 puits à Lussagnet et 1 puits sur Izaute, ainsi que l'analyse séquentielle des diagraphies sur l'ensemble des puits des deux stockages ont permis de reconstituer la séquence de sédimentation et de comprendre l'architecture des réservoirs gréseux (Mathis *et al*⁷¹, 1991 ; Chevallier *et al.*²⁸, 1992). La succession des dépôts sur les stockages correspond au passage d'un milieu marin (grès à Nummulites) à un milieu continental (molasse d'Aquitaine), avec pour principales étapes de bas en haut :

- tout d'abord, la sédimentation de barres sableuses dans un contexte littoral ou deltaïque à l'aplomb des structures. Elles constituent la meilleure partie du réservoir avec des porosités atteignant 25 % ;
- puis la continentalisation des dépôts. Les caractéristiques réservoirs des sables apparaissent dégradées par de la kaolinite ;
- enfin la mise en place de la molasse, vers le sommet du réservoir, dans un environnement de dépôts lacustres à palustre de plaine d'inondation, entrecoupés de chenaux.

Ce cadre structural et sédimentaire localisé au droit des stockages s'inscrit dans un système géologique régional qui sera plus amplement décrit au chapitre suivant.

I.2.3. Caractéristiques techniques essentielles

Le volume maximum atteint avant l'hiver 1996/1997 fut de $1,6 \cdot 10^9$ m³(n) sur Lussagnet et de $2,3 \cdot 10^9$ m³(n) sur Izaute. Le volume soutiré fut de $0,52 \cdot 10^9$ m³(n) sur Lussagnet et de $0,83 \cdot 10^9$ m³(n) sur Izaute, soit dans chacun des cas, approximativement un tiers du volume injecté.

La pression dans la bulle est limitée pour ne pas entraîner la migration du gaz à travers la couverture molassique. Elle dépend de la profondeur du réservoir et des pressions de déplacement mesurées sur les échantillons de la couverture en cellule oedométrique. Les pressions maximum autorisées en condition de fond sont de 76,2 bars sur Lussagnet et de 71,8 bars sur Izaute.

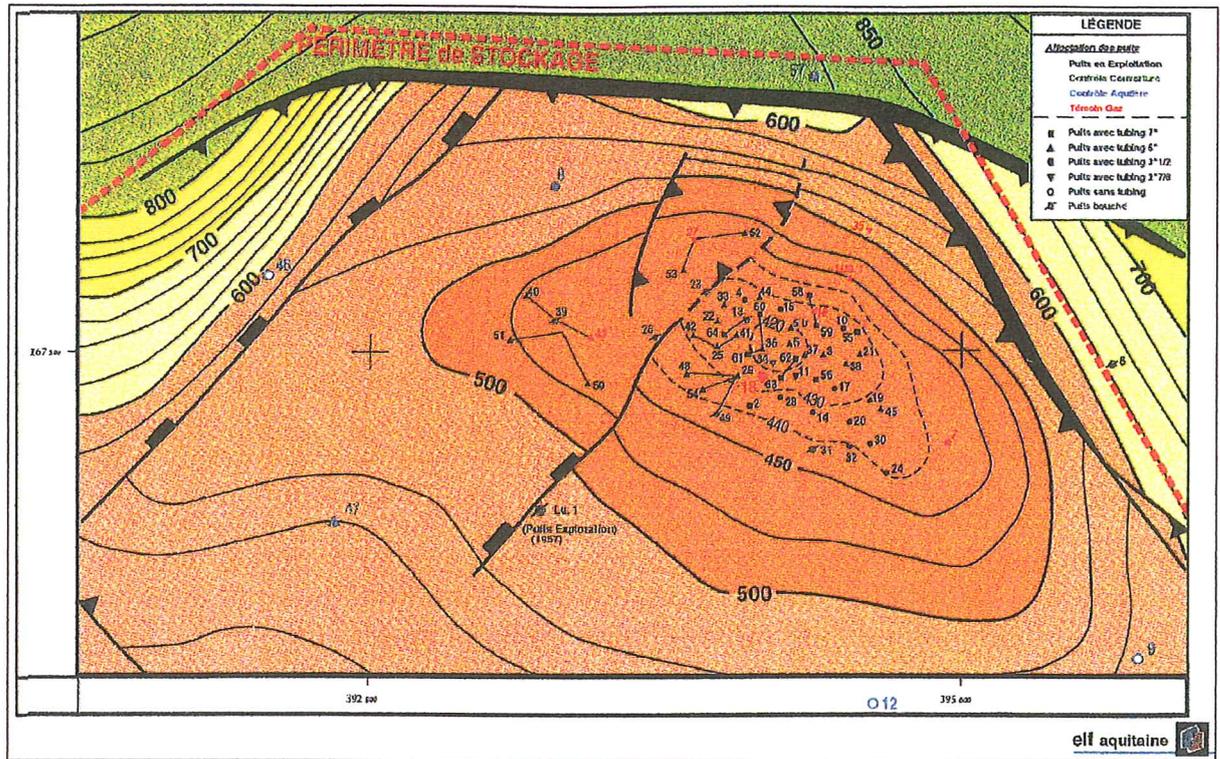


Figure I.6 : structure de Lussagnet (isobathes au toit des sables sous-molassiques - détail)

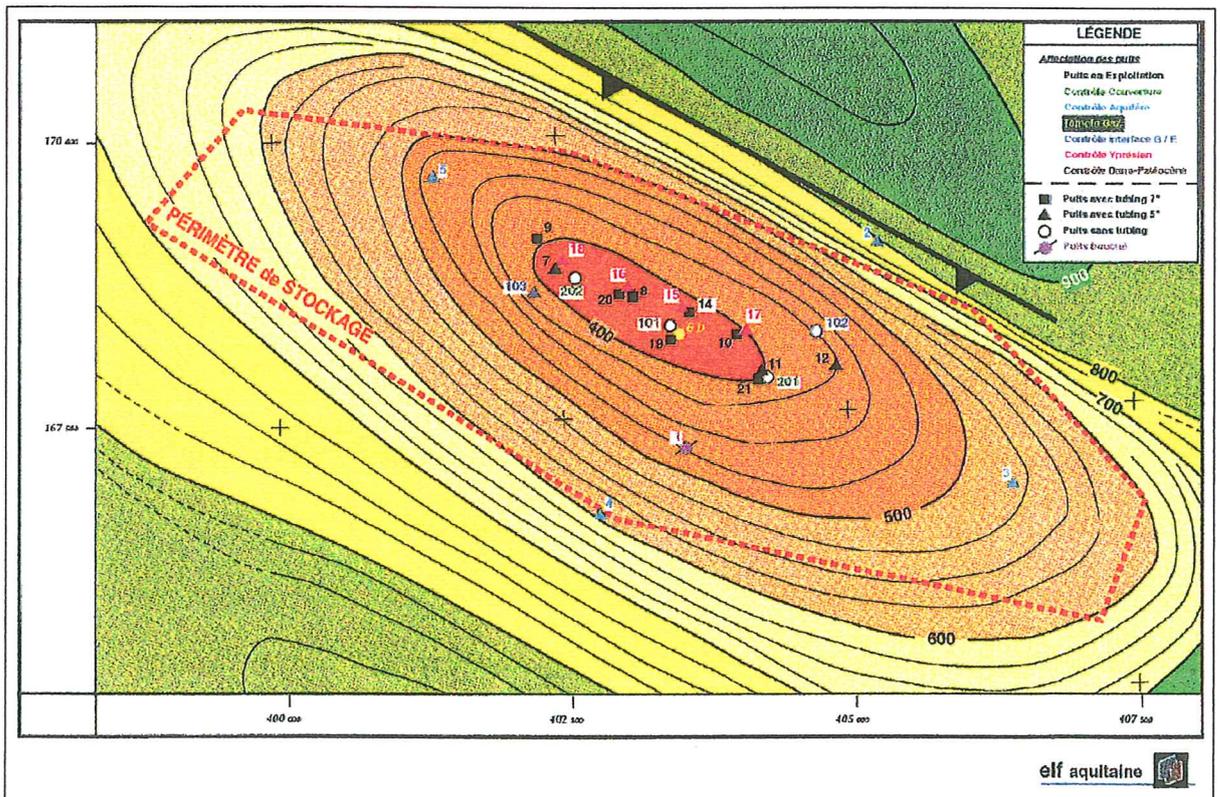


Figure I.7 : structure d'Izaute (isobathes au toit des sables sous-molassiques - détail)

Les équipements des stockages en aquifère comprennent des puits dits « d'exploitation » consacrés aux injections et aux soutirages de gaz dans le réservoir. D'autres puits dits « de

contrôle » assurent la surveillance de l'interface eau - gaz, le contrôle de l'étanchéité de la couverture. Dans le détail, le dispositif d'exploitation des deux stockages se compose donc (figures I.6 et I.7) :

- de puits d'injection et de soutirage dans le réservoir des Sables Sous-molassiques (44 puits sur Lussagnet, 10 puits sur Izaute),
- de puits de contrôle de la position de l'interface gaz/eau qui permettent de suivre l'évolution du gaz dans la structure grâce à des mesures de diagraphies neutroniques (2 puits sur Izaute),
- de puits de contrôle de la pression dans la bulle de gaz (6 puits sur Lussagnet, 1 puits sur Izaute),
- de puits de contrôle de l'étanchéité de la couverture (2 puits sur Lussagnet, 2 puits sur Izaute),
- de puits de contrôle périphérique de l'aquifère sous-molassique (7 puits sur Lussagnet, 4 puits sur Izaute),
- de puits de contrôle de l'aquifère sous-jacent (1 puits sur Izaute).

Cet imposant dispositif de surveillance ne peut observer que l'environnement immédiat des stockages. Il doit être complété par un réseau plus lâche implanté dans l'aquifère utilisé par les stockages.

1.2.4. Cadre hydrogéologique

Le réservoir des stockages est l'aquifère régional dit des « Sables sous-molassiques » qui occupe toute la partie centrale du Bassin Aquitain. Il s'insère dans un ensemble hydrogéologique complexe, englobant plusieurs aquifères plus ou moins interconnectés à la faveur de structures et/ou de discordances sédimentaires.

L'exploitation de cet aquifère profond est diversifiée. En plus des stockages souterrains de gaz, elle concerne l'alimentation en eau potable, l'irrigation, le thermalisme, la géothermie. Une gestion convenable doit donc prendre en considération les interférences éventuelles avec les autres utilisateurs du sous-sol.

I.3. Cycles de stockage et fluctuations régionales induites

I.3.1. Fonctionnement des stockages

Après une période de remplissage assez longue souvent supérieure à 5 ans, l'exploitation des stockages se caractérise par une succession de cycles d'injection et de soutirage. Un cycle se compose (figure I.8) :

- d'une phase d'injection en été, d'avril à septembre, pendant laquelle le gaz est injecté dans le réservoir. La pression dans le réservoir augmente progressivement pour atteindre environ 76 bars au toit des sables à Lussagnet et 72 bars à Izaute, tandis que l'eau est refoulée à la périphérie ;
- d'une phase de soutirage en hiver, d'octobre à mars, pendant laquelle le gaz est récupéré en tête de puits, pour être envoyé sur le réseau après son traitement et un rééquilibrage des pressions. Cette phase s'accompagne d'une baisse de la pression de fond et d'un déplacement de l'eau qui vient réoccuper la partie des pores précédemment envahie par le gaz.

A Lussagnet et Izaute, les bonnes caractéristiques hydrogéologiques du réservoir des sables sous-molassiques, dans lequel est stocké le gaz, permettent de disposer chaque hiver d'un « stock utile » qui représente environ 45 % du stock total, le reste du stock constituant le « gaz coussin ».

I.3.2. Impacts possibles des stockages

Schématiquement, le développement puis l'exploitation d'un stockage de gaz naturel est susceptible d'entraîner deux sortes de conséquences sur les aquifères concernés.

I.3.2.1. Modification du champ de pression

Les impacts vis-à-vis de la nappe peuvent relever de phénomènes mécaniques. L'injection d'une quantité importante de gaz accompagnée progressivement d'une exploitation cyclique du stockage va modifier le régime hydrodynamique des aquifères profonds. Les pressions en tête ou les niveaux piézométriques des divers puits pourront évoluer avec une amplitude dépendant de l'aquifère intercepté, de son anisotropie et de la localisation géographique des ouvrages (Meunier⁷⁶, 1995).

Dans les zones où ces couches aquifères affleurent une modification du débit naturel des sources ou, de façon moins perceptible, des rivières qu'elles alimentent, est envisageable. De même une variation du régime des pressions pourra également amener des transferts d'un aquifère à un autre. Ainsi une partie limitée de ce qui peut être considéré comme une ressource à long terme pourra quitter son lieu de stockage naturel.

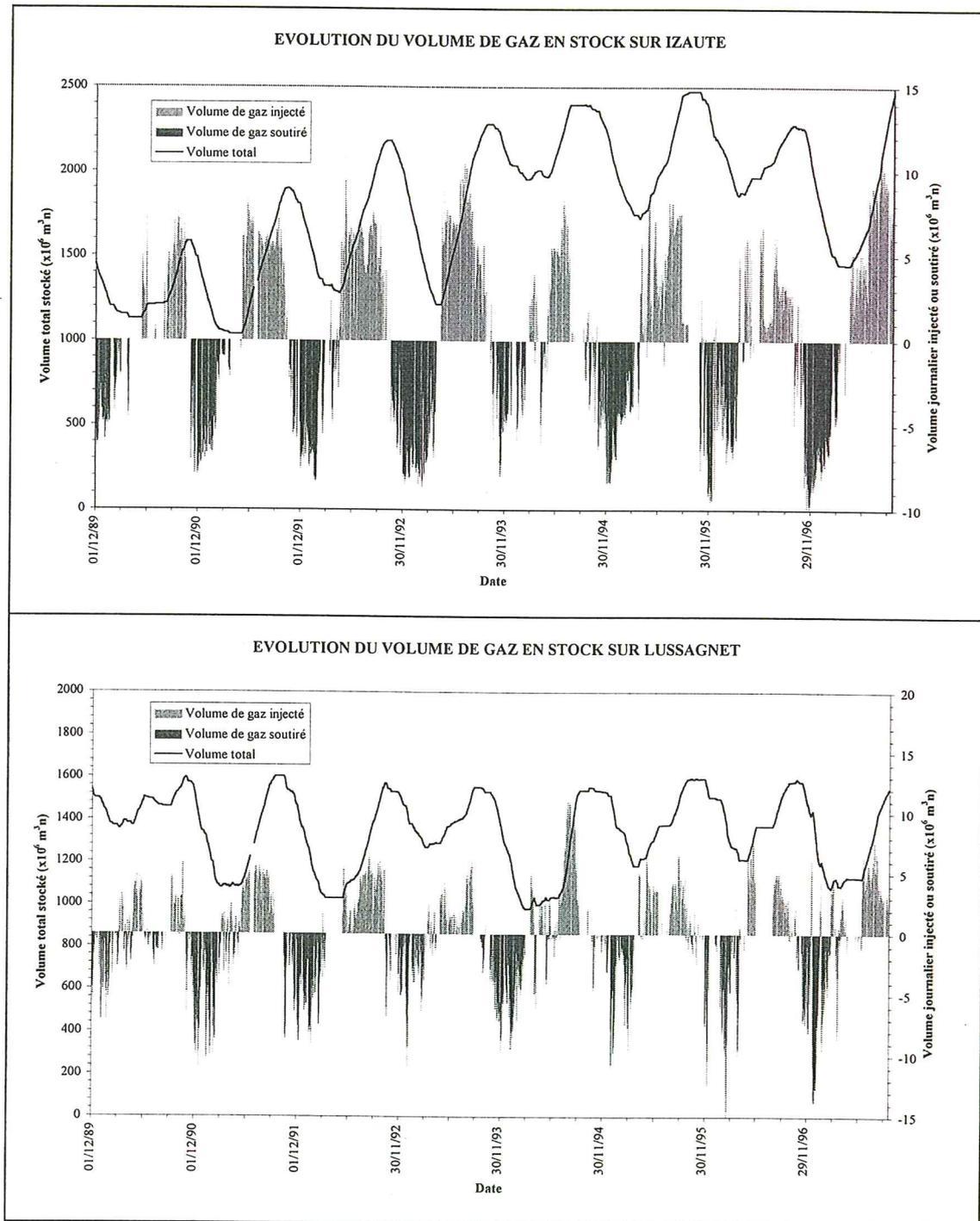


Figure I.8 : évolution du volume de gaz en stock sur Izaute et Lussagnet

Généralement, la continuité et les bonnes caractéristiques du réservoir de stockage impliquent une « réactivité » de l'aquifère à l'échelle régionale qui s'accompagne d'une propagation d'une onde de pression provoquée par les modulations de volume des stockages. Centrée sur le stockage, l'onde va s'atténuer avec la distance pour devenir négligeable au-delà de « l'aire d'influence des stockages », zone définie par les relevés de pression où l'on constate des battements supérieurs à ± 5 m en phase avec la périodicité des stockages.

La montée en pression de la nappe peut compenser la baisse liée à l'augmentation régulière des prélèvements pour des besoins agricoles et domestiques, et améliorer ainsi la productivité de certains ouvrages. Mais dans le cas de la remontée du niveau piézométrique, une inondation est envisageable dans les zones d'affleurements de l'aquifère.

Au contraire, les fortes évolutions annuelles de la piézométrie avec un minimum très marqué peuvent conduire à l'assèchement temporaire de certaines sources ou à l'arrêt de production de certains puits. Un dispositif de suivi piézométrique à l'échelle régionale doit donc être défini, permettant de contrôler en temps réel les évolutions effectives et de prendre les mesures correctrices éventuellement nécessaires au niveau de l'exploitation des stockages.

1.3.2.2. Modifications physico-chimiques et phénomènes de transport

L'exploitation des stockages peut également être à l'origine de perturbations physico-chimique de la qualité de l'eau de l'aquifère.

Avec une composition chimique relativement constante (95 % de méthane en moyenne), le gaz naturel est considéré comme peu réactif vis-à-vis de l'eau contenue dans l'aquifère. Cependant diverses modifications physico-chimiques sont à attendre sur de très longues périodes dans la zone de stockage ; la principale étant la solubilisation du méthane et son transport par les circulations des nappes aquifères à échéance de plusieurs centaines de siècles (Meunier ⁷⁶, 1995 ; Sauvagnac & Ledoux ⁸⁹, 1989). Les éventuelles conséquences physico-chimiques directement liées au gaz stocké ne pourront donc être physiquement ressenties en dehors du périmètre de protection des stockages qu'à très longue échéance.

Dans la zone d'influence des stockages, la propagation des variations de pression liées aux cycles d'injection et de soutirage se réalise à une échelle de temps beaucoup plus courte : quelques mois à quelques années pour des distances de quelques dizaines de kilomètres selon les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères concernés. Directement liées à ces gradients de pression, les circulations forcées entre aquifères peuvent engendrer des mélanges d'eaux de qualités différentes.

Prévenir une pollution de l'eau par le stockage de gaz nécessite de préciser la composition du gaz injecté, d'analyser les mécanismes qui interviennent dans le transport de masse et de vérifier l'absence d'altération ou de modification des caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques des eaux dans le pourtour des stockages. Un dispositif de suivi qualitatif doit donc être implanté en complément du réseau de surveillance piézométrique.

I.3.3. Dispositif de suivi

Au delà du strict périmètre des stockages qui regroupe les puits de suivi de la bulle de gaz et de qualité de l'eau ainsi que les puits d'exploitation, le réseau de surveillance s'étend sur une zone comprise entre 20 et 40 km autour des stockages d'Izaute et de Lussagnet (Lebas & Thomas ⁶³, 1995) qui correspond à la zone d'influence des stockages (figure I.9).

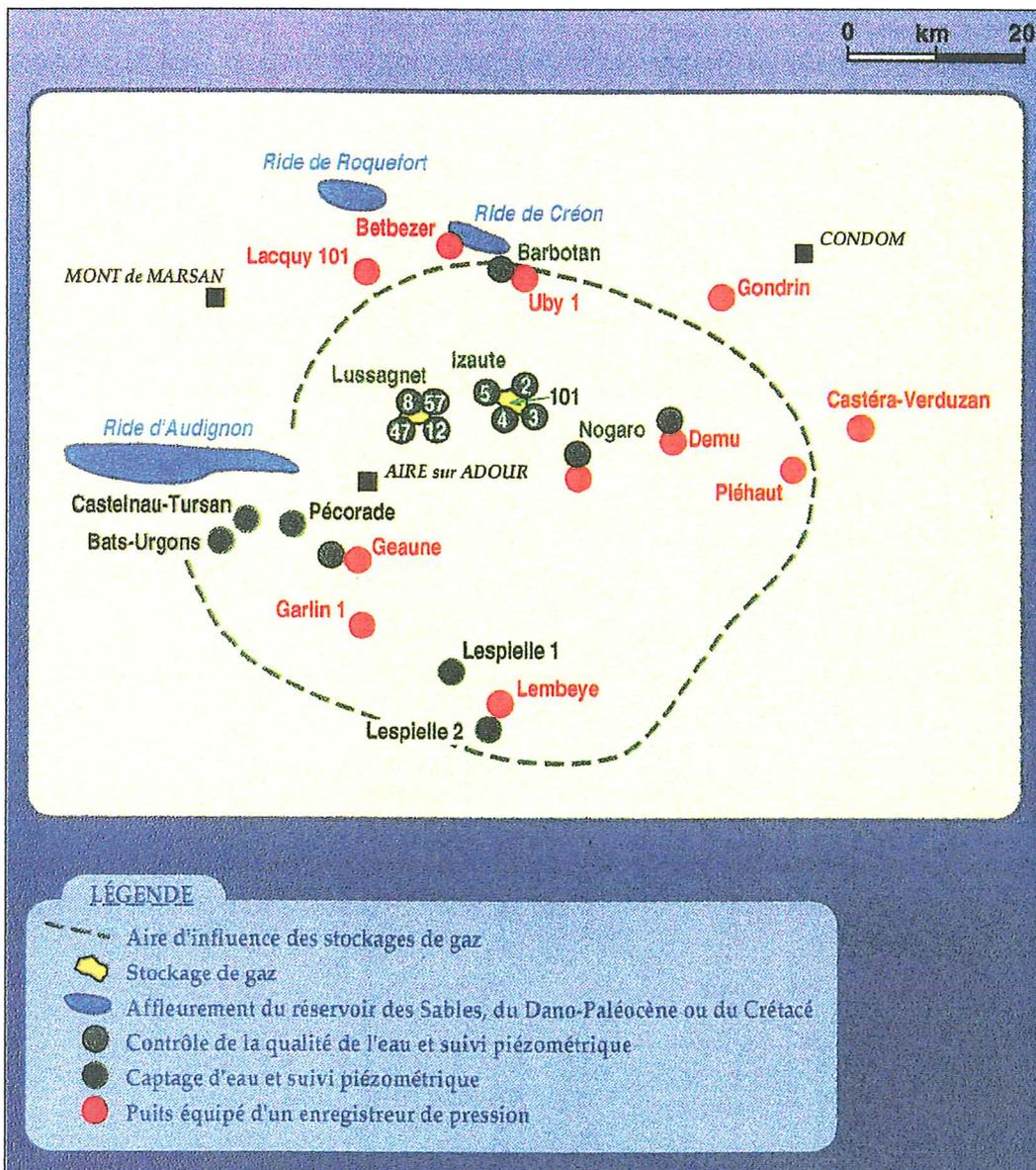


Figure I.9 : zone d'influence observée des stockages et réseau de surveillance

Ce réseau doit être évolutif : il doit intégrer les nouveaux puits forés dans la zone d'influence et substituer tel ou tel puits dont la fonction peut changer à l'intérieur du périmètre.

De nos jours, le dispositif de surveillance comporte 35 puits pour le suivi de l'aquifère (tableau I.2). Parmi ceux-ci, qui enregistrent toutes les variations piézométriques, 13 sont plus particulièrement utilisés pour les analyses qualitatives régulières, 9 dans le périmètre de stockage, 4 dans la zone d'influence.

Puits	Nature des contrôles	Pression à -380m/NM	Cote piézo. (m.NGF)	Cote interface gaz/eau	Analyses laboratoires			Observations
					Bordeaux	Labège	Lacq	
Réservoir exploité (Lutétien)								
IZA 6bis	Témoin gaz	Hebdomadaire						Alerte 58,8 bars abs
IZA 12	Frange eau	Hebdomadaire			Annuelle	Semestrielle	Semestrielle	si artésianisme
LUG 46	Frange eau				Annuelle	Semestrielle	Semestrielle	si artésianisme
IZA 102 et IZA 103	Neutron	Manuelle		Permanent				3 campagnes de mesures
Réservoir inférieur inexploité (Yprésien)								
IZA 15		Manuelle						Alerte sur présence gaz
IZA 17		Manuelle						
Couverture stockage Izaute								
IZA 201	Contrôle	Hebdomadaire						Alerte sur anomalie
IZA 202	étanchéité	Hebdomadaire						
Aquifère régional infra-molassique								
Périphérie IZAUTE								
IZA 2	Piézomètre				Annuelle	Semestrielle	Semestrielle	
IZA 3	Piézomètre				Annuelle	Semestrielle	Semestrielle	Alerte sur présence gaz
IZA 4	Piézomètre				Annuelle	Semestrielle	Semestrielle	
IZA 5	Piézomètre				Annuelle	Semestrielle	Semestrielle	
Périphérie LUSSAGNET								
LUG 57	Piézomètre	Hebdomadaire			Annuelle	Semestrielle	Semestrielle	Alerte sur présence gaz
LUG 47	Captage	Hebdomadaire			Annuelle	Semestrielle	Semestrielle	
Région NORD								
Uby	Piézomètre		Enregistreur					
Taureau	Piézomètre		Enregistreur					
B102 ou B103	Captage		Hebdomadaire		Annuelle	Annuelle	Annuelle	
Geyser 1	Piézomètre		Hebdomadaire					
Laiterie	Piézomètre		Hebdomadaire					
Région EST								
Nogaro 1	Piézomètre		Enregistreur					
Nogaro 2	Captage				Annuelle	Semestrielle	Semestrielle	
Dému	Captage		Enregistreur		Annuelle	Annuelle	Annuelle	
Castéra-Verduzan 2	Captage		Enregistreur					
Gondrin	Captage		Enregistreur					
Région SUD								
Garlin	Captage		Enregistreur					
Région OUEST / SUD-OUEST								
Geaune 1	Piézomètre		Manuelle					
Geaune 2 ou 3	Captage		Manuelle		Annuelle	Annuelle	Annuelle	
Pécorade 101	Captage		Hebdomadaire					
Castelnau-Tursan	Captage		Manuelle					
Bats-Urgons	Captage		Enregistreur					
Aquifère Dano-Paléocène								
IZA 101	Piézomètre		Enregistreur				Semestrielle	

Tableau I.2 : réseau de surveillance de l'aquifère sous-molassique

Dans la zone de stockages, les puits de contrôle aquifères sont au nombre de 8, 4 sur chaque stockage : piézomètres IZA02, 03, 04, 05 sur Izaute et LUG09, 12, 46, 57 sur Lussagnet. Ils permettent de suivre l'évolution piézométrique de l'aquifère dans le pourtour immédiat de la bulle

de gaz. Les enregistrements piézométriques montrent un signal pseudo-sinusoïdal de période annuelle dont l'amplitude varie, selon les années, de 90 à 110 m (figure I.10) au droit des stockages.

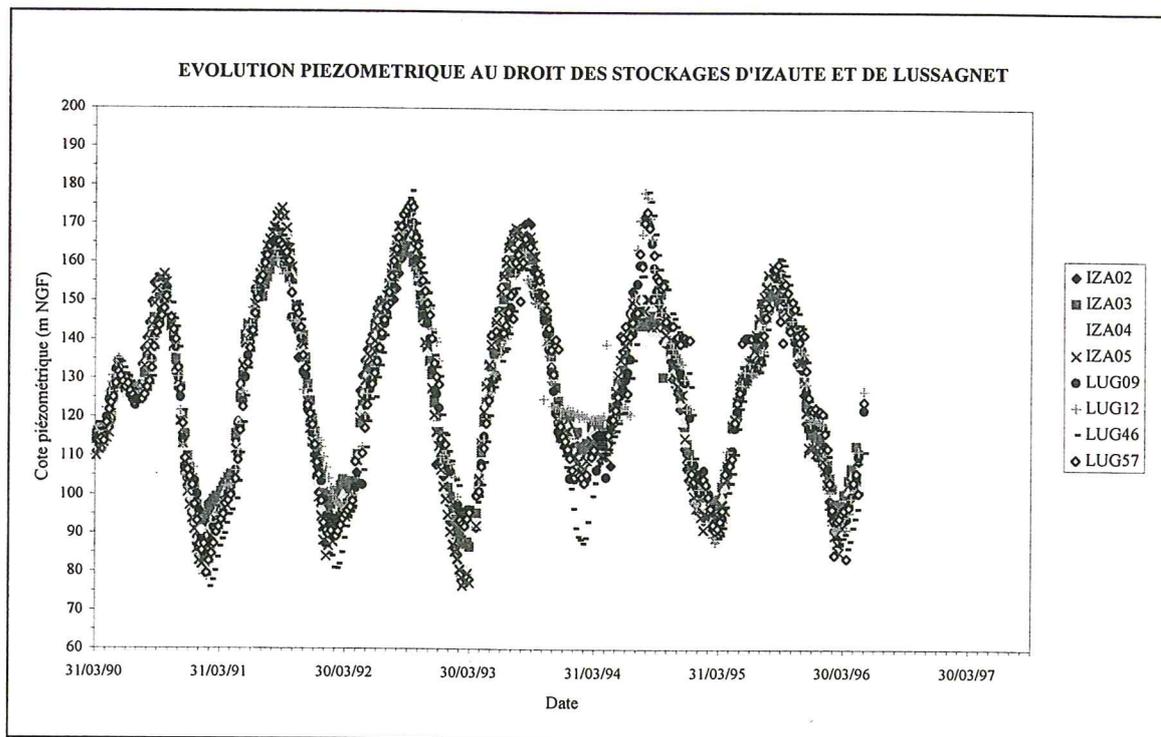


Figure I.10 : évolution piézométrique au droit des stockages d'Izaute et de Lussagnet

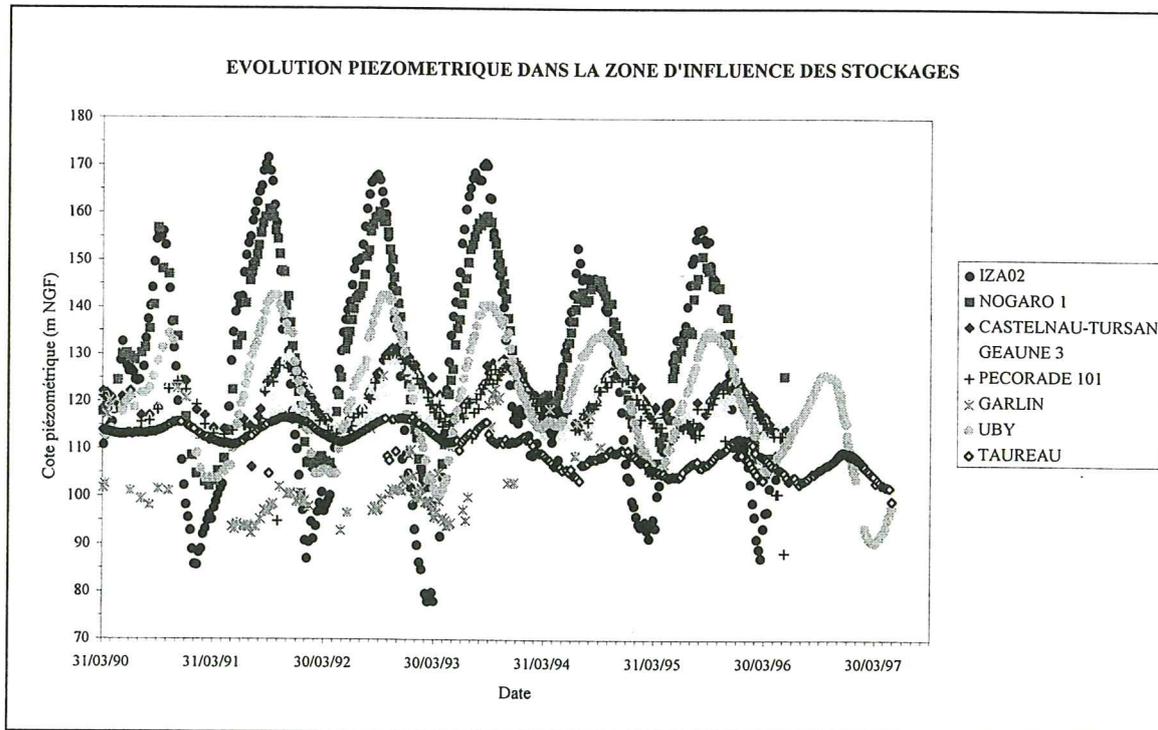


Figure I.11 : évolution piézométrique dans la zone d'influence des stockage

Régionalement, les piézomètres vont enregistrer un signal périodique dont l'amortissement et le retard seront fonction de la distance aux stockages et des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère, en particulier de sa diffusivité (figure I.11). Ainsi un maximum piézométrique peut être observé avec un retard de 2 à 6 semaines (selon les années) au Nord des stockages au piézomètre Uby situé à une vingtaine de kilomètres des stockages, tandis que le décalage atteindra 3 à 4 mois à la station thermale de Barbotan, distante de 1 km de Uby. Dans la région Sud-Ouest de la zone d'influence, le décalage est en moyenne de 2 à 3 mois.

La zone d'influence des stockages intègre deux structures géologiques où soit les sables sous-molassiques, soit les grès à Nummulites, sont proches de l'affleurement. A une vingtaine de kilomètres au Nord-Est des stockages, le réservoir des sables est amené en surface le long de la structure de Barbotan. L'affleurement se situe dans une cuvette où est installée une très ancienne activité thermale.

A l'Ouest des stockages, l'anticlinal d'Audignon amène en surface des horizons aquifères profonds (éocène et dano-paléocène). Les affleurements constituent des points d'émergence potentiels de ces nappes qui alimentent des sources, exploitées pour certaines à la station thermale d'Eugénie-les-Bains, ou se déversent dans le réseau hydrographique de la structure d'Audignon (rivière le Bahus...).

Ces deux structures géologiques sont des sites où les manifestations de l'influence des stockages peuvent se traduire par des résurgences dues aux surpressions. Elles doivent donc faire l'objet d'une surveillance particulière.

I.4. Modélisation géologique et hydrogéologique

Le Bassin Aquitain est en majeure partie recouvert par les formations récentes néogènes et quaternaires. Cette couverture sédimentaire a été pendant de nombreuses années un obstacle à l'étude de l'histoire géologique du bassin, les géologues devant se contenter alors des affleurements de terrains plus anciens sur la bordure Nord-Est et en de rares points de la partie centrale du bassin. Ces affleurements ont fait l'objet d'études géologiques de détails par plusieurs auteurs. Les ouvrages de Abrard ¹ (1948) et Daguin ^{35,36} (1941 ; 1948) résument l'ensemble de ces travaux et proposent une synthèse partielle de la géologie régionale.

Durant les années 40, la découverte des gisements gazifères et pétrolifères de la bordure Nord-pyrénéenne motiva la prospection profonde de l'Aquitaine. En 1972, un millier de forages et plusieurs dizaines de milliers de kilomètres de profils sismiques permirent enfin d'esquisser une synthèse géologique régionale (Kieken ⁵⁷, 1973 ; BRGM *et al.* ¹⁹, 1973).

C'est également à cette époque que des synthèses hydrogéologiques, plus ou moins détaillées, furent menées à l'échelle du Bassin d'Aquitaine (Lavigne & Marionnaud. ^{62,68}, 1968 ; Kühn *et al.* ⁵⁹, 1969 ; Kieken & Marionnaud ⁵⁸, 1972 ; Astié *et al.* ⁶, 1972 ; Housse & Maget ⁵², 1977). Elles ont permis d'identifier les principales nappes profondes, quelques caractéristiques hydrodynamiques et de proposer un schéma hydraulique cohérent de la région, dont les bases furent jetées dès 1969 par Vouve, Cazal, Plaud, Pouchan ¹⁰⁰ (1969). En 1984 et pour le compte d'Elf Aquitaine, le BEICIP (Bureau d'Etudes Industrielles et de Coopération de l'Institut français du Pétrole) mena une synthèse régionale concernant la nappe aquifère éocène en vue d'une modélisation hydrodynamique (BEICIP ⁹, 1984).

I.4.1. Histoire géologique sommaire à l'échelle régionale

Du Crétacé supérieur au Tertiaire, une sédimentation turbiditique de bassin flexural puis intra-continental prédomine dans le Bassin Aquitain. Pendant ce laps de temps, la mobilité structurale du bassin et l'avancée des chevauchements ont pour principale conséquence la migration des évaporites triasiques vers la surface, créant ainsi de nombreuses structures au centre du Bassin Aquitain. Les faciès décrits ci-après concernent la partie centrale du bassin, aux environs des stockages de gaz (figure I.12) (Le Marrec *et al.* ⁶⁶, 1995).

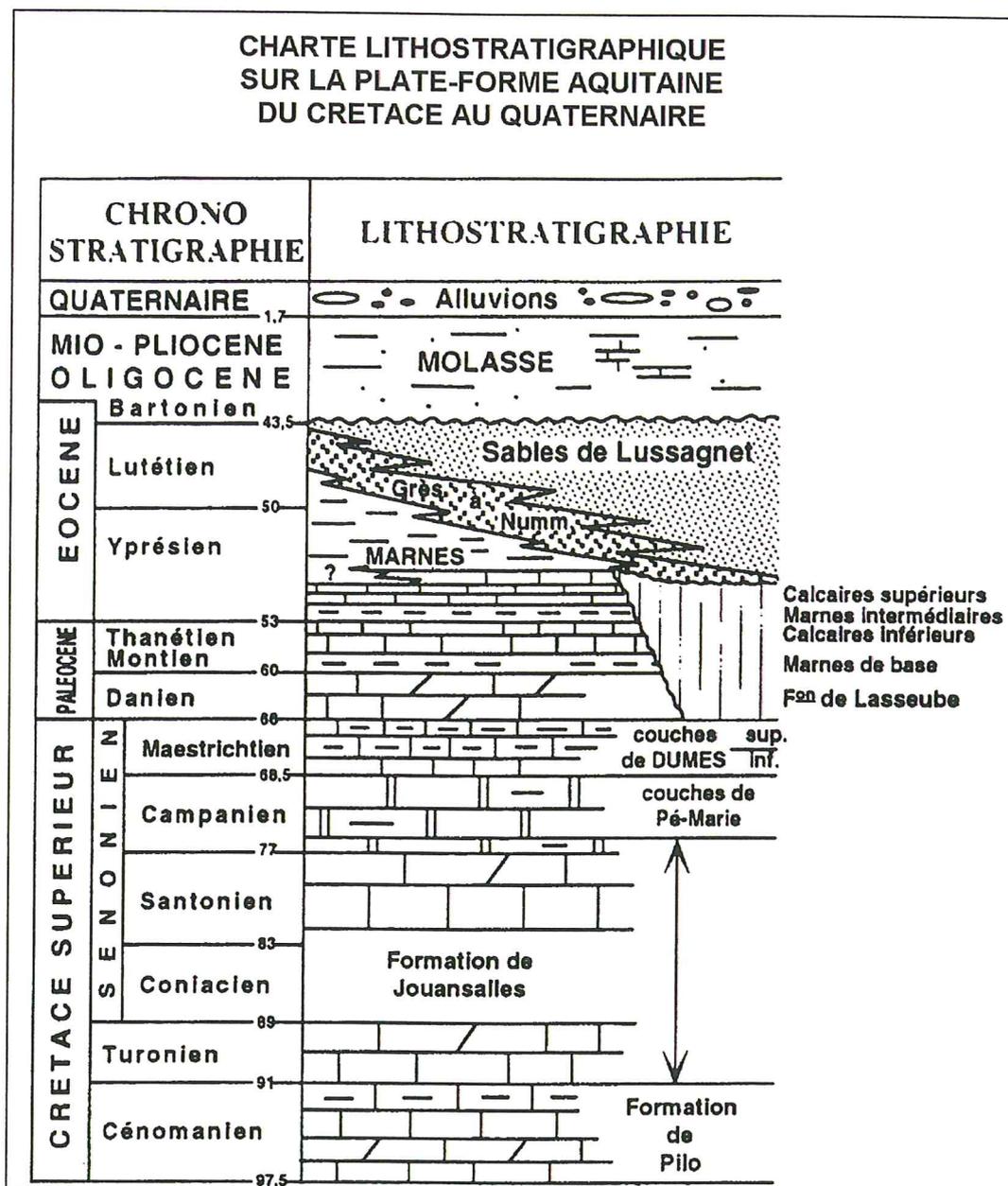


Figure I.12 : chartre lithostratigraphique sur la plate-forme aquitaine (d'après Le Marrec et al. ⁶⁶, 1995)

I.4.1.1. Crétacé supérieur (Cénomanién - Maestrichtien)

Du Cénomanién au Sénonien inférieur, une transgression marine recouvre la totalité de l'Aquitaine, ne laissant émerger à l'Est qu'un môle (Agen, Auch, Limoux) en bordure du Massif Central.

La paléogéographie marque deux domaines distincts. L'ensemble du bassin est constitué d'une large plate-forme carbonatée (figure I.13), tandis que s'individualisent deux zones profondes, héritées des sillons d'effondrement amorcés au Crétacé inférieur. Des séries marno-calcaires vont s'y succéder suivies par de très épaisses formations de type flysch :

- au Sud, dans le sillon sous-pyrénéen,
- à l'Ouest, dans le bassin de Parentis.

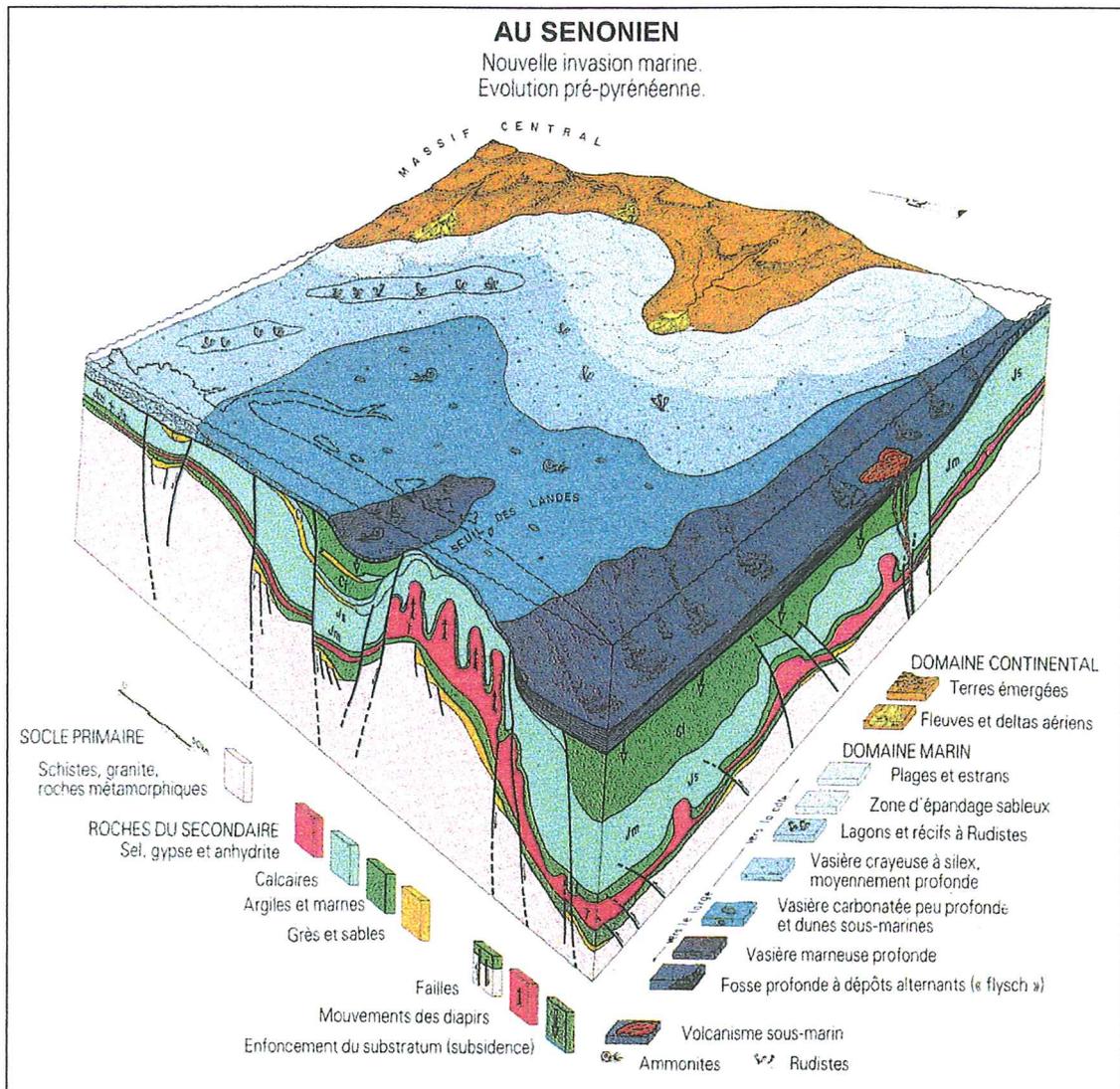


Figure I.13 : paléogéographie du bassin aquitain au Crétacé supérieur (d'après document ANDRA-BRGM, sans référence)

Dans la partie centrale du Bassin Aquitain, les dépôts de plate-forme du Cénomaniens se composent d'une épaisse série calcaréo-dolomitique, localement marneuse, caractérisée par la présence d'Orbitolines et de Préalvéolines (« formation de Pilo ») (figure I.12).

Du Turonien au Santonien, la plate-forme s'étend plus largement ; la formation de Jouansalles s'y dépose avec des faciès grainstones bioclastiques pouvant être localement dolomitisés et acquérant des propriétés réservoirs. En même temps la bordure septentrionale de la fosse flysch s'élargit vers le Nord pour atteindre la limite actuelle dite du Front Nord Pyrénéen.

La paléogéographie précédente de type plate-forme se répète au Campanien. Dans la zone étudiée, les dépôts de cet étage se caractérisent par la formation de Pé-Marie correspondant à un calcaire marneux accompagné de silex fréquents et de glauconie.

Au cours du Maastrichtien, la sédimentation s'uniformise graduellement sur l'ensemble du bassin avec des dépôts exclusivement marneux : couches de Dumes sur la plate-forme et marnes de Nay dans la fosse flysch (figures I.12 et I.13). Le schéma sédimentaire du Sénonien supérieur correspond donc à une progradation Est - Ouest qui s'accompagne d'un comblement progressif du bassin.

I.4.1.2. Tertiaire

Au début du Tertiaire, la paléogéographie est marquée par la mise en place d'une fosse au Sud avec des sédiments de type flysch et la prédominance d'une plate-forme carbonatée au Nord (figure I.14).

Au cours du Dano-Paléocène, la sédimentation se limite à une surface réduite au Sud du bassin, ne dépassant pas au Nord une ligne Arcachon - Toulouse (« flexure celtaquitaine »). Des zones de non-dépôt ou d'érosion existent localement au droit des structures du Bas-Adour et de la structure de Roquefort. Un faciès continental lacustre et/ou palustre occupe les parties orientales et septentrionales du bassin. Au Sud-Ouest, un faciès marin de plate-forme se maintient pendant qu'une sédimentation profonde de type flysch se poursuit dans le sillon sous-pyrénéen avec quelques séquences carbonatées plus importantes à la base (« calcaires de Lasseube ») (figures I.12 et I.15).

Dans le secteur Garlin-Audignon-Mont-de-Marsan, un faciès calcaréo-dolomitique se maintient durant tout le Dano-Paléocène (figure I.15). Reconnues à l'affleurement sur l'anticlinal d'Audignon, les couches d'Arcet et de Houns constituent des dépôts à tendance récifale qui témoignent de la position haute de la structure durant cette période. Ces faciès de plate-forme passent brutalement à des séries marneuses vers le Sud du bassin puis à des séries flyschs à l'approche du sillon sous-pyrénéen. Ces dépôts, comme ceux de l'Eocène, se répartissent selon des directions imposées par les alignements structuraux.

L'Yprésien est marqué par la tectonique pyrénéenne qui se traduit par un soulèvement et une émergence des Pyrénées centrales et orientales ainsi qu'un exhaussement du Massif Central. Au cours de cette période, le Bassin Aquitain se compartimente suite à l'élévation des axes structuraux (St Gaudens-Pau, Audignon-Louer-Magesq, Villagrain-Landiras) et une recrudescence de l'halocinèse, créant ainsi des synclinaux de plus en plus prononcés (Tarbes - Arzacq - Bas-Adour).

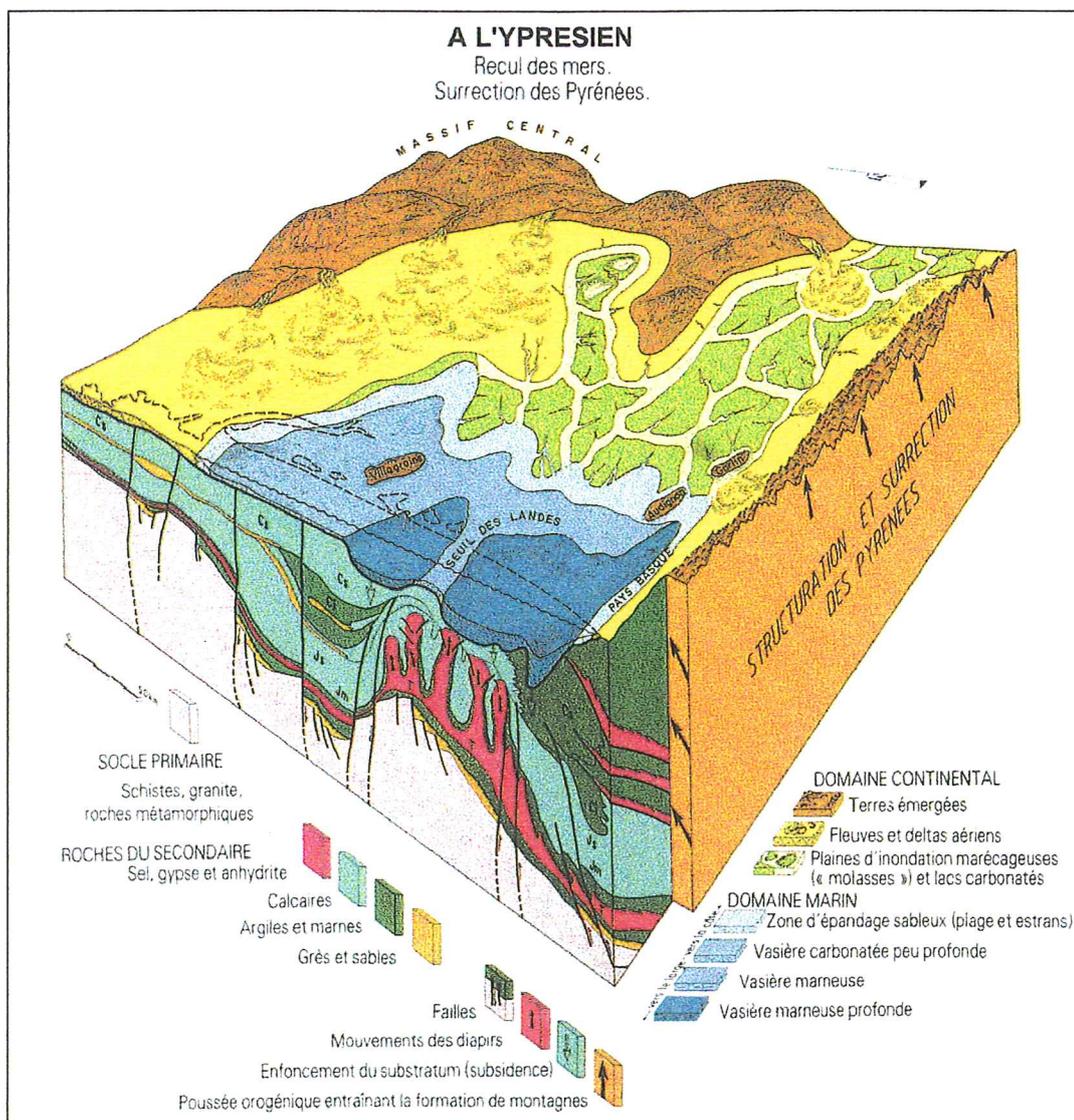


Figure I.14 : paléogéographie du bassin aquitain à l'Eocène (d'après document ANDRA-BRGM, sans référence)

La paléogéographie est progressivement modifiée. L'organisation des faciès orientée N110° au Paléocène va basculer pour se développer selon une direction méridienne. Un système progradant Est - Ouest s'installe ainsi sur la plate-forme et comble progressivement le sillon Nord-pyrénéen (figure I.14).

Des sédiments continentaux constitués de sables et d'argiles s'étendent dans la moitié orientale du Bassin Aquitain. Dans la région paloise, à Bosdarros, les premiers dépôts sont des grès à Nummulites accompagnés d'une faune cuisienne. L'ensemble est couronné par des horizons sableux dont l'âge a donné lieu à de multiples controverses. La faune citée montre qu'ils appartiennent encore au Cuisien et qu'ils correspondent à des faciès côtiers. Mais ces mêmes horizons sableux se retrouvent dans les nombreux forages situés à l'Est et au Nord de Pau, dans ceux de Garlin, de Lussagnet (figure I.15) et dans ceux implantés sur le périclinal Est de la

structure d'Audignon ; dans cette dernière zone, ils se placent entre les marnes cuiisiennes et des calcaires à galets de quartz attribuables à l'Eocène moyen. Les auteurs de la synthèse géologique considèrent finalement que ces sables représentent le terme régressif du cycle Eocène inférieur. Plus à l'Ouest, ces sables passent à des calcaires gréseux et des marnes de plate-forme puis à des marnes pélagiques.

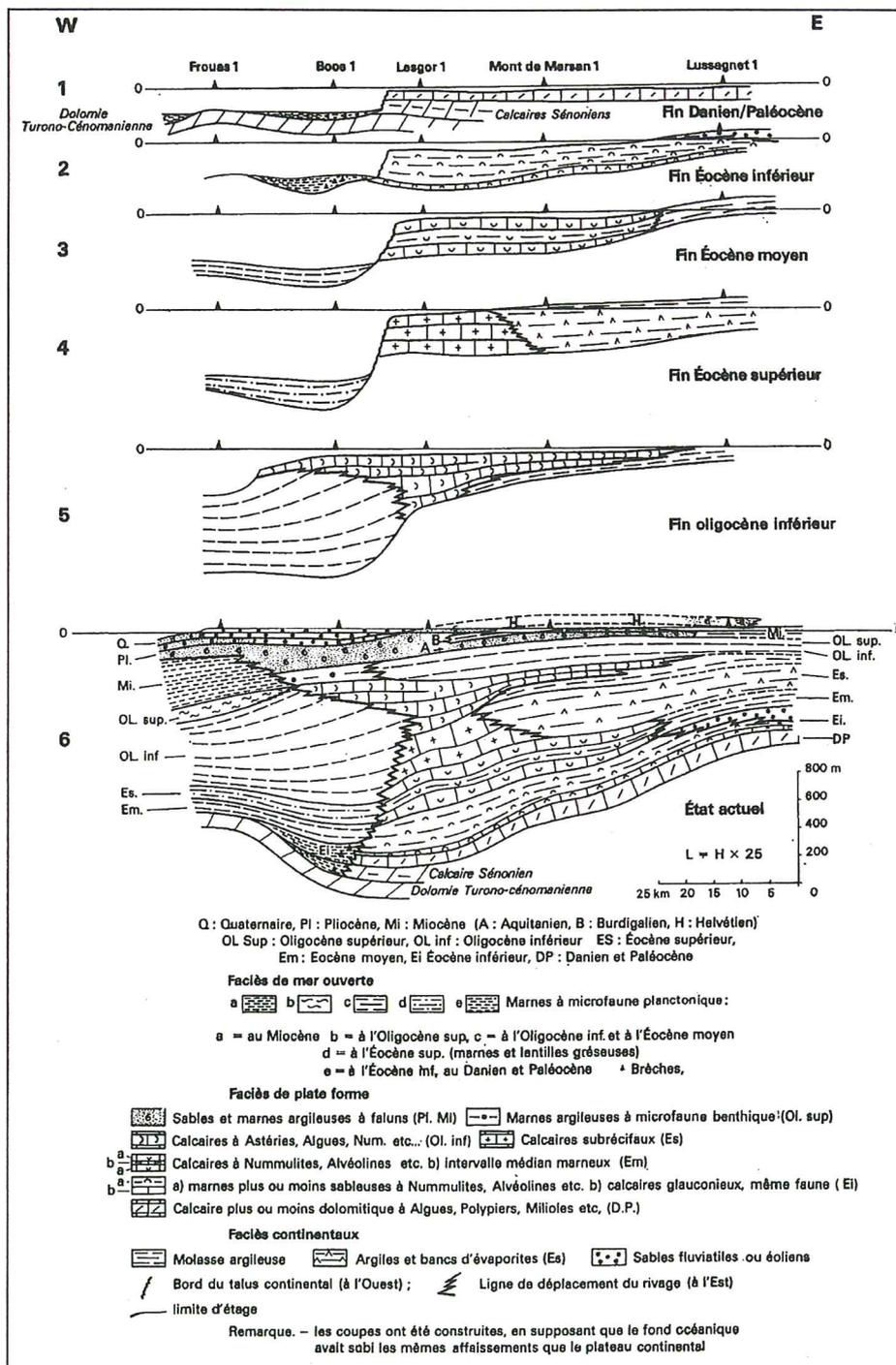


Figure I.15 : évolution du Bassin Aquitain au cours du Tertiaire (d'après Kieken⁵⁷, 1973)

Durant le Lutétien, l'érection pyrénéenne atteint son paroxysme. Elle s'accompagne d'un comblement du bassin par des sédiments continentaux hétérogènes de type marno-gréseux

désignés sous le nom de «Molasse» qui vont occuper toute la partie orientale du bassin. Le soulèvement des Pyrénées fournit un important matériel détritique accumulé dans la puissante série des « Poudingues de Palassou » (série inférieure).

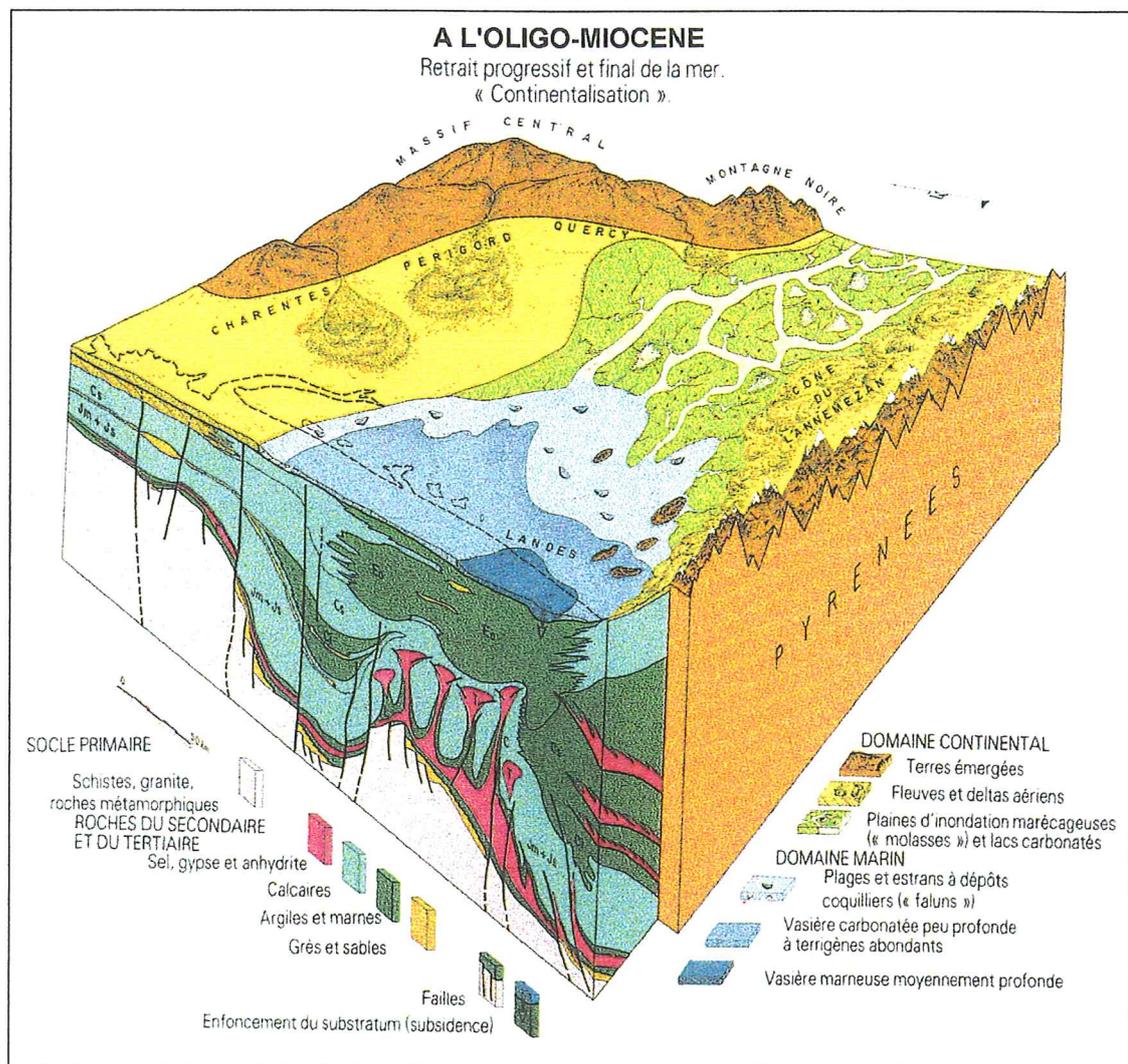


Figure I.16 : paléogéographie du bassin aquitain à l'Oligo-Miocène (d'après document ANDRA-BRGM, sans référence)

La plate-forme lutétienne se cantonne à l'Ouest d'une direction sub-méridienne passant par Mont-de-Marsan. Les faciès les plus internes sont représentés par des marno-calcaires et des calcaires riches en grands foraminifères benthiques ; ce sont les couches de Nousse, les couches dites « à grandes Nummulites », et les couches de la grotte de Brassempouy, connues en surface sur le flanc Sud-Ouest de l'anticlinal d'Audignon. En progressant à l'Ouest, vers le domaine de mer ouverte, le faciès calcaire disparaît peu à peu et fait place à des marnes à microfaune planctonique (figure I.15).

Durant le Bartonien, le territoire couvert par le domaine marin est de plus en plus restreint. Les faciès molassiques persistent dans la partie orientale du bassin et s'avancent vers l'Ouest. Ces faciès continentaux font latéralement place à des dépôts calcaires gréseux. Les faciès molassiques peu développés n'envahissent cette zone qu'à l'Oligocène (figure I.16), recouverts rapidement par du Miocène marin.

1.4.2. Cadre structural régional

A la fin du Crétacé, la géométrie du bassin est relativement simple : la plate-forme carbonatée occupe une grande partie de l'Aquitaine et correspond à un ensemble subtabulaire entaillé au Nord par le sillon de Parentis et au Sud par la fosse sous-pyrénéenne qui sont comblés par des sédiments progradants.

Mais le modelé structural de la base du Tertiaire est en réalité plus complexe et témoigne de déformations qui ont eu lieu au cours du Tertiaire. Les géologues (Kieken⁵⁷, 1973 ; BRGM *et al.*¹⁹, 1973) ont discerné trois panneaux structuraux sur la carte en isobathes de la base du Tertiaire (figure I.17) :

- un panneau Nord limité par le seuil du Poitou, le Massif Central et la flexure celtaquitaine qui se caractérise par un ensemble monoclinale peu structuré, avec des pendages faibles vers le Sud-Ouest et des séries peu épaisses ;
- un panneau médian localisé entre le panneau précédent et une ligne passant par Magescq, Audignon, Mirande, Carcassonne. Ce panneau complexe comporte un secteur Ouest fortement subsident qui est limité à l'Est par un axe Belin-Louer. Le secteur oriental est un compartiment plus homogène avec un gradient vers l'Ouest. La limite Sud de ce panneau est marquée par des failles à fort rejet qui ont été identifiées par la sismique réflexion sur le flanc Nord des anticlinaux de Magescq et Audignon ;
- un panneau Sud ou « sillon pré-pyrénéen » dont la limite méridionale correspond approximativement au Front Nord Pyrénéen. C'est un compartiment particulièrement subsident où l'halocinèse a été active durant le Tertiaire.

Selon la carte en isobathes de la base du Tertiaire, l'ensemble structural aquitain se caractérise par une succession d'antiformes et de synformes orientés selon deux directions principales (figure I.18) : l'une Est - Ouest selon laquelle s'allongent, par exemple, les anticlinaux de Villagrains - Landiras, de Roquefort, d'Audignon et de Meillon ; l'autre Nord-Ouest - Sud-Est représentée par les ride de Brocas - Bordères, d'Izaute, de St Médard, de Garlin et de Lacq, mais aussi les synclinaux de Mirande, d'Arzacq et de Tarbes.

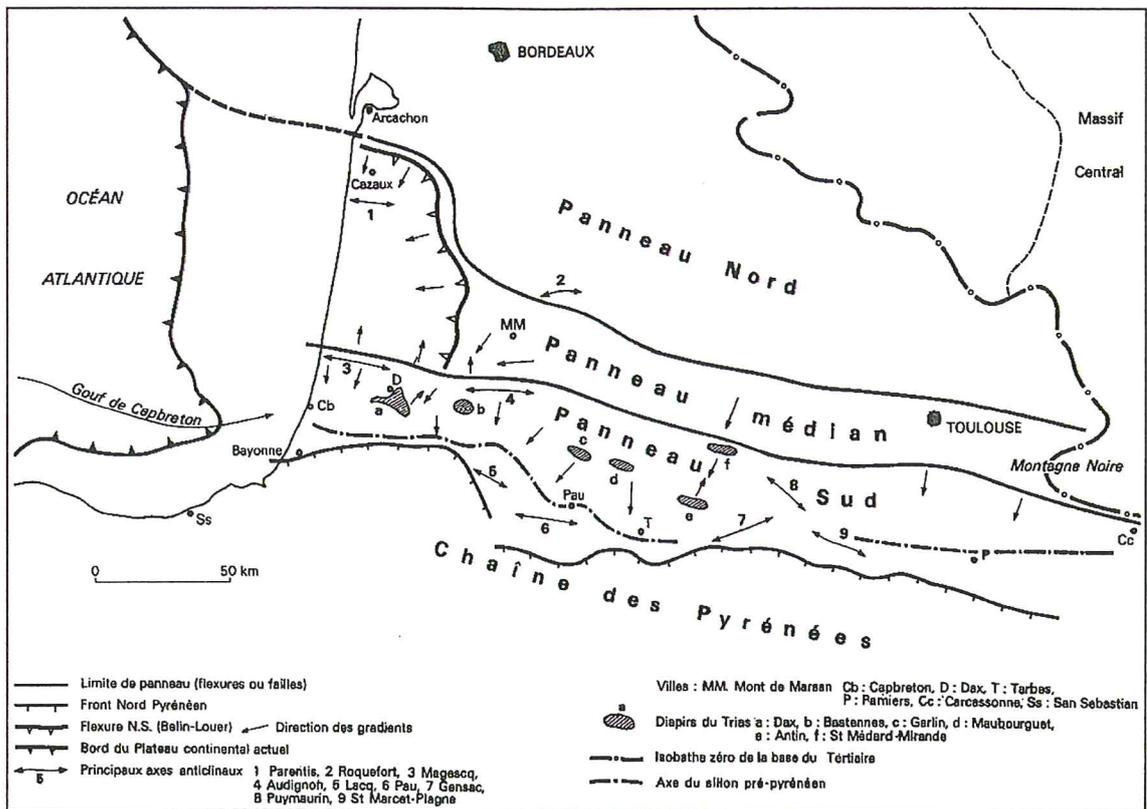


Figure I.17 : schéma structural de la base du Tertiaire (d'après Kieken⁵⁷, 1973)

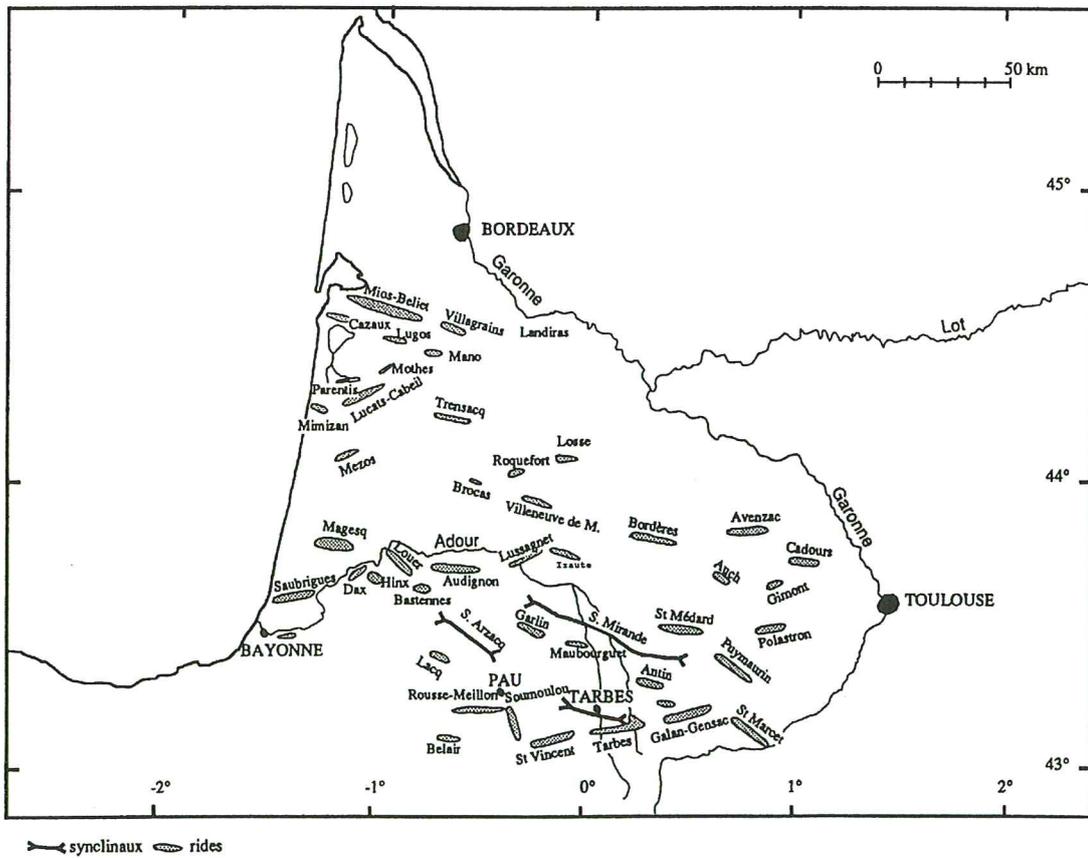


Figure I.18 : toponymie des principaux bassins et ride de l'Aquitaine (d'après Brunet²¹, 1991)

La coexistence de ces deux directions est essentiellement liée au polyphasage de l'histoire tectonique du bassin sous l'influence pyrénéenne et aux héritages structuraux anciens (hercynien à crétacé).

I.4.3. Cadre hydrogéologique régional

Les premières synthèses hydrogéologiques en Aquitaine (Mengaud ⁷⁵, 1941 ; Astié & Bourgeois ⁵, 1966 ; Vouve *et al.* ¹⁰⁰, 1969) ont dénombré huit aquifères séparés par des niveaux imperméables et dont les âges s'étendent du Jurassique au Plio-Quaternaire. A l'échelle du bassin, ces auteurs ont montré qu'à la faveur de contacts sédimentaires et par l'intermédiaire de formes structurales, ces aquifères sont interconnectés (figure I.19). Ainsi c'est autour de l'important aquifère éocène, présent sur l'ensemble du Bassin Aquitain que s'est construit le concept d'un aquifère multicouche unique. En général les aquifères du Bassin Aquitain sont subdivisés en :

- aquifères de surface et semi-profonds avec de haut en bas les aquifères des sables plio-quaternaires, du Miocène et de l'Oligocène,
- aquifères profonds avec ceux de l'Eocène, du Dano-Paléocène et du Crétacé.

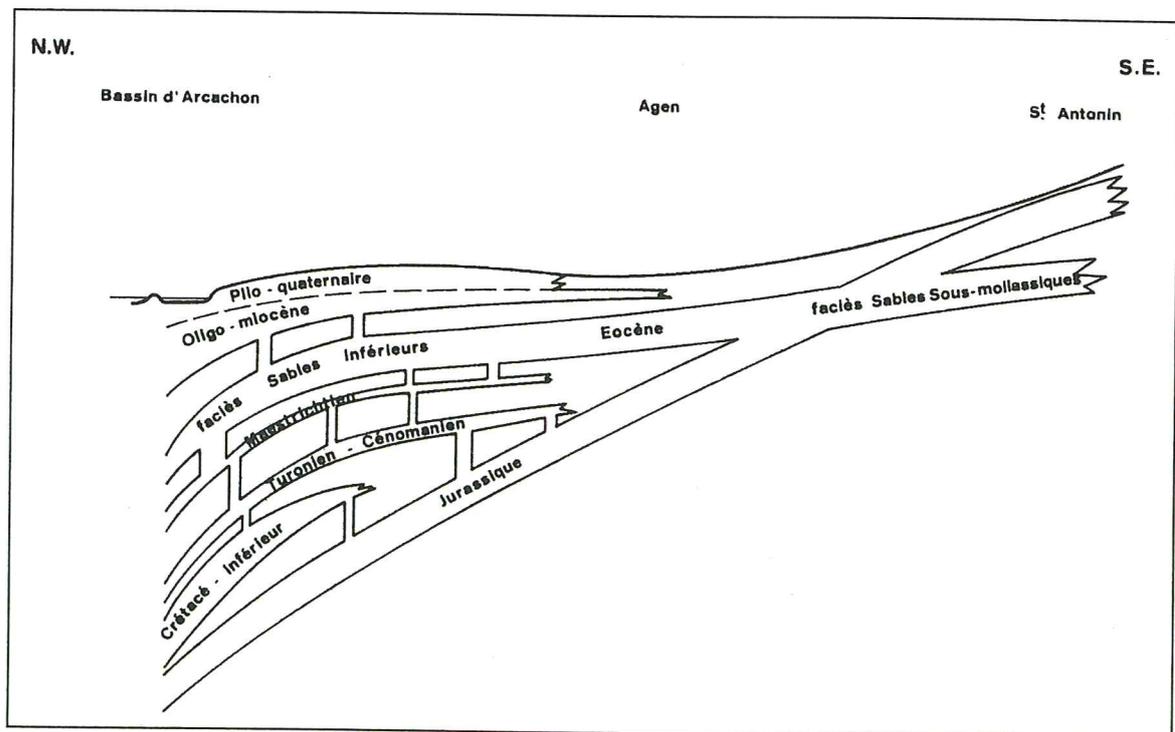


Figure I.19 : schéma multicouche des aquifères interconnectés karstiques et poreux perméables dans le Bassin Aquitain (d'après Vouve *et al.* ¹⁰⁰, 1969)

Les aquifères profonds sont relativement mal connus car les données hydrogéologiques (piézométrie, caractéristiques hydrauliques, hydrochimisme) sont issues de la recherche pétrolière

et essentiellement concentrées au droit des structures géologiques. Elles font défaut dans les parties profondes du bassin.

1.4.3.1. Aquifère Eocène des sables sous-molassiques

Extension - faciès

L'aquifère le plus étendu du Bassin Aquitain est celui de l'Eocène. Il occupe toute la partie centrale du Bassin, à l'Est d'une ligne Pau - Mont de Marsan - Langon, représenté par un faciès détritico sableux (« Sables sous-molassiques ») ou gréseux (« Grès à Nummulites »). A l'Ouest de cette ligne, l'aquifère est à dominante carbonatée. La limite entre les deux faciès passe en bordure des structures d'Audignon (périclinal Est) et de Créon (périclinal Ouest) (figure I.20).

Géométrie - affleurements

A la lumière des cartes d'isobathes, d'isopaques et de faciès proposées par le BRGM et le BEICIP, il apparaît un réservoir hétérogène dont l'épaisseur varie de 50 m à plus de 200 m au Sud de la ride d'Audignon, dans le secteur de Geaune. De plus les faciès réservoirs subissent de rapides variations de profondeur du fait de l'existence de fosses et de rides. Le toit du réservoir varie donc de la cote +116 (Barbotan) à -1750 mNGF de profondeur (bassin d'Arzacq). Les affleurements sont situés sur la ride de Barbotan et dans les zones de bordure du Bassin (Quercy, Béarn - Bigorre et Petites Pyrénées).

Communications - zone d'échanges

Les structures géologiques jouent un rôle important dans les communications entre la nappe éocène et les nappes sus- et sous-jacentes. L'extension régionale de la couverture molassique ne permet que des communications réduites avec les aquifères sus-jacents. Entre les aquifères de l'Eocène et du Dano-Paléocène, des communications sont envisageables du fait de la discontinuité de la couverture imperméable yprésienne qui isole les deux réservoirs dans la majeure partie du bassin. Cette couverture est absente à l'Est d'Izaute, dans les secteurs de Roquefort et de Créon (figure I.21).

Piézométrie - zones d'alimentation

L'esquisse piézométrique de cette nappe captive des sables sous-molassiques met en évidence des côtes piézométriques plus élevées que celle des nappes oligocène et dano-paléocène, et un phénomène d'artésianisme dans les ouvrages captant. Ceci souligne l'individualité de ce système aquifère. L'évolution piézométrique indique une tendance générale à la baisse de pression dans cette nappe malgré la surpression liée aux stockages de gaz. Cette évolution s'explique par

Les cartes piézométriques proposées par différents auteurs (figure I.22) montrent un écoulement divergent : une partie du flux se dirige selon un axe de drainage parallèle à la Garonne vers le système Nord-Aquitain, l'autre partie suit un axe SE-NW passant par Roquefort et se dirigeant vers l'océan. Les zones d'alimentation de la nappe se répartissent sur les bordures du Bassin Aquitain :

- par les Petites Pyrénées (Guessab⁵¹, 1970) le flux est estimé à $12.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$;
- par les affleurements du Béarn et de la Bigorre (Pelissier-Hermitte⁷⁹, 1970), l'infiltration est évaluée à $15.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$, à laquelle viendrait s'ajouter l'alimentation par percolation au mur des principales nappes alluviales de la région (vallée du Gave de Pau, de l'Echez, de l'Adour) qui est estimée à $11.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$. Jusqu'à présent ces infiltrations étaient considérées comme négligeables car la nappe présentait des exutoires de trop-pleins. Mais l'exploitation croissante de la nappe éocène peut avoir inversé ces phénomènes ;

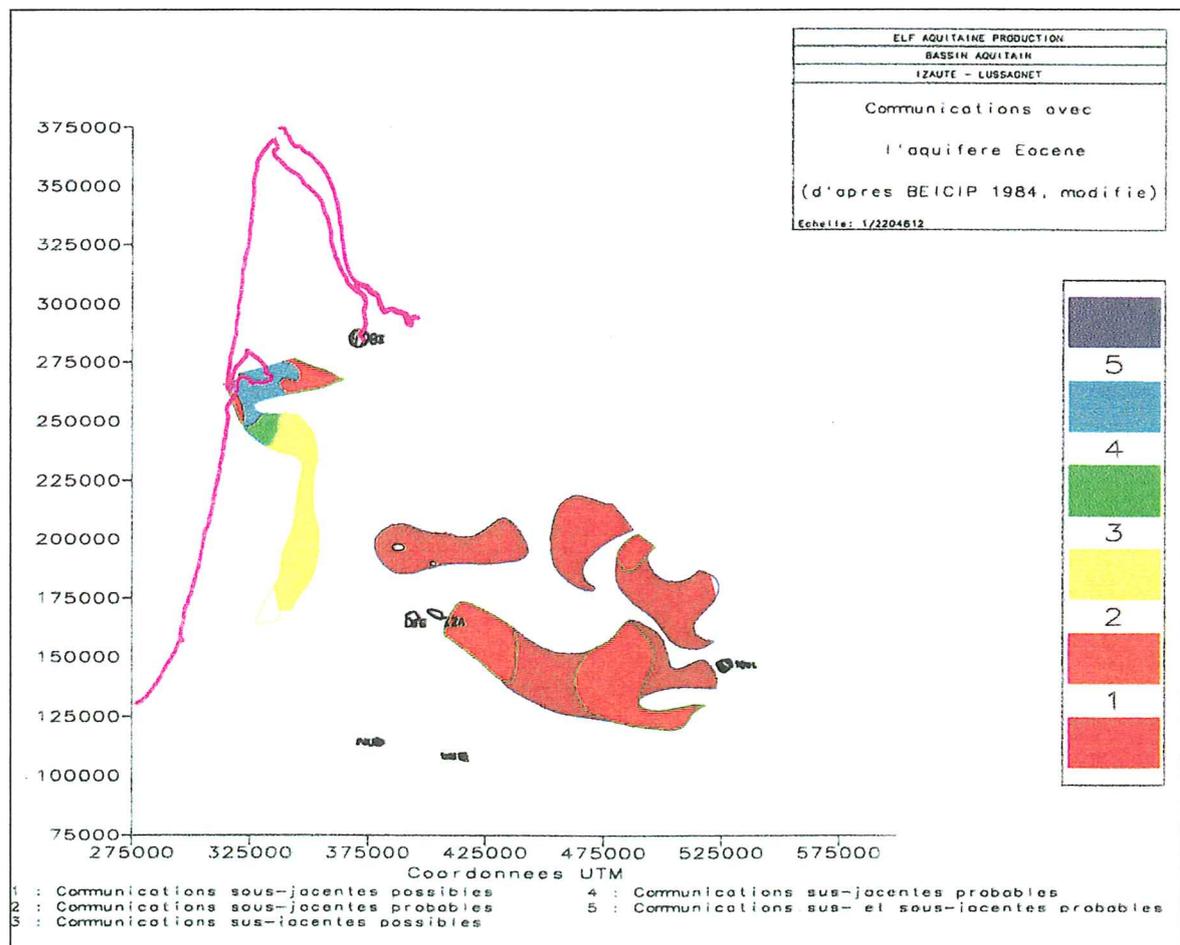


Figure I.21 : cartes des zones de communications entre aquifères (d'après BEICIP⁹, 1984)

- par la bordure orientale dans l'Albigeois et le Castrais, la capacité d'infiltration (et non l'infiltration réelle) a été estimée à $18.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ par une méthode de bilan hydrologique (Faugère⁴⁶, 1970) ;
- en bordure du Massif Central, les affleurements des sables du sidérolithique permettent l'infiltration de $25.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ (Le Gallic⁶⁵, 1966) qui sont totalement utilisés par les prélèvements de la région bordelaise ($> 50.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$).

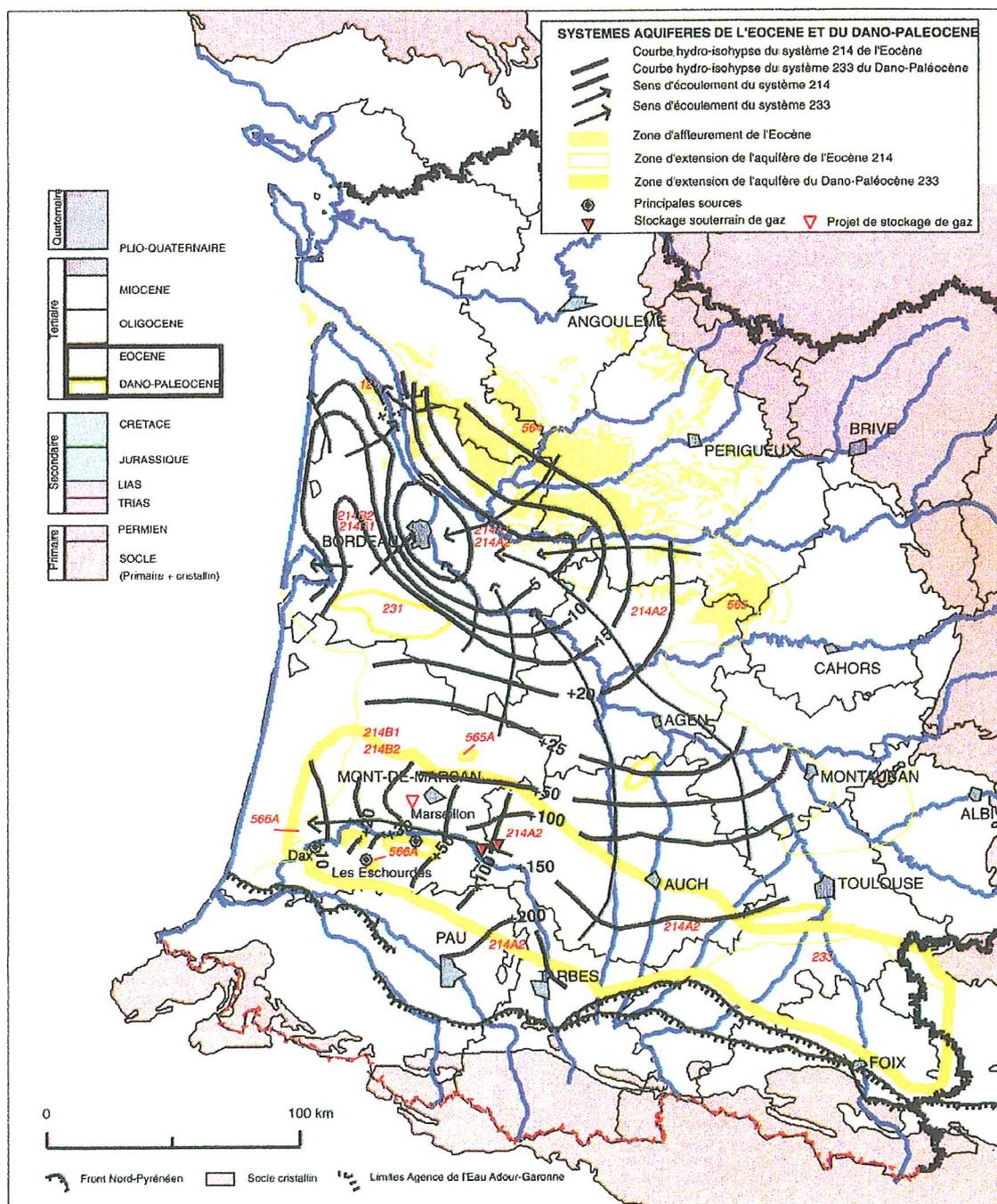


Figure I.22 : carte piézométrique (aquifère éocène) (d'après Mauroux & Danneville⁷², 1996)

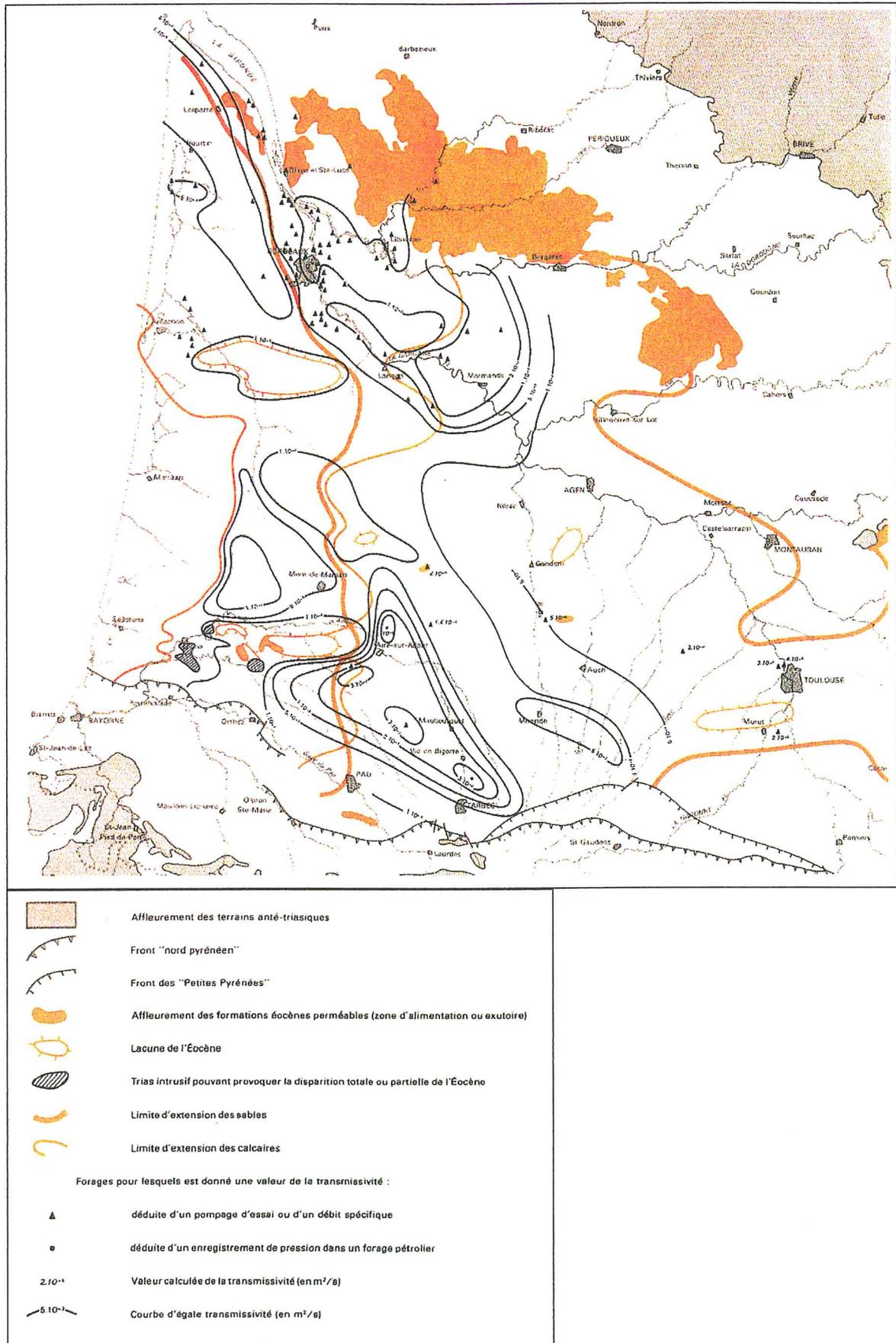


Figure I.23 : carte des transmissivités (aquifère éocène) (d'après Housse & Maget⁵², 1977)

Caractéristiques hydrodynamiques

Les cartes de répartition des transmissivités établies par Astié *et al.* ⁶ (1972), Housse & Maget ⁵² (1977) et BEICIP ⁹ (1984) indiquent des valeurs allant de 3.10^{-2} à 1.10^{-4} $m^2.s^{-1}$ (figure I.23). Elles soulignent la grande hétérogénéité du réservoir et les bonnes caractéristiques hydrodynamiques des formations sableuses orientales.

I.4.3.2. Aquifère Dano-Paléocène

Extension - faciès

Il se distingue de l'aquifère précédent par sa nature carbonatée et souvent dolomitique. Ce réservoir, décrit par Armand & Capdeville ³ (1992) et l'Institut de Géodynamique ^{53, 54} (1992) autour du site des Landes de Siougos, comprend une succession de niveaux calcaires aux qualités réservoirs variables selon l'importance de la dolomitisation.

Le réservoir présente une géométrie limitée par des variations latérales de faciès qui s'accompagnent d'une dégradation de ses propriétés. Son extension se fait selon une bande NW-SE (figure I.24).

Géométrie - affleurements

De la même manière que le réservoir éocène, l'aquifère dano-paléocène est affecté par des déformations structurales souples ou cassantes. Sa profondeur varie de l'affleurement (structure d'Audignon) à -2600 m dans les synclinaux du Bas-Adour pour des épaisseurs de la formation allant de 50 à 400 m. Les calcaires dolomitisés se réduisent en épaisseur en direction du Sud-Ouest.

Communications - zone d'échanges

Les relations avec l'aquifère sus-jacent ont été abordées précédemment (figure I.21). Dans la partie orientale du bassin, on peut penser que l'aquifère dano-paléocène communique largement avec celui des formations du Crétacé supérieur dans la majeure partie de sa zone d'extension, car aucune formation imperméable efficace ne les sépare (Armand & Capdeville ³, 1992). Localement la communication s'étend souvent jusqu'au Crétacé inférieur et même au Jurassique au droit des structures anticlinales (Créon) où elle peut être favorisée par le jeu des failles. En effet le long de la structure de Roquefort, il peut y avoir communication du Dano-Paléocène ici karstifié avec les calcaires de l'Albien sur le flanc Sud faillé.

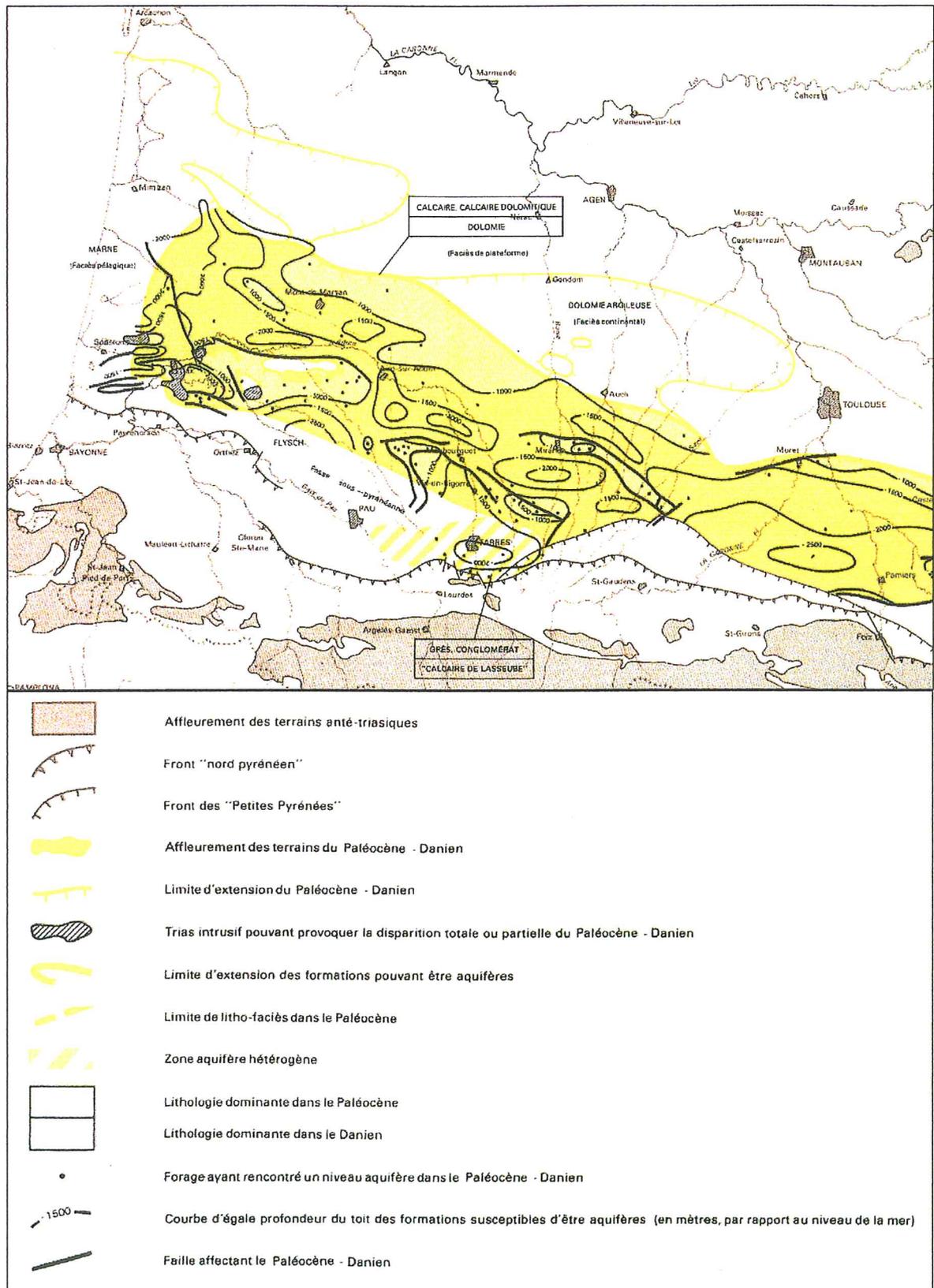


Figure I.24 : carte d'extension des faciès (aquifère dano-paléocène)
(d'après Housse & Maget⁵², 1977)

De même à la structure d'Audignon, le faisceau d'accidents du flanc Nord a favorisé la karstification des formations calcaires et dolomitiques. Les connexions avec le Crétacé supérieur paraissent évidentes notamment dans le périclinal Est (Pouchan⁸², 1986). Les formations du Maastrichtien ne peuvent que limiter une communication directe entre les deux aquifères mais là encore le relais se fait par la fissuration et la karstification de la formation.

Piézométrie - zones d'alimentation

Les études précédentes n'ont pu dessiner, faute de données, qu'une esquisse de la piézométrie de l'aquifère du Dano-Paléocène (figure I.25), les points d'observation étant peu nombreux et concentrés au niveau des structures.

La zone d'alimentation de la nappe se situe le long du Front des Petites Pyrénées (Guessab⁵¹, 1970). Plus à l'Ouest, les possibilités d'alimentation existent chaque fois que le réservoir affleure. Il faut toutefois noter que les structures sont plutôt des exutoires visibles ou occultes de cette nappe, car les sources telles que Peyradère et le cours du Bahus sur Audignon, les Eschourdes à Donzacq, les sources thermales à Préchacq (Pouchan *et al.*⁸³, 1985 ; Pouchan⁸², 1986 ; Institut de Géodynamique⁵³, 1990) ne représentent que la partie aérienne et visible des émergences. Il est hautement probable que des exutoires occultes, particulièrement sous les alluvions de l'Adour ou en direction de formations de couverture vers l'Ouest, existent.

L'écoulement général divergent de l'aquifère dano-paléocène s'effectue globalement du Sud-Est vers le Nord-Ouest et le Sud-Ouest. L'évolution piézométrique montre une tendance générale à la baisse de pression dans cette nappe. Les différents auteurs attribuent cette baisse aux variations de la recharge nette et/ou à une augmentation progressive des prélèvements (Armand & Sourisseau⁴, 1990 ; Armand & Capdeville³, 1992).

Caractéristiques hydrodynamiques

Suites à ces études, des valeurs des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère sont proposées :

- porosité variant du Sud-Est vers le Nord-Ouest de 12 à 24 %,
- transmissivité variant de $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ au Sud à $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ au Nord (figure I.25).
Sur les bords fracturés et karstifiés des structures, les transmissivités peuvent atteindre $10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

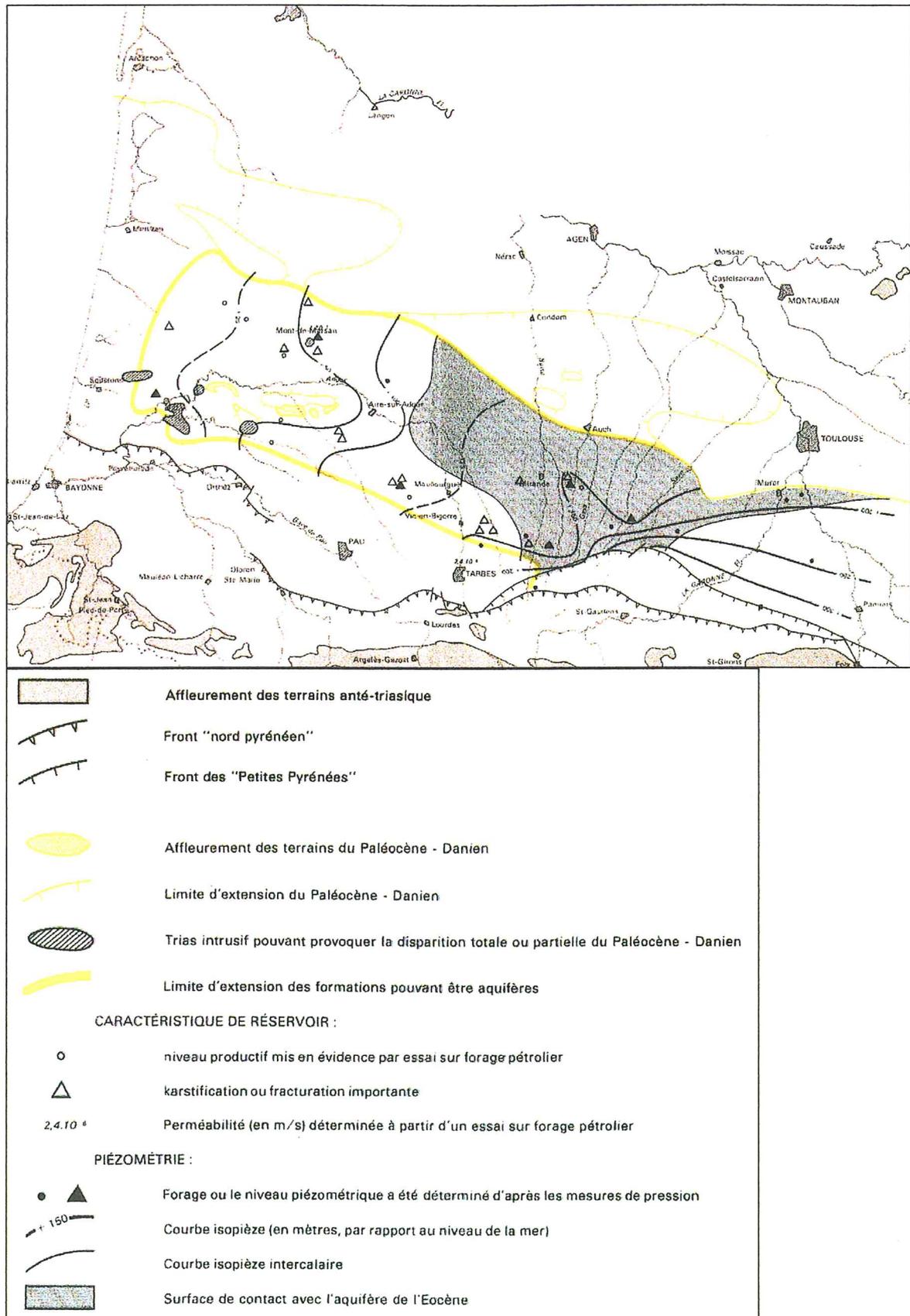


Figure I.25 : carte des transmissivités et de la piézométrie (aquifère dano-paléocène) (d'après Housse & Maget⁵², 1977)

I.4.3.3. Aquifère du Crétacé supérieur

Extension - faciès

Il paraît comporter deux ensembles aquifères :

- un ensemble supérieur (Sénonien supérieur) aux faciès variés avec d'Ouest en Est des dolomies, marnes, calcaires crayeux, calcaires, argiles et sables,
- un ensemble inférieur (Cénomaniens - Sénonien inférieur) correspondant aux faciès de plate-forme avec des calcaires dolomitiques à l'Ouest du méridien de Mont-de-Marsan et des calcaires francs à l'Est.

Géométrie - affleurements

La géométrie du réservoir, comparable à celle des aquifères précédents, est particulièrement complexe. Les profondeurs varient de l'affleurement près des structures (Audignon, Roquefort) jusqu'à plus de 2000 m de profondeur dans les fosses synclinales. Les épaisseurs des formations sont variables de 50 à 600 m.

Communications - zone d'échanges

Outre les relations de cette nappe avec l'aquifère dano-paléocène, des connexions sont possibles avec les aquifères du Crétacé inférieur et du Jurassique par l'intermédiaire de très larges zones de contact (Armand & Sourisseau⁴, 1990) et en bordure des structures.

Piézométrie - zones d'alimentation

Les données piézométriques sont incertaines et limitées aux mesures réalisées lors de tests sur les forages pétroliers. Les cotes d'affleurements dans les zones d'exutoire constituent des données aux limites. Du fait de l'existence de communications de l'aquifère avec ceux du Dano-Paléocène, il est difficile d'établir un schéma piézométrique propre à cet aquifère. On pourra en première approximation le rapprocher de celui de l'aquifère dano-paléocène. La nappe ne possède pas d'aire d'alimentation dans le Sud du bassin. Son alimentation s'effectuerait peut-être par les affleurements du Crétacé inférieur de la bordure pyrénéenne et plus à l'Ouest par drainance (Housse & Maget⁵², 1977). L'écoulement général de la nappe se fait selon une direction du Sud-Est vers l'Ouest avec des axes de drainage au droit des grandes vallées. La source de Marseillon a été reconnue comme étant un exutoire de cette nappe sur la structure d'Audignon (Pouchan⁸², 1986).

I.5. Les modèles hydrodynamiques

I.5.1. Modèle hydrogéologique de l'ensemble du Bassin Aquitain (1974)

Le premier modèle d'extension régionale a été construit par Besbes *et al.*¹⁴ en 1974. Cet outil qui avait pour but de comprendre le comportement du système aquifère multicouche du bassin a été réalisé selon une vision correspondant au schéma hydraulique établi par Vouve *et al.*¹⁰⁰ (1969) (figure I.26), composé d'une alternance de couches aquifères et semi-perméables interstratifiées, allant du Quaternaire au Jurassique.

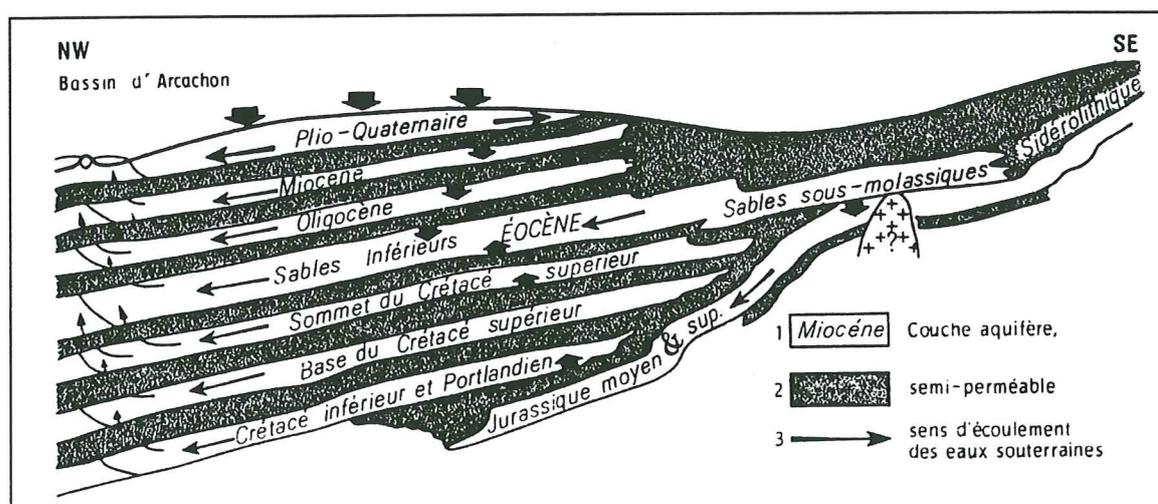


Figure I.26 : schéma de la structure multicouche modélisée (d'après Besbes *et al.*¹⁴, 1974)

Résultats de la modélisation

L'ensemble du bassin est représenté par une succession de nappes communicant entre elles par drainance verticale. Le modèle calé a permis d'établir un bilan des flux pour chaque aquifère, en prenant en compte les échanges de flux avec l'extérieur du bassin et les échanges entre les différentes couches par drainance (figure I.27). Ce travail montre qu'une modélisation de l'aquifère éocène seul ne peut être envisagée à cette échelle du fait de l'intercommunication qui existe entre l'ensemble des nappes profondes : l'ensemble hydrogéologique doit être représenté dans son intégralité même si les nappes les plus profondes sont inexploitées.

Limites du modèle

A cette époque, une information géologique et hydrogéologique dense existe dans la région bordelaise et le Bassin d'Arcachon, ce qui a permis de restituer une répartition précise de la

piézométrie dans le bassin septentrional cohérente avec la répartition des transmissivités et les débits d'alimentation.

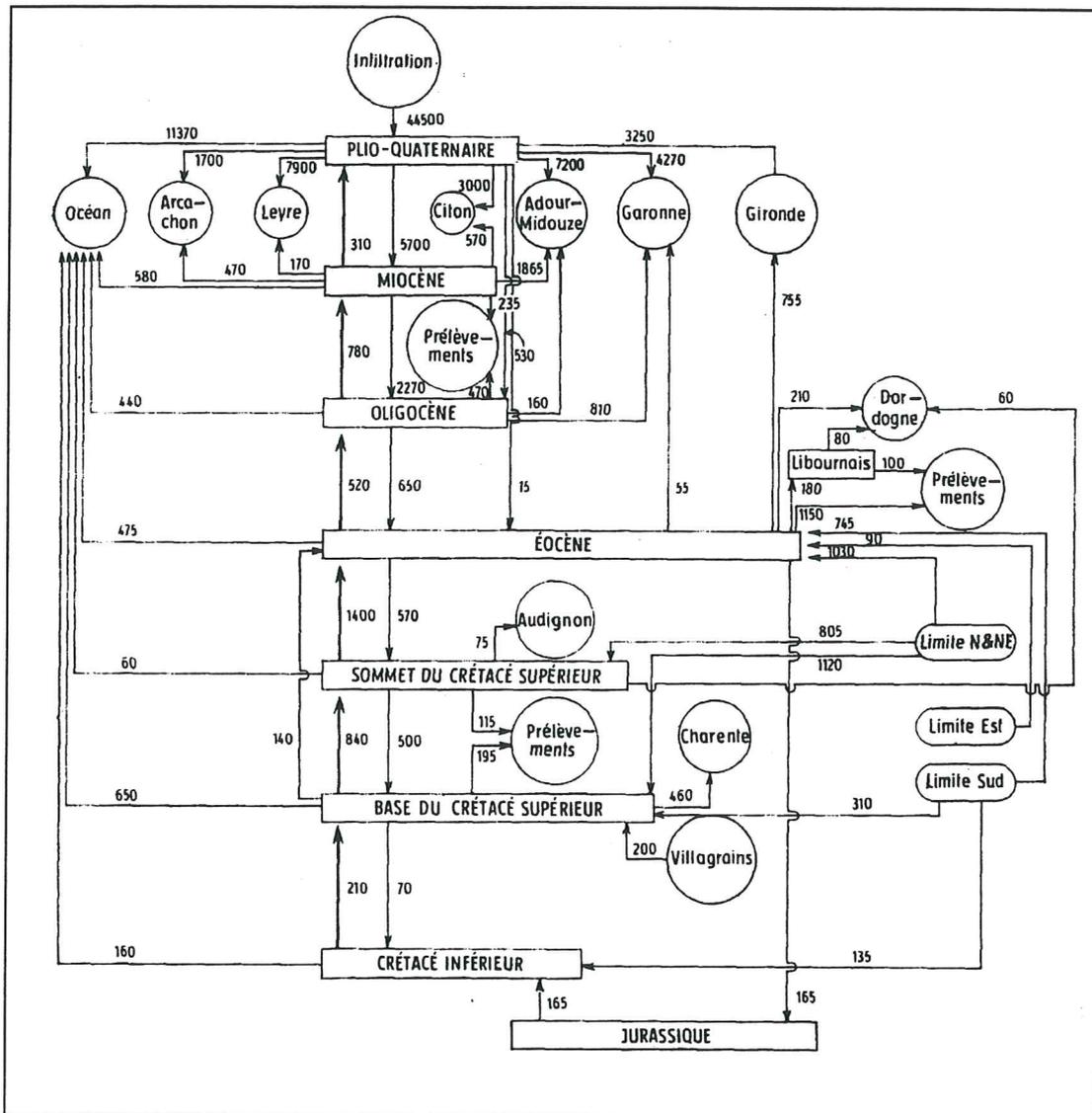


Figure I.27 : bilan en eau du système (d'après Besbes et al. ¹⁵, 1978)

En revanche au Sud du Bassin Aquitain, l'information est alors beaucoup plus rare du fait de la grande profondeur des aquifères. Elle est essentiellement fournie par les sondages pétroliers et la géophysique (Besbes et al. ¹⁵, 1978). Dans cette partie du bassin, qui englobe le stockage de Lussagnet, les auteurs se sont efforcés d'assurer :

- la reproduction des cartes piézométriques vraisemblables,
- des taux d'infiltration aux affleurements compatibles avec les observations,
- une schématisation des échanges entre nappes en accord avec les hypothèses structurales,

- une répartition des paramètres hydrauliques issue des descriptions de faciès.

Enfin l'objectif de la modélisation étant d'estimer les circulations profondes à l'échelle régionale, les conditions hydrogéologiques particulières liées à l'exploitation du stockage souterrain de gaz de Lussagnet, en fonctionnement depuis 1957, n'a pas été pris en compte dans cette modélisation.

I.5.2. Modélisation en vue de l'impact des stockages de gaz au sein de l'aquifère sous-molassique (1983)

En 1983, dans le cadre du dossier de demande d'autorisation de stockage souterrain de gaz naturel à Izaute, la société Elf Aquitaine confie au BRGM la construction d'un modèle de simulation visant à évaluer l'impact hydrogéologique du stockage en tout point de l'aquifère sous-molassique et à calculer dans le temps les évolutions de pression de gaz dans les stockages (Vandenbeusch & Roche⁹⁹, 1983).

La zone modélisée s'étend selon un polygone passant par les villes de Roquefort, Mont-de-Marsan, Pau, Mirande et Condom (figure I.28). Les deux sites de stockages se trouvent au centre de cette zone.

Résultats de la modélisation

Dans ce modèle, l'aquifère est représenté par une couche unique horizontale.

Les pressions du gaz dans les stockages ainsi que la position de l'interface eau-gaz sont calculées à partir d'une loi de comportement du gaz de type gaz parfait et d'une relation de cubature pour chaque stockage.

La piézométrie de la nappe est simulée ainsi que le déphasage et la réduction d'amplitude sur les forages de la zone d'influence, englobant la structure de Barbotan.

Limites du modèle

En modélisant l'aquifère éocène des Sables sous-molassiques avec une seule couche, ce modèle ne tient pas compte du système aquifère multicouche reconnu dans cette partie du bassin par Vouve *et al.*¹⁰⁰ (1969) et modélisé par Besbes *et al.*¹⁴ (1974). Ainsi la zone de communications entre cet aquifère et celui du Dano-Paléocène située à l'Est du stockage d'Izaute est ignorée (figure I.21).

Malgré le progrès des connaissances géologiques depuis le modèle précédent, plusieurs secteurs situés dans la zone d'influence des stockages sont restés sans information hydrogéologique conduisant ainsi les auteurs à proposer un certain nombre d'hypothèses sur la distribution des paramètres hydrodynamiques.

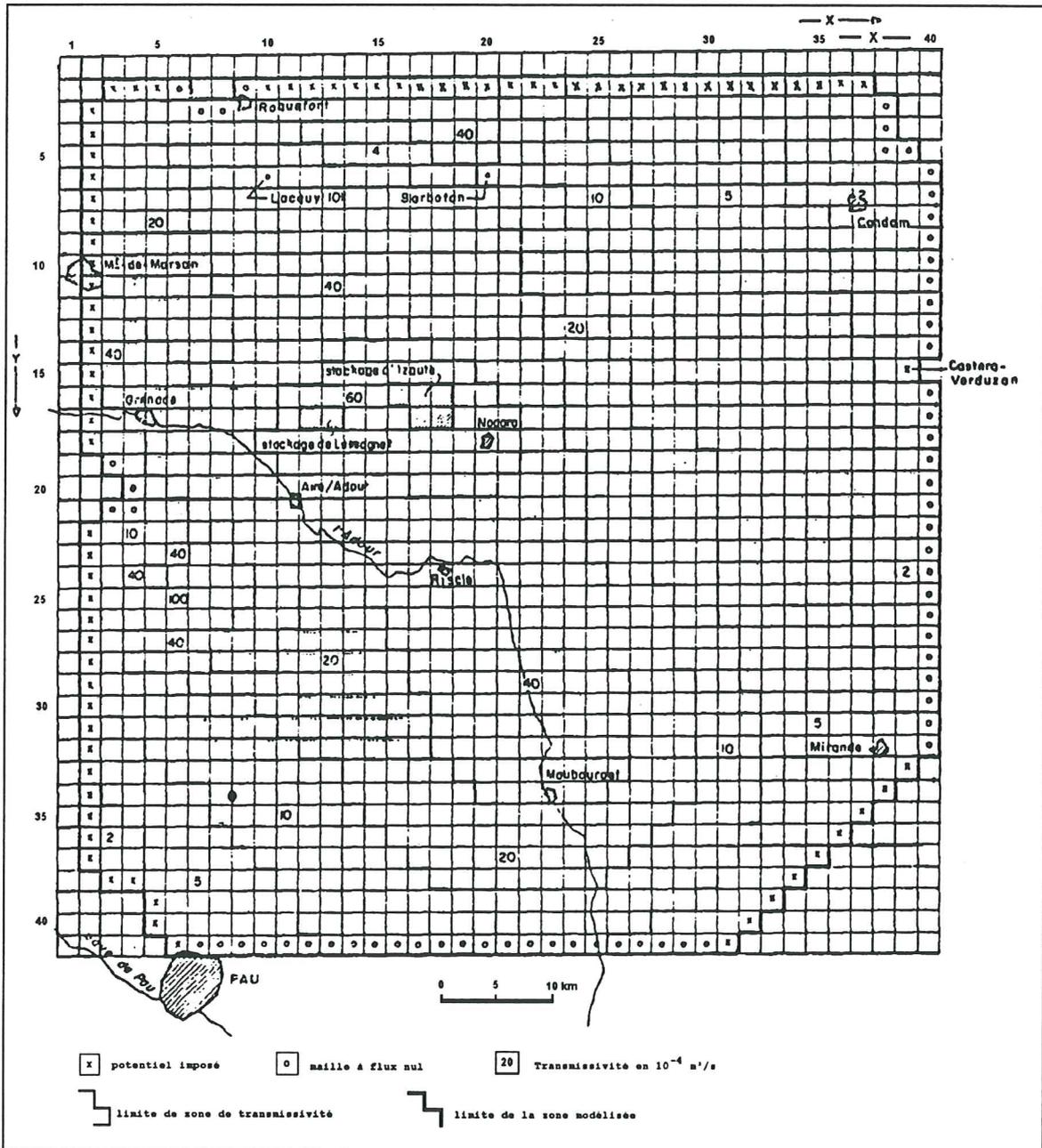


Figure I.28 : maillage de la zone modélisée (d'après Vandenberg & Roche⁹⁹, 1983)

Le paramètre transmissivité a pu être déterminé à partir des tests des forages pétroliers et d'eau. Pour répondre aux contraintes de calage, les valeurs sont distribuées dans l'aquifère selon un axe central orienté Nord Ouest - Sud Est (figure I.28) avec un ordre de grandeur variant de

2.10^{-4} à $100.10^{-4} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. Pour le coefficient d'emménagement, les auteurs n'ont pas pu bénéficier d'informations suffisantes pour dresser une carte de répartition.

Le site de Barbotan est un site particulier pris en compte dans les conditions hydrogéologiques contemporaines à la modélisation. L'activité thermique se fait alors par des forages artésiens. Le comportement hydraulique de l'aquifère artésien est mal connu, en raison de la rareté des mesure de pression et des tests hydrauliques. La perte de l'artésianisme et l'abandon des forages anciens causé par l'implantation de nouveaux forages profonds ont largement modifié le schéma hydraulique de la structure. Les auteurs ont choisi de modéliser cette structure sans tenir compte des particularités hydrauliques liées à l'exploitation de la station thermique.

I.5.3. Nouvelle modélisation de la nappe aquifère sous-molassique (1988)

Ce travail mené par la société Elf Aquitaine (Eygun & Bertrand ⁴⁵, 1988) a bénéficié de l'étude géologique et hydrogéologique de l'aquifère sous-molassique réalisée par le BEICIP ⁹ (1984). L'objectif de ce modèle était de rendre compte de l'influence des stockages sur la nappe et de restituer la baisse de pression générale résultant des autres types d'exploitation, à partir de données géologiques et hydrogéologiques remises à jour.

Le BEICIP ⁹ (1984) décrit un système hydrogéologique aquitain complexe dans lequel les informations restent parcellaires encore à cette date : nombreuses possibilités de communications entre aquifères, certaines probables et d'autres plus hypothétiques, alimentations des différents aquifères encore méconnues, dispersion des données ponctuelles issues de forages.

Résultats de la modélisation

Le modèle est bâti sur l'hypothèse d'un aquifère monocouche fermé, sans exutoire aux affleurements anticlinaux et sans déversement dans les aquifères profonds.

Le programme de simulation est le modèle pétrolier SCORE dans sa version monophasique-eau. Ce choix implique que les stockages sont représentés par des « mailles à eau » pour lesquelles sont adoptées des données spécifiques. Des puits producteurs ou injecteurs d'eau sont implantés dans ces mailles. Les débits d'eau équivalents aux mouvements de gaz positifs ou négatifs selon que l'on est en injection ou en soutirage sont fournis par un modèle utilitaire (INTERF) mettant en jeu les volumes de gaz stockés, la compressibilité équivalente et les mouvements de gaz. Ce modèle utilitaire restitue les interférences observées entre les stockages et fournit les flux à leurs périphéries qui sont ensuite introduits dans le « modèle de nappe ».

Le modèle utilitaire INTERF a été remplacé par un modèle diphasique tridimensionnel spécifique au stockage en 1994 (Tutenuit *et al.*⁹⁸, 1994).

Le modèle de nappe simule l'évolution piézométrique des puits du réseau de suivi dans la zone d'influence des stockages.

Limites du modèle

En considérant la nappe des Sables sous-molassiques comme un aquifère monocouche fermé, les connaissances hydrogéologiques régionales sont négligées si bien que pour restituer la piézométrie générale, les flux d'alimentation de la nappe connus dans la littérature ont dû être modifiés et un certain nombre de barrières de transmissivités et des barrières d'écoulement ont été ajoutées.

Mais comme le font remarquer Le Pochat & Sourisseau⁶⁷ (1993), la crédibilité du modèle repose sur le bon calage en pression des piézomètres, en particulier au point sensible de Barbotan bien que certaines données hydrogéologiques connues ne soient pas prises en compte.

1.5.4. Modélisation en vue de l'impact du futur stockage de gaz des Landes de Siougos (1993)

Dans le cadre de la demande d'autorisation de stockage souterrain de gaz naturel dans la région des Landes de Siougos, près de Mont-de-Marsan, Gaz de France a construit un modèle visant à simuler l'impact du futur stockage sur l'aquifère dano-paléocène et le système aquifère multicouche aquitain.

Ce dernier est représenté par 4 couches « réservoirs » qui correspondent aux aquifères allant du Sénonien à l'Eocène et une couche « couverture » entre l'Eocène et le toit du Dano-Paléocène. La zone modélisée s'inscrit dans un rectangle limité au Nord par un parallèle passant par le Bassin d'Arcachon, au Sud par le chevauchement nord-pyrénéen, à l'Ouest par l'océan Atlantique et à l'Est par une ligne passant à 20 km à l'est d'Auch (GDF⁵⁰, 1993).

Résultats de la modélisation

La construction de ce modèle, qui s'appuie sur les synthèses géologiques et hydrogéologiques précédentes, a été également confortée par des études complémentaires précisant l'extension des différents aquifères modélisés, leurs conditions aux limites ainsi que leurs caractéristiques pétrophysiques.

En utilisant le code MULTI, les écoulements sont calés en régimes transitoire et permanent ce qui permet de confirmer et/ou de réajuster les champs de perméabilités verticales et horizontales définies par les études géologiques.

La modélisation est « réalisée au mieux compte tenu des informations disponibles [...] Ce modèle dégage une solution cohérente à partir d'hypothèses probables » (Sauty⁸⁸, 1997).

Limites du modèle

Cette modélisation peut cependant être améliorée en étudiant plus précisément le comportement hydrodynamique des structures géologiques et des rides incluses dans la zone modélisée (anticlinal d'Audignon, de Louer, structures du Bas-Adour).

I.6. Conclusions

Les stockages souterrains de gaz naturel en France sont une nécessité nationale. Réalisés en cavités salines ou en nappes aquifères, ils assument une double fonction de régulation des modulations saisonnières de la consommation quotidienne et annuelle de gaz, et de réserve stratégique en cas de défaillance des chaînes d'approvisionnement.

Cette activité, lorsqu'elle est pratiquée en nappe aquifère, provoque évidemment des perturbations d'ordre hydrogéologique qui correspondent à la fois à des modifications piézométriques mais parfois physico-chimiques indirectes.

Suite aux cycles annuels d'injection et de soutirage, les stockages de gaz d'Izaute et de Lussagnet perturbent la piézométrie dans l'aquifère sableux de l'Eocène dans un rayon d'une trentaine de kilomètres environ. Cette « zone d'influence » des stockages englobe des objets géologiques particuliers créant un schéma complexe : discontinuités sédimentaires mettant en contact des aquifères différents, phénomènes de drainance diffuse entre aquifères, structures géologiques profondes avec émergence de l'aquifère sous-molassique (sources).

A partir d'observations géologiques, Vouve *et al.*¹⁰⁰ proposent, dès 1969, un schéma de circulations hydrauliques au sein du Bassin Aquitain symbolisant cette complexité. Cette vision régionale des grands ensembles sédimentaires est reprise par la suite tant sur le plan géologique (BRGM *et al.*¹⁹, 1973 ; BEICIP⁹, 1984) que sur le plan hydrogéologique (Astié *et al.*⁶, 1972 ; Kieken & Marionnaud⁵⁸, 1972 ; Housse & Maget⁵², 1977 ; Armand & Sourisseau⁴, 1990).

La complexité de la zone d'influence des stockages n'a pu jusqu'ici être réellement représentée dans les modèles hydrodynamiques (Besbes *et al.*¹⁴, 1974 ; Vandenbeusch & Roche⁹⁹, 1983 ; Eygun & Bertrand⁴⁵, 1988), en particulier au droit de structures géologiques reconnues comme étant soit une zone d'émergence tel que l'anticlinal de Barbotan, soit une zone d'émergence potentielle telle que le périclinal Est de l'anticlinal d'Audignon, dans le secteur d'Eugénie-les-Bains.

Conscient de l'insuffisance du modèle de simulation SCORE sur ces aspects, Elf Aquitaine a décidé de construire un nouveau modèle dynamique 3D et multicouche avec pour objectif la simulation de la zone des stockages et des aquifères environnants à une échelle régionale, mais aussi locale au droit des structures.

La prise en compte de ces particularités nécessite en premier lieu une synthèse géologique et hydrogéologique intégrant les connaissances récentes. Cette démarche est mise en œuvre avec

l'appui des techniques pétrolières utilisées dans la « séquence d'étude des réservoirs ». Cette méthodologie est généralement appliquée à l'échelle d'un réservoir ou d'un stockage. Elle a été étendue ici pour la première fois au système aquifère multicouche du Bassin Aquitain en s'intéressant exclusivement aux formations tertiaires et en veillant à intégrer deux échelles de description : l'ensemble du Bassin et les structures émergentes situées dans la zone d'influence des stockages.

La démarche est exposée au chapitre ci-après.