



EGID – BORDEAUX 3

**Modélisation hydrodynamique des nappes
tertiaires du Médoc :
Test des hypothèses géologiques et impacts
potentiels sur la ressource**

Rapport final d'exécution des travaux

Janvier 2005

UNIVERSITE MICHEL DE MONTAIGNE
EGID - BORDEAUX 3
1, Allée F. DAGUIN
33607 Pessac Cedex FRANCE
☎ 05 57 12 10 00 Télécopie 05 57 12 10 01

SOMMAIRE

SOMMAIRE	2
1. AVANT-PROPOS	5
2. MODELISATION DES AQUIFERES TERTIAIRES MEDOCAINS – ETAT INITIAL	7
2.1. Outil de modélisation	7
2.1.1. Discrétisation spatiale du système aquifère multicouche	9
2.1.2. Conditions aux limites	12
2.1.3. Discrétisation temporelle	15
2.1.4. Paramètres hydrodynamiques	15
2.1.5. Alimentation et prélèvements	18
2.1.6. Réseau d’observation	22
2.2. Régime permanent - Simulations	24
2.3. Régimes transitoires - Simulations	28
2.3.1. Chroniques piézométriques	29
2.3.2. Comportement aux exutoires oligocènes	33
2.3.3. Fonctionnement quantitatif du système	34
3. MISE A JOUR GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE	37
3.1. Les nouvelles données géologiques et hydrogéologiques	37
3.2. Mise à jour du modèle numérique nord-médocain	47
3.3. Régime transitoire - Simulations	50
3.4. Exploitation projetée de l’aquifère oligocène	54
3.5. Exploitation à long terme du champ captant – Simulations	55
4. APPROCHE DE MODELISATION SEMI-ANALYTIQUE	60
4.1. Mise en œuvre du modèle	60
4.2. Découpage spatial du domaine d’étude	60
4.3. Calage en régime transitoire	62
4.4. Simulation d’exploitation	65
5. APPROCHE D’AIDE A LA DECISION	73
5.1. Objectif et méthodologie	73
5.2. MRU et modèle de gestion	74
5.3. Application à des scénarii de gestion	80
5.3.1. Scénario 1 : Maximisation de la production d’un champ captant	80
5.3.2. Scénario 2 : gestion globale d’un système aquifère multicouche	84
6. CONCLUSIONS	89

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude et du modèle cadre	7
Figure 2: Discrétisation du domaine d'étude et toit des formations aquifères.....	11
Figure 3 : Surfaces d'affleurement des aquifères restituées dans le modèle.....	12
Figure 4 : Pluies efficaces calculées pour une RFU de 100 et 150 mm (données Météo-France)	18
Figure 5 : Volumes annuels cumulés prélevés par couche modélisée	20
Figure 6 : Volumes annuels prélevés par maille de calcul pour l'année 1996	21
Figure 7 : Localisation des piézomètres de contrôle	23
Figure 8: Cartes piézométriques calculées en régime permanent (données de 1981).....	25
Figure 9 : Chroniques piézométriques mesurées et calculées – Aquifère miocène.....	30
Figure 10 : Chroniques piézométriques mesurées et calculées – Aquifère oligocène.....	30
Figure 11 : Chroniques piézométriques mesurées et calculées – Aquifère éocène	31
Figure 12 : Chronique piézométrique simulée au piézomètre 08523X0092 (Eocène).....	32
Figure 13 : Débits simulés aux sources oligocènes	33
Figure 14 : Bilan inter-annuel du système calculé sur la période 1981-1999.....	36
Figure 15 : Implantation des forages de reconnaissance et profils de sismique réflexion haute résolution	38
Figure 16 : Synthèse géologique de l'aquifère oligocène médocain	40
Figure 17: Evolution des courbes dérivées mesurées et simulées – Modèles variables	44
Figure 18: Evolution des pressions mesurées et simulées – Modèles variables	45
Figure 19: Variogrammes régionaux calculés pour l'ensemble des aquifères tertiaires (cote du toit de l'aquifère)	48
Figure 20: Mise à jour du modèle numérique médocain	50
Figure 21: Hauteurs piézométriques calculées pour l'année 1996 sur la zone modifiée	51
Figure 22 : Hauteurs piézométriques simulées au puits 08026X0034	53
Figure 23 : Hypothèse préliminaire pour un champ captant (<i>d'après BRGM, 1999</i>).....	54
Figure 24 : Rabattements calculés après 1 année d'exploitation.....	56
Figure 25: Rabattements calculés après 10 années d'exploitation	57
Figure 26 : Maillages de Voronoi retenus pour le champ médocain	63
Figure 27 : Rabattements mesurés et simulés pour l'essai d'interférence de longue durée ..	64
Figure 28 : Proposition d'une nouvelle localisation de champ captant oligocène (champ captant oligocène sud).....	68
Figure 29 : Situation des points de stress et des points d'observation	78
Figure 30 : Hauteurs piézométriques calculées et observées pour l'année 1981	79

Figure 31 : Cartes piézométriques de l'aquifère Eocène – Impact du processus d'optimisation global 86

Figure 32 : Distribution des débits optimisés par rapport au scénario tendanciel 88

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Paramètres de discrétisation du domaine d'étude 10

Tableau 2 : Répartition des conditions imposées selon les couches aquifères 14

Tableau 3 : Distribution du champ de perméabilité (nombre de cellules) 17

Tableau 4 : Bilan des entrées et sorties en régime permanent influencé 28

Tableau 5 : Forages de reconnaissance réalisés..... 38

Tableau 6 : Caractéristiques des essais de pompage 42

Tableau 7 : Paramètres calculés - Modèles variables..... 46

Tableau 8 : Rabattements résiduels calculés sur les forages AEP existants..... 66

Tableau 9 : Rabattements calculés au droit du champ captant 67

Tableau 10 : Rabattements résiduels calculés aux forages AEP existants pour le champ captant oligocène sud..... 69

Tableau 11 : Rabattements calculés au droit du champ captant sud..... 70

Tableau 12 : Débits optimisés pour le champ captant oligocène 82

Tableau 13 : Influences calculées au droit et à proximité du champ captant – débits optimisés..... 83

1. AVANT-PROPOS

Le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) de la Gironde, achevé en 1996, prévoit la mise en œuvre d'une politique de réduction des prélèvements issus de la nappe de l'Eocène. Dans l'optique du SAGE Nappes Profondes, en fin d'élaboration et qui souligne également la nécessité de diminuer l'exploitation de la nappe de l'Eocène en Médoc, un programme de recherche a été initié par le Syndicat Mixte d'Etude et de Gestion de la Ressource en Eau de la Gironde (SMEGREG).

Un premier programme de reconnaissance géologique et hydrogéologique a été confié par convention en 2001 et 2002 à l'Institut EGID-Bordeaux 3 afin de préciser et quantifier les ressources en eau souterraine exploitables des aquifères tertiaires du Médoc, pouvant se substituer aux ressources actuelles utilisées pour l'alimentation en eau potable ou le cas échéant les compléter.

La mise à jour des connaissances géologiques et hydrogéologiques de la zone médocaine a notamment conduit à la mise en évidence d'un compartimentage de la ressource oligocène. L'intégration de ces éléments nouveaux dans le schéma géologique et hydrogéologique régional amène vraisemblablement à proposer un nouveau fonctionnement hydraulique du réservoir oligocène et des aquifères associés. Il convient également de s'interroger sur la prise en compte de ces nouveaux éléments dans les outils de gestion quantitative de ces aquifères, en particulier le modèle mathématique régional. En effet, l'influence de telles structures est *a priori* difficilement quantifiable mais pourrait être non négligeable dans l'optique d'une exploitation importante de l'aquifère oligocène pour l'alimentation en eau potable. Il est donc nécessaire d'estimer l'impact potentiel de ce nouveau contexte structural sur les différents scénarii envisagés dans le programme de substitution à l'exploitation de la nappe éocène, tels que définis par le schéma directeur de gestion des ressources en eau de la Gironde, achevé en 1996.

La démarche employée pour répondre à cette problématique sera la suivante. Deux modèles hydrodynamiques intégrant les trois nappes tertiaires seront réalisés selon d'une part les hypothèses de continuité hydrogéologique retenues dans le modèle nord-aquitain du BRGM, et d'autre part selon les nouvelles données géologiques et

hydrogéologique obtenues lors des dernières campagnes d'acquisition. L'influence de ces modifications sur la programme prévisionnel d'exploitation de la nappe de l'oligocène et notamment la mise en œuvre d'un nouveau champ captant pourra de cette manière être appréhendée.

Ce volet de quantification a également fait l'objet d'une double approche de modélisation avec la mise en œuvre d'un modèle semi-analytique, apte à rendre compte de systèmes hydrauliques complexes. A ce titre, cette approche multi-échelle constitue un complément d'information important pour le développement de projet de gestion.

C'est également dans un soucis de gestion à plus grande échelle qu'un outil d'optimisation a été développé et appliqué au système multicouche tertiaire, permettant de tester et d'optimiser un scénario de substitution prévu par le SAGE Nappes Profondes

Ce rapport final présente l'ensemble de ces travaux.

2. MODELISATION DES AQUIFERES TERTIAIRES MEDOCAINS – ETAT INITIAL

2.1. Outil de modélisation

La représentation du système aquifère tertiaire ne peut être envisagée que par un modèle multicouche, composé d'un empilement d'horizons présentant des caractéristiques hydrodynamiques différentes. La structure, l'agencement et l'organisation du système multicouche fait que l'élaboration d'un modèle uniquement limité à la zone médocaine n'est pas envisageable. Le développement d'un modèle « cadre » a donc été entrepris afin d'y inclure la zone étudiée. Ce modèle cadre a été élaboré à partir de l'ensemble des données disponibles, pour reproduire au mieux l'interconnection de la zone Médoc au sein du complexe global (Figure 1).

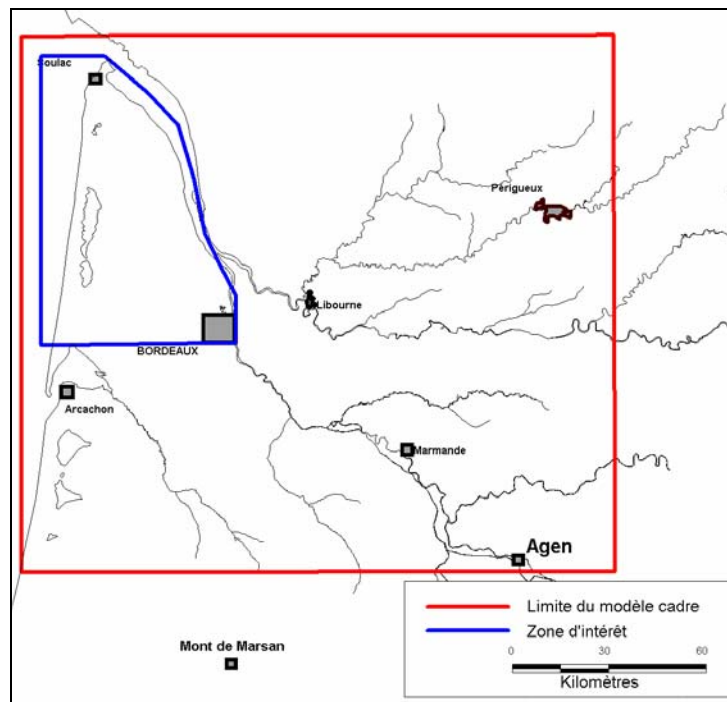


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude et du modèle cadre

L'extension globale du modèle cadre est de 31080 km². La disposition et l'agencement vertical des différents aquifères ont été reproduits. Ainsi, tel qu'il a été défini précédemment, le système hydrogéologique a été décomposé en 5 unités aquifères, qui sont en succession normale :

- l'aquifère plio-quadernaire ;
- l'aquifère miocène ;
- l'aquifère oligocène ;
- l'aquifère éocène ;
- l'aquifère crétaé.

Ces unités sont séparées par des unités semi-perméables ou imperméables, qui assurent le confinement des aquifères profonds.

Le modèle construit est basé sur le code de calcul MODFLOW 2000 (« Modular Three-Dimensionnal Finite-Difference Ground-Water Flow Model ») développé par l'United States Geological Survey ¹ sous interface Visual Modflow[®].

L'équation générale aux dérivées partielles utilisée dans le code MODFLOW pour résoudre l'écoulement transitoire au sein d'un aquifère tri-dimensionnel, poreux, captif, hétérogène et anisotrope est la suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + R = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad [1]$$

avec

h	potentiel hydraulique [L] ;
K	tenseur de conductivité hydraulique [L.T ⁻¹] ;
S_s	coefficient d'emmagasinement spécifique [L ⁻¹] ;
R	terme puits/source (flux unitaires entrants et sortants de l'aquifère) [T ⁻¹] ;
t	temps [T].

La résolution de l'équation générale de l'écoulement [1] est effectuée sur un maillage tridimensionnel par la méthode des différences finies, en utilisant les conditions aux limites du système. Ces conditions limites correspondent à des données hydrogéologiques réelles traduites numériquement. On distingue principalement deux familles de conditions limites :

- *condition de Dirichlet* : la charge hydraulique sur la limite est indépendante des conditions de circulation dans l'aquifère ;
- *condition de Neumann* : le flux transitant à travers la limite est connu.

¹ HARBAUGH *et al.*, 2000 : MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model- User guide to modularization concepts and the ground-water flow process, Open-File report 00-92, 121 p.

Parmi les grandeurs utilisées dans ce modèle, on peut distinguer :

- les variables d'entrées et les variables de sortie ;
- les paramètres de l'aquifère correspondant aux transmissivités et coefficients d'emmagasinement.

Les variables d'entrées correspondent aux différentes conditions aux limites, présentées précédemment et aux termes puits/sources. Les variables de sorties sont les hauteurs piézométriques h calculées. Les grandeurs au sein d'un élément de discrétisation sont supposées constantes (transmissivité, emmagasinement) ou uniformément réparties (pompage).

La géométrie est représentée explicitement, en intégrant pour chaque couche le toit et le mur de la formation considérée. De cette manière, un soin particulier a pu être apporté à la représentation du système hydrogéologique nord-aquitain, le contrôle de la géométrie étant direct au sein du modèle.

2.1.1. Discrétisation spatiale du système aquifère multicouche

La discrétisation spatiale du domaine constitue l'étape permettant de prendre en compte la géométrie et les limites du système dans le modèle d'écoulement. Le choix des solutions a été guidé par une prise en compte des limites physiques des différents aquifères, chaque fois que cela était possible.

Le maillage couvre la zone totale du modèle cadre, soit une superficie de 31080 km². Le modèle comprend 279720 mailles carrées de 1 km de côté (185 colonnes par 168 lignes réparties reportées sur 5 couches aquifères et 4 épontes). Toutefois, les mailles situées à l'extérieur des zones d'extension de chaque horizon ont été inactivées pour précisément restituer la superficie de chaque niveau. Les caractéristiques du maillage pour chaque couche sont données dans le Tableau 1.

La topographie a été digitalisée sur la totalité de la zone d'étude à partir des cartes IGN au 1/25000, puis rééchantillonnée selon le maillage du modèle, afin de disposer d'un référentiel topographique le plus fidèle possible.

Couche du modèle	Nombre de cellules actives	Occupation de la couche (%)
Aquifère plio-quadernaire	7567	24,3
Eponte	9093	29,3
Aquifère miocène	9093	29,3
Eponte	10797	34,7
Aquifère oligocène	10797	34,7
Eponte	14572	46,9
Aquifère éocène	20179	64,9
Eponte	18145	58,4
Aquifère crétaé	16042	51,6

Tableau 1: Paramètres de discrétisation du domaine d'étude

La géométrie des aquifères a été reconstruite à partir des informations brutes disponibles (coupes des forages) mais également à partir de la géométrie du modèle hydrodynamique régional existant développé par le BRGM. Pour chaque couche (aquifère ou éponte), le toit et le mur ont été traités par analyse géostatistique et interpolés afin d'implémenter directement la géométrie au sein du modèle (Figure 2). Les zones d'affleurement ont été prises en compte comme contraintes supplémentaires, tout comme les zones de lacune (Figure 3). La transcription de ces zones dans un modèle multicouche en différences finies implique cependant de travailler avec une géométrie locale équivalente. En effet, dans le cas d'un biseautage des couches et d'une venue à la surface d'une couche plus profonde, le formalisme de discrétisation utilisé dans MODFLOW nécessite de prendre en compte toutes les couches lors de la construction de la géométrie. Deux solutions pratiques pour simuler une zone d'affleurement sont soit d'affecter à toutes les couches sur-incombantes, normalement absentes, une épaisseur minimale virtuelle puis de les désactiver, soit de leur affecter des paramètres hydrauliques équivalents à ceux de la couche affleurante, en fonction des relations existant avec la surface.

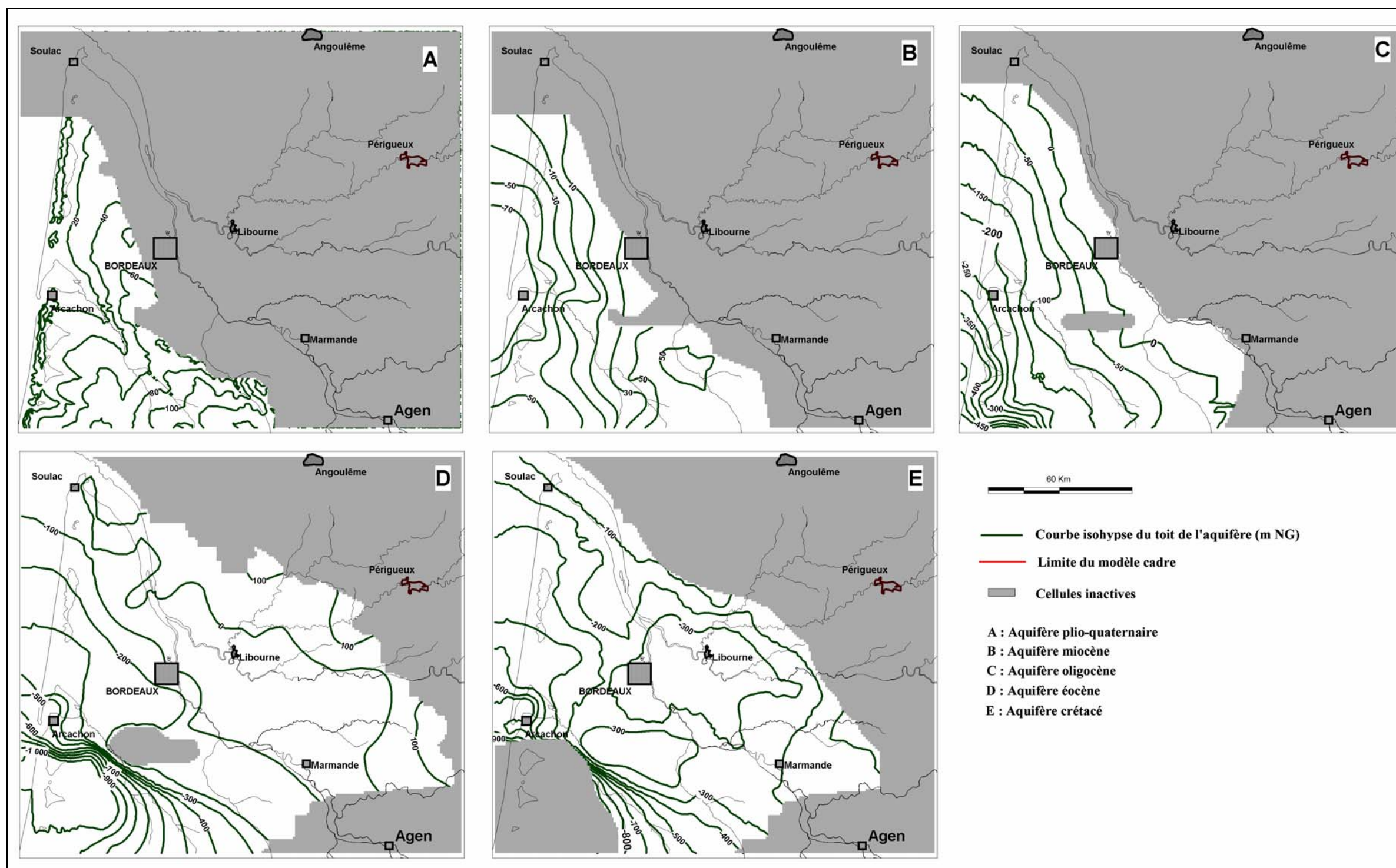


Figure 2: Discretisation du domaine d'étude et toit des formations aquifères.

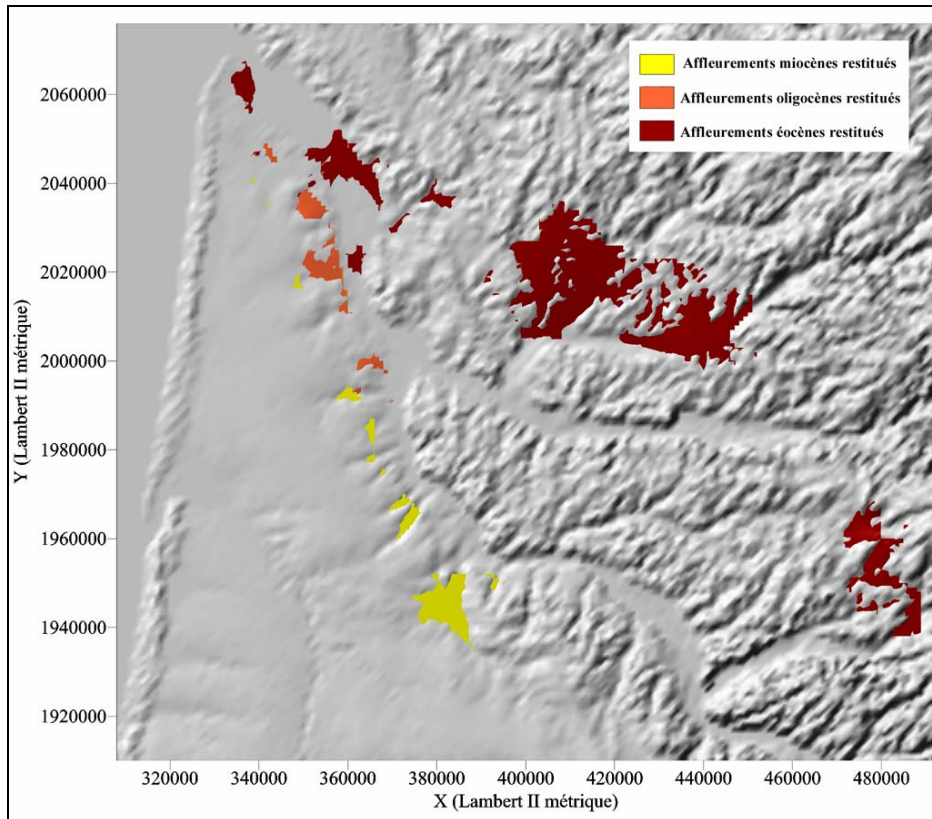


Figure 3 : Surfaces d'affleurement des aquifères restituées dans le modèle

2.1.2. Conditions aux limites

La synthèse hydrogéologique régionale a permis de déterminer la nature des limites des différents aquifères, leurs particularités et de les intégrer au sein du modèle. La structure modulaire du code de calcul MODFLOW permet de choisir entre plusieurs types de limites et conditions imposées. Nous en avons retenu trois types :

- Potentiel imposé : ce type de limite se traduit par une valeur piézométrique de la nappe fixée par l'utilisateur. Quels que soient les paramètres utilisés et quelles que soient les sollicitations imposées (pompage, infiltration,...), ce potentiel ne change pas ;
- Limite à flux nul ;
- Limite de drainage : ce module permet d'imposer une cote de débordement et de simuler, si nécessaire, l'évacuation de l'eau si la charge calculée est supérieure à la cote imposée.

D'une manière générale, l'Océan Atlantique est représenté comme une zone d'exutoire pour tous les aquifères. L'océan a donc été considéré comme une limite à potentiel imposé, dont la valeur a été fixée à 0 m NG. Pour l'aquifère plio-quadernaire,

cette limite a été imposée depuis la côte littorale en direction de l'ouest, ce qui explique le nombre important de mailles à charge constante dans cette couche (Tableau 2). Pour les aquifères profonds, la distribution des potentiels imposés a été déportée vers l'ouest pour minimiser l'impact de ceux-ci sur les mailles de calcul situées au droit du littoral. Ce choix paraît d'autant plus justifié par l'existence de zones d'exutoires diffus immergés. Des potentiels imposés ont également été utilisés pour simuler l'influence des lacs médocains sur l'aquifère plio-quadernaire. Les valeurs prises en compte correspondent aux altitudes moyennes des plans d'eau. Les rôles de zones d'exutoires tenus par la Garonne et la Gironde pour les aquifères oligocène et éocène ont également été simulés par des potentiels imposés. Ici encore, l'altitude moyenne des plans d'eau au sein de la maille a servi de valeur guide. Dans le cas des relations entre la nappe de l'Eocène et l'estuaire, l'utilisation du module d'échange nappe/rivière aurait été préférable, afin de préciser les débits d'échanges. Toutefois, les paramètres d'utilisation de ce module nécessitent une connaissance détaillée de la morphologie du lit de l'estuaire et des propriétés hydrodynamiques des terrains qui le composent. Ces données restent trop disparates actuellement. Des potentiels imposés ont également été utilisés pour simuler la piézométrie de la nappe crétacée. Cette solution a été retenue étant donné les informations fragmentaires concernant cet aquifère. De plus, l'examen des courbes piézométriques a montré que l'influence de ce dernier sur les aquifères tertiaires dans la zone médocaine est *a priori* faible. Toutefois, une vérification détaillée des flux transitant à travers cette couche et la couche éocène sera effectuée pour s'assurer que le biais introduit par ce choix de représentation reste minime.

Couche du modèle	Maille à potentiel imposé	Maille à condition de Drain	Maille à flux nul
Aquifère plio-quadernaire	1321	537	306
Aquifère miocène	130	27	365
Aquifère oligocène	171	3	349
Aquifère éocène	340	-	568
Aquifère crétacé	835	-	517

Tableau 2 : Répartition des conditions imposées selon les couches aquifères

Les autres limites correspondent pour l'ensemble des aquifères à des limites à flux nul. L'intégration des limites physiques des aquifères, notamment les limites de dépôts, justifie ce choix. Le nombre de mailles à flux nul est alors fonction du linéaire de la limite de dépôt (Tableau 2). La limite sud, qui ne correspond pas à une limite physique à proprement parler, a également été choisie à flux nul. En effet, l'examen des données piézométriques disponibles pour chaque aquifère montre que le tracé proposé des courbes piézométriques est sub-perpendiculaire à un axe est-ouest. On peut penser dans cette représentation que les flux en provenance du sud sont faibles. L'estimation de ces flux entrants reste difficile, étant donné l'incertitude existant sur le tracé de ces courbes piézométriques. L'utilisation d'une limite à flux nul permet de ne pas introduire de biais *a priori*, et de vérifier de manière heuristique cette hypothèse.

Le module de drainage a été utilisé pour simuler les relations entre les aquifères et le réseau hydrographique. Ce module nécessite pour chaque maille une altitude de référence qui permet d'imposer une cote de débordement et de simuler le drainage de la cellule. Ces altitudes ont été calculées à partir des cotes sol des cours d'eau et des altitudes moyennes affectées à chaque maille. Le choix de la représentation de ces limites par ce type de condition est justifié par la présence d'un réseau ramifié de cours d'eaux et de crastes, qui drainent les formations plio-quadernaires qu'ils traversent. C'est également le cas pour l'aquifère miocène, qui peut affleurer dans le lit de certains cours d'eau (Ciron) mais de manière très locale. S'il était utopique de représenter la totalité du réseau hydrographique drainant l'aquifère plio-quadernaire étant donné la complexité du chevelu, les tronçons principaux des cours d'eau ont toutefois été pris en compte.

Les conditions de drain ont également été utilisées pour simuler les sources. Dans ce cas, c'est la cote de la source qui correspond à la cote de débordement. Les sources de Thil-Gamarde et Budos ont été retranscrites de cette façon. Il faut préciser que les débits de fuite ainsi simulés peuvent s'écarter notablement des débits réels mesurés, lesquels sont souvent augmentés à partir d'aménagements d'exploitation (galeries drainantes, forages,...).

2.1.3. Discrétisation temporelle

Tout comme la discrétisation spatiale, la discrétisation temporelle du modèle est nécessaire pour la résolution numérique de l'équation d'écoulement en régime transitoire.

Pour simuler le régime transitoire avec MODFLOW, le temps de simulation doit être divisé en périodes de contraintes (« stress period ») durant lesquelles pour notre modèle toutes les conditions sont considérées constantes. Le régime transitoire est construit à partir d'une succession d'états pseudo-permanents.

Nous disposons d'une chronique de données (piézométrie, précipitations, prélèvements) pour la période de 1981 à 1999. Le premier choix est de découper la durée totale de simulation en périodes représentatives des périodes de hautes eaux et basses eaux. L'adaptation des pas de calcul sur les « saisons » du cycle hydrogéologique est la meilleure solution pour retranscrire les différents états de la nappe. Ce choix nécessite cependant la prise en compte des variations saisonnières de soutirage aux forages. Seuls les volumes soutirés annuels sont connus pour la majorité des ouvrages. Cette constatation est problématique dans certaines zones où il existe une majorité de forages agricoles, lesquels pompent préférentiellement durant la période climatique de basses eaux et pour lesquels l'utilisation de débits moyens estimés à partir des volumes annuels n'est pas possible. La restitution des fluctuations temporelles des nappes par simulation pourrait ainsi ne pas être cohérente avec l'observation. Afin de résoudre ce problème d'échantillonnage, un pas de discrétisation temporel annuel a été retenu. Les phénomènes observés de période inférieure à l'année ne pourront être pris en compte ou restitués.

2.1.4. Paramètres hydrodynamiques

Les différents aquifères ont été considérés comme isotropes. Les valeurs de perméabilité des nappes captives ont été obtenues à partir des informations existantes pour chaque aquifère. Dans un premier temps, les champs de perméabilité du modèle régional développé par le BRGM ont été utilisés. Ces valeurs de perméabilité ont été ajustées durant les phases de calage en régime permanent

et transitoire, en respectant l'ordre de grandeur. Les valeurs de perméabilité pour la couche miocène sont comprises entre 1.10^{-6} et 5.10^{-3} m.s⁻¹. La distribution bimodale, centrée respectivement sur 1.10^{-5} et 1.10^{-4} m.s⁻¹ (Tableau 3), est caractéristique des deux faciès principaux de l'aquifère miocène, calcaire gréseux et faluns. Les zones de perméabilités maximales sont localisées aux zones d'exutoire de la nappe et aux parties subaffleurantes, notamment dans les cours d'eaux (Jalle de Saint Médard), où des paramètres transmissifs élevés sont nécessaires pour pouvoir restituer correctement les flux. La distribution des valeurs de perméabilité de la couche oligocène présente un caractère bimodal moins marqué. S'échelonnant sur une gamme comprise entre 1.10^{-6} et 5.10^{-3} m.s⁻¹, les perméabilités sont centrées sur 10^{-5} m.s⁻¹ et dans une moindre mesure sur 10^{-4} m.s⁻¹ (Tableau 3). Ces valeurs correspondent à des valeurs classiques pour des calcaires fissurés présentant parfois des intercalations argileuses, pour les valeurs les plus basses. La bordure est de l'aquifère oligocène est caractérisée par les valeurs maximales de perméabilité. Cette aire correspond à la zone où la nappe semi-captive est sise dans des calcaires très fracturés et ouverts. La couche éocène est aussi caractérisée par une distribution bimodale de perméabilités centrée sur 1.10^{-5} et 1.10^{-4} m.s⁻¹ (Tableau 3). Ces deux valeurs correspondent aux faciès sableux et calcaires de l'aquifère. L'aquifère éocène, constitué de plusieurs horizons aquifères interconnectés, est ici modélisé avec une seule couche. Les perméabilités utilisées correspondent donc à des perméabilités équivalentes. Etant donné une épaisseur généralement plus importante des faciès calcaires, il est logique de retrouver un déplacement des valeurs de perméabilité vers le « pôle calcaire ». Les valeurs maximales (de 5.10^{-4} à 5.10^{-3} m.s⁻¹) sont observées pour les zones d'affleurement à l'est constituées par les formations des « Sables du Périgord » et traduisant les aires de mise charge de l'aquifère éocène.

Les valeurs de perméabilités mesurées pour l'aquifère plio-quadernaire sont peu nombreuses. Ces valeurs sont comprises entre 1.10^{-5} et 5.10^{-3} m.s⁻¹. Sa structure argilo-sableuse lenticulaire complexe rend difficile une régionalisation de ces rares mesures. L'affectation des valeurs de perméabilité dans le modèle s'est donc essentiellement réalisée par essais durant le calage, en respectant la plage de valeurs observées. La valeur centrale de la distribution utilisée est de 1.10^{-3} m.s⁻¹

² COTTINET, 1974 : Contribution à l'étude des fluctuations de la nappe du massif forestier landais., Thèse Bordeaux 1, 93 p.

(Tableau 3), caractéristique du caractère sableux des formations considérées. La queue de distribution, s'étendant vers $1.10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, correspond à l'augmentation de la fraction argileuse dans les faciès aquifères.

Plage de perméabilités affectée (m.s^{-1})	Couche aquifère plio-quadernaire	Couche aquifère miocène	Couche aquifère oligocène	Couche aquifère éocène
$1.10^{-3} < K < 5.10^{-3}$	4472	115	122	3
$5.10^{-4} < K < 1.10^{-3}$	2111	799	472	537
$1.10^{-4} < K < 5.10^{-4}$	711	2867	2202	4560
$5.10^{-5} < K < 1.10^{-4}$	114	2175	3	2005
$1.10^{-5} < K < 5.10^{-5}$	156	2640	6559	11481
$5.10^{-6} < K < 1.10^{-5}$	3	497	21	1565
$10^{-6} < K < 5.10^{-6}$	0	0	1418	26

Tableau 3 : Distribution du champ de perméabilité (nombre de cellules)

Pour l'aquifère créacé, comme les charges sont assurées par les potentiels imposés, une seule valeur de perméabilité de $1.10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ a été utilisée. Celle-ci correspond à la valeur minimale de perméabilité observée pour ce réservoir³.

Toutes les épontes ont par défaut été affectées d'une valeur initiale de $1.10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$. Les ajustements de perméabilité au cours du calage ont été limités, étant donné le peu d'information dont nous disposons pour ces formations. Contrairement aux aquifères, les épontes ont été considérées comme anisotropes, présentant une composante verticale (K_z) pouvant être différente des composantes horizontales (K_x et K_y), dans le respect de l'ordre de grandeur.

Les valeurs de coefficient d'emmagasinement nécessaires au calcul en régime transitoire ont également été implémentées. Pour les nappes captives, étant donné le peu d'information dont nous disposons sur ce paramètre, une valeur moyenne de 10^{-4} a été appliquée de manière uniforme à toutes les couches. La gamme de coefficient d'emmagasinement spécifique correspondant à cette valeur est comprise entre 1.10^{-5} m^{-1} et 5.10^{-7} m^{-1} . En ce qui concerne la nappe libre plio-quadernaire, le coefficient d'emmagasinement est assimilé à la porosité efficace du milieu (« specific

³ HOUSSE et MAGET, 1977 : Potentiel géothermique du Bassin Aquitain, Levallois Perret : BRGM, Elf Aquitaine (Production), 167 p.

yield »), c'est à dire le volume d'eau récupérable par écoulement gravitaire. Les rares valeurs de ce paramètre pour cet aquifère sont généralement comprises entre 5 et 20 %⁴. Une valeur de 10 % a été retenue et appliquée à l'ensemble de la couche plio-quadernaire.

2.1.5. Alimentation et prélèvements

L'alimentation et les prélèvements constituent les composantes du terme puits/source de l'équation générale de l'écoulement (Eq. II. 1).

La pluie efficace a été calculée à partir des chroniques de pluviométrie et des données d'évapotranspiration fournies par Météo-France. Ces calculs sont réalisés pour une réserve utile (RFU) donnée, classiquement égale à 100 mm ou 150 mm (Figure 4). Ces valeurs de pluie efficace sont ensuite appliquées uniformément sur les zones d'affleurement identifiées comme des aires potentielles d'alimentation et de mise en charge.

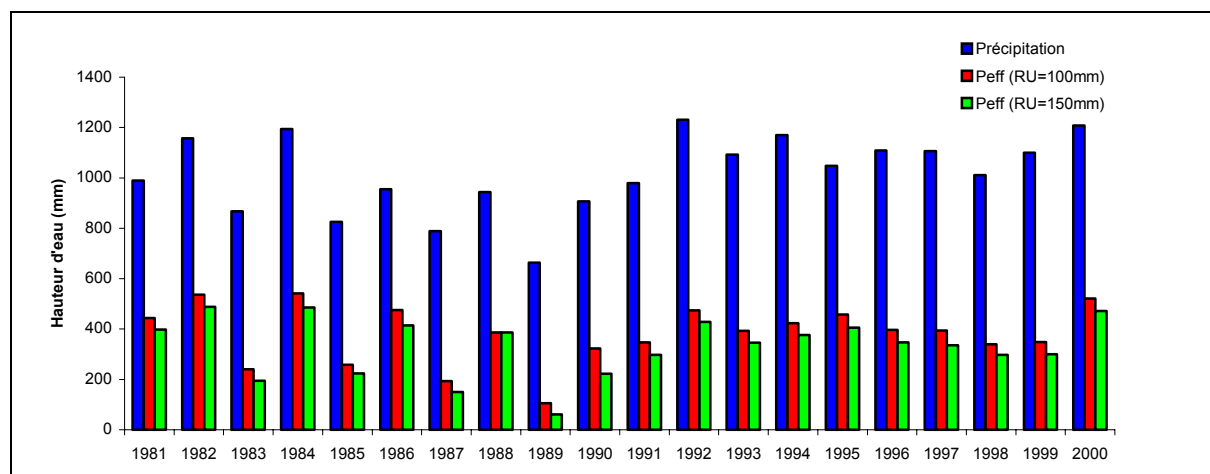


Figure 4 : Pluies efficaces calculées pour une RFU de 100 et 150 mm (données Météo-France)

Il s'est avéré au vu des premiers résultats de simulation qu'une valeur homogène de pluie efficace appliquée uniformément n'était pas satisfaisante. Un coefficient correctif inférieur compris entre 0 et 1 a été appliqué. Ce coefficient est censé rendre

⁴ JEHL, 1967 : Etude hydrogéologique de la nappe phréatique de la bordure orientale du Haut-Médoc entre Ste-Hélène et la Garonne, Thèse 3^{ème} Cycle Bordeaux, 76 p.

compte de la part de superficies participant réellement à la recharge. Les valeurs ont été obtenues par dichotomie, à partir des informations lithologiques des formations affleurantes. Pratiquement, ce coefficient est élevé (0,37 à 0,62) pour les formations plio-quadernaires qui présentent des caractéristiques hydrauliques et géographiques homogènes, et plus faible (0,1) pour les formations éocènes qui sont très réduites à l'affleurement et généralement sub-affleurantes sous un recouvrement qui va limiter le flux entrant dans l'aquifère. Une fois ces coefficients déterminés en régime permanent, ils ont été conservés *in extenso* pour l'ensemble des simulations en régime transitoire, attendu que les phénomènes physiques censés être intégrés dans ce paramètre sont indépendants du temps, tout du moins à l'échelle considérée.

L'ensemble des forages recensés en 1999 a été implémenté au sein du modèle. Pour chaque ouvrage, les chroniques de volumes extraits annuels ont été renseignées sur la période de 1981 à 1999. Il faut cependant souligner la disparité de l'information disponible entre par exemple la couche éocène, qui dispose d'un suivi régulier depuis plusieurs années et la couche miocène, dont les volumes annuels prélevés souffrent vraisemblablement d'une méconnaissance et d'une sous-estimation importante.

Si chaque forage est identifié de manière explicite au sein du modèle, les prélèvements sont globalisés au sein de chaque maille. La distribution globale est la suivante :

- 662 points de prélèvements pour la couche miocène, répartis sur 378 mailles de calcul ;
- 660 points de prélèvements pour la couche oligocène, répartis sur 385 mailles de calcul ;
- 581 points de prélèvements pour la couche éocène, répartis sur 430 mailles de calcul.

A titre d'exemple, la Figure 6 présente la répartition des volumes prélevés par maille de calcul pour l'année 1996. Le volume total soutiré connu pour cette année est de 123.10^6 m^3 , dont 19.10^6 m^3 à l'aquifère miocène, 42.10^6 m^3 à l'aquifère oligocène et 62.10^6 m^3 à l'aquifère éocène. Ces volumes n'englobent pas les volumes annuels extraits des sources. Un bilan complet pour la couche oligocène nécessiterait la prise

en compte, pour 1996, de 15.10^6 m^3 supplémentaires, fournis par les sources de Thil-Gamarde et Fontbannes. Les sources étant simulées par une cote de débordement, ces volumes ne rentrent pas dans le calcul du terme puits/source.

La chronique des volumes prélevés pour la période 1981 – 1999 souligne une légère croissance (Figure 5) dont l'amplitude reste toutefois masquée par l'augmentation de la connaissance des volumes prélevés à la couche miocène.

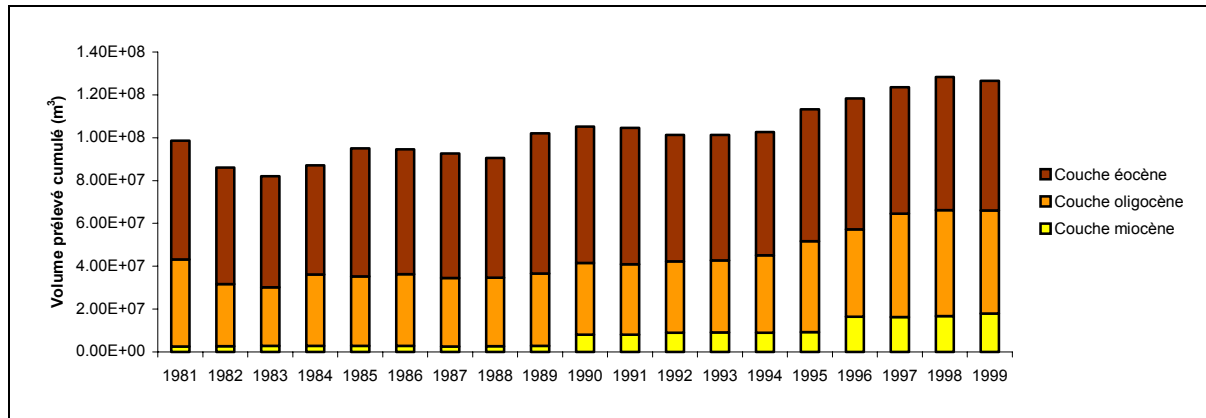


Figure 5 : Volumes annuels cumulés prélevés par couche modélisée

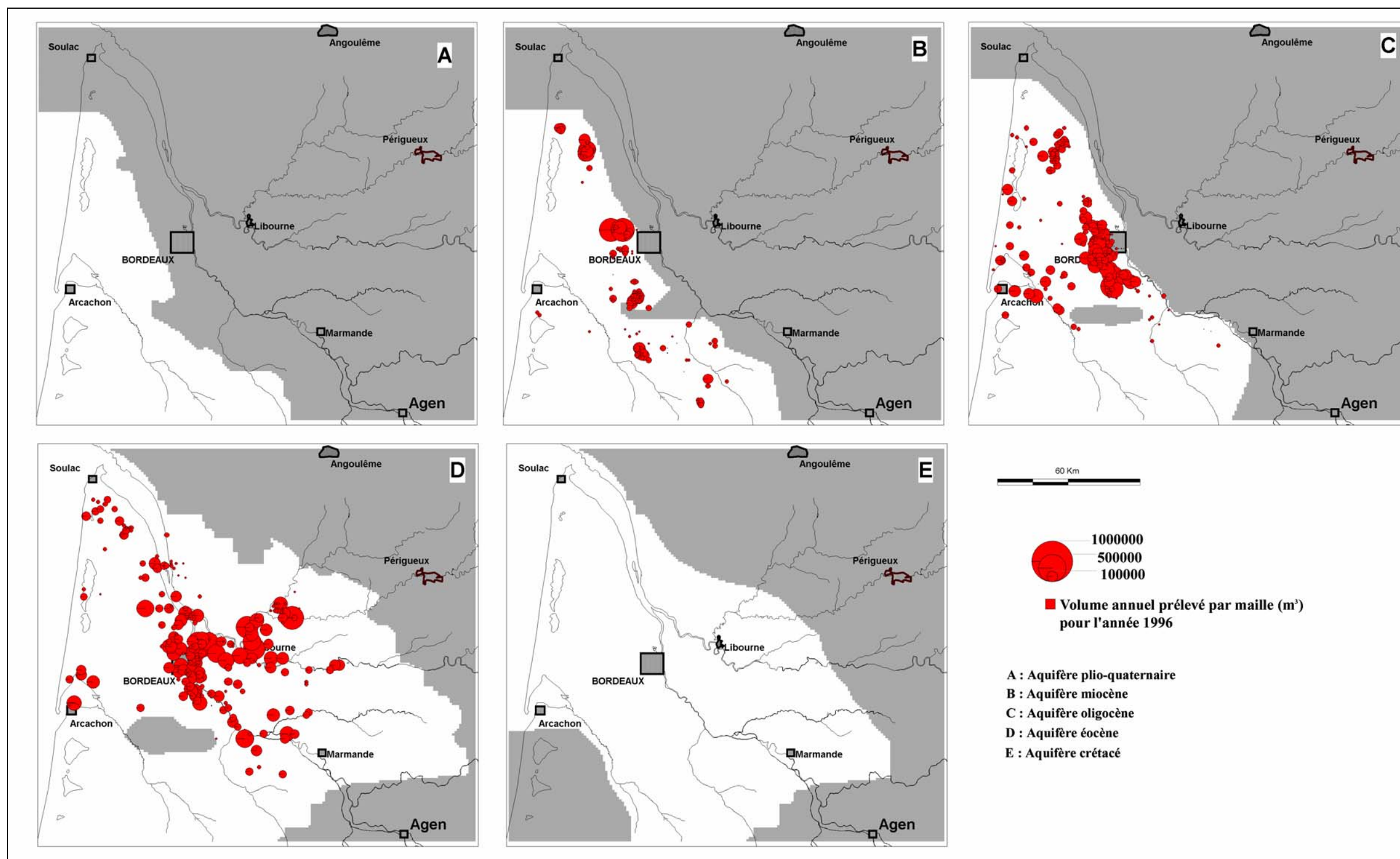


Figure 6 : Volumes annuels prélevés par maille de calcul pour l'année 1996

2.1.6. Réseau d'observation

Les chroniques d'observations utilisées pour les phases de calage et de validation ont été obtenues à partir des données des différents réseaux de surveillance des nappes, par le biais du Réseau National des Données sur l'Eau (RNDE). L'outil ADES (Accès aux Données sur les Eaux Souterraines), mis en place par le RNDE, permet à l'utilisateur de disposer d'une large gamme de données actualisées quantitatives et qualitatives sur les eaux souterraines. 116 piézomètres de contrôle ont pu être intégrés au modèle à partir de cette base. Ces points de contrôle se répartissent comme suit :

- 16 points affectés à la couche miocène ;
- 31 points affectés à la couche oligocène ;
- 69 points affectés à la couche éocène.

La distribution géographique des points d'observation, non homogène à l'échelle considérée (Figure 7), ne permet pas une caractérisation précise de la piézométrie des différentes nappes mais assure un contrôle sur les grandes figures d'écoulement.

A date, aucun point de contrôle ne disposant d'un suivi temporel n'est disponible pour la couche plio-quadernaire. La vérification des charges calculées ne peut se faire ici que pour un ordre de grandeur à partir de données existantes souvent anciennes.

Les chroniques piézométriques correspondent généralement à des mesures manuelles, ou plus rarement à des enregistrements continus par capteur. Le pas d'échantillonnage des mesures manuelles est discontinu ce qui rend difficile le traitement de ces chroniques. De nombreux phénomènes de courte période et de forte amplitude apparaissent fréquemment, correspondant le plus souvent à l'influence des pompages. Ces variations masquent quelquefois l'évolution à plus long terme des hauteurs piézométriques.

La comparaison directe avec les charges calculées par le modèle est de ce fait délicate. En effet, les charges calculées par le modèle sont des charges moyennes annuelles qui n'intègrent pas les phénomènes modificateurs de plus courte période

..

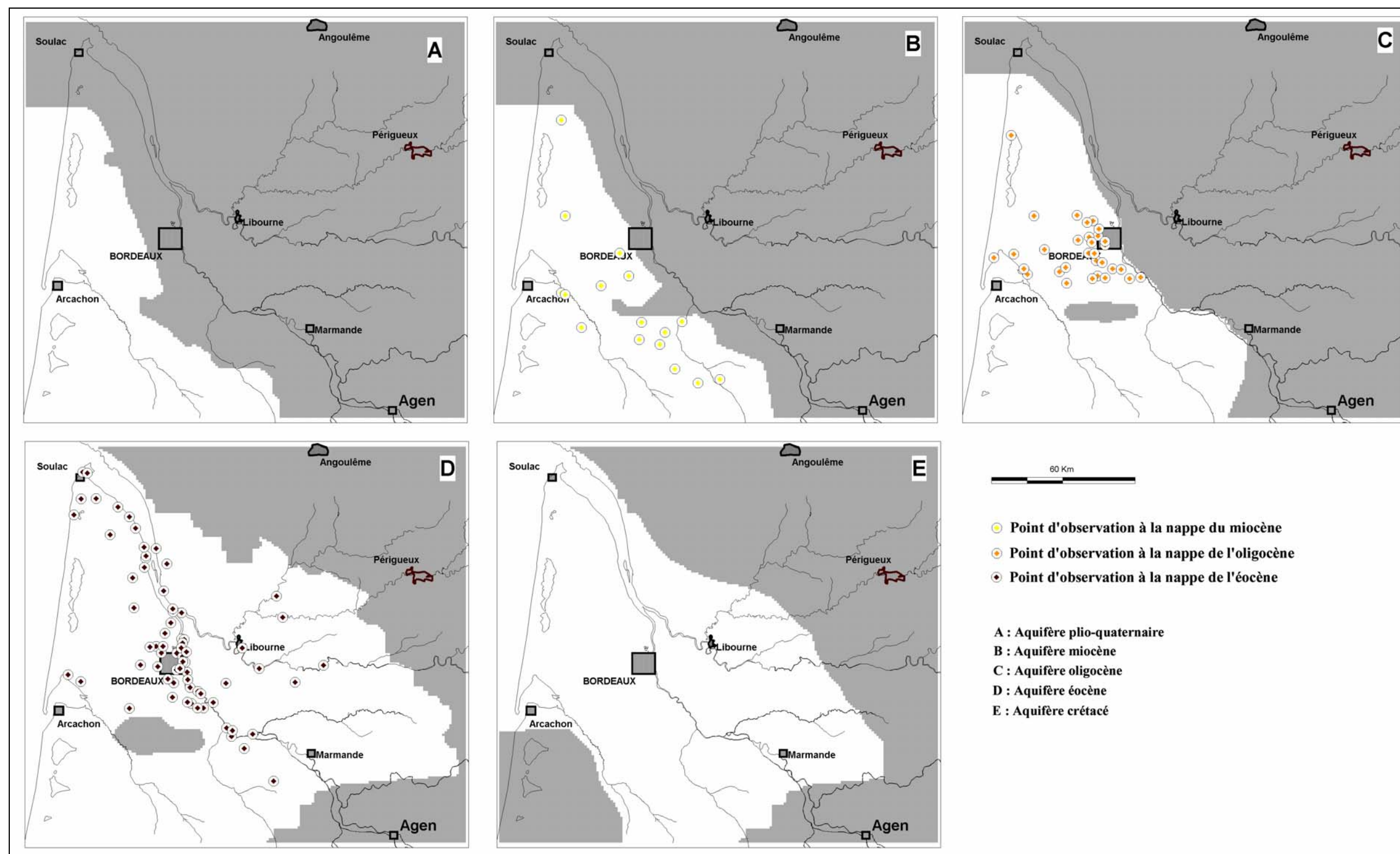


Figure 7 : Localisation des piézomètres de contrôle

A ce titre, certaines évolutions transitoires observées sur des piézomètres, induites par des prélèvements de courte durée, ne pourront être restituées puisque les volumes prélevés correspondant dans le modèle sont moyennés sur la période de contrainte temporelle. La comparaison directe avec les charges calculées par le modèle est de ce fait délicate.

La charge calculée est affectée à la totalité de la maille, c'est à dire à une surface de 1 km². Considérant un gradient hydraulique local de 2 ‰, valeur classique pour une nappe captive, la variation de charge au sein d'une même maille peut atteindre 2,8 m. Cet écart est une fonction linéaire directe du gradient hydraulique local.

2.2. Régime permanent - Simulations

Une simulation en régime permanent a été réalisée pour l'année 1996. Cette première simulation avait pour buts :

- a. de vérifier le comportement numérique du modèle ;
- b. de valider le choix des conditions aux limites ;
- c. de préciser les choix des paramètres hydrodynamiques ;
- d. de procéder à un ajustement le cas échéant.

L'année 1996 a été retenue puisque nous disposions d'un jeu de données (H, Q, P_e) suffisant pour procéder au calage. Il faut préciser qu'il n'existe pas de régime permanent établi pour les nappes tertiaires, étant donné les fortes sollicitations par pompage auxquelles elles sont soumises. Vouloir établir un régime rigoureusement permanent reviendrait à simuler l'état initial du système, avant toute mise en production. Cette simulation ne saurait aboutir à un ajustement satisfaisant des caractéristiques des réservoirs, les données piézométriques anté-production étant trop rares et imprécises. La comparaison d'un régime stabilisé (résultats du modèle) et d'un régime non stationnaire (valeurs observées) est donc soumise à de nombreuses limites. Toutefois, cette étape reste nécessaire pour une première évaluation du comportement du modèle et de ses paramètres avant le passage au régime transitoire.

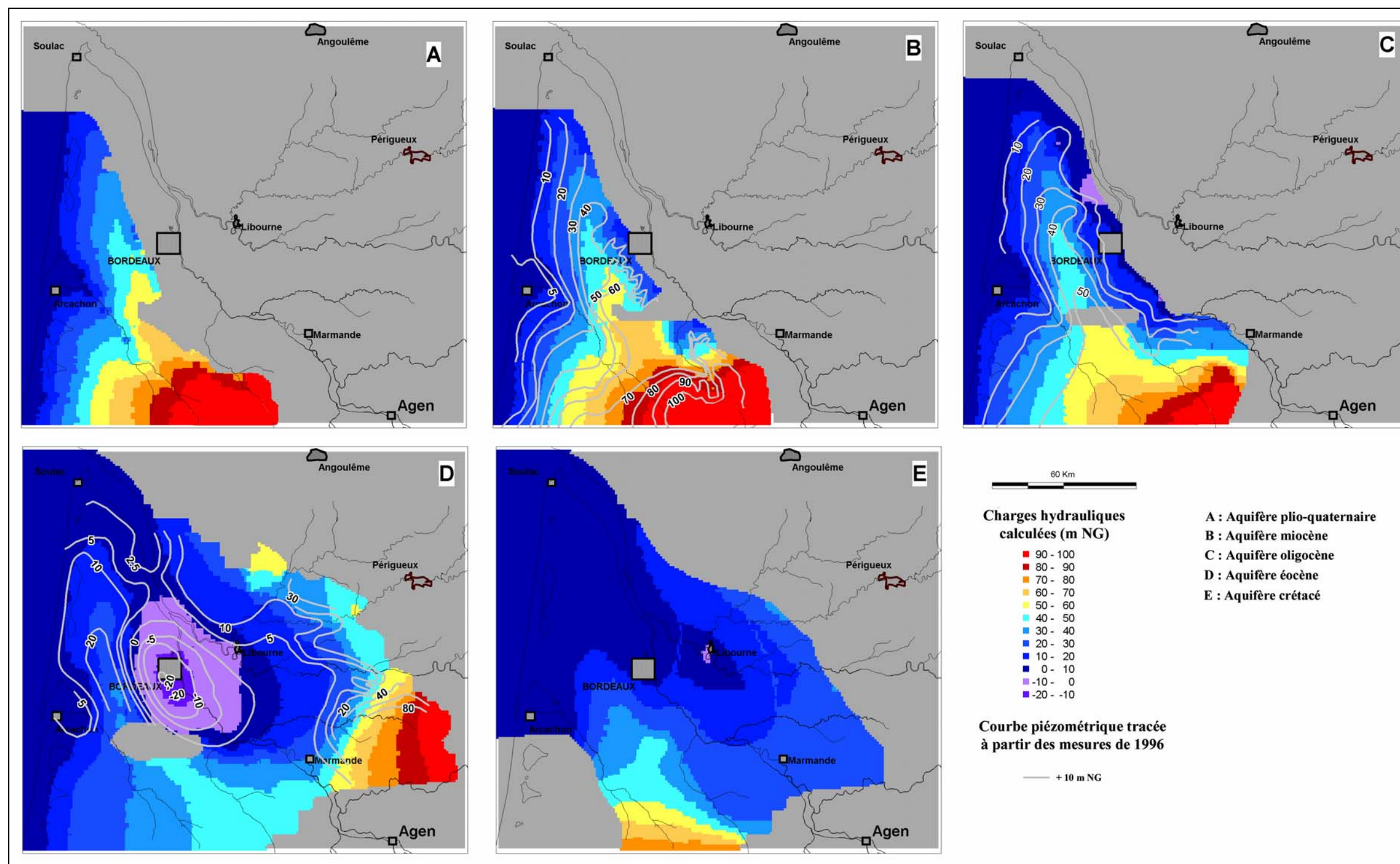


Figure 8: Cartes piézométriques calculées en régime permanent (données de 1981)

Les états piézométriques calculés pour les aquifères plio-quadernaire, miocène, oligocène, éocène et créacé sont présentés en Figure 8. On note la bonne concordance générale entre les figures d'écoulement restituées par le modèle et celles obtenues à partir des mesures piézométriques. L'ordre de grandeur des charges hydrauliques est également respecté.

Les charges restituées pour l'aquifère plio-quadernaire sont cohérentes avec les rares mesures dont nous disposons pour cet aquifère, mais qui n'ont pas été intégrées n'étant pas synchrones avec la période de simulation. Cette intégration de l'aquifère plio-quadernaire comme couche de calcul est un élément important qui constitue une entrée fondamentale du système. Cet aquifère complexe, tant par sa répartition horizontale que par son organisation verticale, peut être simulé par une couche équivalente, intégrant tous les niveaux aquifères et considérée comme libre. La dimension des cellules n'est *a priori* pas à l'échelle de la représentation des nombreux ruisseaux qui drainent cette nappe mais l'utilisation de « perméabilités locales équivalentes », non transposables directement au terrain, permet d'obtenir des résultats cohérents avec les ordres de grandeur observés. C'est le cas pour la restitution du cours d'eau de la Leyre, qui draine de manière importante l'aquifère plio-quadernaire.

Les charges hydrauliques de la nappe miocène sont bien restituées dans la partie nord. La zone de mise en charge médocaine est comparable avec les valeurs mesurées. La morphologie globale est respectée. Les ordres de grandeurs des charges restituées dans la partie sud sont corrects, même s'il n'est pas possible de restituer dans le détail les relations complexes qui existent entre l'aquifère miocène et les cours d'eau situés au sud-est. Toutefois, l'axe de drainage principal induit par le cours d'eau du Ciron apparaît de manière nette et correspond au drainage local de l'aquifère du Miocène. C'est également le cas dans la région du Médoc, où le drainage de l'aquifère miocène par la partie amont de la Jalle de Saint-Médard est particulièrement bien marqué.

La piézométrie calculée de l'aquifère oligocène est comparable à la piézométrie mesurée. Les formes dissymétriques visibles sur le Médoc sont assimilables à celles interprétées à partir des mesures. Deux zones, correspondant à des soutirages

importants, apparaissent plus déprimées que dans la réalité. C'est le cas dans la zone de Saint Laurent de Médoc du fait des nombreux forages agricoles implantés vers Saint Médard en Jalles. Dans cette zone, la faible épaisseur de l'aquifère associée à des paramètres transmissifs très élevés (importante fissuration ouverte des calcaires) reste cependant difficile à restituer à l'échelle adoptée. Plus au sud, les figures de drainage apparentes sur le tracé du cours d'eau de la Leyre sont beaucoup plus amorties sur la morphologie piézométrique calculée.

La morphologie de la nappe éocène est la plus complexe, car fortement influencée par les prélèvements. D'une manière générale, la piézométrie simulée est cohérente avec celle mesurée. La zone du Médoc où les écoulements se font d'une part en direction de l'océan Atlantique et d'autre part en direction de la Garonne et la Gironde, est bien restituée. La zone la plus problématique correspond à la zone de la « dépression bordelaise ». L'amplitude des rabattements provoqués par les soutirages est globalement respectée, quoique légèrement sous-estimée. Le modèle dissymétrique proposé à partir des mesures piézométriques est difficile à restituer, la dépression se propageant vers l'est en direction de Libourne. Le rôle des structures faillées à l'aplomb de la Garonne semble être prépondérant dans la morphologie du cône de dépression, créant vraisemblablement un écran hydraulique et limitant la propagation de l'onde de dépression. Une attention particulière sera apportée durant le calage transitoire dans cette zone pour permettre de restituer cette caractéristique du cône de rabattement.

Les charges hydrauliques calculées pour l'aquifère crétacé correspondent aux valeurs mesurées. Ce résultat est principalement induit par l'application sur cette couche de contraintes importantes par le biais de potentiels imposés. Si cette solution peut être validée à l'examen des cartes piézométriques obtenues, un soin particulier sera apporté à l'étude des flux rentrant et provenant de cette couche lors du régime transitoire, afin de s'assurer que ce choix n'induit pas un biais trop important dans le bilan global.

Le bilan du système toutes couches confondues sur le domaine a été effectué pour vérifier la cohérence du modèle (Tableau 4).

ENTREES = 3693000 m³.j⁻¹		SORTIES = 3693000 m³.j⁻¹	
Recharge = 3510000 m³.j⁻¹		Recharge = 0	
Potentiel imposé = 183000 m³.j⁻¹		Potentiel imposé = 1702000 m³.j⁻¹	
Pompage = 0		Pompage = 295000 m³.j⁻¹	
Drains = 0		Drains = 1696000 m³.j⁻¹	
ENTREES – SORTIES = 0 m³.j⁻¹			

Tableau 4 : Bilan des entrées et sorties en régime permanent influencé

Dans ce bilan, un poste important apparaît. Il s'agit du débit évacué à partir des drains, censés simuler le réseau hydrographique drainant généralement l'aquifère plio-quadernaire et plus localement l'aquifère miocène. Les drains sont également utilisés pour simuler localement les sources de débordement de l'aquifère oligocène qui participent également au flux de sortie. Globalement, 46 % des intrants sont évacués de cette manière.

Les potentiels imposés constituent 5 % des entrées du système. Une part de ces débits entrant est attribuable à la zone des lacs médocains. Considérant la surface cumulée des lacs de Lacanau et de Hourtin (88 km²), le flux correspondant reste négligeable, puisque de l'ordre de 2.10⁻³ m³.j⁻¹.m⁻².

Les cartes piézométriques calculées (Figure 8) illustrent la cohérence du modèle en régime permanent, dans les limites d'application d'un régime stationnaire à un état observé non stationnaire.

2.3. Régimes transitoires - Simulations

Plusieurs simulations en régime transitoire ont été réalisées pour affiner les distributions des paramètres hydrodynamiques et tester la sensibilité du modèle. Ces simulations doivent normalement permettre de procéder au calage des valeurs de coefficient d'emmagasinement (S). Toutefois, étant donné le peu d'informations disponibles, nous avons volontairement imposé une répartition de S homogène par couche. Pour approcher au mieux la distribution de S, il aurait fallu procéder à un calage sur un modèle transitoire plus court, avec un pas temporel mensuel, voire hebdomadaire, pour appréhender de manière plus précise le comportement des

fonctions de stockage/destockage des aquifères. Les informations nécessaires pour réaliser une approche de ce type n'étant pas disponibles (chroniques de prélèvements), nous n'avons pas pu l'effectuer. Si toutefois, ces informations sont disponibles, elles pourront être intégrées ultérieurement et ne pourront que préciser les résultats présentés ci-après.

2.3.1. Chroniques piézométriques

Les simulations en régime transitoire ont été réalisées sur la période de 1981 à 1999. Les chroniques piézométriques calculées sont cohérentes avec les chroniques mesurées (Figure 9 à Figure 11).

Le peu de points d'observation renseignés concernant la nappe miocène permet toutefois de caractériser le comportement de cette dernière et valider sa simulation. Les chroniques piézométriques sont généralement stables dans le temps (Figure 9), et les valeurs calculées sont très proches de celles mesurées. Seul le piézomètre 08268X0026, situé à la périphérie de l'anticlinal de Villagrains-Landiras présente des phénomènes cycliques de faible amplitude (< 2 m) qui ne sont pas restitués par le modèle. Ces variations correspondent aux fluctuations saisonnières qui ne sont pas prises en compte étant donné le pas de temps retenu. Les chroniques issues des piézomètres situés dans la zone médocaine (07545X0002 et 08026X0001) sont correctement restituées, bien que la faible densité des points d'observation dans cette zone ne permette pas de formuler des conclusions plus avancées.

Les chroniques piézométriques caractérisant la nappe oligocène sont plus variables dans le temps (Figure 10). Les valeurs calculées sont très proches de celles mesurées, ce qui est notamment bien illustré en bordure littorale vers Lacanau (07538X0009) ou le Bassin d'Arcachon (08254X0011). L'influence des pompages apparaît localement de manière nette sur certaines chroniques d'observation, comme c'est le cas au piézomètre 08035X0337 situé dans la périphérie de Bordeaux où la chronique calculée correspond à la tendance générale de l'évolution piézométrique.

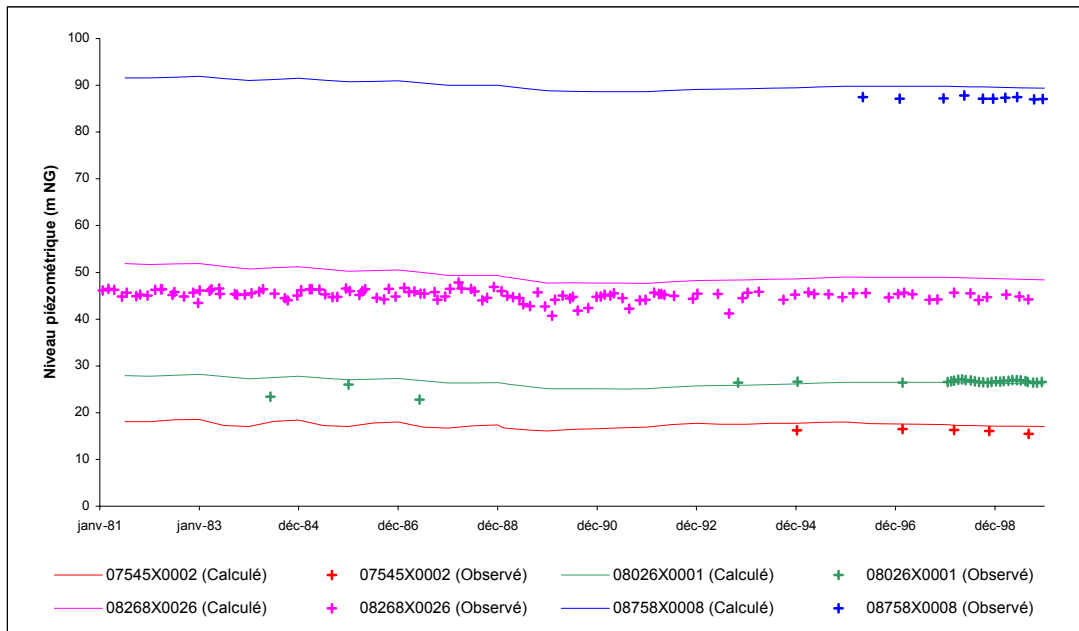


Figure 9 : Chroniques piézométriques mesurées et calculées – Aquifère miocène

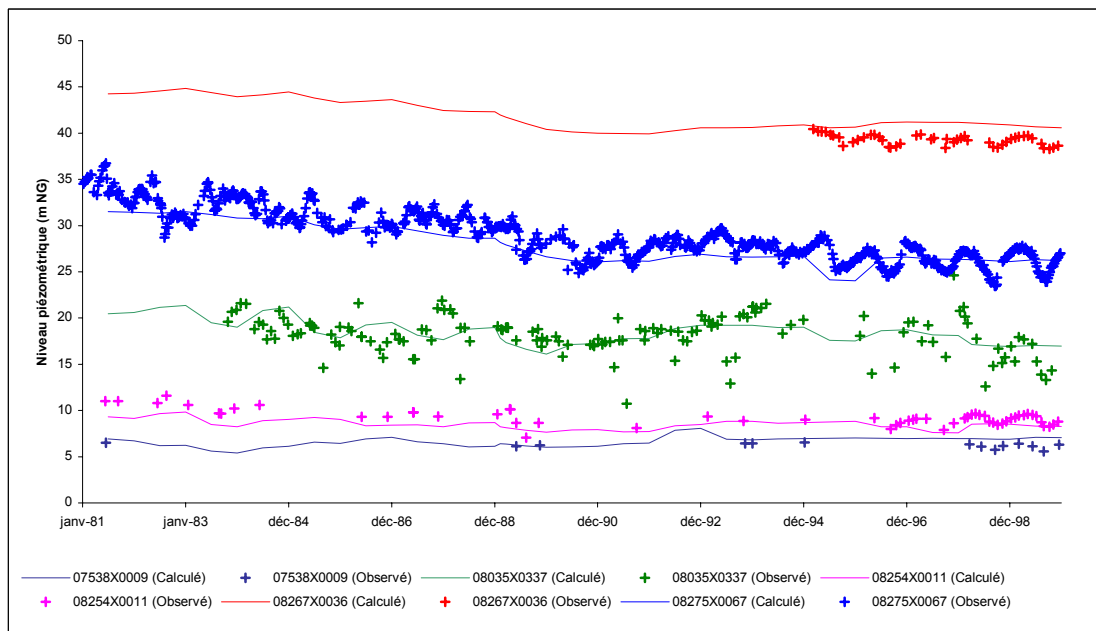


Figure 10 : Chroniques piézométriques mesurées et calculées – Aquifère oligocène

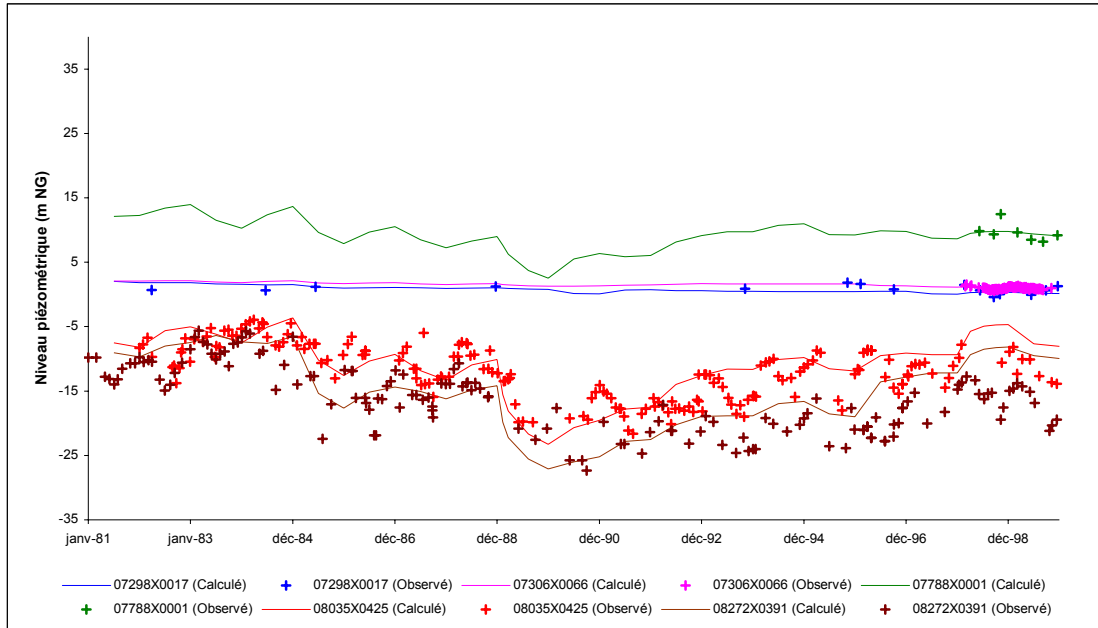


Figure 11 : Chroniques piézométriques mesurées et calculées – Aquifère éocène

L'évolution temporelle des charges calculées pour la nappe éocène est en accord avec les observations (Figure 11). On remarque que les chroniques mesurées aux piézomètres situés au nord du Médoc sont bien restituées (07888X0001, 07306X0066 et 07298X0017), dans une zone où la charge doit être connue avec précision pour tenir compte d'éventuels échanges entre l'estuaire et l'aquifère. Dans la zone bordelaise, où la nappe éocène est très sollicitée, les chroniques présentent des variations de grande amplitude, correspondant aux effets d'interférences entre les différents ouvrages exploités. Les chroniques calculées ne restituent évidemment pas ces variations de courte période mais la tendance globale simulée est cohérente avec celle tirée de l'observation.

La sensibilité du modèle et la qualité du calage ont été estimées à partir d'une fonction critère F élaborée à partir de tous les points d'observation et définie par :

$$F = \frac{1}{(H_{obs})_{max} - (H_{obs})_{min}} \cdot \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (H_{calc} - H_{obs})_i^2} \quad [2]$$

avec H_{obs} hauteur piézométrique observée ;
 H_{calc} hauteur piézométrique calculée ;
 N nombre d'observations.

Pour la simulation transitoire, les valeurs de F sont comprises entre 4 et 6 % selon les périodes considérées. La précision globale de la simulation est comprise entre 3 et 5 mètres par rapport aux valeurs observées. Compte tenu de l'extension globale du modèle et du maillage retenu, le calage du modèle est acceptable.

La qualité globale du modèle est toutefois sensiblement pénalisée par certaines chroniques qui présentent des écarts importants. Ces écarts sont généralement explicables et imputables aux simplifications utilisées pour la mise en place du modèle. Parmi celles-ci, on trouve notamment la prise en compte d'une seule couche de calcul pour l'Eocène, alors que celui-ci est constitué par plusieurs niveaux aquifères. Cette approche est aisément justifiable compte tenu de l'extension géographique du modèle. Localement, cette hypothèse simplificatrice peut introduire des biais importants dans la restitution des chroniques piézométriques. D'autres chroniques présentent des comportements non restitués par le modèle. C'est le cas au piézomètre 08523X0092 captant l'aquifère éocène, situé dans le quart sud-est du modèle, à la confluence de la Garonne et du Dropt (Figure 12). La première partie de la chronique est correctement restituée alors que les charges calculées accusent une remontée à partir de 1990 non comparable avec les charges issues de l'observation. Ces écarts montrent à l'évidence un déficit de connaissances tant sur l'architecture géologique locale des aquifères que sur les volumes prélevés dans ces zones.

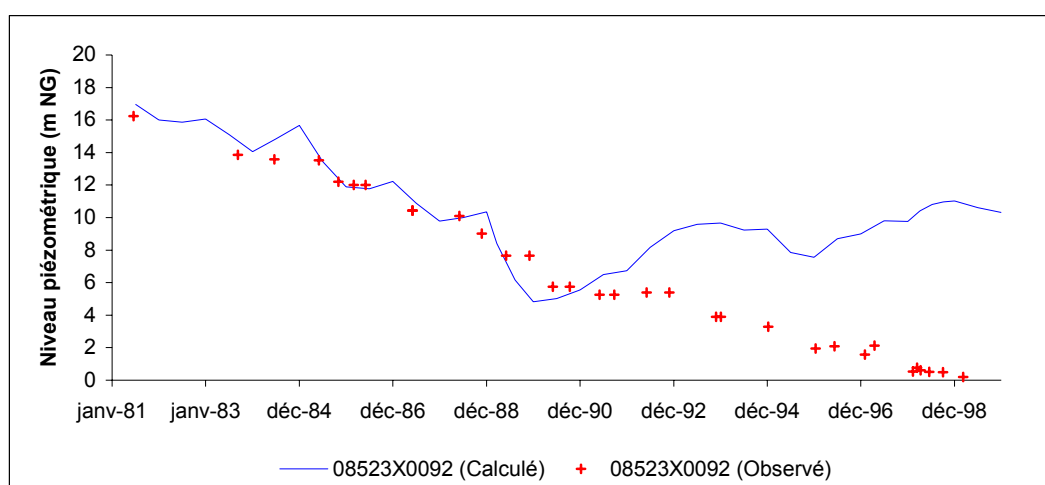


Figure 12 : Chronique piézométrique simulée au piézomètre 08523X0092 (Eocène)

Il est difficile de recalibrer ici le modèle si l'on veut tenir compte de ce degré de liberté. Néanmoins, ces zones sont suffisamment éloignées de l'aire d'intérêt pour ne pas poser de problème quant à l'utilisation du modèle mais nécessitent un examen plus approfondi dans l'optique d'une utilisation pour une gestion locale.

2.3.2. Comportement aux exutoires oligocènes

L'étude de certaines entités particulières du modèle permet également de vérifier la cohérence globale du système. A ce titre, un intérêt particulier est porté au fonctionnement des sources de Thil-Gamarde et de Budos, qui constituent un exutoire important de l'aquifère oligocène et constituent une ressource importante, puisque captées pour l'alimentation en eau potable de la Communauté Urbaine de Bordeaux.

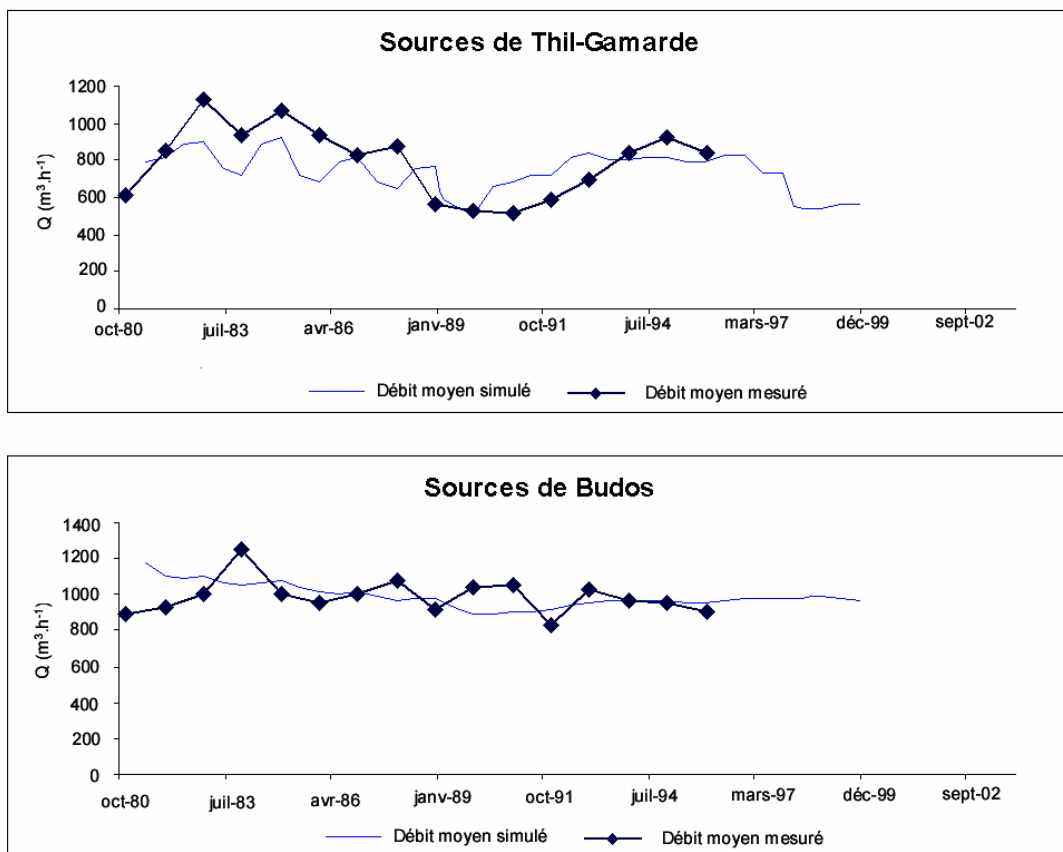


Figure 13 : Débits simulés aux sources oligocènes

Les chroniques de débit simulées pour les sources de Thil-Gamarde et Budos sont cohérentes avec les valeurs mesurées (Figure 13). Les débits observés sont estimés à partir des volumes annuels extraits et englobent les fluctuations saisonnières. Le comportement des deux émergences diffère. La source de Thil-Gamarde présente une fluctuation pluriannuelle alors que la source de Budos affiche un débit relativement stable sur la période 1981-1997. C'est également le cas des débits calculés. La source de Thil-Gamarde semble réagir à la pluviométrie de manière plus marquée que celle de Budos. La part de l'écoulement réglée par les phénomènes locaux d'alimentation directe et les variations de débits induites par des effets de surcharge hydraulique sont dans ce cas plus importantes. Le site reste très dépendant des fluctuations saisonnières et pluri-annuelles et également des années sèches exceptionnelles. Ce propos doit toutefois être modéré à l'examen des conditions d'exploitation de la source. Cette dernière est aménagée par une galerie drainante et des forages permettent localement d'augmenter les volumes prélevés, diminuant d'autant la part de l'écoulement en régime non influencé. Si pour la modélisation il est possible de prendre en compte de tels aménagements notamment par le biais des « perméabilités apparentes » utilisées pour simuler le débordement, les phénomènes de sollicitation sont difficilement restituables à l'échelle envisagée. En ce qui concerne la source de Budos, les fluctuations inter-annuelles sont moins marquées et le débit observé est vraisemblablement proche de celui induit par le régime naturel de la nappe oligocène, soutenue par les aquifères sous-jacents qui assurent un débit de base important. D'une manière générale, une quantification précise des phénomènes hydrogéologiques à la périphérie de ces sources nécessiteraient une modélisation fine qu'il n'est pas possible d'effectuer à l'échelle d'un maillage régional.

2.3.3. Fonctionnement quantitatif du système

Le modèle permet d'établir le bilan des flux de chacun des aquifères. Celui-ci prend en compte les circulations de flux avec l'extérieur du système aquifère (océan, réseau hydrographique, lacs, alimentation) et les échanges par drainance entre les différentes couches qui le composent. Le bilan a été calculé à partir de la simulation du régime hydrodynamique transitoire 1981 à 1999. L'organigramme de la Figure 14 présente le bilan inter-annuel calculé sur cette période pour les entités perméables et

les éléments extérieurs au système. Les épontes ne sont pas représentées explicitement dans ce schéma. Les volumes annuels sont exprimés en millions de mètres cubes. Il faut rappeler que la représentativité des flux calculés est étroitement liée aux valeurs de perméabilités introduites dans le modèle et aux valeurs de charges calculées par ce dernier.

L'examen du bilan met en avant plusieurs caractéristiques du système. Tout d'abord, si les flux transitant à travers l'aquifère plio-quadernaire sont très importants, seulement 13 % de cette recharge parvient aux nappes sous-jacentes et participe effectivement à l'alimentation *per descensum* de ces aquifères. Une grande partie du flux entrant dans la nappe plio-quadernaire est drainée par le réseau hydrographique. D'une manière générale, notons la prépondérance des échanges verticaux entre les différents aquifères tertiaires et l'importance des flux descendants, participant de manière indirecte à l'alimentation induite de ces nappes. Ainsi l'alimentation directe de l'aquifère miocène ne représente que 12 % du flux entrant dans la couche. En ce qui concerne l'aquifère oligocène, l'alimentation est assurée à plus de 90 % par les aquifères sus-jacents, l'alimentation directe représentant environ 8 % et restant très localisée. Pour l'aquifère éocène, la part du flux entrant provenant de l'alimentation directe est de l'ordre de 35 %, soulignant l'importance des affleurements situés sur la bordure orientale de l'aquifère.

En ce qui concernent les aquifères tertiaires, on note la part importante des soutirages dans les flux sortants. A l'exception de l'aquifère miocène, dont les volumes prélevés sont très certainement sous-estimés, les flux soutirés par pompage sont égaux ou supérieurs aux flux sortant par écoulement naturel. Les pompages effectués aux sources oligocènes (Thil-Gamarde et Budos) ne sont pas comptabilisés dans les prélèvements mais comme flux de débordement.

Dans ce bilan, les flux entrant et sortant de l'aquifère créacé sont très faibles et équilibrés. Ces faibles valeurs apparentes sont notamment induites par les conditions imposées pour modéliser cette couche. Les très faibles valeurs de perméabilité verticale utilisées pour simuler l'éponte éocène/créacé limitent les échanges entre ces deux couches. L'utilisation des potentiels imposés pour restituer la piézométrie ne biaise pas le reste du bilan et le mode de calcul de cette couche peut ainsi être

validé. Il est évident que les relations entre la couche aquifère du Crétacé et de l'Eocène sont plus complexes, toutefois la solution retenue pour représenter le multicouche nord-aquitain n'introduit pas d'écart trop important dans les résultats de simulation.

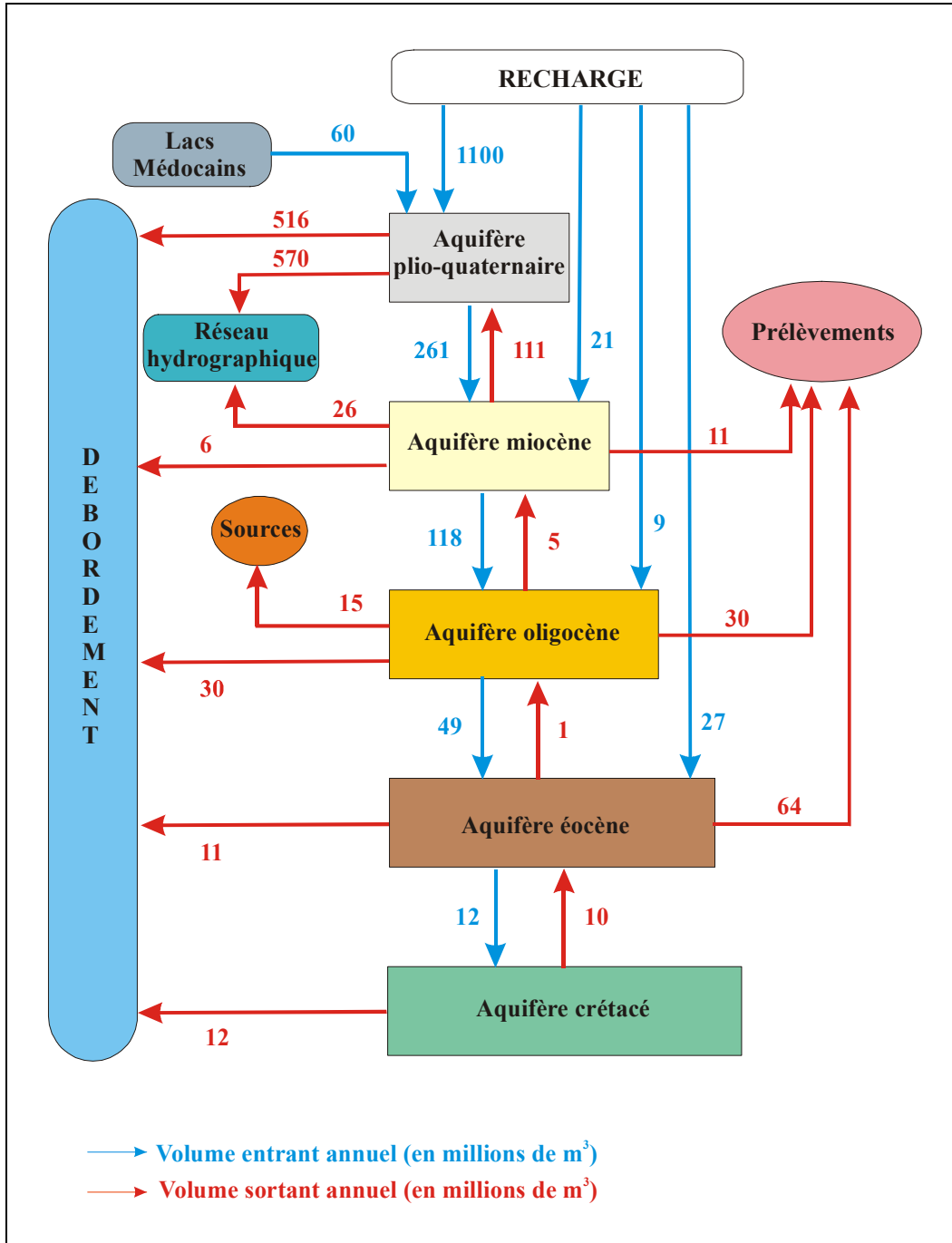


Figure 14 : Bilan inter-annuel du système calculé sur la période 1981-1999

3. MISE A JOUR GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

Compte tenu des relations d'interdépendance mises en évidence à l'échelle régionale entre les différentes aquifères tertiaires, une estimation précise de l'impact du champ captant doit également intégrer les échanges verticaux pouvant être mis en jeu. Le modèle numérique distribué (MODFLOW), particulièrement adapté à ce type d'échelle, a été retenu pour d'étudier l'influence de ces nouveaux prélèvements sur la totalité du système aquifère nord-médocain.

3.1. Les nouvelles données géologiques et hydrogéologiques

Trois sites de reconnaissance ont été retenus dans la zone centrale pour affiner le modèle géologique. Ces sites sont situés de part et d'autre du raccordement présumé entre la faille de Bordeaux et la faille de Carcans-Listrac (Figure 15). Au total, 10 forages de reconnaissance ont été réalisés entre 2001 et 2003 (Tableau 5). Les travaux de forage ont été réalisés selon la méthode rotary. Les coupes géologiques relevées à partir des déblais de forage sur site au fur et à mesure de la reconnaissance ont fait l'objet d'une détermination plus poussée en laboratoire. Les affectations stratigraphiques ont été réalisées en collaboration avec le service régional d'Aquitaine du BRGM. A chaque sondage de reconnaissance, un jeu de diagraphies différées a été réalisé.

Six profils de reconnaissance par sismique réflexion haute résolution ont été effectués par la société d'étude GEOLITHE, sous la maîtrise d'ouvrage du SMEGREG. Le linéaire total prospecté est de 21 kilomètres, réparti comme suit : deux profils de 2500 m, deux profils de 3000 m et deux profils de 5000 m (Figure 15). La « sismique haute résolution » a été réalisée à l'aide d'un vibreur Mertz 22 couplé à un dispositif Geometrics de type Smartseis R48 pour l'acquisition. Les fréquences de vibrations étaient comprises entre 30 Hz et 150 Hz. Les forages de reconnaissance ont permis de caler la succession lithologique de chaque profil, avec les mesures de vitesse acoustique effectuées par diagraphies sur certains des ouvrages. La migration temps-profondeur a été réalisée à partir de ces données et la résolution finale des profils migrés est comprise entre 5 et 10 mètres.

Site	Désignation du forage	Profondeur atteinte (m)
Site 1	MP1	135
Site 1	MP2	40
Site 1	SP4	168
Site 2	BP1	107
Site 3	SP0	10
Site 3	SP1	305
Site 3	SP2	214
Site 3	SP3	134
Site 3	SF1	230
Site 3	SF2	230

Tableau 5 : Forages de reconnaissance réalisés

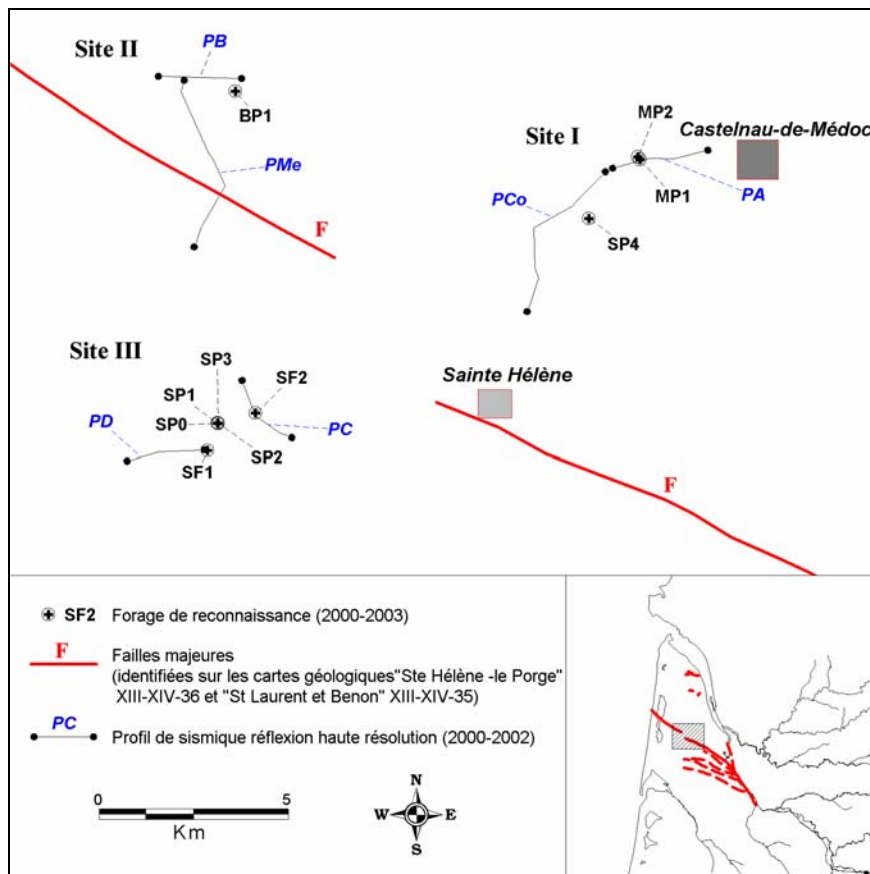


Figure 15 : Implantation des forages de reconnaissance et profils de sismique réflexion haute résolution

L'étude combinée des profils sismiques et des sondages de reconnaissance a permis d'affiner la géométrie de l'aquifère oligocène et de ses épontes associées. Les études de synthèse précédentes (HOSTEINS, 1982) ne laissaient pas présager de structuration notable de l'aquifère oligocène dans la partie médocaine. Toutefois, certains travaux avaient pourtant mis en évidence sur le littoral des variations d'épaisseur et de faciès dans les séries miocènes, interprétées alors comme liées au jeu de failles normales orientées localement est-ouest⁵. Le prolongement de ces accidents dans la zone d'étude n'avait pu être précisé, ni d'ailleurs leur influence potentielle sur la géométrie des aquifères tertiaires en général ou l'aquifère oligocène en particulier. Notre étude n'a pas mis en évidence d'accident tectonique cassant majeur sur la zone d'étude. Les géométries observées dans les séries oligo-miocènes attestent cependant d'une flexure tectonique non négligeable. Le jeu tectonique cassant qui affecte les séries oligocènes et même miocènes le long de la faille de Bordeaux, au voisinage de l'agglomération, se transforme vers le NO en une simple flexuration synsédimentaire oligo-miocène qui ne provoque pas de véritables discontinuités dans les séries tertiaires. Cette structure correspond probablement à un amortissement du jeu de la faille normale en profondeur mise en évidence dans les formations mésozoïques sur le littoral, à la faveur des forages pétroliers de Carcans. La déformation est probablement ante-miocène comme l'atteste l'étude de ces dépôts. Les formations miocènes reposent en « on-lap » sur la paléotopographie oligocène engendrée par cette déformation.

L'ensemble de ces informations a permis d'établir un schéma général pour la géométrie des aquifères dans cette zone (Figure 16). Deux compartiments sont distingués :

- **un compartiment sud**, où l'aquifère oligocène est particulièrement bien développé, présentant une épaisseur maximale de l'ordre de 80 mètres. L'éponte inférieure oligo-éocène est ici bien développée (30 mètres) et présente une topographie déformée. L'éponte supérieure oligo-miocène, plus homogène, présente une structuration moindre du fait de l'amortissement progressif de la déformation. Sa puissance maximale est proche de 20 mètres. Cette zone correspond à la partie septentrionale de la flexure, où les dépôts présentent leur épaisseur maximale.

⁵ CARALP et VIGNEAUX, 1960 : Aspect structural du Médoc Atlantique, C.R.Somm.S.G.F., (6), pp. 796 - 800.

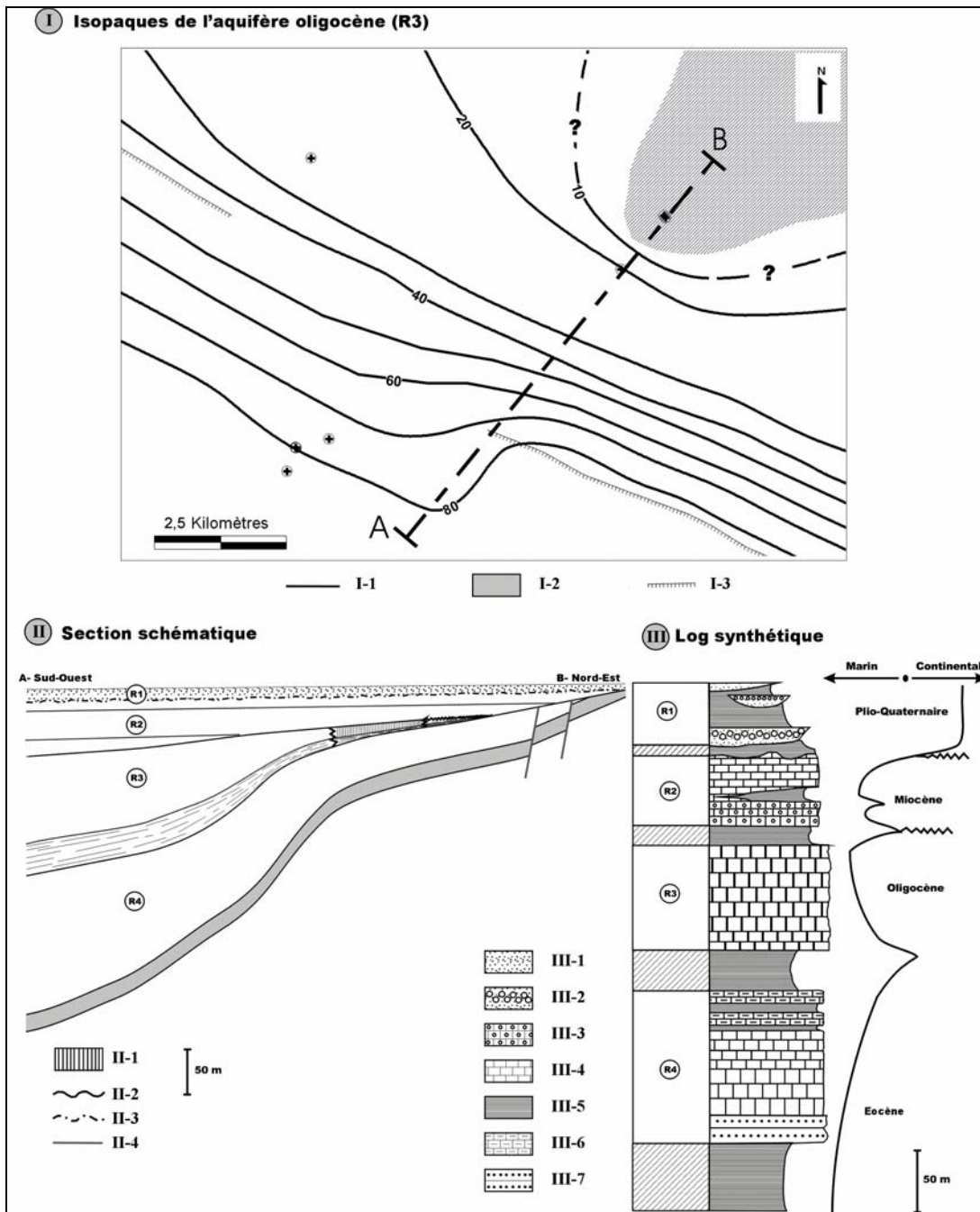


Figure 16 : Synthèse géologique de l'aquifère oligocène médocain⁶

I. Isopaques de l'aquifère oligocène. II-1 courbe isopaque. I-2 lacune de dépôt aquifère oligocène. I-3 faille identifiée en profondeur. **II. Coupe synthétique à travers les formations tertiaires.** II.1. zone de karstification de l'aquifère oligocène. II-2. surface d'érosion oligocène. II-3. surface d'érosion anté-pliocène. II-4. faille. **III. Log géologique synthétique et milieux de dépôts associés.** III-1. sable. III-2. sables et graviers. III-3. calcaire gréseux. III-4. calcaire. III-5. argile-marne. III-6. calcaire lacustre. III-7. alternance sable-calcaire gréseux.

⁶ LARROQUE et DUPUY, 2004 : Apports de la sismique réflexion haute résolution à l'identification des structures profondes des formations tertiaires en Médoc (Gironde, France) : implications hydrogéologiques, C.R. Geoscience, (336), 12, pp. 1111-1120.

- **un compartiment Nord**, caractérisé par une formation oligocène peu épaisse (20 – 30 m), vraisemblablement en liaison hydraulique directe avec les formations aquifères miocènes et interconnectée avec les formations plio-quadernaires sus-jacentes via l'aquifère relais du Miocène. Les calcaires oligocènes présentent dans cette zone une fissuration ouverte importante, voire un début de karstification. Ces phénomènes de dissolution des calcaires sont connus par ailleurs, notamment à l'est de la Garonne ⁷et plus localement au nord de la zone d'étude ⁸où la présence d'un horizon karstique d'altération y est mise en évidence au sein de formations oligocènes en situation phréatique.

D'une manière générale, ces observations mettent en évidence la capacité des calcaires oligocènes à une dissolution préférentielle selon les variations locales de lithologie d'une part, et d'autre part des fissurations préexistantes d'origine tectonique. Leur implication hydrogéologique est dès lors primordiale puisque les propriétés hydrauliques de ces formations vont être grandement dépendantes de ces phénomènes. De plus, dans le cas d'une continuité hydraulique même locale comme observée dans le compartiment nord et sous réserve d'une fissuration importante, l'aquifère miocène pourrait offrir un soutien important en cas de prélèvements intenses dans l'aquifère oligocène. En contrepartie, la pérennité de la qualité de cette ressource vis à vis de pollution potentielle provenant de la surface, ou d'une dégradation à plus long terme par mélange avec des eaux de surface, reste problématique.

L'impact de la structure de Castelnau-Médoc sur les formations tertiaires a pu être précisé. Cette dernière semble avoir limité l'ampleur de la transgression oligocène vers l'est et induit localement une réduction notable de l'épaisseur des dépôts. Ces terrains ont par la suite vraisemblablement été enlevés sur les parties les plus hautes par une érosion ante-miocène. A la périphérie du dôme de Castelnau-Médoc, les terrains oligocènes ont subi une karstification importante, comme l'atteste la présence d'une fissuration importante au forage SP4. Sur le centre de la structure, la

⁷ KLINGEBIEL *et al.*, 1993: Facteurs faciologiques et tectoniques contrôlant la karstification sur la marge nord aquitaine (France) : exemple de l'Oligocène Nord aquitain, C.R.Acad.Sc. Paris Série II, (317), pp. 523–529

⁸ COURREGES, 1997 : Le crypto-karst de la péninsule du Médoc - Crypto-altération, dissolution, karst sous-marin et évolution quadernaire, Quaternaire, (8), 2-3, pp. 289 - 304.

présence d'argiles de décalcification au forage de reconnaissance MP1 accrédite l'hypothèse d'une altération importante des dépôts oligocènes par action météoritique, jusqu'à leur érosion totale. Les terrains miocènes reposent en discordance sur cette paléotopographie. Ces derniers présentent également un degré de fissuration élevé, comme observé au forage MP2.

Plusieurs incertitudes sur la géométrie des formations sédimentaires tertiaires ont pu être levées sur une zone jusqu'alors déficitaire en information. Les investigations géologiques ont permis dans un premier temps de souligner la complexité de l'organisation de ces dépôts et leur disparité spatiale. Cette variabilité, induite par ces changements sédimentaires et les diverses influences tectoniques doit également être précisée vis-à-vis des caractéristiques hydrodynamiques des différentes formations. Seule cette phase complémentaire permettra alors de proposer des hypothèses fiables quant aux différents schémas hydrogéologiques envisageables dans cette région.

Suite à la création des forages de reconnaissance, des essais de pompages ont été effectués afin de procéder à la détermination des paramètres hydrodynamiques. Les forages suivants ont été testés : SP1, SP2, SP3, SF1, SF2 pour le site III et MP1 pour le site II. Les principales caractéristiques de mise en œuvre des essais sont données ci-après (Tableau 6).

Code	Date de début	Date de Fin	Durée de pompage (min)	Durée de remontée (min)	Débit de pompage (m ³ /h)
<i>MP1</i>	13/06/01	18/06/01	3027	4205	129,3
<i>SP1</i>	30/09/02	02/10/02	1500	1246	5,1
<i>SP2</i>	12/11/02	14/11/02	2785	392	73,4
<i>SP3</i>	06/11/02	08/11/02	1480	1385	8,9
<i>SF1</i>	23/09/03	28/09/03	4311	2574	140
<i>SF2</i>	21/10/03	27/10/03	4320	3600	150

Tableau 6 : Caractéristiques des essais de pompage

Une première détermination des paramètres hydrodynamiques des aquifères a été initiée en considérant les différents réservoirs comme homogènes, isotropes et d'extension infinie. Les forages ont été assimilés à des puits parfaits. Seuls les paramètres quantifiant l'effet de puits et l'effet pariétal ont été pris en compte. Pour

chaque essai de débit, les paramètres ont été calculés en fonction de l'adéquation de la courbe de dérivée de pression mesurée avec la courbe de dérivée de pression simulée. Les courbes de pressions simulées sont par la suite comparées avec les courbes de pression enregistrées lors des essais.

Une série de simulations a ainsi été réalisée afin de préciser le type de modèle de réservoir retenu, en les contraignant avec les observations géologiques réalisées. Les courbes de dérivée de pression obtenues sont présentées en Figure 17, la restitution des pressions correspondantes en Figure 18. Le type de modèle retenu pour chaque forage ainsi que les paramètres hydrodynamiques et géométriques correspondants sont donnés dans le Tableau 7.

- *Au puits SP1*, il existe une bonne concordance entre les valeurs de pression mesurées et calculées. Le réservoir a été considéré comme homogène et d'extension infinie devant les durées de pompage. Notons tout de même une valeur d'effet pariétal élevée (Tableau 7). Cette valeur traduit vraisemblablement une perte de charge induite par le fluide de forage dans le rayon d'invasion. Cette valeur majorante n'est donc pas uniquement liée à la modification physique des propriétés du matériau aquifère créée par le forage, mais probablement au colmatage local induit par la bentonite.
- *Au puits MP1*, il a été possible d'affiner le calage selon l'hypothèse d'un réservoir homogène semi-infini. Si le gain n'est pas directement visible sur la courbe de dérivée de la pression du fait d'un bruit important, la chronique de pression simulée s'ajuste parfaitement avec les mesures. L'hypothèse structurale semble ici en accord avec les données de la géologie. A la distance calculée de 955 m pour une limite étanche correspondrait la série de failles normales observées à l'est, et qui décale successivement l'aquifère éocène. La valeur calculée de $2,2 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ pour la perméabilité est supérieure à celle estimée par simple interpolation des données existantes dans cette zone⁹.

⁹ MOUSSIE, 1972 : Le système aquifère de l'Eocène moyen et supérieur du bassin nord-aquitain. Influence du cadre géologique sur les modalités de circulation, Thèse Bordeaux 3, 73 p.

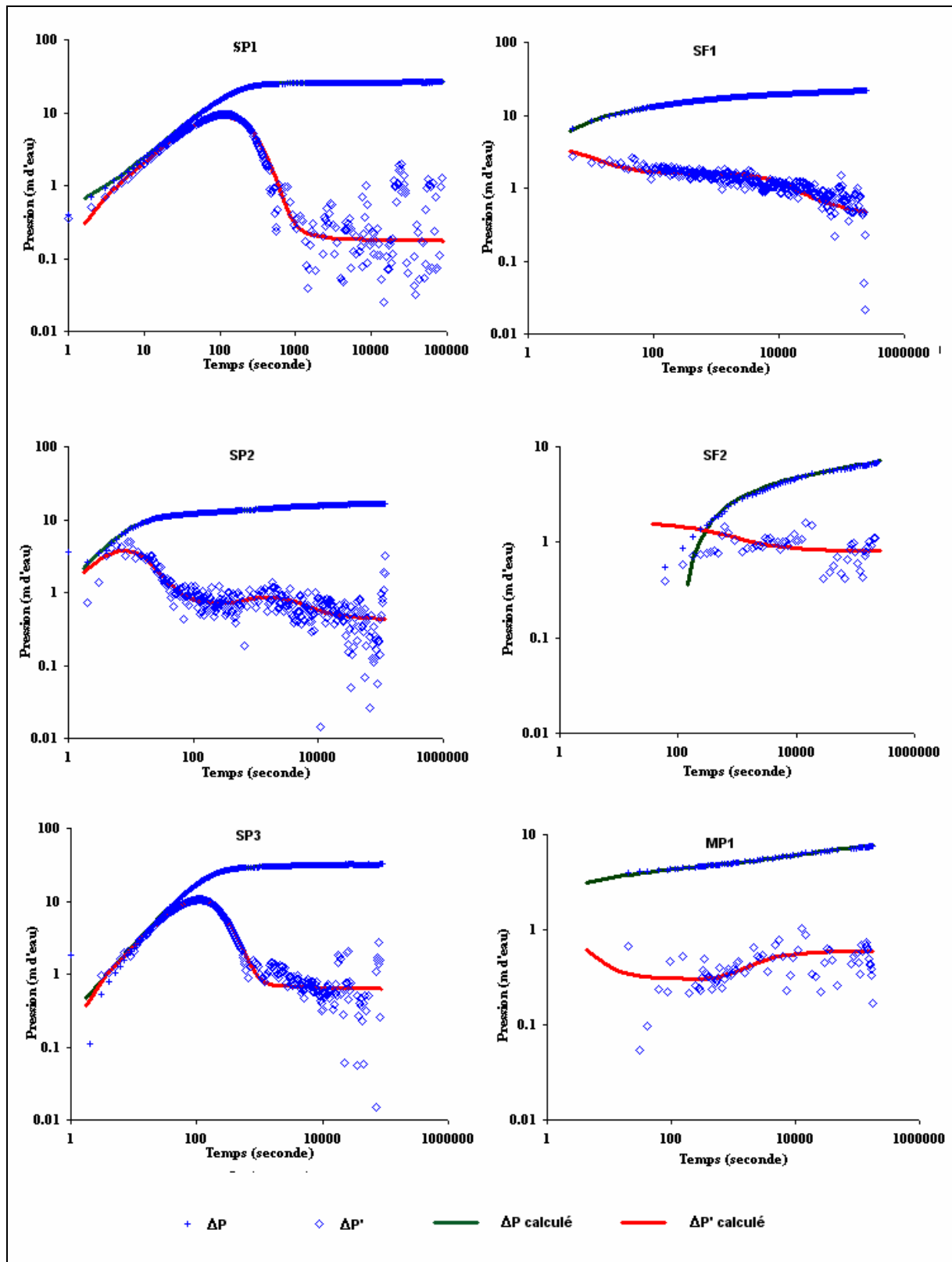


Figure 17: Evolution des courbes dérivées mesurées et simulées – Modèles variables

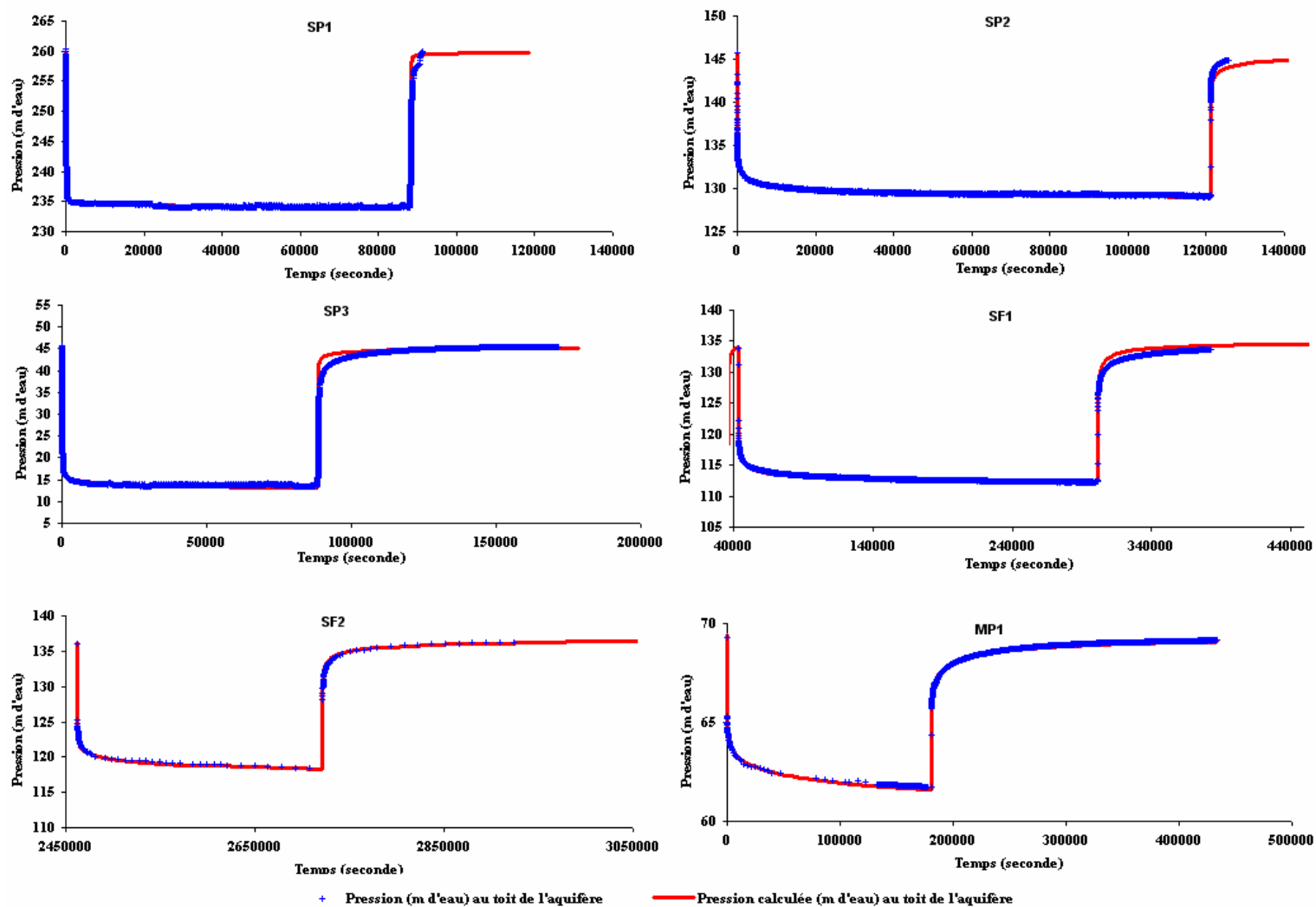


Figure 18: Evolution des pressions mesurées et simulées – Modèles variables

Code	Capacité de puits C (m ³ .Pa ⁻¹)	Effet pariétal s _k (-)	Type de réservoir	Conductivité hydraulique K (m.s ⁻¹)	Type de limite	Distance de la limite (m)
SP1	6,5.10 ⁻⁷	60	Homogène	2,1.10 ⁻⁵	Infini	/
SP2	1,4.10 ⁻⁶	1.5	Composite	3,5.10 ⁻⁵	Variation latérale de faciès	385
SP3	9,7.10 ⁻⁷	16	Double porosité	1.10 ⁻⁵	Infini	/
SF1	1,2.10 ⁻⁶	-2	Composite	2,5.10 ⁻⁵	Variation latérale de faciès	450
SF2	1,4.10 ⁻⁶	-2.4	Composite	3.10 ⁻⁵	Variation latérale de faciès	122
MP1	5,9.10 ⁻⁷	-1.1	Homogène	2,2.10 ⁻⁴	1 faille	955

Tableau 7 : Paramètres calculés - Modèles variables

- Aux puits SF1, SF2 et SP2, l'exploitation des données a permis la mise en place d'un modèle local de réservoir oligocène, limité latéralement par une variation de faciès, ce qui marque bien la dérivée de pression et l'historique de pompage. L'effet de la variation latérale de faciès est également visible au forage SP2, sur la courbe de dérivée de pression (Figure 17) :

- Un premier régime pseudo-stabilisé se met en place avant d'atteindre la limite, celle-ci se traduisant par une inflexion de la courbe.
- Un second régime stabilisé se met ensuite en place, correspondant alors à la sollicitation de la totalité de l'aquifère.

Cette prise en compte d'une variation latérale de faciès est justifiée par les descriptions des coupes géologiques, notamment entre BP1 et SP2, situés respectivement dans le compartiment nord et le compartiment sud de la zone médocaine. A cette variation de faciès correspond également une variation notable d'épaisseur, soulignée dans les profils sismiques P_{Me} et P_{Co}. Compte tenu des variations d'épaisseur et du tracé de la variation de faciès, il est difficile de prendre en compte cette géométrie à l'aide de la solution analytique.

Toutefois, les indications qualitatives obtenues sur la structure du réservoir correspondent bien au modèle géologique proposé.

Les perméabilités calculées pour les trois ouvrages, de l'ordre de 10^{-5} m.s^{-1} , sont comparables et soulignent l'homogénéité du réservoir dans cette zone. Le transit du flux est ici assuré par une porosité vraisemblablement de fine fissure et non par de la fracturation importante, dont l'hétérogénéité spatiale aurait été révélée.

- *Au puits SP3, l'interprétation a conduit à la prise en compte pour l'aquifère miocène d'un modèle de double porosité. Ce régime de double porosité correspond à une fissuration ouverte de l'aquifère. Seule la base de l'aquifère a été testée. La partie supérieure très fracturée a dû être isolée par tubage pour garantir la stabilité de l'ouvrage.*

La perméabilité calculée, proche de 10^{-5} m.s^{-1} , correspond à une perméabilité globale de système matrice-fissures.

Les essais de pompages s'intègrent bien dans le modèle géologique local proposé. En ce qui concerne l'aquifère oligocène, l'homogénéité du réservoir est bien mise en évidence dans sa partie sud. Le passage vers la zone nord-ouest s'effectue par une variation latérale de faciès avec l'apparition de calcaires largement karstifiés le long du périclinal de la structure de Castelnau-Médoc. Il convient dès lors de replacer ces faits à plus grande échelle afin de les intégrer dans les schémas d'écoulement régionalisés.

3.2. Mise à jour du modèle numérique nord-médocain

Les données structurales obtenues lors des campagnes de reconnaissance géologiques ont ainsi été intégrées au modèle géologique régional. Pour procéder à cette intégration, une approche géostatistique a été retenue. Cette approche offre l'avantage de prendre en compte la structure spatiale du paramètre considéré. La corrélation spatiale des données peut être identifiée par l'intermédiaire du variogramme.

Les variogrammes des couches aquifères miocène, oligocène et éocène ont été construits à partir des données de forage clairement identifiées sur l'ensemble du Médoc. Deux types de variogrammes ont été retenus parmi les modèles les plus usuels :

- **Type Puissance :**

$$\gamma(h) = C_0 + C.h^n \quad [3]$$

- avec C_0 effet de pépité ;
 C amplitude du variogramme ;
 n facteur puissance, $0 < n < 2$;
 h distance entre deux points.

- **Type Gaussien :**

$$\gamma(h) = C \left[1 - e^{-h^2} \right] + C_0 \quad [4]$$

Ces solutions proposées présentent un bon accord avec les valeurs mesurées (Figure 19).

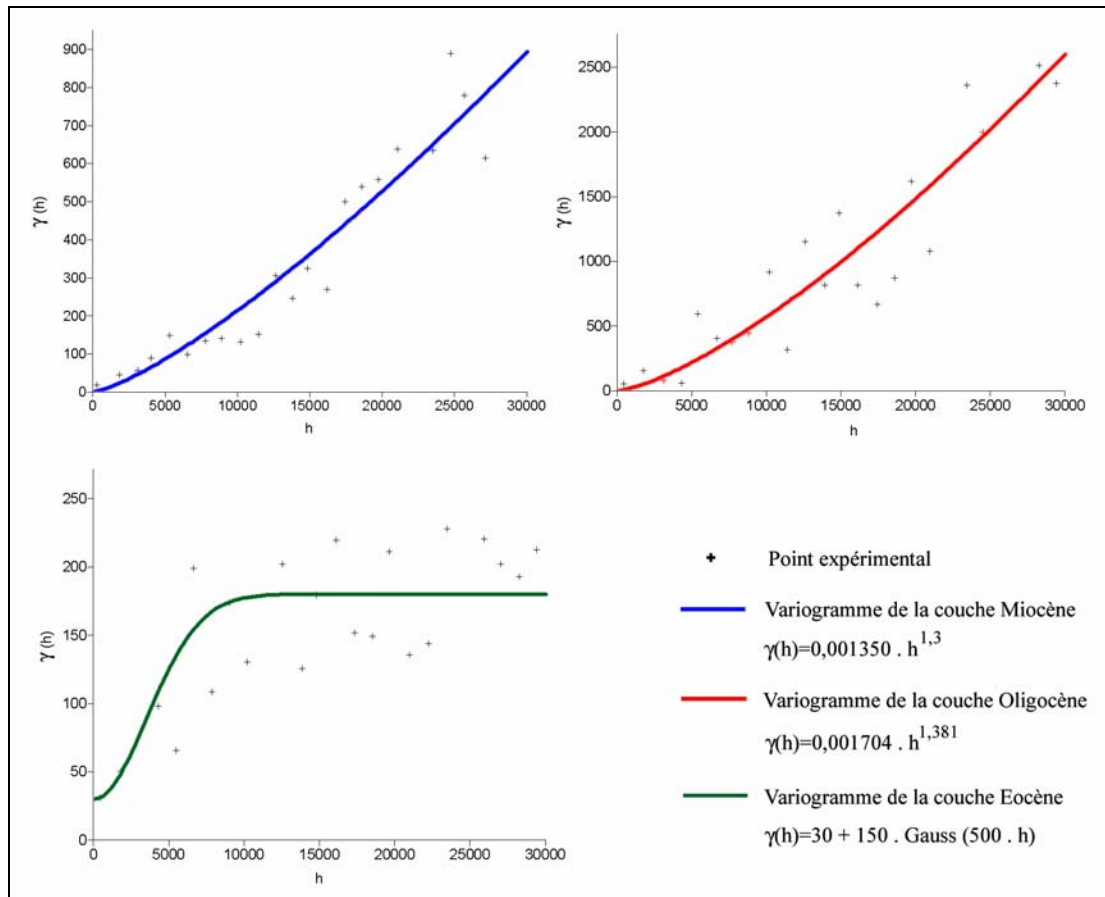


Figure 19: Variogrammes régionaux calculés pour l'ensemble des aquifères tertiaires (cote du toit de l'aquifère)

Le variogramme calculé pour la couche éocène respecte la tendance observée dans les points de mesures. Toutefois, on peut noter des écarts importants et il est délicat de proposer un modèle géostatistique moyen pour une couche composée de plusieurs faciès distincts à l'échelle régionale et imbriqués selon plusieurs couches. En revanche, les variogrammes calculés pour les couches oligocène et miocène présentent des similitudes. Des modifications tectoniques d'épaisseur observées pour l'Eocène ne se retrouvent ni à l'Oligocène ni au Miocène qui présentent de fait des similitudes dans les modèles de variogrammes proposés.

A partir de ces variogrammes, des cartes de toit et de mur pour les aquifères miocène, oligocène et éocène ont été construites par krigeage pour la zone investiguée par les forages de reconnaissance et les campagnes de sismique réflexion. Les valeurs ont été interpolées au pas kilométrique pour pouvoir être directement compatibles avec le maillage du modèle numérique. Les cartes isopaques actualisées pour les formations miocènes et oligocènes, déduites des cartes construites, permettent de vérifier la cohérence de la construction géométrique (Figure 20) avant de les intégrer dans le modèle hydrodynamique.

Les formations aquifères miocènes présentent une épaisseur plus importante dans le quart sud-ouest de la zone de modification (Figure 20a). Les épaisseurs, de l'ordre de 80 mètres, correspondent ici à celles observées aux forages de reconnaissance. Il semble se dessiner un effet de chenal, d'orientation nord-est/sud-ouest, où l'aquifère miocène présenterait une épaisseur maximale.

Les épaisseurs proposées pour l'aquifère oligocène sont cohérentes avec le modèle géologique local issu des nouvelles informations collectées (Figure 20b). Deux compartiments se distinguent clairement, présentant un contraste d'épaisseur sensible. Le passage entre les deux compartiments est marqué par une zone à fort gradient. Cette nouvelle géométrie prend en compte la lacune de Castelnau-Médoc, identifiée au nord-est.

Les cartes locales construites ont été intégrées aux cartes régionales utilisées pour la construction du modèle hydrodynamique. Bien que la zone de modification ne présente qu'une superficie faible par rapport à l'emprise globale du modèle, cette modification est nécessaire pour rendre au mieux compte du comportement des aquifères dans cette zone.

Outre les modifications géométriques, les valeurs de perméabilité ont également été modifiées dans ce modèle, à partir des valeurs obtenues par les essais de nappe.

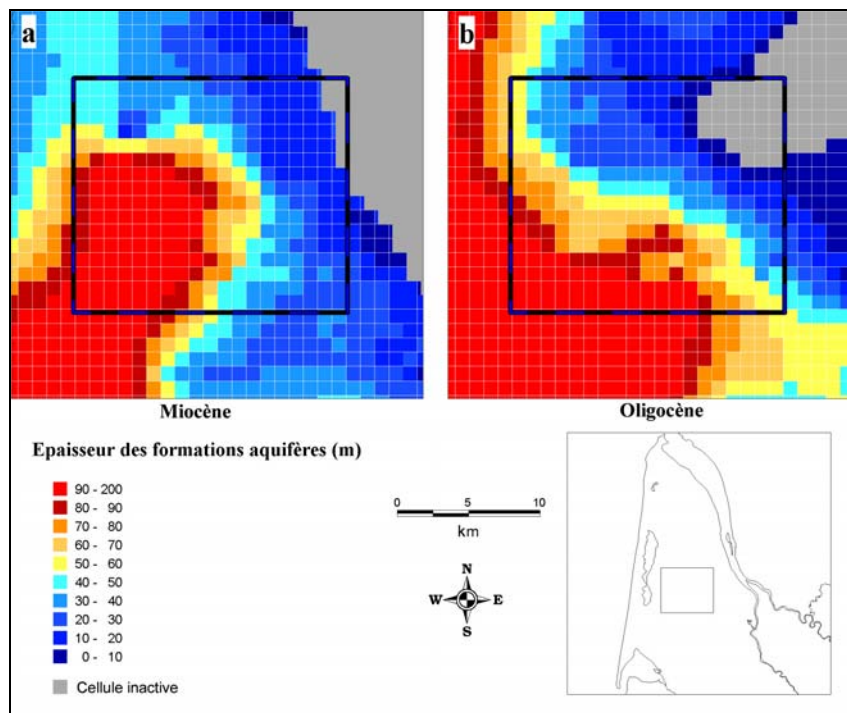


Figure 20: Mise à jour du modèle numérique médocain

3.3. Régime transitoire - Simulations

Afin de vérifier la cohérence des modifications réalisées et d'estimer leur impact sur les charges hydrauliques calculées par le modèle, une simulation en régime transitoire a été effectuée, à titre de comparaison, sur la période allant de 1981 à 1999, déjà simulée par le modèle numérique initial. A l'échelle régionale, les variations induites par ces modifications sont peu sensibles. Les courbes piézométriques présentent la même morphologie. L'impact sur les chroniques piézométriques reste également modéré, sans remettre en cause la distribution des paramètres hydrodynamiques retenue à cette échelle. La précision globale de la simulation est comprise entre 3 et 5 mètres par rapport aux valeurs observées, soit une précision comparable à celle du modèle initial. Si les écarts entre les deux modèles sont peu sensibles à l'échelle régionale, des différences apparaissent dans le détail du modelé piézométrique. L'allure générale des courbes piézométriques est donnée pour la zone centrale pour l'année 1996 en Figure 21.

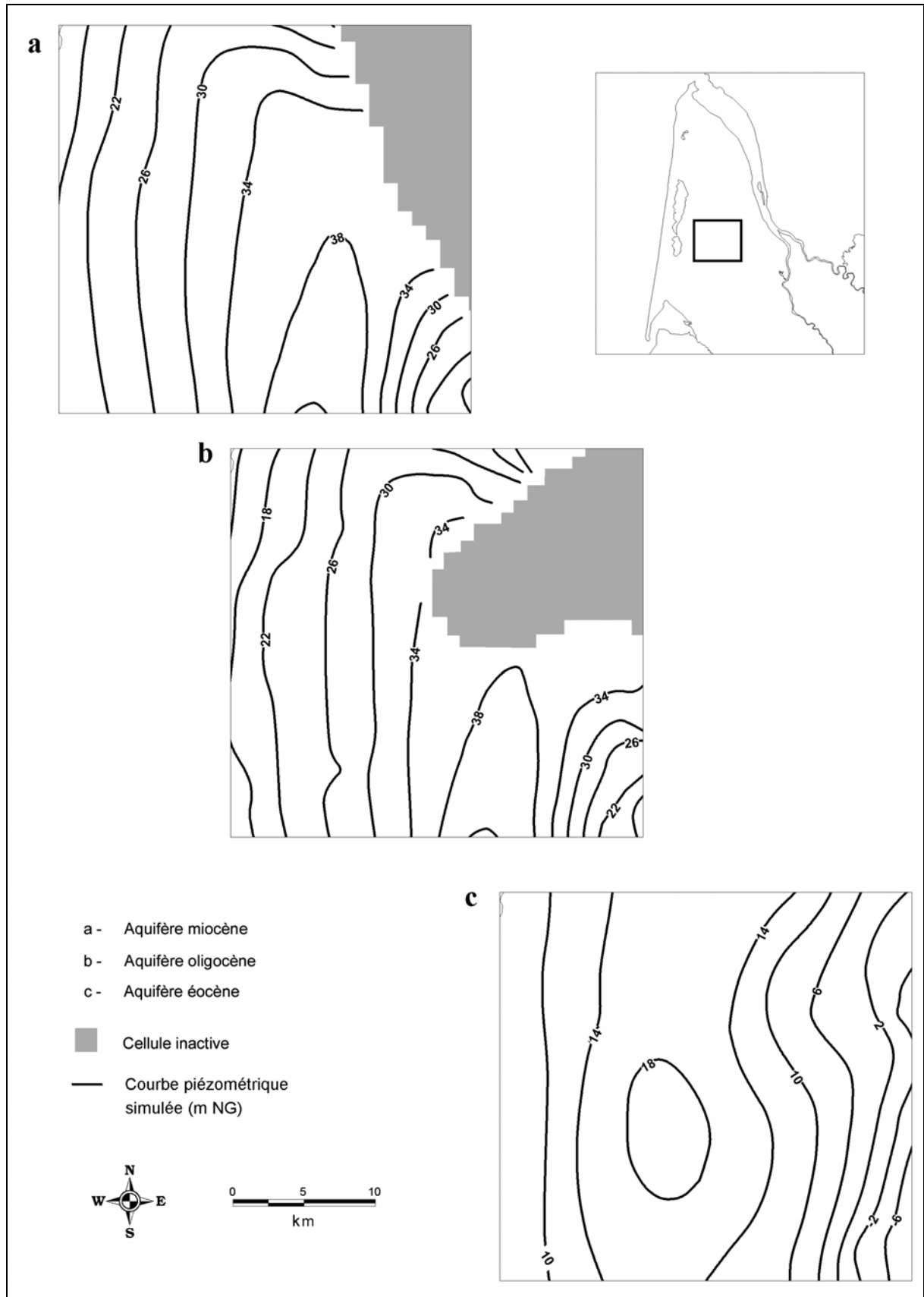


Figure 21: Hauteurs piézométriques calculées pour l'année 1996 sur la zone modifiée

- *Pour l'aquifère miocène* (Figure 21a), l'allure des courbes piézométriques reste globalement inchangée, avec des directions d'écoulement de part et d'autre d'une zone de diffluence, à partir de hauteurs piézométriques supérieures à + 38 m NG. Les hauteurs piézométriques calculées dans la partie centrale sont dans le même ordre de grandeur que celles mesurées au piézomètre SP3. Les mesures présentent une valeur moyenne de + 32 m NG, pour une valeur calculée de + 28,9 m NG.
- *Pour l'aquifère oligocène* (Figure 21b), la mise en évidence de la lacune de Castelnau-Médoc et la modification de la géométrie perturbent sensiblement le modelé piézométrique. Cette lacune divise à l'est l'aquifère en deux compartiments. Au sud, les écoulements se feraient en direction des zones d'exutoire de Thil et de Gamarde. Au nord, les modelés sont plus complexes, avec des directions d'écoulement rayonnantes à partir des zones de mise en charge localisées au flanc nord-ouest de la lacune de sédimentation. Il est possible d'envisager une continuité avec les aquifères susjacentes, et notamment l'aquifère miocène qui présente des valeurs de hauteurs piézométriques très proches de celles calculées pour l'aquifère oligocène. Pour la partie centrale, la hauteur piézométrique calculée au forage SP2 est identique à celle mesurée, avec un écart de 0,31 m.
- *Pour l'aquifère éocène* (Figure 21c), le modelé piézométrique diffère peu de celui calculé précédemment avec des directions d'écoulement s'effectuant de part et d'autre d'une zone de partage. Toutefois, les hauteurs piézométriques calculées ici sont plus faibles, avec des valeurs maximales de l'ordre de + 18 m NG pour la partie haute de la piézométrie, ce qui est cohérent avec celles mesurées au forage SP1. Au droit de la lacune oligocène de Castelnau-Médoc, les charges calculées sont inférieures à celles mesurées. On retrouve ici le problème de représentativité de l'aquifère éocène, constitué de niveaux distincts superposés pouvant être localement en communication. Ces incertitudes pourront difficilement être levées, si ce n'est par une reconnaissance précise de l'ensemble des horizons aquifères.

Dans la zone modifiée, peu de forages disposent de mesures piézométriques autorisant une vérification du comportement non-permanent des aquifères. Seul le puits 08026X0034 dispose d'un suivi irrégulier depuis 1990, mais les chroniques d'exploitation à ce puits restent incertaines. Toutefois, nous avons tenté de simuler la chronique piézométrique observée avec les deux modèles (Figure 22).

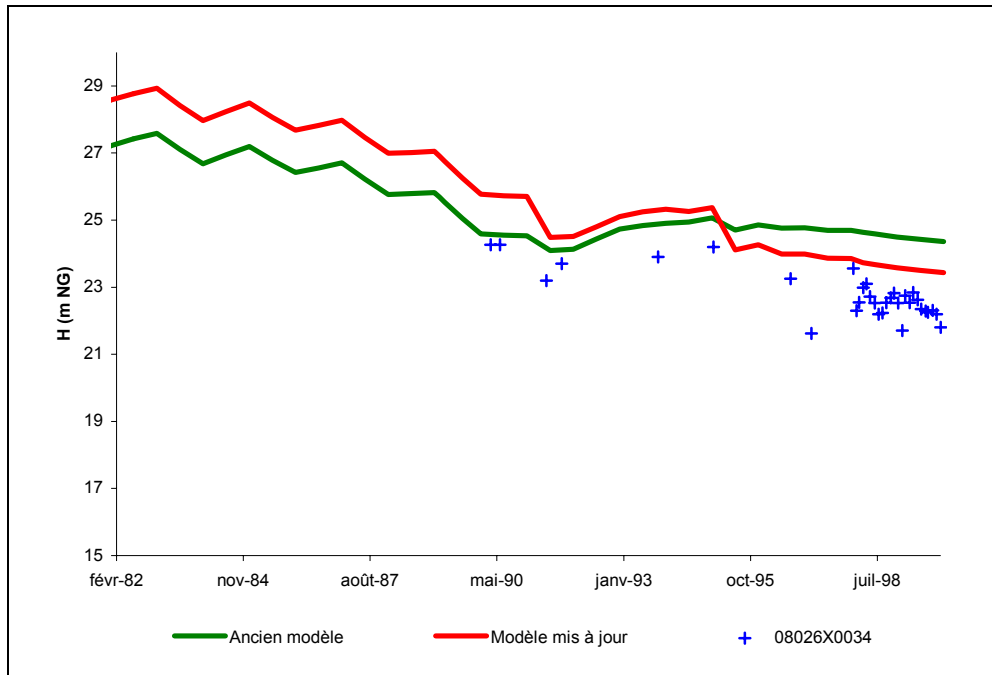


Figure 22 : Hauteurs piézométriques simulées au puits 08026X0034

Pour les années antérieures à 1990, il n'est pas possible d'estimer les écarts entre les hauteurs piézométriques calculées et hauteurs piézométriques réelles. Notons simplement que les hauteurs piézométriques calculées avec le modèle mis à jour sont supérieures à celles calculées avec le modèle primitif. A partir de 1990, les mesures réalisées sur ce puits montrent une hauteur piézométrique décroissante, passant de + 25 m NG à + 22 m NG en 8 années. Dans ce même intervalle de temps, la chronique calculée à partir du *modèle initial* présente une stabilisation apparente. La chronique calculée avec le *nouveau modèle* est quant à elle en adéquation morphologique avec la chronique mesurée, bien que surestimant les valeurs observées. Toutes choses étant égales par ailleurs, la nouvelle géométrie locale et les nouveaux paramètres hydrodynamiques retenus permettent une meilleure simulation des rares mesures de cette zone. *Actuellement, l'incertitude existant sur les prélèvements ne permet pas de procéder à un calage plus fin qui pourrait dès lors être biaisé et introduire à plus long terme des écarts significatifs.*

3.4. Exploitation projetée de l'aquifère oligocène

La mise en œuvre d'un champ captant l'aquifère oligocène dans la région médocaine est envisagée afin d'assurer la distribution en eau potable dans la partie nord du Médoc, mais également afin de proposer une solution de substitution partielle à l'exploitation de la nappe éocène en région bordelaise.

Le futur site d'exploitation est prévu sur la commune de Sainte Hélène (Figure 23). Les nouveaux captages sont répartis en deux champs. Le premier champ est composé de 7 ouvrages situés à l'ouest de Sainte Hélène. Chaque ouvrage est distant de l'autre de 1 kilomètre, selon une ligne Nord-Sud de coordonnée X = 338500 mètres. Le second champ captant est situé à 5 kilomètres du premier en direction du nord. Il est composé de 2 ouvrages, également distants de 1 kilomètre l'un de l'autre. A terme, ce dispositif d'exploitation doit produire approximativement $16000 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$, permettant de compenser une partie des $30000 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$ d'économie préconisée pour l'aquifère éocène. L'exploitation de chaque ouvrage est prévue au débit de $150 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 12 heures par jour.

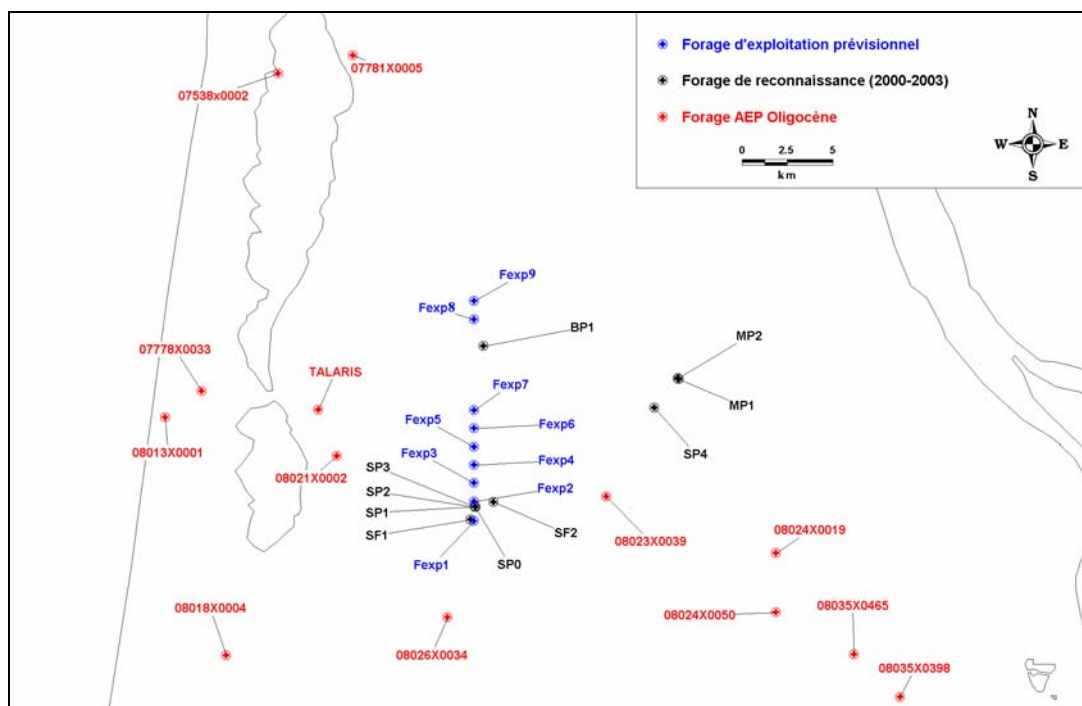


Figure 23 : Hypothèse préliminaire pour un champ captant (d'après BRGM, 1999)

3.5. Exploitation à long terme du champ captant – Simulations

Les données pour le fonctionnement du champ captant ont été intégrées au modèle numérique global. Les 9 forages, répartis en deux zones de captage, ont été ajoutés, d'après leur localisation initialement prévue. Les forages d'exploitations ont été considérés comme parfaits.

Dix années d'exploitation sont envisagées, au débit de production prévu, soit 1800 m³.j⁻¹ par puits.

Pour la simulation transitoire, les conditions initiales et limites sont celles de l'année 1999, et ont été reproduites pour les 10 années d'exploitation simulées. Une simulation de durée identique dans les mêmes conditions mais réalisée sans production du champ captant permet en théorie de disposer d'un « *état de référence transitoire* », nécessaire à l'estimation de l'impact du projet, hors toute interférence induite par d'autres phénomènes. Pour chaque période, les rabattements induits par l'exploitation du champ captant ont été calculés par simple différence entre les résultats des modèles d'exploitation et de référence.

Deux états, correspondant aux dépressions calculées pour les aquifères miocène, oligocène et éocène au bout de 1 et 10 années d'exploitation, sont présentés en Figure 24 et Figure 25. L'examen de ces figures appelle quelques commentaires :

- *Pour l'aquifère miocène* (Figure 24a et Figure 25a) : l'impact de l'exploitation de l'aquifère oligocène est modéré. Des valeurs maximales de rabattement sont observées au droit du champ captant oligocène. Ces dernières sont de l'ordre de 1 m au bout d'un an et de 1,50 m au bout de 10 années. En revanche, on observe une propagation de la dépression plus marquée vers l'ouest. A cinq kilomètres du champ captant, la dépression est encore de l'ordre du mètre, alors qu'elle décroît très rapidement vers l'est. Ce phénomène est particulièrement visible pour la partie Nord du champ captant, où la dépression est moindre à l'aplomb des forages d'exploitation oligocènes. La prépondérance du régime transmissif dans cette zone correspond à la présence de faciès miocènes très fissurés. Plus au sud-ouest, l'apparition des calcaires gréseux marque une diminution de transmissivité. *Au final, l'impact sur cet aquifère reste modéré.*

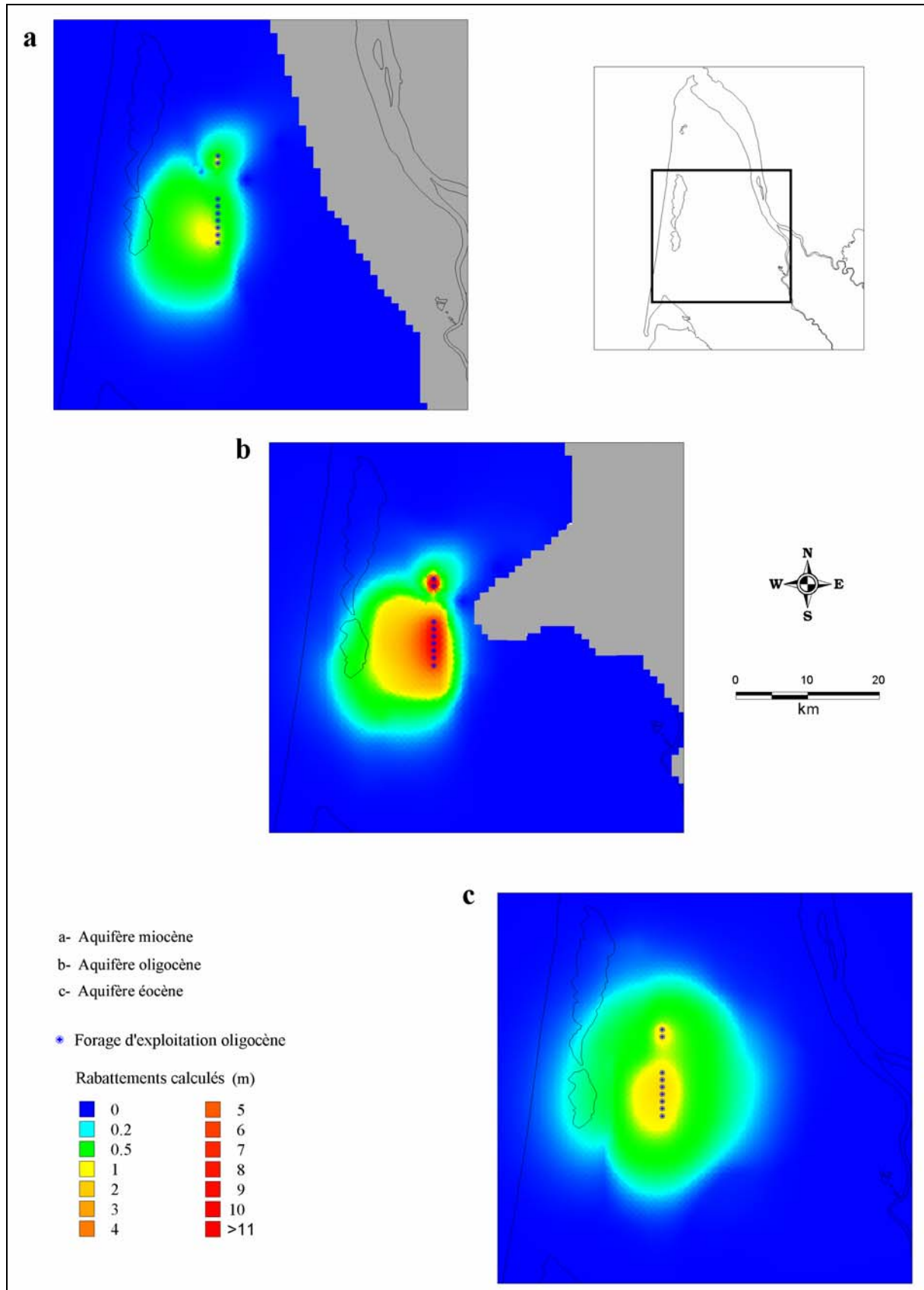


Figure 24 : Rabattements calculés après 1 année d'exploitation

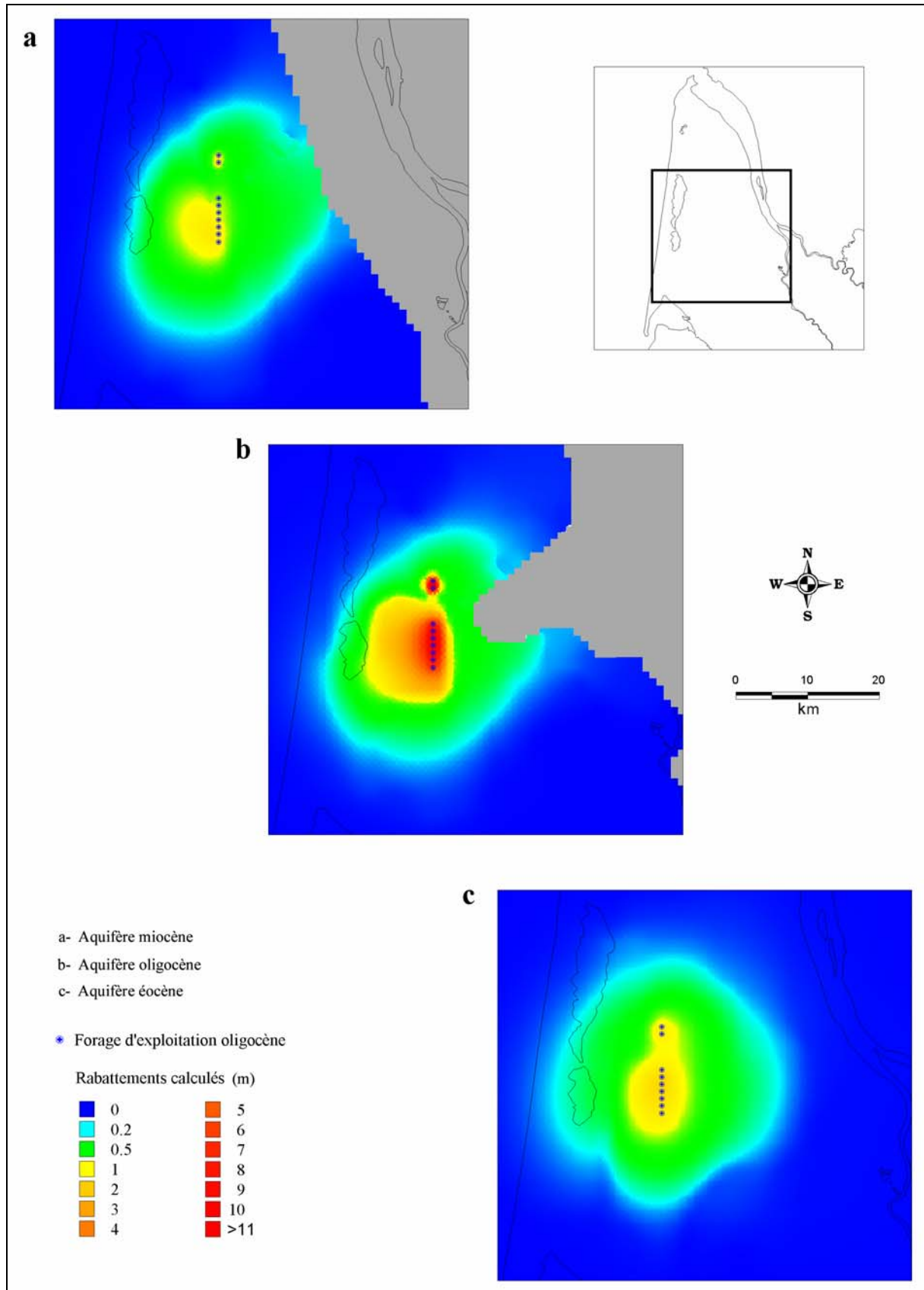


Figure 25: Rabattements calculés après 10 années d'exploitation

- *Pour l'aquifère oligocène* (Figure 24b et Figure 24b) : les rabattements les plus importants sont calculés au droit du champ captant et se stabilisent au bout d'une année d'exploitation. Ainsi, pour la partie sud du champ captant, constituée de 7 ouvrages, les rabattements atteignent une valeur moyenne de 11 mètres au bout de 1 an. Après 10 ans d'exploitation, la valeur moyenne calculée est de 12 mètres. Pour le champ captant Nord, constitué de deux ouvrages, le même phénomène est mis en évidence, avec toutefois des valeurs de rabattement plus importantes puisque les valeurs maximales calculées seraient de 16 mètres en 1 an et de 16,70 mètres au bout de 10 ans. Le compartimentage de l'aquifère oligocène semble particulièrement effectif en zone nord où la réduction d'épaisseur de l'aquifère oligocène est compensée par une meilleure perméabilité. En zone sud l'aquifère oligocène, plus développé, présente un confinement plus élevé marqué par une propagation de l'onde de dépression plus rapide dans cette direction. Vers l'est, c'est le phénomène inverse qui se produit. La présence de calcaires fissurés en relation avec l'aquifère miocène aux abords de la lacune de Castelnau-Médoc limite la propagation de la dépression. L'effet de limite introduit par cette lacune reste malgré tout peu visible à très long terme. L'influence sur les forages situés au sud-est est ainsi réduite, tout comme l'impact direct sur les sources de Thil-Gamarde. Plus généralement, les valeurs de dépression sont en accord avec la géométrie générale de l'aquifère oligocène, y compris pour le compartiment nord. L'impact global reste relativement modéré puisque inférieur à 1 mètre, à une distance maximale de 10 kilomètres. On retiendra que le modèle numérique fournit exclusivement des valeurs de rabattement qui sont à affecter à la dimension de la maille, soit 1 km².
- *Pour l'aquifère éocène* (Figure 24c et Figure 25c) : l'impact calculé semble là aussi modéré. En effet, les valeurs maximales calculées au bout de 10 ans, au droit du champ captant sont de l'ordre de 1,80 mètres. Au bout de 1 an, la morphologie de la zone d'influence est acquise, seul son rayon augmente au cours du temps. Le confinement de l'aquifère éocène entraîne une propagation importante de la dépression. Après 10 années d'exploitation, le rayon moyen effectif de cette dépression est de l'ordre de 15 kilomètres. Le

rayon d'influence, où la dépression est supérieure à 1 m, est de l'ordre de 5 kilomètres. Le comportement apparemment homogène de l'aquifère éocène dans cette zone ne traduit sans doute que le manque d'information. *De fait, si ces résultats ne sont qu'une indication, on peut considérer en première approximation que l'aquifère éocène restera peu sensible à l'exploitation de la nappe oligocène dans cette zone, dans les conditions d'application du modèle.*

La mise en œuvre d'un champ captant exploitant l'aquifère oligocène tel que prévu dans le projet initial, capable de produire au total $16000 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$, semble être compatible avec la géométrie de cet aquifère et des aquifères tertiaires en général. La prise en compte de la géométrie telle qu'elle a été redéfinie à partir des investigations géologiques, amène à dissocier deux comportements hydrauliques à long terme. En effet, on distingue un compartiment sud où le caractère capacitif prépondérant entraîne une propagation importante de l'onde de dépression générée par le pompage, d'un compartiment Nord où le caractère fortement transmissif de l'aquifère oligocène et la liaison hydraulique avec l'aquifère miocène limitent fortement l'influence de l'exploitation. Toutefois, si la propagation est limitée dans cette zone, les rabattements calculés au droit des forages d'exploitation prévisionnels sont ici maximaux. La lacune de Castelnau n'introduit pas d'effet de limite étanche particulièrement significatif. La présence de calcaires très karstifiés engendre un caractère transmissif marqué qui permet de limiter l'influence des prélèvements sur les ouvrages AEP situés plus à l'est, tout comme sur les sources de Thil et de Gamarde. Les influences calculées sur les aquifères miocène et éocène restent modérées et ne remettent pas en cause, *a priori*, les bases de ce projet.

4. APPROCHE DE MODELISATION SEMI-ANALYTIQUE

4.1. Mise en œuvre du modèle

Il existe plusieurs familles de méthodes permettant de résoudre ce type de problème : méthodes analytiques, semi-analytiques ou encore numériques. Chaque méthode est généralement adaptée à une typologie de problème ou à une échelle d'application particulière.

Nous avons choisi de combiner ces différentes méthodes pour calculer l'influence de ce nouveau champ captant, depuis une échelle locale jusqu'à une vision régionale. Cette approche a fait appel aux méthodes complémentaires suivantes :

- **Méthodes numériques** : celles-ci permettent de traiter des problèmes tri-dimensionnels et de prendre en compte l'hétérogénéité des grands systèmes aquifères. Basées sur différents types de schémas de discrétisation et une approximation numérique des équations d'écoulement, ces méthodes sont parmi les plus souples et les plus développées en hydrogéologie mais nécessitent une attention toute particulière sur les erreurs introduites par la discrétisation. La prise en compte de la totalité du système aquifère permet de travailler à une échelle régionale et de détailler les relations inter-aquifères.
- **Méthodes semi-analytiques** : développement des méthodes précédentes, elles constituent des solutions hybrides permettant de traiter des problèmes plus complexes. Bien que soumises à des conditions d'application restrictives, ces techniques sont efficaces pour appréhender le comportement d'un réservoir soumis à des sollicitations importantes (stress de pompage par exemple). L'échelle d'application est généralement kilométrique, voire sous certaines conditions pluri-kilométriques.

4.2. Découpage spatial du domaine d'étude

La zone d'intérêt est constituée par la partie centrale du Médoc, où sont concentrés les puits oligocènes utilisés pour l'alimentation en eau potable et où le futur champ captant devrait être implanté . Deux modèles semi-analytiques sont construits selon un maillage hexagonal de Voronoi. Les caractéristiques communes des deux modèles sont les suivantes :

- Superficie de la zone d'intérêt : 2000 km² ;
- Superficie totale de la zone modélisée : 9200 km² ;
- Forages d'exploitation oligocène (champ captant) : 9 ;
- Forages AEP utilisés pour le calcul d'interférences : 13.

Les modèles sont considérés comme clos, c'est à dire que les limites latérales sont des limites à flux nul. Afin d'éviter un effet de limite étanche sur la zone d'étude au cours des simulations de pompage à long terme, les bordures du modèle ont été repoussées, augmentant ainsi la superficie de la zone modélisée. Le gradient hydraulique naturel a ici été négligé, compte tenu des ordres de grandeur des phénomènes. La charge initiale est supposée homogène au sein de l'aquifère oligocène. La valeur retenue correspond à la valeur moyenne calculée à partir des mesures effectuées aux forages de reconnaissance SF1, SF2 et SP2.

A partir de ces caractéristiques communes, les éléments respectifs de chaque modèle sont développés :

- *Modèle homogène* (Figure 26a) : le réservoir est considéré comme homogène sur tout le domaine d'étude. L'épaisseur de l'aquifère est de 80 mètres. Les formations ne présentent pas de discontinuité particulière. Cette hypothèse est représentative des conditions géologiques supposées avant les investigations réalisées dans le cadre de cette étude. Le maillage est composé par 4614 éléments.
- *Modèle compartimenté* (Figure 26b) : le réservoir est ici considéré comme non homogène. Il est composé de 2 compartiments d'épaisseur distincte. Le premier compartiment, situé au sud, présente une épaisseur de 80 mètres. L'épaisseur du réservoir dans le second compartiment, au nord, est de 30 mètres. La liaison entre les deux compartiments est assurée par une zone présentant une rapide variation d'épaisseur, localisée sur la zone de flexure identifiée par la campagne de sismique réflexion. A l'est, la lacune de Castelnau-Médoc est également prise en compte. Le maillage est ici composé par 4831 éléments.

Etant donné l'objectif de cette modélisation, à savoir l'estimation de l'impact du champ captant oligocène sur les forages AEP existant, ces derniers seront assimilés à des piézomètres d'observations et ne seront pas considérés comme productifs.

Seuls les rabattements induits par la mise en exploitation du champ captant prévu seront calculés.

4.3. Calage en régime transitoire

Les paramètres hydrodynamiques ont été obtenus par interprétation des essais de pompage réalisés sur les forages SF1, SF2 et SP2. Une valeur de perméabilité de $3 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$, correspondant à la moyenne des valeurs obtenues, a été appliquée à l'ensemble du réservoir pour les deux modèles. Pour le coefficient d'emmagasinement, une valeur uniforme de $3 \cdot 10^{-4}$ est retenue correspondant à la valeur calculée à partir des essais et mesures sur nappe.

Un essai d'interférence entre les puits SF1 et SF2 a été réalisé. Ce test, d'une durée totale de 30 jours, du 29 octobre au 28 novembre 2003, a consisté à un pompage simultané sur SF1 et SF2, aux débits moyens respectifs de $130 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ et $120 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Les rabattements ont fait l'objet d'un enregistrement automatique aux forages, ainsi qu'au piézomètre d'observation SP2 (Figure 27). Ce pompage de longue durée a été précédé d'essais par paliers réalisés sur les ouvrages SF1 et SF2. Ces sollicitations ont été intégrées à la chronique de longue durée utilisée pour valider le choix des paramètres hydrodynamiques et vérifier le comportement à plus long terme des modèles de puits utilisés.

On observe une bonne concordance entre les rabattements mesurés et calculés pour les trois ouvrages (Figure 27) pour le modèle homogène. Le comportement dynamique est bien restitué, tant pour les phases de descente que pour celles de remontée. Le modèle compartimenté donne également des résultats très satisfaisants permettant sa validation. Les caractéristiques hydrauliques du complexe puits/réservoir sont validées aux deux ouvrages SF1 et SF2. Au piézomètre SP2, les paramètres retenus pour la diffusivité de l'aquifère dans cette zone permettent de bien restituer les chroniques piézométriques, tant en phase qu'en amplitude.

A cette échelle de temps (30 j.), les écarts sur les rabattements entre les deux modèles ne sont pas significatifs et ne sont pas suffisamment discriminants. A titre de comparaison, l'exploitation prévisionnelle est simulée par les 2 approches, même si le modèle compartimenté est le plus en adéquation avec le modèle géologique

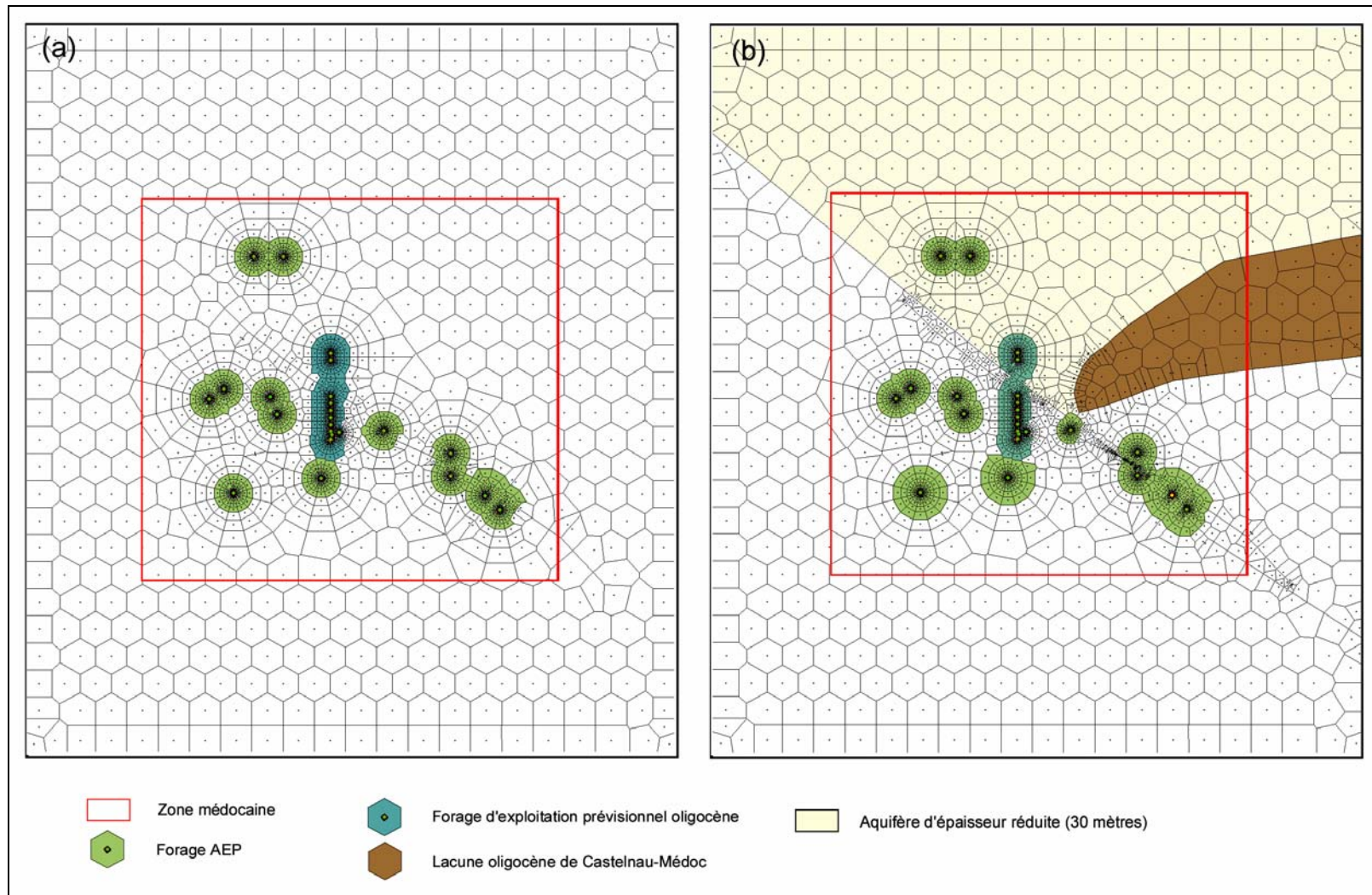


Figure 26 : Maillages de Voronoi retenus pour le champ médocain

- a. Modèle homogène ;*
b. Modèle compartimenté avec lacune d'aquifère.

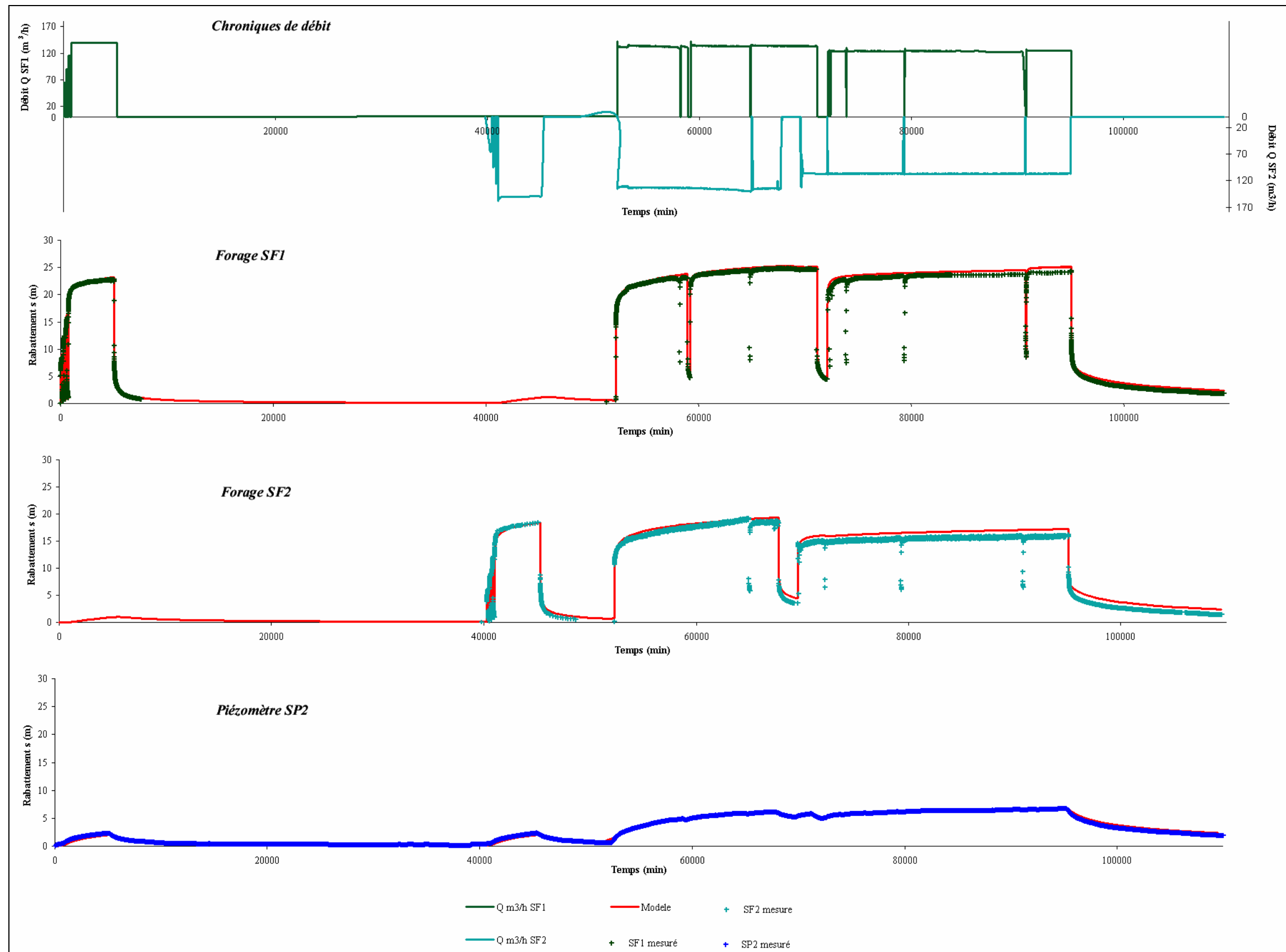


Figure 27 : Rabattements mesurés et simulés pour l'essai d'interférence de longue durée

4.4. Simulation d'exploitation

L'impact du champ captant a été envisagé dans les simulations de la manière suivante :

- Caractéristiques hydrauliques (effet de capacité C et effet pariétal s_k) identiques pour chaque ouvrage et égales à la moyenne des valeurs déterminées pour SF1 et SF2 ;
- Exploitation simultanée de chaque ouvrage au débit de $150 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 12 heures par jour ;
- Durée totale d'exploitation de 1 année.

Pour chaque modèle de Voronoi (homogène et compartimenté), les rabattements ont été calculés au bout de 3, 6, 9 et 12 mois. Les rabattements induits calculés sur les forages AEP existants sont présentés au Tableau 8. Les rabattements calculés en fin de descente et en fin de remontée au droit du champ captant sont présentés au Tableau 9.

Dans le modèle homogène, les rabattements résiduels au droit du littoral sont compris entre 2 et 5 mètres, à une distance supérieure à 15 kilomètres. Vers l'est, les rabattements résiduels calculés ne sont plus que de 1 mètre vers le forage 08035X0398, à 25 kilomètres du champ captant.

Dans le modèle compartimenté, les contraintes de géométrie introduites augmentent notablement les rabattements résiduels générés aux forages AEP existants. On note ainsi pour les forages 07538X0002 et 07781X0005, situés dans le compartiment nord, une augmentation moyenne des rabattements de 80 %, avec des valeurs respectives calculées à terme de 5,21 m et 6,20 m. La mise en place de la lacune de Castelnau-Médoc perturbe également la propagation spatiale du cône de dépression. Le forage 08023X0039, situé entre cette dernière et le champ captant, est particulièrement influencé. Le rabattement calculé pour le modèle compartimenté au bout de 12 mois est de 15,53 m contre 10,56 m pour le modèle homogène. Un impact important est également à envisager sur le forage AEP 08026X0034, qui alimente la commune de Saumos, et le forage Talaris, prévu pour l'alimentation de la commune de Lacanau. Les rabattements, proches de 12 m, restent toutefois compatibles avec une exploitation acceptable de ces ouvrages.

Au sud-est, les niveaux piézométriques des émergences de Thil-Gamarde sont marqués par une baisse de 3,6 m environ. Puisque le réservoir est considéré comme

monocouche et strictement confiné, l'examen plus détaillé des conditions d'émergence introduirait certainement des contraintes complexes qu'il n'est pas possible de prendre en compte ici.

Forage	<i>Rabattements (m) - Modèle homogène</i>				<i>Rabattements (m) - Modèle compartimenté</i>			
	3 Mois	6 Mois	9 Mois	12 Mois	3 Mois	6 Mois	9 Mois	12 Mois
07538X0002	0,33	1,19	2,06	2,89	0,60	2,15	3,73	5,21
07781X0005	0,49	1,53	2,50	3,39	0,91	2,81	4,59	6,20
08013X0001	0,87	2,39	3,63	4,70	1,04	3,04	4,82	6,42
07778X0033	1,27	3,05	4,41	5,54	1,48	3,85	5,83	7,56
TALARIS	4,13	6,79	8,51	9,84	5,00	8,71	11,29	13,36
08021X0002	4,98	7,75	9,51	10,87	5,85	9,65	12,24	14,31
08023X0039	4,76	7,48	9,22	10,56	6,66	10,76	13,44	15,53
08035X0398	0,09	0,56	1,17	1,81	0,13	0,83	1,75	2,72
THIL	0,17	0,83	1,59	2,34	0,26	1,25	2,38	3,51
08024X0050	0,58	1,80	2,89	3,85	0,84	2,63	4,25	5,71
08024X0019	0,76	2,15	3,33	4,35	1,13	3,21	4,98	6,53
08026X0034	4,12	6,59	8,23	9,52	4,67	7,92	10,23	12,11
08018X0004	0,78	2,16	3,32	4,34	0,87	2,56	4,11	5,53

Tableau 8 : Rabattements résiduels calculés sur les forages AEP existants

Au droit du champ captant, les rabattements calculés en fin de remontée sont compris entre 23 m et 29 m au bout des 12 mois d'exploitation simulés. En fin de descente, pour le modèle compartimenté, les valeurs s'échelonnent entre 46 m et 57 m. Les valeurs maximales sont calculées pour les forages d'exploitation Fexp8 et Fexp9, situés dans le compartiment nord. Les modifications de géométrie introduites dans le second modèle génèrent d'ailleurs pour ces ouvrages une augmentation moyenne de 55 % par rapport au modèle homogène. Dans la partie sud, où l'aquifère oligocène reste bien développé, l'influence est moins notable. Les variations de rabattements au sein du champ sont de l'ordre de 10 à 20 % entre les deux modèles pour les rabattements calculés en fin de remontée, et de l'ordre de 20 à 30 % pour ceux en fin de descente.

Au forage de reconnaissance BP1, le toit de l'aquifère oligocène est situé à – 35 m NG et la hauteur piézométrique de l'aquifère oligocène mesurée à ce point est de +

27 m NG. Pour un rabattement maximal de 57,66 m calculé dans cette zone, la hauteur piézométrique au bout d'une année d'exploitation serait à – 30,66 m NG et ne serait donc supérieure que de 4,34 mètres à la cote du toit de l'aquifère oligocène. Dans ces conditions, le dénoyage local de l'aquifère oligocène semble ici inévitable dans cette configuration de pompage. Selon les hypothèses ayant présidées à la mise en place de la modélisation, ce dénoyage pourrait être envisagé au bout de quelques années. Si de plus une détérioration des propriétés hydrauliques des ouvrages d'exploitation est envisagée, telles des pertes de charges aux puits supérieures à celles estimées à partir des forages SF1 et SF2, le dénoyage de l'aquifère oligocène pourrait être rapide et empêcher une mise en œuvre du champ captant, tout au moins à ce débit.

Forage	Rabattelements (m) - Modèle homogène				Rabattelements (m) - Modèle compartimenté			
	3 Mois	6 Mois	9 Mois	12 Mois	3 Mois	6 Mois	9 Mois	12 Mois
Descente								
<i>Fexp1</i>	35,48	38,53	39,85	41,79	37,13	41,39	43,61	46,29
<i>Fexp2</i>	37,90	41,02	42,37	44,32	39,57	43,98	46,27	48,98
<i>Fexp3</i>	38,98	42,15	43,51	45,47	41,31	45,85	48,19	50,93
<i>Fexp4</i>	39,32	42,52	43,90	45,86	42,86	47,52	49,90	52,68
<i>Fexp5</i>	39,24	42,46	43,84	45,81	43,99	48,74	51,17	53,97
<i>Fexp6</i>	38,51	41,74	43,13	45,10	44,50	49,33	51,79	54,62
<i>Fexp7</i>	36,82	40,03	41,41	43,38	43,98	48,86	51,36	54,20
<i>Fexp8</i>	32,61	35,54	36,82	38,74	46,82	51,65	54,17	57,04
<i>Fexp9</i>	31,80	34,64	35,88	37,78	47,56	52,30	54,79	57,66
Remontée								
<i>Fexp1</i>	13,03	16,60	17,92	19,32	14,62	19,41	21,62	23,76
<i>Fexp2</i>	15,20	18,84	20,18	21,60	16,88	21,82	24,09	26,27
<i>Fexp3</i>	16,24	19,93	21,29	22,71	18,35	23,41	25,74	27,95
<i>Fexp4</i>	16,70	20,42	21,79	23,22	19,17	24,35	26,73	28,97
<i>Fexp5</i>	16,59	20,34	21,72	23,15	19,47	24,74	27,17	29,43
<i>Fexp6</i>	15,86	19,61	20,99	22,42	19,10	24,45	26,91	29,19
<i>Fexp7</i>	14,34	18,08	19,46	20,89	17,84	23,24	25,73	28,03
<i>Fexp8</i>	10,08	13,53	14,81	16,19	14,70	20,05	22,56	24,89
<i>Fexp9</i>	9,32	12,68	13,92	15,28	14,00	19,27	21,76	24,08

Tableau 9 : Rabattelements calculés au droit du champ captant

Dans l'hypothèse où la contrainte maximale d'exploitation est la hauteur piézométrique minimale assurant le confinement de la nappe, le dénoyage peut entraîner à long terme une dégradation des propriétés de l'aquifère, et l'exploitation des forages Fexp8 et Fexp9 ne pourrait être maintenue en l'état.

De manière générale, ces résultats soulignent la nécessité de disposer d'un autre emplacement pour le champ captant, permettant, à dispositif égal, de produire les mêmes volumes journaliers tout en excluant le risque de dénoyage de l'aquifère.

Le dispositif de pompage pourrait être déplacé vers le sud, où l'aquifère est plus développé (Figure 28). Le champ captant nord, constitué par les ouvrages Fexp8 et Fexp9 serait abandonné, au profit d'un champ unique composé de 9 forages, une distance de 1,5 km entre chaque ouvrage permettant de réduire les interférences durant les périodes de pompages. Le débit d'exploitation de chaque ouvrage ne serait pas modifié et resterait de $150 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 12 heures par jour.

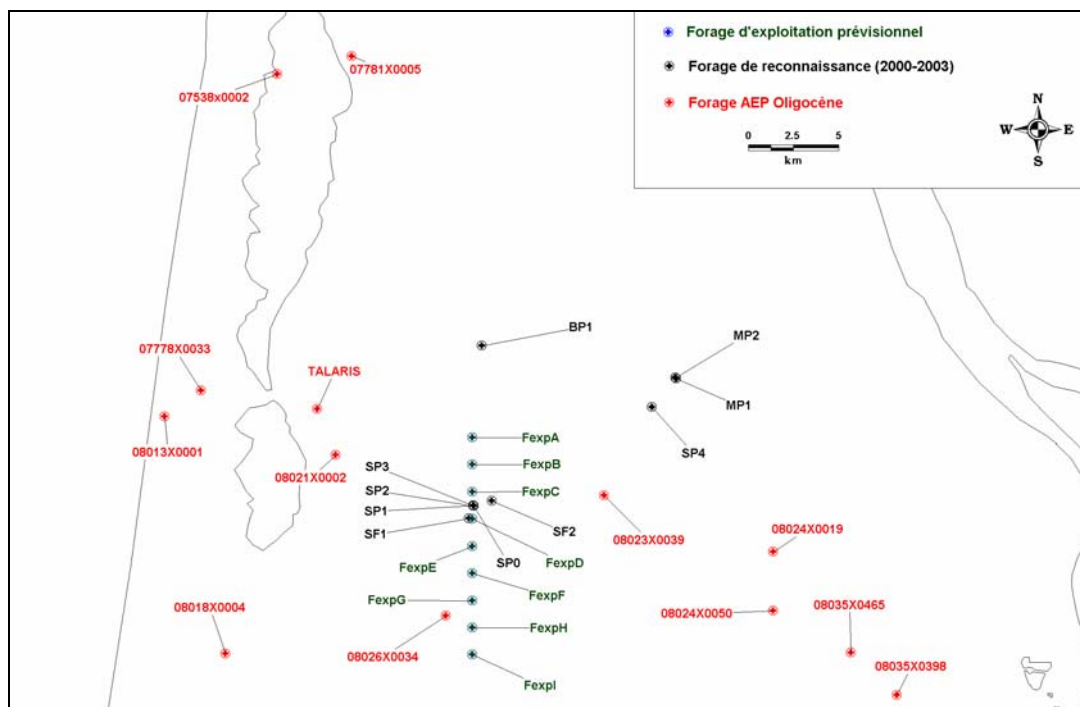


Figure 28 : Proposition d'une nouvelle localisation de champ captant oligocène (champ captant oligocène sud)

Le modèle compartimenté, plus en accord avec la géologie, a été utilisé pour simuler l'impact du nouveau champ captant sur les forages AEP existants et sur les ouvrages prévus.

Les rabattements résiduels calculés pour ce nouveau dispositif sont généralement plus faibles que ceux calculés pour la disposition précédente de champ captant (Tableau 10) et deviennent compatibles avec des contraintes d'exploitation.

Forage	3 Mois	6 Mois	9 Mois	12 Mois
<i>07538X0002</i>	0,14	0,86	1,81	2,83
<i>07781X0005</i>	0,20	1,07	2,14	3,23
<i>08013X0001</i>	0,75	2,35	3,85	5,24
<i>07778X0033</i>	1,01	2,85	4,49	5,97
<i>TALARIS</i>	3,25	6,19	8,36	10,17
<i>08021X0002</i>	4,50	7,73	10,02	11,89
<i>08023X0039</i>	6,26	10,26	12,91	15,00
<i>08035X0398</i>	0,26	1,30	2,50	3,70
<i>THIL</i>	0,46	1,85	3,28	4,64
<i>08024X0050</i>	1,30	3,59	5,51	7,18
<i>08024X0019</i>	1,47	3,94	5,97	7,71
<i>08026X0034</i>	12,24	15,94	18,38	20,32
<i>08018X0004</i>	1,51	3,54	5,20	6,67

Tableau 10 : Rabattements résiduels calculés aux forages AEP existants pour le champ captant oligocène sud

Ainsi, les rabattements résiduels diminuent aux forages AEP existants situés dans le compartiment nord. Le rabattement résiduel passe notamment de 6,20 m à 3,23 m pour le forage 07781X0005, situé sur le littoral. Si les rabattements résiduels augmentent dans le compartiment sud, les augmentations sont modérées et comprises entre 1 m et 1,50 m. Seul le forage 08026X0034, situé à une faible distance du champ captant (1,25 km), subit une forte influence. Le rabattement résiduel calculé au bout de 3 mois est de 12,24 m et atteindrait 20,32 m après une année d'exploitation. Dans ces conditions, la productivité de cet ouvrage s'en trouverait sensiblement affectée.

Les rabattements calculés en fin de remontée et de descente pour chaque ouvrage du champ captant sont présentés au Tableau 11.

Pour cette nouvelle configuration, les rabattements calculés en fin de descente restent inférieurs à 47 mètres, soit un gain de 10 mètres par rapport au dispositif initial. Ces valeurs sont de plus compatibles avec la géométrie de l'aquifère dans cette zone, où le toit des formations oligocènes a été rencontré vers - 110 m NG. Dans cette zone la hauteur piézométrique est proche de + 27,8 m NG et les valeurs atteintes en fin de pompage au bout de 12 mois seraient comprises entre - 18,2 m NG et - 12,2 m NG. L'exploitation à long terme pourrait dès lors être envisagée, compte tenu de la réserve de charge disponible avant un dénoyage de l'aquifère.

Forage	3 Mois	6 Mois	9 Mois	12 Mois
Descente				
<i>FexpA</i>	36,54	40,55	42,65	45,25
<i>FexpB</i>	37,02	41,09	43,21	45,83
<i>FexpC</i>	36,60	40,71	42,83	45,44
<i>FexpD</i>	37,17	41,26	43,36	45,95
<i>FexpE</i>	37,37	41,40	43,47	46,04
<i>FexpF</i>	37,19	41,13	43,14	45,68
<i>FexpG</i>	36,46	40,27	42,22	44,72
<i>FexpH</i>	35,17	38,82	40,70	43,15
<i>Fexpl</i>	33,19	36,64	38,44	40,84
Remontée				
<i>FexpA</i>	11,93	16,45	18,55	20,62
<i>FexpB</i>	13,62	18,22	20,33	22,41
<i>FexpC</i>	14,23	18,86	20,98	23,05
<i>FexpD</i>	14,80	19,41	21,51	23,57
<i>FexpE</i>	15,06	19,61	21,67	23,71
<i>FexpF</i>	14,82	19,27	21,28	23,29
<i>FexpG</i>	14,11	18,43	20,38	22,35
<i>FexpH</i>	12,85	17,01	18,89	20,81
<i>Fexpl</i>	10,82	14,80	16,59	18,45

Tableau 11 : Rabattements calculés au droit du champ captant sud

Cette nouvelle configuration semble au vu de ces résultats plus appropriée à la mise en œuvre d'un programme de substitution à l'exploitation de la nappe éocène. La réalisation d'un champ captant oligocène tel que défini ci-dessus, doit être effectué dans la zone où l'aquifère oligocène est suffisamment développé et présente des conditions de protection sanitaires intéressantes. Toutefois, d'autres contraintes non prises en compte dans ces simulations peuvent remettre en cause cette proposition. Tout d'abord, le champ captant initialement prévu, et notamment les deux forages situés à l'extrémité Nord, devait desservir certaines des communes de la partie septentrionale du Médoc, afin de disposer d'une ressource alternative aux forages éocènes. Il s'agit en fait de conditions économiques et sociales qu'il n'y a pas lieu de développer ici.

Si la disposition spatiale des ouvrages initialement prévue devait être maintenue, il faudrait trouver une solution capable de produire des volumes d'eau équivalents sans risque de dégradation de l'aquifère. Des débits plus importants sur les ouvrages sud permettraient de diminuer les prélèvements sur les forages d'exploitation envisagés dans la partie Nord où l'aquifère oligocène est le moins producteur, et réduire d'autant l'ampleur des dépressions.

La proposition d'un nouvel emplacement pour le champ captant oligocène reste soumise aux hypothèses ayant présidés à la mise en place des modèles semi-analytiques et aux conditions de validité qui s'y rattachent, à savoir :

- **Le réservoir est considéré comme monocouche** : il n'est pas possible de représenter explicitement les phénomènes de drainance. Dans le cas du Médoc, cette hypothèse est discutable pour la partie nord, où l'aquifère oligocène semble en relation hydraulique directe avec les aquifères miocène et plio-quadernaire susjacentes. Compte tenu du soutien possible par drainance vers l'aquifère oligocène, les modèles proposent vraisemblablement une vision pessimiste en ne tenant pas compte de ces phénomènes.
- **Le réservoir est considéré comme confiné** : cette hypothèse est vérifiée sur une grande partie du Médoc, notamment vers l'océan Atlantique. Vers l'est, les conditions géologiques devenant plus floues à mesure que les couches remontent vers la surface, les conditions d'application sont plus difficilement vérifiables. C'est notamment le cas

vers les émergences de Thil et Gamarde. Dans ce cas, l'impact calculé dans cette zone ne peut être donné qu'à titre indicatif.

- **Le réservoir est considéré initialement à une pression uniforme** : le choix d'une pression initiale uniforme est une simplification qui se justifie devant le type de simulation réalisée. Seules les interférences entre forages sont ici envisagées. Un calcul par rapport à une référence commune, même fictive, ne pose ainsi pas de problème.
- **Les puits d'exploitation sont considérés comme parfaits** : nous avons considéré que tous les ouvrages correspondaient à des puits parfaits. Un modèle modifié est cependant envisageable, prenant en compte des puits à pénétration partielle si nécessaire.
- **Les caractéristiques des ouvrages d'exploitation sont constantes dans le temps** : pour des modélisations à très long terme, il faudrait sans doute envisager un facteur correctif introduisant le vieillissement des installations, avec une augmentation des pertes de charge induites par exemple par des phénomènes de colmatage.

Malgré des conditions d'application théoriquement restrictives, ces modèles semi-analytiques constituent un outil puissant pour tester différentes hypothèses relatives à la géométrie des réservoirs et/ou à différents scénarii d'exploitation. Cette approche heuristique, difficile à mettre en œuvre à partir des modèles hydrodynamiques classiques, devient fructueuse grâce à des outils numériques très flexibles, tel que la discrétisation de Voronoi.

Dans le cas de l'aquifère oligocène nord-médocain, l'importance de la géométrie et particulièrement de la flexure synsédimentaire, menant à un compartimentage du réservoir oligocène, entre une partie sud bien développée et une partie nord d'épaisseur plus réduite, est clairement apparue. Dans les hypothèses d'application, le champ captant prévisionnel oligocène, tel qu'initialement défini, ne semble pas être en adéquation avec les contraintes imposées par la géométrie locale de l'aquifère et sa viabilité à long terme reste incertaine.

5. APPROCHE D'AIDE A LA DECISION

5.1. Objectif et méthodologie

Le but de toute gestion est d'atteindre un objectif spécifique de la manière la plus efficace possible en respectant tout un ensemble de contraintes et de conditions.

En matière de gestion des nappes, les contraintes et limites seront imposées à partir de considérations socio-économiques, et à partir du comportement physique des systèmes aquifères considérés. Les modèles de gestion des aquifères font appel à des *modèles hydrodynamiques* afin de préciser ce comportement physique, et à des *méthodes de recherche opérationnelles* (programmation linéaire, quadratique, ...) pour prendre en compte les diverses contraintes extérieures.

La méthode de Matrice des Réponses Unitaires est basée sur l'utilisation d'un modèle de simulation externe, par opposition à la méthode intégrée, pour générer les réponses unitaires. La Réponse Unitaire décrit l'influence d'une variation unitaire de la variable de décision (débit de pompage ou d'injection) à des emplacements potentiels de pompage sur plusieurs variables dépendantes (charge hydraulique, gradient hydraulique, vitesse d'écoulement) à différents points d'observation. L'assemblage de toutes les Réponses Unitaires constitue la Matrice de Réponse Unitaires (MRU). La MRU est par la suite intégrée dans le modèle de gestion.

L'application d'un schéma de discrétisation de type différences finies à l'équation aux dérivées partielles [1] qui décrit l'écoulement de l'eau dans un milieu poreux, permet d'aboutir pour le régime permanent à un système d'équations linéaires de la forme :

$$[D][H] = [R] + [Q] \quad [5]$$

avec $[D]$ matrice carrée de transmissivité globale $[L^2.T^{-1}]$;
 $[H]$ vecteur inconnu des charges hydrauliques $[L]$;
 $[R]$ vecteur lié aux conditions aux limites $[L^3.T^{-1}]$;
 $[Q]$ vecteur des débits de pompage $[L^3.T^{-1}]$.

L'équation [5] permet de décrire le comportement du système aquifère. La linéarité du système, nécessaire pour aboutir à cette formulation, est vérifiée pour les nappes captives. En revanche, dans le cas des nappes à surface libre, la transmissivité doit

rester sensiblement constante dans l'environnement du puits. Cette condition sera suffisante pour obtenir un système linéaire ou quasi-linéaire.

Pour une nappe captive, l'introduction de la notion de coefficient d'influence (ou réponse unitaire) permet d'écrire pour le rabattement au point d'observation i résultant du débit influençant Q_j au point de pompage j :

$$(H_i - H_{0i}) = a_{ij} (Q_j - Q_{0j}) \quad [6]$$

avec H_i charge hydraulique au point d'observation i [L] ;
 H_{0i} charge hydraulique de référence au point d'observation i [L] ;
 Q_j débit influençant au point de pompage j [L³.T⁻¹] ;
 Q_{0j} débit de référence au point de pompage j [L³.T⁻¹] ;
 a_{ij} coefficient d'influence du pompage j sur la charge hydraulique au point i [L⁻².T].

Le coefficient d'influence a_{ij} permet de quantifier le changement sur la variable considérée (charge hydraulique, vitesse, gradient hydraulique,...) induit par un changement unitaire de la variable de décision (débit de pompage/injection). L'ensemble des coefficients d'influence calculés pour tous les points d'observation et pour tous les pompages unitaires constitue la MRU.

Il est dès lors possible grâce au principe de superposition de calculer à partir de la MRU la dépression induite par n pompages au point d'observation i :

$$(H_i - H_{0i}) = \sum_{j=1}^n a_{ij} (Q_j - Q_{0j}) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad [7]$$

5.2. MRU et modèle de gestion

Le développement du modèle de gestion est basé sur la construction d'une « fonction objectif » synthétisant l'ensemble des préférences du décideur. La « fonction objectif » est une fonction linéaire de la variable de décision, c'est à dire des débits de pompage, et exprime obligatoirement le problème de gestion sous l'une des formes suivantes :

- minimiser ou maximiser la production d'un champ captant ;
- minimiser un coût de pompage ;
- minimiser ou maximiser les dépressions sur une zone déterminée ;
- minimiser les investissements pour des infrastructures ;
- ...

A la « fonction objectif » précédemment définie sont adjointes des contraintes particulières permettant de définir le domaine de faisabilité du problème et estimer la solution optimale. Dans les problèmes de gestion qui nous intéressent, les contraintes portent généralement sur :

- les charges ou les dépressions sur une zone de la nappe ;
- les débits prélevés ;
- les flux transitant à travers une zone ;
- ...

A partir de ces remarques, on peut envisager la formulation générique d'un problème de gestion via la méthode MRU de la manière suivante :

$$\text{Minimiser / Maximiser } g(Q) = \sum_{j=1}^n c_j Q_j \quad [8]$$

sous les contraintes

$$[b_i^{\min}] \leq [H_i] \leq [b_i^{\max}] \quad [9]$$

$$[Q_j^{\min}] \leq [Q_j] \leq [Q_j^{\max}] \quad [10]$$

où

$$[H_i] = [a_{ij}] [Q_j] \quad [11]$$

- avec
- $g(Q)$ fonction objectif ;
 - $[Q_j]$ vecteur des variables de décision ;
 - $[H]$ vecteur des variables dépendantes ;
 - c_j coefficient de la fonction objectif relatif à la variable Q ;
 - $[a_{ij}]$ matrice des réponses unitaires ;
 - $[b_i^{\min}]$ vecteur des limites inférieures sur la variable dépendante H ;
 - $[b_i^{\max}]$ vecteur des limites supérieures sur la variable dépendante H ;
 - $[Q_j^{\max}]$ vecteur des limites supérieures sur la variable de décision Q ;
 - $[Q_j^{\min}]$ vecteur des limites inférieures sur la variable de décision Q .

Grâce à ce formalisme, le problème de gestion peut être résolu à l'aide des techniques classiquement utilisées en recherche opérationnelle (programmation linéaire, méthode du Simplex,...).

Parmi les avantages de cette méthode, citons la possibilité de limiter la taille du problème de gestion, attendu que seuls les emplacements potentiels des prélèvements et les points de contrôle de la variable dépendante sont retenus pour le calcul. De plus, l'utilisation d'un code de calcul hydrodynamique indépendant comme simple routine lors de la création de la MRU permet d'utiliser des modèles d'écoulement classiques, tel que MODFLOW.

Les inconvénients de la méthode concernent le temps de calcul nécessaire à la création de la MRU, qui peut être important dans le cas de problèmes complexes. De plus, tout changement dans le modèle hydrodynamique entraîne nécessairement de recalculer la MRU, figeant quelque peu la procédure de couplage entre le modèle hydrodynamique et le modèle de gestion. Enfin, la condition de linéarité nécessaire à la mise en œuvre de la méthode peut s'avérer assez contraignante dans l'étude de certains systèmes (nappe libre).

Quoi qu'il en soit, la méthode de Matrice de Réponses Unitaires constitue un solide canevas pour la mise en œuvre de modèles de gestion, préliminaires ou définitifs, pour des aquifères régionaux.

C'est dans cette optique que nous avons appliqué la méthode de la MRU au système multicouche tertiaire, comme première approche de gestion quantitative à l'échelle d'un bassin sédimentaire.

Le modèle numérique utilisé pour construire la MRU est le modèle régional MODFLOW présenté précédemment, dans sa version géométrique mise à jour. La piézométrie de référence simulée par le modèle correspond à la piézométrie en régime non influencé pour l'année 1981.

Afin d'envisager le plus grand nombre de scénarii et de disposer d'un outil exhaustif, toutes les mailles du modèle contenant un prélèvement ont été intégrées comme variables de décision. L'emplacement potentiel du champ captant oligocène a été pris en compte. Au total, 720 points de stress (mailles successivement soumises à

un pompage unitaire) ont été retenus pour la construction de la matrice globale (Figure 29).

Les points de contrôle correspondent aux points de vérification des variables d'état du système. La totalité des points de stress a été intégrée comme des points de contrôle, afin de disposer d'informations sur les zones de pompage. De plus, compte tenu des problématiques de gestion de l'aquifère éocène, des points de contrôle supplémentaires dans la zone de l'estuaire de la Gironde ont été implémentés. Au total, 757 points de contrôles sont pris en compte (Figure 29).

Les coefficients d'influences sont calculés pour chaque point d'observation en réalisant une simulation pour chaque point de prélèvement sollicité à un débit unitaire. La valeur du débit unitaire a été fixée à $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$. La construction de la MRU à partir des points de stress et des points de contrôle est le volet le plus exigeant en temps de calcul¹⁰.

Pour vérifier la cohérence des résultats obtenus et la validité des hypothèses de linéarité formulées, les coefficients d'influences obtenus ont été utilisés pour simuler les charges observées pour l'état 1981.

D'après l'équation [7], on peut écrire pour la charge simulée au point d'observation i :

$$H_i^{81} = H_i^{ref} + \sum_{j=1}^n a_{ij} \beta_j^{81} Q_j \quad i = 1, 2, \dots, m \quad [12]$$

avec H_i^{81} charge hydraulique calculée au point i pour l'année 1981 [L] ;
 H_i^{ref} charge hydraulique de référence au point d'observation i [L] ;
 Q_j débit unitaire influençant au point de pompage j [$\text{L}^3 \cdot \text{T}^{-1}$] ;
 β_j^{81} coefficient de pondération pour le débit au point j en 1981 [-] ;
 a_{ij} coefficient d'influence du pompage j sur la charge hydraulique au point i [$\text{L}^{-2} \cdot \text{T}$].

¹⁰ Dans le cas présent, les 720 simulations nécessaires à l'élaboration de la MRU nécessitent 36 heures de calcul sur un processeur Pentium® IV cadencé à 2,8 GHz.

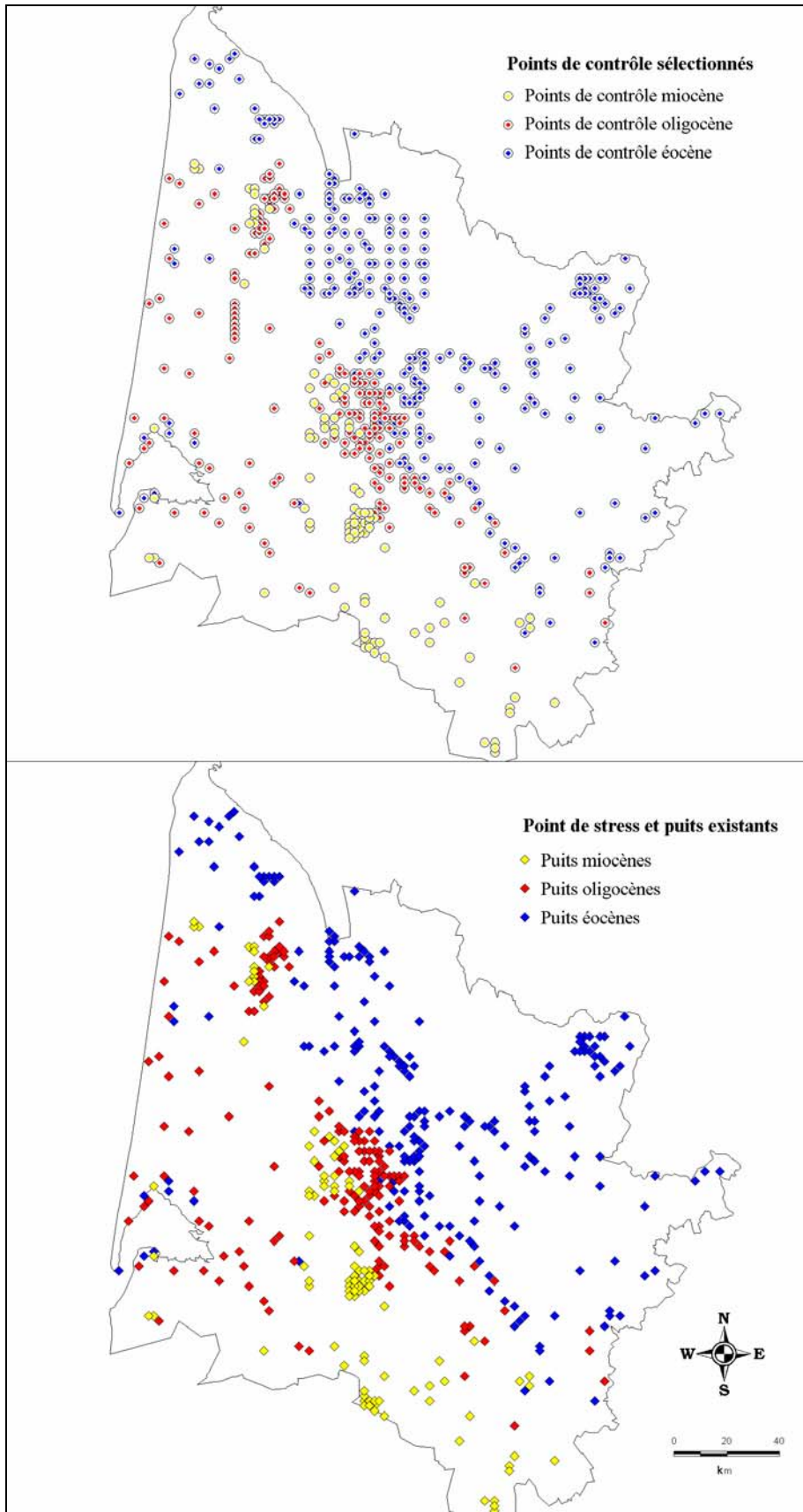


Figure 29 : Situation des points de stress et des points d'observation

Les charges hydrauliques calculées à partir des coefficients d'influence (Equation [12]) aux points de contrôle présentent une corrélation satisfaisante avec celles observées pour 1981 (Figure 30).

On remarquera toutefois que se sont les valeurs de charge les plus faibles qui sont sous-estimées par rapport à l'observation. Ces valeurs correspondent aux valeurs mesurées pour l'aquifère éocène dans la région bordelaise. Le régime permanent ne permet pas en effet de retranscrire fidèlement les valeurs dans cette zone où la piézométrie est fortement marquée par les prélèvements. L'erreur reste toutefois acceptable à l'échelle de la modélisation. *L'ensemble de ces résultats permet donc de valider les hypothèses d'application de la méthode MRU. Par la suite, on admettra comme hypothèse supplémentaire que les conditions observées pour simuler l'année 1981 resteront constantes pour l'ensemble des scénarii envisagés.*

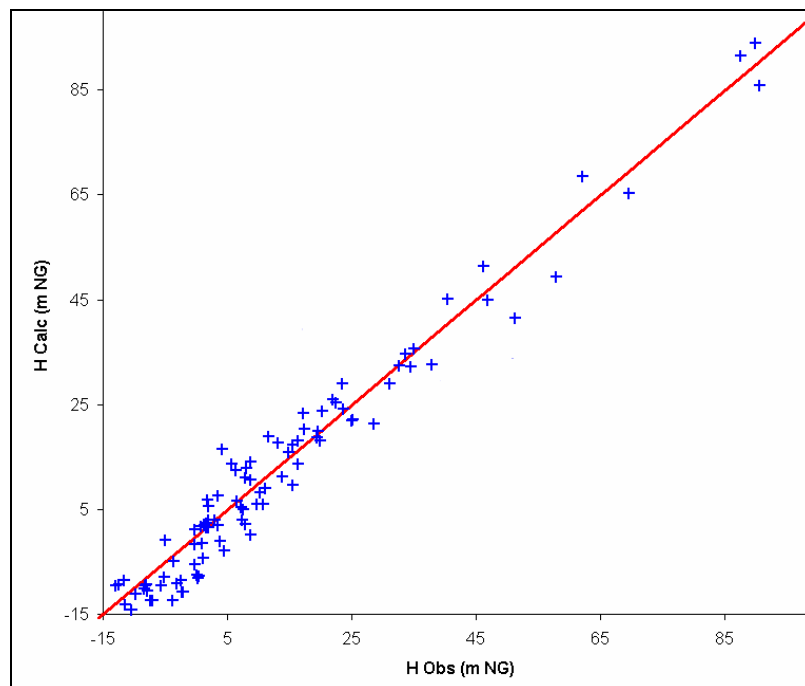


Figure 30 : Hauteurs piézométriques calculées et observées pour l'année 1981

5.3. Application à des scénarii de gestion

Deux exemples d'application ont été retenus afin de mettre en avant les possibilités mais aussi les limites de ce type d'application à des systèmes aquifères complexes.

5.3.1. Scénario 1 : Maximisation de la production d'un champ captant

La procédure d'optimisation est ici utilisée pour calculer une solution optimale pour maximiser le volume total des prélèvements sur le champ captant prévisionnel oligocène, tout en respectant des contraintes de rabattement sur les ouvrages d'exploitation et les ouvrages environnants de l'ensemble des nappes.

La prise en compte de tous les points de pompage dans la forme finale de la matrice de réponses unitaires permet ici une grande souplesse d'utilisation. Il est ainsi possible d'intégrer le problème d'optimisation dans un scénario tendanciel préétabli en fonction des prélèvements sur l'ensemble de la région. Les modifications effectuées sur les orientations générales d'exploitation ne nécessitent pas de simulations supplémentaires via le modèle numérique avant de procéder à la détermination des nouveaux débits de pompages optima pour le champ captant.

Dans le cas présent, **le scénario tendanciel régional envisagé** est le suivant :

- *Prélèvements effectués dans l'aquifère miocène stables dans le temps et égaux à ceux réalisés en 1996 ;*
- *Prélèvements réalisés dans l'aquifère oligocène en augmentation générale de 11 % par rapport à la situation de 1996 ;*
- *Prélèvements réalisés dans l'aquifère éocène en augmentation générale de 11 % par rapport à 1996.*

L'optimisation du champ captant oligocène devra s'inscrire dans ce scénario général et répondre aux contraintes supplémentaires suivantes :

- *Rabattement total au droit du champ captant inférieur ou égal à 10 mètres pour les deux ouvrages situés dans le compartiment Nord et à 15 mètres pour les 7 ouvrages dans le compartiment sud. Les rabattements envisagés ici concernent la totalité de la maille ;*

- *Dépression résiduelle générée par la mise en production du champ sur les forages AEP environnants inférieure à 5 mètres.*

La formulation mathématique du problème d'optimisation est envisagée de la manière suivante :

Résoudre la fonction objectif :

$$\text{Max } F_1 = \sum_{j=1}^{f_{opt}} Q_j \quad [13]$$

- avec F_1 fonction objectif à maximiser ;
 Q_j débit produit au forage k ;
 f_{opt} nombre de forage constituant le champ captant à optimiser.

sous les contraintes suivantes :

1- Contraintes sur le rabattement (variable dépendante)

$$\sum_{i=1}^{Obs} \sum_{n=1}^P a_{in} Q_n^T + \sum_{i=1}^{Obs} \sum_{j=1}^{f_{opt}} a_{ij} Q_j \leq s_i \quad [14]$$

- avec P nombre total de points de prélèvement ;
 Obs nombre total de points d'observation ;
 Q_n^T débit tendanciel soustrait au point de prélèvement n ;
 s_i rabattement maximum toléré au point d'observation i .

2- Contraintes sur le débit de pompage des ouvrages du champ captant (variable de décision)

$$Q_j^{\min} \leq Q_j \leq Q_j^{\max} \quad [15]$$

- avec Q_j^{\min} débit minimum envisagé au point de prélèvement j ;
 Q_j^{\max} débit maximum envisagé au point de prélèvement j .

La résolution de ce problème permet d'obtenir une solution pour la distribution des volumes exploitables au champ captant (Tableau 12 : Débits optimisés pour le champ captant oligocène). La nomenclature utilisée pour les forages prévisionnels est la même que celle présentée à la Figure 23.

Forage envisagé	Débit optimisé (m ³ .j ⁻¹)
<i>Fexp1</i>	1056
<i>Fexp2</i>	1205
<i>Fexp3</i>	3944
<i>Fexp4</i>	2281
<i>Fexp5</i>	2080
<i>Fexp6</i>	2024
<i>Fexp7</i>	2262
<i>Fexp8</i>	3021
<i>Fexp9</i>	5369

Tableau 12 : Débits optimisés pour le champ captant oligocène

Le volume total journalier exploitable d'après la solution optimisée serait donc de 23000 m³ qui respecterait les contraintes d'exploitation initialement retenues. Cette valeur est à comparer au volume journalier initialement prévu de 16000 m³. Le gain obtenu par l'optimisation du schéma d'exploitation du champ captant est particulièrement net. La diminution des volumes prélevés à partir des deux ouvrages prévisionnels envisagés dans le compartiment Nord (respectivement 1056 m³.j⁻¹ et 1205 m³.j⁻¹ au lieu de 1800 m³.j⁻¹ initialement prévu) permet de limiter le rabattement dans cette zone où la structure de l'aquifère n'est pas compatible avec des dépressions de grande amplitude. En contrepartie, des soutirages plus importants peuvent être réalisés sur les autres ouvrages prévus dans une zone où les propriétés de l'aquifère sont plus propices.

L'influence cumulée du champ captant et de l'exploitation des ouvrages selon le scénario tendanciel est présentée ci-après (Tableau 13) pour les ouvrages prévisionnels et les forages AEP les plus proches.

Point d'observation	Distance au champ captant (m)	Influence tendancielle (m)	Influence du champ captant (m)	Influence totale (m)
08021X0002	7200	1,53	2,85	4,38
08023X0039	6700	2,47	0,49	2,96
08026X0034	5500	1,86	1,32	3,18
07785X0001	5500	1,38	0,32	1,70
<i>Fexp1</i>	/	0,59	9,41	10
<i>Fexp2</i>	/	0,40	9,60	10
<i>Fexp3</i>	/	0,28	14,72	15
<i>Fexp4</i>	/	0,32	14,68	15
<i>Fexp5</i>	/	0,33	14,67	15
<i>Fexp6</i>	/	0,35	14,65	15
<i>Fexp7</i>	/	0,36	14,64	15
<i>Fexp8</i>	/	0,37	14,63	15
<i>Fexp9</i>	/	0,40	14,60	15

Tableau 13 : Influences calculées au droit et à proximité du champ captant – débits optimisés

Pour les forages AEP voisins, la dépression générée est inférieure à 5 mètres et resterait compatible avec le maintien de l'exploitation des ouvrages existants dans cette zone.

La solution optimale obtenue ici est limitée en premier lieu par les contraintes fixées sur les variables dépendantes (rabattement) à l'aplomb du champ captant prévisionnel. Il va de soi que le plus grand soin doit être porté à l'estimation des valeurs de contraintes dans cette zone avant de mettre en place la procédure d'optimisation. On pourra à cet effet préciser les valeurs limites à l'aide d'autres approches, plus adaptées à l'étude du comportement hydraulique d'un tel ensemble, tel que précisé auparavant.

5.3.2. Scénario 2 : gestion globale d'un système aquifère multicouche

L'optimisation d'un scénario de gestion à grande échelle faisant intervenir des opérations sur plusieurs aquifères est ici envisagée.

La situation tendancielle du scénario 1, à savoir une augmentation de 11 % des volumes prélevés à l'aquifère éocène et oligocène par rapport à la situation de 1996, est reprise. Les objectifs de gestion sont les suivants :

- économiser un volume global journalier de 14000 m³ pour l'aquifère éocène, par rapport au scénario tendanciel ;
- redistribuer les 14000 m³ journaliers économisés sur les prélèvements oligocènes ;
- assurer dans la zone de l'estuaire de la Gironde une hauteur piézométrique de la nappe éocène supérieure à une valeur limite, censée limiter les risques potentiels de venue d'eau éventuellement minéralisée.

Les économies et les redistributions de prélèvements doivent être réalisées de manière à assurer une desserte locale minimale et compatible avec les installations de pompage existantes.

On propose pour ce problème d'optimisation la formulation mathématique suivante :

Résoudre la fonction objectif :

$$\text{Egaliser } F_2 = \sum_{j=1}^{f_{opt}} Q_j = V_{oli}^T + V_{eoc}^T \quad [16]$$

- avec
- F_2 fonction objectif ;
 - Q_j débit produit au forage j ;
 - f_{opt} nombre total de forage à optimiser ;
 - V_{oli}^T volume tendanciel prélevé à l'aquifère oligocène, basé sur une augmentation de 11% du volume annuel prélevé à la nappe oligocène en 1996 ;
 - V_{eoc}^T volume tendanciel prélevé à l'aquifère éocène, basé sur une augmentation de 11% du volume annuel prélevé à la nappe éocène en 1996.

sous les contraintes suivantes :

1- Contraintes sur les hauteurs piézométriques (variables dépendantes)

$$H_i^{Ref} - \sum_{i=1}^{Obs} \sum_{j=1}^P a_{ij} Q_j \geq H_i^{min} \quad [17]$$

avec P nombre total de points de prélèvement ;
 Obs nombre total de points d'observation ;
 H_i^{Ref} hauteur piézométrique de référence calculée au point i ;
 H_i^{min} hauteur piézométrique minimale tolérée au point d'observation i .

2- Contraintes sur les débits (variables de décision)

$$Q_j^{min} \leq Q_j \leq Q_j^{max} \quad j = 1, 2, \dots, P \quad [18]$$

avec Q_j^{min} débit minimal à assurer au point de prélèvement j ;
 Q_j^{max} débit maximal envisageable au point de prélèvement j .

$$Q_j = Q_j^T \quad j = 1, 2, \dots, N_{mio} \quad [19]$$

avec N_{mio} nombre total de forages captants l'aquifère oligocène ;
 Q_j^T prélèvement tendanciel au point de prélèvement miocène j ;

$$\sum_{j=1}^{N_{oli}} Q_j = V_{oli}^T + V^{Eco} \quad [20]$$

avec N_{oli} nombre total de forages captant l'aquifère oligocène ;
 V^{Eco} volume économisé sur l'aquifère éocène.

$$\sum_{j=1}^{N_{eoc}} Q_j = V_{eoc}^T - V^{Eco} \quad [21]$$

avec N_{eoc} nombre total de forages captants l'aquifère oligocène ;

La valeur de hauteur piézométrique limite virtuelle retenue pour les points d'observation en zone estuaire (Eq. [17]) est fixée à + 1 m NG. Les valeurs minimales de débit pour les points de prélèvements ont été bloquées à la moitié de la valeur tendancielle, en assumant qu'une distribution locale doit être assurée. De la même manière, les valeurs maximales ont été limitées au double de la valeur tendancielle calculée sur la base des prélèvements de 1996. Ces valeurs de

contraintes sont arbitraires et seule une étude des besoins locaux et des installations existantes permettrait de définir réellement ces contraintes.

La distribution optimisée obtenue par la résolution de ce problème permet de proposer une nouvelle carte piézométrique pour l'aquifère éocène. Celle-ci est à comparer à la carte piézométrique calculée pour le scénario tendanciel non-optimisé (Figure 31).

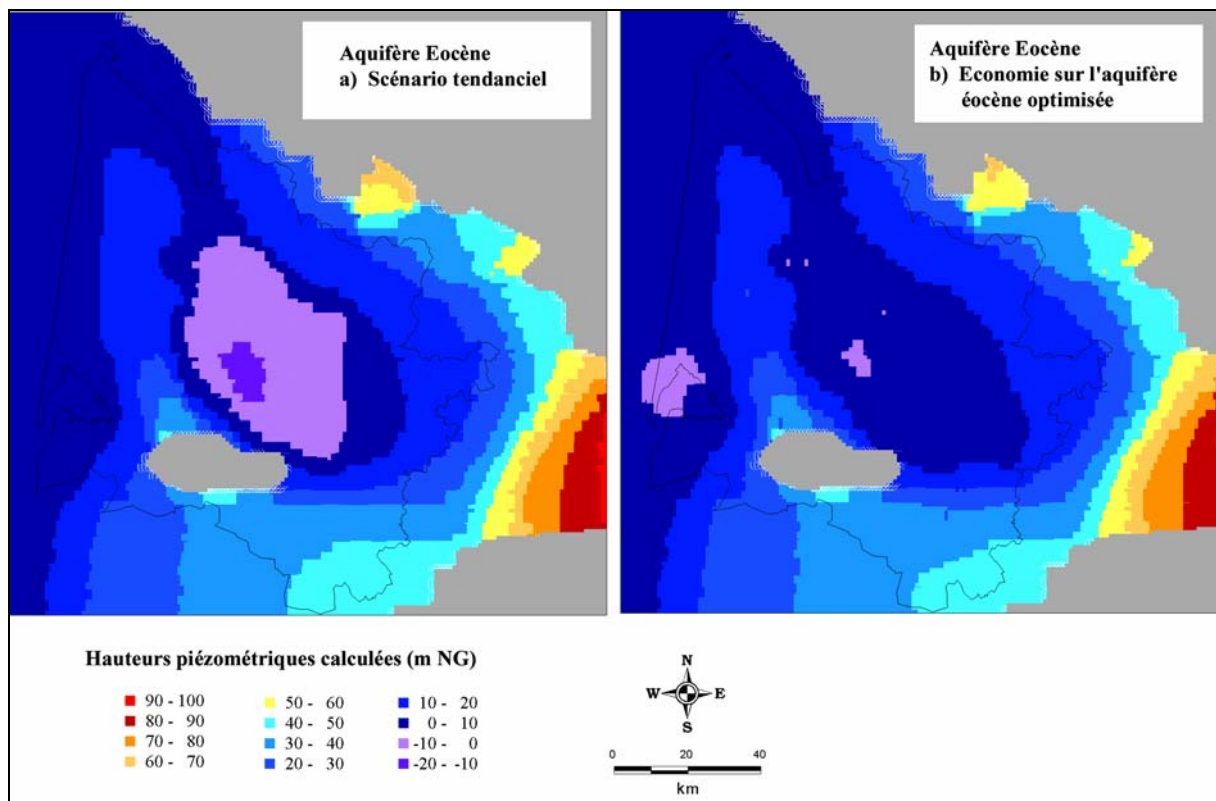


Figure 31 : Cartes piézométriques de l'aquifère Eocène – Impact du processus d'optimisation global

L'examen de cette figure appelle plusieurs commentaires :

- les effets du nouveau scénario optimisé se manifestent principalement par une hausse des hauteurs piézométriques dans la zone bordelaise. Les valeurs négatives sont ici limitées à la toute proche agglomération ;
- les hauteurs piézométriques minimales sont respectées sur la zone de l'estuaire, contrainte principale de gestion dans la mise en œuvre de ce scénario ;

- on note l'apparition d'une zone où les hauteurs piézométriques présentent des valeurs négatives dans la région d'Arcachon. Ce phénomène reste toutefois d'extension limitée.

Les variations de débits aux mailles de prélèvement ont été calculées par rapport au scénario tendanciel. Les modifications nécessaires pour obtenir la distribution optimisée qui mène au respect des contraintes établies sont présentées ci-après (Figure 32).

Les diminutions de débit les plus importantes par rapport au scénario tendanciel sont observées au centre, dans la région bordelaise. A l'opposé, le Médoc, au sens large, voit l'ensemble de ses prélèvements augmenter pour arriver à la solution optimale. Notons, d'après la solution proposée, qu'il est envisageable d'augmenter les prélèvements par rapport à ceux prévus par le scénario tendanciel dans la zone proche de l'estuaire, où des contraintes sur les hauteurs piézométriques ont pourtant été imposées. Il apparaît clairement ici que l'approche régionale de la gestion permet de proposer des solutions différentes de celles envisageables à une échelle plus locale, où la diminution automatique des prélèvements sur la zone de contraintes est en général la solution immédiatement retenue.

Si le passage à l'échelle régionale permet de globaliser la gestion des aquifères, et passer outre une vision locale parfois réductrice pour les phénomènes considérés, ce changement introduit des limites dans la procédure d'optimisation. Des contraintes supplémentaires, non prises en compte jusqu'ici et n'appartenant pas au système physique constitué par le complexe puits/aquifère doivent être intégrées. Il s'agit principalement de contraintes socio-économiques liées à des facteurs géographiques, sanitaires ou démographiques pour lesquelles l'approche MRU seule se révèle insuffisante.

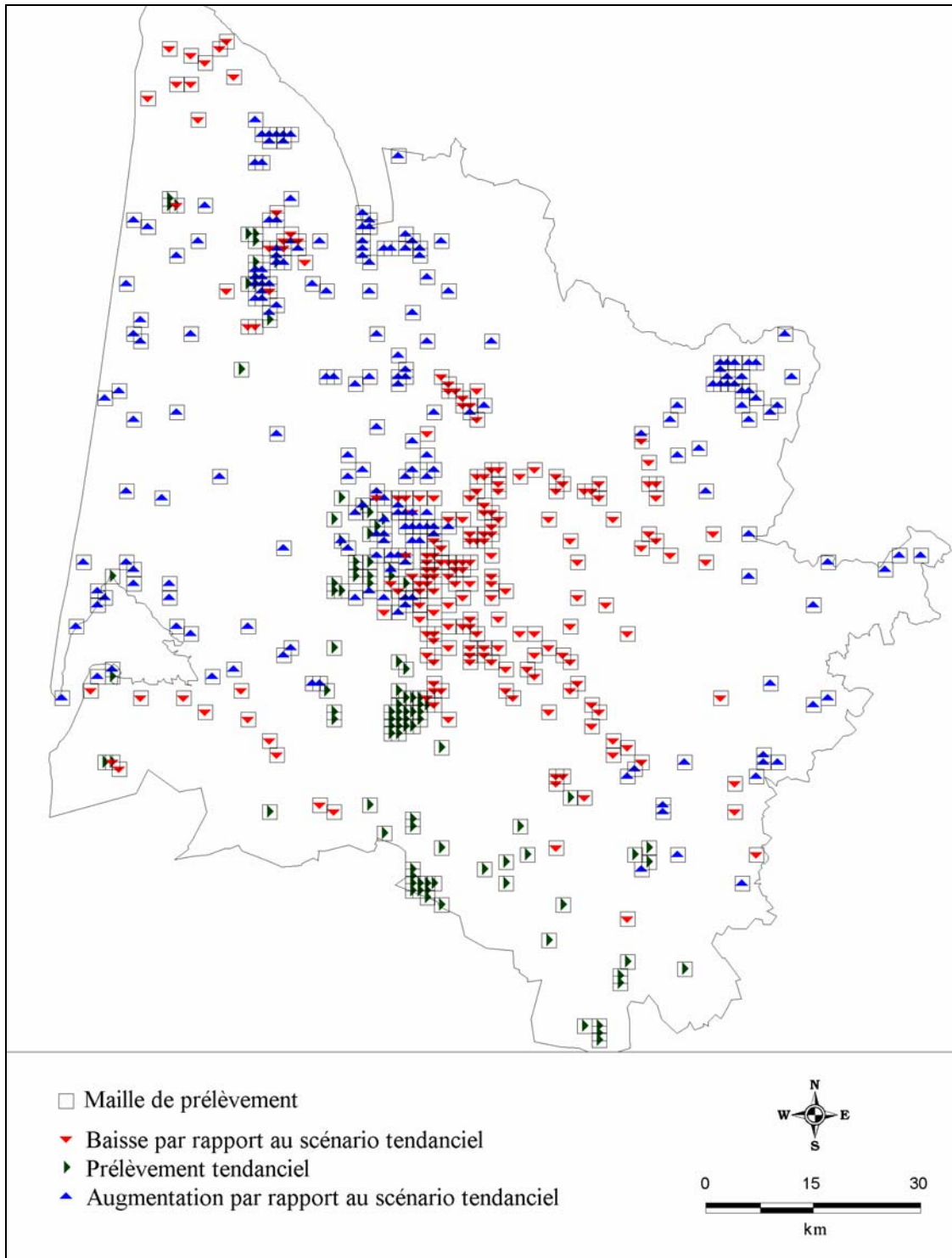


Figure 32 : Distribution des débits optimisés par rapport au scénario tendanciel

6. CONCLUSIONS

Afin de prendre en compte les nouvelles investigations réalisées dans le Médoc dans la mise en œuvre des scénarii d'exploitation des nappes tertiaires en région médocaine, deux modèles numériques ont été construits selon un schéma de résolution aux différences finies grâce au code de calcul MODFLOW. Les caractéristiques communes de ces modèles sont les suivantes :

- 9 couches de calcul ;
- mailles carrées de 1 km de côté ;
- représentation explicite de la géométrie des couches géologiques ;
- intégration des prélèvements.

Le premier modèle régional a été développé selon les hypothèses ayant présidé à la mise en œuvre du modèle régional du BRGM. L'intégration de la couche plio-quadernaire comme couche de calcul permet de supprimer l'utilisation de potentiels imposés en surface. Les résultats obtenus après calage en régime permanent et transitoire sont satisfaisants et autorisent l'utilisation de ce modèle comme support de travail.

Le second modèle numérique régional a été développé à partir du modèle précédent en intégrant la nouvelle vision géologique et hydrogéologique de la région médocaine. La restitution du comportement hydrodynamique des nappes tertiaires dans cette région a sensiblement été améliorée.

Au vu des résultats obtenus, ce modèle a pu être utilisé pour tester le projet d'exploitation de la nappe oligocène en Médoc, préconisé par le SAGE Nappes Profondes comme une des solutions de substitution à l'exploitation de la nappe de l'Eocène.

Toutefois, compte tenu des limitations inhérentes à ce type de modélisation numérique, un second modèle d'échelle réduite a été développé utilisant une approche semi-analytique, afin de rendre compte de l'hydraulique souterraine du complexe champ captant/aquifère dans la proche périphérie de la zone d'exploitation. Ces deux types de modélisation retenus sont totalement dissociés et reposent sur des approches différentes des phénomènes. Les résultats

complémentaires, à l'échelle régionale et locale, permettent d'estimer de manière exhaustive l'impact de cette exploitation prévue.

Il ressort de l'utilisation de ces deux modèles que le champ captant oligocène tel qu'il est proposé est envisageable à l'échelle régionale. Les rabattements générés à cette échelle restent compatibles avec les formations géologiques et deviennent rapidement acceptables, pour les trois aquifères tertiaires. Localement, la disposition du champ captant n'est pas compatible avec une exploitation à long terme de l'aquifère oligocène. C'est le cas dans la partie centre-nord du Médoc, où malgré les qualités transmissives non négligeables de l'aquifère oligocène et une liaison hydraulique avec l'aquifère miocène avantageuse, une exploitation à long terme pourrait entraîner un dénoyage local de l'aquifère oligocène, non visible à l'échelle du modèle régional, mais souligné par la modélisation semi-analytique.

Une solution envisageable pourrait être alors de garder cette configuration spatiale mais préférer une distribution des prélèvements différente, avec une exploitation plus importante des forages situés au sud. Une autre solution, abordée précédemment, serait de déplacer le champ captant vers le sud vers la commune de Saumos, où l'influence sur le compartiment Nord serait alors minime et les risques de dénoyage beaucoup plus limités

Devant l'importance des problèmes de gestion à grande échelle et la complexité des systèmes hydrogéologiques en jeu, un outil d'aide à la décision a été développé et testé à l'échelle régionale sur un scénario prévisionnel de substitution d'exploitation de la nappe de l'Eocène. Bien que nécessitant encore des développements pour prendre en compte notamment une caractérisation multiobjectif des préférences du décideur et une intégration des contraintes économique, les résultats obtenus mettent en évidence des zones de potentialité intéressante, comme le Bassin d'Arcachon.

Cet outil constitue déjà dans sa forme actuelle, un système permettant de traiter des scénarii complexes pour aboutir, comme démontré, à des solutions optimales satisfaisant des contraintes évoluées.

Avant de pouvoir réellement disposer d'un outil de gestion à grande échelle, un soin particulier doit être apporté à certaines singularités régionales qu'il n'est pas pour

l'instant possible de restituer à l'aide de modèles numériques d'échelle régionale. A ce titre, la région de Villagrains-Landiras, siège d'une structure géologique importante, nécessite un traitement particulier, avec notamment la présence d'exutoires naturels de la nappe oligocène. La région d'Arcachon, si elle apparaît actuellement comme une zone potentiellement intéressante, doit également faire l'objet d'une caractérisation géologique et hydrogéologique détaillée. Ce n'est qu'à cette condition qu'il sera à priori possible de disposer d'outils de modélisation et de gestion suffisamment fiables pour être représentatifs.

A Pessac, le 01 février 2005,

A. DUPUY

F. LARROQUE