



Ministère de l'Economie
des Finances et de l'Industrie
Secrétariat d'Etat à l'Industrie



AGENCE DE L'EAU
ADOUR-GARONNE



DOCUMENT PUBLIC

*Restructuration du modèle nord-aquitain de
gestion des nappes
Correction du biais de calage du modèle*

Etude soutenue dans le cadre des actions de Service Public du BRGM 99-D-553

Avril 1999
R 40711



Mots clés : Modélisation, Hydrogéologie, Oligocène, Eocène, Campanien, Nord-Aquitain, Gironde, Schéma Directeur.

En bibliographie ce rapport sera cité de la façon suivante :

SEGUIN J.J.

Restructuration du modèle nord-aquitain de gestion des nappes.

Correction du biais de calage du modèle

Rapport BRGM R 40711

© BRGM 1999, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Sommaire

INTRODUCTION.....	1
1. MISE EN EVIDENCE DU BIAIS DE CALAGE.....	2
1.1. Analyse globale des écarts entre piézométries observée et calculée.....	2
1.2. Evolution des écarts moyens.....	3
2. CORRECTION DU BIAIS.....	7
2.1. Eocène.....	7
2.2. Oligocène.....	11
CONCLUSION.....	16

Liste des figures

- Figure 1** - Evolution des différences entre piézométries observée et simulée pour l'ensemble des piézomètres de l'Eocène.
- Figure 2** - Evolution des différences entre piézométries observée et simulée pour l'ensemble des piézomètres de l'Oligocène.
- Figure 3** - Evolution de l'intervalle de confiance à 95 % pour les piézomètres de l'Eocène
- Figure 4** - Evolution de l'intervalle de confiance à 95 % pour les piézomètres de l'Oligocène
- Figure 5** - Eocène : histogramme des écarts individuels entre chroniques piézométriques observées et chroniques simulées.
- Figure 6** - Eocène : évolution dans le temps des écarts moyens et de leur écart type
- Figure 7** - Eocène : histogramme des écarts moyens calculés, pas de temps par pas de temps
- Figure 8** - Oligocène : histogramme des écarts individuels entre chroniques piézométriques observées et chroniques simulées.
- Figure 9** - Oligocène : histogramme des écarts individuels entre chroniques piézométriques observées et chroniques simulées (point n° 9 ajouté).
- Figure 10** - Oligocène : évolution dans le temps des écarts moyens.
- Figure 11** - Oligocène : évolution dans le temps de l'écart type des écarts moyens.

Introduction

Devant la nécessité de préserver la nappe de l'Eocène, pour laquelle on observe une baisse piézométrique depuis plusieurs années avec le risque d'une intrusion des eaux de l'estuaire de la Garonne sur les conseils du BRGM SGR/AQI, l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, la Communauté Urbaine de Bordeaux et le Conseil Général de la Gironde ont décidé la mise en place d'un Schéma Directeur de gestion des ressources en eau de la Gironde. Ce Schéma conduit à proposer des solutions alternatives permettant de limiter les prélèvements dans cette nappe.

Compte tenu de l'importance des investissements à faire, les partenaires associés dans cette démarche ont demandé au BRGM Service Géologique Régional Aquitaine d'utiliser le modèle mathématique nord-aquitain, développé au début des années 1990, pour tester les différentes solutions proposées par le Cabinet d'études du Schéma. Une expertise du modèle réalisée à la demande de l'Agence de l'Eau a montré que le modèle devait être amélioré pour arriver à un niveau de représentativité du milieu souterrain suffisant pour fonder des décisions d'investissements lourds.

En accord avec les Experts, un programme a été établi pour restructurer le modèle (vérification de la géométrie, analyse plus fine de la recharge, amélioration du calage...).

Suite aux recommandations formulées, un important travail de vérification de la géométrie du modèle a été entrepris. Les données les plus récentes (géologie, piézométrie, prélèvements...) ont été utilisées et une démarche de calage en trois étapes a été mise en œuvre pour sérier les difficultés (l'étape finale, quant à elle, a été réalisée avec un pas de temps trimestriel sur les 9 dernières années d'une période totale de 25 ans, de 1972 à 1996).

Un rapport détaillant l'ensemble des travaux de modélisation et les résultats obtenus a été soumis au collège d'Experts. Une analyse fine des résultats obtenus a mis en évidence un biais dans le calage réalisé à partir des chroniques piézométriques disponibles, à savoir une sous estimation par le modèle de la baisse des niveaux de 20 cm/an dans l'Eocène et de 16 cm/an dans l'Oligocène.

Ce rapport expose seulement l'analyse des **résultats du recalage** et les améliorations obtenues suite à la **correction du biais** qui était lié à une piézométrie initiale trop basse (mal connue en 1972) et à des coefficients d'emmagasinement légèrement surestimés. La synthèse des deux rapports est quant à elle réunie dans le rapport BRGM R40224.



1. Mise en évidence du biais de calage

Ce premier chapitre, extrait du rapport d'expertise de 1998 (Ph. Ackerer, G. Porel, F. Delay), rappelle la démarche ayant permis de mettre en évidence le biais de calage du modèle nord aquitain. Les résultats statistiques et les graphiques qu'il contient permettent également de juger de l'amélioration apporté au modèle par résorption du biais.

1.1. ANALYSE GLOBALE DES ÉCARTS ENTRE PIÉZOMETRIES OBSERVÉES ET CALCULÉES

Les critères suivants ont été retenus pour l'analyse des écarts :

- seuls les aquifères de l'Oligocène et Eocène sont analysés. Le nombre de points dans le Campanien est insuffisant ;
- les premiers pas de temps (1972 à 1974) ne sont pas pris en compte pour éviter les biais dus à la piézométrie initiale retenue pour le modèle. Pour l'Oligocène, les années 1975 à 1976 ont été retirées de l'analyse, le nombre de mesures étant insuffisant ;
- pour l'Eocène, le piézomètre 0779-4X-0001 (colonne 18, ligne 19 du modèle) a été retiré de l'analyse en raison d'écarts importants (plus de 16 m en moyenne) et inexplicables ;
- l'estimation des intervalles de confiance a été fixée sur une base de la moyenne +/- 2 fois l'écart-type.

L'analyse globale sur l'ensemble des différences entre piézométries observée et simulée est présentée dans le tableau 1 ci dessous :

Période	1975-1987	1987-1996	1975-1996
EOCENE : m	1.26	-1.02	-0.33
EOCENE : e	2.84	3.13	3.23
Int. de Confiance	[-4.42 ; 6.94]	[-7.28 ; 5.24]	[-6.79 ; 6.13]
OLIGOCENE : m	0.18	-1.88	-1.35
OLIGOCENE : e	2.87	4.06	3.90
Int. de Confiance	[-5.56 ; 5.92]	[-10.00 ; 6.24]	[-9.15 ; 6.45]

Tableau 1 - Analyse globale des différences

(m : moyenne des différences en mètres, e : écart type des différences en mètres)

La limite inférieure de l'intervalle de confiance est égale à : moyenne - 2 écarts-type

La limite supérieure est égale à : moyenne + 2 écarts-type

90% des différences entre piézométrie mesurée et piézométrie calculée se situent dans l'intervalle de confiance pour l'Oligocène, 93% pour l'Eocène. Ceci démontre que l'hypothèse d'une loi normale de distribution pour les écarts est justifiée puisque si ces

derniers étaient statistiquement indépendants et si leur distribution était une loi normale parfaite, le pourcentage "entrant" dans plus ou moins deux écarts-type devrait être de 95%.

1.2. ÉVOLUTION DES ÉCARTS MOYENS

L'évolution des écarts moyens calculés pour tous les piézomètres et pour chaque pas de temps est analysée pour détecter d'éventuels tendances et biais à l'échelle de l'aquifère. L'évolution de l'écart-type de ces écarts permet d'analyser le gain ou la perte de précision du modèle au cours de la simulation, notamment dans la phase de validation du modèle.

Les figures 1 et 2 montrent la présence d'un biais. Le modèle a tendance à surestimer la piézométrie (la moyenne des différences entre observation et simulation décroît) et sa précision se dégrade (l'écart-type augmente au cours du temps). Cette dégradation de la précision globale du modèle est à mettre en relation avec le passage d'un régime transitoire au pas de temps annuel à un pas de temps trimestriel à partir de 1987. Le modèle devient sensible aux incertitudes sur la distribution des coefficients d'emmagasinement pour le pas trimestriel.

Le passage en phase de validation de 1993 à 1996 ne se traduit pas par une dégradation significative de la précision du modèle, ce qui met en évidence la cohérence du modèle proposé. L'étendue de l'intervalle de confiance sur les différences entre hauteurs piézométriques mesurées et calculées augmente, en accord avec la diminution de précision (figures 3 et 4). Cette augmentation de l'incertitude est nettement plus marquée pour l'Oligocène que pour l'Eocène.

Si l'on admet que la variation de la piézométrie représente la variation du stock d'eau, ce qui est vraisemblable au voisinage de Bordeaux, le modèle simule une vidange de l'aquifère plus lente que celle observée. A priori, une vidange simulée plus rapide était attendue, compte tenu des hypothèses faites en adoptant un modèle du type multicouche. En effet, une absence de stockage dans les épontes peut augmenter artificiellement la réactivité du modèle puisqu'il n'y a pas de vidange - recharge possible des épontes.

Les raisons de ce biais sont à chercher tant dans la quantification des sollicitations (la recharge) que dans les paramètres hydrodynamiques retenus (conductivité hydraulique, emmagasinement).

Le biais sur les différences moyennes peut être évalué par les équations des droites de tendance sur les figures 1 et 2

$$\begin{array}{ll} \text{pour l'Eocène :} & m = -0.20 (x-1975) + 2.20 \\ \text{pour l'Oligocène :} & m = -0.16 (x-1975) + 0.90 \end{array}$$

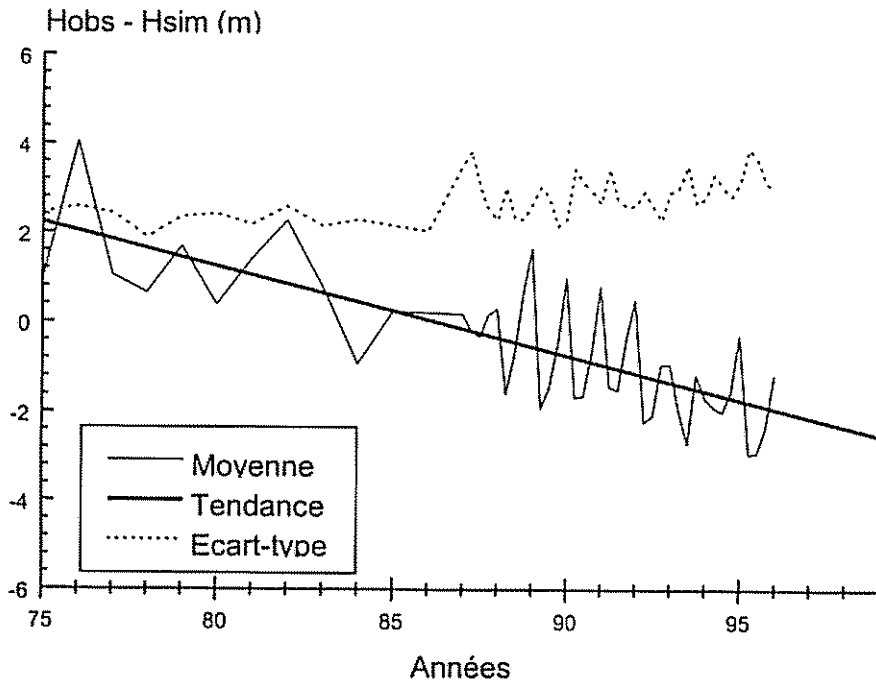


Figure 1 - Evolution des différences entre piézométries observée et simulée pour l'ensemble des piézomètres de l'Eocène.

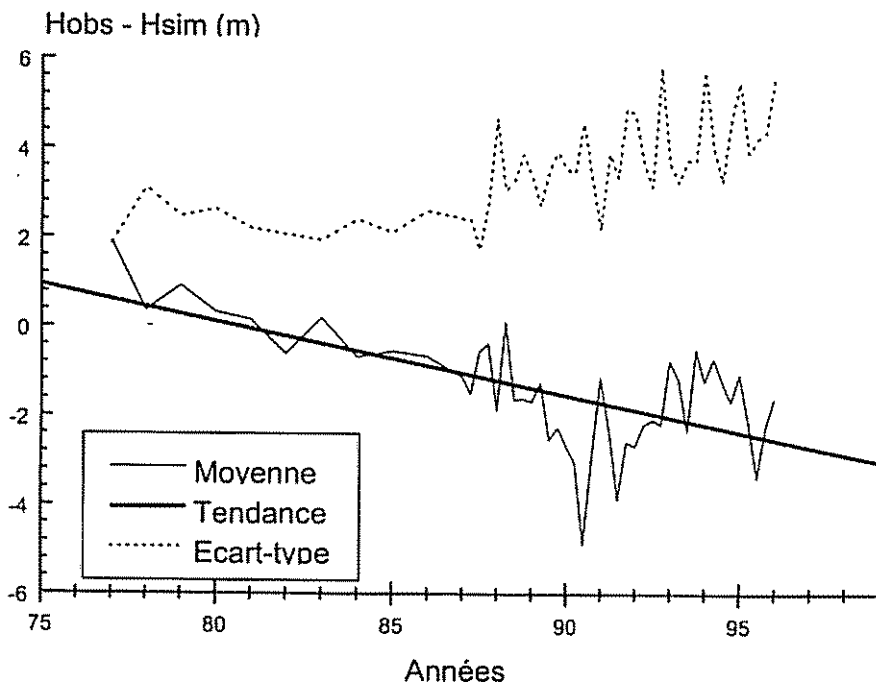


Figure 2 - Evolution des différences entre piézométries observée et simulée pour l'ensemble des piézomètres de l'Oligocène.

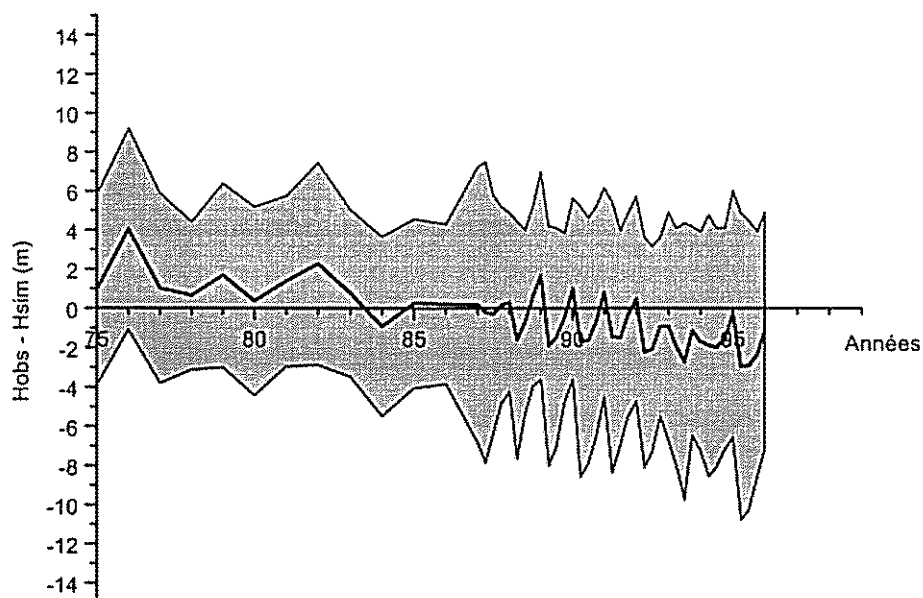


Figure 3 - Evolution de l'intervalle de confiance à 95 % pour les piézomètres de l'Eocène (la zone grisée représente l'intervalle de confiance, la courbe au centre est la moyenne).

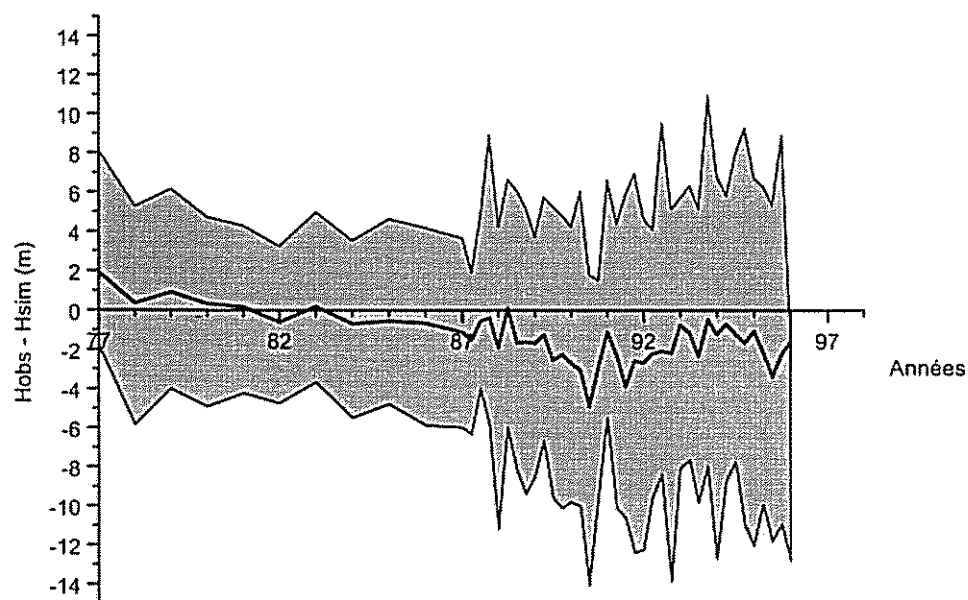


Figure 4 - Evolution de l'intervalle de confiance à 95 % pour les piézomètres de l'Oligocène

Le biais est estimé à -0.20 m par an pour l'Eocène et -0.16 m par an pour l'Oligocène. Cela signifie que le modèle simule une baisse globale de la piézométrie plus lente que celle observée à raison de 0.20 m par an pour l'Eocène et de 0.16 m par an pour l'Oligocène.

Ces conclusions ne reposent que sur les différences de piézométrie entre observation et simulation. Pour l'Oligocène, compte tenu de la localisation géographique des piézomètres observés elles ne sont applicables qu'au voisinage de Bordeaux. Ces conclusions sont un peu plus générales pour l'Eocène dont les points de référence sont mieux répartis.



2. Correction du biais

Le biais de calage ainsi mis en évidence a pour origine d'une part une piézométrie initiale trop basse (mal connue en 1972) et d'autre part des coefficients d'emmagasinement légèrement surestimés (ce qui est en fait une conséquence de cet état piézométrique initial sous estimé qui a été compensé au cours du calage par l'introduction de coefficients d'emmagasinement plus forts).

Après le nouveau calage, la démarche suivie pour l'analyse des écarts entre observations et simulations reprend celle mise en œuvre pour l'expertise du rapport initial (cf chapitre 1, ci après) tout en y apportant quelques précisions.

Le Campanien, pour lequel le nombre de données est faible et qui est reproduit avec une moindre précision a été exclu de cette analyse.

Les 4 premières années (1972 à 1975) ont été retirées de l'analyse afin d'éliminer l'influence d'un état initial incertain. Le nombre de pas de temps est alors de 48.

Pas de temps par pas de temps et piézomètre par piézomètre, les écarts $H_{obs}-H_{sim}$ entre valeurs mesurées H_{obs} et valeurs simulées H_{sim} (= écarts individuels), ont été calculés.

Afin de mettre en évidence une éventuelle dérive dans la piézométrie simulée, on a calculé, pas de temps par pas de temps, la moyenne des écarts sur l'ensemble des piézomètres retenus (= écarts moyens) ainsi que l'écart type correspondant; puis les valeurs obtenues ont été reportées sur un graphique en fonction du temps et une analyse de régression a été effectuée.

2.1. EOCENE

2.1.1. Écarts individuels $H_{obs}-H_{sim}$

Les points numérotés 3, 21 et 22 quasiment insensibles aux variations des paramètres de calage et mal reproduits, ont été retirés de l'analyse.

Les paramètres statistiques de base sont donnés dans le tableau 2 ci-dessous pour 3 périodes: la période au pas de temps annuel (de 1976 à 1987), celle au pas de temps trimestriel (de 1988 à 1996) et la réunion des deux.

	1976-1987	1988-1996	1976-1996
Nombre de valeurs	154	483	637
Moyenne générale m (en m)	0.07	0.32	0.26
Ecart type σ (en m)	2.48	2.79	2.72
Minimum	-5.26	-6.72	-6.72
Maximum	8.88	10.28	10.28

Tableau 2 - Statistiques sur les écarts entre piézométrie observée et piézométrie simulée calculés sur les chroniques de mesures disponibles

En moyenne, les valeurs observées sont donc légèrement supérieures aux valeurs simulées, surtout sur la période trimestrielle (moyenne de 32 cm contre 7 cm seulement pour la période annuelle). La baisse générale des niveaux est donc légèrement plus accentuée par le modèle.

La distribution des fréquences de valeurs est précisée par l'histogramme de la figure 5 (les classes sont incrémentées de plus ou moins 1/2 écart type à partir de la moyenne).

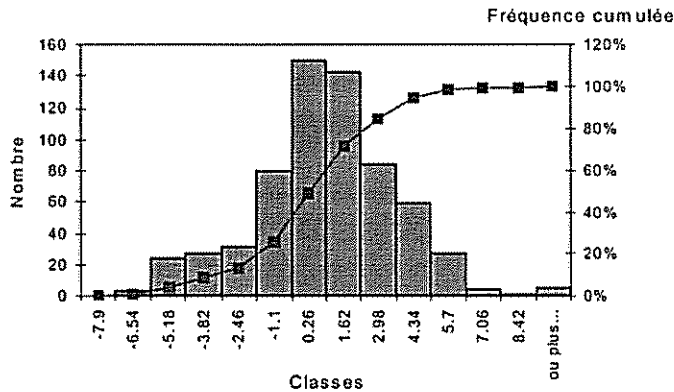


Figure 5 - Eocène : histogramme des écarts individuels entre chroniques piézométriques observées et chroniques simulées

La répartition des valeurs s'organise suivant une distribution normale comme le montre qualitativement l'histogramme où :

72 % des écarts sont compris entre $(m - 1\sigma) = -2.46$ m et $(m + 1\sigma) = 2.98$ m (la valeur théorique est de 68%)

94.5 % des écarts sont compris entre $(m - 2\sigma) = -5.18$ m et $(m + 2\sigma) = 5.70$ m (la valeur théorique est de 95%)

En supposant l'indépendance statistique des écarts, l'intervalle de confiance à 95% de la moyenne m est donné par :

$$IC_{95} = \left[m - t_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, m + t_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right]$$

$t_{1-\frac{\alpha}{2}}$ est la valeur du T de Student pour un niveau de confiance $1-\alpha = 95\%$.

$$t_{1-\frac{\alpha}{2}} = 2.01 \quad \text{et} \quad t_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = 0.21$$

D'où l'intervalle de confiance suivant : $IC_{95} = [0.05, 0.47]$

La moyenne des écarts $H_{obs} - H_{sim}$ reste donc proche de 0 et positive.

2.1.2. Évolution des écarts moyens de 1976 à 1996

L'évolution de ces écarts est présentée par la figure 6.

Pour 48 valeurs considérées (12 annuelles et 36 trimestrielles), la moyenne générale de ces écarts est de 0.24 m et l'écart type de 0.84 m. Le minimum est de -1.81 m et le maximum de 2.31 m.

L'existence d'une dérive peut être mise en évidence par une analyse de régression. L'équation de la droite ajustée sur la série des écarts moyens (figure 6) est :

$$E = -0.0264(t-76) + 0.586$$

La pente de la droite (le coefficient de régression) est $a_{rg} = -2.64 \text{ cm/an}$. Il semble donc que l'on passerait au cours du temps de la situation actuelle de sous-estimation en moyenne des niveaux simulés (cf ci-dessus) à la situation inverse de baisse moins prononcée des niveaux simulés par rapport aux niveaux mesurés (à partir de 1998, en prolongeant la droite de tendance).

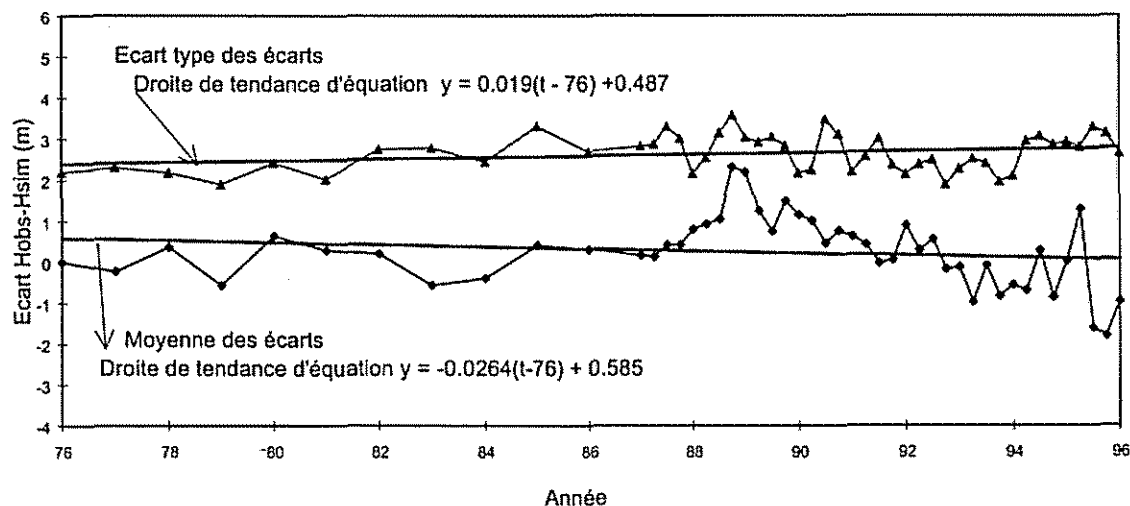


Figure 6 – Eocène : évolution dans le temps des écarts moyens et de leur écart type.

Mais cette tendance est faible, inférieure à 3 cm par an et de plus, non significative au sens statistique comme le montre l'application suivante du test de Student.

On peut en effet vérifier, à l'aide de l'histogramme de la figure 7, que les écarts moyens se distribuent approximativement suivant une loi normale.

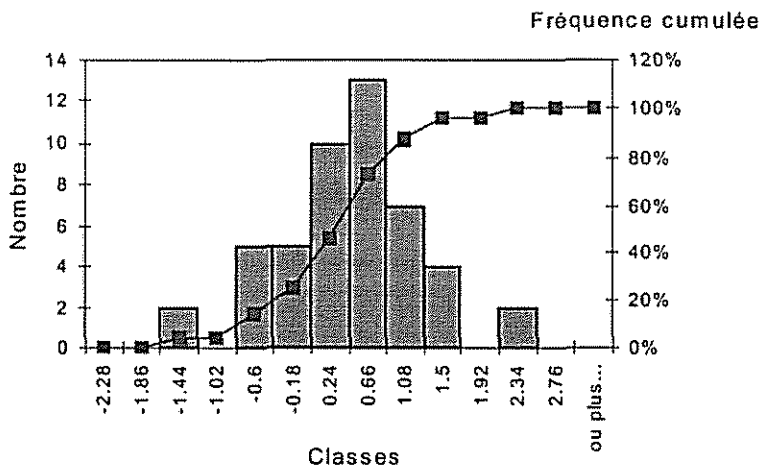


Figure 7 - Eocène : histogramme des écarts moyens calculés pas de temps par pas de temps

Si l'on suppose de plus que ces écarts moyens sont statistiquement indépendants, on peut alors mettre en œuvre le test de Student pour savoir si l'on peut considérer la valeur du coefficient de régression a_{rg} comme significativement différente de 0 ou non.

La valeur calculée du T de Student est égale à 1.137, inférieure à la valeur théorique de 2.01 pour un niveau de confiance de 95%. La pente de la droite de régression n'est donc pas significativement différente de 0 et par conséquent la tendance dégagée reste peu probable (sur la base de l'échantillon analysé).

Remarque : Le test sur le coefficient de régression a_{rg} (significativement différent de 0 ou non) s'effectue en calculant l'expression :

$$t_{obs} = a_{rg} \sqrt{\frac{\sum_i (t_i - \bar{t})^2}{\sigma^2_{res}}}$$

t désigne les valeurs du temps et \bar{t} la moyenne de ces valeurs ;

σ^2_{res} est la variance des résidus (écarts entre la droite de régression et les valeurs de l'échantillon).

2.1.3. Évolution des écarts types de 1976 à 1996

Le report graphique en fonction du temps (figure 5) de l'écart type des écarts moyens montre sur la période considérée une légère tendance à l'augmentation, de 2 cm par an environ, la droite de régression ayant pour équation $y = 0.019 (t-76) + 0.49$ (en m).

Par contre, sur les 10 dernières années, les écarts type restent stables. La précision du modèle ne se dégrade donc pas de façon significative au cours du temps.

2.2. OLIGOCENE

2.2.1. Écarts individuels $H_{obs} - H_{sim}$

Les points numérotés 6, 9 et 10 (numéro d'ordre des figures) quasiment insensibles aux variations des paramètres de calage et mal reproduits, ont été retirés de l'analyse.

Les paramètres statistiques de base sont donnés dans le tableau 3 ci-dessous pour 3 périodes : la période au pas de temps annuel (de 1976 à 1987), celle au pas de temps trimestriel (de 1988 à 1996) et la réunion des deux.

	1976-1987	1988-1996	1976-1996
Nombre de valeurs	105	331	436
Moyenne générale m (en m)	2.07	1.80	1.86
Ecart type σ (en m)	2.52	2.41	2.44
Minimum	-4.53	-7.61	-7.61
Maximum	8.39	8.44	8.44

Tableau 3 - Oligocène : Statistiques sur les écarts entre chroniques piézométriques observées et simulées

En moyenne, sur toute la période, les valeurs observées sont supérieures aux valeurs simulées de 1.9 m. La baisse générale des niveaux est donc plus accentuée par le modèle.

La distribution des fréquences de valeurs est précisée par l'histogramme de la figure 8 (les classes sont incrémentées de plus ou moins 1/2 écart type à partir de la moyenne) .

Contrairement au cas de l'Eocène, la répartition des valeurs en classes de fréquence se prête moins bien à l'ajustement d'une loi normale, la distribution étant dissymétrique :

43 % des écarts sont compris entre $(m - 1\sigma) = -0.58$ et $m = 1.86$

27 % entre $m = 1.86$ et $(m + 1\sigma) = 4.3$

95 % des écarts sont compris entre $(m - 2\sigma) = -3.02$ et $(m + 2\sigma) = 6.74$

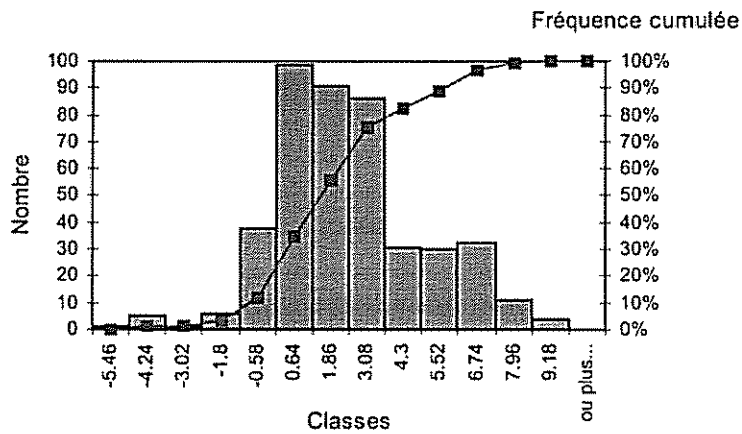


Figure 8 - Oligocène : histogramme des écarts individuels entre chroniques piézométriques observées et chroniques simulées

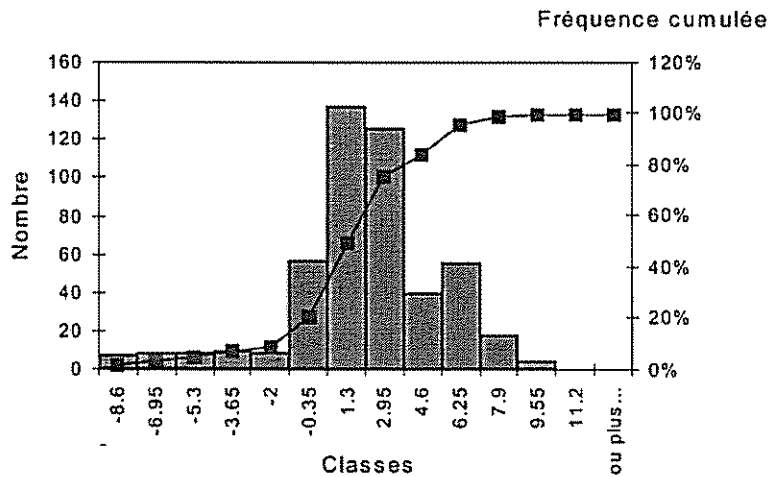


Figure 9 - Oligocène : histogramme des écarts individuels entre chroniques piézométriques observées et chroniques simulées (point n° 9 ajouté)

Remarque :

Si l'on rajoute le point n° 9, on obtient les caractéristiques statistiques suivantes :

	1976-1996
Nombre de valeurs	475
Moyenne générale m (en m)	1.3
Ecart type σ (en m)	3.3
Minimum	-14.36
Maximum	8.44

et l'histogramme des fréquences de la figure 9, qui reste dissymétrique. Dans cette distribution :

- 75 % des écarts sont compris entre $(m - 1\sigma) = -2 \text{ m}$ et $(m + 1\sigma) = 4.6 \text{ m}$
- 94 % des écarts sont compris entre $(m - 2\sigma) = -5.3 \text{ m}$ et $(m + 2\sigma) = 7.9 \text{ m}$

2.2.2. Évolution des écarts moyens de 1976 à 1996

L'évolution de ces écarts est présentée par la figure 10. Pour 48 valeurs considérées (12 annuelles et 36 trimestrielles), la moyenne générale de ces écarts est de 1.89 m et l'écart type de 0.86 m. Le minimum est de -0.55 m et le maximum de 3.33 m.

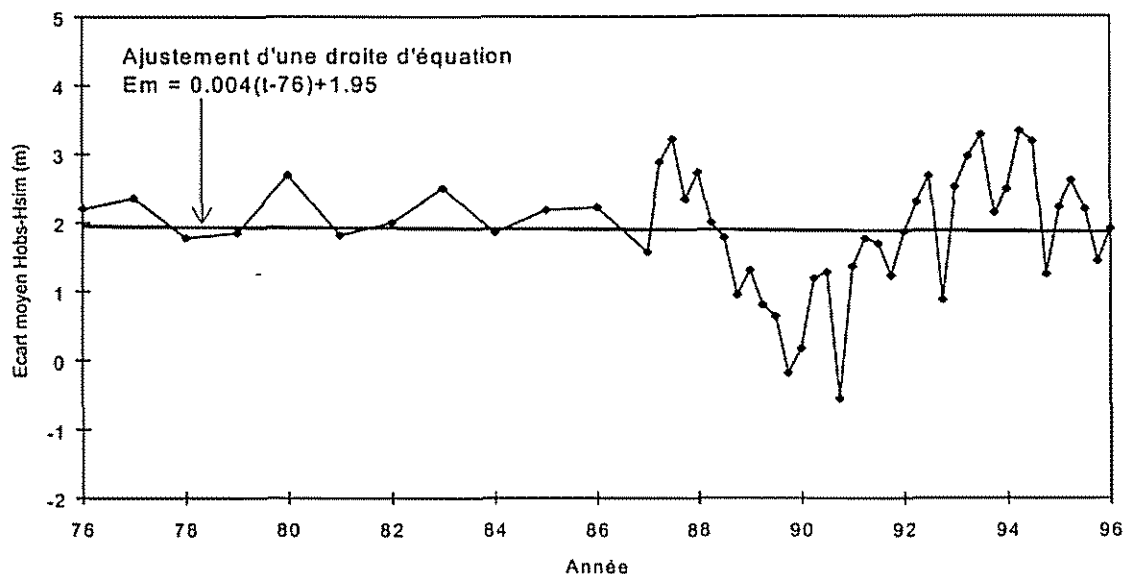
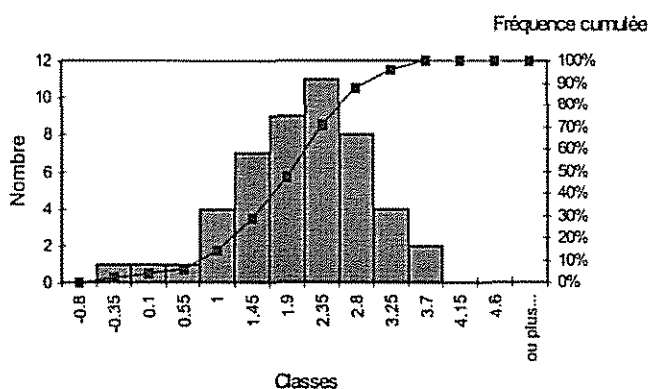


Figure 10 - Oligocène : évolution dans le temps des écarts moyens

L'existence d'une dérive peut être mise en évidence par une analyse de régression.
L'équation de la droite ajustée sur la série des écarts moyens est :

$$E = -0.004(t-76) + 1.95$$

La pente de la droite étant quasiment nulle, on peut conclure à une absence de dérive, conclusion que l'on peut renforcer par une étude statistique. En effet, on peut vérifier à l'aide de l'histogramme ci-dessous, que les écarts moyens se distribuent approximativement suivant une loi normale.



Si l'on suppose de plus que ces écarts moyens sont statistiquement indépendants, on peut calculer un intervalle de confiance pour le coefficient de régression. Pour un niveau de confiance de 95% cet intervalle est :

$$IC_{95} = [-0.05\text{m/an} , +0.04 \text{ m/an}]$$

La pente de la droite de régression reste donc faible, comprise avec une probabilité de 95% entre -5 cm/an et $+4 \text{ cm/an}$.

2.2.3. Évolution des écarts types de 1976 à 1996

Le report graphique en fonction du temps (figure 11) de l'écart type des écarts moyens montre sur la période considérée une légère tendance à la réduction des écarts types au cours du temps, de 5 cm par an environ.

Comme pour l'Eocène, la précision du modèle ne se dégrade donc pas au cours du temps.

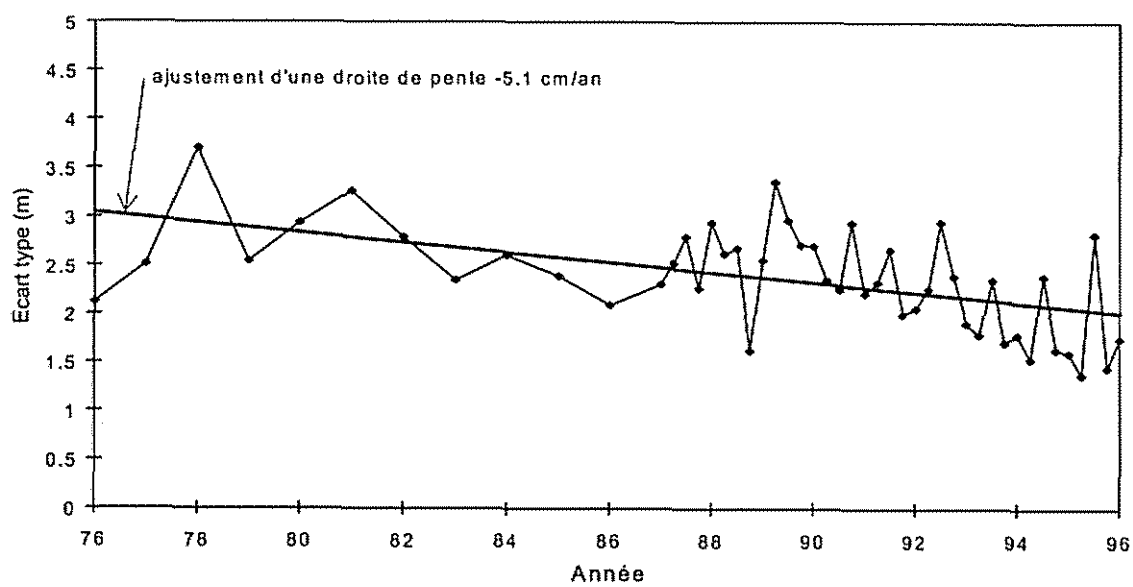


Figure 11 - Oligocène : évolution dans le temps de l'écart type des écarts moyens



Conclusion

Le modèle de gestion des eaux souterraines du nord de l'Aquitaine a été actualisé et amélioré conformément à l'avis des experts désignés par les partenaires du Schéma Directeur de gestion des eaux du département de la Gironde. En particulier le biais de calage mis en évidence par l'expertise a été résorbé.

Au terme du calage, la plupart des chroniques piézométriques disponibles pour l'Oligocène (15) et surtout pour l'Eocène (22) sont bien reproduites en phase, en amplitude et en pente, à l'exception de 2 ou 3 points situés dans les zones périphériques. Pour l'Eocène et l'Oligocène, l'analyse des écarts moyens entre valeurs observées et valeurs simulées sur l'ensemble des piézomètres, pas de temps par pas de temps, ne met pas en évidence de biais significatif : les écarts restent stables au cours du temps et la baisse des niveaux n'est ni sous estimée ni surestimée.

