

Document public



59959

Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine

Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes

Module 1 - Année 2 -
Convention 2008 - 2013

Rapport final



Préfecture de la région Aquitaine
Secrétariat général pour les affaires régionales



BRGM/RP-59959-FR
Juin 2011





Document public

Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine

Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes

Module 1 - Année 2 -
Convention 2008 - 2013

Rapport final

BRGM/RP-59959-FR

Juin 2011

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2010EAU09

M. Saltel, N. Pédron, JP. Platel, B. Bourguine, T. Gutierrez



Vérificateur :

Original signé par :

JJ. SEGUIN

Approbateur :

Original signé par :

N. LENOTRE

En l'absence de signature, et pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.



Mots clés : modélisation géologique, modélisation hydrodynamique, Bassin Nord-Aquitain, Modèle Nord-Aquitain, Bajocien, Bathonien, Callovo-Oxfordien, Kimméridgien, Tithonien, Cénomanién, Turonien, Coniacien-Santonien, Campano-Maastrichtien, Éocène moy à inf, Éocène sup, Oligocène, Burdigalien-Aquitanién, Serravallien, Plio-Quaternaire, coefficients d'emmagasinement.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : M. Saltel, N. Pédrón, JP. Platel, B. Bourguine, T. Gutierrez (2011) - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes – Module 1 – Année 2 – BRGM/RP-59 959-FR, 63 pages, 38 figures, 6 annexes.

Synthèse

Cette étude (PSP10AQI19 et PSP10AQI16) est réalisée dans le cadre de l'année 2 de la convention "Gestion des eaux souterraines en région Aquitaine" signée entre l'État, la Région Aquitaine et le BRGM pour la période 2008-20013 avec le concours financier de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et de l'Europe (fonds FEDER). Elle s'inscrit dans le prolongement des travaux de modélisation des aquifères de la région Aquitaine engagés par le Service Géologique Régional (SGR) pour élaborer des outils d'aide à la décision destinés à définir au mieux les stratégies d'exploitation des ressources en eaux souterraines de la région. Certaines nappes sont en effet très sollicitées et parfois en situation de déséquilibre avec des prélèvements excédant leur possibilité de renouvellement. Elles requièrent donc une gestion stricte afin d'en préserver leur pérennité sur le long terme.

L'objectif du présent module est de développer le Modèle Nord-Aquitain (MONA) pour obtenir une plus grande finesse de représentation des aquifères et mieux traiter ainsi les problèmes posés à une échelle plus locale, en particulier ceux soulevés par le SAGE "Nappes profondes de Gironde", mais aussi ceux qui émergent dans les départements voisins de Lot-et-Garonne et de la Dordogne.

La première partie du travail réalisé s'est focalisée sur la version actuelle du MONA (Version 3.3b) avec l'objectif d'améliorer sa représentativité : d'une part, le passage au pas de temps trimestriel sur une courte période de temps (de 2002 à 2007) a contribué à préciser les coefficients d'emmagasinement ; d'autre part l'actualisation des données d'entrée (prélèvements, flux d'infiltration) et des chroniques d'observation sur la période 2008-2009 permet de bénéficier d'un outil le plus à jour possible.

La deuxième partie est consacrée à l'actualisation du modèle géologique, infra structure du MONA, avec l'objectif de discrétiser l'ensemble des couches à la maille de 500 m de côté tout en intégrant les épontes. Ce travail, complexe à mettre en œuvre, a nécessité l'élaboration d'une base de données de référence compilant : la description de près de 3 300 forages, les données diagraphiques disponibles, la carte des affleurements (d'après le Référentiel Hydrogéologique BD-LISA) et le tracé des failles. Ce travail s'est appuyé sur les différents modèles géologiques existants (Miocène, Oligocène, Eocène, Crétacé supérieur, Cénomaniens+Jurassique) développés avec différents outils et à différentes périodes (au cours des 2 précédentes conventions régionales ou dans le cadre de projets spécifiques). La construction de cette base a permis de revenir sur la géométrie des premières couches intégrées dans le modèle (Tertiaire) qui n'ont pu bénéficier au moment de leur élaboration des outils récents utilisés pour construire la géométrie des couches du Crétacé et du Jurassique (logiciel GDM + composants Multilayer). La nouvelle géométrie sera intégrée dans le modèle en fin d'année 3. Les phases de transferts des données spatio-temporelles et de calage de la future version 4 seront traitées en année 3 et les années suivantes.



Sommaire

1. Introduction.....	9
2. Validation de la robustesse du MONA V3.3b	11
2.1. GÉNÉRALITÉS	11
2.2. MÉTHODOLOGIE	13
2.2.1. Prélèvements	13
2.2.2. Recharge	16
2.3. RÉSULTATS DES SIMULATIONS	19
2.4. ÉVALUATION SOMMAIRE DE LA SENSIBILITÉ DU MODELE	22
3. Actualisation des données spatio-temporelles.....	27
3.1. PRÉLÈVEMENTS	27
3.1.1. Collecte des données de prélèvements	27
3.1.2. Traitements des données collectées	28
3.1.3. Bilan général de l'actualisation des données de prélèvements du modèle Nord-Aquitain sur la période 2008-2009.....	29
3.2. CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES	30
3.3. CALCUL DES PRÉCIPITATIONS EFFICACES ET ACTUALISATION DES DONNÉES DE RECHARGE DES NAPPES DU MODÈLE NORD-AQUITAIN. 32	
3.3.1. Les précipitations efficaces	32
3.3.2. La recharge.....	34
3.4. RESULTATS DU MODELE ACTUALISE.....	35
3.4.1. Les chroniques de calage	35
3.4.2. Les cartes piézométriques	36
4. Actualisation de la géométrie des réservoirs du Bassin nord aquitain. 39	
4.1. OBJECTIF	39
4.2. OUTILS ET PRINCIPES.....	40
4.3. SOURCES DE DONNÉES UTILISÉES	41

4.3.1. Forages.....	41
4.3.2. Données diagraphiques	45
4.3.3. Carte géologique.....	47
4.3.4. Modèle Numérique de Terrain (MNT).....	49
4.3.5. Failles	49
4.4. CODAGE ET VALIDATION DES DONNÉES.....	50
4.4.1. Codage des données	50
4.4.2. Coupes géologiques synthétiques.....	53
5. Conclusions	59
6. Bibliographie.....	61

Liste des illustrations

Figure 1 : Géométrie du Modèle Nord-Aquitain	12
Figure 2 : Situation géographique et géologie à l’affleurement – Extension de la zone modélisée	12
Figure 3 : Carte de répartition des forages intégrés dans le modèle	14
Figure 4 : Evolution des prélèvements par département (tous usages confondus) – 3 248 ouvrages pris en compte dans le modèle MONA	14
Figure 5 : Évolutions mensuelles des prélèvements AEP sur la CUB	15
Figure 6 : Évolution des précipitations efficaces au pas de temps trimestriel	16
Figure 7 : Localisation des zones d’affleurement du modèle pour chaque nappe et source des données de pluies utilisées pour le calcul de la recharge	18
Figure 8 : Comparaison entre les niveaux observés et simulés	19
Figure 9 : Comparaison entre niveaux simulés et observés – exemple des nappes du Tertiaire	20
Figure 10 : Comparaison entre niveaux simulés et observés – exemple des nappes du Secondaire	21
Figure 11 : Analyse de sensibilité – impact du paramètre K - exemple des nappes du Tertiaire	23
Figure 12 : Analyse de sensibilité – impact du paramètre K – exemple des nappes du Secondaire	24
Figure 13 : Analyse de sensibilité – impact du paramètre Ss - exemple des nappes du Tertiaire	25
Figure 14 : Analyse de sensibilité – impact du paramètre Ss – exemple des nappes du Secondaire	26
Figure 15 : Prélèvements dans les aquifères modélisés du MONA en 2008 et 2009 (m ³ /an)	29
Figure 16 : Évolution des prélèvements dans les couches du Modèle Nord Aquitain de 1972 à 2009 tous départements confondus	30
Figure 17 : Nombre de chroniques piézométriques utilisés pour le calage	31
Figure 18 : Localisation des points d’observation	32
Figure 19 : Évolution des précipitations efficaces annuelles à la station de Mérignac (33) pour une Réserve Utile (RU) de 150 mm.	33
Figure 20 : Précipitations efficaces 2008 et 2009 calculées pour les 5 stations météorologiques prises en compte dans le MONA V3.3b-2009 (RU=150 mm)	33
Figure 21 : Moyenne et écarts-type des précipitations efficaces pour les 5 stations prises en compte dans le MONA V3.3b-2009	34
Figure 22 : Exemple de comparaison entre les niveaux observés et simulés - forage de Bouliac (Eocène moyen)	35

Figure 23 : Niveaux piézométriques simulés par le modèle Nord-Aquitain version MONA V3.3b-2009 dans l'aquifère « Eocène moyen » pour les années 2008 et 2009.....	37
Figure 24 : Modèle Estuaire - Succession stratigraphique des formations modélisées.....	42
Figure 25 : Modèle Estuaire - Visualisation 3D	42
Figure 26 : Modèle Oligocène - Succession stratigraphique des formations modélisées.....	43
Figure 27 : Modèle Oligocène - Visualisation 3D	43
Figure 28 : Carte géologique simplifiée du Triangle landais	44
Figure 29 : Modèle Plio-Quaternaire - Succession stratigraphique des formations modélisées.....	44
Figure 30 : Codification des réservoirs à partir de la corrélation diagraphique	46
Figure 31 : Affleurements des différents réservoirs considérés dans le modèle nord-aquitain cartographiés à partir des travaux du Référentiel Hydrogéologique BDLISA	48
Figure 32 : Vue 3D du MNT ré-échantillonné au pas de 500 m.....	49
Figure 33 : Pile stratigraphique des formations modélisés.....	50
Figure 34 : Codification des forages – Illustration de la problématique de concaténation des données	52
Figure 35 : Coupe hydrogéologique schématique dans les formations tertiaires - Coupe A (SW-NE).....	54
Figure 36 : Coupe hydrogéologique schématique dans les formations tertiaires - Coupe B (SW-NE).....	55
Figure 37 : Coupe hydrogéologique schématique dans les formations tertiaires - Coupe C (SW-NE).....	56
Figure 38 : Coupe hydrogéologique schématique dans les formations tertiaires - Coupe D (N-NW - S-SE)	57

Liste des annexes

Annexe 1 Historique du Modèle Nord Aquitain	65
Annexe 2 Extension des aquifères modélisés dans la version 3 du MONA	69
Annexe 3 Coefficients d'emmagasinement issus du calage au pas de temps trimestriel.....	87
Annexe 4 Chroniques de calage du modèle au pas de temps trimestriel	103
Annexe 5 Actualisation des chroniques de calage sur la période 2008-2009.....	125
Annexe 6 Description des modèles géologiques précédents.....	145

1. Introduction

Cette étude est réalisée dans le cadre de l'année 2 de la convention "Gestion des eaux souterraines en région Aquitaine" signée entre l'État, la Région Aquitaine et le BRGM pour la période 2008-2013 avec le concours financier de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et de l'Europe (fonds FEDER). Elle correspond au module 1 de cette convention qui en compte 6.

Ce travail s'inscrit dans le prolongement des travaux de modélisation des aquifères de la région Aquitaine engagés par le Service Géologique Régional (SGR) d'Aquitaine depuis plus de 15 ans pour disposer d'outils de gestion et d'aide à la décision et définir ainsi au mieux des stratégies d'exploitation des ressources souterraines de la région. Certaines nappes sont en effet très sollicitées et mises en situation de déséquilibre.

Le **MO**dèle Nord-Aquitain (**MONA**), initialement construit pour apporter des réponses à la problématique de l'effondrement des niveaux de la nappe de l'Eocène en Gironde, est le fruit d'un long développement, qui a commencé il y a plus de 15 ans [(Braneyre, 1993) ; (Braneyre, et al., 1993) ; (Amraoui, et al., 1998) ; (Amraoui, et al., 1999) ; (Seguin, 1999a) ; (Seguin, 1999b) ; (Pédron, et al., 2003b) ; (Pédron, et al., 2005) ; (Pédron, et al., 2006) ; (Pédron, et al., 2006) ; (Pédron, et al., 2008)]. Les différentes évolutions qui ont été apportées au modèle, notamment dans le cadre des différentes conventions « Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine », ont abouti à l'élaboration de plusieurs versions décrites en annexe 1.

Initialement composé de 3 couches (Oligocène, Eocène et Crétacé supérieur) et à mailles carrées de 5 km de côté, ce modèle (**MONA V3.3b-2007**) intègre aujourd'hui 15 couches (du Plio-Quaternaire au Jurassique moyen) à mailles carrées de 2 km de côté et couvre le sud de la Charente, la moitié sud-ouest de la Dordogne, le nord-ouest du Lot-et-Garonne, le nord des Landes et la totalité du département de la Gironde.

Il a notamment été utilisé dans le cadre du Schéma Directeur de Gestion de la Ressource en Eau de la Gironde puis du SAGE « nappes profondes » de Gironde, pour chiffrer les économies d'eau à réaliser et proposer des réductions de prélèvements ou des ressources de substitution. Plus ponctuellement, il a permis de simuler l'impact sur la ressource de nouveaux champs captant. Les dernières utilisations ont permis d'apporter des éléments techniques pour appuyer la définition de volumes prélevables dans toutes les nappes captives du nord du Bassin aquitain (Gomez, et al., 2010) et de réaliser des simulations prospectives dans le cadre de la révision du SAGE "Nappes profondes de Gironde".

Le présent module de la Convention a pour objectif le développement du Modèle Nord-Aquitain pour obtenir une plus grande finesse de représentation des aquifères et mieux traiter ainsi les problèmes posés à une échelle plus locale : ceux soulevés par le SAGE "Nappes profondes de Gironde", mais aussi ceux qui émergent dans les départements voisins de Lot-et-Garonne et de la Dordogne.

Le travail réalisé au cours de cette année d'étude a consisté à valider la robustesse du MONA dans sa version 3.3b en réalisant une transcription du modèle du pas de temps annuel au pas de temps trimestriel de manière à mieux préciser les coefficients d'emmagasinement. Cette démarche s'inscrit dans une optique d'amélioration continue pour pouvoir disposer d'un modèle de plus en plus performant. Elle s'accompagne également de la volonté de bénéficier d'un outil le plus à jour possible. C'est pourquoi, les données d'entrées (prélèvements, flux d'infiltration) et les chroniques d'observation ont été actualisées sur la période 2008-2009.

En parallèle au perfectionnement de la version 3 du MONA, ce module a permis d'initier l'élaboration de la **version 4** du modèle afin d'améliorer encore sa représentativité.

En effet, les problématiques émergentes dans les départements de Dordogne et de Lot-et-Garonne notamment, qui disposent des grandes zones d'alimentation de ces aquifères, nécessitent d'affiner le maillage (500 m x 500 m). Ceci permettra de mieux prendre en compte les zones d'affleurements et les émergences (matérialisées par des "zones de débordement" dans le modèle. Les bilans des flux seront ainsi affinés.

Par ailleurs, le modèle (de la V1 à la V3) a été construit en pseudo-3D. Les épontes n'étant pas explicitement prises en compte comme couches de calcul, le modèle ne peut donc pas être utilisé pour le moment sur les problématiques de transport (zone minéralisée de l'éocène girondin par exemple) ou de thermique (géothermie). L'intégration des épontes au modèle permettra de pallier ces manques dans la version 4.

Toutes ces modifications nécessiteront un recalage complet de l'outil et un travail sur plusieurs années de la convention régionale. Pendant cette période, le MONA V3.3b restera pleinement opérationnel.

2. Validation de la robustesse du **MONA V3.3b**

Le passage du modèle du pas de temps annuel au pas de temps trimestriel a pour objectif de valider la robustesse du modèle dans sa version 3.3b. Cette discrétisation temporelle plus fine permet de retranscrire les variations saisonnières dans les différentes nappes modélisées et ainsi de mieux préciser les coefficients d'emmagasinement introduits dans la modèle.

A l'issue de la transposition au pas de temps trimestriel, une analyse de sensibilité sommaire du modèle sur les principaux paramètres (perméabilités et emmagasinement) a été effectuée.

2.1. GÉNÉRALITÉS

Le modèle construit utilise le code de calcul **MARTHE** (Modélisation d'Aquifères par maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements) développé par le BRGM (actuellement version 4.3) via l'interface **WinMarthe** version 7 [(Thiéry, 1990) ; (Thiéry, 2006) ; (Thiéry, 2010)]. Le schéma de résolution utilise les différences finies. Les couches du modèle sont discrétisées en mailles parallélépipédiques dont les faces supérieures et inférieures correspondent respectivement au toit et au mur de la formation considérée. Le maillage du MONA est régulier (mailles carrés de 2 km de côté). Le modèle comprend au total 148 colonnes, 128 lignes et 15 couches soit un total de 284 160 mailles dont 66 973 servent au calcul des écoulements. MONA est un modèle « pseudo 3D », c'est-à-dire que les épontes ne figurent pas explicitement en tant que couches de calcul. Les charges hydrauliques n'y sont donc pas calculées. Toutefois, bien que les termes de stockages-déstockages ne soient pas pris en compte dans les épontes, les échanges verticaux entre couches aquifères sont restitués.

Dans sa version actuelle (**MONA V3.3b-2007**) le modèle simule les écoulements au sein de 15 aquifères (Figure 1) : le Plio-Quaternaire, le Langhien-Serravallien (Helvétien), l'Aquitaniens-Burdigalien, l'Oligocène, l'Eocène supérieur, l'Eocène moyen, l'Eocène inférieur, le Campano-Maastrichtien, le Coniacien-Santonien, le Turonien, le Cénomaniens, le Tithonien, le Kimméridgien, le Bathonien-Callovo-Oxfordien et le Bajociens.

Le domaine modélisé couvre la partie nord du Bassin aquitain (Figure 2) : la totalité du département de la Gironde, une grande partie de celui des Landes (pour les 4 premières couches principalement), le Lot-et-Garonne, l'essentiel (hormis le nord-est) de celui de la Dordogne, le nord du Gers et du Tarn et Garonne, l'ouest du Lot, le sud de la Charente et de la Charente maritime. Les limites de chacun des aquifères sont reportées sur les illustrations de l'annexe 2.

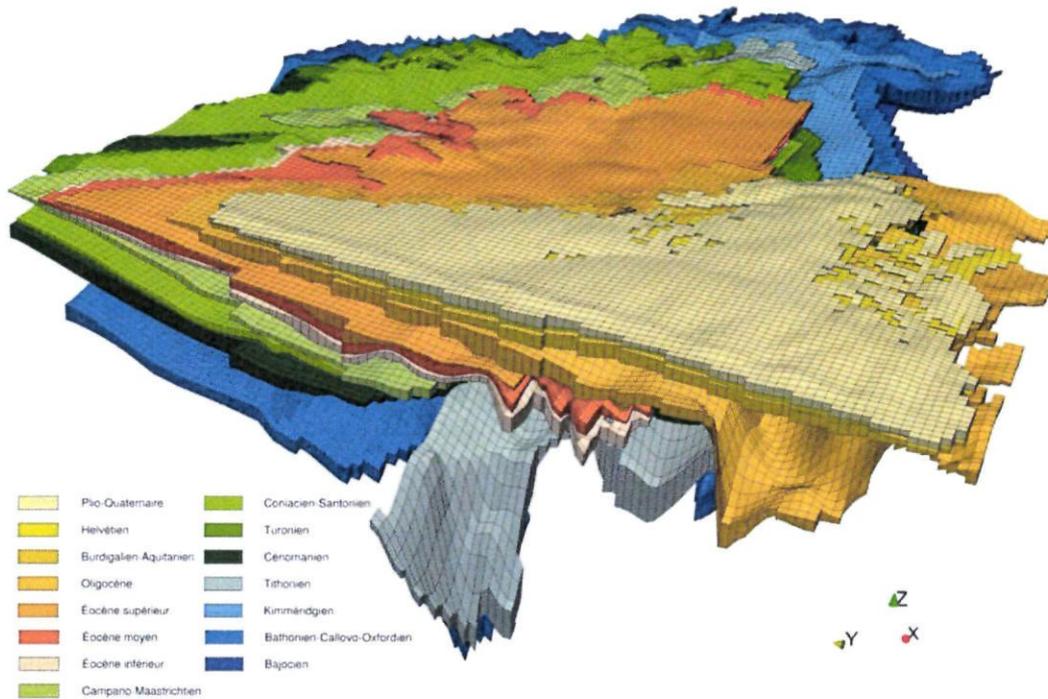


Figure 1 : Géométrie du Modèle Nord-Aquitain

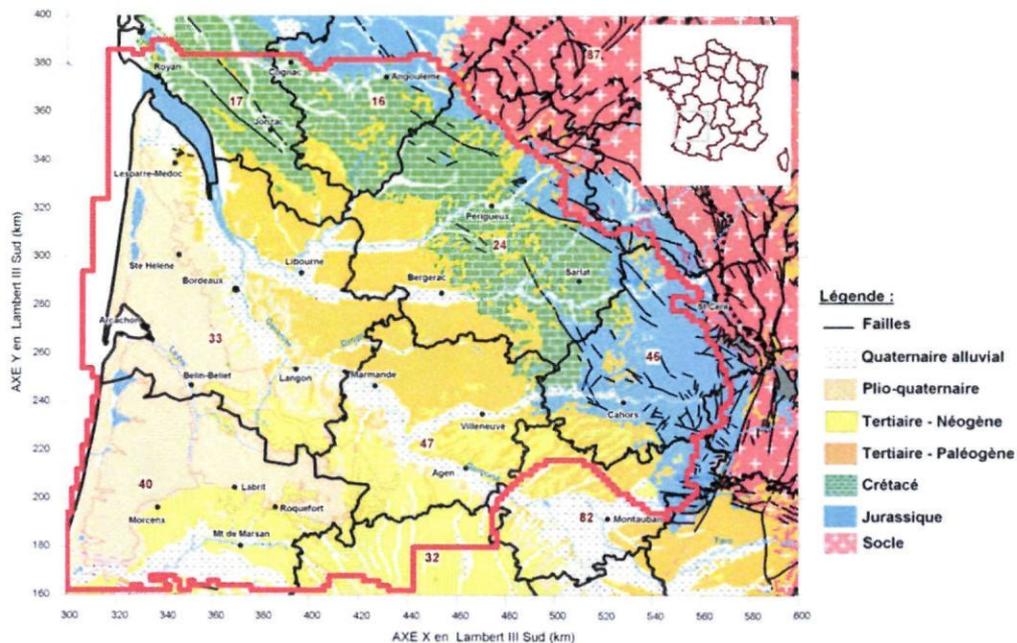


Figure 2 : Situation géographique et géologie à l'affleurement – Extension de la zone modélisée

2.2. MÉTHODOLOGIE

En régime transitoire, le temps est découpé en un ensemble de périodes. D'un pas de temps au suivant, certains paramètres vont varier : recharge, prélèvements,... La modélisation en régime transitoire s'effectue sur une période totale de 36 ans, de 1972 à 2007 de manière à partir d'un état initial le moins influencé possible.

Par ailleurs, un découpage de la durée de simulation selon les variations saisonnières, représentant les périodes de « hautes eaux » et de « basses eaux », a été réalisé sur une période de 6 ans (2002–2007) avec l'objectif de mieux cerner le champ des coefficients d'emmagasinement. Cette période a été choisie car elle est la plus riche en données.

Le modèle fonctionnera donc au pas de temps annuel de 1972 à 2001 puis au pas de temps trimestriel de 2002 à 2007. Ce découpage nécessite de répartir plus finement les prélèvements selon les usages (alimentation en eau potable et irrigation notamment) et de tenir compte des pics de consommation observés.

Il en va de même en ce qui concerne la recharge au niveau des affleurements qui s'effectue principalement entre octobre et mars.

2.2.1. Prélèvements

Les forages intégrés dans le modèle (Figure 3) sont issus d'une base dédiée ayant fait l'objet d'une actualisation récente (Gomez, et al., 2010). Au total, 3 251 ouvrages sollicitent les 14 nappes modélisées (hors Plio-Quaternaire) qui se répartissent ainsi : 3 forages en Tarn-et-Garonne (82), 85 en Lot-et-Garonne (47), 536 dans les Landes (40), 1409 en Gironde (33), 400 en Dordogne (24), 687 en Charente-Maritime (17) et 131 en Charente (16).

Les volumes prélevés en 2007 étaient d'environ **292 millions de m³** (Figure 4). Le volume maximum enregistré correspond à l'année 2003 avec 323 millions de m³. Depuis lors, la tendance générale est à la baisse.

Remarque : *sur les 3248 ouvrages considérés comme entrant dans les limites du MONA, 69 ouvrages captant les aquifères modélisés, situés très proches des limites du MONA mais à l'extérieur du maillage, ont été légèrement déplacés afin d'être pris en compte. En effet, la précision du maillage (2 km x 2 km) ne permet pas de retranscrire scrupuleusement les limites d'extension des réservoirs. Il arrive donc que certains forages se trouvent en dehors du maillage du modèle. Tous ces ouvrages sont situés au nord de la zone d'étude et captent le Campanien (49), le Coniacien (2) et le Turonien (18).*

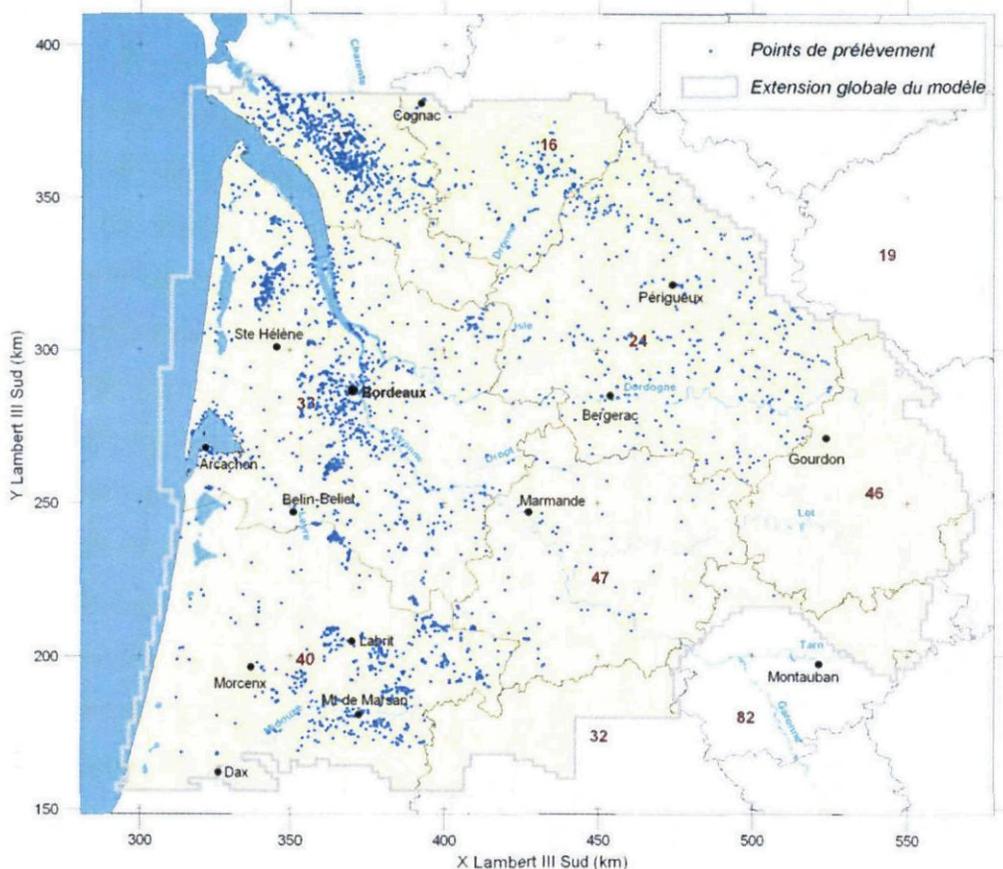


Figure 3 : Carte de répartition des forages intégrés dans le modèle

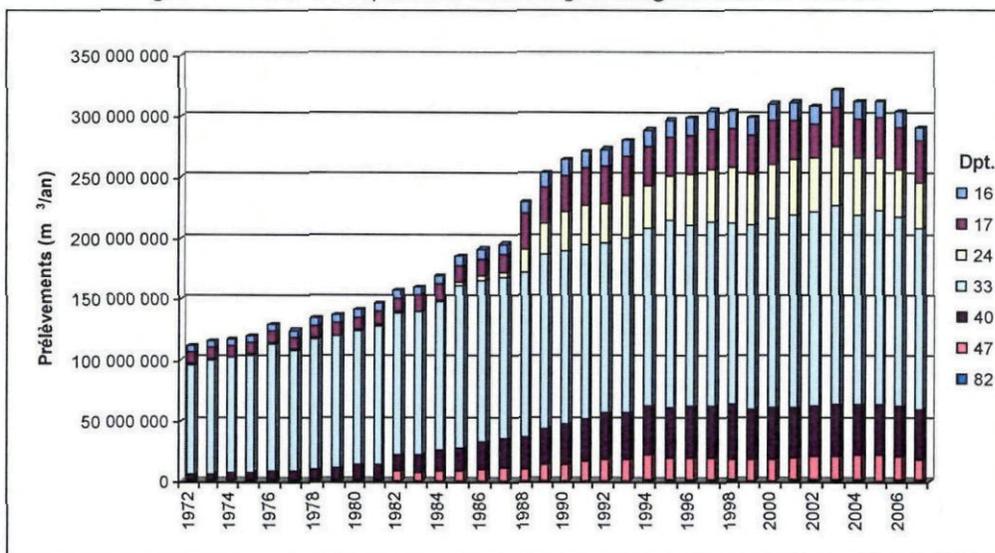


Figure 4 : Evolution des prélèvements par département (tous usages confondus) – 3 248 ouvrages pris en compte dans le modèle MONA

Les valeurs de prélèvement annuel ont été intégrées dans le modèle sur la période 1972-2001. Pour la période allant de 2002 à 2007, les valeurs annuelles ont été ajustées pour s'adapter au pas de temps trimestriel. La distribution des débits d'exploitation a été définie différemment selon les usages. Ainsi, pour l'alimentation en eau potable, les valeurs prises en compte ont été déterminées à partir des variations observées sur cette période au droit de la CUB (Figure 5).

Cette approche schématique traduit uniquement les grandes tendances des variations saisonnières de la consommation en eau. Cependant elle ne permet pas de retranscrire les différences existantes entre les agglomérations (ex : Bordeaux) et les stations balnéaires (ex : Arcachon) dont l'activité touristique influence grandement la consommation sur la période estivale. De même les différences de consommation d'un département à un autre n'ont pu être représentées faute de données.

Les prélèvements agricoles ont été introduits au 3^{ème} trimestre (mais la période d'irrigation peut s'étaler de fin mai à début septembre). Les prélèvements industriels, ont été quant à eux considérés comme constants tout au long de l'année.

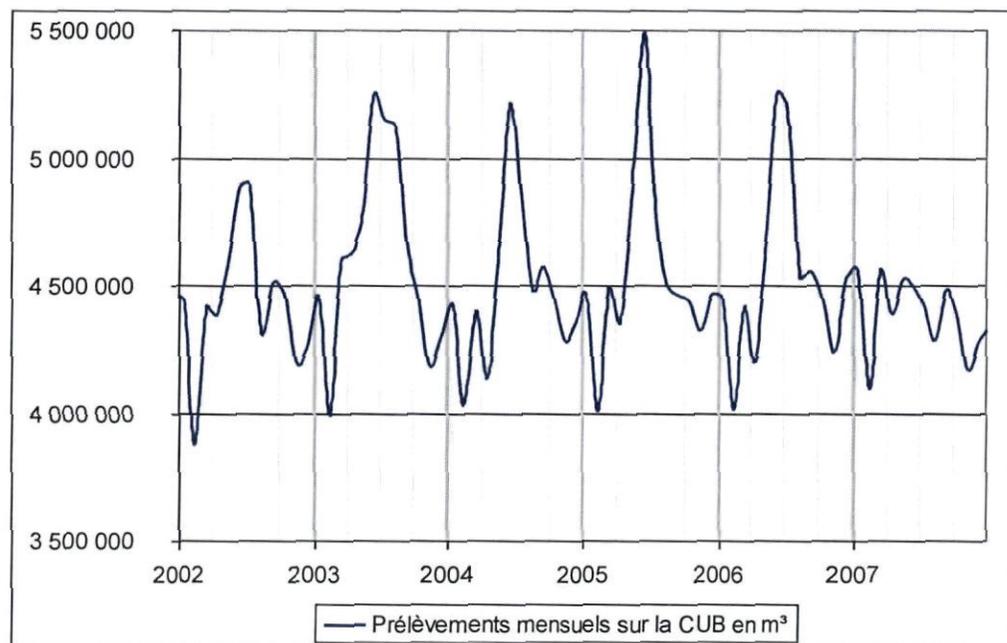


Figure 5 : Évolutions mensuelles des prélèvements AEP sur la CUB

2.2.2. Recharge

La recharge des nappes par infiltration est une inconnue et constitue donc un paramètre de calage. En première approche, les pluies efficaces (recharge plus ruissellement) sont calculées à l'aide d'un bilan hydrologique classique qui se présente, par pas de temps, sous la forme :

$$P - ETP - (R + I_p) = [\Delta S]_{-}^0 \quad \text{avec } R + I_p = P_{eff}$$

- où
- P = Précipitations
 - ETP = Evapotranspiration potentielle
 - R = Ruissellement
 - I_p = Infiltration en profondeur
 - ΔS = Variation de stock d'eau dans le sol sur une épaisseur Δz de sol et durant le pas de temps

Les données météorologiques (P et ETP) sont collectées régulièrement auprès de la *Division Climatologique Interrégionale Sud-Ouest* de Météo France pour les stations de Mérignac en Gironde, de Mont-de-Marsan dans les Landes, de Cognac (Château-Bernard) en Charente, de Gourdon dans le Lot et de Bergerac en Dordogne. Pour réaliser ces bilans, le sol est assimilé à un réservoir d'une capacité maximale en eau donnée (classiquement appelée « réserve utile »). Des valeurs de réserve utile (RU) de 100 et de 150 mm ont été retenues pour les calculs de pluies efficaces. La première correspond à un compromis territorial à l'échelle de la zone d'étude tandis que la seconde (150 mm) constitue une fourchette haute de la réserve utile du sol permettant de borner le travail de modélisation. Les bilans par station météorologique sont réalisés au pas de temps décadaire. Les valeurs ont ensuite été agrégées au pas de temps annuel pour la période 1972-2001 et au pas de temps trimestriel sur la période 2002-2007 (Figure 6). Ce découpage plus fin permet de mieux répartir la recharge au cours du temps. En effet les observations montrent que les précipitations efficaces sont les plus importantes entre octobre et mars. En dehors de ces périodes, la recharge peut être considérée comme nulle.

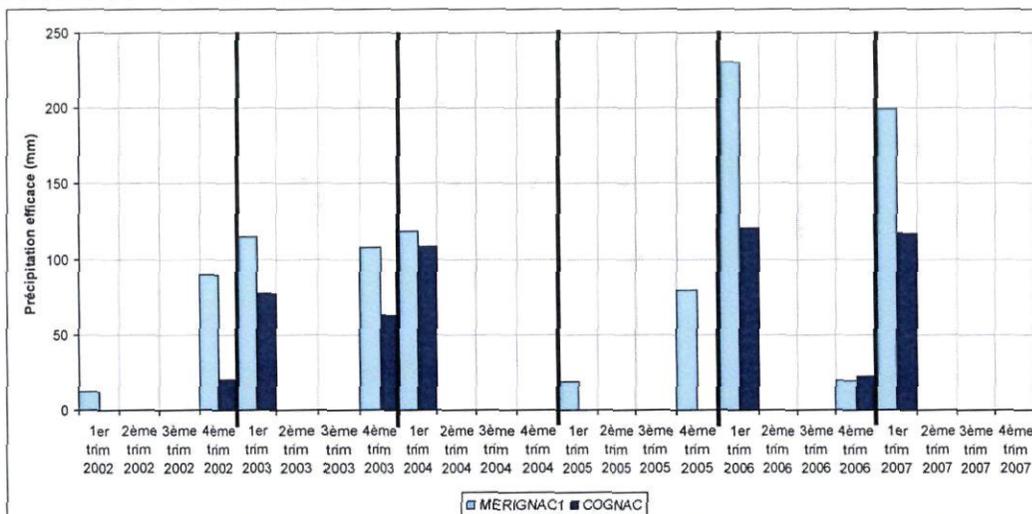


Figure 6 : Évolution des précipitations efficaces au pas de temps trimestriel

A noter que les bilans réalisés ici ne permettent pas de différencier l'infiltration du ruissellement. Ce dernier est en effet un paramètre très variable et donc difficilement estimable. Les écoulements calculés (c'est-à-dire les pluies efficaces) sont donc généralement supérieurs à l'alimentation réelle des nappes au droit des affleurements mais permettent cependant d'avoir une borne supérieure de l'infiltration réelle. Ils interviennent dans l'estimation a priori d'une recharge qui est calculée à l'aide d'une "loi" empirique. Les 5 stations météorologiques considérées (Mérignac, Bergerac, Gourdon, Cognac et Mont de Marsan) sont utilisées pour le calcul de la recharge dans les mailles d'affleurement. Elles ont été choisies pour leur représentativité. Elles sont bien réparties sur le territoire modélisé et présentent des chroniques de pluies et d'ETP sur plus de 35 ans qui peuvent donc être utilisées pour le calcul de la recharge du modèle sur chaque pas de temps depuis l'état initial (1972). Le Plio-Quaternaire constitue l'aquifère le plus superficiel du modèle Nord-Aquitain et affleure sur toute la partie ouest de la zone d'étude. L'attribution des flux d'infiltration s'y fait donc par grandes plages (Pédron, et al., 2001). Par contre, les zones d'affleurement des aquifères plus profonds sont peu nombreuses et souvent localisées. Il peut y avoir des écarts importants entre la superficie réelle des affleurements et la superficie des mailles correspondantes (4 km²), ce qui impose, de distribuer le flux d'infiltration dans les mailles en fonction de la superficie réelle des affleurements. Les superficies des affleurements dans les mailles de la grille du modèle de 2 km de côté ont été entièrement recalculées et regroupées en classes (0 à 10%, 10 à 20%...) pour les couches 1 à 7 (jusqu'à l'Eocène inférieur) en année 1 du module 4 de la convention régionale 2002-2008 (Pédron, et al., 2003b) et pour l'ensemble des nappes du Crétacé et du Jurassique au cours l'année 4 (Pédron, et al., 2008). Chaque maille de recharge directe a ensuite été rattachée (en utilisant les polygones de Thiessen) à une station météorologique en fonction de sa localisation géographique (Figure 7) de façon à moduler la recharge calculée en fonction de la variabilité spatiale des pluies efficaces.

Chaque maille d'affleurement du modèle est affectée d'un numéro de zone de recharge (ou météorologique [ZMTO] dans le logiciel MARTHE) qui dépend de la couche considérée, de la station météorologique à laquelle elle est rattachée et de la classe correspondant au rapport de la superficie réelle de l'affleurement sur la superficie totale de la maille (4 km²). La nomenclature de codification des mailles est décrite ci-dessous :

14 1 9

- 14 : numéro de la couche du modèle en l'occurrence le Bathonien-Callovo-Oxfordien
- 1 : numéro de la station météorologique
- 9 : superficie réelle de l'affleurement dans la maille comprise entre 90 et 100% (Classe 9)

Cette numérotation permet d'ajouter des couches ou de prendre en compte des stations météorologiques supplémentaires sans modifier l'existant.

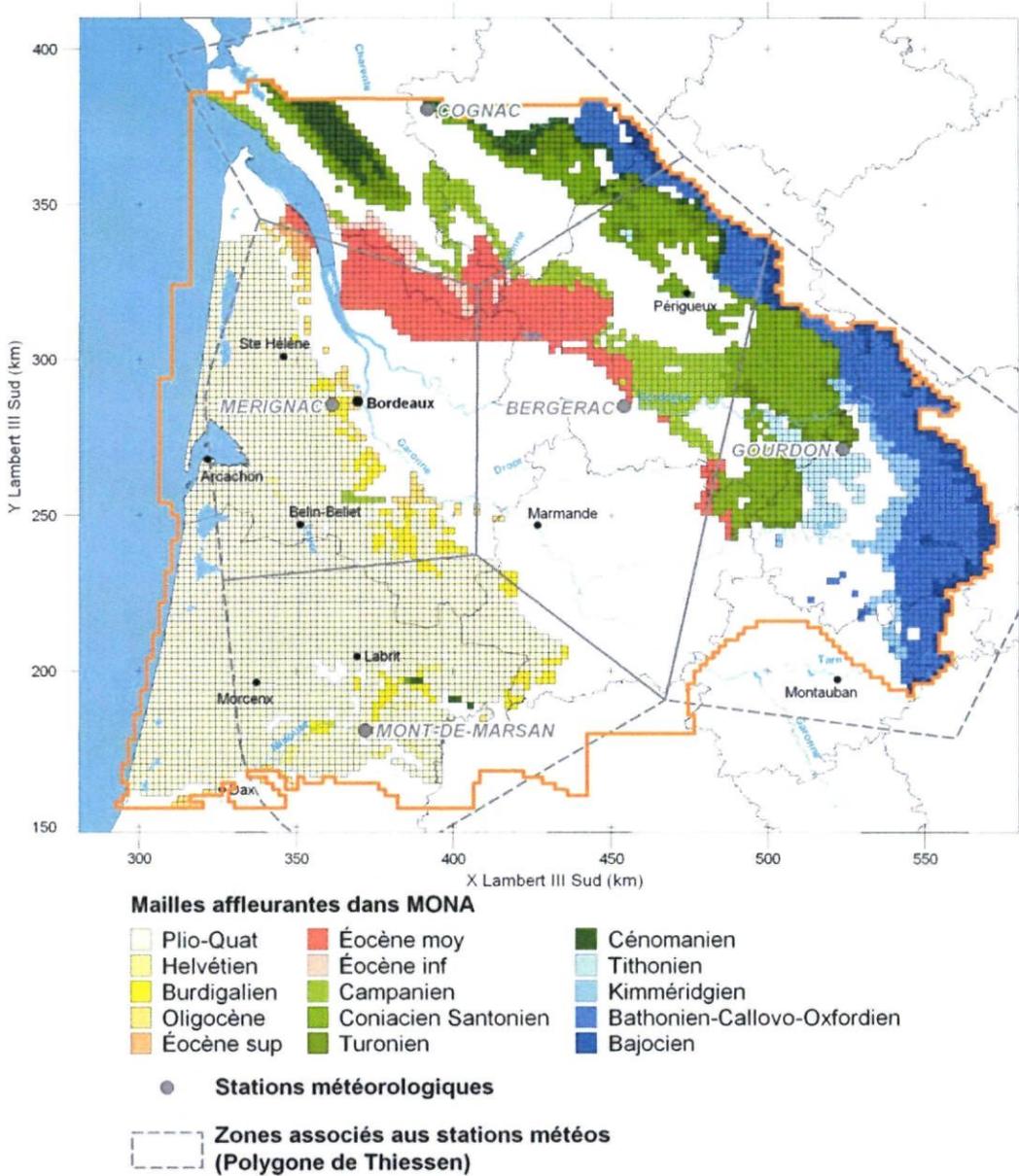
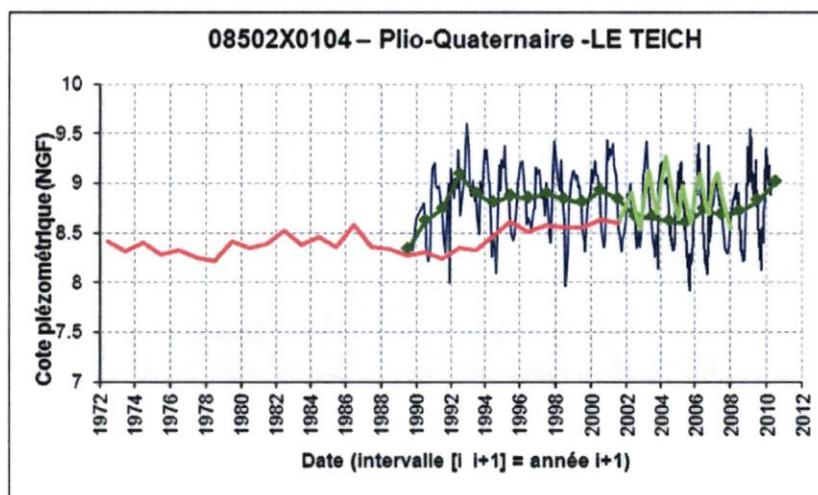


Figure 7 : Localisation des zones d'affleurement du modèle pour chaque nappe et source des données de pluies utilisées pour le calcul de la recharge

2.3. RÉSULTATS DES SIMULATIONS

Les simulations réalisées ont permis de confronter, au pas de temps trimestriel, les variations mesurées au droit des piézomètres de contrôle et les résultats du modèle. Cette comparaison a principalement été mise en œuvre sur les chroniques d'observations les plus fines. En effet, certaines séries ne comportent pas suffisamment de mesures pour retranscrire les variations saisonnières de la nappe.

La transcription du modèle au pas de temps trimestriel a permis de valider et de consolider les valeurs de coefficient d'emmagasinement en les ajustant à la marge pour restituer au mieux les fluctuations observées. Les couches incorporées le plus récemment (Campanien à Bajocien) n'avaient pas fait l'objet d'un calage au pas de temps trimestriel. Ce travail a donc été l'occasion d'affiner au mieux, en l'état actuel des connaissances et des caractéristiques du modèle, la définition de ce paramètre. Le champ des coefficients d'emmagasinement issu de ce calage est présenté en annexe 3. Les graphiques de comparaison entre les chroniques piézométriques mesurées et les charges calculées par le modèle sont présentés en annexe 4. L'exemple présenté en Figure 8 illustre le mode de représentation graphique adopté, avec en bleu les mesures brutes observées, en vert la moyenne annuelle des valeurs observées et en rouge les charges calculées par le modèle au droit du piézomètre. L'ajustement apparaît visuellement satisfaisant (Figure 9 et Figure 10) sur la grande majorité des chroniques de calage. La plupart des points sont reproduits convenablement en niveaux, en phase, en pente et en amplitude de variations. Il ressort néanmoins que le calage dans les nappes du secondaire est un peu moins abouti que celui des nappes du tertiaire du fait de leur incorporation plus récente.



- Niveaux piézométriques observés
- Moyennes annuelles des niveaux piézométriques observés
- Niveaux piézométriques annuels simulés sur la période 1972-2001
- Niveaux piézométriques trimestriels simulés sur la période 2002-2007

Figure 8 : Comparaison entre les niveaux observés et simulés

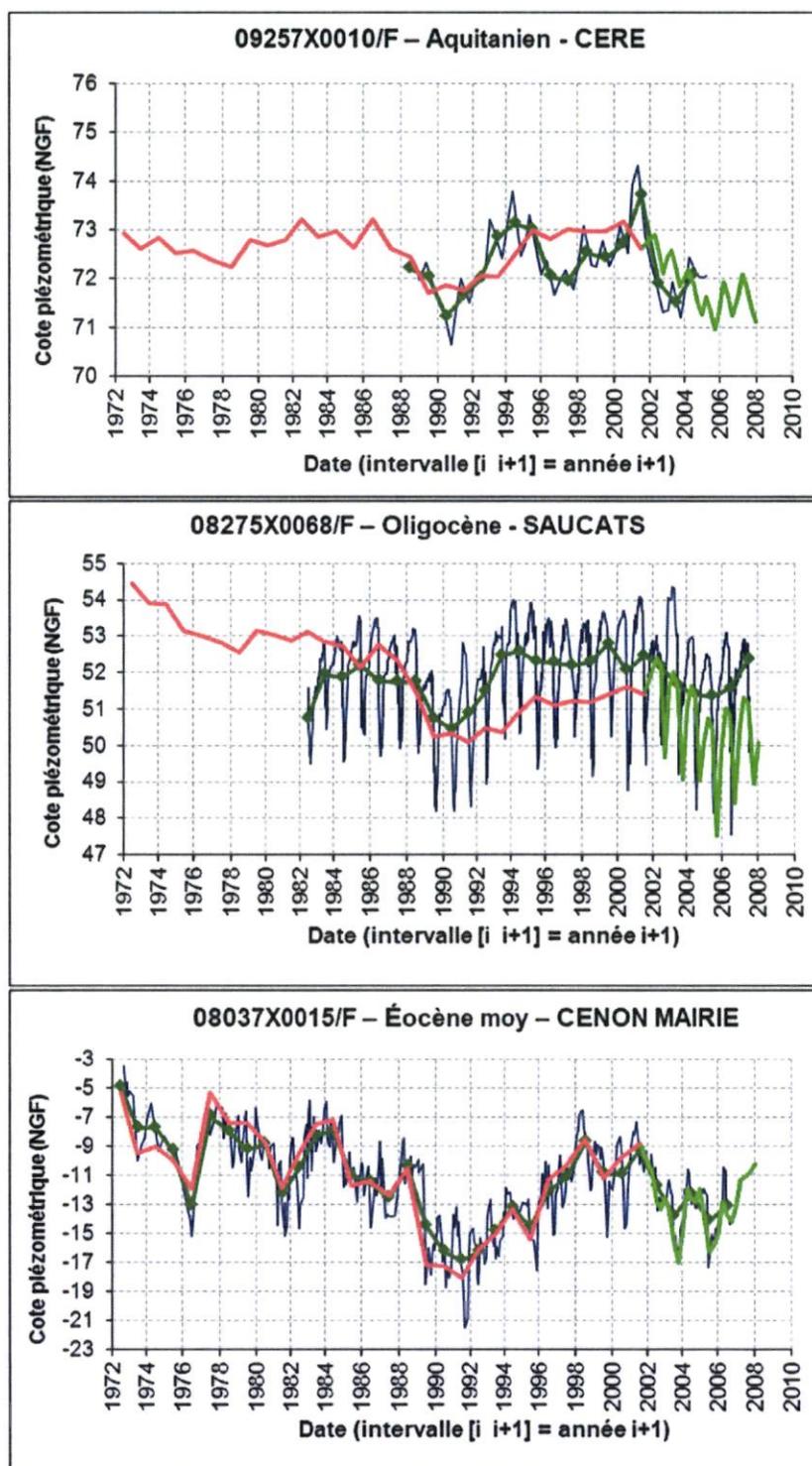


Figure 9 : Comparaison entre niveaux simulés et observés – exemple des nappes du Tertiaire

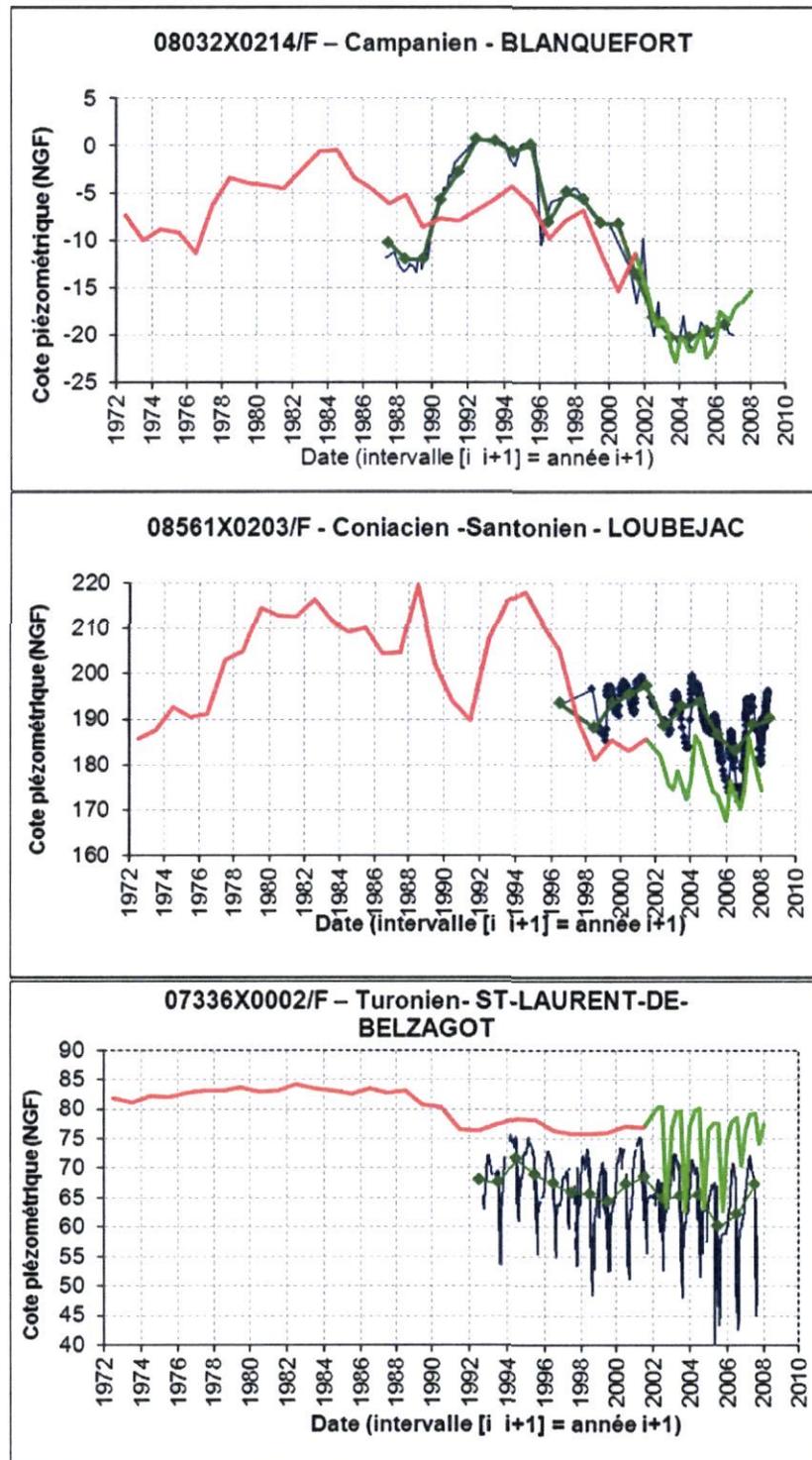


Figure 10 : Comparaison entre niveaux simulés et observés – exemple des nappes du Secondaire

2.4. ÉVALUATION SOMMAIRE DE LA SENSIBILITÉ DU MODELE

Les analyses de sensibilité décrites dans ce chapitre ont été réalisées sur l'ensemble des 15 couches du modèle, l'objectif étant d'apprécier globalement l'impact de modifications de paramètres sur les résultats obtenus (Il ne s'agit donc pas d'étudier finement l'impact de variations locales des paramètres).

L'analyse a été menée sur les paramètres hydrodynamiques (perméabilité **K** et coefficient d'emmagasinement spécifique **Ss**) des aquifères captifs du modèle en faisant varier l'ensemble des valeurs initiales en les multipliant par une valeur donnée (0.2, 0.5, 2 et 5). A noter que selon la valeur initiale du paramètre considéré, les variations appliquées peuvent être importantes.

Les graphiques présentés dans les pages 23 et 24 (Figure 11 et Figure 12) montrent les résultats des analyses effectuées sur la perméabilité **K**. Vu les différences de charges induites par les modifications appliquées, ce paramètre a donc une grande influence sur les résultats. En effet, selon la valeur initiale de la perméabilité, les diminutions ou les augmentations mises en œuvre aboutissent à des variations de charges de l'ordre de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres.

A noter que plus **K** est petit et plus les variations saisonnières sont marquées. Diminuer la perméabilité en gardant le coefficient d'emmagasinement **S** constant revient à diminuer la diffusivité qui régit les propagations d'influence dans l'aquifère.

Les résultats de l'analyse de sensibilité réalisée sur le coefficient d'emmagasinement spécifique **Ss** sont illustrés sur les graphiques pages 25 et 26 (Figure 12 et Figure 13). Les variations appliquées modifient peu les valeurs de charges simulées en comparaison des résultats observées pour l'analyse effectuée sur les valeurs de **K**.

Néanmoins, il apparaît que le coefficient d'emmagasinement spécifique influence l'amplitude des variations saisonnières sur les pas de temps trimestriels.

In fine, le modèle s'avère beaucoup plus sensible aux variations de la perméabilité **K** qu'aux variations de coefficients d'emmagasinement spécifique **Ss**. Néanmoins pour traduire au mieux les variations saisonnières observées, il est indispensable de définir au plus juste la diffusivité du réservoir en ajustant à la fois la perméabilité et le coefficient d'emmagasinement spécifique.

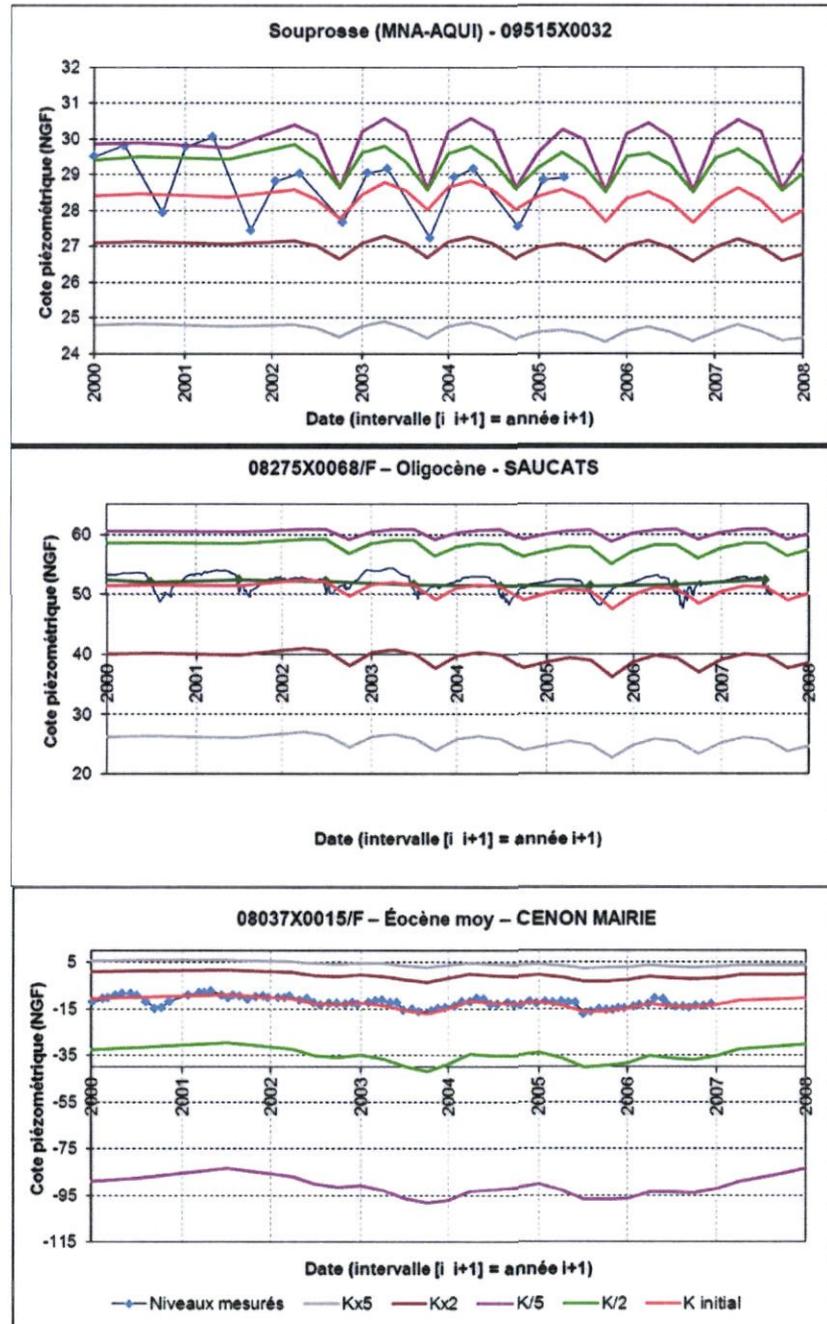


Figure 11 : Analyse de sensibilité – impact du paramètre K - exemple des nappes du Tertiaire

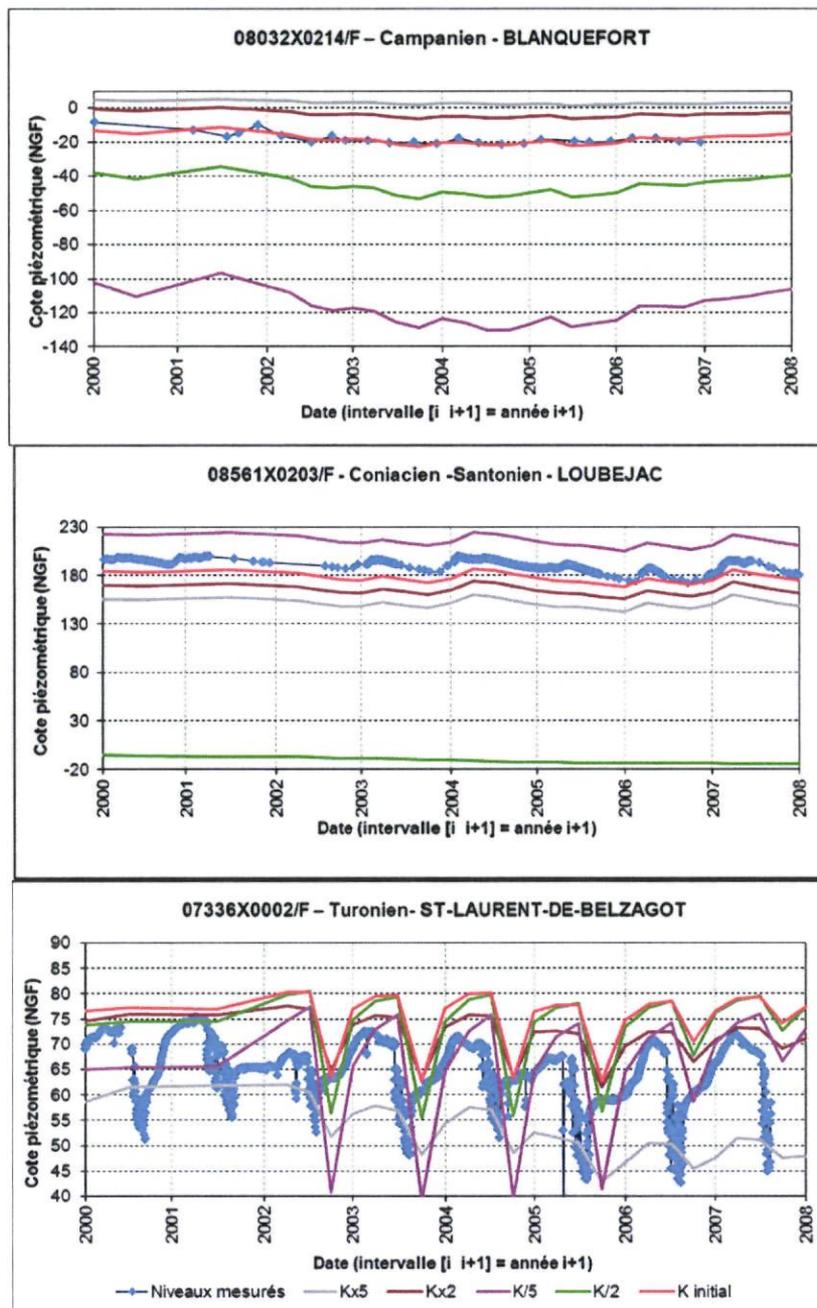


Figure 12 : Analyse de sensibilité – impact du paramètre K – exemple des nappes du Secondaire

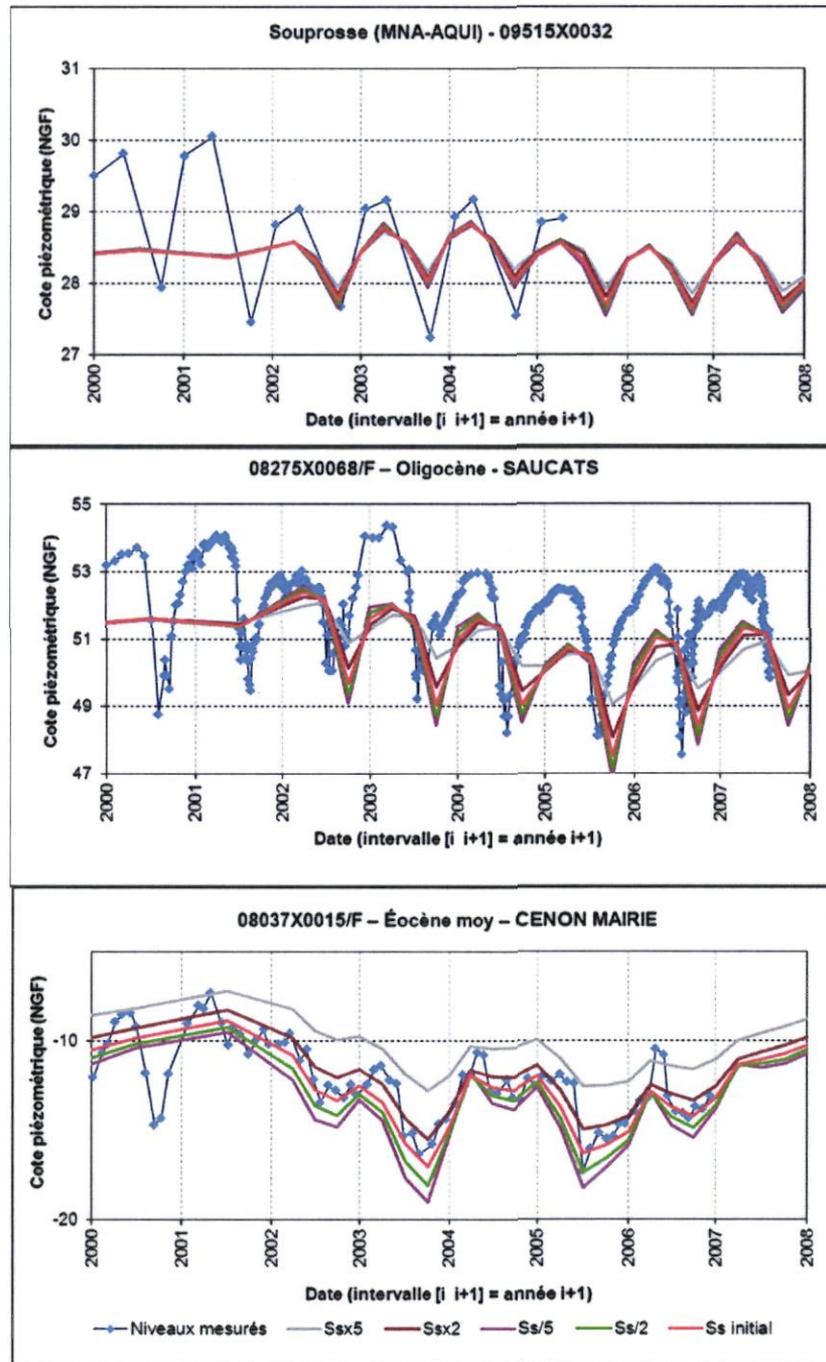


Figure 13 : Analyse de sensibilité – impact du paramètre Ss - exemple des nappes du Tertiaire

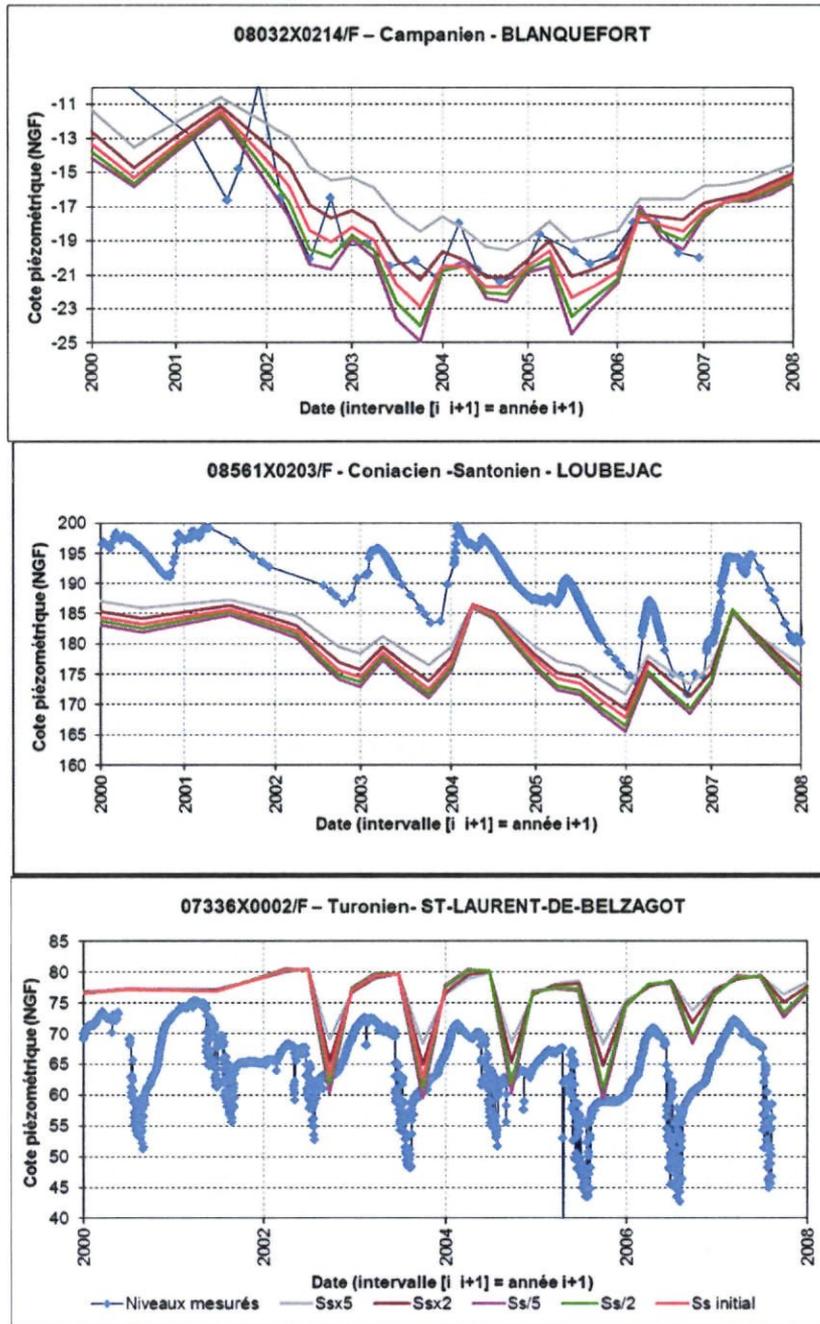


Figure 14 : Analyse de sensibilité – impact du paramètre Ss – exemple des nappes du Secondaire

3. Actualisation des données spatio-temporelles

Les phases d'actualisation des données réalisées successivement en 1999, 2001, 2005 et 2010 ont servi de période de validation du modèle et ont permis de contrôler sa robustesse. La version actuelle du Modèle Nord-Aquitain (MONA V3.3b-2007) simule les écoulements au sein de quinze entités hydrogéologiques distinctes sur la période 1972-2007. Le recueil des données d'entrée (prélèvements, flux d'infiltration) et des chroniques d'observation sur la période 2008-2009 permet de bénéficier d'un outil le plus à jour possible. Le modèle sera alors dans sa version MONA V3.3b-2009.

3.1. PRÉLÈVEMENTS

Afin de restituer au mieux les variations piézométriques de chacune des nappes modélisées sur l'ensemble de la période considérée, il est nécessaire d'acquérir une connaissance la plus exhaustive possible des prélèvements soutirés au milieu. Un important travail de collecte des données de prélèvements est donc nécessaire.

3.1.1. Collecte des données de prélèvements

Des données de prélèvements sont recueillies annuellement par le BRGM dans le cadre du programme de « gestion des nappes d'eaux souterraines du département de la Gironde ». Cette collecte permet de disposer des volumes prélevés d'environ 4 520 ouvrages du département captant une ou plusieurs nappes d'eaux souterraines. Elle est faite directement auprès des exploitants et chaque prélèvement est rattaché à un ouvrage parfaitement localisé. Elle constitue le noyau de la base de données utilisée pour le modèle Nord-Aquitain. Dans les autres départements, le BRGM ne procède pas au recueil annuel des volumes prélevés sur les captages d'eaux souterraines. Seules des études ponctuelles, comme par exemple celle menée sur l'évaluation des ressources en eau de l'Eocène dans le Bergeracois (Pédron, et al., 2003a), viennent alimenter les bases de données gérées par le BRGM. Dans le cadre de cette actualisation, le BRGM a récupéré des données auprès de différents organismes intervenant dans la gestion des ressources en eaux souterraines de la région Aquitaine. Les informations collectées ont été très variables suivant le département et l'usage :

- La DDT de Dordogne (Direction Départementale des Territoires) : récupération des volumes prélevés de 264 forages, uniquement à usage AEP, pour l'année 2008.
- L'AEAG (Agence de l'Eau Adour Garonne) : recueil des volumes pompés en 2008 et 2009 sur 8 656 points d'eau répartis sur l'ensemble de la région Aquitaine.
- Les Chambres d'Agriculture en Gironde, Charentes et Charentes Maritimes ont fourni des éléments permettant de mieux connaître les prélèvements agricoles.

Ces informations ont servi à mettre à jour la base de données déjà existante pour le Modèle Nord-Aquitain avec des prélèvements recensés jusqu'en 2009.

3.1.2. Traitements des données collectées

Les chroniques brutes de prélèvements recensés proviennent d'organismes différents ayant chacun leurs objectifs propres (connaissance pour le BRGM, redevance pour l'AEAG, règlementaire/gestion pour la DDT...). L'organisation qui en découle conduit à une grande hétérogénéité dans les données. Chaque organisme applique généralement son propre système de codification pour identifier les ouvrages (malgré l'existence de l'indice national issu de la Banque du Sous-Sol (BSS)) et s'affranchit souvent d'une géolocalisation précise. L'affectation des volumes prélevés aux points d'eau varie également. Principalement, deux cas de figures ont été rencontrés : soit la valeur communiquée correspondait exactement au soutirage sur le forage (cas le plus favorable), soit elle représentait un cumul de prélèvements lié au regroupement de plusieurs ouvrages (même exploitant ou même commune par exemple). Un travail de traitement des données collectées a dû être entrepris afin :

- d'identifier les points proposant des volumes prélevés (communes, lieu-dit, géolocalisation...) et de les recouper avec la BDES (Banque de Données sur les Eaux Souterraines) afin d'écarter les doublons,
- de vérifier la cohérence des volumes communiqués,
- d'actualiser la base de données locale dédiée au modèle Nord-Aquitain.

Certains forages sont présents dans les bases de plusieurs organismes qui proposent parfois, sur une même période, des volumes de prélèvements différents. Dans ce cas, l'usage de l'ouvrage, la connaissance du point de prélèvement ou une confirmation directe auprès de l'exploitant lui-même a permis de déterminer la valeur exacte ou la plus probable. Certains volumes aberrants ont toutefois été écartés de l'actualisation car il était impossible de retrouver leur origine. Les ouvrages agricoles représentent un cas particulier : les seules sources d'informations sont les études ponctuelles des Chambres d'Agriculture et dans une moindre mesure les données transmises par l'AEAG (très difficiles à exploiter car les redevances pour cet usage ne sont pas gérées à l'ouvrage). Le recouplement des données est donc quasiment impossible dans la majorité des cas (notamment dans le Miocène où les ouvrages agricoles sont très nombreux). Les données bancarisées dans la BDES (Banque de données) correspondent alors souvent au report, depuis l'année de mise en service du forage, des prélèvements relevés lors des inventaires BRGM. Durant tout le traitement, une parfaite correspondance entre les données issues de la Gestion des nappes en Gironde (GN33) et les données du Modèle a été assurée pour répondre notamment aux exigences de gestion du SAGE « Nappes profondes de Gironde ».

A l'heure actuelle, la base de données de prélèvement du MONA compte au total 3 865 forages pour lesquelles les volumes annuels soutirés sont renseignés sur la période 1972 – 2009. Sur cet ensemble 3 344 forages sont compris dans les limites du MONA et sont utilisés comme données d'entrée pour la simulation des écoulements.

3.1.3. Bilan général de l'actualisation des données de prélèvements du modèle Nord-Aquitain sur la période 2008-2009

Les prélèvements totaux, par an et par nappe, injectés dans le modèle Nord-Aquitain pour les années 2008 et 2009 sont indiqués ci-après (Figure 15).

	2007	2008	2009
Aquitainien	41 464 633	43 555 200	42 887 408
Langhien Serravalien	23 705 835	24 235 555	21 921 278
Oligocène	68 195 182	67 921 632	64 052 651
Éocène sup	2 695 875	3 328 968	2 886 149
Éocène moy	53 245 343	53 260 886	54 852 694
Éocène inf	8 438 110	9 054 364	9 623 737
Campanien	16 956 135	15 526 143	17 535 540
Coniacien-Santonien	14 169 419	15 415 985	15 561 065
Turonien	34 460 210	35 000 546	34 904 530
Cénomaniien	11 812 984	14 150 812	13 906 129
Tithonien	800 990	804 045	866 619
Kimméridgien	2 915 378	2 601 651	2 751 461
Bathonien-Calovo-Oxfordien	10 487 071	11 846 112	12 269 324
Bajocien	3 384 730	4 058 078	3 840 131
TOTAL	292 731 896	300 759 977	297 858 714

Figure 15 : Prélèvements dans les aquifères modélisés du MONA en 2008 et 2009 (m³/an)

Entre 2007 et 2008, les prélèvements ont globalement augmenté puisque sur l'ensemble des prélèvements recensés, une hausse de près de 8 millions de m³ est observée. En 2009, la tendance s'inverse mais la baisse constatée n'est que de 3 millions de m³.

En observant l'évolution des prélèvements dans leur ensemble (Figure 16), il est possible de constater qu'en dehors des fluctuations liées aux conditions climatiques (plus ou moins favorables), les prélèvements peuvent être considérés comme quasi stables depuis les années 2000.

Les aquifères de l'Oligocène et de l'Eocène moyen sont les réservoirs les plus sollicités avec des volumes pompés largement supérieurs à ceux des autres nappes (chacun représentant environ 20% du volume total). L'Oligocène tend cependant, depuis le début des années quatre-vingt-dix, à devenir l'aquifère le plus exploité parmi les nappes modélisées. La diminution des prélèvements observés pour l'Oligocène entre 2008 et 2009 est en partie due aux reports de prélèvements vers l'Éocène moyen dans le secteur de Martillac en raison de la pollution des sources de Gamarde de juin 2009.

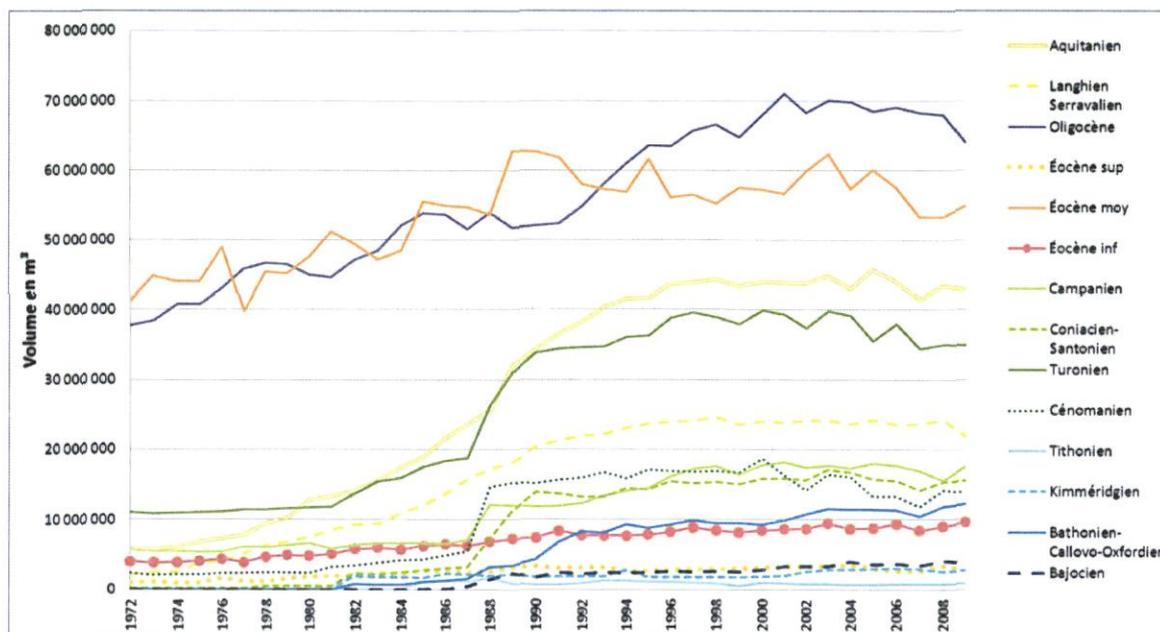


Figure 16 : Évolution des prélèvements dans les couches du Modèle Nord Aquitain de 1972 à 2009 tous départements confondus.

3.2. CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES

Les points d'observation sont utilisés pour le calage et la validation du modèle qui s'appuie sur des chroniques de référence que le modèle doit restituer au mieux en respectant à la fois les niveaux observés, la pente, la phase et l'amplitude des variations.

Pour qu'une chronique piézométrique soit exploitable, elle doit être suffisamment étoffée et longue. L'aquifère capté doit être connu avec certitude et être unique (sauf lorsque deux réservoirs sont sollicités mais pas individualisés par une épente). Le pas d'acquisition des mesures est variable d'un point à un autre (journalier, hebdomadaire, ..., annuel). L'attribution du réservoir capté pour chacun des points d'observation a fait l'objet d'une validation par le géologue régional. Les chroniques piézométriques de référence ont également été vérifiées et actualisées avec les données de nivellement acquises ces dernières années dans le cadre des réseaux « quantitatifs » de gestion patrimoniale et départementale (Gironde, Dordogne et Lot-et-Garonne notamment) ou d'études ponctuelles.

Ces ouvrages nivelés constituent des repères fiables pour le calage du modèle. Au cours du développement du modèle, la recherche de nouvelles chroniques a permis d'enrichir de manière conséquente le nombre des points de calage (qui passent à 433, Figure 17 contre 145 en 2006 lors de la précédente actualisation) et ainsi de consolider les résultats des simulations.

Aquifère	Couche du modèle	Nombre de chroniques utilisées pour le calage
Plio-Quaternaire	1	24
Serravallien	2	13
Aquitainien	3	43
Oligocène	4	49
Éocène supérieur	5	10
Éocène moyen	6	77
Éocène inférieur	7	24
Campanien	8	57
Coniacien-Santonien	9	22
Turonien	10	38
Cénomaniens	11	18
Tithonien	12	7
Kimméridgien	13	7
Bathonien-Callovo-Oxfordien	14	32
Bajocien	15	12
	TOTAL	433

Figure 17 : Nombre de chroniques piézométriques utilisés pour le calage

L'ensemble des chroniques piézométriques utilisées dans le cadre du modèle Nord-Aquitain a été actualisé jusqu'en 2009. Ces données ont été principalement extraites de la banque de données sur les eaux souterraines (BDES) gérée par le BRGM. Seul deux chroniques (Claix - 07095X0117 et Epaud - 07336X0543) ont été mises à jour à partir des données du site de l'Observatoire Régional de l'Environnement (<http://www.piezo-poitou-charentes.org/>) qui gère le réseau de suivi des nappes en Poitou-Charentes.

Les graphiques présentés en annexe 5 ont été générés avec **Infograph** (utilitaire BRGM développé sous Excel) qui permet de combiner les observations issues des différents piézomètres aux valeurs simulées par le modèle.

La localisation des points de mesures et les chroniques afférentes sont présentées en Figure 18.

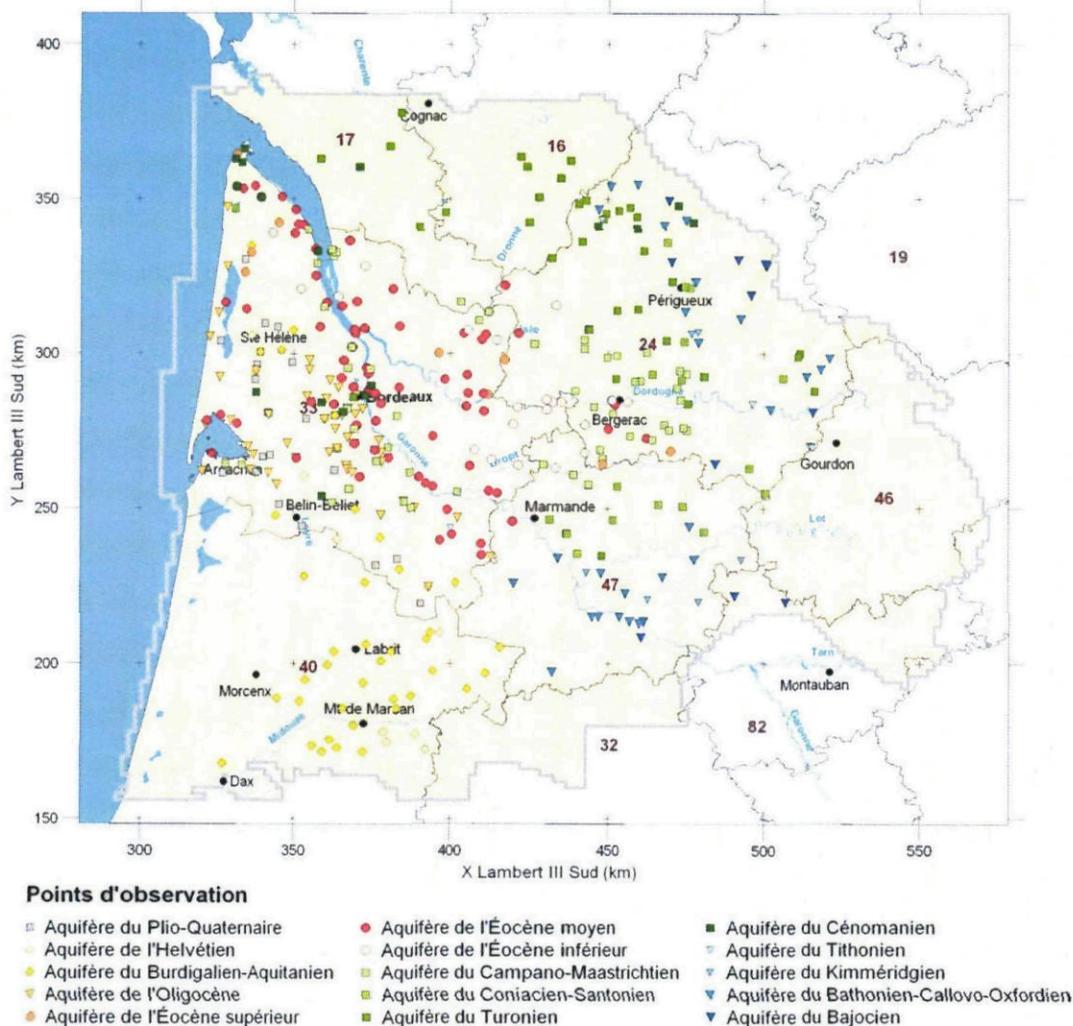


Figure 18 : Localisation des points d'observation

3.3. CALCUL DES PRÉCIPITATIONS EFFICACES ET ACTUALISATION DES DONNÉES DE RECHARGE DES NAPPES DU MODÈLE NORD-AQUITAIN

3.3.1. Les précipitations efficaces

Les données de précipitations et d'évapotranspirations potentielles (ETP) pour les stations de Mérignac en Gironde, de Cognac (Château-Bernard) en Charente, de Bergerac en Dordogne, de Gourdon dans le Lot et de Mont-de-Marsan dans les Landes ont été acquises sur les sites internet de Météo-France (Climathèque et Publithèque). Les données de ces stations sont utilisées dans le modèle pour le calcul de la recharge des nappes par zones météorologiques (ZMTO).

Les précipitations efficaces sont calculées par le BRGM au pas de temps décadaire à partir :

- des précipitations (P),
- de l'évapotranspiration potentielle (ETP),
- de la capacité maximale en eau du sol (la réserve utile RU), fixée à deux valeurs 100 mm et 150 mm.

L'évolution des précipitations efficaces annuelles depuis 1972 (pour une RU de 150 mm) à la station de mesure de Mérignac (33) est retracée sur la figure ci-dessous.

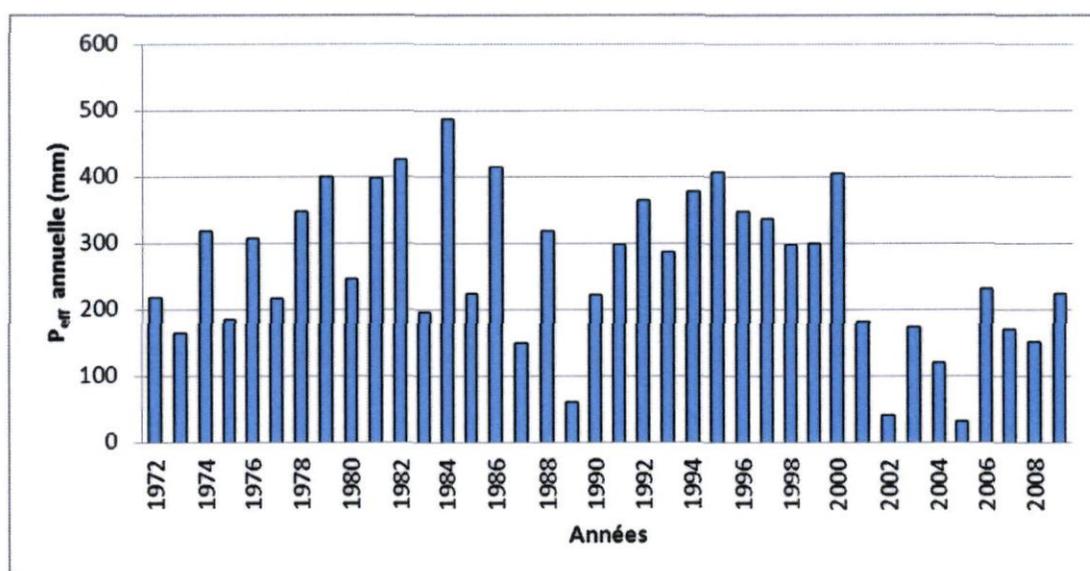


Figure 19 : Évolution des précipitations efficaces annuelles à la station de Mérignac (33) pour une Réserve Utile (RU) de 150 mm.

Les précipitations efficaces (RU=150 mm) des deux années d'actualisation 2008 et 2009 pour les 5 stations météorologiques prises en compte sont présentées ci-dessous.

Années	Mérignac (33) Peff (mm)	Cognac (16) Peff (mm)	Bergerac (24) Peff (mm)	Gourdon (46) Peff (mm)	Mont-de-Marsan (40) Peff (mm)
2008	151.7	53.4	111	334.3	281.6
2009	223.4	127.8	136.5	178.6	369.3

Figure 20 : Précipitations efficaces 2008 et 2009 calculées pour les 5 stations météorologiques prises en compte dans le MONA V3.3b-2009 (RU=150 mm)

Pour chacune de ces cinq stations, la Figure 21 ci-après fournit la moyenne et l'écart type des pluies efficaces calculées sur la période 1972-2009.

Station <i>R.U.</i>	Mérignac (33)		Cognac (16)	Bergerac (24)	Gourdon (46)	Mont-de-Marsan (40)
	100 mm	150 mm	150 mm	150 mm	150 mm	150 mm
Moyenne (mm)	289	264	168	159	173	296
Ecart type (mm)	99	113	96	92	98	103

Figure 21 : Moyenne et écarts-type des précipitations efficaces pour les 5 stations prises en compte dans le MONA V3.3b-2009

3.3.2. La recharge

Le mode de calcul de la recharge pour la période d'actualisation est le même que celui utilisé lors des phases de calage des différentes versions du modèle qui se sont succédées depuis 1998. Le calcul est détaillé dans le dernier rapport BRGM/RP-53 659-FR (Pédron, et al., 2005). Dans cette phase, la recharge année par année a été évaluée suivant les secteurs en prenant comme référence la pluie efficace moyenne de la station météo considérée, calculée sur la période **1972-2000** (avec une RU maximale de 150 mm). A partir des valeurs de recharge du régime permanent, les valeurs année par année pour chaque zone d'infiltration définie lors de la phase de calage sont obtenues par :

$$R_{z,k} = \frac{P_{eff}(k)}{\overline{P_{eff}}} \overline{R_z}$$

$R_{z,k}$ est la valeur de recharge de l'année k affectée à la zone z

$\overline{R_z}$ est la valeur de recharge du régime permanent pour la zone z

$P_{eff}(k)$ est la pluie efficace de l'année k

$\overline{P_{eff}}$ est la pluie efficace moyenne calculée sur la période 1971-2000

La localisation des zones de recharge de chaque couche du modèle ainsi que les stations météorologiques qui s'y rattachent est présentée en Figure 7, page 18.

Les données de pluies efficaces de la station de Mérignac, pour une RU de 150 mm, sont utilisées pour l'Eocène (sup, moy et inf), le Campano-Maastrichtien et le Turonien-Coniacien-Santonien.

Les données de la station de Mérignac, pour une RU de 100 mm sont utilisées pour le calcul de la recharge des nappes plio-quadernaire, miocènes (Aquitaniens-Burdigaliens et

Langhien - Serravallien) et oligocène. Les données des stations de Cognac et de Gourdon, pour une RU de 150 mm, sont utilisées pour le Turonien-Coniacien-Santonien et le Campano-Maastrichtien.

Les données de Bergerac, pour une RU de 150 mm, sont utilisées pour les nappes de l'Eocène inférieur et de l'Eocène moyen.

Les données de Mont-de-Marsan, pour une RU de 100 mm sont utilisées pour le Plio-Quaternaire. Les pluies efficaces trimestrielles supérieures ou égales à 250 mm sont réduites de 30 %. Cet écrêtage simule la diminution de l'infiltration (augmentation de la part du ruissellement) dans les écoulements durant les périodes fortement pluvieuses.

3.4. RESULTATS DU MODELE ACTUALISE

3.4.1. Les chroniques de calage

Les graphiques de comparaison entre les courbes d'évolution tracées à partir des mesures et des charges calculées par le modèle pour les différentes nappes sont présentés en annexe 5. L'exemple de restitution présenté ci-dessous (Figure 22) montre en points rouges les mesures brutes observées et en bleu les niveaux calculés par le modèle version MONA 3.3b 2009 au droit du piézomètre considéré.

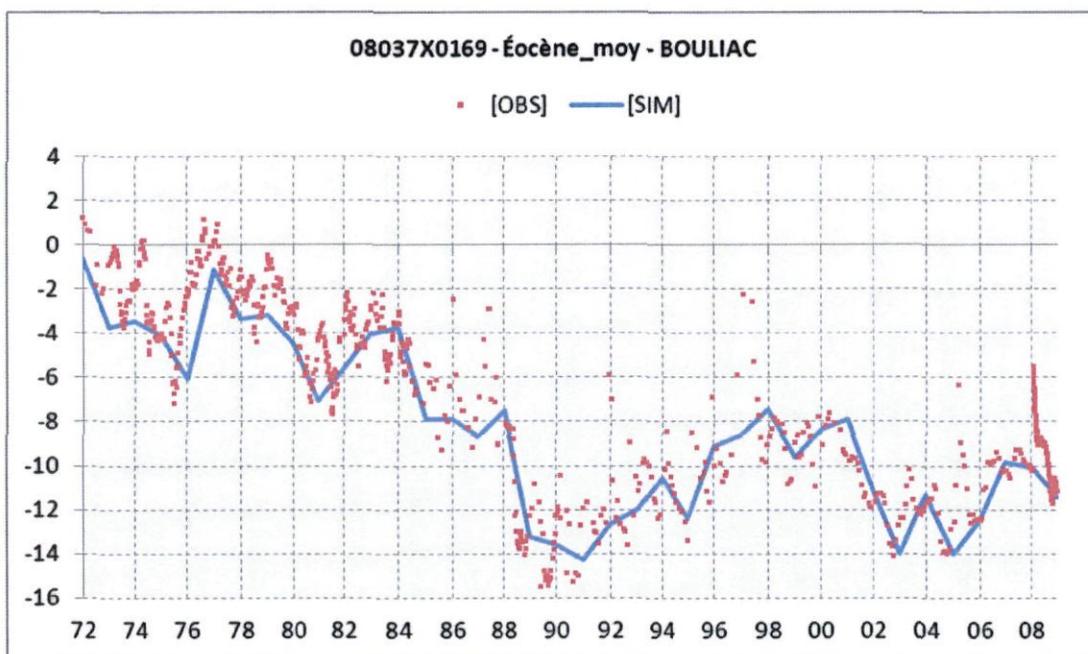


Figure 22 : Exemple de comparaison entre les niveaux observés et simulés - forage de Bouliac (Eocène moyen)

L'ajustement apparaît visuellement satisfaisant sur la grande majorité des chroniques de calage pour les nappes considérées (Annexe 5). La plupart des points sont bien reproduits en niveaux, en phase et en pente. Ces résultats confirment la fiabilité du modèle. En effet, sur la période 2008-2009, le modèle retranscrit très convenablement les variations de charge avec les nouvelles données d'entrée sans qu'aucune modification des paramètres hydrodynamiques n'ait été nécessaire.

3.4.2. Les cartes piézométriques

Le modèle actualisé dans sa version MONA V3.3b-2009 permet de restituer les cartes piézométriques simulées des nappes pour les années 2008 et 2009.

Les cartes piézométriques de l'aquifère « Eocène moyen » sont présentées en Figure 23. Ce réservoir présente un enjeu important dans le nord du Bassin aquitain, notamment en Gironde où il est sollicité pour l'alimentation en eau potable de l'agglomération bordelaise. La comparaison de ces cartes montre une baisse des niveaux entre 2008 et 2009, le cône de dépression sous Bordeaux atteignant des niveaux inférieurs à - 25 m NGF.

Au fil des ans, la surface influencée par les prélèvements réalisés sur l'agglomération bordelaise et sa périphérie n'a cessé de croître en direction du Sud-Est. Ainsi, entre 2008 et 2009, la surface dont la piézométrie est inférieure à 0 mNGF a augmenté de 10% pour atteindre près de 3 600 km².

Par ailleurs, le creux de la dépression, représenté par la valeur la plus faible observée, s'est déplacé vers le sud-est. En effet, au milieu des années 70, les niveaux les plus bas étaient mesurés dans le secteur de Blanquefort, alors qu'en 2009 ils sont localisés sur Martillac.

Piézométrie 2008

Piézométrie 2009

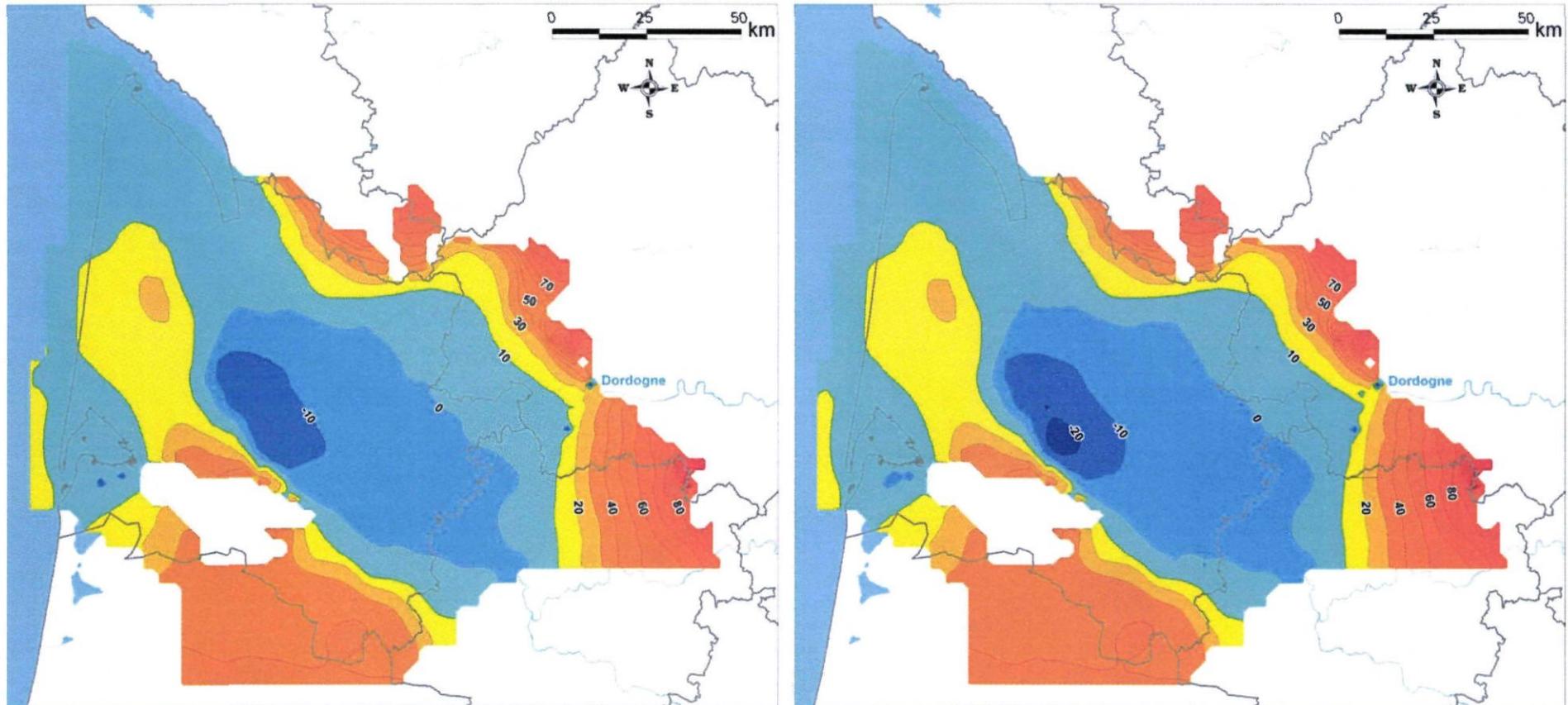


Figure 23 : Niveaux piézométriques simulés par le modèle Nord-Aquitain version MONA V3.3b-2009 dans l'aquifère « Eocène moyen » pour les années 2008 et 2009.



4. Actualisation de la géométrie des réservoirs du Bassin nord aquitain

4.1. OBJECTIF

L'actualisation de la géométrie des réservoirs du Bassin nord aquitain a pour but d'améliorer la représentativité du modèle hydrodynamique. Dans sa version actuelle (V3.3b 2007), le Modèle Nord-Aquitain répond parfaitement aux problématiques de nappes profondes à renouvellement lent pour lesquels il a été construit. Toutefois, les problématiques émergentes dans les départements de Dordogne et de Lot-et-Garonne (baisse généralisée et continue des niveaux piézométriques pour les nappes profondes du Jurassique et du Crétacé supérieur) notamment nécessitent d'affiner le maillage. Ces secteurs correspondent par ailleurs aux grandes zones d'alimentation des aquifères du Secondaire. Une représentation plus fine de la géométrie permet de mieux prendre en compte les zones d'affleurements et donc les secteurs où il peut y avoir des émergences (matérialisées par des zones de débordements dans le modèle). La fiabilité des bilans calculés sera donc accrue.

Par ailleurs, Le modèle (de la V1 à la V3) a été construit en pseudo-3D. Cela signifie que les épontes ne sont pas explicitement prises en compte comme couches de calcul. Le modèle ne peut donc pas être utilisé pour le moment sur les problématiques de transport (zone minéralisée de l'Éocène girondin) ou de thermique (géothermie). L'intégration des épontes dans la version 4 du modèle permettra d'y remédier.

Toutes ces modifications nécessiteront un recalage complet de l'outil et un travail sur plusieurs années de la convention régionale. Dans l'attente de cette version, le MONA V3.3b sera pleinement opérationnel.

La construction du modèle géologique du MONA est un préalable à la modélisation hydrodynamique. L'objectif final étant d'obtenir une géométrie de l'ensemble des couches à la maille de 500 m en intégrant les épontes.

La géométrie du modèle actuel (V3.3b 2007) a été réalisée en plusieurs phases en utilisant des méthodes et des outils différents. En effet, les premières couches incorporées dans le Modèle Nord Aquitain (du Plio-Quaternaire à l'Éocène) n'ont pu bénéficier au moment de leur élaboration des outils récents utilisés pour construire la géométrie des couches du Crétacé et du Jurassique.

Le but est ici de synthétiser l'ensemble des informations (forages, diagraphies, cartes géologiques, failles, MNT,...) qui ont été prises en compte dans les travaux précédents pour construire une base de données géologique cohérente et la plus complète possible.

4.2. OUTILS ET PRINCIPES

Le modèle géologique sera construit en utilisant le logiciel **GDM** (Geological Data Management) et son composant **Multilayer** (Bourguine, 2006) développé tous deux par le BRGM. Ces outils permettent d'interpoler les toits et les murs des formations considérées et de combiner ces surfaces en contrôlant la cohérence par rapport aux données d'entrée (log de forages, contacts géologiques à l'affleurement,...).

Le principe général de la modélisation géologique peut être décrit comme suit :

- on part des données « exactes » où le toit et/ou le mur d'une formation ont été reconnus (forages, contacts géologiques) ;
- à partir de ces données exactes, une interpolation est réalisée au droit de chaque point pour vérifier si les contraintes d'inégalité sont respectées : par exemple pour un sondage se terminant dans la couche A, la surface calculée correspondant au mur de cette couche doit passer sous la fin du forage. Réciproquement pour un sondage débutant dans la couche A, la cote du toit interpolée en ce point doit passer au-dessus du début du forage (les surfaces interpolées au-dessus de la topographie sont éliminées, la surface du sol étant considérée comme une "variable érodante") ;
- lorsque ces inégalités ne sont pas respectées, il faut ajouter des points de contrainte de façon à respecter les structures géologiques et les variations connues des épaisseurs des formations. Ce travail se fait à partir de l'expertise du géologue et de visualisations en plan et en coupe sur lesquelles sont reportés les éléments connus : logs des forages, épaisseurs et cote des formations, coupes interpolées.
- le travail se fait ainsi pas à pas, interface par interface.
- Les paramètres d'interpolation de chaque surface sont ajustés en fonction du jeu de données correspondant.
- Une fois toutes les contraintes d'inégalités respectées, les différentes surfaces modélisées sont combinées automatiquement entre elles en fonction de leur caractère « érosif » ou « déposant » et avec la variable TOPO (MNT). Cette combinaison permet d'obtenir un modèle multicouche cohérent.
- l'ensemble du modèle est ensuite contrôlé par l'intermédiaire de cartes en isohypses et isopaques, et par le tracé de coupes sériées, ce qui permet de corriger les éventuelles anomalies résiduelles.

4.3. SOURCES DE DONNÉES UTILISÉES

4.3.1. Forages

Les travaux de modélisation géologique vont s'appuyer pour partie sur les travaux effectués précédemment pour construire la géométrie du MODèle Nord Aquitain. Au cours de son élaboration (Annexe 1), la géométrie du MONA s'est peu à peu complexifiée, ainsi :

- les études réalisées dans le cadre du Contrat particulier entre l'État, la Région Aquitaine et l'agence de l'eau Adour-Garonne [(Bichot, et al., 1999) ; (Bichot, et al., 2000) ; (Pédron, et al., 2001)] ont permis de recueillir et de synthétiser les données disponibles concernant les réservoirs du Miocène (Aquitainien et Langhien-Serravalien) et d'aboutir in-fine à une modélisation hydrodynamique de ces aquifères ;
- l'Oligocène, qui a été intégré dès la première version du MODèle Nord Aquitain, a vu sa géométrie mise à jour en 2005 à partir de données géologiques issues de travaux universitaires (Larroque, 2004) et des travaux de synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologiques en région bordelaise (Platel, et al., 2000) ;
- la géométrie des réservoirs de l'Éocène a été revue en 2005 lors de la différenciation en trois réservoirs [(Pédron, et al., 2003b) et (Pédron, et al., 2005)] ;
- enfin, les dernières modifications de la géométrie du modèle ont porté sur les réservoirs du Secondaire [(Pédron, et al., 2006) et (Pédron, et al., 2008)].

Ces améliorations ont été réalisées avec des méthodes et des outils différents. Les bases de données afférentes décrivant les formations rencontrées en forage sont donc de différentes natures. A noter que seules les couches du Secondaire ont été construites à l'aide des logiciels GDM et Multilayer. La géométrie des réservoirs du Tertiaire a été élaborée couche par couche par interpolation à l'aide du logiciel Surfer® des côtes du toit et du mur des formations aquifères. La cohérence numérique de l'ensemble a été vérifiée dans le SIG (MapInfo®) par le calcul des épaisseurs des épontes (une épaisseur d'éponte négative indiquerait un croisement de couches).

En parallèle aux développements du MODèle Nord Aquitain, d'autres modèles géologiques ont été construits pour répondre à des problématiques plus spécifiques. Ainsi pour étudier plus en détail les interactions entre l'estuaire de la Gironde et les réservoirs de l'Éocène, un modèle au pas de 200 m a été élaboré (Platel, et al., 2006). Le territoire modélisé s'étend de Saint-Estèphe au nord à Blanquefort au sud, sur environ 20 km de large. L'étendue du modèle permet d'intégrer une partie des affleurements de l'Éocène moyen détritique au nord-est de la zone d'étude ainsi que les formations de l'Éocène moyen calcaire qui affleurent à Blaye et dans le lit de l'estuaire de la Gironde.

La stratigraphie des neuf formations modélisées est établie comme suit (Figure 24):

	Formations	Description
1	FLAN	Flandrien
2	QUAT	Quaternaire alluvial
3	AUTR	Formation de recouvrement
4	EPES	Eponte Eocène supérieur
5	EMC2	Eocène moyen Calcaire 2 (EMC2)
6	EPO2	Eponte EMC1/EMC2
7	EMC1	Eocène moyen Calcaire 1 (EMC1)
8	EPO1	Eponte EMDT/EMC1
9	EMDT	Eocène moyen Détritique (EMDT)

Figure 24 : Modèle Estuaire - Succession stratigraphique des formations modélisées

La géométrie de ce modèle est illustrée par la visualisation 3D suivante (Figure 25)

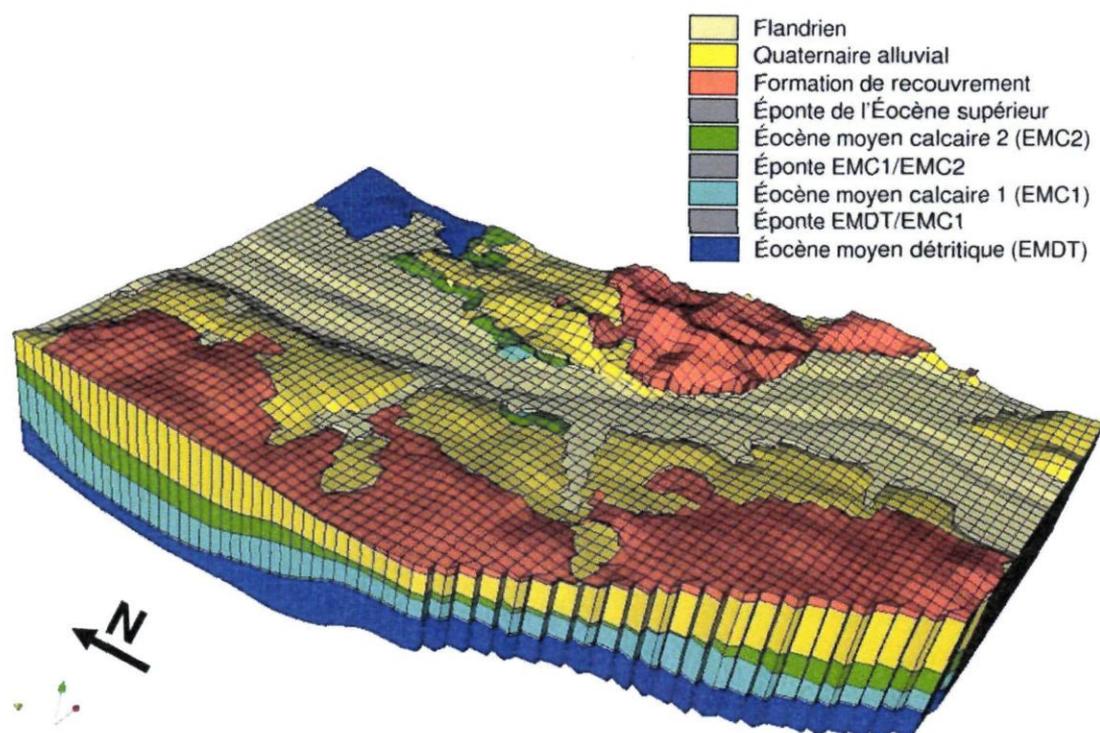


Figure 25 : Modèle Estuaire - Visualisation 3D

Par ailleurs, dans le cadre de l'Atlas des Zones à Risque du SAGE nappes profondes de Gironde, le SMEGREG¹ a commandé au BRGM la réalisation d'un modèle hydrodynamique intégrateur des connaissances géologiques et hydrogéologiques sur le réservoir de l'Oligocène dans le but d'étudier plus finement le dénoyage du réservoir (Saltel, et al., 2010). Le modèle géologique prend en compte 6 couches au total dont le détail est présenté dans le tableau ci-dessous :

	Formations	Description
1	ALUV	Alluvions de la Garonne
2	REMI	Recouvrement quaternaire à miocène moyen
3	MIOC	Réservoir miocène
4	EPCM	Eponte Chattien-Miocène
5	OLNP	Réservoir oligocène
6	EPOL	Formations imperméable au mur du réservoir oligocène

Figure 26 : Modèle Oligocène - Succession stratigraphique des formations modélisées

La géométrie du modèle est illustrée par la visualisation 3D suivante (ci-dessous).

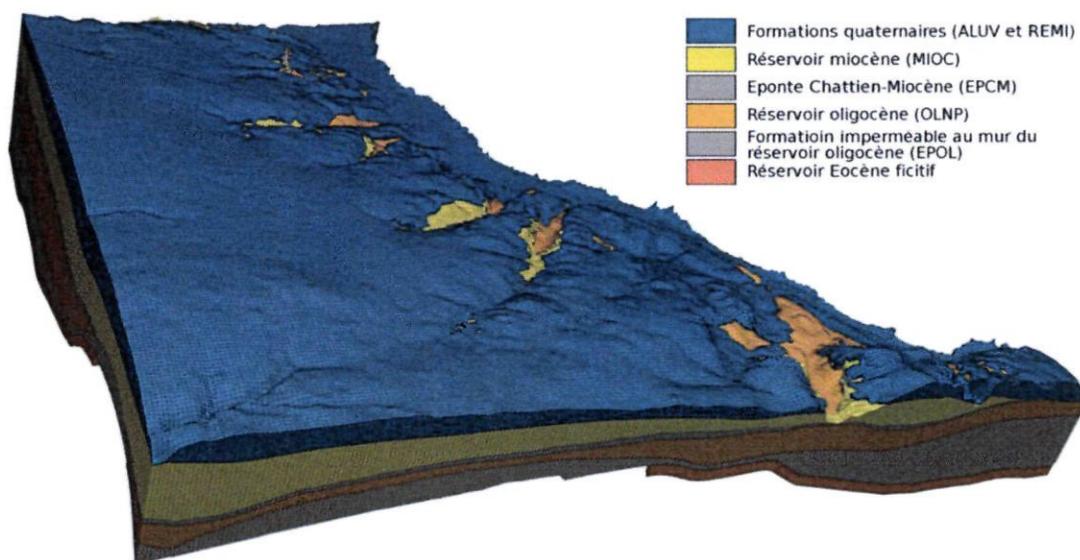


Figure 27 : Modèle Oligocène - Visualisation 3D

Dans le cadre de la convention pluriannuelle signée entre le BRGM et la Région Aquitaine (pour les périodes 2002-2006 puis 2008-2013), le Service Géologique Régional (SGR) Aquitaine a entrepris en 2008 des investigations concernant les potentialités aquifères du Plio-Quaternaire des Landes de Gascogne et du Médoc (Figure 28).

¹ Syndicat Mixte d'Etude pour la Gestion de la Ressource en Eau du département de la Gironde.

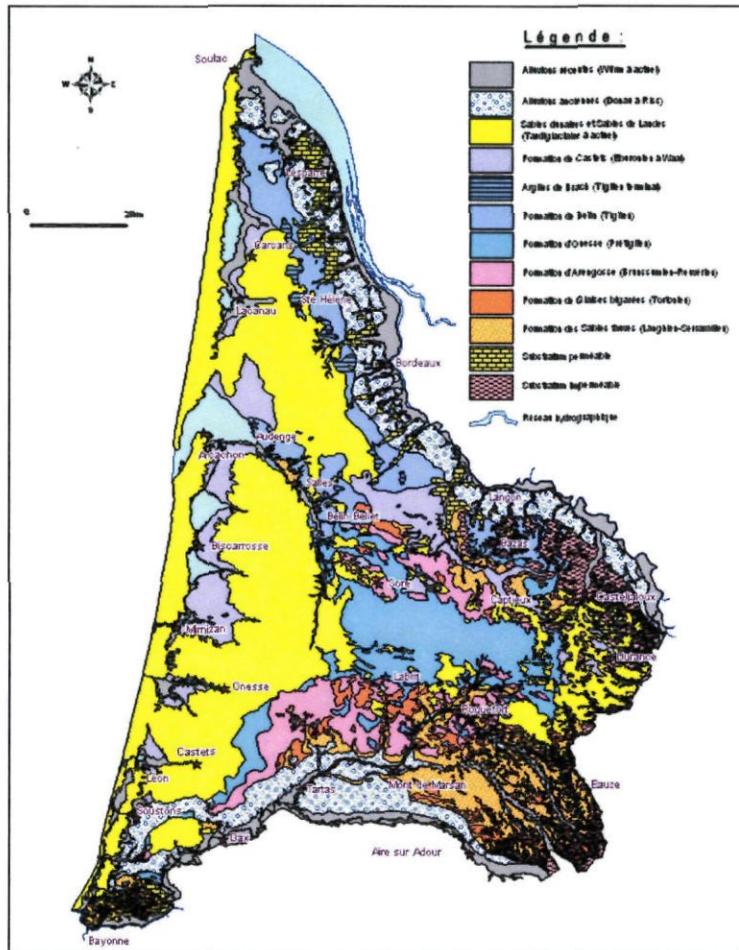


Figure 28 : Carte géologique simplifiée du Triangle landais

Ces travaux (Corbier, et al. 2010) ont notamment abouti à la construction d'un modèle géologique détaillé (Figure 29) basé sur un nombre important de sondages (1091).

	Formations	Description
1	D-NF	Dunes et Sables des Landes
2	Fy-z	Terrasses Fy-z
3	Fx-t	Terrasses Fx-t
4	CAST	Formation de Castets
5	ONES	Onesse
6	AREN	Arengosse
7	GLAI	Glaises Bigarrées
8	FAUV	Sables Fauves
9	SUB	Substratum

Figure 29 : Modèle Plio-Quaternaire - Succession stratigraphique des formations modélisées

Chacun de ces modèles a été construit à partir de données de forage qui ont été codées pour décrire les formations à représenter :

- Le modèle Plio-Quaternaire (1091 forages),
- Le modèle Oligocène (637 forages),
- Le modèle Estuaire (136 forages),
- Le **MO**dèle Nord-Aquitain qui comprend trois bases :
 - Miocène (363 forages),
 - Éocène (969 forages)
 - Secondaire (953 forages)

Pour chacun de ces forages, ont été distinguées les données de « tête » (indice BSS, coordonnées, altitude, localisation,..) et les données de « passe » qui correspondent à la description des horizons (aquifères et épontes).

Les différentes bases s'intéressant à différents horizons (Annexe 6), il arrive que certains forages soient décrits à plusieurs reprises mais à des profondeurs différentes. Ainsi en croisant les données de tête des différentes bases nous arrivons à un total de 3 188 forages décrits. Sur cet ensemble la description n'est parfois pas complète sur la totalité du puits. La concaténation de ces informations a néanmoins servi de point de départ à la constitution d'une base incorporant les forages les plus représentatifs.

Il a par la suite été nécessaire de compléter, voire de corriger, les informations de ces forages. Il pouvait en effet y avoir des informations divergentes pour décrire un même horizon. Une validation de tous les forages incertains a permis de corriger les erreurs et de compléter les manques d'informations.

Ce processus de validation s'est principalement appuyé sur la **BSS** (Banque des données du **Sous-Sol**). A l'heure actuelle, la base de forages comprend un total de 3 305 forages décrits par 13 173 passes. Sur ce total, plus de 1 000 forages ont été validés.

4.3.2. Données diagraphiques

En compléments des descriptions lithologiques, les données diagraphiques ont été utilisées pour délimiter les horizons réservoirs et les épontes. Les corrélations de ces différentes mesures (Gamma ray, résistivités, log de production,..) réalisées sur un ensemble de forages donnent des informations précieuses sur la géométrie des corps aquifères. En s'appuyant sur des mesures physiques, cette approche permet d'avoir une vision intégrée des systèmes étudiés et d'aboutir à une définition des réservoirs la plus cohérente possible (Figure 30).

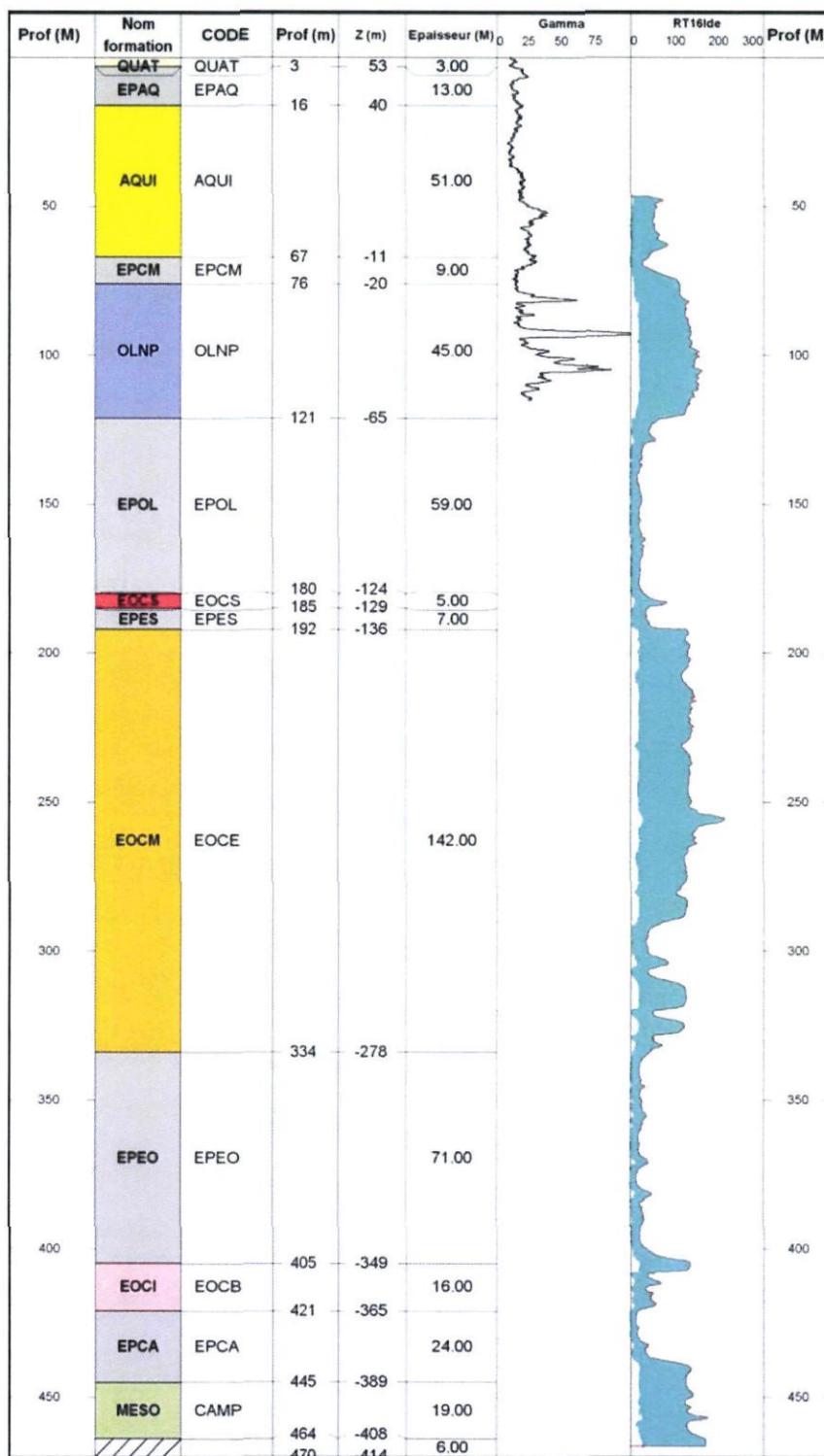


Figure 30 : Codification des réservoirs à partir de la corrélation diagraphique

L'objectif étant de construire une base de données géologique la plus cohérente et complète possible, nous avons cherché à intégrer le plus grand nombre de mesures diagraphiques. Les données diagraphiques utilisées proviennent soit de forages pétroliers, soit de forages utilisés pour l'alimentation en eau potable. Actuellement nous avons pu intégrer dans la base de données près de 65 forages contenant des mesures de Gamma ray et de résistivité.

Le recueil de ces mesures entrepris en année 2 (2010-2011) du projet se poursuivra en année 3 (2011-2012) de manière à compléter la base de données. Le but étant que ces données permettent de valider nos interprétations sur un domaine le plus vaste possible.

4.3.3. Carte géologique

Dans le cadre de la modélisation géologique, l'utilisation d'une carte géologique des formations affleurantes est un auxiliaire de travail précieux. Elle permet en effet de :

- comparer les formations affleurantes fournies par la carte géologique à la première formation observée dans les forages et de produire une carte de divergence,
- définir les contacts entre formations affleurantes et ainsi contraindre le modèle.

Souhaitant modéliser les différents réservoirs et épontes du nord du Bassin aquitain, la vision stratigraphique des cartes géologiques conventionnelles n'est pas parfaitement adaptée à notre démarche. Par contre, le travail réalisé dans le cadre du Référentiel Hydrogéologique Français BD LISA (Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères) correspond tout à fait à notre problématique [(Pédron, et al., 2009) ; (Ayache, et al. 2011)].

En effet, l'élaboration de ce référentiel national confiée au BRGM en 2006 par le Ministère en charge de l'Ecologie a pour objectif la délimitation et la caractérisation des entités aquifères et non aquifères au sein d'un SIG (Système d'Information Géographique). A partir du travail réalisé, il est donc possible d'aboutir à une carte hydrogéologique délimitant les affleurements des formations aquifères et non aquifères.

La carte hydrogéologique dressée sur l'emprise actuelle du Modèle Nord aquitain (version 3.3b) donne une idée générale de l'extension des affleurements des aquifères et épontes (Figure 31).

Le maillage choisi pour la modélisation géologique permettra de mieux restituer les différentes zones d'affleurements. En effet, le passage d'un maillage de 2 km de côté à 500 m permettra d'aboutir à une meilleure représentativité de la complexité des corps géologiques modélisés. Néanmoins, même à cette échelle, des simplifications sont inévitables.

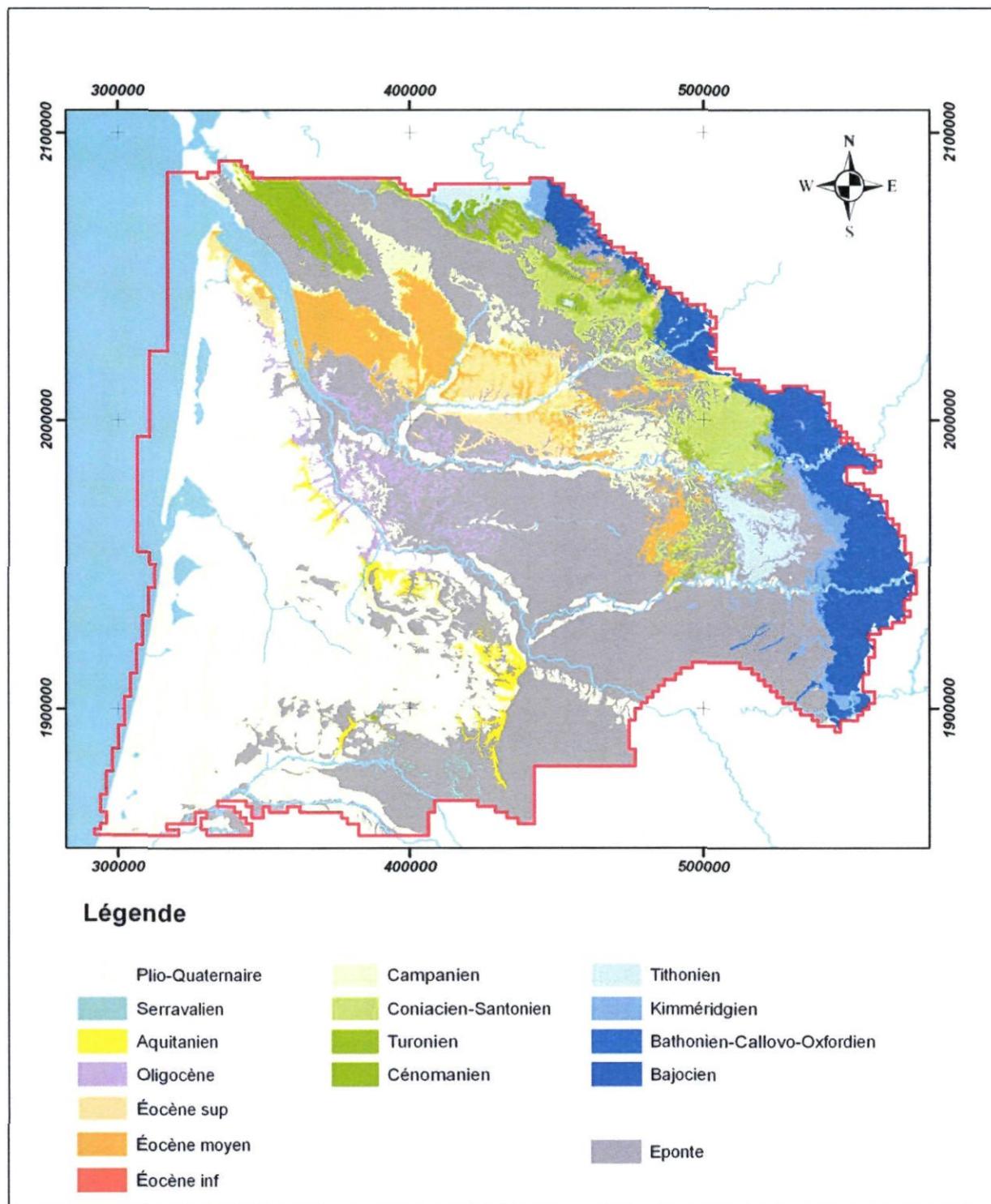


Figure 31 : Affleurements des différents réservoirs considérés dans le modèle nord-aquitain cartographiés à partir des travaux du Référentiel Hydrogéologique BDLISA

4.3.4. Modèle Numérique de Terrain (MNT)

Le MNT de l'IGN (2005) au pas de 50 m a été utilisé pour contrôler l'altitude de tous les forages et assigner la cote des contacts des formations affleurantes issues de la carte géologique. Après ré-échantillonnage au pas de 500 m pour correspondre à la maille choisie, le MNT a permis de représenter la variable « topographie » du modèle (Figure 32).

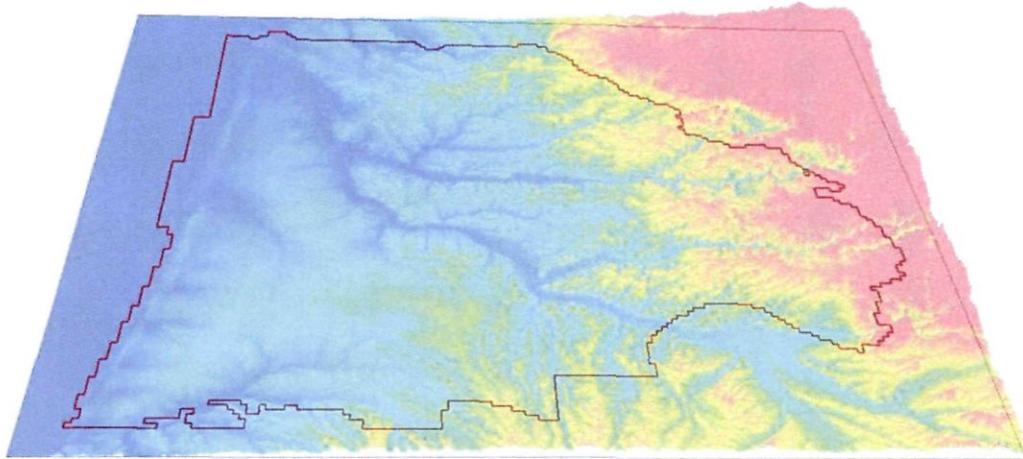


Figure 32 : Vue 3D du MNT ré-échantillonné au pas de 500 m

4.3.5. Failles

Si les recouvrements mio-pliocènes ont longtemps rendu difficile une bonne connaissance de la tectonique du bassin aquitain, l'ensemble des méthodes géophysiques (gravimétrie, méthodes telluriques) et en particulier la sismique réflexion ont mis en évidence la complexité des structures en place. L'organisation structurale du Bassin Aquitain montre l'existence de deux provinces séparées par un accident majeur, la flexure Celtaquitaine, dont le linéament prolonge d'Arcachon à Carcassonne le rebord du talus continental nord aquitain. Le domaine septentrional est caractérisé par des accidents tectoniques (plis ou failles) peu complexes de direction hercynienne. La province méridionale est le siège d'une tectonique plus complexe où l'halocinèse (processus de formation des dômes typique des séries sédimentaires très épaisses par la migration d'une masse saline légère vers le haut) joue un rôle prépondérant. Les principales failles jouant un rôle sur la structuration des réservoirs du Nord du Bassin ont été digitalisées afin d'être utilisées pour l'interpolation des toits et des murs des couches modélisées, mais ces failles (ou zones de failles) seront toujours considérées comme verticales.

4.4. CODAGE ET VALIDATION DES DONNÉES

4.4.1. Codage des données

Les forages et la carte géologique ont fait l'objet d'un codage spécifique dans l'objectif d'une analyse de cohérence avant modélisation. Chacun des sondages utilisés dans le cadre de la modélisation géologique a été décrit en fonction du codage présenté ci-dessous (Figure 33). Au final, le modèle géologique comportera 29 couches dont 15 aquifères et 14 épontes.

Code	Description
QUAT	Formations du Quaternaires
EPLS	Éponte au sommet du Langhien-Serravallien
LASE	Aquifère du Langhien-Serravallien
EPAQ	Éponte au sommet de l'Aquitaniens
AQUI	Aquifère de l'Aquitaniens
EPCM	Éponte Chattien-Miocène
OLNP	Aquifère de l'Oligocène
EPOL	Éponte à la base de l'Oligocène
EOCS	Réservoir supérieur de l'Éocène
EPES	Éponte à la base de l'Éocène supérieur
EOCM	Aquifère de l'Éocène moyen
EPEO	Éponte à la base de l'Éocène moyen
EOCI	Réservoir inférieur de l'Éocène
EPCA	Éponte au sommet du Campanien
CAMP	Aquifère du Campanien
EPCS	Éponte au sommet du Coniacien Santonien
COST	Aquifère du Coniacien-Santonien
EPTU	Éponte au sommet du Turonien
TURO	Aquifère du Turonien
EPCE	Éponte au sommet du Cénomaniens
CENO	Cénomaniens
EPTI	Éponte au sommet du Tithonien
TITH	Aquifère du Tithonien
EPKI	Éponte au sommet du Kimméridgien
KIMM	Aquifère du Kimméridgien
EPCX	Éponte au sommet du réservoir du Bathonien-Calovo-Oxfordien
BACX	Aquifère du Bathonien-Calovo-Oxfordien
EPBJ	Éponte au sommet du Bajociens
BAJO	Réservoir du Bajociens

Figure 33 : Pile stratigraphique des formations modélisés

Les aquifères du Crétacé et du Jurassique ayant été incorporés très récemment au Modèle Nord Aquitain (MONA V3.3), la quasi-totalité des forages traversant ces horizons avaient été décrits. Le modèle géologique correspondant avait été construit à l'aide de du logiciel GDM.

L'élaboration de la géométrie des réservoirs tertiaires étant plus ancienne et la source de données plus fragmentaire (en raison des différentes extensions des modèles locaux), un travail beaucoup plus important a été nécessaire pour compléter la base forage tout en s'assurant de la cohérence de l'information.

Les différentes bases de données qui ont servi de point de départ à notre travail ont été construites avec des objectifs différents s'intéressant plus particulièrement à tel ou tel horizon. Ainsi certaines descriptions de forages n'ont été réalisées que pour les formations de surface (Plio-Quaternaire par exemple) alors que d'autres forages n'ont été codés que pour les terrains du secondaire. Il arrive donc que certains forages soient décrits à plusieurs reprises mais à des profondeurs différentes (Figure 34). Il a donc été nécessaire de confronter les différentes sources d'information afin de s'assurer de leur cohérence et de venir compléter l'information lorsque celle-ci était manquante

De plus, des codifications utilisées pour d'anciens modèles n'ont pu être conservées. Le code « MIOC » utilisé pour décrire les formations miocènes dans le cadre de la problématique de l'atlas des zones à risques de l'Oligocène a dû être entièrement recodé pour faire apparaître la distinction entre l'Aquitainien et le Langhien-Serravallien.

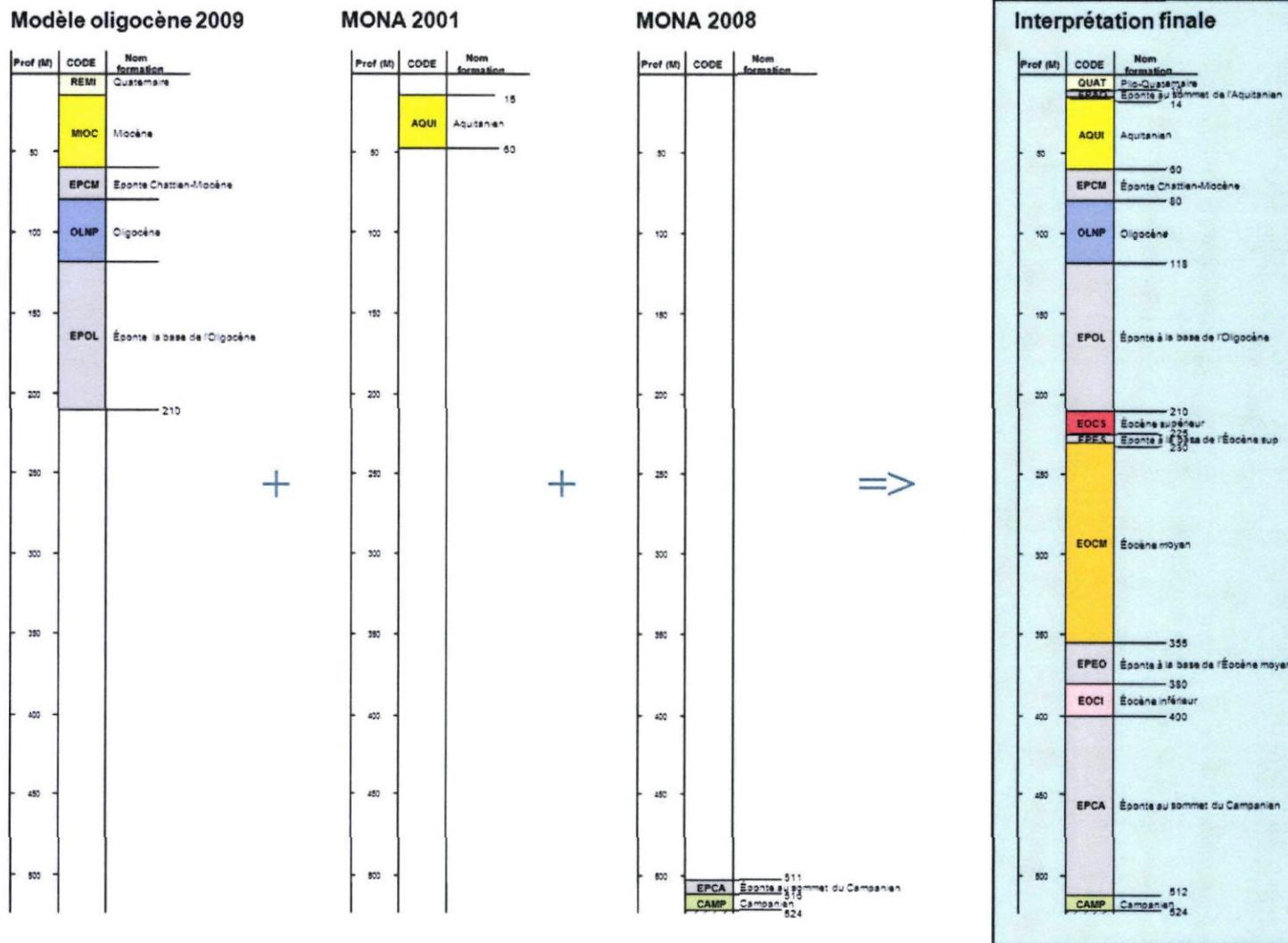


Figure 34 : Codification des forages – Illustration de la problématique de concaténation des données

4.4.2. Coupes géologiques synthétiques

En préalable à la modélisation géologique, il était nécessaire d'avoir une vision d'ensemble de la géométrie des réservoirs du nord du Bassin aquitain. La complexité du système est illustrée par un ensemble de 4 coupes traversant le domaine étudié (Figure 35 à Figure 38). Elles ont été construites à partir des forages de la base de données décrite précédemment. Ces coupes figurent donc les ensembles réservoirs et les épontes qui les séparent en grisé uniforme.

Dans un souci de clarté et pour venir compléter les coupes qui avaient été réalisées dans le cadre de travaux récents centrés sur les réservoirs du Crétacé et du Jurassique (Platel, et al., 2008), les terrains représentés s'intéressent plus particulièrement aux formations tertiaires.

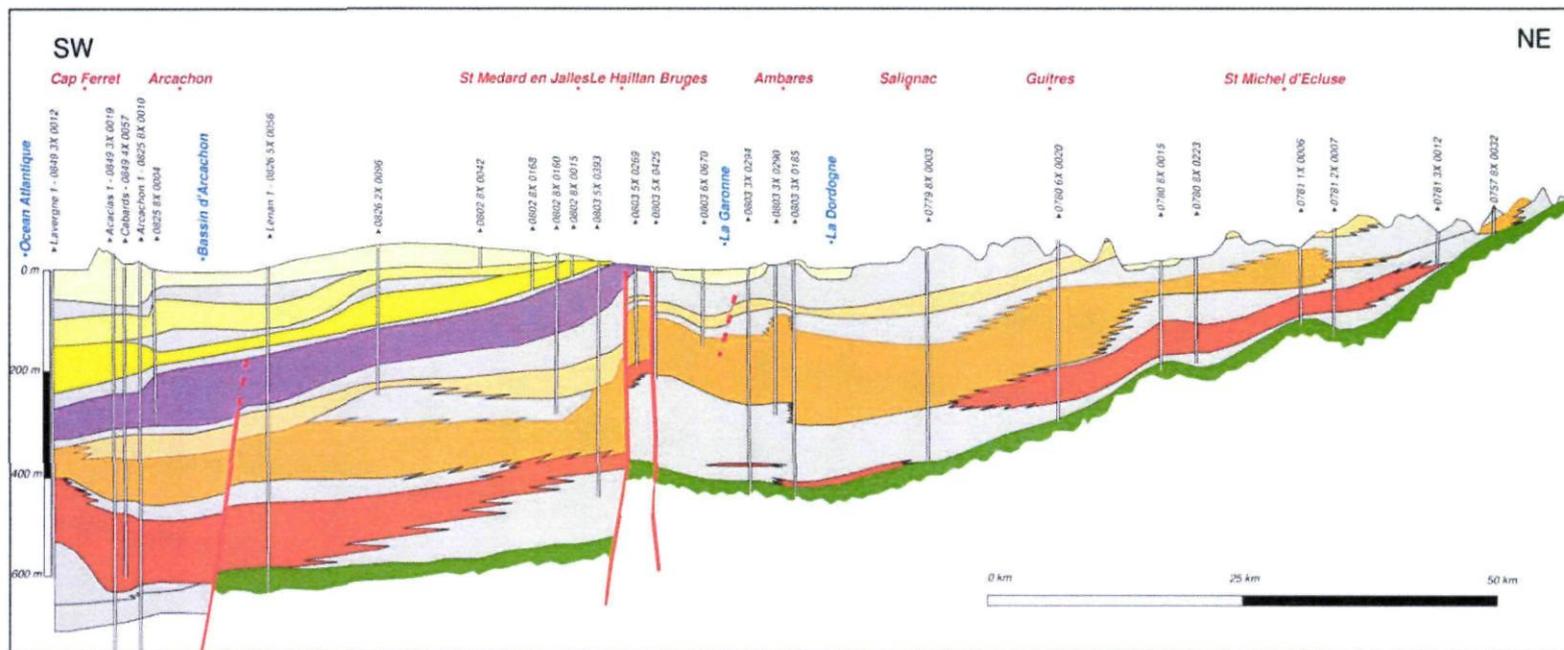
Les coupes A à C sont orientées NW-SE. Les coupes A et B permettent d'illustrer l'approfondissement général des réservoirs tertiaires en direction de l'ouest. La coupe C qui traverse la structure de Villagrains-Landiras, traduit la différence de contexte entre le nord et le sud du Bassin aquitain. La coupe D orienté NNW-SSE recoupe les principales structures géologiques sur secteur d'étude (Jonzac, Blaye-Listrac et Villagrains-Landiras) et montre bien l'impact de ces anticlinaux sur l'agencement des corps aquifères.

Trois réservoirs sont identifiés au sein des formations éocènes. L'aquifère principal est constitué par l'Éocène moyen, dont l'épaisseur est plus importante en comparaison des réservoirs sommital (Éocène supérieur) et basal (Éocène inférieur) plus discontinus. Au sein de l'Éocène inférieur, deux ensembles indépendants peuvent être individualisés : un aquifère plus détritique localisé au NE et un réservoir calcaire situé au SW. Localement les réservoirs éocènes peuvent être en communication. C'est notamment le cas dans le secteur d'Arcachon où l'Éocène supérieur et moyen sont en relation.

L'aquifère de l'Oligocène est facilement identifiable en forage. Le réservoir est constitué par des calcaires à texture grainstone, les calcaires à Astéries. Deux membres (B et C) peuvent être individualisés (Platel, et al., 2000) séparé par une intercalation de marnes et de calcaires marneux de quelques mètres d'épaisseur. Néanmoins, cette séparation ne pouvant pas être considérée comme une véritable éponte, un seul réservoir regroupant les deux ensembles a été considéré dans le cadre de la modélisation géologique.

Dans les formations miocènes, la distinction de deux aquifères (Langhien-Serravallien et Aquitanien) déjà présente dans la version 3 du MONA a été conservée ici. Ces deux entités sont séparées par une éponte discontinue d'épaisseur variable.

Le réservoir plio-quadernaire regroupe les formations des Sables des Landes, de Castets, de Belin, d'Onesse, et d'Arengosse. L'éponte basale correspond aux formations des Glaises bigarrées et des Sables fauves.



Coupe A - Légende :

Plio-Quaternaire

QUAT Sables, graviers et sables argileux

Miocène

EPHE Argiles et argiles sableuses
 HELV Grès calcaires
 EPAQ Marnes
 AQU1 Grès calcaires

Oligocène

EPCM Marnes et 'molasses'
 OUNP Calcaires, calc. lacustres et calcaires gréseux

Éocène

EPOL "Molasses" Oligocène et à Éocène sup
 EOCS Grès et sables +/- argileux Éocène sup (Pliabonien)
 EPES "Molasses" marnes et argiles Éocène sup à moy
 EOCM Grès et sables +/- argileux Éocène moy (Barbonien - Lutétien)
 EPEO "Molasses" et marnes Éocène moy à inf
 EOC1 Grès et sables +/- argileux Éocène moy à inf (Lutétien - Priabonien)
 EPCL Argiles et marnes Éocène inf à Massichien

Crétacé

CAMP Calcaires et calcaires gréseux Campanien sup à Massichien

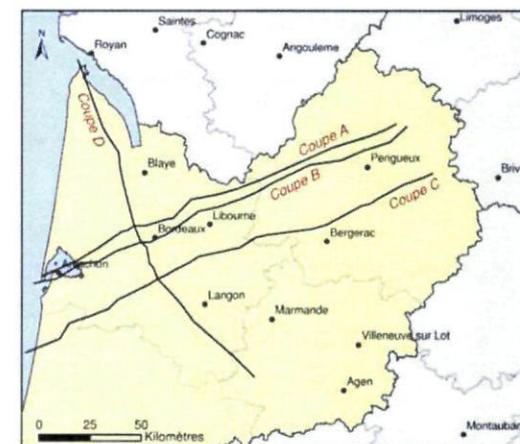
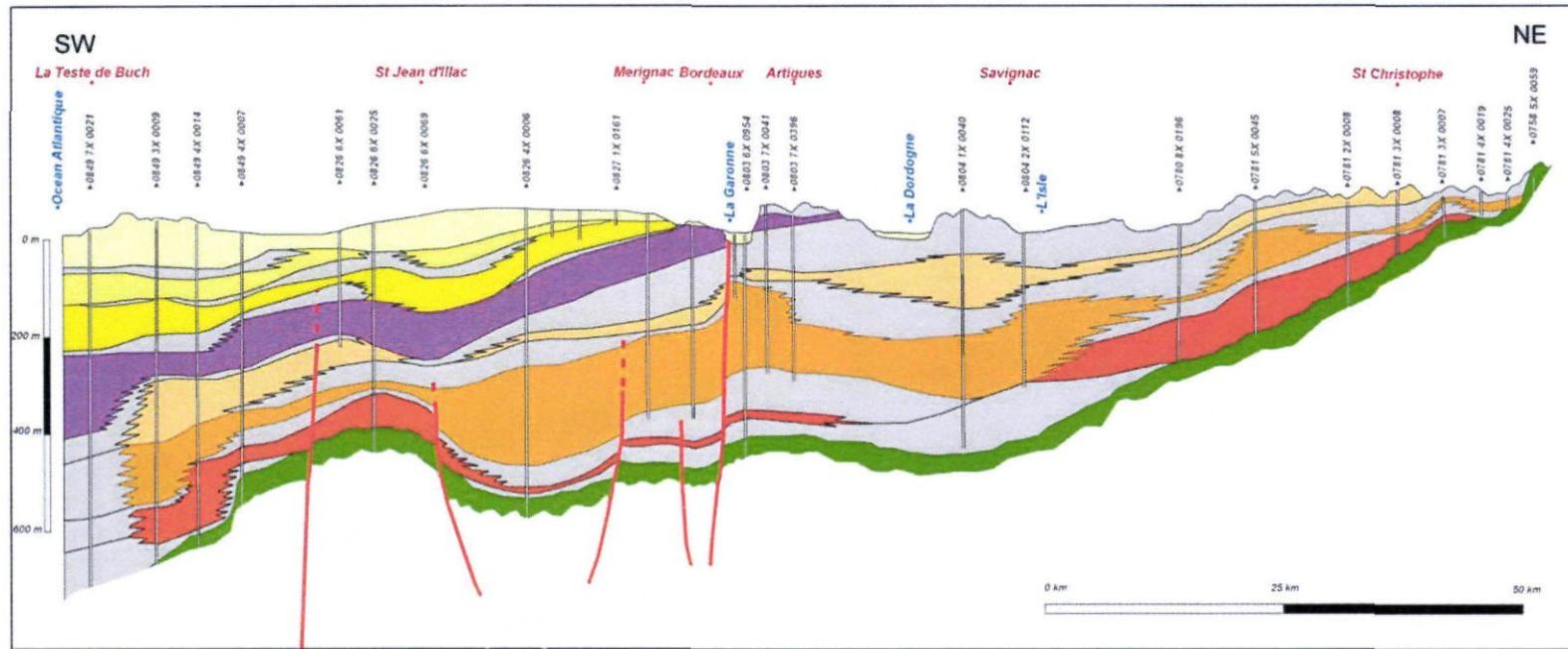


Figure 35 : Coupe hydrogéologique schématique dans les formations tertiaires - Coupe A (SW-NE)



Coupe B - Légende :

Plio-Quaternaire

QUAT Sables, graviers et sables argileux Plio-Quaternaire

Miocène

EPHE Argiles et argiles sableuses Miocène sup. (Tortonien)
 HELV Grès calcaires Miocène moy. ("Helvétien")
 EPAQ Marnes Miocène
 AQUI Grès calcaires Miocène inf. (Burdigalien - Aquitainien)

Oligocène

EPCM Marnes et "molasses" Miocène à Oligocène
 OLNP Calcaires, calc. lacustres et calcaires gréseux Oligocène inf. (Rupélien)

Eocène

EPOL "Molasses" Oligocène inf. à Eocène sup.
 EOCS Grès et sables +/- argileux Calcaires gréseux Eocène sup. (Pliabonien)
 EPES "Molasses" marnes et argiles Eocène sup. à moy.
 EOCC Grès et sables +/- argileux Calcaires et calc. gréseux Eocène moy. (Bartonien - Lutétien)
 EPEO "Molasses" et marnes Eocène moy. à inf.
 EOCC Grès et sables +/- argileux Calcaires et calc. gréseux Eocène moy. à inf. (Lutétien - Yprésien)
 EPCA Argiles et marnes Eocène inf. à Maastrichtien

Crétacé

CAMP Calcaires et calcaires gréseux Campanien sup. à Maastrichtien

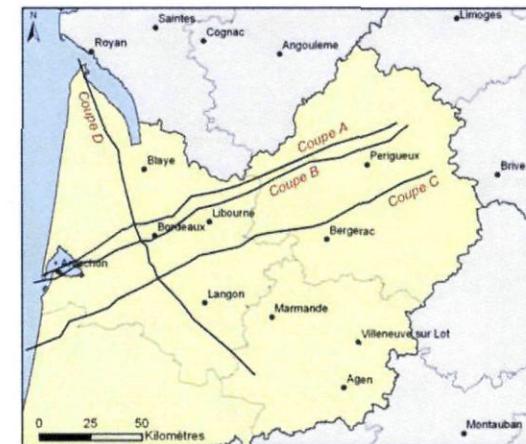


Figure 36 : Coupe hydrogéologique schématique dans les formations tertiaires - Coupe B (SW-NE)
 BRGM/RP-59959-FR – Rapport final

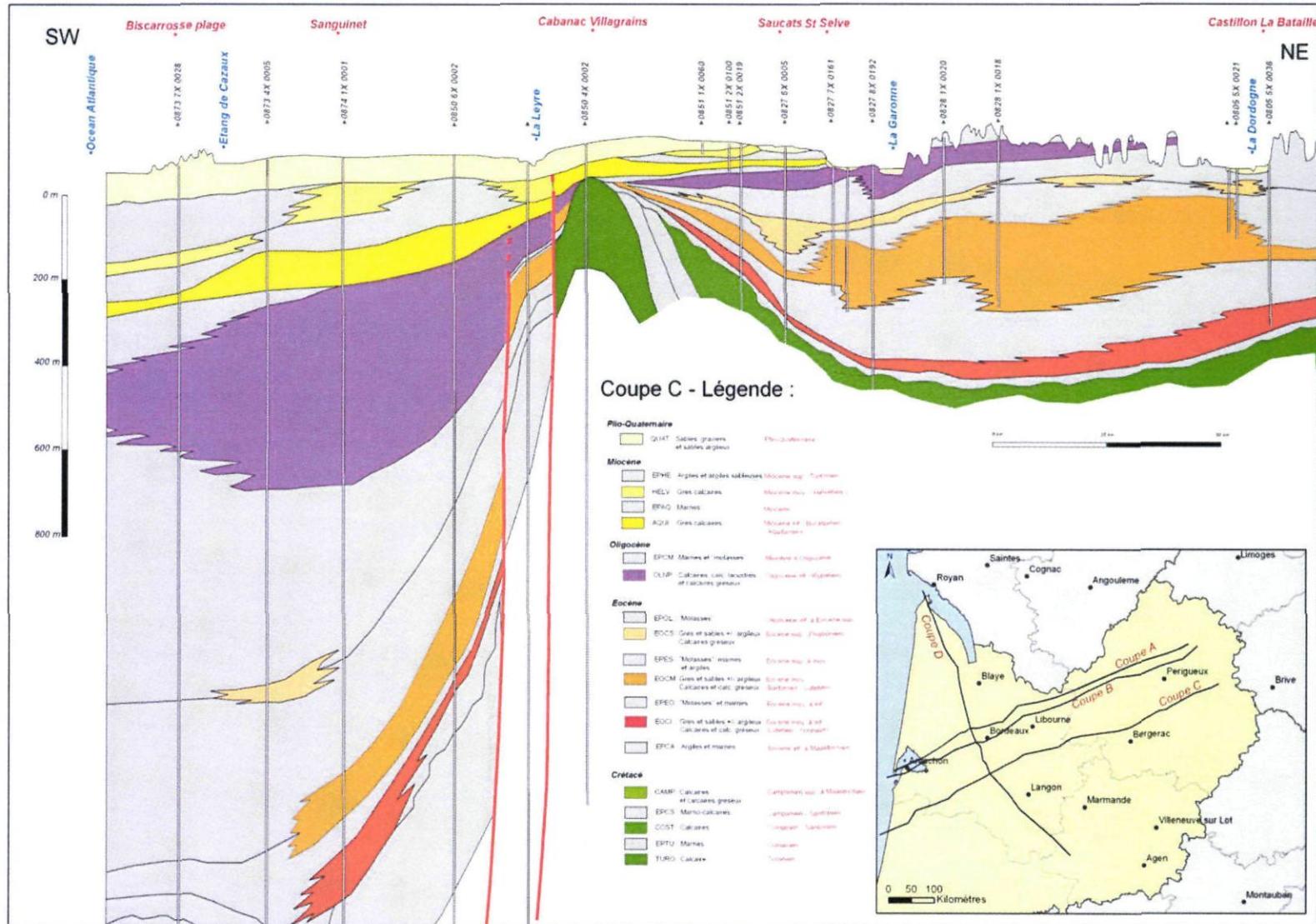
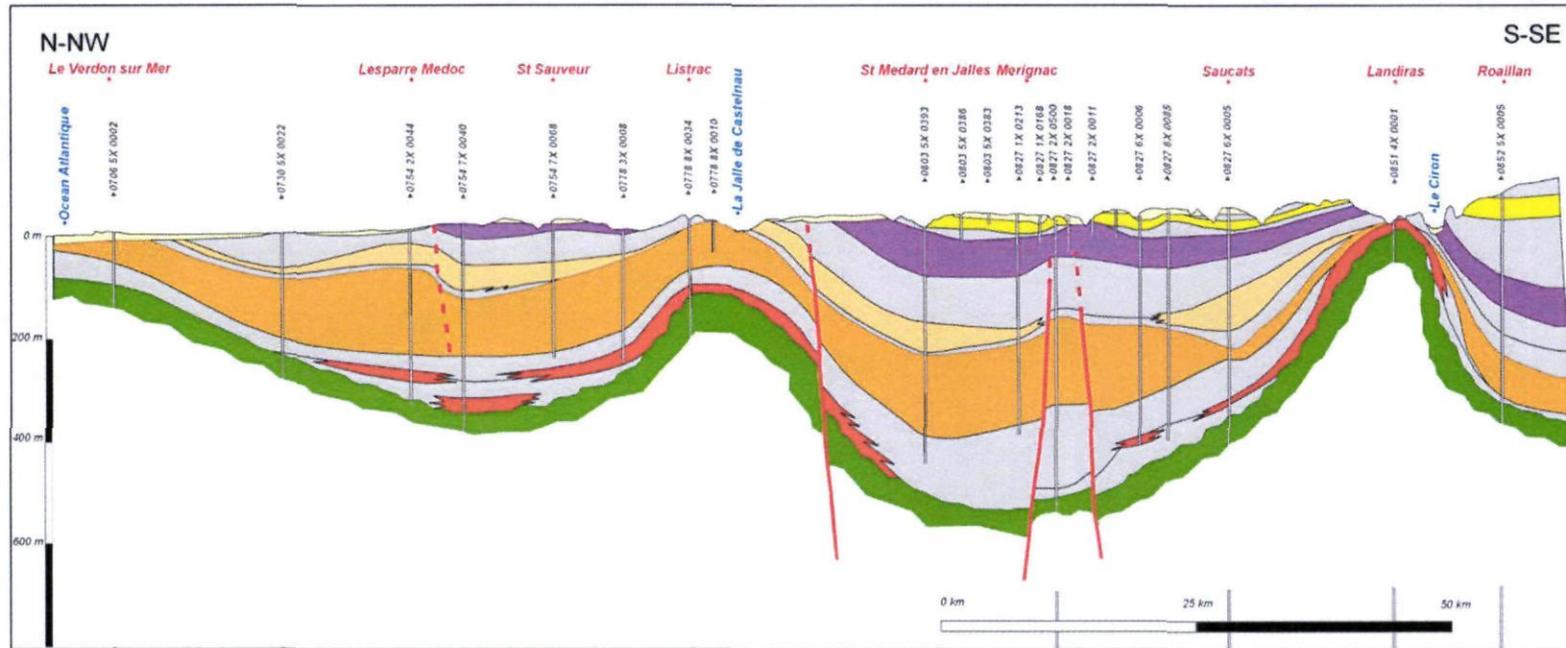


Figure 37 : Coupe hydrogéologique schématique dans les formations tertiaires - Coupe C (SW-NE)



Coupe D - Légende :

Plio-Quaternaire

QUAT Sables, graviers et sables argileux Plio-Quaternaire

Miocène

EPHE Argiles et argiles sableuses Miocène sup. (Tortonien)
 HELV Grès calcaires Miocène moy. ("Helvetien")
 EPAQ Marnes Miocène
 AQUI Grès calcaires Miocène inf. (Burdigalien - Aquitainien)

Oligocène

EPCM Marnes et "molasses" Miocène à Oligocène
 OLNP Calcaires calc. lacustres et calcaires gréseux Oligocène inf. (Rupélien)

Eocène

EPOL "Molasses" Oligocène inf. à Eocène sup.
 EOCS Grès et sables +/- argileux Eocène sup. (Friborien)
 EPCS Calcaires gréseux
 EPES "Molasses" marnes et argiles Eocène sup. à moy.
 EOCS Grès et sables +/- argileux Eocène moy.
 EPCS Calcaires et calc. gréseux (Bartonien - Lutétien)
 EPEO "Molasses" et marnes Eocène moy. à inf.
 EOCS Grès et sables +/- argileux Eocène moy. à inf. (Lutétien - Yprésien)
 EPCS Calcaires et calc. gréseux
 EPCA Argiles et marnes Eocène inf. à Maastrichtien

Crétacé

CAMP Calcaires et calcaires gréseux Campanien sup. à Maastrichtien

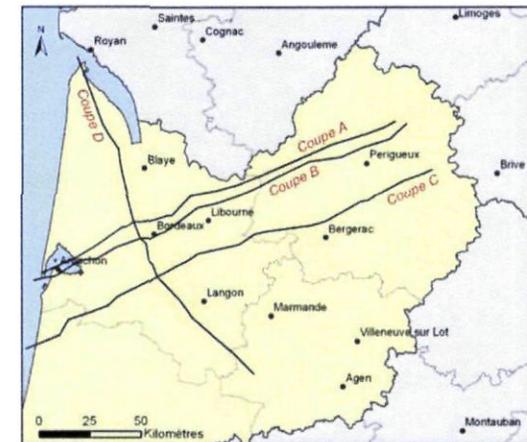


Figure 38 : Coupe hydrogéologique schématique dans les formations tertiaires - Coupe D (N-NW - S-SE)



5. Conclusions

Les travaux présentés ici s'inscrivent dans le cadre du module 1 de l'année 2 (2010-2011) de la convention "Gestion des eaux souterraines en région Aquitaine" (convention comprenant 6 modules). Ils portent sur le développement et la maintenance du Modèle Nord Aquitain (MONA) de gestion des nappes.

L'objectif principal de ce module est de disposer d'un outil de gestion et d'aide à la décision destiné à définir au mieux les stratégies d'exploitation des ressources en eau souterraines de la région. Le programme de cette année 2 est scindé en deux parties :

- ***Une première partie qui s'est focalisée sur la version actuelle du MONA (Version 3.3b)*** avec l'objectif d'améliorer sa représentativité. En effet, le passage du modèle au pas de temps trimestriel sur une courte période a permis de préciser les coefficients d'emménagement du modèle. Par ailleurs, l'actualisation des données d'entrées (prélèvements, flux d'infiltration) et des chroniques d'observation sur la période 2008-2009 permet de bénéficier d'un outil le plus à jour possible.
- ***Dans un second temps, l'élaboration d'une version actualisée de la géométrie du modèle (qui conduira à une Version 4 de ce modèle) a été initiée*** afin d'obtenir une plus grande finesse de représentation des aquifères. Cela permettra de mieux traiter les problèmes posés à une échelle plus locale, en particulier ceux soulevés par le SAGE "Nappes profondes de Gironde", mais aussi ceux qui émergent dans les départements voisins de Lot-et-Garonne et de la Dordogne.

Le passage du modèle au pas de temps trimestriel montre que sur la période considérée les niveaux observés sont bien restitués par le modèle pour la plupart des chroniques (en niveaux, en phase, en pente et en amplitude de variations). Néanmoins le calage au pas de temps trimestriel dans les nappes du secondaire est un peu moins abouti que celui des nappes du tertiaire du fait de leur incorporation plus récente dans le modèle. Mais in fine, le travail réalisé a permis d'améliorer localement la représentativité du modèle.

Par ailleurs, l'actualisation du modèle sur la période 2008-2009 a permis de démontrer que le modèle retranscrit bien les variations de charge avec les nouvelles données d'entrée sans qu'aucune modification des paramètres hydrodynamiques n'ait été nécessaire. Le calage du modèle peut donc être considéré comme robuste.

L'amélioration de la géométrie du modèle doit permettre de représenter à une échelle plus fine la complexité des réservoirs du Nord du Bassin aquitain, l'objectif final étant d'obtenir une géométrie de l'ensemble des couches, aquifères et épontes, à la maille de 500 m. Le modèle géologique comportera in-fine 29 couches dont 15 aquifères et 14 épontes. Actuellement seul les 15 aquifères sont représentés dans le modèle hydrodynamique.

Le travail réalisé cette année sur ce volet de l'étude a consisté à renseigner une base de données de référence compilant : la description de près de 3 300 forages, les données diagraphiques disponibles, les affleurements cartographiés des couches aquifères issus du Référentiel Hydrogéologique BD LISA et le tracé des failles.

Les bases de données géologiques réalisées lors d'études antérieures (modèle Plio-Quaternaire, modèle Oligocène, modèle Estuaire et modèle Nord-Aquitain) ont servi de socle à ce travail. Il a néanmoins été nécessaire de mettre en cohérence l'ensemble des informations et d'enrichir la base pour la rendre la plus complète et la plus fiable possible.

En préalable à la modélisation géologique, il était nécessaire d'avoir une vision d'ensemble de la géométrie des réservoirs du nord du Bassin aquitain. C'est pourquoi de grandes coupes hydrogéologiques ont été dressées à partir des forages intégrés dans la base de données décrite précédemment.

En année 3 de la convention régionale, le modèle géologique sera finalisé. Les coupes décrites dans le présent rapport (Figure 35 à Figure 38) serviront de référence lors de la construction du modèle. Les données brutes collectées en année 2 (forages, diagraphies, carte géologique, MNT) serviront de base au travail de modélisation. L'intégration de forages complémentaires servira à consolider la base géologique. Par ailleurs, l'incorporation des données diagraphiques numériques initiée en année 2 sera poursuivie en année 3 afin d'avoir une vision intégrée des systèmes étudiés et d'aboutir à une définition des réservoirs la plus cohérente possible.

La validation du modèle nécessitera une vérification de la cohérence globale des données. Celle-ci sera effectuée en année 3 par l'observation des cartes en isohypses et isopaques et par la réalisation de coupes sériées dans le modèle comparées notamment aux coupes réalisées dans le cadre de l'année 2. Ce travail sera effectué en concertation avec le géologue régional et d'un géologue expert.

En parallèle, les données d'entrée de la version 3.3b du modèle ainsi que les chroniques d'observation seront actualisées avec les données de l'année 2010. Le but étant de maintenir le modèle opérationnel et disposer ainsi d'un outil d'aide à la décision, d'évaluation et de gestion des ressources. Le modèle sera alors dans sa version MONA V3.3b-2010.

6. Bibliographie

Amraoui N., Bichot F., Platel J.P., et Seguin J.J. (1998). Gestion des eaux souterraines en Aquitaine. Année 2 - Evaluation des ressources. Ajout des couches du Santonien-Turonien, du Cénomanién et du Jurassique moyen et supérieur au modèle nord aquitain. BRGM/RR-40110-FR.

Amraoui N., Bichot F., Seguin J.J., Platel J.P., et Sourisseau B. (1999). Restructuration du modèle nord aquitain de gestion des nappes. Réalisation de 6 simulations pour le Schéma de Gestion des Eaux du département de la Gironde. BRGM/RR-40224-FR.

Ayache B., Labarthe B., Pédrón N., et Saplairoles M. (2011). Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA -Bassin Adour-Garonne - Année 4 - Harmonisation des entités hydrogéologiques à l'échelle du bassin. Complément au rapport au Rapport BRGM/RP-58198-FR.

Bichot F., Louis J.P., Astruc J.G., Dufour P., et Platel J.P. (1999). Gestion des eaux souterraines en Aquitaine. Année 3 - Évaluation des ressources - Modélisation des aquifères du Miocène - Recueil et synthèse de données - BRGM/RR-40728-FR.

Bichot F., Seguin J.J., Platel J.P., Rosiau M., et Dufour P. (2000). Gestion des eaux souterraines en Aquitaine. Année 4 - Évaluation des ressources. Modélisation des aquifères du Miocène - Recueil et synthèse de données - BRGM/RP-50466-FR.

Bourgine B. (2006). Modélisation géologique 3D à l'aide du programme MultiLayer - Version 3 - BRGM/RP-53111-FR.

Braneyre M. (1993) Modèle conceptuel sommaire. Multicouche aquitain, BRGM/RR-37322-F.

Braneyre M., Chigot D., Lambert M., Moreau C.F., Sourisseau B., Platel, J.P., Dubreuilh, J. et Gaaloul N. (1993) Modélisation mathématique multicouche des trois aquifères exploités du bassin sédimentaire nord-aquitain (Oligocène - Éocène - Crétacé) - BRGM/RR-37361-FR.

Braneyre M., Lambert M., et Sourisseau B. (1994). Rapport de synthèse du modèle régional multicouche du Bassin Nord-aquitain. Calage en régime transitoire et simulations - BRGM/RR-38006-FR.

Corbier P., Karnay G., Bourguine B., et Saltel M. (2010). Gestion des eaux souterraines en région Aquitaine. Reconnaissance des potentialités aquifères du Mio-Plio-Quaternaire des Landes de Gascogne et du Médoc en relation avec les SAGE - Module 7 , Année 1. Convention 2008-2013. Rapport final - BRGM/RP-57813-FR.

Gomez E., Pédrón N., et Buscarlet E. (2010). Utilisation du Modèle Nord-Aquitain (MONA) pour appuyer la définition des volumes prélevables dans les aquifères profonds du Nord du Bassin aquitain - BRGM/RP-57878-FR.

Larroque F. (2004). Gestion globale d'un système aquifère complexe, Application à l'ensemble aquifère multicouche médocain.» Université Michel de Montaigne - Bordeaux 3.

Pédrón N., Seguin J.J., et Bichot F. (2001). Gestion des eaux souterraines en Aquitaine. Année 5. Évaluation des ressources. Modélisation des aquifères du Miocène. Calage et simulations. BRGM/RP-51176-FR.

Pédrón N., Capdeville J.P., Mauroux B., Baudry D., et Pouzadoux C. (2003a). Évaluation de la ressource en eau de l'Éocène dans le Bergeracois. Année 1. Recueil et synthèse des données - BRGM/RP-52528-FR.

Pédrón N., Seguin J.J., et Capdeville J.P. (2003b). Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Développements et maintenance du Modèle Nord Aquitain de gestion des nappes - Module 4 - Année 1. BRGM/RP-52602-FR.

Pédrón N., Platel J.P., et Lopez B. (2005). Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Développements et maintenance du Modèle Nord Aquitain de gestion des nappes - Modules 4 - Année 2 - Rapport final - BRGM/RP-53659-FR.

Pédrón N., et Lopez B. (2006). Actualisation du modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes. Période 2001 - 2003. Rapport final - BRGM/RP-54220-FR.

Pédrón N., Platel J.P., et Bourguin B. (2006). Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes – Module 4 – Année 3 – BRGM/RP-55242-FR.

Pédrón N., Platel J.P., et Abou Akar A. (2008). Évaluation de la ressource en eau de l'Éocène dans le Bergeracois. Phase 2 : Finalisation de l'inventaire, intégration des données au modèle régional et simulations. Rapport final. - BRGM/RP-56301-FR.

Pédrón N., Platel J.P., Bourguin B., et Loiseau J.B. (2008). Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Année 4 - Module 4 - Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes - RP-56614-FR.

Platel .J.P., Schnebelen N., Le Nindre Y.M., Saplaïroles M., et Dufour P. (2000). Gestion des eaux souterraines en Aquitaine. Année 4. Opération sectorielle - Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise - Synthèse des connaissances géologiques - Etat des connaissances hydrogéologiques - BRGM/RP-50468-FR.

Platel J.P., Pédron N., Gomez E., et Winckel A. (2006). Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine. Caractérisation de la crête piézométrique de l'Éocène au Sud de l'Estuaire de la Gironde. Module 2 - Année 3. Finalisation et suivi du réseau de surveillance. Modélisation hydrodynamique. Rapport final - BRGM/RP-55240-FR.

Salte! M. (2008) Impact de structures géologiques sur l'alimentation de systèmes aquifères profonds - Fonctionnement hydrogéologique des antiformes du sud de Bordeaux. Université de Bordeaux 3.

Salte! M., Pédron N., Platel J.P. et Bourgine B. (2010). Atlas des zones à risque du SAGE Nappes Profondes de Gironde - Phase 2 - Problématique du dénoyage de l'Oligocène au Sud de l'agglomération Bordelaise, BRGM/RP-58156-FR.

Seguin J.J. (1999a) Restructuration du modèle nord-aquitain de gestion des nappes. Correction du biais de calage du modèle. R40711.

Seguin J.J. (1999b) Contrôle qualité et gestion des nappes d'eaux souterraines en Gironde. Actualisation du modèle nord-aquitain de gestion des nappes. Période 1997-1998. BRGM/RR-40760-FR.

Seguin J.J. (2002) Gestion des eaux souterraines en Aquitaine. Actualisation du modèle nord-aquitain. Période 1999-2000. BRGM/RP-51758-FR.

Thiéry D. (1990) Logiciel MARTHE Modélisation d'Aquifère par maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Écoulements - R-32210.

Thiéry D. (2006) Didacticiel du pré-processeur WinMarthe v4.0 - Rapport final - BRGM/RP -54652-FR.

Thiéry D. (2010) Didacticiel du code de calcul Marthe v7.0 - Votre premier modèle - BRGM/RP-58632-FR.



Annexe 1

Historique du Modèle Nord Aquitain

MONA V1

Elaboration d'un 1er modèle régional à mailles carrées de 5 km de côté au début des années 90 [(Braneyre, 1993) ; (Braneyre, et al., 1993) ; (Braneyre, et al., 1994)] fonctionnant en régime transitoire sur la période 1972-1992 et simulant les écoulements au sein de 4 couches aquifères : Mio-Plio-Quaternaire (à potentiels imposés), Oligocène, Éocène et Campano-Maastrichtien.

En 1996, 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, proposant des solutions alternatives permettant de limiter les prélèvements dans l'Éocène. Les partenaires ci-dessus ont demandé au BRGM d'utiliser le **MONA V1** pour tester les différentes solutions proposées par les cabinets d'étude du schéma. En 1998, une expertise du modèle réalisée à la demande de l'Agence de l'Eau a montré qu'il devait être amélioré pour arriver à un niveau de représentativité du milieu souterrain suffisant pour fonder des décisions d'investissements lourds, nécessaires pour mettre en œuvre les solutions du schéma. La prise en compte des différentes recommandations de l'expertise a permis de faire évoluer le modèle et d'aboutir à la version 2 décrite ci-dessous.

MONA V2

Version du modèle au pas de 5 km fonctionnant en régime transitoire sur la période 1972-1996 (**MONA V2-1996**) et simulant les écoulements au sein de 5 couches aquifères : Mio-Plio-Quaternaire (à potentiels imposés), Oligocène, Éocène, Campano-Maastrichtien, Turonien-Coniacien-Santonien (Amraoui, et al., 1999).

Cette version du modèle a été par la suite actualisée à deux reprises :

- en 1999 (Seguin, 1999b) avec les données 1997 et 1998 (**MONA V2-1998**). Cette version du modèle a permis de reprendre les simulations du Schéma Directeur de Gestion des Ressources en Eau de la Gironde pour tester différents scénarios d'exploitation des nappes et de réduction des prélèvements dans l'Éocène.
- en 2001 (Seguin, 2002) avec les données 1999 et 2000 (**MONA V2-2000**). Le modèle ainsi actualisé a été utilisé dans le cadre du SAGE "Nappes profondes de Gironde" pour simuler différents scénarios d'économie d'eau, aider à la définition des VMPO (Volumes Maximum Prélevables Objectifs) pour chacune des nappes visées par le SAGE, et proposer des indicateurs de l'état de la ressource.

Parallèlement, à la demande de la MISE de Gironde, des simulations ponctuelles ont été réalisées pour fonder les autorisations d'implantation et de prélèvements d'une dizaine d'ouvrages devant solliciter des nappes visées par le SAGE « Nappes Profondes ».

MONA V2B : Il existe une version du modèle 5 km fonctionnant en régime permanent avec 7 couches (+Cénomanien et Jurassique) développé au cours de l'année 2 de la convention « Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine 1996-2001 ».

MONA V3

Développements réalisés dans le cadre de la convention régionale « Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine » 2002-2006. Au cours de l'année 1 (Pédron, et al., 2003b), les améliorations suivantes ont été apportées :

- Passage du modèle à mailles carrées de 5 km de côté (MONA V2-2000) à une version 2 km avec adjonction de l'Aquitainien-Burdigalien, du Langhien-Serravallien (Helvétien) et du Plio-Quaternaire en remplacement de l'ancienne couche Mio-Plio-Quaternaire à potentiels imposés (MONA V3-2000).
- Subdivision de l'Éocène en 3 couches distinctes et réajustement de la géométrie de l'Oligocène (MONA V3.1-2000).

Au cours de l'année 2, la finalisation de la géométrie de l'Oligocène a été réalisée et le calage des trois couches de l'Éocène et celle de l'Oligocène effectués.

La version **MONA V3.1** du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes intègre donc 9 couches : Plio-Quaternaire, Langhien-Serravallien (Helvétien), Aquitainien-Burdigalien, Oligocène, Éocène supérieur, Éocène moyen, Éocène inférieur, Campano-Maastrichtien, et l'ensemble Turonien-Coniacien-Santonien.

Cette version du modèle a été actualisée en 2005 (Pédron, et al., 2006) avec les données de la période 2001-2003 (**MONA V3.1-2003**), puis partiellement en 2007 (uniquement les 3 couches de l'Éocène et du Campano-Maastrichtien) sur la période 2004-2006 (**MONA V3.1-2006p**) pour les besoins de l'étude sur l'évaluation des ressources dans le Bergeracois (Pédron, et al., 2008).

Au cours de l'année 3 (Pédron, et al., 2006), les travaux réalisés ont permis la subdivision de la couche du Turonien-Coniacien-Santonien en deux couches distinctes (Turonien et Coniacien-Santonien) et l'actualisation de la géométrie du Campano-Maastrichtien (**MONA V3.2**).

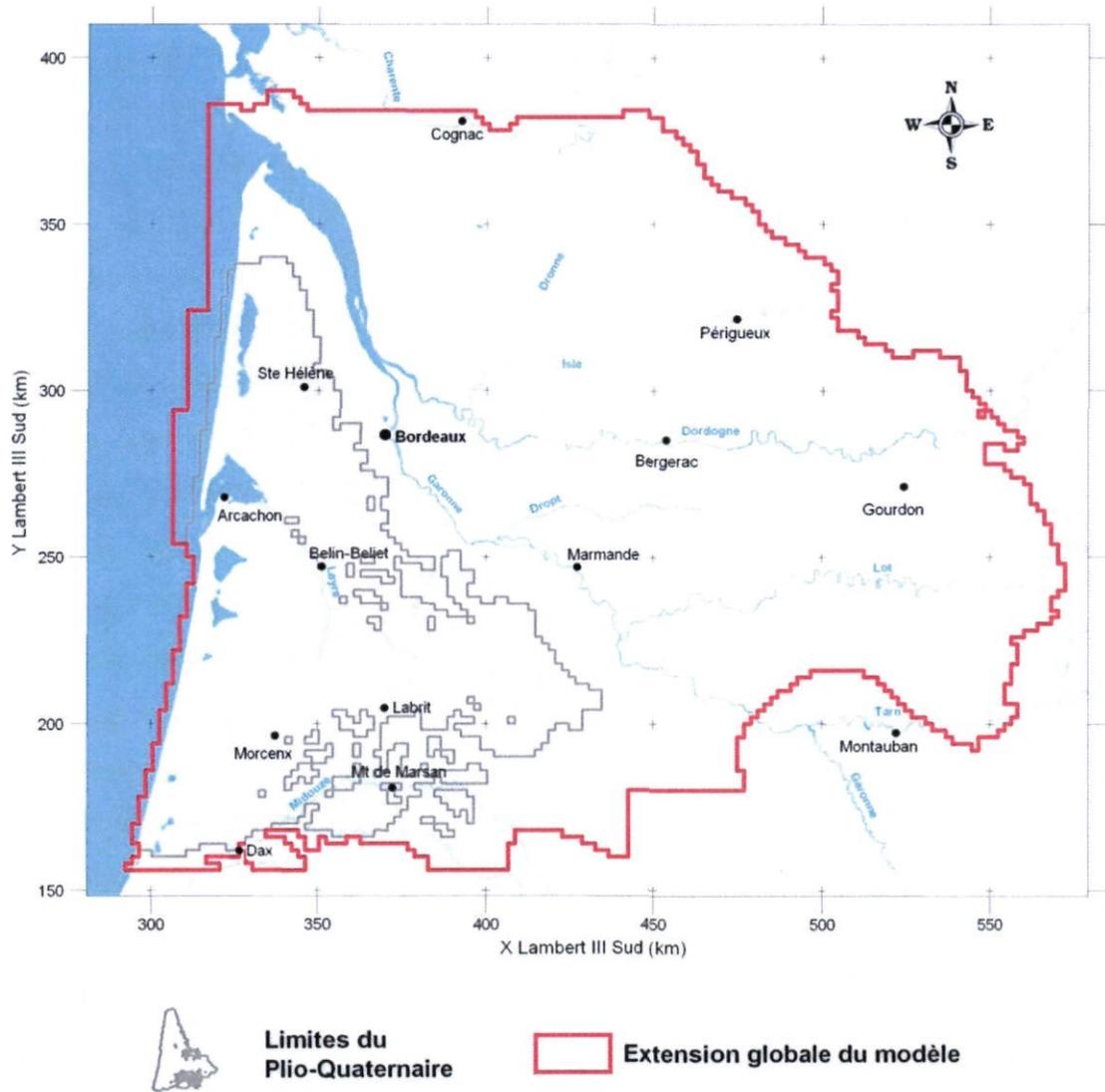
L'année 4 (Pédron, et al., 2008) a été consacrée à la réalisation d'un modèle géologique régional des couches du Cénomanien et du Jurassique (Bajocien, Bathonien-Calovo-Oxfordien, Kimméridgien et Tithonien) et à l'intégration de ces couches dans le modèle hydrodynamique pour aboutir à une version **MONA V3.3**.

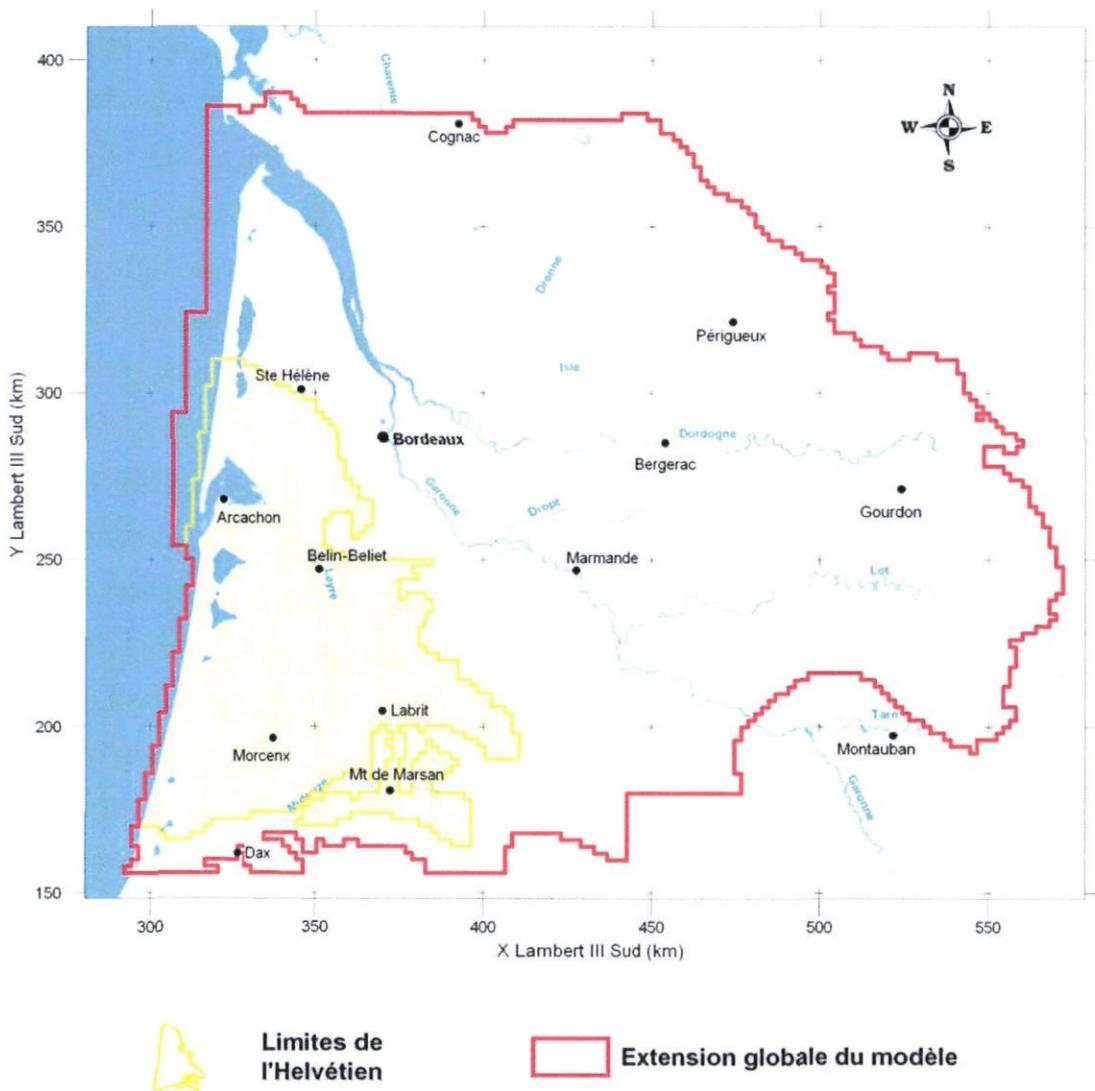
La version **V3.3b** correspond principalement à des ajustements de la loi de recharge de la nappe du Plio-Quaternaire et à une meilleure prise en compte du comportement des réservoirs autour de la structure de Villagrains-Landiras suite aux études récentes réalisées dans le secteur (Saltel, 2008).

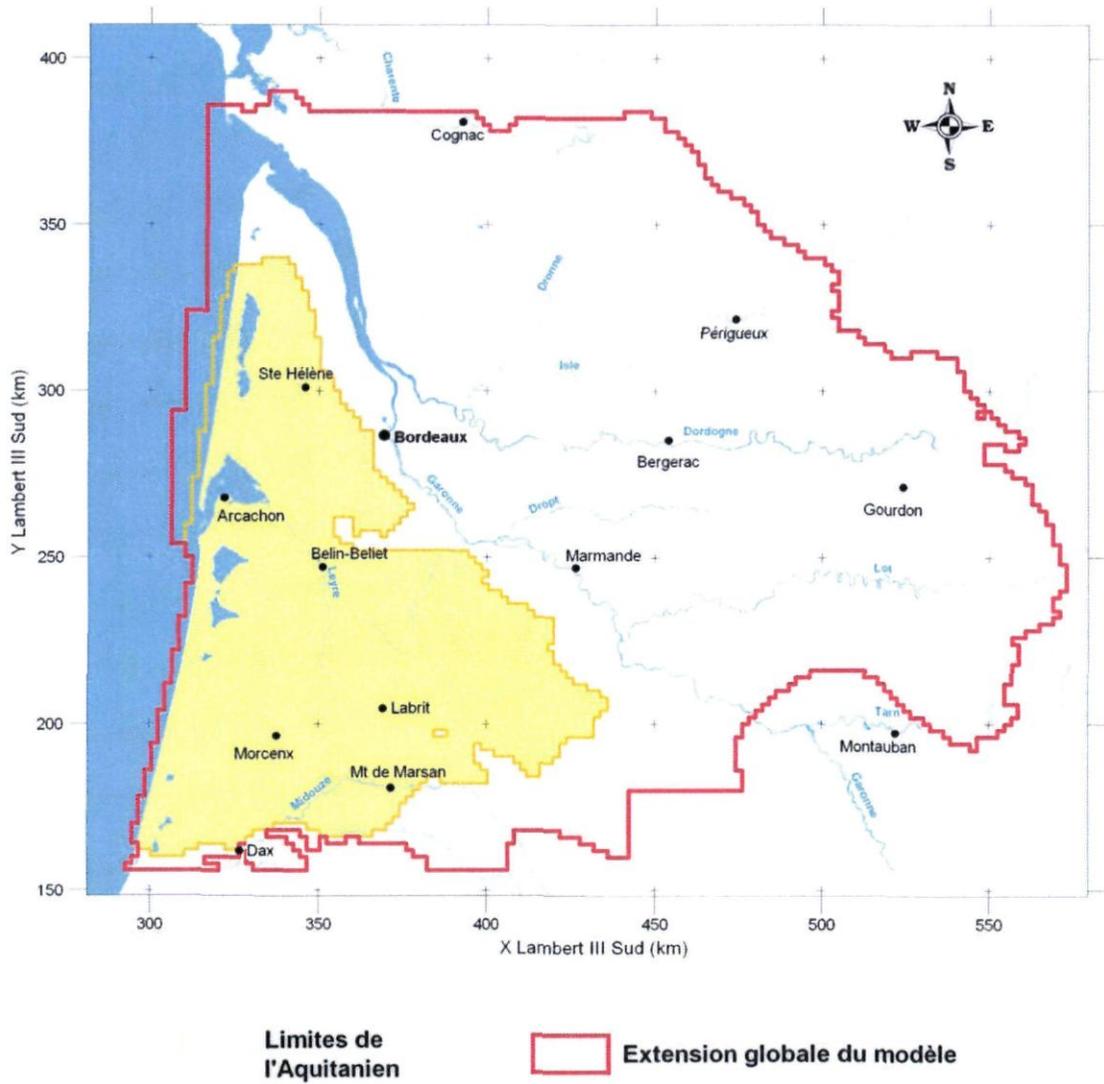
Annexe 2

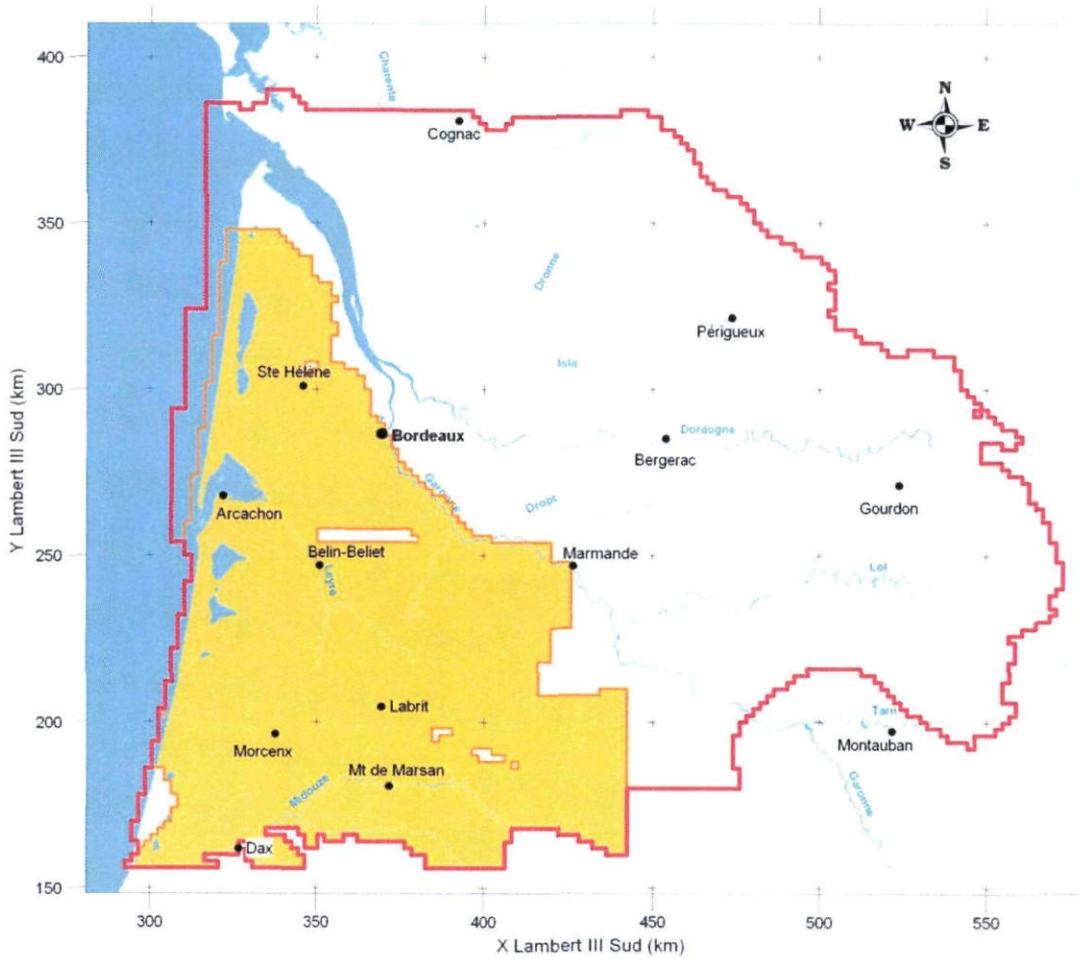
Extension des aquifères modélisés dans la version 3 du MONA







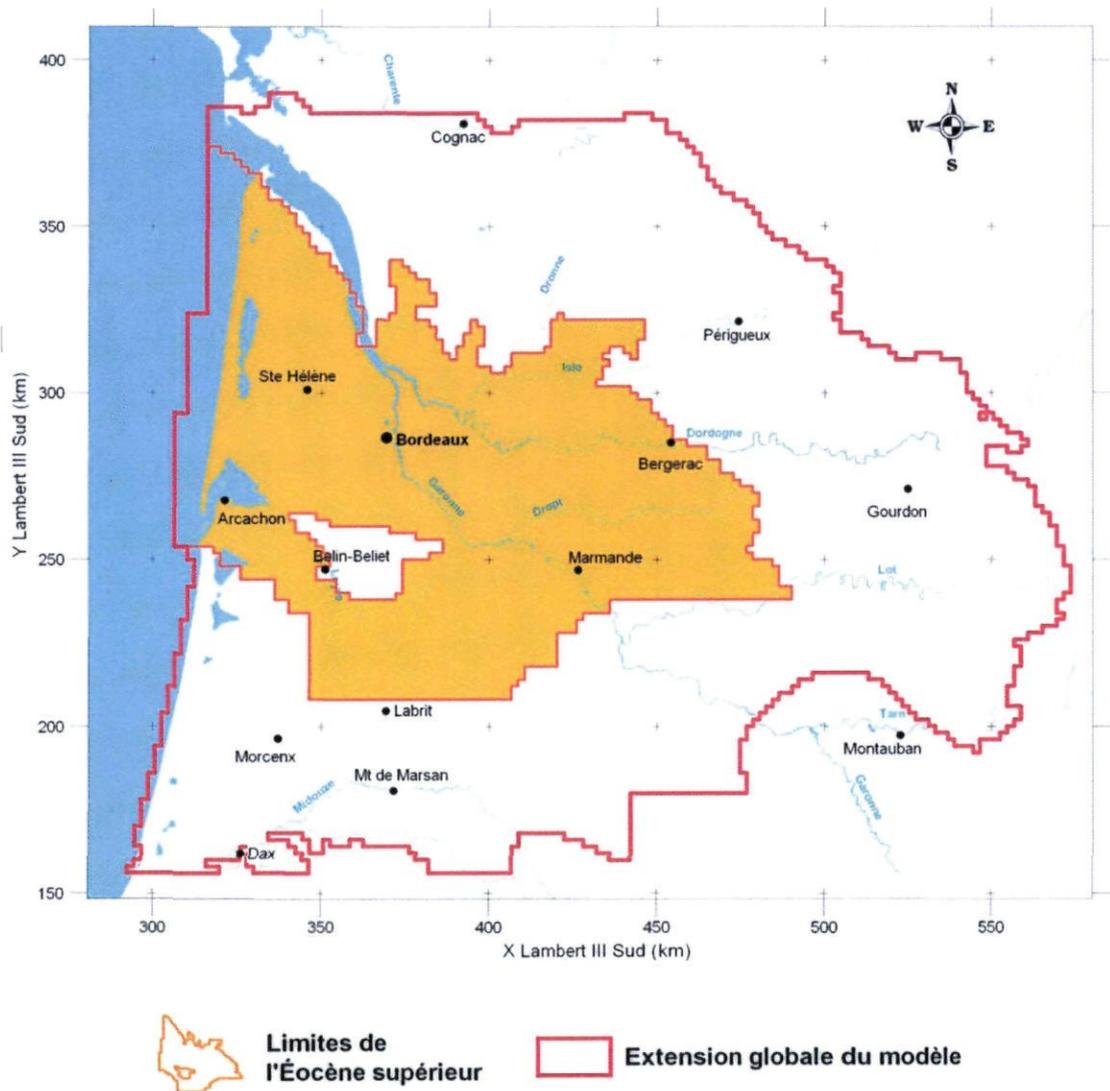


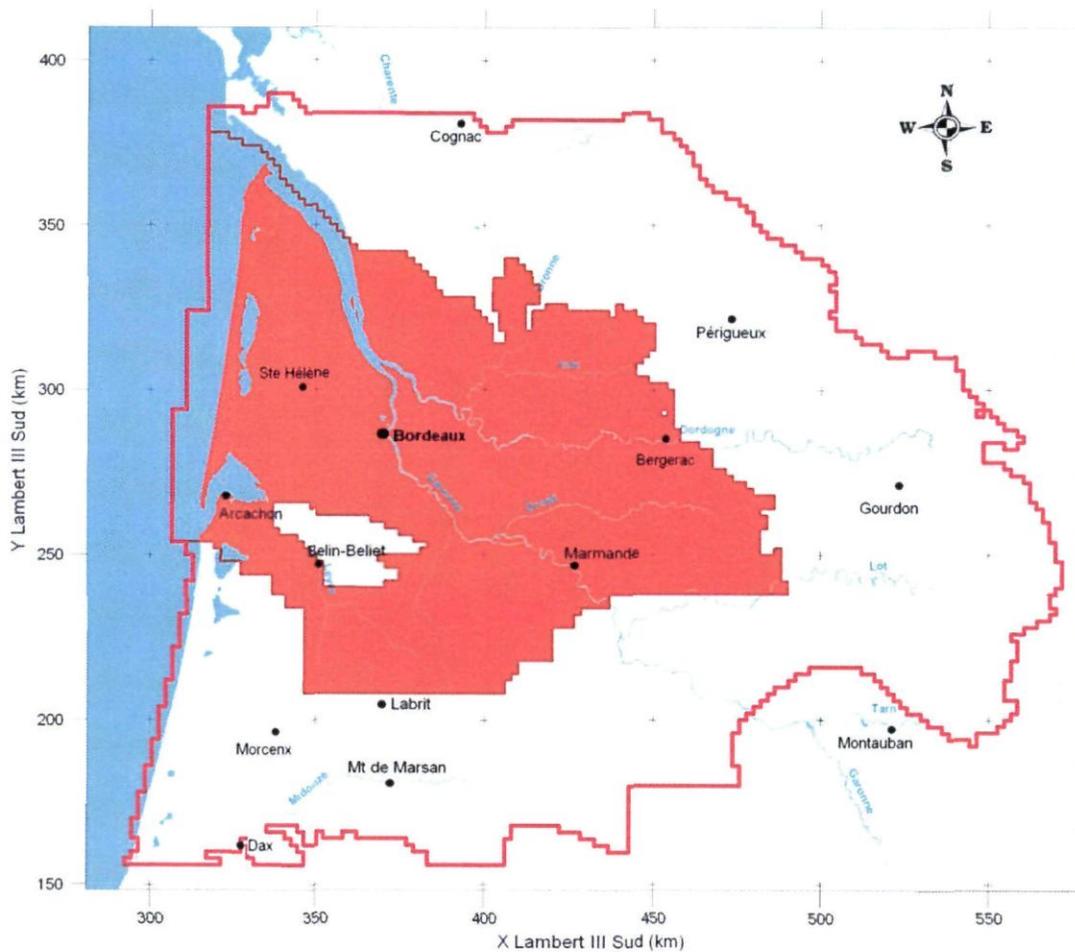


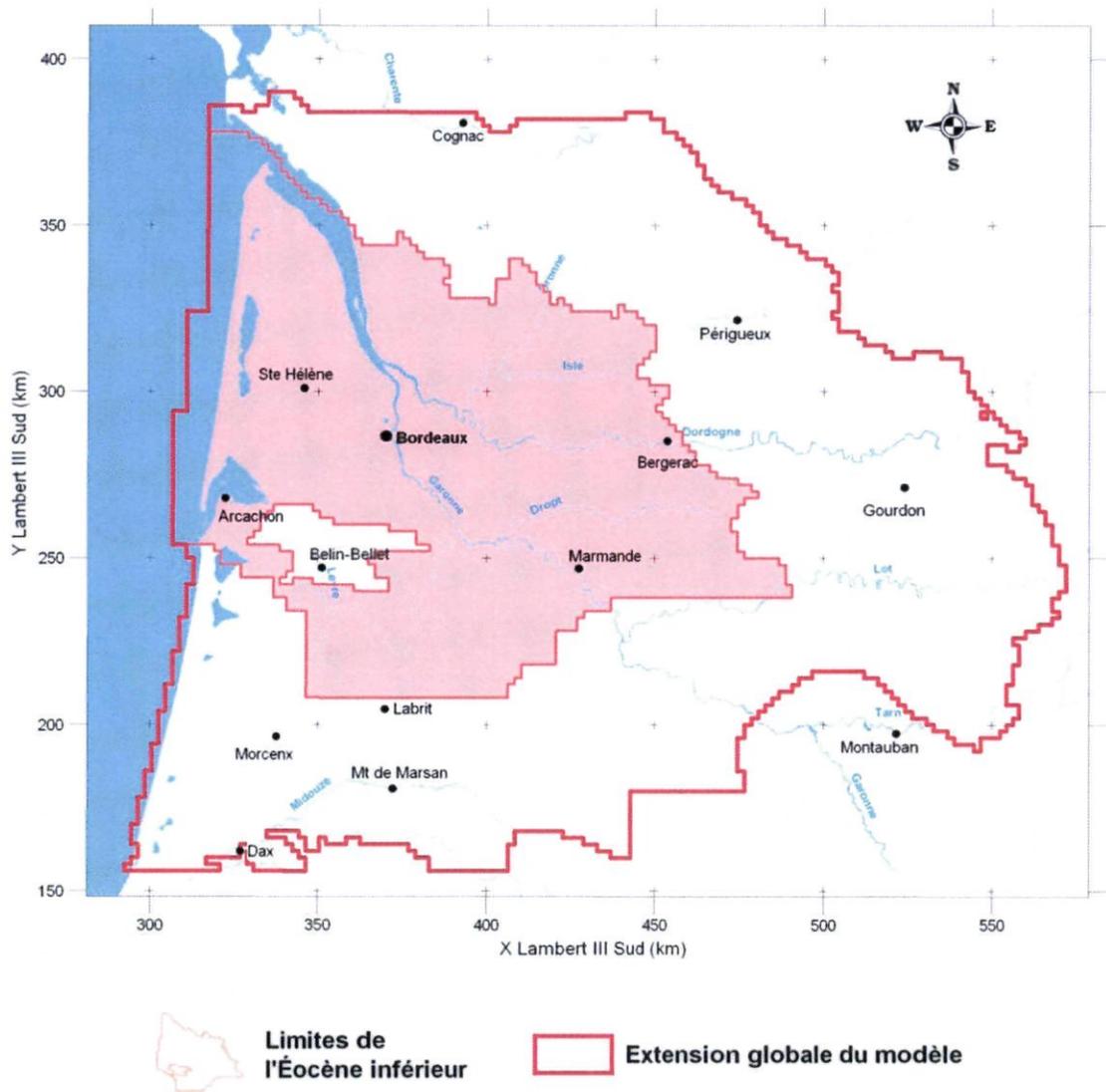
Limites de l'Oligocène

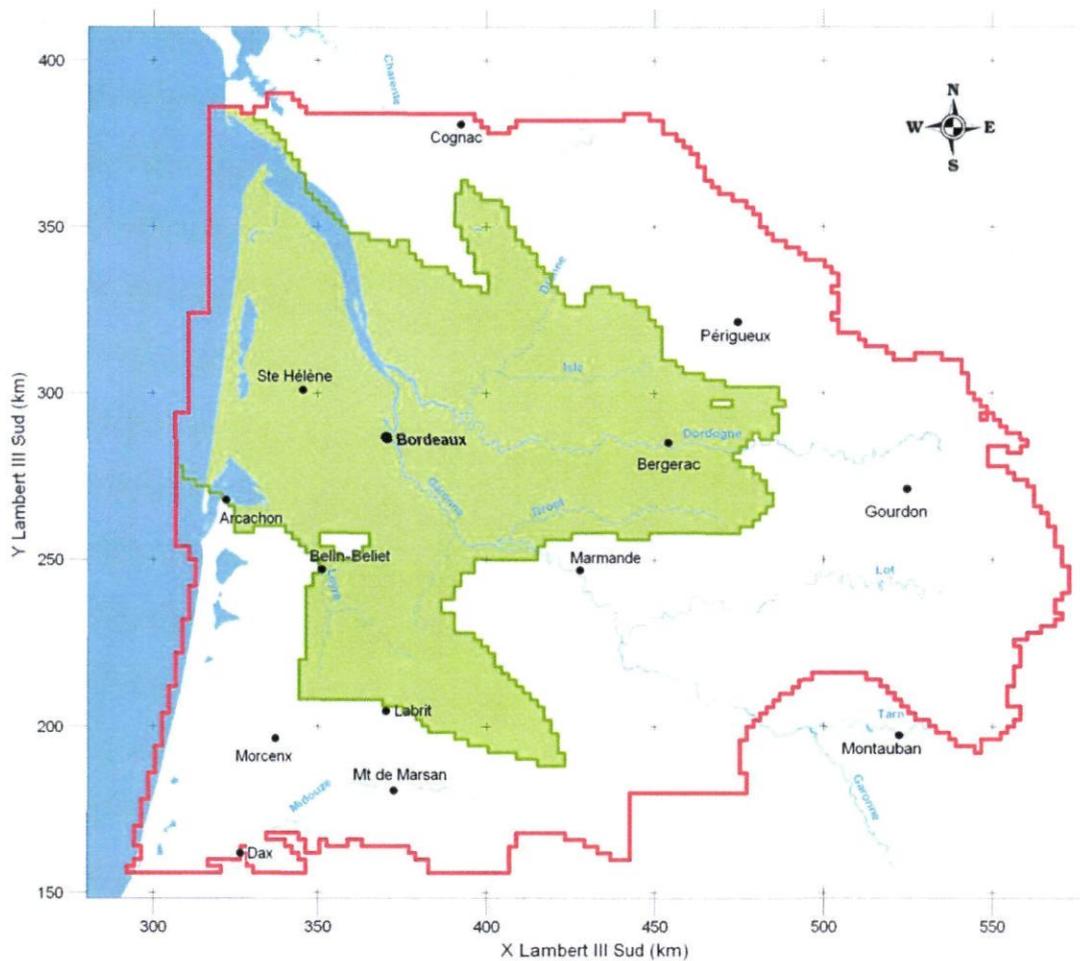


Extension globale du modèle





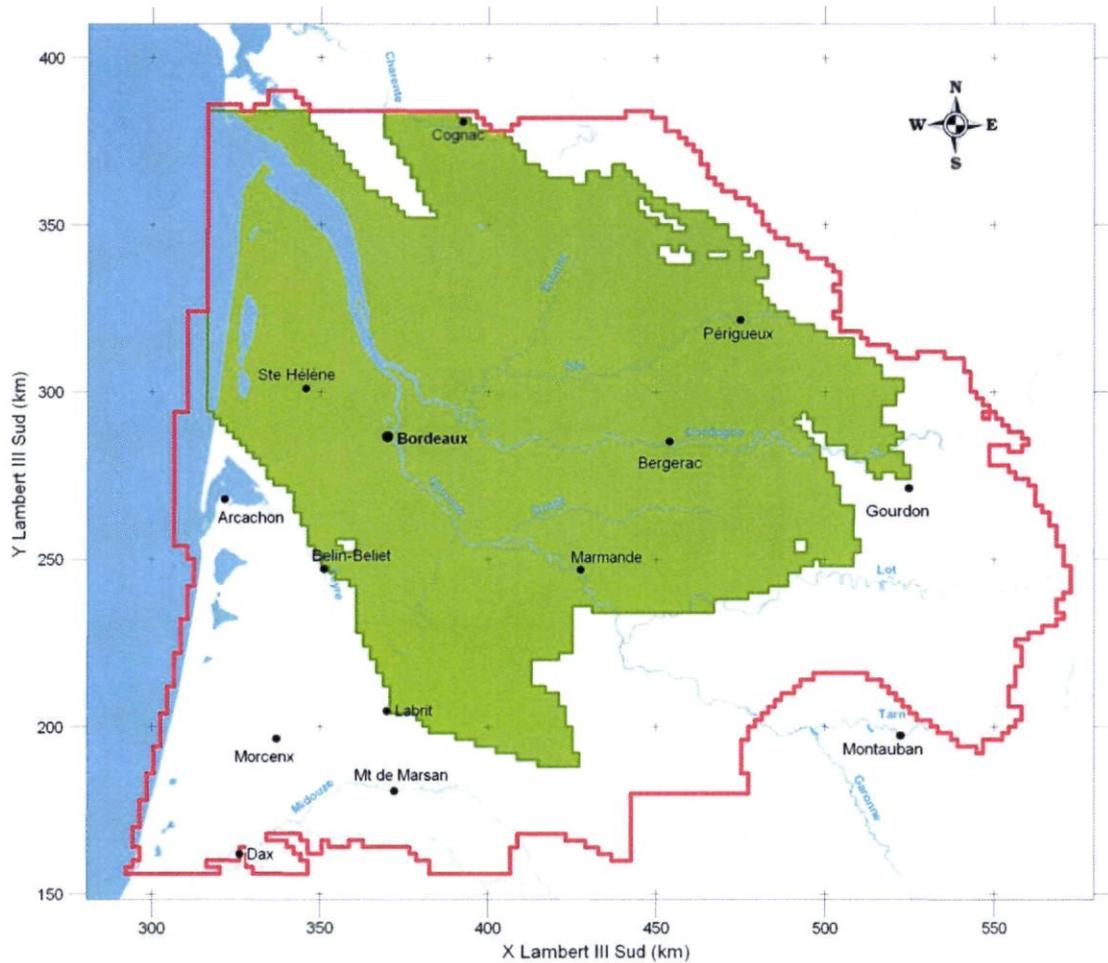




**Limites du
Campano-Maastrichtien**



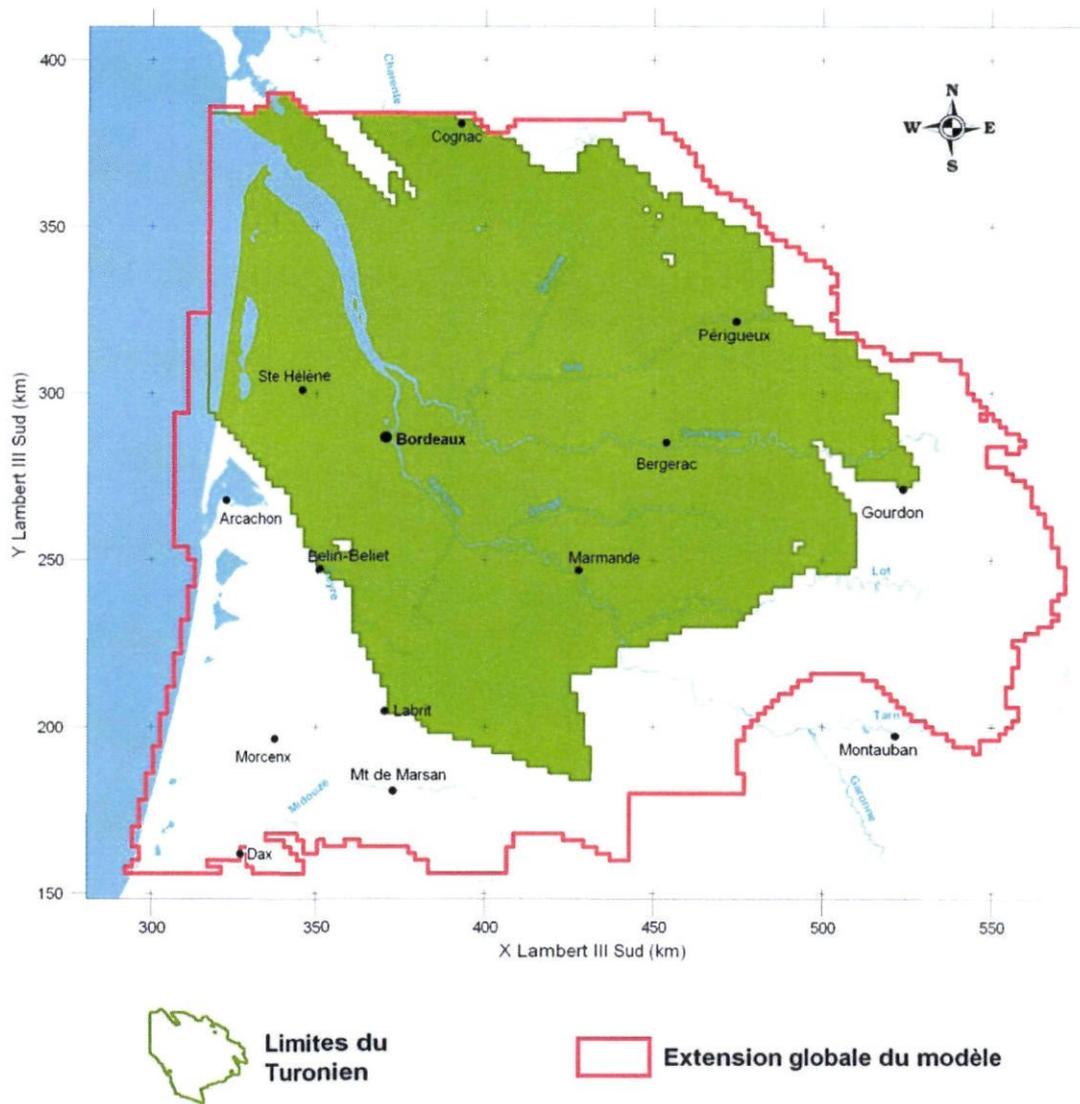
Extension globale du modèle

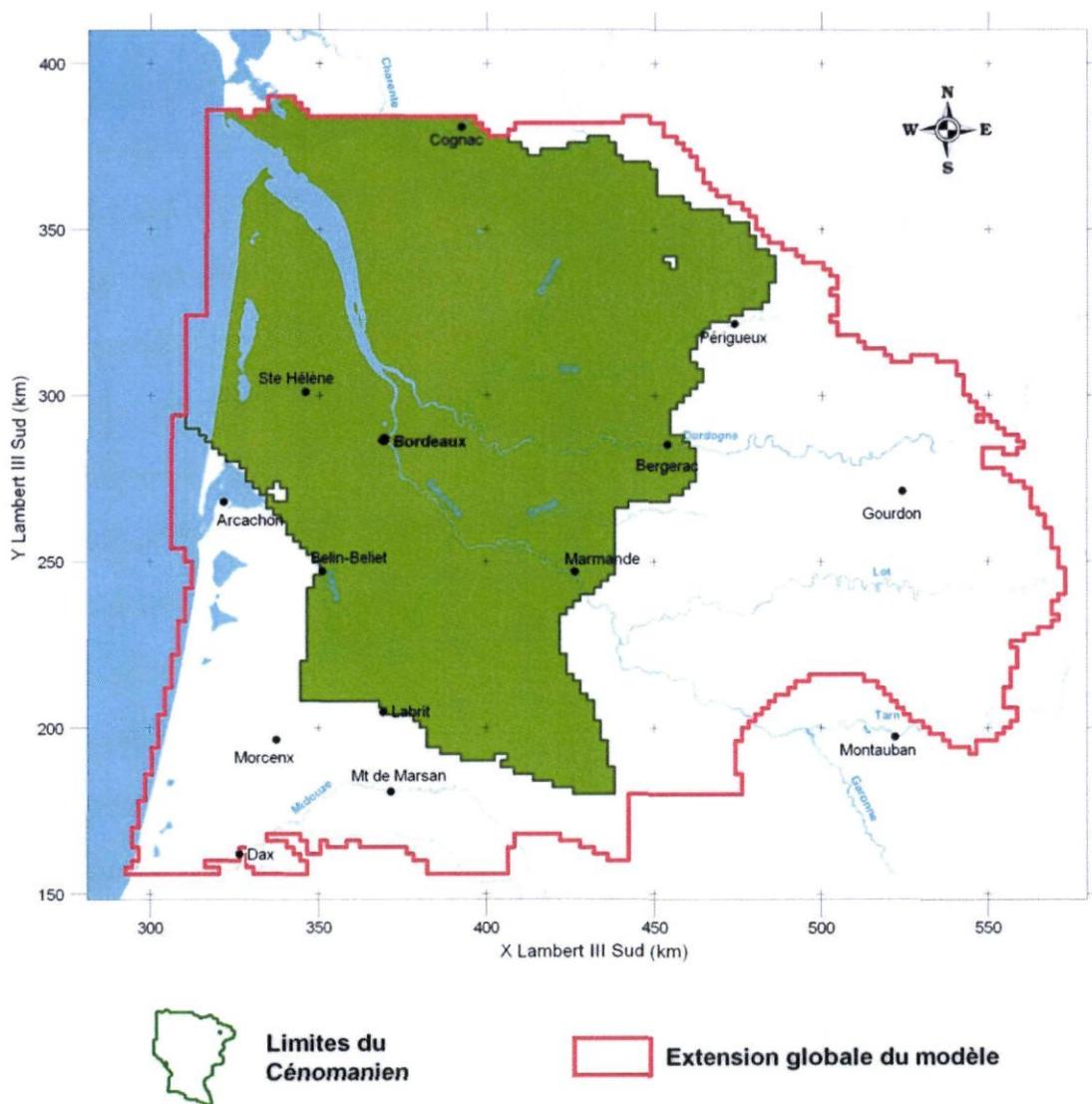


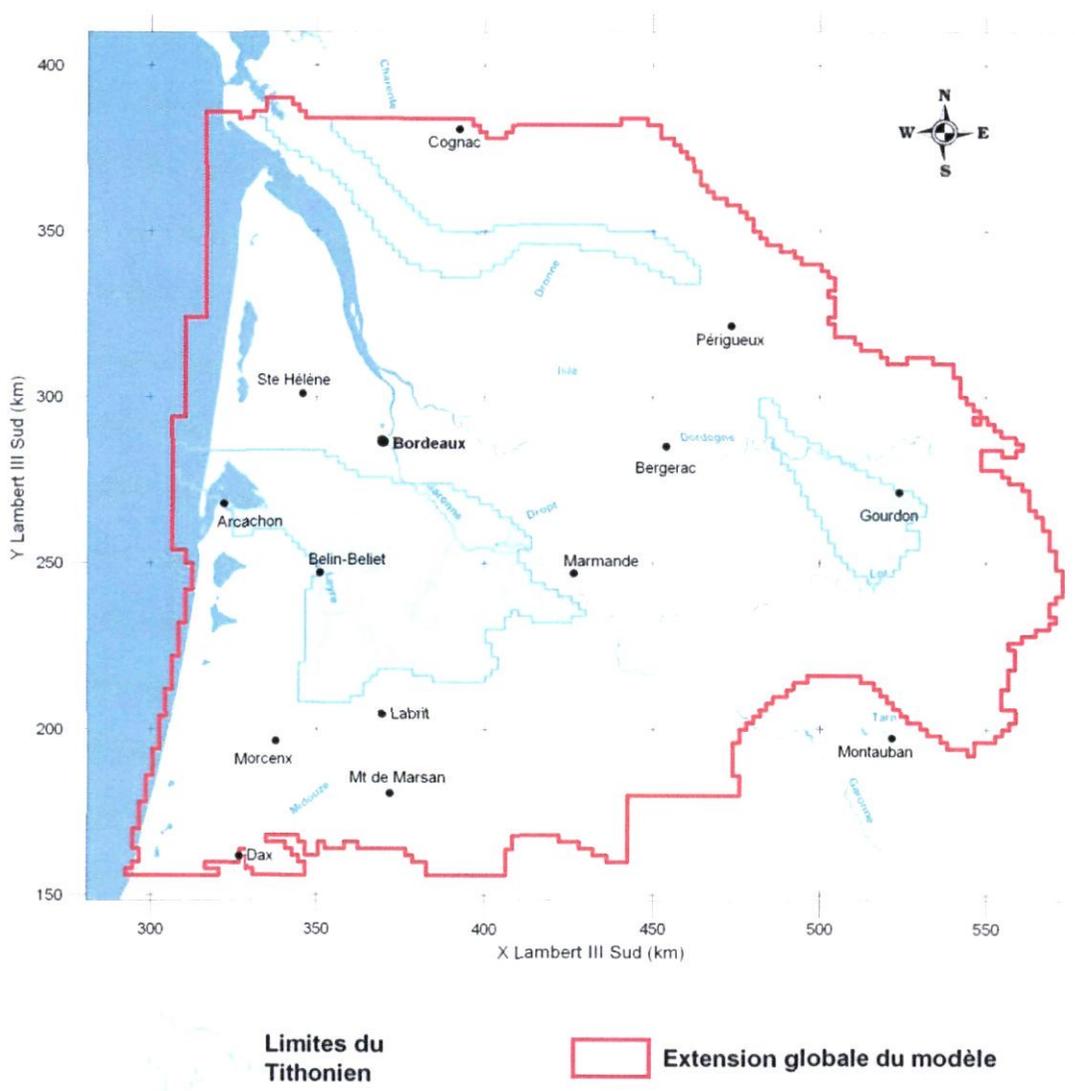
**Limites du
Coniacien-Santonien**

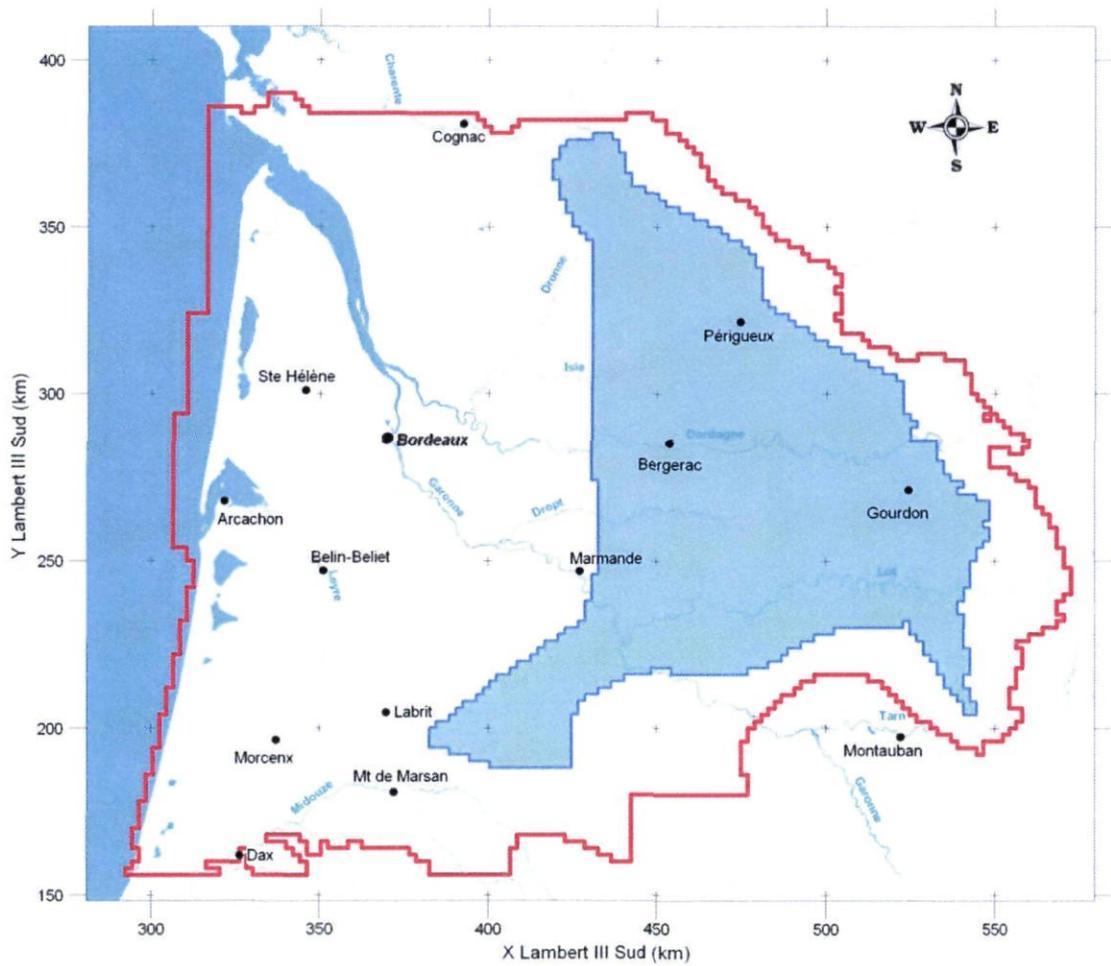


Extension globale du modèle



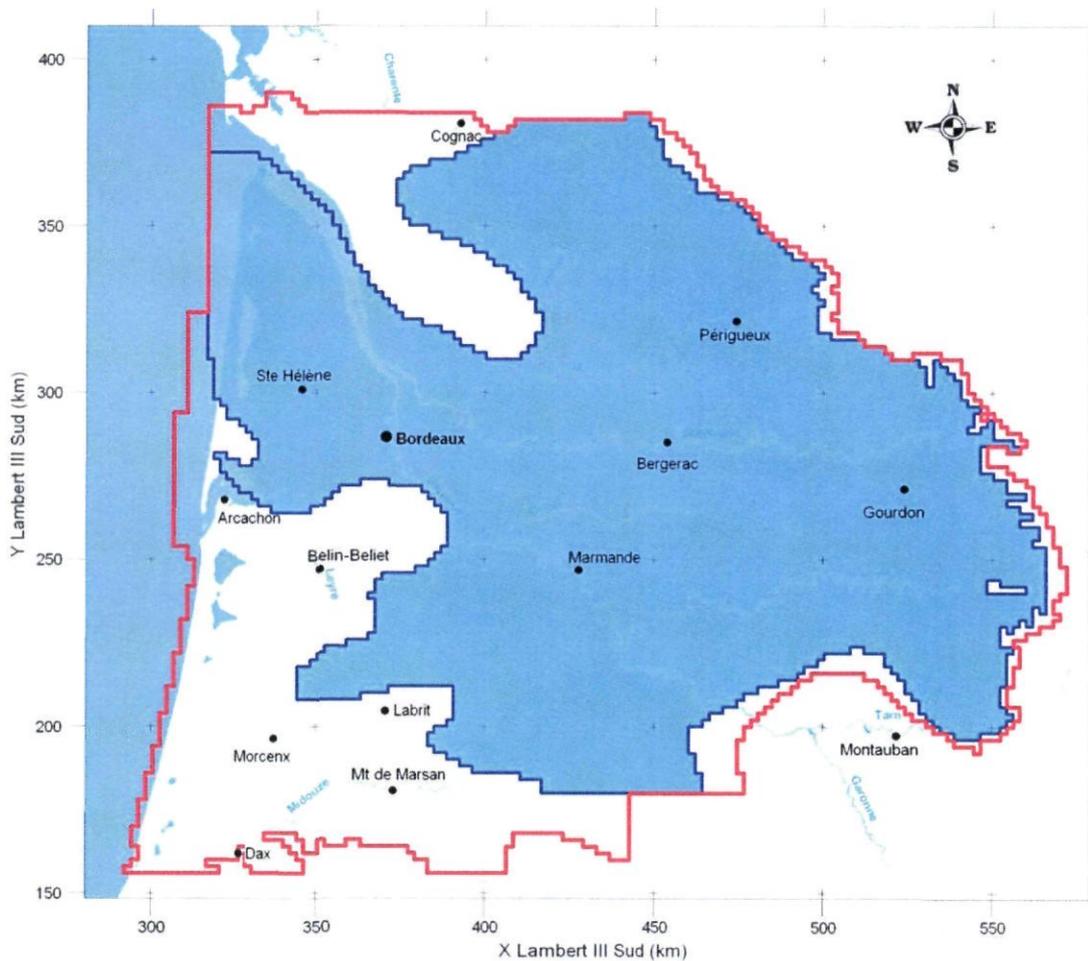






 **Limites du
Kimméridgien**

 **Extension globale du modèle**



**Limites du Bathonien
-Callovo-Oxfordien**



Extension globale du modèle



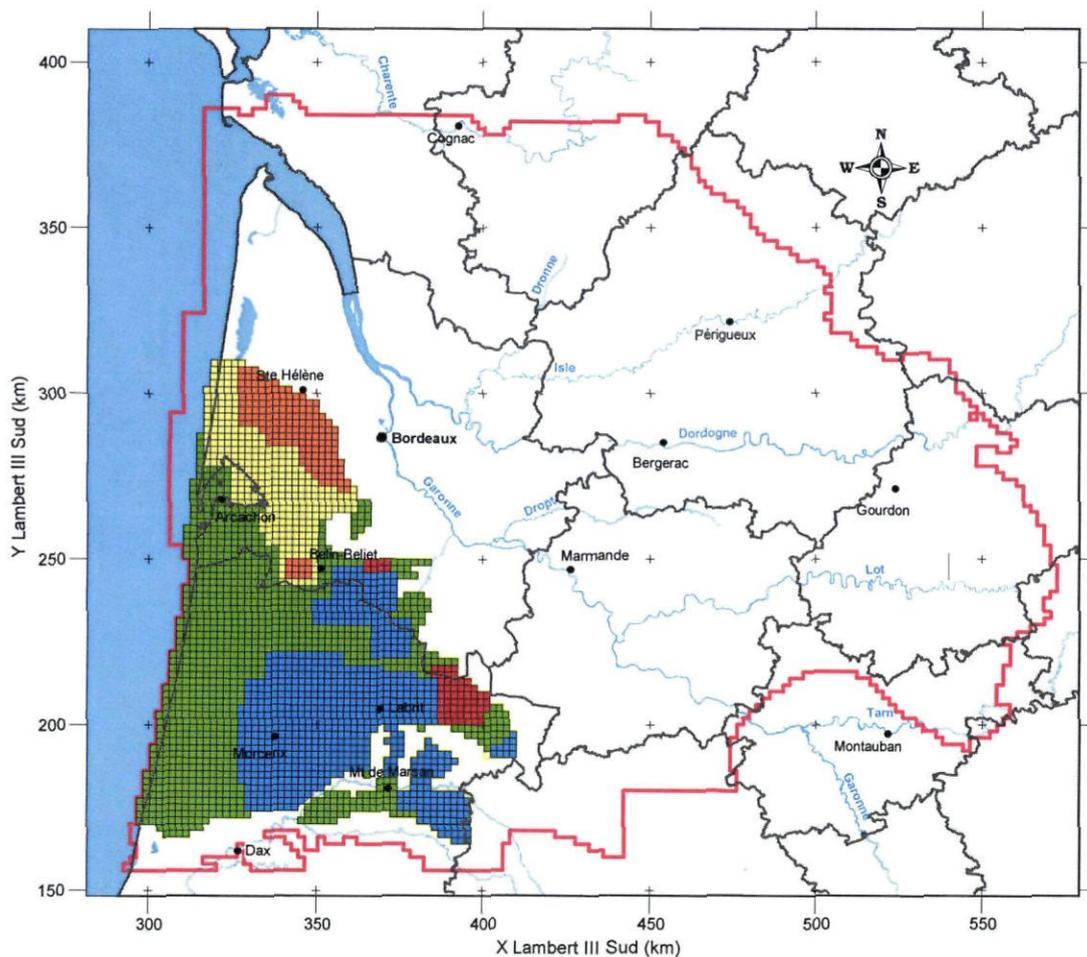
Annexe 3

Coefficients d'emmagasinement issus du calage au pas de temps trimestriel



Carte indicative des coefficients d'emmagasinement spécifique

Couche N°2 : Langhien-Serravalien

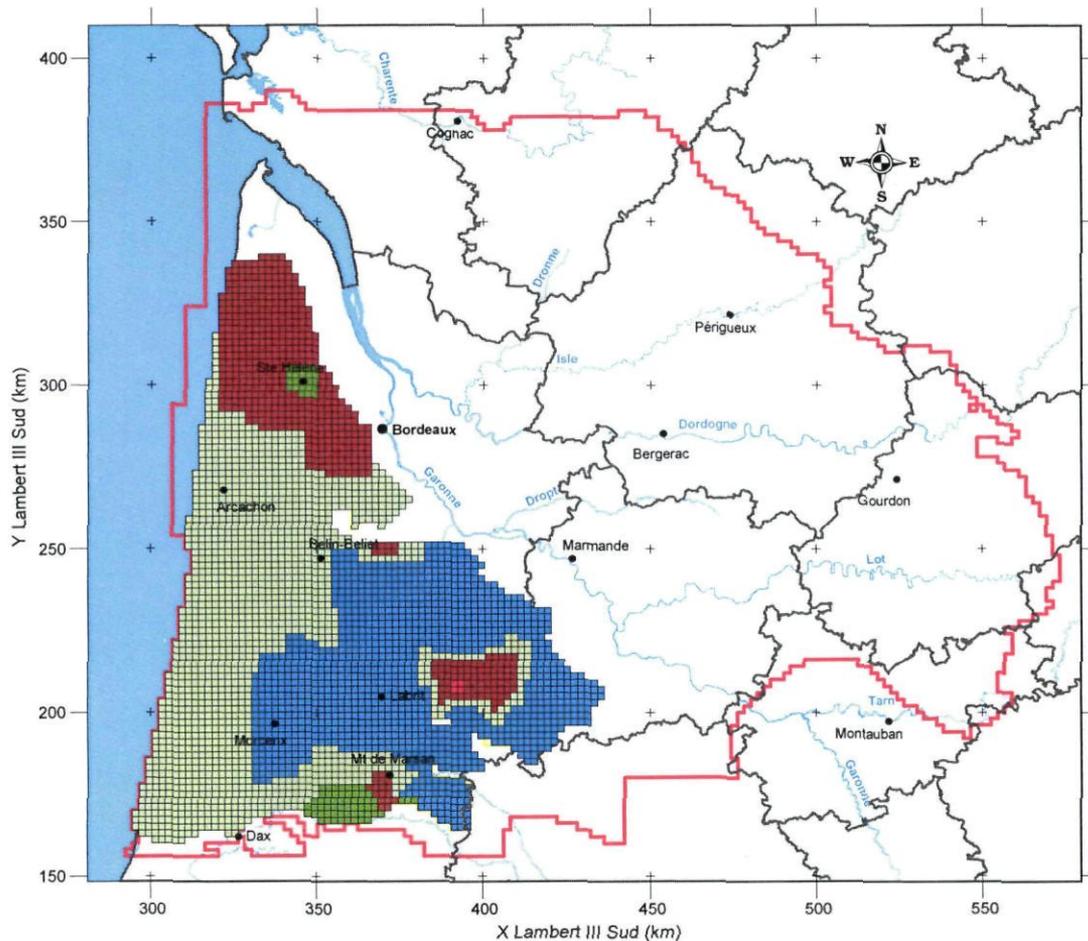


Classe des coefficients d'emmagasinement spécifiques (m-1)

- [4.10-5 - 5.10-5]
- [1.10-5 - 2.10-5]
- [8.10-6 - 1.10-5]
- [4.10-6 - 6.10-6]
- [1.10-6 - 2.10-6]
- Extension globale du modèle

Carte indicative des coefficients d'emmagasinement spécifique

Couche N°3 : Aquitanien

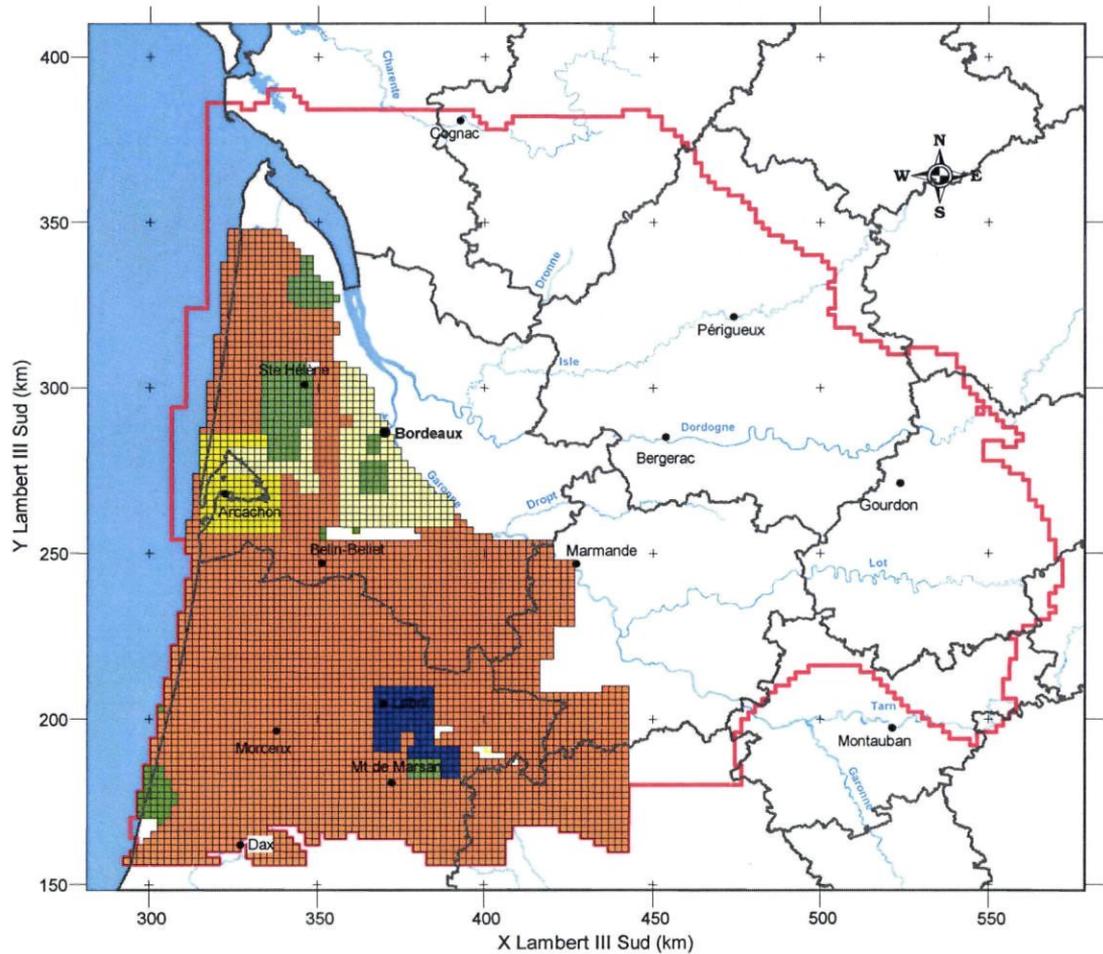


Classe des coefficients d'emmagasinement spécifiques (m-1)

- $[4.10^{-5} - 5.10^{-5}[$
 - $[1.10^{-5} - 2.10^{-5}[$
 - $[8.10^{-6} - 1.10^{-5}[$
 - $[5.10^{-7} - 1.10^{-6}[$
 - $[1.10^{-7} - 5.10^{-7}[$
- Extension globale du modèle

Carte indicative des coefficients d'emmagasinement spécifique

Couche N°4 : Oligocène

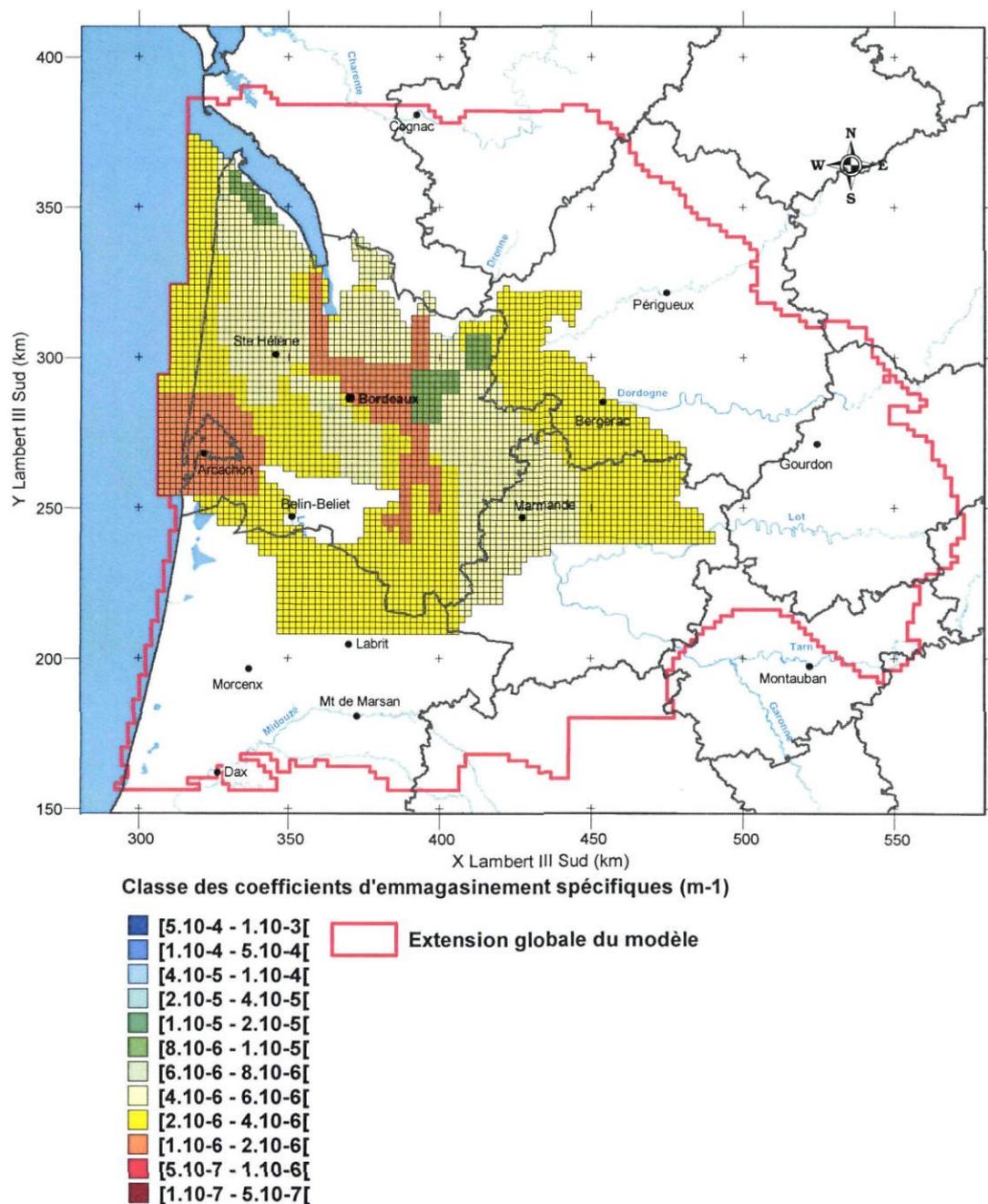


Classe des coefficients d'emmagasinement spécifiques (m-1)



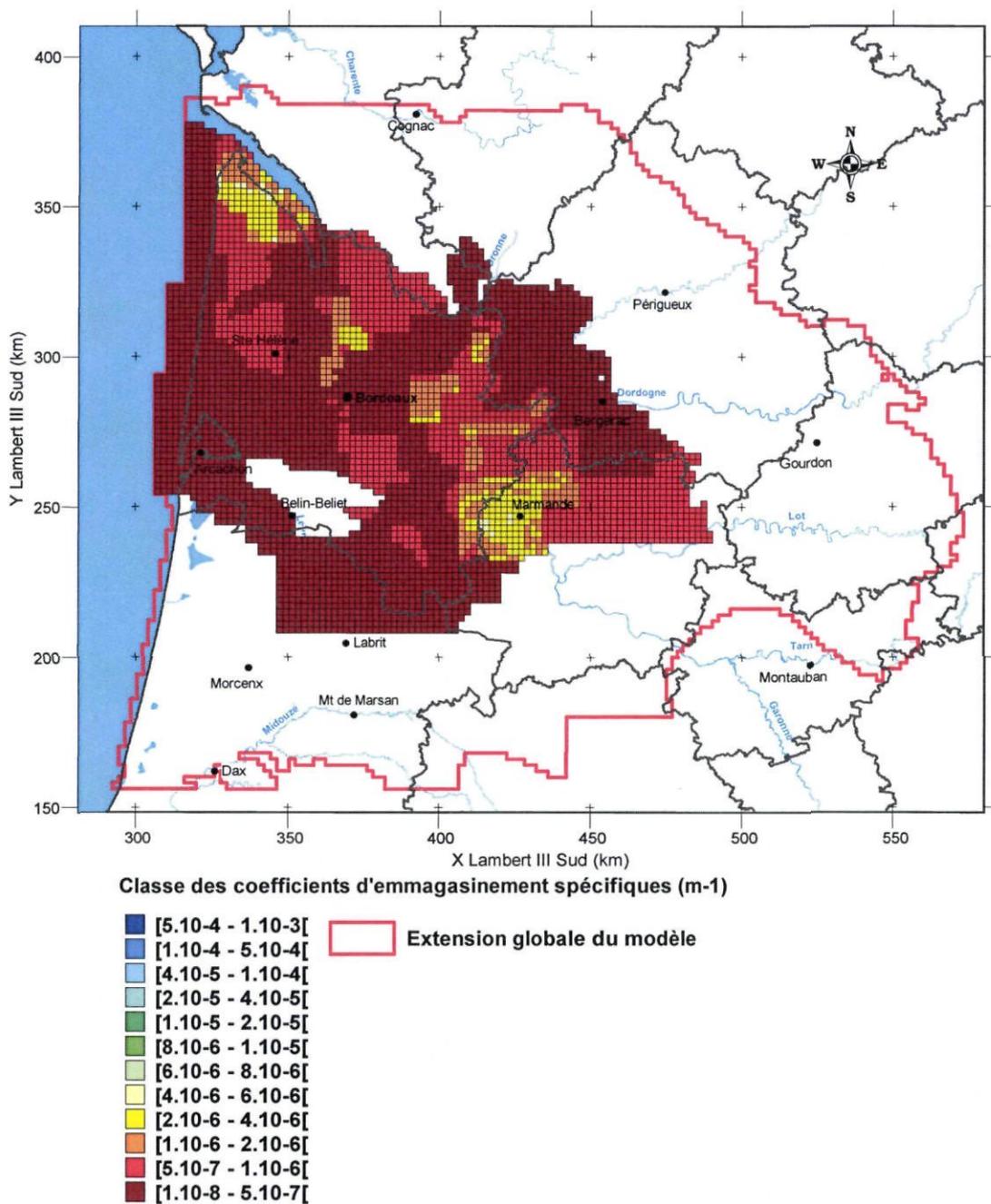
Carte indicative des coefficients d'emmagasinement spécifique

Couche N°5 : Éocène supérieur



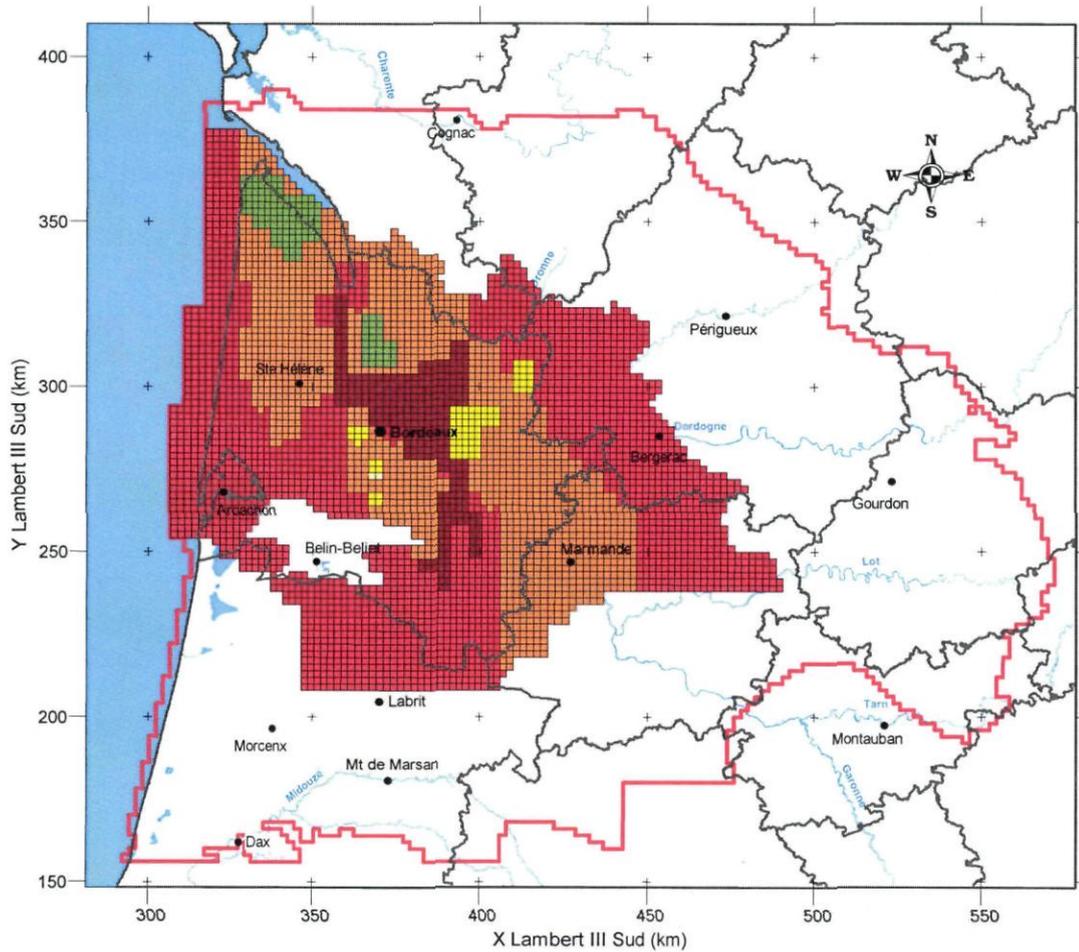
Carte indicative des coefficients d'emmagasinement spécifique

Couche N°6 : Éocène moyen

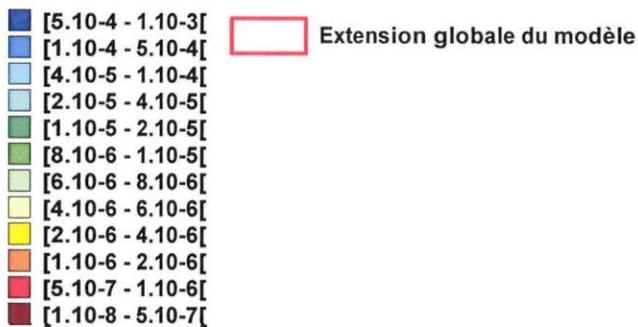


Carte indicative des coefficients d'emmagasinement spécifique

Couche N°7 : Éocène inférieur

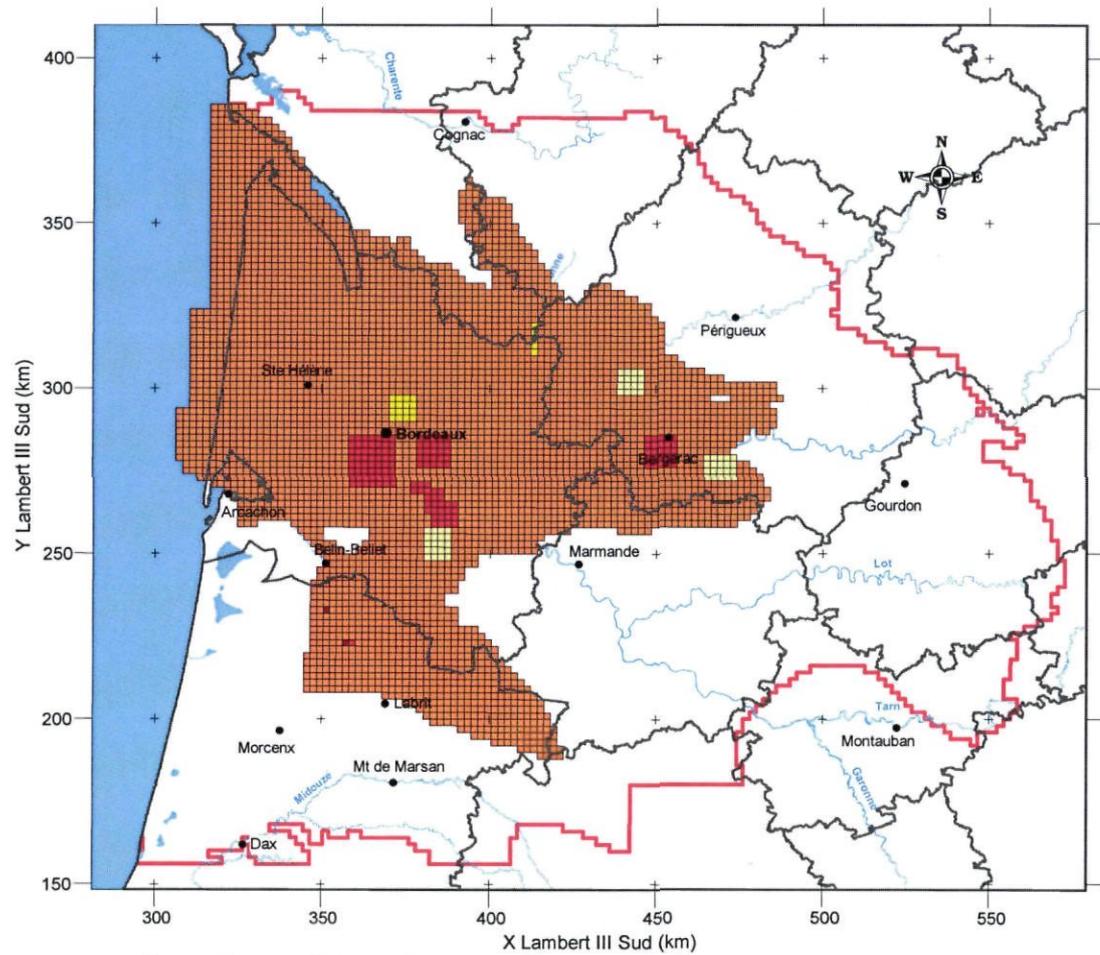


Classe des coefficients d'emmagasinement spécifiques (m-1)

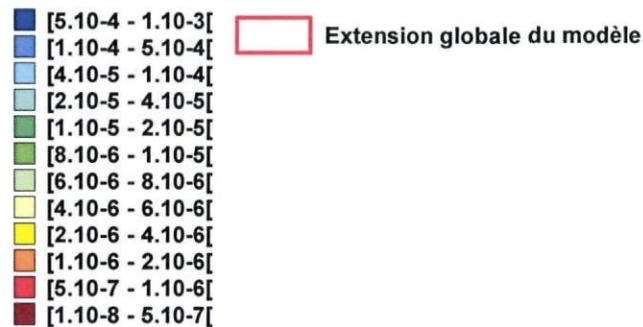


Carte indicative des coefficients d'emmagasinement spécifique

Couche N°8 : Campanien

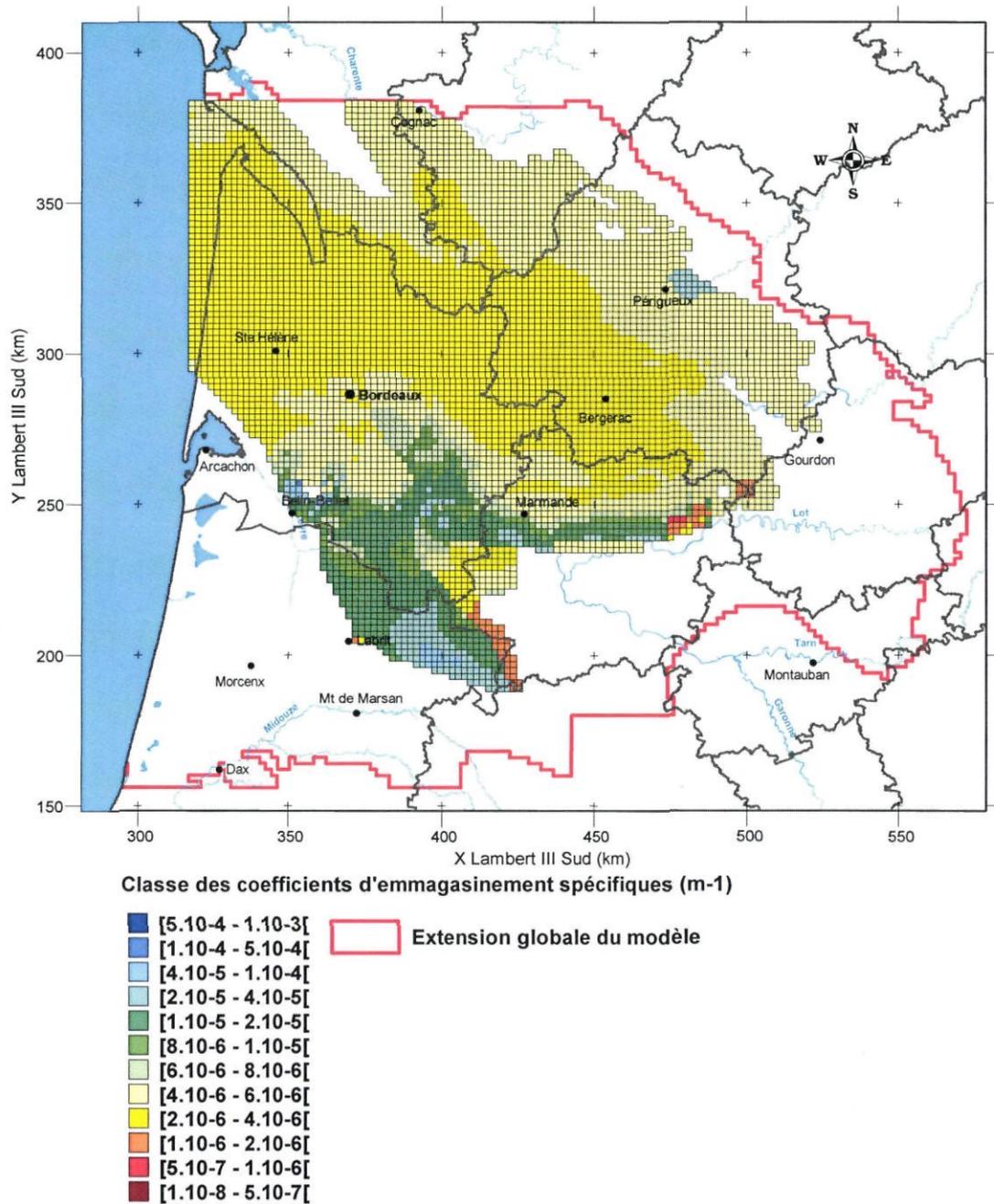


Classe des coefficients d'emmagasinement spécifiques (m-1)



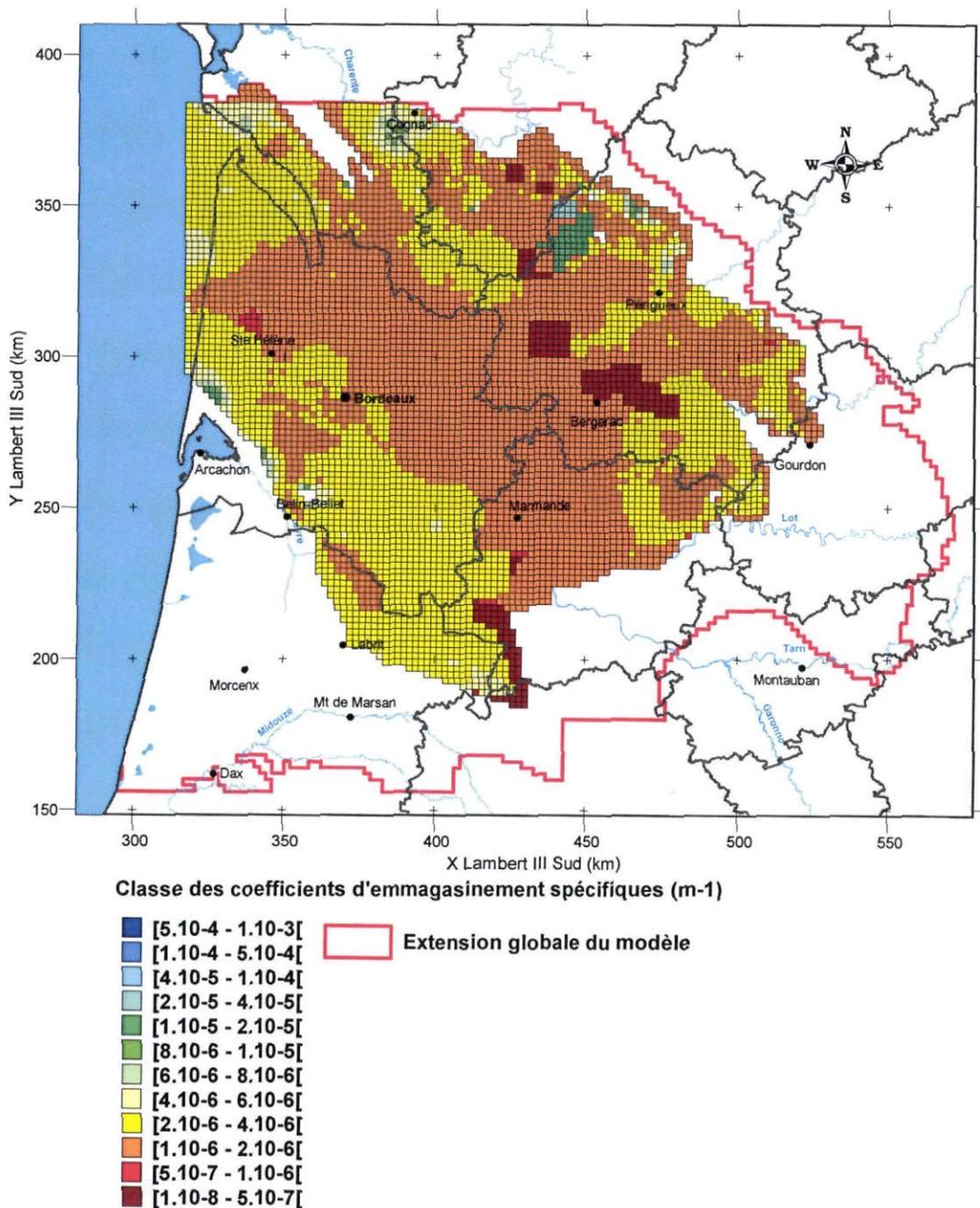
Carte indicative des coefficients d'emmagasinement spécifique

Couche N°9 : Coniacien-Santonien



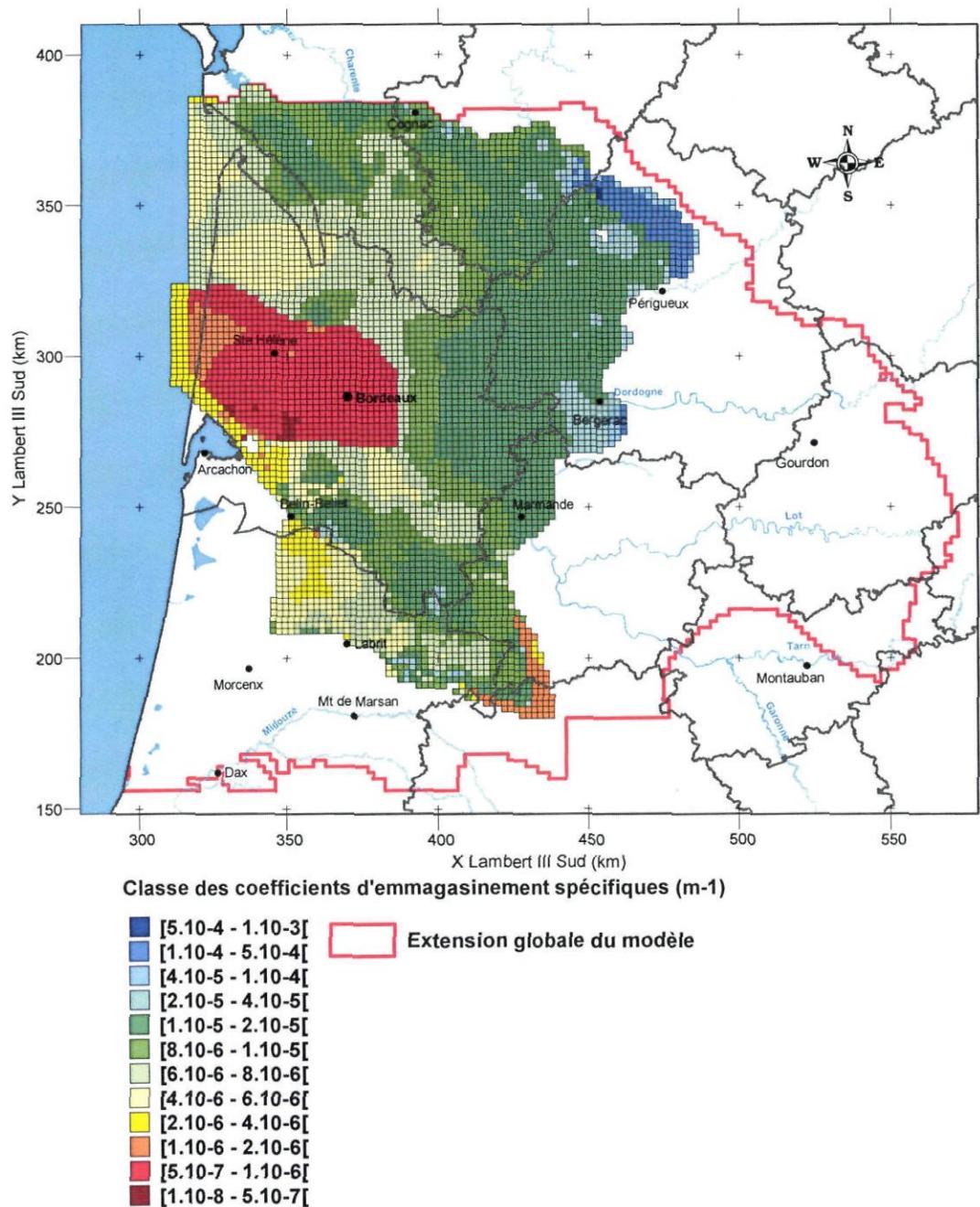
Carte indicative des coefficients d'emmagasinement spécifique

Couche N°10 : Turonien



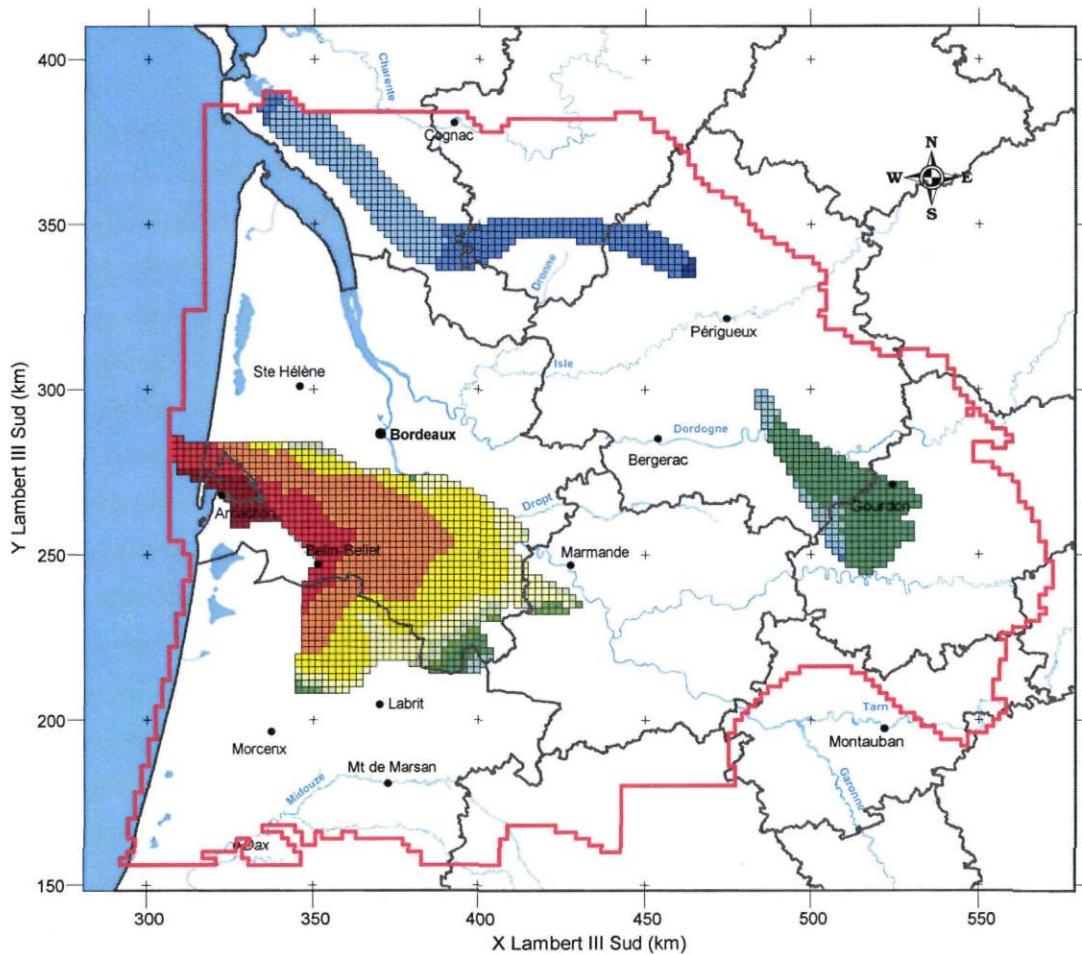
Carte indicative des coefficients d'emmagasinement spécifique

Couche N°11 : Cénomanién

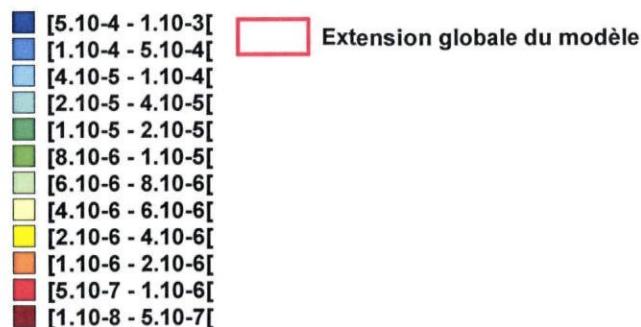


Carte indicative des coefficients d'emmagasinement spécifique

Couche N°12 : Tithonien

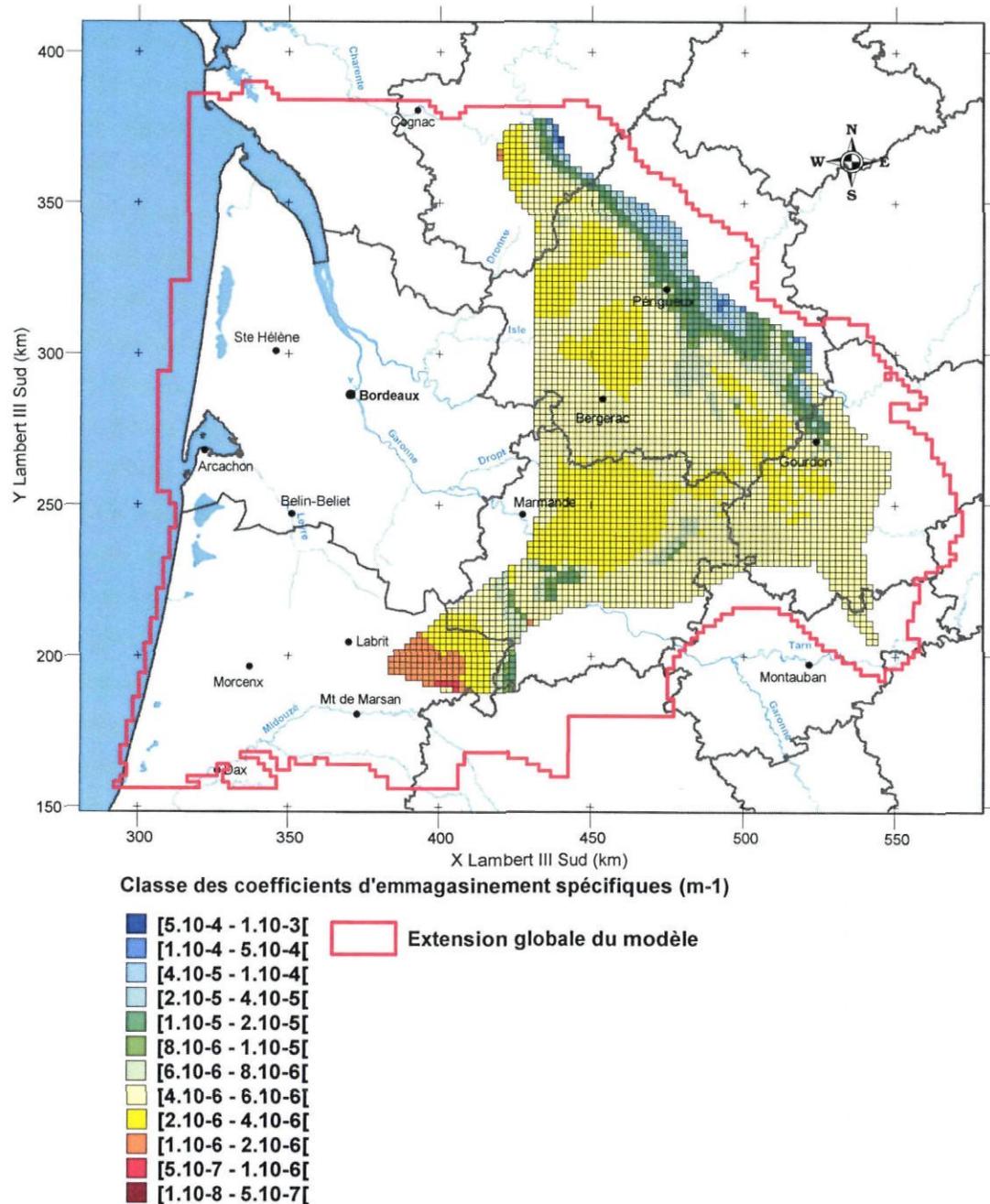


Classe des coefficients d'emmagasinement spécifiques (m-1)



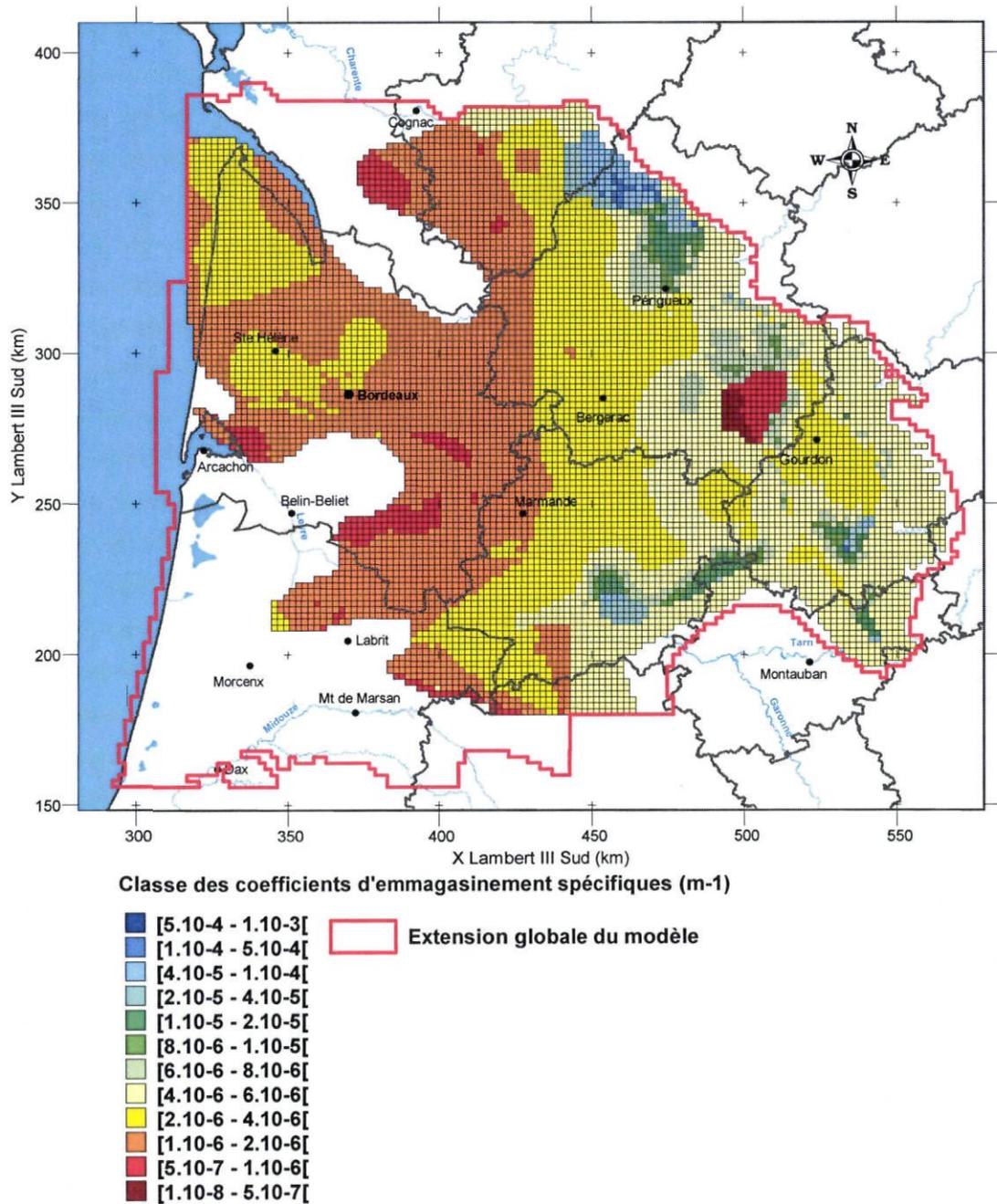
Carte indicative des coefficients d'emmagasinement spécifique

Couche N°13 : Kimméridgien



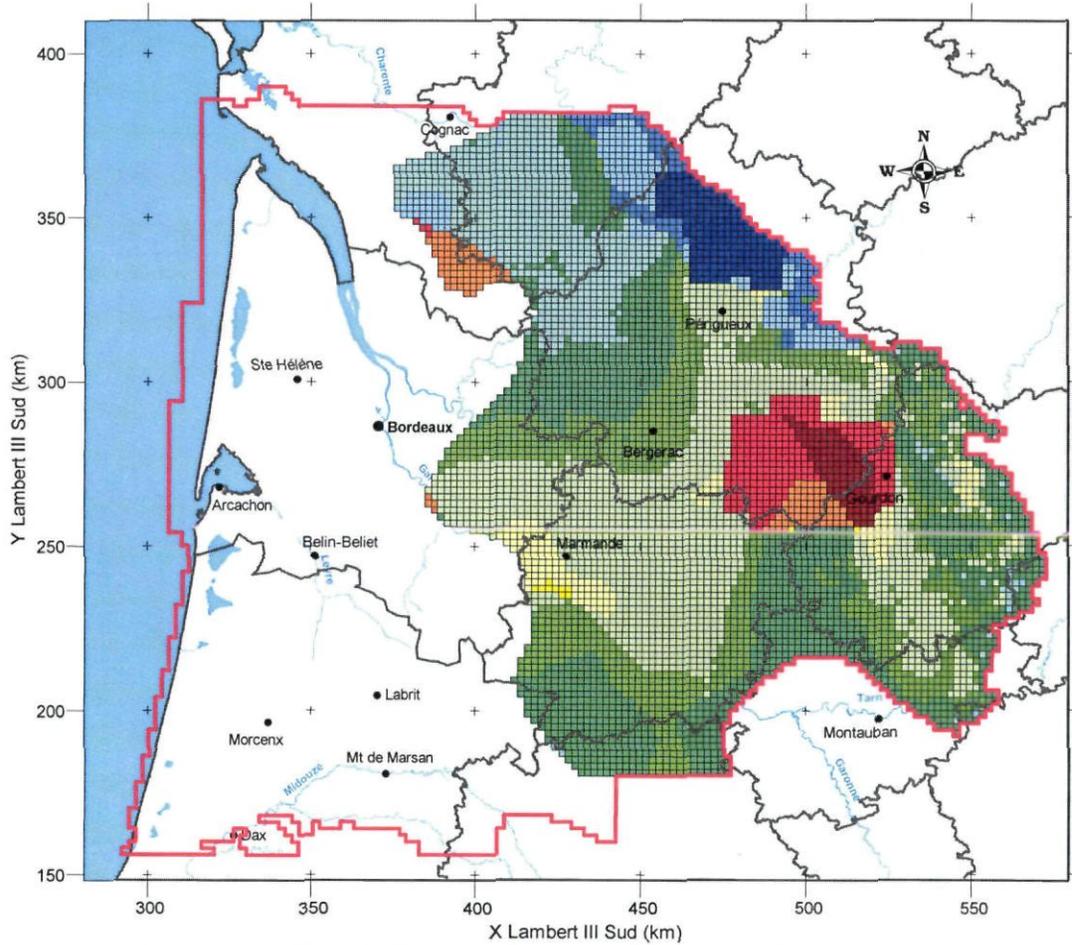
Carte indicative des coefficients d'emmagasinement spécifique

Couche N°14 : Bathonien-Callovo-Oxfordien

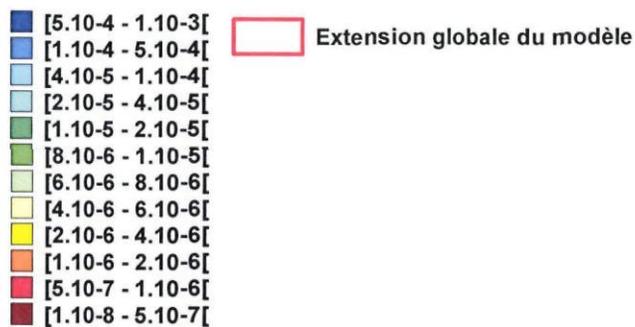


Carte indicative des coefficients d'emmagasinement spécifique

Couche N°15 : Bajocien



Classe des coefficients d'emmagasinement spécifiques (m-1)

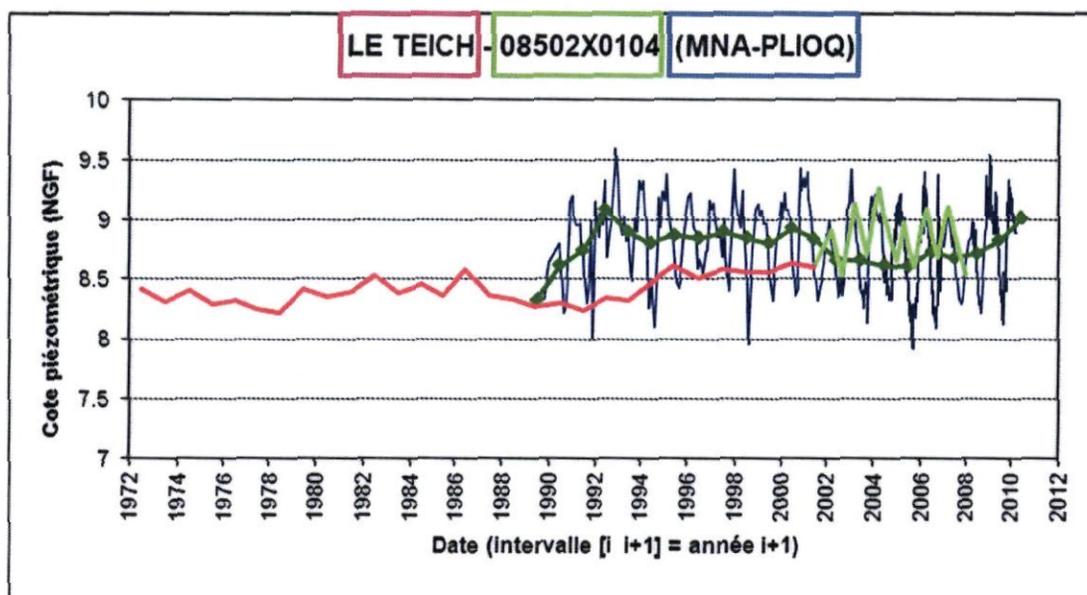


Annexe 4

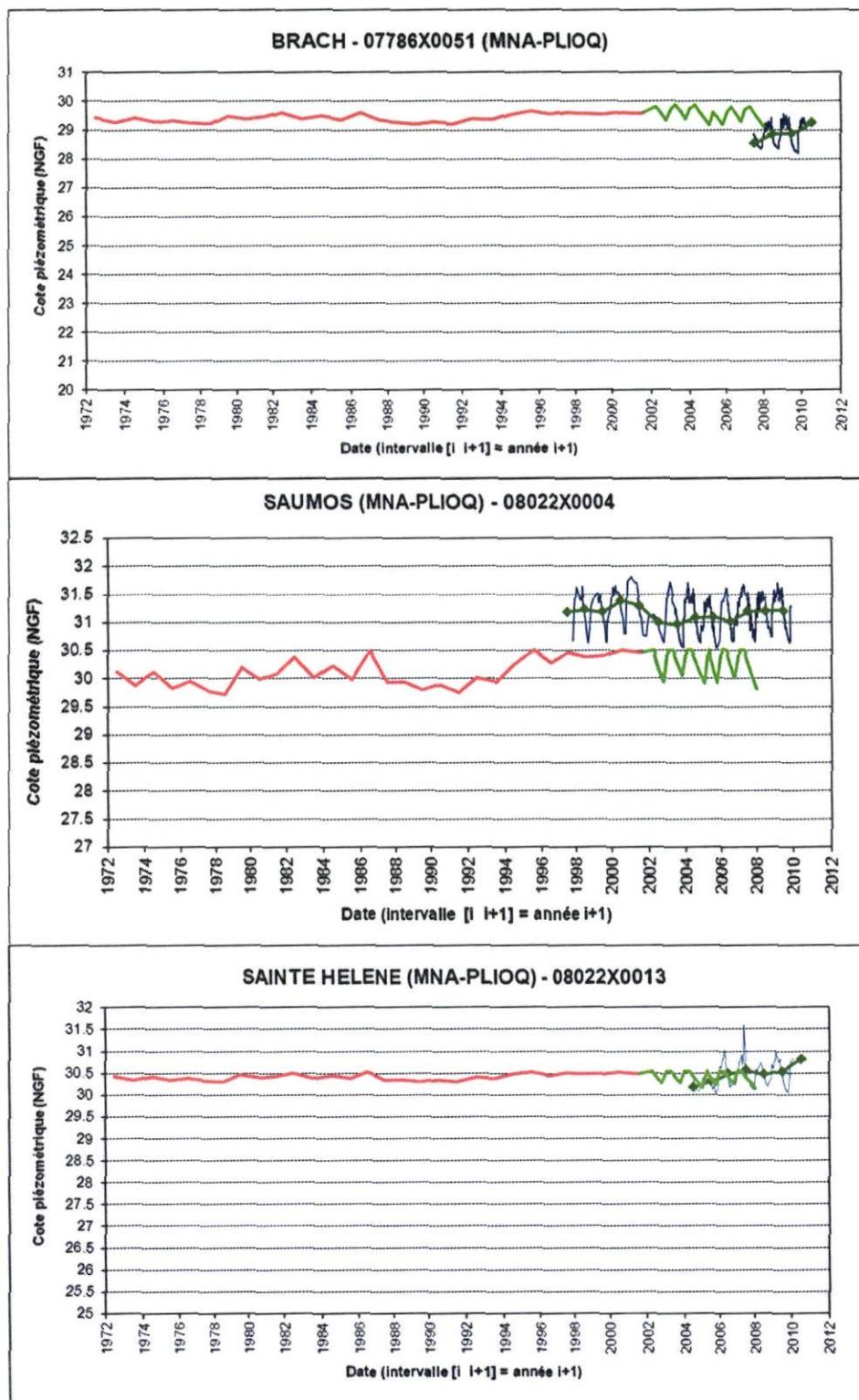
Chroniques de calage du modèle au pas de temps trimestriel

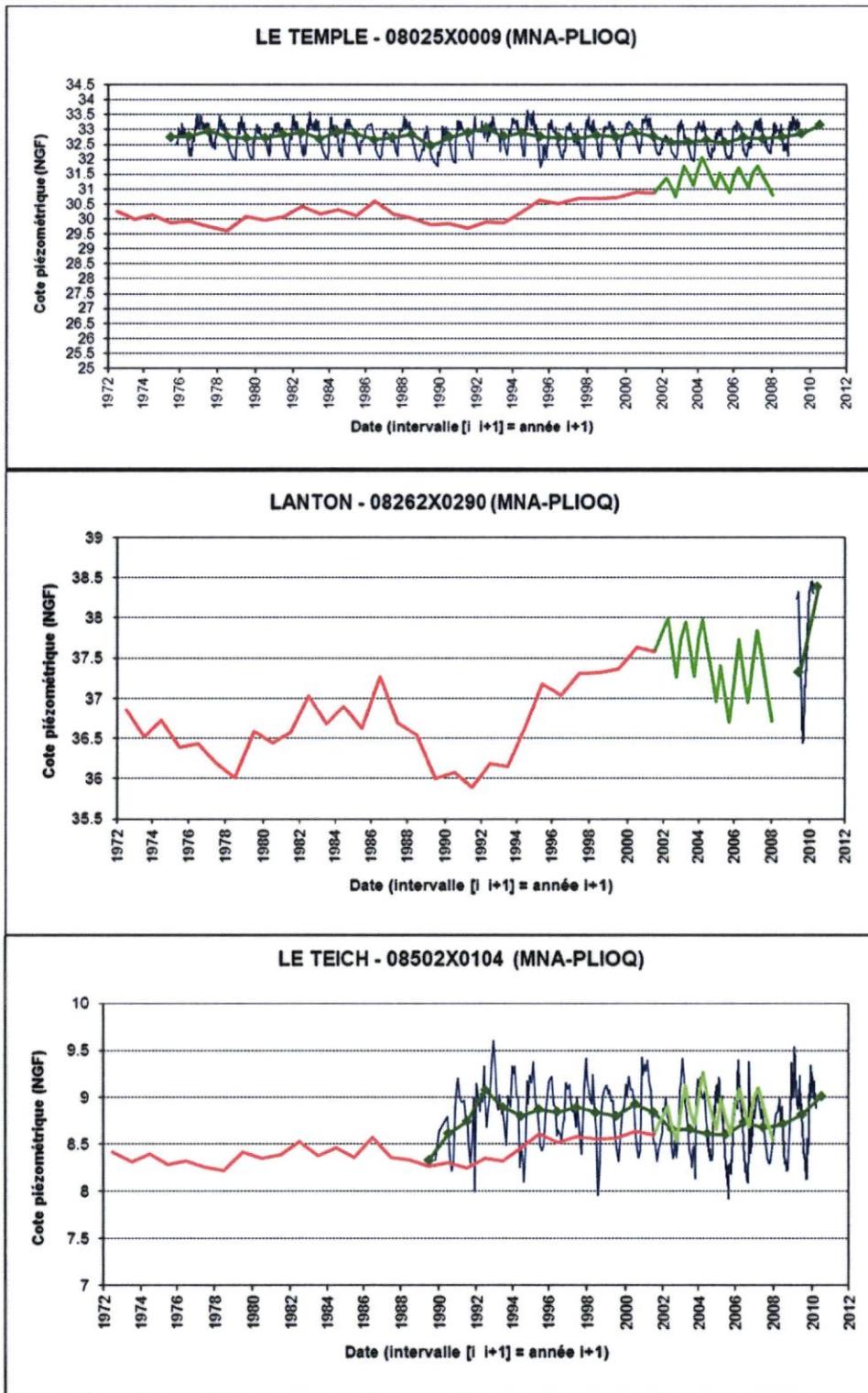


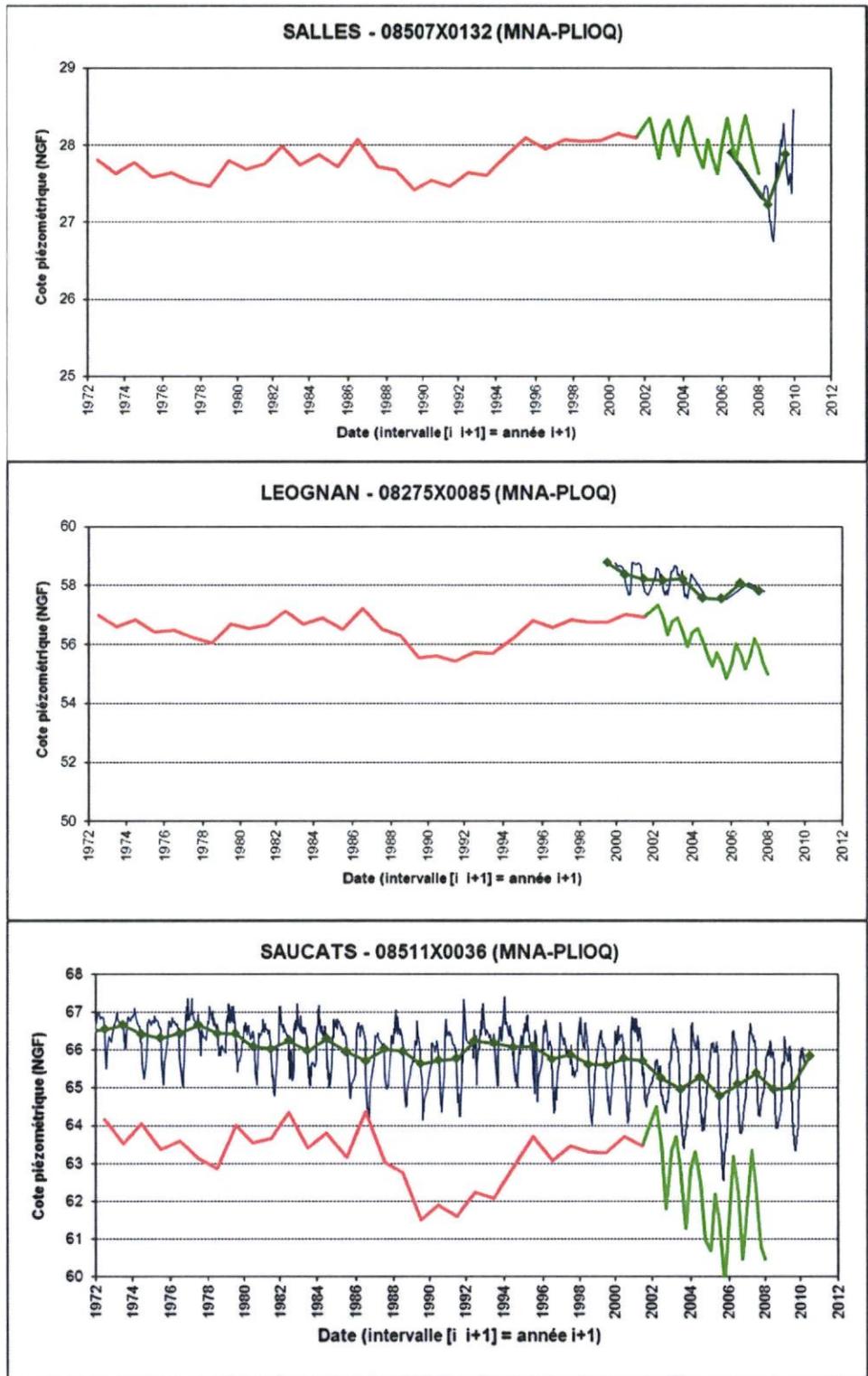
LEGENDE

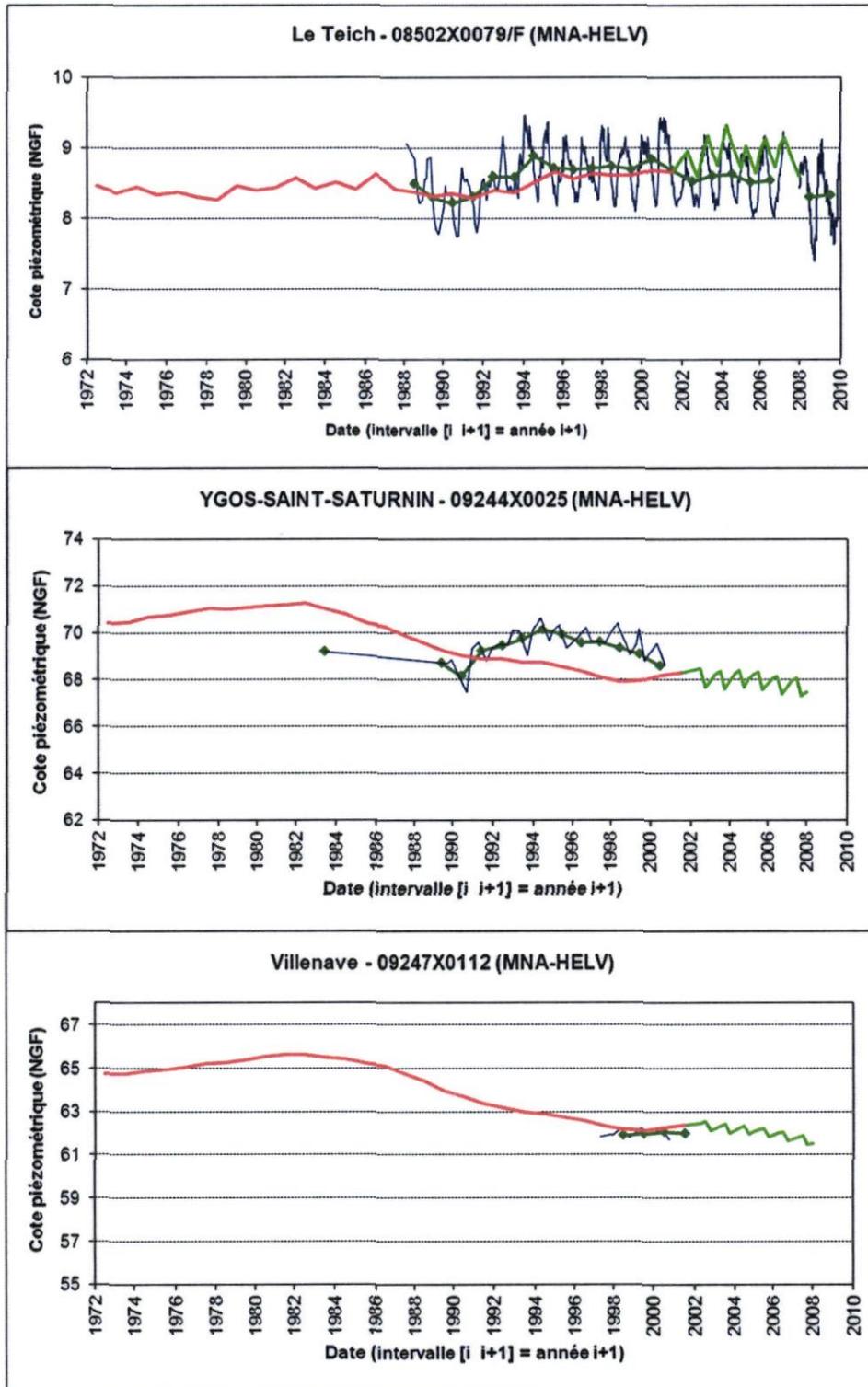


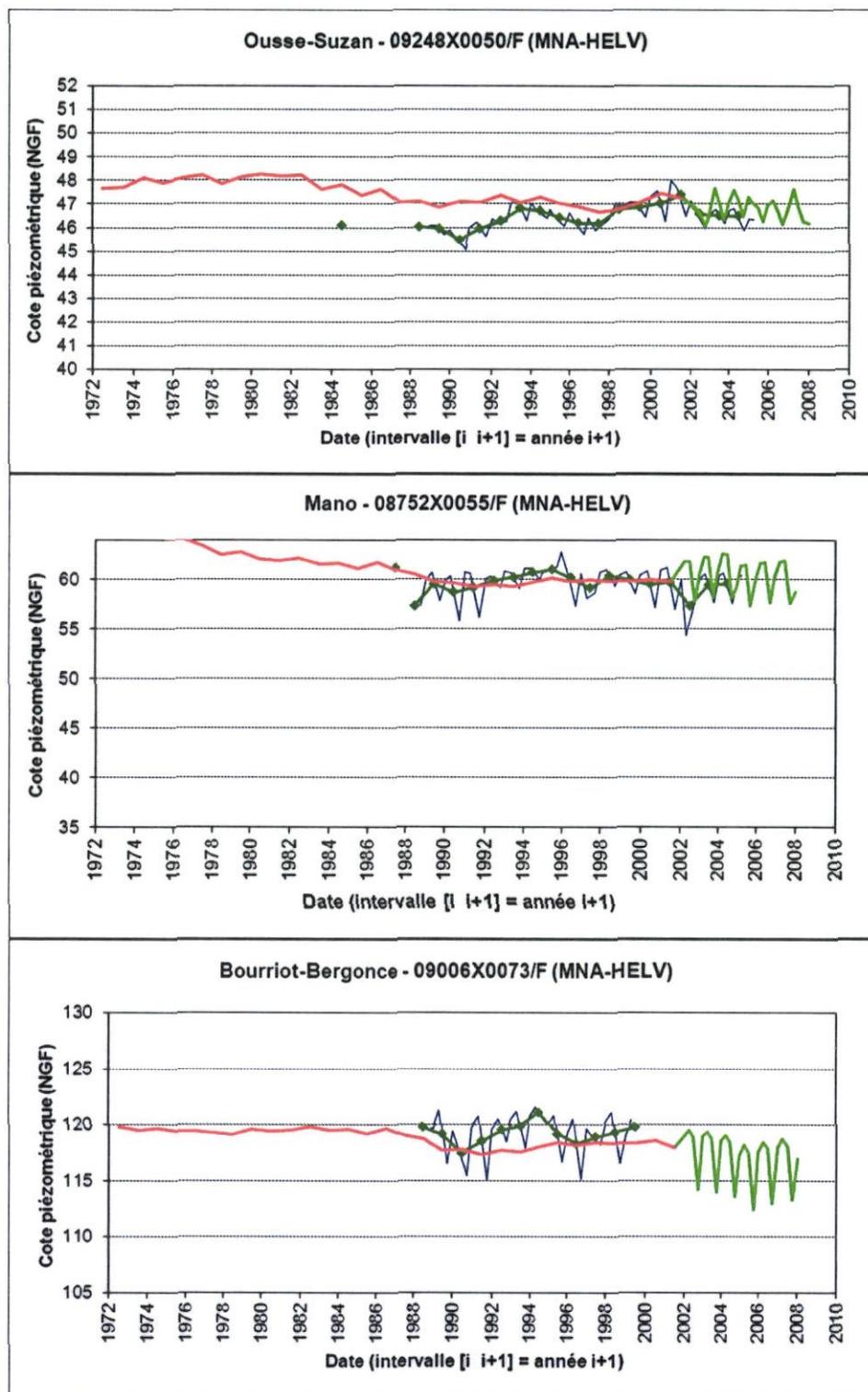
- Commune d'implantation de l'ouvrage
- Indice national BSS de l'ouvrage
- Nappe(s) captée(s) par l'ouvrage
- Niveaux piézométriques observés
- Moyennes annuelles des niveaux piézométriques observés
- Niveaux piézométriques annuels simulés sur la période 1972-2001
- Niveaux piézométriques trimestriels simulés sur la période 2002-2007

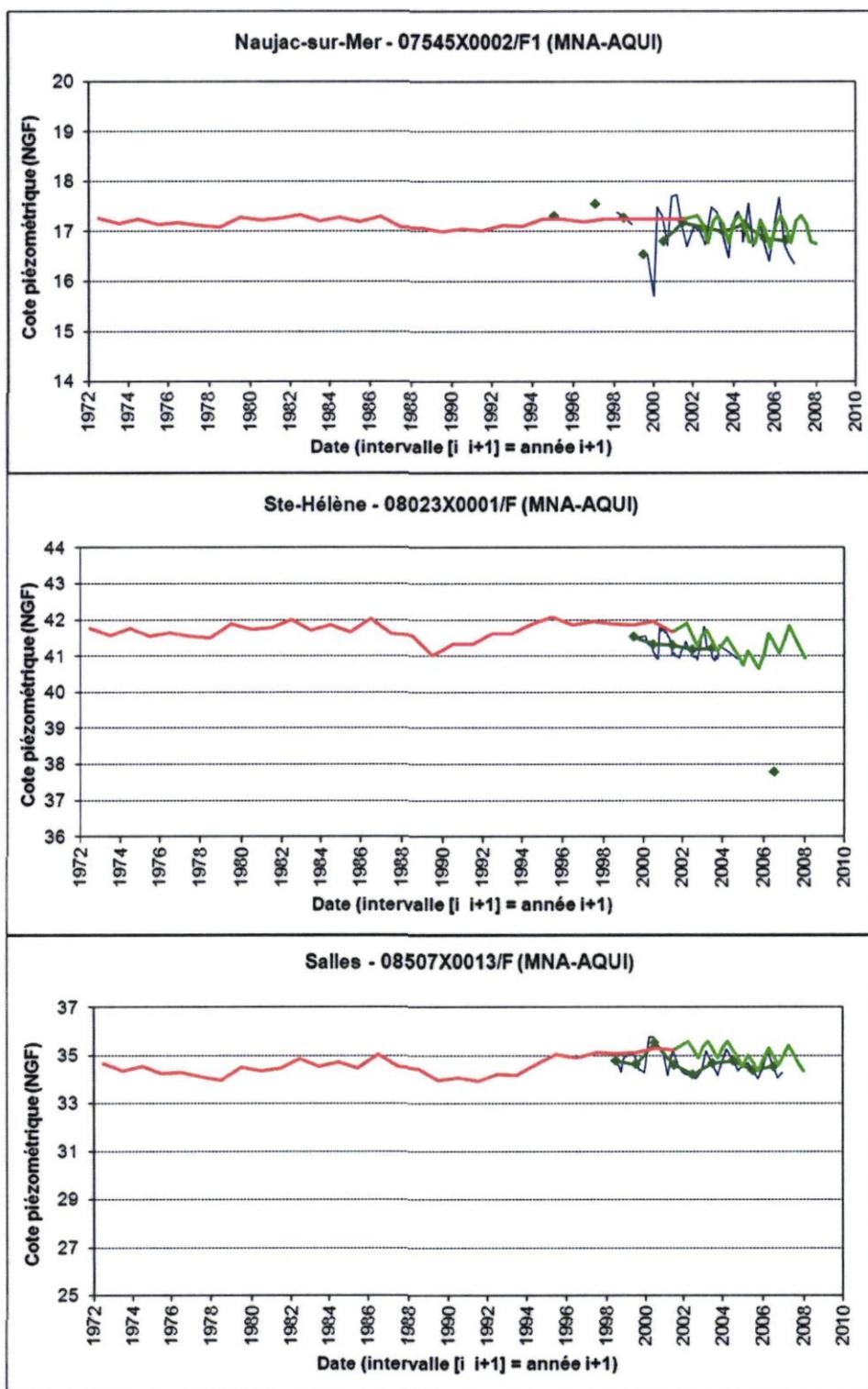


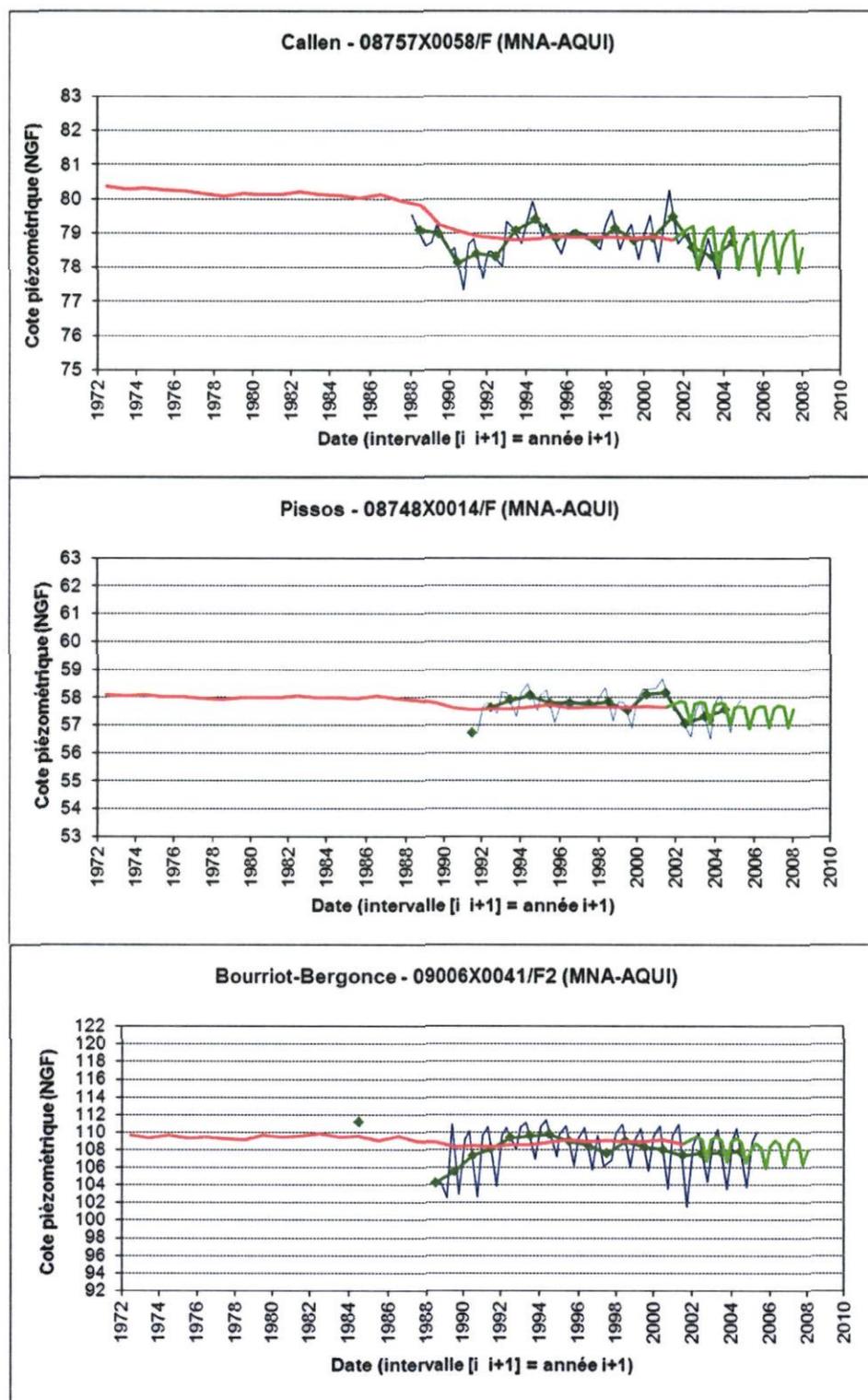


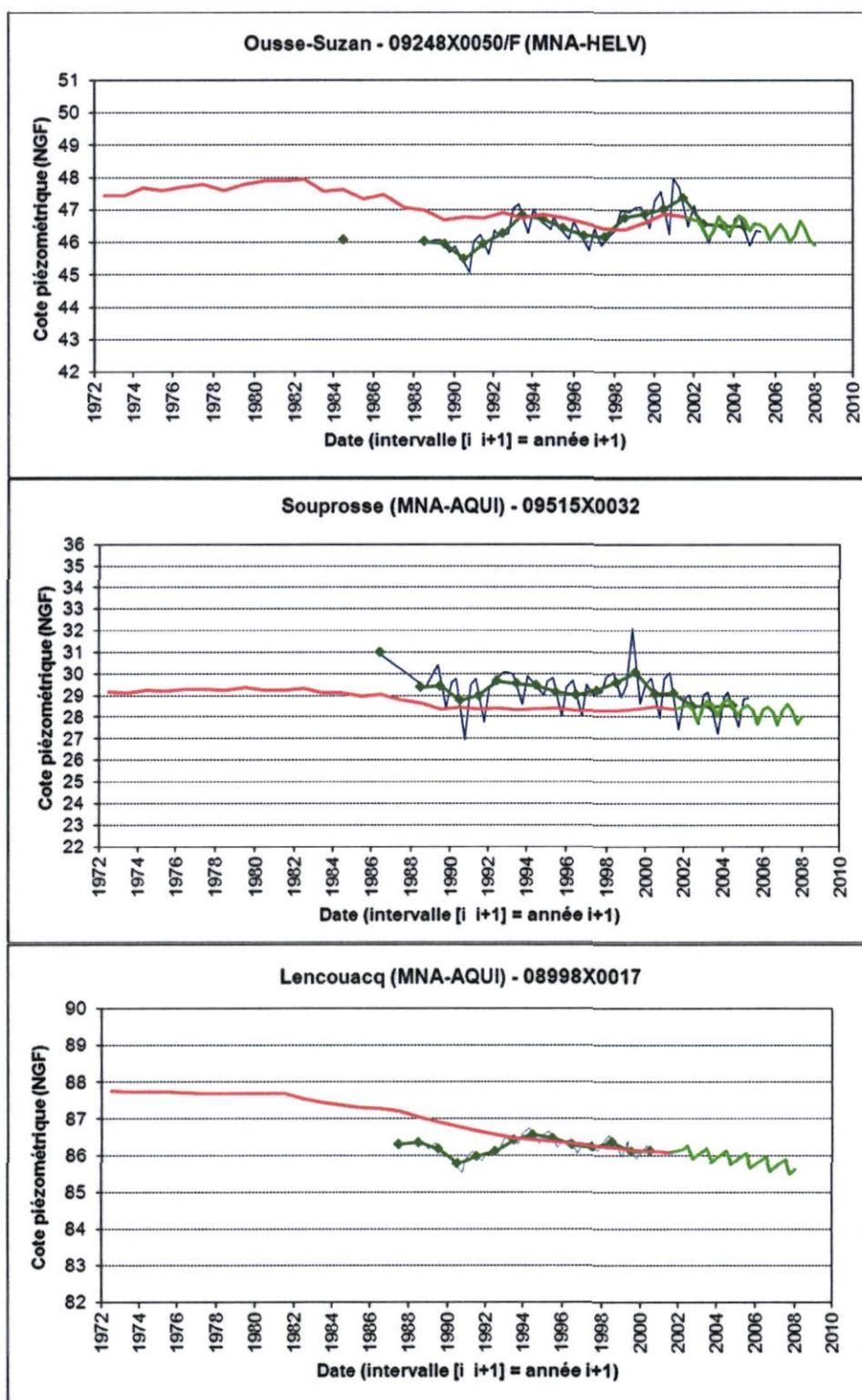


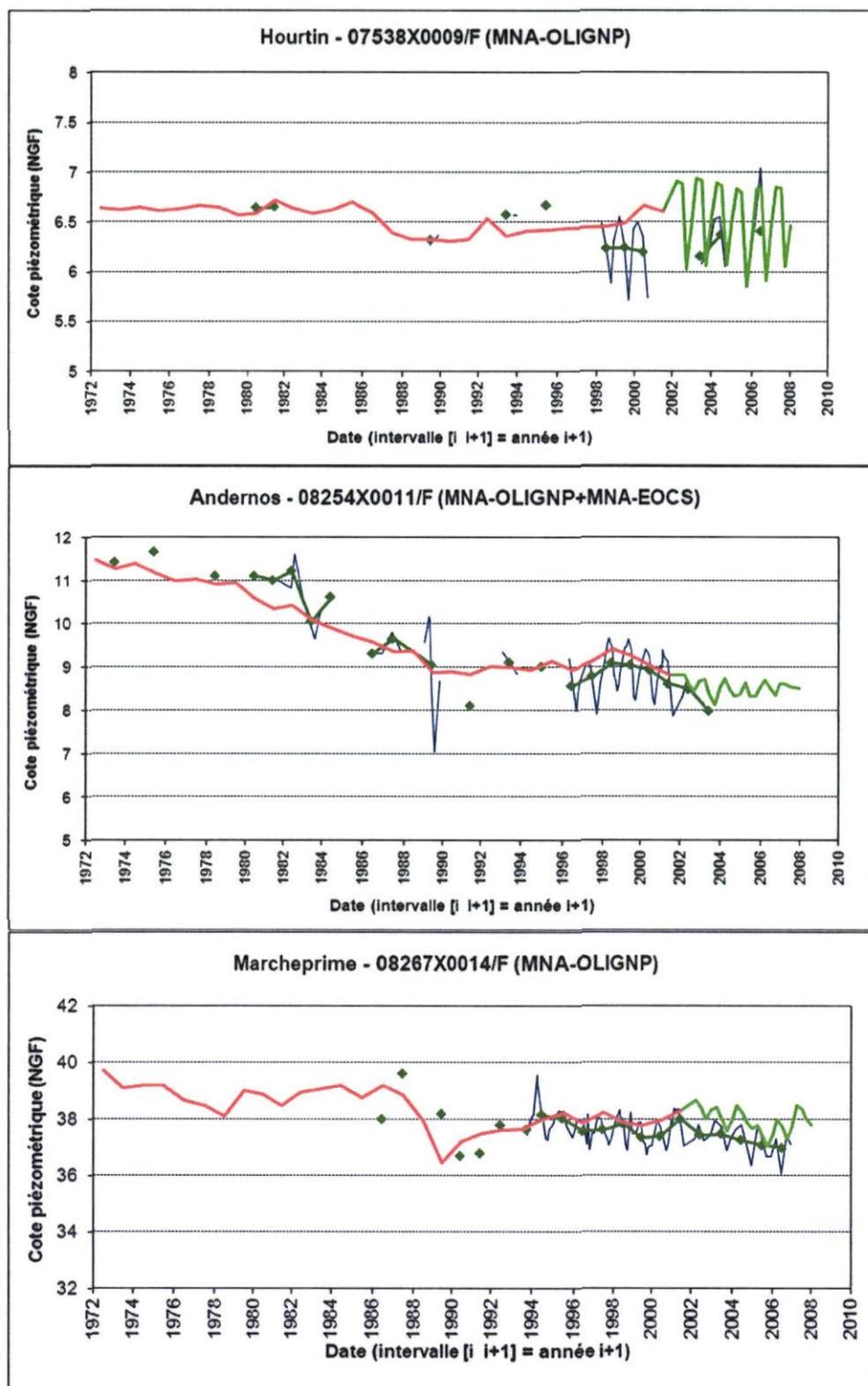


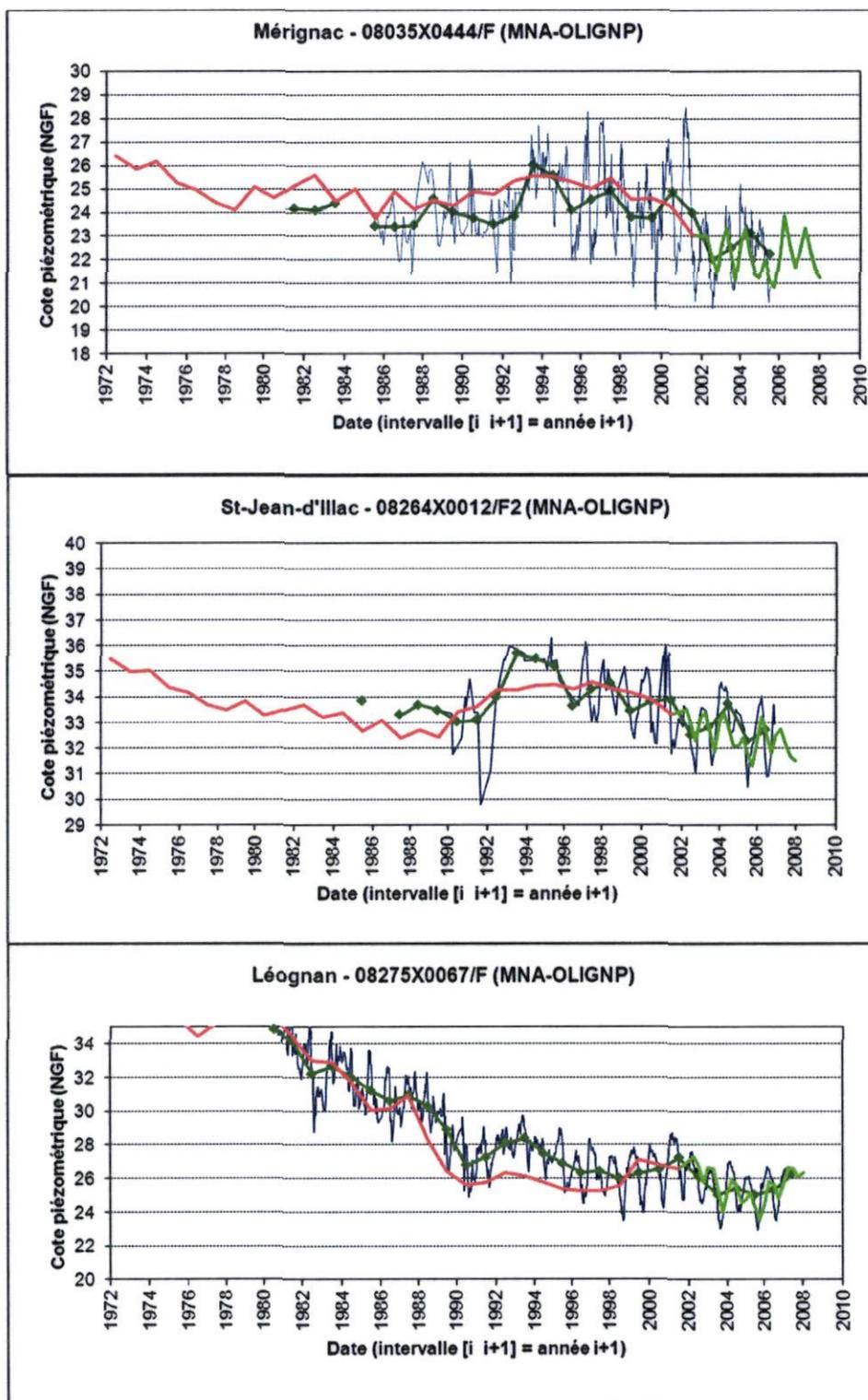


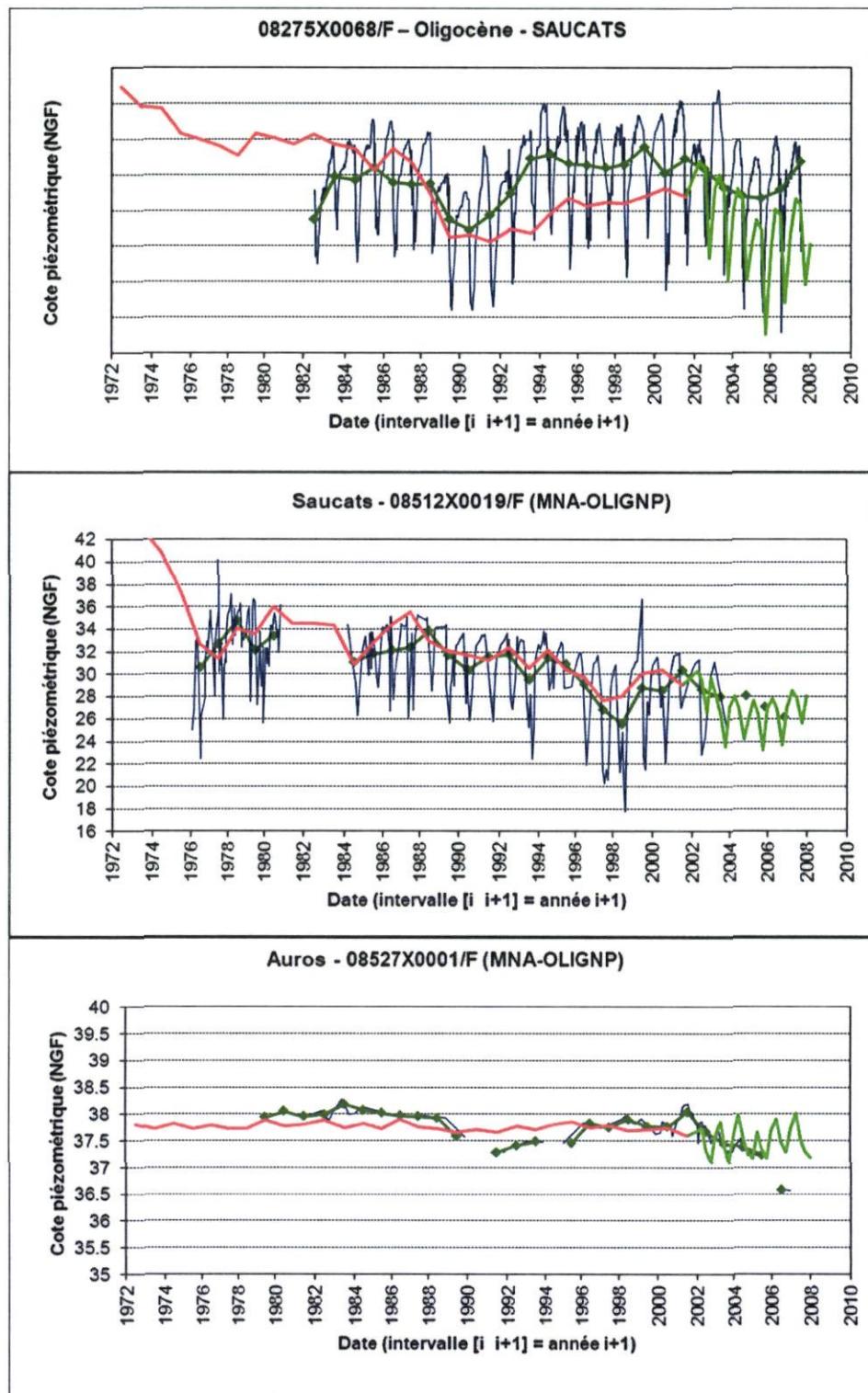


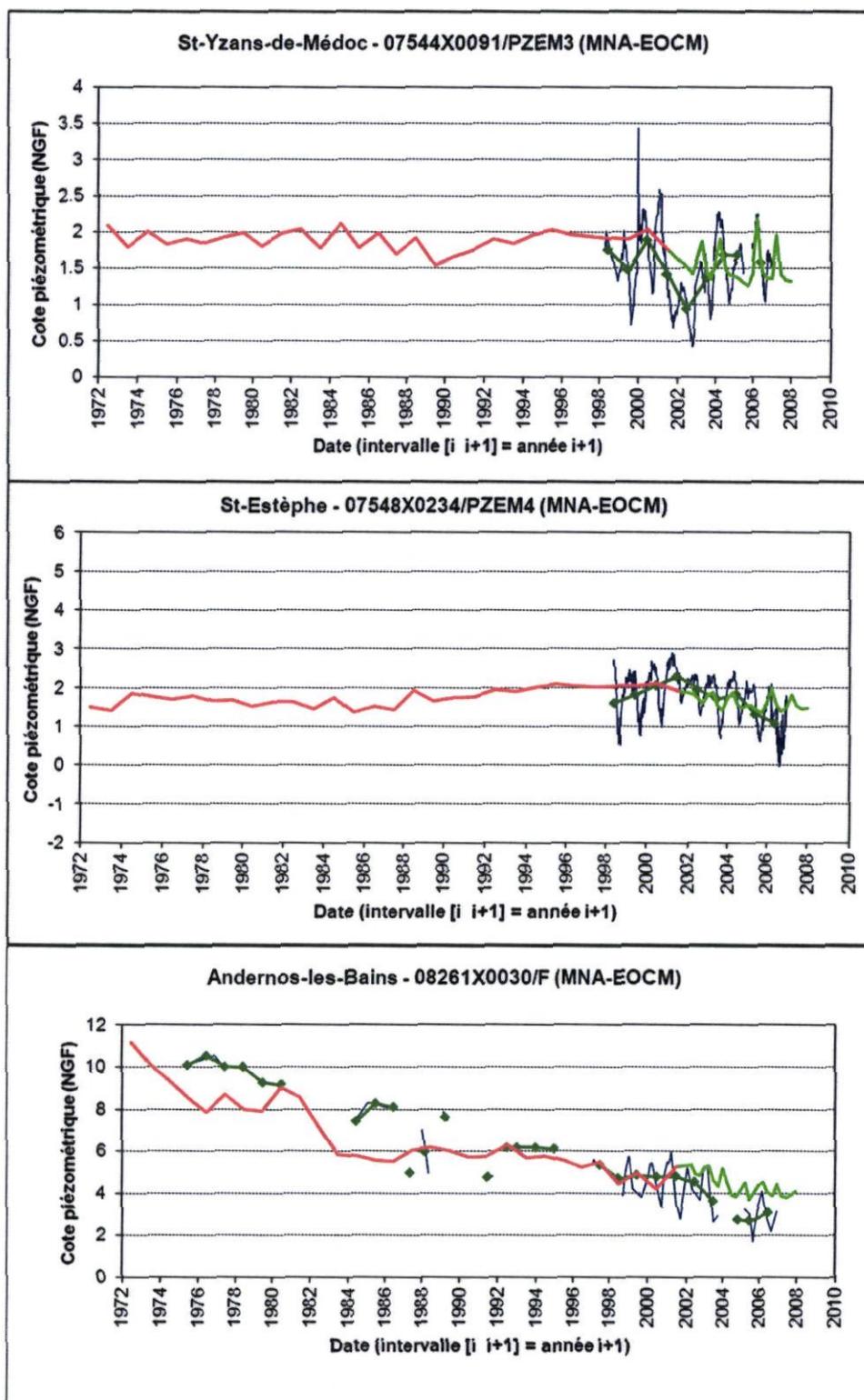


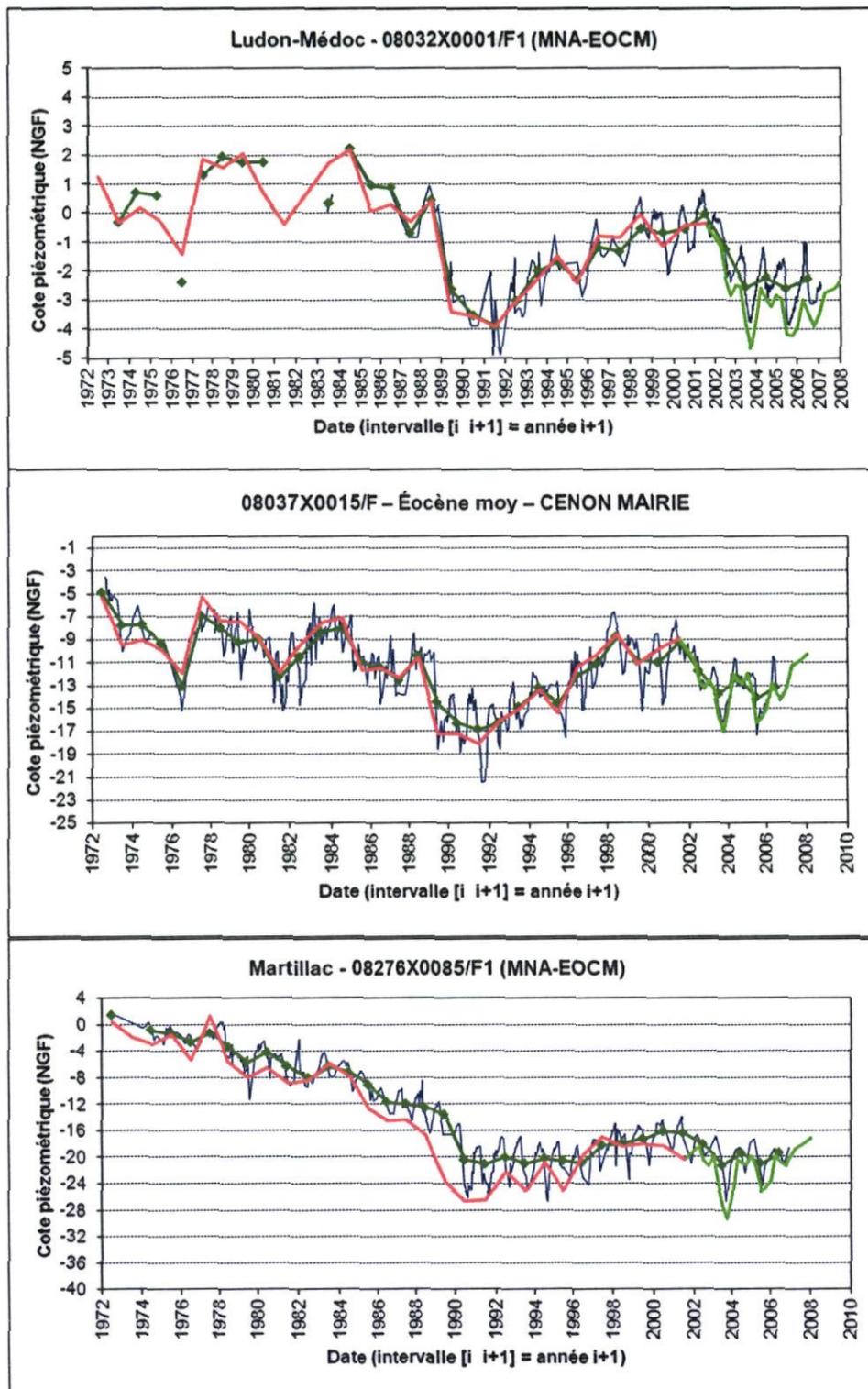


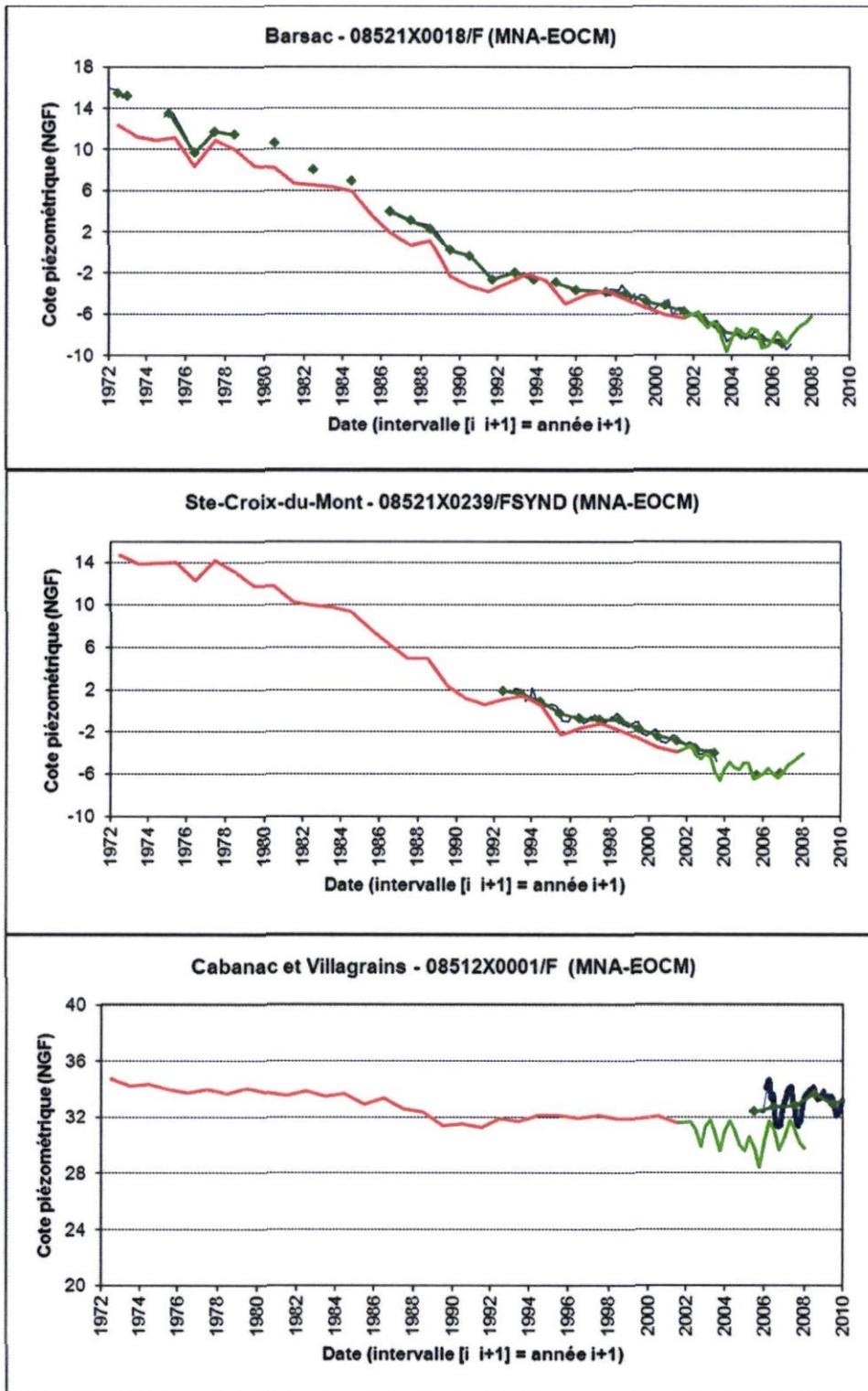


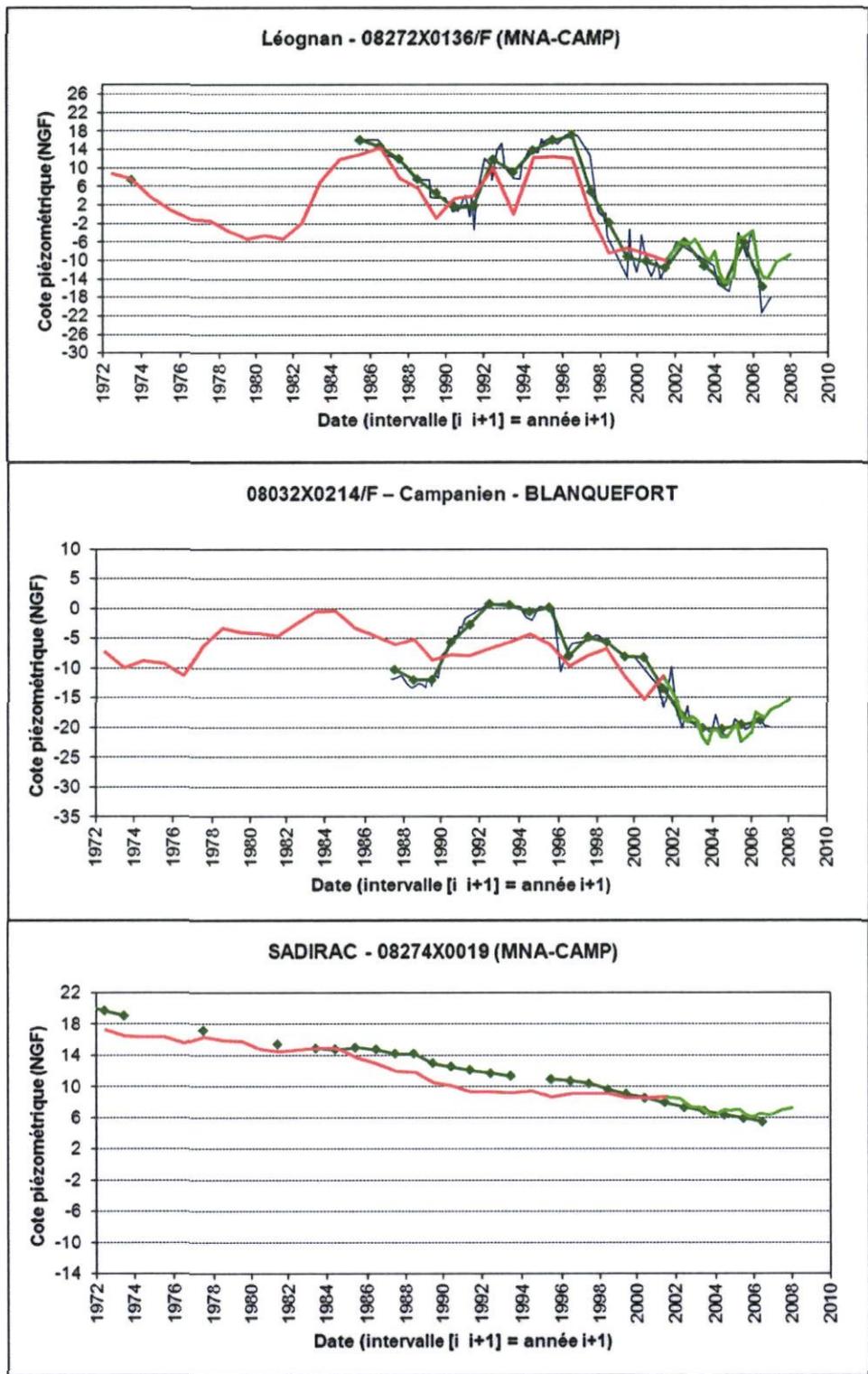


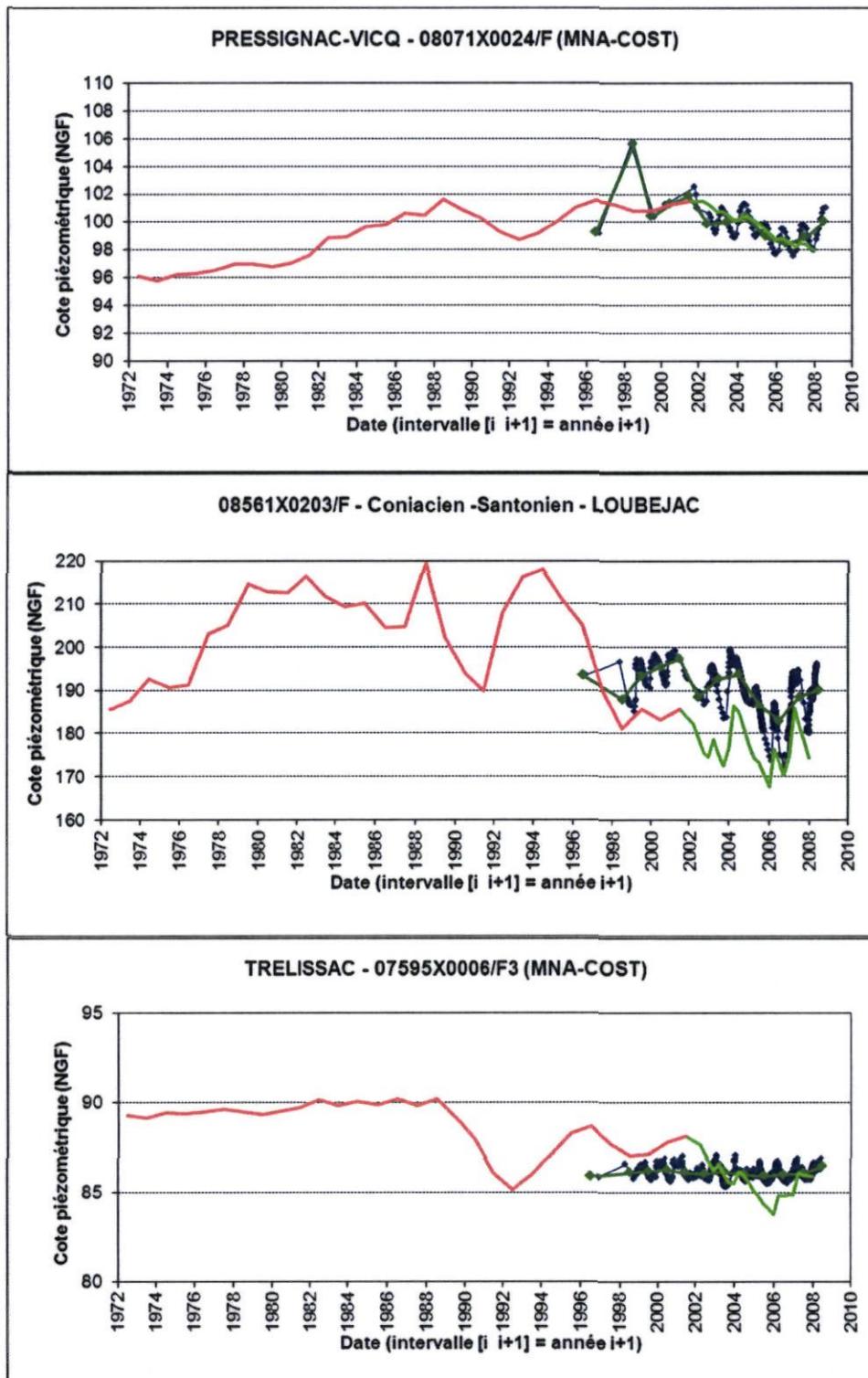


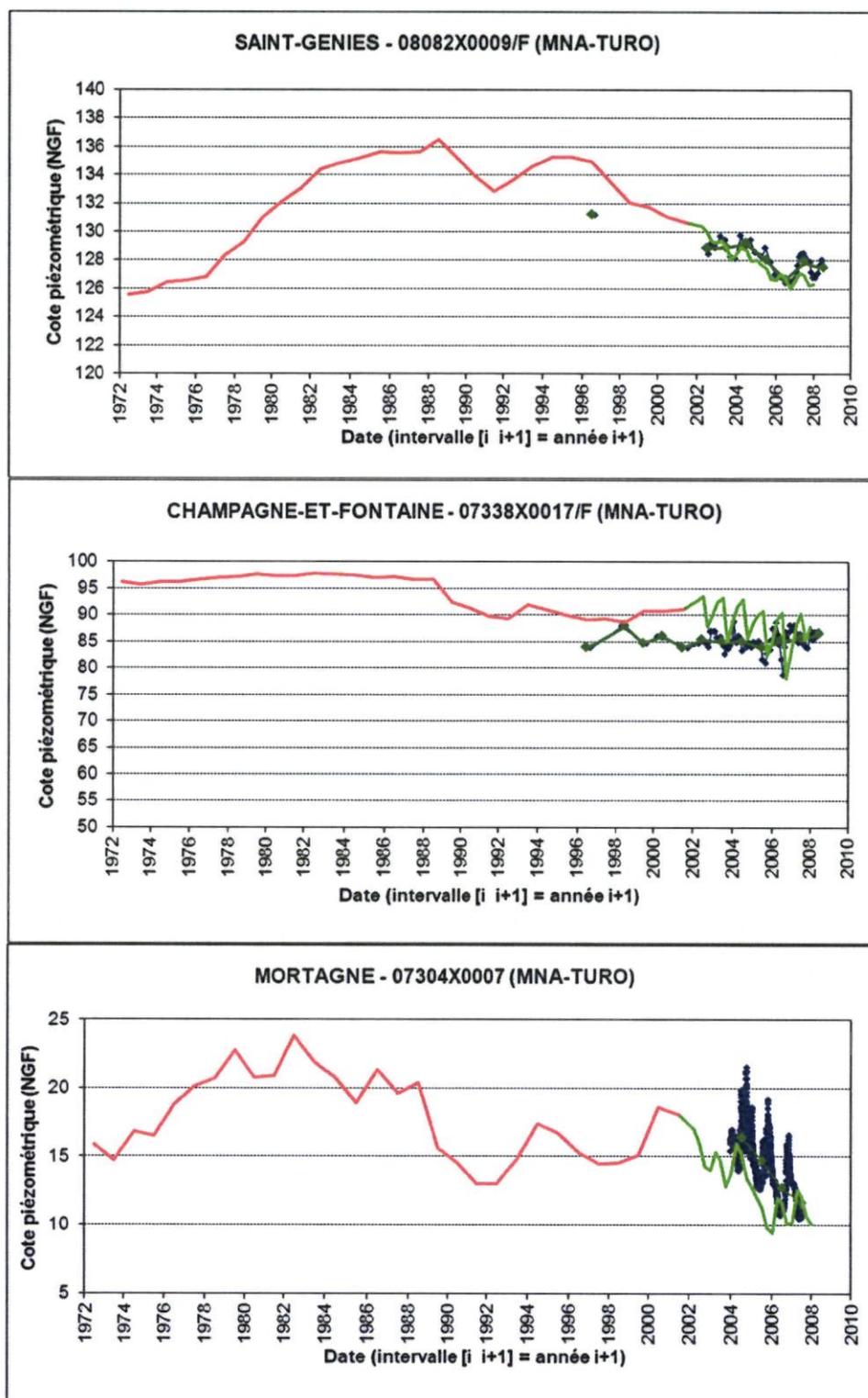


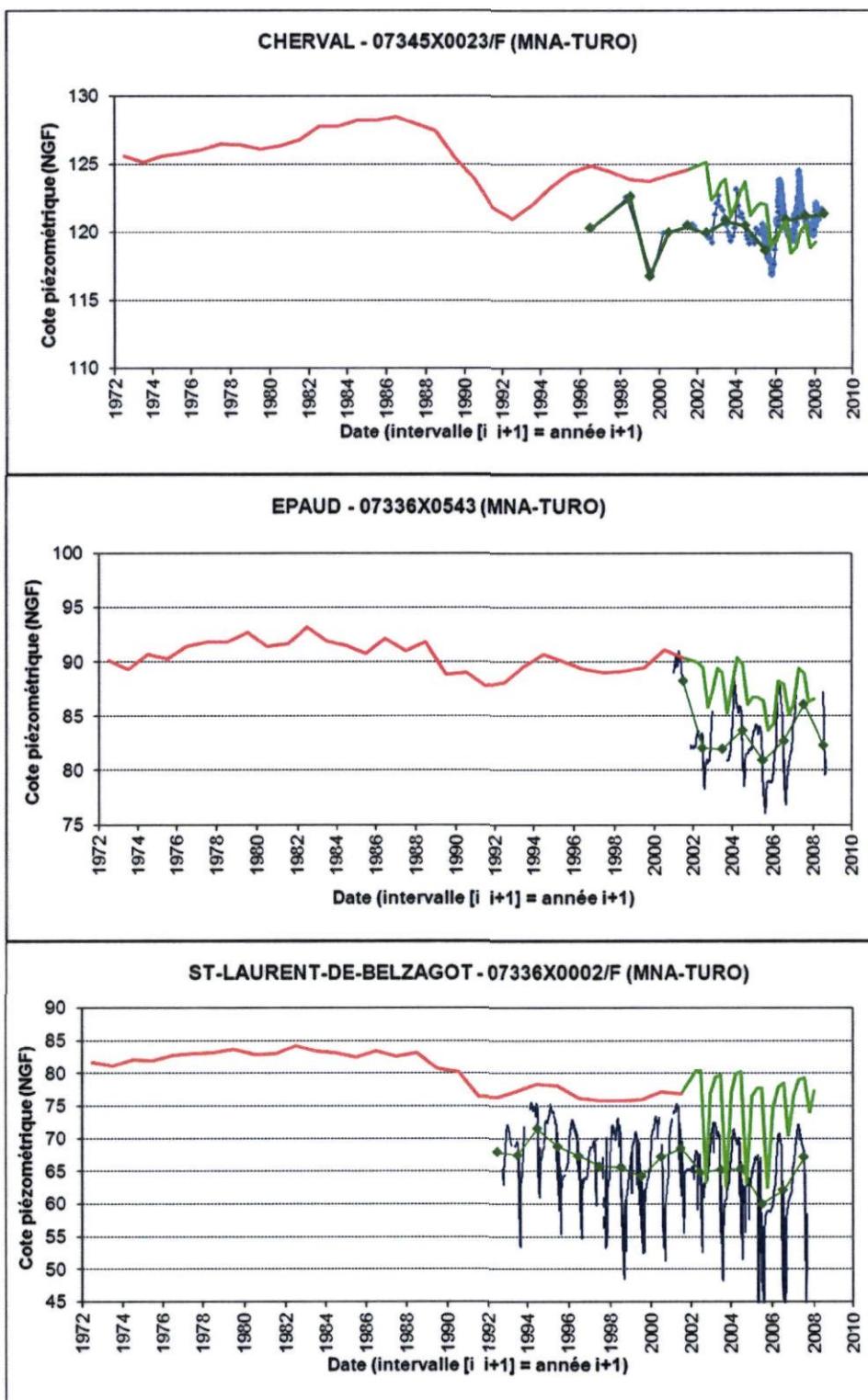


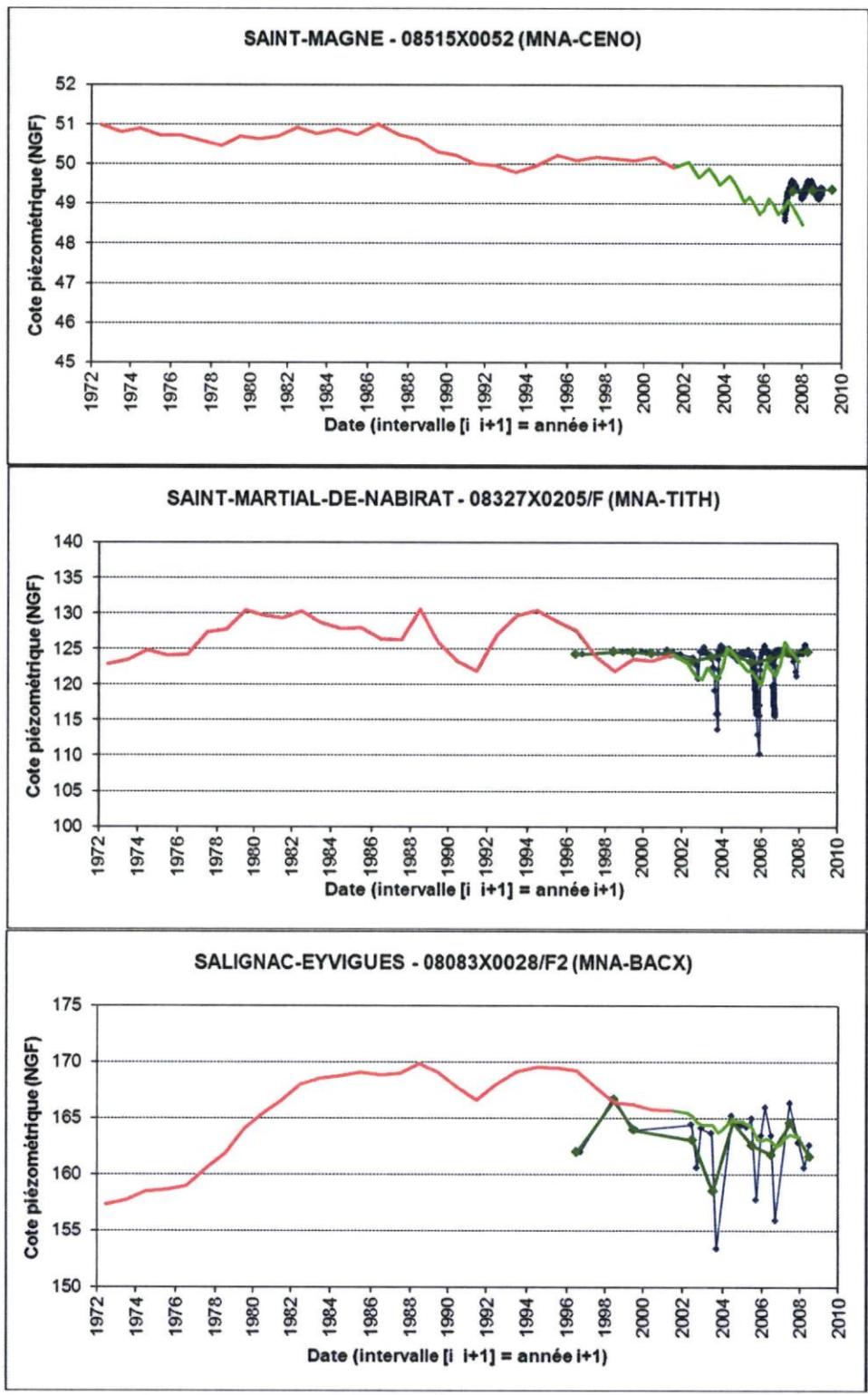








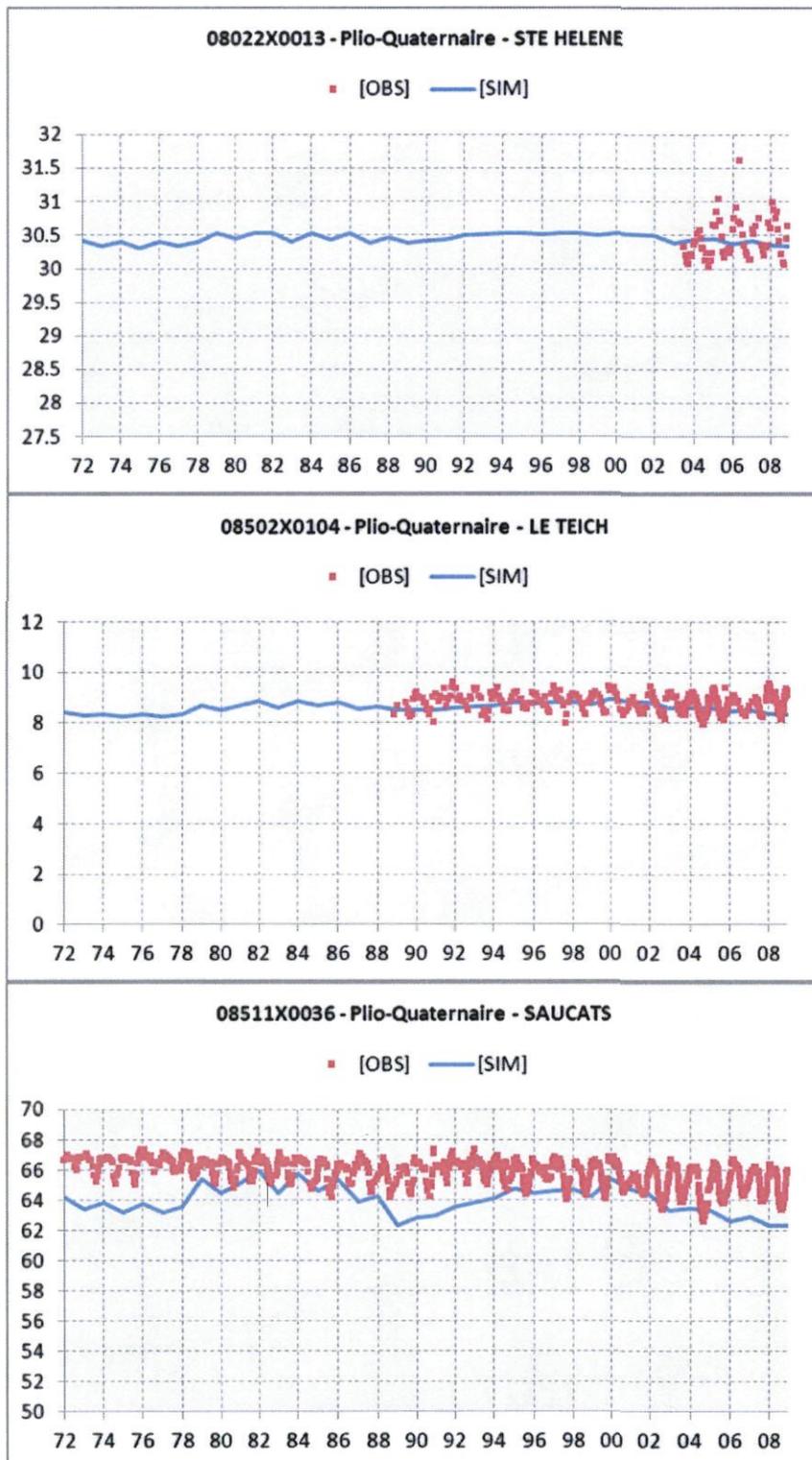


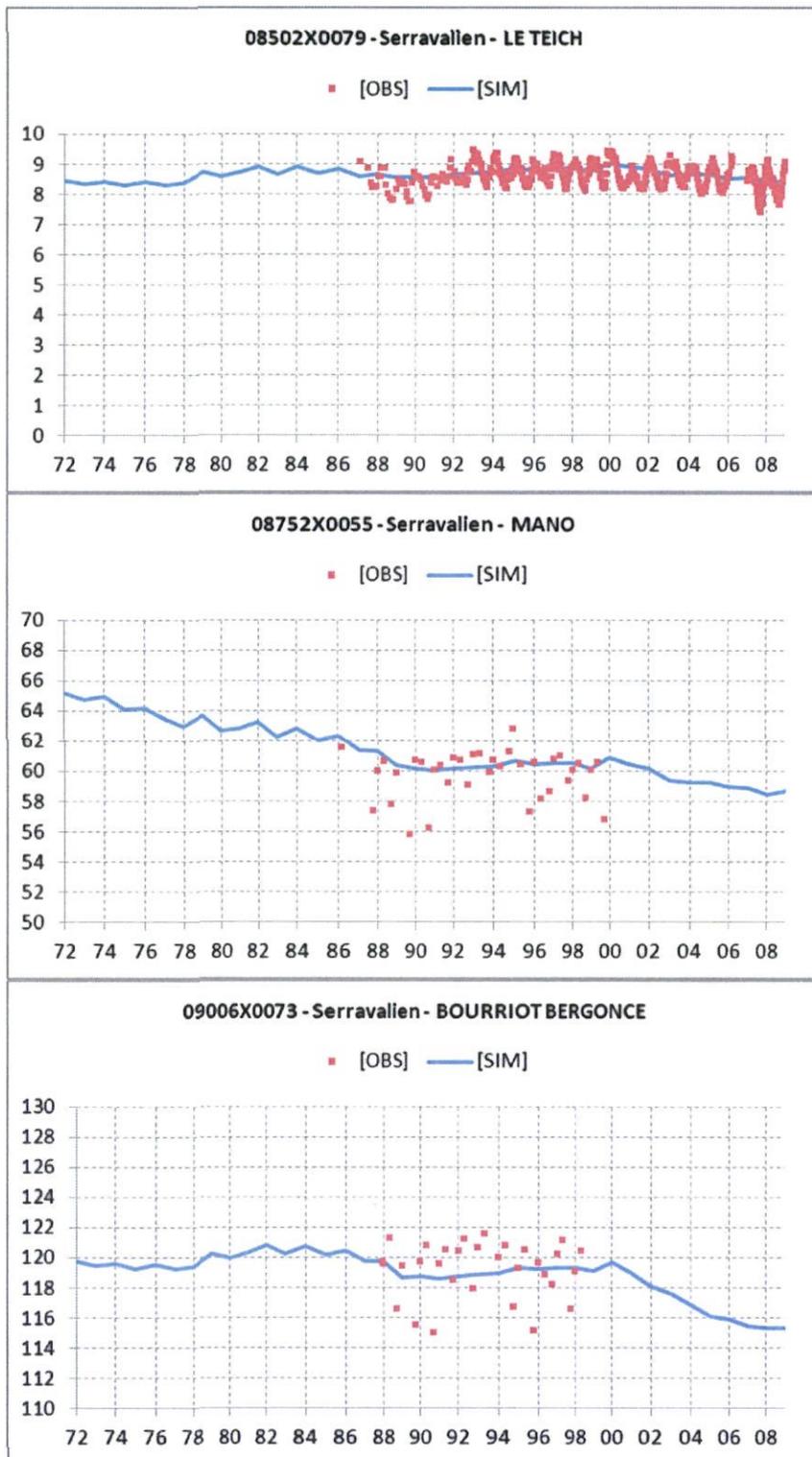


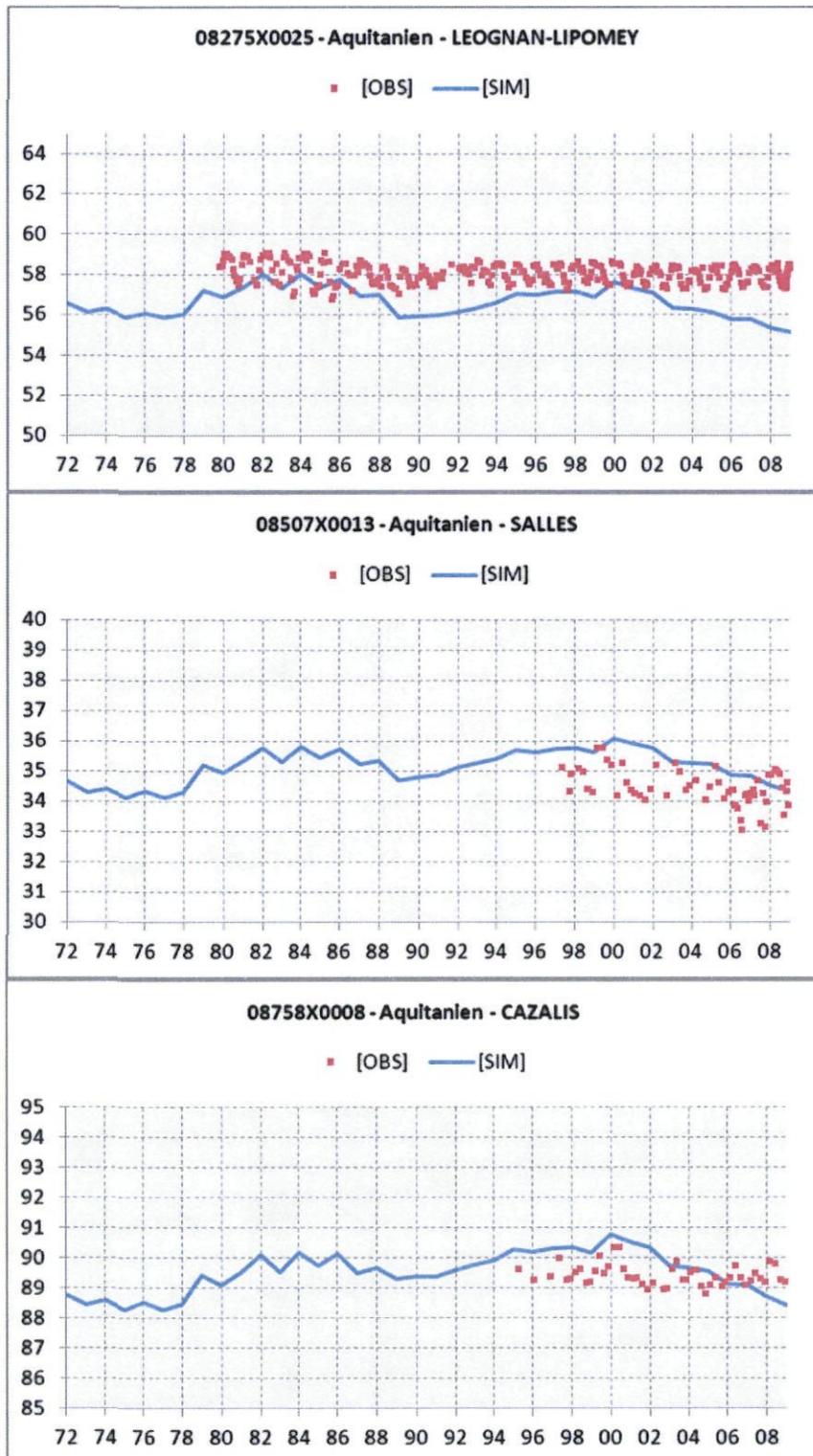
Annexe 5

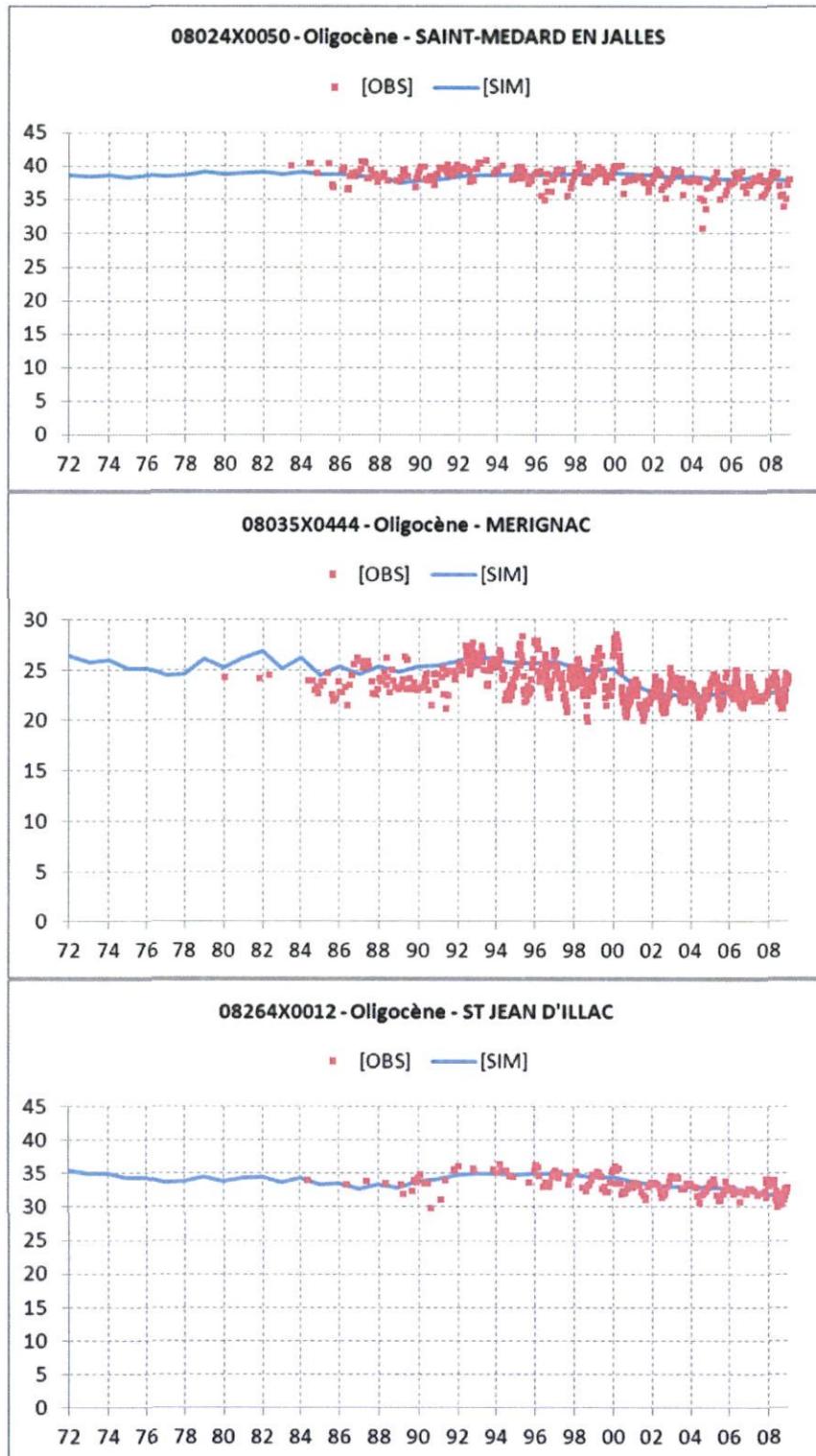
Actualisation des chroniques de calage sur la période 2008-2009

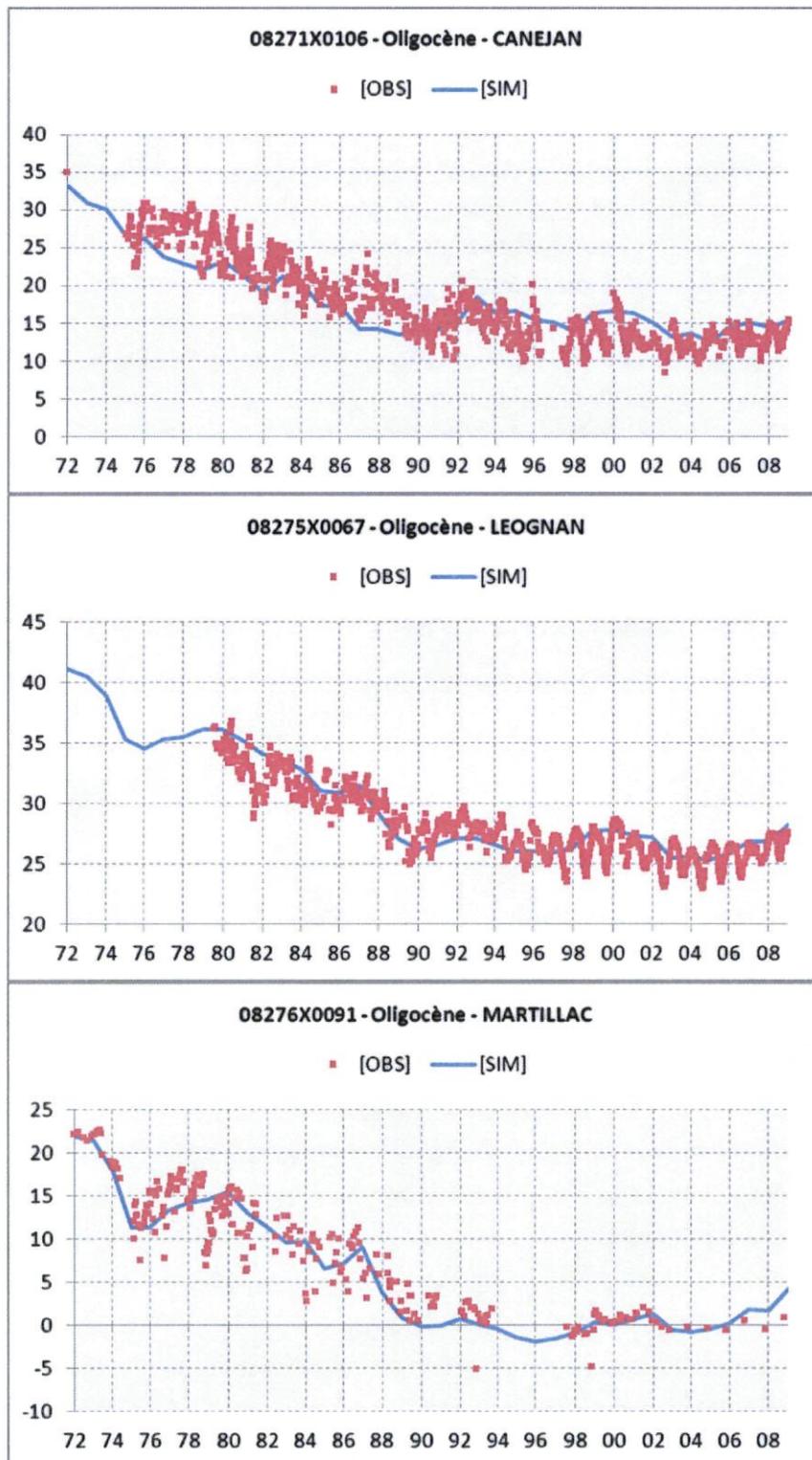


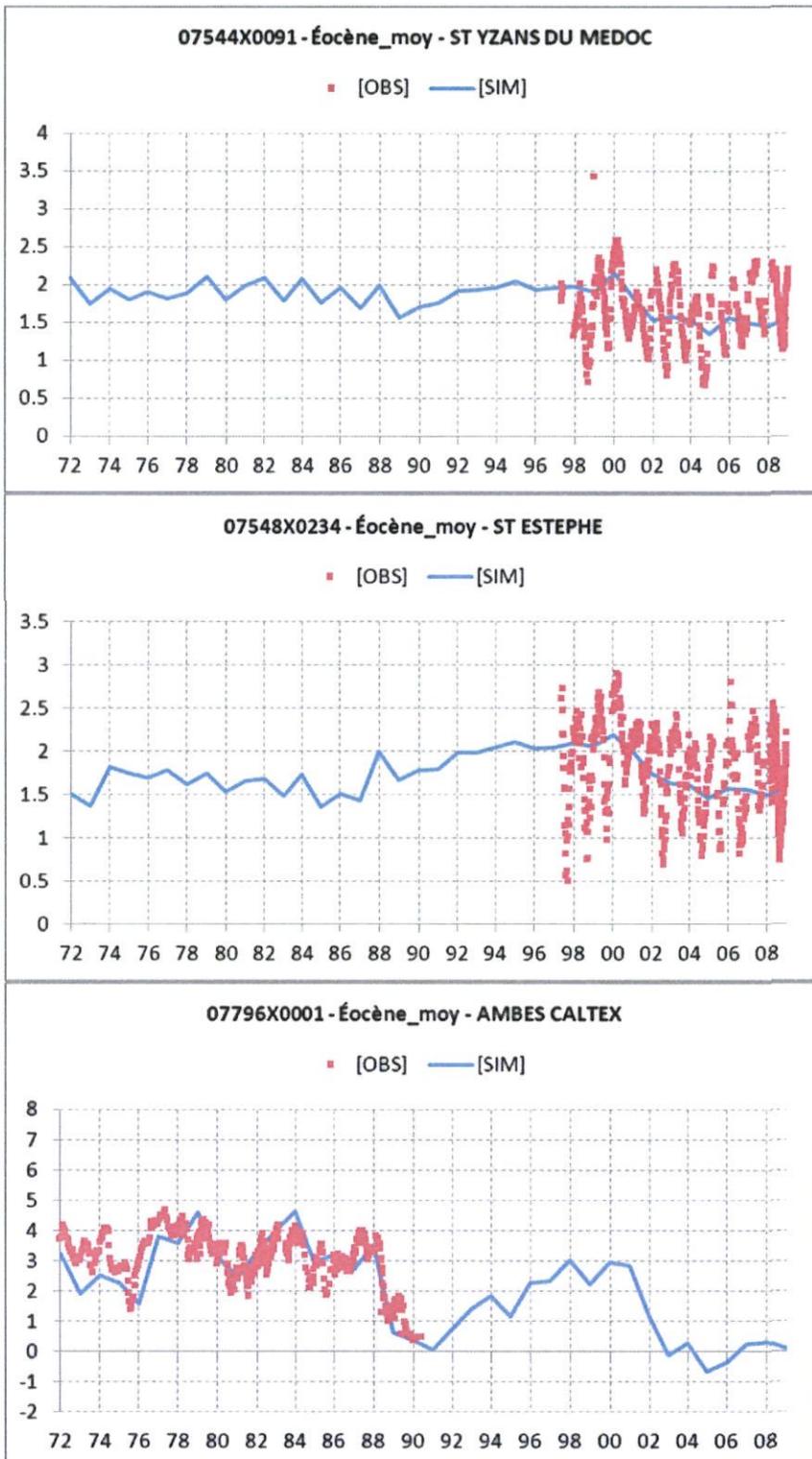


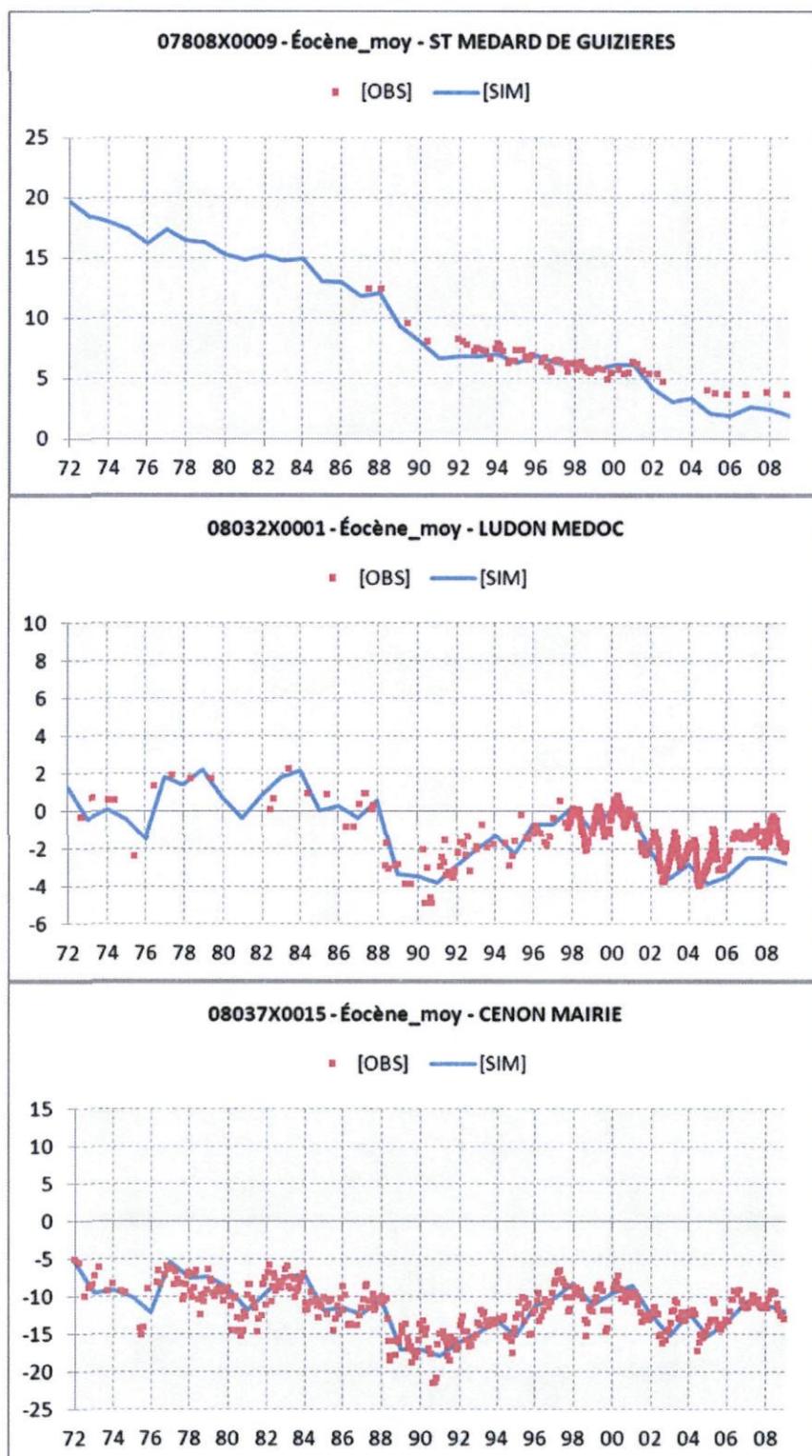


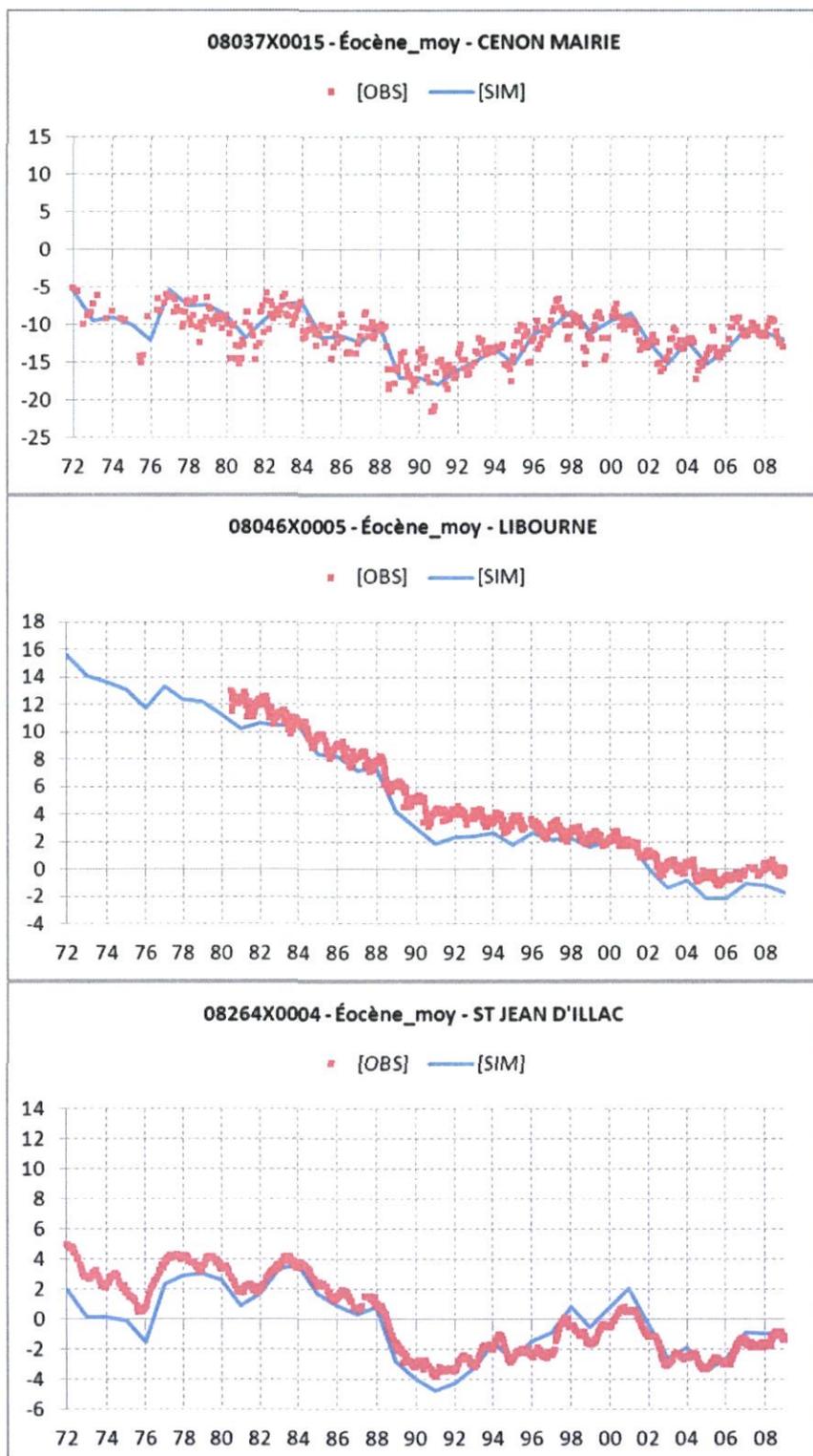


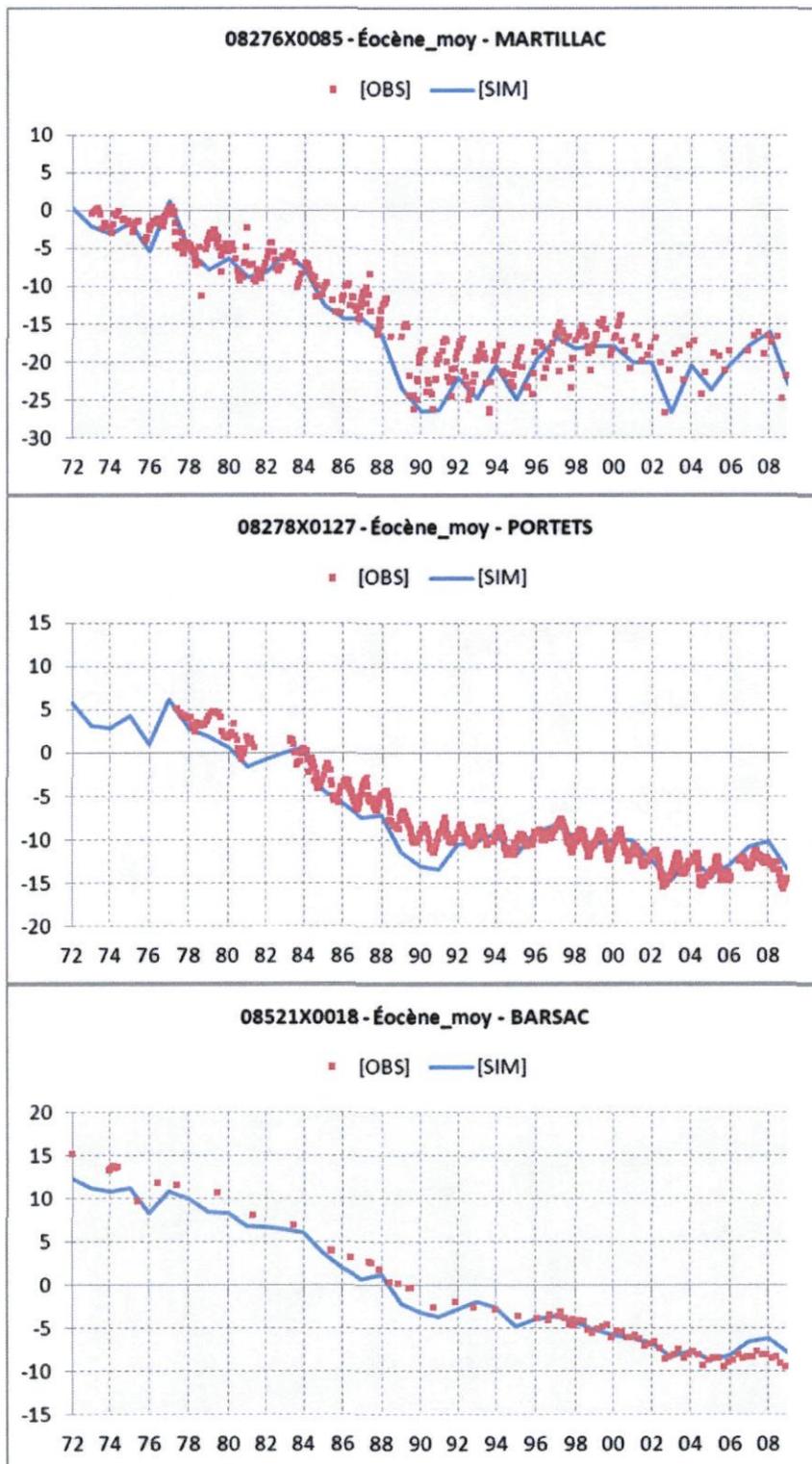


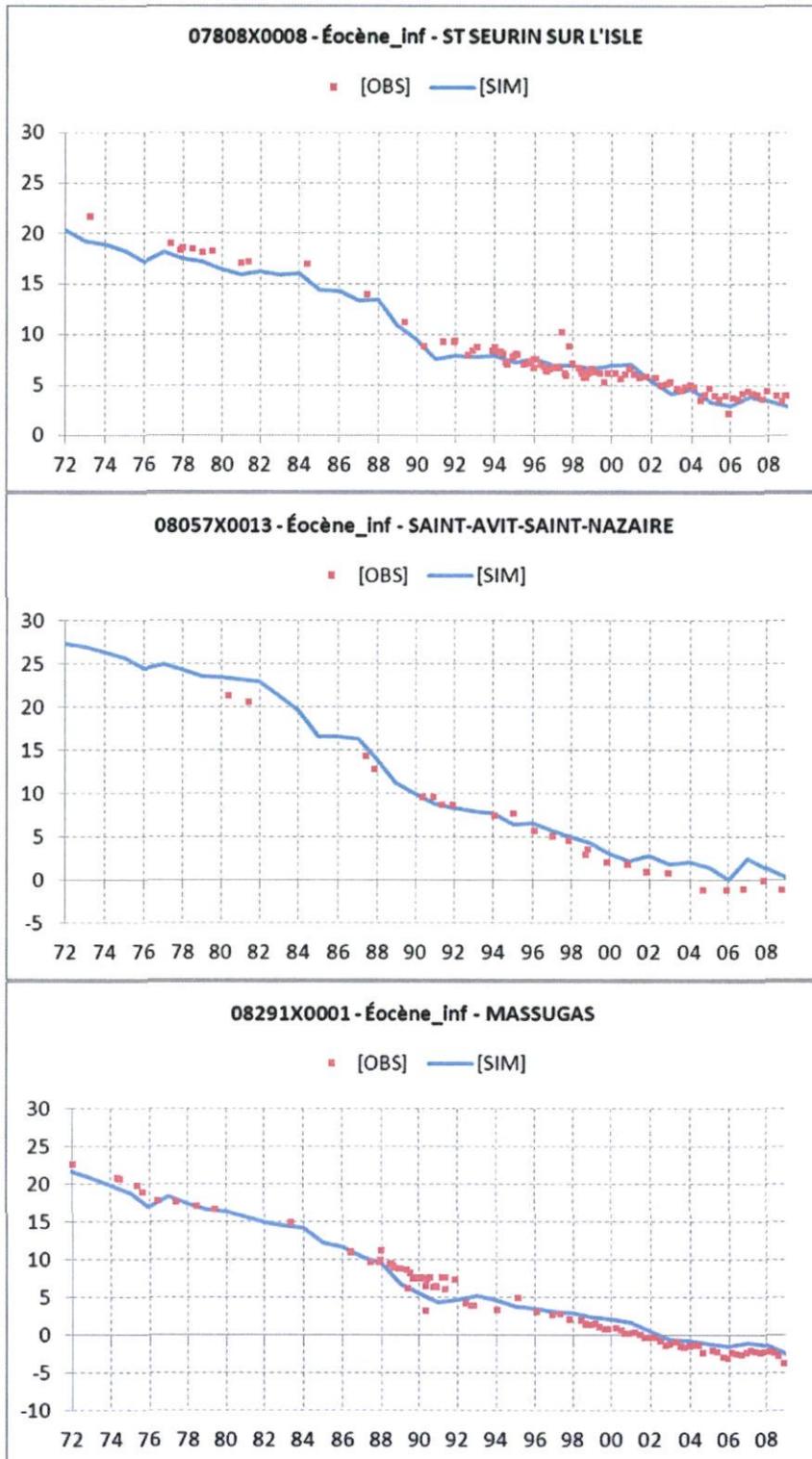


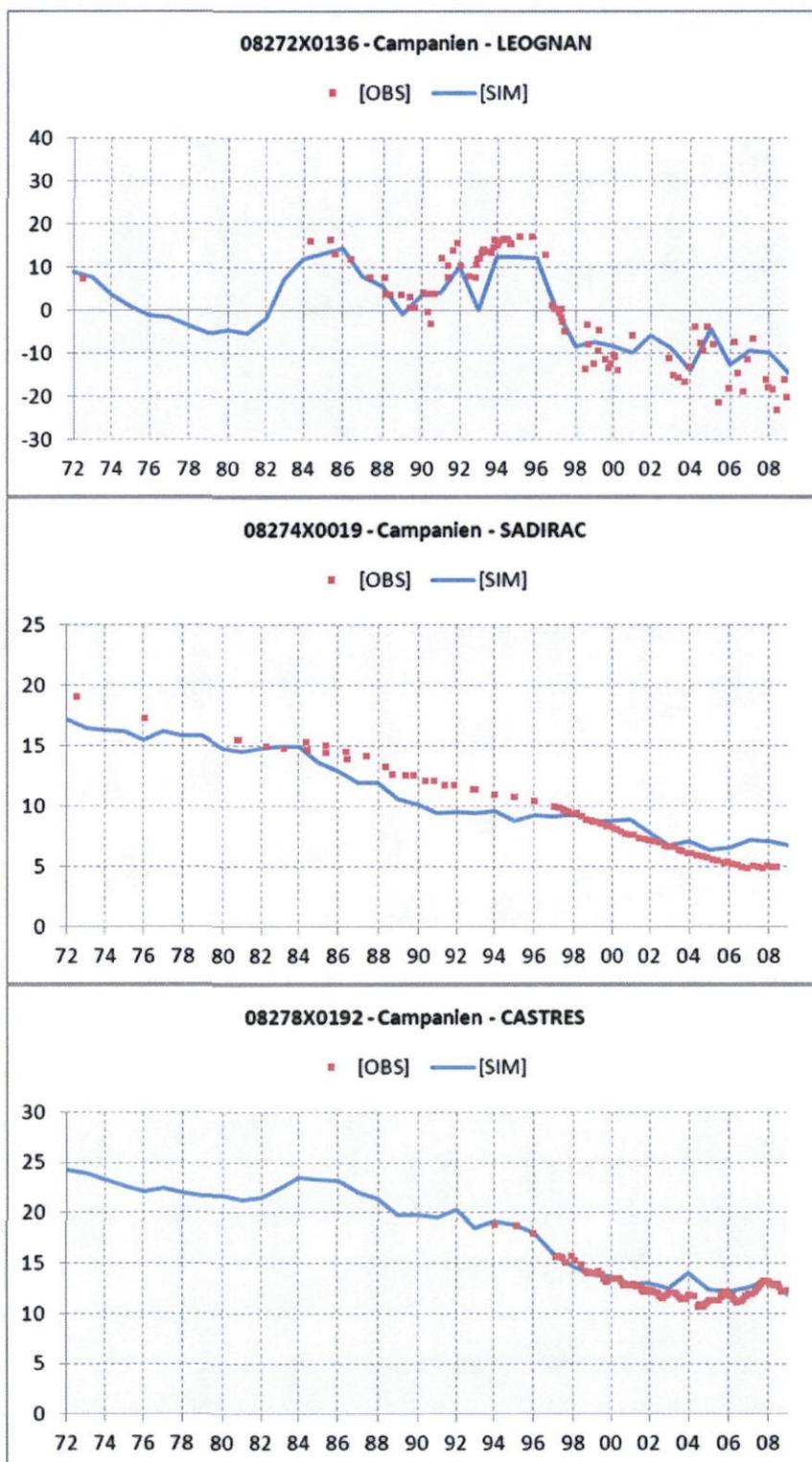


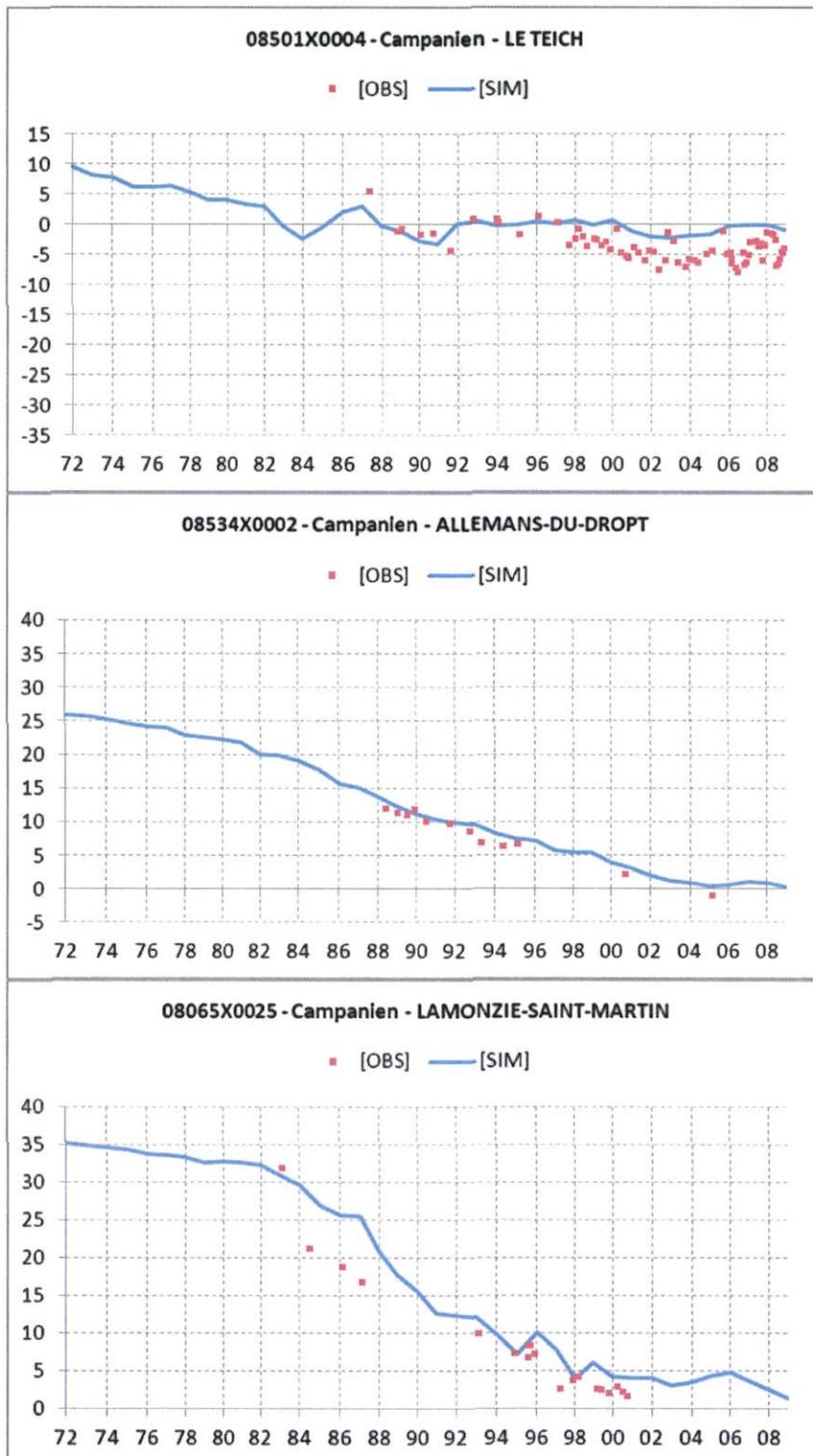


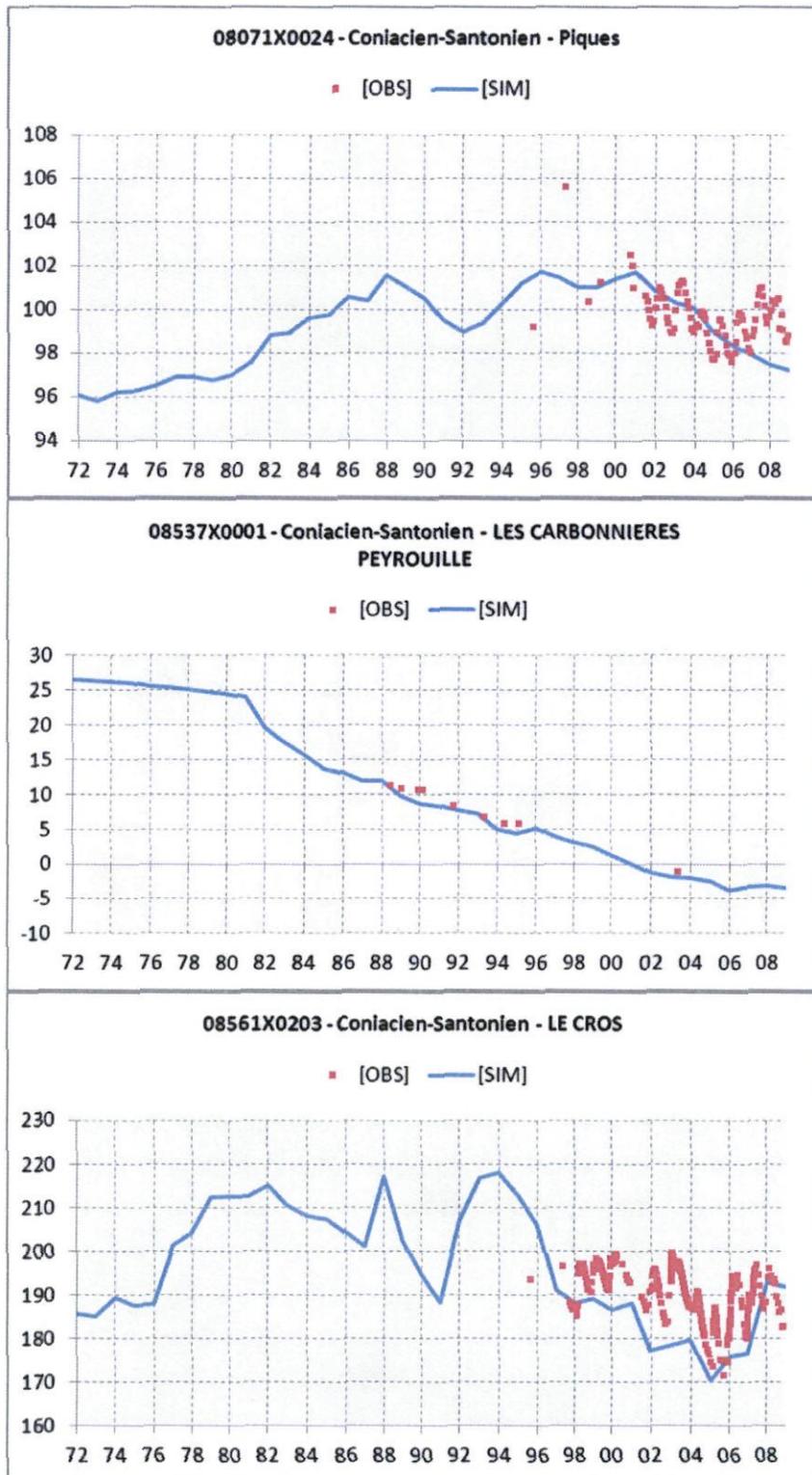


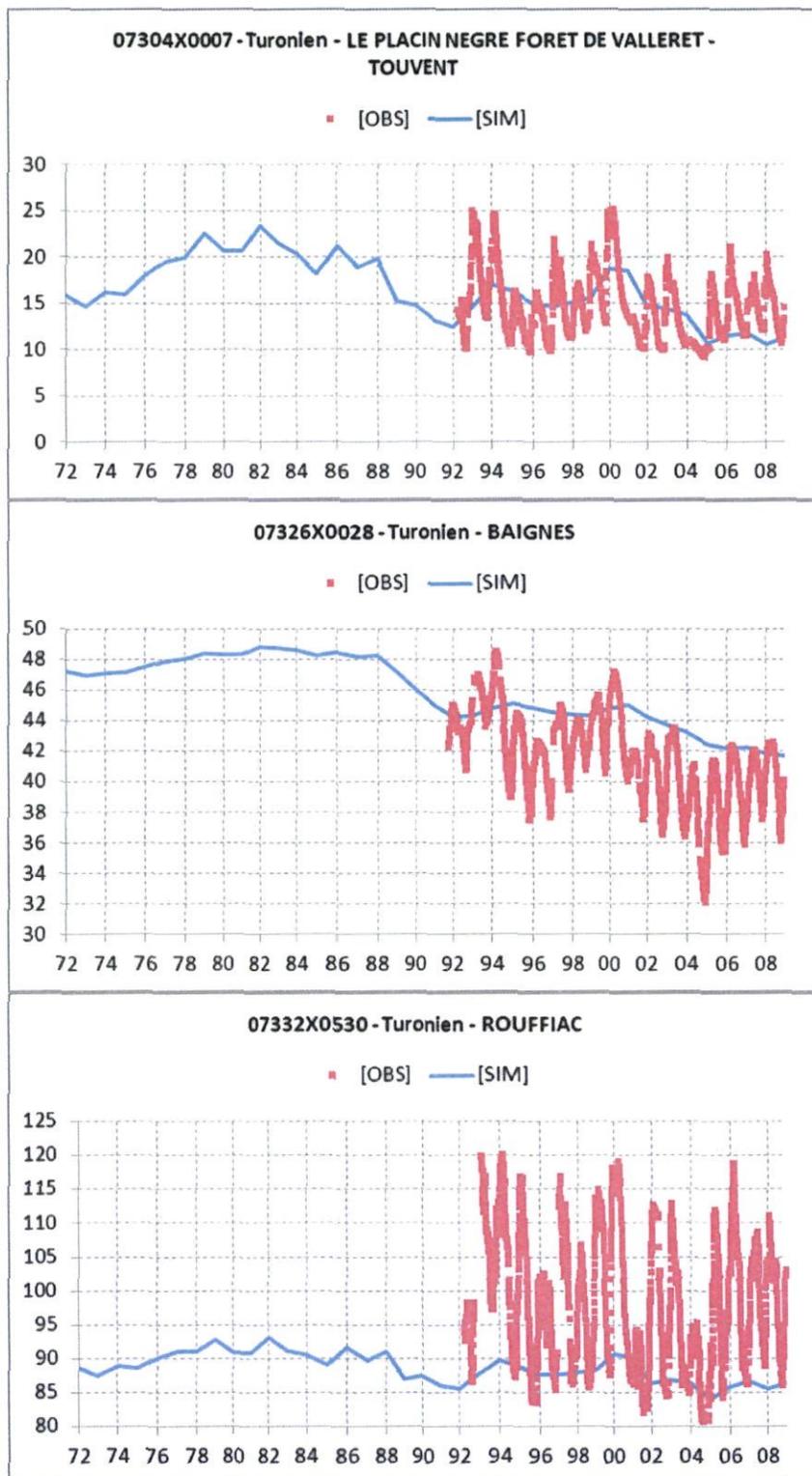


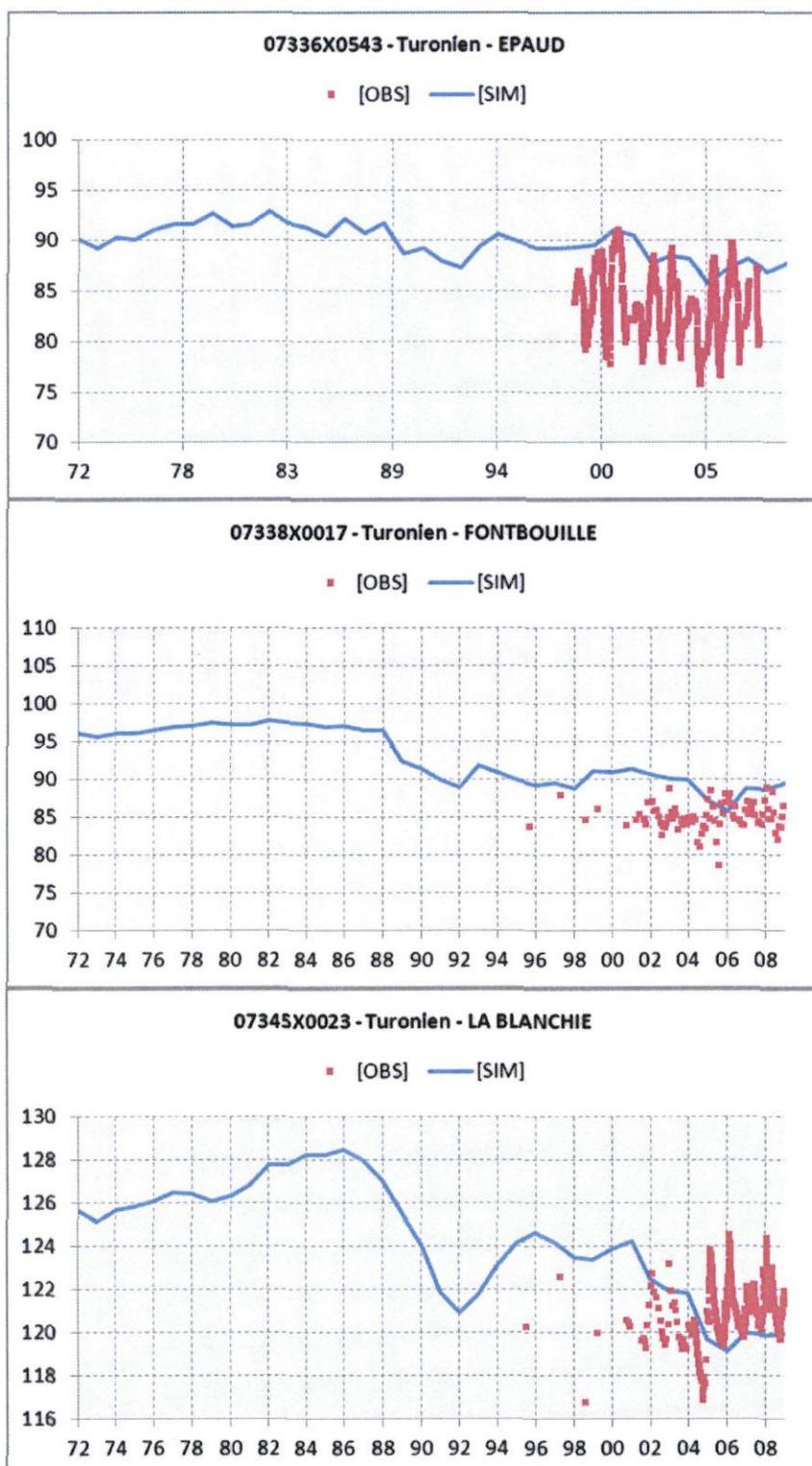


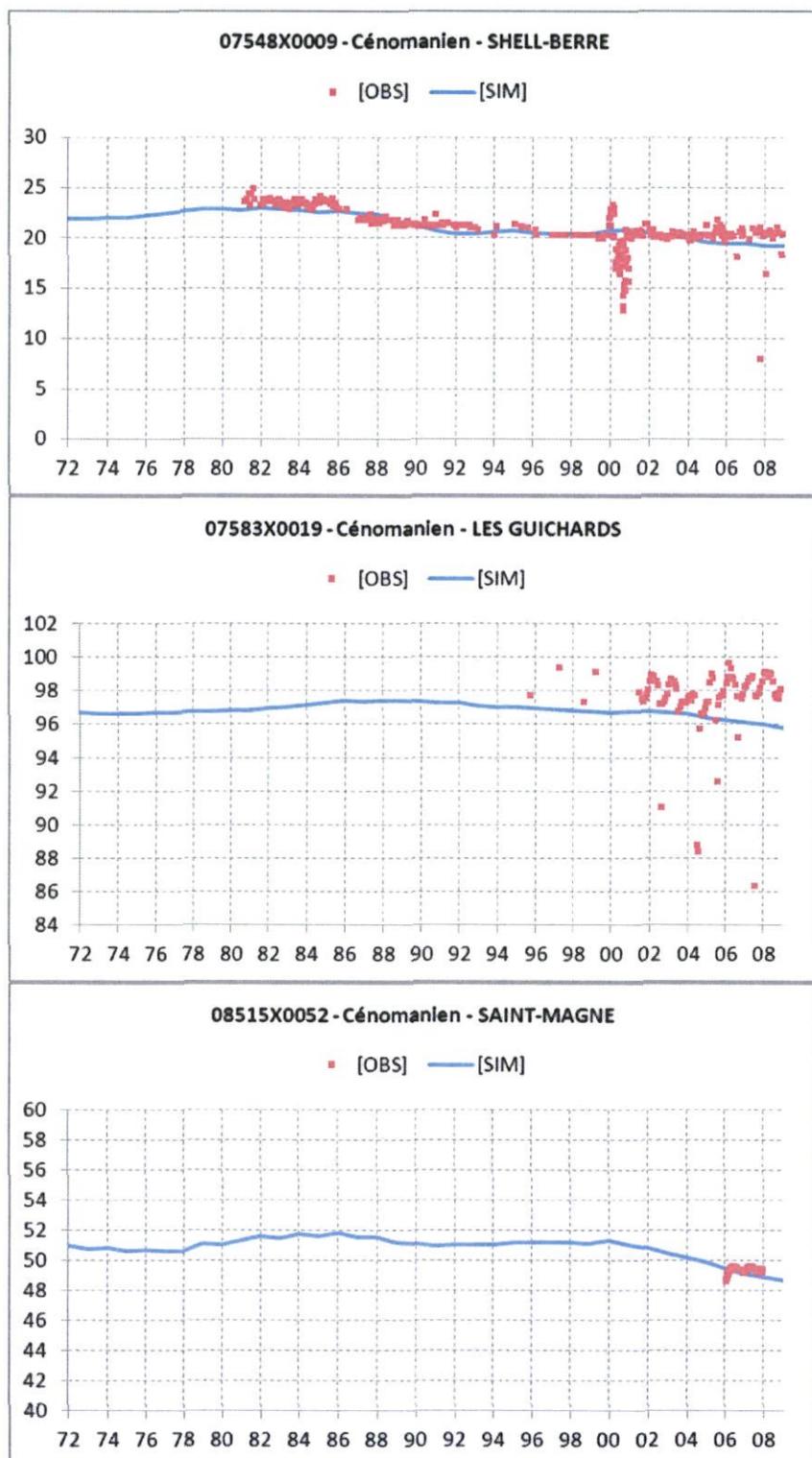


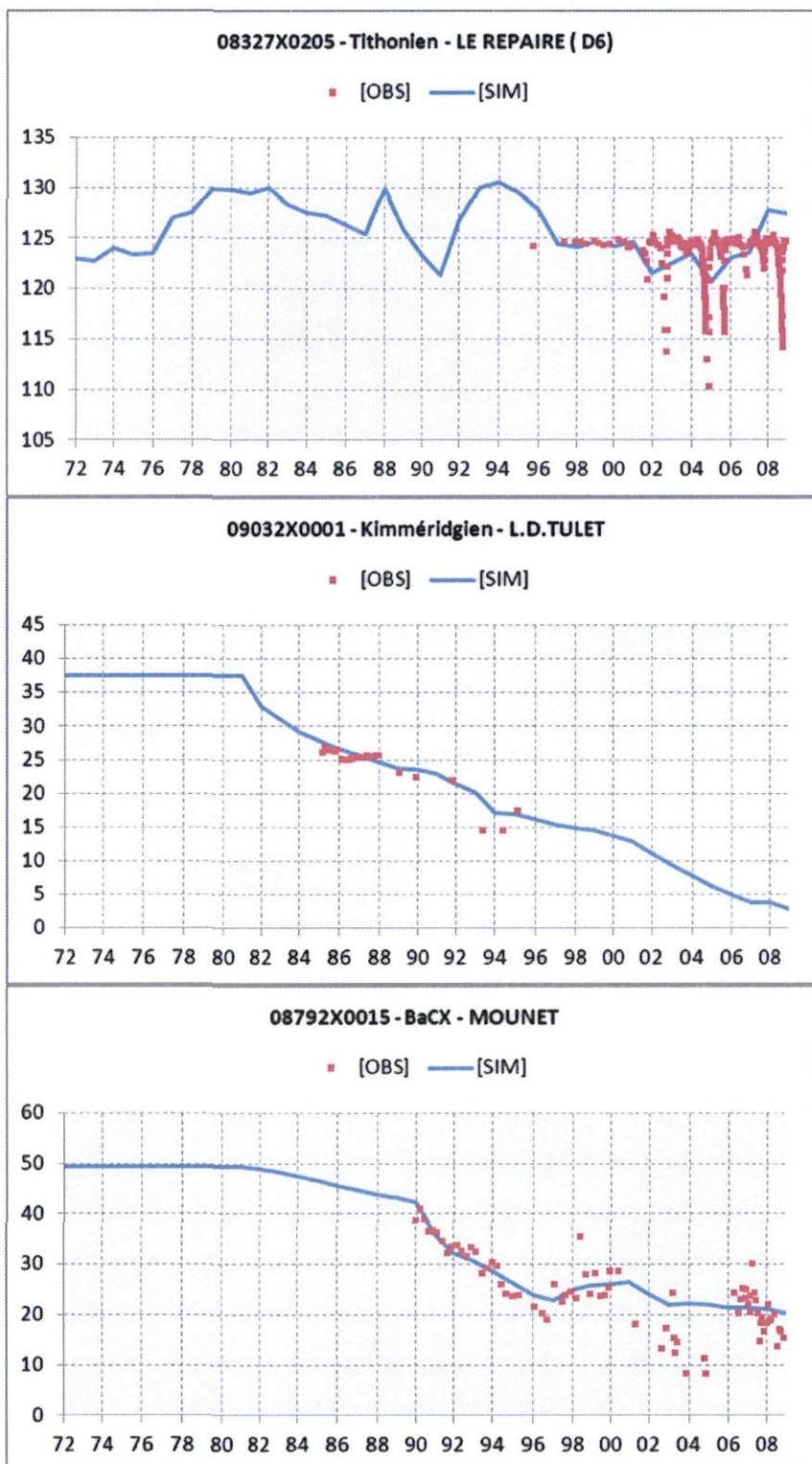


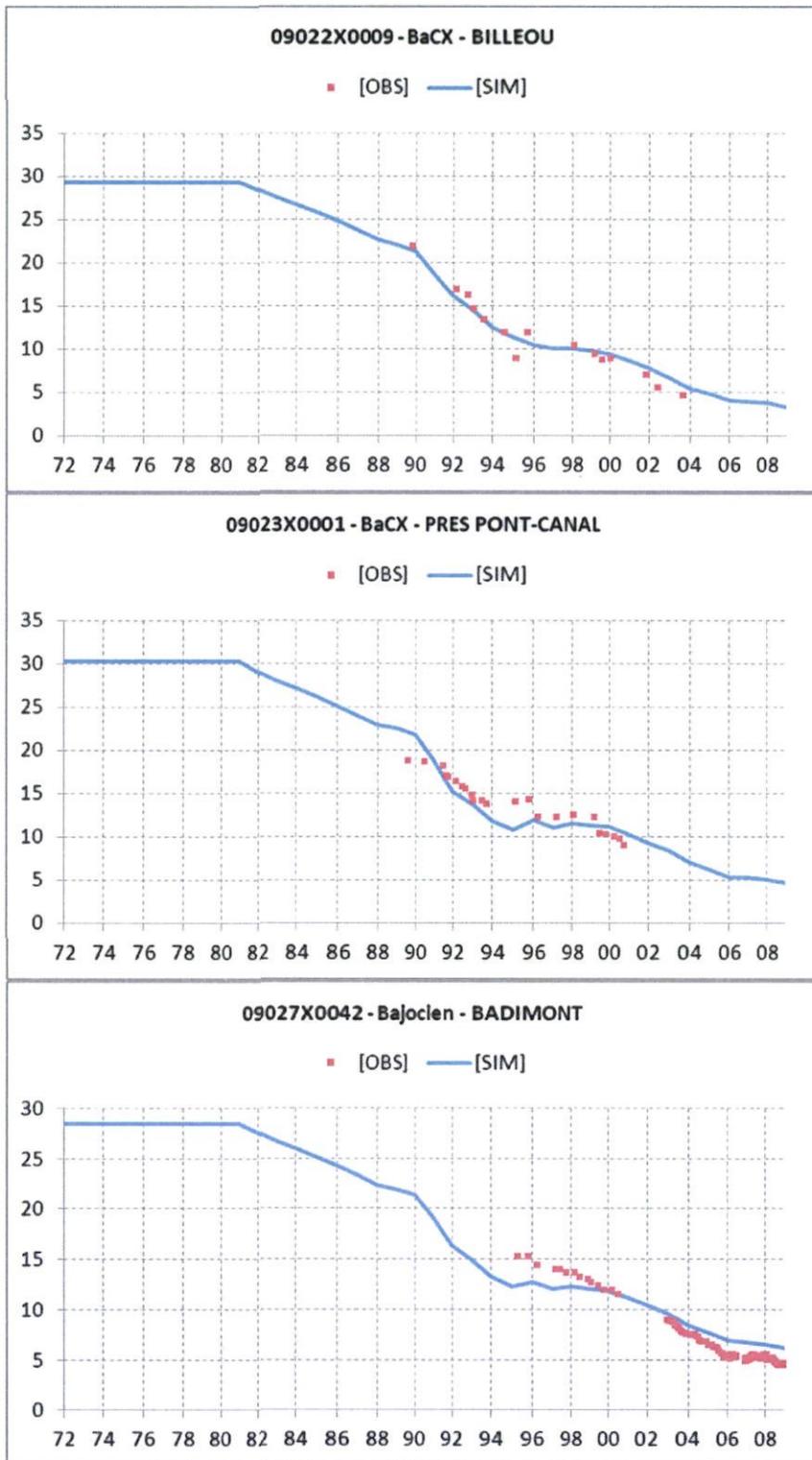












Annexe 6

Description des modèles géologiques précédents





Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Aquitaine
Parc Technologique Europarc
24, avenue Léonard de Vinci
33600 Pessac - France
Tél. : 05 57 26 52 71