

Document public



Préfecture de la région Aquitaine
Secrétariat général pour les affaires régionales



Gestion des Eaux souterraines en région Aquitaine Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes

- Module 1 - Année 4 -
Convention 2008 - 2013

Rapport final

BRGM/RP-63381-FR
Octobre 2014

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM PSP12AQI19

M. Saltel, O. Cabaret, B. Bourguine, C. Loiselet



Préfecture de la région Aquitaine
Secrétariat général pour les affaires régionales



Direction régionale
de l'Environnement,
de l'Aménagement
et du Logement
AQUITAINE

Vérificateur :

Nom : J.J. SEGUIN

Date : 20/10/2014

Approbateur :

Nom : N. PEDRON
Directeur du BRGM Aquitaine par
intérim

Date : 22/10/2014

**Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.**

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.

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

Saltel M., Cabaret O., Bourguin B., Loiselet C. (2014) - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine -Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes - Module 1 - Année 4. BRGM/RP-63381-FR, 49 p., 28 ill., 5 ann.

Synthèse

Cette étude (PSP12AQI19 et PSP12AQI23) est réalisée dans le cadre de l'année 4 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. Elle s'inscrit dans le prolongement des travaux de modélisation des aquifères de la région Aquitaine engagés par le BRGM Aquitaine 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 de préserver leur pérennité sur le long terme. L'objectif global de ce 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 du Lot-et-Garonne et de la Dordogne.

Le travail réalisé au cours de cette année d'étude a consisté à actualiser les données d'entrée du modèle dans sa version 3.3 (prélèvements, flux d'infiltration) et les chroniques piézométriques jusqu'en 2011 de manière à pouvoir bénéficier d'un outil le plus à jour possible. Cette actualisation a démontré que le modèle retranscrit bien la piézométrie mesurée 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.

En parallèle à la maintenance de la version 3.3 du MONA, ce module a permis de finaliser l'élaboration de la géométrie de la version 4 du modèle dont l'objectif est d'améliorer encore sa représentativité. La modélisation a nécessité de revisiter la géologie du Bassin aquitain en élaborant au préalable une base de données de référence. Cette dernière comprend la description de 3 480 forages, les données diagraphiques disponibles de plus de 250 forages soit 343 mesures, les affleurements cartographiés des couches aquifères issus du Référentiel Hydrogéologique BD LISA sur l'équivalent de 100 cartes géologiques, les données sismiques disponibles (secteur de Villagrains-Landiras) et le tracé des failles.

La construction du modèle géologique proprement dit a été initiée en année 3. Du fait de la limitation du logiciel en termes de nombre de couches, 3 modèles ont été nécessaires pour retranscrire l'ensemble du système multicouche : un modèle pour les formations du Tertiaire, un autre pour le Crétacé et un dernier pour le Jurassique. Au final, le modèle géologique global comporte 30 couches dont 15 aquifères, 14 épontes et une couche de recouvrement sur le Quaternaire, soit 31 surfaces à interpoler.

Un travail important de validation et de mise en cohérence des données a été réalisé. Il a notamment porté sur la correspondance des données de sondage et des cartes géologiques. Etant donné l'importance de la surface modélisée, c'est près de 100 cartes géologiques qu'il a fallu revisiter pour faire coïncider au mieux les observations en forages avec les affleurements de la carte. Les limites d'extension des aquifères ont également été revues dans le cadre de la modélisation géologique.

Le modèle tertiaire a fait l'objet d'une attention particulière en raison de sa complexité, du nombre très important de forages qui recoupent ces formations et de son importance stratégique pour l'alimentation en eau potable. Les horizons du Crétacé et du Jurassique avaient fait l'objet de travaux de modélisation récents [(Pédrón et al., 2006) ; (Pédrón et al.,

2008)]. Les nouvelles versions de ces modèles ont été construites de manière à bénéficier de tout le travail d'interprétation qui avait été réalisé à l'époque, notamment via l'apport des profils sismiques réinterprétés du Bassin aquitain (Serrano et al., 2006), tout en intégrant les données les plus récentes (nouveaux forages atteignant ces horizons). Des forages de contraintes ont donc été générés dans les secteurs où la donnée réelle était la moins dense.

In fine, l'amélioration de la géométrie du modèle finalisé en année 4 a permis de représenter à une échelle plus fine la complexité des réservoirs du Nord du Bassin aquitain. Les toits et les murs des 30 couches du modèle géologique ont été implémentés dans le modèle hydrodynamique via l'interface graphique Winmarthe du logiciel de modélisation **MARTHE**. Les premières simulations en régime transitoire ont été réalisées à partir des données spatio-temporelles provenant de la version 3.3 du MONA sans toutefois entamer le processus de calage.

L'année 5 sera pleinement consacrée à la modélisation hydrodynamique. Dans un premier temps les simulations seront réalisées en régime permanent dans le but de valider les choix de construction du modèle (conditions aux limites, recharge...) et d'obtenir une première estimation des champs de perméabilité.

En parallèle, les données d'entrée du modèle ainsi que les chroniques d'observation seront actualisées avec les données de l'année 2012. Le but étant de maintenir le modèle opérationnel et de 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-2012.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Actualisation des données spatio-temporelles	11
2.1. PRELEVEMENTS	11
2.1.1. Collecte des données de prélèvements	11
2.1.2. Traitement des données collectées	11
2.1.3. Bilan général de l'actualisation des données de prélèvements du modèle Nord-Aquitain sur la période 2010-2011	13
2.2. CALCUL DES PRECIPITATIONS EFFICACES ET ACTUALISATION DES DONNEES DE RECHARGE DES NAPPES DU MODELE NORD-AQUITAIN	14
2.2.1. Les précipitations efficaces	14
2.2.2. La recharge	16
2.3. CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES	18
2.4. RESULTATS DU MODELE ACTUALISE	19
2.4.1. Les chroniques de calage	19
2.4.2. Les cartes piézométriques	20
3. Actualisation de la géométrie des réservoirs du Bassin Nord Aquitain	23
3.1. OBJECTIF	23
3.2. BILAN DES ANNEES PRECEDENTES	23
3.3. OUTILS ET PRINCIPES	24
3.4. DONNEES NECESSAIRES A LA MODELISATION	26
3.4.1. Données de forage	26
3.4.2. Carte géologique	27
3.4.3. Modèle Numérique de Terrain (MNT)	29
3.4.4. Données sismiques	29
3.4.5. Failles	29
3.5. CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTS MODELES	31
3.5.1. Le modèle tertiaire	31
3.5.2. Le modèle crétacé	36
3.5.3. Le modèle jurassique	38
3.6. VALIDATION DES DONNEES	40
3.6.1. Mise en cohérence carte géologique / forages	40
3.6.2. Ajustement des limites d'extension maximale des formations	40
3.6.3. Validation de la cohérence spatiale du modèle - vision 2 D et 3D	40

3.7. INTEGRATION DANS MARTHE - 1 ^{ERE} SIMULATION EN REGIME PERMANENT	42
4. Conclusion	45
5. Bibliographie	47

Liste des illustrations

Illustration 1 - Prélèvements dans les aquifères modélisés du MONA en 2009 et 2011 (m ³ /an).....	13
Illustration 2 - Évolution des prélèvements dans les couches du Modèle Nord Aquitain de 1972 à 2011 tous départements confondus.....	14
Illustration 3 - Évolution des précipitations efficaces annuelles à la station de Mérignac (33) pour une Réserve Utile (RU) de 150 mm.....	15
Illustration 4 - Précipitations efficaces 2010 et 2011 calculées pour les 5 stations météorologiques prises en compte dans le MONA V3.3b-2011 (RU=150 mm).	15
Illustration 5 - Moyenne et écarts-type des précipitations efficaces pour les 5 stations prises en compte dans le MONA V3.3b-2011.	15
Illustration 6 - Localisation des zones d’affleurement du modèle pour chaque nappe et source des données de pluies utilisées pour le calcul de la recharge	17
Illustration 7 - Nombre de chroniques piézométriques utilisés pour le calage	18
Illustration 8 - Localisation des 423 points d’observation.	19
Illustration 9 - Exemple de comparaison entre les niveaux observés et simulés - forage de Bouliac (Eocène moyen).....	20
Illustration 10 - Niveaux piézométriques simulés par le modèle Nord-Aquitain version MONA V3.3b-2011 dans l’aquifère « Eocène moyen » pour les années 2010 et 2011.....	21
Illustration 11 - Pile stratigraphique des formations modélisées.	25
Illustration 12 - Codification des forages - Illustration schématique de la problématique de concaténation des données.....	26
Illustration 13 - Évolution de la base forage au cours du temps.	27
Illustration 14 - Évolution du maillage entre la version 3 et la version 4 du MONA.	28
Illustration 15 - Pile stratigraphique du modèle tertiaire.	31
Illustration 16 - Limites d’extension des formations aquifères du modèle tertiaire utilisées pour la modélisation.	32
Illustration 17 - Failles prises en compte dans le modèle tertiaire.	33
Illustration 18 - Apport des données sismiques dans la modélisation géologique (secteur de Villagrains- Landiras).	34
Illustration 19 - MNT ré-échantillonné à la maille de 500 m.	35
Illustration 20 - Pile stratigraphique du modèle crétacé.	36
Illustration 21 - Limites d’extension maximale des formations aquifères du modèle crétacé utilisées pour la modélisation.	37
Illustration 22 - Pile stratigraphique du modèle jurassique.....	38
Illustration 23 - Limites d’extension du Bajocien, seule extension du Jurassique utilisée pour contraindre l’interpolation.	39

Illustration 24 - Contrôle de cohérence à l'aide de 36 coupes.	41
Illustration 25 - Exemple de visualisation 3D du modèle géologique.	42
Illustration 26 - Comparaison des différentes versions du MONA.	43
Illustration 27 - Nombre de mailles et superficie de chaque couche du MONA en version V4.	43
Illustration 28 - Première restitution piézométrique dans le MONA V4 (Nappe de l'Oligocène).	44

Liste des annexes

Annexe 1 : Historique du Modèle Nord Aquitain	51
Annexe 2 : Actualisation des chroniques de calage – période 1972 - 2011	57
Annexe 3 : Coupes réalisées dans le modèle géologique	77
Annexe 4 : Cartes des isobathes des murs et des toits du modèle géologique	115
Annexe 5 : Vues 3 D dans le modèle géologique	147

1. Introduction

Les travaux présentés dans ce rapport ont été effectués dans le cadre du module 1 de l'année 4 (2011-2012) de la convention "Gestion des eaux souterraines en région Aquitaine" (convention comprenant 7 modules) 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.

Cette étude fait suite aux travaux de modélisation des aquifères de la région Aquitaine engagés par le BRGM Aquitaine depuis près de 20 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 MOdèle 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 20 ans [(Braneyre et al., 1993) ; (Braneyre et al., 1993) ; (Braneyre et al., 1994) ; (Amraoui et al., 1998) ; (Amraoui et al., 1999) ; (Seguin, 1999) ; (Seguin, 1999) ; (Seguin, 2002) ; (Pédron et al., 2003) ; (Pédron et al., 2005) ; (Pédron et al., 2006) ; (Pédron et al., 2006) ; (Pédron et al., 2007) ; (Pédron et al., 2008) ; (Pédron et al., 2008) ; (Gomez et al., 2010) ; (Saltel et al., 2011), (Saltel et al., 2012)]. 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.

Le modèle 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 dans le secteur de Sainte-Hélène en Gironde [(Pédron et al., 2009) ; (Saltel, 2012) ; (Cabaret et al., 2012)] et a aussi servi à réaliser des simulations prospectives permettant d'évaluer les effets de différentes conditions de recharge et d'exploitation de la ressource sur les nappes du Secondaire de Dordogne et du Lot-et-Garonne (Platel et al., 2010). D'un point de vue plus global, le modèle a été utilisé pour apporter des éléments techniques permettant appuyer la définition de volumes prélevables dans toutes les nappes captives du nord du Bassin aquitain (Gomez et al., 2010) et pour réaliser des simulations prospectives dans le cadre de la révision du SAGE "Nappes profondes de Gironde" [(Saltel et al., 2012) ; (Cabaret et al., 2012)]. Le modèle a également été utilisé dans le cadre du projet national Explore 2070 visant à étudier les impacts du changement climatique sur les eaux souterraines.

Le présent module de la Convention a pour objectif la maintenance et 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.

La première partie du travail réalisé concerne l'actualisation de la version actuelle du MONA (Version 3.3b) : mise à jour des données d'entrée (prélèvements, flux d'infiltration) et des chroniques piézométriques sur l'année 2011 afin de bénéficier d'un outil le plus à jour possible.

La deuxième partie est consacrée à la finalisation du nouveau modèle géologique, infrastructure du MONA, avec l'objectif d'affiner le maillage du modèle en passant d'une maille de 2 km de côté à une maille de 500 m tout en intégrant les épontes.

2. 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-2010) simule les écoulements au sein de quinze entités hydrogéologiques sur la période 1972-2010. Le recueil des données d'entrée (prélèvements, flux d'infiltration) et des chroniques piézométriques sur l'année 2011 permet de bénéficier d'un outil le plus à jour possible. Le modèle sera alors dans sa version MONA V3.3b-2011.

2.1. PRELEVEMENTS

Afin de restituer au mieux les variations piézométriques de chacune des nappes modélisées sur l'ensemble de la période considérée (1972-2011), il est nécessaire d'acquérir une connaissance la plus exhaustive possible des prélèvements dans les nappes. Un important travail de collecte des données de prélèvements est donc nécessaire.

2.1.1. Collecte des données de prélèvements

Le BRGM dispose d'une base de données de prélèvements référençant l'ensemble des volumes prélevés dans les différents ouvrages situés dans la zone d'extension du MONA. Cette base est constituée principalement par les données recueillies annuellement dans le cadre du programme de « Gestion des nappes d'eaux souterraines du département de la Gironde ». La collecte est réalisée auprès des exploitants et chaque prélèvement est rattaché à un ouvrage parfaitement localisé. En complément, la Chambre d'agriculture de la Gironde fournit les prélèvements agricoles. Pour les autres départements, le BRGM ne procède pas au recueil annuel des volumes prélevés sur les captages d'eaux souterraines et seules des études ponctuelles viennent alimenter la base des données de prélèvements. Pour l'actualisation du MONA 2011, le BRGM a obtenu des données de différents organismes intervenant dans la gestion des ressources en eaux souterraines de la région Aquitaine. Les informations collectées sont issues de :

- L'AEAG (Agence de l'Eau Adour Garonne),
- Les DDT Dordogne, Charente et Charente-Maritime,
- Les Conseils généraux de Dordogne et des Landes,
- Véolia (pour les départements 40 et 47).

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 2011.

2.1.2. Traitement des données collectées

Les chroniques brutes de prélèvements recensées proviennent d'organismes différents ayant chacun leurs objectifs propres (connaissance pour le BRGM, redevance pour l'AEAG,...). 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). Suivant les bases de données, la qualité de la géolocalisation des points peut-être très variable. La valeur 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'écartier 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 peu crédibles 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) et les données bancarisées correspondent alors souvent au report, depuis l'année de mise en service du forage, des prélèvements. Au cours du travail effectué cette année, il a été décidé d'estimer au plus juste, pour les années 2009 à 2011, les volumes agricoles de Gironde non remontés par enquête. Ces volumes sont estimés à partir d'une clé de répartition qui a été fournie par la Chambre d'agriculture de Gironde et qui s'est appuyée sur :

- les années de références (2004-2005-2006) issues de l'enquête de la Chambre d'agriculture réalisée en 2007,
- les volumes réels remontés par enquête à l'année x (jugés fiables),
- l'expertise de la Chambre d'agriculture sur les conditions climatiques estivales de l'année x et celles des années de référence.

Au terme de cet exercice, la base de données de prélèvements pour le MONA 2011 contient 6084 ouvrages pour lesquels les volumes annuels sont renseignés sur la période 1972-2011.

2.1.3. Bilan général de l'actualisation des données de prélèvements du modèle Nord-Aquitain sur la période 2010-2011

Les prélèvements totaux, par an et par nappe, injectés dans le modèle Nord-Aquitain pour les années 2009 à 2011 sont indiqués ci-après (Illustration 1).

Aquifères	Prélèvements (en m ³) selon les années		
	2009	2010	2011
Helvétien	22 233 022	22 867 933	22 525 907
Aquitainien	36 180 831	36 586 529	35 072 640
Oligocène	65 032 764	65 684 056	64 391 444
Eocène supérieur	2 963 635	3 096 525	3 237 053
Eocène moyen	55 292 898	52 631 612	53 812 591
Eocène inférieur	9 862 943	10 154 703	9 696 612
Campanien	17 864 683	17 755 528	17 496 393
Coniacien-Santonien	18 289 335	17 286 375	16 359 339
Turonien	35 141 924	36 331 434	35 651 548
Cénomaniens	13 487 510	13 431 271	13 225 411
Tithonien	866 619	863 094	836 790
Kimméridgien	2 933 701	2 798 470	2 601 061
Bathonien-Calovo-Oxfordien	12 154 943	12 661 286	12 186 782
Bajocien	3 987 024	4 594 951	3 415 817
Total	296 291 831	296 743 766	290 509 389

Illustration 1 - Prélèvements dans les aquifères modélisés du MONA en 2009 et 2011 (m³/an).

La représentation graphique des prélèvements par année (Illustration 2) montre que les réservoirs de l'Oligocène et de l'Eocène moyen sont les plus sollicités. L'Oligocène est devenu, depuis le début des années quatre-vingt-dix, l'aquifère le plus exploité parmi les nappes modélisées.

Par ailleurs, 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.

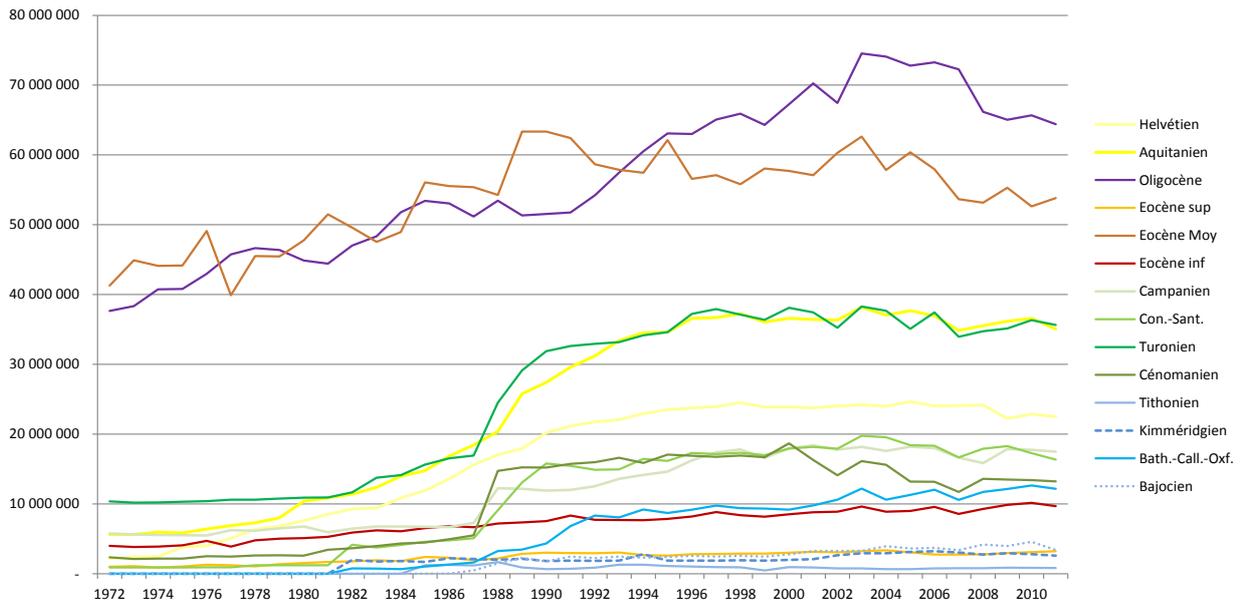


Illustration 2 - Évolution des prélèvements dans les couches du Modèle Nord Aquitain de 1972 à 2011 tous départements confondus.

2.2. CALCUL DES PRECIPITATIONS EFFICACES ET ACTUALISATION DES DONNEES DE RECHARGE DES NAPPES DU MODELE NORD-AQUITAIN

2.2.1. 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 ont été calculées 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 en Gironde (Illustration 3) montre que l'année 2011 a été marquée par une chute importante de la pluie efficace, celle-ci étant observable sur l'ensemble des 5 stations utilisées pour l'actualisation du modèle nord-aquitain (Illustration 4).

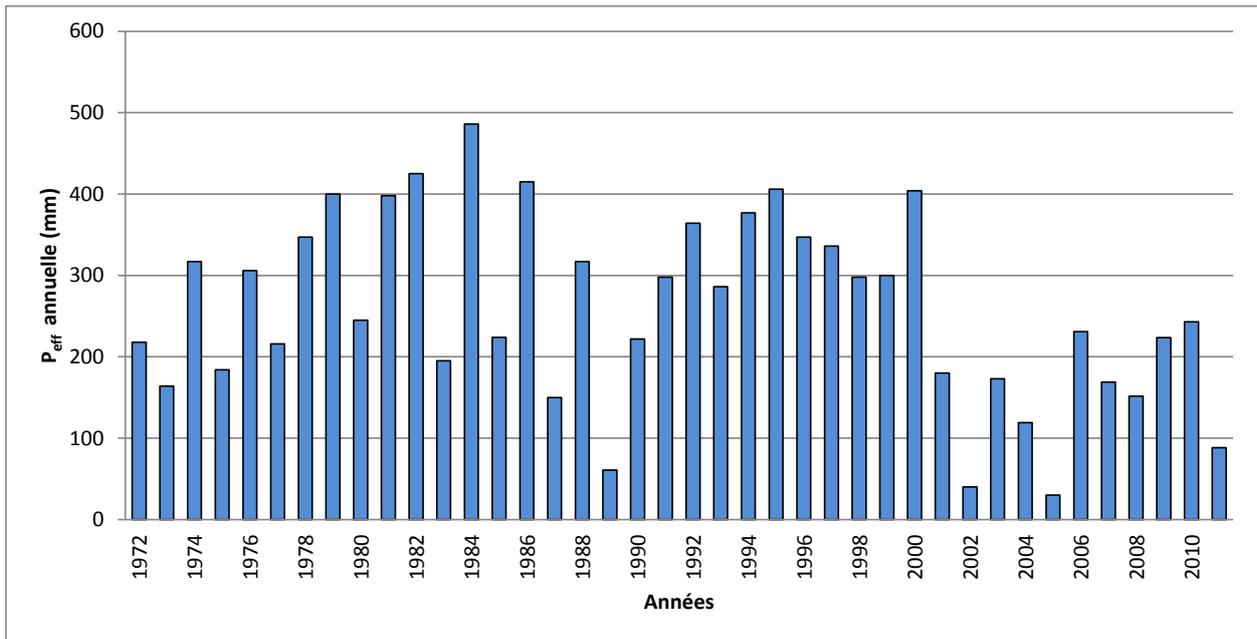


Illustration 3 - Évolution des précipitations efficaces annuelles à la station de Mérignac (33) pour une Réserve Utile (RU) de 150 mm.

Années	Précipitations efficaces Peff (mm) selon les stations				
	Mérignac (33)	Cognac (16)	Gourdon (46)	Bergerac (24)	Mont-de-Marsan (40)
2010	243,0	183,1	113,5	115,1	296,0
2011	88,2	66,5	33,8	38,5	146,1

Illustration 4 - Précipitations efficaces 2010 et 2011 calculées pour les 5 stations météorologiques prises en compte dans le MONA V3.3b-2011 (RU=150 mm).

Pour chacune de ces cinq stations, l'illustration 5 ci-après fournit la moyenne et l'écart type des pluies efficaces calculées sur la période 1972-2011.

Station	Mérignac (33)		Cognac (16)	Gourdon (46)	Bergerac (24)	Mont-de-Marsan (40)
	100 mm	150 mm	150 mm	150 mm	150 mm	150 mm
Moyenne (mm)	285,4	258,9	165,8	167,7	154,5	291,9
Ecart-type (mm)	98,9	114	94,8	98,4	91,9	103,3

Illustration 5 - Moyenne et écarts-type des précipitations efficaces pour les 5 stations prises en compte dans le MONA V3.3b-2011.

2.2.2. 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 1971-2011.

La localisation des zones de recharge de chaque couche du modèle ainsi que les stations météorologiques qui s'y rattachent est présentée en Illustration 6.

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. 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%...). 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 (Illustration 6) 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-Calovo-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.

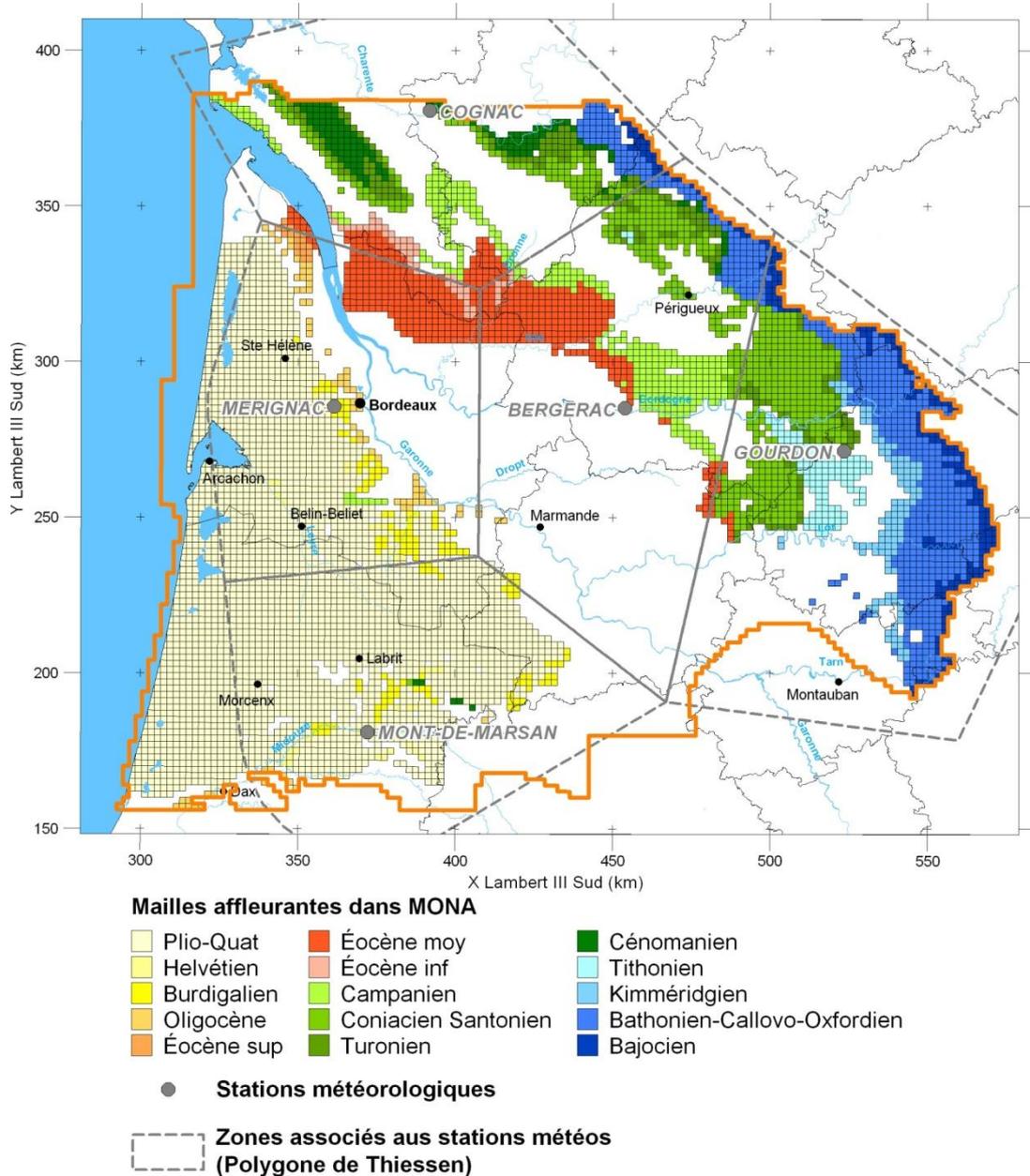


Illustration 6 - Localisation des zones d'affleurement du modèle pour chaque nappe et source des données de pluies utilisées pour le calcul de la recharge

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-quaternaire, miocènes (Aquitanién-Burdigalien 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.

2.3. CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES

Le calage et la validation du modèle s'appuient 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 éponte). 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 (Illustration 7). 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.

<i>Aquifère</i>	<i>Couche du modèle</i>	<i>Nombre de chroniques utilisées pour le calage</i>
<i>Plio-Quaternaire</i>	1	24
<i>Serravallien</i>	2	13
<i>Aquitainien</i>	3	38
<i>Oligocène</i>	4	58
<i>Éocène supérieur</i>	5	10
<i>Éocène moyen</i>	6	76
<i>Éocène inférieur</i>	7	23
<i>Campanien</i>	8	57
<i>Coniacien-Santonien</i>	9	21
<i>Turonien</i>	10	34
<i>Cénomaniens</i>	11	15
<i>Tithonien</i>	12	7
<i>Kimméridgien</i>	13	7
<i>Bathonien-Calovo-Oxfordien</i>	14	31
<i>Bajocien</i>	15	9
	TOTAL	423

Illustration 7 - Nombre de chroniques piézométriques utilisés pour le calage

L'ensemble des chroniques piézométriques utilisées pour le calage du modèle Nord-Aquitain a été actualisé jusqu'en 2011. Ces données ont été principalement extraites de la Banque de Données sur les Eaux Souterraines (BDES) gérée par le BRGM et du portail national d'Accès

aux Données sur les Eaux Souterraines (ADES). La localisation des points de mesures est présentée en Illustration 8.

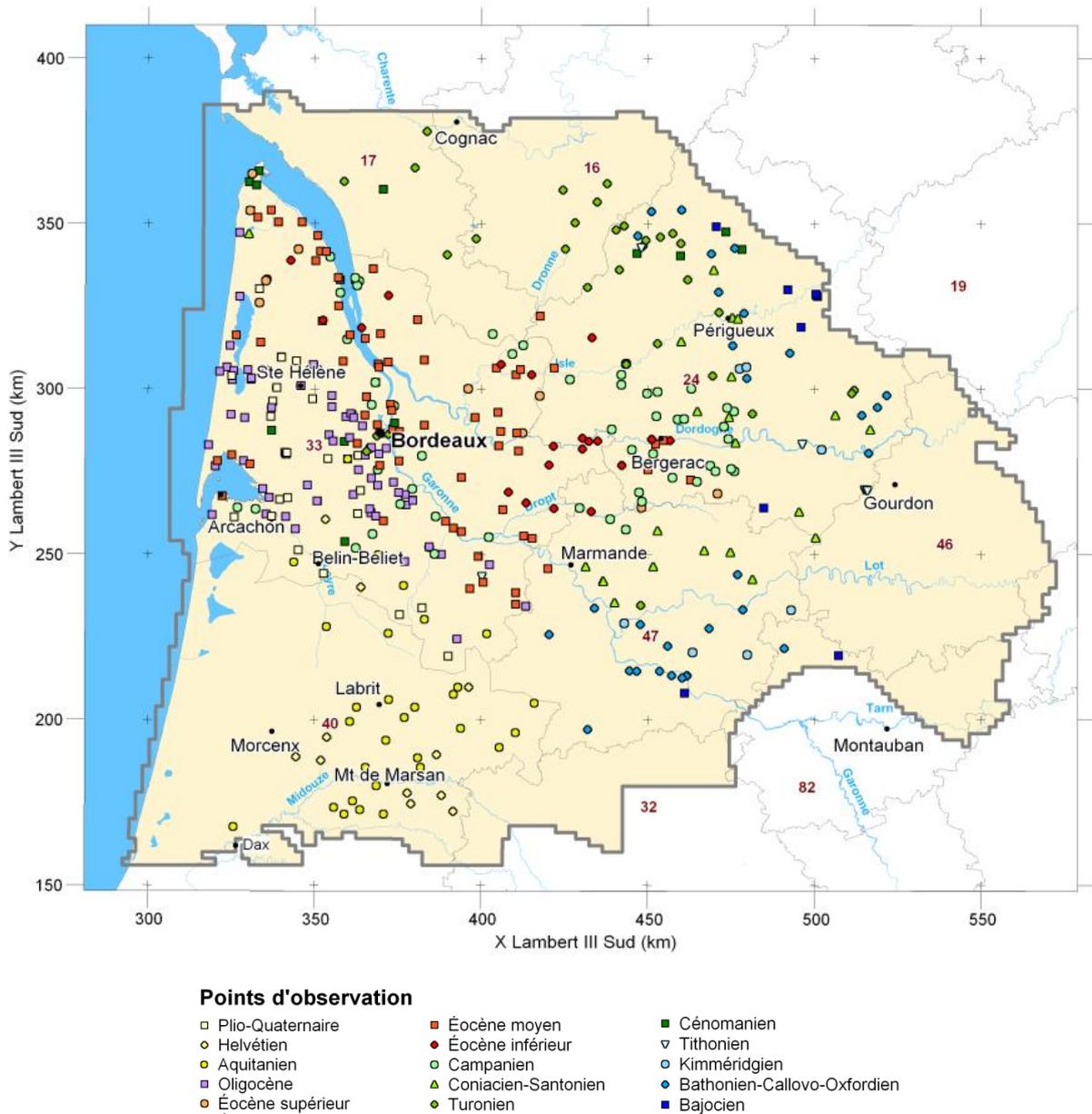


Illustration 8 - Localisation des 423 points d'observation.

2.4. RESULTATS DU MODELE ACTUALISE

2.4.1. 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 2. L'exemple de restitution présenté ci-dessous (Illustration 9) montre en points bleus les mesures brutes observées et en rouge les niveaux calculés par le modèle version MONA 3.3b 2011 au droit du piézomètre considéré.

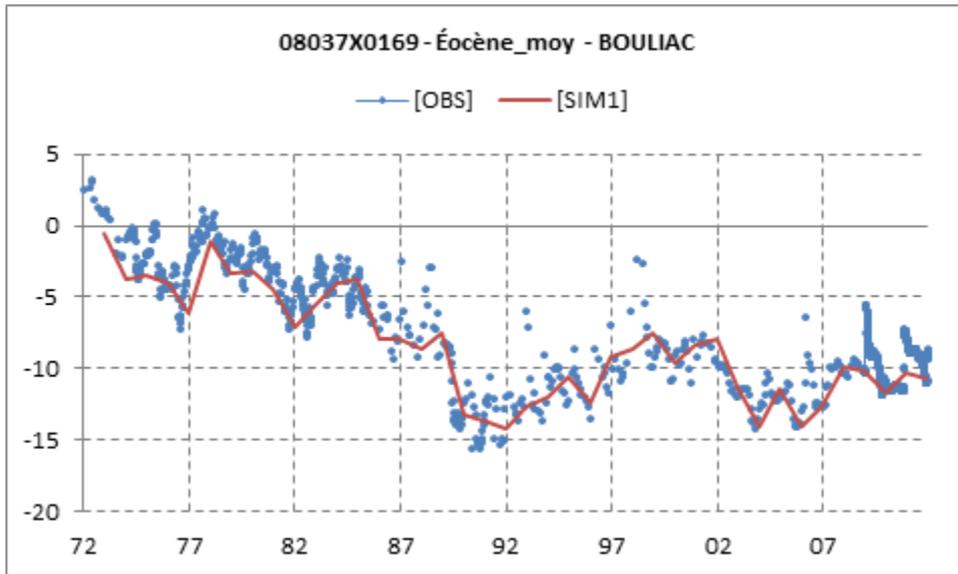


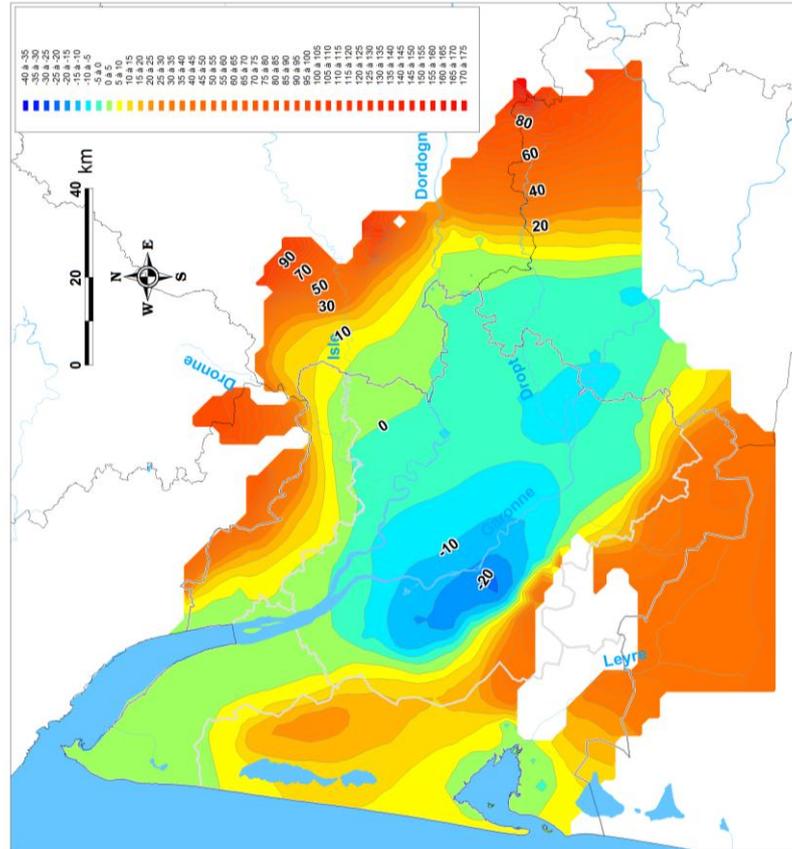
Illustration 9 - Exemple de comparaison entre les niveaux observés et simulés - forage de Bouliac (Éocène moyen).

L'ajustement apparaît visuellement satisfaisant sur la grande majorité des chroniques de calage pour les nappes considérées (Annexe 2). 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 2009-2010, 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.

2.4.2. Les cartes piézométriques

Le modèle actualisé dans sa version MONA V3.3b-2011 permet de restituer les cartes piézométriques simulées des nappes pour chaque année. La carte piézométrique de l'aquifère « Éocène moyen » pour l'année 2011 peut être comparée à celle de l'année précédente (Illustration 10). 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 relative stagnation des cotes piézométriques sous la communauté urbaine de Bordeaux. Par ailleurs, au droit de la Garonne, l'absence de zones d'infiltration directe des eaux de pluie combinée à des prélèvements continus induisent une poursuite de la baisse piézométrique qui se traduit notamment par une extension plus importante de l'isopièze -5 m NGF par rapport à 2010. Au final, 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 2010 et 2011, la surface dont la piézométrie est inférieure à -5 m NGF a augmenté de plus de 20 %.

Piézométrie 2011



Piézométrie 2010

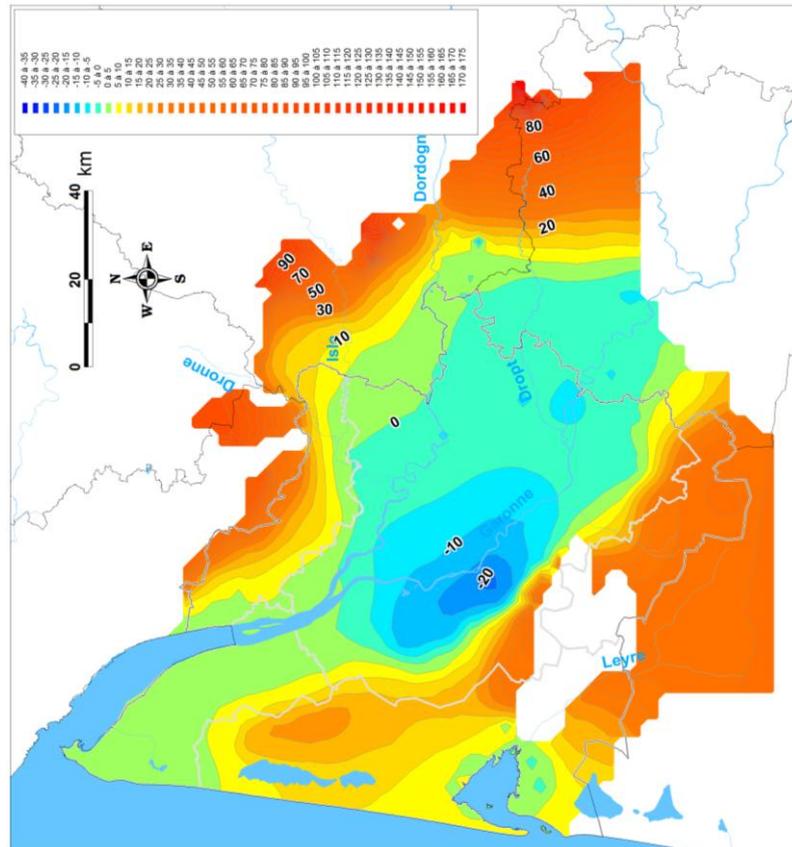


Illustration 10 - Niveaux piézométriques simulés par le modèle Nord-Aquitain version MONA V3.3b-2011 dans l'aquifère « Eocène moyen » pour les années 2010 et 2011

3. Actualisation de la géométrie des réservoirs du Bassin Nord Aquitain

3.1. 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 2011), le Modèle Nord-Aquitain répond parfaitement aux problématiques de nappes profondes à renouvellement lent pour lesquelles 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) 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 est toujours dans une version quasi-3D (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 2011) 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.

3.2. BILAN DES ANNEES PRECEDENTES

Le travail de modélisation géologique a débuté au cours de l'**année 2** de la convention 2008-2013 par l'élaboration de la 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. Par ailleurs, dans le but d'avoir une vision d'ensemble de la géométrie des réservoirs du nord du Bassin aquitain, de grandes coupes hydrogéologiques ont été dressées à partir des forages

intégrés dans la base de données décrite précédemment. Ces coupes ont été réalisées pour servir de référence lors de la construction du modèle.

En **année 3**, la base de donnée a été complétée pour in fine aboutir à la description de près de 3 400 forages, 343 données diagraphiques numériques sur près de 250 forages. La construction du modèle a été initiée. L'ensemble du système aquifère tertiaire a fait l'objet d'un modèle à part entière en raison de sa complexité, du nombre très important de forages qui recoupent ces formations et de son importance stratégique pour l'alimentation en eau potable. Un travail important de validation et de mise en cohérence des données a été réalisé. Il a notamment porté sur la correspondance des données de sondage et des cartes géologiques. Etant donné l'importance de la surface modélisée, ce sont près de 100 cartes géologiques qu'il a fallu revisiter pour faire coïncider, au mieux, les observations en forages avec celles des affleurements des cartes. Les limites d'extension des aquifères ont également été revues dans le cadre de la modélisation géologique. Les coupes hydrogéologiques réalisées en année 2 ont été utilisées pour valider le travail de modélisation initié sur les formations tertiaires.

3.3. OUTILS ET PRINCIPES

Le modèle géologique est construit avec le logiciel **GDM (Geological Data Management)** et son composant **Multilayer** (Bourgine, 2010) développés tous deux par le BRGM. Ces outils permettent d'interpoler les toits et les murs des formations 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 multicouches 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.

Les données utilisées pour la construction du modèle (forages, la carte géologique) font l'objet d'un codage spécifique permettant une analyse de cohérence avant modélisation. Chacun des sondages ainsi que chaque polygone de la carte géologique a été décrit en fonction du codage présenté ci-dessous (Illustration 11). Du fait de la limitation du logiciel en termes de nombre de couches, 3 modèles ont été nécessaires pour modéliser l'ensemble du système. Ils permettent de modéliser les formations du Tertiaire, du Crétacé et du Jurassique. Au final, le modèle géologique global comporte 30 couches dont 15 aquifères, 14 épontes et une couche de recouvrement sur le Quaternaire, soit 31 surfaces à interpoler.

Le codage est similaire à celui de la version 3 puisque les mêmes réservoirs sont pris en compte. A noter cependant l'intégration complète des épontes et l'ajout de la formation RECO qui correspond aux alluvions flandriennes et aux formations tertiaires ne pouvant être rattachées aux épontes décrites. L'intégration du code « RECO » permet de modéliser l'ensemble des formations et de ne pas générer des surépaisseurs dans les réservoirs.

	Code	Description
Modèle tertiaire	RECO	Formations de recouvrement et alluvions flandriennes
	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
Modèle crétacé	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
Modèle Jurassique	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

Illustration 11 - Pile stratigraphique des formations modélisées.

3.4. DONNEES NECESSAIRES A LA MODELISATION

3.4.1. Données de forage

La base des forages comprend des données de « tête » (indice BSS, coordonnées, altitudes, localisation, ...) et des données de « passe » qui correspondent à la description des horizons rencontrés (aquifères et épontes). Elle a été construite en s'appuyant sur les données de modèles géologiques antérieurs : MONA dans sa version 3, modèle « Estuaire » (Platel et al., 2006), modèle « Crétacé et Jurassique » (Pédron et al., 2008), modèle « Oligocène » (Saltel et al., 2010), modèle « Plio-Quaternaire » (Corbier et al., 2010).

A noter que 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 (Illustration 12). 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'Aquitanien et le Langhien-Serravallien.

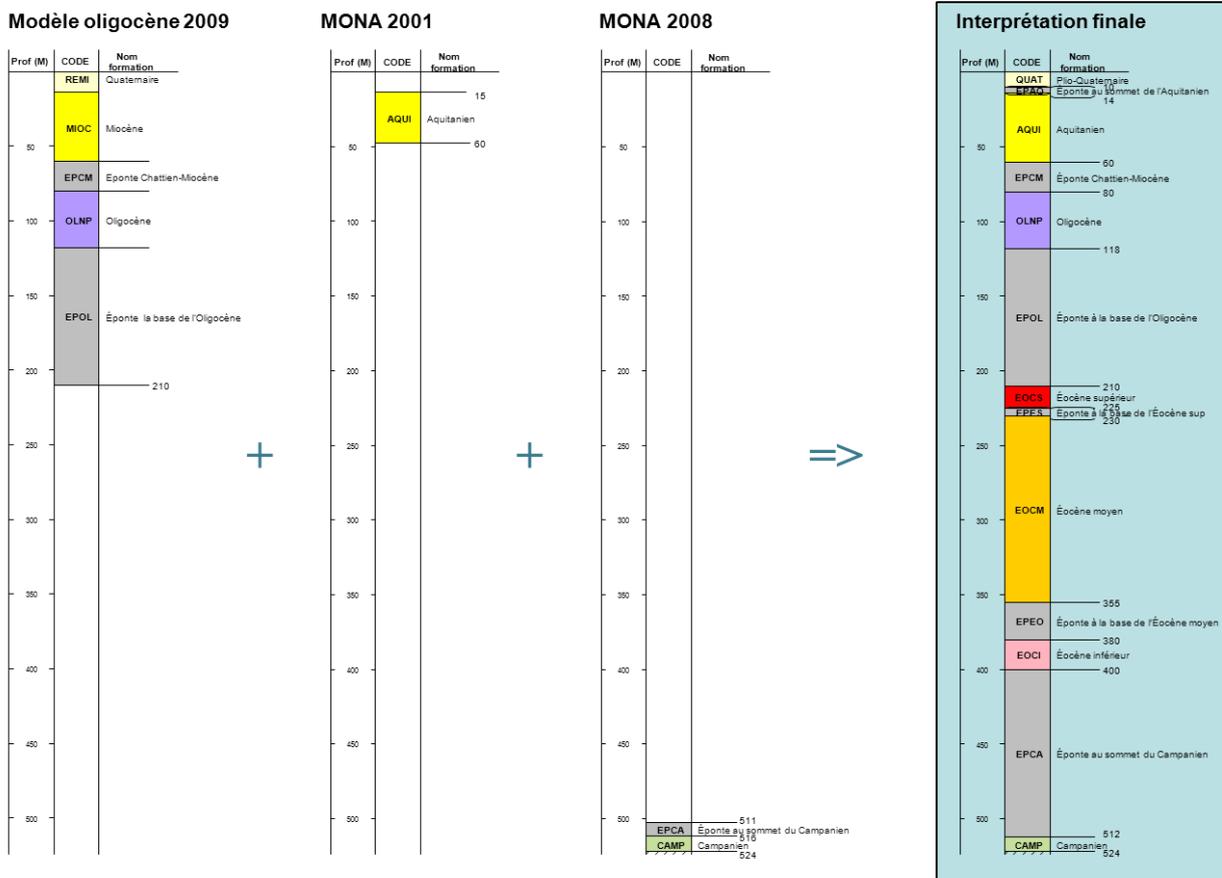


Illustration 12 - Codification des forages - Illustration schématique de la problématique de concaténation des données.

Le travail de cohérence des données a principalement été réalisé au cours de l'année 2 de la convention soit la première année d'étude pour la réalisation du modèle géologique (Saltel et al., 2011). L'extension du modèle étant relativement conséquente, la base s'est enrichie peu à peu en cours de modélisation (Illustration 13).

	année de la convention		
	année 2	année 3	année 4
Nombre de forages décrits	3 305	3 415	3 480
Nombre d'horizon décrits	13 173	15 744	16 567
Nombre de forage validés	1 000	2 290	2 512

Illustration 13 - Évolution de la base forage au cours du temps.

La validation des forages s'est faite progressivement pendant le processus de modélisation. Près de 72 % des forages de la base ont été validés, c'est-à-dire que leur coupe a dû soit être renseignée, car le forage n'était pas décrit initialement dans la base, soit être complétée lorsque les données initiales étaient parcellaires (Illustration 12), soit être corrigée pour être cohérente vis-à-vis des forages voisins. Ainsi, les forages non validés (28 %) correspondent en fait à des forages pour lesquels aucun travail de réinterprétation n'a été nécessaire. La même base de forages est utilisée pour les 3 modèles géologiques réalisés.

3.4.2. Carte géologique

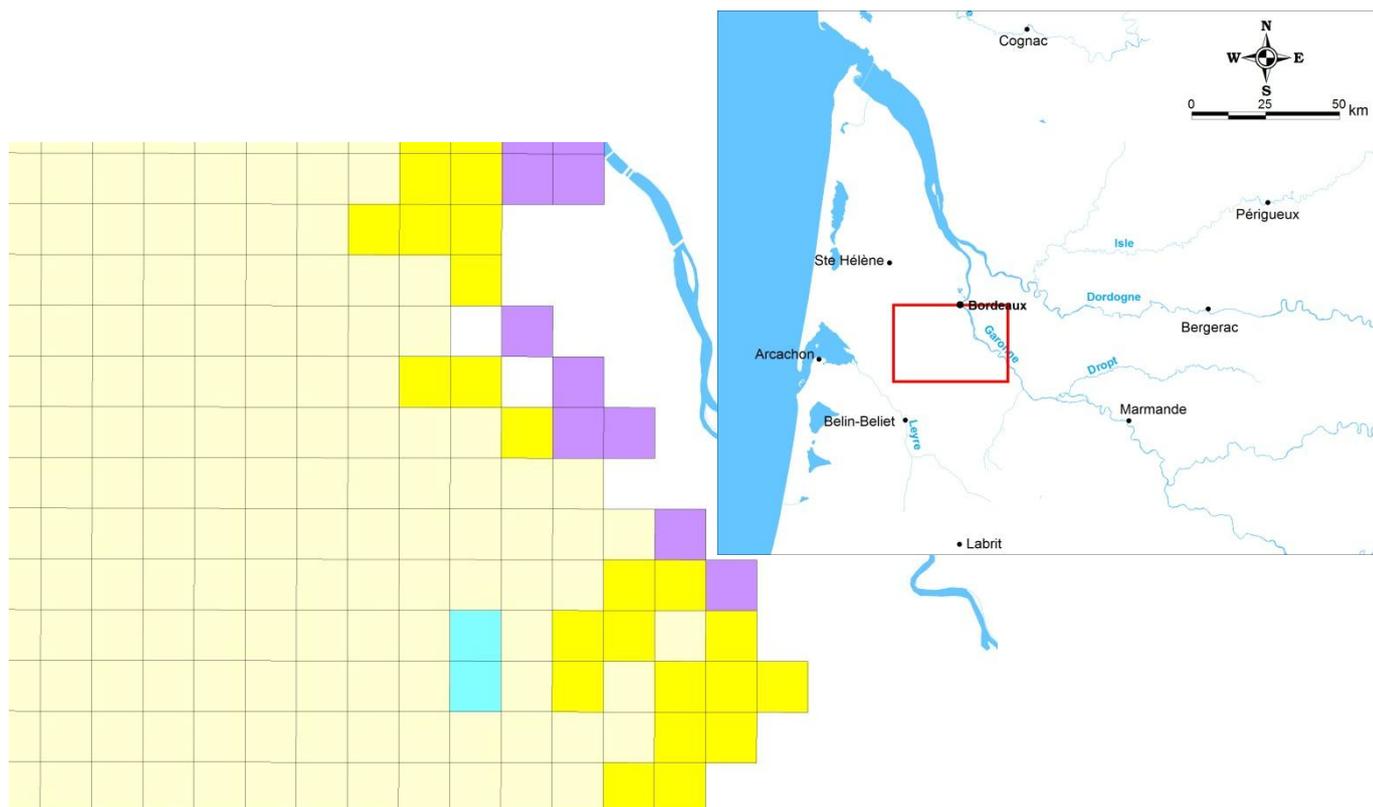
Dans le cadre de la modélisation géologique, l'utilisation d'une carte géologique des formations affleurantes est un auxiliaire de travail précieux. Elle permet en effet de :

- 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.

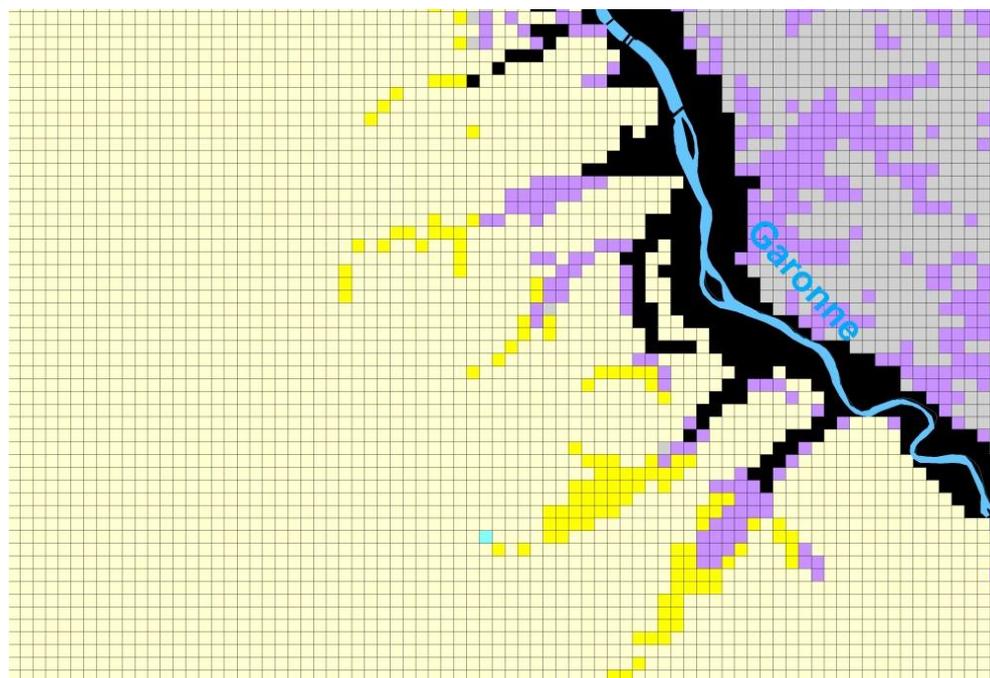
Souhaitant modéliser les différents réservoirs et épontes du nord du Bassin aquitain, la vision stratigraphique des cartes géologiques conventionnelles n'est pas parfaitement adaptée à notre démarche. Par contre, le travail réalisé dans le cadre du Référentiel Hydrogéologique Français **BD-LISA** (**B**ase de **D**onnées des **L**imites des **S**ystèmes **A**quifères) 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.

Le maillage choisi pour la modélisation géologique a permis 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 (Illustration 14).



Zones d'affleurement du MONA V3 à la maille de 2 km



Zones d'affleurement du MONA V4 à la maille de 500 m

Illustration 14 - Évolution du maillage entre la version 3 et la version 4 du MONA.

3.4.3. Modèle Numérique de Terrain (MNT)

Le MNT sert à définir :

- la surface topographique, qui sera la surface supérieure du modèle,
- la surface bathymétrique (fond de l'eau), qui est utilisée pour représenter le fond de l'eau (rivière, lac, mer) lorsque cela est nécessaire. Dans ce cas, cette surface doit être sous la surface topographique (qui est soit le sol, soit la surface de l'eau).

Dans le cadre du processus de modélisation le MNT permet de faire un contrôle de l'altitude des forages de la base et des valeurs du MNT dans les secteurs correspondants. Cette opération permet de mettre en évidence des incohérences dans la BSS liées le plus souvent à un problème de positionnement du forage.

3.4.4. Données sismiques

Les données sismiques intégrées proviennent des travaux de 2008 dont l'objectif était d'affiner les connaissances sur la structuration des formations du Tertiaire et du Crétacé au droit de la structure de Villagrains-Landiras à partir du retraitement¹ d'anciens profils de sismique réflexion (Platel et al., 2008). L'objectif est ici d'intégrer ces données au modèle géologique. Les profils utilisés sont les suivants :

- ligne 1 189 (permis Landes) opérée par Esso REP dans les années 60,
- lignes 94 B1, 94 B2, 94 M1 et 94 M2 de la campagne Grand Villandraut opérée en 1994 par CGG pour le compte de Texas Crude qui correspondent aux données les plus récentes.

Récemment, ces profils ont été utilisés pour générer des cartes structurales de la base du Tertiaire et du Crétacé supérieur (Serrano et al., 2012). Afin d'apprécier la précision des grilles générées, les surfaces issues des interpolations calées sur les données sismiques ont été confrontées aux données de toit et de mur reconnues dans la base forage MONA V4 (Saltel et al., 2011) sur le secteur considéré. Il ressort de ce contrôle que les différences observées sont moins importantes pour la base du Tertiaire que pour la base du Crétacé supérieur. Ceci peut s'expliquer par le fait que le contraste lithologique soit plus marqué dans le premier cas que dans le second. Cependant, il faut noter que la fiabilité des données issue de la base du Tertiaire est maximale aux abords des lignes sismiques prises en compte. En dehors de ces zones, il apparaît que l'écart avec les cotes provenant des forages est plus important.

Seules les données issues de la base du Tertiaire aux abords des lignes sismiques ont donc été utilisées pour contraindre l'interpolation du modèle géologique (Saltel et al., 2012). L'intégration de ces données permet d'affiner de manière significative la géométrie de l'interface Tertiaire/Secondaire au droit de la structure de Villagrains-Landiras.

3.4.5. 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

¹ Les méthodes de retraitement utilisées sont décrites dans le rapport BRGM RP-56962-FR et ne seront pas détaillées ici

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 qui nous intéresse plus particulièrement 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 (contrainte technique liée aux outils de modélisation utilisés).

Les failles peuvent être prises en compte dans les interpolations ou les calculs des variogrammes dans lesquels elles introduisent des discontinuités. L'interpolation peut se faire en prenant en compte un réseau de failles différent d'une formation à l'autre.

3.5. CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTS MODELES

3.5.1. Le modèle tertiaire

Le modèle géologique du Tertiaire comporte 16 couches définies par la pile stratigraphique ci-dessous (Illustration 15).

Formation	Type Surf.	Description	Nom Surf.	n° FORM
MESO	EROD	Recouvrement		F16
QUAT		Plio-Quaternaire	B16	F15
EPHE	EROD	Éponte sommet de l'Helvétien	B15	F14
HELV		Helvétien	T13	F13
EPAQ		Éponte sommet de l'Aquitainien	T12	F12
AQUI		Aquitainien	T11	F11
EPCM		Éponte Chattien Miocène	T10	F10
OLNP		Oligocène	T09	F09
EPOL		Éponte Oligocène-Éocène	T08	F08
EOCS		Éocène supérieur	T07	F07
EPES		Éponte base de l'Éocène sup	T06	F06
EOCM		Éocène moyen	T05	F05
EPEO		Éponte de base de l'Éocène moy	T04	F04
EOCI		Éocène inférieur	T03	F03
EPCA		Éponte au sommet du Campanien	T02	F02
MESO		Secondaire	T01	F01

Illustration 15 - Pile stratigraphique du modèle tertiaire.

Les bases des formations F16 (Recouvrement) et F15 (Quaternaire) ont été considérées en EROD c'est à dire comme des surfaces d'érosion. Toutes les autres surfaces ont été définies en ONLAP (dépôt d'une formation sur la précédente). Ces attributions impactent directement l'ordre de modélisation des surfaces et donc le résultat final de la modélisation (cf. chapitre 3.3).

La limite d'extension globale du modèle a été définie. Ce polygone sert à limiter les calculs, c'est-à-dire que les formations ne seront pas interpolées au-delà de ce polygone.

Les limites d'extension maximale des formations ont été renseignées pour chaque surface. Leur prise en compte permet de limiter les contrôles d'inégalités et les interpolations dans la limite d'existence de la formation. Les limites d'extension ont été basées sur la base de données **LISA** (Ayache et al., 2011). Chaque entité de la BD LISA est constituée d'une partie affleurante et d'une partie sous-couverture. Cependant, le tracé global d'une formation s'est appuyé sur les données de forages, la connaissance régionale des géologues et hydrogéologues et sur les affleurements des couches considérées. Néanmoins, les limites d'extension de la BD LISA peuvent être imprécises dans certains secteurs car la liste des forages pris en compte alors n'était pas exhaustive. Ces contours ont donc fait l'objet d'un contrôle d'inégalité afin de vérifier si les forages traversant une formation donnée sont bien localisés à l'intérieur de la limite d'extension de ladite formation (Saltel et al., 2012). L'ensemble des limites des aquifères tertiaires a pu ainsi être ajusté (Illustration 16).

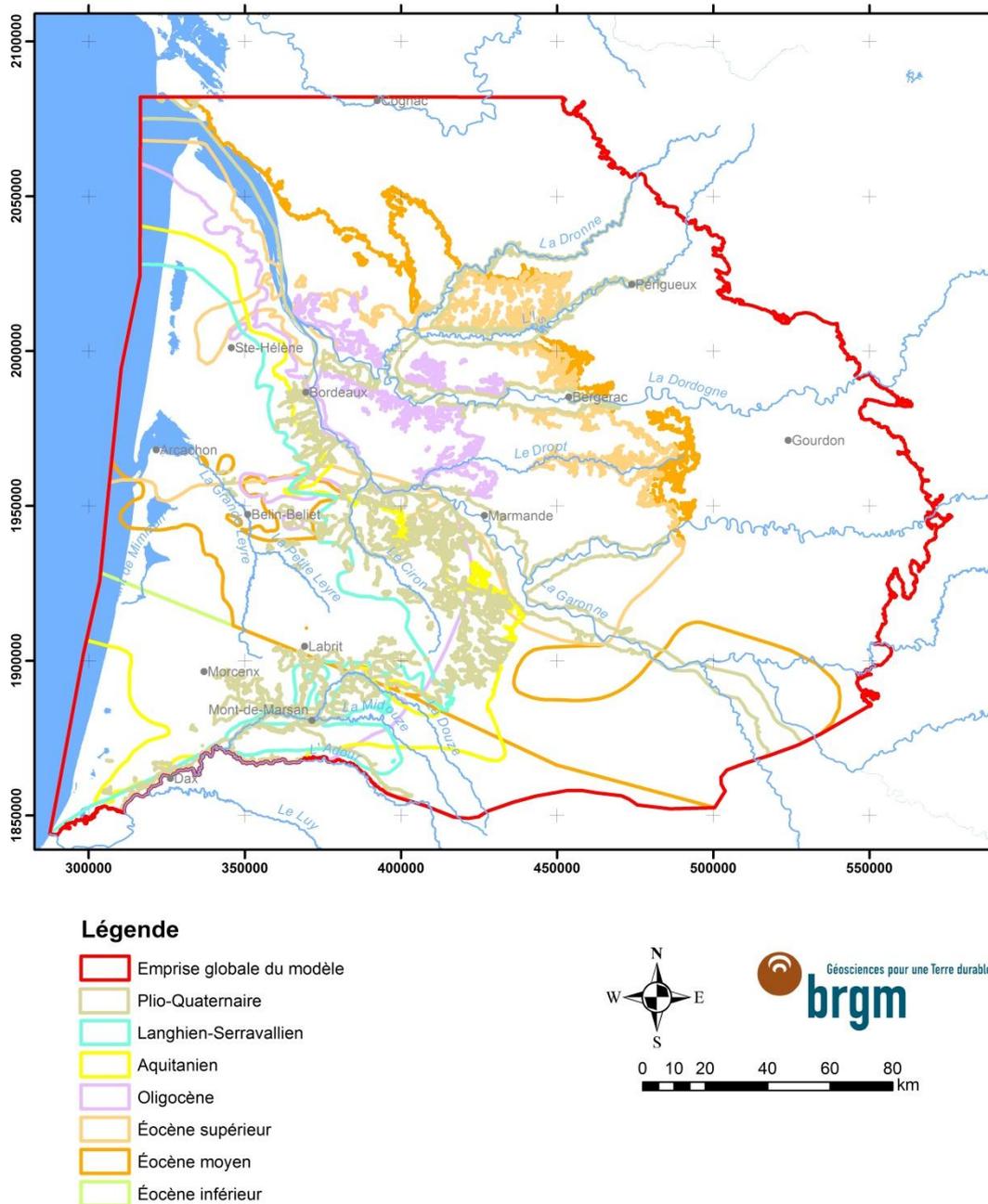


Illustration 16 - Limites d'extension des formations aquifères du modèle tertiaire utilisées pour la modélisation.

Le schéma structural pris en compte dans ce modèle est relativement simplifié puisque seules les failles majeures ont été considérées (Illustration 17).

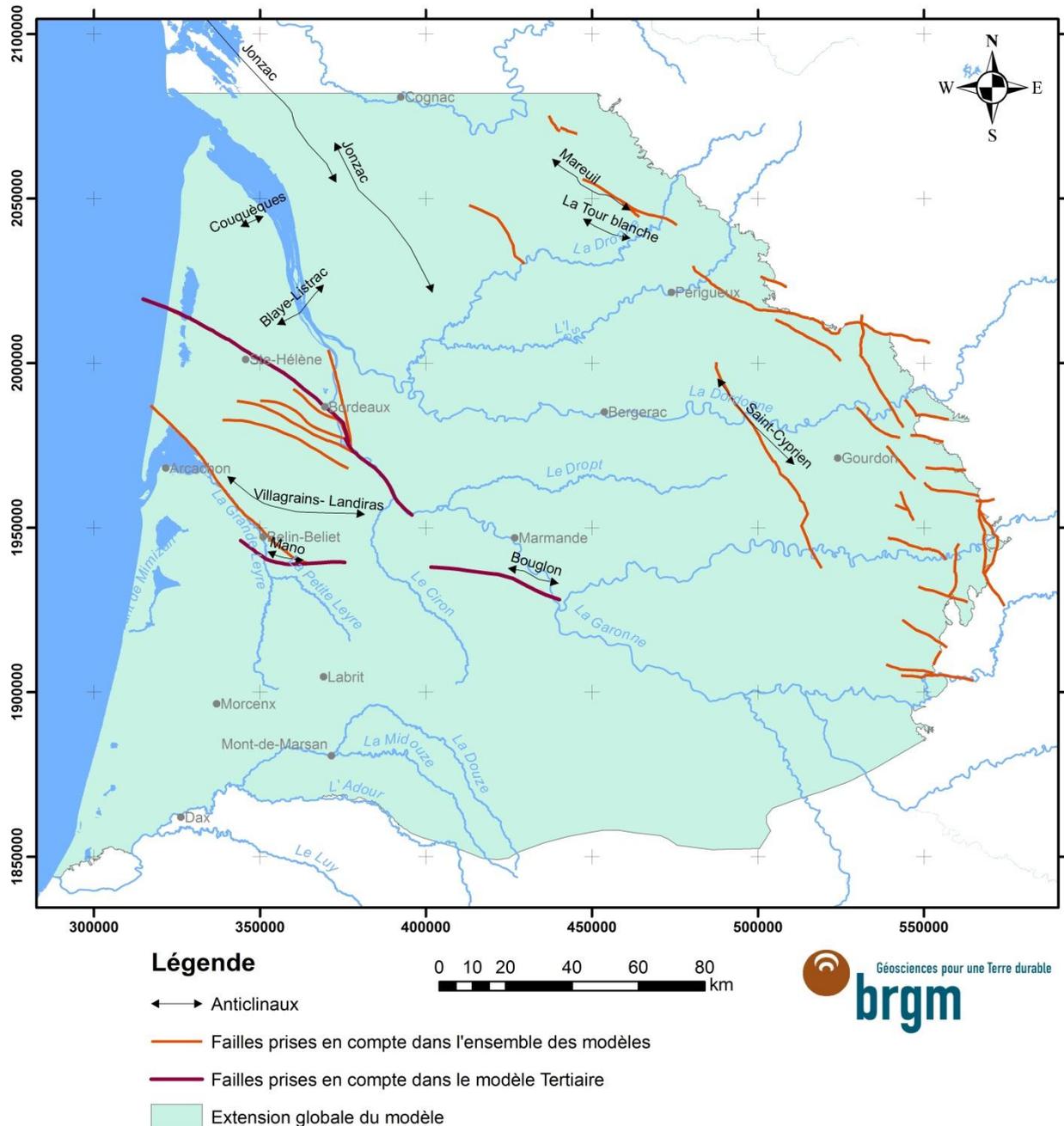
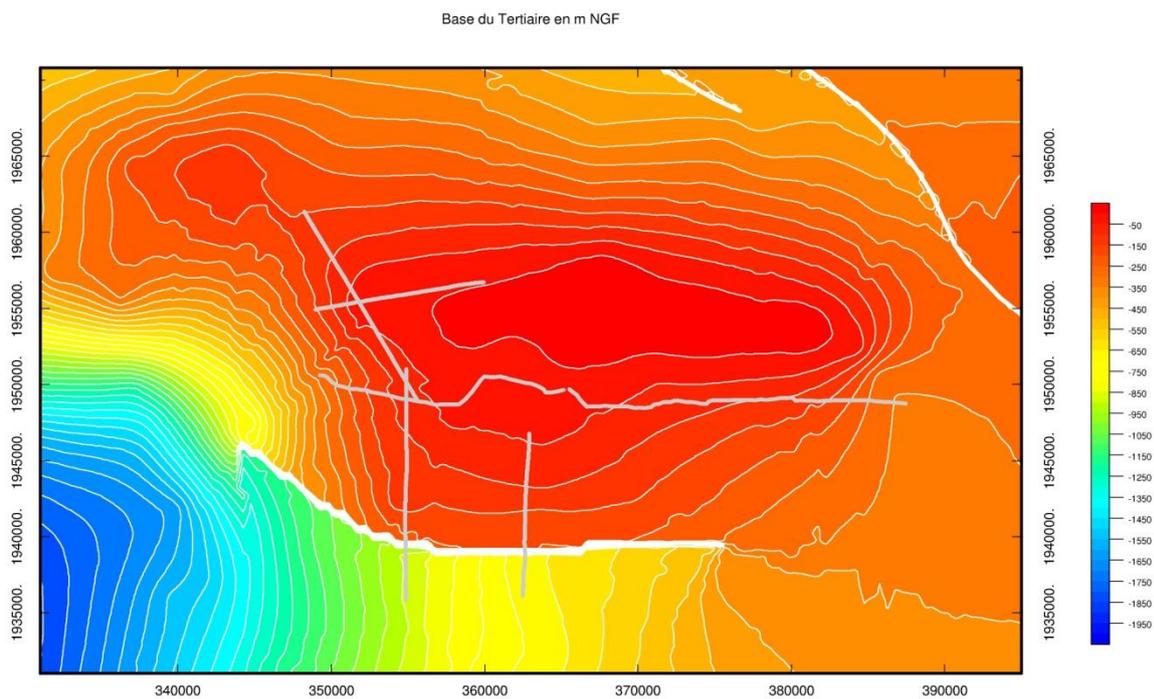
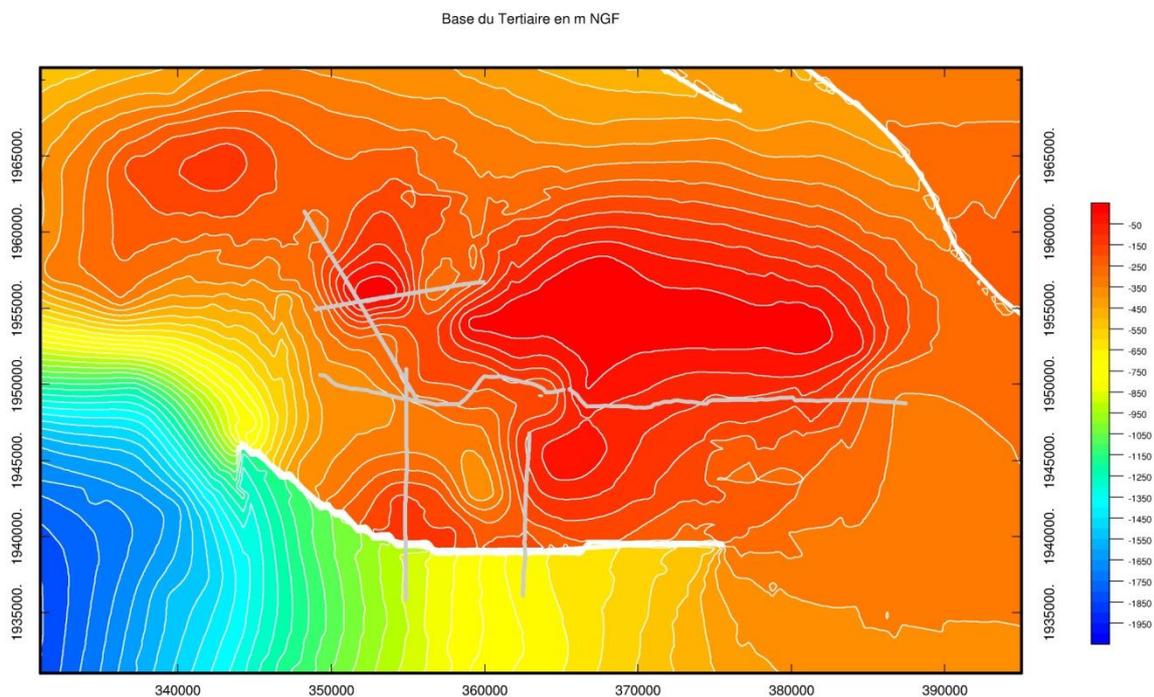


Illustration 17 - Failles prises en compte dans le modèle tertiaire.

Les données sismiques ont été prises en compte dans le modèle en tant que points de passage matérialisant le toit des formations crétacées (MESO dans la pile stratigraphique). Ils permettent de contraindre l'interpolation dans ce secteur. La comparaison de la base du Tertiaire issue uniquement de l'interpolation des données de forage avec celle intégrant les profils sismiques permet de visualiser l'apport des données sismiques dans la modélisation géologique (Illustration 18).



A : Surface issue de l'interpolation des seules données de forages



B : Surface issue de l'interpolation des données de forages et des données sismiques

Illustration 18 - Apport des données sismiques dans la modélisation géologique (secteur de Villagrains-Landiras).

Le **MNT** de l'IGN (2006) au pas de 25 m (BD Alti - IGN) a été ré-échantillonné au pas de 500 m pour être intégré dans GDM (Illustration 19). La surface topographique a été modifiée au droit des cours d'eau représentés sur la carte ci-dessous de manière à intégrer sur les mailles concernées les valeurs minimums provenant du MNT initial à 25 m. Cette opération a été réalisée en vue de la modélisation hydrodynamique de manière à ce que l'altitude des cours d'eau soit la plus réaliste possible et que les zones de drainage des aquifères ne soient pas sous-estimées. Par ailleurs GDM peut prendre en compte dans son MNT deux altitudes : la surface topographique et la bathymétrie. Cette dernière a donc été renseignée pour les secteurs suivants :

- lacs de Carcans, Lacanau, Cazaux et Biscarrosse (2R) : bathymétries provenant des SAGE,
- Bassin d'Arcachon : bathymétrie composite (SIBA + Homonim SHOM + Gebco),
- golfe de Gascogne : bathymétrie Homonim SHOM,
- estuaire de la Gironde : bathymétrie fournie par le Grand Port Maritime de Bordeaux.

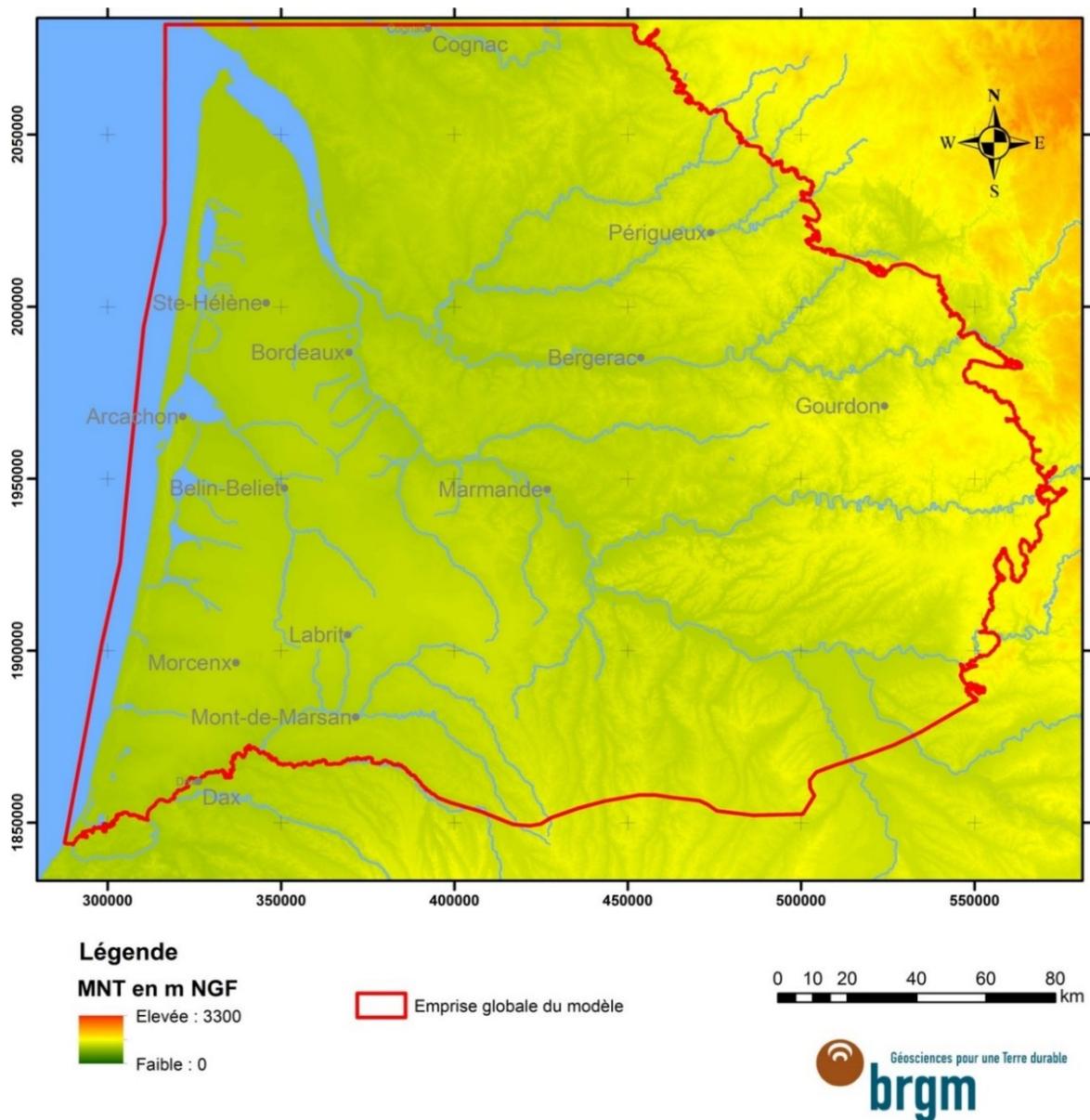


Illustration 19 - MNT ré-échantillonné à la maille de 500 m

3.5.2. Le modèle crétacé

Le modèle géologique du Crétacé comporte 9 couches définies dans la pile stratigraphique ci-dessous (Illustration 15).

Formation	Type Surf.	Description	Nom Surf.	n° FORM
TERT	EROD	Formations tertiaires	B09	F09
CAMP		Campanien	T07	F08
EPCS		Eponte au sommet du Conia-Sant	T06	F07
COST		Coniacien-Santonien	T05	F06
EPTU		Eponte au sommet du Turonien	T04	F05
TURO		Turonien	T03	F04
EPCE		Eponte au sommet du Cénomanién	T02	F03
CENO	EROD	Cénomanién	B02	F02
JURA		Jurassique		F01

Illustration 20 - Pile stratigraphique du modèle crétacé.

Les bases des formations du Tertiaire B09 et le toit du Jurassique B02 ont été considérées en EROD c'est à dire comme des surfaces d'érosion. Elles correspondent respectivement à la base du modèle tertiaire et au toit du modèle jurassique. La surface B09 n'est pas interpolée dans ce modèle. Elle correspond au toit de la formation MESO (T01) du modèle tertiaire. Toutes les autres surfaces ont été définies en ONLAP (cf. chapitre 3.3).

La **limite d'extension** globale du modèle est la même que celle du modèle tertiaire. Les limites d'extension maximale de formation ont été renseignées pour chaque aquifère (Illustration 21). Ces contours ont fait l'objet d'une validation pour s'assurer de la concordance avec les données de forages.

L'ensemble des **failles** référencées en Illustration 17 a été prise en compte dans le modèle crétacé. Le schéma structural considéré est bien plus complexe. Il intègre notamment l'ensemble du jeu de failles du secteur de Bordeaux.

Le **MNT** utilisé est identique à celui utilisé pour le modèle tertiaire.

Le modèle crétacé ayant fait récemment l'objet d'un modèle géologique (Pédron et al., 2006 et 2008), il a été décidé de s'appuyer sur le modèle précédent pour contraindre le nouveau. L'objectif est ici de bénéficier de tout le travail d'interprétation qui avait été réalisé à l'époque tout en intégrant les données les plus récentes (nouveaux forages atteignant ces horizons).

Des forages de contraintes ont donc été générés dans les secteurs où la donnée réelle était la moins dense. Ainsi, 147 forages dont la coupe a été réalisée en fonction de la géométrie du MONA V3 ont été intégrés à la base forages. Lorsque les données de ces forages étaient en contradiction avec les données réelles, une mise en cohérence a été réalisée pour corriger le forage fictif.

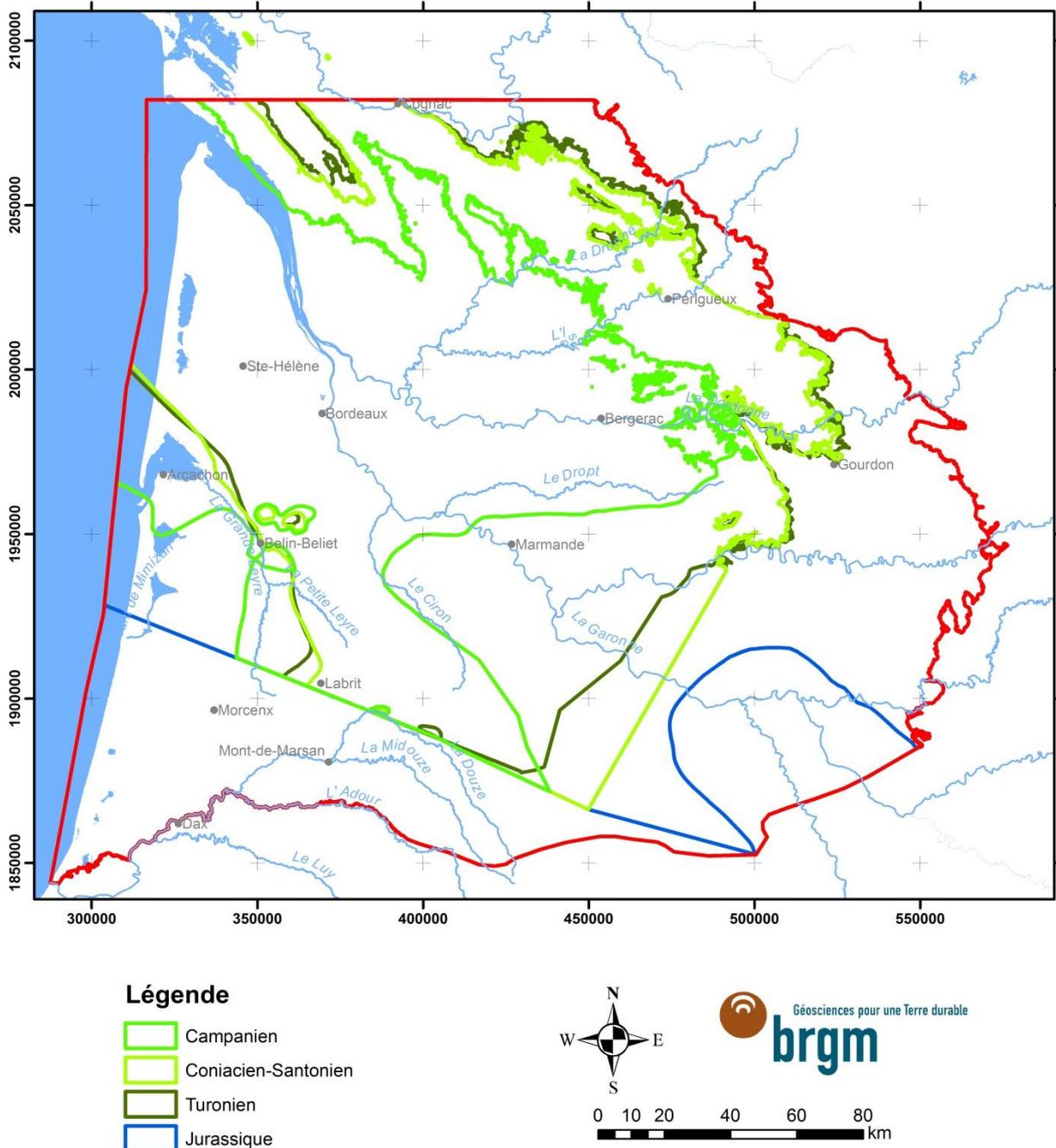


Illustration 21 - Limites d'extension maximale des formations aquifères du modèle crétacé utilisées pour la modélisation.

3.5.3. Le modèle jurassique

Le modèle géologique du Jurassique comporte 10 couches définies dans la pile stratigraphique ci-dessous (Illustration 22).

Formation	Type Surf.	Description	Nom Surf.	n° FORM
RESU	EROD	Tertiaire et Crétacé	B10	F10
EPTI		Eponte au sommet du Tithonien	T08	F09
TITH		Tithonien	T07	F08
EPKI		Eponte au sommet du Kimm.	T06	F07
KIMM		Kimméridgien	T05	F06
EPCX		Eponte au sommet du BACX	T04	F05
BACX		Bathonien-Callovo-Oxfordien	T03	F04
EPBJ		Eponte au sommet du Bajocien	T02	F03
BAJO		Bajocien	T01	F02
BAJU		Base sous le Jurassique		F01

Illustration 22 - Pile stratigraphique du modèle jurassique.

La base de la formation du RESU (Recouvrement Supérieur) B10 a été considérée en EROD c'est à dire comme une surface d'érosion. Elle correspond à la base du Cénonamien (B02) du modèle crétacé et n'est pas interpolée dans ce modèle. Toutes les autres surfaces ont été définies en ONLAP (cf. chapitre 3.3).

Les aquifères et les épontes décrits dans la pile stratigraphique coïncident avec le schéma défini dans le cadre de la précédente version du MONA (Pédron et al., 2008). Cependant, de manière à pouvoir définir la base exacte du Bajocien, il a été nécessaire d'identifier dans les coupes de forages et sur la carte géologique toute les formations antérieures regroupées sous l'appellation BAJU (Base sous je Jurassique)

La **limite d'extension** globale du modèle est la même que celle des modèles sus-jacents.

Les contours des réservoirs ont été intégrés pour s'assurer de la cohérence avec les données de forages mais seule la limite du Bajocien a été utilisée pour contraindre l'interpolation (Illustration 23).

Les **failles** prises en compte sont identiques à celles du modèle crétacé.

Le **MNT** utilisé est identique à celui utilisé pour le modèle tertiaire.

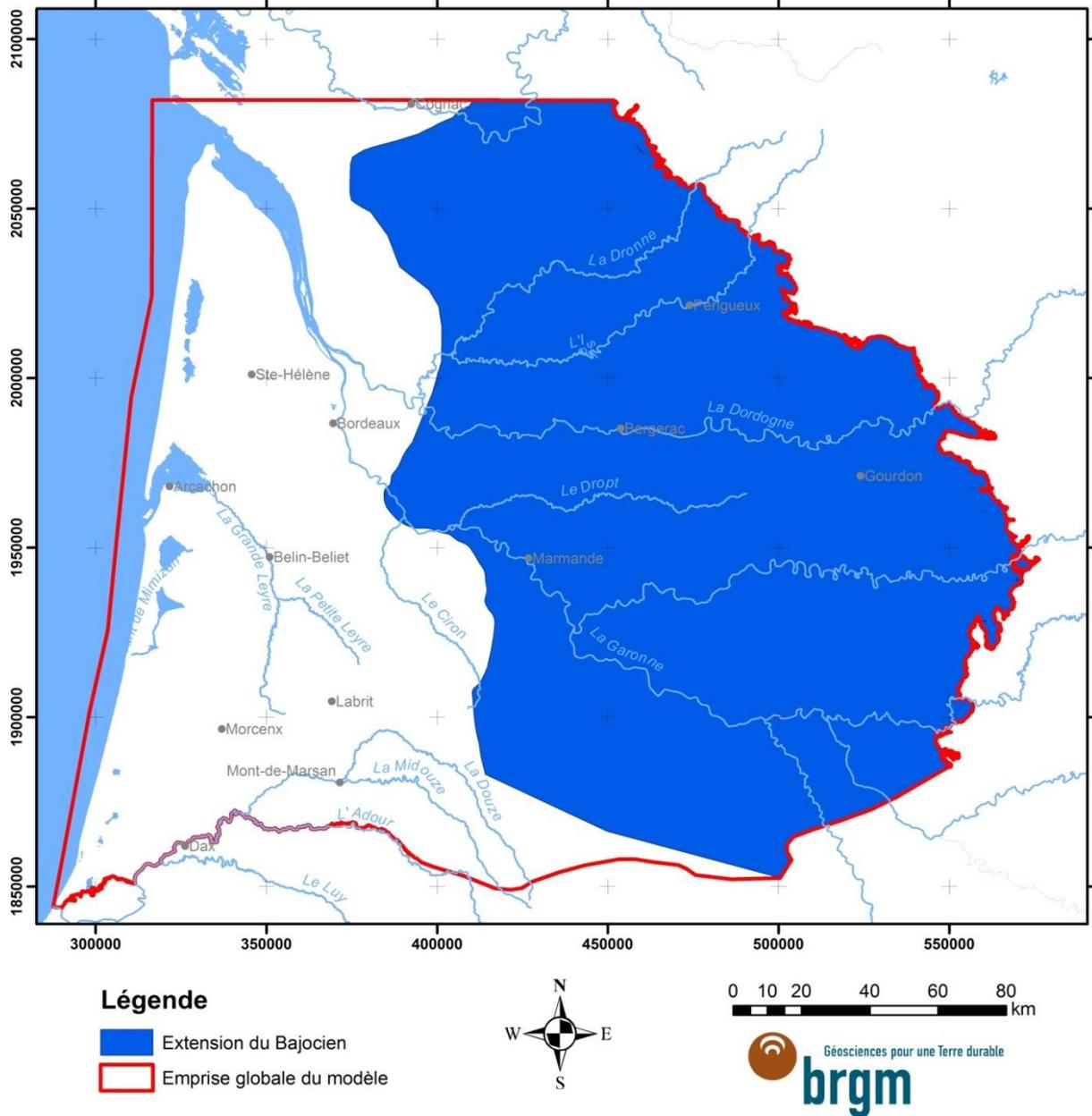


Illustration 23 - Limites d'extension du Bajocien, seule extension du Jurassique utilisée pour contraindre l'interpolation.

Tout comme le modèle crétacé, le modèle jurassique a fait l'objet d'un modèle géologique récent (Pédron et al., 2008). Le travail de modélisation réalisé ici s'appuie sur le modèle précédent pour bénéficier de tout le travail d'interprétation qui avait été réalisé à l'époque tout en intégrant les données les plus récentes (nouveaux forages atteignant ces horizons). Le précédent modèle avait d'ailleurs bénéficié de l'apport des profils sismiques réinterprétés du Bassin aquitain (Serrano et al., 2006) qui avaient été utilisés pour fixer des points de contraintes. Des forages de contraintes ont donc été générés dans les secteurs où la donnée réelle était la moins dense. Ainsi, 226 forages dont la coupe a été réalisée en fonction de la géométrie du MONA V3 ont été intégrés à la base forages. Lorsque les données de ces forages étaient en contradiction avec les données réelles, une mise en cohérence a été réalisée pour corriger le forage fictif.

3.6. VALIDATION DES DONNEES

3.6.1. Mise en cohérence carte géologique / forages

L'ensemble du domaine modélisé s'étend sur une surface globale de 49 740 km² et intègre près de 100 cartes géologiques. Sur cet ensemble, la mise en concordance entre la carte géologique et les données de forages a été réalisée. En effet, Multilayer permet de comparer la première formation du forage à celle identifiée au même endroit sur la carte géologique, afin de relever d'éventuelles incohérences.

Différentes sources d'erreurs sont possibles : limites des formations géologiques mal positionnées, forage mal codé, carte vecteur mal codée (erreur de saisie), etc... En tout état de cause il convient de corriger ces incohérences. Le plus souvent, la carte géologique est moins précise que l'information donnée par les forages, mais il peut arriver aussi qu'il y ait des erreurs de saisie ou d'interprétation dans les forages. Par ailleurs, il faut garder à l'esprit que les cartes géologiques ont été réalisées à une période donnée, en fonction des informations alors disponibles. Depuis, la réalisation de nouveaux forages, non présents au moment du levé de la carte, apportent des informations complémentaires qui permettent de valider ou d'infirmer certaines hypothèses de construction.

Dans les modèles géologiques, la carte géologique entrée dans les données de base sous forme de polygones est imposée dans les modèles finaux produits. Il est donc important de corriger la carte géologique si cette dernière diffère sensiblement des informations fournies par les forages.

3.6.2. Ajustement des limites d'extension maximale des formations

Les limites d'extension de la BD LISA ont été utilisées pour chaque couche pour assurer un contrôle de cohérence vis-à-vis des données de forage.

C'est dans le modèle tertiaire, où la donnée est la plus dense en raison de l'accessibilité des réservoirs, que cette méthode de validation a été la plus employée. En effet, le contrôle a été réalisé pour l'ensemble des aquifères et des éponges modélisés.

Pour le modèle du Crétacé et du Jurassique, seules les limites des réservoirs ont été utilisées. En effet, le nombre de forages profonds étant moins important, il est plus facile de faire la distinction entre les aquifères que de différencier les éponges qui sont parfois superposées les unes aux autres. Même si les limites n'ont pas toujours été utilisées directement dans le processus de modélisation (notamment pour le modèle du Jurassique) elles ont toujours servi pour la validation de la base forages.

3.6.3. Validation de la cohérence spatiale du modèle - vision 2 D et 3D

Outre la comparaison avec des coupes réalisées au préalable (Saltel et al., 2012), l'ensemble du modèle a fait l'objet d'un contrôle par l'intermédiaire d'une série de 36 coupes (Annexe 3) dont la position est présentée en Illustration 24.

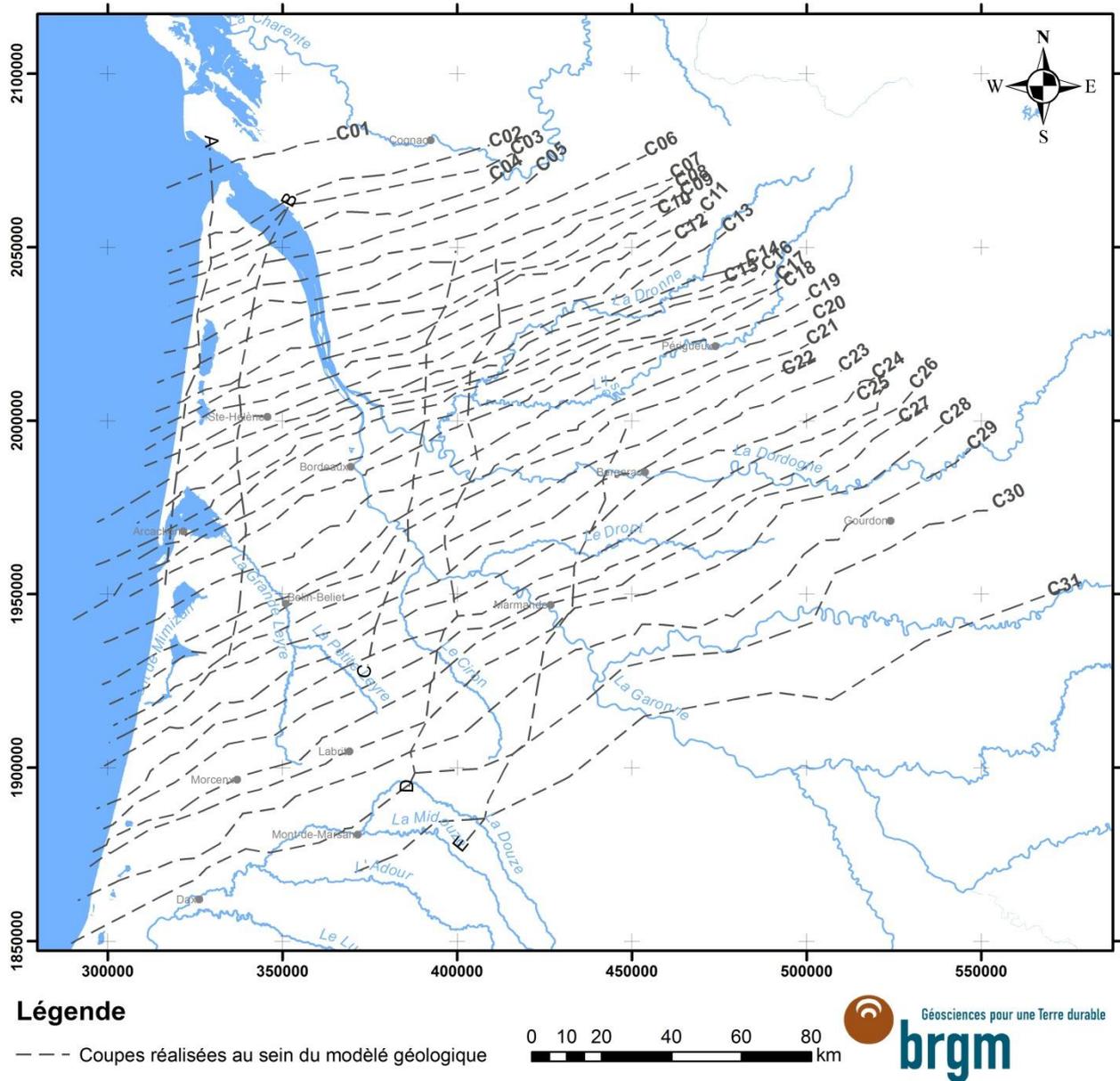
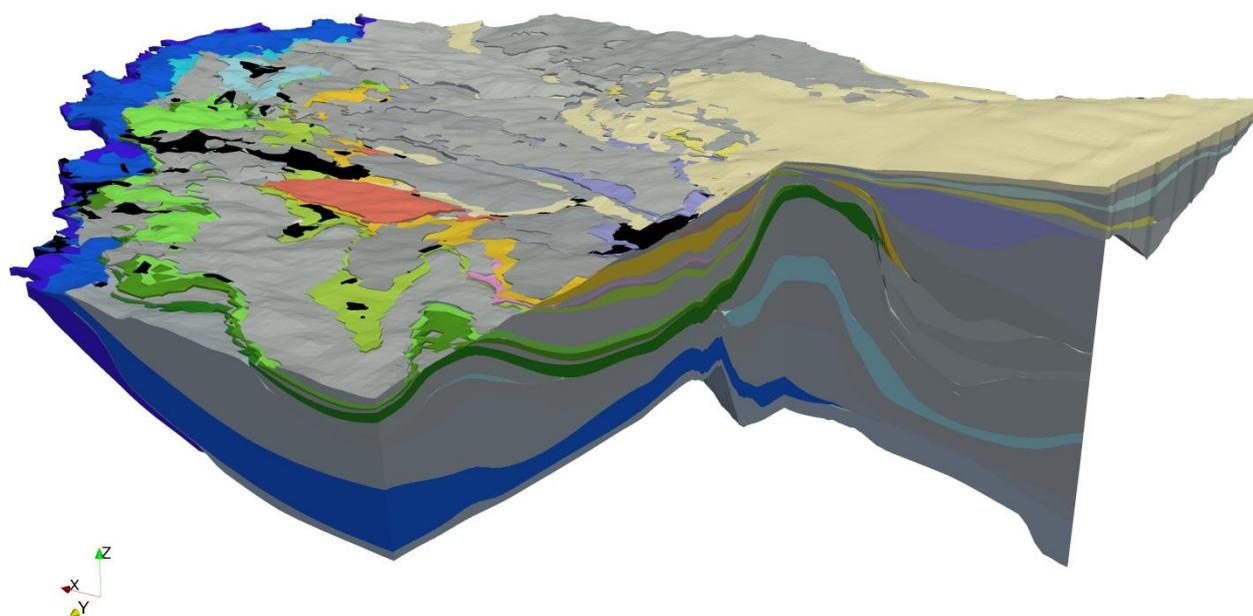


Illustration 24 - Contrôle de cohérence à l'aide de 36 coupes.

Par ailleurs, des cartes d'isobathes et d'isopaques ont été tracées afin de mettre en évidence et de corriger les éventuelles anomalies (Annexe 4).

La visualisation 3D du modèle géologique complète l'analyse de cohérence. Elle permet d'avoir une vision globale et de détecter des singularités qui pourraient s'avérer incohérentes (Illustration 25). Des illustrations 3D supplémentaires du modèle géologique final sont présentées en Annexe 5.



	Recouvrement		Campano-Maastrichtien
	Plio-Quaternaire		Coniacien-Santonien
	Langhien-Serravallien		Turonien
	Burdigalien-Aquitainien		Cénomanién
	Oligocène		Tithonien
	Éocène supérieur		Kimméridgien
	Éocène moyen		Bathonien-Calovo-Oxfordien
	Éocène inférieur		Bajocien

Illustration 25 - Exemple de visualisation 3D du modèle géologique.

3.7. INTEGRATION DANS MARTHE - 1^{ERE} SIMULATION EN REGIME PERMANENT

Le transfert complet de la géométrie issue des 3 modèles construits à l'aide de GDM a été effectué et tous les contrôles d'usage ont été réalisés pour s'assurer de la parfaite transposition. Les toits et les murs des 30 couches du modèle (Illustration 11) ont été implémentés dans le modèle hydrodynamique via l'interface graphique Winmarthe du logiciel de modélisation **MARTHE** (Modélisation d'Aquifères par maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements). Celle-ci permet également un contrôle de cohérence géométrique qui a servi d'ultime vérification.

Dans sa nouvelle configuration, le modèle comprend désormais 30 couches (15 aquifères et 15 épontes) soit 2 382 835 mailles de calcul effectives, ce qui représente 35 fois plus de mailles que dans la version 3.3 du MONA (Illustration 26).

MONA V3.3	MONA V4
15 couches aquifères	30 couches
Pseudo 3D	3D
66 973 mailles	2 382 835 mailles
2 km x 2 km	500 m x 500 m

Illustration 26 - Comparaison des différentes versions du MONA.

Le nombre de mailles dans chaque couche du modèle est rappelé ci-après :

Formation	N° de couche	Codification	Nombre de mailles	Superficie en km ²
		MONA		
Formations de recouvrement et alluvions flamandaises	1	RECO	8 451	2 113
Aquifère du Plio-Quaternaire	2	QUAT	66 821	16 705
Éponte au sommet du Langhien-Serravallien	3	EPLS	49 862	12 466
Aquifère du Langhien-Serravallien	4	LASE	39 857	9 964
Éponte au sommet de l'Aquitainien	5	EPAQ	59 732	14 933
Aquifère de l'Aquitainien	6	AQUI	51 643	12 911
Éponte Chattien-Miocène	7	EPCM	100 683	25 171
Aquifère de l'Oligocène	8	OLNP	58 673	14 668
Éponte à la base de l'Oligocène	9	EPOL	93 847	23 462
Aquifère de l'Éocène supérieur	10	EOCS	38 156	9 539
Éponte à la base de l'Éocène supérieur	11	EPES	88 724	22 181
Aquifère de l'Éocène moyen	12	EOCM	79 163	19 791
Éponte à la base de l'Éocène moyen	13	EPEO	81 167	20 292
Aquifère de l'Éocène inférieur	14	EOCI	62 964	15 741
Éponte au sommet du Campanien	15	EPCA	93 016	23 254
Aquifère du Campanien	16	CAMP	69 592	17 398
Éponte au sommet du Coniacien Santonien	17	EPCS	95 941	23 985
Aquifère du Coniacien-Santonien	18	COST	96 370	24 093
Éponte au sommet du Turonien	19	EPTU	71 417	17 854
Aquifère du Turonien	20	TURO	102 018	25 505
Éponte au sommet du Cénomaniens	21	EPCE	108 764	27 191
Aquifère du Cénomaniens	22	CENO	86 186	21 547
Éponte au sommet du Tithonien	23	EPTI	58 380	14 595
Aquifère du Tithonien	24	TITH	37 483	9 371
Éponte au sommet du Kimméridgien	25	EPKI	123 820	30 955
Aquifère du Kimméridgien	26	KIMM	54 756	13 689
Éponte au sommet du réservoir du Bathonien-Calovo-Oxfordien	27	EPCX	118 402	29 601
Aquifère du Bathonien-Calovo-Oxfordien	28	BACX	149 946	37 487
Éponte au sommet du Bajocien	29	EPBJ	134 177	33 544
Réservoir du Bajocien	30	BAJO	102 824	25 706

Illustration 27 - Nombre de mailles et superficie de chaque couche du MONA en version V4.

Suite à l'import de la géométrie du modèle dans Marthe, une première simulation a été réalisée en régime permanent en intégrant les champs de perméabilités issues de la version 3.3 du MONA (Illustration 28). Les potentiels ont été imposés sur la façade atlantique pour les horizons aquifères. La recharge et les prélèvements correspondent aux données de l'année 1972.

Ceci ne constitue qu'une première approche. La convergence du modèle n'est pas satisfaisante à l'heure actuelle et doit être améliorée avant d'entamer la phase de calage de la piézométrie par rapport aux observations.

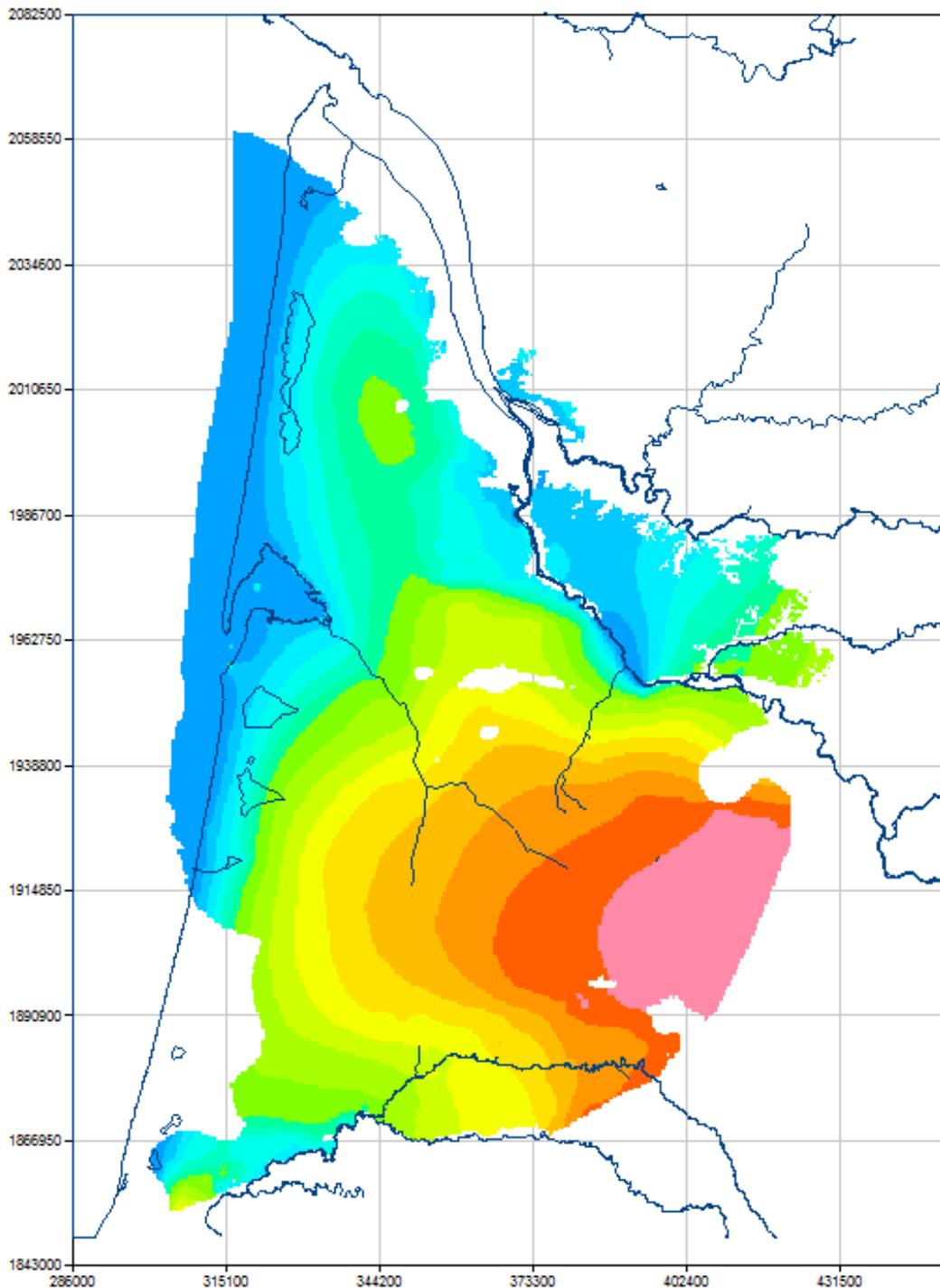


Illustration 28 - Première restitution piézométrique dans le MONA V4 (Nappe de l'Oligocène).

4. Conclusion

L'objectif principal de ce module est l'évolution du Modèle Nord-Aquitain afin de disposer d'un outil de gestion et d'aide à la décision, actualisé et enrichi de nouvelles couches, pour être de plus en plus performant et définir au mieux les stratégies d'exploitation des ressources en eau souterraines de la région. Le programme de cette année 3 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'actualiser les données d'entrées (prélèvements, flux d'infiltration) et les chroniques d'observation jusqu'en 2011 afin de bénéficier d'un outil le plus à jour possible. L'actualisation du modèle jusqu'en 2011 a permis de démontrer que le modèle retranscrit bien les chroniques piézométriques 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.
- Dans un second temps, l'élaboration d'une version actualisée de la géométrie du modèle (qui conduira à une Version 4 de ce modèle) initié en année 2 a été finalisée en année 4. Le but étant 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 travail réalisé cette année 4 a permis de finaliser le modèle géologique dont l'élaboration avait commencé en année 2. La modélisation a nécessité au préalable la construction d'une base de données de référence qui intègre désormais la description de 3 480, les données diagraphiques disponibles de plus de 250 forages soit 343 mesures, les affleurements cartographiés des couches aquifères issus du Référentiel Hydrogéologique BD LISA sur l'équivalent de 100 cartes géologiques, les données sismiques disponibles (secteur de Villagrains-Landiras) et le tracé des failles.

La construction du modèle géologique a été initiée en année 3. Du fait de la limitation du logiciel en termes de nombre de couches, 3 modèles ont été nécessaires pour modéliser l'ensemble du système : un modèle pour les formations du Tertiaire, un autre pour le Crétacé et un dernier pour le Jurassique. Au final, le modèle géologique global comporte 30 couches dont 15 aquifères, 14 épontes et une couche de recouvrement sur le Quaternaire, soit 31 surfaces à interpoler.

Un travail important de validation et de mise en cohérence des données a été réalisé. Il a notamment porté sur la correspondance des données de sondage et des cartes géologiques. Etant donné l'importance de la surface modélisée, c'est près de 100 cartes géologiques qu'il a fallu revisiter pour faire coïncider au mieux les observations en forages avec celles des affleurements de la carte. Les limites d'extension des aquifères ont également été revues dans le cadre de la modélisation géologique.

Le modèle tertiaire a fait l'objet d'une attention particulière en raison de sa complexité, du nombre très important de forages qui recoupent ces formations et de son importance stratégique pour l'alimentation en eau potable. Les horizons du Crétacé et du Jurassique avaient fait l'objet de travaux de modélisation récents (Pédrón et al., 2006 et 2008). Les nouvelles versions de ces modèles ont été construites de manière à bénéficier de tout le travail d'interprétation qui avait été réalisé à l'époque, notamment via l'apport des profils sismiques réinterprétés du Bassin aquitain (Serrano et al., 2006), tout en intégrant les données les plus

récentes (nouveaux forages atteignant ces horizons). Des forages de contraintes ont donc été générés dans les secteurs où la donnée réelle était la moins dense.

In fine, l'amélioration de la géométrie du modèle finalisé en année 4 a permis de représenter à une échelle plus fine la complexité des réservoirs du Nord du Bassin aquitain. Les toits et les murs des 30 couches du modèle géologique ont été implémentés dans le modèle hydrodynamique via l'interface graphique Winmarthe du logiciel de modélisation **MARTHE**. Les premières simulations en régime transitoire ont été réalisées à partir des données provenant de la version 3.3 du MONA sans toutefois entamer le processus de calage.

L'année 5 sera pleinement consacrée à la modélisation hydrodynamique. Dans un premier temps les simulations seront réalisées en régime permanent dans le but de valider les choix de construction du modèle (conditions aux limites, recharge...) et d'obtenir une première estimation des champs de perméabilité.

En parallèle, les données d'entrée du modèle ainsi que les chroniques d'observation seront actualisées avec les données de l'année 2012. Le but étant de maintenir le modèle opérationnel et de 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-2012.

5. Bibliographie

Amraoui N., Bichot F., Platel J.P., Seguin J.J. (1998) - Gestion des eaux souterraines en Aquitaine. Année 2 - Evaluation des ressources. Ajout des couches du Santonien-Turonien, du Cénomaniens et du Jurassique moyen et supérieur au modèle nord aquitain. BRGM/RR-40110-FR, 59 p. 24 fig., 13 tab., 6 ann.

Amraoui N., Bichot F., Seguin J.J., Platel J.P., 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, 17 p.

Ayache B., Labarthe B., Pédrón N., Saplaïroles 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, 170 p., 23 ill., 2 ann..

Bourgine B. (2010) - Modélisation géologique 3D à l'aide du programme MultiLayer - Version 4 - BRGM/RP-53111-FR Mise à jour janvier 2010, 197 p., 147 ill.

Braneyre M., Seguin J.J., Lambert M. (1993) - Modèle conceptuel sommaire - Multicouche aquitain. Rapport BRGM R37322 BOR AQL 93, 12 p., 7 fig., 1 ann..

Braneyre M., Chigot D., Lambert M., Moreau C.F., Sourisseau B., Platel J.P., Dubreuilh J., Gaaloul N. (1993) - Modélisation mathématique multicouche de trois aquifères exploités du sédimentaire nord-aquitain (Oligocène - Eocène - Crétacé). R-37361, 26 p., 7 fig., 2 ann.

Braneyre M., Lambert M., Sourisseau B. (1994) - Rapport de synthèse du modèle régional multicouche du Bassin Nord-Aquitain : Calage en régime transitoire et simulations. Rapport BRGM R38006 SGN SP 94, 42 p, 29 fig, 9 ann.

Cabaret O., Saltel M. (2012) - Simulations d'impacts d'un champ captant d'une capacité de 10 et 12 millions de m³ dans l'Oligocène à l'aide du Modèle Nord-Aquitain (MONA) – Sainte-Hélène (33) – Rapport BRGM/RP-61290-FR, 81 p., 62 fig., 3 ann.

Cabaret O., Saltel M. (2012) - Contribution à la révision du SAGE Nappes Profondes de Gironde : Utilisation du Modèle Nord-Aquitain - phase « Tendances et Scénarios » - Simulations complémentaires - Rapport final, BRGM/RP-61479-FR, 46 p., 21 fig., 4 ann.

Corbier P., Karnay G., Bourgine B., 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 2. BRGM/RP-57813-FR , 184p., 36 figures, 6 annexes.

Gomez E., Pédrón N., 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, 61 p., 30 fig. 13 ann.

Gomez E., Saltel M., Pédrón N. (2010) - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain - Module 4 - Année 1 - Convention 2008-2013. BRGM/RP-57810-FR, 38 p.,15 ill., 8 ann..

Pédron N., Abou Akar A., Platel J.P. (2007) - Evaluation de la ressource en eau de l'Eocène dans le Bergeracois. Phase 2 : Finalisation de l'inventaire, intégration des données au modèle régional et simulations. BRGM/RP-56301-FR, 72 p., 7 ann.

Pédron N., Abou-Akar A., Gomez E. (2009) - Simulation d'impact d'un champ captant dans l'aquifère Oligocène sur le secteur de Sainte-Hélène (33) à l'aide du Modèle Nord-Aquitain (MONA) – BRGM/RC-57035-FR, 36 p., 11 fig., 6 ann.

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

Pédron N., P. Platel J., Bourguine B. (2006) - Gestion des eaux souterraines en région aquitaine. Développement et maintenance du modèle nord-aquitain de gestion des nappes - Module 4 - Année 3 - BRGM/RP-55242-FR, 56 p., 24 fig., 3 ann.

Pédron N., Platel J.P., 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. BRGM/RP-56301-FR, 72 p., 7 ann.

Pédron N., Platel J.P., Bidzana K., Lucassou F., Loiseau J.B., Labarthe B., Seguin J.J., Mardhel V. (2009) - Référentiel Hydrogéologique Français BDRHF - Version 2- Bassin Adour-Garonne. Années 2 et 3 - Délimitation des entités hydrogéologiques en région Aquitaine. Rapport d'étape. BRGM/RP-56949-FR. 60 p., 41 ill., 5 annexes.

Pédron N., Platel J.P., Bourguine B., Loiseau J.B. (2008) - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine -Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes - Année 4 - Module 4 - BRGM/RP-56614-FR, 99 p., 49 fig., 6 ann.

Pédron N., Platel J.P., 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, 96 p., 43 fig., 8 tab., 8 ann.

Pédron N., Seguin J.J., Capdeville J.P. (2003) - 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, 56 p., 25 fig., 5 tab., 7 ann.

Platel J.P., Pédron N., Gomez E., Saltel M. (2010) - Perspectives de gestion des nappes du Secondaire en Agenais-Périgord. Synthèse géologique et hydrogéologique, modélisation hydrodynamique. BRGM/RP-59330-FR, 217p., 101 fig., 12 tab., 19 ann.

Platel J.P., Pédron N., Gomez E., 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, 166 p., 37 fig., 15 tab., 6 ann.

Platel J.P., Serrano O. (2008) - Structuration des formations du Tertiaire et du Crétacé dans le Sud-Gironde (Villagrains - Saint-Magne) après retraitement et interprétation de profils de sismique-réflexion ancienne. Rapport BRGM/RP-56962-FR, 43 p., 13 ill., 1 annexe, 11 plnaches hors texte.

Saltel M. (2012) - Simulation d'impact d'un champ captant d'une capacité de 10 millions de m³ par an dans l'aquifère oligocène sur le secteur de Sainte-Hélène (33) à l'aide du Modèle Nord-Aquitain (MONA) –Rapport BRGM/RP-60822-FR, 40 p., 18 fig., 3 ann.

Saltel M., Faucher A., B. Bourgine (2012) - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine -Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes – Module 1 – Année 3 – BRGM/RP-61614-FR, 45 pages, 24 figures, 3 annexes.

Saltel M., Pédron N. (2012) - Contribution à la révision du SAGE Nappes Profondes de Gironde : Utilisation du Modèle Nord-Aquitain dans le cadre du module « Tendances et Scénarios » -Rapport final, BRGM/RP-60416-FR 56 p., 24 fig., 5 ann.

Saltel M., Pédron N., Platel J.P., Bourgine B., Gutierrez T. (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 p., 38 fig., 6 ann.

Saltel M., Pédron N., Platel J.P., Corbier P., 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 123 p., 64 fig., 11 tab., 7 ann.

Saltel M. (2008) - Impact de structures géologiques sur l'alimentation de systèmes aquifères profonds - Fonctionnement hydrogéologique des antifformes du sud de Bordeaux. Thèse de doctorat : Thèse de doctorat, Université Michel de Montaigne - Bordeaux 3, 268p,

Seguin J.J. (1999) - 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, 22 p., 10 fig., 8 tab.

Seguin J.J. (1999) - Restructuration du modèle nord-aquitain de gestion des nappes. Correction du biais de calage du modèle. BRGM/RR-40711-FR, 16 p., 11 fig.

Seguin J.J. (2002) - Gestion des eaux souterraines en Aquitaine. Actualisation du modèle nord-aquitain. Période 1999-2000. BRGM/RP-51758-FR, 22 p., 8 fig., 8 tab.

Serrano O., Delmas J., Hanot F., Vially R., Herbin J.P., Houel B., Tourlière B. (2006) - Le Bassin d'Aquitaine : valorisation des données sismiques, cartographie structurale et potentiel pétrolier. Ed. BRGM, 2 volumes, 245 p., 142 figures, 17 tableaux, 17 annexes,

Serrano O., Saltel M. (2012) - Note Technique sur les données sismiques retraitées sur le secteur de Villagrains – Saint Magne. Rapport BRGM/RP-61350-FR, 11 p., 4 fig.

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 (+Cénomaniens 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 Cénomaniens et du Jurassique (Bajocien, Bathonien-Callovio-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).

MONA V4

Développements réalisés dans le cadre de la convention régionale « Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine » 2008 – 2013.

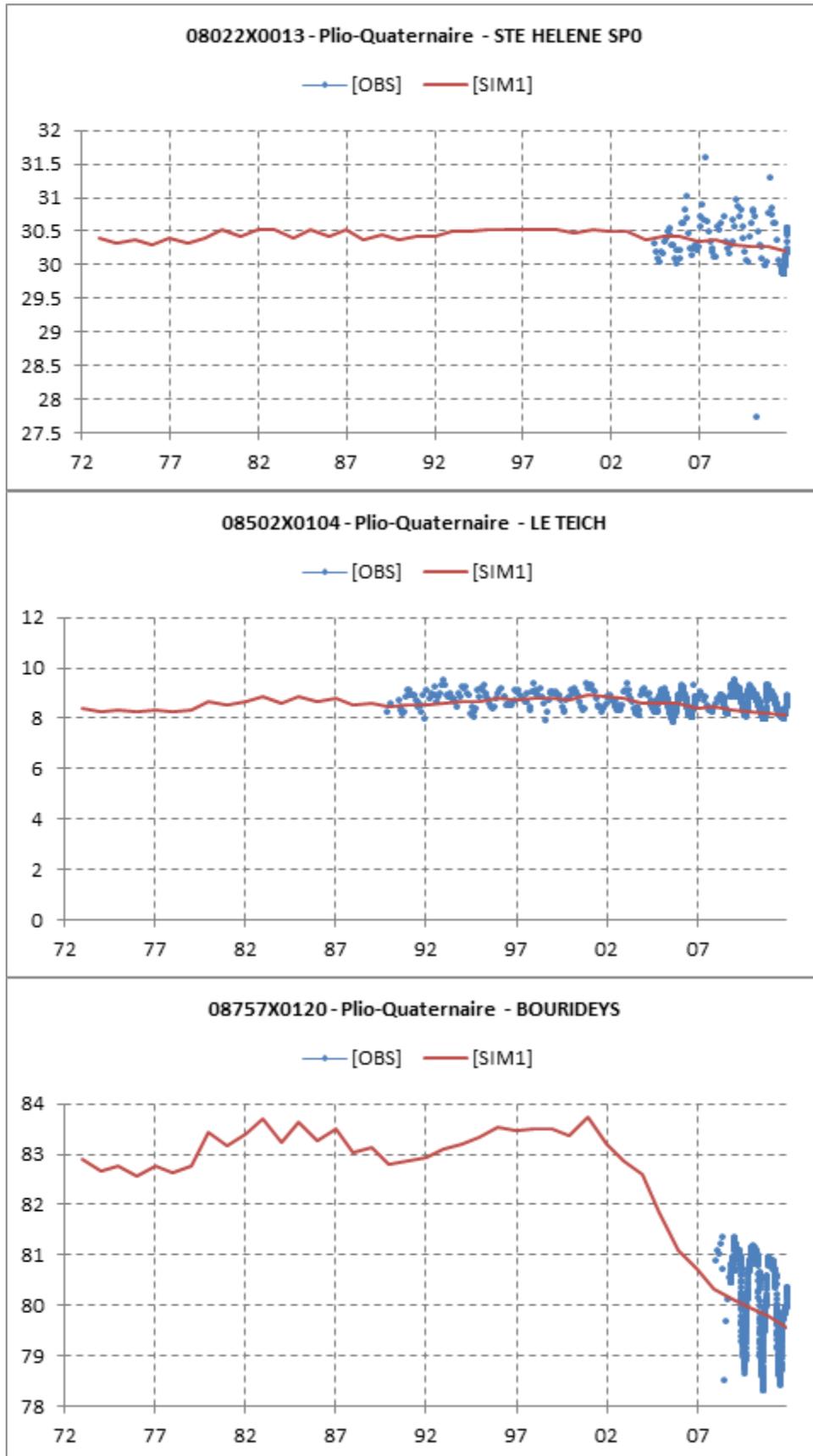
L'année 2 de la convention 2008-2013 (Saltel et al., 2011) les travaux ont permis l'élaboration de la base de données de référence compilant la description de près de 3 300 forages, les données diagaphiques disponibles, les affleurements cartographiés des couches aquifères issus du Référentiel Hydrogéologique BD LISA et le tracé des failles.

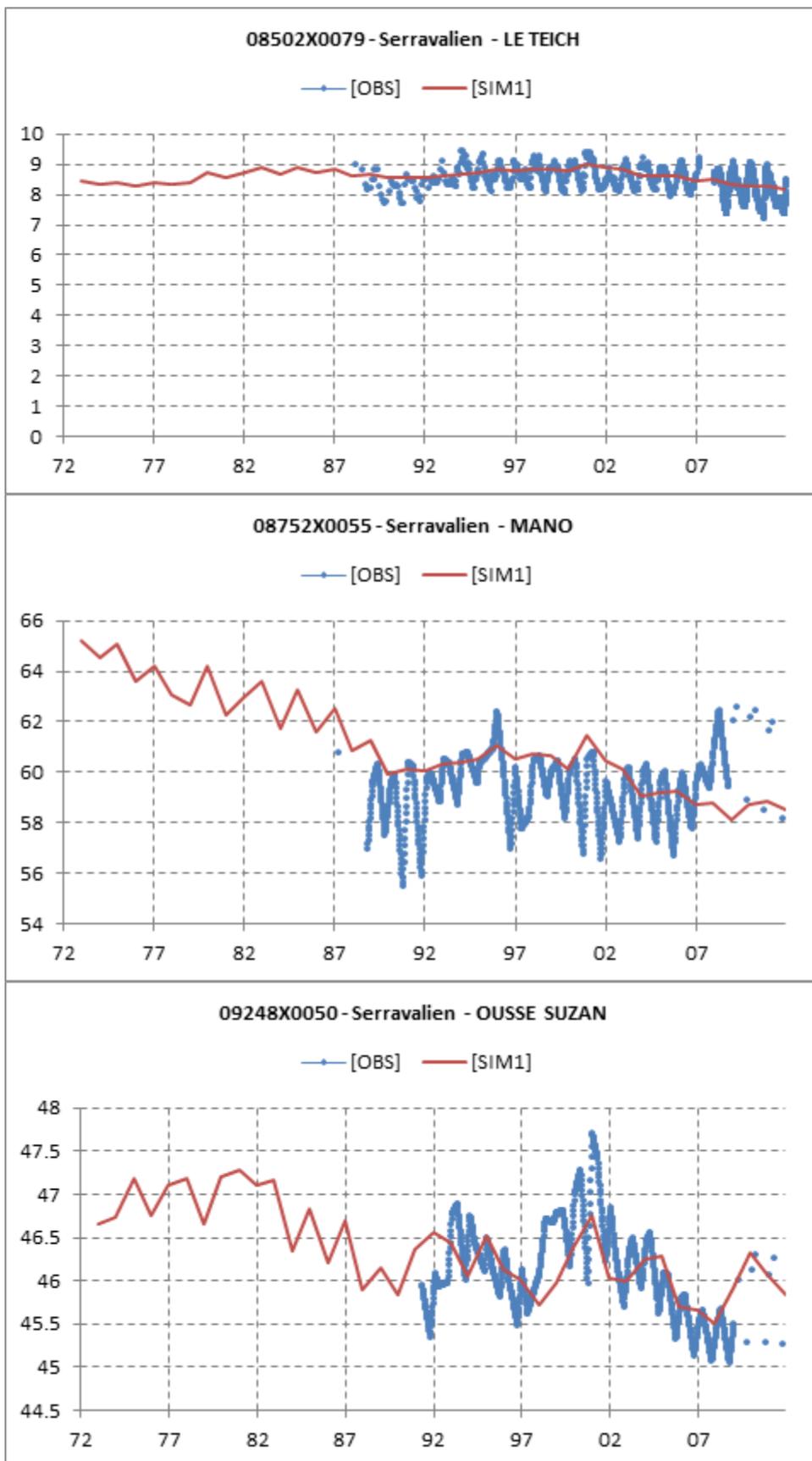
En année 3 (Saltel et al., 2012), la base de donnée a été complétée pour in fine intégrer la description de près de 3 400 forages, 343 données diagaphiques numériques sur près de 250 forages. La construction du modèle a été initiée. L'ensemble du système aquifère tertiaire a fait l'objet d'un modèle à part entière en raison de sa complexité, du nombre très important de forages qui recoupent ces formations et de son importance stratégique pour l'alimentation en eau potable. Un travail important de validation et de mise en cohérence des données a été réalisé. Il a notamment porté sur la correspondance des données de sondage et des cartes

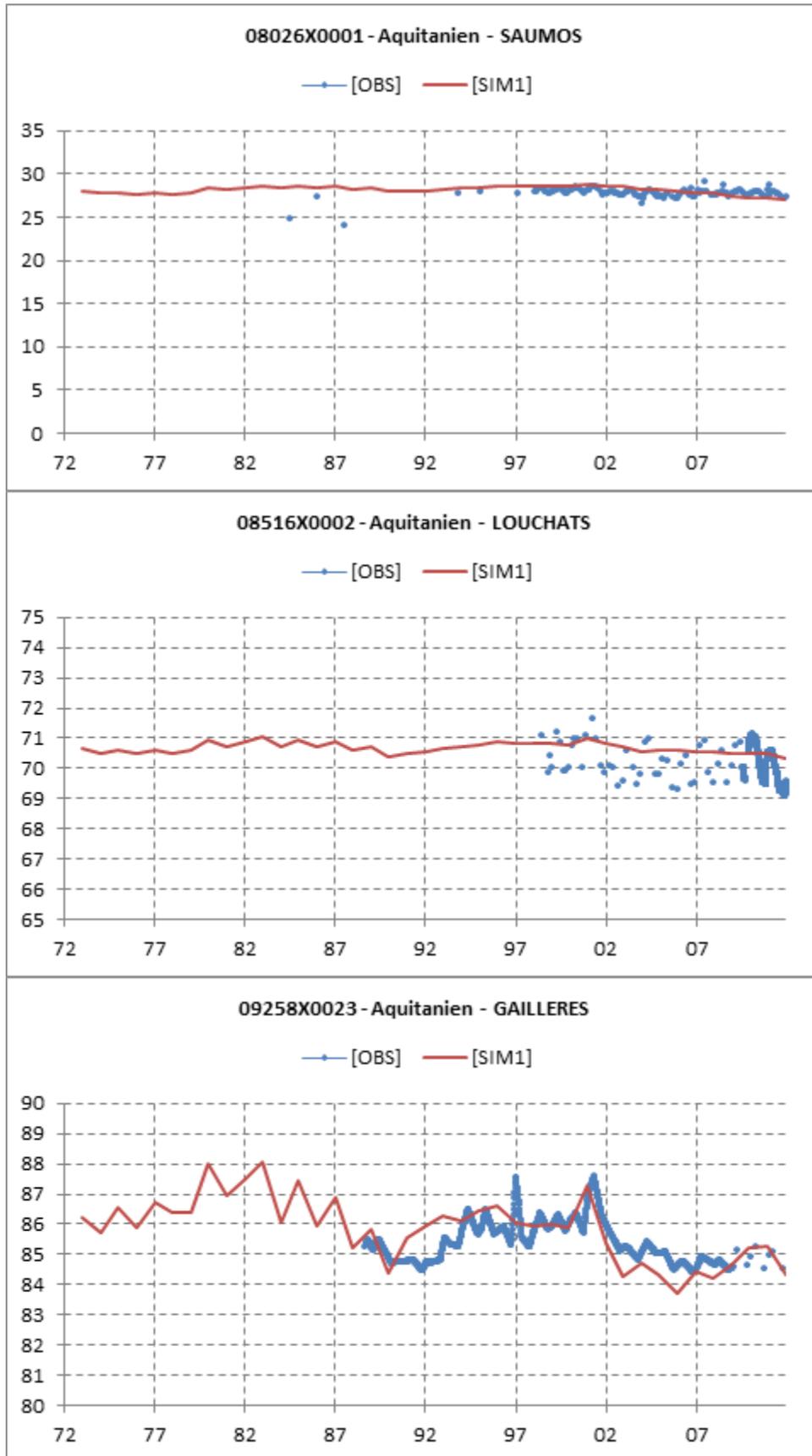
géologiques. Etant donné l'importance de la surface modélisée, c'est près de 100 cartes géologiques qu'il a fallu revisiter pour faire coïncider, au mieux, les observations en forages avec celles des affleurements de la carte. Les limites d'extension des aquifères ont également été revues dans le cadre de la modélisation géologique. Les coupes hydrogéologiques réalisées en année 2 ont été utilisées pour valider le travail de modélisation initié sur les formations tertiaires

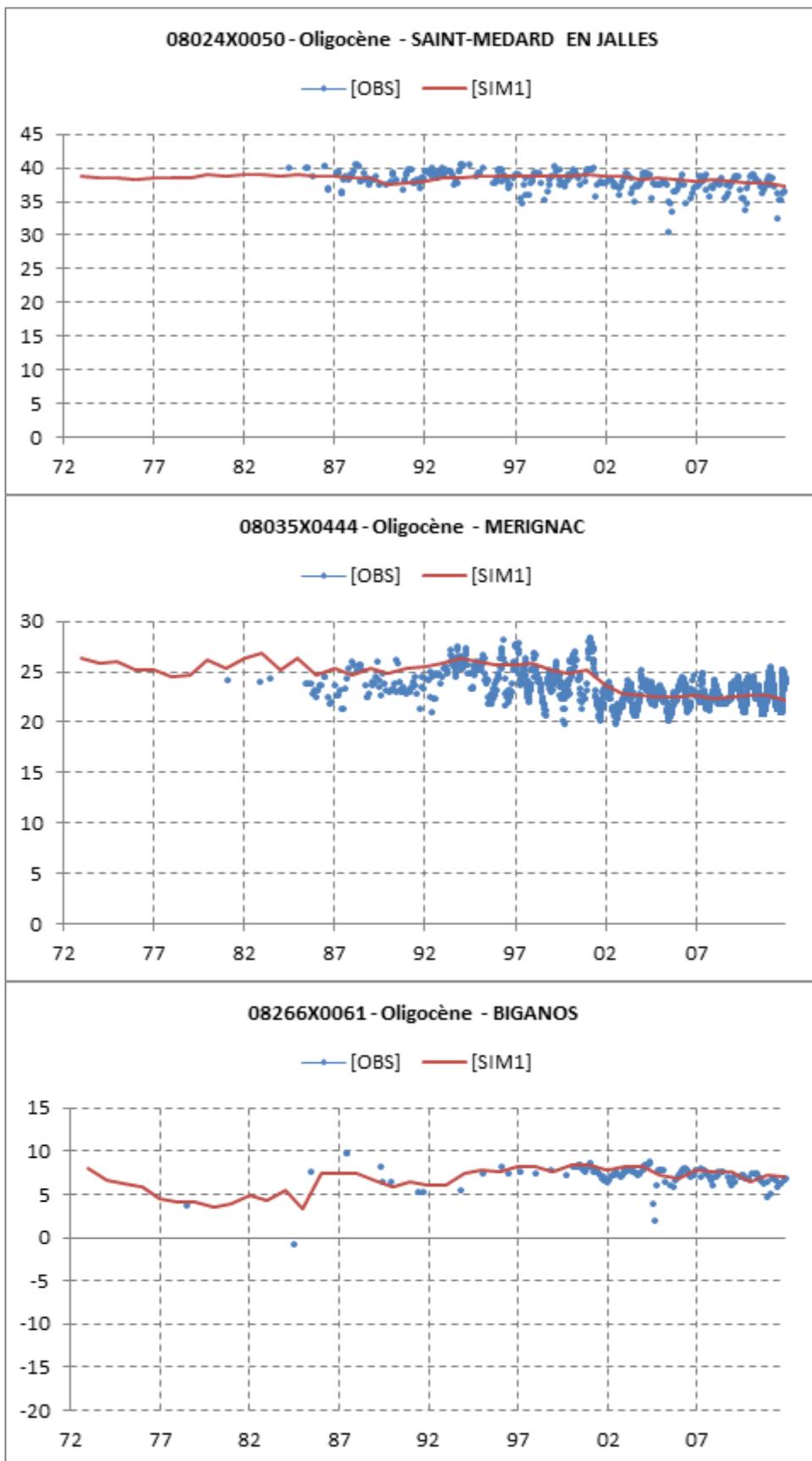
Annexe 2

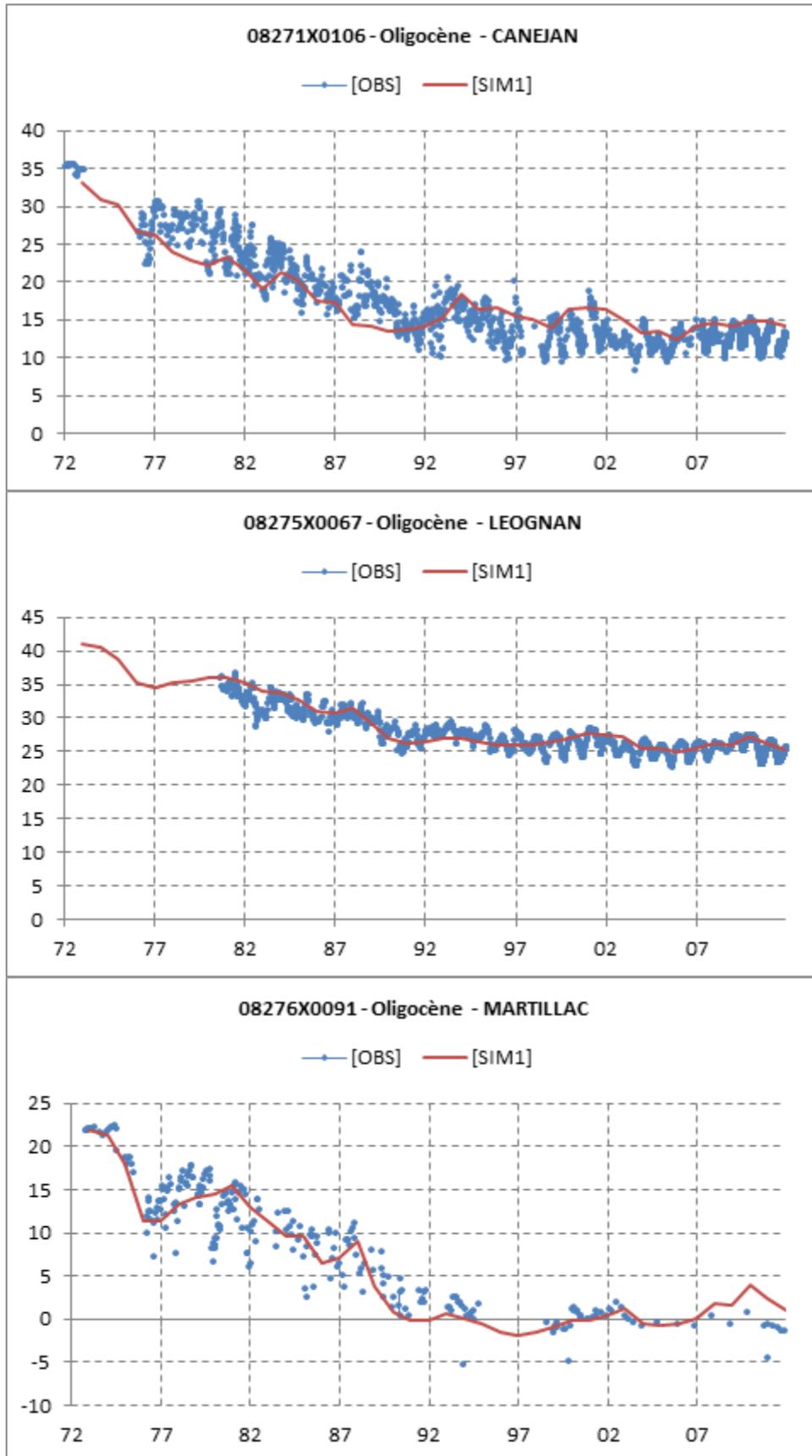
Actualisation des chroniques de calage – période 1972 - 2011

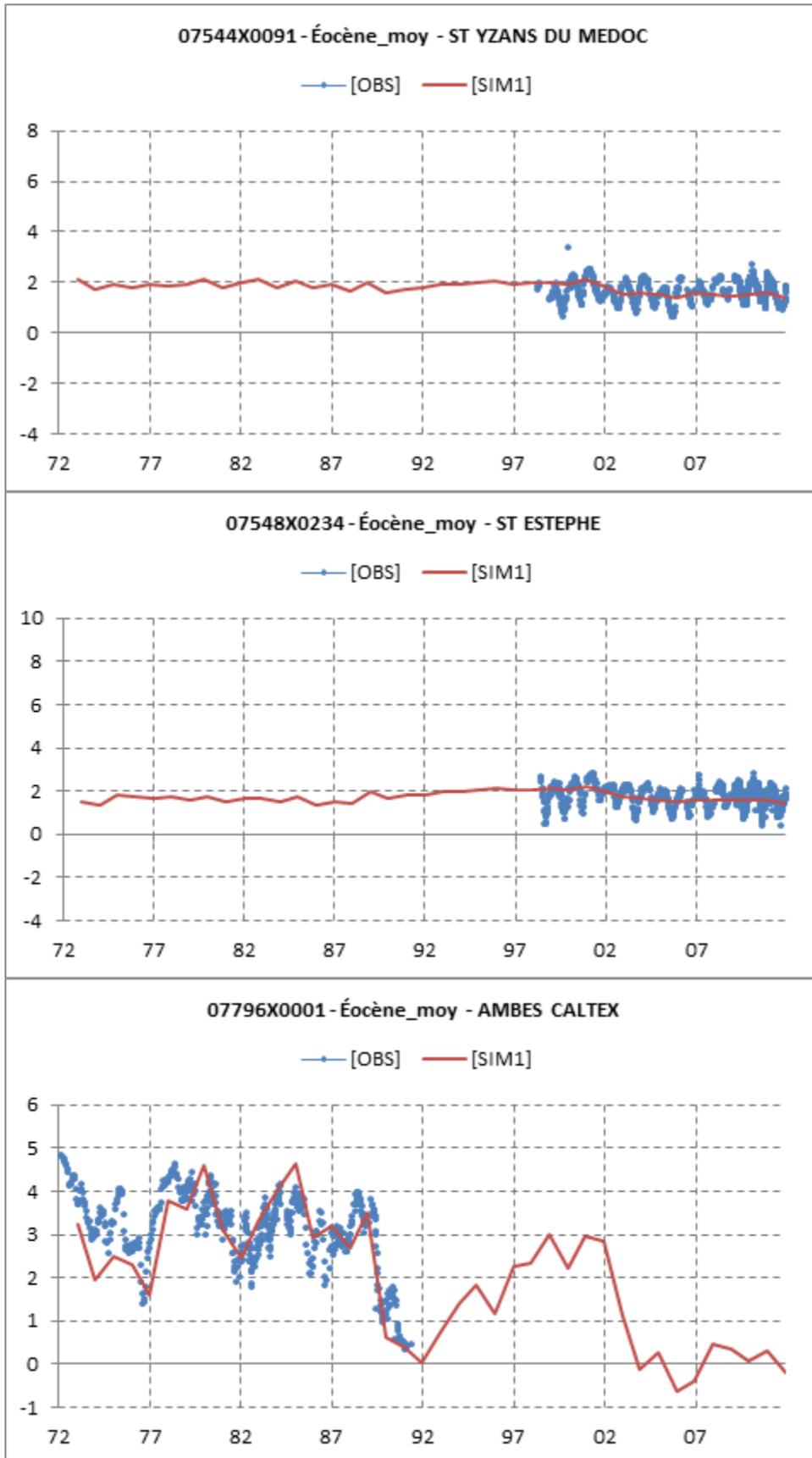


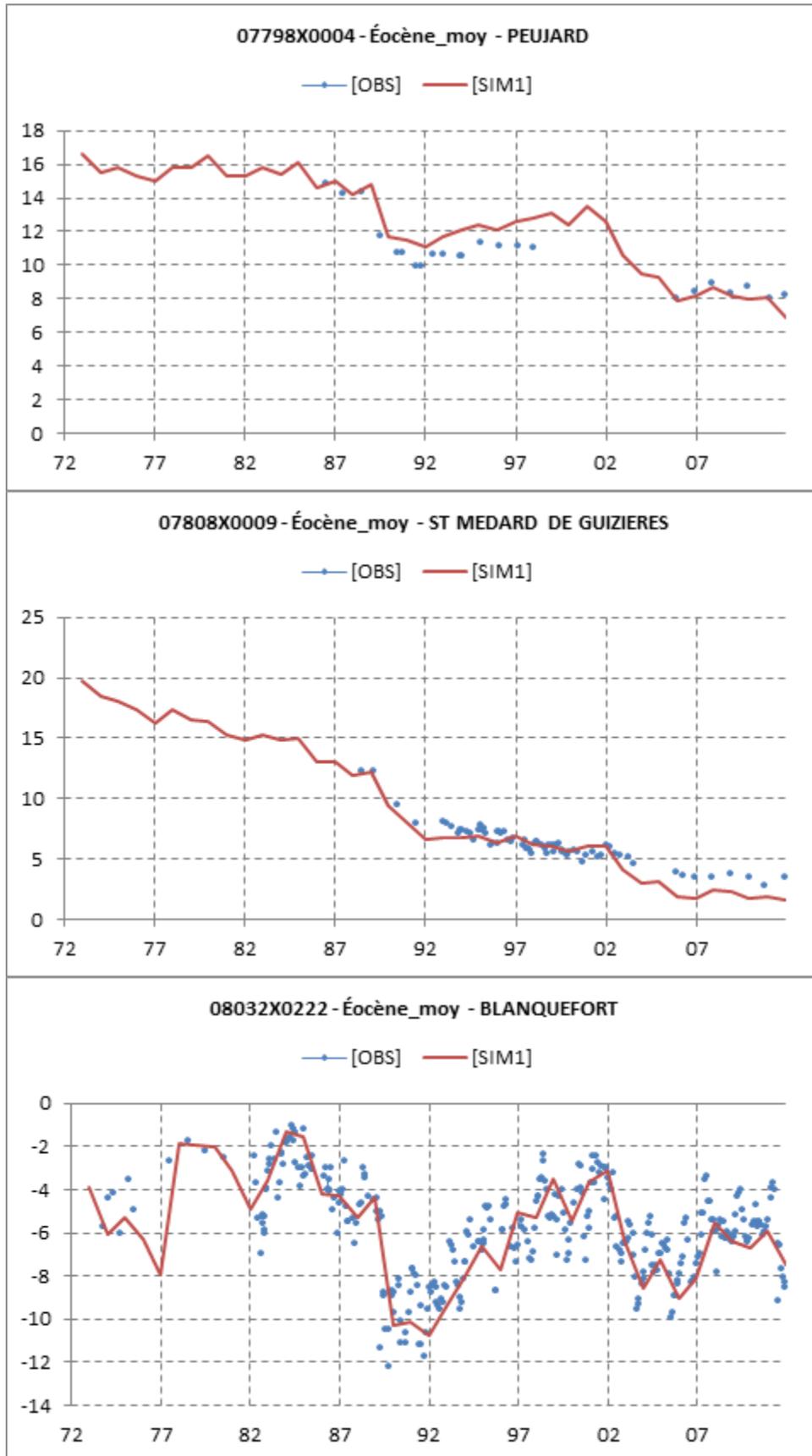


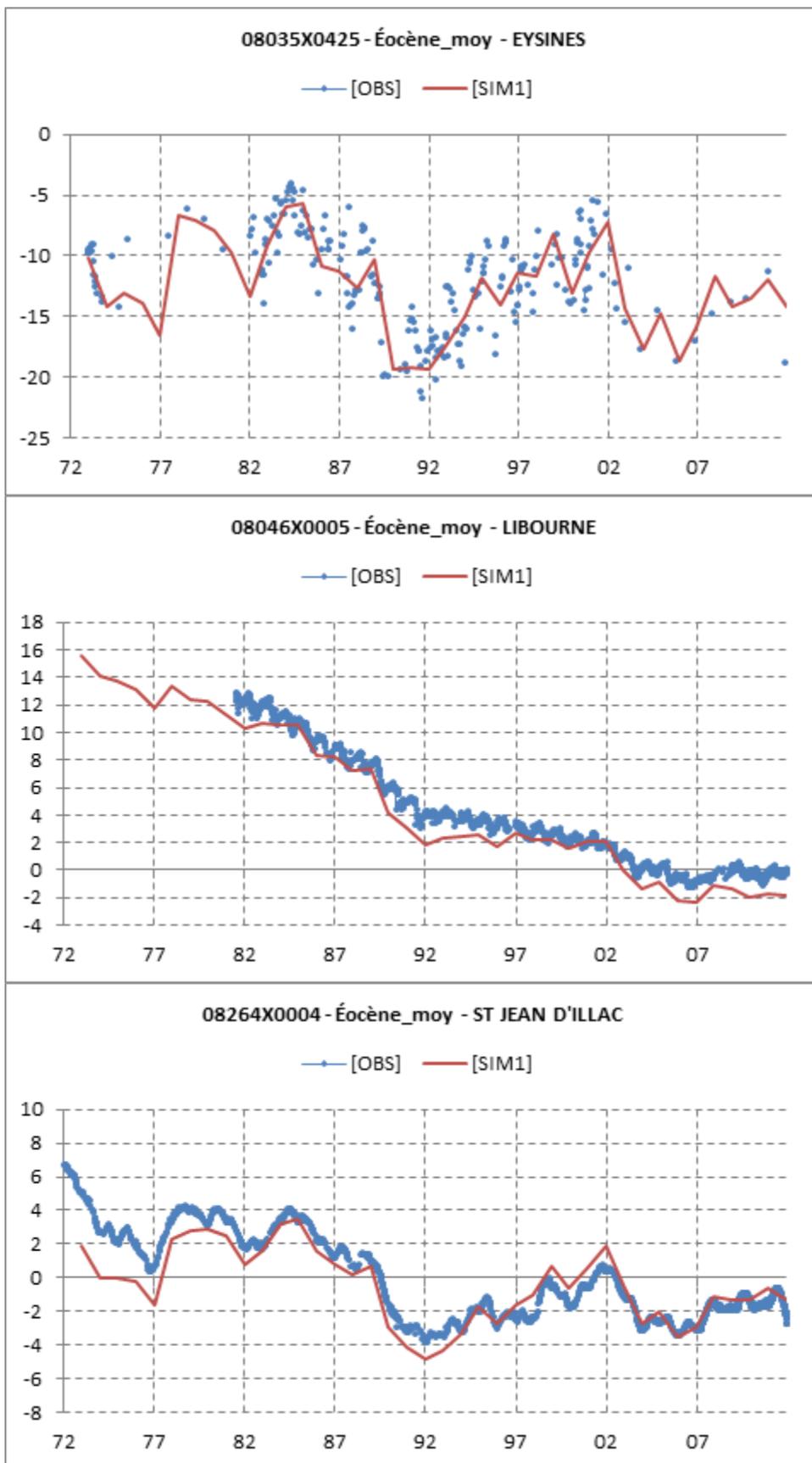


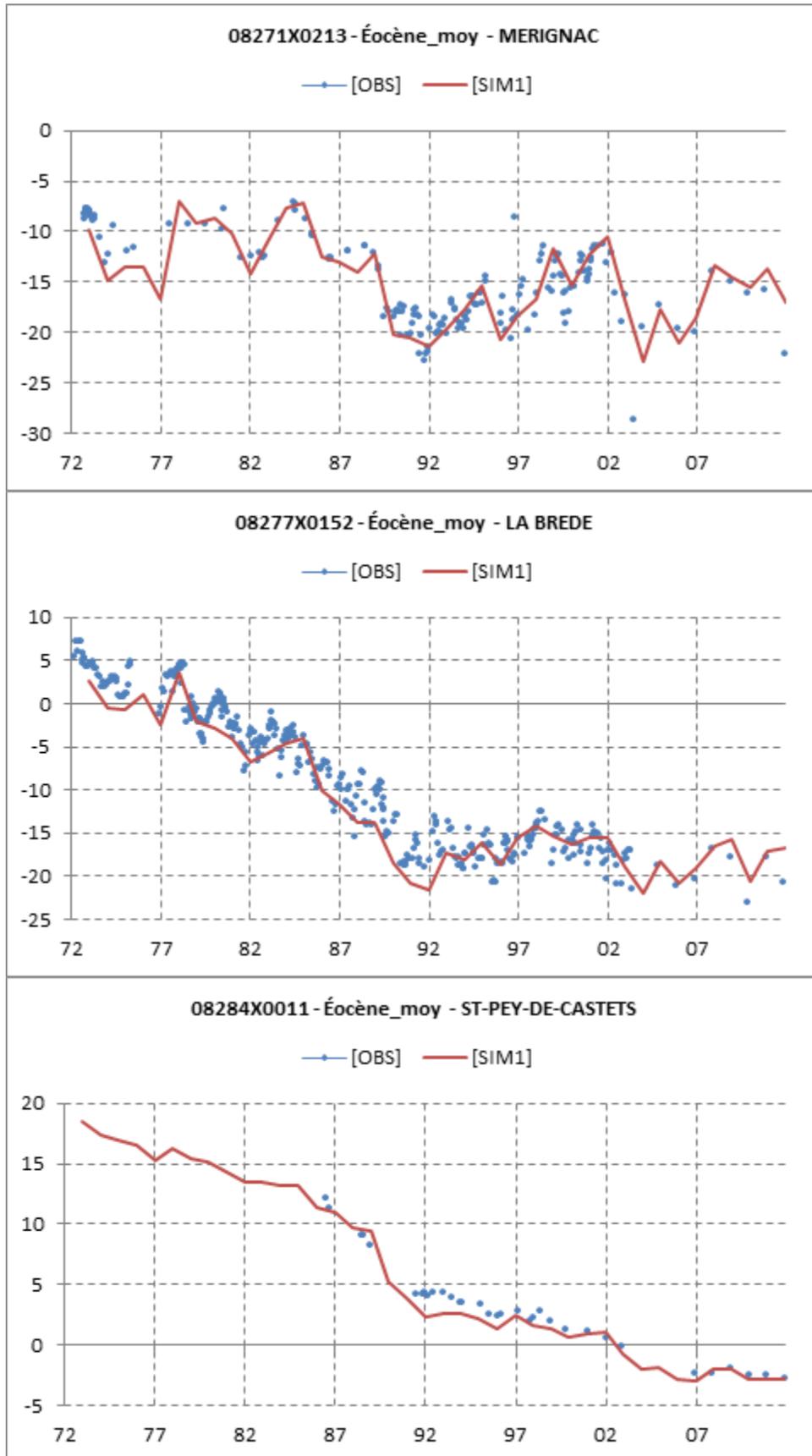


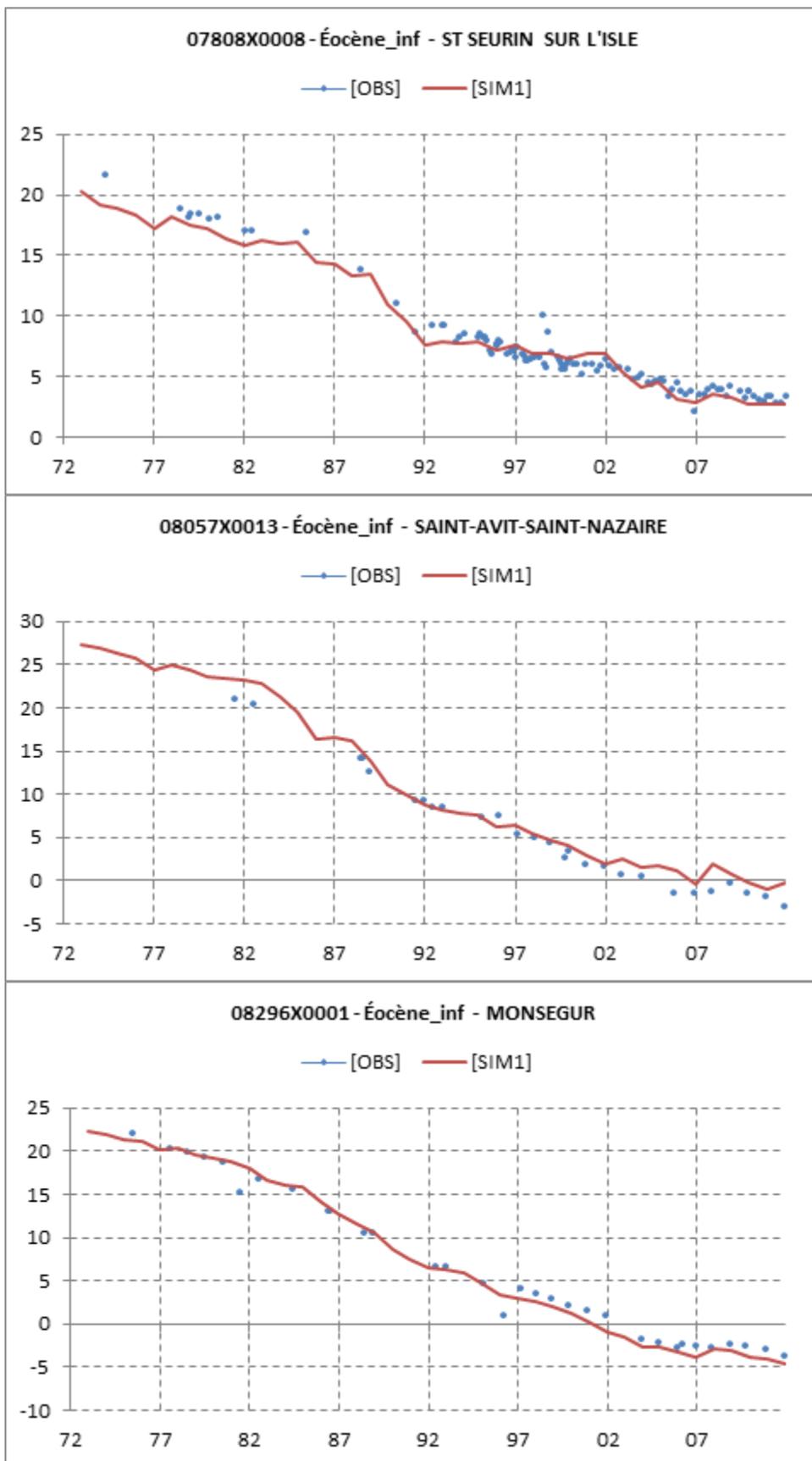


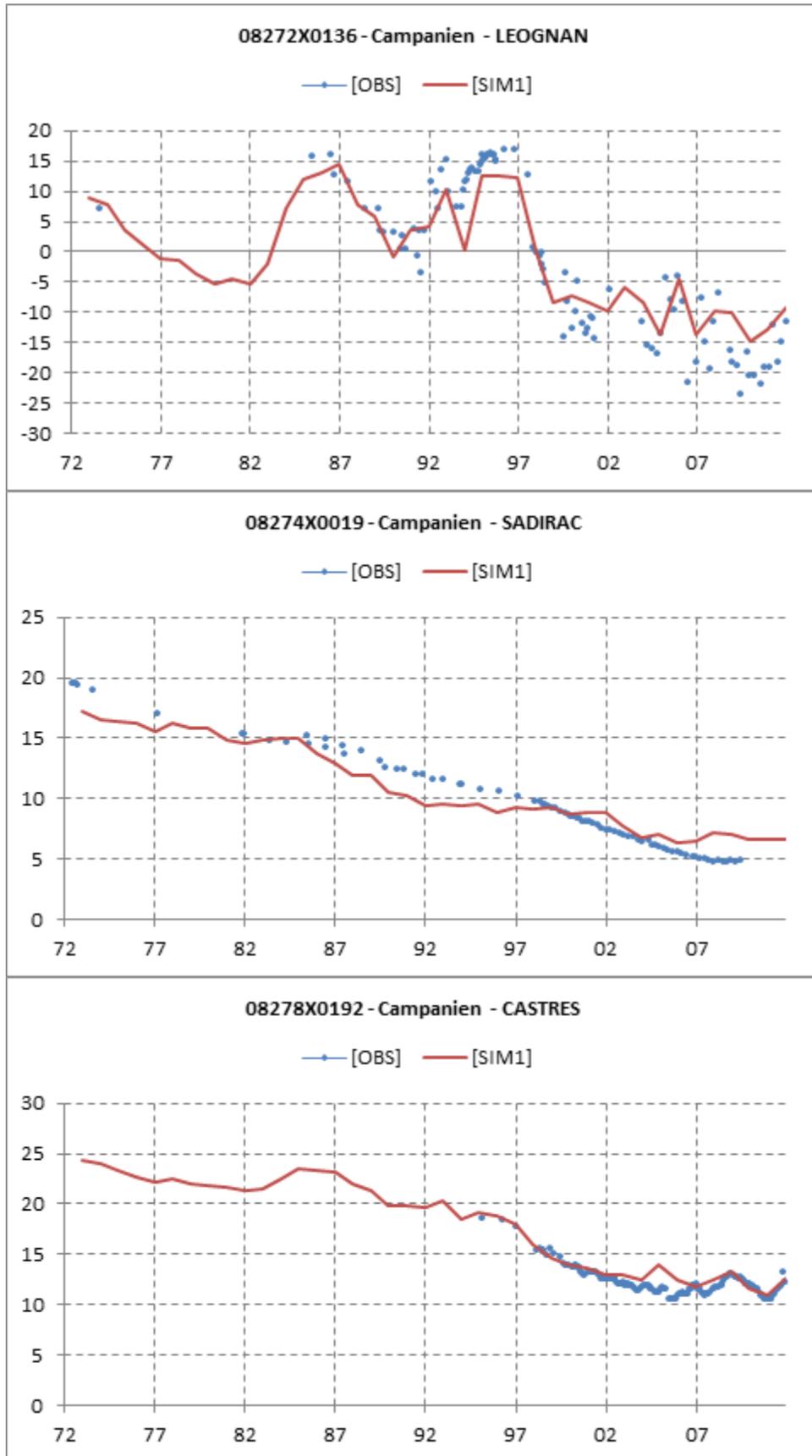


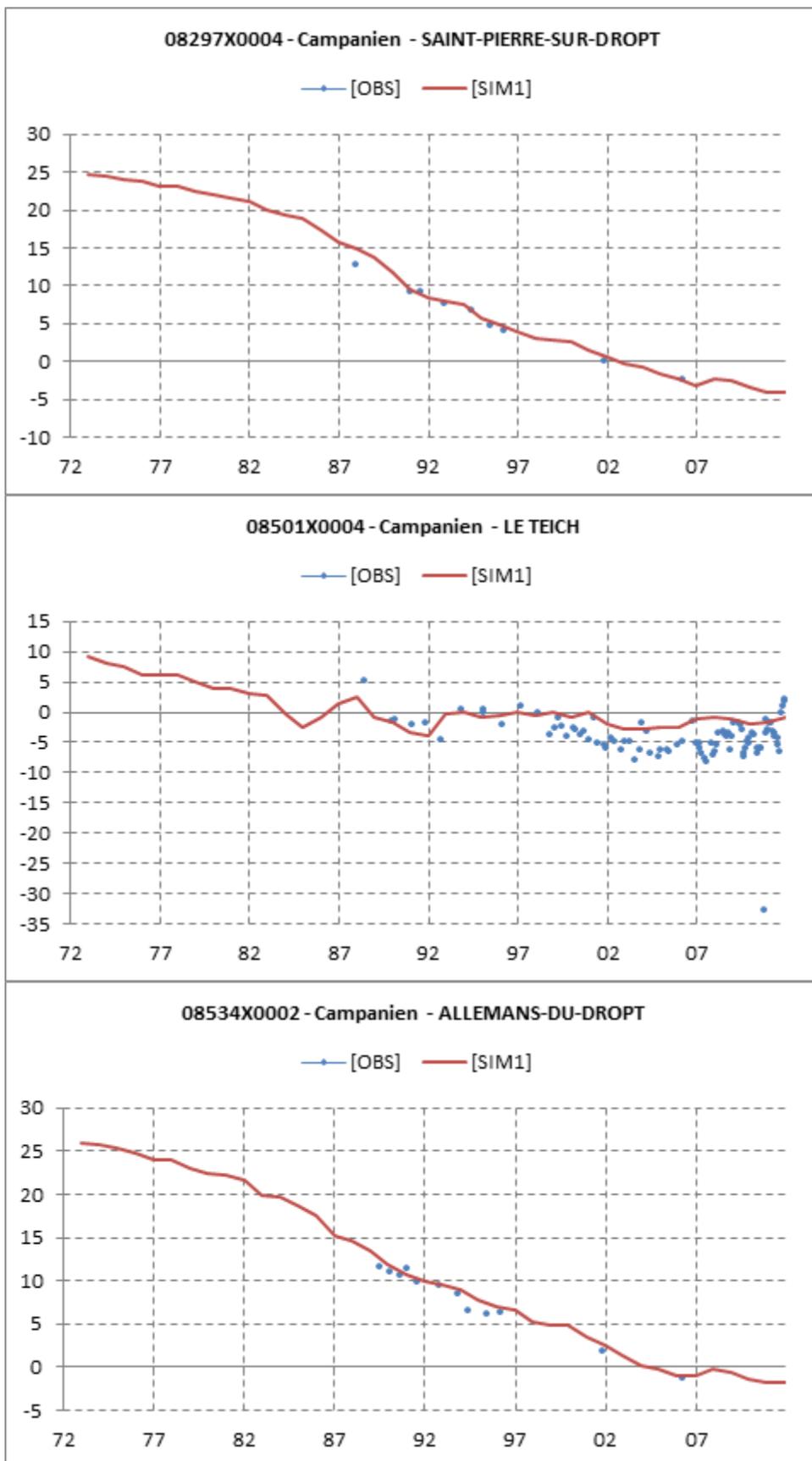


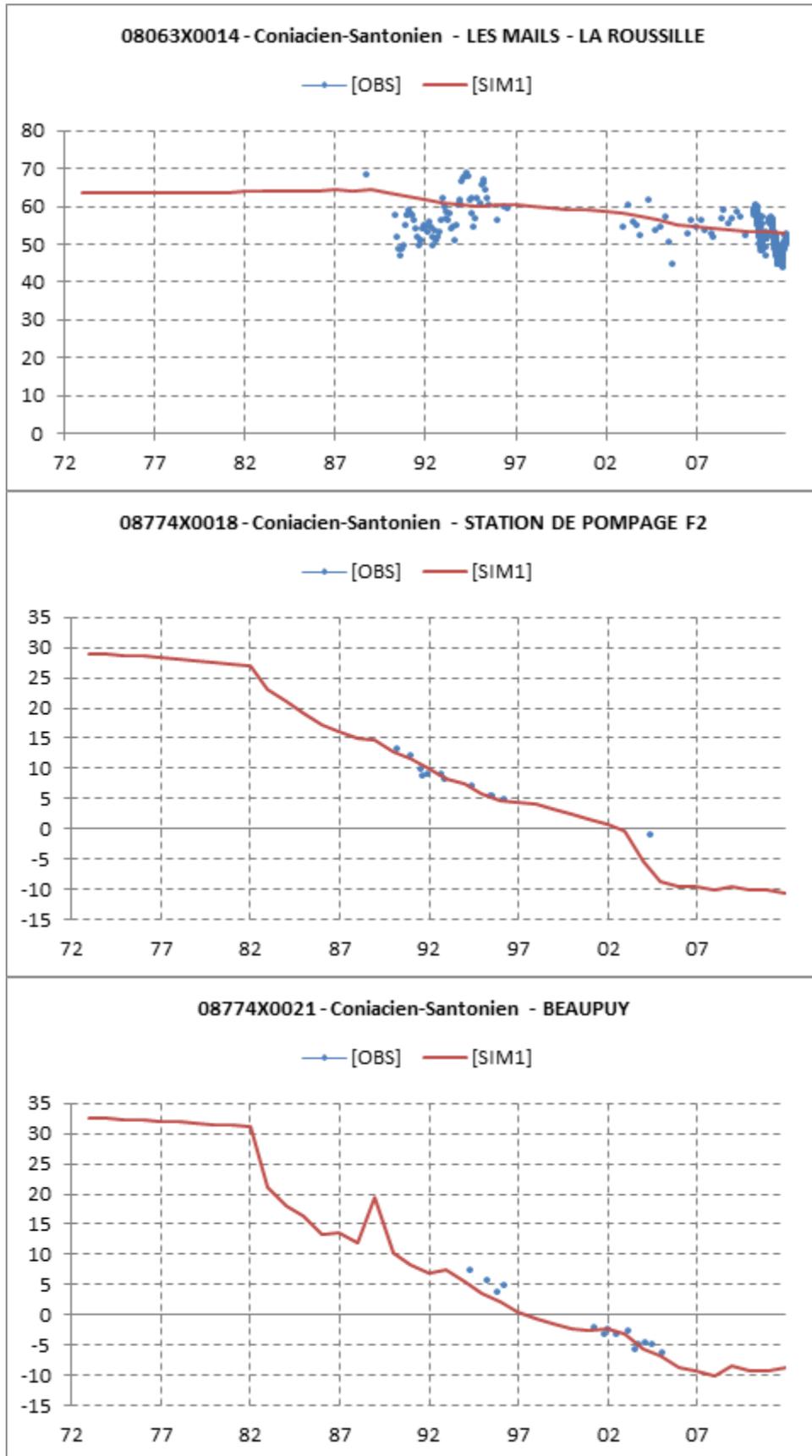


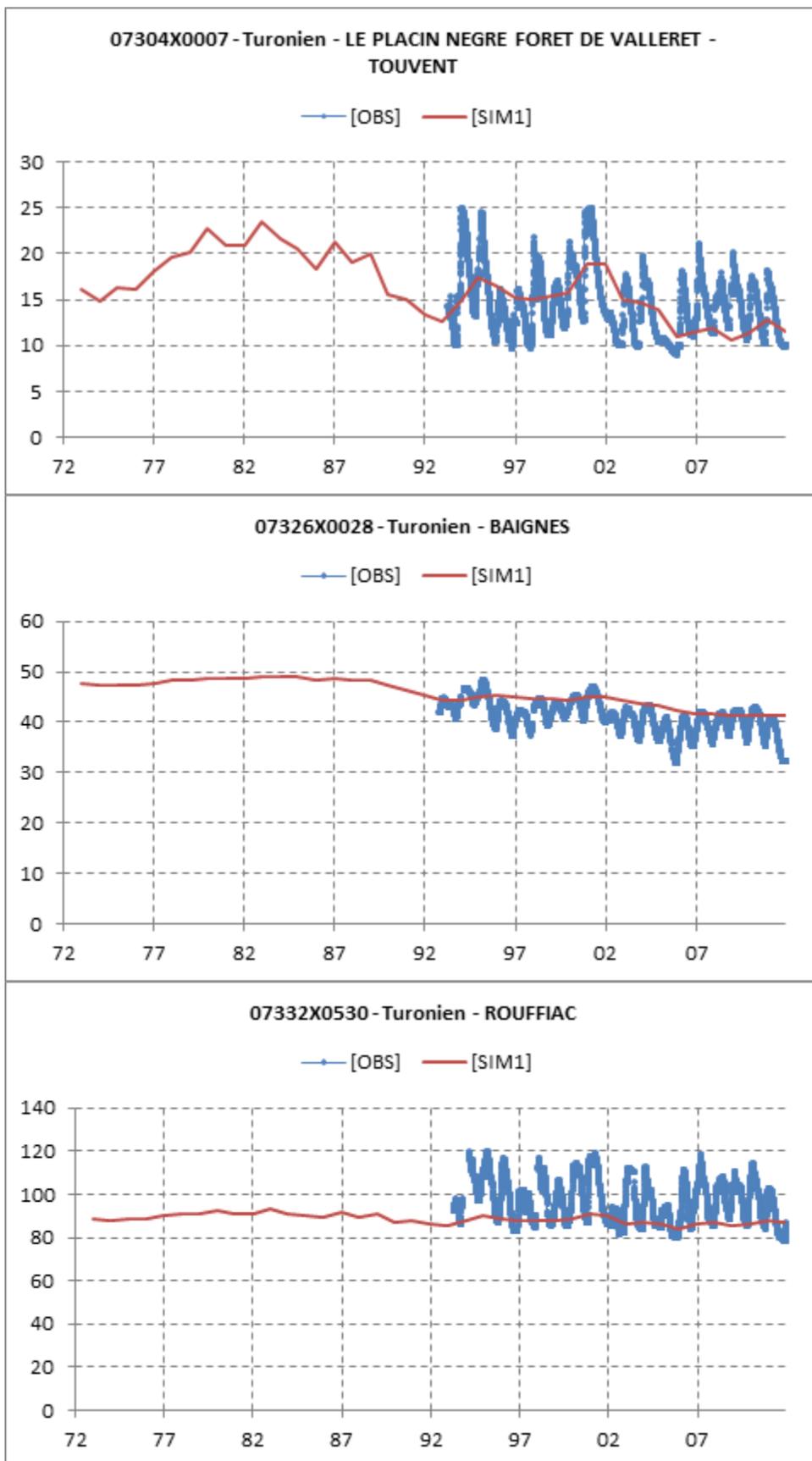


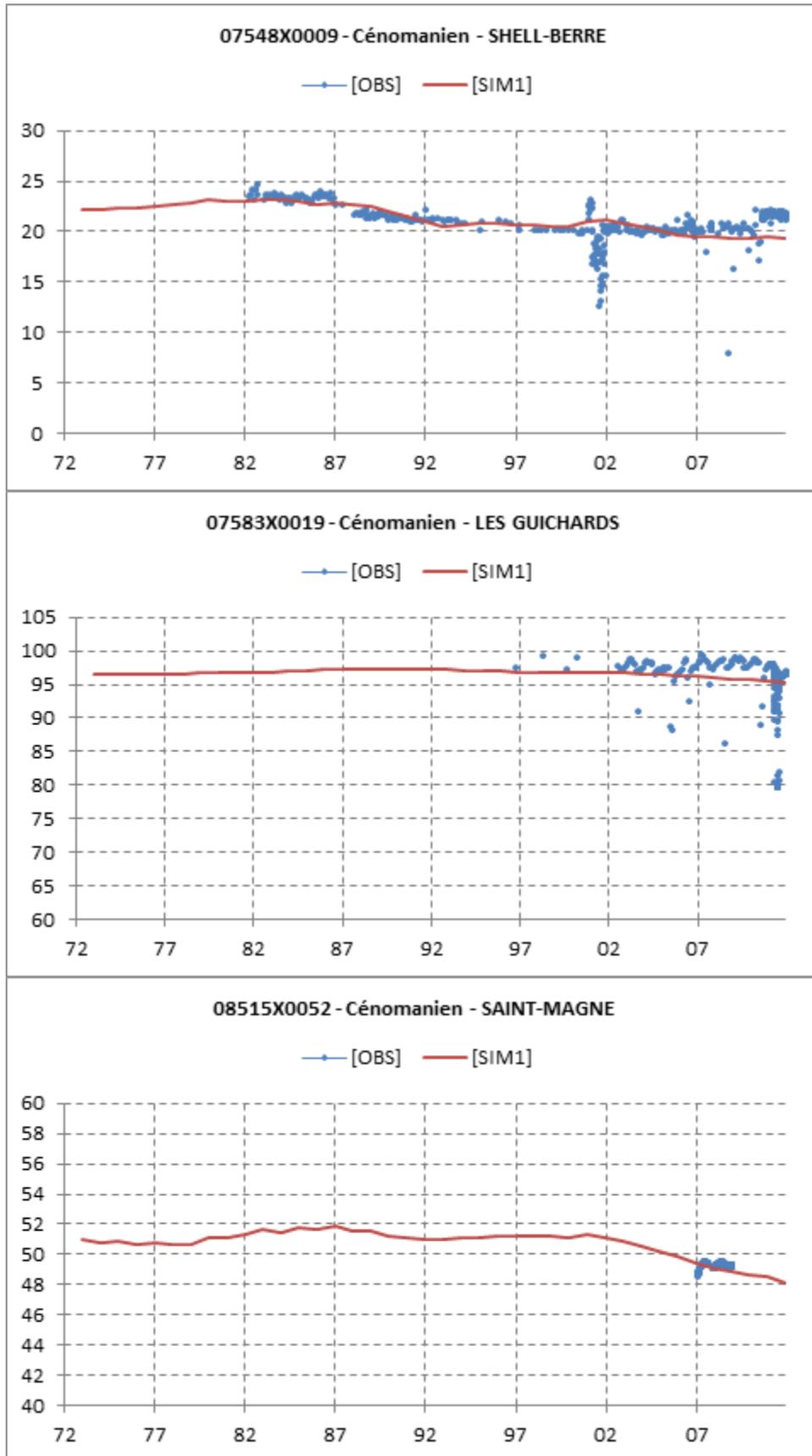


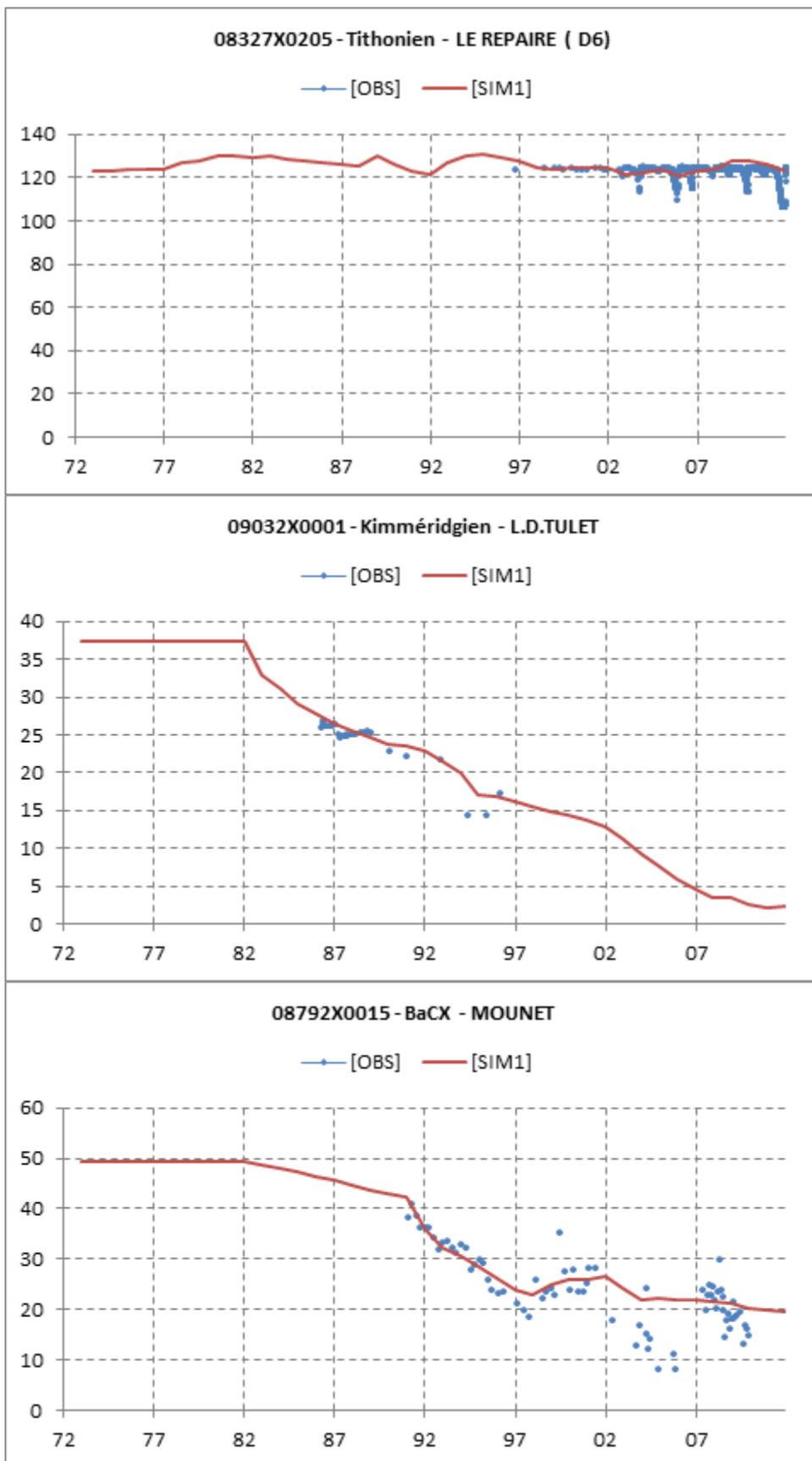


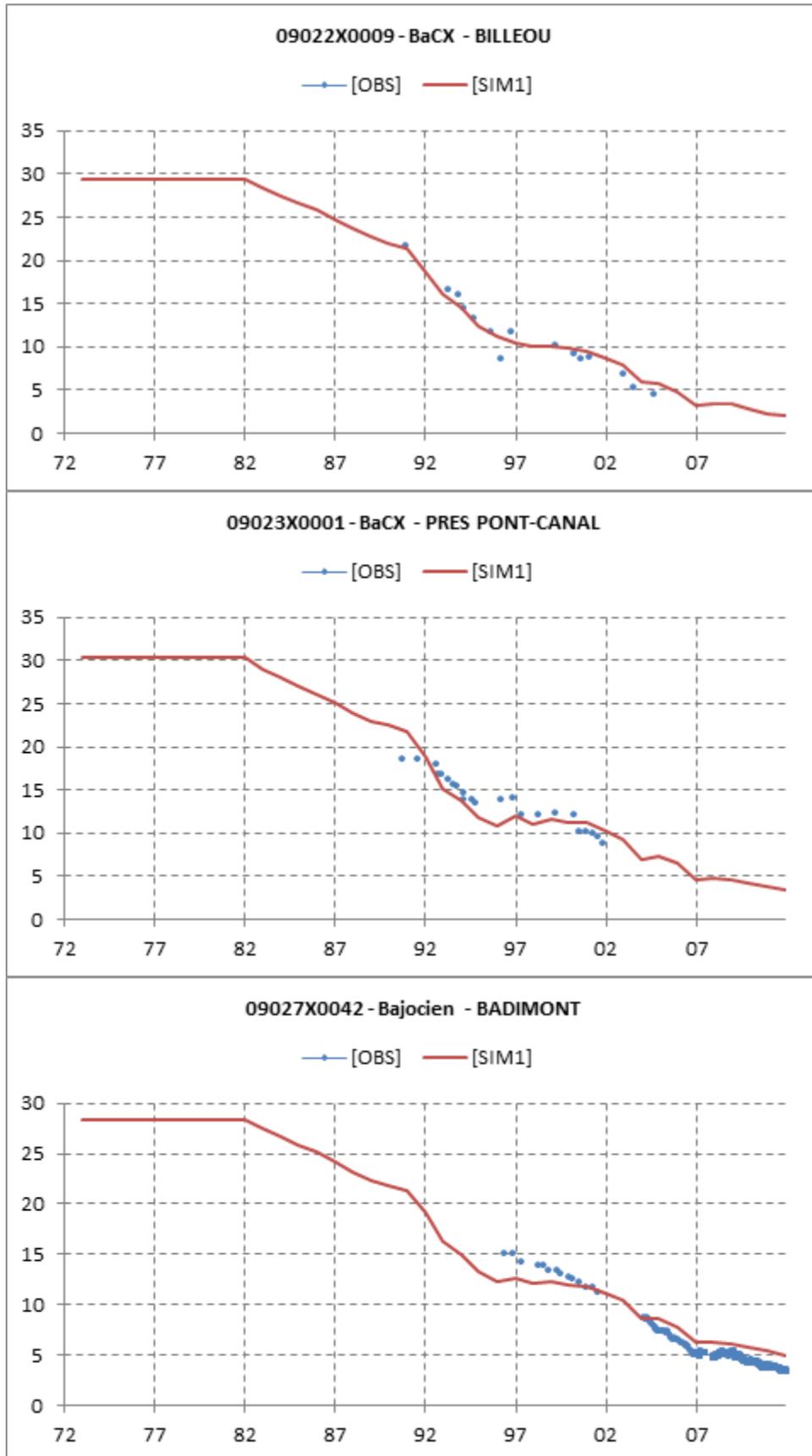






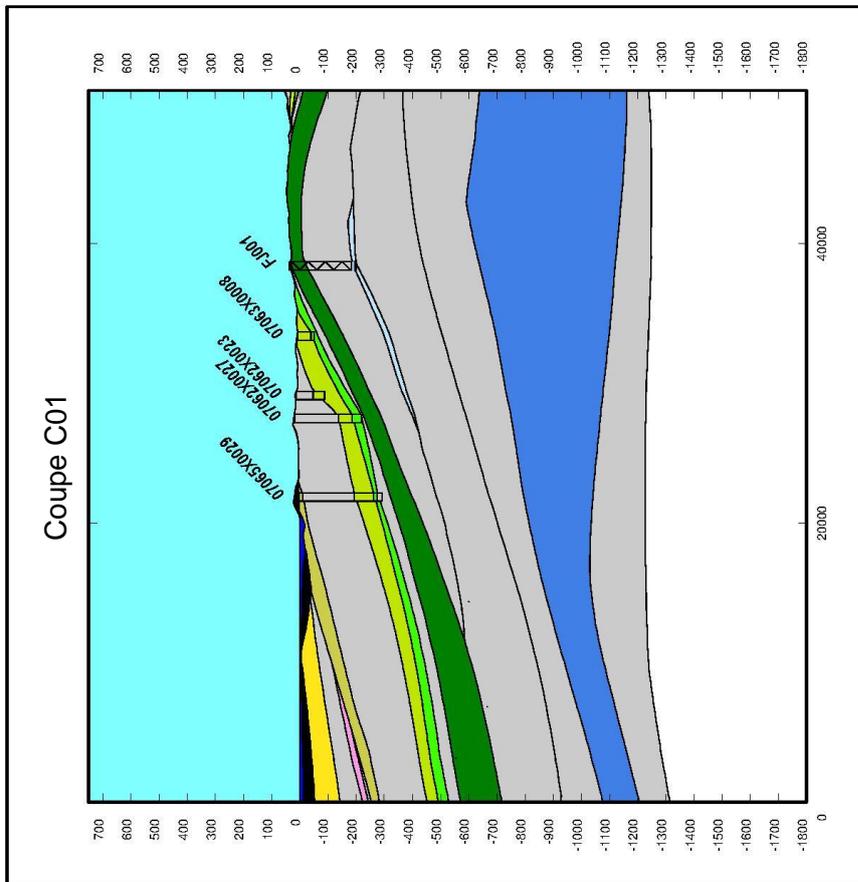


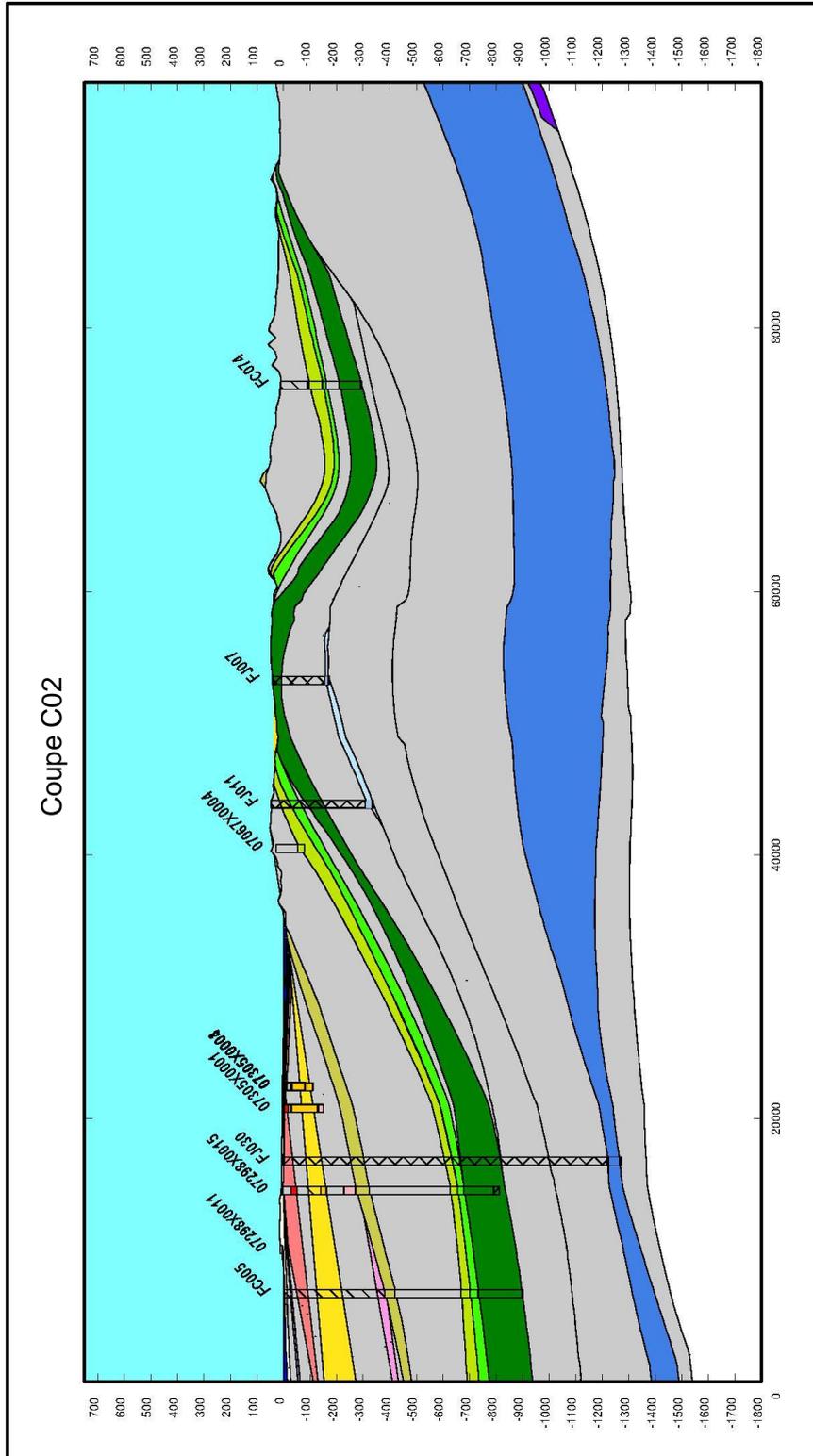


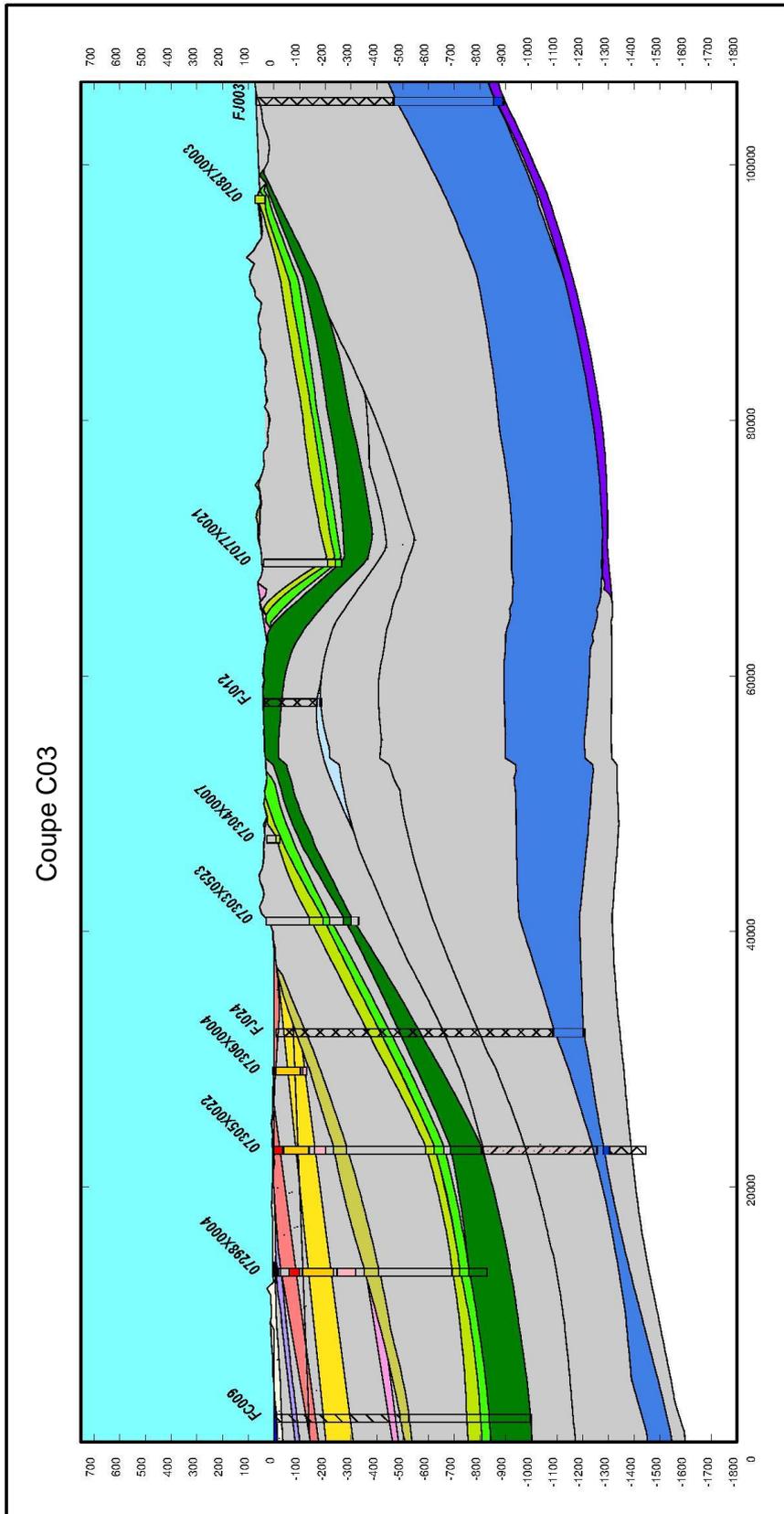


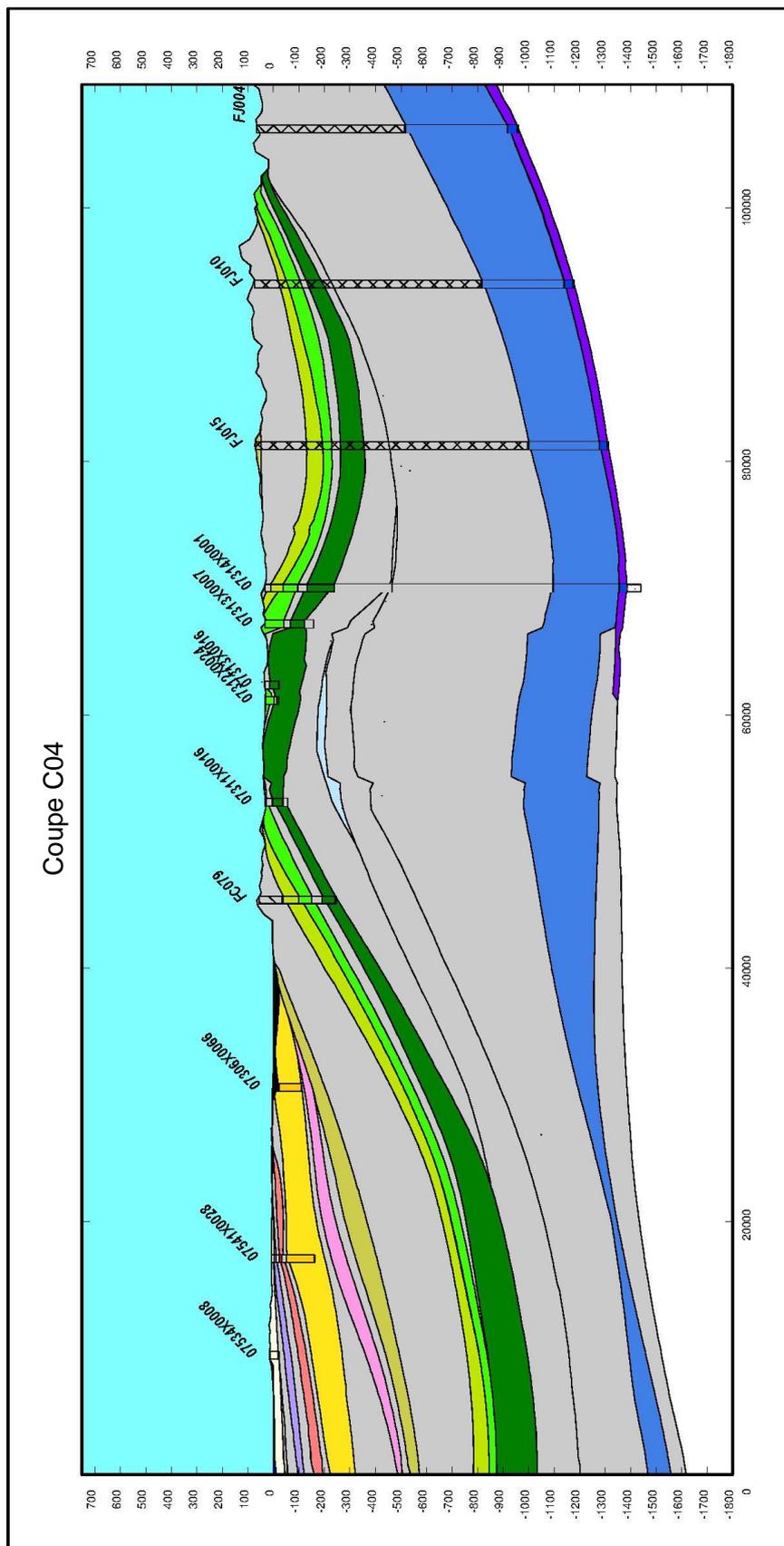
Annexe 3

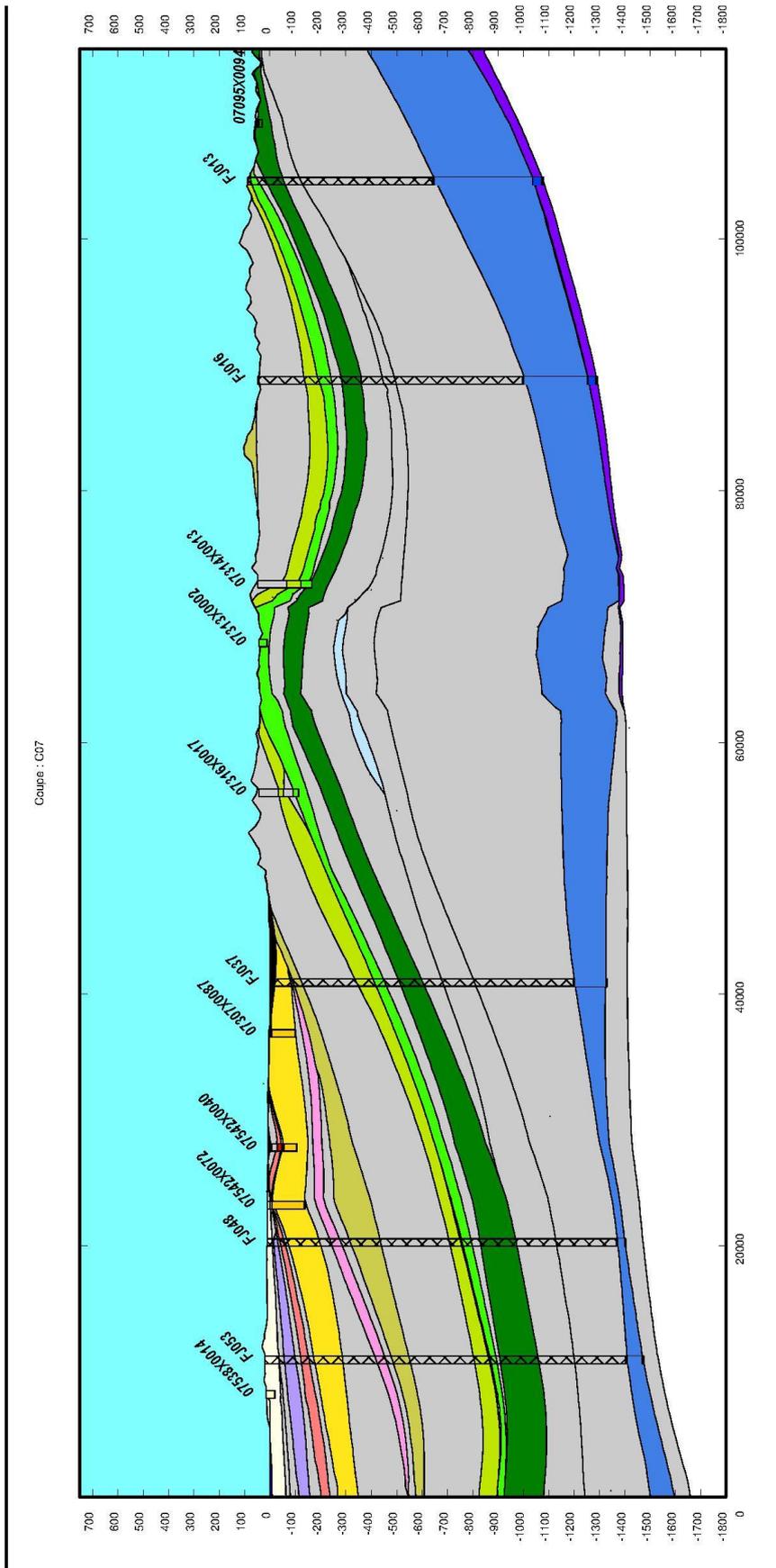
Coupes réalisées dans le modèle géologique

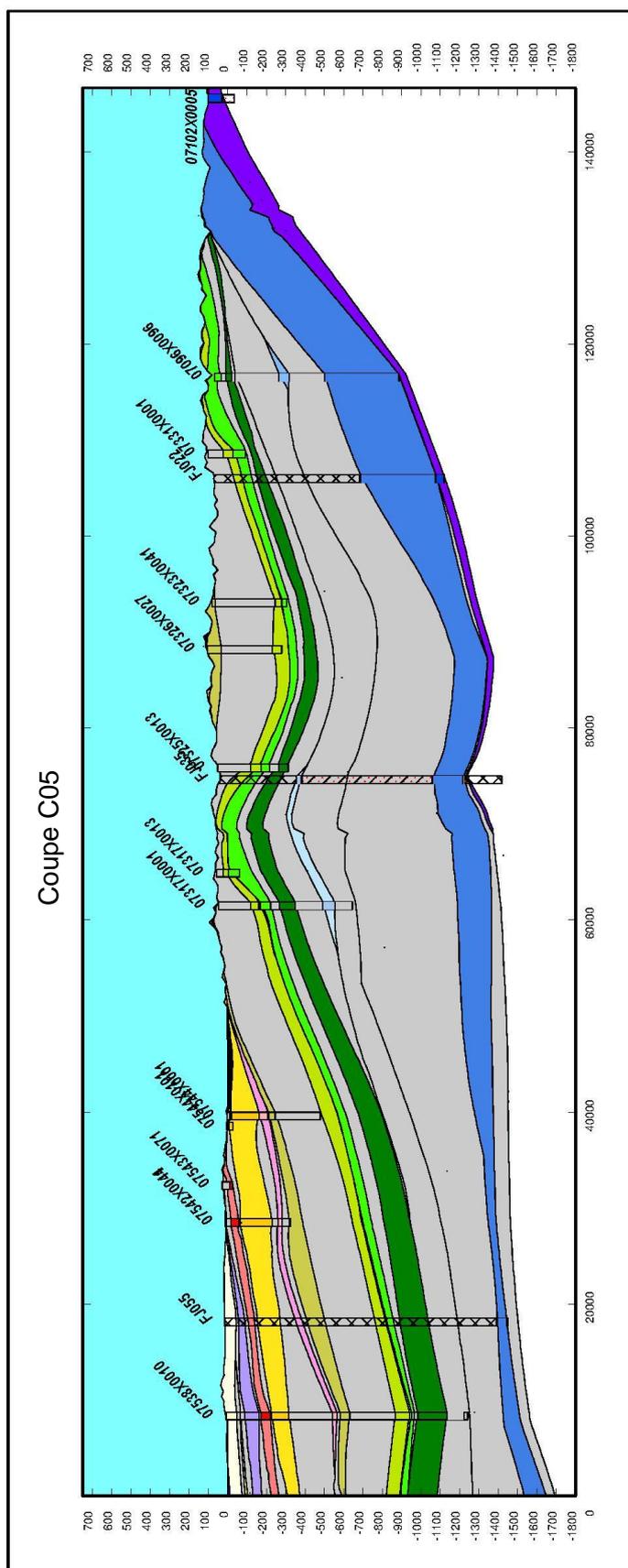


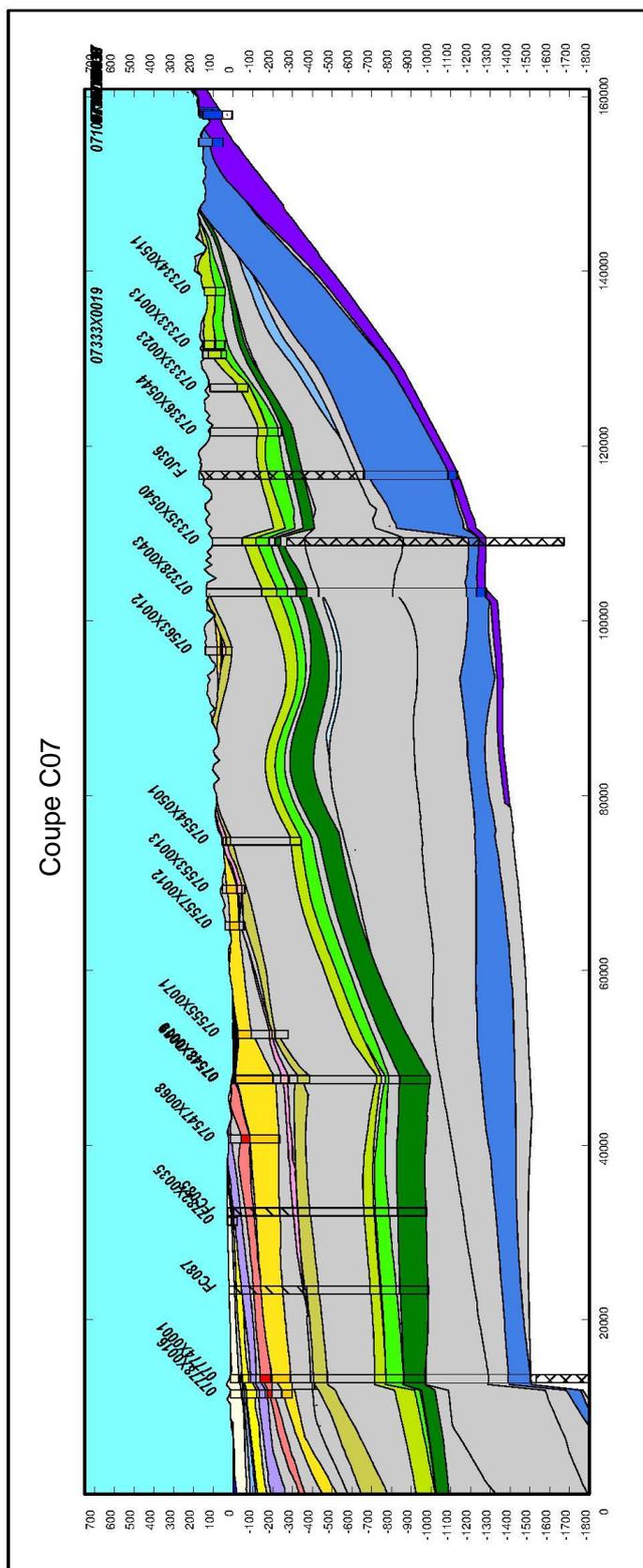


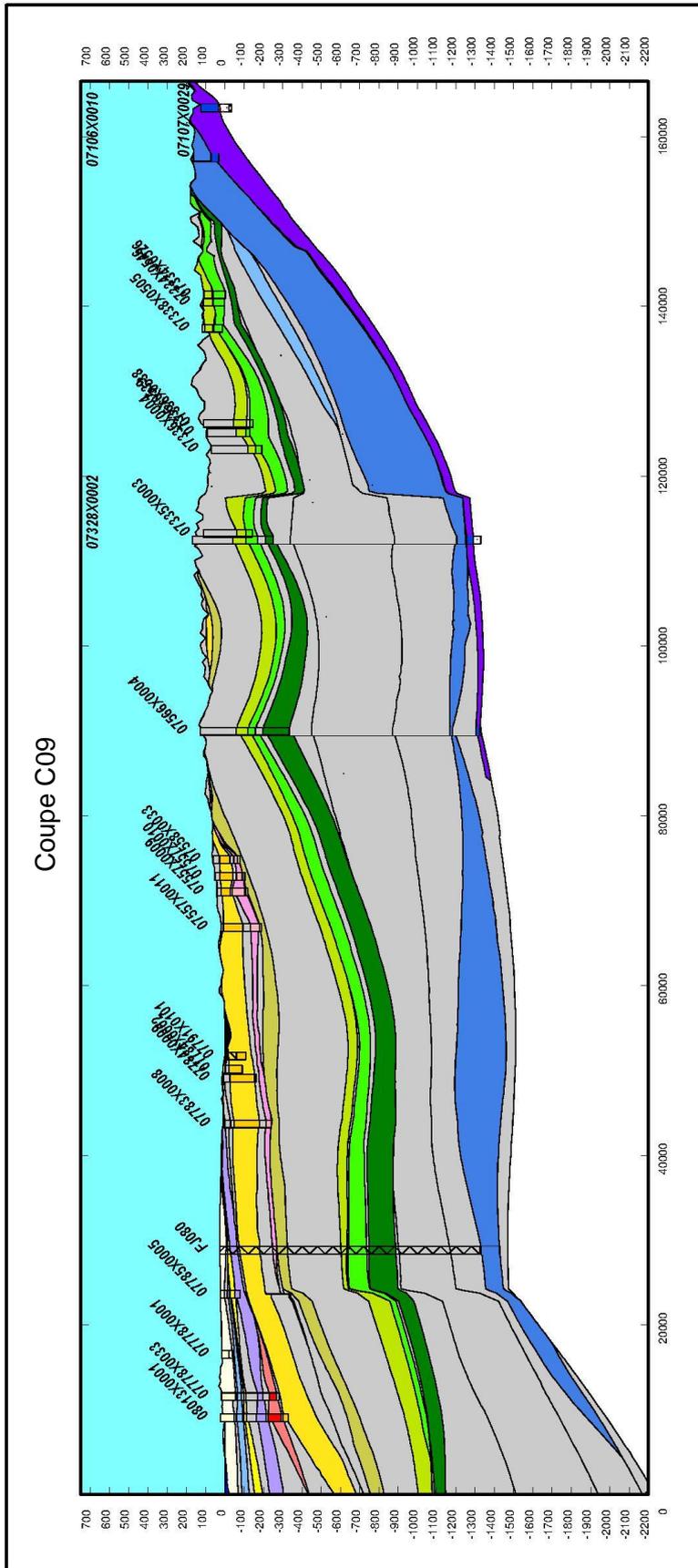


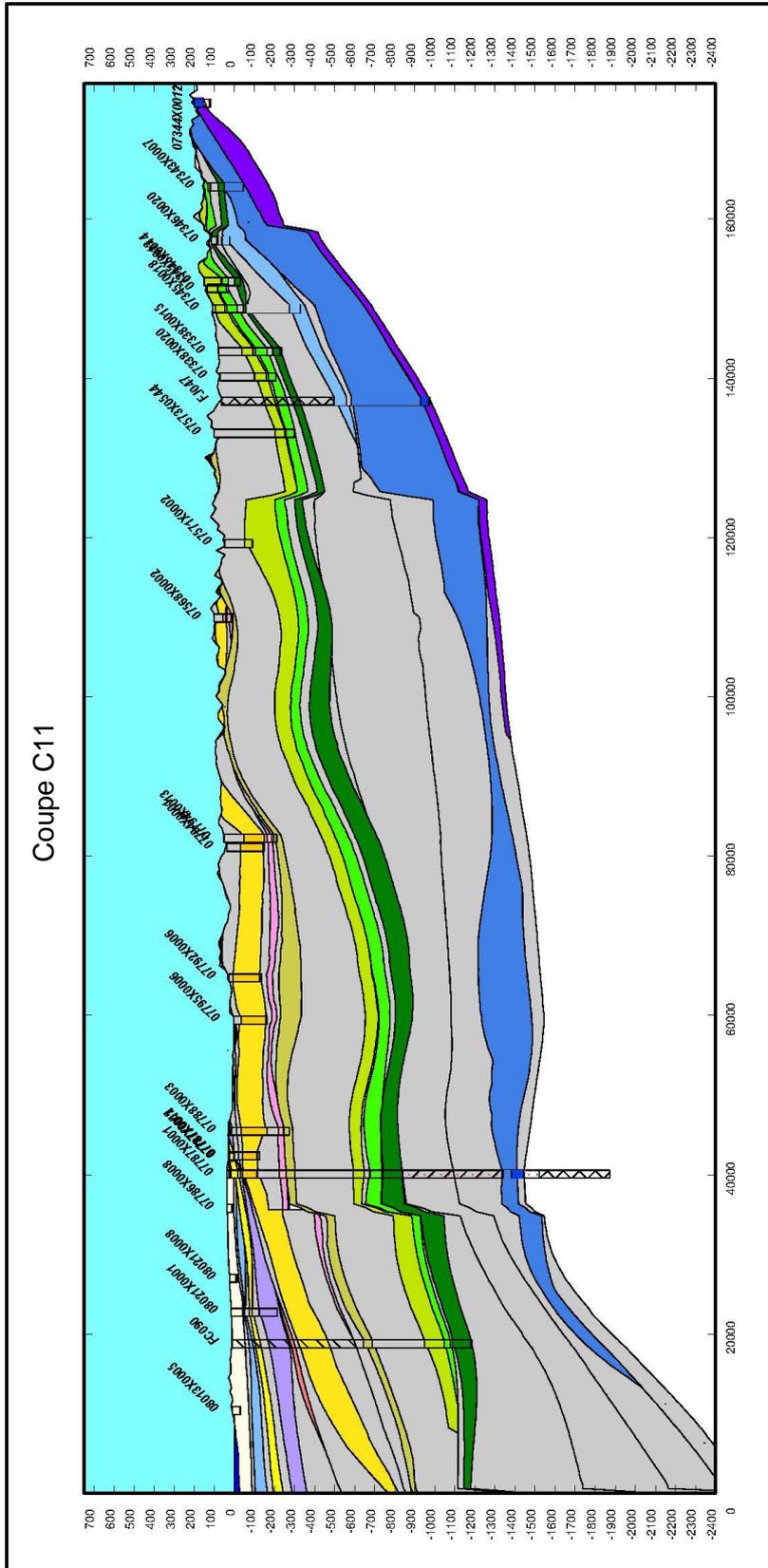


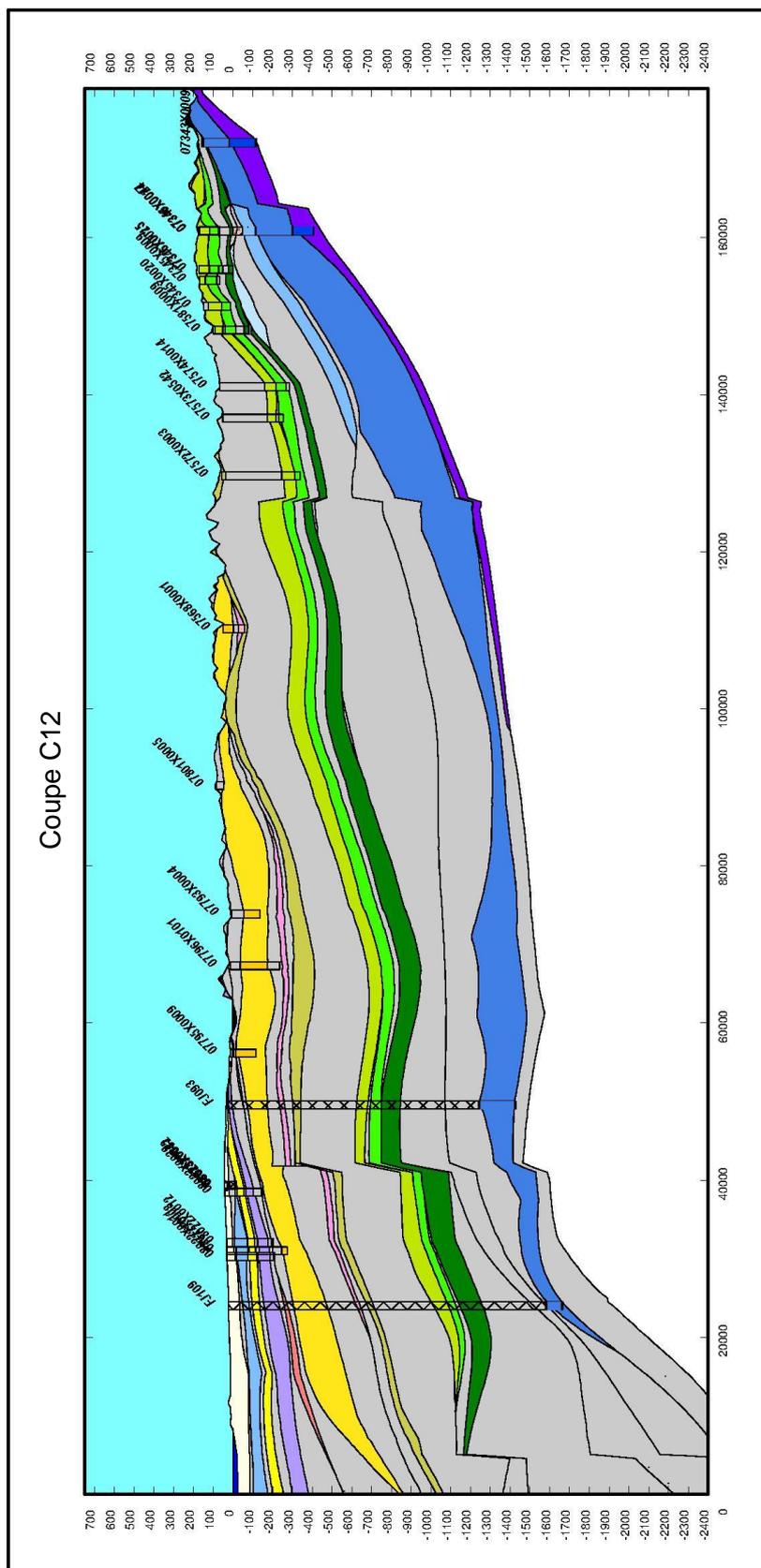


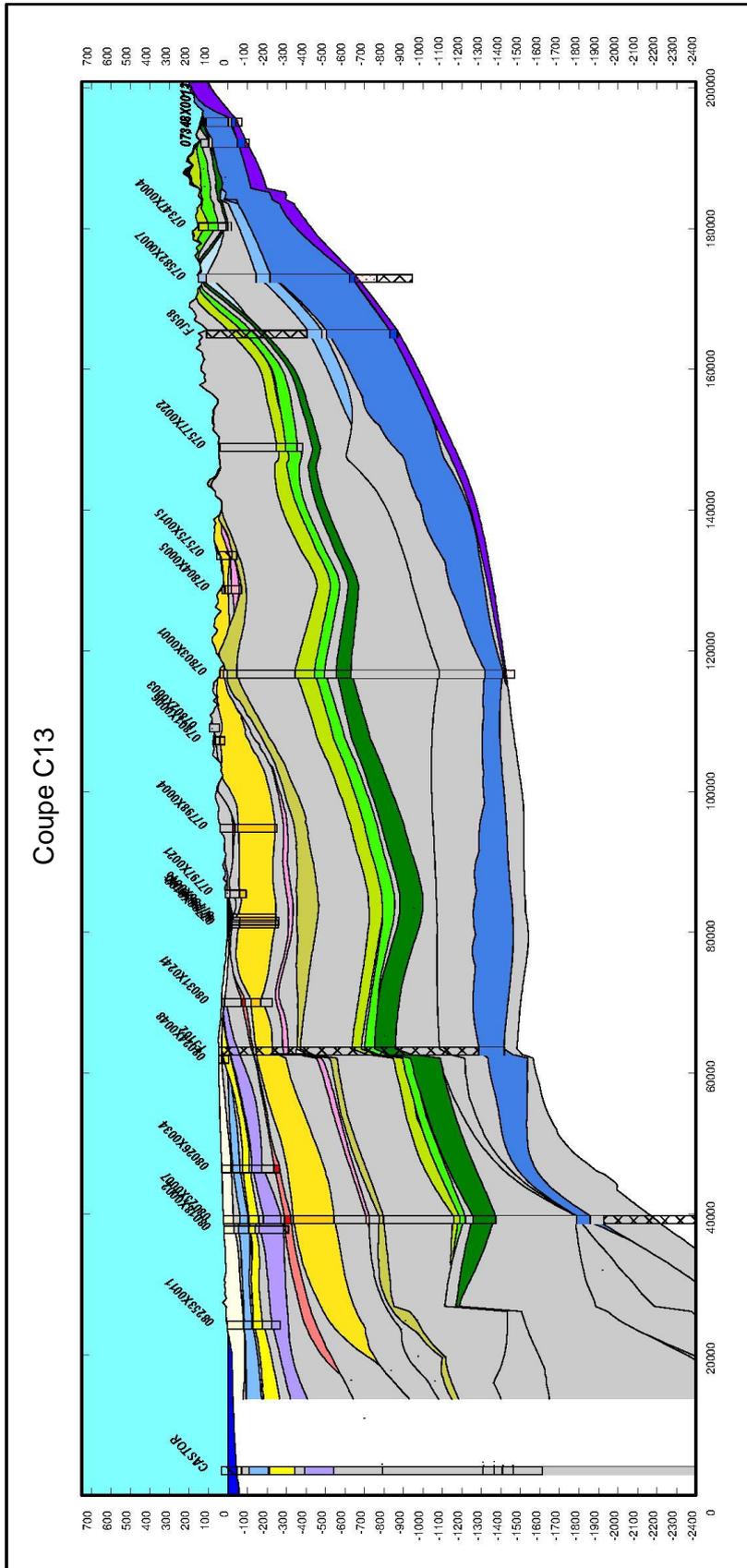


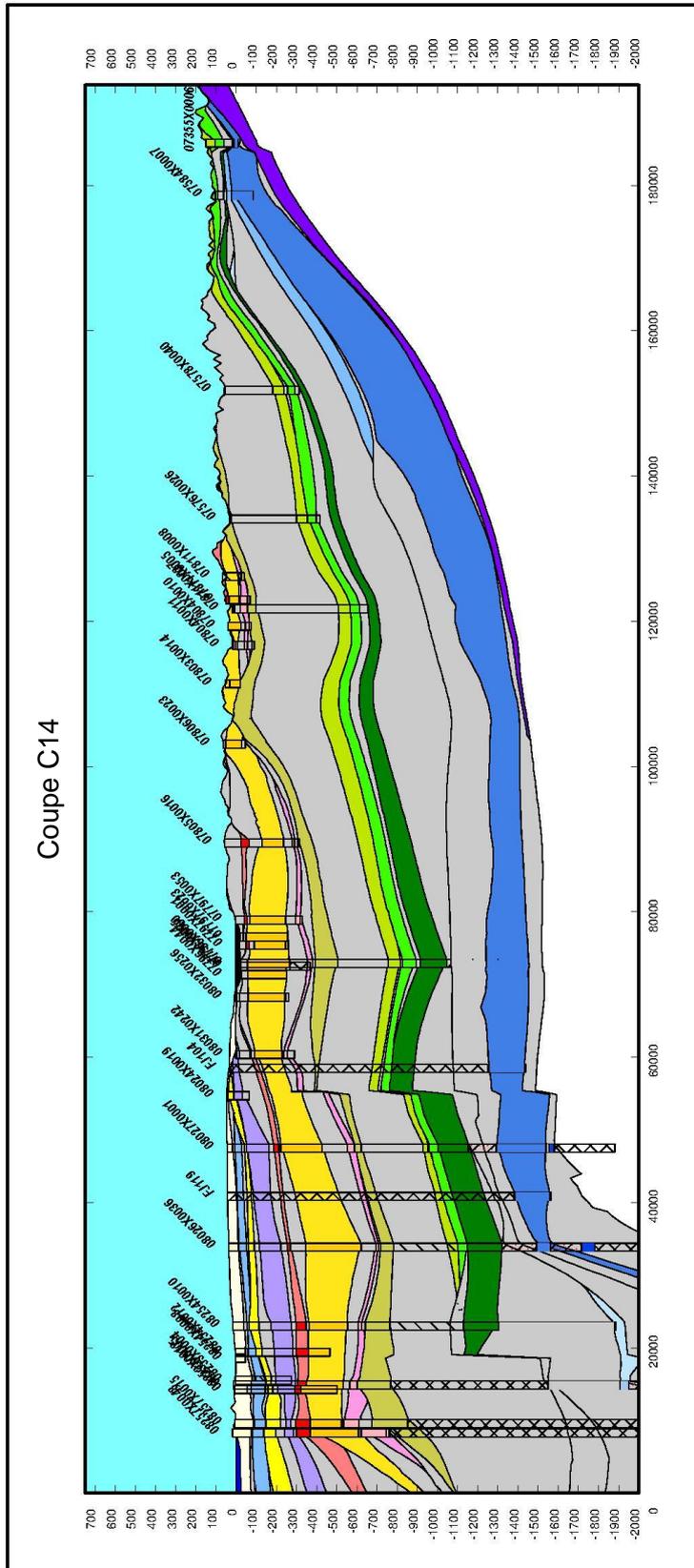


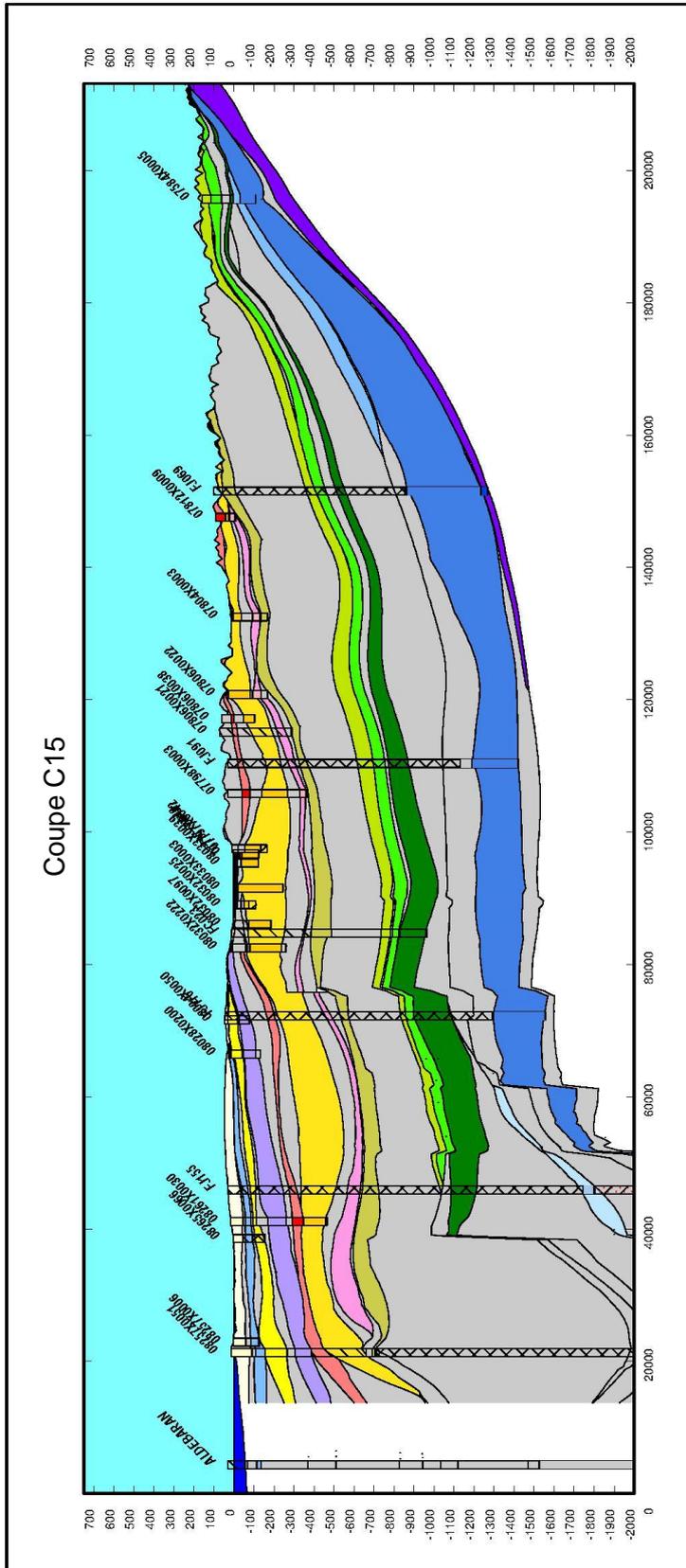


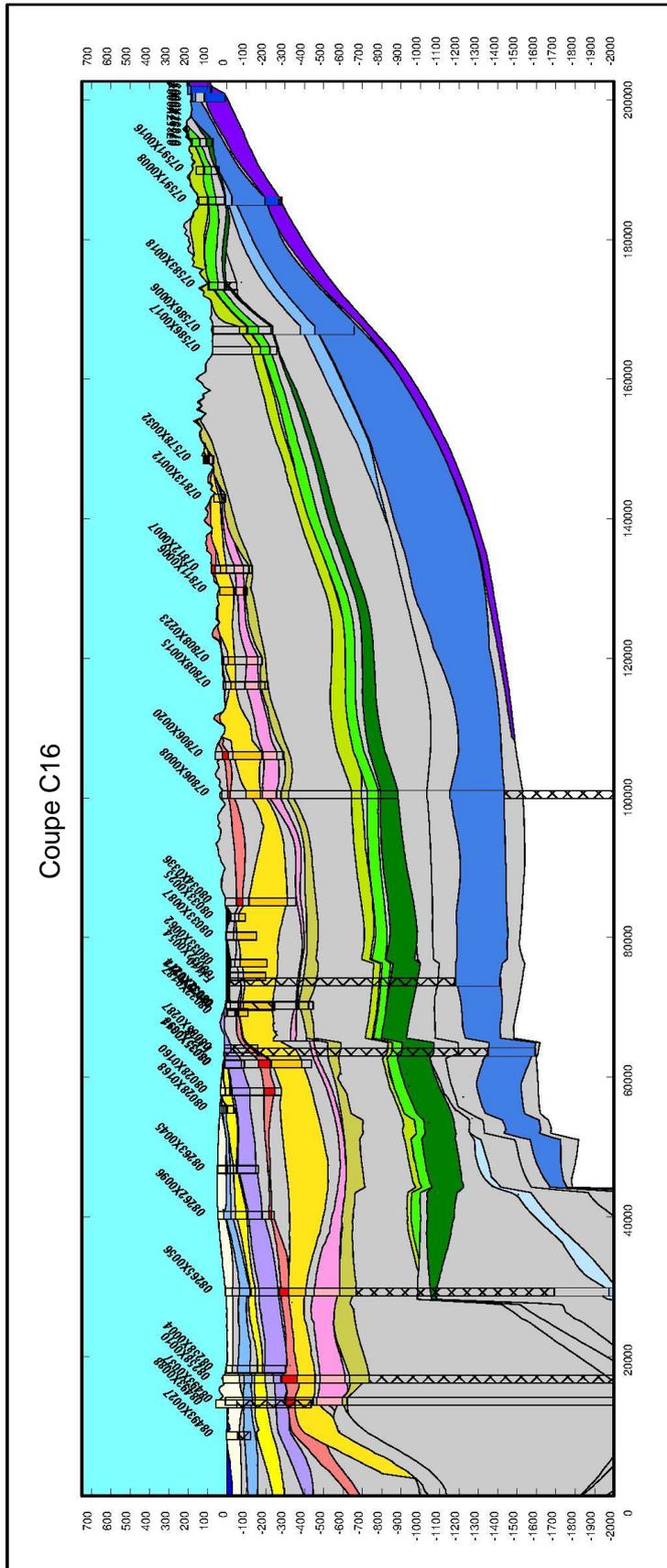


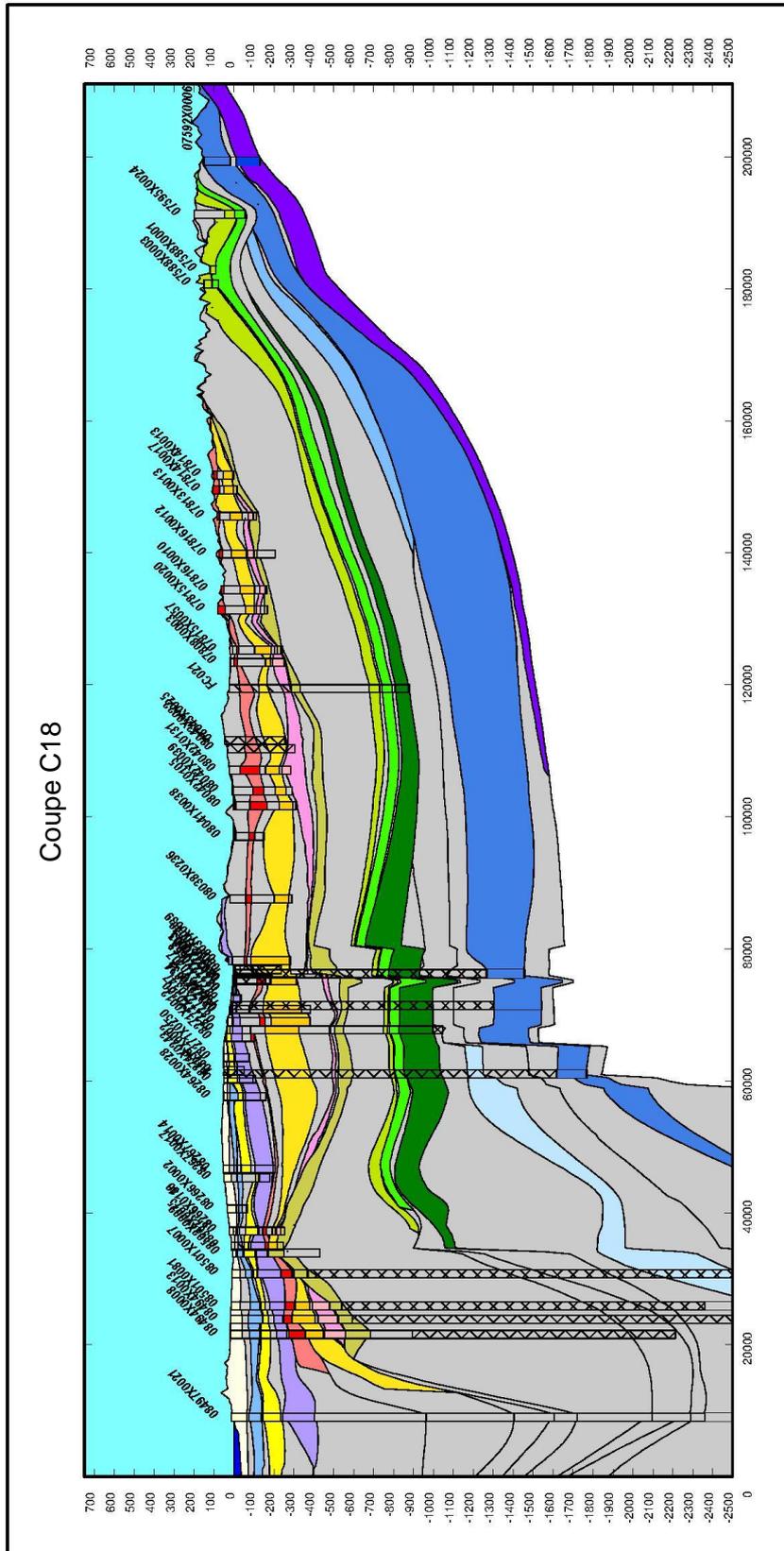


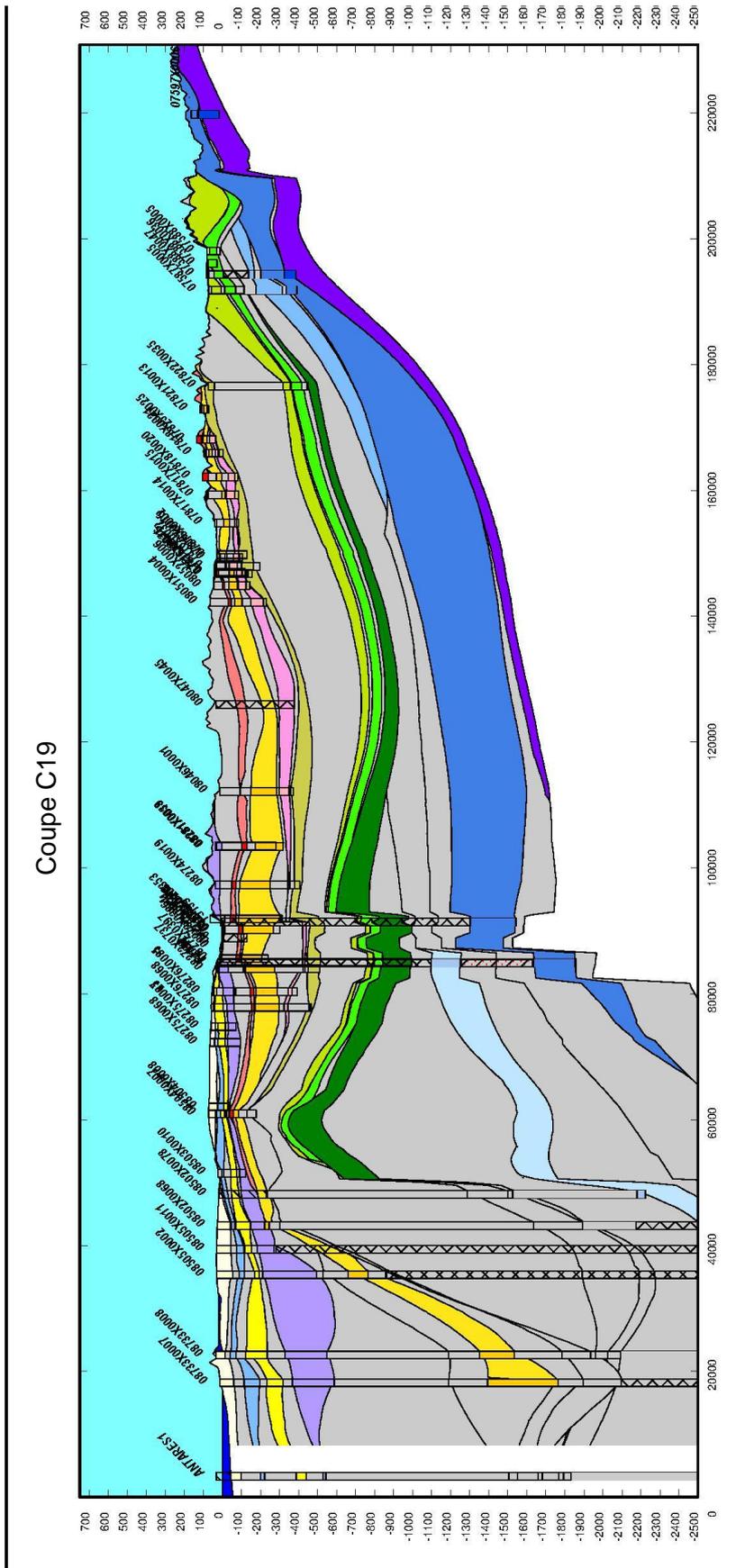


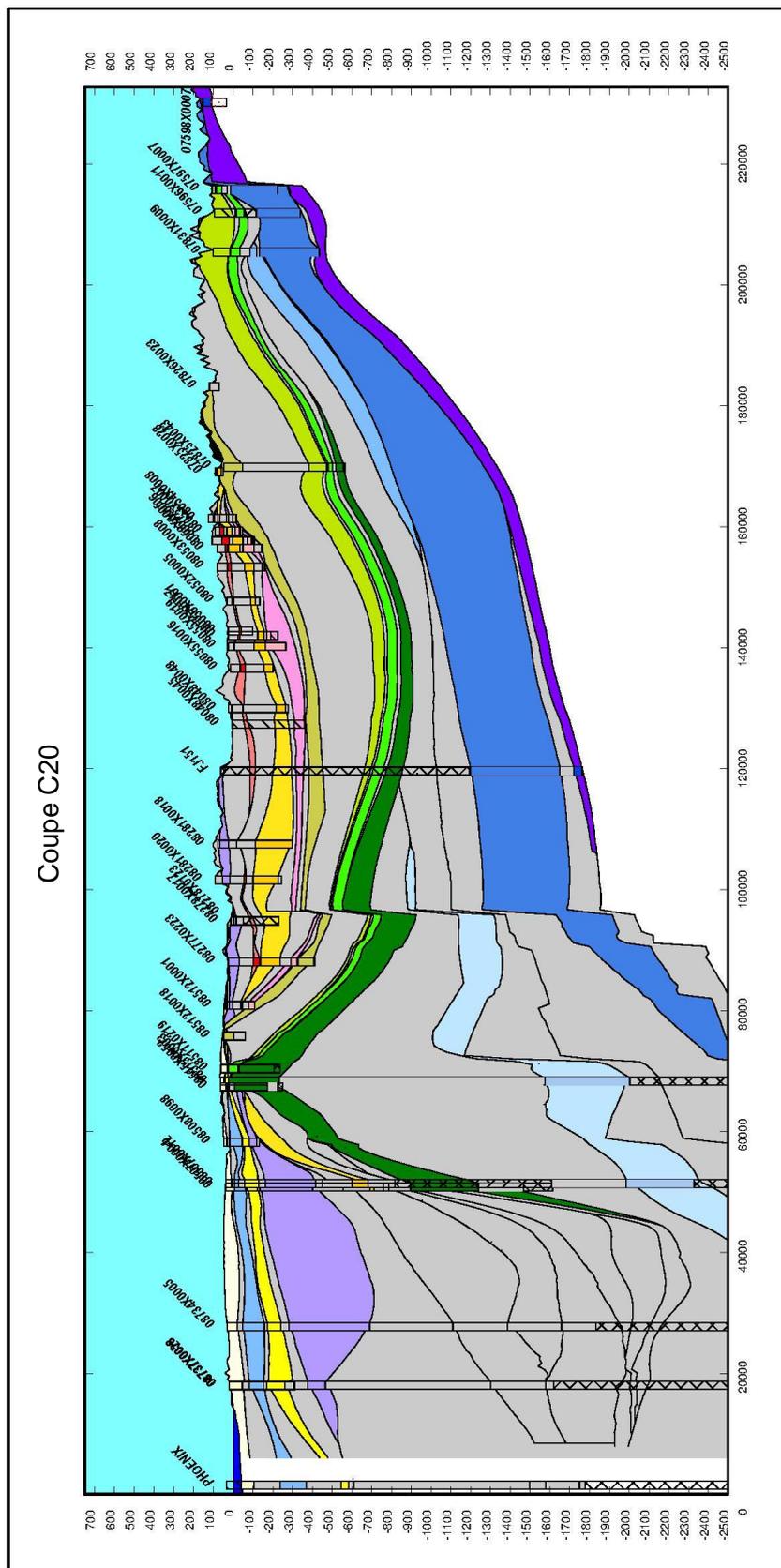


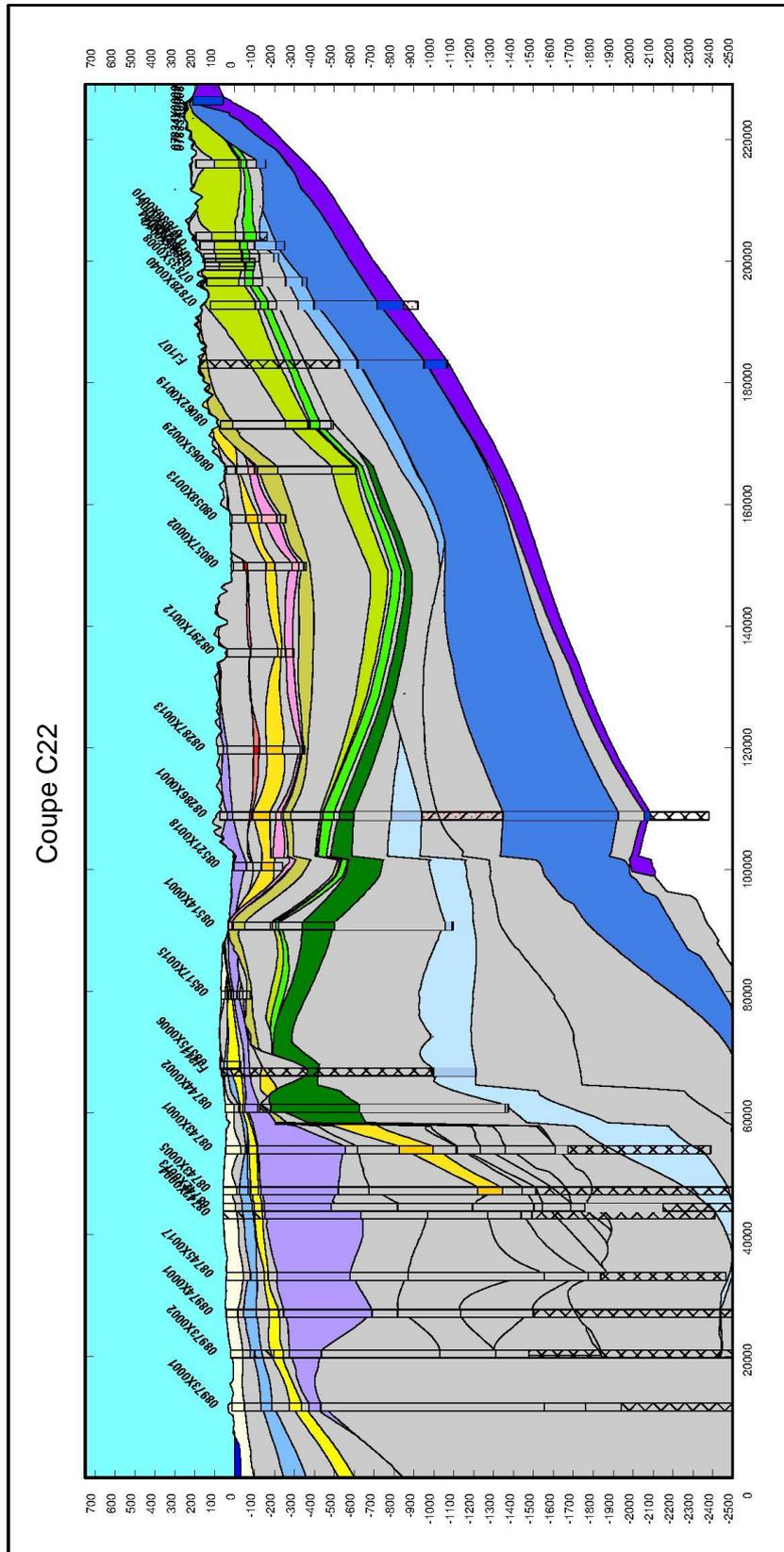


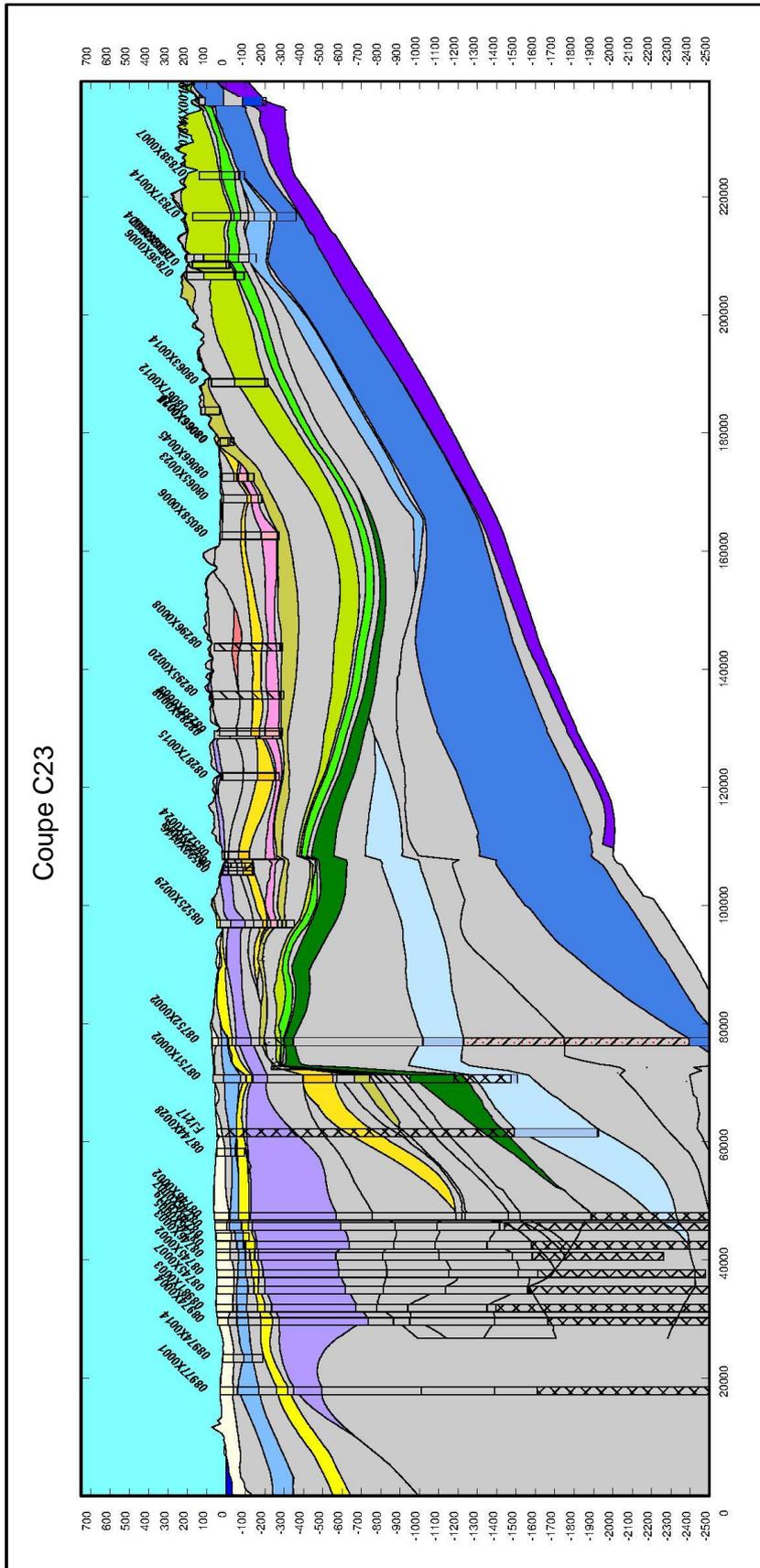


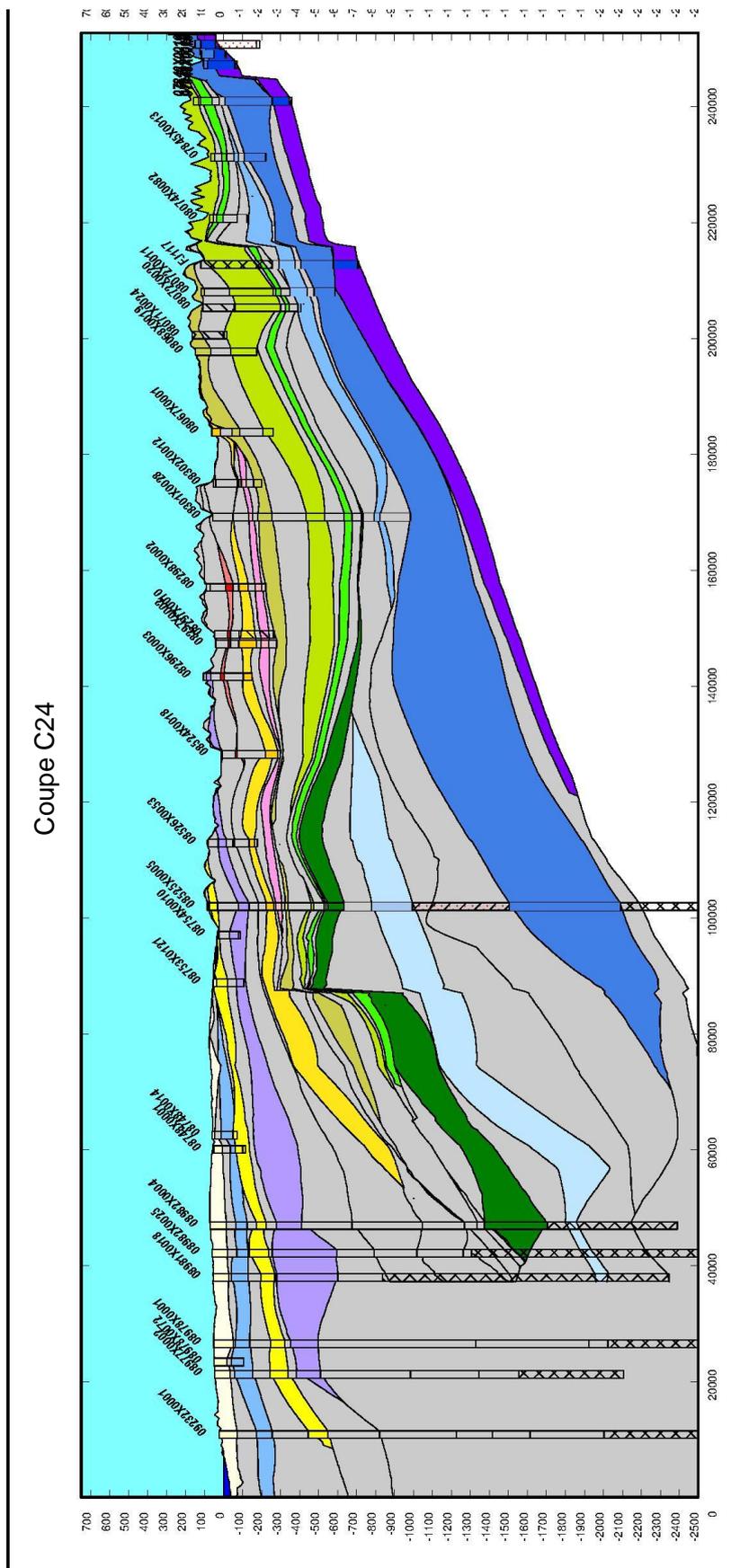


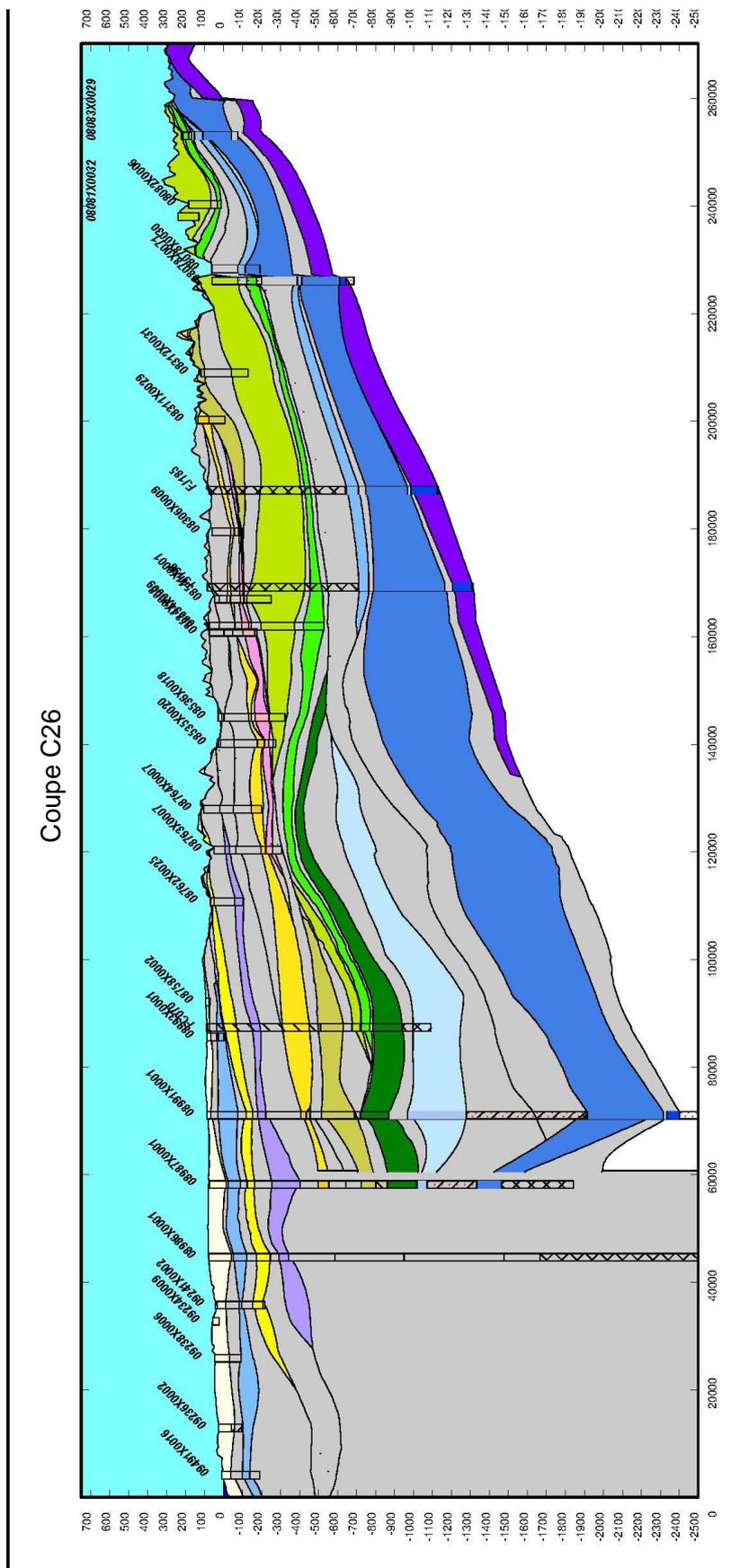


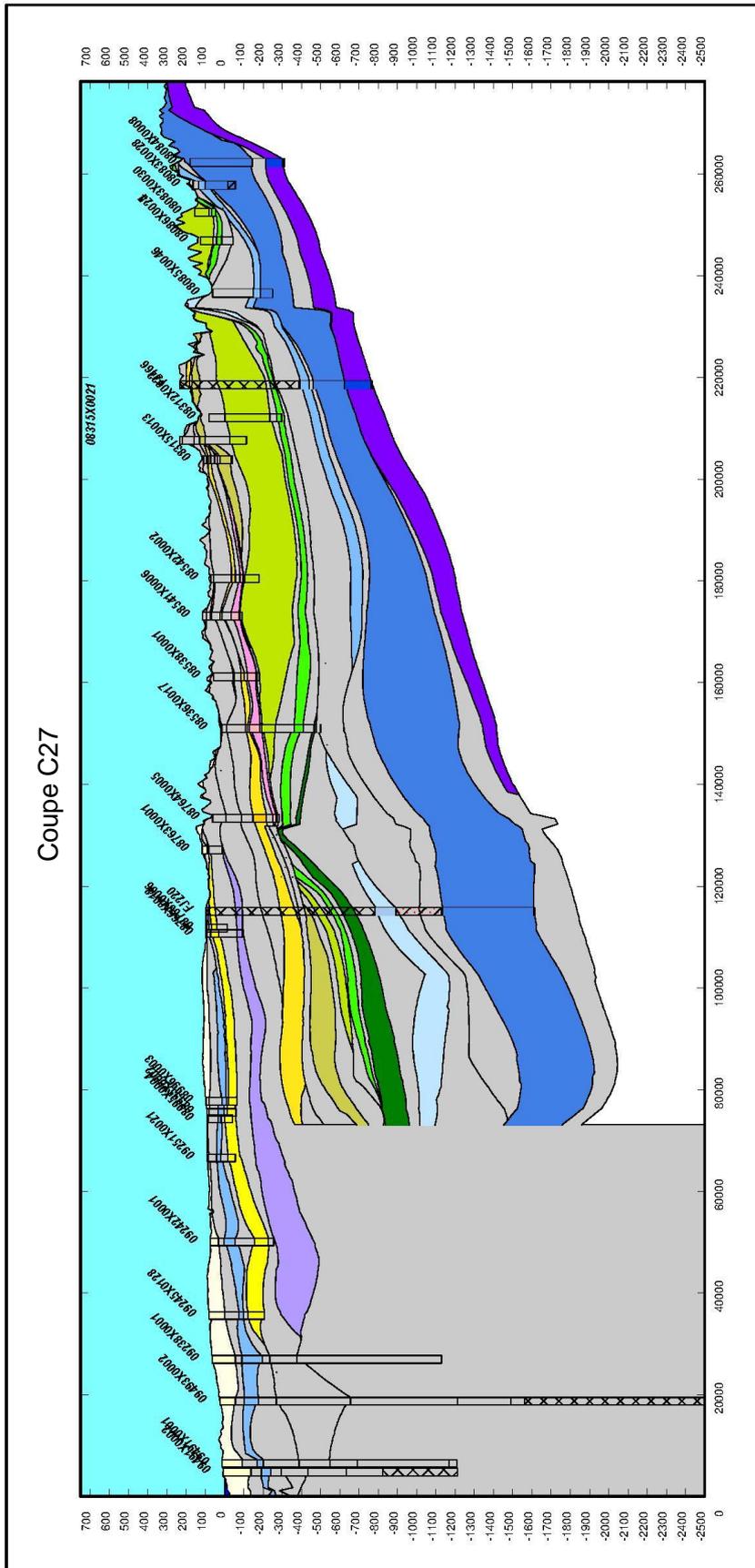


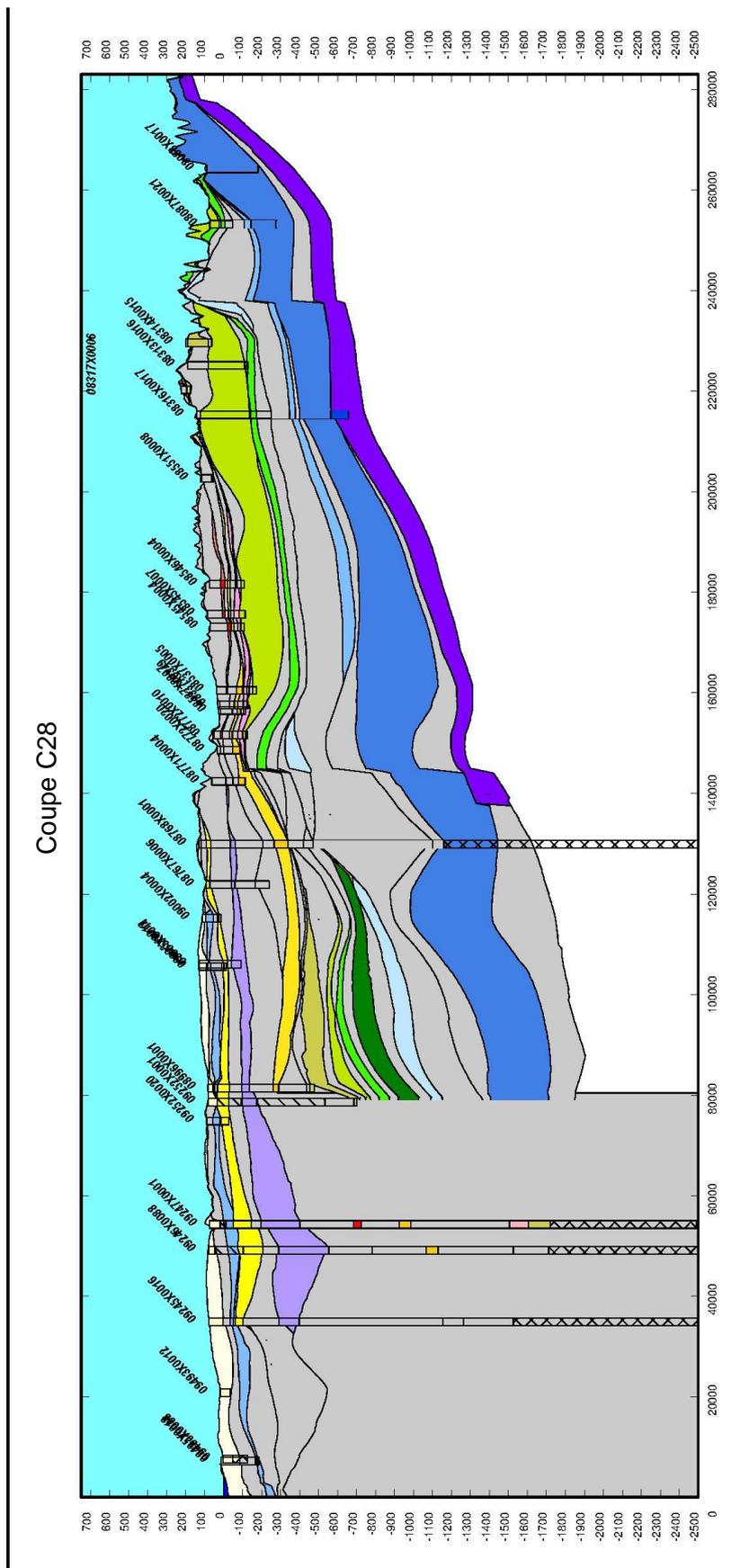


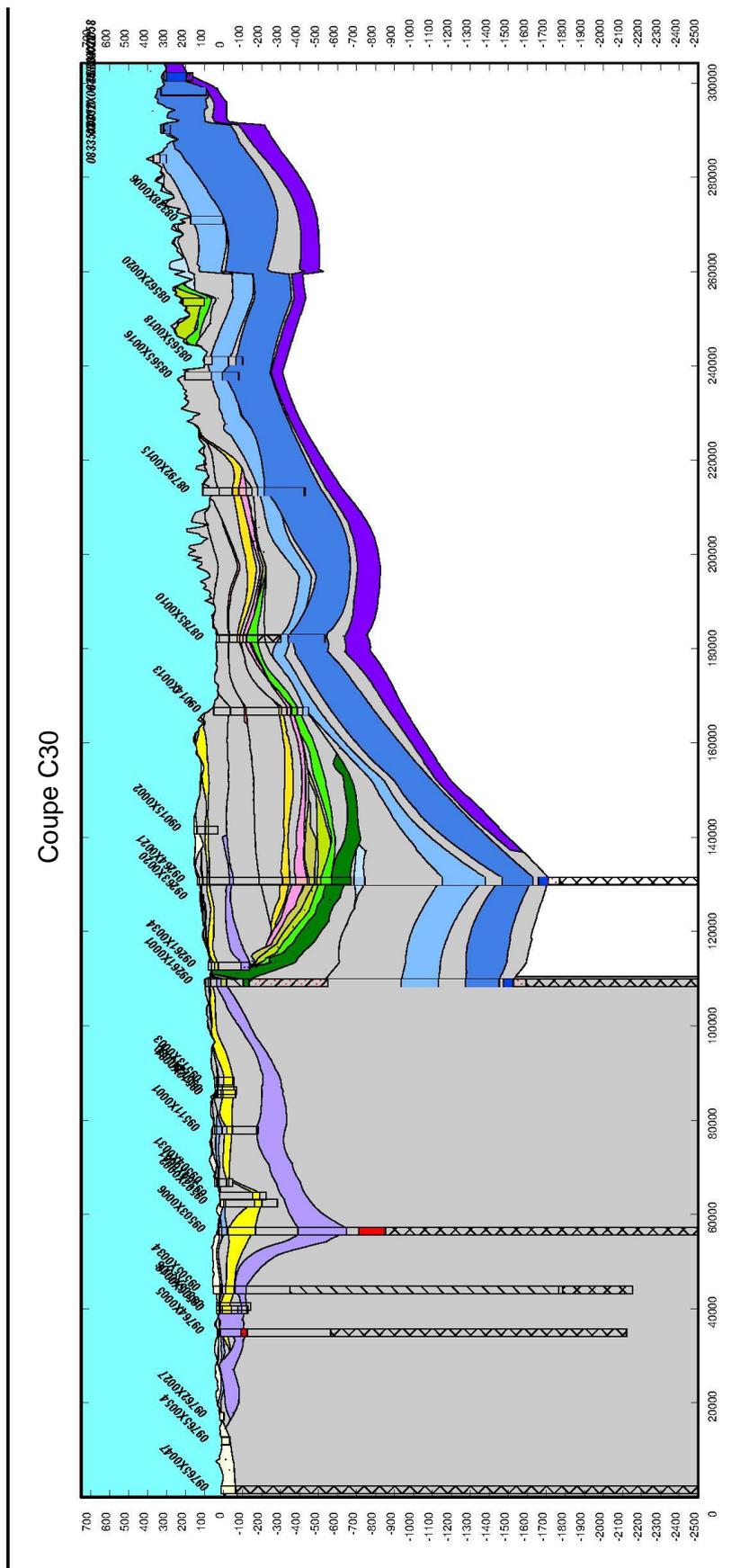


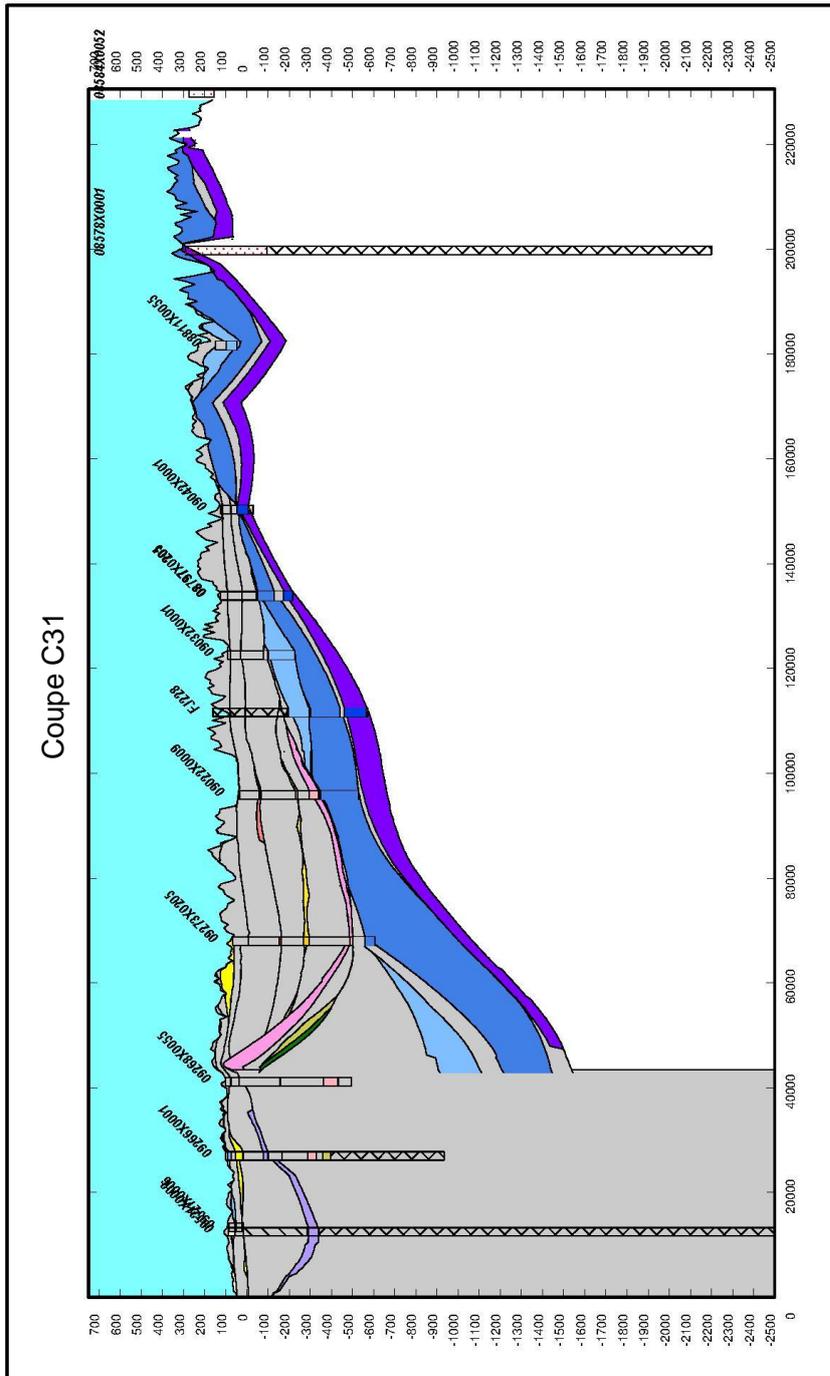


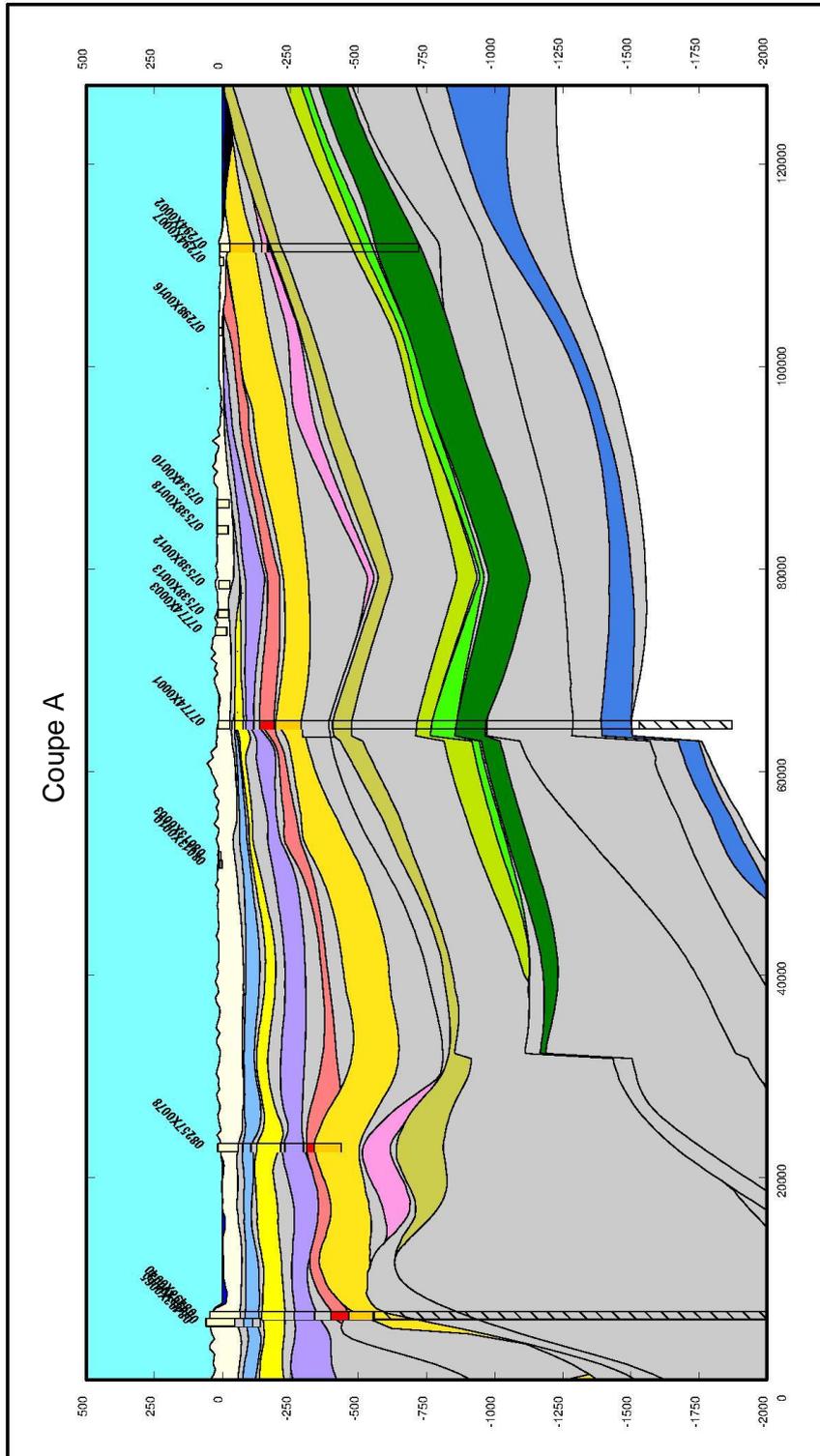


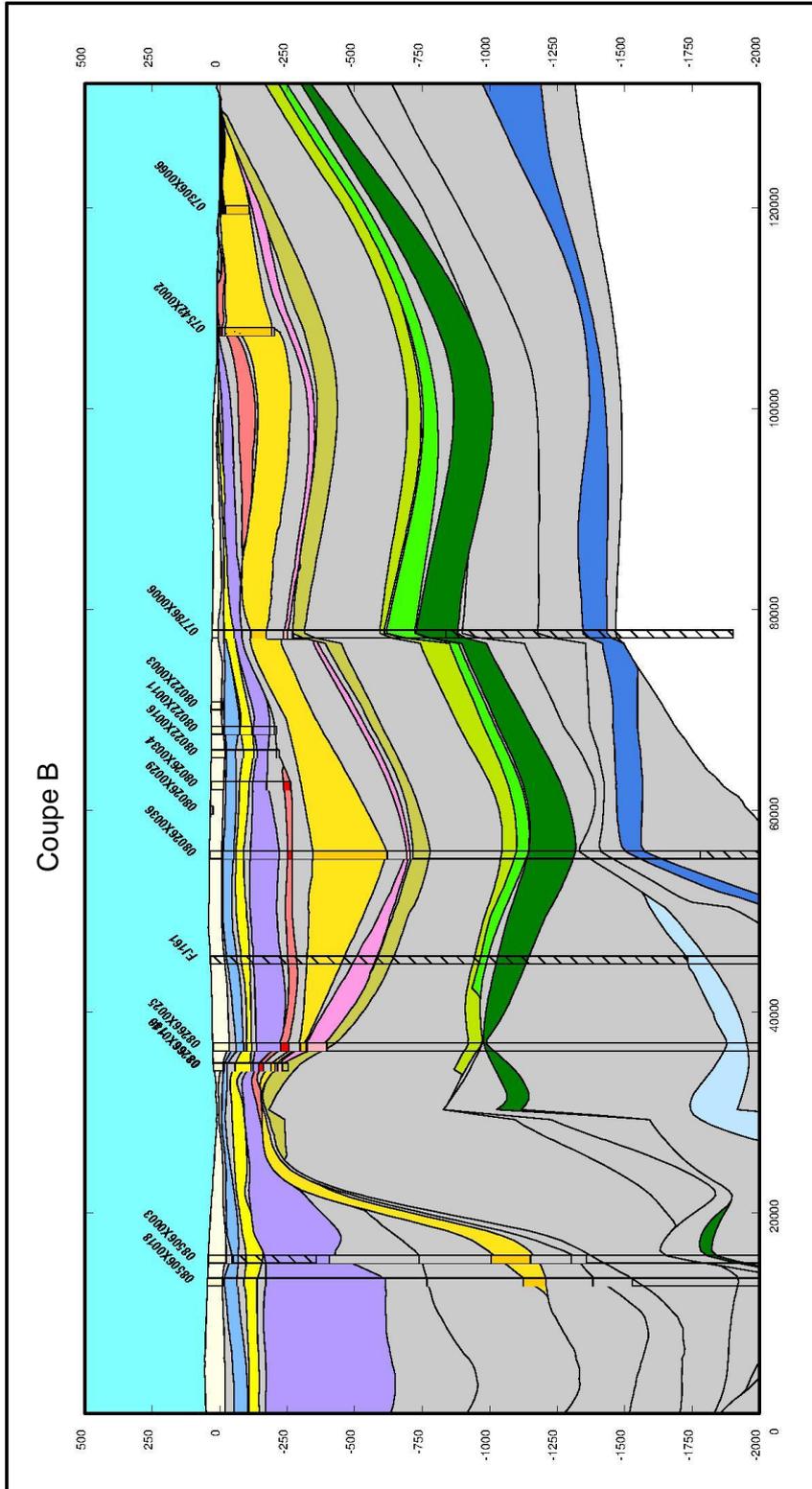


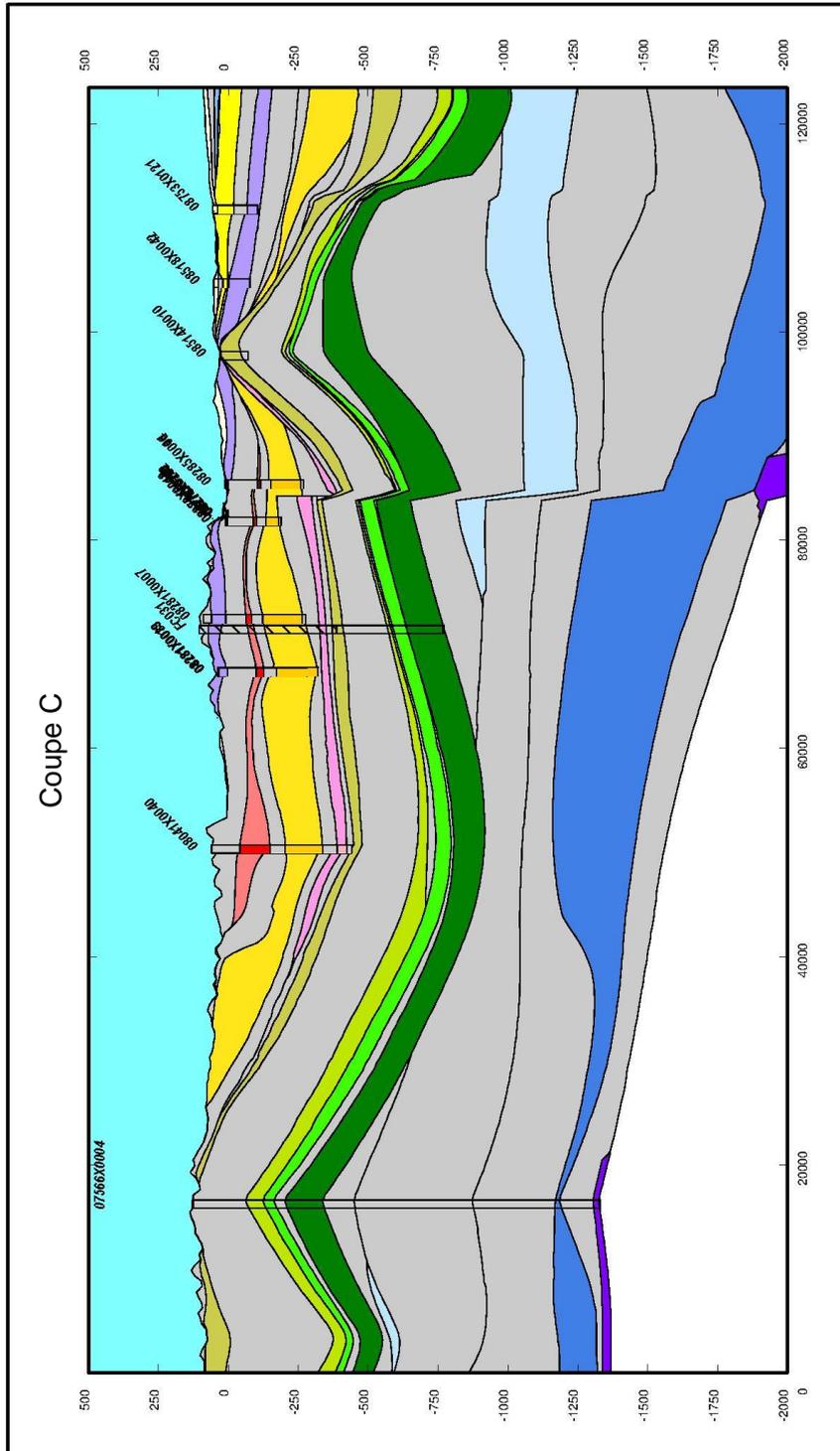


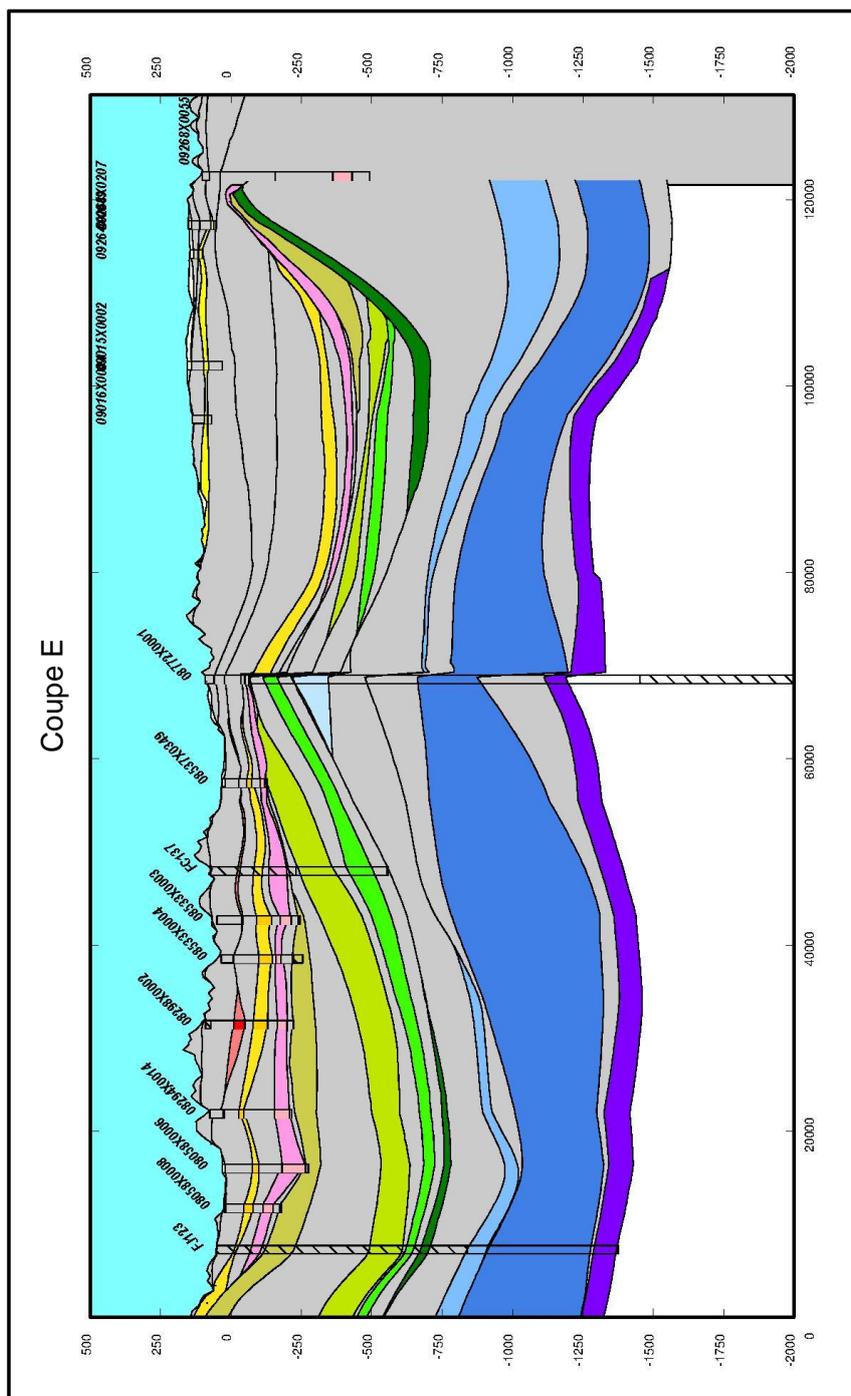






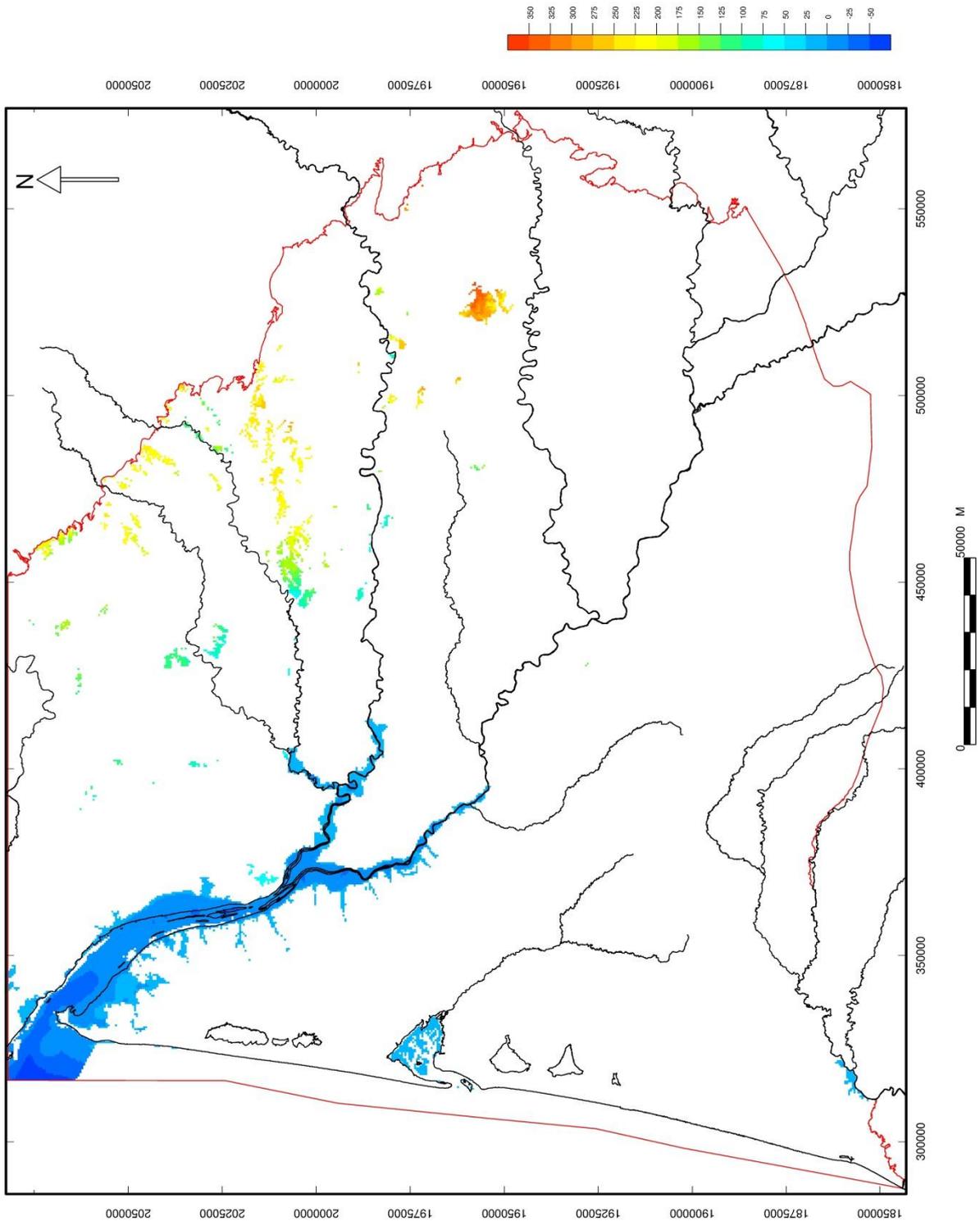




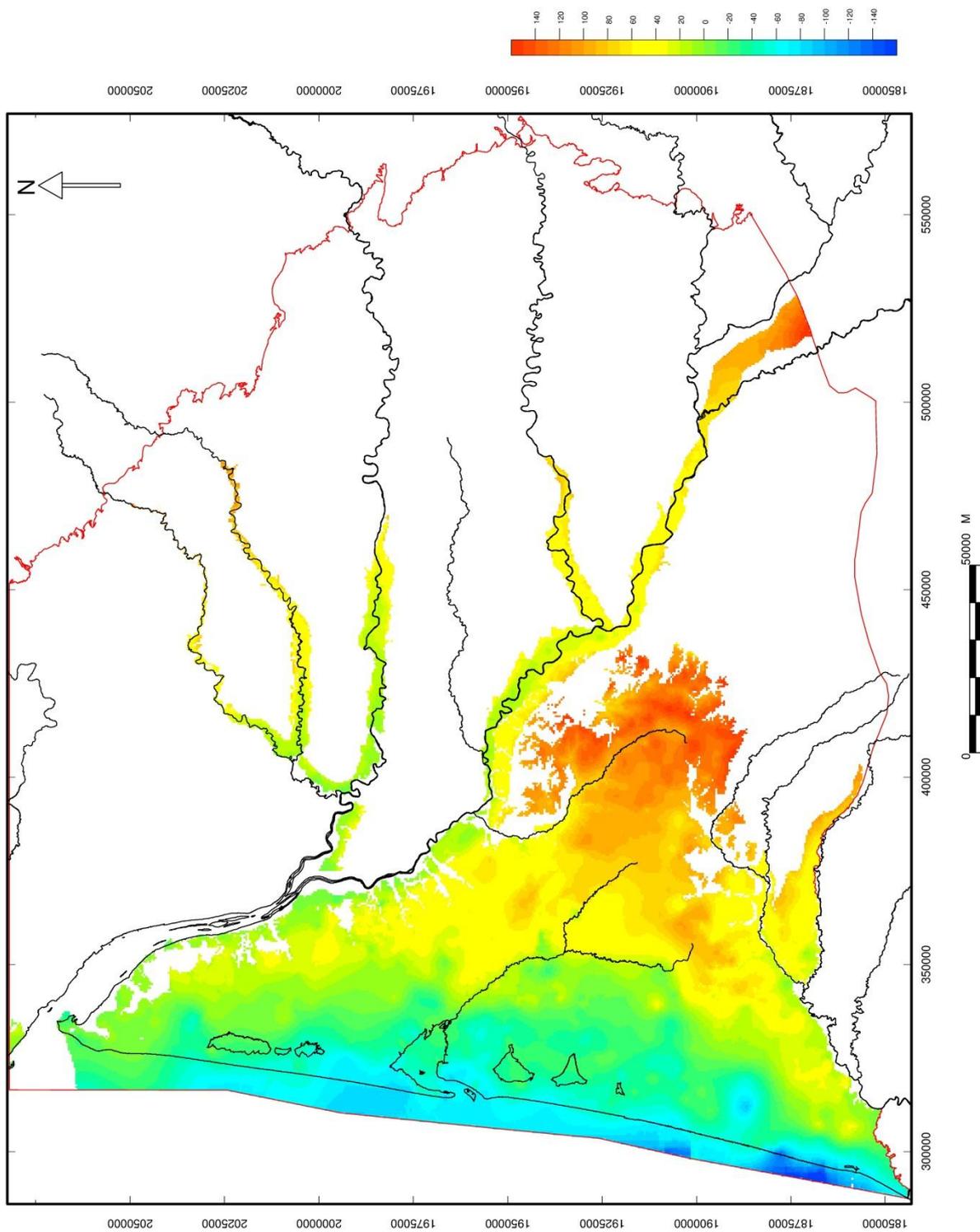


Annexe 4

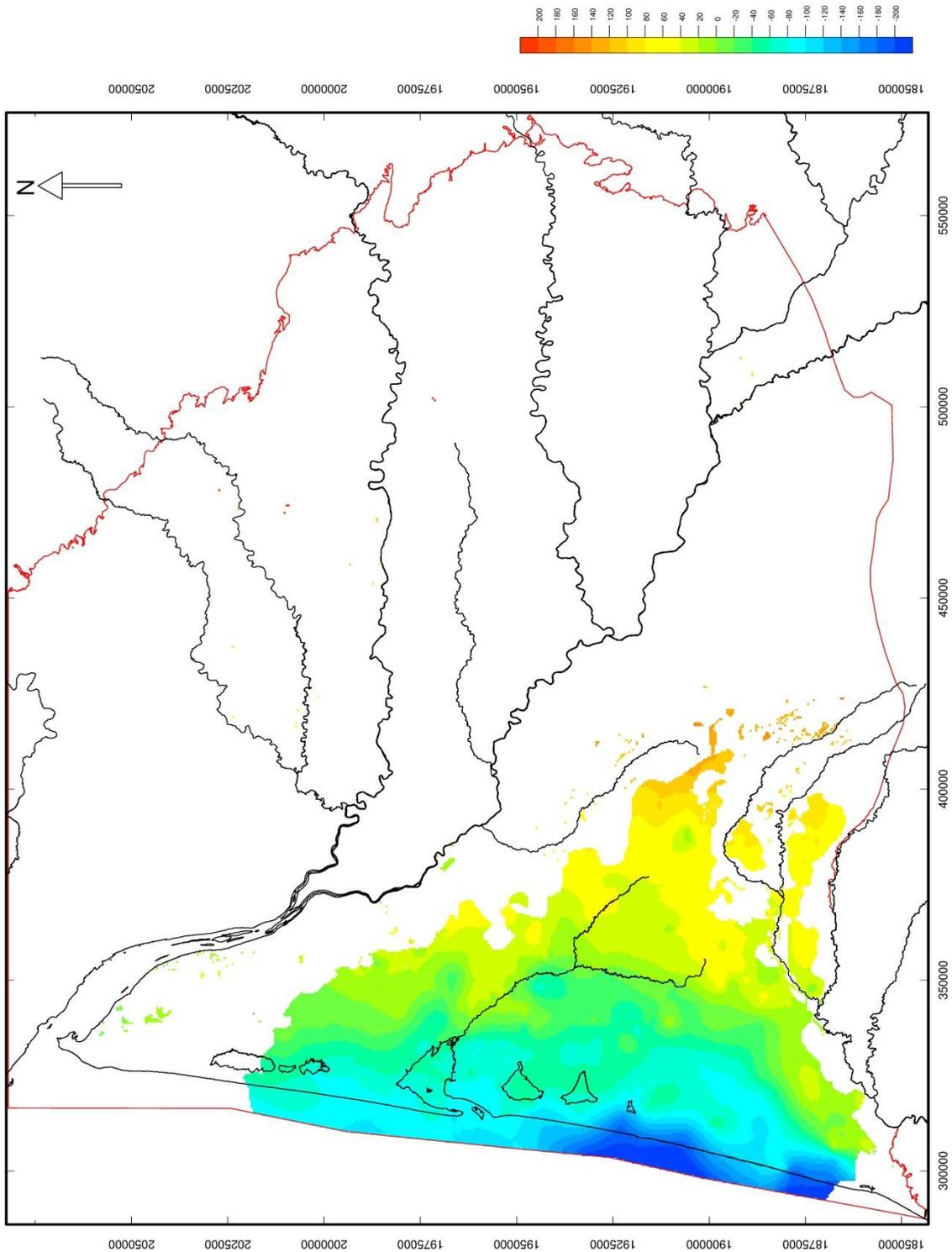
Cartes des isobathes des murs et des toits du modèle géologique



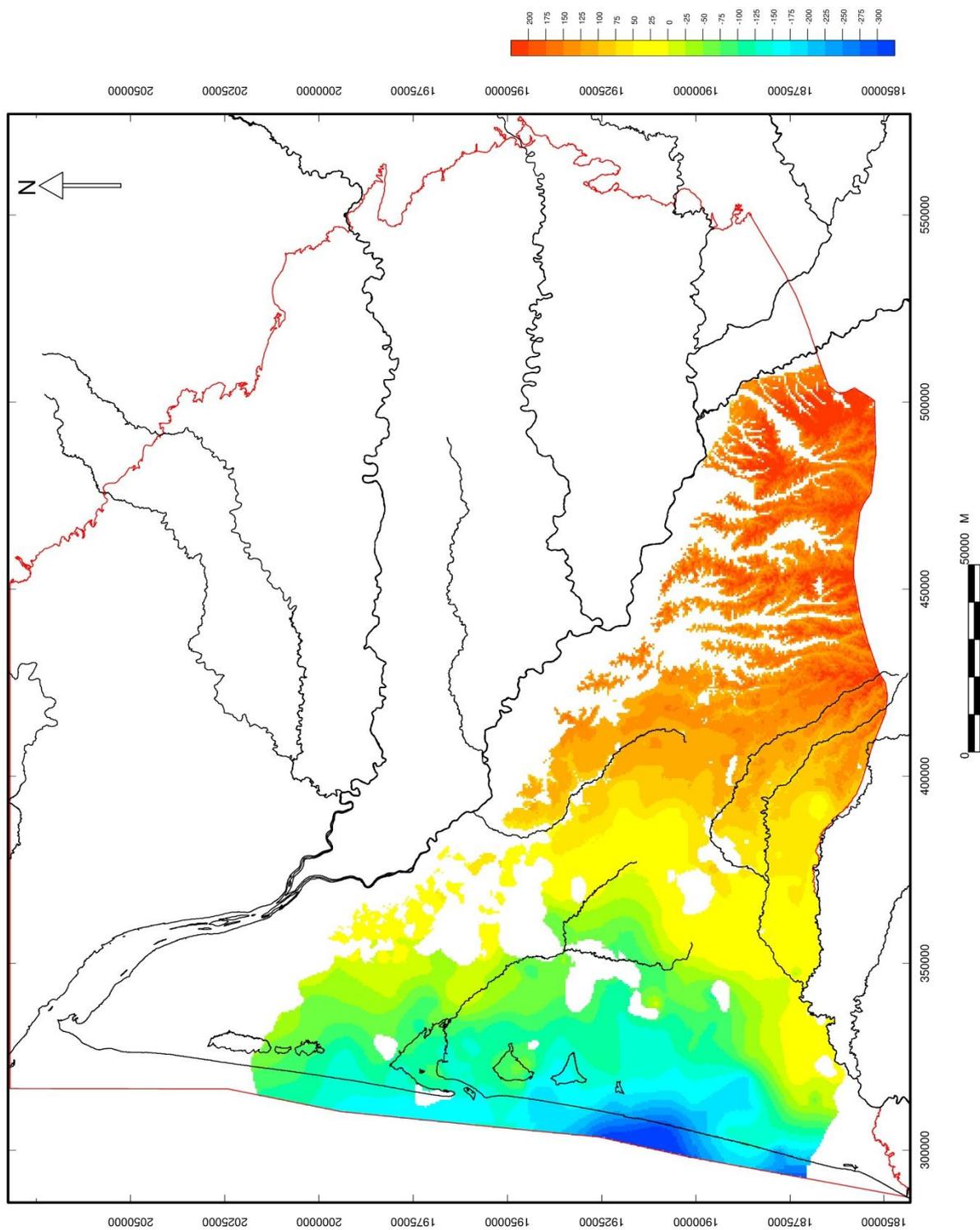
Mur des formations de recouvrement et alluvions flamandaises (m NGF)



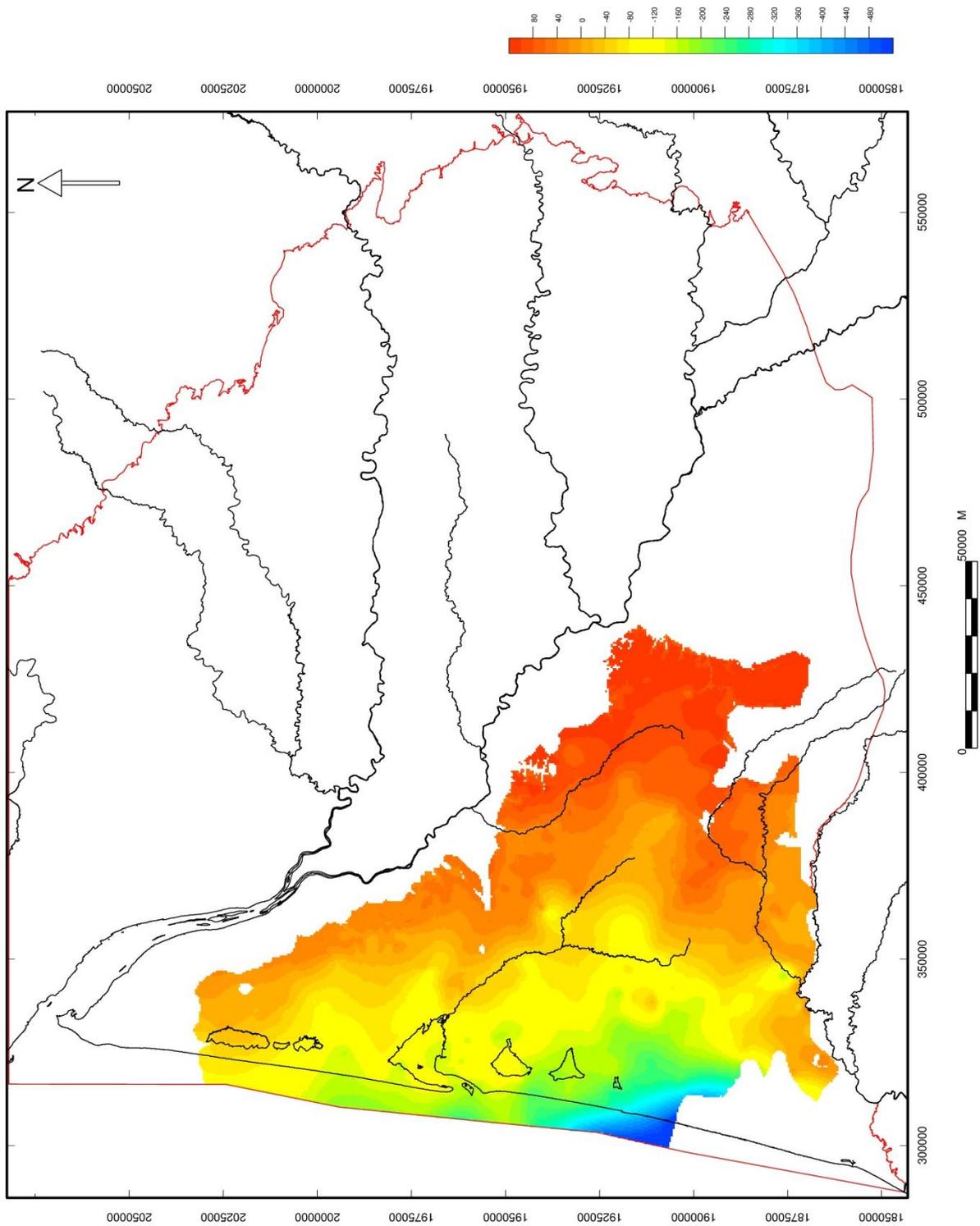
Mur du Plio-Quaternaire (m NGF)



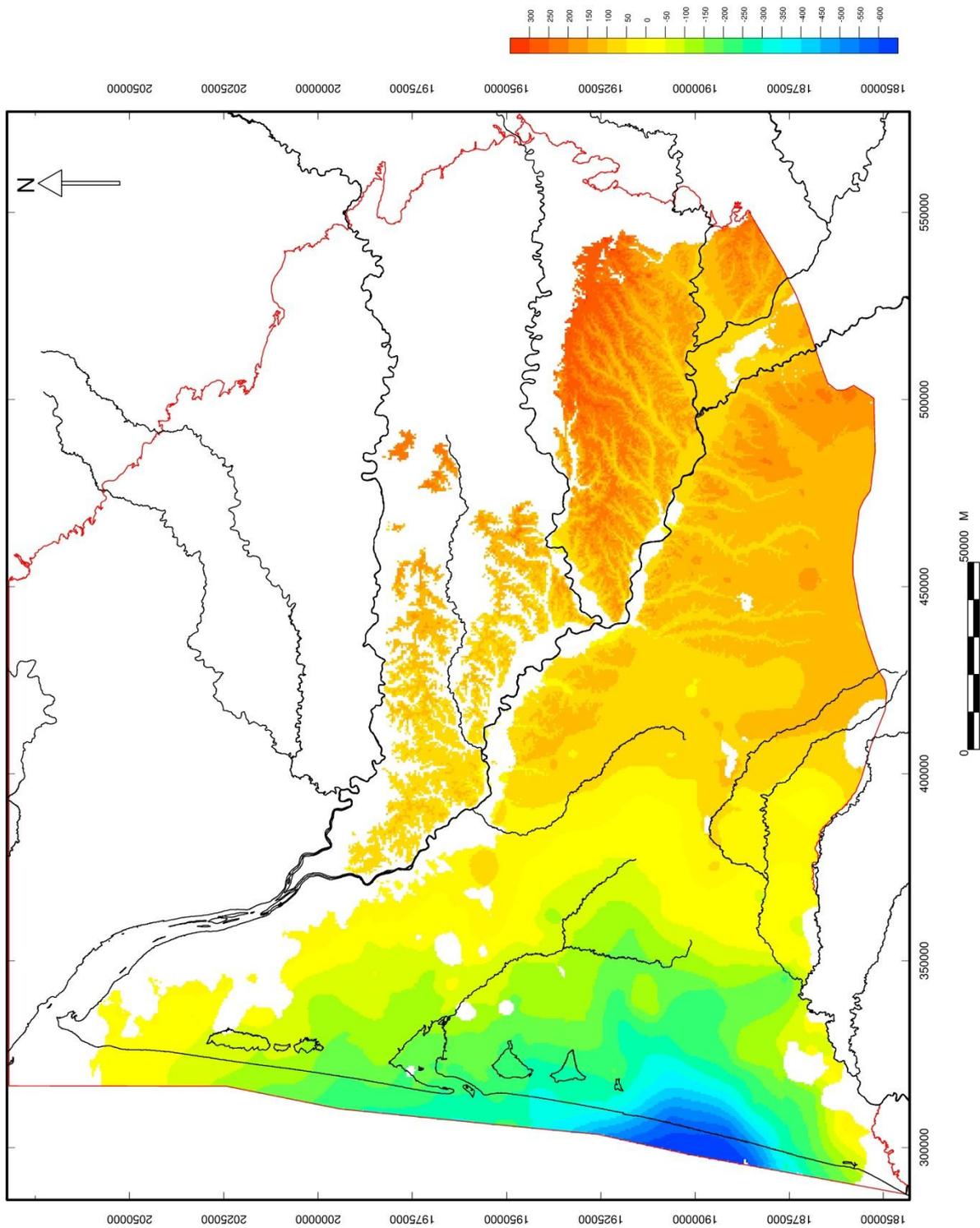
Toit de l'aquifère du Langhien-Serravallien (m NGF)



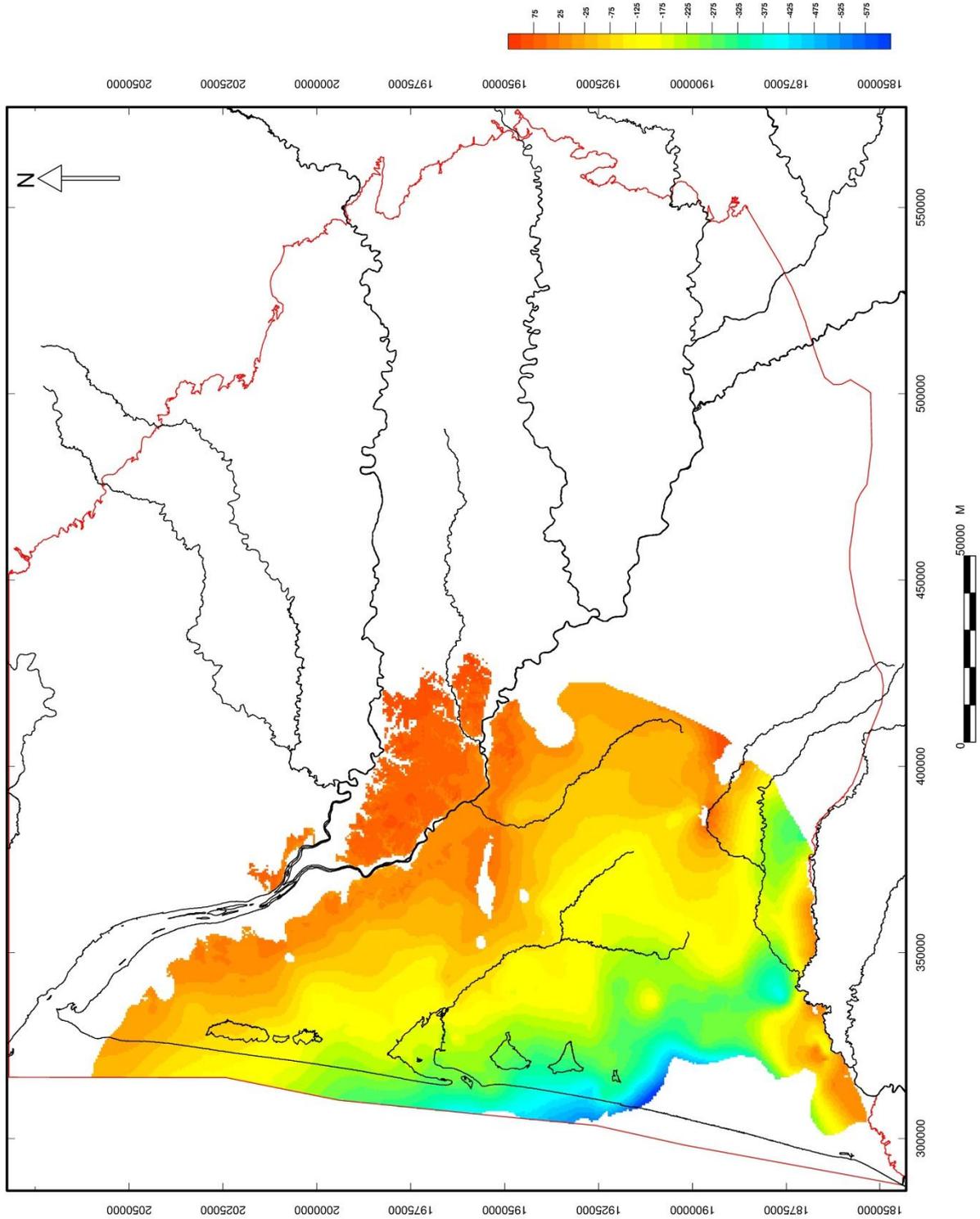
Toit de l'éponte au sommet de l'Aquitainien (m NGF)



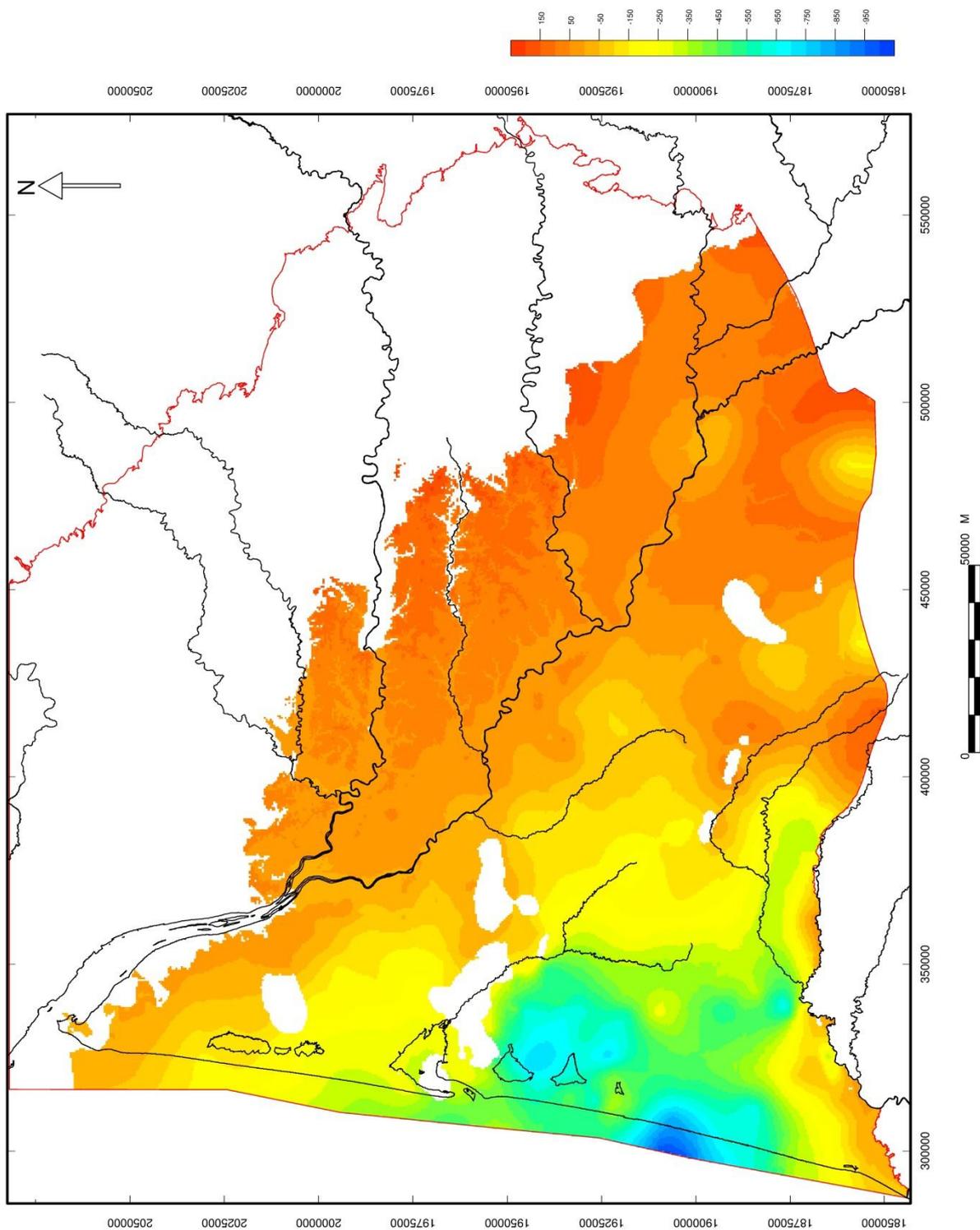
Toit de l'aquifère de l'Aquitainien (m NGF)



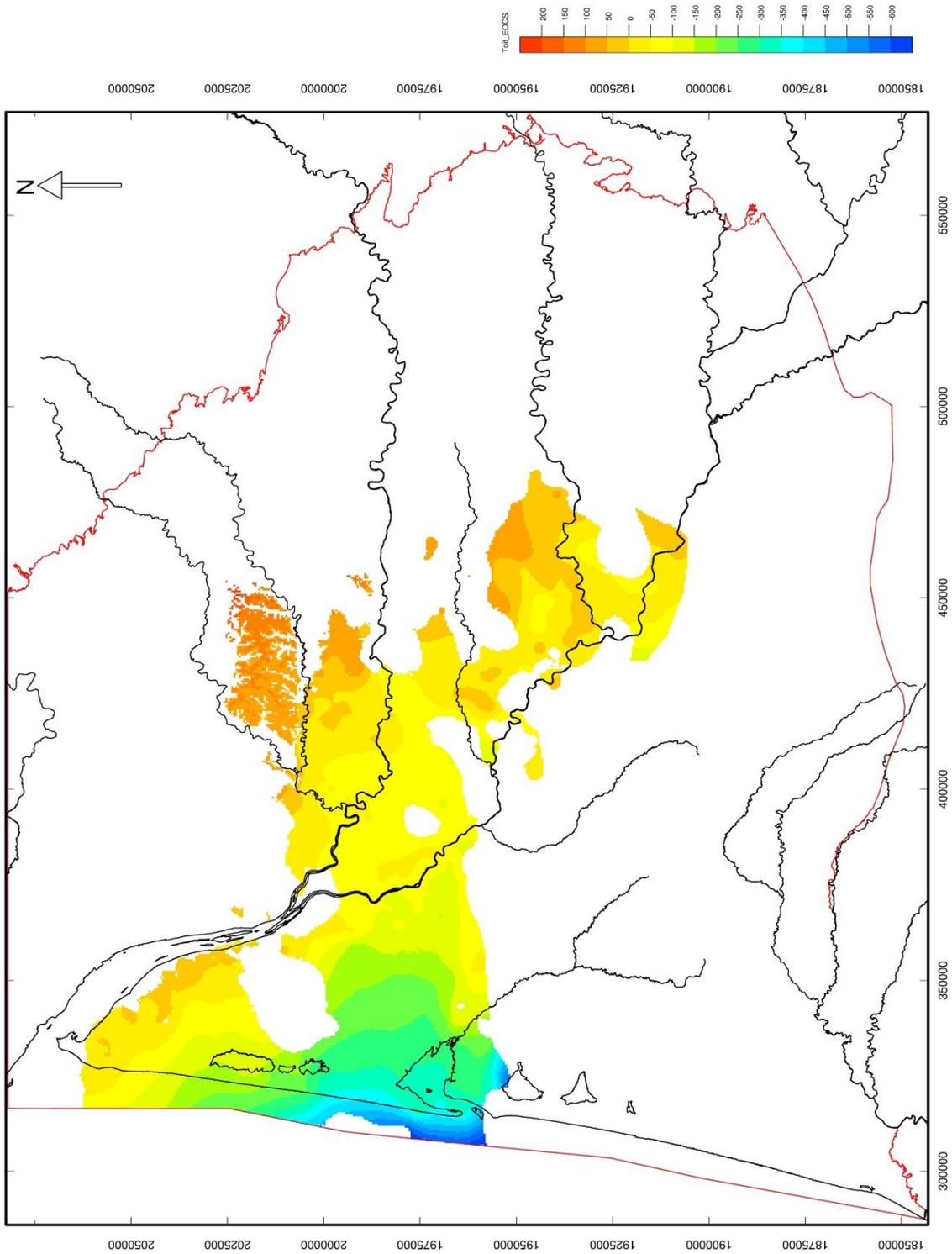
Toit de l'éponte du Chattien-Miocène (m NGF)



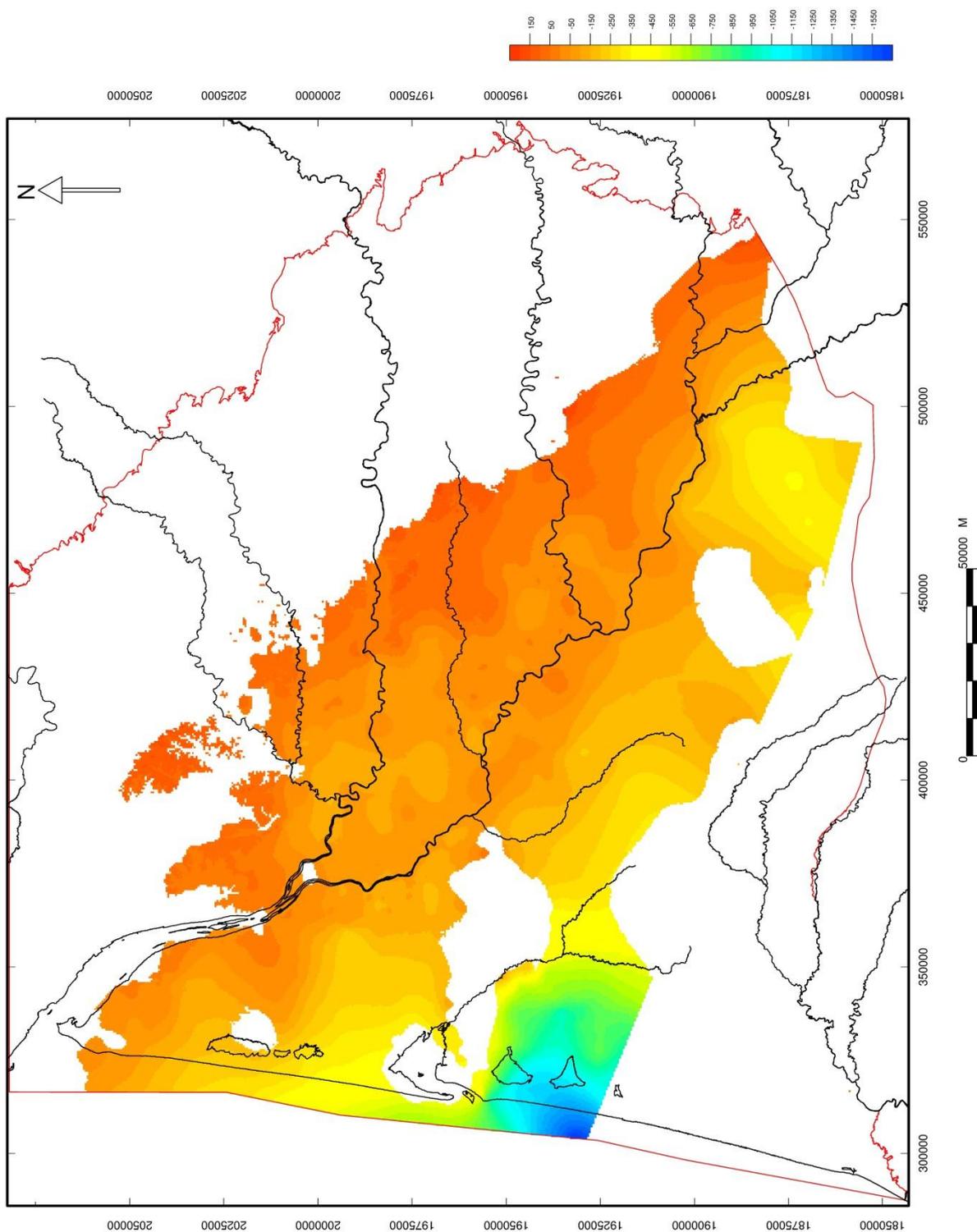
Toit de l'aquifère de l'Oligocène (m NGF)



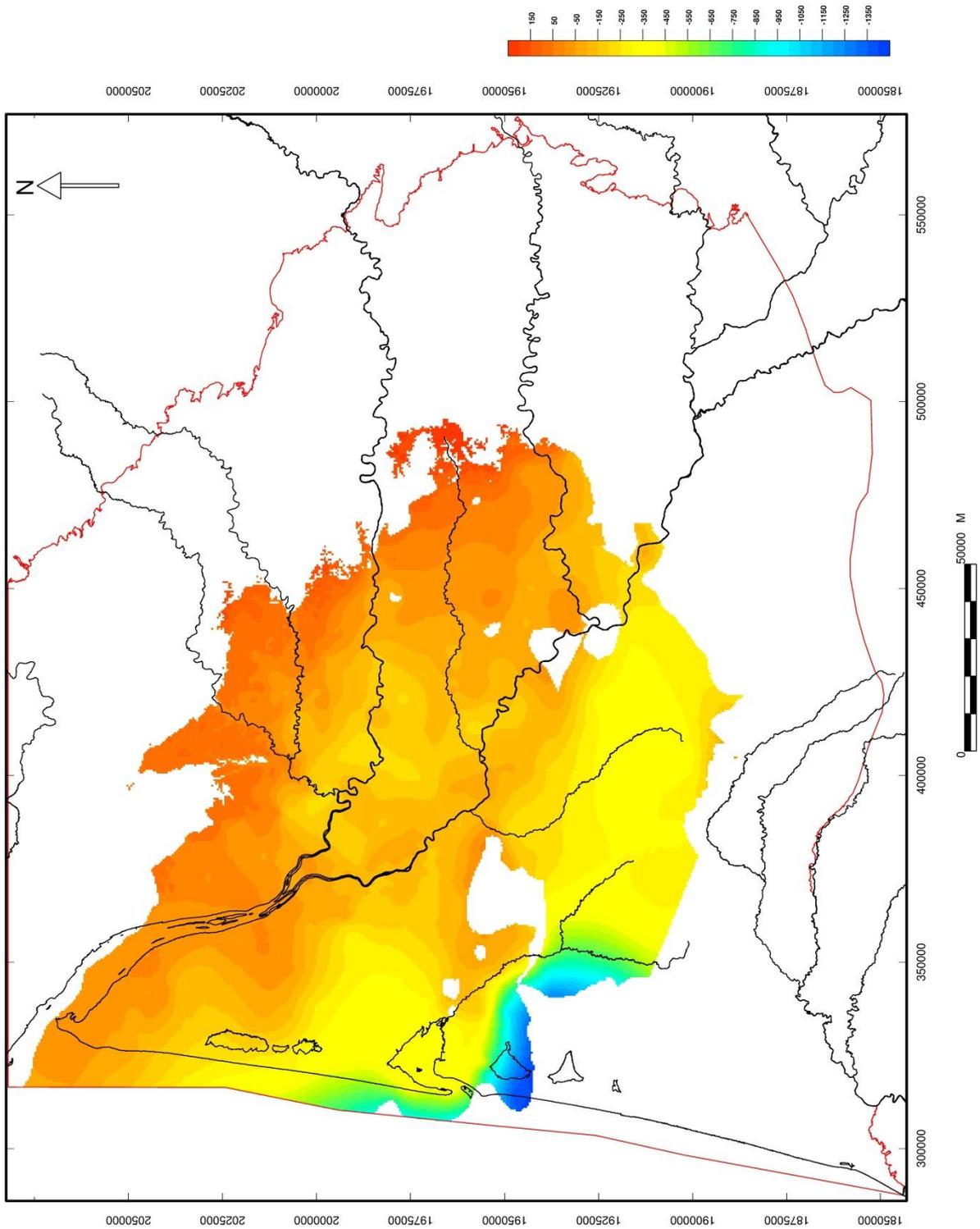
Toit de l'éponte à la base de l'Oligocène (m NGF)



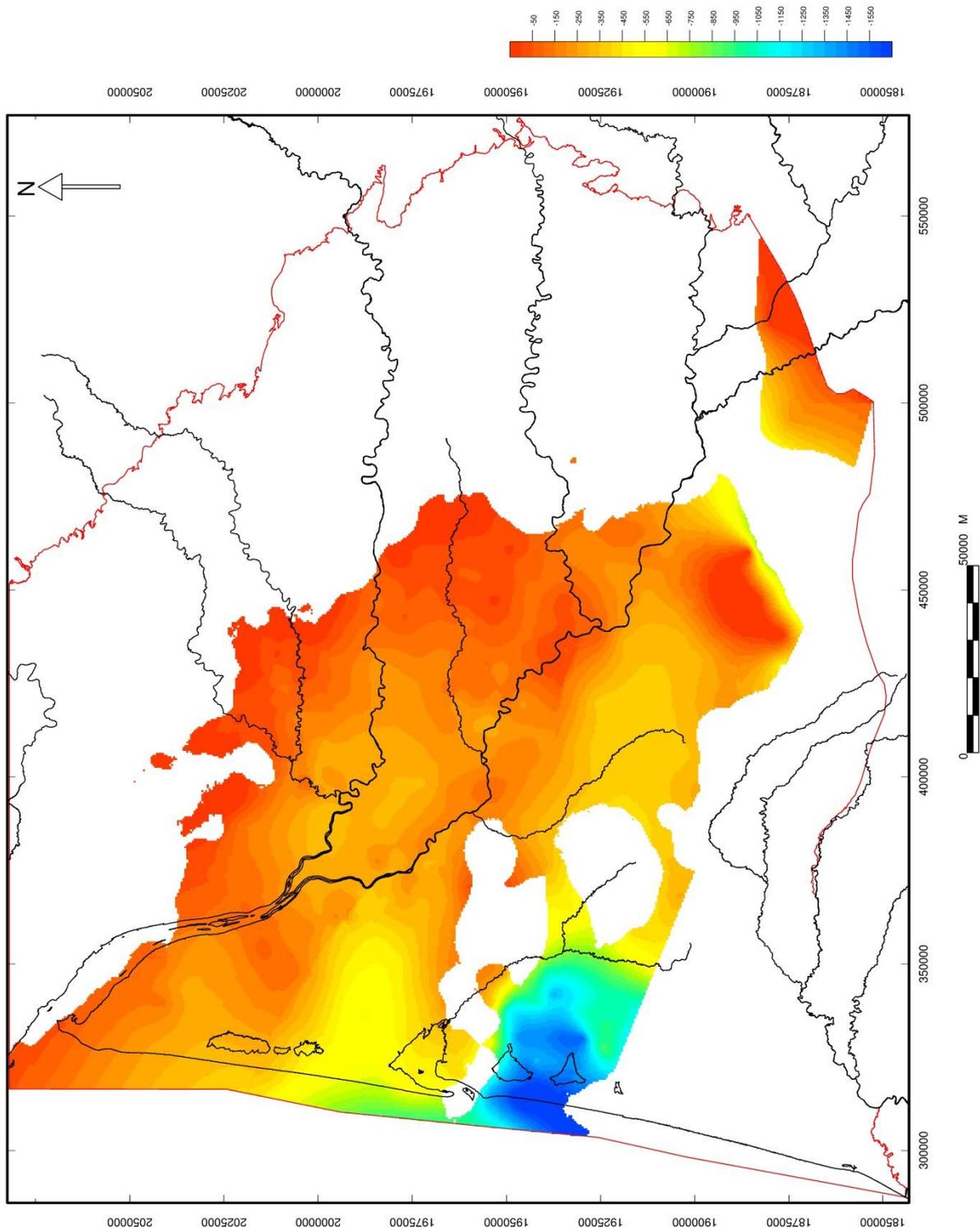
Toit de l'aquifère de l'Éocène supérieur (m NGF)



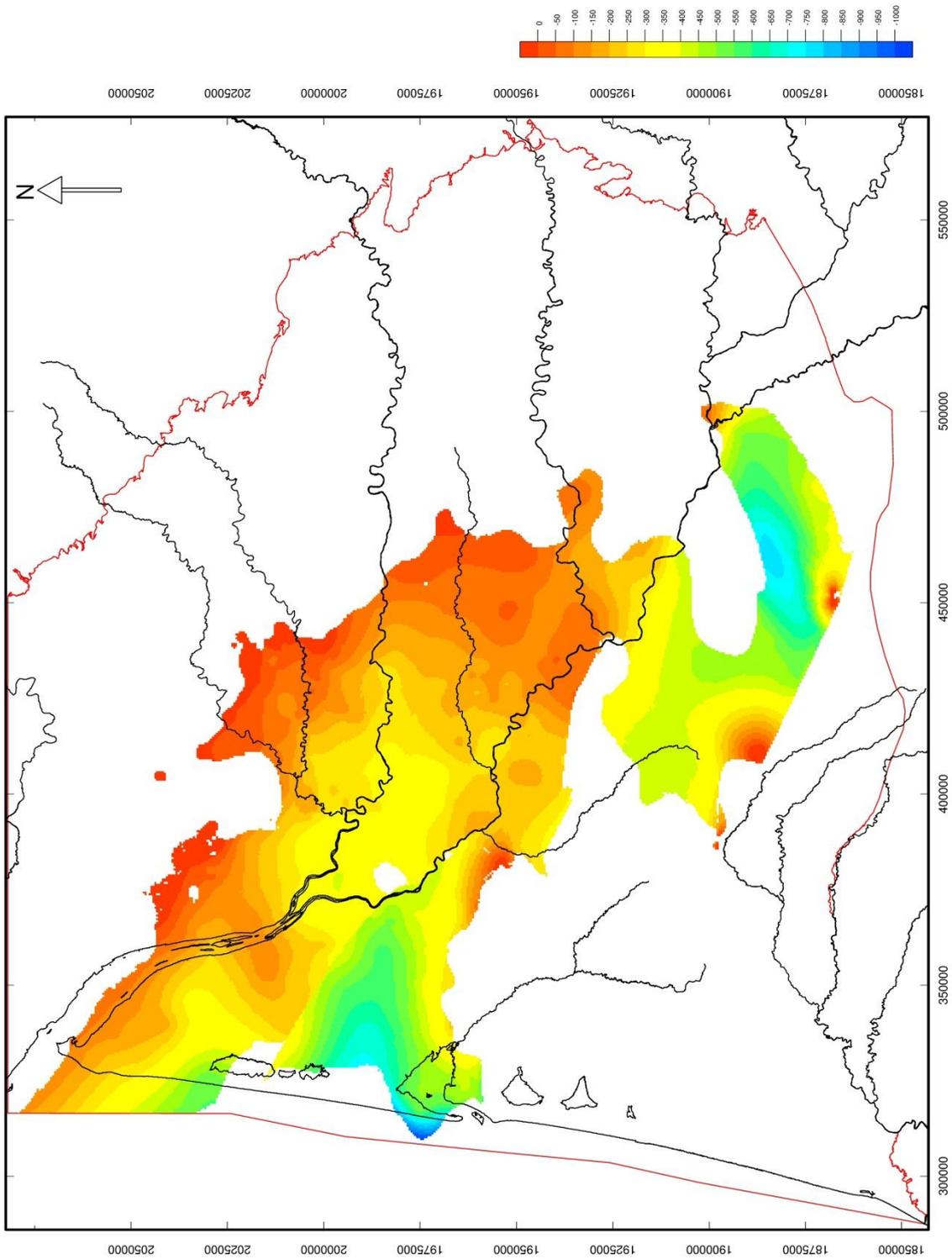
Toit de l'éponte à la base de l'Éocène supérieur (m NGF)



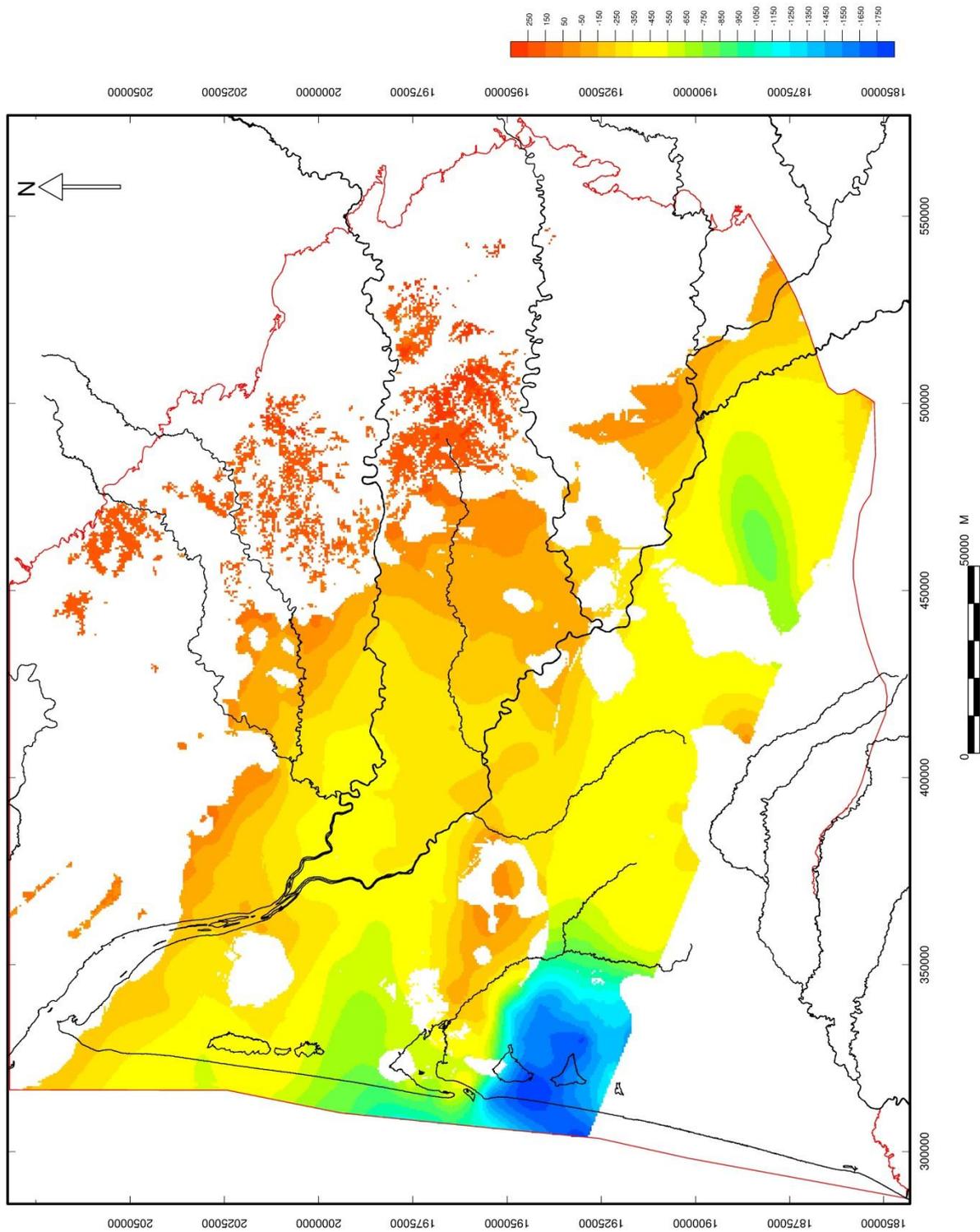
Toit de l'aquifère de l'Éocène moyen (m NGF)



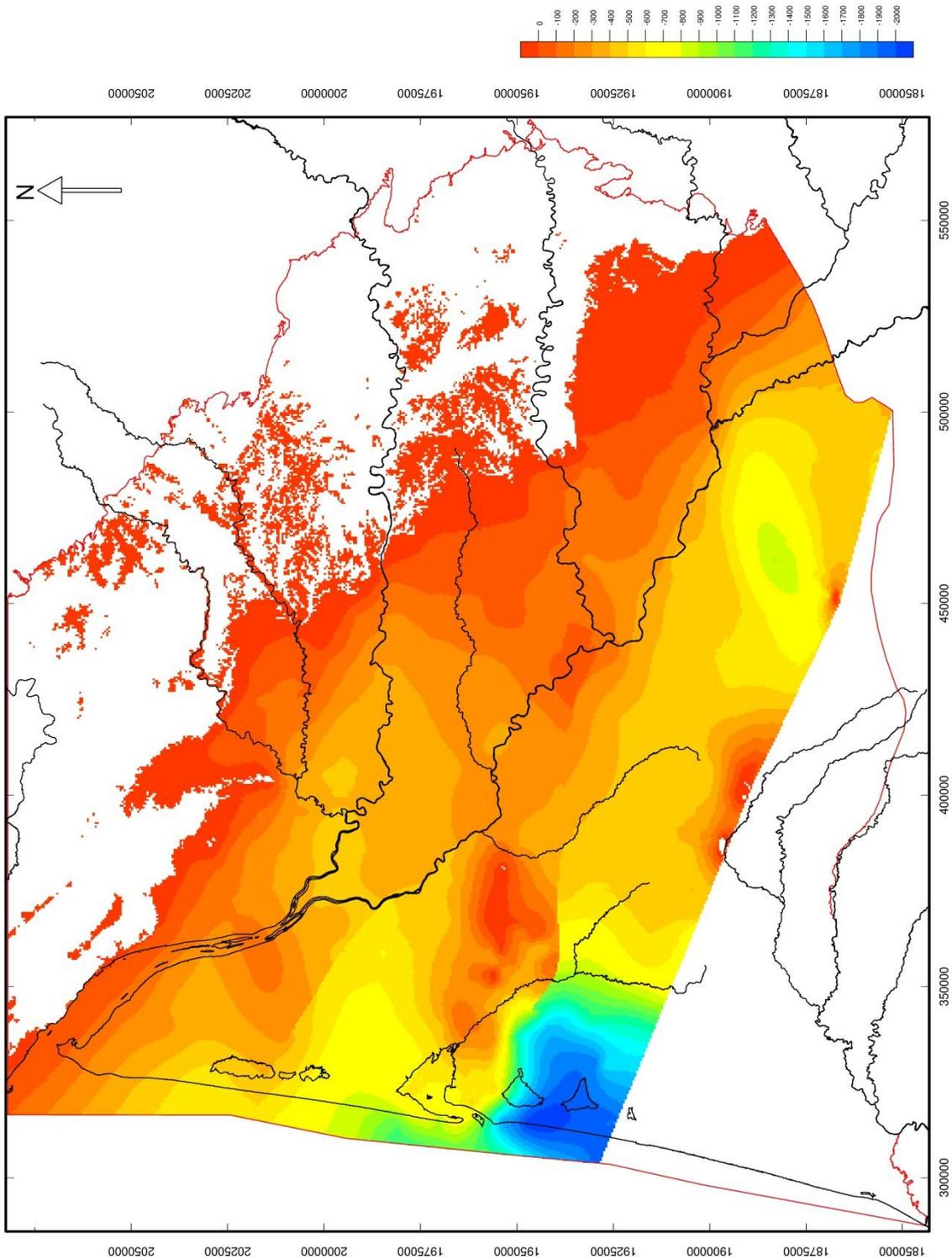
Toit de l'éponte à la base de l'Éocène moyen (m NGF)



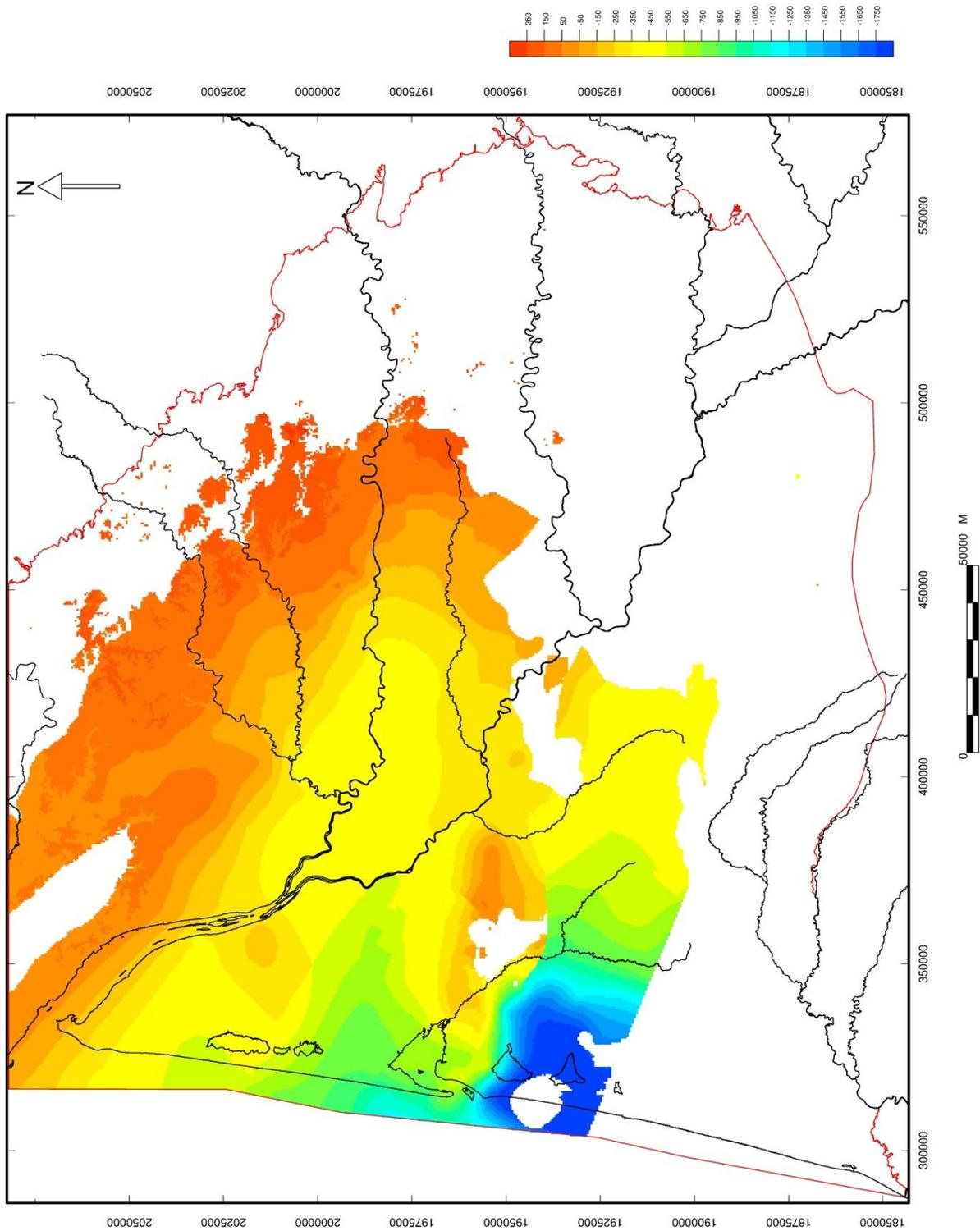
Toit de l'aquifère de l'Éocène inférieur (m NGF)



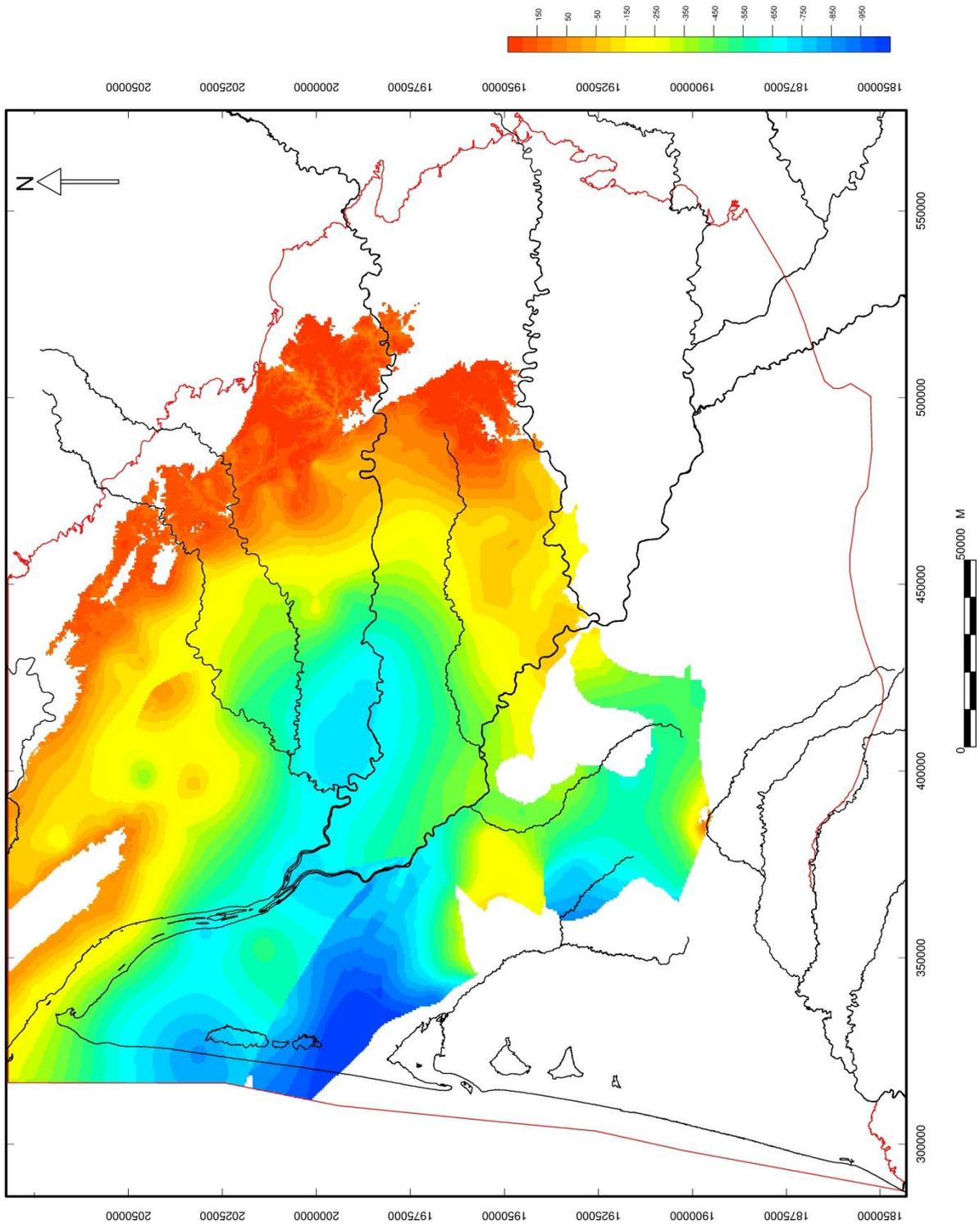
Toit de l'éponte au sommet du Campanien



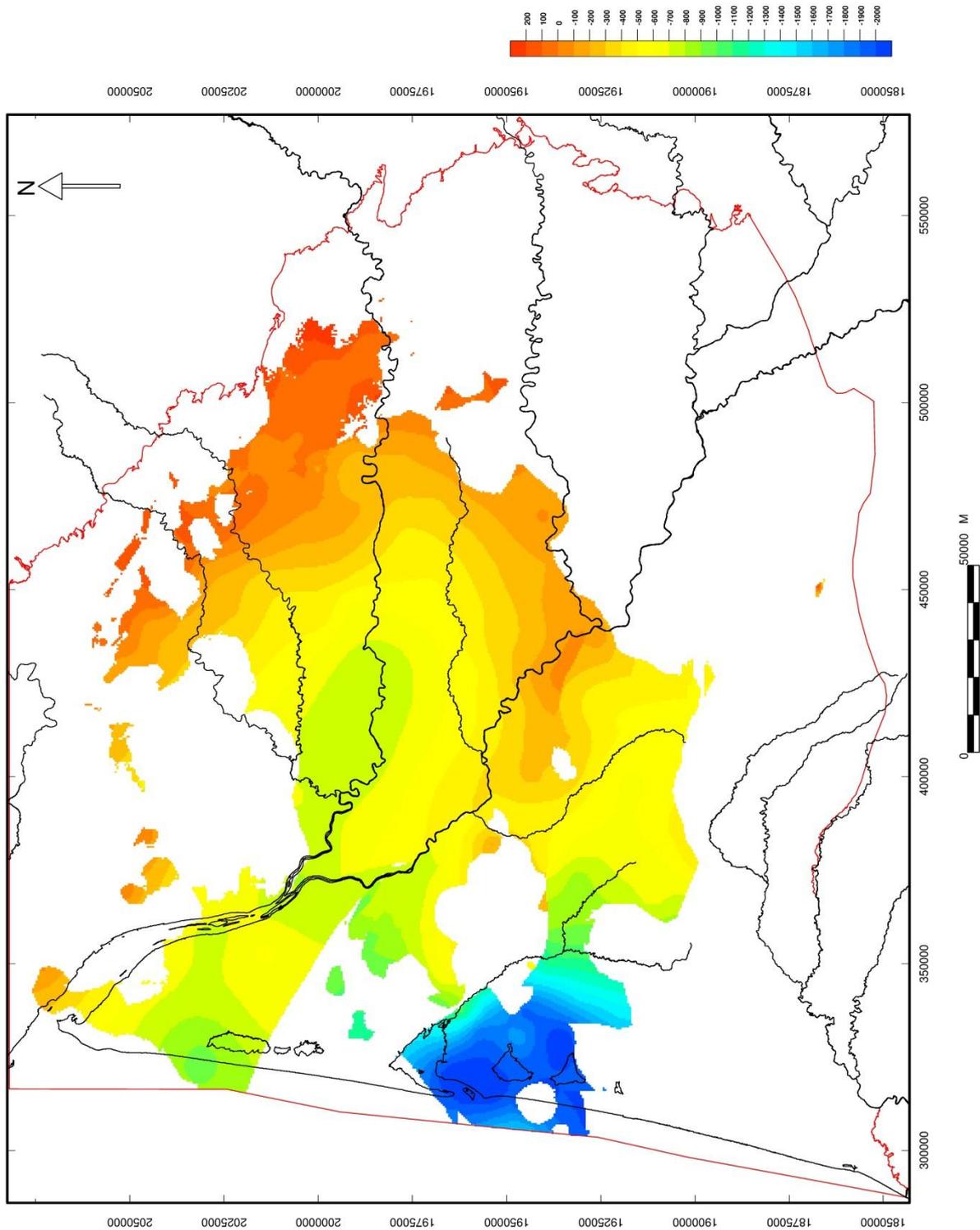
Toit de l'aquifère du Campanien (m NGF)



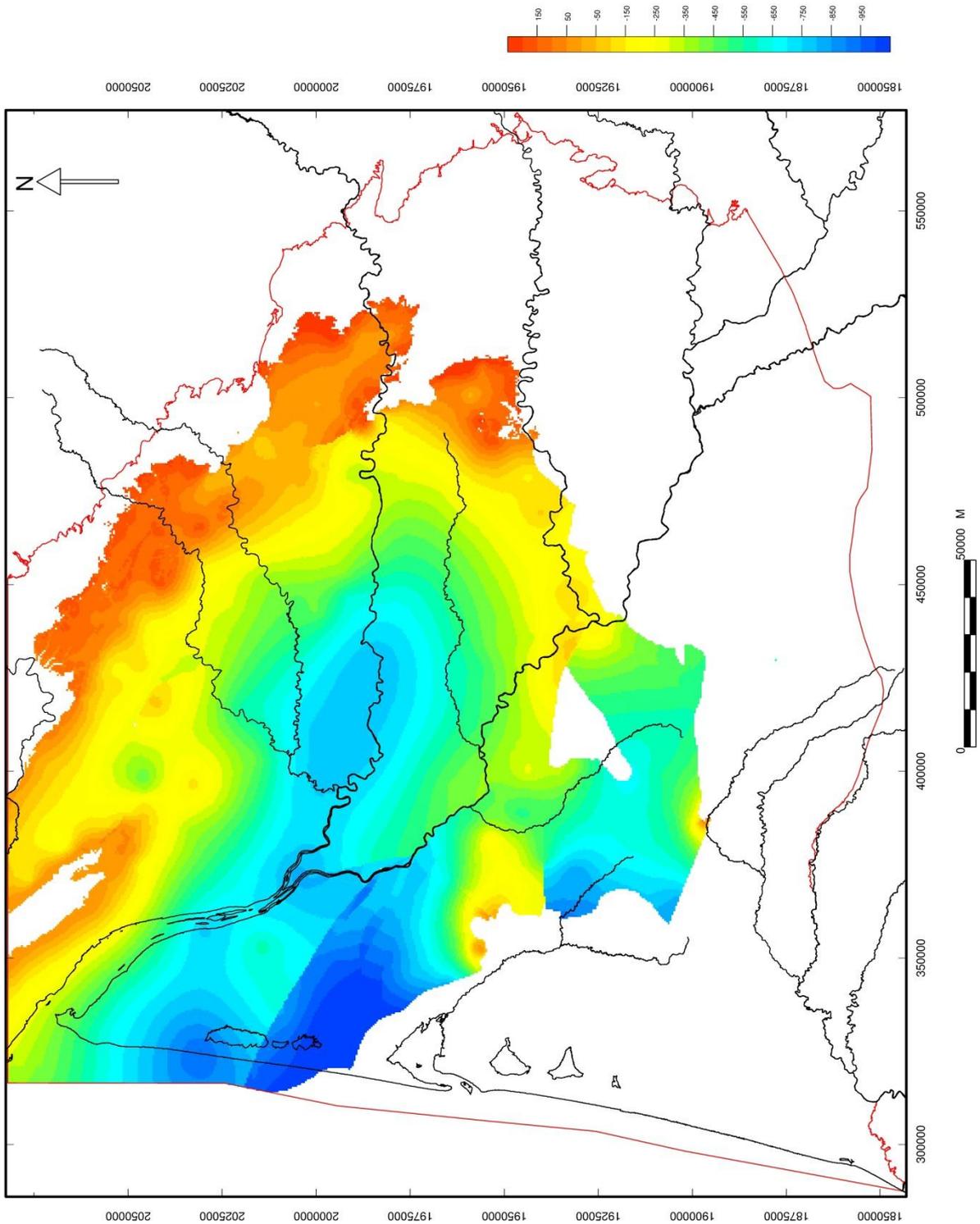
Toit de l'éponte au sommet du Coniacien Santonien (m NGF)



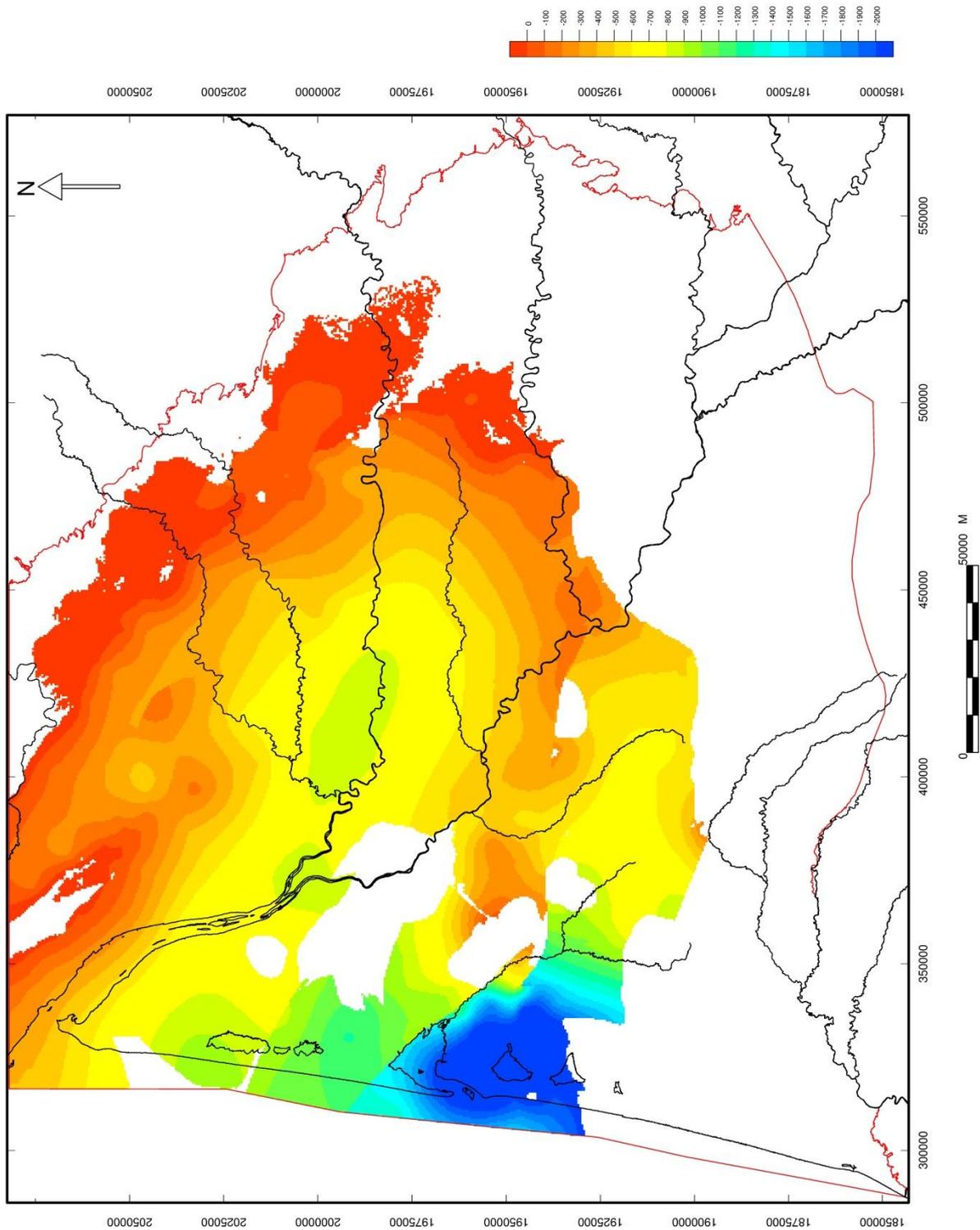
Toit de l'aquifère du Coniacien-Santonien (m NGF)



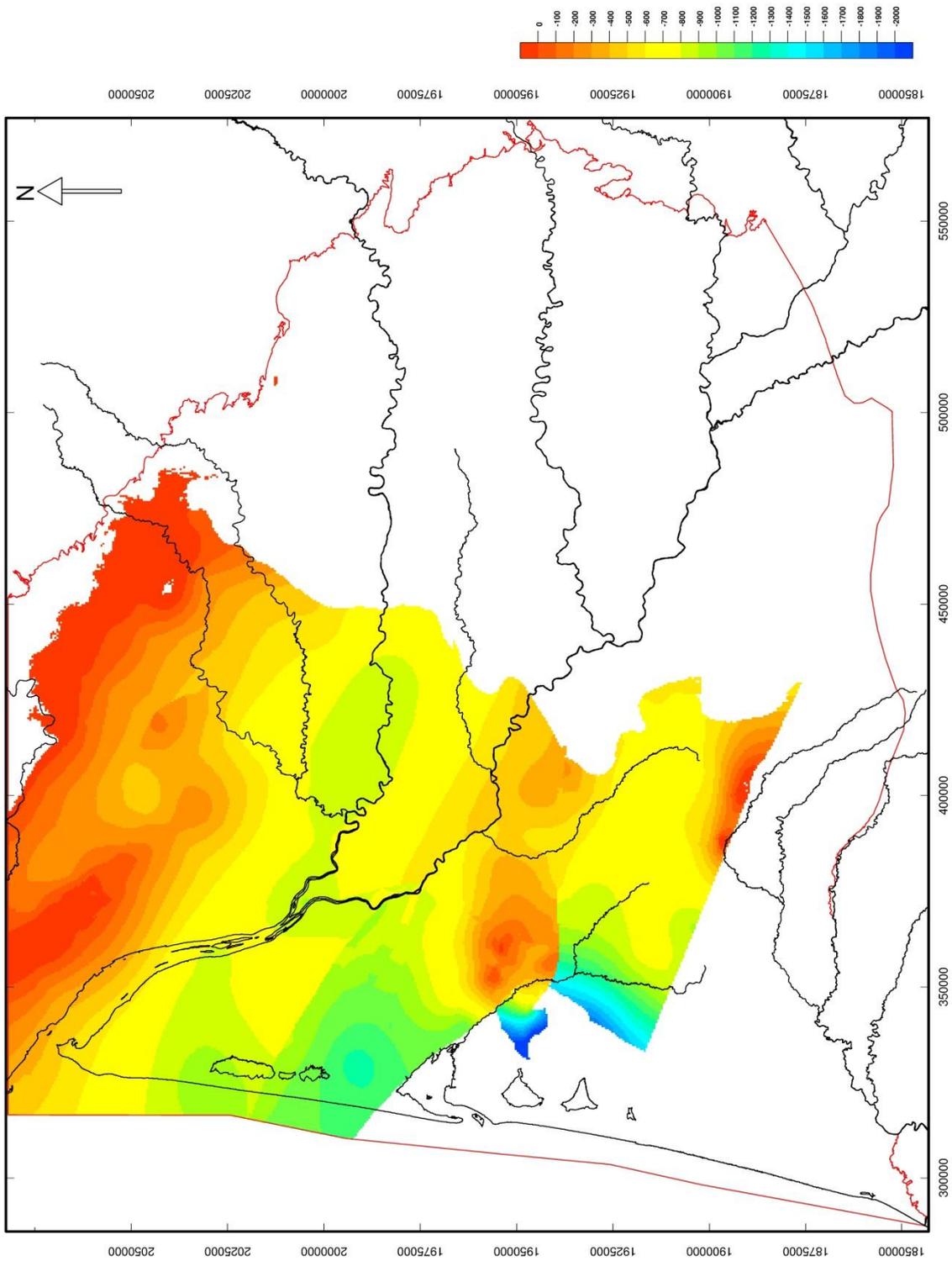
Toit de l'éponte au sommet du Turonien (m NGF)



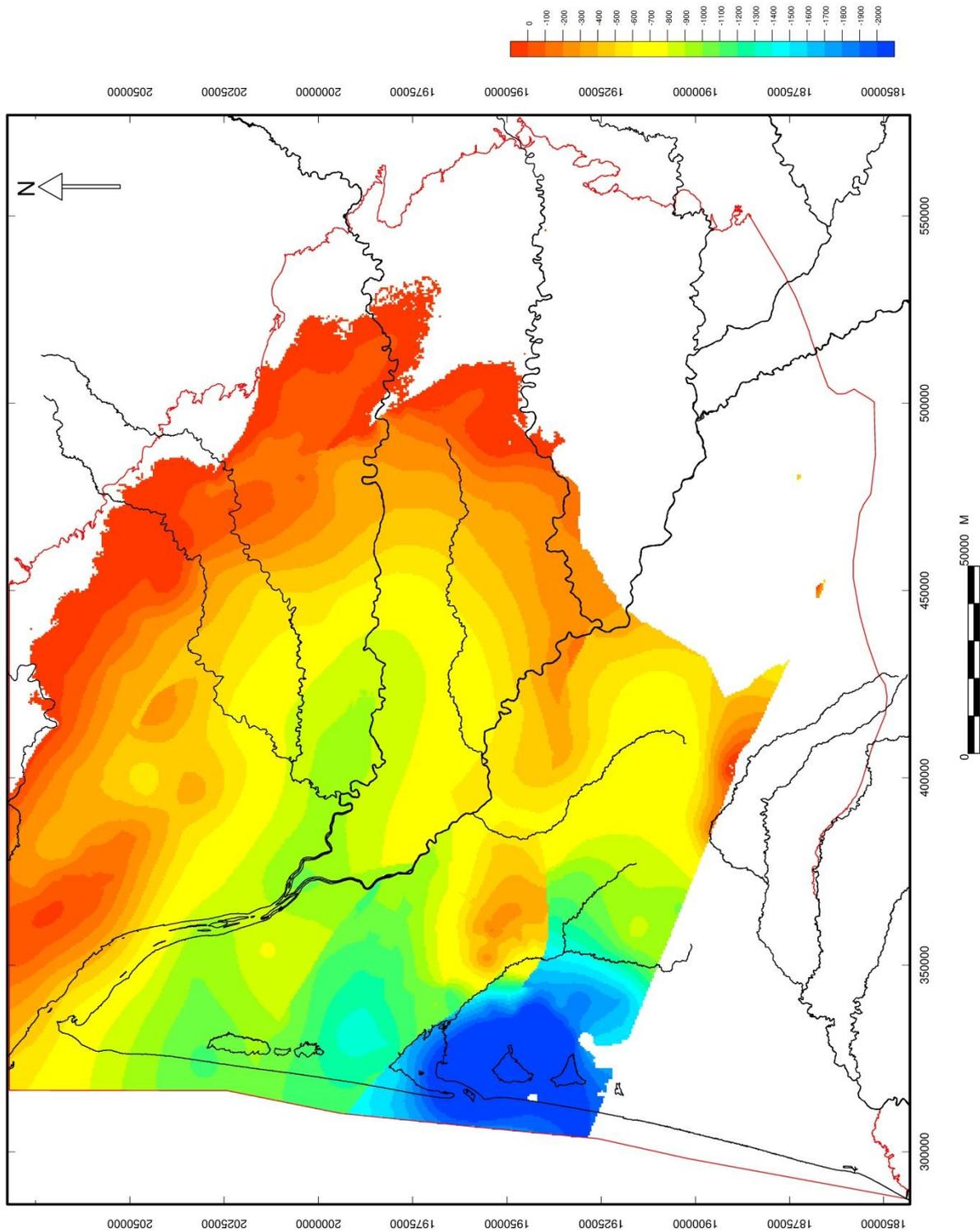
Toit de l'aquifère du Turonien (m NGF)



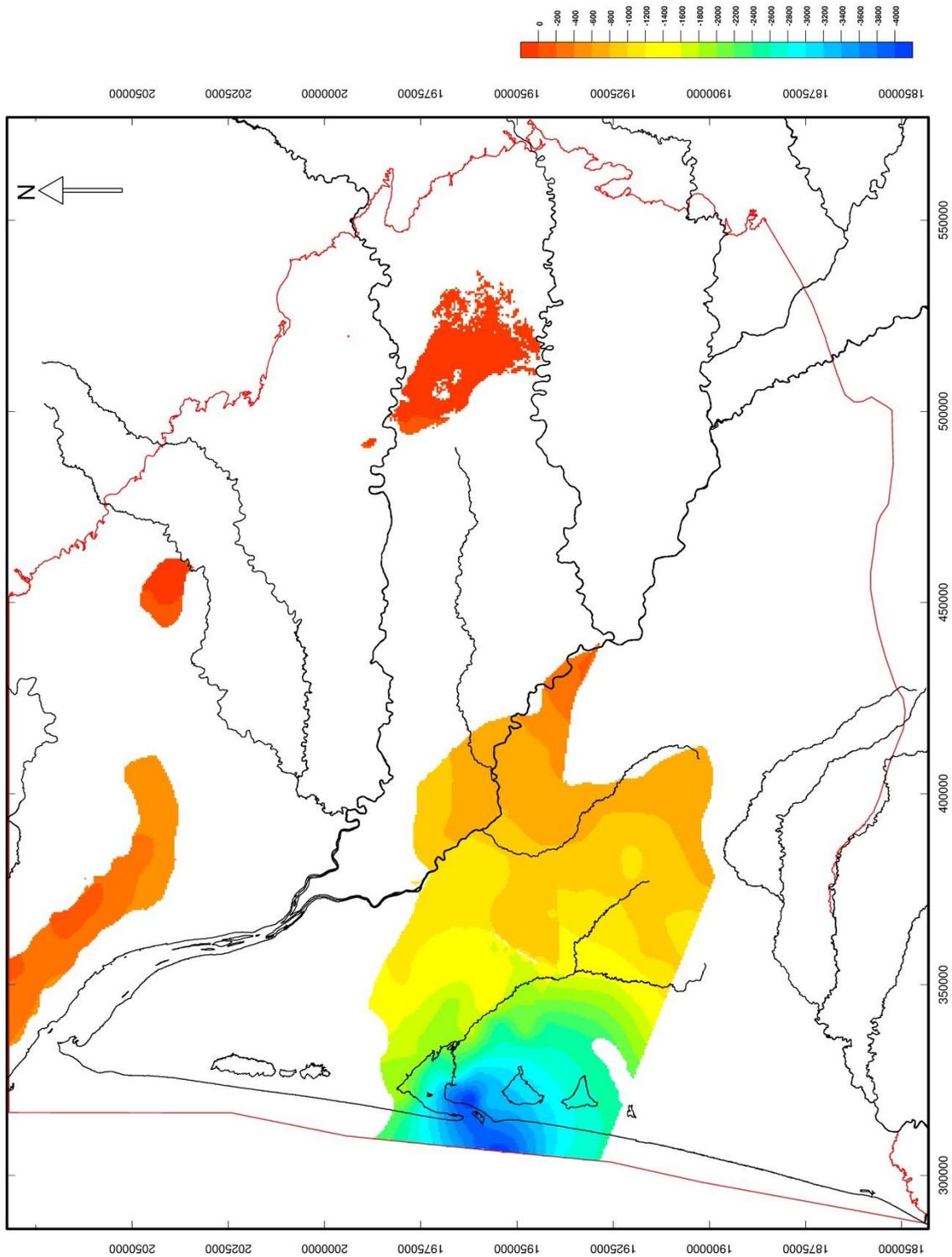
Toit de l'éponte au sommet du Cénomaniens (m NGF)



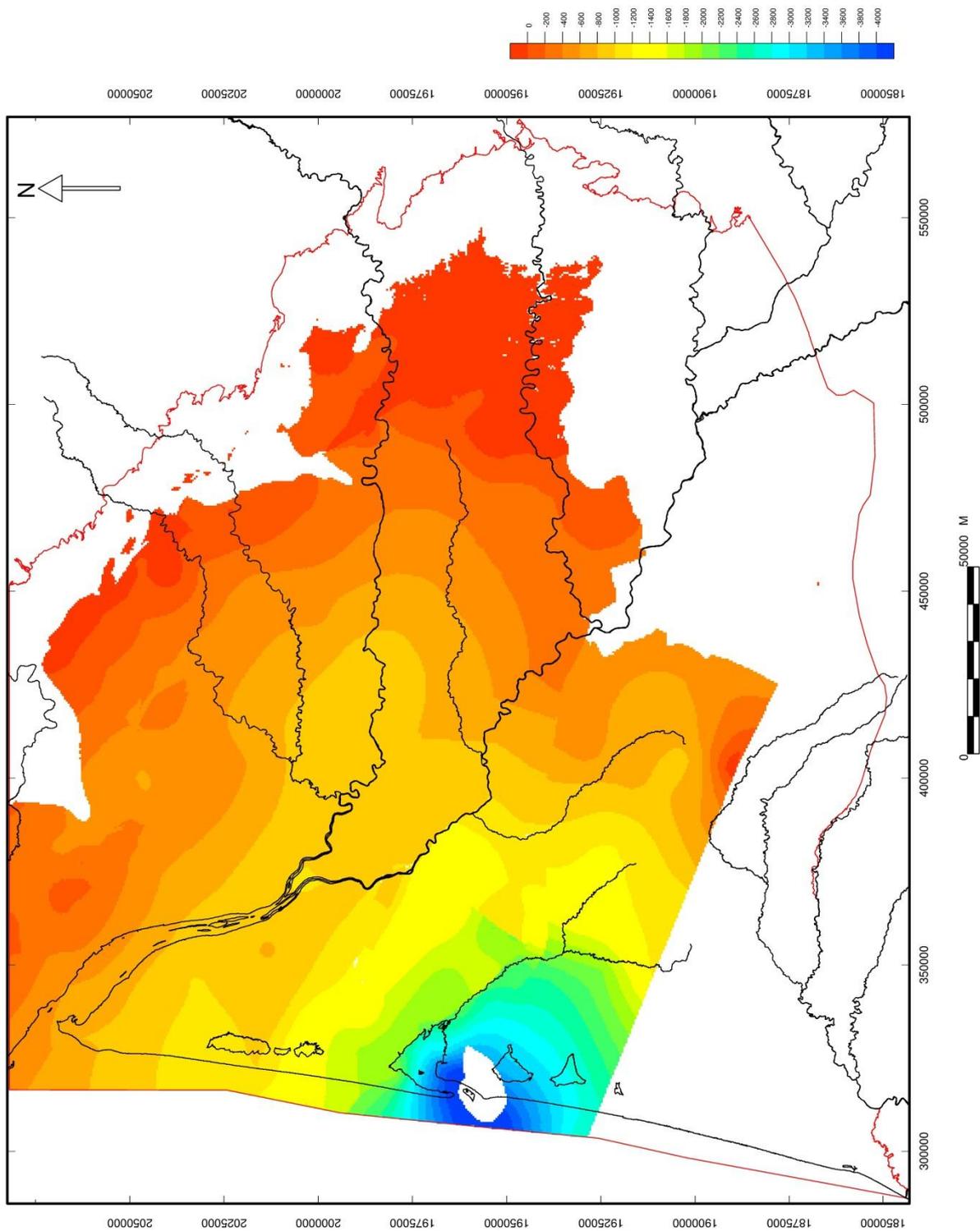
Toit de l'aquifère du Cénomaniens (m NGF)



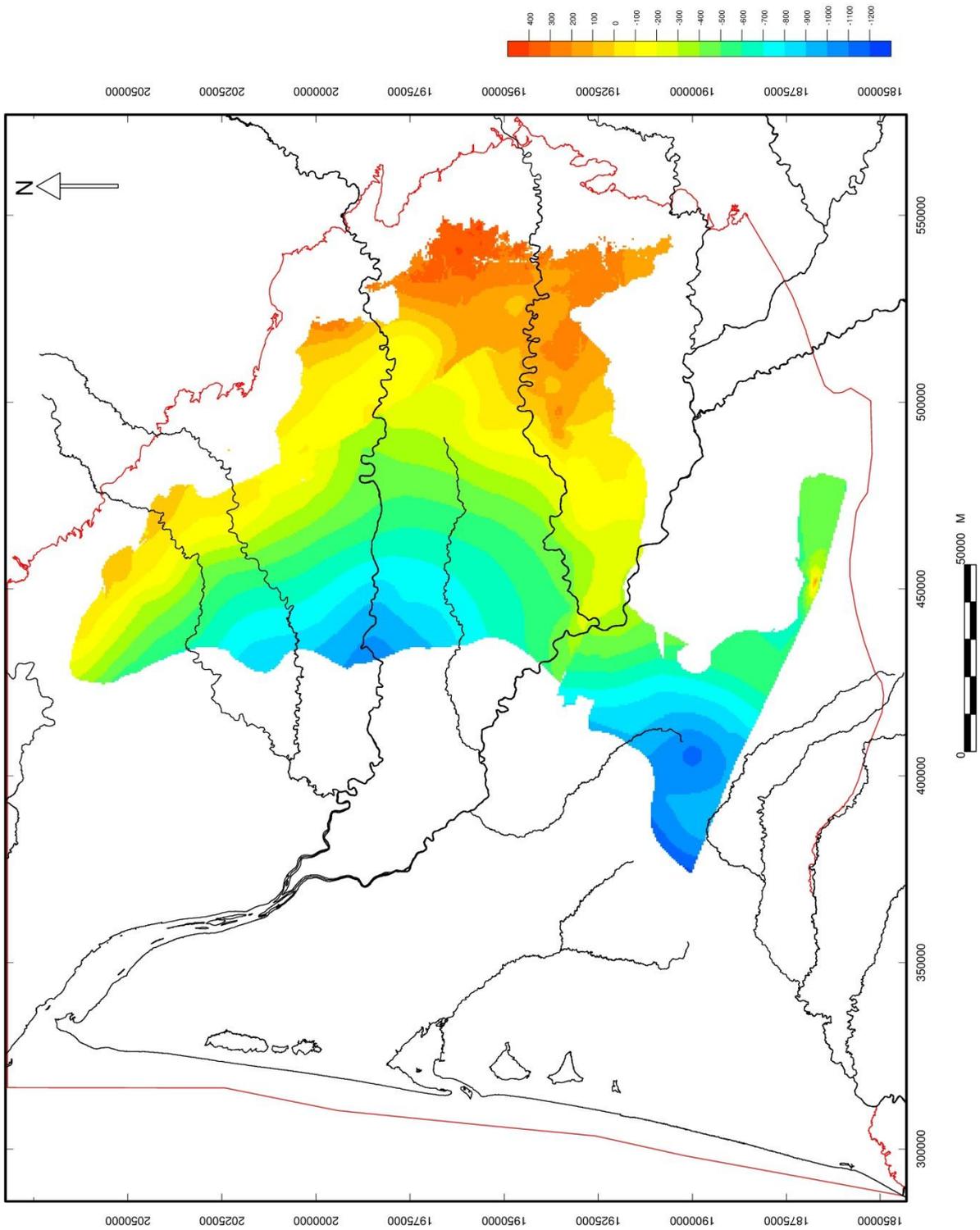
Mur de l'aquifère du Cénomaniien (m NGF)



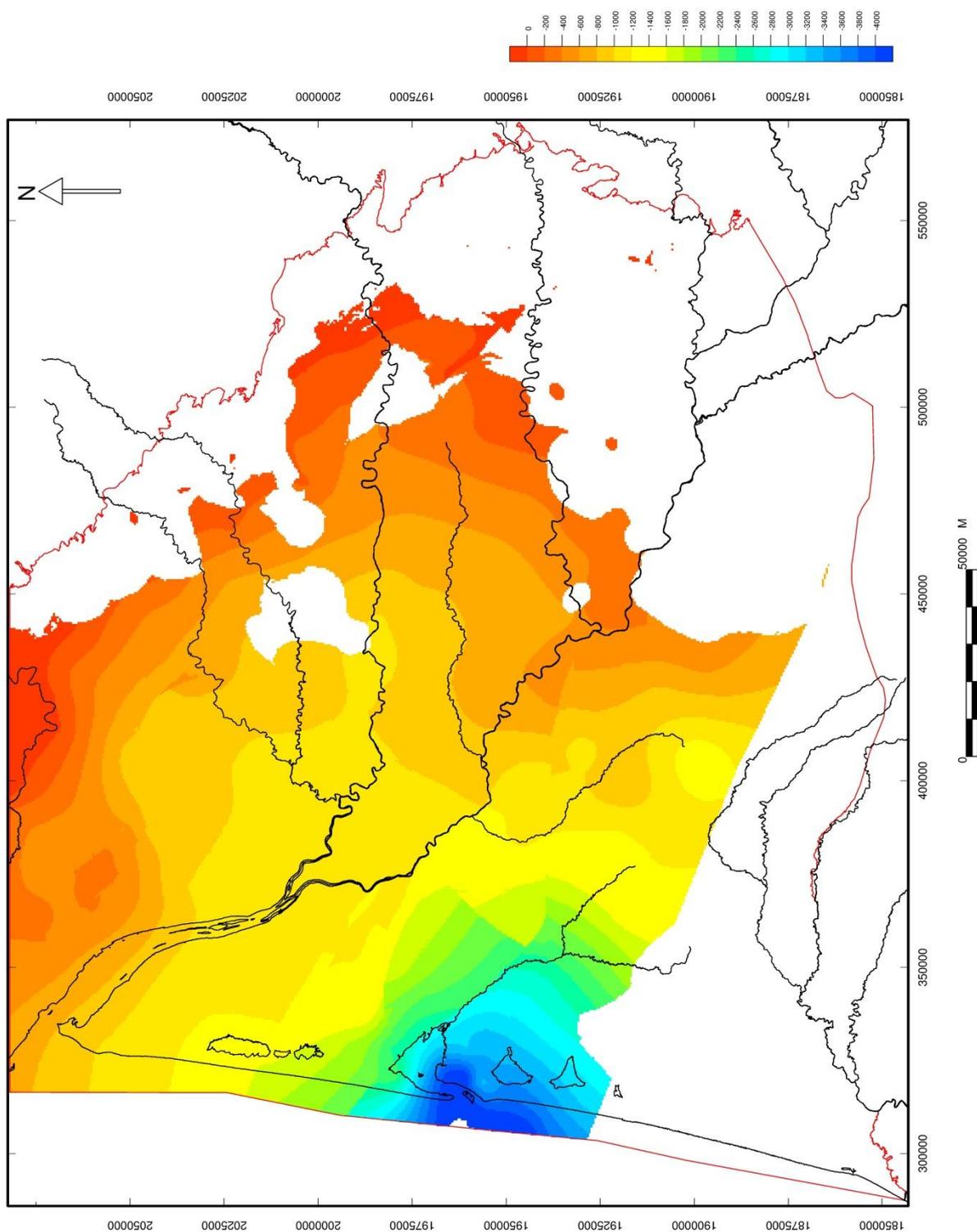
Toit de l'aquifère du Tithonien (m NGF)



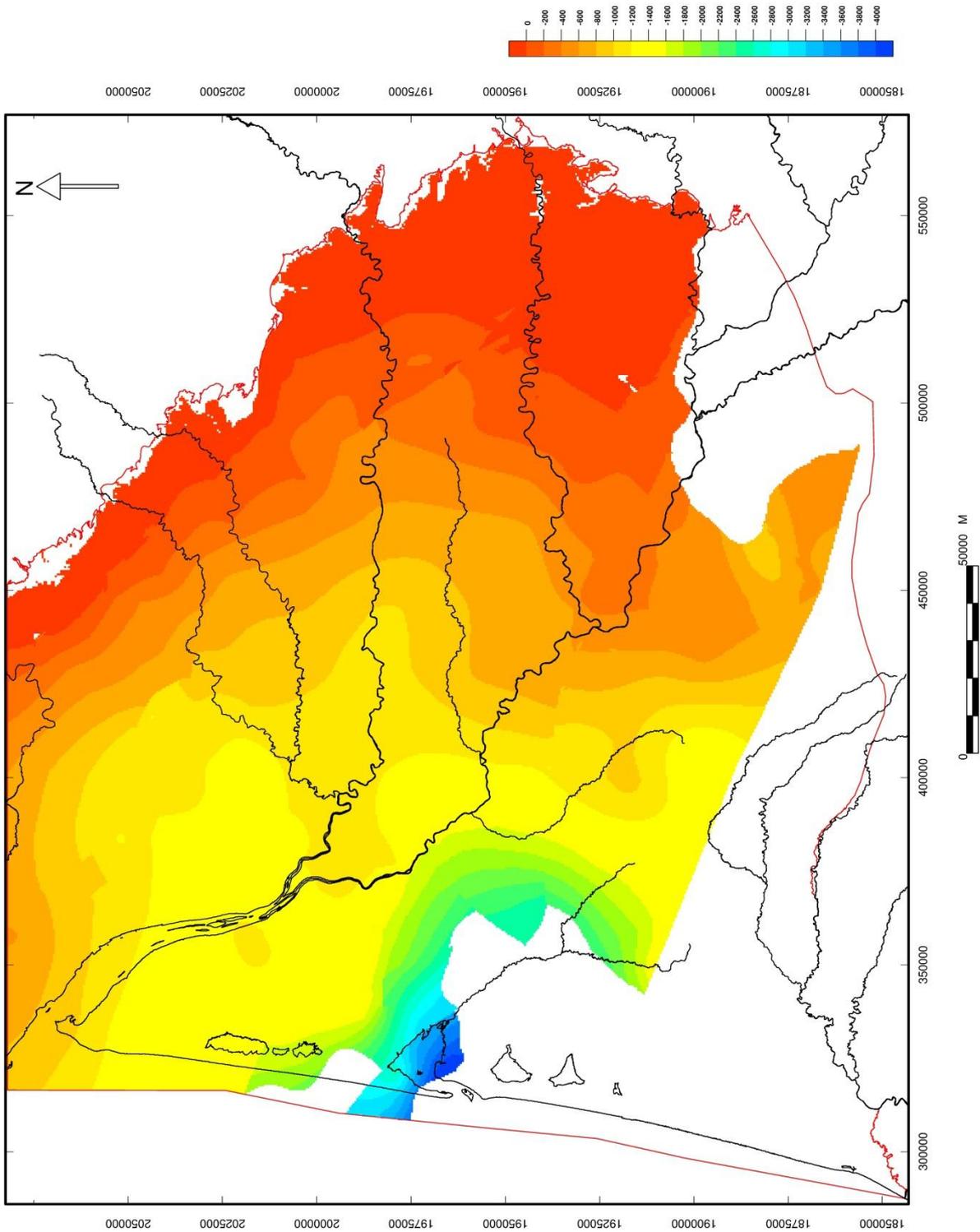
Toit de l'éponte au sommet du Kimméridgien (m NGF)



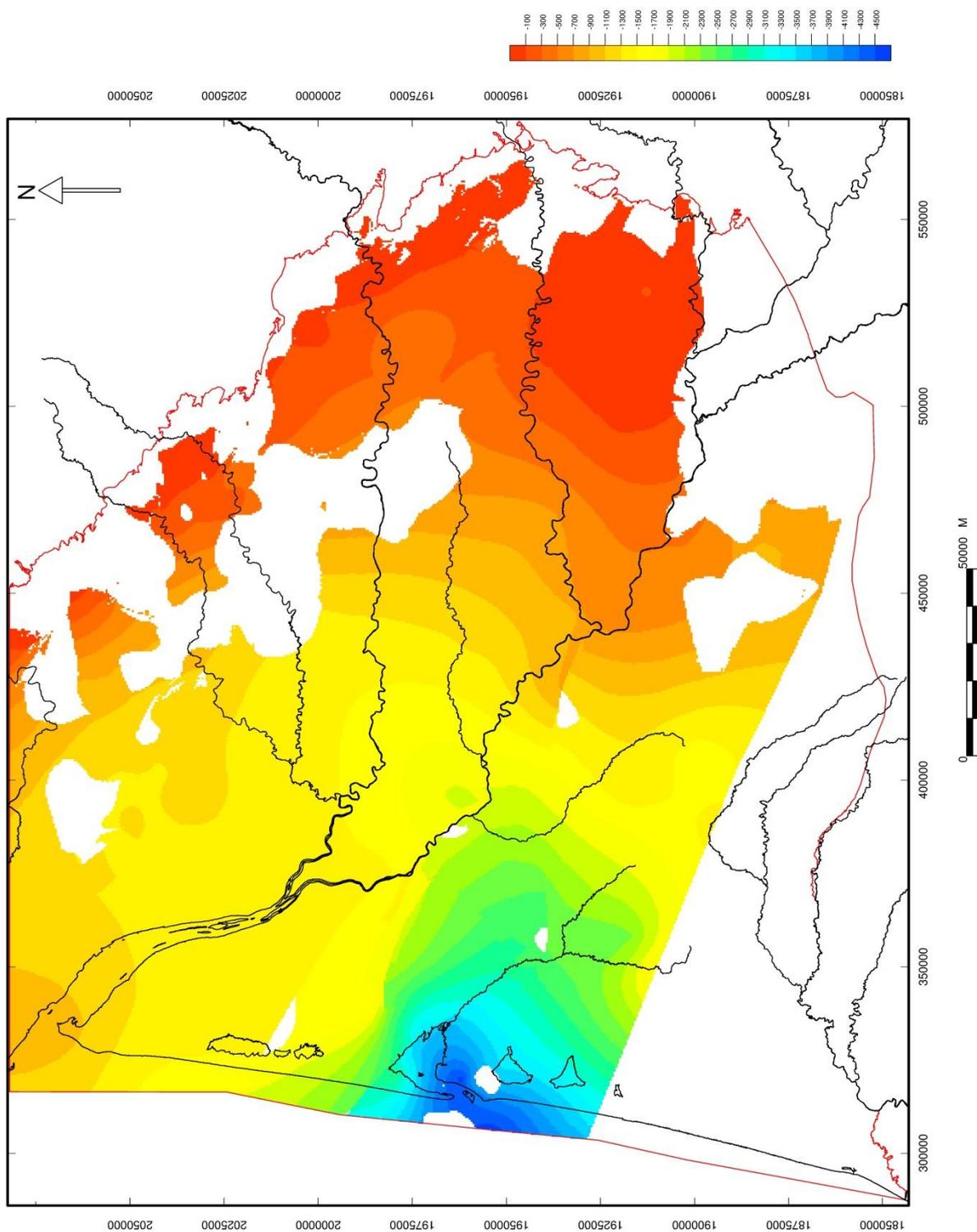
Toit de l'aquifère du Kimméridgien (m NGF)



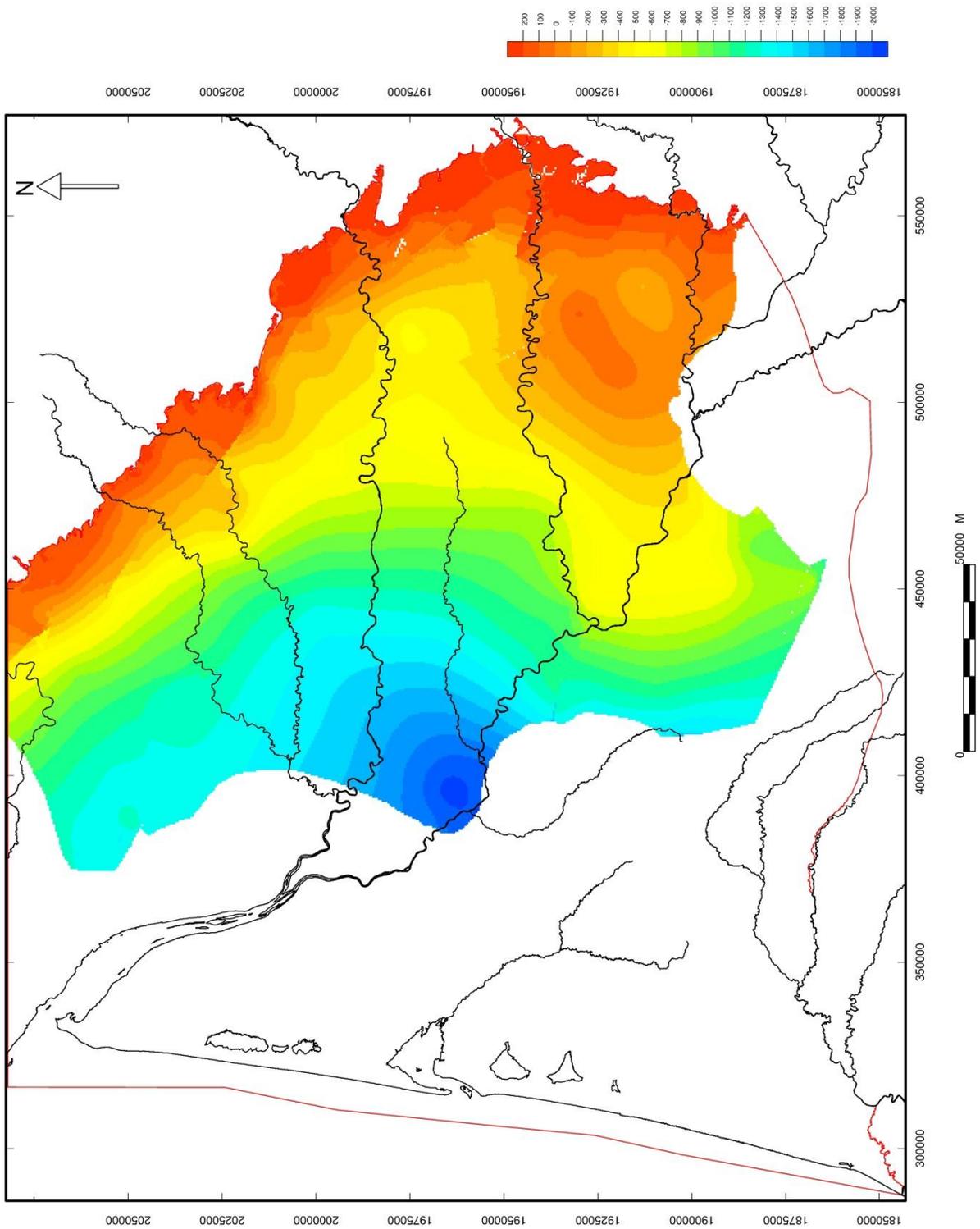
Toit de l'éponte au sommet du réservoir du Bathonien-Calovo-Oxfordien (m NGF)



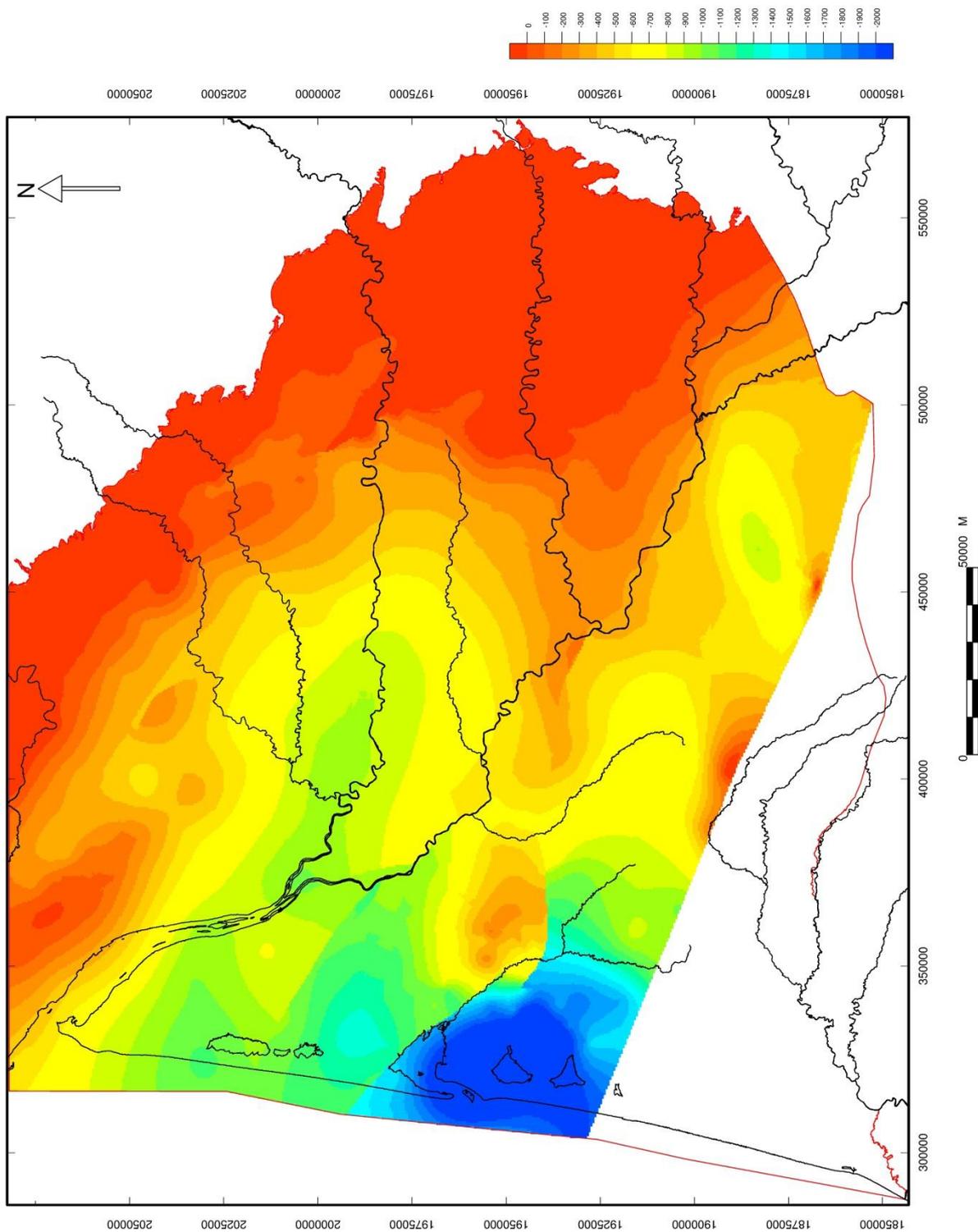
Toit de l'aquifère du Bathonien-Callovio-Oxfordien (m NGF)



Toit de l'éponte au sommet du Bajocien (m NGF)



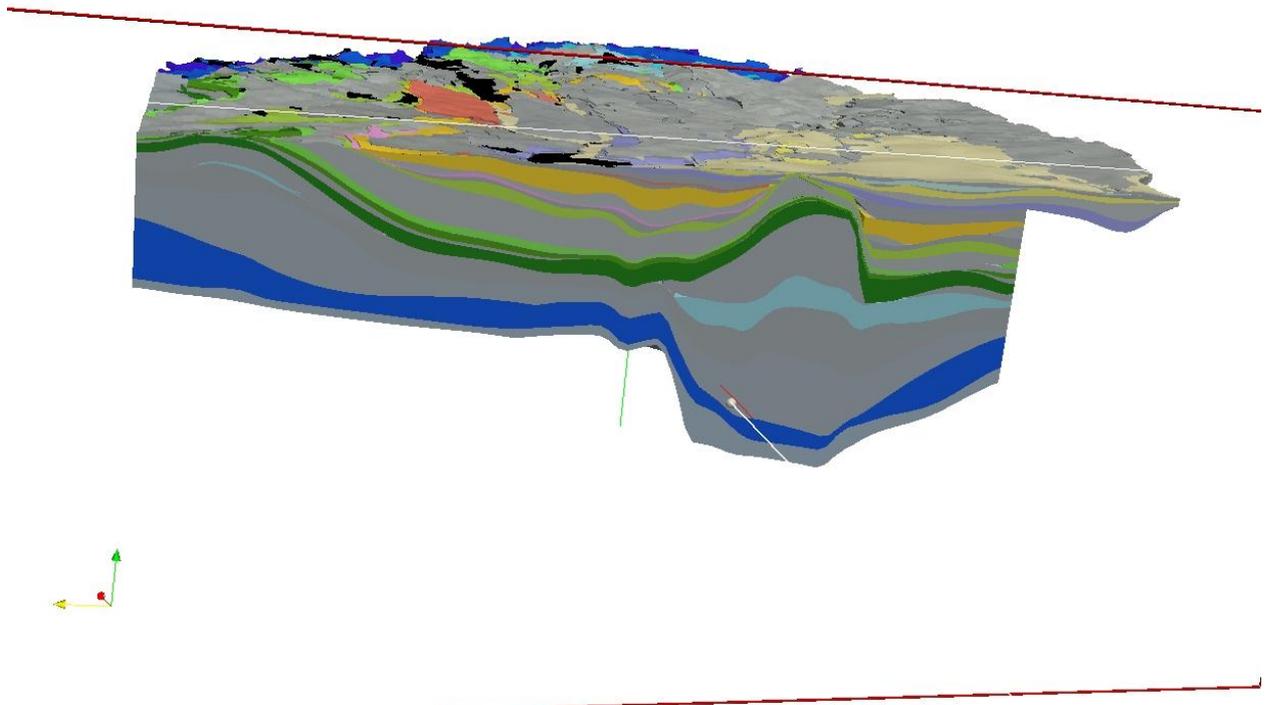
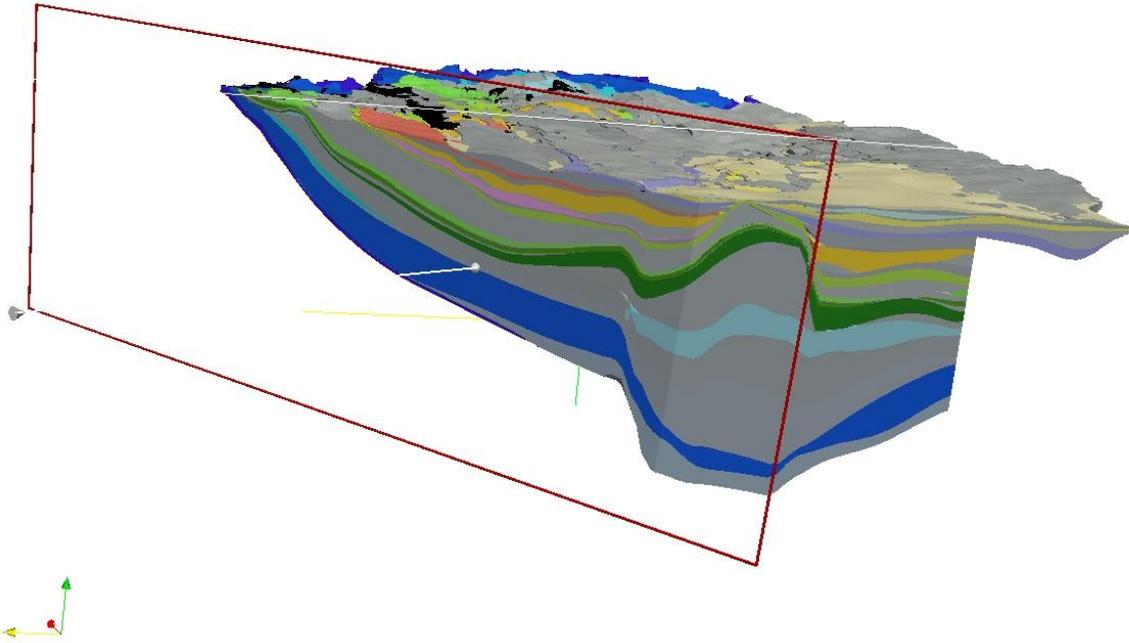
Toit de l'aquifère du Bajocien (m NGF)

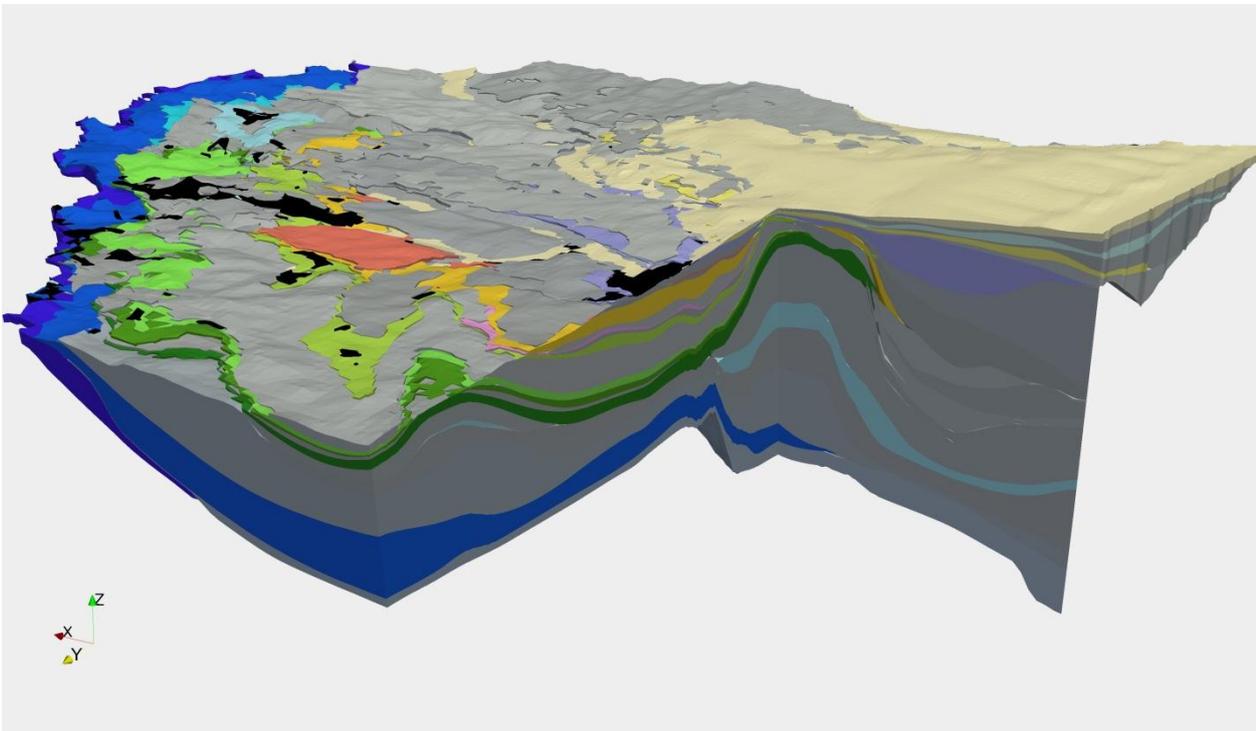
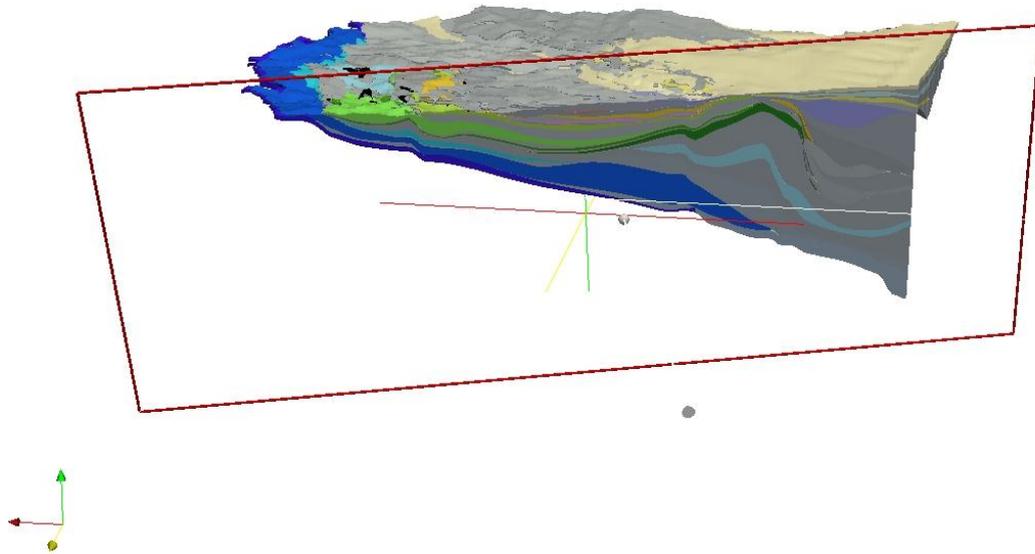


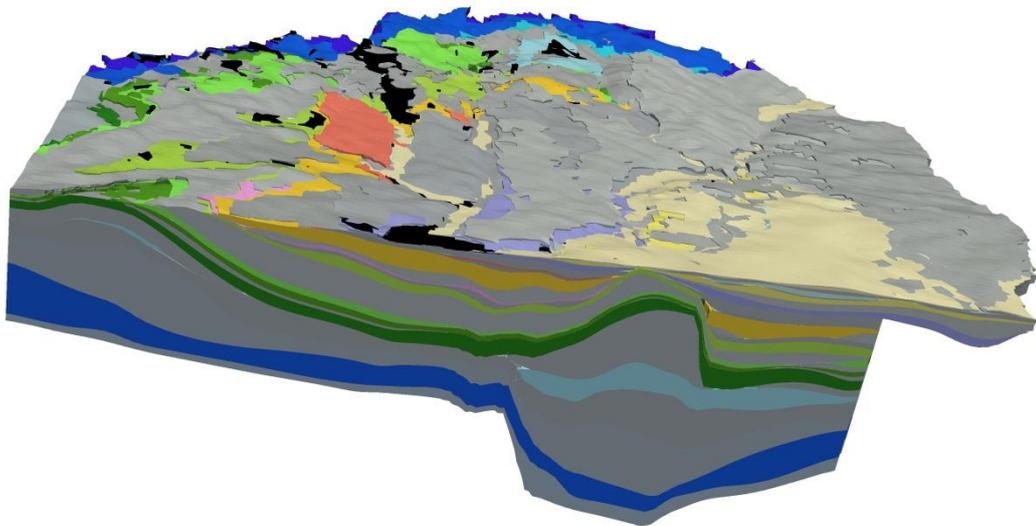
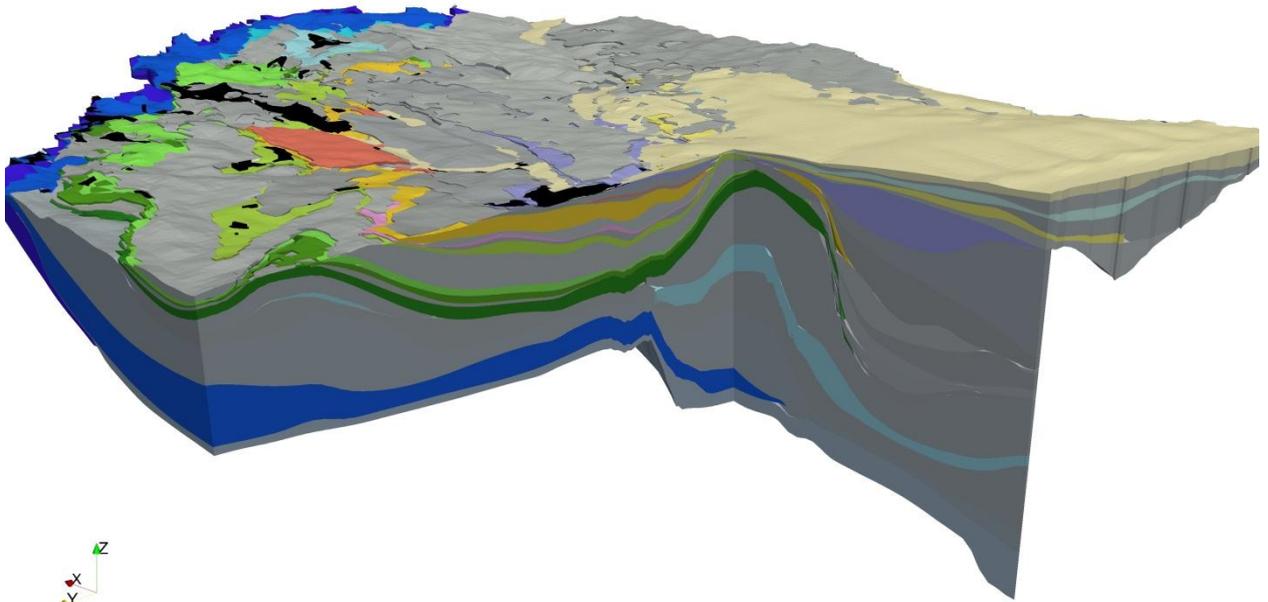
Mur de l'aquifère du Bajocien (m NGF)

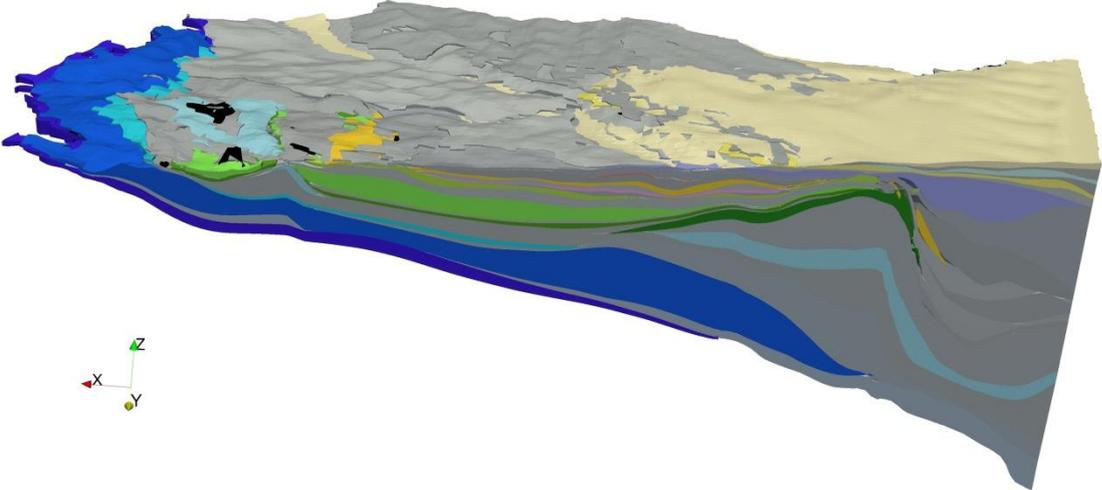
Annexe 5

Vues 3 D dans le modèle géologique











Géosciences pour une Terre durable

brgm

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

Direction régionale Aquitaine
Parc Technologique Europarc
24, avenue Léonard de Vinci
33 600 – Pessac - France
Tél. : 05 57 26 52 71