



SORBONNE
UNIVERSITÉ



POLYTECH[®]
SORBONNE



ISTeP
Institut
des Sciences
de la Terre
de Paris
UMR 7193 - SU - CNRS

01/03/2019-31/08/2019



Géosciences pour une Terre durable

brgm

RgF

RÉFÉRENTIEL
GÉOLOGIQUE
DE LA FRANCE

Bilan sédimentaire des bassins péri-alpins français

Maître de Stage : Nicolas Bellahsen

Co-encadrants : Jean-Baptiste Girault, Nicolas
Loget, Justine Briais, Eric Lasseur

Tutrice académique : Sara Lafuerza

Yoann Frémondère--Delétoile

POLYTECH SORBONNE – ST5

2018/2019

Abstract:

The sediment budget of French circum-alpine basins lets to understand the erosion of Alps and to observe the signal of exhumation of mountains. The study is located on different basins: 2 between Alps and Massif Central: Bresse and Bas-Dauphiné Rhône and 6 others in South-East: Carpentras, Aix-en-Provence, Manosque, Marseille, Saint-Martin-de-Crau and Camargue region. The goal is to obtain the best results of volume for each basin. We use seismic data for the center of Bresse basin, borderlines of Bresse basin were interpolated with basement data distributed by French Geological National Survey. For the others basins, we use the basement data too because seismic data are not available or not good quality. We create interpolated maps for each geological time between Eocene and Plio-Quaternary for all basins. The results give that the basin in North have Oligocene sediment like most important part of volume. In South, Miocene is the most important part of volume for these little basins, except Aix-en-Provence, Marseille, Camargue, where respectively Paleocene, Chattian and Rupelian sediment are the most important part of volume. These results compared to Kuhlemann results are lower than his results of an order of magnitude for each basin, but with the total volume and the estimations of Gulfe of Lion, which are similar between Leroux (2012) and Kuhlemann (2000), the volume is fast the same ($2,90778E+14$ m³ for us versus $5,79314E+14$ m³ for Kuhlemann).

Remerciement :

Je remercie Nicolas Bellahsen de m'avoir proposé un stage, même si le sujet de ce rapport n'avait rien à voir avec le sujet d'origine, mais merci de m'avoir fait confiance, un très grand Merci à toi !

Je remercie également les personnes qui étaient associés à ce sujet : JB, merci pour ta patience, de ton aide et de m'avoir fait briller les yeux sur la géologie, même si ça n'avance pas toujours ! Merci à Nicolas Loget, de m'avoir beaucoup aidé sur la biblio et ArcMap notamment. Merci vraiment et encore désolé si certaines choses m'ont échappé ^^

Merci à Alain Rabaute pour la partie ArcGIS et ses mystères, qui sont toujours des mystères pour les personnes d'ESRI ;-) et un grand merci aux personnes de l'ISTeP qui m'ont accueillies gentiment et m'ont aidé quand j'en avais besoin (surtout niveaux clefs et pass !)

Merci aux personnes du BRGM, notamment Justine et Eric pour leurs aides, sur la Bresse, le Bas-Dauphiné Rhône et la Savoie (même si la Savoie on attend encore ;-) et merci aux autres personnes du BRGM que j'ai pu oublier

Enfin, merci à Maxime, Laurianne, Tiphaine, Ella, Aurélie, Nicolas, Julia, Manon ... Tous les doctorants, stagiaires, tous dans la même galère, mais on avance et on s'en sort toujours ! Et un grand merci à mes proches qui m'ont toujours soutenues. La bise à vous tous !

PLAN :

Liste des figures	p.1
Liste des tableaux	p.1
Introduction	p.2
I) Contexte Géologique	p.3
I.a) Chaînes des Alpes	p.3
I.b) Bassins sédimentaires périphériques	p.4
I.b.i) Le bassin de la Bresse	p.4
I.b.ii) Le bassin du Bas-Dauphiné-Rhône	p.5
I.b.iii) Les bassins péri-ouest alpins	p.5
II) Matériels et méthodes	p.7
II.a) Données cartographiques, sismiques et géologiques	p.7
II.a.i) Le bassin de la Bresse	p.7
II.a.ii) Le bassin du Bas-Dauphiné-Rhône	p.7
II.a.iii) Les bassins péri-ouest alpins	p.7
II.b) Cartes isopaques	p.8
II.b.i) Mise en forme des données	p.8
II.b.ii) Interpolation	p.8
II.c) Interprétation sismique et calage avec des puits : exemple de la Bresse	p.9
II.c.i) Horizons sismiques	p.9
II.c.ii) Traitement des profils sismiques et Création des isochrones	p.9
II.c.iii) Paramètres pour la conversion des isochrones en isopaques	p.10
II.d) Calcul du volume sédimentaire	p.11
III) Résultats	p.11
III.a) Cartes d'interpolation	p.11
III.a.i) Le bassin de la Bresse	p.11
III.a.ii) Le bassin du Bas-Dauphiné-Rhône	p.12
III.a.iii) Les bassins péri-ouest alpins	p.13
III.b) Volume sédimentaire des différents bassins	p.15
III.b.i) Le bassin de la Bresse	p.15
III.b.ii) Le bassin du Bas-Dauphiné-Rhône	p.15
III.b.iii) Les bassins péri-ouest alpins	p.16
III.c) Carte récapitulative avec volumes et bassins	p.22
IV) Discussions	p.22
IV.a) La compaction	p.22
IV.b) Comparaison avec les données de Kuhlemann	p.23
Conclusions	p.25
Bibliographie	p.26
ANNEXE	p.29

Liste des figures :

- *Figure 1: Volume cumulatif par million d'années des Alpes de l'Ouest et suisses d'après Kuhlemann et al. (2002).....p.2*
- *Figure 2: Organisation d'un bassin d'avant-pays (modifié d'après Ricci Lucchi, 1986, DeCelles et Gilles, 1996 ; Burkhard et Sommaruga, 1998 ; Lacombe et Mouthereau, 2002)p.3*
- *Figure 3: Superficies des différents bassins étudiésp.6*
- *Figure 4 : Répartition du volume sédimentaire dans la Bresse pour le Cénozoïquep.15*
- *Figure 5 : Répartition du volume sédimentaire dans le Bas-Dauphiné Rhône pour le Cénozoïquep.16*
- *Figure 6 : Répartition du volume sédimentaire dans le bassin de Carpentras pour le Cénozoïquep.17*
- *Figure 7 : Répartition du volume sédimentaire dans le bassin d'Aix-en-Provence pour le Cénozoïquep.18*
- *Figure 8 : Répartition du volume sédimentaire dans le bassin de Manosque pour le Cénozoïquep.19*
- *Figure 9 : Répartition du volume sédimentaire dans le bassin de Marseille pour le Cénozoïquep.20*
- *Figure 10 : Répartition du volume sédimentaire dans le bassin de Saint-Martin-de-Crau pour le Cénozoïquep.21*
- *Figure 11 : Répartition du volume sédimentaire dans le bassin de la Camargue pour le Cénozoïquep.22*
- *Figure 12: Carte récapitulative des bassins (Nom, surface, volume total)p.22*
- *Figure 13: Taux de sédiment par million d'années calculée pour nos différents bassinsp.24*
- *Figure 14: Taux de sédiment par million d'années calculée pour nos différents bassins et le Golfe du Lion d'après Leroux (2012)p.24*
- *Figure 15: Taux de sédiment par million d'années d'après Kuhlemann et al. (2002)p.25*

Liste des tableaux

- *Tableau 1: Paramètres d'interpolation et leurs caractéristiquesp.8*
- *Tableau 2 : Vitesse de propagation dans différents horizons sismiques pour différents puits de la Bressep.10*
- *Tableau 2: Bilan sédimentaire dans le bassin de la Bressep.15*
- *Tableau 4 : Bilan sédimentaire dans le bassin du Bas-Dauphiné Rhônep.15*
- *Tableau 5 : Bilan sédimentaire dans le bassin de Carpentrasp.16*
- *Tableau 6 : Bilan sédimentaire dans le bassin d'Aix-en-Provencep.17*
- *Tableau 7 : Bilan sédimentaire dans le bassin de Manosquep.18*
- *Tableau 8 : Bilan sédimentaire dans le bassin de Marseillep.19*
- *Tableau 9 : Bilan sédimentaire dans le bassin de Saint-Martin-de-Craup.20*
- *Tableau 10 : Bilan sédimentaire dans le bassin de la Camarguep.21*
- *Tableau 11: Volume sédimentaire dans le Sud-Est de la France, d'après Kuhlemann et al. (2002)p.23*
- *Tableau 12: Volume sédimentaire calculée, avec des données de Leroux (2012)p.23*

Introduction :

Lors de l'orogénèse alpine, d'énormes quantités de sédiment ont été produites suite à l'érosion des massifs cristallins à partir de l'Oligocène (compression alpine). En aval des massifs, ces sédiments ont pu se déposer ou transiter dans des bassins d'avant-pays ou dans des rivières, fleuves, mers intérieures. Notre but est de quantifier ces volumes, mais comment faire ? Kuhlemann (2000) a fait un bilan sédimentaire des bassins périalpins sur toute l'Europe, nous donnant des résultats de volumes. Cependant, comment a-t'il fait pour déterminer ces volumes dans Kuhlemann (2000, *et al.* 2002) et ses courbes de volumes de sédiment par million d'années dans Kuhlemann *et al.* (2002) ? De plus, sur ces mêmes courbes, nous observons une diminution du volume de sédiment autour de 21 Ma, pourquoi une telle diminution alors que c'est le moment où les massifs alpins sont exhumés et érodés (Figure 1) ? A quel moment Le pic d'accumulation de sédiment est-il le plus fort ?

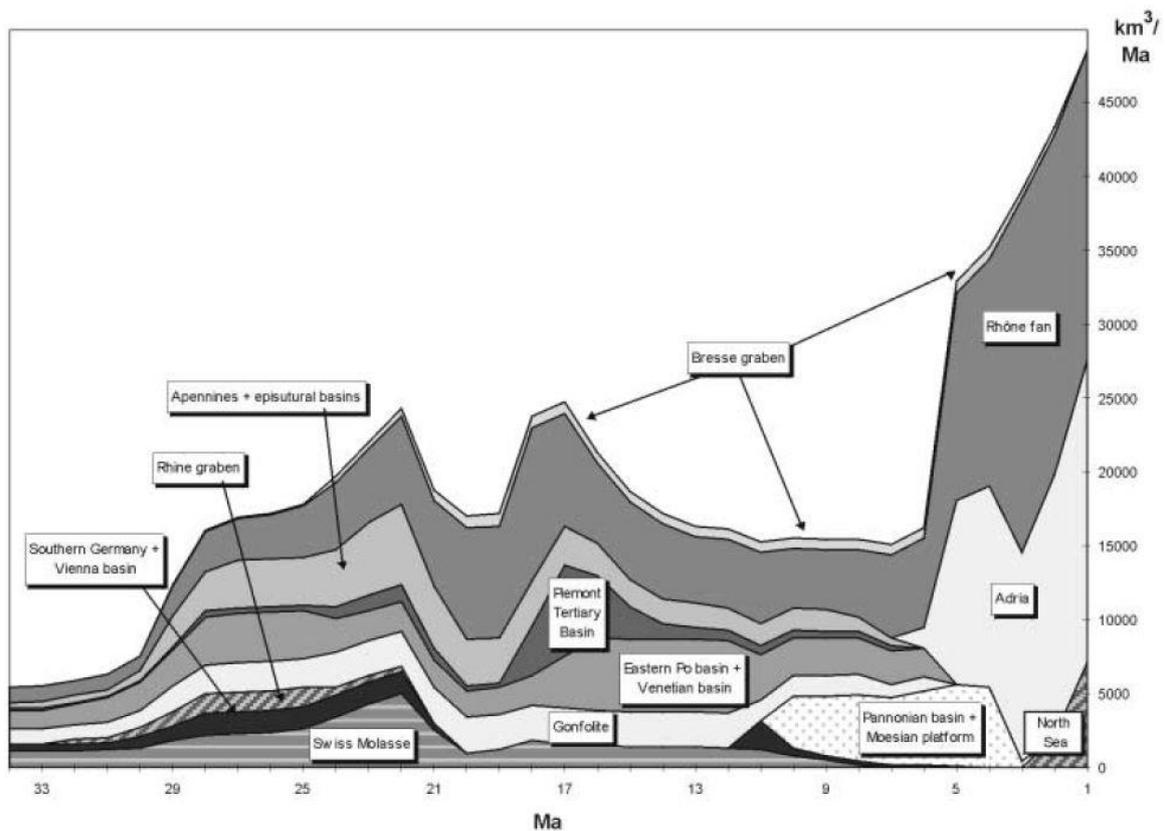


Figure 1: Volume cumulé par million d'années des Alpes de l'Ouest et suisses d'après Kuhlemann *et al.* (2002)

C'est pour répondre à ces questions que nous nous proposons de calculer les volumes sédimentaires de différents bassins ouest-alpins. Tout d'abord, nous expliquerons la formation de la chaîne alpine ainsi que des différents bassins qui seront étudiés, puis nous exposerons quelles ont été les données qui étaient à notre disposition et quelle a été la marche à suivre pour l'obtention des volumes pour tous les bassins. Enfin, nous comparerons nos données avec celles de Kuhlemann et discuterons des points à développer sur notre travail.

I) Contexte Géologique :
I.a) Chaînes des Alpes

L'histoire de la formation des Alpes résulte de la fermeture de l'Océan Liguro-piémontais par une subduction océanique sous la plaque Apulie, entre le Crétacé supérieur et jusqu'à l'Eocène inférieur et par une subduction continentale de l'extrémité de la marge européenne à l'Eocène moyen (e.g., Chopin, 1987). Puis la collision des deux croûtes continentales a lieu à partir de l'Oligocène. Elle se compose de deux domaines structuraux : la zone interne et la zone externe, séparées par une importante faille inverse traversant toute la croûte continentale : le front pennique. Il s'agit de l'accident majeur qui sépare les unités de la croûte européenne ayant subi la subduction océanique puis continentale sous la plaque Apulie des unités ayant subi seulement la collision continentale (e.g. Debelman, 1983 ; Agard et Lemoine, 2003).

Nous allons retracer l'évolution géodynamique de la région : au Trias s'effectue une première phase de rifting (dans la future zone interne), puis au Lias et cela amincie la lithosphère jusqu'à la création de l'Océan Ligure. La marge européenne se compose de 3 domaines (Lemoine et al., 1986 ; Agard et Lemoine, 2003 ; Mohn et al., 2012) : la zone Piémontaise, la partie la plus amincie et la plus distale proche de la transition Océan/Continent, la zone Briançonnaise, qui a un amincissement moins important et la zone Dauphinoise (équivalente de la zone Helvétique dans les Alpes Centrales) plus épaisse et proximale.

Une seconde phase de rifting, plus locale, débute au Jurassique (Manatchal et al., 2006), ouvre le domaine Valaisan, qui se refermera au cours du Crétacé supérieur par une subduction et la fermeture de l'océan Liguro-Piémontais (Stampfli, 2002).

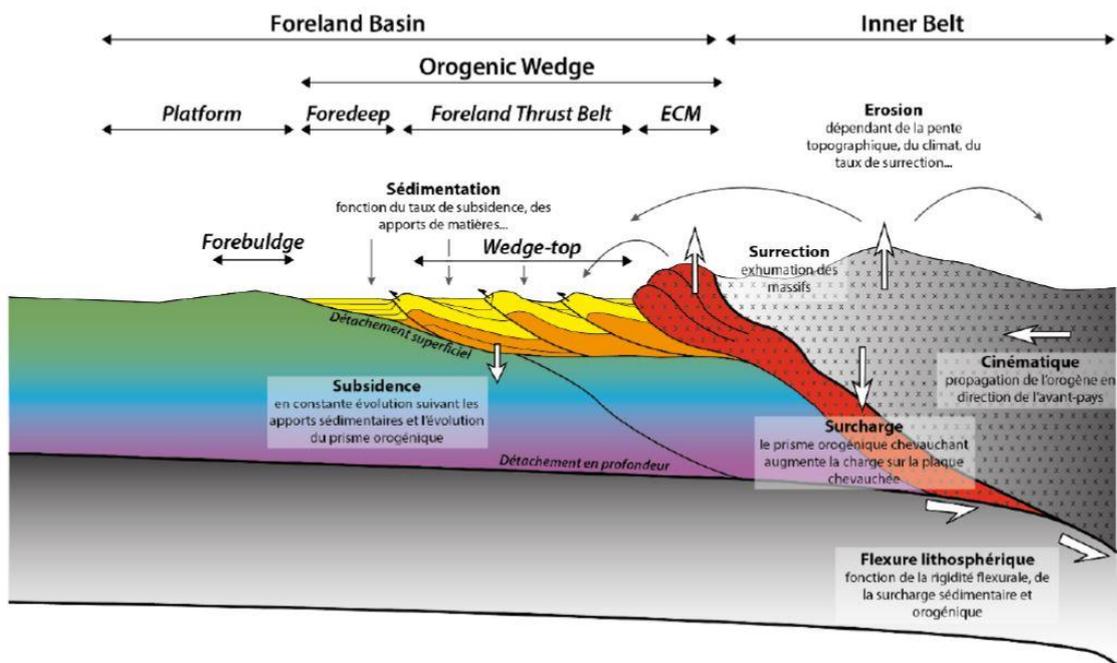


Figure 2: Organisation d'un bassin d'avant-pays (modifié d'après Ricci Lucchi, 1986, DeCelles et Gilles, 1996 ; Burkhard et Sommaruga, 1998 ; Lacombe et Mouthereau, 2002)

La collision alpine ne commence qu'à partir de l'Eocène, il y a environ 35 Ma. Elle réactive le front pennique (qui s'était formé lors de la subduction) et induit l'enfouissement d'une partie

de la zone externe sous la zone interne (Burkhard et Sommaruga, 1998). La partie de la marge proximale est alors partiellement enfouie et intégrée au prisme collisionnel. Un métamorphisme dans le faciès schiste-vert apparaît et un raccourcissement des Massifs Cristallins Externes (MCE) se fait (e.g. Rolland et al., 2003, 2008 ; Cenki-Tok et al., 2014). Après un pic de métamorphisme enregistré par les MCE, le front des déformations est propagé vers les zones les plus externes : les chaînes Subalpines, pendant que les MCE commencent à être exhumés (Boutoux et al., 2016). Ces déformations vont aussi faire apparaître dans le domaine Dauphinois un bassin d'avant-pays. Ce sont de grands chevauchements de nappes sur l'avant-pays qui provoquent une surcharge sur la plaque chevauchée, ce qui cause une flexure de la lithosphère et créer des bassins sédimentaires. Ces bassins se situent en dehors de la chaîne en surrection et se développe en parallèle de l'orogénèse (Figure 2). Différents paramètres influent dans la formation des bassins d'avant-pays des Alpes : la flexure de la lithosphère par isostasie à cause de la surcharge de l'orogène (Beaumont, 1981 ; Sinclair, 1997 ; Ford et al., 2004), comme dit précédemment, mais d'autres phénomènes interagissent avec cette surcharge : la tectonique via les déformations chevauchantes et les mouvements verticaux qui déclenchent la surcharge, les processus sédimentaires et d'érosion qui disparent cette surcharge sur toute la surface du bassin et enfin, la réponse flexurale de la lithosphère par équilibrage isostatique (Sinclair, 1991, 1997 ; Ford et al., 2004).

Ces trois processus ont donc une influence sur le remplissage et la stratigraphie de ces bassins. Ces derniers vont varier au cours du temps et de l'espace, avec la tectonique ou encore l'influence du climat par la modification des flux sédimentaires dans le temps (e.g., Homewood et al., 1999). Dans les bassins d'avant-pays, les flux sédimentaires sont d'origines diverses : ils peuvent provenir de la chaîne en surrection, du bombement flexural qui va créer du relief ou encore d'une production locale au sein du bassin (plateforme carbonatée). De plus, le niveau marin relatif est un autre paramètre à prendre en compte (locale sous l'influence de la tectonique ou globale sous l'influence du climat).

La géométrie et la lithologie de ces sédiments déposés dans le bassin nous donnent d'importantes informations sur l'évolution du bassin d'avant-pays avec le prisme orogénique (Allen et al., 1991 ; Sinclair, 1991, 1997 ; Homewood et al., 1999 ; Ford et al., 2004). En effet, la stratigraphie dans le bassin conserve l'enregistrement du développement du système prisme orogénique progradant et du bassin d'avant pays dans le temps (Sinclair, 1991).

I.b) Bassins sédimentaires périphériques

Dans notre cas, nous étudions le bassin bressan, le Bas-Dauphiné Rhône et de petits bassins dans le Sud-Est : Carpentras, Aix-en-Provence, Manosque, Marseille, Saint-Martin-de-Crau et la Camargue.

Notre zone d'étude se situe dans le Sud-Est de la France et résulte de la flexure de la croûte continentale suite à la collision, ou d'une zone de dépôts suite à l'érosion des Alpes ou une zone d'accumulation sur le chemin de la Mer Méditerranée.

I.b.i) Le bassin de la Bresse

Le bassin de la Bresse, ou graben de la Bresse, est un bassin qui a subi de l'extension puis de la compression. De l'Eocène à l'Oligocène, le bassin est en extension, se creuse et de gros dépôts salifères et calcaires se déposent, avec parfois des passées conglomératiques (Eocène supérieur, Rupélien). Il s'ouvre le long de l'axe Rhin-Rhône-Méditerranée. A l'Oligocène s'initialise la collision alpine, donc le bassin n'est plus en extension mais continue de

s'approfondir car il subit la compression alpine. Le Jura bloque le bassin contre le Massif Central et forme un bassin molassique d'avant pays, mais pas aussi développé que le bassin molassique savoyard (Oligocène supérieur/terminal – Miocène). Il se remplit de calcaires marneux. Il y a quelques émergences qui ont lieu, au milieu du Chattien, pendant le Burdigalien et le Messinien (crise messinienne en Méditerranée). Puis, le Plio-Quaternaire comble le bassin jusqu'à aujourd'hui.

I.b.ii) Le bassin du Bas-Dauphiné-Rhône

Le bassin du Bas-Dauphiné Rhône regroupe le Bas-Dauphiné, le couloir rhodanien près de Valence et une partie de la région de Valréas. Le Bas-Dauphiné est un carrefour où se rejoignent les dépôts apportés, d'une part du bassin bressan par la Saône et ses affluents, de l'autre du bassin molassique savoyard par le Rhône. Tant connecté aux deux bassins, il a subi les mêmes histoires géologiques, extension puis compression, donc a le même type de faciès sédimentaires, des molasses (d'eau douce ou de mer) venant du bassin savoyard, des évaporites du même type que le bassin bressan sur sa partie Nord, etc. Le Plio-Quaternaire recouvre aussi une bonne partie du bassin, la zone du bassin la plus profonde étant près de Valence, zone qui subit la subsidence comme la Bresse. Après Valence, il y a un goulot d'étranglement où les terrains mésozoïques affleurent abondamment, mais les terrains cénozoïques sont peu étendus et peu profonds. Plus au Sud nous arrivons dans les bassins du Sud-Est.

I.b.iii) Les bassins péri-ouest alpins

Le pourtour méditerranéen contient de nombreux petits bassins d'âge tertiaire, créés lors de la création des Alpes, le rapprochement de la plaque Apulie à la plaque européenne et le redressement de la Corse et de la Sardaigne. Nous avons décidé de prendre 6 bassins en compte pour le bilan sédimentaire, dont nous avons fait le découpage. Ces bassins sont les bassins de Carpentras, de Manosque, d'Aix-en-Provence, de Marseille, de Saint Martin de Crau et de la Camargue, cités plus haut (Figure 3).

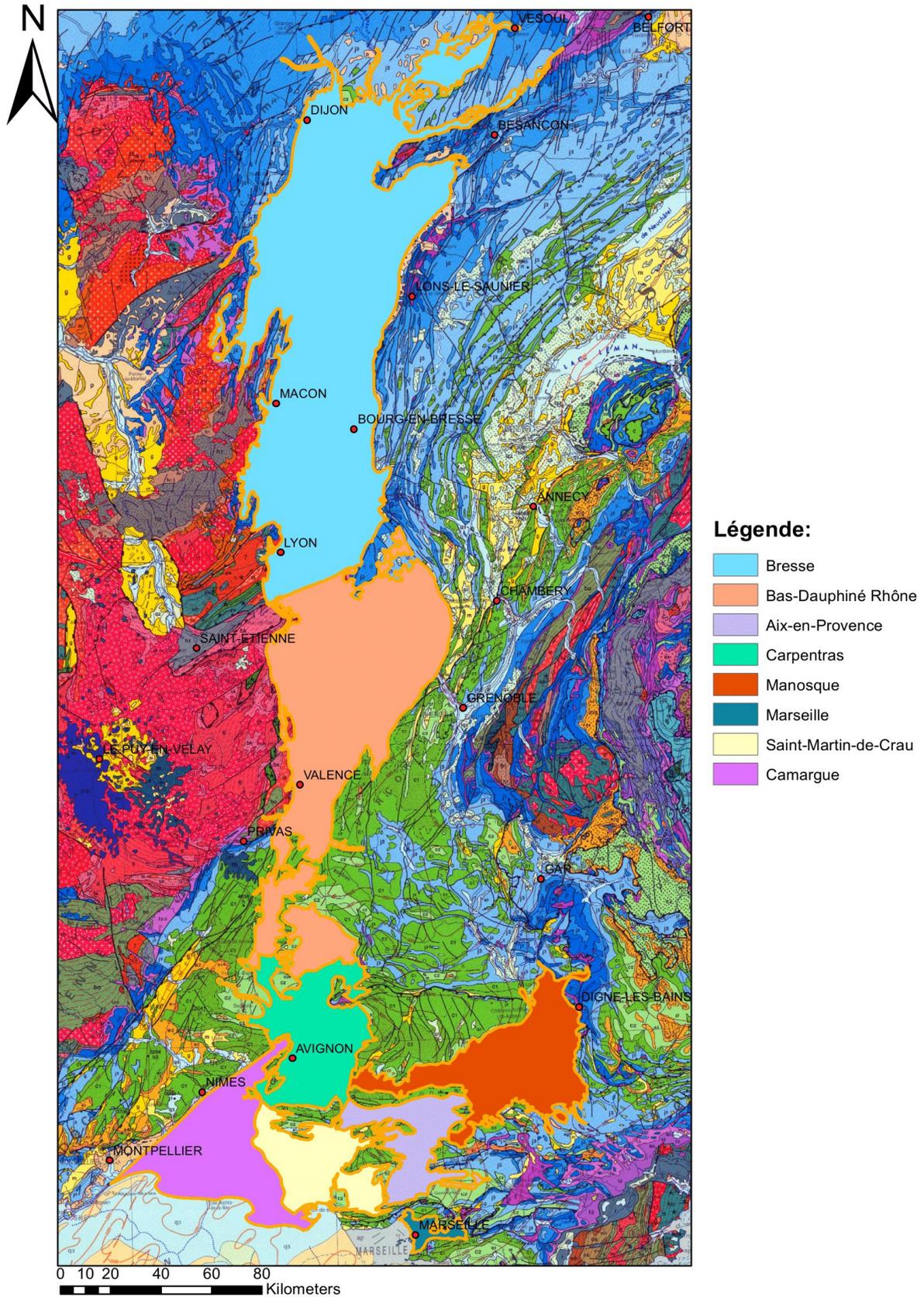


Figure 3: Superficies des différents bassins étudiés

II) Matériels et méthodes :

II.a) Données cartographiques, sismiques et géologiques

II.a.i) Le bassin de la Bresse

Pour étudier la Bresse, nous nous sommes inspirés du travail effectué par Couëffé et Tourlière (2008) qui ont élaboré des cartes isopaques pour le Plio-quadernaire et le Miocène ainsi que des cartes isohypses. Ces cartes ont été élaborées à partir de données de puits de la banque du sous-sol (BSS), de trois lignes sismiques et de travaux de master, qui ont fait de l'interprétation sismique sur des lignes de projection sismique et du calage de puits sur ces profils (placer les horizons obtenus par forage sur les profils). Ce travail a permis de calculer des cartes isopaques dans le cœur du bassin de la Bresse. Ma démarche de travail a été la suivante : (i) récupération sur le site « Infoterre » de tous les puits (forages, sondages, piézomètre, etc.) dans le bassin de la Bresse et importation dans ArcMap, (ii) Tri et récupération des cotes des différents toits d'horizons qui nous intéressent en sélectionnant les logs validés BRGM (il s'agit de log stratigraphique construit par le BRGM après examen de tous les documents fournis sur le puits et faisant un bilan assez détaillé des caractéristiques du puits : altitude, profondeur, type de sol et faciès sédimentaire, etc). Ces puits vont ensuite servir à calculer les interpolations des différents horizons sur les bords du bassin où il n'existe pas de lignes sismiques. Le centre du bassin est lui défini par la sismique, qui sera présenté plus loin dans le rapport. Le découpage du bassin nous donne une surface de 10570 km², il s'étend de Lyon au Sud, prend les régions des Dombes et de la Bresse en passant par Bourg-en-Bresse et Mâcon, puis se limite au Nord à Dijon et Vesoul.

II.a.ii) Le bassin du Bas-Dauphiné-Rhône

Pour le Bas-Dauphiné Rhône, nous avons repris les cartes élaborées par Couëffé et Tourlière (2008) : les cartes isopaques du Miocène et Plio-Quadernaire et les cartes isohypses des murs de l'Eocène, de l'Oligocène et du Miocène. Avec l'aide du BRGM (Justine BRIAIS), nous avons cherché à pouvoir améliorer ces cartes en mettant plus de précision, notamment à travers l'étude de lignes sismiques de campagne qui ont été faites sur la zone du bassin. Malheureusement par manque de temps, nous n'avons pas pu exploiter ces données. Le bassin a une surface de 6040,70 km², qui s'étend du Sud de Lyon jusqu'à Valréas en passant par Valence. Le bassin est large au Nord mais se rétrécit jusqu'à Valence, où le bassin correspond au couloir rhodanien, en plus d'une grande partie du bassin de Valréas. Couëffé et Tourlière (2008) ont utilisé deux lignes sismiques dans la partie centrale de la zone, au niveau du rétrécissement près de Valence, pour construire leurs cartes. De plus, pour prendre en compte le plus de surface possible pour les interpolations, des données de la BSS ont été utilisées et les cotes des horizons intéressants récupérés.

II.a.iii) Les bassins péri-ouest alpins

Ces bassins se situent le long et à l'Est du Rhône et le long de la Durance, limités à l'Ouest par le fossé de Nîmes. Le découpage des bassins a été fait en sorte de couvrir le plus de territoire possible contenant des terrains d'âge tertiaire. L'emprise totale sur le Sud-Est est de 8845 km², sachant que le bassin de Carpentras fait 1934 km², celui de Manosque 2309 km², celui d'Aix-en-Provence 1050 km², celui de Marseille 177 km², celui de Saint-Martin-de-Crau 1283 km² et

celui de la Camargue 2093 km². Là encore, les données de la BSS ont été utilisées pour recueillir le plus d'information possible pour les interpolations. Certains puits en dehors des bassins ont été pris en compte car ils permettent lors du calcul d'interpolation de limiter les étendues des terrains cénozoïques, car les terrains mésozoïques affleurent dans ces zones.

II.b) Cartes isopaques

Pour réaliser les cartes isopaques de tous les bassins, différentes étapes ont dû être suivies (sauf pour le Bresse car une partie de ces étapes n'étaient pas nécessaires) et qui vont être expliquées.

II.b.i) Mise en forme des données

Pour la zone du Bas-Dauphiné Rhône, nous avons récupéré et géoréférencé les cartes publiées par Couëffé et Tourlière (2008) sur ArcMap, puis avons numérisé les isolignes en renseignant les isopaques ou isohypses indiqués pour chaque carte utile. Les polygones créés sont ensuite décomposés en point afin de pouvoir générer des fichiers d'interpolation raster. Nous obtenons une banque de données de point avec leurs coordonnées spatiales et les valeurs d'épaisseur ou d'altitude d'un horizon géologique.

Pour contraindre les zones manquant de données isolignes, des données de la BSS ont été ajoutées dans la production des cartes raster.

Pour les autres bassins (Carpentras, Manosque, Aix-en-Provence, Marseille, Saint-Martin-de-Crau et la Camargue), les recherches déjà effectués sur ces zones ne permettent peu ou pas d'améliorer ou de calculer les calculs d'isopaques. Pour chaque bassin, un tri des données de la BSS a été fait en sélectionnant les puits ayant le plus d'informations nécessaires, permettant d'avoir à terme de bons calculs d'interpolation.

II.b.ii) Interpolation

Quel que soit le bassin, les données traitées, enregistrées sous la forme d'une banque de données de point, vont permettre de construire les cartes d'interpolation. Pour cela, nous avons utilisé la méthode d'interpolation de la pondération inverse à la distance (Inverse distance weighting – IDW), elle consiste à déterminer les valeurs de chaque cellule par la combinaison pondérée de manière linéaire d'un ensemble de points d'échantillonnage, pris autour de la cellule calculée. La pondération est faite à partir d'une fonction inverse à la distance. Cette méthode implique que l'influence d'une variable tracée diminue avec la distance par rapport à la cellule calculée. De plus, nous avons joué sur différents paramètres pour affiner nos cartes, qui sont la taille du pixel, le nombre de point pris en compte pour calculer l'interpolation et la distance maximale entre le point calculé et les données alentour nécessaire pour l'interpolation. Nous avons fait différents essais avec les paramètres suivants :

Tableau 1: Paramètres d'interpolation et leurs caractéristiques

		Nombre de point pris en compte dans l'interpolation		
		12	20	30
Taille du pixel	1000m de côté	a	b	c
	500m de côté	d	e	f

Comme nous pouvons le voir sur le Tableau 1 ci-dessus, différentes cartes, noté de « a » à « f » ont été testé sur les bassins de Bresse et du Bas-Dauphiné Rhône, à partir des cartes isopaques de Couëffé et Tourlière (2008). Nous avons fait varier la taille de pixel et le nombre de point pris dans l'interpolation. La distance entre le pixel calculé et les points permettant le calcul d'interpolation est variable (paramètre par défaut sur ArcMap), c'est-à-dire que, quelque soit la distance, le logiciel de calcul prendra en compte le nombre de point maximal rentré par l'utilisateur (Voir Annexe 1 pour l'exemple du Miocène dans la Bresse).

II.c)Interprétation sismique et calage avec des puits : exemple de la Bresse

Pour le bassin de le Bresse, le travail a été poussé plus loin. Couëffé et Tourlière (2008) ont établi des cartes isopaques produites à partir de seulement 3 lignes sismiques. Afin de mieux contraindre nos cartes, nous avons pris contact avec Justine Briais, géologue au BRGM, qui a travaillé récemment sur un set de données sismiques plus conséquent en Bresse.

II.c.i) Horizons sismiques

A travers le travail d'un stage de M2 d'il y a quelques années, la région de la Bresse s'est enrichie en données sismiques (par des campagnes de prospection sismique). Une carte avec différentes lignes sismiques, centré sur le centre du bassin, a été établi à partir de ces données, avec création des marqueurs montrant les horizons sismiques intéressants. Notre travail a permis d'étendre la surface d'information sismique vers le sud par l'apport de nouvelles lignes sismiques. Il a fallu tout d'abord repérer les interfaces qui nous intéressent dans ce bassin. A partir d'un log géologique du bassin, nous avons décidé de prendre les horizons sismiques suivants :

- Le toit du Cénozoïque
- Le toit de l'Eocène
- La discontinuité du Chattien, surface d'érosion entre le Chattien inférieur et le Chattien supérieur
- Le toit de l'Aquitaniens, là encore une surface d'érosion entre l'Aquitaniens et le Langhien (le Burdigalien étant absent dans ce bassin)
- Le toit du Miocène, nouvelle surface d'érosion entre le Serravalien/Tortonien et le Plio-Quaternaire
- Le toit du Plio-Quaternaire, la surface du sol.

Ces horizons permettent de découper les strates du bassin en parties bien définies :

- L'Eocène
- Le Rupélien – Chattien inférieur
- Le Chattien supérieur – Aquitaniens
- Le Langhien, Serravalien et Tortonien
- Le Plio-Quaternaire

II.c.ii) Traitement des profils sismiques et Création des isochrones

Ces horizons ont ensuite été reportés sur des puits à proximité des nouvelles lignes sismiques, et avec le travail fait auparavant par l'autre étudiant, nous avons prolongé ses marqueurs

sismiques sur nos nouvelles lignes. Elles partent du horst de Cormuz (Sud du bassin de la Bresse) et vont vers le Sud. Nous avons propagé les marqueurs sismiques sur toutes les lignes ajoutées. Puis, nous avons construit une nouvelle grille sur le bassin de la Bresse et lancé la construction de cartes isochrones des marqueurs sismiques sur Seisvison. Ce dernier nous a donné une taille par défaut de pixel de 1522,5m de côté pour ce bassin.

II.c.iii) Paramètres pour la conversion des isochrones en isopaques

Nous avons dû faire des opérations de conversion pour pouvoir les ouvrir et afficher sous ArcMap, car les cartes isochrones transmises par le BRGM étaient sous le format « .xyz » et que ArcMap n'accepte pas ce format. Une fois les conversions finies, nous pouvons commencer à calculer les isopaques avec la relation $d = v \times t$, qui nous dit que pour avoir la distance (ce qui revient à l'épaisseur dans notre cas), il nous faut la vitesse de propagation et le temps. Les isochrones sont en ms, mais la vitesse de propagation n'est pas connue. Nous avons décidé de calculer une vitesse moyenne pour tout le bassin. A partir des essais fait sur les puits, des graphiques temps-profondeur ont été tracés et nous avons calculé les vitesses de propagation pour chaque couche sur chaque puit. Puis nous avons calculé une vitesse moyenne pour les différents horizons, comme montré sur le Tableau 2 ci-dessous :

Tableau 2 : Vitesse de propagation dans différents horizons sismiques pour différents puits de la Bresse

Nom du Puit	Eocène	Rupélien- Chattien inférieur	Chattien supérieur- Aquitaniien	Langhien, Serravalien et Tortonien	Plio- Quaternaire
Bresse 1 (BR1)	3574,4 m/s	3200 m/s	2450 m/s	2615,4 m/s	2060,6 m/s
Bresse 101 (BR 101)	848,6 m/s	1440 m/s	1400 m/s	2187,5 m/s	1907,1 m/s
Menetreuil (MEN-CD1)	3133,3 m/s	3000 m/s	2285,7 m/s	1863,8 m/s	1200 m/s
Montcoy 1 (MCY1)	2627,1 m/s	1960,8 m/s	2312,5 m/s	1294,1 m/s	1490,2 m/s
Bresse Sud 1 (BRS1)	-	3105,5 m/s	2232,6 m/s	2087,6 m/s	1955,6 m/s
Moyenne vitesse par couches géologiques	1840,9 m/s	2541,3 m/s	2136,2 m/s	2009,7 m/s	1722,7 m/s

Une fois ces vitesses connues, nous avons lancé le calcul suivant dans la table attributaire pour convertir les isochrones en isopaques :

$$e_{ij} = v_i \times (t_{ij} \times 10^{-3})$$

Où e est l'épaisseur en m de la couche i dans le pixel j, v la vitesse moyenne en m/s de la couche i et t le temps en ms pour la couche i dans la cellule j, sachant que le calcul se fait sur tous les j

II.d) Calcul du volume sédimentaire

Lorsque les valeurs d'épaisseurs des différentes couches sont connues, il ne nous reste plus que le calcul du volume. En ayant une épaisseur, il nous faut connaître la surface de chaque pixel pour déterminer le volume de sédiment pour chaque couche dans chaque pixel. Il suffit de faire une somme pour voir le volume total sur tout le bassin.

La taille du pixel a été déterminé lors de l'interpolation des données : 1522,5 m de côté pour la Bresse et le Bas-Dauphiné Rhône et 500 m pour les bassins du Sud-Est. Nous avons mis la même taille de pixel aux deux premiers bassins car leurs tailles sont similaires, les bassins du Sud-Est étant plus petits, et par rapport à la répartition des données de la BSS, une taille de 500 m de côté nous a semblé plus appropriée.

Pour la suite, nous appliquons la relation suivante : $\sum_{ij} V_{ij} = \sum_{ij} e_{ij} \times S_{ij}$ où V est le volume de la couche i en m³, e l'épaisseur en m, S la surface du pixel, i la couche et j un pixel de la couche i. Tous ces calculs se font dans la table attributaire dans ArcMap en deux étapes, calcul de la surface pour les pixels, puis le calcul du volume.

III) Résultats

III.a) Cartes d'interpolation

A cause de la taille des cartes, toutes les cartes ont été mises en annexe. Elles y seront plus lisibles et nous y ferons référence dans les différents paragraphes concernés.

III.a.i) Le bassin de la Bresse

- Eocène :

Les dépôts éocènes les plus importants se situent le long de la bordure Est du bassin, à Bourg-en-Bresse et à l'Ouest de Lons-le-Saunier et au Nord-Ouest au Sud de Dijon. Les épaisseurs peuvent atteindre entre 1500 m au minimum et jusqu'à plus de 2800 m. Nous pouvons observer sur la carte (Annexe 2.1) une transversale Sud-Ouest/Nord-Est (SW-NE) où les dépôts éocènes sont très faibles, entre 0 et 200 m d'épaisseur, séparant les deux dépôts centre principaux. Le reste du bassin contient des épaisseurs entre 200 et 500 m.

- Rupélien – Chattien inférieur :

Sur cette première période de l'Oligocène, les dépôts dans ce bassin sont nettement moins importants. Nous pouvons voir sur l'Annexe 2.2 que les plus grandes épaisseurs atteignent environ 900 m, sur la bordure Est du bassin (Bourg-en-Bresse et à l'Ouest de Lons-le-Saunier), alors qu'à l'Ouest, les épaisseurs sont plus faibles (0 à 100 m).

- Chattien supérieur – Aquitanien :

Pour la seconde partie de l'Oligocène, les dépôts centre sont plus disparates que les cartes précédentes. L'Annexe 2.3 nous montre que les isopaques maximales se situent au Sud du bassin de la Bresse sur la bordure Ouest, entre Lyon et Mâcon, où ils atteignent environ 500 m au maximum. Sur la bordure Est, des zones locales de dépôts arrivent à ces épaisseurs mais ne sont pas aussi étendues qu'à l'Ouest. Dans la partie Nord du bassin, nous retrouvons la transversale SW-NE, bordée de part et d'autre par de petites zones de dépôts atteignant entre 300 et 400 m d'épaisseur. Ailleurs, les épaisseurs restent faibles, toujours comprises entre 0 à 200 m.

- Langhien-Serravalien-Tortonien (Miocène) :

Le Burdigalien étant une période d'émersion dans le bassin de la Bresse, les dépôts miocènes débutent entre Langhien et le Serravalien. Le dépôt centre au Sud du Bassin repasse sur la bordure Est, dans la région de Bourg-en-Bresse, avec des épaisseurs de 900 m environ au maximum. Nous retrouvons la transversale SW-NE avec de faibles valeurs d'isopaque (0 à 200 m) avec de petits dépôts dont les épaisseurs ne dépassent pas 300 m, comme nous pouvons le voir sur l'Annexe 2.4.

- Plio-Quaternaire :

La dernière période géologique nous donne de plus grandes zones de dépôts, avec des valeurs d'isopaque beaucoup plus importantes (Annexe 2.5). Jusqu'à 900 m sur la zone de Bourg-en-Bresse, qui s'étend vers la bordure Ouest au Sud du bassin avec 600 m d'épaisseur. Au Nord, la transversale SW-NE se voit bien, avec des épaisseurs d'environ 400 m bordée par des zones de plus fortes épaisseurs entre 600 et 800 m.

III.a.ii) Le bassin du Bas-Dauphiné-Rhône

- Eocène :

Dans ce bassin, comme nous pouvons voir sur l'Annexe 3.1, l'interpolation de l'éocène n'a pas pu couvrir toute la surface, par manque de données pour cet âge géologique. L'interpolation nous montre que les zones où les épaisseurs sont les plus importantes se situent dans la région de Valence et à son Sud dans le couloir rhodanien. Elles sont comprises entre 1500 m et 2000 m maximum. Au Nord de Valence, les valeurs d'isopaque sont plus faibles et variables (entre 0 et 500 m). Au Sud du bassin, dans la région de Valréas, les épaisseurs sont entre 200 m et 600 m. Ailleurs, les données sont absentes.

- Oligocène :

Pour l'Oligocène, les données sont plus nombreuses et nous donnent une meilleure interpolation qu'à l'Eocène (Annexe 3.2). Nous pouvons voir qu'il existe un dépôt centre très important centré sur Valence avec une petite extension vers le Nord-Est, où les isopaques sont comprises entre 1000 m sur les bords de ce dépôt centre et 1900 m en son cœur. Au Nord du bassin, les épaisseurs sont plus faibles : entre 100 m et 500 m au Nord-Ouest et entre 100 m et 200 m au Nord-Est. Pour le Sud du bassin, les données sont manquantes, sauf dans la région de Valréas où les épaisseurs sont faibles comme au Nord.

- Miocène :

Au Miocène, les données sont satisfaisantes pour que l'interpolation couvre l'ensemble du bassin du Bas-Dauphiné Rhône (Annexe 3.3). Nous pouvons y observer que le dépôt centre change de région et se forme au cœur du Bas-Dauphiné, dont les épaisseurs sont entre 500 m et 700 m. La zone de dépôt se poursuit vers le Sud en suivant le Rhône avec des isopaques entre 200 m et 400 m. Le bassin de Valréas se forme au Sud avec des épaisseurs pouvant atteindre 600 m. Dans l'actuel couloir rhodanien, les valeurs sont faibles et ne dépasse pas les 100 m.

- Plio-Quaternaire :

Sur l'Annexe 3.4, nous pouvons voir que le Plio-Quaternaire est très superficiel dans ce bassin, les épaisseurs sont comprises en moyenne entre 0 et 100 m, avec des zones où il est inexistant.

III.a.iii) Les bassins péri-ouest alpins

- Paléocène (Annexes 4.1, 5.1, 6.1, 7.1, 8.1 et 9.1) :

Le Paléocène n'est pas présent dans tous les bassins. Les bassins de Manosque, Marseille et Saint-Martin-de-Crau n'en ont pas, mais ceux d'Aix-en-Provence, de Carpentras et de la Camargue en ont. Celui de Carpentras est celui avec les dépôts les plus faibles (ne dépasse pas les 50 m), tandis que celui d'Aix-en-Provence en contient un peu plus au Sud de son bassin (200 m en moyenne), le reste du bassin avec des épaisseurs variant entre 0 et 150 m. Le bassin de la Camargue a un dépôt centre important au Sud-Ouest, avec au plus épais 1800 m.

- Eocène (Annexes 4.2, 5.2, 6.2, 7.2, 8.2 et 9.2) :

Les bassins de Manosque et Marseille n'ont pas d'éocène. Les bassins d'Aix-en-Provence, Carpentras et de la Camargue ont respectivement au Sud-Est, à l'Est et au Sud des zones avec des épaisseurs plus importantes (200 m pour les deux premiers, 400 m pour la Camargue) que le reste de leurs bassins. Pour le bassin de Saint-Martin-de Crau, le manque de données pour l'éocène a conduit à une carte, qui ne peut pas être représentative du bassin. Néanmoins, nous pouvons supposer que l'éocène est pelliculaire dans ce bassin comme dans les autres.

- Oligocène (Annexes 4.3, 4.4, 5.3, 5.4, 6.3, 6.4, 7.3, 7.4, 8.3, 8.4 et 9.3) :

La plupart des bassins ont un découpage dans l'Oligocène (Rupélien et Chattien), sauf pour le bassin de la Camargue où les données étaient plus précises pour l'ensemble de l'Oligocène. Dans ce bassin, nous observons deux dépôts centre, un à l'Ouest où le cœur dépasse 2800 m d'épaisseur, l'autre à l'Est allant jusqu'à 1200 m d'épaisseur environ. Le reste du bassin est hétérogène, avec des isopaques variant de 0 à 500 m au plus près des dépôts centre.

Dans le bassin d'Aix-en-Provence, le Rupélien est pelliculaire, il ne dépasse pas les 50m d'épaisseur et se situe exclusivement au Sud du bassin. Le Chattien recouvre une plus grande surface du bassin, hormis une partie du Nord-Ouest, son épaisseur varie entre 0 et 100 m, mais la majeure partie de la surface a une épaisseur inférieure à 50 m.

Pour le bassin de Carpentras, le Rupélien est plus épais que le Chattien. Dans le Sud du Bassin, les isopaques sont comprises entre 100 et 200 m, à l'Est entre 50 et 150 m, le reste du bassin entre 0 et 50 m. Au Nord-Est, un petit dépôt centre existe près de Vaison-la-Romaine et atteint environ 650 m d'épaisseur, avec un gradient d'épaisseur du Nord vers le Sud de cette région. Le Chattien est quasi inexistant, un petit dépôt au Nord ne dépassant pas 50 m d'épaisseur.

Pour le bassin de Manosque, c'est similaire à celui de Carpentras. Le Rupélien concentre les plus grandes épaisseurs de l'Oligocène avec une importante isopaque sur la bordure Nord du bassin, atteignant 700 m en son cœur et 100 m à ses limites. Le reste de la surface a une épaisseur entre 0 et 100 m. Le Chattien est plus réduit car sur la plupart du bassin, l'épaisseur ne dépasse pas 100 m.

Dans le bassin de Marseille, c'est l'inverse : le Rupélien est inexistant près de la côte, ne dépassant pas 50 m à l'Est, le Chattien est par contre très important. Des épaisseurs sont localisées à l'Ouest près de la Méditerranée, avec des valeurs entre 150 et 750 m. A l'Est, il est inexistant. Sur le reste du bassin, il est peu épais (entre 0 et 150 m).

Enfin, le bassin de Saint-Martin-de-Crau a des épaisseurs de Rupélien, mais le Chattien est inexistant. Au Nord, entre 150 et 300 m de sédiments rupéliens forme un petit bassin, le reste du bassin ayant une épaisseur entre 0 et 150 m.

- Aquitanien (Annexes 4.5, 5.5, 6.5, 7.5, 8.5 et 9.4) :

L'Aquitanien n'est pas présent dans les bassins de Marseille et d'Aix-en-Provence.

Dans le bassin de Carpentras, l'Aquitanien a une faible épaisseur (entre 0 et 50 m), sauf au centre du bassin où il peut atteindre 100 m. De même dans le bassin de Saint-Martin-de-Crau, l'épaisseur est entre 0 et 100 m, sauf au Nord-Est où une petite zone de dépôt ressort, avec une épaisseur maximum de 300 m. Dans les deux derniers bassins, les dépôts de l'Aquitanien sont plus importants. Celui de Manosque a un dépôt centre au Nord du bassin, entre 0 et 800 m d'épaisseur, le reste du bassin entre 0 et 100 m. Pour la Camargue, les dépôts centre sont dispersés entre l'Ouest et l'Est, avec des isopaques comprises entre 200 et 700 m.

- Burdigalien (Annexes 4.6, 5.6, 6.6, 7.6, 8.6 et 9.5) :

Le Burdigalien n'est pas présent dans le bassin de Marseille, mais dans les autres il l'est.

Dans le bassin d'Aix-en-Provence, le Burdigalien est pelliculaire, ne dépassant rarement les 50 m d'épaisseur. Il est surtout présent au Nord du bassin. Dans le bassin de Carpentras, le Burdigalien est présent sur toute la surface du bassin. L'épaisseur est comprise entre 0 et 100 m, avec deux petits dépôts centre à l'Ouest et l'Est entre 150 et 300 m d'épaisseur. Dans le bassin de Manosque, un grand dépôt est présent au Nord du bassin avec des épaisseurs comprises entre 100 et 700 m, le reste du bassin ne dépassant pas les 100 m. Dans le bassin de Saint-Martin-de-Crau, un dépôt s'est formé au Nord du bassin, contenant des isopaques d'environ 200 m. L'étang de Berre, au Sud-Est du bassin ne contient pas de Burdigalien. Dans le bassin de la Camargue, deux dépôts centre se distinguent avec des épaisseurs entre 150 et 900 m, le reste du bassin ne dépassant pas 150 m.

- Miocène (Annexes 4.7, 5.7, 6.7, 7.7, 8.7 et 9.6) :

Le Miocène correspond à la période Langhien-Messinien. Pour cette période, il n'y a pas de Miocène dans le bassin de Marseille.

Dans le bassin d'Aix-en-Provence, les dépôts miocènes recouvrent une bonne partie du bassin et les épaisseurs varient entre 0 et 150 m. Dans le bassin de Carpentras, l'épaisseur du Miocène est entre 0 et 50 m, mais il existe de nombreuses petites zones de dépôts dans le bassin allant jusqu'à 200 m d'épaisseur et un gros dépôt centre au Nord, près de Vaison-la-Romaine, avec des isopaques allant de 150 à 700 m. Dans le bassin de Manosque, la majorité du bassin a une épaisseur ne dépassant pas 100 m, excepté au Nord du bassin où un gros dépôt centre s'est formé avec des isopaques allant jusqu'à 1000 m. Dans le bassin de Saint-Martin-de-Crau, les épaisseurs les plus importantes se situent au Nord du bassin (150-300 m), le reste ne dépassant pas 100 m. Dans le bassin de la Camargue, le centre du bassin est dépourvu de Miocène. Mais de chaque côté, les épaisseurs sont plus importantes avec de petites zones de dépôts avec des épaisseurs entre 150 et 600 m.

- Plio-Quaternaire (Annexes 4.8, 5.8, 6.8, 7.8, 8.8 et 9.7) :

Dans les bassins d'Aix-en-Provence, Carpentras, Marseille et Saint-Martin-de-Crau, l'épaisseur du Plio-Quaternaire est faible et ne dépasse pas 50-100 m, sur toute la surface des différents bassins. Dans le bassin de Manosque, un dépôt centre est présent dans la partie Nord du bassin. L'épaisseur peut y atteindre 800 m, tandis que le reste du bassin est compris entre 0 et 100 m. Dans le bassin de la Camargue, au contraire, la plus grande partie du bassin a de grande épaisseur de Plio-Quaternaire, au minimum 100 m, au maximum 800 m.

III.b) Volume sédimentaire des différents bassins

III.b.i) Le bassin de la Bresse

Tableau 3: Bilan sédimentaire dans le bassin de la Bresse

Ages	Volume (m3)	Répartition du volume sédimentaire de la Bresse dans le Tertiaire (%)
Eocène	3,24204E+12	29,8
Rupélien - Chattien inférieur (1)	1,64073E+12	15,1
Chattien supérieur – Aquitanien (2)	1,46748E+12	13,5
Oligocène (=1+2)	3,10821E+12	28,6
Langhien - Serravalien - Tortonien	1,37771E+12	12,7
Plio-Quaternaire	3,16119E+12	29,0
Total du Cénozoïque	1,08892E+13	100

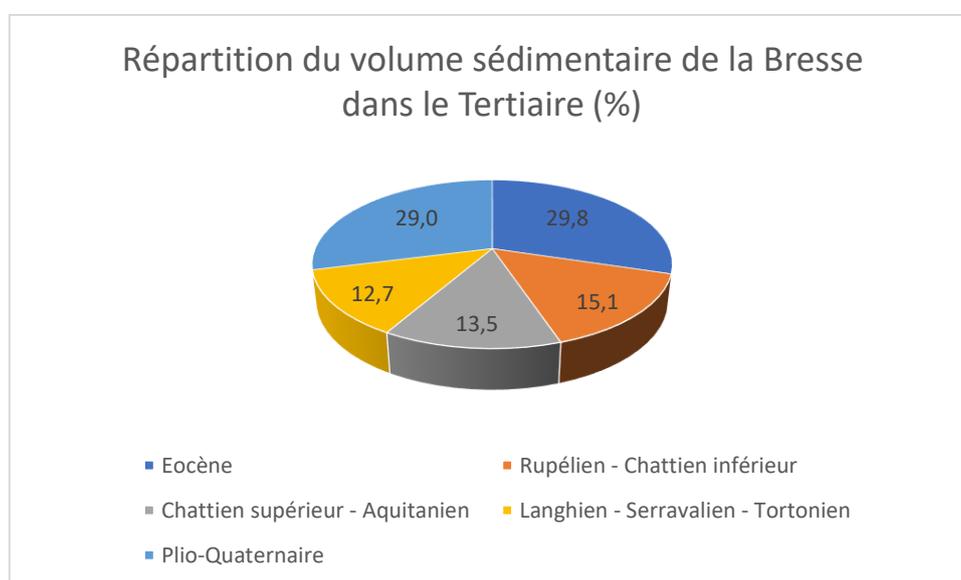


Figure 4 : Répartition du volume sédimentaire dans la Bresse pour le Cénozoïque

Le Tableau 3 et la Figure 4 nous montre que le volume de sédiment dans la Bresse est très important, le plus grand comparé aux autres bassins. L'Eocène, l'Oligocène et le Plio-Quaternaire représentent respectivement 29,8%, 28,6% et 29%, soit près de 90% du volume total, distribué à part égal. Le Miocène avec 12,7% est la plus faible part, alors qu'il regroupe plusieurs temps géologiques.

III.b.ii) Le bassin du Bas-Dauphiné-Rhône

Tableau 4: Bilan sédimentaire du bassin du Bas-Dauphiné Rhône

Ages	Volume (m3)	Répartition du volume sédimentaire du Bas-Dauphiné Rhône dans le Tertiaire (%)
Eocène	9,46364E+11	19,70887
Oligocène	2,1542E+12	44,86322
Miocène	1,55765E+12	32,43946
Plio-Quaternaire	1,43497E+11	2,988452
Total du Cénozoïque	4,80171E+12	100

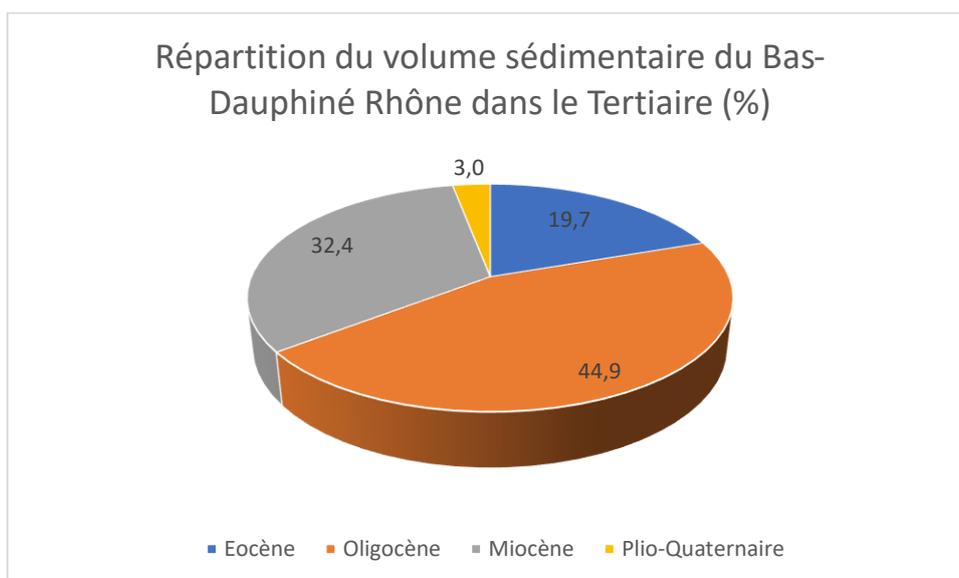


Figure 5: Répartition du volume sédimentaire dans le Bas-Dauphiné Rhône pour le Cénozoïque

Dans le Bas-Dauphiné Rhône, la part la plus importante revient à l'Oligocène avec près de 45% du volume total, le Miocène vient ensuite avec 32,4%, puis l'Eocène avec environ 20%. Le Plio-Quaternaire ne représente seulement 3% du volume total du bassin (Tableau 4, Figure 5). Ce volume global est nettement inférieur à celui de la Bresse puisque qu'un ordre de grandeur les sépare.

III.b.iii) Les bassins péri-ouest alpins

- Bassin de Carpentras

Tableau 5: Bilan sédimentaire du bassin de Carpentras

Ages	Volume (m ³)	Répartition du volume sédimentaire dans le bassin de Carpentras dans le Tertiaire (%)
PALEOCENE	2485416511	0,6
EOCENE	1,9825E+10	4,8
RUPELIEN	6,4399E+10	15,5
CHATTIEN	1536974535	0,4
AQUITANIEN	9775765452	2,4
BURDIGALIEN	1,0594E+11	25,5
MIOCENE	1,8015E+11	43,4
PLIOQUATERNAIRE	3,0765E+10	7,4
Total du Cénozoïque	4,1488E+11	100

Dans le bassin de Carpentras, c'est le Miocène qui représente la plus grande part du volume total avec environ 70%, vient ensuite l'Oligocène qui représente environ 16%, puis le Plio-Quaternaire avec 7,4% et l'Eocène avec 4,8%. Le Paléocène ne représente que 0,6%, ce qui est négligeable devant le volume total. Ce dernier est plus petit que les deux volumes

précédents, d'un ordre de grandeur avec le Bas-Dauphiné Rhône et de deux ordres de grandeur avec la Bresse (Tableau 5, Figure 6).

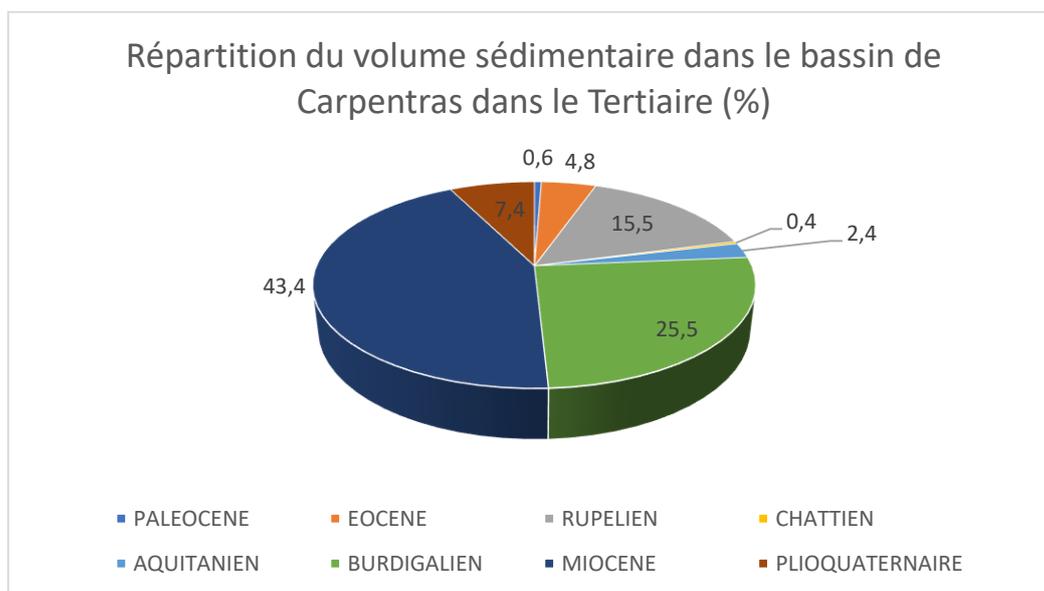


Figure 6: Répartition du volume sédimentaire dans le bassin de Carpentras pour le Cénozoïque

- Bassin d'Aix-en-Provence

Tableau 6: Bilan sédimentaire dans le bassin d'Aix-en-Provence

Ages	Volume (m3)	Répartition du volume sédimentaire dans le bassin d'Aix-en-Provence dans le Tertiaire (%)
PALEOCENE	64407646088	42,9
EOCENE	34744361048	23,2
RUPELIEN	222056188,9	0,1
CHATTIEN	16782108173	11,2
AQUITANIEN	0	0,0
BURDIGALIEN	3303924428	2,2
MIOCENE	27236649661	18,1
PLIOQUATERNAIRE	3371306057	2,2
Total du Cénozoïque	1,50068E+11	100

Dans le bassin d'Aix-en-Provence, le Tableau 6 et la Figure 7 nous montre que le paléocène représente la plus grande part du volume total, avec environ 43%, puis l'Eocène avec environ 23%. Le Miocène et l'Oligocène suivent avec respectivement 20,3% et 11,3% du volume total. Nous pouvons voir que l'Oligocène est représenté en grande majorité par le Chattien (11,2%) par rapport au Rupélien (0,1%) et le Miocène par la période Langhien-Messinien (18,1%) par rapport à l'Aquitaniens (0%) et le Burdigalien (2,2%). L'ordre de grandeur du volume est similaire à celui de Carpentras.

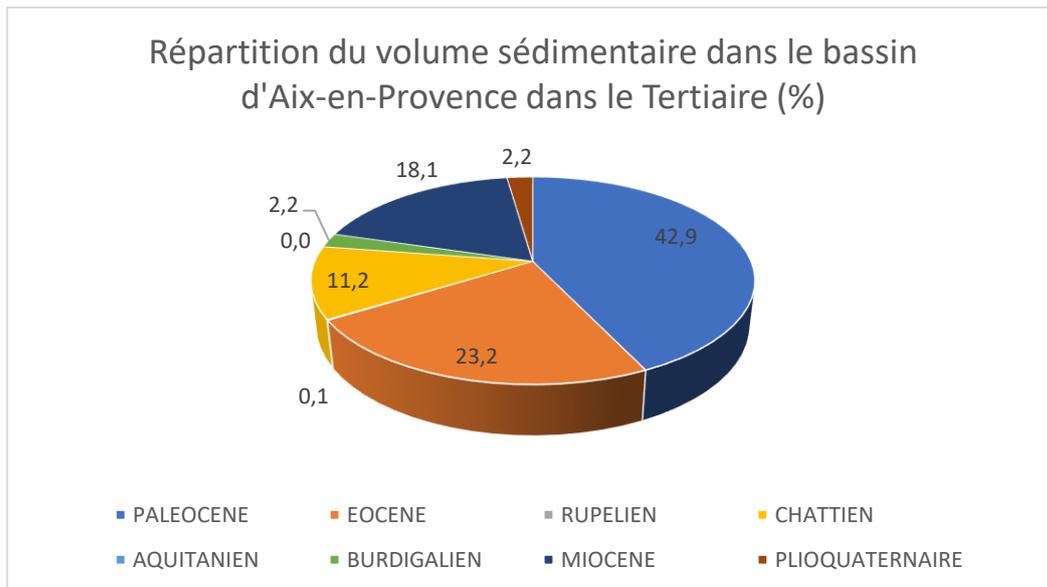


Figure 4: Répartition du volume sédimentaire dans le bassin d'Aix-en-Provence pour le Cénozoïque

- Bassin de Manosque

Tableau 7: Bilan sédimentaire dans le bassin de Manosque

Ages	Volume (m3)	Répartition du volume sédimentaire dans le bassin de Manosque dans le Tertiaire (%)
PALEOCENE	0	0,0
EOCENE	0	0,0
RUPELIEN	2,0347E+11	24,6
CHATTIEN	1,827E+10	2,2
AQUITANIEN	1,4184E+11	17,2
BURDIGALIEN	1,5241E+11	18,4
MIOCENE	1,9755E+11	23,9
PLIOQUATERNAIRE	1,1345E+11	13,7
Total du Cénozoïque	8,27E+11	100

Dans le bassin de Manosque, la part du Paléocène et de l'Eocène sont nulles (Tableau 7). Ce qui représente la plus grande partie des sédiments est le Miocène avec 59,5% suivi de l'Oligocène avec 26,8%. Le Plio-Quaternaire termine avec 13,7%. Nous pouvons voir dans le Miocène que les parts de l'Aquitanién, du Burdigalien et du reste du Miocène sont proches, donc la plupart des sédiments du bassin sont de l'Oligocène terminal à Miocène inférieur (Figure 8).

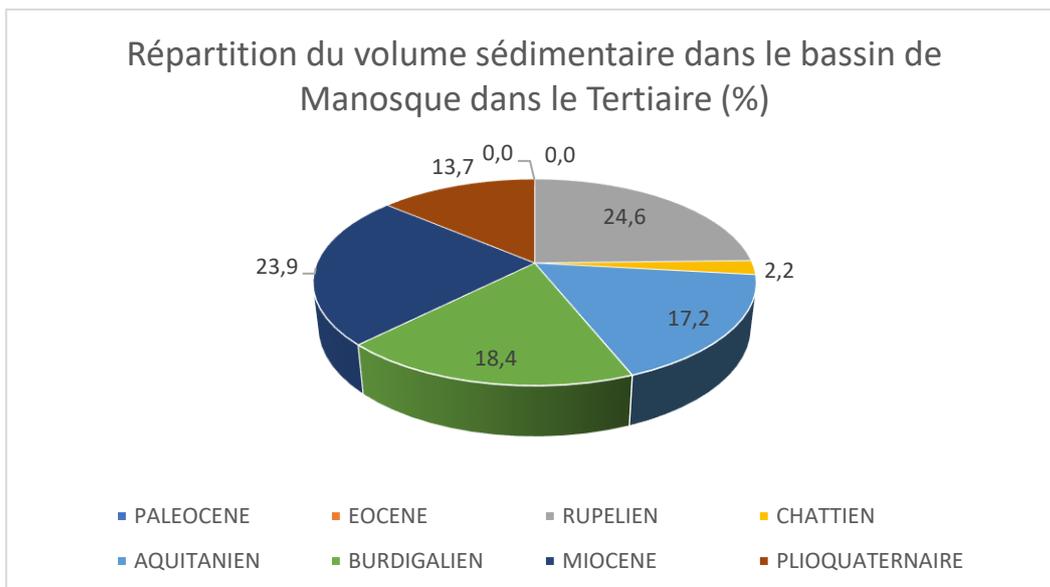


Figure 5: Répartition du volume sédimentaire dans le bassin de Manosque pour le Cénozoïque

- Bassin de Marseille

Tableau 8: Bilan sédimentaire dans le bassin de Marseille

Ages	Volume (m3)	Répartition du volume sédimentaire dans le bassin de Marseille dans le Tertiaire (%)
PALEOCENE	0	0,0
EOCENE	0	0,0
RUPELIEN	919760379,3	3,5
CHATTIEN	24691445936	93,0
AQUITANIEN	0	0,0
BURDIGALIEN	0	0,0
MIOCENE	0	0,0
PLIOQUATERNAIRE	935556780,1	3,5
Total du Cénozoïque	26546763096	100

Le cas du bassin de Marseille est différent des autres bassins du Sud-Est. 93% du volume total est du Chattien, avec le Rupélien à 3,5%, l'Oligocène représente 96,5%. Ceci étant, le Paléocène, l'Eocène et le Miocène sont inexistant dans ce bassin. Le Plio-Quaternaire ne représente que 3,5% du volume du bassin, ce qui est peu (Tableau 8 et Figure 9).

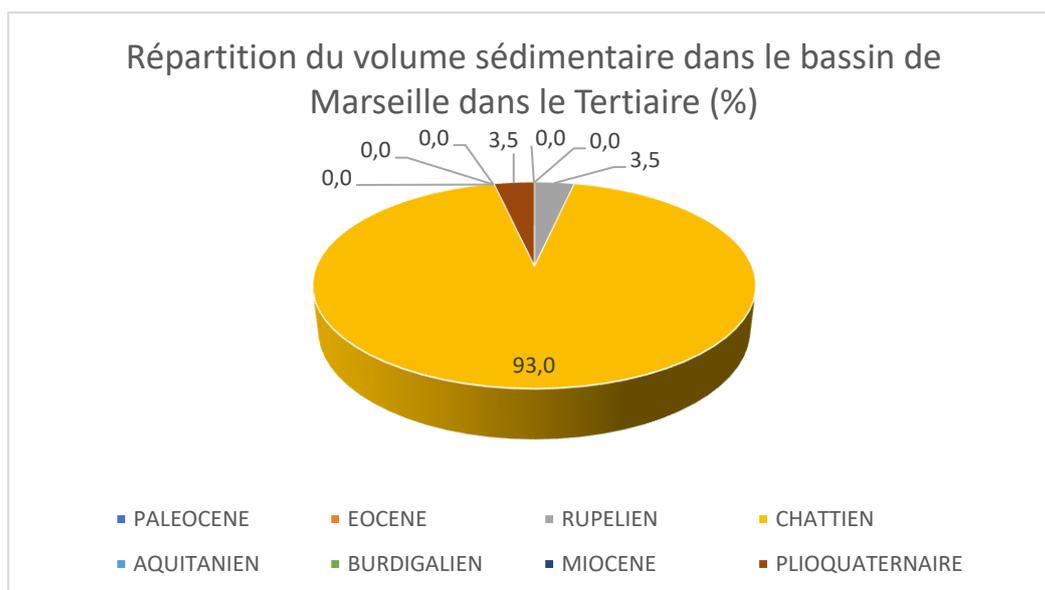


Figure 6: Répartition du volume sédimentaire dans le bassin de Marseille pour le Cénozoïque

- Bassin de Saint-Martin-de-Crau

Tableau 9: Bilan sédimentaire dans le bassin de Saint-Martin-de-Crau

Ages	Volume (m3)	Répartition du volume sédimentaire dans le bassin de Saint-Martin-de-Crau dans le Tertiaire (%)
PALEOCENE	0	0,0
EOCENE	9876144342	4,2
RUPELIEN	40904994603	17,5
CHATTIEN	0	0,0
AQUITANIEN	13539334074	5,8
BURDIGALIEN	79794557428	34,2
MIOCENE	73421444723	31,5
PLIOQUATERNAIRE	15848224448	6,8
Total du Cénozoïque	2,33385E+11	100

Dans le bassin de Saint-Martin-de-Crau, la majorité du volume sédimentaire vient du Miocène à 31,5%, suivi de l'Oligocène avec 17,5%, avec exclusivement du Rupélien, puis le Plio-Quaternaire avec 6,8%. L'Eocène représente 4,2%, et il n'y a pas de Paléocène. Là encore, l'Oligocène terminal – Miocène inférieur représente 40% du volume total, contre 31,5% pour le Miocène moyen à supérieur (Tableau 9 et Figure 10).

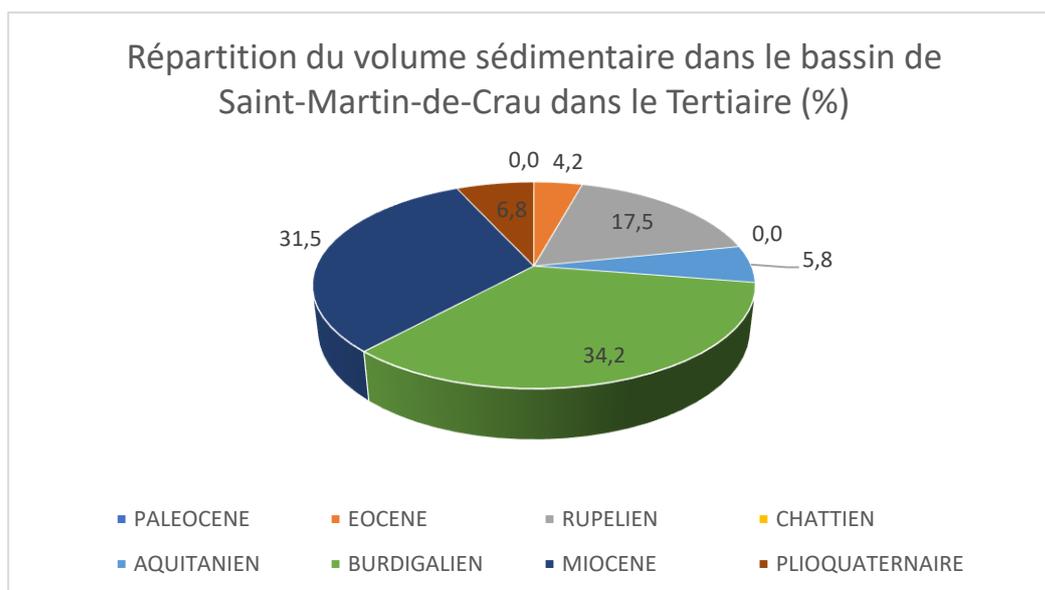


Figure 7: Répartition du volume sédimentaire dans le bassin de Saint-Martin-de-Crau pour le Cénozoïque

- Bassin de la Camargue

Tableau 10: Bilan sédimentaire pour le bassin de la Camargue

Ages	Volume (m3)	Répartition du volume sédimentaire dans le bassin de la Camargue dans le Tertiaire (%)
PALEOCENE	1,99743E+11	4,6
EOCENE	70698909138	1,6
RUPELIEN	2,06734E+12	47,7
CHATTIEN	3287538374	0,1
AQUITANIEN	4,55878E+11	10,5
BURDIGALIEN	2,8552E+11	6,6
MIOCENE	1,86426E+11	4,3
PLIOQUATERNAIRE	1,06075E+12	24,5
Total du Cénozoïque	4,32964E+12	100

Dans le bassin de la Camargue, c'est l'Oligocène qui représente la plus grande part du volume sédimentaire (47,8%), la quasi-majorité venant du Rupélien (47,7% contre 0,1% du Chattien). Vient ensuite le Plio-Quaternaire avec 24,5% et le Miocène avec 21,4%. Le Paléocène et l'Eocène représente respectivement 4,6% et 1,6% du volume sédimentaire. Nous pouvons observer que du début de l'Oligocène jusqu'à la fin Miocène (sauf le Chattien), la part de volume sédimentaire diminue dans le temps (Tableau 10 et Figure 11).

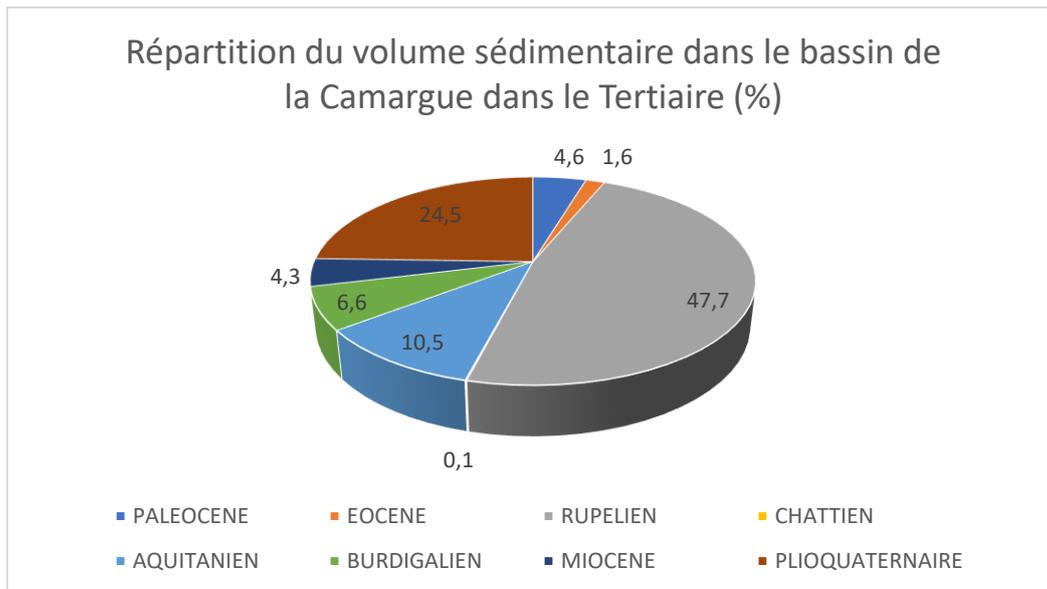


Figure 8: Répartition du volume sédimentaire dans le bassin de la Camargue pour le Cénozoïque

III.c) Carte récapitulative avec volumes et bassin

Pour la répartition dans chaque bassin, veuillez-vous reporter sur les camemberts et tableaux du paragraphe précédent, la Figure 12 nous montre le volume total ainsi que la surface.

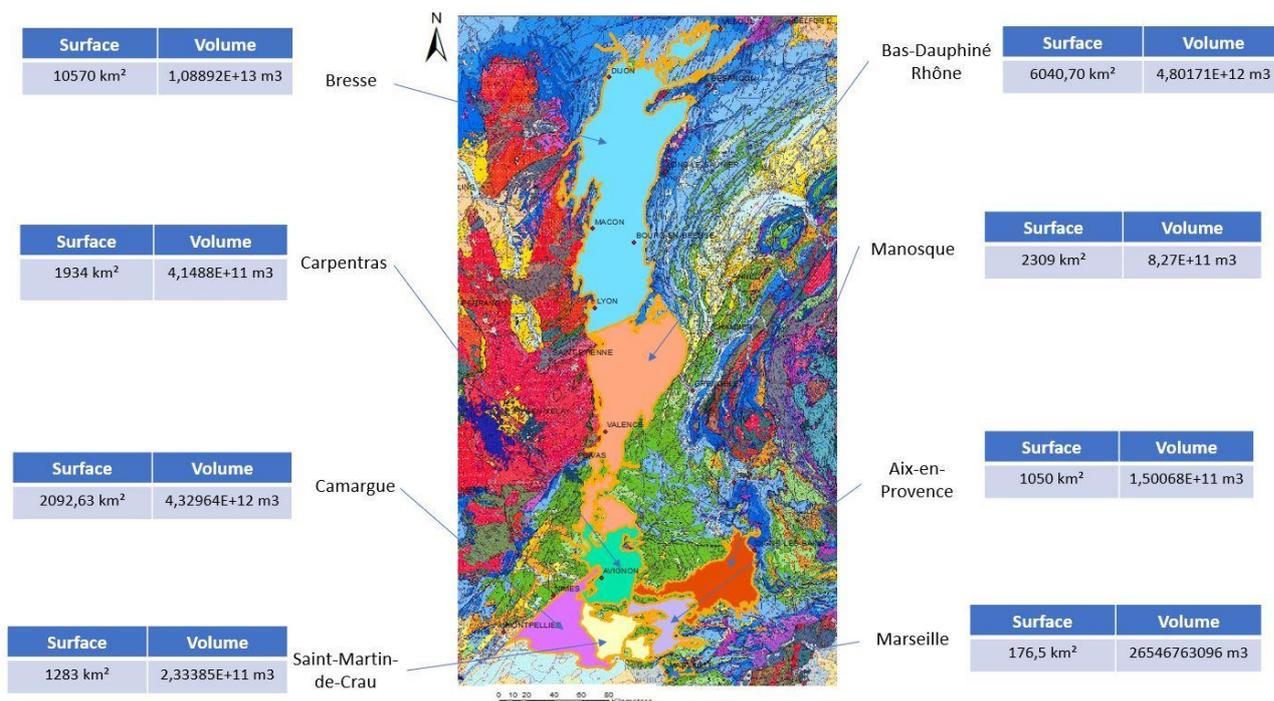


Figure 9: Carte récapitulative des bassins (Nom, surface, volume total)

IV) Discussions

IV.a) La compaction

La compaction est le phénomène de tassements des sédiments au fur et à mesure de leur enfouissement. Plus ces sédiments sont profonds, plus les couches qui sont au-dessus font pression par leur poids sur ces sédiments et réduit l'espace entre les grains, expulse l'eau des

pores et peut faire de la réorganisation chimique à l'intérieur de la couche. Cela implique que l'épaisseur observée dans le sol n'est pas l'épaisseur réelle de sédiments qui s'est déposé à la surface, donc un volume différent. Le calcul de décompaction aurait été nécessaire pour pouvoir comparer les volumes obtenus par l'érosion du massif alpin avec les volumes mesurés dans les bassins et décompactés. Il n'a pas été fait par manque de temps. Cependant, pour un travail ultérieur, il serait intéressant de faire ces calculs sur les différents horizons tertiaires.

IV.b) Comparaison avec les données de Kuhlemann

A partir des données dans Kuhlemann (2000) et Kuhlemann *et al.* (2002), nous avons recalculé les volumes sédimentaires des bassins qui nous intéresse, c'est-à-dire les bassins ouest-Alpin, noté dans Kuhlemann (2000) « Bresse Graben », « Rhône fan », « Rhône » et « Golfe of Lions ». Nous devons prendre le Golfe du Lion car cette zone comprend le **onshore** du Rhône (zones Camargue et Saint-Martin-de-Crau) et les bassins provençaux côtiers (Marseille).

Tableau 11: Volume sédimentaire dans le Sud-Est de la France, d'après Kuhlemann *et al.* (2002)

	Moyenne volume Rhône (m ³)	Moyenne Bresse Graben (m ³)	Golfe of Lion (d'après Kuhlemann, 2000, repris par Leroux, 2012) (m ³)	Total par âge (m ³)
Oligocène	2,9747E+13	8,4992E+11	-	3,05971E+13
Miocène	1,3331E+14	1,33154E+13	1,625E+14	3,0913E+14
Plio-Quaternaire	8,6887E+13	1,69984E+12	1,51E+14	2,39587E+14
Total par bassin	2,49949E+14	1,58652E+13	3,135E+14	5,79314E+14

Tableau 12: Volume sédimentaire calculée, avec des données de Leroux (2012)

	Oligocène (m ³)	Miocène (m ³)	Plio-Quaternaire (m ³)	Total par bassin (m ³)
Bresse	3,10821E+12	1,37771E+12	3,16119E+12	7,64712E+12
Bas-Dauphiné Rhône	2,1542E+12	1,55765E+12	1,43497E+11	3,85535E+12
Aix-en-Provence	17004164362	30540574089	3371306057	50916044508
Carpentras	65935601207	2,95867E+11	30764694194	3,92567E+11
Manosque	2,21745E+11	4,91804E+11	1,13453E+11	8,27001E+11
Marseille	25611206316	0	935556780,1	26546763096
Saint-Martin-de-Crau	4,0905E+10	1,6676E+11	1,5848E+10	2,2351E+11
Camargue	2,0706E+12	9,2782E+11	1,0607E+12	4,0592E+12
Golfe du Lion (d'après Leroux, 2012)	-	1,14696E+14	1,59E+14*	2,73696E+14
Total par âge	7,70424E+12	1,19544E+14	1,6353E+14	2,90778E+14

Nous pouvons voir que le calcul de Kuhlemann (2000) (tableau 11) pour la Bresse est largement surestimé par rapport à nos calculs issus de la sismique (tableau 12). Pour les autres bassins, c'est plus compliqué puisque certains sont complètement nouveaux dans ce bilan sédimentaire (Aix-en-Provence, Manosque, une partie du bassin de Carpentras), mais les autres petits bassins, avec le Bas-Dauphiné Rhône forme la partie « Rhône » de Kuhlemann (2000) et Kuhlemann *et al.* (2002). De même, les résultats de Leroux (2012) sur le Golfe du Lion sont analogues (Plio-Quaternaire) ou inférieurs (Miocène et volume total) aux estimations de Kuhlemann (2000, *et al.* 2002) (Figures 13, 14 et 15).

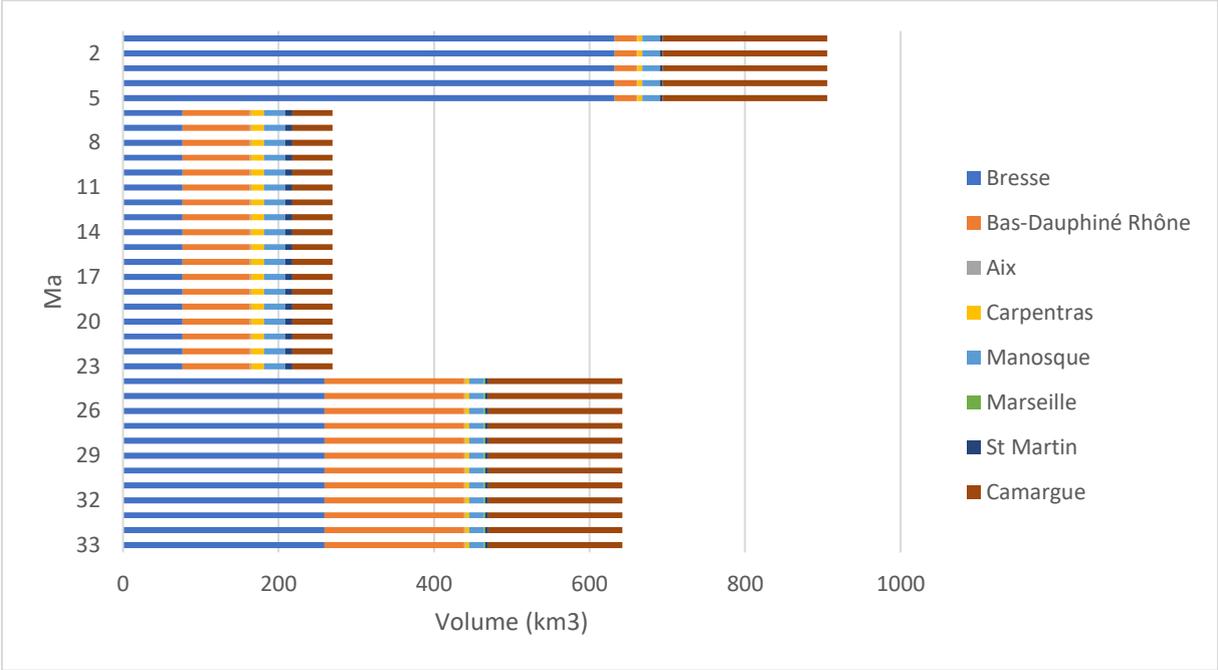


Figure 13: Taux de sédiment par million d'années calculée pour nos différents bassins

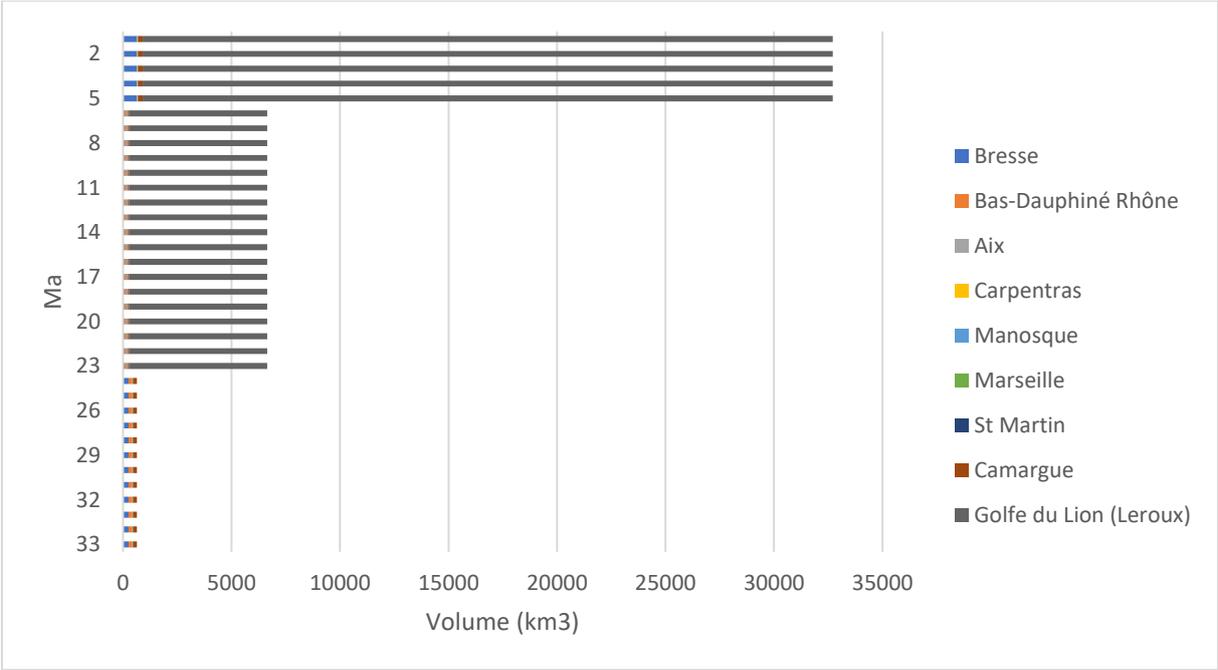


Figure 14: Taux de sédiment par million d'années calculée pour nos différents bassins et le Golfe du Lion d'après Leroux (2012)

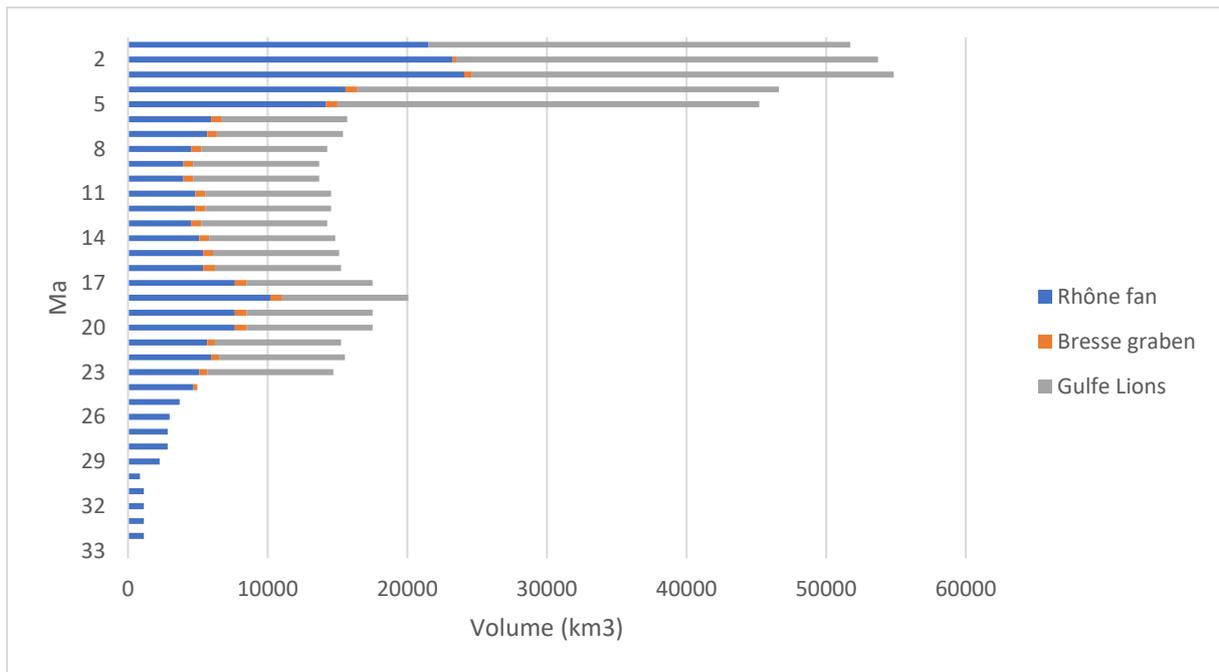


Figure 15: Taux de sédiment par million d'années d'après Kuhlemann et al. (2002)

Nous pouvons voir que nos résultats sans les données du Golfe du Lion sont de 10 à 100 fois inférieurs aux données de Kuhlemann *et al.* (2002). Alors que Kuhlemann nous dit que le taux de sédiment est partagé entre le Golfe du Lion et la zone couverte par le Rhône, nos résultats montre que la part du Rhône est négligeable devant les sédiments apportés dans le Golfe du Lion.

Conclusions

Obtenir une valeur précise du volume sédimentaire dans le Sud-Est est difficile car les données ne sont pas forcément accessibles, elles ne sont pas toutes du même types, par exemple pour la Bresse, nous avons utilisés des profils sismiques, ce qui nous donne des valeurs de volumes assez précises, alors que pour les autres bassins, nous n'avons pu utiliser que des données de la BSS et faire de l'interpolation. Les données de la BSS pouvant être lacunaire et devant être triées une a une, le résultat sera toujours moins précis que la sismique. De plus, cette étude a permis de déterminer des volumes sédimentaires, mais aussi une méthode de calcul pour que n'importe qui puissent retrouver nos valeurs. Toutefois, nous ne sommes pas parvenus à obtenir des courbes précises de taux de sédimentation comme dans Kuhlemann *et al.* (2002). Faire du détail au million d'années n'est pas possible et nous n'obtenons qu'une moyenne pour les différents temps géologiques choisis (Figures 13 et 14), mais nous voyons bien que les résultats de Kuhlemann sont surestimés par rapport aux nôtres.

Bibliographie :

Agard, P., & Lemoine, M. (2003). Visage des Alpes : Structure et évolution géodynamique.

Allen, P. A., Crampton, S. L., & Sinclair, H. D. (1991). The inception and early evolution of the North Alpine Foreland Basin, Switzerland. *Basin Research*, 3(3), 143–163.

Beaumont, C. (1981). Foreland basins. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 65(2), 291–329.

Boutoux, A., Bellahsen, N., Nanni, U., Pik, R., Verlaguet, A., Rolland, Y., & Lacombe, O. (2016). Thermal and structural evolution of the external Western Alps: Insights from (U–Th–Sm)/He thermochronology and RSCM thermometry in the Aiguilles Rouges/Mont Blanc massifs. *Tectonophysics*, 683, 109–123.

Burkhard, M., & Sommaruga, A. (1998). Evolution of the western Swiss Molasse basin: structural relations with the Alps and the Jura belt. *Geological Society, London, Special Publications*, 134(1), 279-298.

Centi-Tok, B., Darling, J. R., Rolland, Y., Dhuime, B., & Storey, C. D. (2014). Direct dating of mid-crustal shear zones with synkinematic allanite: new *in situ* U-Th-Pb geochronological approaches applied to the Mont Blanc massif. *Terra Nova*, 26(1), 29-37.

Chopin, C. (1987). Very-high-pressure metamorphism in the western Alps: implications for subduction of continental crust. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 321(1557), 183-197.

Couëffé R. et Tourlière B., (2008) - Modélisation géologique multicouche Bresse, Dombes, Bas-Dauphiné, Couloir rhodanien - Méthodologie de réalisation, guide d'utilisation des produits numériques - Rapport final. BRGM/RP-57712-FR, 62 p. - 10 Fig., 1 tab. - 1 ann. de 21 cartes.

Debelmas, J., Escher, A., & Trumpy, R. (1983). Profiles through the western Alps. *Profile of Orogenic Belts*, 83-96.

DeCelles, P. G., & Giles, K. A. (1996). Foreland basin systems. *Basin research*, 8(2), 105-123.

Ford, M., & Lickorish, W. H. (2004). Foreland basin evolution around the western Alpine Arc. *Geological Society, London, Special Publications*, 221(1), 39-63.

GeoMol Team (2015): GeoMol – Assessing subsurface potentials of the Alpine Foreland Basins for sustainable planning and use of natural resources – Project Report, 188 pp. (Augsburg, LfU)

Homewood P., Mauriaud P. et Lafont F., 1999. Best practices in sequence stratigraphy for explorationists and reservoir engineers – Vade mecum de stratigraphie séquentielle pour géologues, géophysiciens et ingénieurs-réservoir, Bulletin du Centre de Recherche et Exploration-Production, ELF Aquitaine, 25, pp. 81.

Kuhlemann, J. (2000), Post-collisional sediment budget of circum-alpine basins (central Europe), *Mem. Sci. Geol., Padova*, 52, 1–91.

Kuhlemann J., Frisch W., Székely B., Dunkl I., Kázmér M. (2002). Post-collisional sediment budget history of the Alps: tectonic versus climatic control, *International Journal of Earth Sciences*, Vol. 91, Issue 5, pp 818-837

Kuhlemann, J., and Kempf O. (2002), Post-eocene evolution of the north alpine foreland basin and its response to alpine tectonics, *Sedimentary Geology*, 152, 45–78.

Lacombe, O., & Mouthereau, F. (2002). Basement-involved shortening and deep detachment tectonics in forelands of orogens: Insights from recent collision belts (Taiwan, Western Alps, Pyrenees). *Tectonics*, 21(4).

Lemoine, M., Bas, T., Arnaud-Vanneau, A., Arnaud, H., Dumont, T., Gidon, M., ... Megard-Galli, J. (1986). The continental margin of the Mesozoic Tethys in the Western Alps. *Marine and petroleum geology*, 3(3), 179–199.

Leroux E., (2012). Quantification des flux sédimentaires et de la subsidence du bassin Provençal. Sciences de la Terre. Université de Bretagne occidentale – Brest.

Lucchi, F. R. (1986). The Oligocene to Recent foreland basins of the northern Apennines. *Foreland Basins, IAS Special Publication*, 8, 105-139.

Manatschal, G., A. Engström, L. Desmurs, U. Schaltegger, M. Cosca, O. Müntener, and D. Bernoulli (2006), What is the tectono-metamorphic evolution of continental break-up: The example of the Tethyan Ocean–Continent Transition, *J. Struct. Geol.*, 28(10), 1849–1869.

Mohn, G., Manatschal, G., Beltrando, M., Masini, E., & Kuszniir, N. (2012). Necking of continental crust in magma-poor rifted margins: Evidence from the fossil Alpine Tethys margins: NECKING OF CONTINENTAL CRUST. *Tectonics*, 31(1).

Rolland, Y., Cox, S., Boullier, A.-M., Pennacchioni, G., & Mancktelow, N. (2003). Rare earth and trace element mobility in mid-crustal shear zones: insights from the Mont Blanc Massif (Western Alps). *Earth and Planetary Science Letters*, 214(1-2), 203-219.

Rolland, Y., Rossi, M., Cox, S. F., Corsini, M., Mancktelow, N., Pennacchioni, G., ... Boullier, A. M. (2008). ⁴⁰Ar/ ³⁹Ar dating of synkinematic white mica: insights from fluid-rock reaction in low-grade shear zones (Mont Blanc Massif) and constraints on timing of deformation in the NW external Alps. *Geological Society, London, Special Publications*, 299(1), 293-315.

Sinclair, H. D. (1997). Flysch to molasse transition in peripheral foreland basins: The role of the passive margin versus slab breakoff. *Geology*, 25(12), 1123–1126. 58

Sinclair, H. D. (1997). Tectonostratigraphic model for underfilled peripheral foreland basins: An Alpine perspective. *Geological Society of America Bulletin*, 109(3), 324–346.

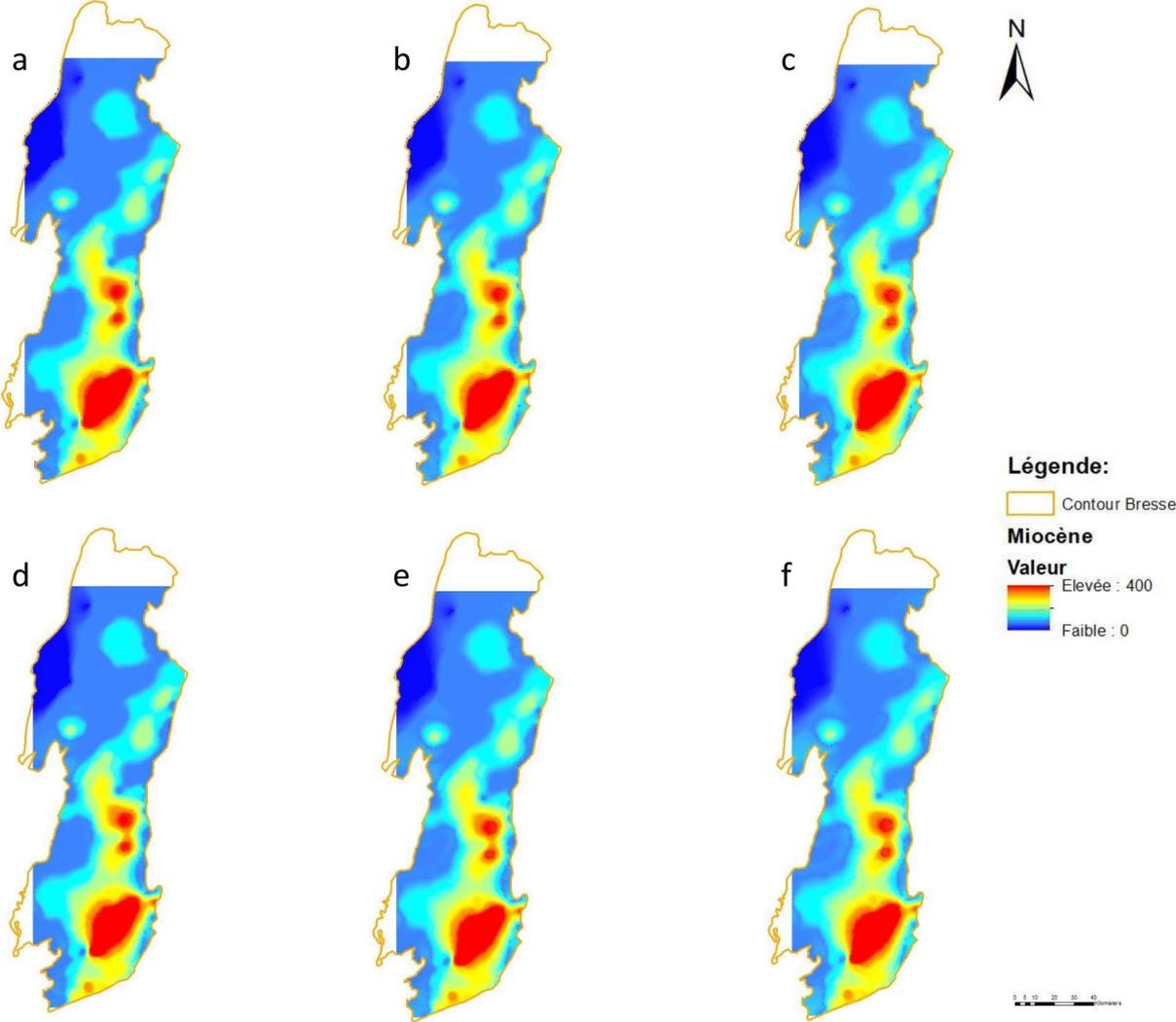
Sinclair, H. D., Coakley, B. J., Allen, P. A., & Watts, A. B. (1991). Simulation of foreland basin stratigraphy using a diffusion model of mountain belt uplift and erosion: an example from the central Alps, Switzerland. *Tectonics*, 10(3), 599-620.

Stampfli, G. M., G. D. Borel, R. Marchant, and J. Mosar (2002), Western Alps geological constraints on western Tethyan reconstructions, *J. Virtual Explor.*, 8, 77–106

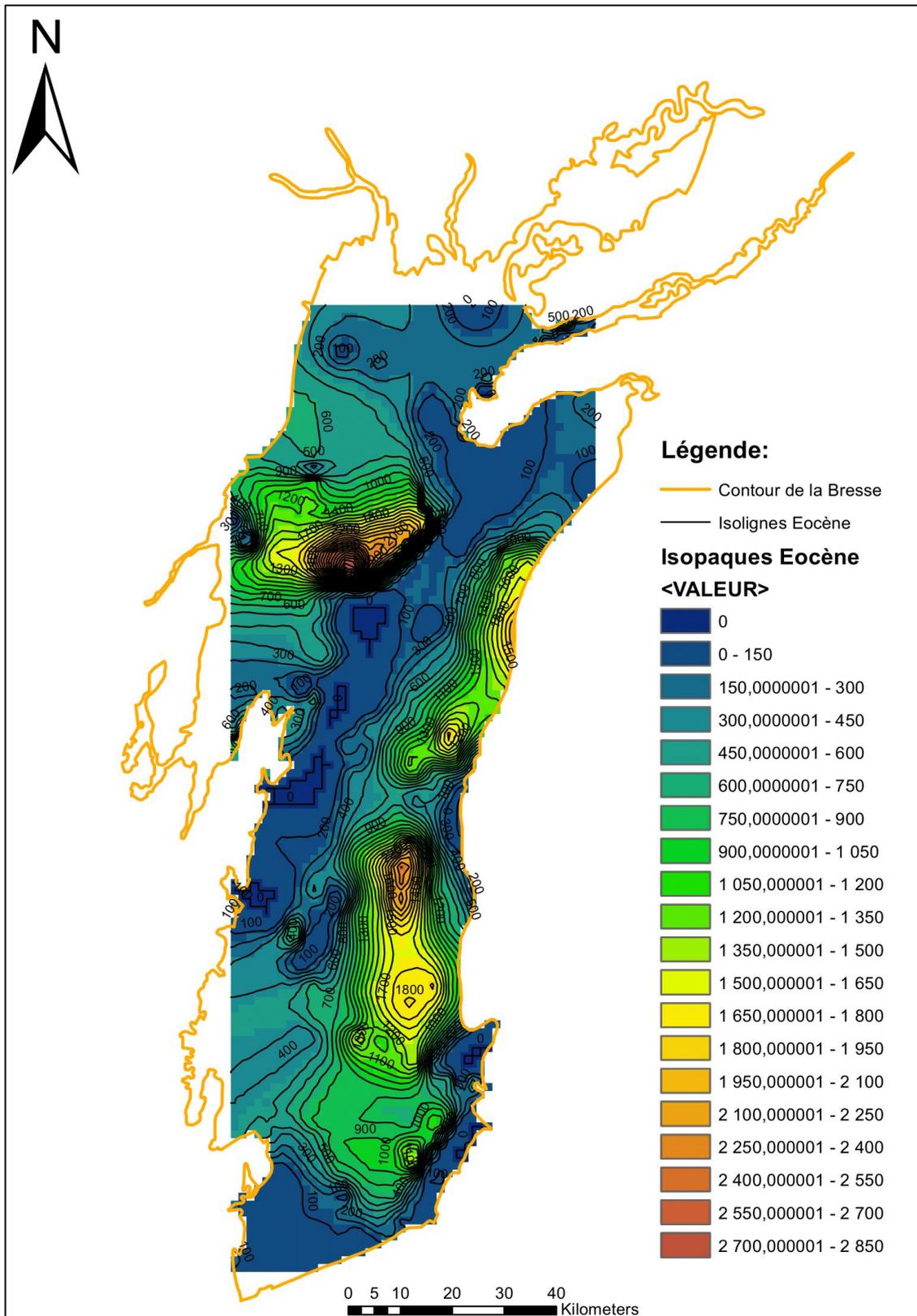
ANNEXE:

Annexe 1 : Exemple de cartes de la Bresse avec les différents paramètres d'interpolations à partir des données de Couëffé R. et Tourlière B., (2008) pour le Miocène	p.30
Annexe 2 : Carte d'interpolation de la Bresse	p.31
Annexe 3 : Cartes d'interpolation du Bas-Dauphiné Rhône	p.36
Annexe 4 : Cartes d'interpolation du bassin d'Aix-en-Provence	p.40
Annexe 5 : Cartes d'interpolation du bassin de Carpentras	p.48
Annexe 6 : Cartes d'interpolation du bassin de Manosque	p.56
Annexe 7 : Cartes d'interpolation du bassin de Marseille	p.60
Annexe 8 : Cartes d'interpolation du bassin de Saint-Martin-de-Crau	p.64
Annexe 9 : Cartes d'interpolation du bassin de la Camargue	p.68

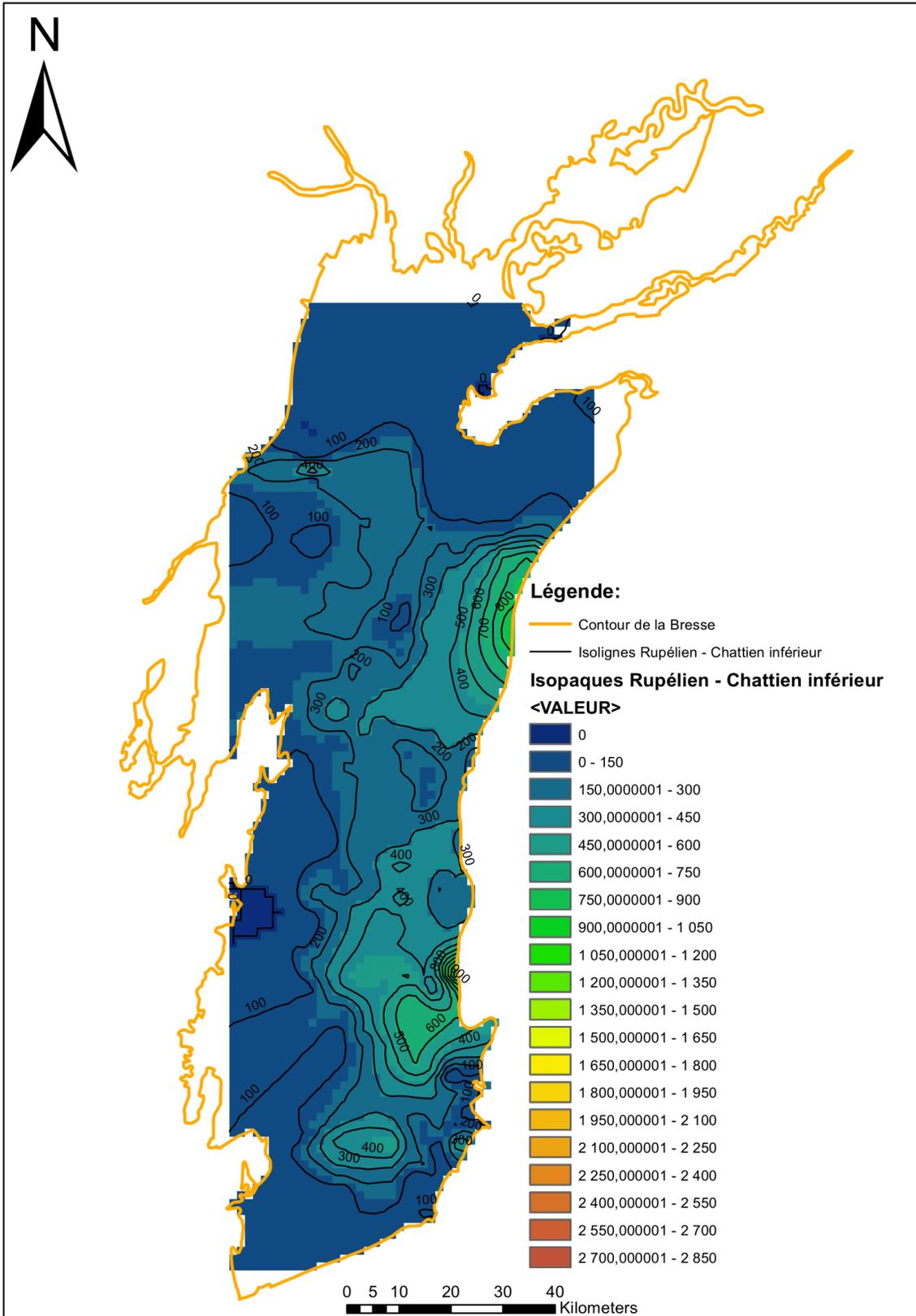
Annexe 1 : Exemple de cartes de la Bresse avec les différents paramètres d'interpolations à partir des données de Couëffé R. et Tourlière B., (2008) pour le Miocène



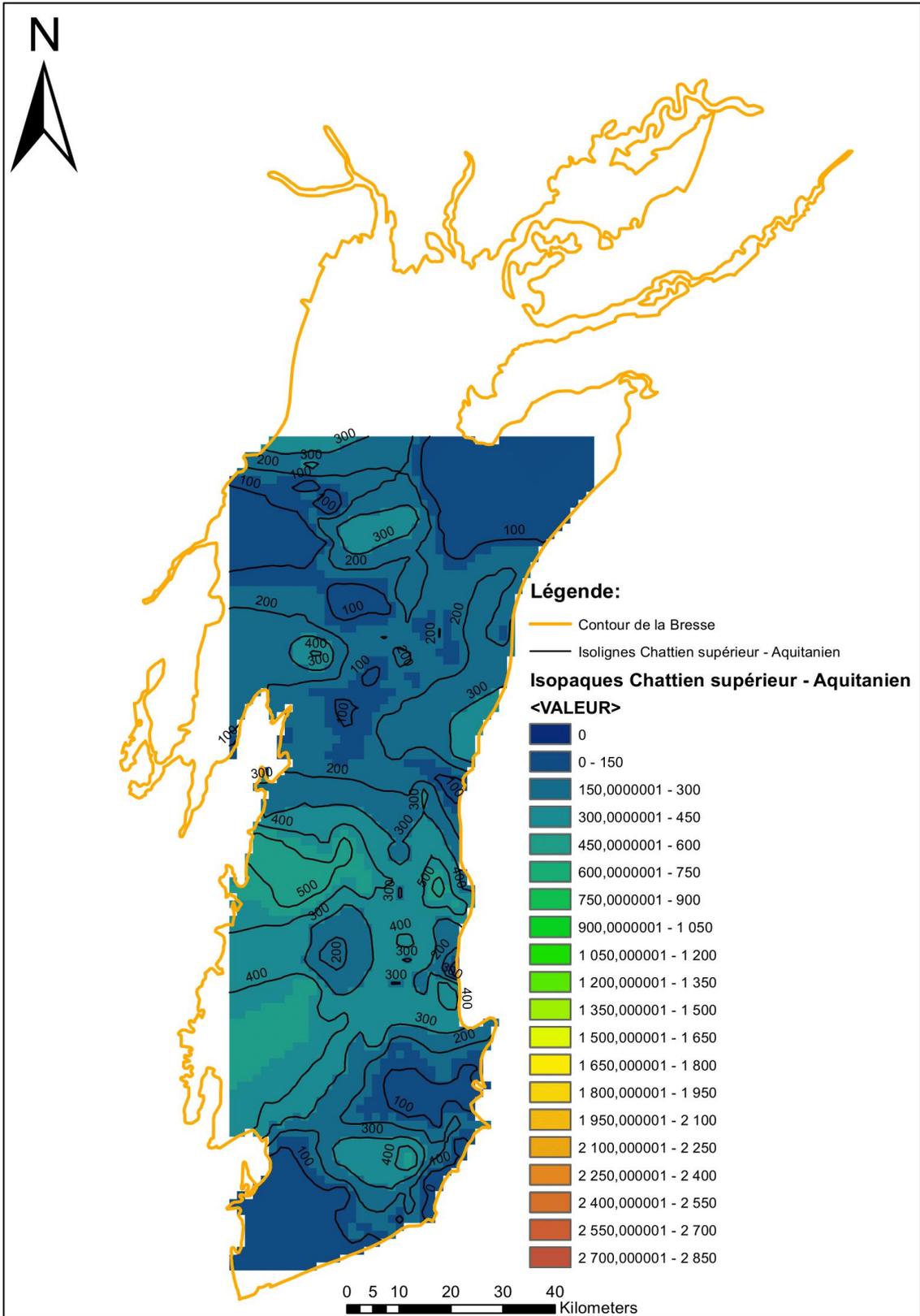
Annexe 2 : Carte d'interpolation dans le bassin de la Bresse



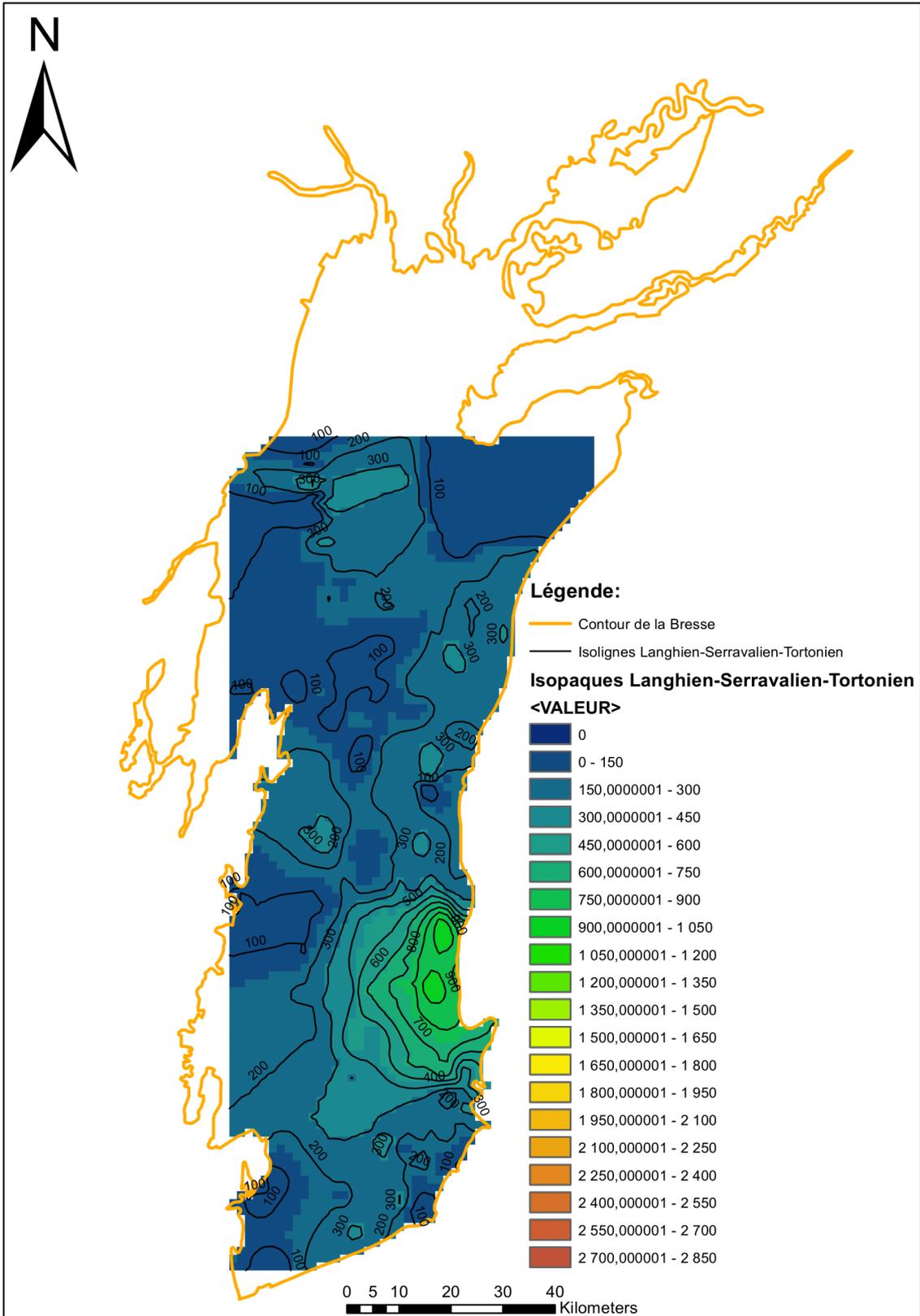
Annexe 2.1 : Carte isopaque de l'Eocène dans le bassin de la Bresse



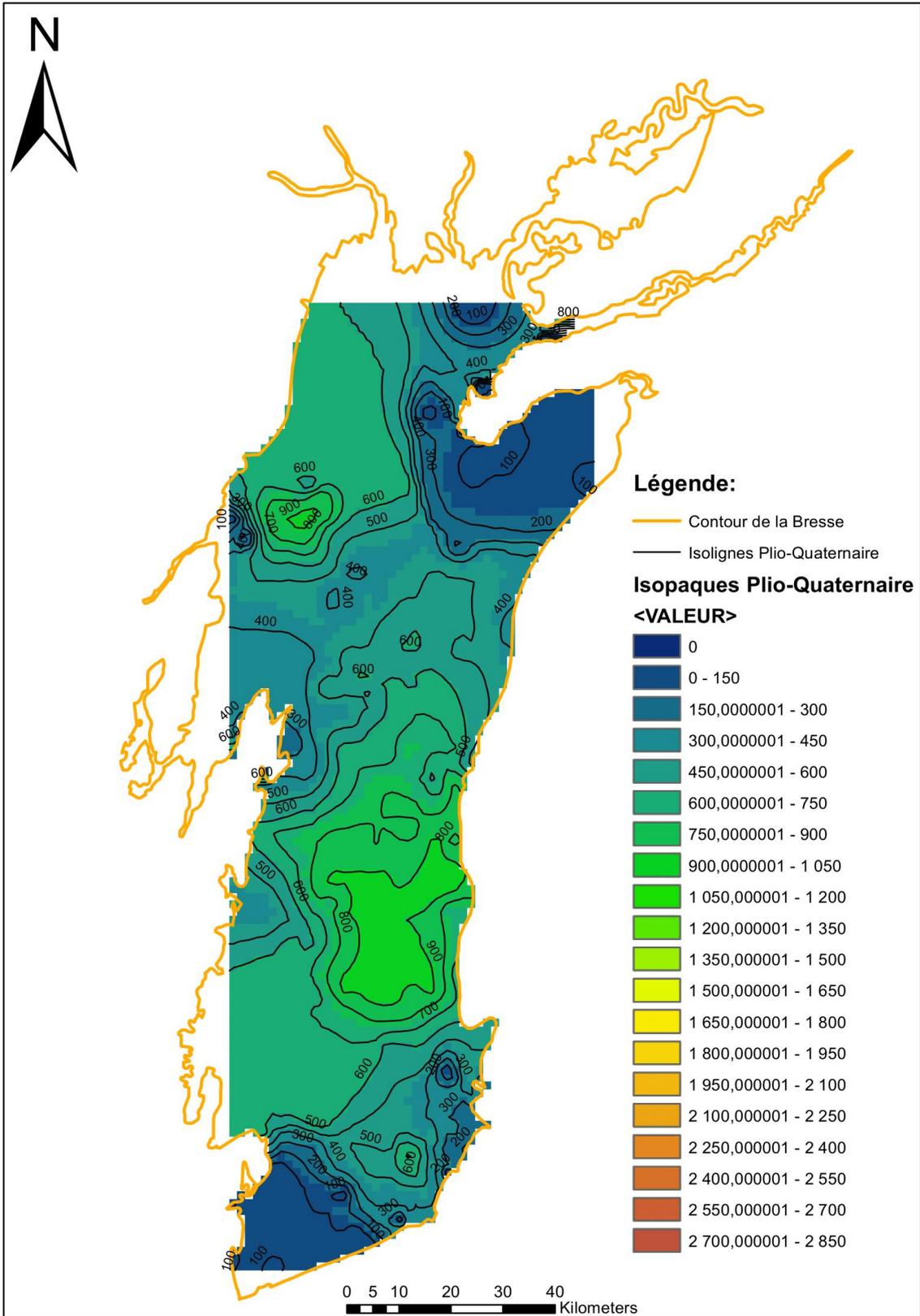
Annexe 2.2 : Carte isopaque du Rupélien – Chattien inférieur dans le bassin de la Bresse



Annexe 2.3 : Carte isopaque du Chattien supérieur – Aquitanien dans le bassin de la Bresse

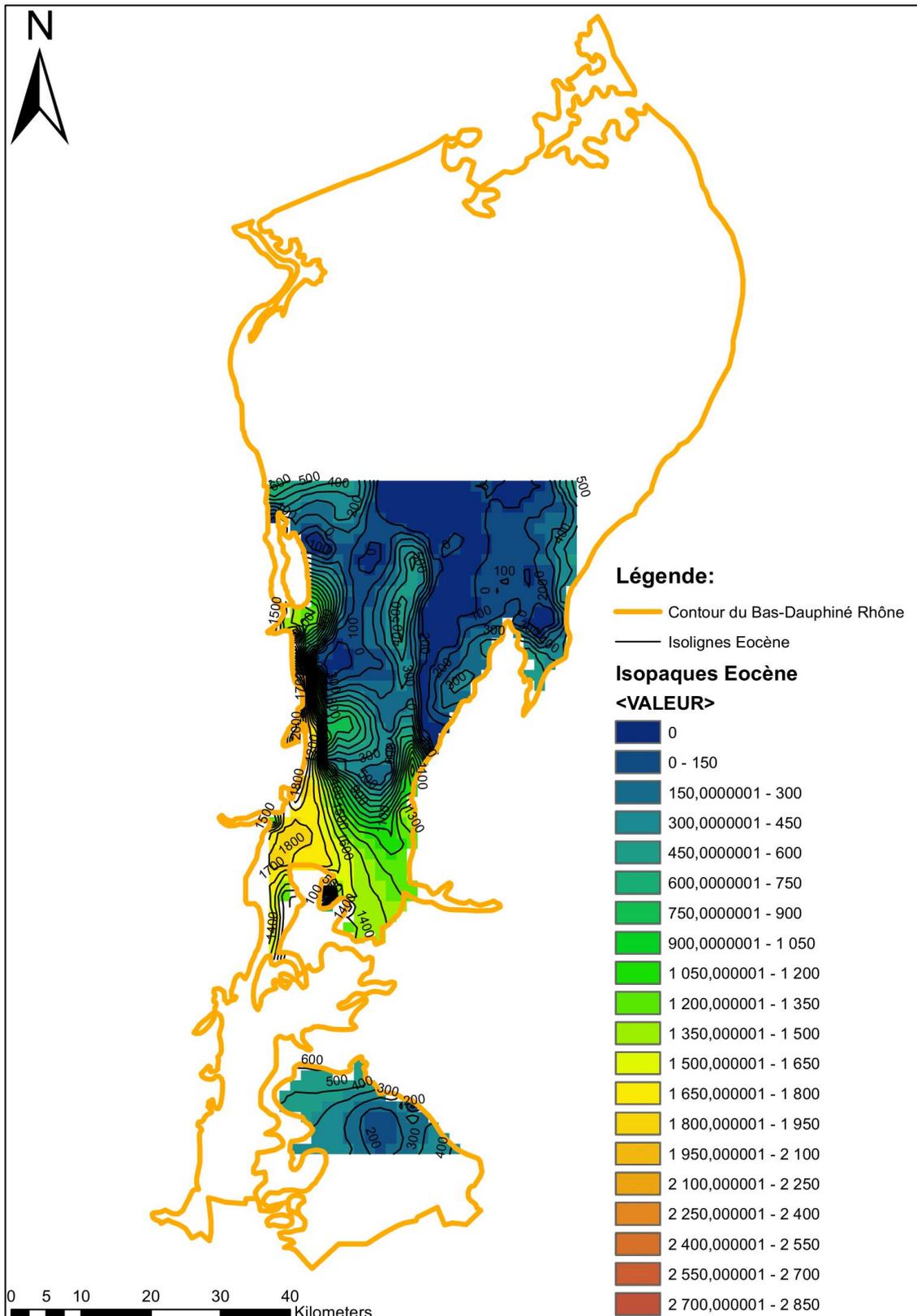


Annexe 2.4 : Carte isopaque du Langhien-Serravalien-Tortonien dans le bassin de la Bresse

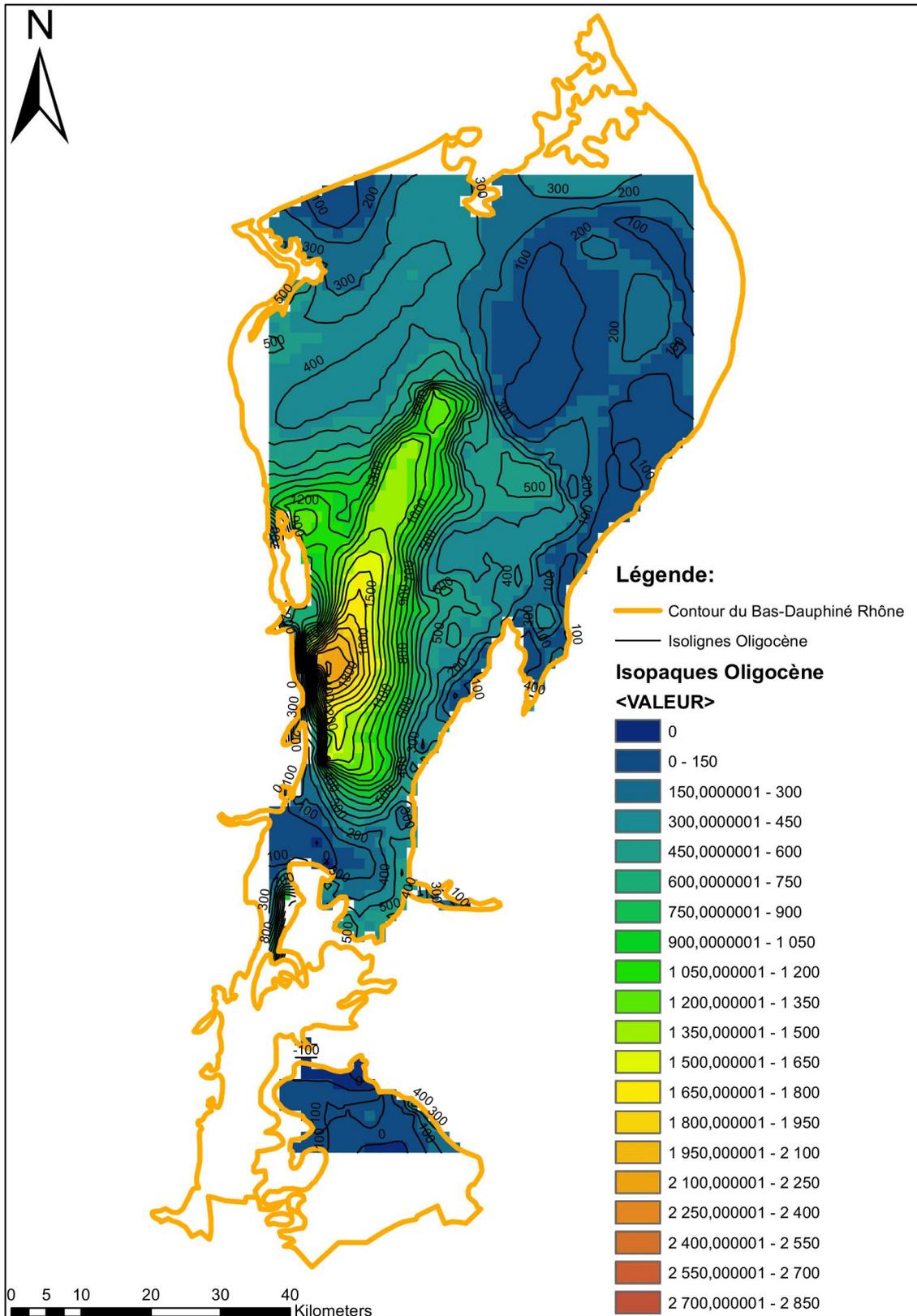


Annexe 2.5 : Carte isopaque du Plio-Quaternaire dans le bassin de la Bresse

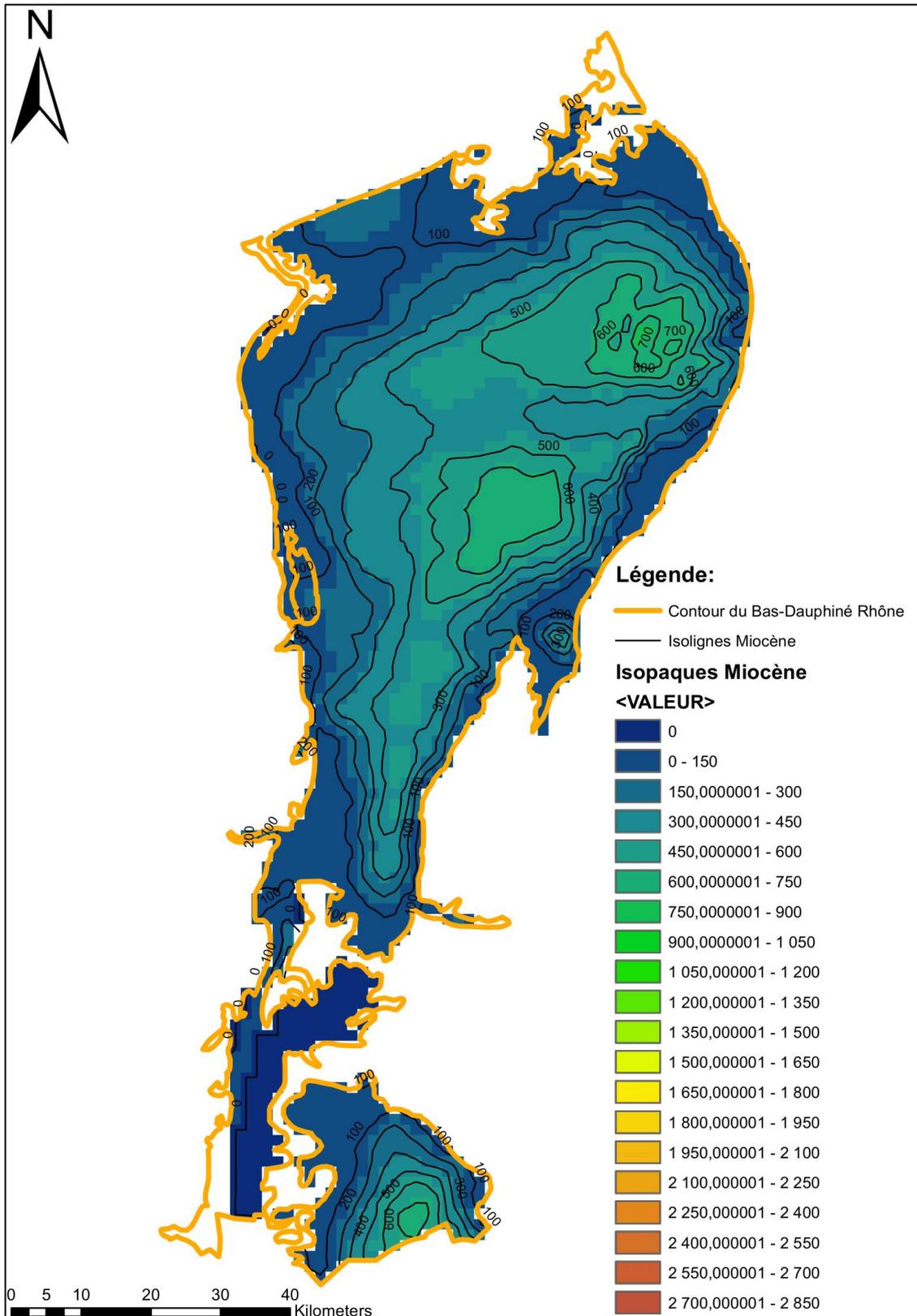
Annexe 3 : Cartes d'interpolation du Bas-Dauphiné Rhône



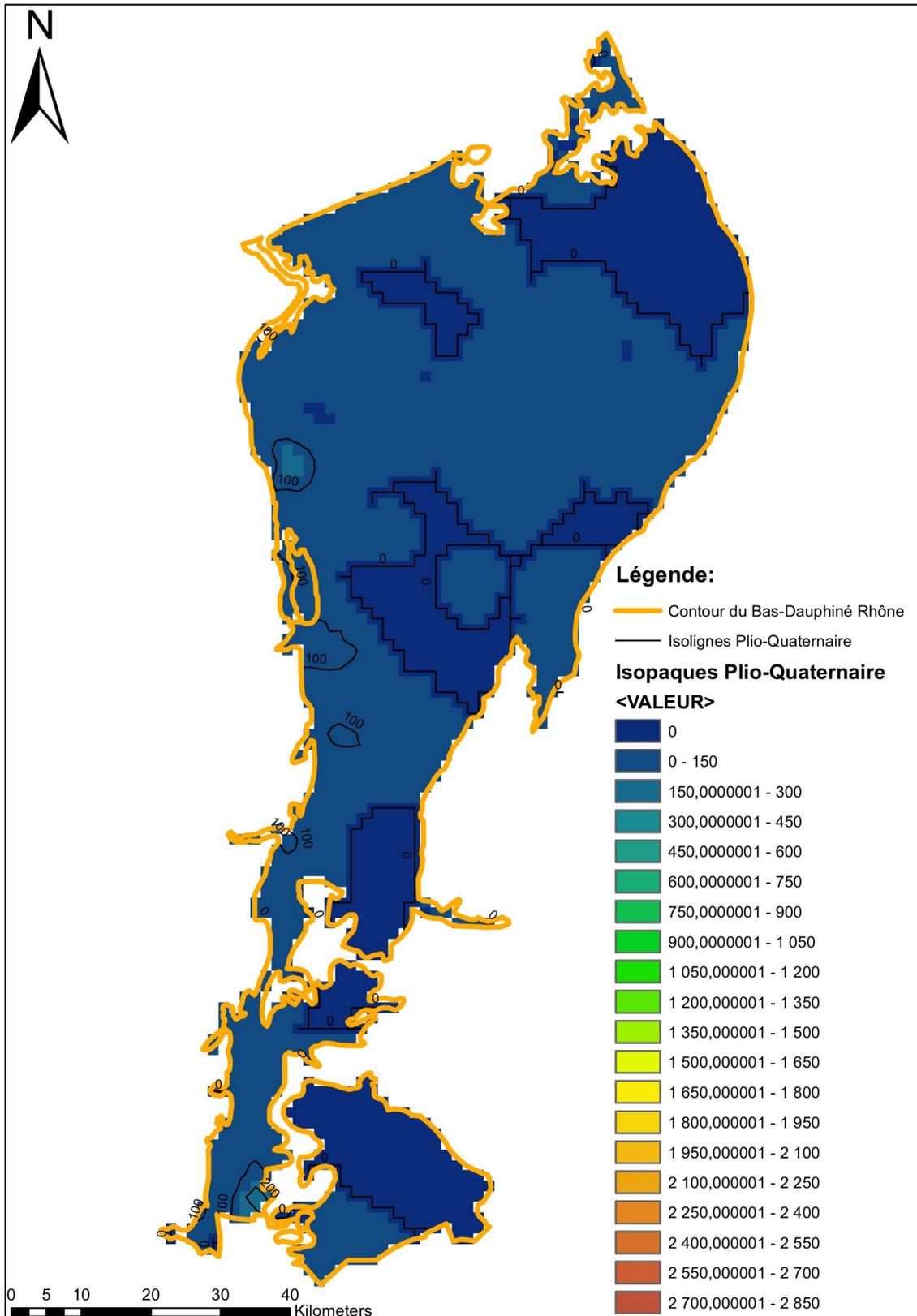
Annexe 3.1 : Carte isopaque de l'Eocène dans le bassin du Bas-Dauphiné Rhône



Annexe 3.2 : Carte isopaque de l'Oligocène dans le bassin du Bas-Dauphiné Rhône

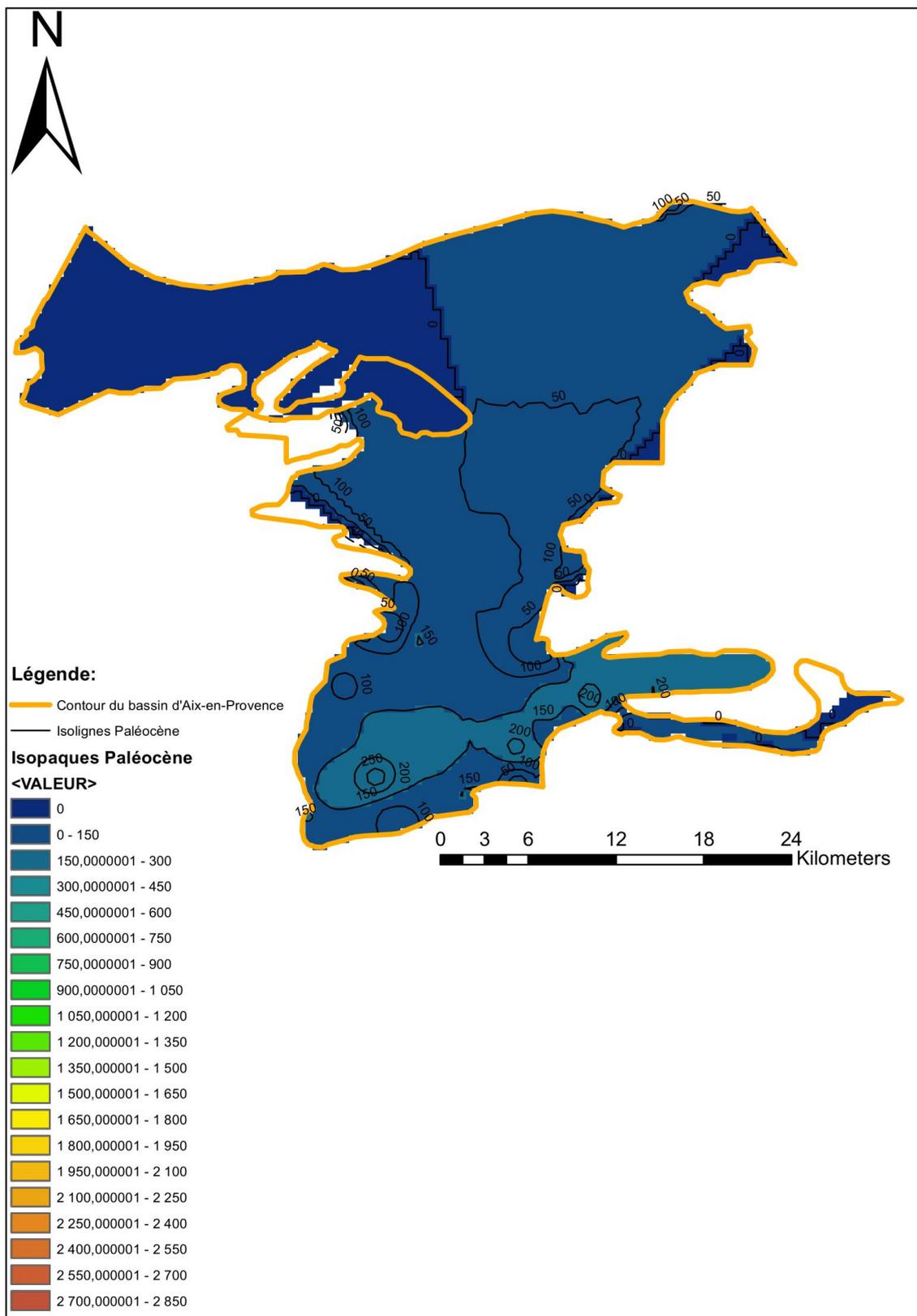


Annexe 3.3 : Carte isopaque du Miocène dans le bassin du Bas-Dauphiné Rhône

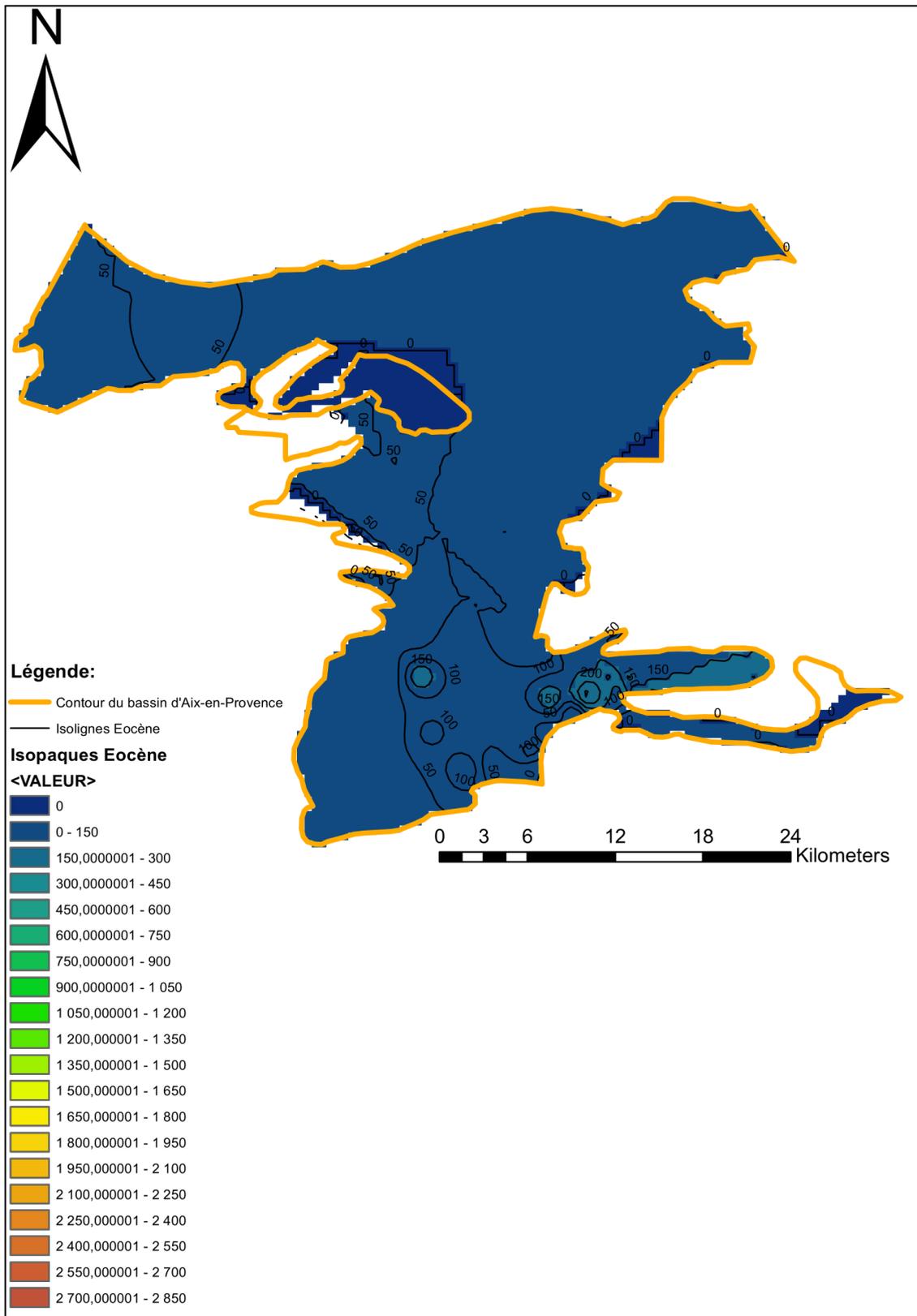


Annexe 3.4 : Carte isopaque du Plio-Quaternaire dans le bassin du Bas-Dauphiné Rhône

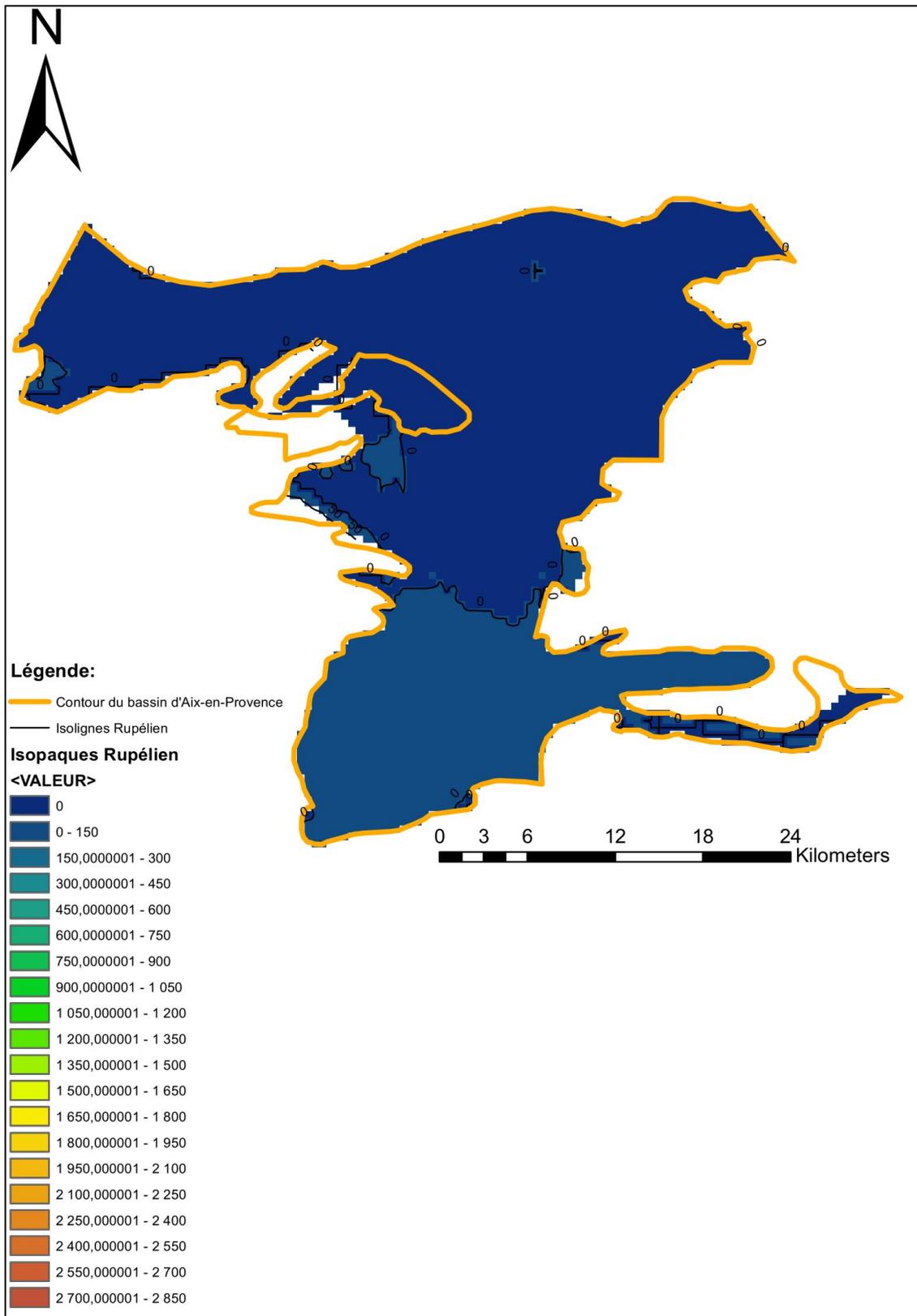
Annexe 4 : Cartes d'interpolation du bassin d'Aix-en-Provence



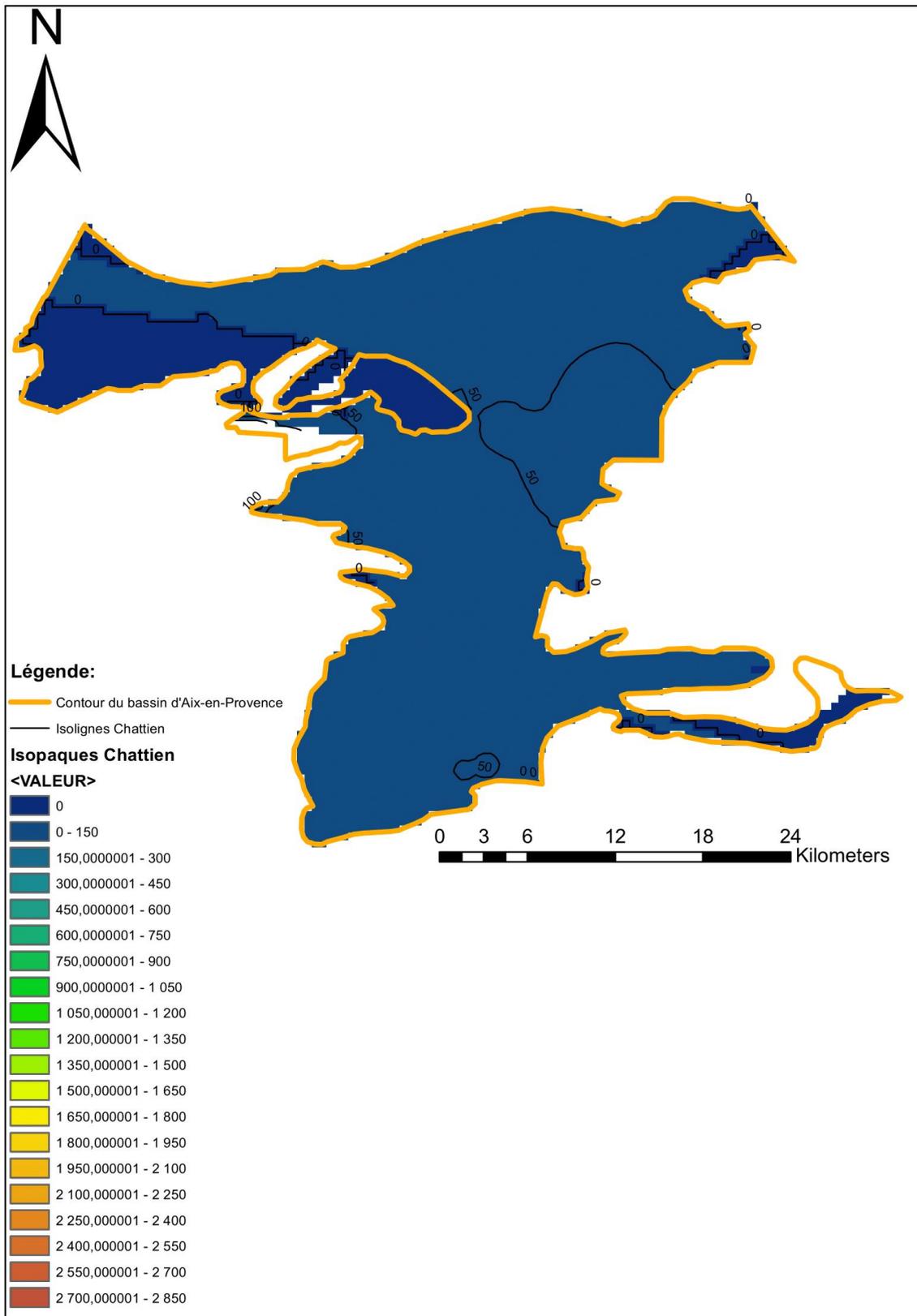
Annexe 4.1 : Carte isopaque du Paléocène dans le bassin d'Aix-en-Provence



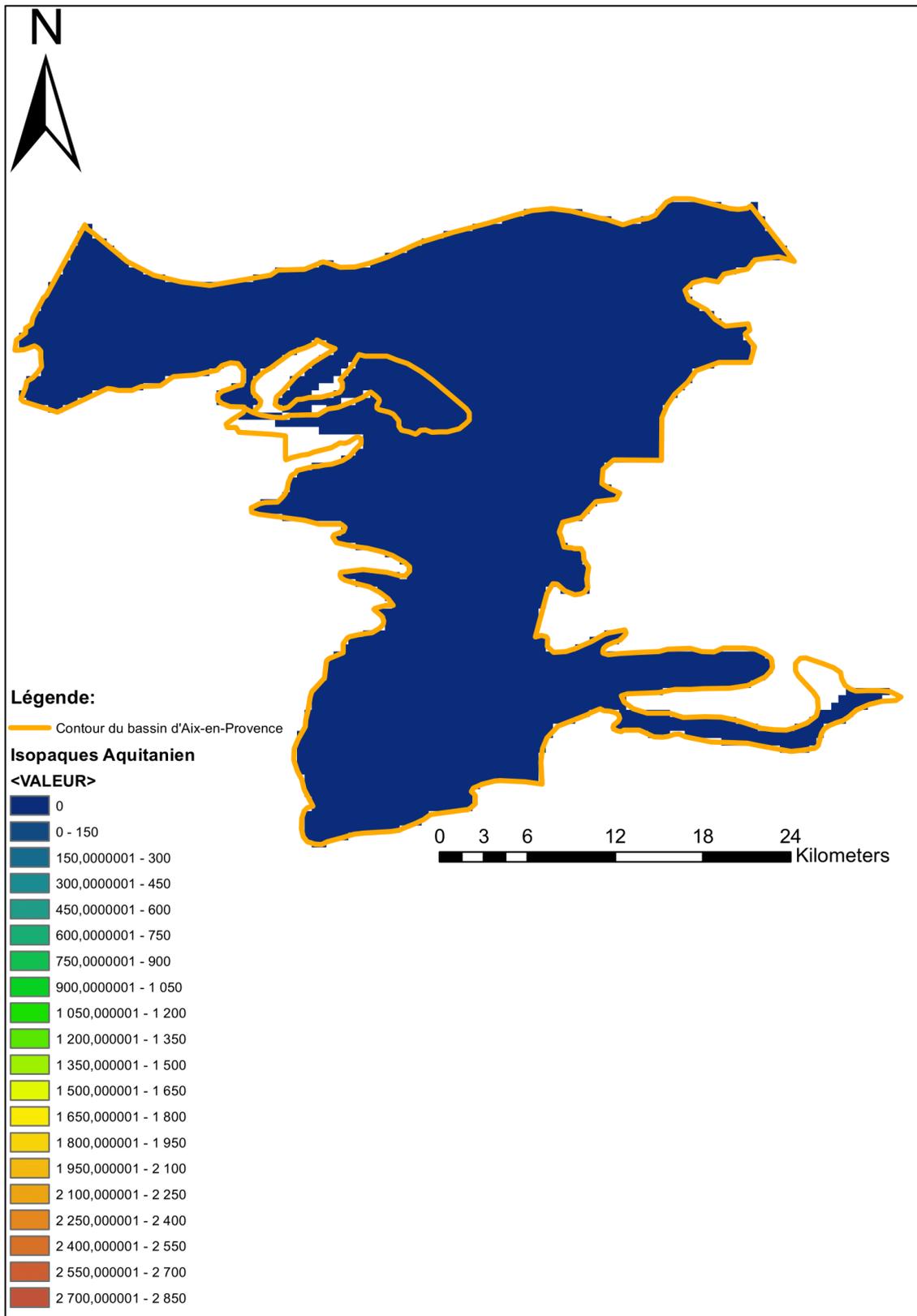
Annexe 4.2 : Carte isopaque du Eocène dans le bassin d'Aix-en-Provence



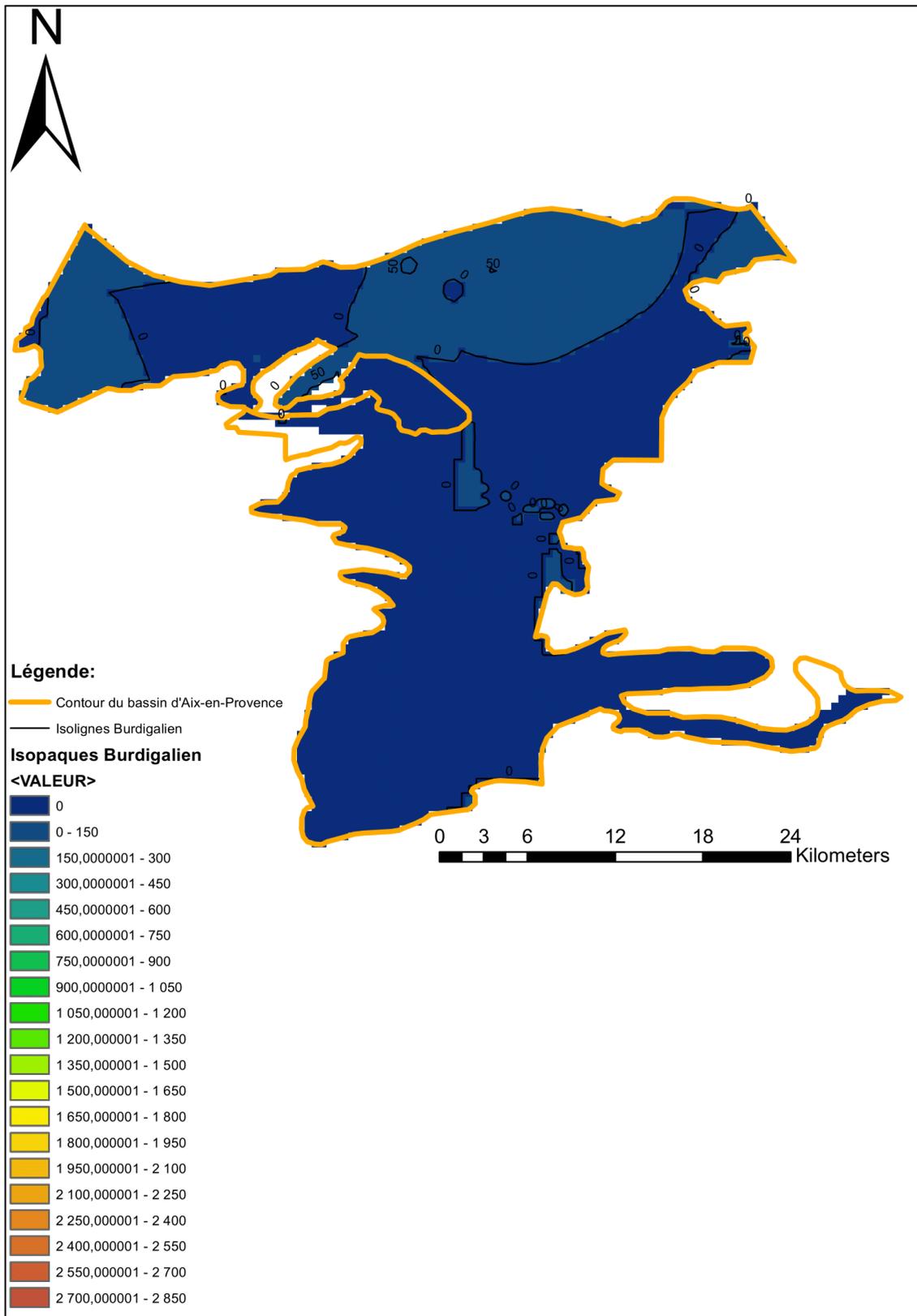
Annexe 4.3 : Carte isopaque du Rupélien dans le bassin d'Aix-en-Provence



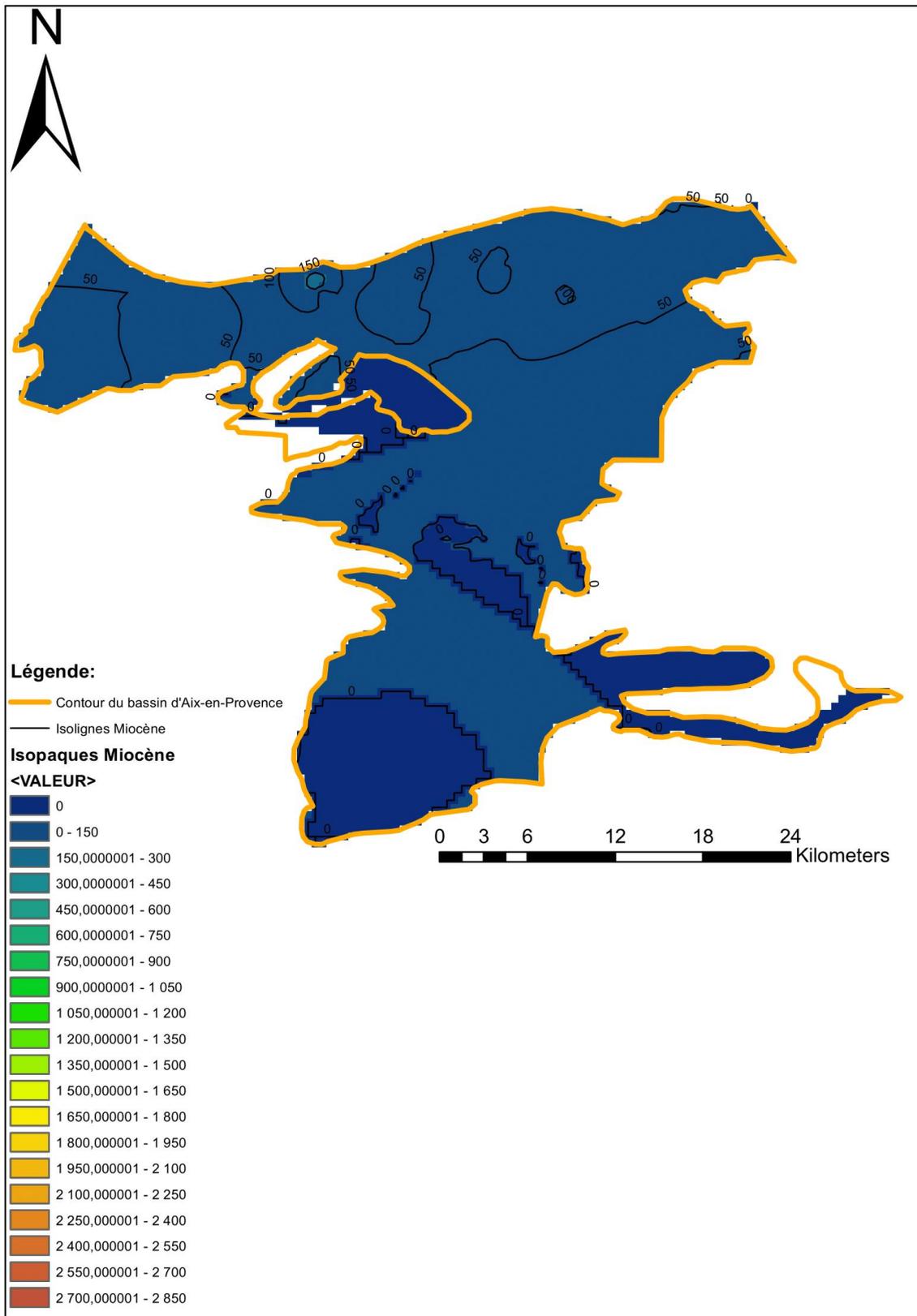
Annexe 4.4 : Carte isopaque du Chattien dans le bassin d'Aix-en-Provence



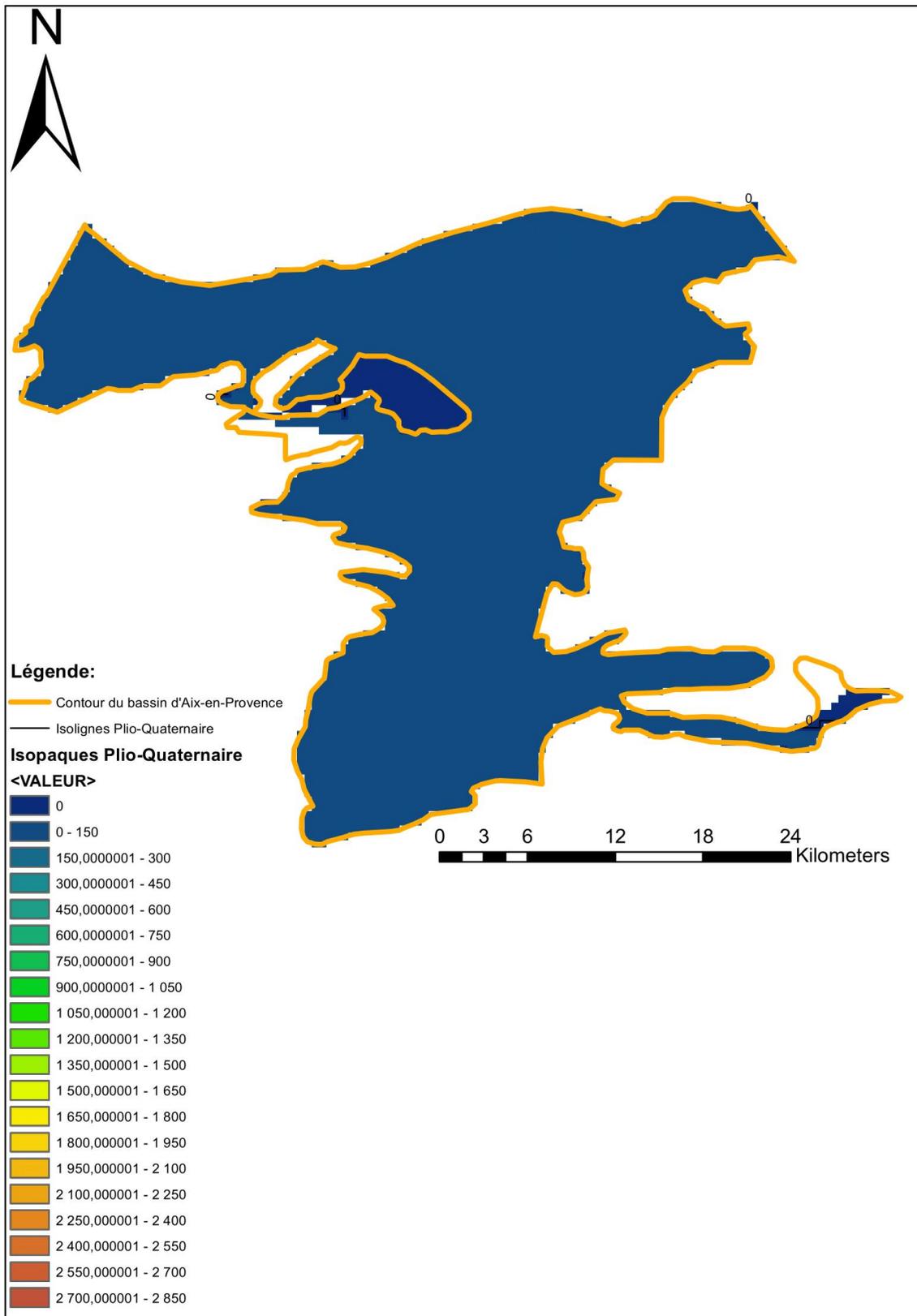
Annexe 4.5 : Carte isopaque de l'Aquitaniien dans le bassin d'Aix-en-Provence



Annexe 4.6 : Carte isopaque du Burdigalien dans le bassin d'Aix-en-Provence

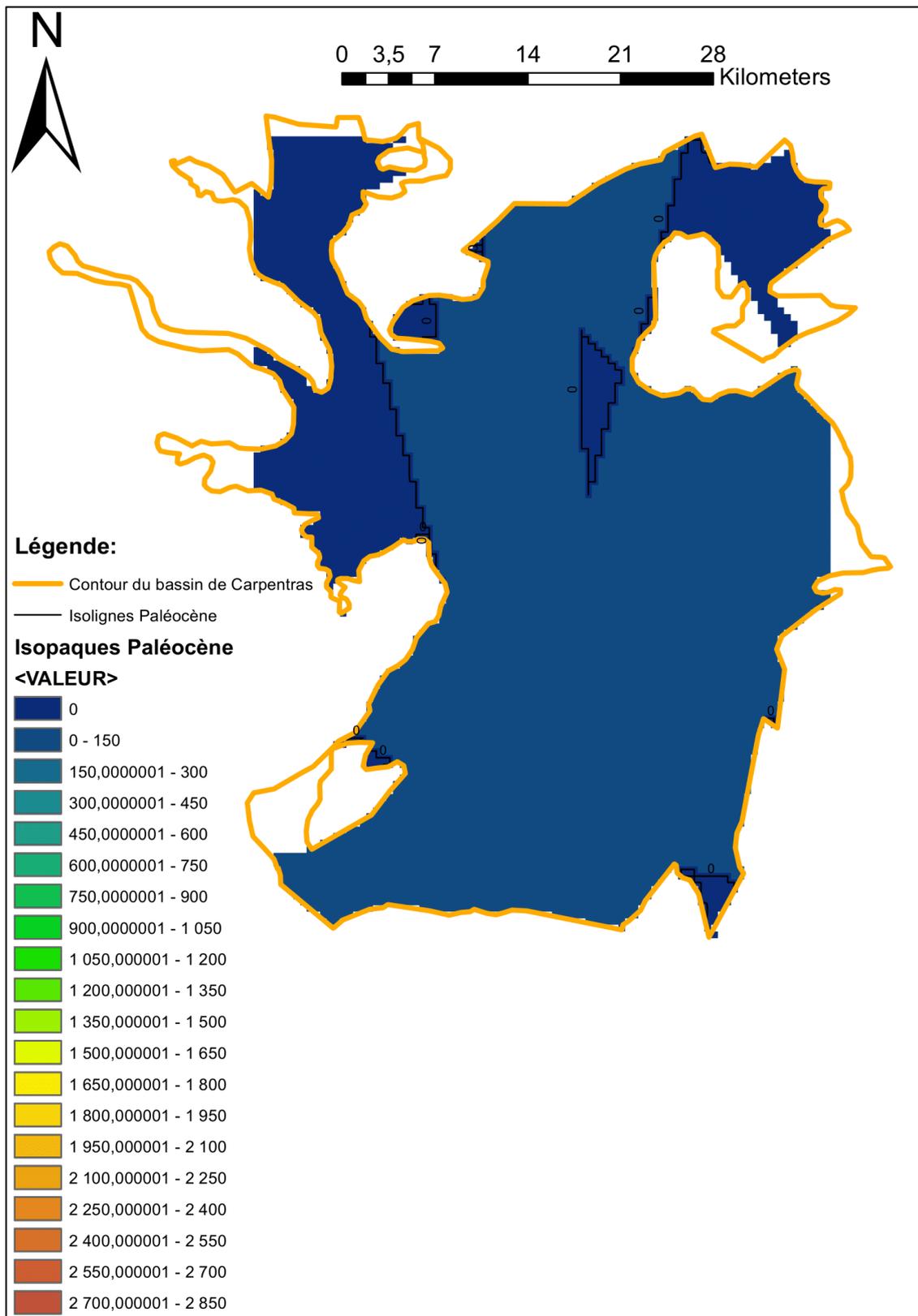


Annexe 4.7 : Carte isopaque du Miocène dans le bassin d'Aix-en-Provence

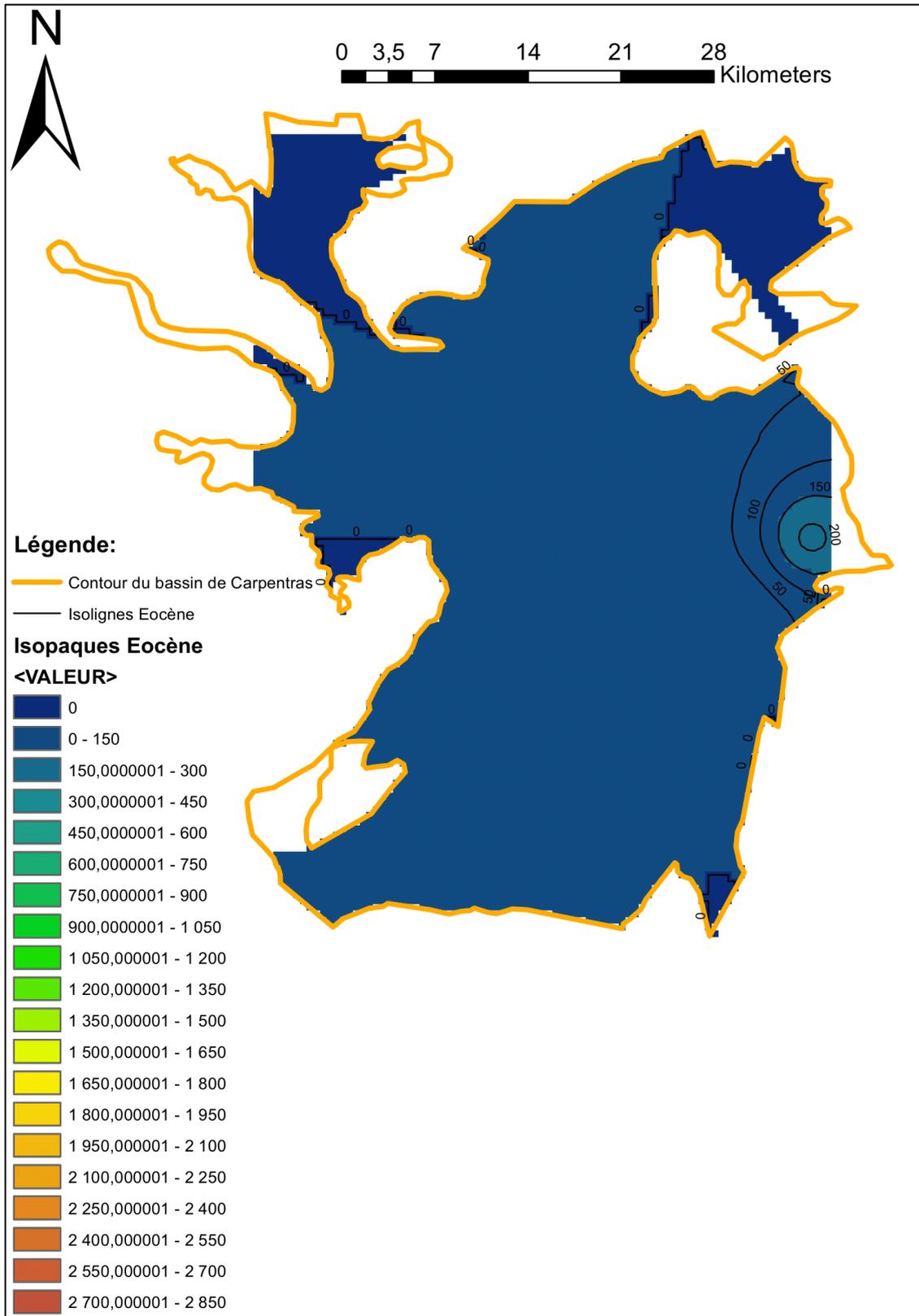


Annexe 4.8 : Carte isopaque du Plio-Quaternaire dans le bassin d'Aix-en-Provence

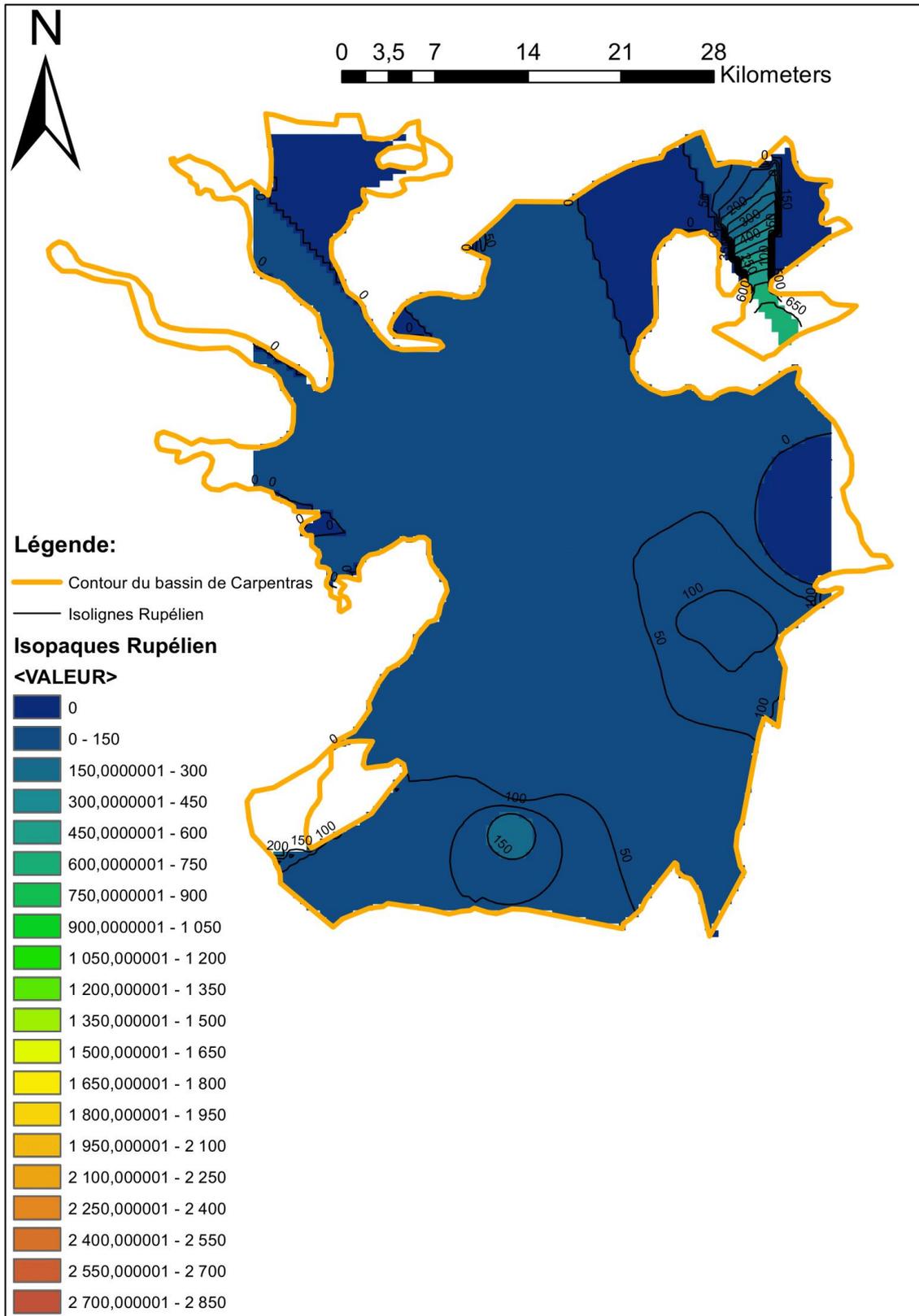
Annexe 5 : Cartes d'interpolation du bassin de Carpentras



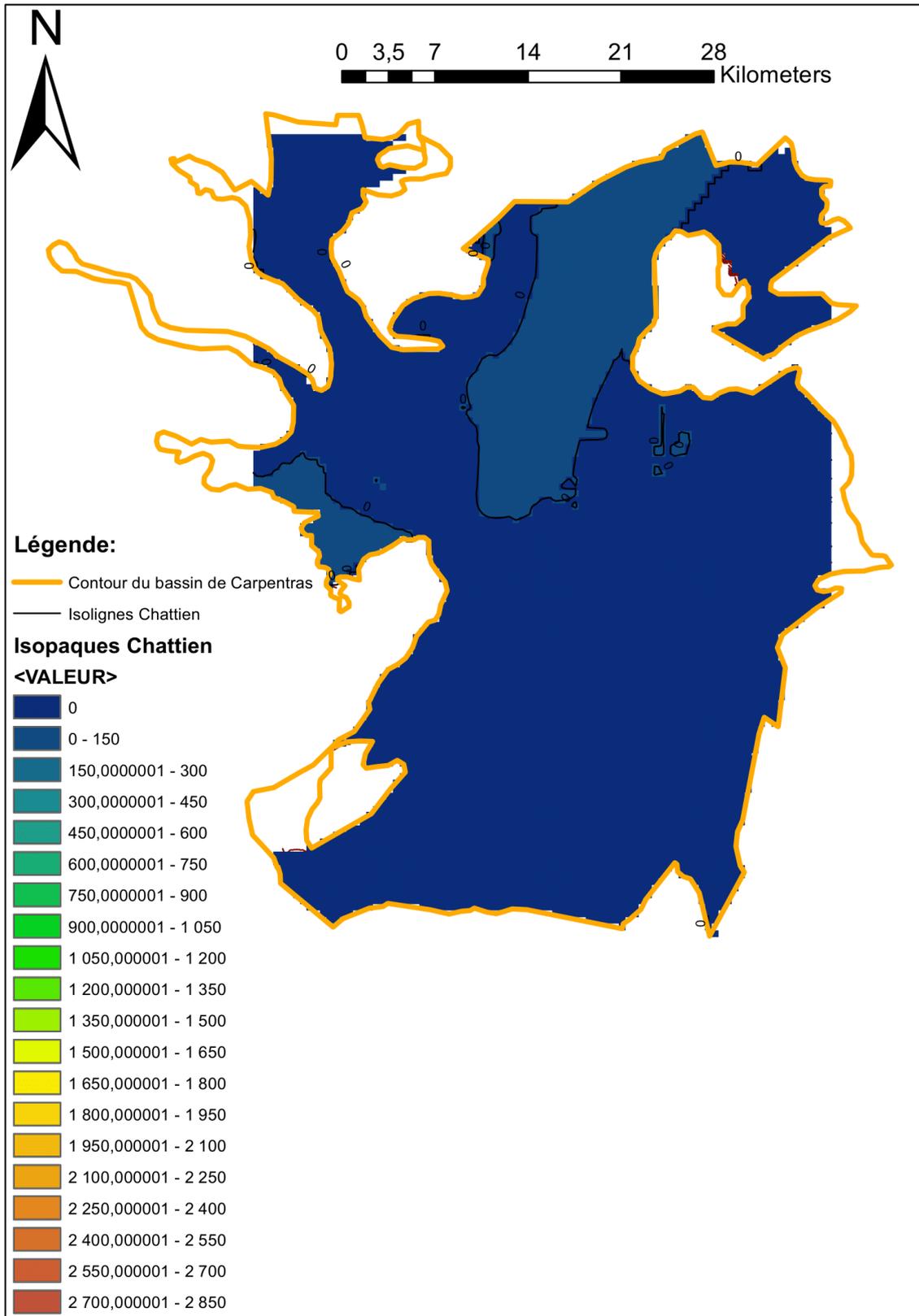
Annexe 5.1 : Carte isopaque du Paléocène dans le bassin de Carpentras



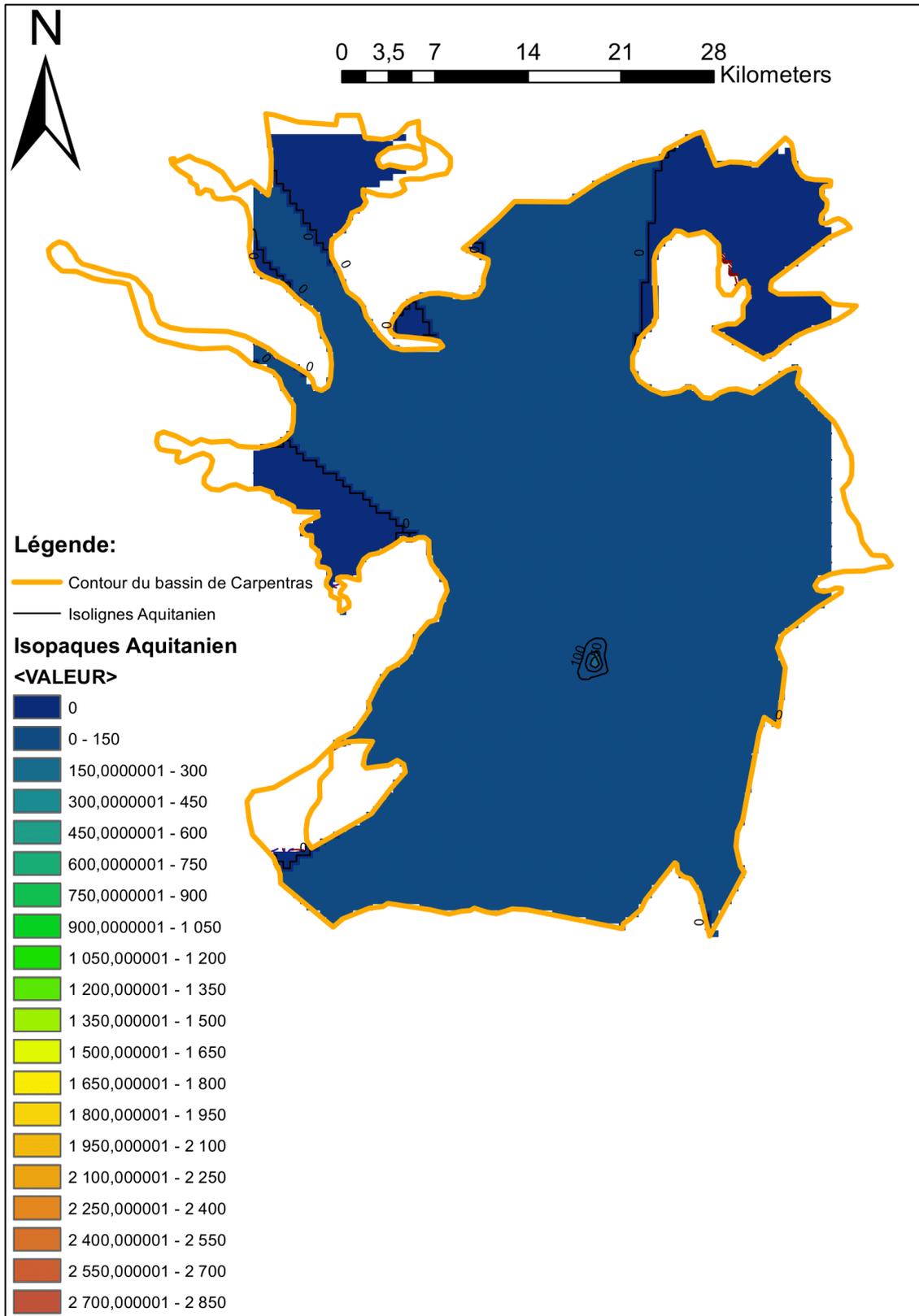
Annexe 5.2 : Carte isopaque du Eocène dans le bassin de Carpentras



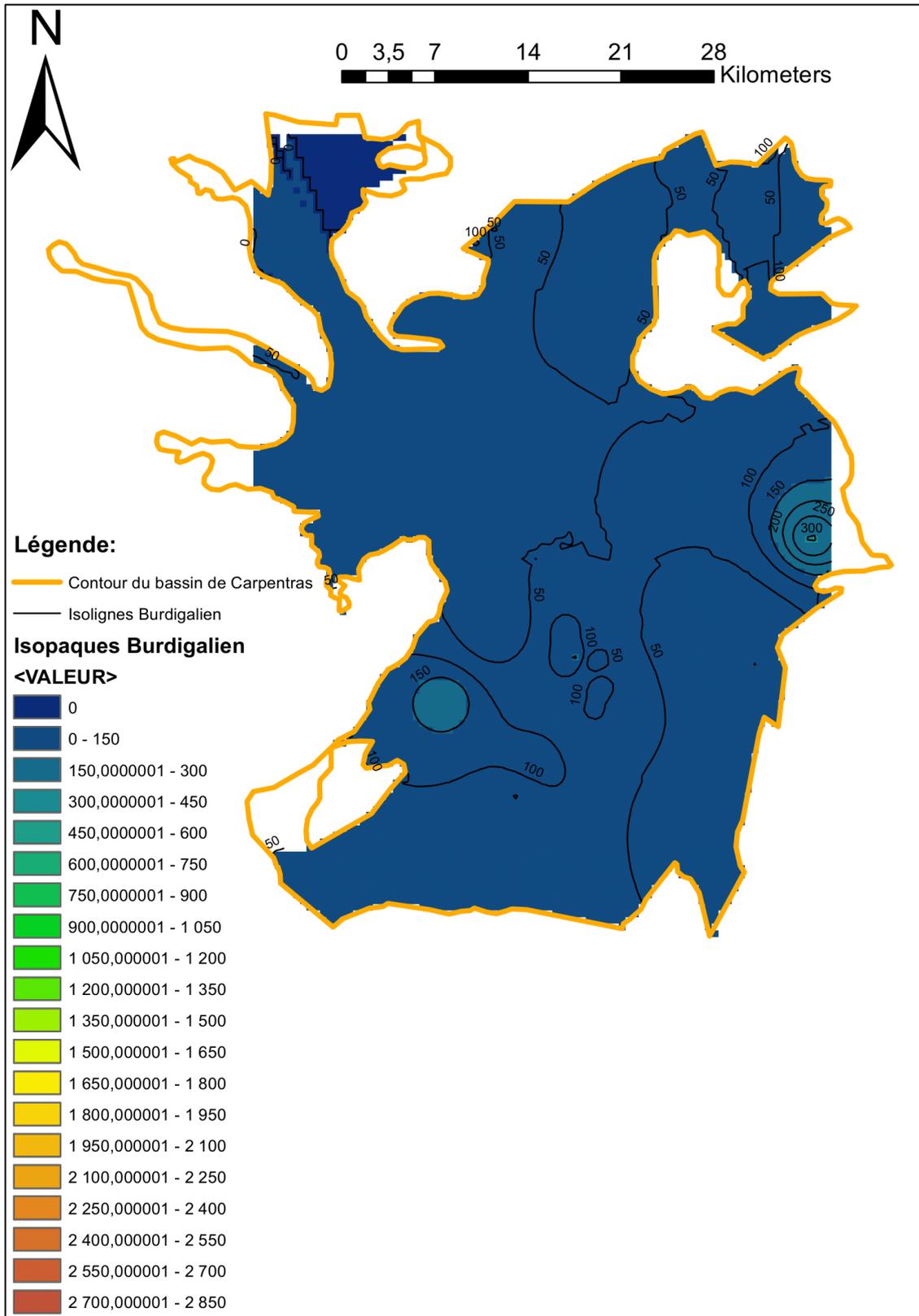
Annexe 5.3 : Carte isopaque du Rupélien dans le bassin de Carpentras



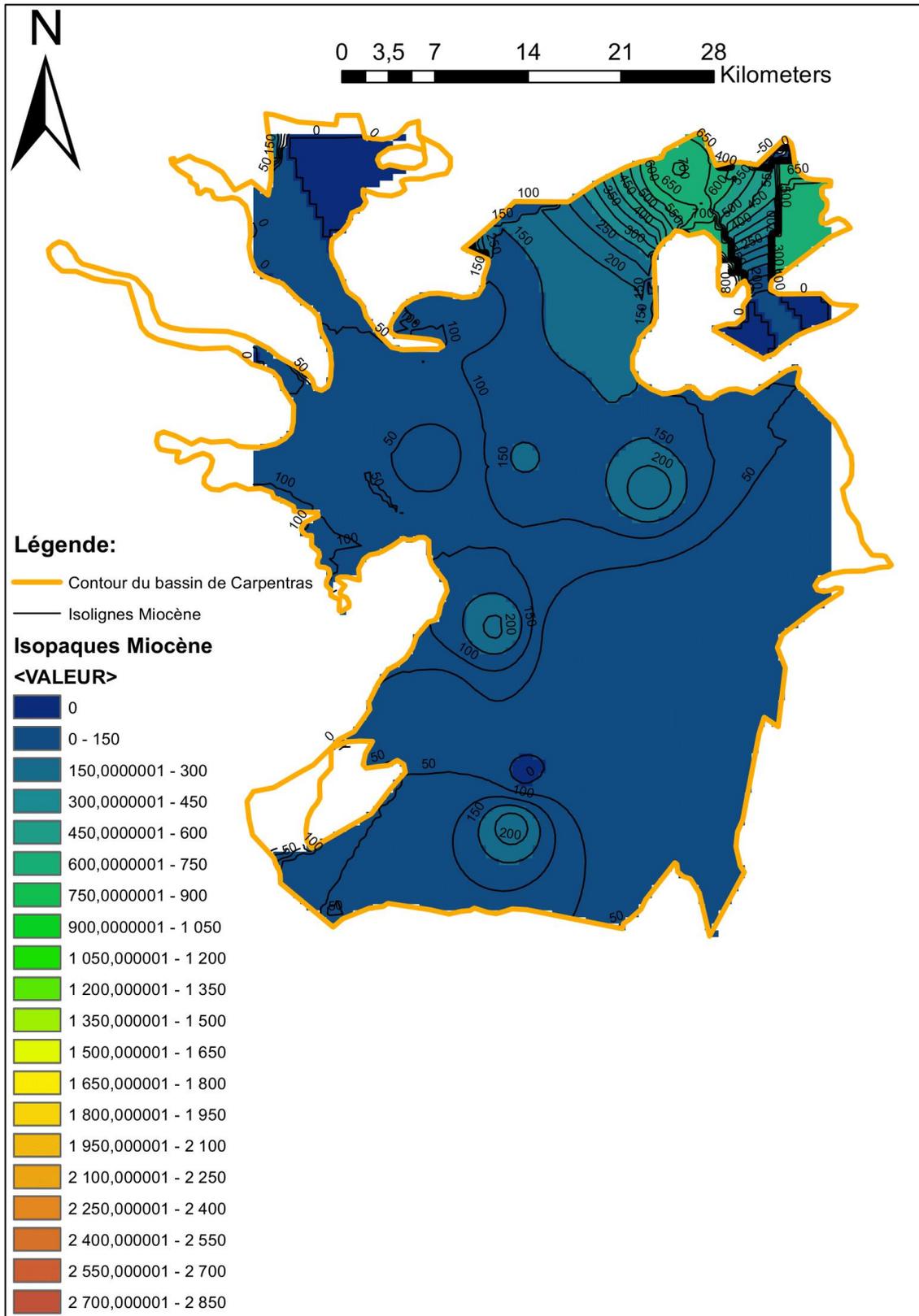
Annexe 5.4 : Carte isopaque du Chattien dans le bassin de Carpentras



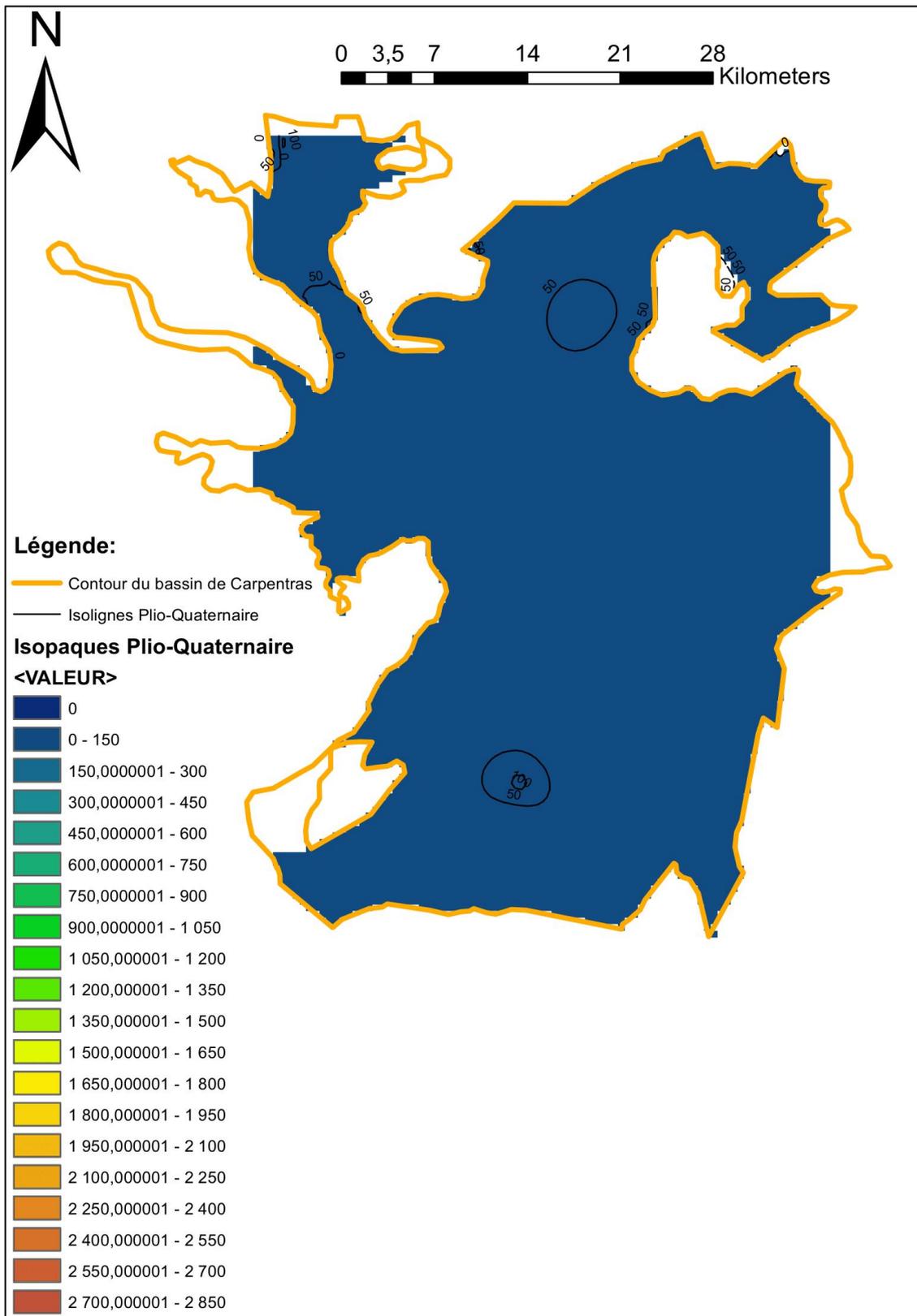
Annexe 5.5 : Carte isopaque de l'Aquitaniien dans le bassin de Carpentras



Annexe 5.6 : Carte isopaque du Burdigalien dans le bassin de Carpentras

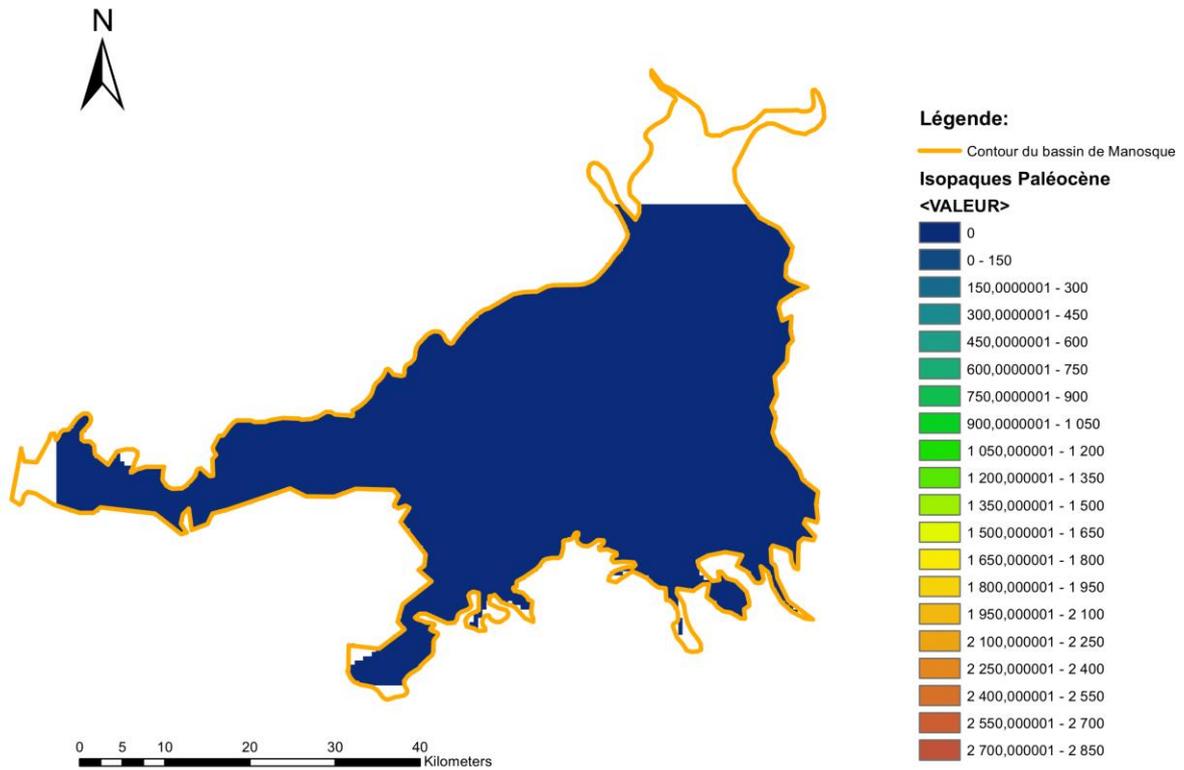


Annexe 5.7 : Carte isopaque du Miocène dans le bassin de Carentan

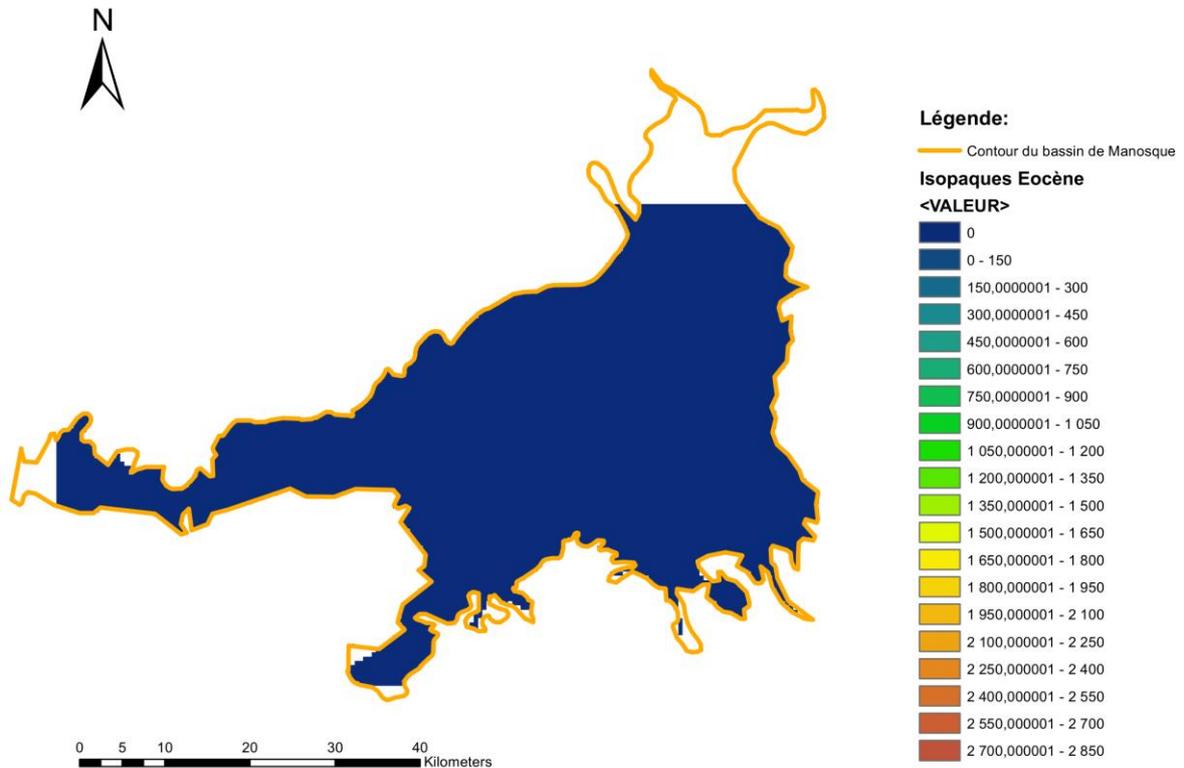


Annexe 5.8 : Carte isopaque du Plio-Quaternaire dans le bassin de Carpentras

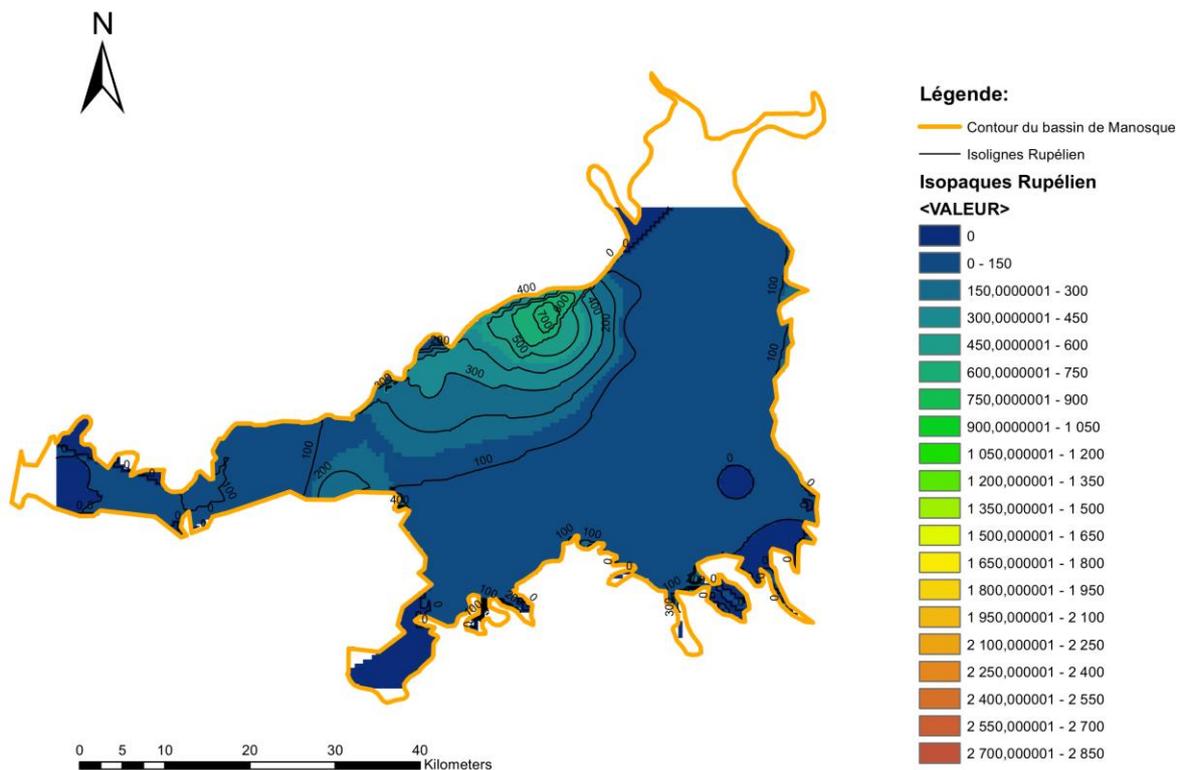
Annexe 6 : Cartes d'interpolation du bassin de Manosque



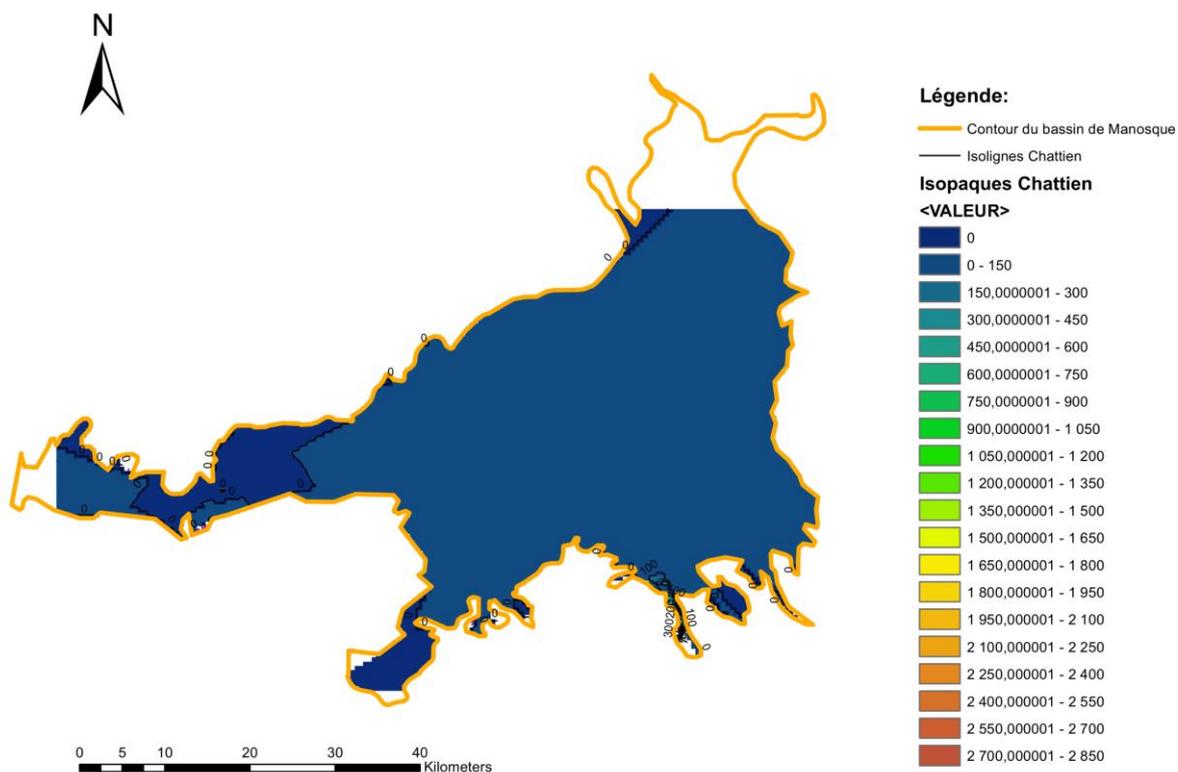
Annexe 6.1 : Carte isopache du Paléocène dans le bassin de Manosque



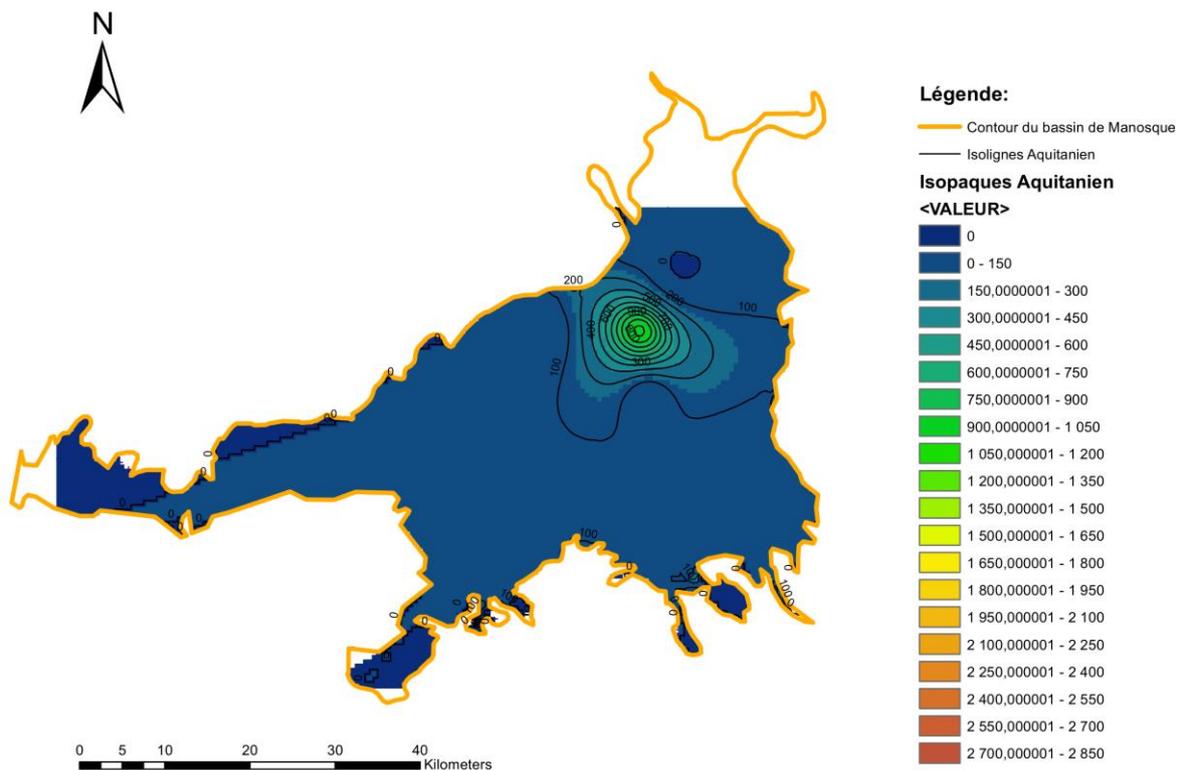
Annexe 6.2 : Carte isopache du Eocène dans le bassin de Manosque



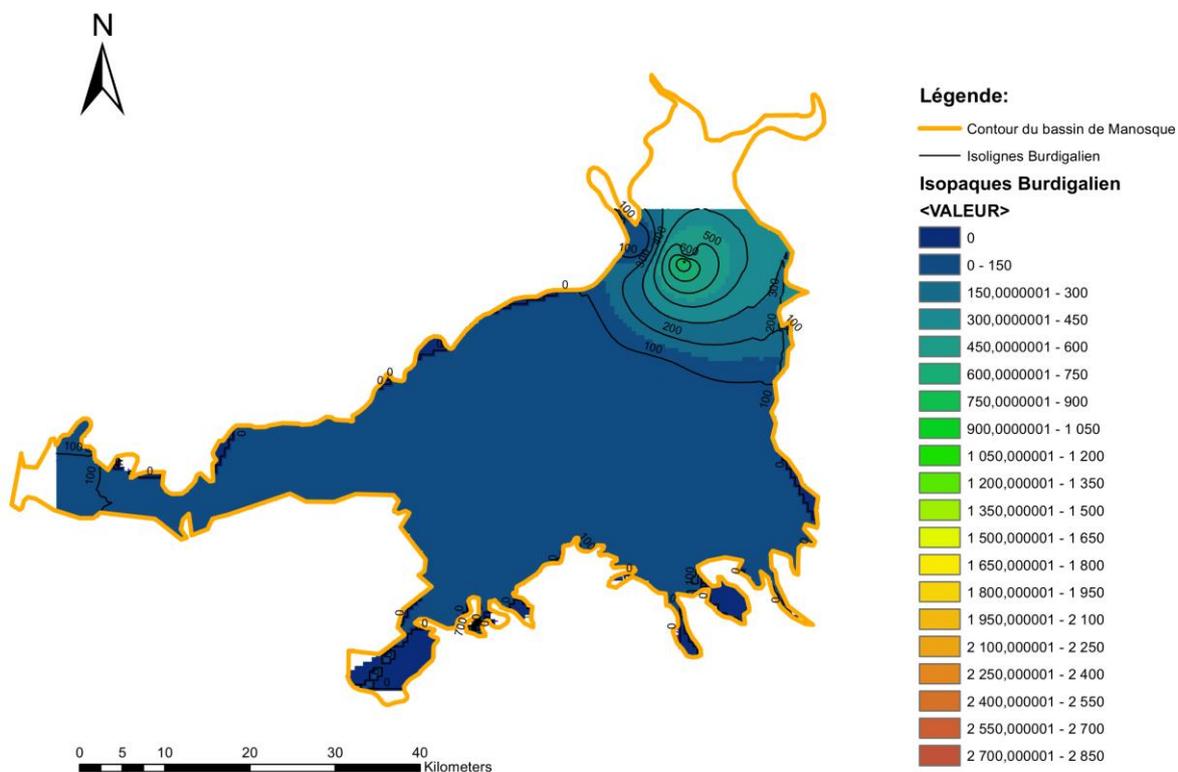
Annexe 6.3 : Carte isopaque du Rupélien dans le bassin de Manosque



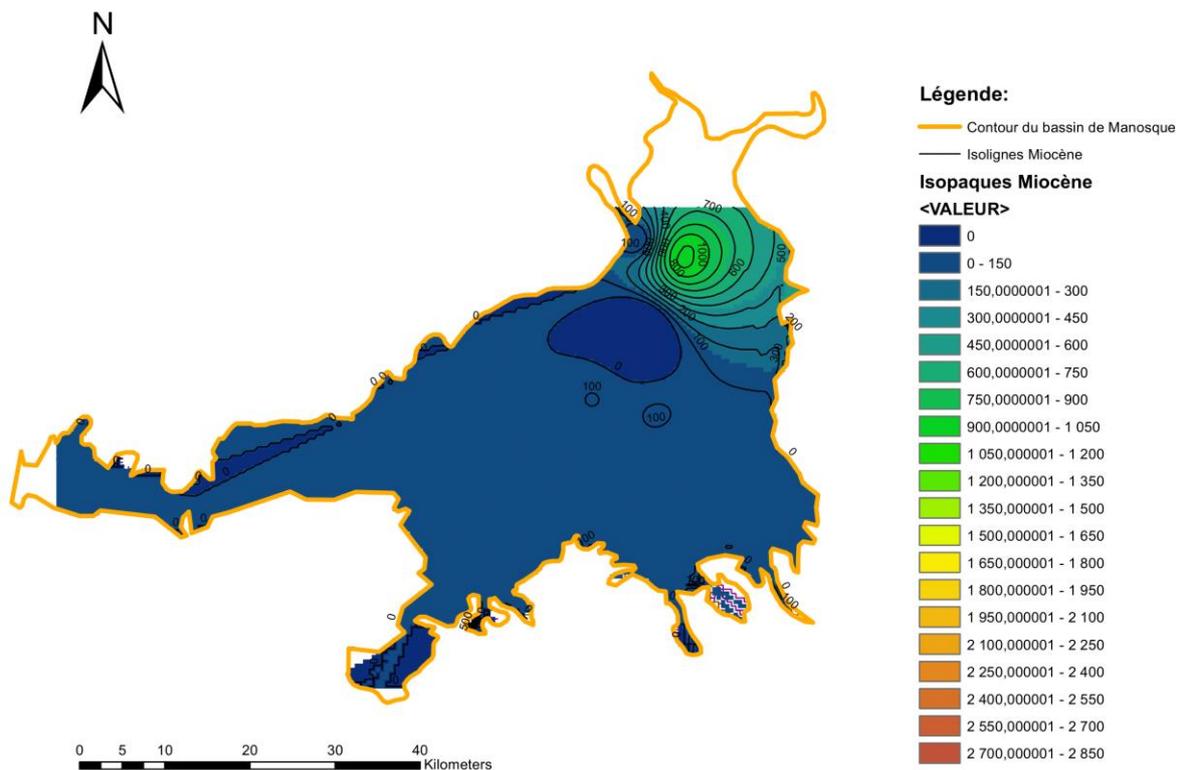
Annexe 6.4 : Carte isopaque du Chattien dans le bassin de Manosque



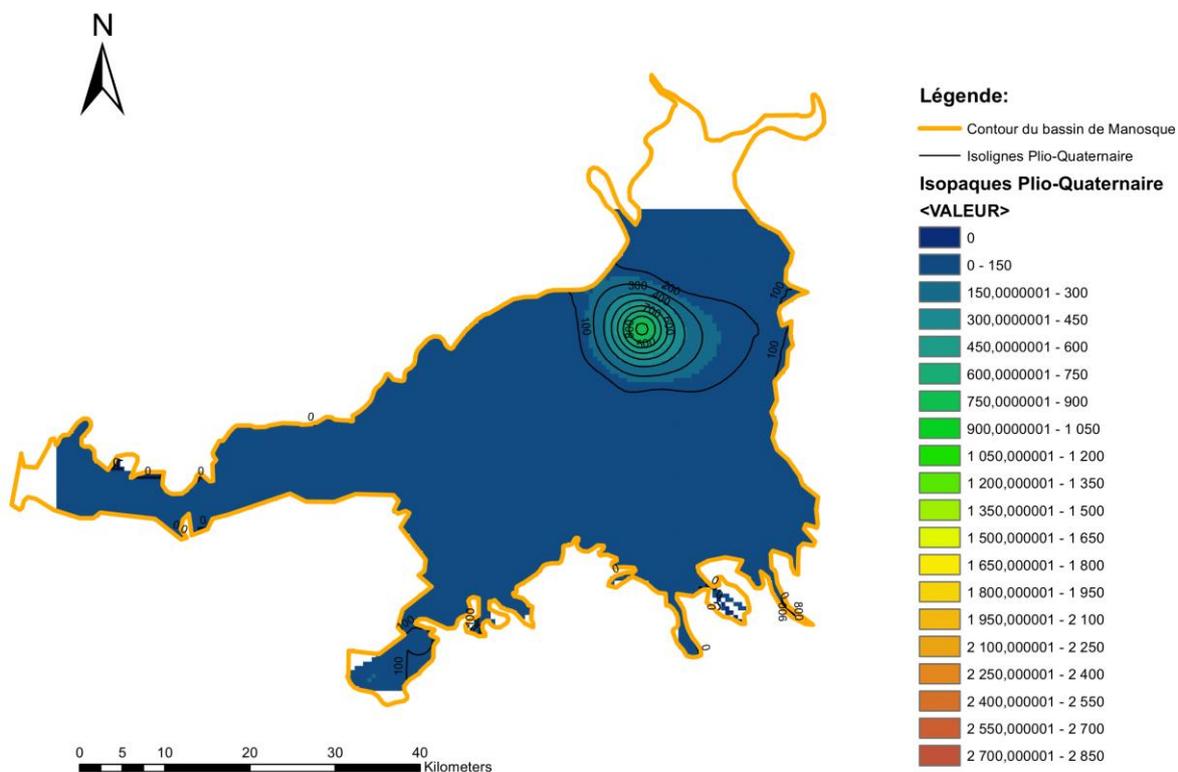
Annexe 6.5 : Carte isopaque de l'Aquitaniien dans le bassin de Manosque



Annexe 6.6 : Carte isopaque du Burdigalien dans le bassin de Manosque

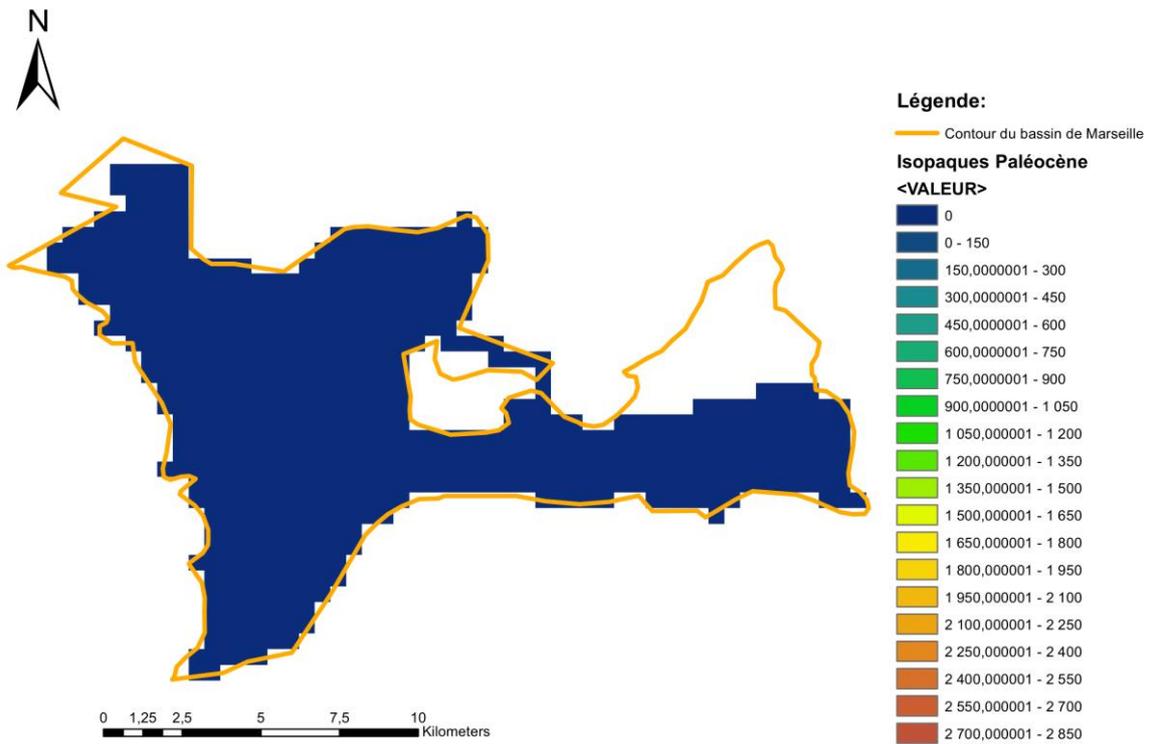


Annexe 6.7 : Carte isopaque du Miocène dans le bassin de Manosque

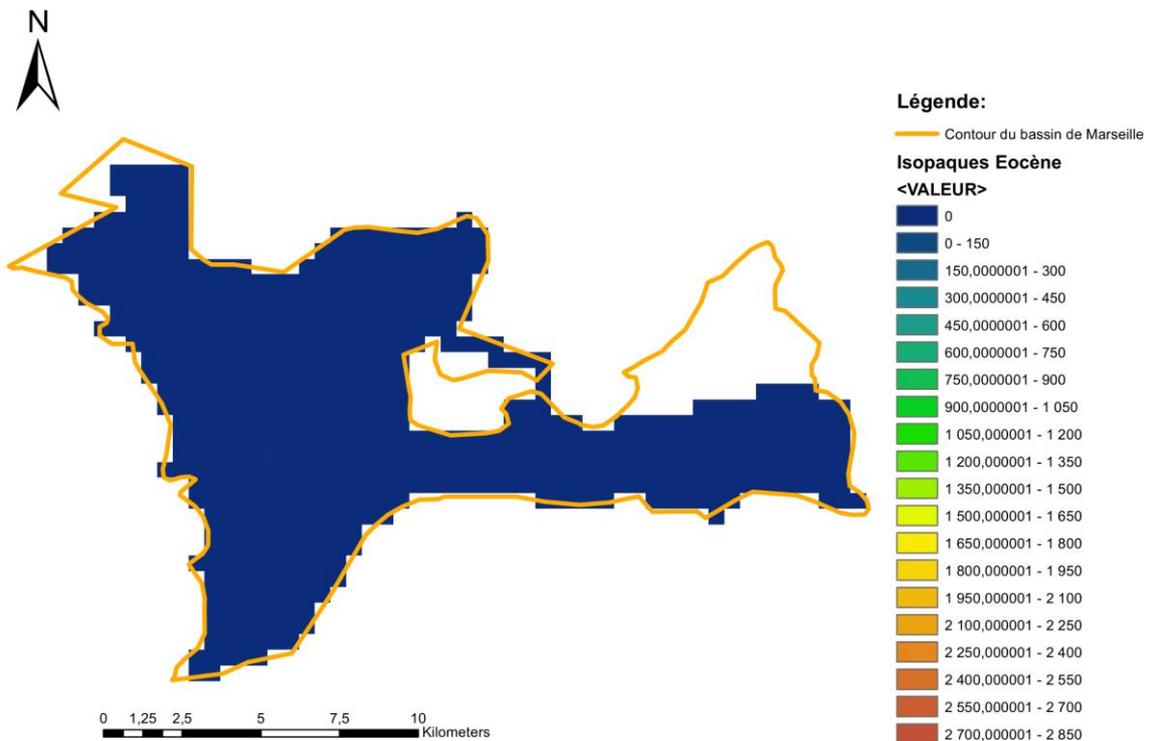


Annexe 6.8 : Carte isopaque du Plio-Quaternaire dans le bassin de Manosque

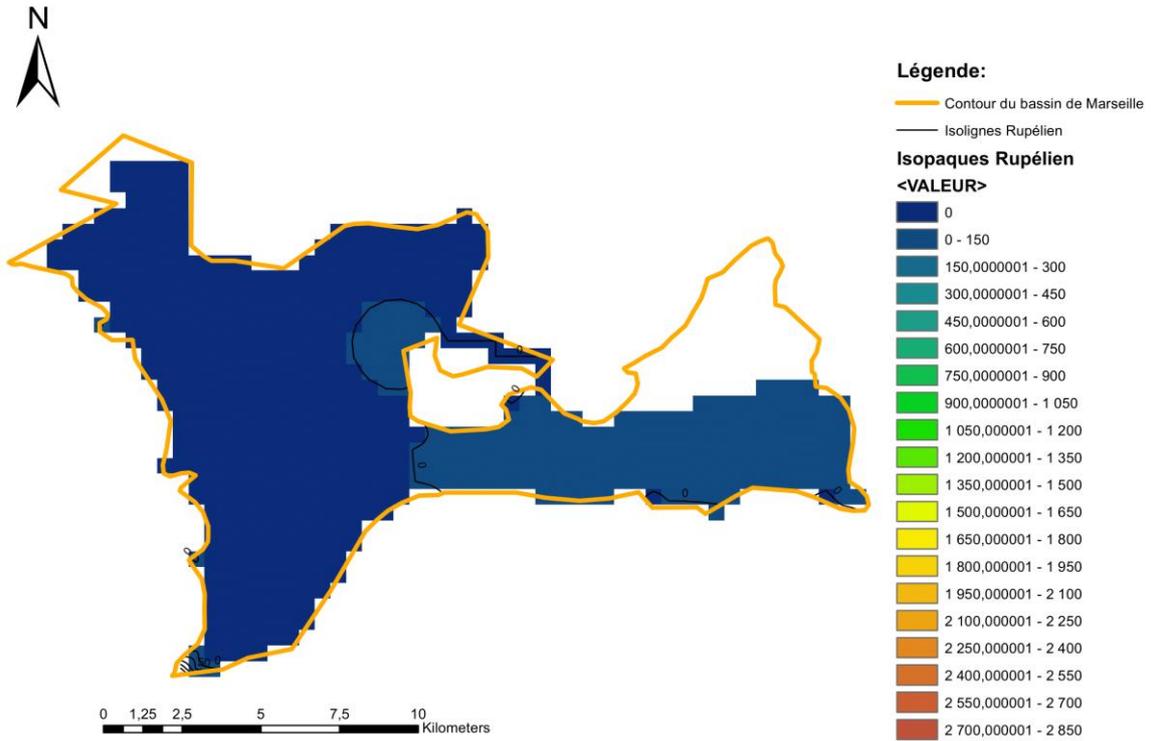
Annexe 7 : Cartes d'interpolation du bassin de Marseille



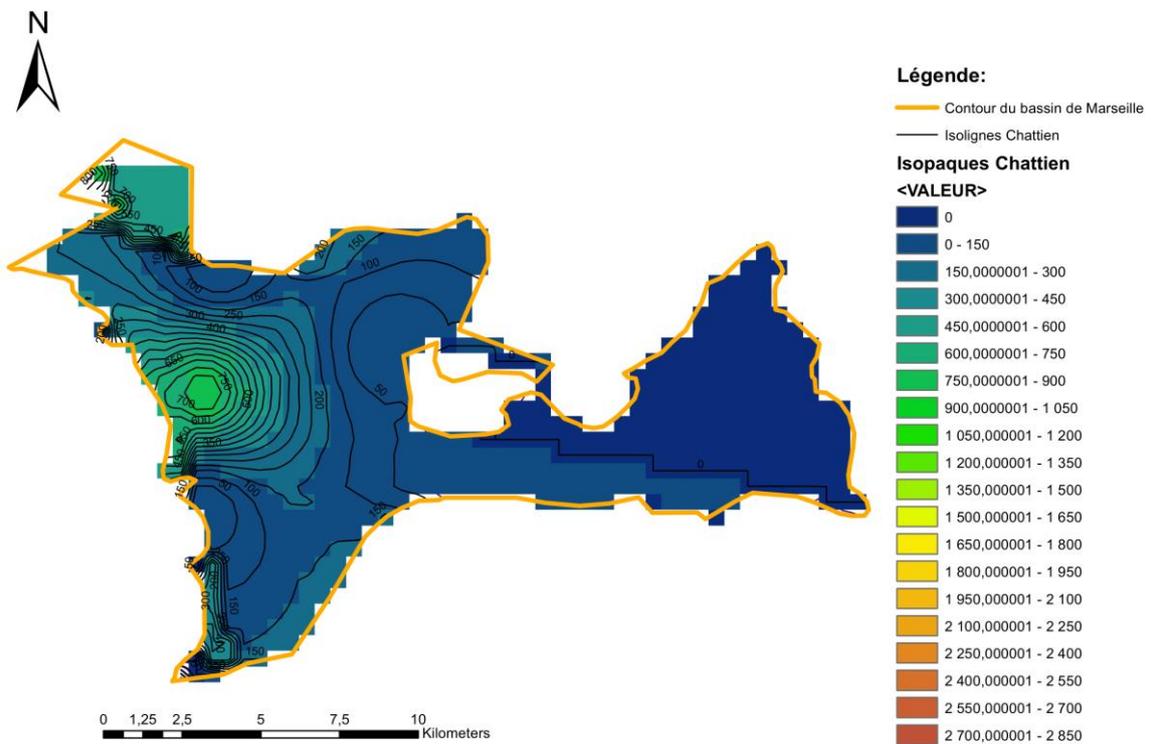
Annexe 7.1 : Carte isopache du Paléocène dans le bassin de Marseille



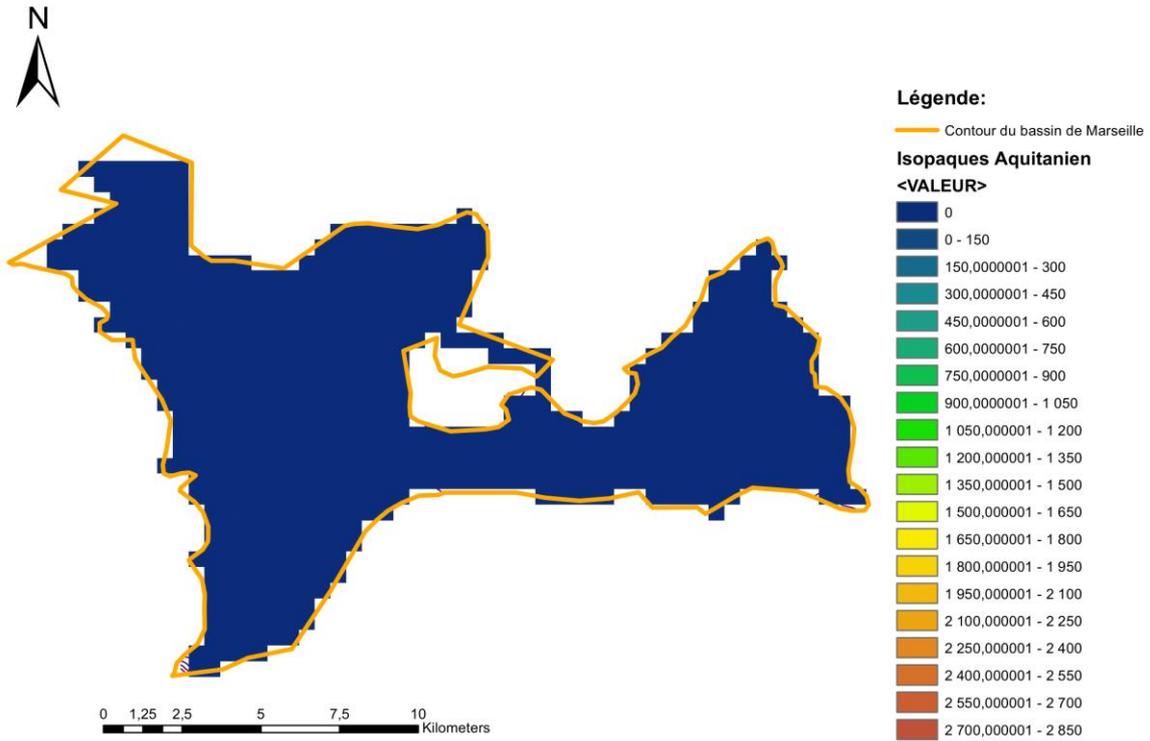
Annexe 7.2 : Carte isopache du Eocène dans le bassin de Marseille



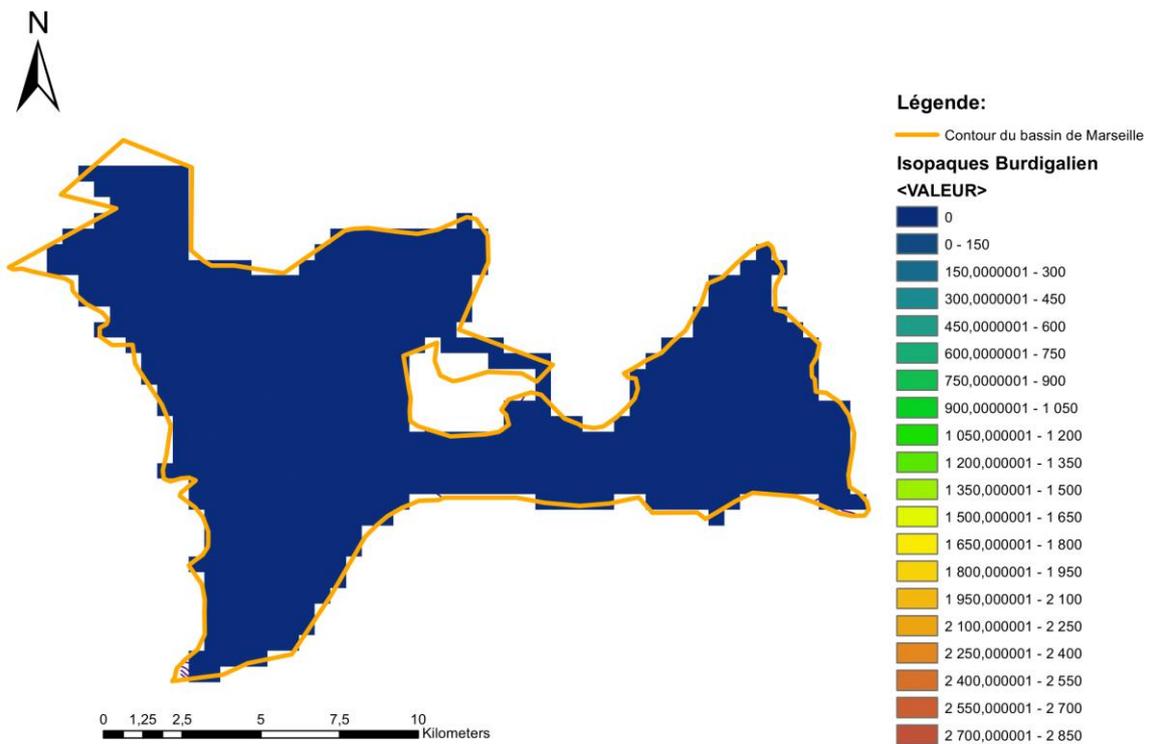
Annexe 7.3 : Carte isopaque du Rupélien dans le bassin de Marseille



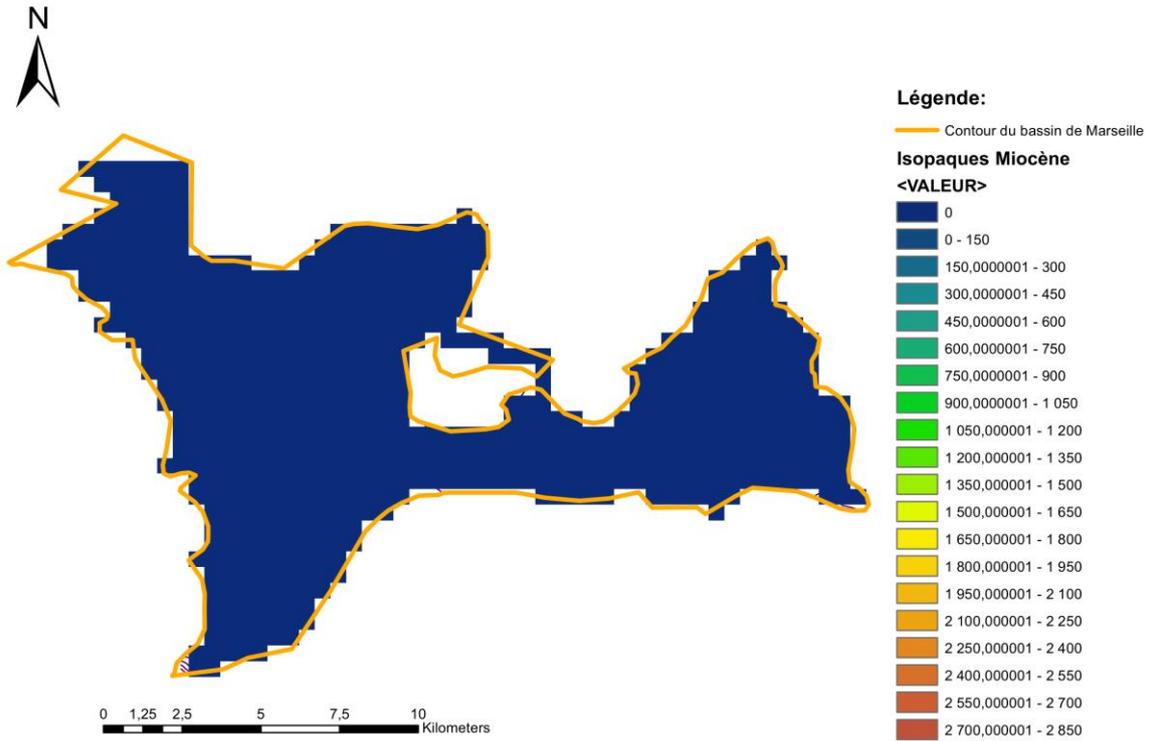
Annexe 7.4 : Carte isopaque du Chattien dans le bassin de Marseille



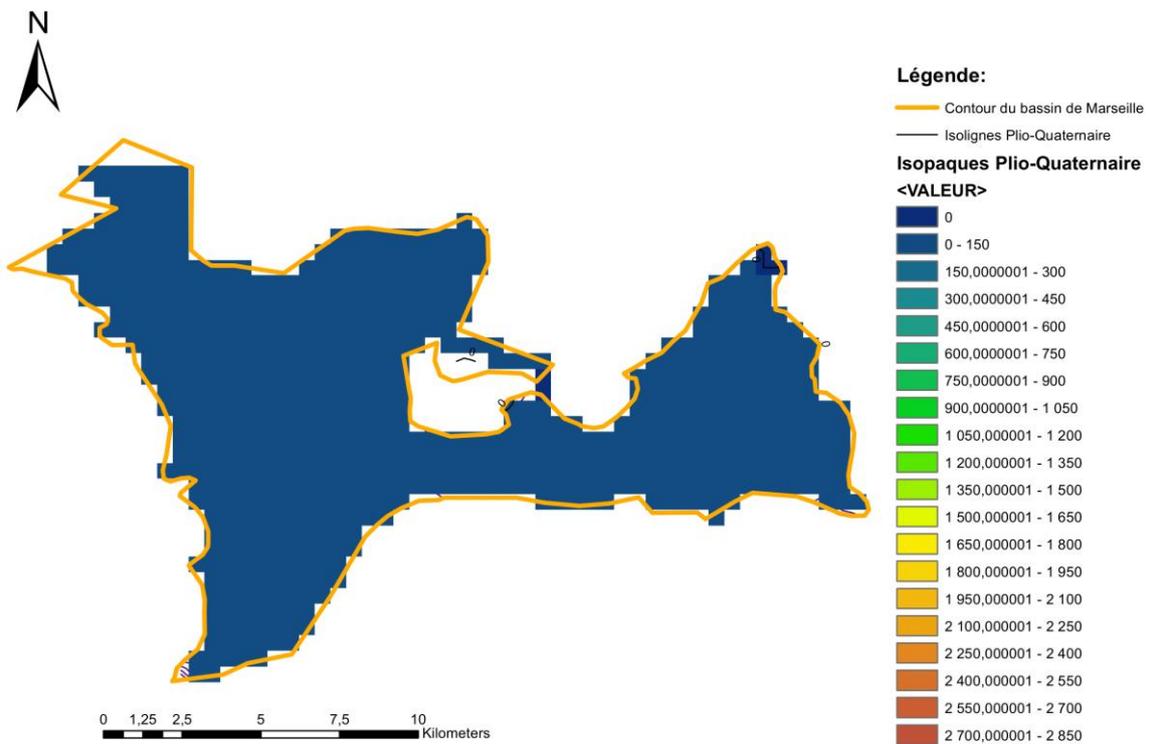
Annexe 7.5 : Carte isopaque de l'Aquitaniens dans le bassin de Marseille



Annexe 7.6 : Carte isopaque du Burdigalien dans le bassin de Marseille

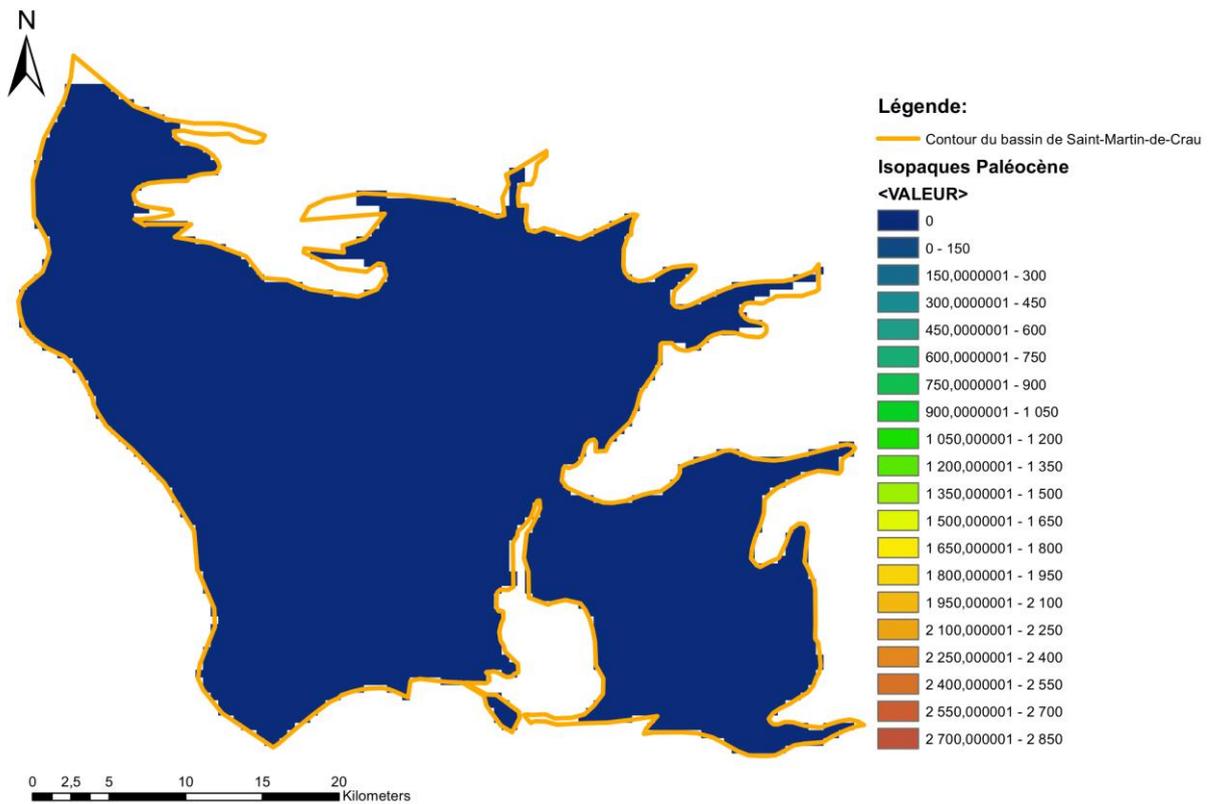


Annexe 7.7 : Carte isopache du Miocène dans le bassin de Marseille

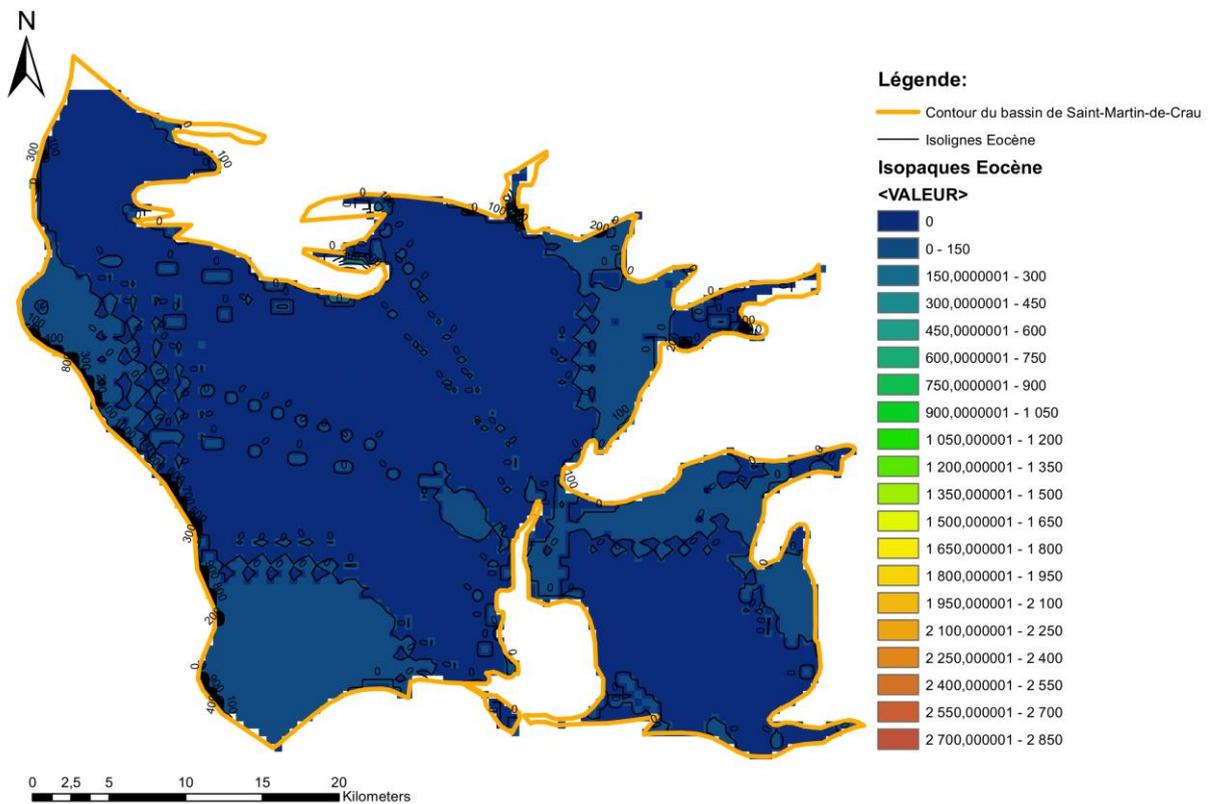


Annexe 7.8 : Carte isopache du Plio-Quaternaire dans le bassin de Marseille

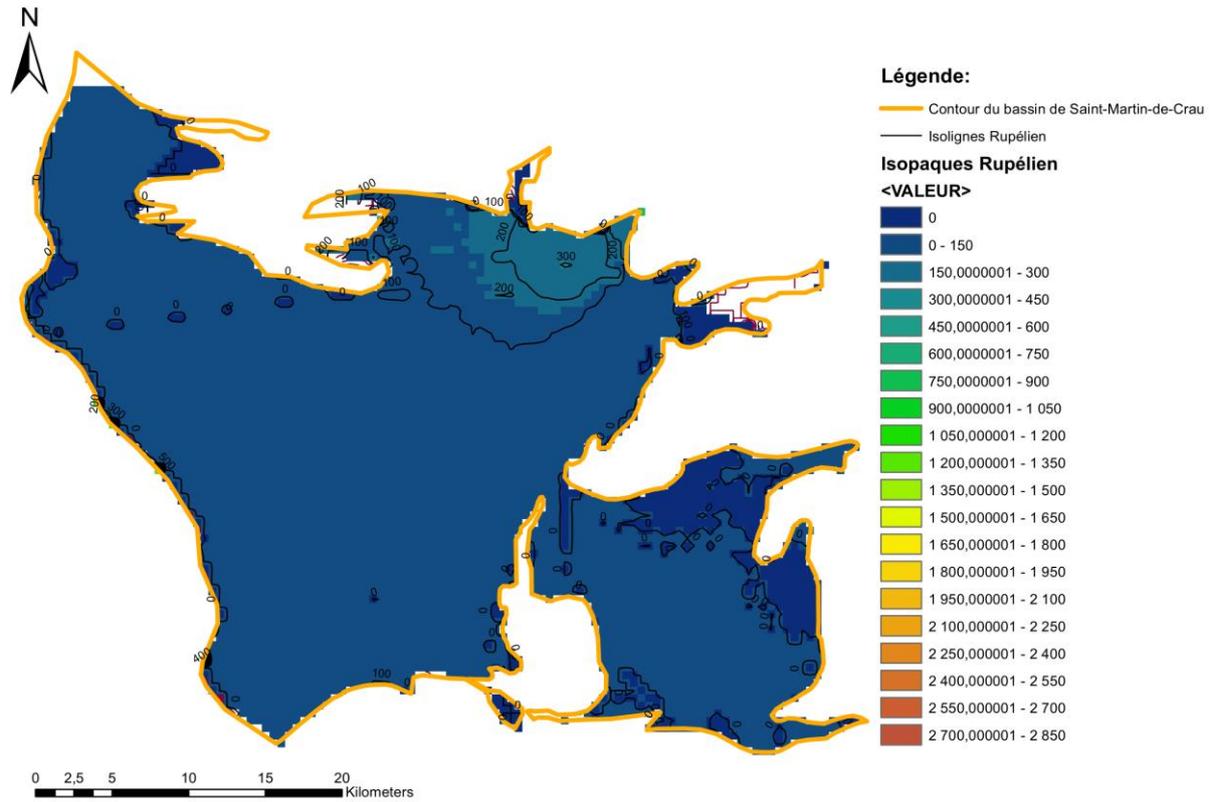
Annexe 8 : Cartes d'interpolation du bassin de Saint-Martin-de-Crau



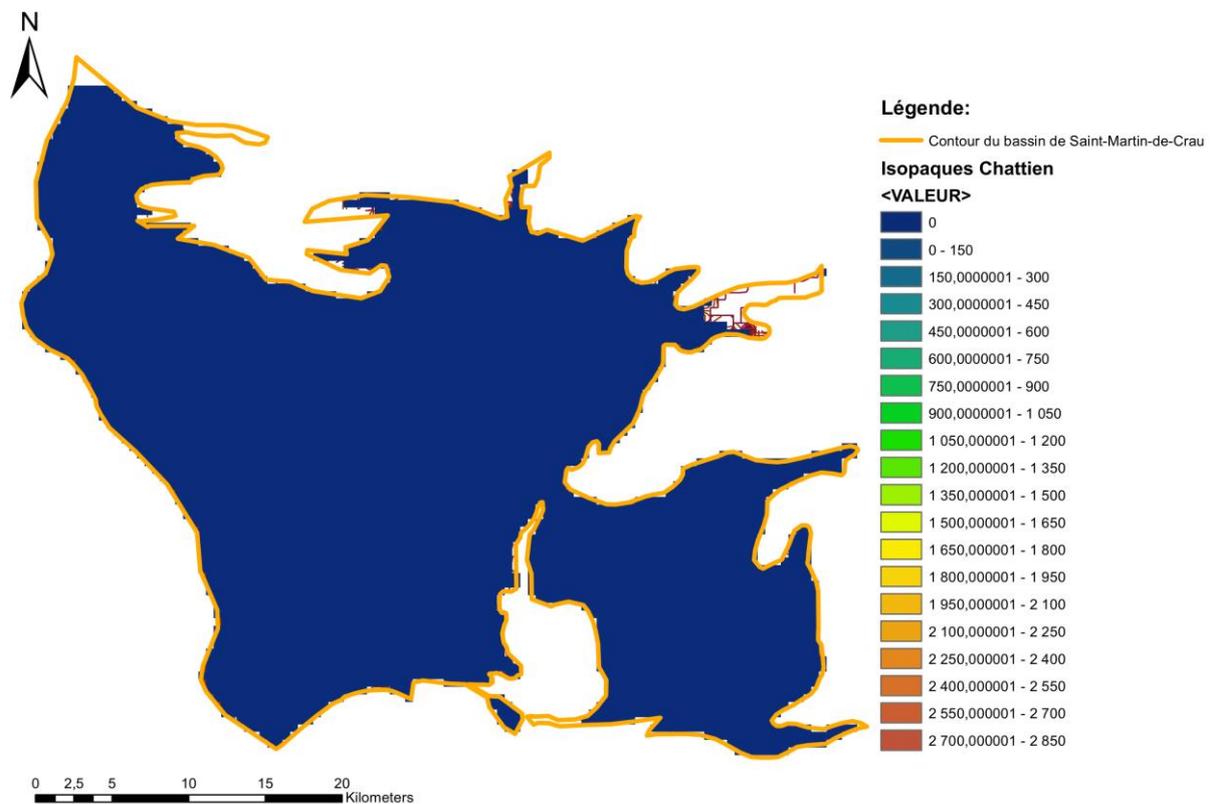
Annexe 8.1 : Carte isopache du Paléocène dans le bassin de Saint-Martin-de-Crau



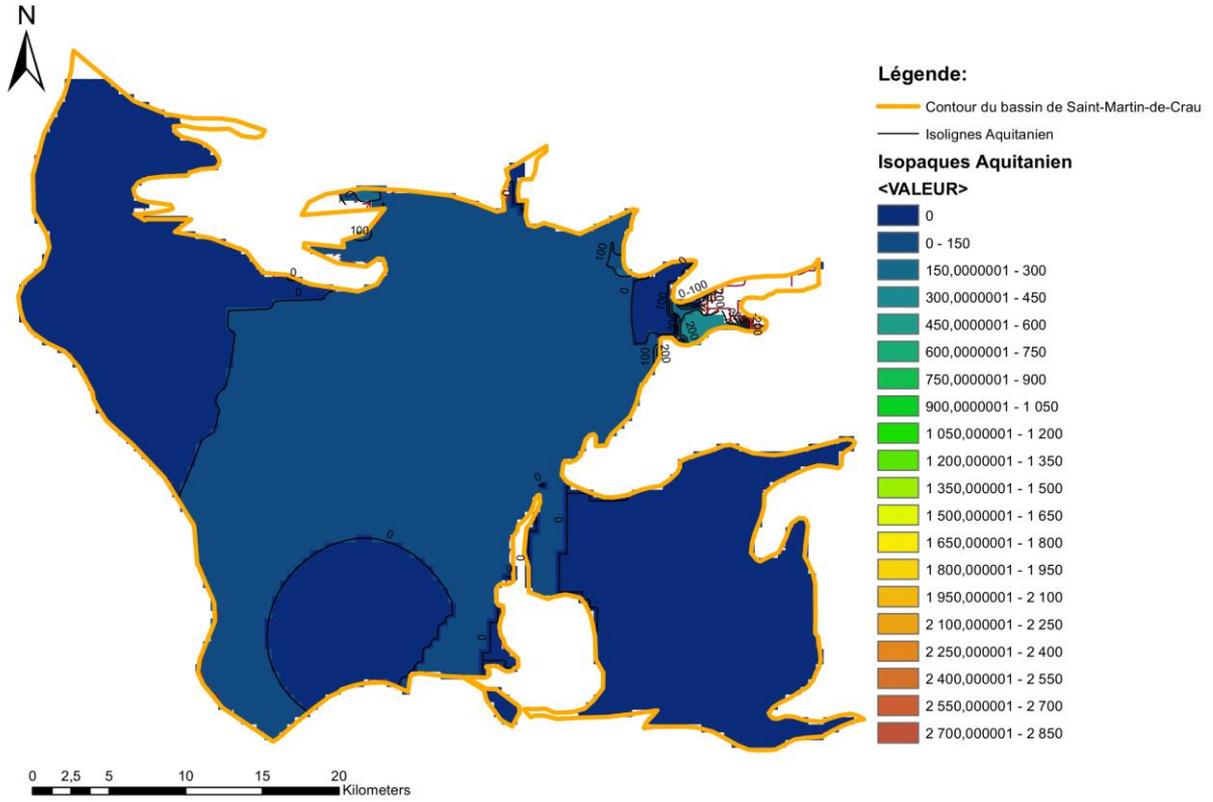
Annexe 8.2 : Carte isopache du Eocène dans le bassin de Saint-Martin-de-Crau



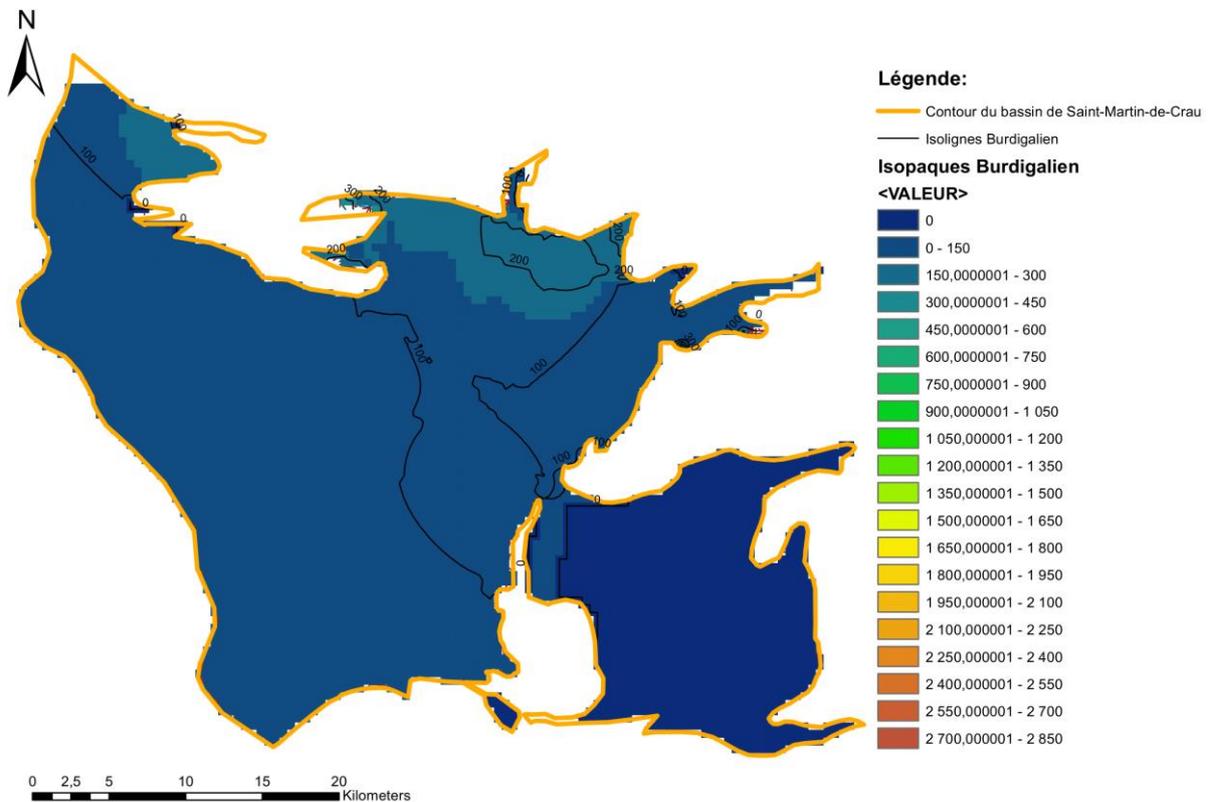
Annexe 8.3 : Carte isopaque du Rupélien dans le bassin de Saint-Martin-de-Crau



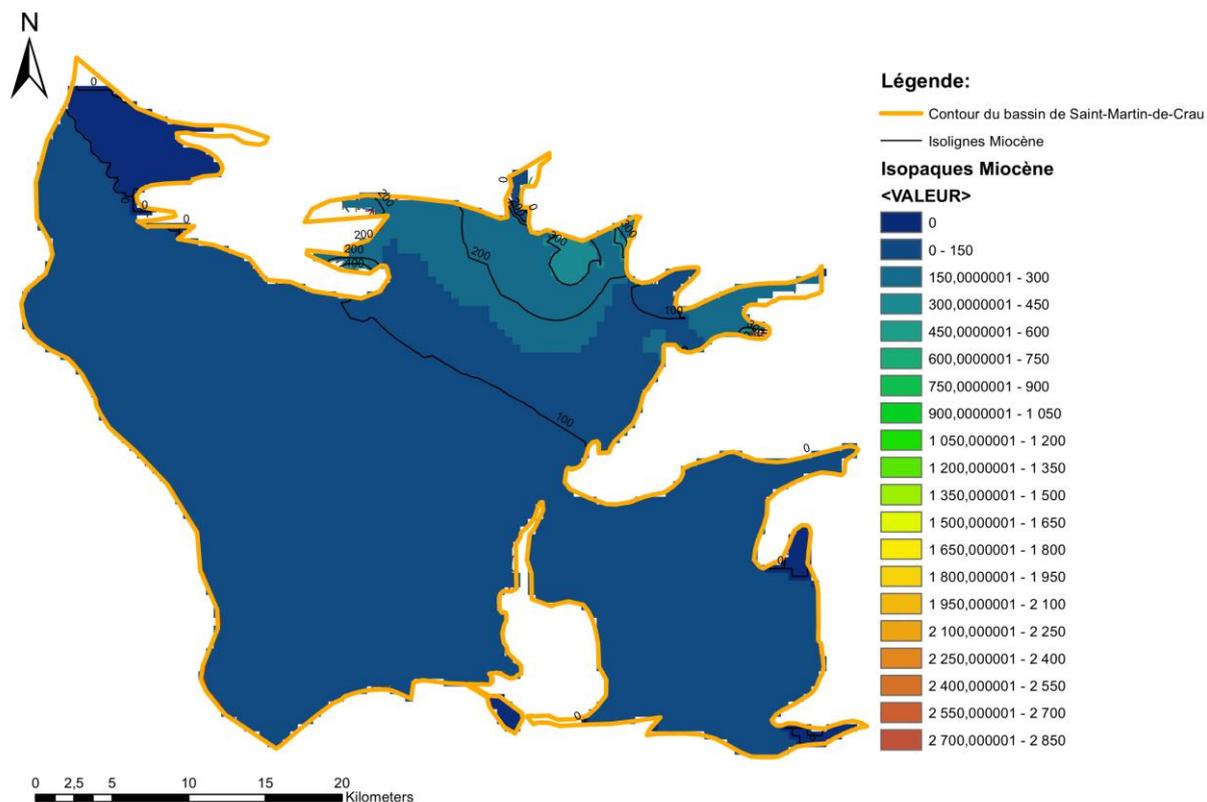
Annexe 8.4 : Carte isopaque du Chattien dans le bassin de Saint-Martin-de-Crau



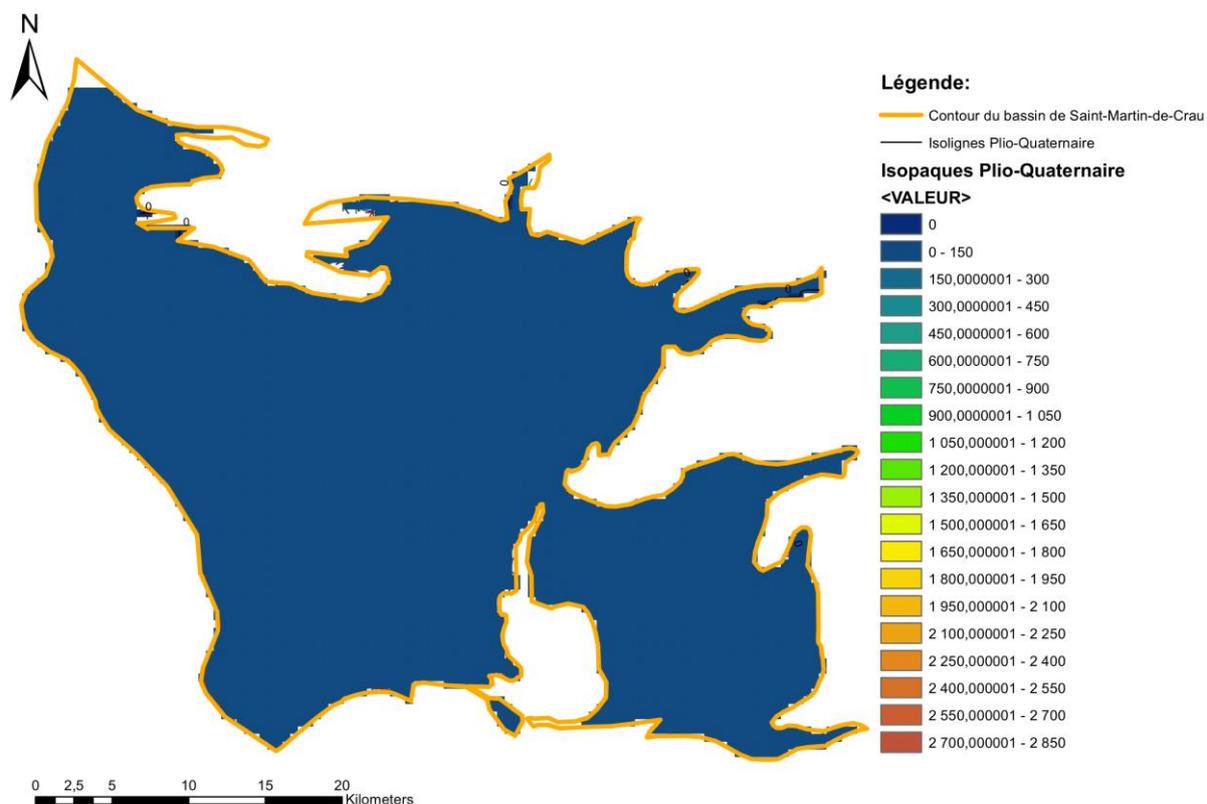
Annexe 8.5 : Carte isopaque de l'Aquitanien dans le bassin de Saint-Martin-de-Crau



Annexe 8.6 : Carte isopaque du Burdigalien dans le bassin de Saint-Martin-de-Crau

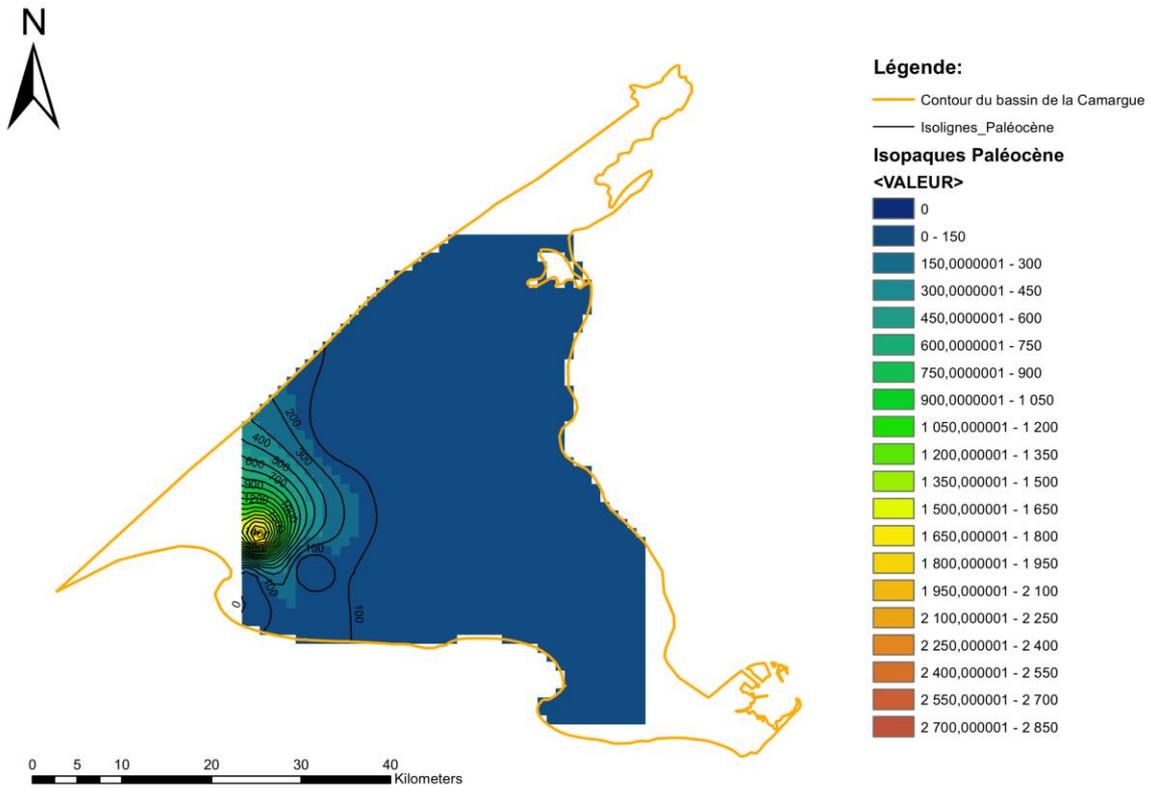


Annexe 8.7 : Carte isopaque du Miocène dans le bassin de Saint-Martin-de-Crau

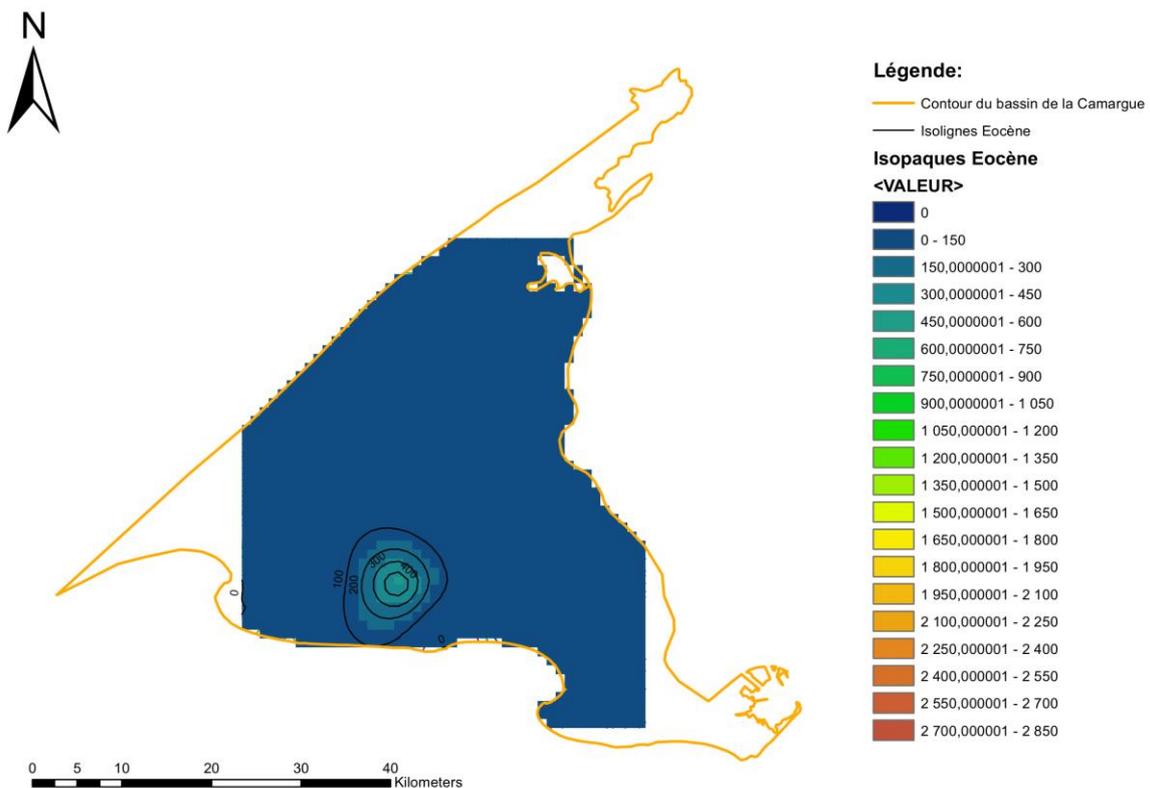


Annexe 8.8 : Carte isopaque du Plio-Quaternaire dans le bassin de Saint-Martin-de-Crau

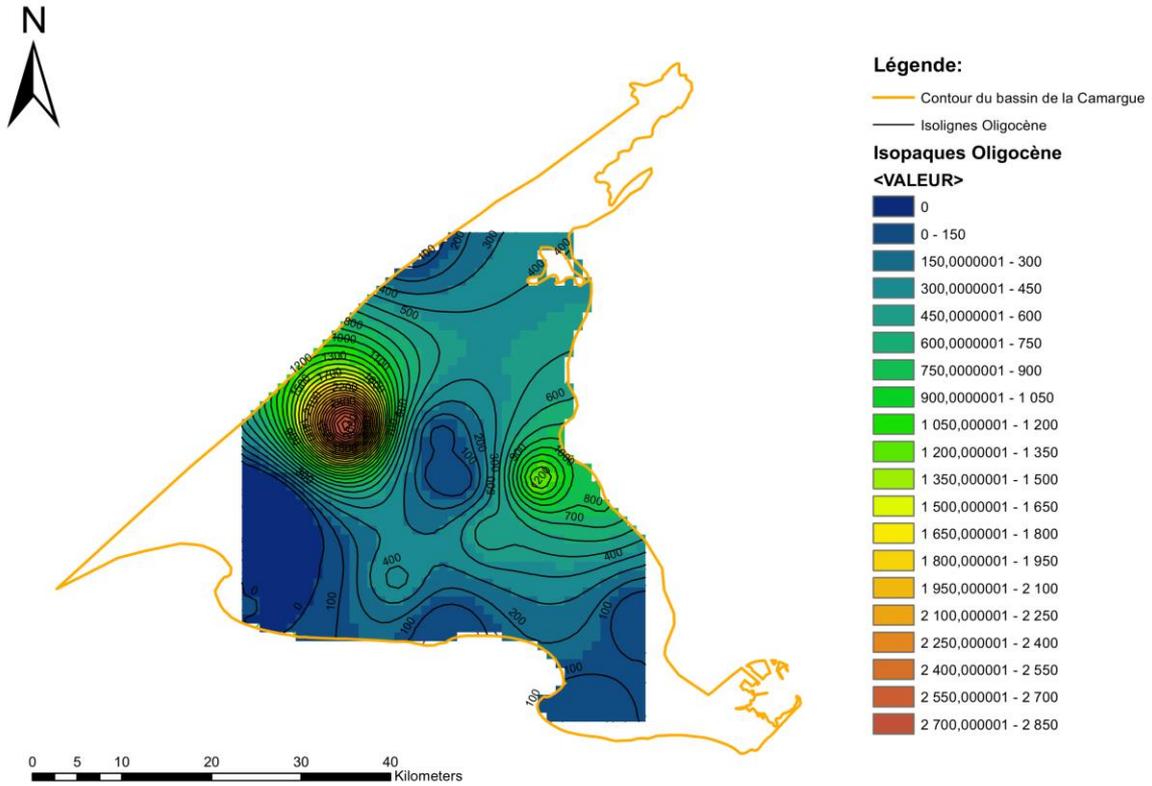
Annexe 9 : Cartes d'interpolation du bassin de la Camargue



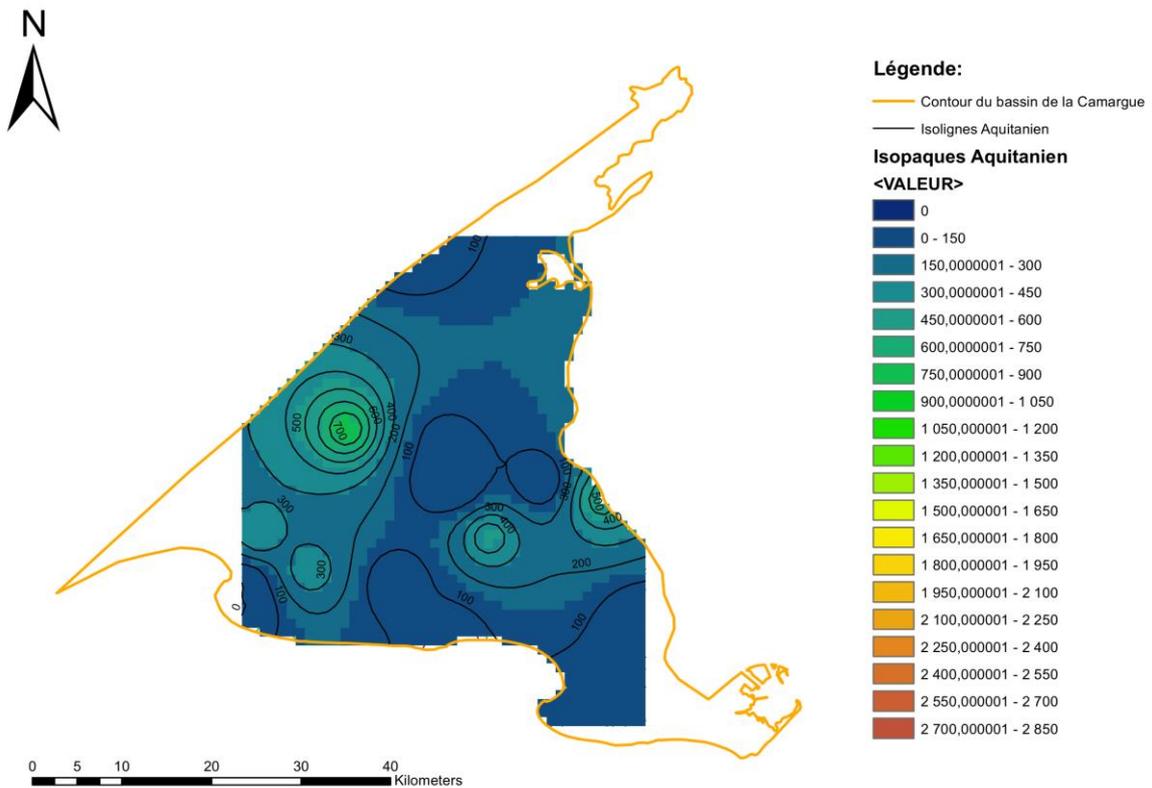
Annexe 9.1 : Carte isopache du Paléocène dans le bassin de la Camargue



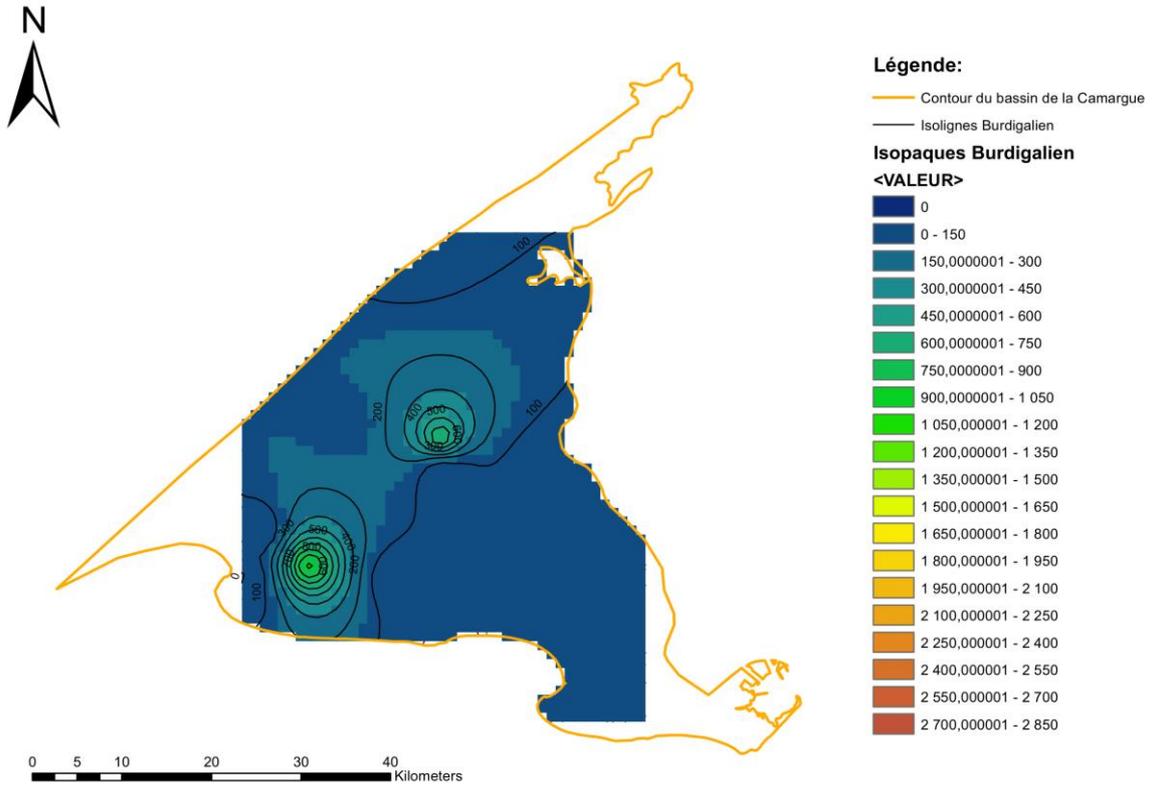
Annexe 9.2 : Carte isopache du Eocène dans le bassin de la Camargue



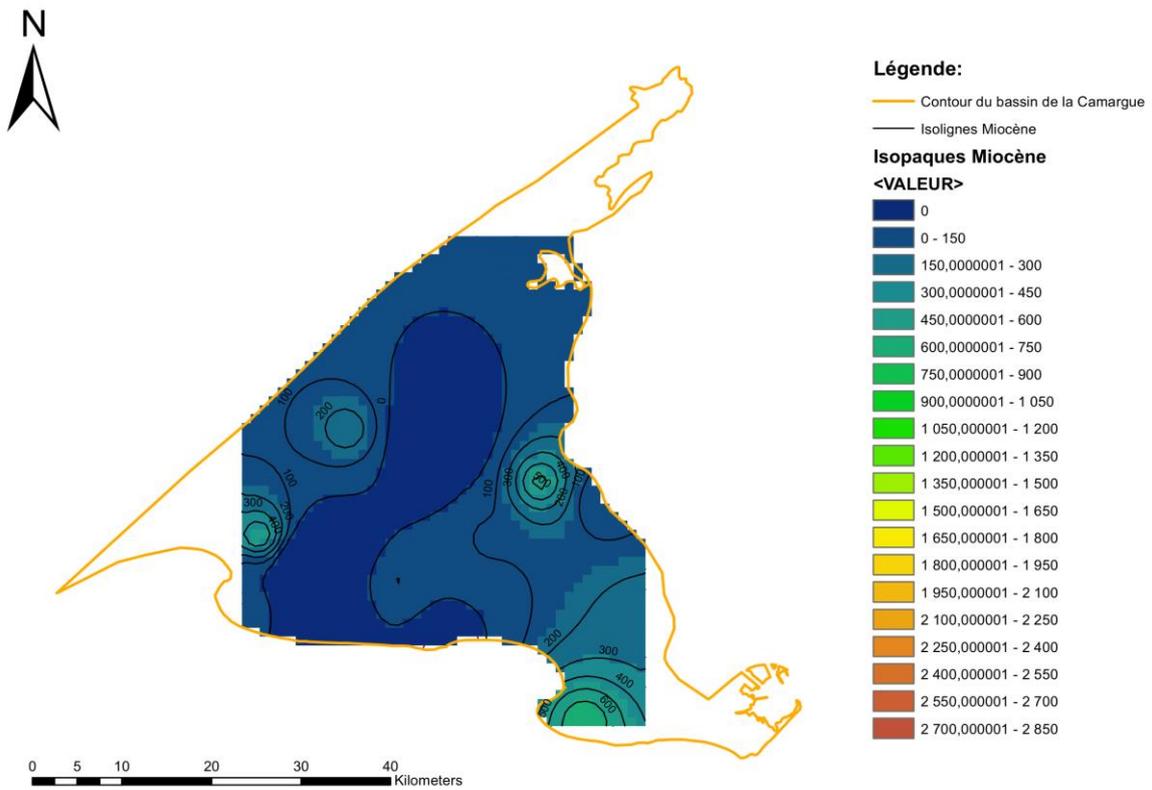
Annexe 9.3 : Carte isopaque de l'Oligocène dans le bassin de la Camargue



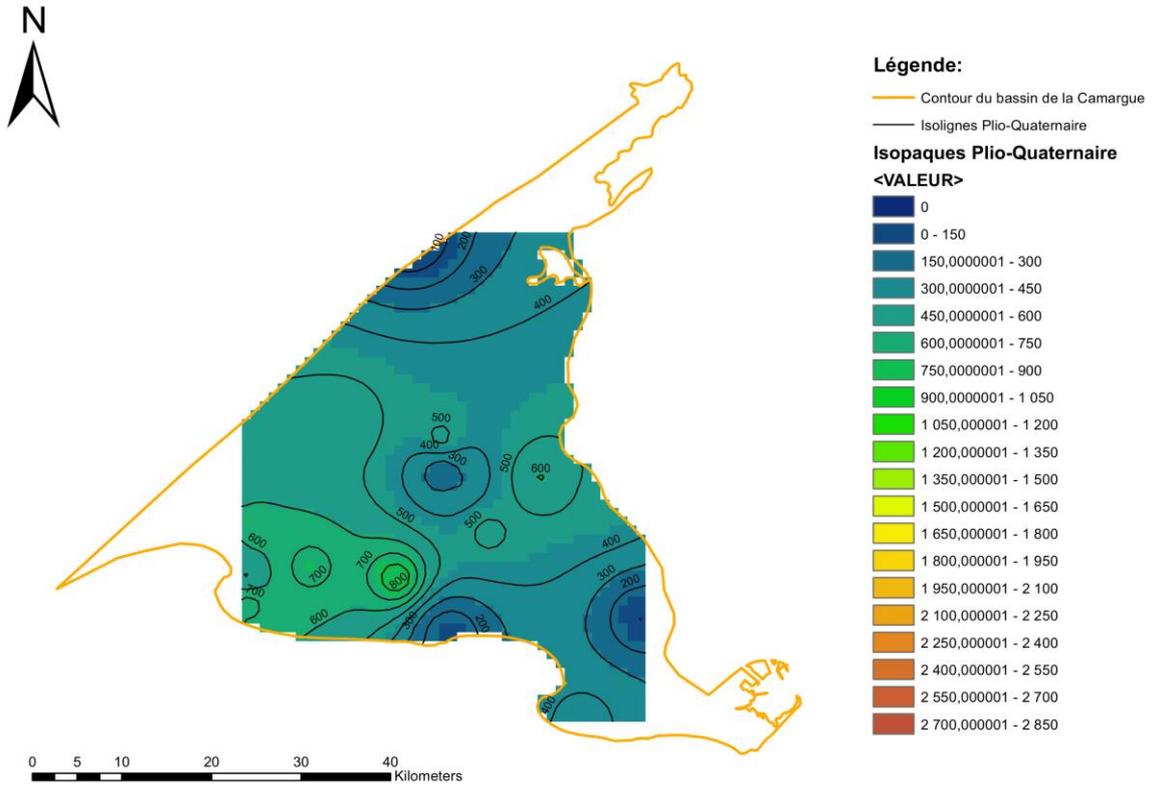
Annexe 9.4 : Carte isopaque de l'Aquitaniien dans le bassin de la Camargue



Annexe 9.5 : Carte isopaque du Burdigalien dans le bassin de la Camargue



Annexe 9.6 : Carte isopaque du Miocène dans le bassin de la Camargue



Annexe 9.7 : Carte isopaque du Plio-Quaternaire dans le bassin de la Camargue