Document public

Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine

Piézométrie des systèmes aquifères : outils de cartographie et optimisation des réseaux de surveillance

- Module 2 - Année 5 -
Convention 2008-2013

Rapport final

BRGM/RP-65136-FR
Décembre 2015

Préfecture de la région Aquitaine
Secrétariat général pour les affaires régionales

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
AQUITAINE

AGENCE DE L'EAU ADOUR-GARONNE
ETABLISSEMENT PUBLIC DU MINISTERE DU DEVELOPPEMENT DURABLE

RÉGION AQUITAINE

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine

Piézométrie des systèmes aquifères : outils de cartographie et optimisation des réseaux de surveillance

- Module 2 - Année 5 -
Convention 2008-2013

Rapport final

BRGM/RP-65136-FR
Décembre 2015

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM PSP13AQI17

M. Saltel, B. Bourgine

Préfecture de la région Aquitaine
Secrétariat général pour les affaires régionales

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : Pauline CORBIER	Nom : Nicolas PEDRON
Fonction : Hydrogéologue	Fonction : Directeur du BRGM Aquitaine
Date : 23/10/2015	Date : 12/02/2016

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 : carte, géostatistiques, krigeage, piézométrie, nappe

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

Saltel M., Bourgine B. (2015). Piézométrie des systèmes aquifères : outils de cartographie et optimisation de réseaux de surveillance. Module 2 - Année 5 - Convention 2008-2013. Rapport final. BRGM/RP-65136-FR, 52 p., 41 fig., 2 ann.

© BRGM, 2015, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre de la convention pluriannuelle « Gestion des Eaux souterraines en Région Aquitaine » signée entre le BRGM, la Région Aquitaine et l'Etat pour la période 2008-2013, avec le soutien financier de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, le BRGM Aquitaine a entrepris des actions de recherche et de mise en valeur des ressources en eaux souterraines.

En année 5 de la convention, le programme a porté sur 6 modules. Le présent document est relatif au module 2 consacré à la piézométrie des systèmes aquifères et plus particulièrement à la mise en œuvre d'outils de cartographie et d'optimisation des réseaux de surveillance.

Les cartes piézométriques peuvent être considérées comme l'outil de base de l'hydrogéologue. Elles permettent d'identifier les directions générales d'écoulement des eaux souterraines, les zones de recharge et les zones d'exutoire mais aussi d'étudier les interactions nappes/rivières. La comparaison dans le temps des cartes piézométriques permet d'observer les évolutions naturelles de la nappe (hautes eaux et basses eaux) ainsi que les impacts liés à l'exploitation de la ressource.

L'objectif de ce module est de mettre au point :

- des méthodes de cartographie géostatistique des niveaux piézométriques prenant en compte le maximum de contraintes, avec évaluation de la précision de la carte produite ;
- des méthodes d'évaluation (globale ou locale) des différences entre deux situations piézométriques données, avec estimation de l'incertitude sur cette différence ;
- des méthodes permettant d'optimiser un réseau de surveillance des niveaux piézométriques (nombre minimum de piézomètres à suivre et position de ces piézomètres, en fonction de la précision souhaitée).

La première année d'étude (Bourgine, 2012), initiée en année 2 de la convention régionale, s'est focalisée sur les aspects méthodologiques. Elle a permis de tester des méthodes de cartographie des niveaux piézométriques à l'aide de techniques géostatistiques « standards » sur 2 types d'aquifères réels : un aquifère captif (Eocène Nord-aquitain) et un autre libre (Turonien du nord-ouest de la Dordogne). Un exemple d'application portant sur l'optimisation des réseaux de surveillance a également été mis en œuvre sur cette dernière nappe.

La seconde année d'étude (Bourgine et al., 2013), correspondant à l'année 3 de la convention régionale, a été consacrée à l'amélioration des méthodes proposées la première année, au développement et au test de nouvelles méthodes, à la rédaction d'un tableau de « bonnes pratiques » présentant les différentes méthodes envisageables avec leurs avantages et inconvénients.

La troisième année d'étude, (Saltel et al., 2015) correspondant à l'année 4 de la convention régionale, a été consacrée à initier l'inventaire des cartes piézométriques réalisées à ce jour sur le territoire aquitain. Ce travail a permis de recenser 265 cartes relatives à 8 nappes différentes. Sur ce total, 151 ont été numérisées et transposées au format shape (.shp). Le travail de digitalisation étant relativement long, les cartes concernant les aquifères les plus stratégiques (utilisés pour l'alimentation en eau potable) ont été traitées en priorité.

Au cours de l'année 5 de la convention régionale, le travail de recensement et de digitalisation s'est poursuivi portant ainsi le nombre total de cartes inventoriées à 276. Sur cet ensemble, 215 sont maintenant disponibles sous SIG (Système d'Information Géographique) au format .shp.

Dans l'optique de rendre cette cartothèque accessible au plus grand nombre, une sélection des 39 cartes les plus représentatives ont été mises en ligne sur l'espace cartographique du SIGES Aquitaine (http://sigesaqi.brgm.fr/). Elles sont également téléchargeables au format .shp via la page GéoSource associée à chaque carte piézométrique. Par ailleurs, 179 cartes sont maintenant disponibles au format image sur le SIGES via la photothèque. Cette dernière permet d'accéder facilement à des photos, cartes ou illustrations à l'aide d'outils de visualisation, de recherche et de téléchargement à l'URL suivante : http://sigesaqi.brgm.fr/?page=ePhoto. La mise en ligne de ces cartes a été réalisée dans le cadre du module valorisation de la convention régionale.

Dans un second temps, les méthodes développées dans le cadre des travaux précédents ont été appliquées à la nappe alluviale de l'Adour à partir des mesures réalisées par le BURGEAP en hautes eaux 2004 (Burgéap, 2004).

L'analyse de la nappe alluviale de l'Adour montre que cette nappe présente un comportement différent de l'amont vers l'aval :

- à l'amont, la nappe présente, d'un point de vue géostatistique, un comportement non stationnaire[1] marqué mais la distribution des isopièzes est assez régulière et modélisable de façon relativement performante par un krigeage avec dérive dépendant des coordonnées (dérive de degré 2). Il serait probablement possible de réduire la densité de mesure sans perte significative de précision ;
- à l'aval, le comportement est également non stationnaire, mais la surface piézométrique est nettement plus complexe notamment dans ses variations à échelle locale. La modélisation géostatistique est possible mais donne des résultats comparativement moins bons qu'en amont. Une analyse plus fine du comportement de la nappe et l'introduction de contraintes hydrogéologiques seraient sans doute nécessaires pour mieux modéliser la piézométrie d'un point de vue géostatistique (introduction de directions préférentielles locales par exemple).

A noter que la méthode d'interpolation par l'inverse de la distance est a priori à éviter pour ce type d'aquifère. Elle donne en effet des résultats très médiocres.

Le krigeage linéaire, qui est le krigeage « par défaut » proposé par de nombreux logiciels, est un compromis acceptable, même s'il n'est pas toujours optimal. Si on l'utilise, il est toutefois recommandé de mettre en œuvre une estimation préalable des erreurs auxquelles il va conduire, en divisant le jeu de données en deux comme dans l'exemple proposé au chapitre 4.5. Ceci nécessite cependant de disposer d'un nombre suffisant de données.

L'inventaire des cartes sur la région étant désormais relativement exhaustif et les approches méthodologiques ayant concerné les différents types de nappes présentes dans la région (libres, captives, alluviales,…), ce programme ne sera pas renouvelé dans le cadre de la future convention régionale. Cependant dans le cadre la convention pluriannuelle « Gestion des Eaux souterraines en Région Aquitaine » 2015-2020 et du module sur la valorisation des eaux souterraines, de nouvelles cartes pourront venir compléter la cartothèque existante.

Par ailleurs, de nouvelles cartes piézométriques de référence pourront être dressées en appliquant les méthodes géostatistiques testées et développées au cours des deux premières années de ce module (années 2 et 3 de la convention régionale 2008-2013).

[1] Lorsque le variogramme ne semble pas montrer de palier et continue à augmenter aux « grandes distances », on dit que le phénomène n'est pas stationnaire

Sommaire

1. Introduction 9

1.1. CONTEXTE GENERAL 9

1.2. OBJECTIF ET PROGRAMME DU MODULE 2 9

2. Inventaire des cartes existantes..... 11

3. Mise à disposition des cartes 15

3.1. UNIFORMISATION DES CARTES 15

3.2. CONSULTATION VIA L'ESPACE CARTOGRAPHIQUE DU SIGES AQUITAINE..... 18

3.3. TELECHARGEMENT DES CARTES AU FORMAT SIG (SHAPE)..... 19

4. Carte piézométrique de la nappe de l'Adour 21

4.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE 21

4.2. PREMIERE ANALYSE DES DONNEES DE LA CAMPAGNE BURGEAP 2004 (HAUTES EAUX)..... 27

4.3. APPROCHES NE DISTINGUANT PAS AMONT ET AVAL 32

4.3.1. Test avec un variogramme moyen omnidirectionnel 32

4.3.2. Test avec un variogramme anisotrope toutes données confondues..... 33

4.3.3. Prise en compte d'une dérive liée aux coordonnées 34

4.3.4. Prise en compte d'une dérive externe liée au MNT 37

4.3.5. Prise en compte de directions d'écoulement..... 42

4.4. APPROCHES DISTINGUANT AMONT ET AVAL. ENSEMBLE DES DONNEES 44

4.4.1. Analyse du variogramme des données amont (en amont de Riscle)..... 44

4.4.2. Analyse du variogramme des données aval (en aval de Riscle)..... 46

4.5. APPROCHES DISTINGUANT AMONT ET AVAL. REDUCTION DU NOMBRE DE DONNEES..... 48

4.6. NAPPE DE L'ADOUR, CONCLUSION..... 50

5. Conclusion..... 51

6. Bibliographie 53

Liste des figures

Figure 1 : Inventaire des cartes piézométriques recensées dans le cadre de la convention régionale..... 11
Figure 2 : Illustration de la méthode de géoréférencement sous ArcGis (carte papier scannée en noir et fond numérique en rouge ; les points de calage sont reliés par des traits bleus)..... 12
Figure 3 : Illustration de la méthode de digitalisation des cartes (courbe digitalisée tracée en rouge)..... 13
Figure 4 : Table attributaire d'un shapefile des isopièzes 13
Figure 5 : Bilan des cartes digitalisées 14
Figure 6 : Exemple de carte piézométrique uniformisée (Bellegarde, 1975) 16
Figure 7 : Accès aux cartes piézométriques uniformisées par le biais de la photothèque 17
Figure 8 : Espace cartographique du SIGES Aquitaine 18
Figure 9 : Cartes piézométriques intégrées à l'espace cartographique 19
Figure 10 : Téléchargement des cartes piézométriques via l'espace cartographique 20
Figure 11 : Vue générale de la plaine alluviale de l'Adour 21
Figure 12 : Coupe géologique schématique de la vallée de l'Adour (Capdeville, 1990)..... 22
Figure 13 : Carte piézométrique de la nappe de l'Adour - 1980 (Bernard et al., 1982) 23
Figure 14 : Carte piézométrique de la nappe de l'Adour - Basses eaux 2003 (Burgéap, 2004)..... 25
Figure 15 : Carte piézométrique de la nappe de l'Adour - Hautes eaux 2004 (Burgéap, 2004) 26
Figure 16 : Distribution de la cote piézométrique Hautes Eaux 2004 le long de l'Adour 27
Figure 17 : Profil topographique de la rivière et cote piézométrique HE 2004..... 28
Figure 18 : Variogramme directionnel de la cote HE 2004 toutes données confondues..... 29
Figure 19 : Hautes eaux 2004 : comparaison des variogrammes bruts « aval » et « amont »..... 30
Figure 20 : Comparaison des variogrammes normés « aval » et « amont » 31
Figure 21 : Variogramme omnidirectionnel des données amont..... 32
Figure 22 : Validation croisée avec un variogramme moyen omnidirectionnel. HE 2004..... 33
Figure 23 : Variogramme directionnel des données amont + aval HE 2004..... 34
Figure 24 : Variogramme des résidus Hautes Eaux 2004, après soustraction d'une dérive de degré 2 sur les coordonnées 35
Figure 25 : Ajustement du variogramme lissé des résidus Hautes Eaux 2004, après soustraction d'une dérive de degré 2 sur les coordonnées 36
Figure 26 :Validation croisée du variogramme des résidus (dérive de degré 2 sur les coordonnées)..... 37
Figure 27 : Corrélation entre la cote piézométrique (ordonnée) et la topographie (abscisse)..... 38
Figure 28 : Variogramme du résidu de la piézométrie HE 2004 par rapport à la topographie moyenne sur une fenêtre de 250 m 39
Figure 29 : Variogramme omnidirectionnel du variogramme du résidu Topo lissée à la maille 250 m - cote piézo HE 2004 40
Figure 30 : Modèle de variogramme du résidu Topo lissée à la maille 250 m - cote piézo HE 2004..... 40
Figure 31 : Validation croisée du résidu cote piézométrique HE 2004 - topo lissée à la maille 250 m 41
Figure 32 : Carte des erreurs réduites. Validation croisée dans l'hypothèse d'une dérive externe 41
Figure 33 : Carte piézométrique HE 2004 dans l'hypothèse d'une dérive externe (secteur de Tarbes) ... 42

Figure 34 : Carte piézométrique HE 2004 dans l'hypothèse d'une dérive de degré 2 et de contraintes de direction d'écoulement (secteur de Tarbes).....43
Figure 35 : Variogramme HE 2004 des données amont, après soustraction d'une dérive de degré 2 44
Figure 36 : Carte piézométrique HE 2004. Données amont. Comparaison de deux méthodes.....45
Figure 37 : Variogramme HE 2004 des données aval, après soustraction d'une dérive de degré 1.....46
Figure 38 : Carte piézométrique HE 2004. Données aval. Comparaison de deux méthodes 47
Figure 39 : Division du jeu de données en deux parties : données utilisées et données de validation.....49
Figure 40 : Comparaison des performances des interpolations, données amont.....49
Figure 41 : Comparaison des performances des interpolations, données aval.....50

Liste des annexes

Annexe 1 : Exemples de cartes piézométriques uniformisées.....55
Annexe 2 : Krigeage avec dérive sur les coordonnées.....79

1. Introduction

1.1. CONTEXTE GENERAL

Dans le cadre de la convention pluriannuelle signée entre le BRGM et la Région Aquitaine pour la période 2008-2013, avec le soutien financier de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, le BRGM Aquitaine a entrepris des actions de recherche et de mise en valeur des ressources en eaux souterraines. Dans le cadre de l'année 5 de la convention, le programme a porté sur les 6 modules suivants :

- **Module 1** : Actualisation et développement du Modèle Nord Aquitain (MONA) de gestion des systèmes aquifères ;
- **Module 2** : Piézométrie des systèmes aquifères : outils de cartographie et optimisation des réseaux de surveillance ;
- **Module 3** : Valorisation et communication des connaissances hydrogéologiques d'Aquitaine ;
- **Module 4** : Connaissance des karsts aquitains ;
- **Module 5** : Système d'information pour la gestion des eaux souterraines (SIGES) ;
- **Module 6** : Étude des relations nappes-rivière-étangs côtiers en lien avec les formations Plio-Quaternaires des Landes de Gascogne et du Médoc en relation avec les SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux).

Le présent document est relatif au module 2 et plus particulièrement aux résultats obtenus lors de la quatrième année d'investigation de cette étude (année 5 de la convention régionale).

D'une façon plus large, cette étude s'inscrit dans le cadre des actions de Service Public du BRGM (PSP13AQI17).

1.2. OBJECTIF ET PROGRAMME DU MODULE 2

Le premier objectif de ce module était méthodologique et visait à :

1. mettre au point des méthodes de cartographie des niveaux piézométriques, avec évaluation de la précision de la carte produite ;
2. évaluer les différences entre deux situations piézométriques données (globalement ou localement), avec estimation de l'incertitude sur cette différence ;
3. élaborer des méthodes permettant d'optimiser un réseau de surveillance des niveaux piézométriques (nombre minimum de piézomètres à suivre et position de ces piézomètres, en fonction de la précision souhaitée).

Les deux premières années d'études (années 2 et 3 de la convention) ont répondu à ce premier objectif en proposant un catalogue de méthodes permettant de dresser des cartes piézométriques, d'évaluer l'incertitude associée et de proposer des méthodes d'optimisation des réseaux de mesures.

Le deuxième objectif de ce module était d'appliquer ces méthodes. Il visait à élaborer des cartes piézométriques de référence sur les principales nappes de la région à partir des travaux méthodologiques réalisés lors des deux premières années, et assurer une large diffusion de celles-ci.

La 3ème année du module (année 4 de la convention) a été consacrée à la réalisation d'un inventaire des cartes piézométriques existantes pour étudier les modalités de circulation (zones d'alimentation, exutoires, axes de drainage) des grandes nappes du Bassin aquitain, ceci afin de faire un état des lieux des données disponibles. Cet inventaire a été finalisé lors de la 4ème année du module (année 5 de la convention)

Cet inventaire intègre les cartes réalisées par le BRGM, les Universités, les bureaux d'études,…. Les cartes piézométriques les plus représentatives ont été incorporées dans une cartothèque (rasters géo-référencés et isopièzes produites au format Shape) et sont maintenant accessibles depuis le SIGES.

Par ailleurs, lors de l'année 5 de la convention, une carte piézométrique de la nappe alluviale de l'Adour a été réalisée à l'aide des méthodes développées au cours des deux premières années. L'objectif était méthodologique. Il visait à trouver la méthode la plus adaptée pour construire la carte et à rationaliser l'échantillonnage des points de mesure dans l'optique de la construction de futures cartes.

2. Inventaire des cartes existantes

Ce travail fait suite au travail de référencement des cartes piézométriques des grandes nappes du Bassin aquitain initié en année 4 de la convention. Ces cartes ont un intérêt majeur car elles permettent d'étudier les modalités de circulation des nappes (zones d'alimentation, exutoires, axes de drainage). Cette démarche d'inventaire permet de faire un état des lieux des données disponibles, de délimiter les secteurs à forts enjeux mais aussi d'évaluer où se situent les lacunes de connaissance. En fin d'année 4, 265 cartes avaient été recensées sur 8 nappes différentes. L'objectif de l'année 5 est de compléter dans la mesure du possible cet inventaire et de poursuivre le travail de digitalisation initié en année 4. Au total, 276 cartes sont désormais recensées (Figure 1).

	Nombre de cartes recensées fin année 4	**Nombre de cartes recensées fin année 5**
Alluvions	11	13
Plio-Quaternaire	49	52
Miocène	20	20
Oligocène	49	51
Éocène moyen	78	80
Paléocène	3	3
Crétacé sup	49	51
Jurassique	6	6
TOTAL	**265**	**276**

Figure 1 : Inventaire des cartes piézométriques recensées dans le cadre de la convention régionale

Pour mémoire, les cartes recensées proviennent essentiellement de rapports BRGM, de thèses universitaires, ou de travaux réalisés par des bureaux d'études. Elles sont disponibles à différents formats : papier pour les plus anciennes, images scannées, format SIG (.tab ou .shp) pour les plus récentes.

Pour les nappes représentant un fort enjeu stratégique (Alimentation en Eau Potable) un très grand nombre de cartes ont été réalisées. C'est notamment le cas pour la nappe de l'Éocène et de l'Oligocène en Gironde. Le nombre de cartes réalisé pour le Plio-Quaternaire peut paraître important mais ces dernières ne concernent que des secteurs restreints étudiés dans le cadre de thèses dans les années 60 pour lesquelles il existe le plus souvent une carte pour les hautes eaux et une pour les basses eaux.

Outre le recensement des cartes, un des objectifs de ce travail était de disposer d'un maximum de cartes au format numérique de manière à pouvoir diffuser l'information via le portail du SIGES Aquitaine (Cf. chapitre 3).

Les cartes déjà présentes au format SIG (.tab) ont été transformées en format .shp (ArcGis) en veillant à ce que les métadonnées[2] associées aient bien été renseignées. Pour les cartes les plus anciennes, un travail important de digitalisation a été mené.

Les cartes au format papier ont été scannées puis géo-référencées sous ArcGIS soit en prenant des points de calage présents sur la carte, soit en utilisant des points de repère dont les coordonnées sont connues (limites administratives, réseau hydrographique,…). Les points de calage doivent être suffisamment espacés et nombreux pour que le géo-référencement soit fiable (Figure 2).

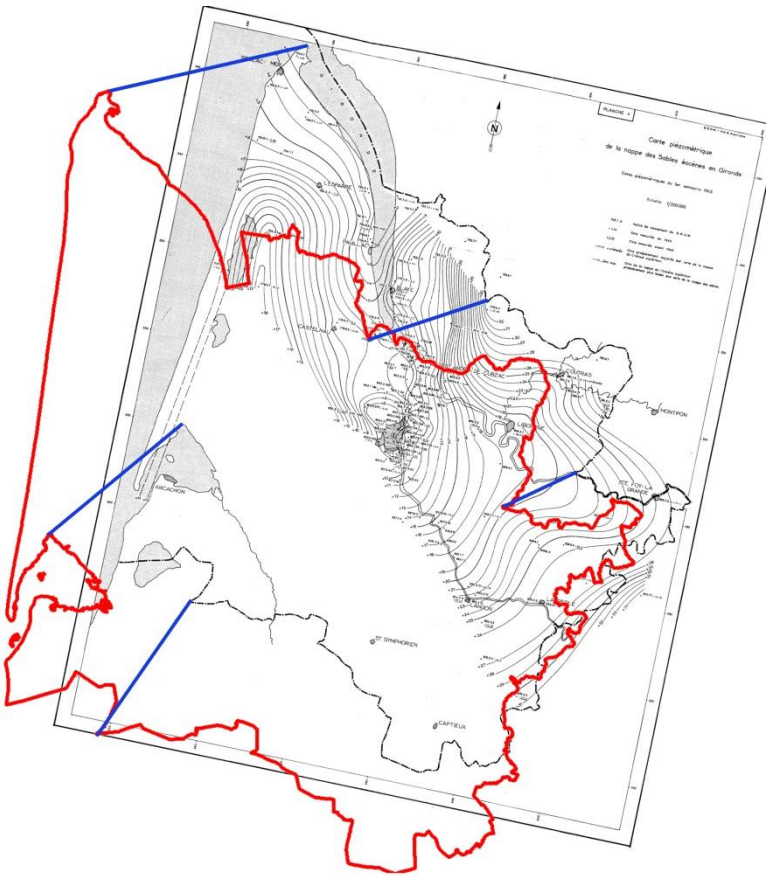


Figure 2 : Illustration de la méthode de géoréférencement sous ArcGis (carte papier scannée en noir et fond numérique en rouge ; les points de calage sont reliés par des traits bleus)

Une fois la carte géo-référencée, la digitalisation s'effectue en retraçant chaque isopièze point par point pour reproduire le modelé piézométrique (Figure 3).

[2] Métadonnées : ensemble des informations techniques et descriptives ajoutées aux documents pour mieux les qualifier

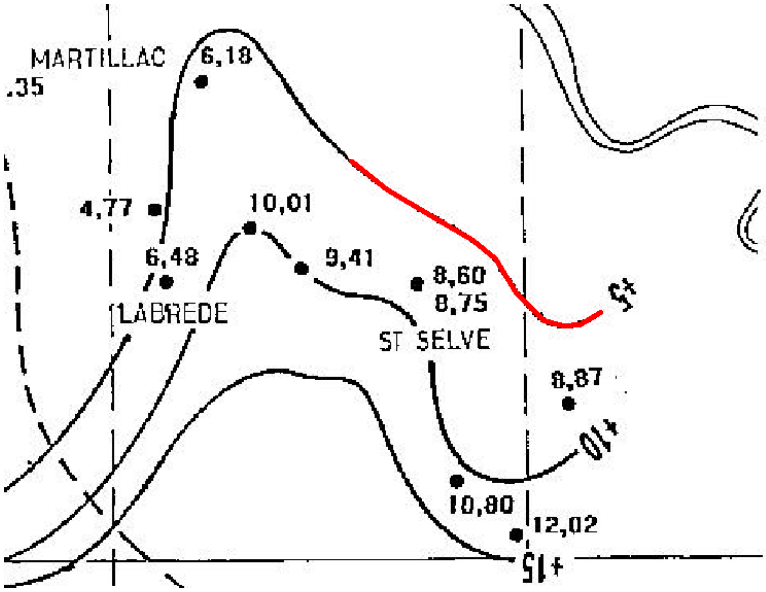


Figure 3 : Illustration de la méthode de digitalisation des cartes (courbe digitalisée tracée en rouge)

Pour chacune des cartes ont été renseignées les métadonnées suivantes (Figure 4) :

- La nappe concernée (ex : Oligocène),
- La période de réalisation des mesures (ex : 1980),
- Renseignements complémentaires correspondant à des détails sur l'emprise de la carte (ex : zone bordelaise) ou l'horizon aquifère considéré (ex : Éocène moyen calcaire),
- La source de la carte (ex : Bellegarde R., Bonnery H. et Hosteins L. (1980) - Gestion des nappes en Aquitaine - Compte rendu annuel de surveillance 1980 - Nappes des sables éocènes en Gironde et des calcaires oligocènes en rive gauche de la Gironde-Garonne - Rapport BRGM 80 SGN 723 AQI),
- L'équidistance principale des isopièzes (ex : 10 m),
- Le code BDRHFV1[3] (ex : 230),
- Le code BD LISA[4] (ex : 324AA01),
- Le code Masse d'eau souterraine[5] (ex : 5083/5102),
- La cote des isopièzes (en m NGF),
- Le degré d'incertitude du tracé (pointillé dans les zones plus incertaines).

Isopièzes_sommet_gironde_1995_L2E

FID	Shape *	nom	Type	Nappe	Annee	Etage	Equidistan	BDRHFV1	LISA	MESO	Source	COTE_mNGF
0	Polyligne	Isopièzes	Estimé	Crétacé sup	1995	Sommet	5	127a3	348	5072	Bonnery H.,	2.5
1	Polyligne	Isopièzes	Estimé	Crétacé sup	1995	Sommet	5	127a3	348	5072	Bonnery H.,	5
2	Polyligne	Isopièzes	Estimé	Crétacé sup	1995	Sommet	5	127a3	348	5072	Bonnery H.,	10
3	Polyligne	Isopièzes	Estimé	Crétacé sup	1995	Sommet	5	127a3	348	5072	Bonnery H.,	15
4	Polyligne	Isopièzes	Calculé	Crétacé sup	1995	Sommet	5	127a3	348	5072	Bonnery H.,	2.5
5	Polyligne	Isopièzes	Calculé	Crétacé sup	1995	Sommet	5	127a3	348	5072	Bonnery H.,	5
6	Polyligne	Isopièzes	Calculé	Crétacé sup	1995	Sommet	5	127a3	348	5072	Bonnery H.,	5
7	Polyligne	Isopièzes	Calculé	Crétacé sup	1995	Sommet	5	127a3	348	5072	Bonnery H.,	10
8	Polyligne	Isopièzes	Calculé	Crétacé sup	1995	Sommet	5	127a3	348	5072	Bonnery H.,	15
9	Polyligne	Isopièzes	Calculé	Crétacé sup	1995	Sommet	5	127a3	348	5072	Bonnery H.,	25
10	Polyligne	Isopièzes	Calculé	Crétacé sup	1995	Sommet	5	127a3	348	5072	Bonnery H.,	20
11	Polyligne	Isopièzes	Calculé	Crétacé sup	1995	Sommet	5	127a3	348	5072	Bonnery H.,	10
12	Polyligne	Isopièzes	Calculé	Crétacé sup	1995	Sommet	5	127a3	348	5072	Bonnery H.,	15
13	Polyligne	Isopièzes	Calculé	Crétacé sup	1995	Sommet	5	127a3	348	5072	Bonnery H.,	20

Figure 4 : Table attributaire d'un shapefile des isopièzes

[3] BDRHFV1 : Base de Données du Référentiel Hydrogéologique National version 1

[4] BD LISA : Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères

[5] Masse d'eau : unité hydrographique (eau de surface) ou hydrogéologique (eau souterraine) cohérente, présentant des caractéristiques assez homogènes et pour laquelle, on peut définir un même objectif

Sur les 276 cartes recensées, 215 sont maintenant transposées au format .shp (Figure 5) contre 151 en fin d'année 4. Le pourcentage des cartes digitalisées est supérieur à 80 % pour la quasi-totalité des nappes de la région Aquitaine. Seule la nappe du Plio-Quaternaire présente un faible pourcentage de cartes digitalisées dans la mesure où ces dernières concernent des secteurs limités et sont constituées de très nombreuses isopièzes définies à l'occasion de travaux de thèse (travail de digitalisation très long). Seules les cartes de plus grandes extensions ont donc été digitalisées. Cependant, dans le cadre de la prochaine convention régionale les cartes non digitalisées seront rendues accessibles sur le SIGES via la photothèque en y intégrant les images d'origine.

	Nombre de cartes recensées	**Nombre de cartes digitalisées**	**% de cartes digitalisées**
Alluvions	13	11	85%
Plio-Quaternaire	52	13	25%
Miocène	20	17	85%
Oligocène	51	43	84%
Éocène moyen	80	75	94%
Paléocène	3	3	100%
Crétacé sup	51	47	92%
Jurassique	6	6	100%
TOTAL	**276**	**215**	**78%**

Figure 5 : Bilan des cartes digitalisées

3. Mise à disposition des cartes

Le travail d'inventaire, de mise en forme et de renseignement de la donnée est un préalable nécessaire à la diffusion de l'information. La cartothèque, ainsi constituée, a pour vocation à être accessible au plus grand nombre. Le vecteur de diffusion de cette information régionalisée est le SIGES Aquitaine (http://sigesaqi.brgm.fr/).

La mise à disposition des cartes via le SIGES est prévue sous différents formats :

- sous formes d'images (.tif),
- au format WMS[6] (Web Map Service) via la consultation sur l'espace cartographique du SIGES,
- au format .shp via l'espace de téléchargement défini dans chaque page GéoSource[7] associée.

3.1. UNIFORMISATION DES CARTES

Les cartes piézométriques sous forme d'images, provenant de l'inventaire détaillé au chapitre 2, sont rendues accessibles via le SIGES grâce à l'application ePhoto qui correspond à un logiciel de gestion de photos optimisé pour l'indexation, la recherche, le partage et la publication d'images et autres documents...

Au préalable, un travail d'uniformisation des cartes a été réalisé pour disposer d'une charte graphique commune. Un atlas a donc été créé sous ArcGis de manière à générer automatiquement les cartes au même format. Ainsi, pour une même nappe, les cartes réalisées ont la même emprise géographique ce qui permet de meilleures superpositions et comparaisons. La nappe et les codes géologiques associés, l'année de réalisation, les zones d'affleurement, la référence bibliographique ainsi qu'une légende traduisant le degré d'incertitude de la carte ont été mentionnés sur chaque document.

En année 4, 18 cartes avaient été uniformisées pour les nappes du Plio-Quaternaire, du Miocène, de l'Oligocène et de l'Éocène. Ces cartes avaient été choisies en fonction de leur emprise (celles présentant les plus grandes extensions avaient été privilégiées) et de manière à retranscrire l'évolution des piézométries au cours du temps. Seule une carte de référence a été présentée pour la nappe du Plio-Quaternaire du fait de la stabilité des niveaux observés.

C'est maintenant 179 cartes qui sont disponibles au format image sur le SIGES via sa photothèque. Elle permet d'accéder facilement à des photos, cartes ou illustrations à l'aide d'outils de visualisation, recherche et de téléchargement à l'URL suivante : http://sigesaqi.brgm.fr/?page=ePhoto

Un exemple est présenté en figure 6. Un échantillonnage plus large des 179 cartes réalisées est présenté en annexe 1.

[6] Web Map Service ou WMS est un protocole de communication standard qui permet d'obtenir des cartes de données géoréférencées à partir de différents serveurs de données. Cela permet de mettre en place un réseau de serveurs cartographiques à partir desquels des clients peuvent construire des cartes interactives. Le WMS est décrit dans des spécifications maintenues par l'Open Geospatial Consortium.

[7] Outil de catalogage de données et services à références spatiales.

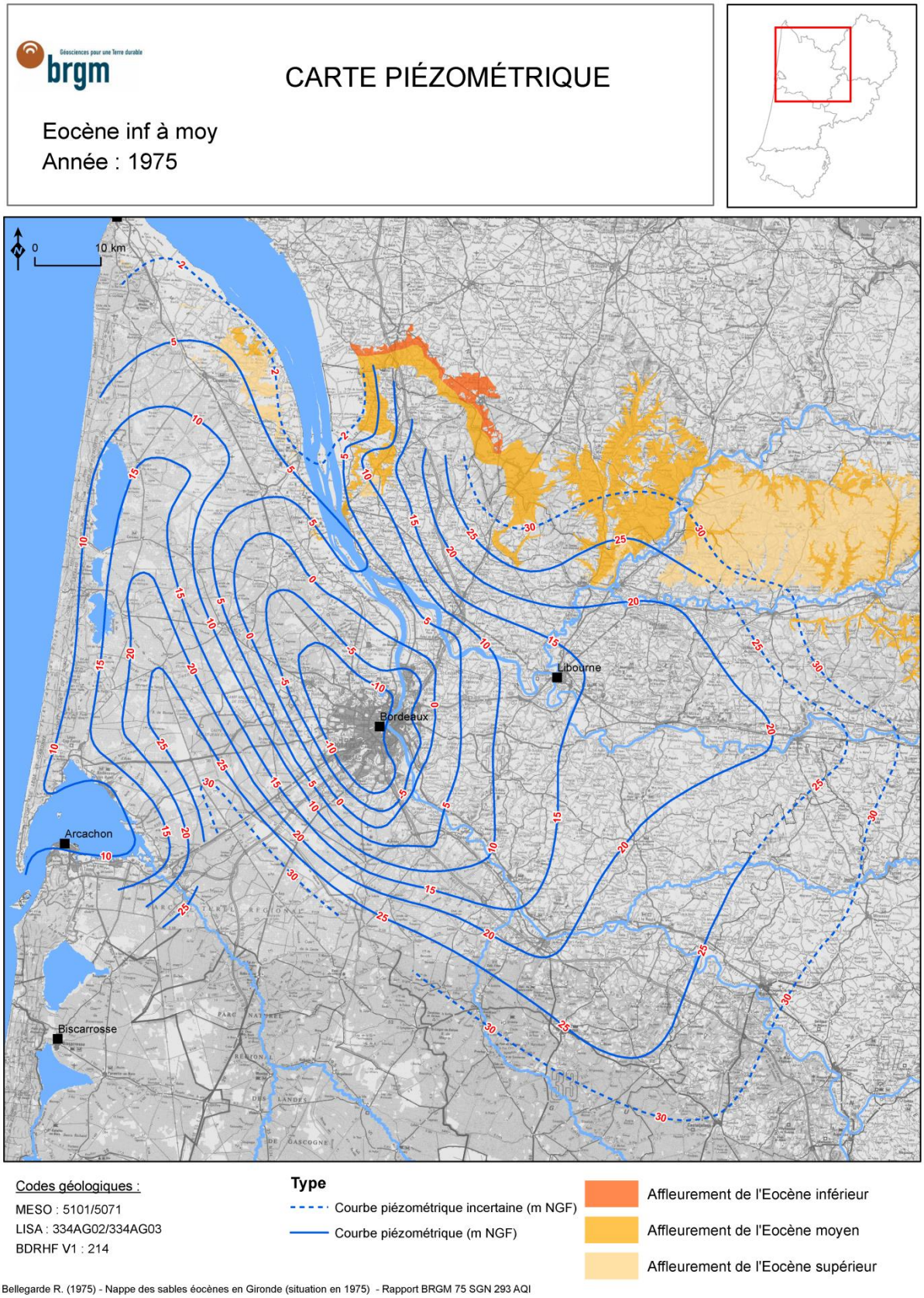


Figure 6 : Exemple de carte piézométrique uniformisée (Bellegarde, 1975)

Il est possible de rechercher les images par mots clés 1 issus du thesaurus scientifique du BRGM, par thèmes 2 ou plus directement par simple mots clés thématiques ou géographiques 3 (Figure 7).

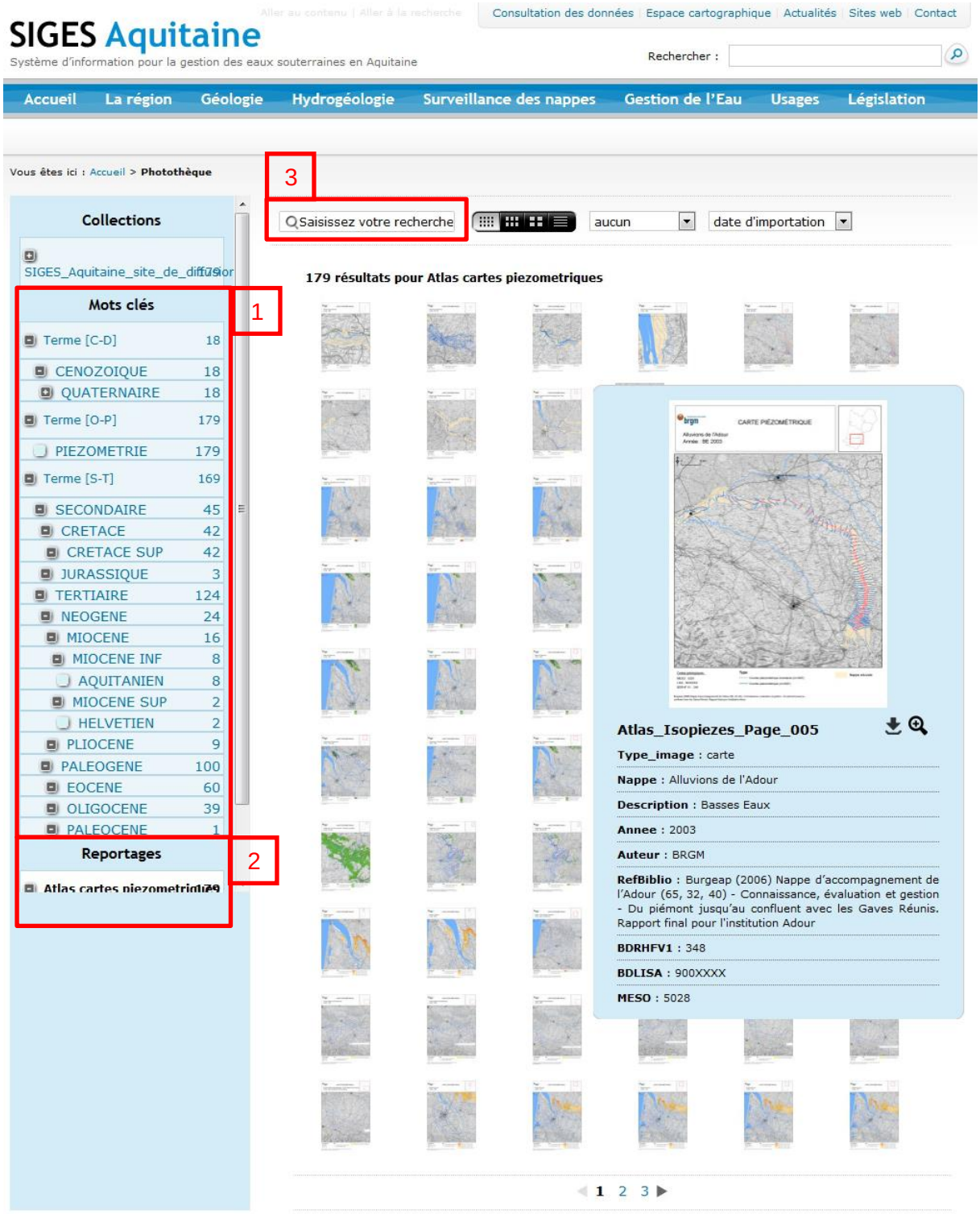


Figure 7 : Accès aux cartes piézométriques uniformisées par le biais de la photothèque

Afin de faciliter l'accès à l'information, des métadonnées ont été définies pour chaque image : mots-clés thématiques et géographiques, aquifères, codes hydrogéologiques (référentiels LISA, MESO, type, date, …).

Une prévisualisation est possible en faisant glisser le curseur sur l'image souhaitée. Il est alors possible soit d'avoir un aperçu plus détaillé en cliquant sur la loupe soit de télécharger la carte en cliquant sur l'onglet suivant

3.2. CONSULTATION VIA L'ESPACE CARTOGRAPHIQUE DU SIGES AQUITAINE

L'espace cartographique du SIGES Aquitaine est un portail géomatique d'accès aux données géo-scientifiques. Il comporte (Figure 8) :

- un volet de navigation (encadré 1) permettant de zoomer, dézoomer, se déplacer…
- un volet gérant l'affichage des couches (encadré 2) dans lequel il est possible de définir les couches affichées, la légende et de dessiner ses propres objets cartographiques (points, lignes, polygones),
- un volet d'options supplémentaires (encadré 3) dans lequel on retrouve des possibilités de localisation par numéro BSS ou par commune, des outils d'impression et de création de log s'appuyant sur la base de données LISA.

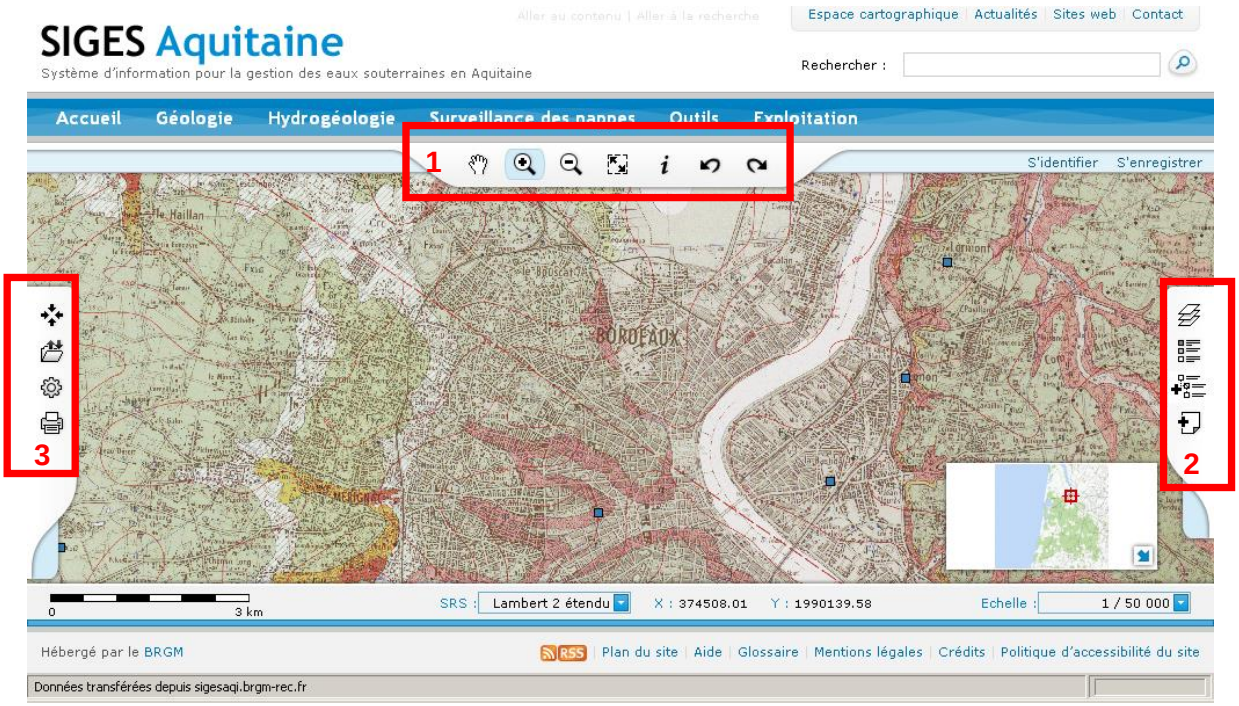


Figure 8 : Espace cartographique du SIGES Aquitaine

Au total 39 cartes ont été transformées au format WMS pour être intégrées à l'espace cartographique du SIGES contre 18 à la fin de l'année 4 (Figure 9).

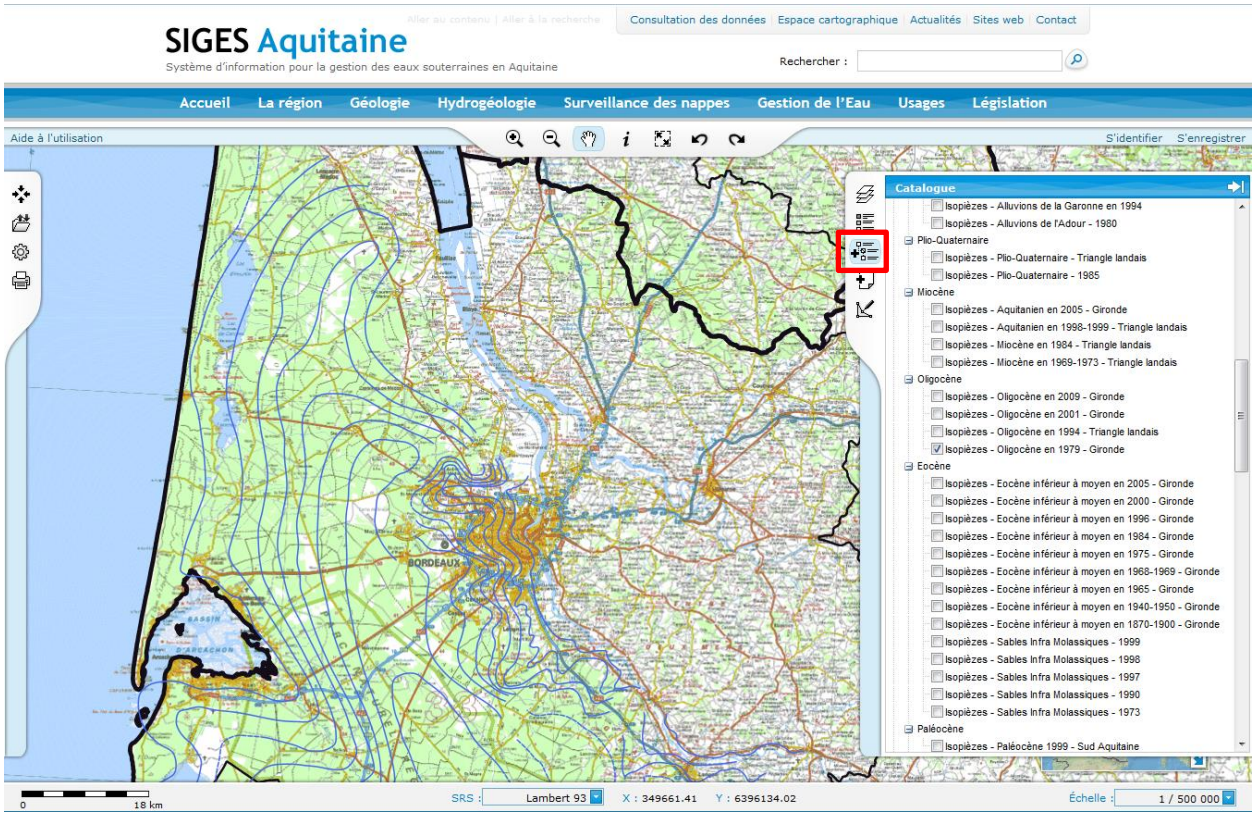


Figure 9 : Cartes piézométriques intégrées à l'espace cartographique

L'affichage des couches s'effectue dans le volet de droite gérant l'affichage des couches via l'onglet « Choix des couches »

3.3. TELECHARGEMENT DES CARTES AU FORMAT SIG (.SHP)

Outre la visualisation des isopièzes sur l'espace cartographique, il est également possible de télécharger ces données au format shp. La couche que l'on souhaite télécharger doit au préalable être sélectionnée dans l'onglet « Choix des couches ».

Le téléchargement s'opère ensuite à partir du volet d'affichage des couches de l'espace cartographique (Figure 10) via l'onglet « Couches affichées »».

Pour la couche correspondant aux isopièzes, l'onglet « Informations sur cette couche » apparaît en surbrillance.

Il permet d'accéder à la page à la page GéoSource qui constitue l'outil choisi pour répondre aux fonctionnalités de base documentaire et de diffusion de métadonnées au sein du SIGES. Sur cette page sont disponibles des liens permettant le téléchargement des couches SIG au format shp du WMS (Figure 10).

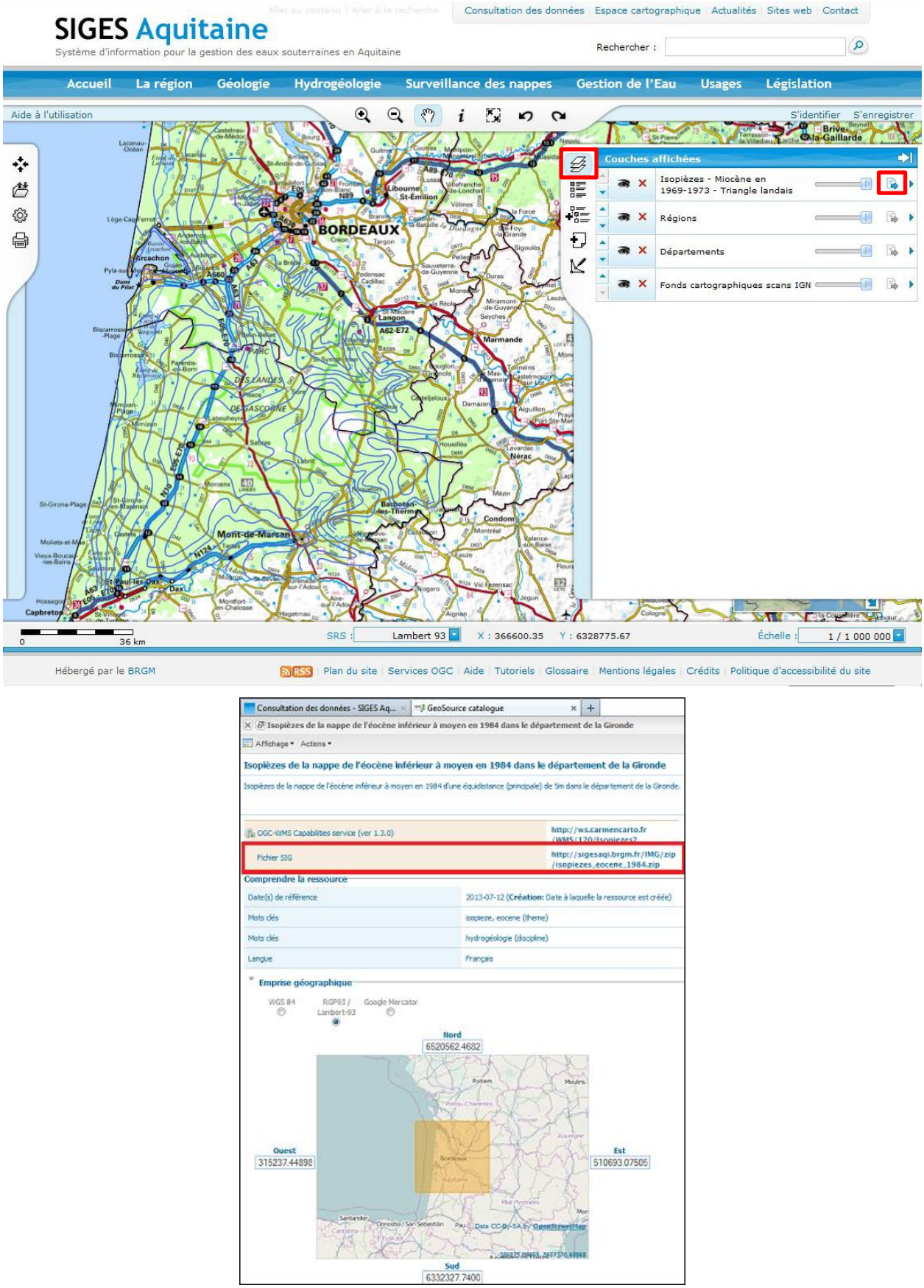


Figure 10 : Téléchargement des cartes piézométriques via l'espace cartographique

4. Carte piézométrique de la nappe de l'Adour

En complément de l'inventaire et à la mise à disposition des esquisses piézométriques présenté au chapitre précédent, une approche méthodologique de la construction des cartes piézométriques est proposée ci-après. Elle repose sur les travaux menés lors des deux premières années d'études (années 2 et 3 de la convention). Les années précédentes, des tests avaient été réalisés sur la nappe captive de l'Éocène moyen et sur les nappes libres du Turonien (Dordogne) et de l'Oligocène (Entre-Deux-Mers). L'exemple choisi ici est celui de la nappe alluviale de l'Adour.

4.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

Le bassin de l'Adour (16 880 km²) s'étend sur la partie Sud-Ouest du bassin Adour-Garonne. Il concerne 4 départements : le Gers, les Hautes-Pyrénées, les Landes et les Pyrénées-Atlantiques (Figure 11).

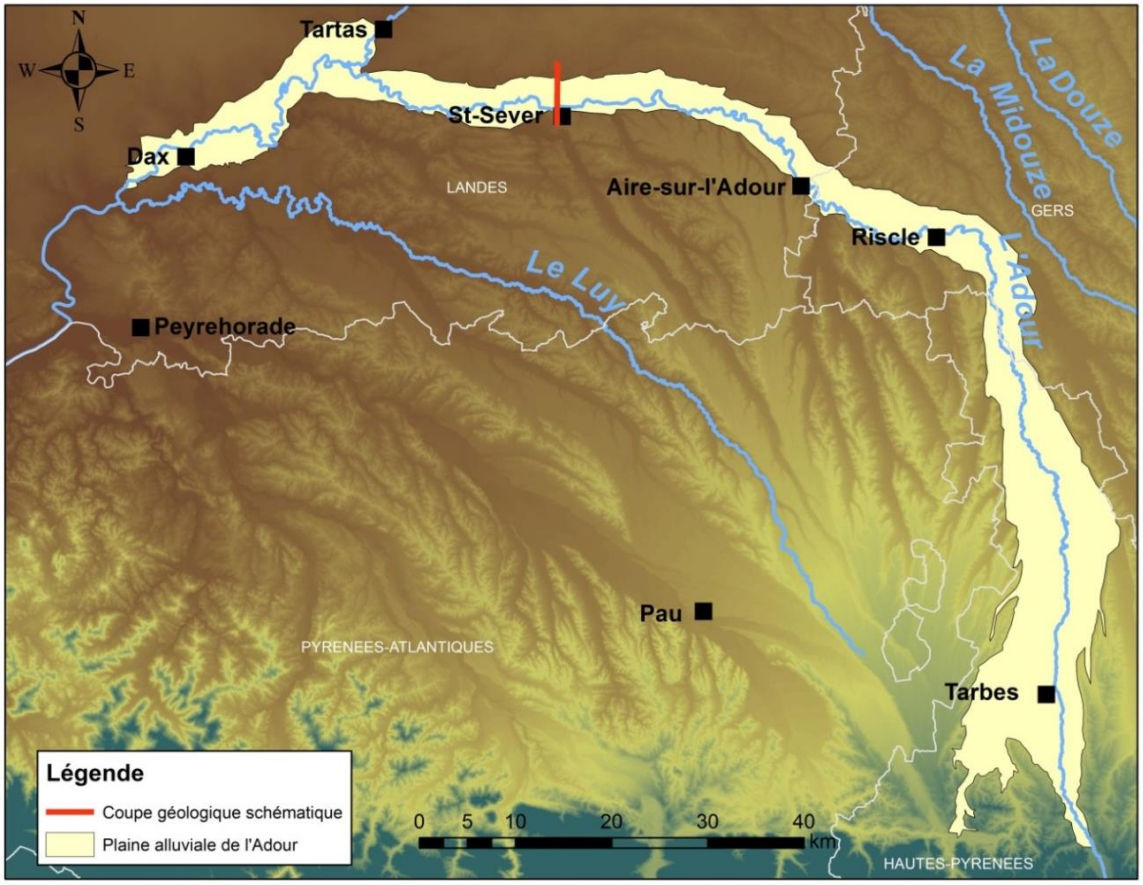


Figure 11 : Vue générale de la plaine alluviale de l'Adour

L'Adour prend sa source dans le massif pyrénéen au niveau du Pic du Midi de Bigorre au col du Tourmalet dans les Hautes-Pyrénées (65) et se jette dans l'Océan Atlantique après Bayonne à Tarnos dans le département des Landes (40). La plaine de l'Adour comporte une nappe alluviale aux ressources particulièrement intéressantes. Au-dessus de leur substratum molassique imperméable, les alluvions de divers âges, à dominante de sables, graviers et

galets constituent un aquifère alimenté par l'infiltration des précipitations et des écoulements superficiels. L'aquifère est en communication directe avec les eaux de l'Adour (Figure 12).

Le remplissage alluvial est formé de façon générale par une vingtaine de mètres de sédiments présentant une partie inférieure grossière (galets, graviers, sables) et une partie supérieure (en moyenne 5 m d'épaisseur) beaucoup plus fine et argileuse, associée à la transgression flandrienne qui a débuté il y a environ 11 000 ans.

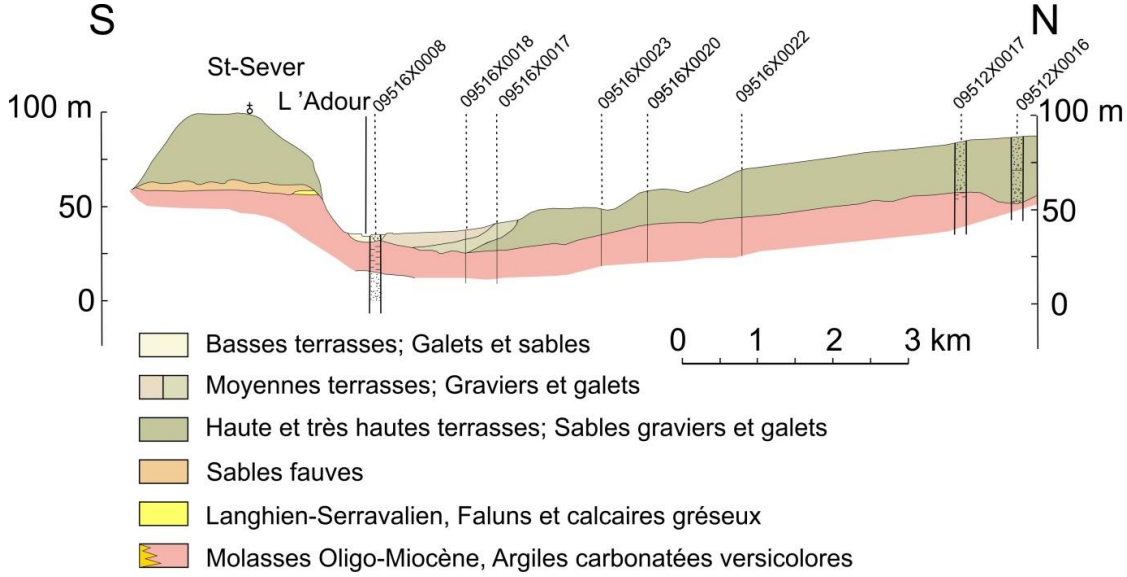


Figure 12 : Coupe géologique schématique de la vallée de l'Adour (Capdeville, 1990)

La vallée de l'Adour peut être subdivisée en une partie aval (du littoral à Dax) où les matériaux alluviaux sont fins, à tendance argileuse affirmée et à perméabilité plutôt faible, et une partie amont où l'aquifère est plus grossier et perméable. La couche superficielle de limons assure une certaine protection de l'aquifère alluvial, le maintenant captif de l'embouchure à la confluence avec la Midouze. Dans le secteur de Dax, certains puits se révèlent artésiens. Dans sa partie amont, l'Adour s'écoule en direction du nord avant de bifurquer en direction de l'Ouest à proximité de Riscle. Concernant la nappe alluviale, au droit de la partie amont (de la source à Aire-sur-Adour), le fonctionnement hydrodynamique de la nappe est relativement homogène du fait de la morphologie du réservoir et des caractéristiques des alluvions qui la composent. En aval, les propriétés de la nappe sont plus hétérogènes.

Dans le cadre d'une étude concernant l'évaluation des ressources en granulat, une piézométrie d'étiage a été réalisée en juillet 1980 (Figure 13) sur près de 220 puits sur la zone aval de la nappe allant de Dax à Aire-sur-Adour (Bernard et al., 1982). Le calcul de la cote NGF de la nappe a été effectué à partir de la cote du sol relevée sur la carte IGN à 1 /25 000, l'erreur possible introduite sur la surface piézométrique est donc de l'ordre du mètre. Cette piézométrie présente un gradient faible et une relation très étroite avec la rivière. La nappe est généralement drainée par la rivière mais la rivière vient alimenter la nappe en période de crue ou en fonction des marées dont l'impact peut se faire sentir jusque dans les environs de Dax. En aval de Dax, l'aquifère étant nettement captif, les relations nappe-rivière doivent être limitées par les limons argileux plus ou moins épais. En dehors de ces échanges avec la rivière, l'alimentation de la nappe se fait principalement par infiltration directe des eaux de pluie et par les apports latéraux des coteaux et des terrasses plus anciennes, plus argileuses et en position plus élevée. Des relations existent vraisemblablement avec les aquifères profonds : nappes des sables fauves et des faluns du Miocène entre Aire-sur-Adour et Tartas, aquifère thermal autour de Dax qui pourrait expliquer l'existence d'un bombement piézométrique de la nappe alluviale, Oligocène entre Dax et Tartas, calcaires éocènes en aval de Peyrehorade.

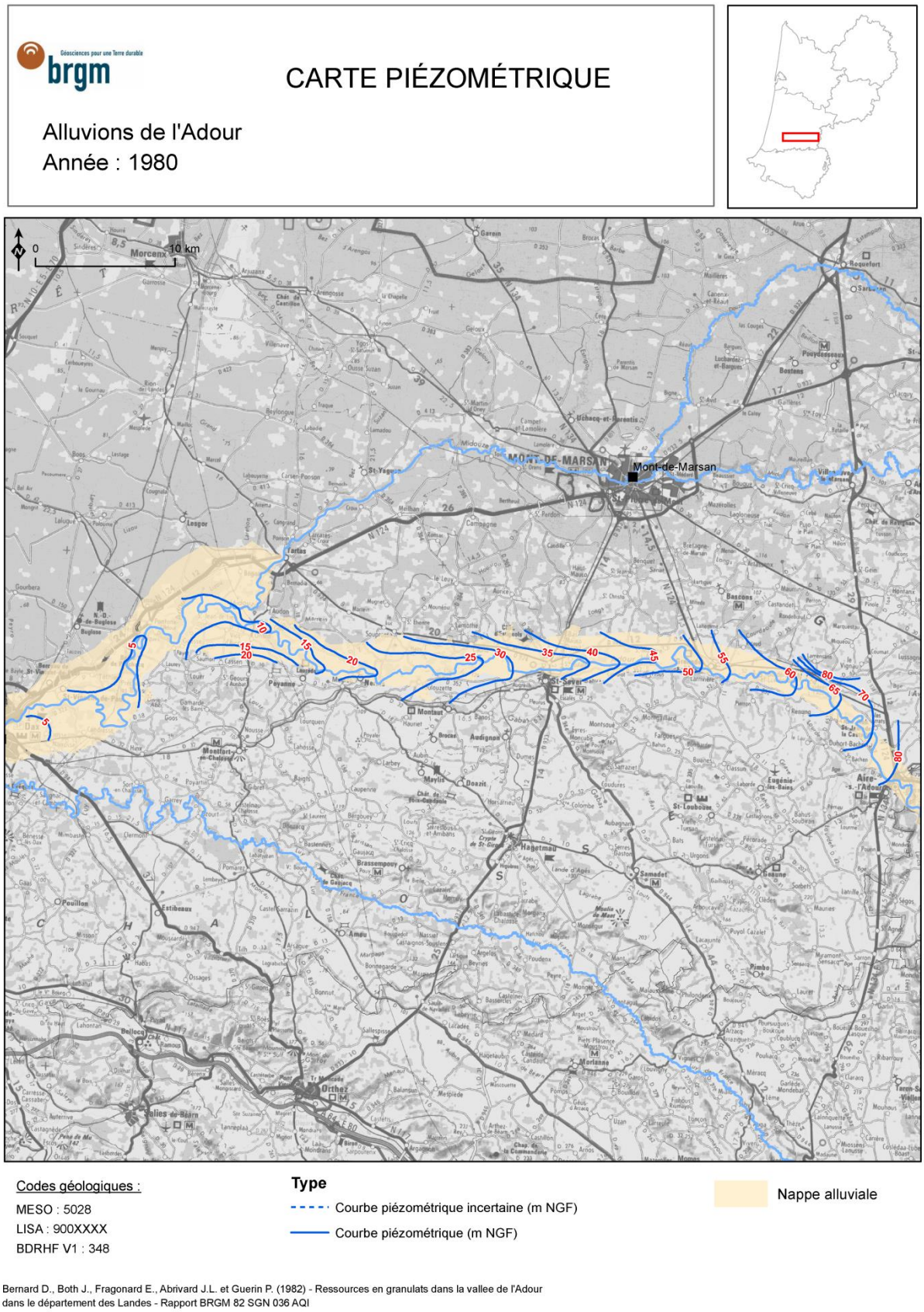


Figure 13 : Carte piézométrique de la nappe de l'Adour - 1980 (Bernard et al., 1982)

Pour la partie amont, la productivité de l'aquifère s'améliore globalement des coteaux vers le centre de la vallée. Toutefois la variabilité horizontale et verticale des sédiments implique que les caractéristiques hydrodynamiques évoluent rapidement. La faible productivité enregistrée sur certains puits proches de la rivière montre que les échanges avec cette dernière peuvent être parfois très limités en raison du colmatage.

Dans la partie aval, assez mal reconnue, les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère alluvial sont a priori médiocres. Il faut atteindre le littoral pour retrouver un aquifère un peu plus grossier, sous une dizaine de mètres d'argile, capable de donner des débits de plusieurs dizaines de m^3/h.

Des cartes plus récentes ont été réalisées à plus grande échelle sur la nappe de l'Adour (Figure 14 et Figure 15). Les mesures se sont déroulées entre le 26 septembre et le 10 octobre 2003 pour la période correspondant aux basses eaux et du 9 au 20 février 2004 pour celles des hautes eaux (Burgéap, 2004). Les mesures du niveau de la nappe et de la profondeur de chaque point d'eau ont été réalisées à l'aide d'une sonde piézométrique manuelle. Les isopièzes, qui représentent l'altitude NGF de la surface de la nappe, ont été tracées à partir de la méthode des triangles, puis d'une interpolation linéaire.

A noter qu'à partir de Saint-Sever et jusqu'à Dax, la forte densité de cours d'eaux en provenance des coteaux nord et la géomorphologie (topographie allant de +10 à +50 m NGF pour un même transect) du bassin hydrographique n'ont pas permis de tracer des isopièzes cohérentes. De même, il a été jugé préférable de ne pas établir d'isopièzes en aval de Dax et jusqu'à la confluence, en raison de l'influence de la marée, de la morphologie du bassin et de la faible densité de points de mesures qui ne permettent pas d'établir de courbes représentatives.

Les amplitudes observées entre la campagne de basses eaux et de hautes eaux sont très variables sur la zone d'étude. Cependant, pour la majorité des points d'eau (89,5%), on constate un battement de la nappe inférieur à 2,5 m.

L'analyse des cartes de basses eaux et de hautes eaux permet d'identifier 2 zones : une partie amont jusqu'à Riscle et une partie aval. Sur la portion amont, les isopièzes sont globalement rectilignes et perpendiculaires au cours d'eau traduisant un équilibre entre la nappe et la rivière. Le gradient hydraulique diminue également significativement sur cette portion en direction de l'aval. Cette décroissance est principalement liée aux variations de pente du substratum.

Sur la partie aval de la nappe, les isopièzes témoignent d'un drainage de la nappe par l'Adour jusqu'à Dax. Ce constat est valable aussi bien pour les hautes eaux que pour la période d'étiage.

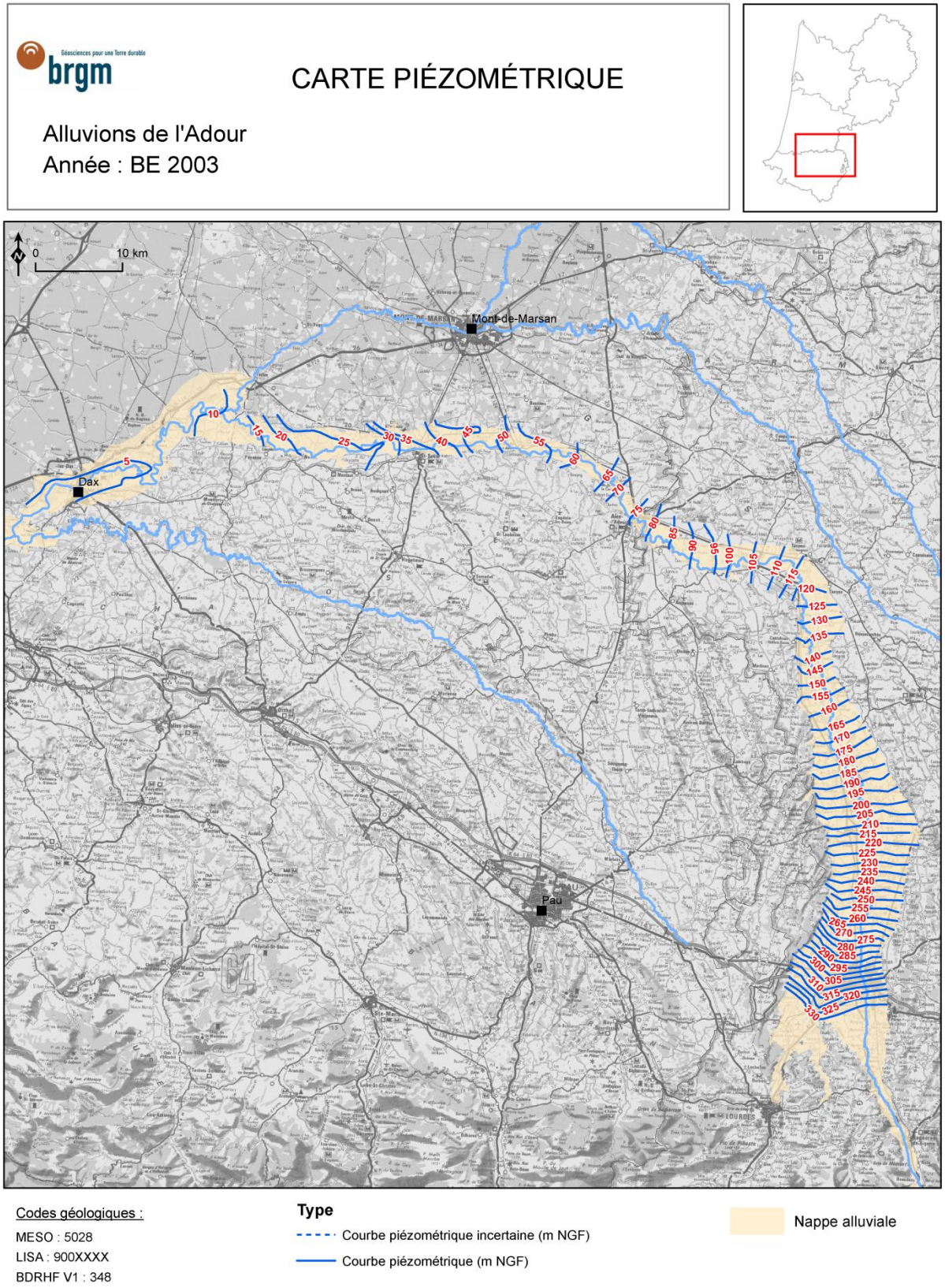


Figure 14 : Carte piézométrique de la nappe de l'Adour - Basses eaux 2003 (Burgéap, 2004)

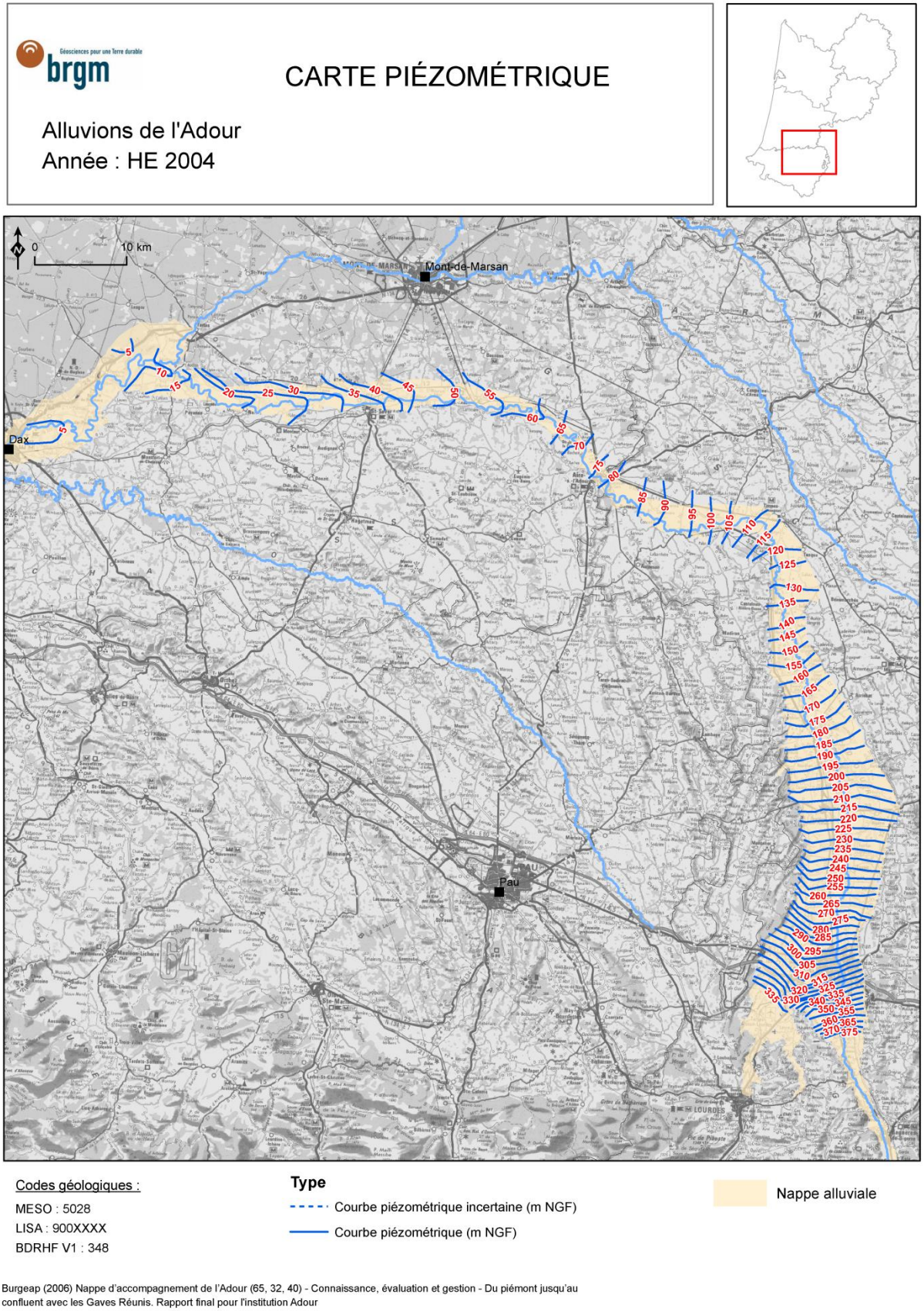


Figure 15 : Carte piézométrique de la nappe de l'Adour - Hautes eaux 2004 (Burgéap, 2004)

4.2. PREMIERE ANALYSE DES DONNEES DE LA CAMPAGNE BURGEAP 2004 (HAUTES EAUX)

L'essentiel des tests ont été menés avec les données des hautes eaux 2004, les points de mesure ayant été plus nombreux que lors des campagnes de basses eaux 1980 et basses eaux 2003. On dispose ainsi de 238 points de mesure. La figure 16 illustre la répartition des données et les gammes de variation de la cote piézométrique hautes eaux 2004 (notée « HE 2004 ») au droit de la nappe alluviale. L'histogramme des cotes piézométriques montre que celles-ci, du fait de leur corrélation à la topographie naturelle et de la géométrie du cours d'eau, forment 3 ensembles assez distincts :

- En aval, entre Dax et Riscle (aux alentours de X=400 000 Lambert II étendue), dans la partie où le cours d'eau est grossièrement orienté Est-Ouest où la cote est comprise entre +5 et +100 m NGF,
- Entre Riscle et Tarbes où la cote est comprise entre +100 et +305 m NGF,
- En amont de Tarbes où la cote est comprise entre +310 et +375 m NGF.

Au final, la section située en amont de Tarbes et se caractérisant par un faible nombre de points d'observation a été regroupée avec la section comprise entre Riscle et Tarbes pour éviter d'obtenir des résultats peu robustes sur cette zone. On a ainsi obtenu 2 principaux domaines :

- En amont de Riscle : orientation principale Sud-Nord
- En aval de Riscle : orientation principale Est-Ouest

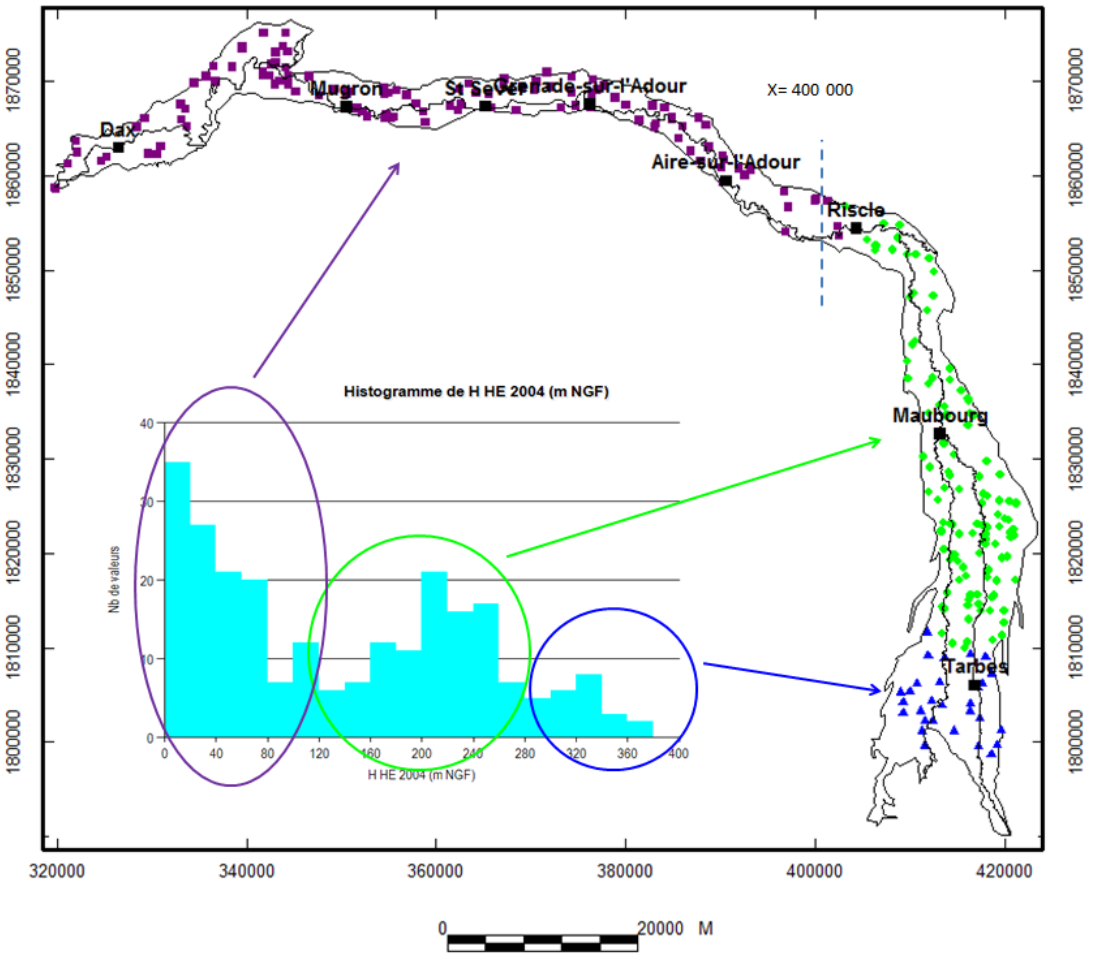


Figure 16 : Distribution de la cote piézométrique Hautes Eaux 2004 le long de l'Adour

En comparant la distribution des niveaux piézométriques par rapport au profil topographique du cours d'eau (Figure 17), il apparaît que la pente de la rivière et de la nappe sont quasi constantes de Mugron à Riscle et qu'elles augmentent ensuite progressivement de Riscle à Tarbes.

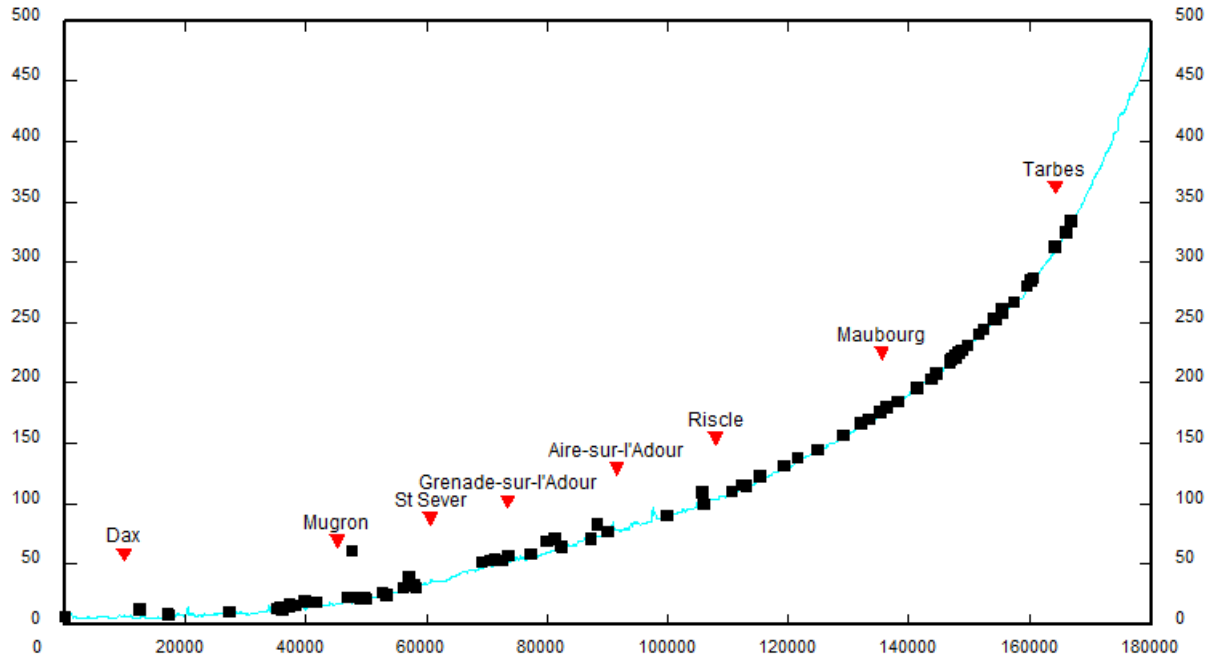


Figure 17 : Profil topographique de la rivière et cote piézométrique HE 2004

Le lien fort entre cote piézométrique et cote topographique (nappe alluviale libre) est rendu ici plus difficile à exploiter en raison des variations de pente le long de la rivière, et du fait des changements brutaux de direction de la rivière.

Si l'on ne tient pas compte de ces effets, on obtient le variogramme « toutes données confondues » représenté en figure 18. Ce variogramme est très fortement anisotrope et bien évidemment non stationnaire (il ne se stabilise pas à un pallier). Par ailleurs, la signification du variogramme dans les différentes directions n'est pas équivalente en termes de données prises en compte. Il convient de préciser que :

- Le variogramme dans la direction Est-Ouest (N90) est surtout représentatif de la partie aval de l'Adour (en aval de Riscle),
- Inversement le variogramme dans la direction Nord-Sud (N00) est surtout représentatif de la partie amont,
- Le variogramme dans la direction N135 tient compte de points situés dans les deux parties de la nappe alluviale,
- Le variogramme dans la direction N45 ne peut être calculé aux « grandes » distances du fait de la géométrie du cours d'eau.

Dans ces conditions, il paraît peu probable d'obtenir des résultats pertinents sur la base de l'utilisation de ce variogramme. Si l'on s'attache à traiter séparément les données « aval » et « amont » par rapport à Riscle, on obtient les variogrammes de la figure 19.

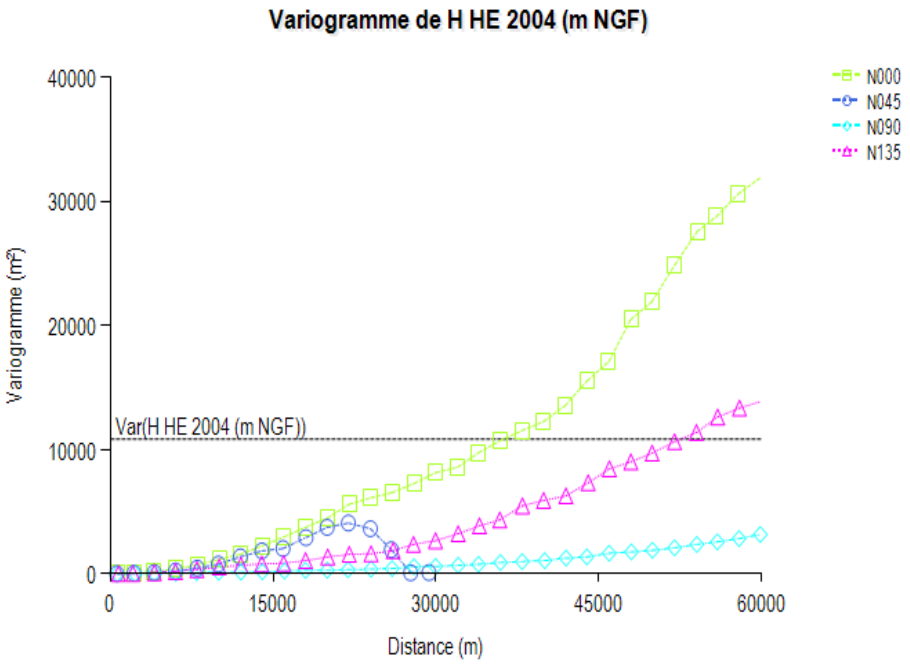


Figure 18 : Variogramme directionnel de la cote HE 2004 toutes données confondues

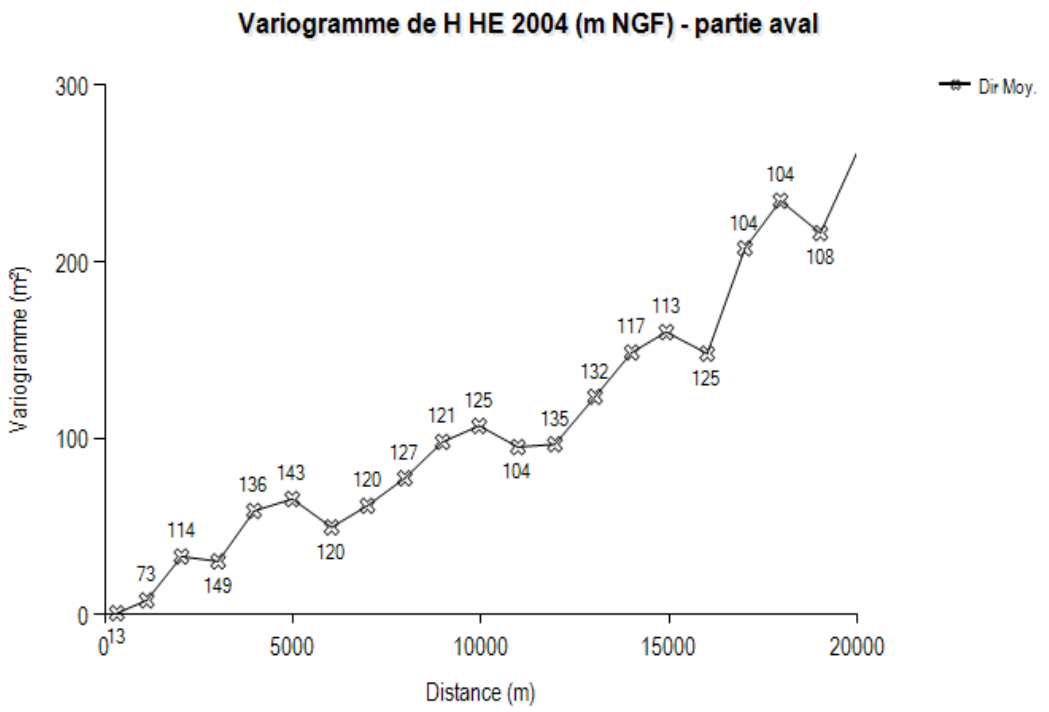
La figure 19 fait apparaître des comportements différents avec :

- en aval, des valeurs de variogrammes nettement plus faibles qu'en amont. En effet, à la distance 20 000 mètres, le variogramme aval atteint environ 250 m² alors qu'en amont à la même distance, on observe des valeurs de près de 4500 m².
- un comportement plus « erratique » du variogramme en aval. Le variogramme amont présente un comportement beaucoup plus lisse et progressif, alors qu'il fluctue de façon plus irrégulière en aval : ceci traduit probablement un comportement de la nappe plus complexe en aval qu'en amont.

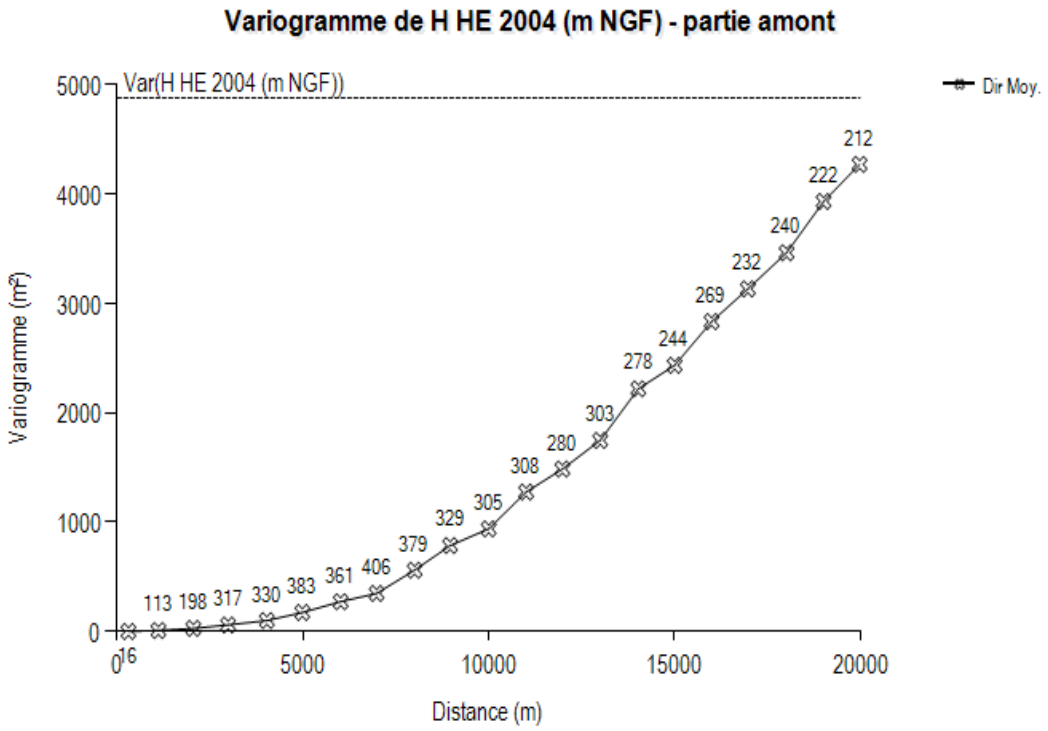
Un moyen de vérifier cette hypothèse est de comparer les variogrammes « aval » et « amont » en les normant chacun par la variance des données correspondantes de manière à les replacer à la même échelle (FIGURE 20).

Il apparaît clairement que, proportionnellement à la variance des données, la piézométrie « aval » présente nettement plus de fluctuations relatives que la piézométrie « amont », aux « courtes » distances (moins de 5 000 m). L'estimation de la piézométrie en aval de Riscle sera donc plus difficile qu'en amont.

Inversement, aux « grandes distances » c'est le variogramme « amont » qui donne les plus grandes valeurs, illustrant la plus grande variabilité des niveaux piézométriques dans l'axe Nord-Sud, comparativement à la partie aval. Ceci est évidemment lié au profil de pente de la rivière.

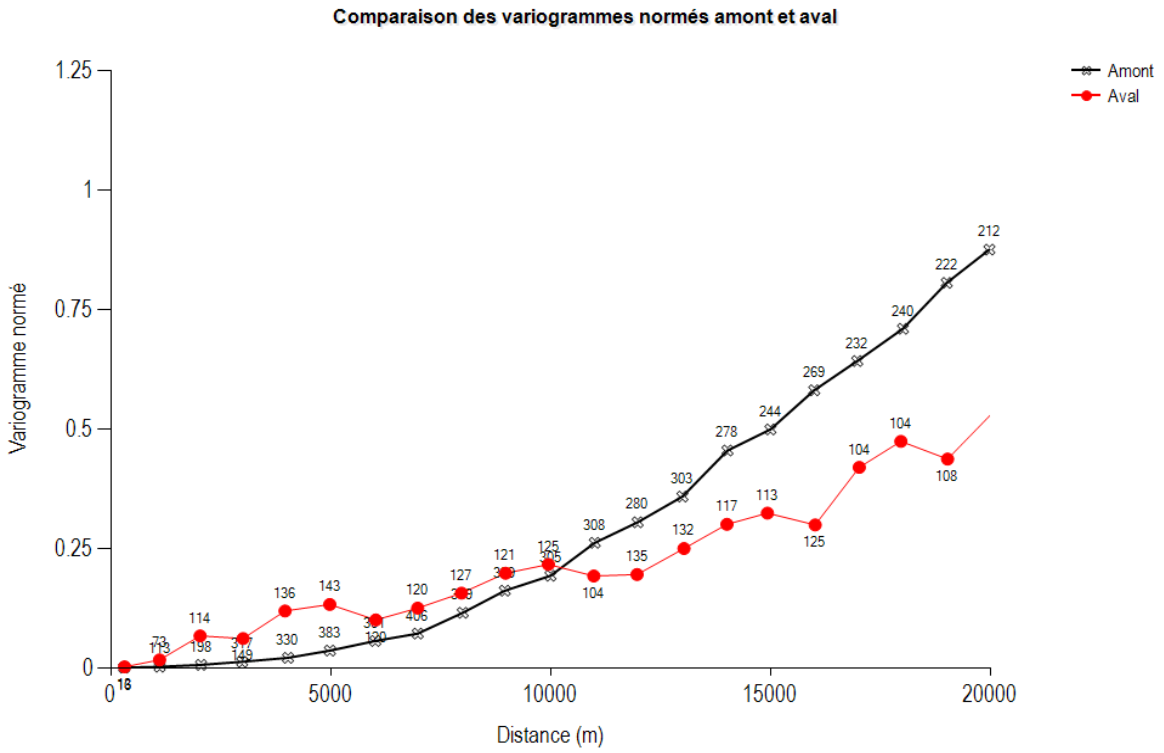


Variogramme des données aval



Variogramme des données « amont »

Figure 19 : Hautes eaux 2004 : comparaison des variogrammes bruts « aval » et « amont »



Variogramme normé des données « aval » ; Variogramme normé des données « amont »

Figure 20 : Comparaison des variogrammes normés « aval » et « amont »

En conclusion de cette première analyse des variogrammes de la cote piézométrique, il apparaît donc un comportement globalement fortement anisotrope, comportement qui s'explique par les variations de pente et de direction de la rivière. La partie amont présente les amplitudes de variation comparativement les plus fortes, mais celles-ci étant structurées de façon plus homogène, elles semblent a priori plus facilement prévisibles que dans la partie aval.

Compte tenu du comportement non stationnaire de la cote piézométrique et du comportement différent de la piézométrie en fonction des directions de calcul et de la situation amont/aval le long du cours d'eau, plusieurs options sont envisageables pour la suite des traitements :

- calcul en mélangeant amont et aval, avec un variogramme « moyen » : ce dernier test étant surtout destiné à vérifier si un modèle « simplifié » serait suffisant en première approche ;
- calcul en mélangeant les données amont et aval, mais prenant en compte la non stationnarité pour corriger la différence amont/aval ;
- calcul spécifique distinguant amont et aval.

Nous allons commencer par le cas « simplifié » : données aval et amont confondues, un seul modèle de variogramme.

4.3. APPROCHES NE DISTINGUANT PAS AMONT ET AVAL

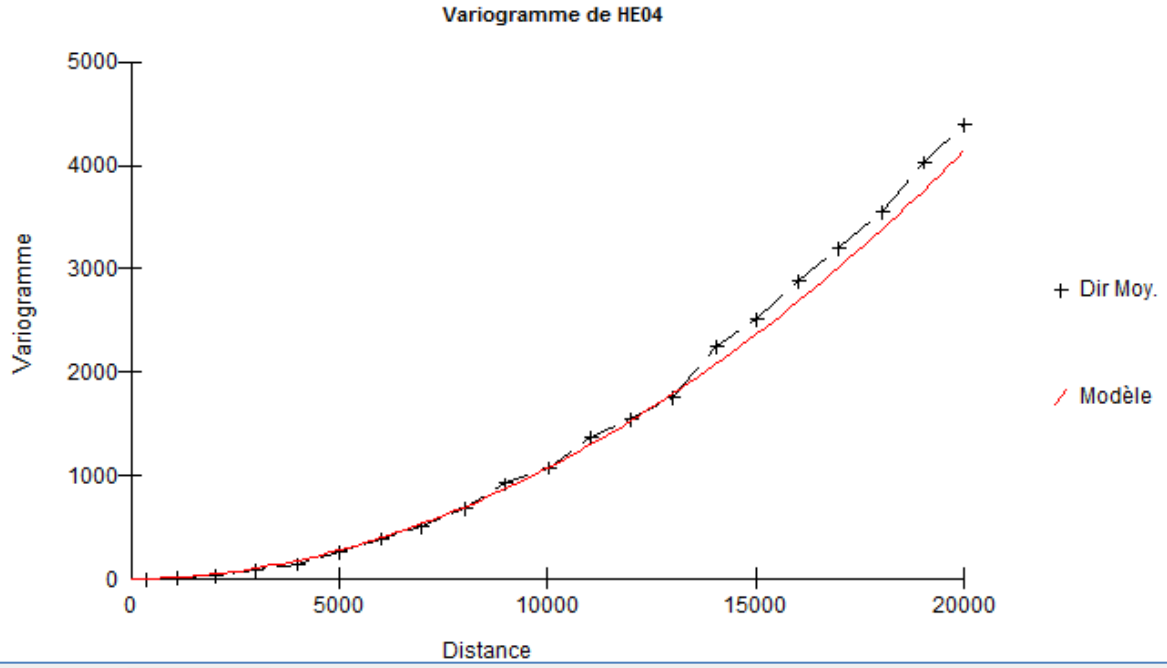
Plusieurs approches vont être testées :

- utilisation d'un variogramme moyen omnidirectionnel[8] et isotrope[9] (approche simplifiée) ;
- utilisation d'un variogramme anisotrope ;
- prise en compte d'une dérive liée aux coordonnées ;
- prise en compte d'une dérive externe liée à la topographie lissée ;
- prise en compte de contraintes supplémentaires (directions d'écoulement).

Dans tous les cas, les données amont et aval ne sont pas distinguées.

4.3.1. Test avec un variogramme moyen omnidirectionnel

Le variogramme utilisé est le variogramme amont toutes directions confondues (Figure 21).



Effet de pépite : 0

Composantes du modèle

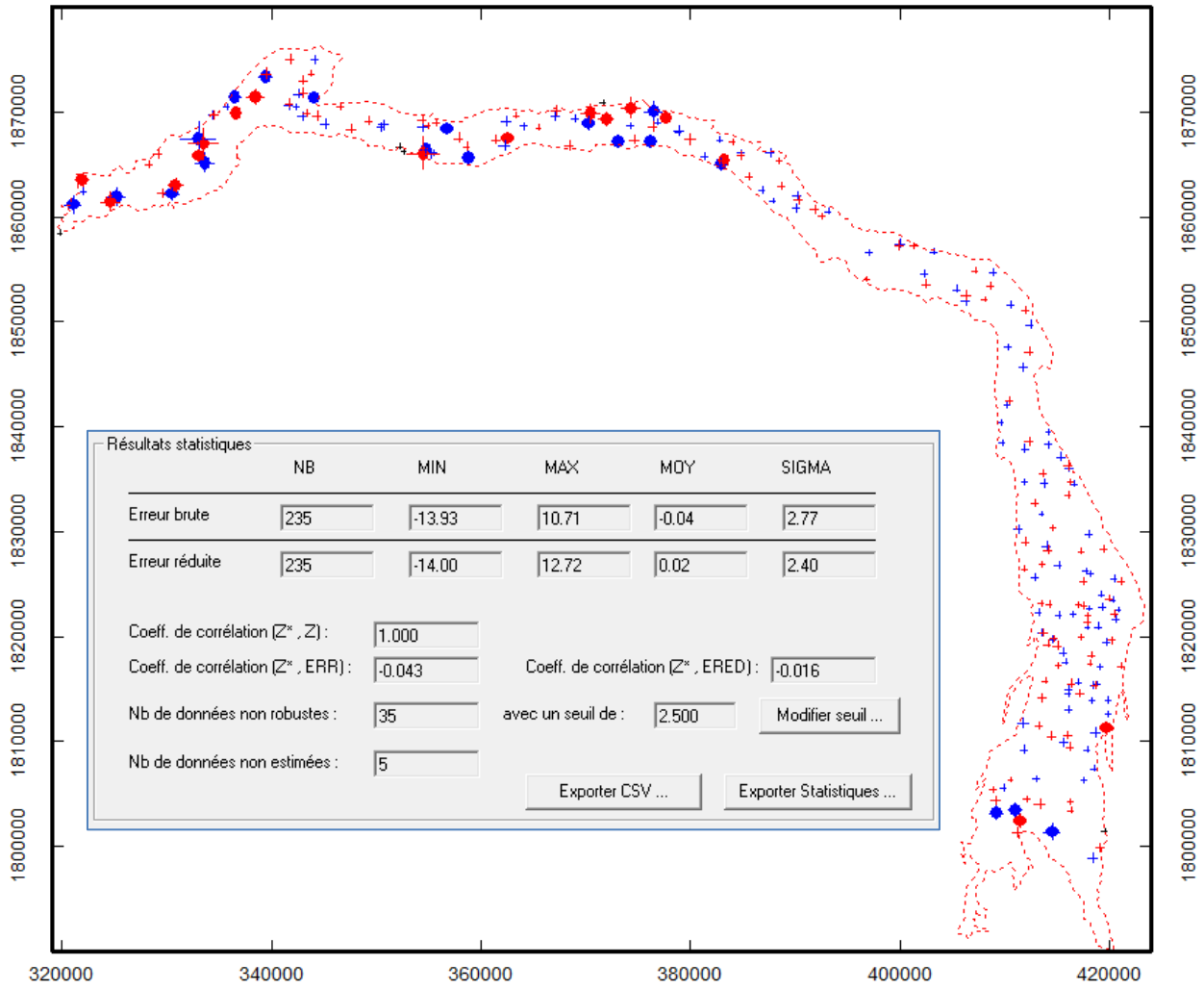
N°	Type de modèle	Palier (ou exponent du modèle puissance)	Portée / Facteur d'échelle (direction PSI)	Type d'anisotropie	Direction d'anisotropie (PSI)	Portée / Facteur d'échelle (direction PSI+90)	Exposant
1	Puissance	1.95	0.000017	Isotrope			

Figure 21 : Variogramme omnidirectionnel des données amont

[8] Qui ne tient pas compte de la direction

[9] Si le variogramme ne varie pas dans les différentes directions de calcul, on dit qu'il est isotrope. Dans le cas contraire, il est dit anisotrope.

Une validation croisée de ce modèle est réalisée[10]. Le résultat (Figure 22) montre que la validation croisée donne de mauvais résultats en aval, ainsi que pour quelques points tout à fait en amont. Ceci était relativement prévisible et montre bien que le modèle de variogramme utilisé est bien calé pour la partie amont entre Riscle et Tarbes, mais par dans les autres parties de la nappe alluviale.



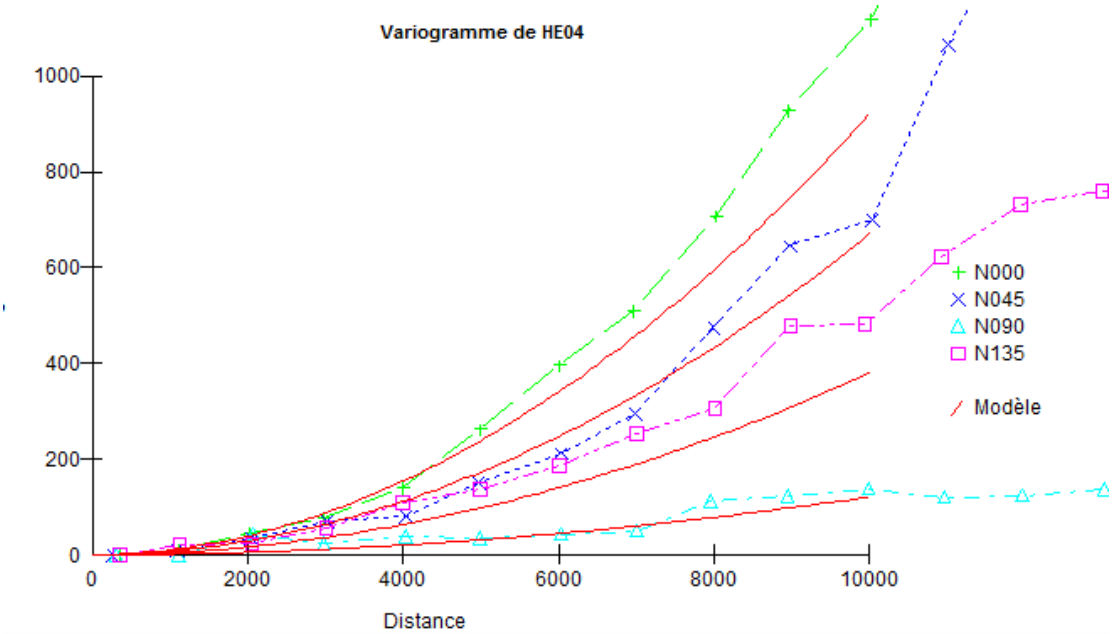
● / ● = *points où la cote piézométrique est mal réestimée (points « non robustes »)*

Figure 22 : Validation croisée avec un variogramme moyen omnidirectionnel. HE 2004

4.3.2. Test avec un variogramme anisotrope toutes données confondues

Un second test est effectué. Cette fois-ci on tient compte de l'anisotropie du variogramme mais les données aval et amont ne sont pas distinguées. Le variogramme obtenu (Figure 23) est ajusté par un modèle « puissance » anisotrope.

[10] Rappelons que la validation croisée consiste à enlever temporairement une donnée, à la ré-estimer à partir des données voisines et du modèle de variogramme, puis à comparer la valeur ré-estimée à la valeur vraie ainsi qu'à l'erreur d'interpolation prévue par le krigeage. Les points pour lesquels la différence entre prévision et réalité est considérée comme « trop » forte sont visualisés (points « non robustes ») et des statistiques sur les différences sont calculées.



Effet de pépite : 0

Composantes du modèle

N°	Type de modèle	Palier (ou exposant du modèle puissance)	Portée / Facteur d'échelle (direction PSI)	Type d'anisotropie	Direction d'anisotropie (PSI)	Portée / Facteur d'échelle (direction PSI+90)	Exposant
1	Puissance	1.95	0.000015	Géométrique	10	0.0000015	

Figure 23 : Variogramme directionnel des données amont + aval HE 2004

Le test de validation croisée de ce modèle anisotrope montre que ce modèle donne des résultats encore moins bons que le modèle isotrope. L'origine de ces mauvais résultats est probablement liée à la géométrie du cours d'eau ; les variogrammes dans les directions Est-Ouest (N090) et Nord-Sud (N000) étant calculés en prenant en compte principalement les données aval pour l'un, et les données amont pour l'autre.

Les deux tests précédents montrent qu'il est difficile de mener une estimation fiable de la piézométrie sans corriger l'effet d'anisotropie et de dérive.

D'autres alternatives de traitement vont donc être testées.

4.3.3. Prise en compte d'une dérive liée aux coordonnées

Etant donnée la géométrie du cours d'eau, on peut approximer la cote piézométrique par une surface quadratique dépendant des coordonnées X et Y. Des détails complémentaires sur cette méthodologie sont apportés en annexe 2.

On s'intéresse ensuite aux résidus, qui correspondent aux différences entre la surface moyenne approximée par les coordonnées et la cote piézométrique.

Le variogramme de ces résidus est présenté figure 24.

On peut noter la très forte réduction de la variance par rapport au variogramme des données brutes : celle-ci n'est plus que de 41 m² alors qu'elle atteignait 10 660 m² (cf. Figure 18).

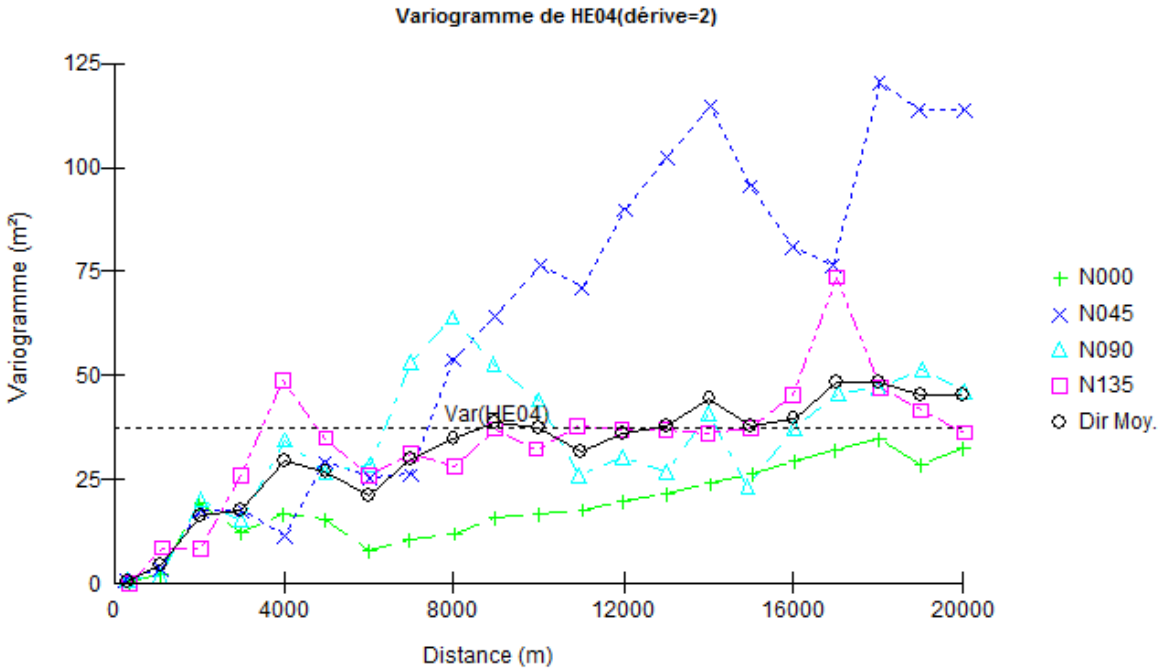


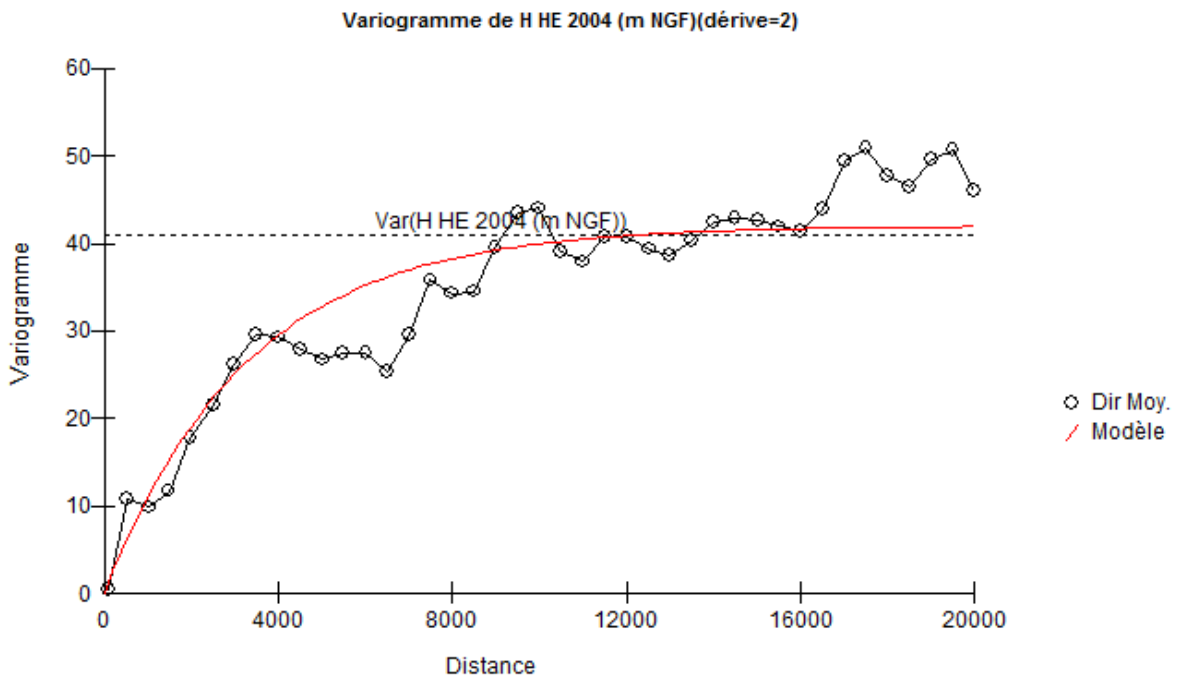
Figure 24 : Variogramme des résidus Hautes Eaux 2004, après soustraction d'une dérive de degré 2 sur les coordonnées

Le variogramme des résidus ne montre plus de dérive mais cependant il n'est pas vraiment isotrope aux « grandes » distances. Ceci est surtout constaté pour le variogramme direction Nord-Sud (N000) qui est plus faible que dans les autres directions. Concernant la direction N045, il est plus difficile de se prononcer car le calcul repose sur beaucoup moins de paires de points que dans les autres directions. Le variogramme dans cette direction de calcul n'est donc peut-être pas vraiment significatif.

Un ajustement anisotrope semblant difficile à réaliser, c'est le variogramme moyen omnidirectionnel qui a été considéré par la suite. Ce variogramme une fois lissé est ajusté par un modèle stationnaire (Figure 25).

La validation croisée de ce modèle conduit aux résultats présentés en figure 26. L'écart-type (« SIGMA ») réduit vaut 0.71, ce qui paraît un peu faible et laisse supposer que les écarts types de krigeage calculés sont globalement légèrement surestimés. Ceci est probablement dû à l'anisotropie du variogramme des résidus, qui n'a pas été modélisée : le variogramme expérimental Nord-Sud est en réalité presque 2 fois plus faible que dans les autres directions aux « grandes » distances, les écarts-types de krigeage dans la partie amont sont donc probablement surestimés.

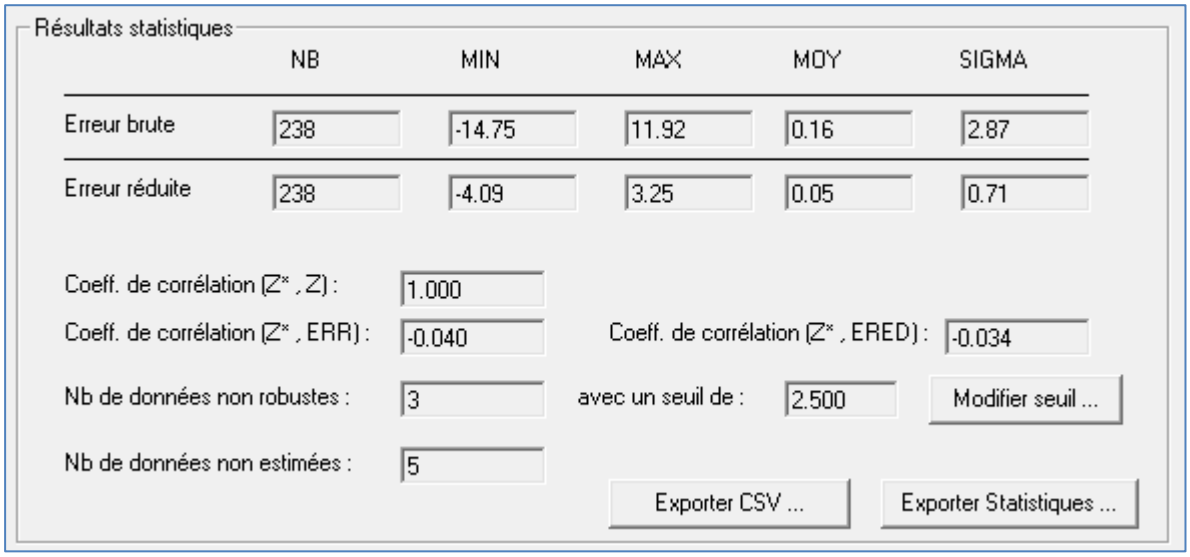
Les 3 points « non robustes » sont situés dans la partie aval, pour laquelle on note d'assez fortes variations de la cote piézométrique (Figure 26).

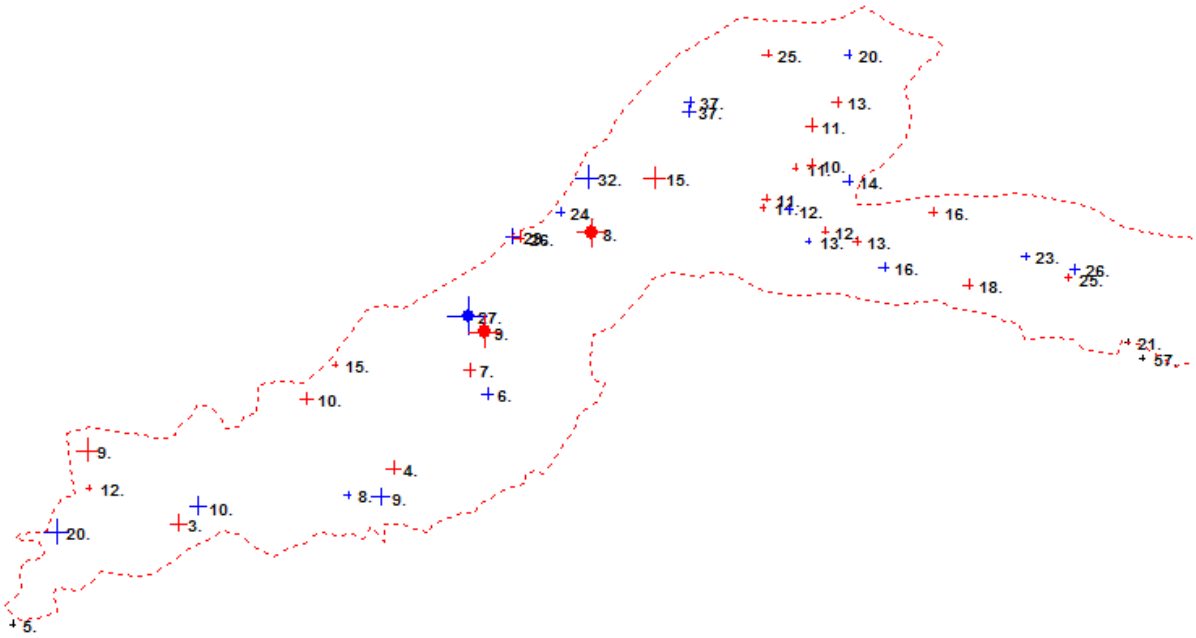


Ajustement du variogramme lissé : 42Exp(3300)

Figure 25 : Ajustement du variogramme lissé des résidus Hautes Eaux 2004, après soustraction d'une dérive de degré 2 sur les coordonnées

Il ressort de ce test que l'interpolation de la cote piézométrique en enlevant une dérive de degré 2 sur les coordonnées donne a priori un assez bon résultat.





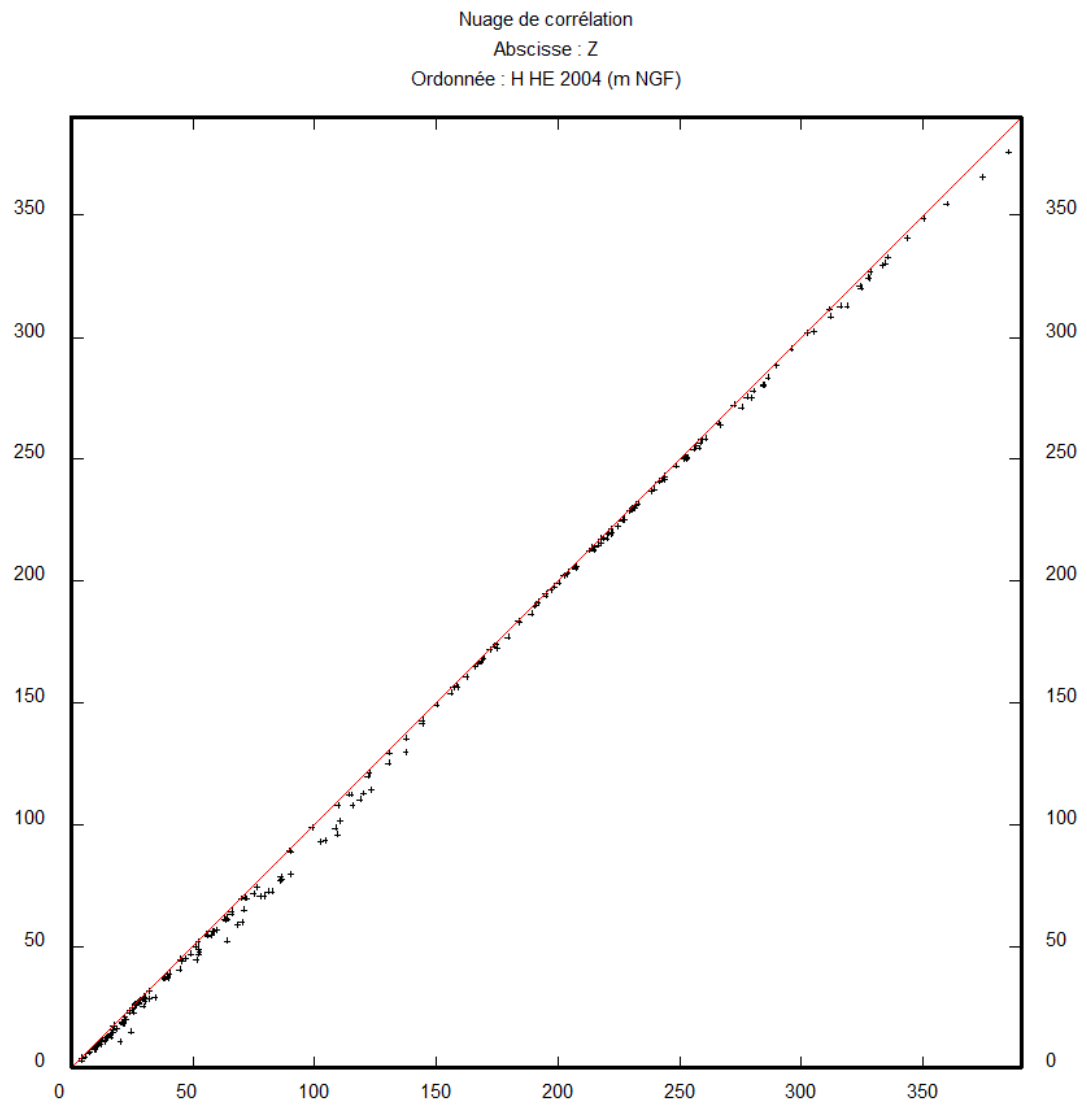
• / • = *points où la cote piézométrique est mal réestimée (points « non robustes »)*

Points mal réestimés : ces points sont liés à un fort gradient hydraulique (la valeur reportée à droite des points est la cote piézométrique vraie). Points à vérifier. On note la forte variabilité de la cote piézométrique dans la partie aval

Figure 26 :Validation croisée du variogramme des résidus (dérive de degré 2 sur les coordonnées)

4.3.4. Prise en compte d'une dérive externe liée au MNT

Dans le cas d'une nappe alluviale libre, la cote piézométrique est très liée à la topographie, ce que l'on peut vérifier pour la nappe de l'Adour en établissant le nuage de corrélation entre la cote topographique et la cote piézométrique (Figure 27).



Nb : la ligne en rouge est la bissectrice (et non pas la droite de régression).

Variable	Nb de valeurs	Mini.	Maxi.	Moyenne	Ecart-type
Z	243	4.443	385.256	140.897	103.114
H HE 2004 (m NGF	243	3.15	375.926	138.029	103.265

Coefficient de corrélation : 0.9997

Régression linéaire : H HE 2004 (m NGF) = 1.00115 * Z - 3.02996

Variance du résidu : 6.74577

Ecart-type du résidu : 2.59726

Figure 27 : Corrélation entre la cote piézométrique (ordonnée) et la topographie (abscisse)

Dans ce contexte, on peut donc espérer tirer profit du fait que la cote topographique est connue partout grâce au modèle numérique de terrain (MNT) en utilisant la méthode de « krigeage externe » qui prend en compte une variable corrélée connue partout. Bien évidemment on n'utilise pas un modèle numérique de terrain à maille fine, qui présenterait trop d'irrégularités comparativement à la surface de la nappe, mais un modèle numérique de terrain lissé sur une fenêtre adaptée (Bourgine, 2012). Ici, il a été choisi de tester le cas d'un MNT lissé en prenant la moyenne de la cote topographique dans une fenêtre de 250 m, en partant d'un MNT initial à la maille de 25 m.

Un « résidu », égal à la différence entre cote piézométrique HE 2004 et cote topographique lissée, est calculé pour chaque piézomètre. A partir de ce résidu, nommé ici « D250 », un variogramme est calculé (Figure 28). On note la très forte réduction de variance après le passage aux résidus : la variance des données brutes était de de 10 660 m² (cf. Figure 18), alors que celle des résidus après soustraction de la dérive liée à la topographie chute à environ 7 m² (encore moins que pour la dérive de degré 2 sur les coordonnées où on avait obtenu 41 m² - Figure 24).

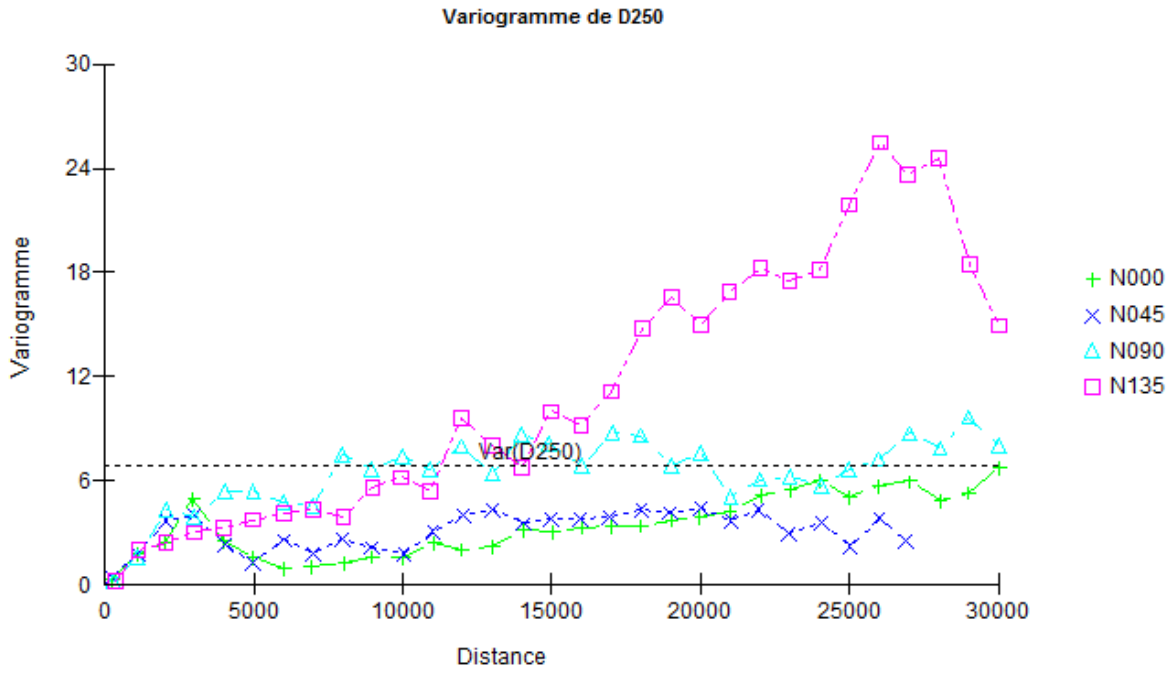


Figure 28 : Variogramme du résidu de la piézométrie HE 2004 par rapport à la topographie moyenne sur une fenêtre de 250 m

Le variogramme des résidus n'est toutefois pas isotrope au-delà d'une distance de 3000 m, ni stationnaire dans la direction N135.

Compte tenu de la maille de mesure des piézomètres, inférieure à 3000 m en général, on peut se contenter d'un ajustement du variogramme toutes directions confondues et négliger le comportement anisotrope (les distances de calcul feront intervenir seulement le variogramme aux « petites » distances).

Le variogramme toutes directions confondues peut donc être ajusté comme indiqué en figure 29 et figure 30.

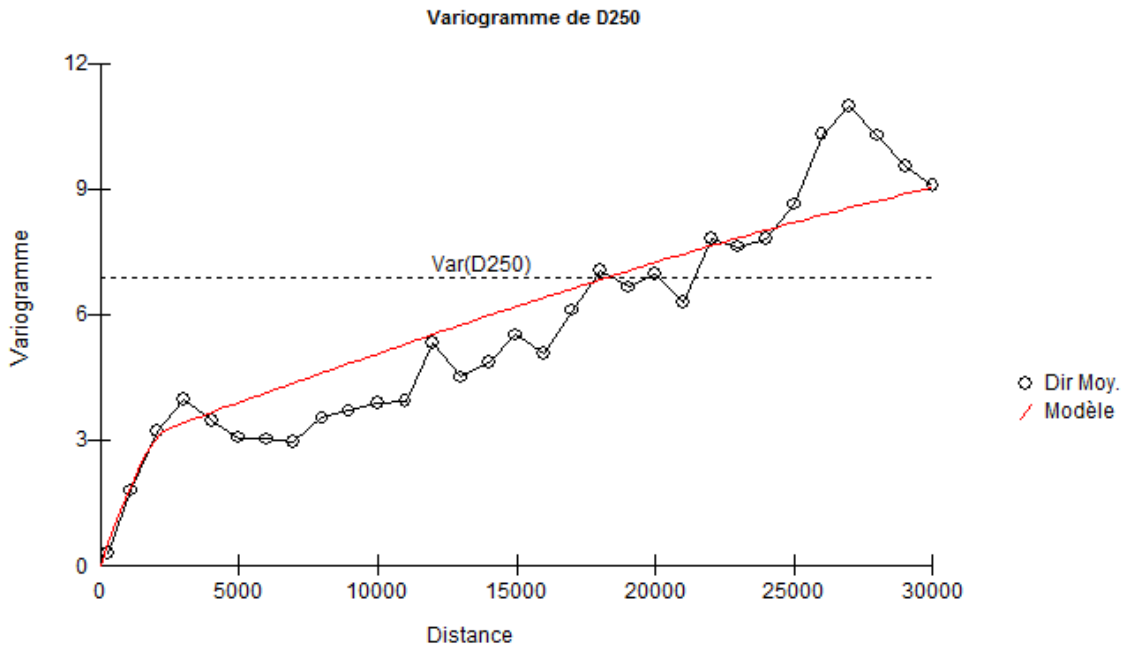


Figure 29 : Variogramme omnidirectionnel du variogramme du résidu Topo lissée à la maille 250 m - cote piézo HE 2004

Effet de pépite : 0

Composantes du modèle

N°	Type de modèle	Palier (ou exposant du modèle puissance)	Portée / Facteur d'échelle (direction PSI)	Type d'anisotropie
1	Sphérique	2.7	2500	Isotrope
2	Sphérique	8	50000	Isotrope

Figure 30 : Modèle de variogramme du résidu Topo lissée à la maille 250 m - cote piézo HE 2004

La validation croisée du résidu donne le résultat indiqué en figure 31. L'écart-type réduit est proche de 1 mais on observe un nombre relativement élevé de « données non robustes » : 10 données non robustes au seuil de 2.5.

En réalité, 4 de ces données non robustes présentent une valeur d'écart type réduit proche de 4 (ce qui est relativement élevé), et les 6 autres présentent une valeur d'écart-type réduit proche de 2.5 (ce qui est encore acceptable). La répartition des données non robustes ne montre pas de caractère géographique marqué et se répartissent aussi bien en amont qu'en aval (Figure 32).

A première vue, la validation croisée de l'interpolation avec dérive externe sur la topographie lissée donne donc des résultats relativement satisfaisants sur la restitution des niveaux piézométriques.

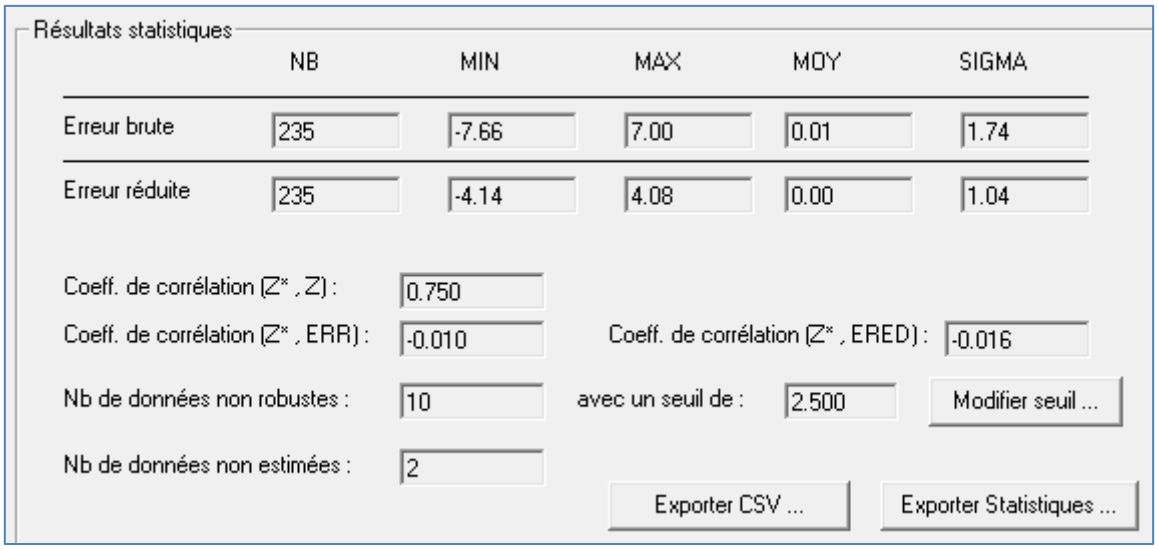
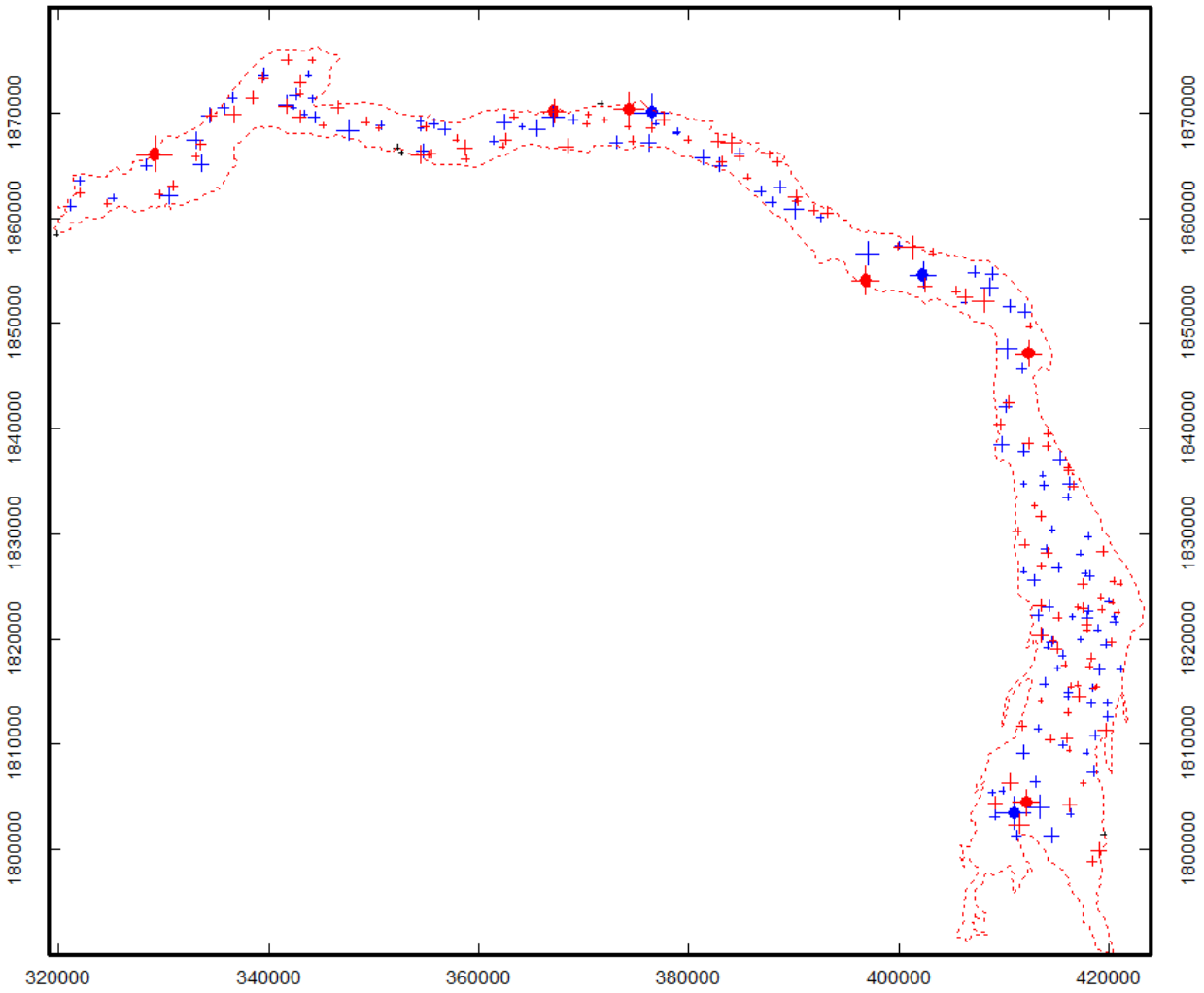


Figure 31 : Validation croisée du résidu cote piézométrique HE 2004 - topo lissée à la maille 250 m



• / • = *points où la cote piézométrique est mal réestimée (points « non robustes »)*

Figure 32 : Carte des erreurs réduites. Validation croisée dans l'hypothèse d'une dérive externe

La carte piézométrique que l'on obtient en utilisant cette méthode est représentée sur la figure 33.

Cette carte montre que la prise en compte de la topographie, même lissée, a tendance à introduire des artefacts à l'ouest en bordure de la plaine alluviale. Pour limiter ces artefacts, il faudrait probablement lisser la topographie de façon différente en bordure de la plaine alluviale afin d'éliminer les effets de « coteau ». Par ailleurs, on constate qu'il existe une différence à proximité des cours d'eau entre le krigeage avec dérive externe et la carte réalisée par le Burgéap. La prise en compte du MNT en dérive externe laisse supposer un léger drainage de la nappe par les différents bras de l'Adour qui ne peut être exclu. L'ajout de points de contrainte sur le réseau hydrographique permettrait d'affiner la restitution de la carte avec cette méthode et de confronter ces données aux mesures réalisées au plus proche de la rivière.

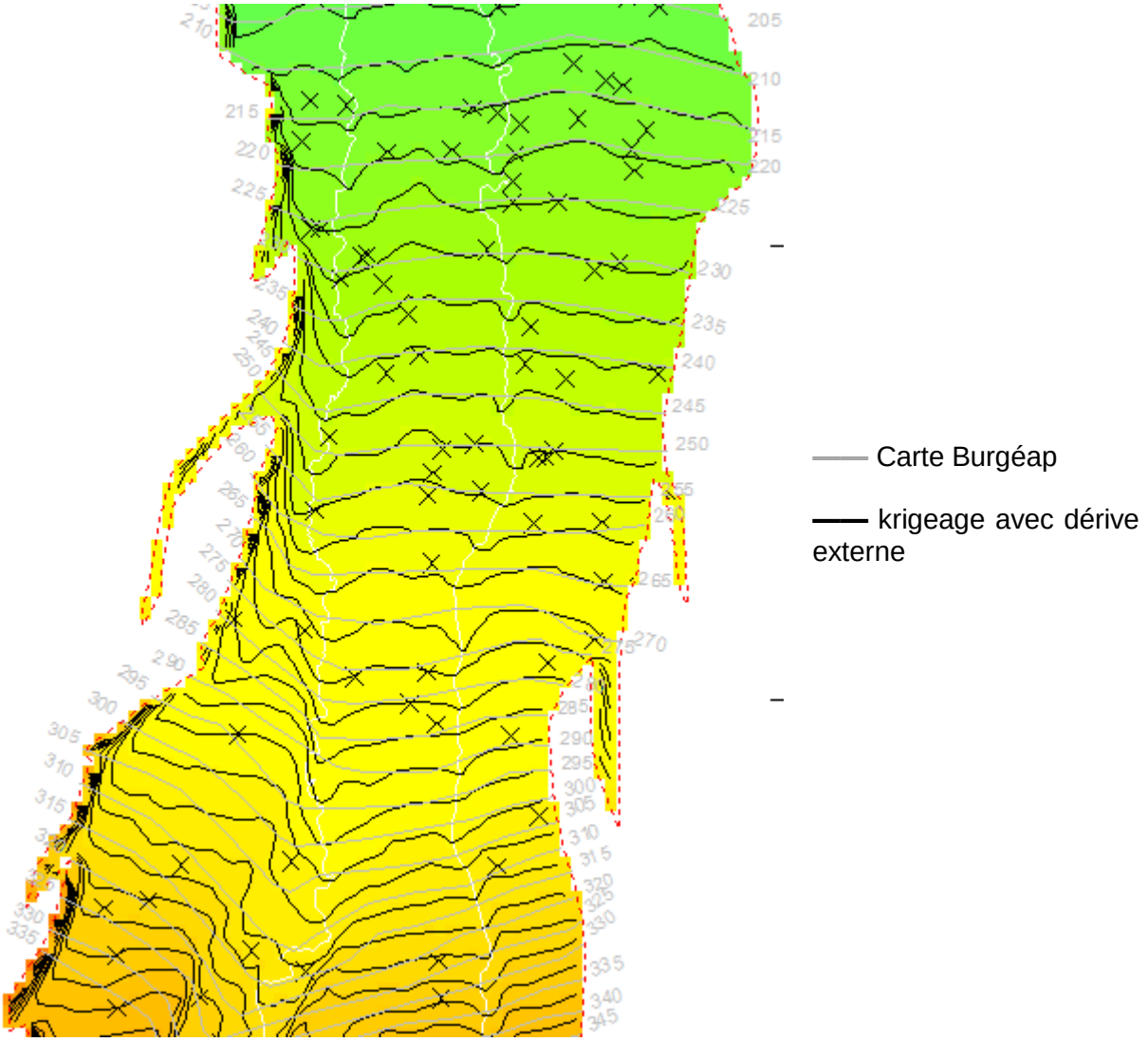


Figure 33 : Carte piézométrique HE 2004 dans l'hypothèse d'une dérive externe (secteur de Tarbes)

4.3.5. Prise en compte de directions d'écoulement

Comme évoqué dans le rapport réalisé en année 3 de la convention régionale (Bourgine et al., 2013), des contraintes de direction d'écoulement peuvent être introduites.

Dans le cas présent, les courbes isopièzes doivent être perpendiculaires aux bordures de la plaine alluviale dans la partie amont du cours d'eau. Les cartes réalisées précédemment n'indiquent pas d'apports significatifs par les coteaux.

Un test a été effectué en introduisant cette contrainte supplémentaire pour mieux contraindre les interpolations. Des vecteurs perpendiculaires aux bordures de la plaine alluviale ont été générés automatiquement à intervalle régulier (environ tous les 3 km). Ces vecteurs génèrent des contraintes de parallélisme des isopièzes au voisinage de ces vecteurs. Le résultat obtenu (Figure 34) montre que si les isopièzes obtenues (en noir sur la Figure 34) respectent bien ces contraintes, le résultat est assez peu différent de la carte existante qui respectait déjà une bonne perpendicularité des isopièzes. Par ailleurs, l'algorithme de génération des vecteurs contrainte génère un vecteur perpendiculaire localement à la bordure de la plaine. Or la perpendiculaire la plus pertinente à introduire est parfois difficile à apprécier en raison des sinuosités du contour. Il faudrait sans doute effectuer un lissage des contours avant de générer un vecteur perpendiculaire.

Il ressort de ce test qu'il n'est pas vraiment utile, au moins dans la partie amont, d'introduire des contraintes de direction d'écoulement : la densité de données est telle que ces contraintes n'améliorent pas significativement la carte. L'avantage apporté par de telles contraintes serait beaucoup plus net si l'on disposait de beaucoup moins de points de mesure.

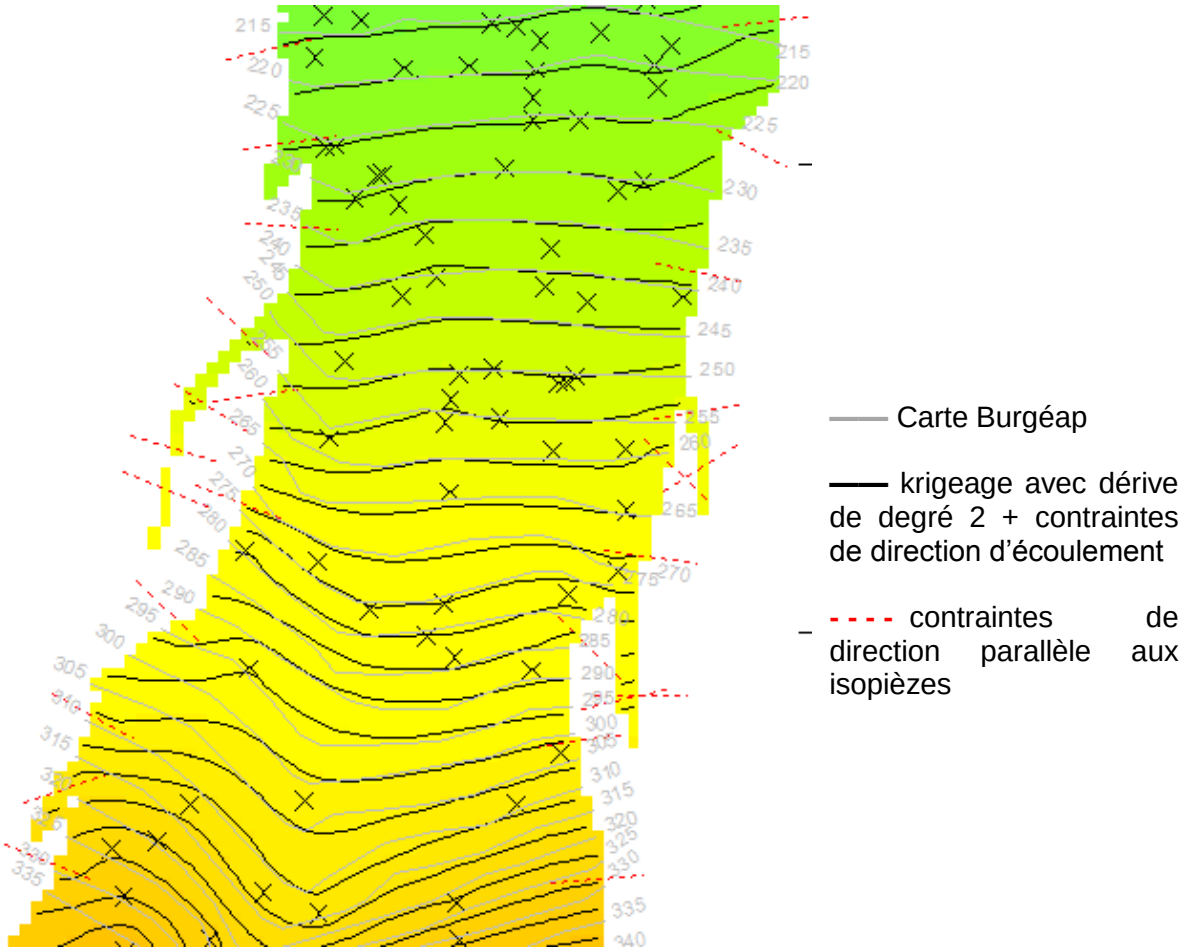


Figure 34 : Carte piézométrique HE 2004 dans l'hypothèse d'une dérive de degré 2 et de contraintes de direction d'écoulement (secteur de Tarbes)

4.4. APPROCHES DISTINGUANT AMONT ET AVAL

Cette fois-ci l'analyse est conduite séparément sur les deux secteurs préalablement identifiés :

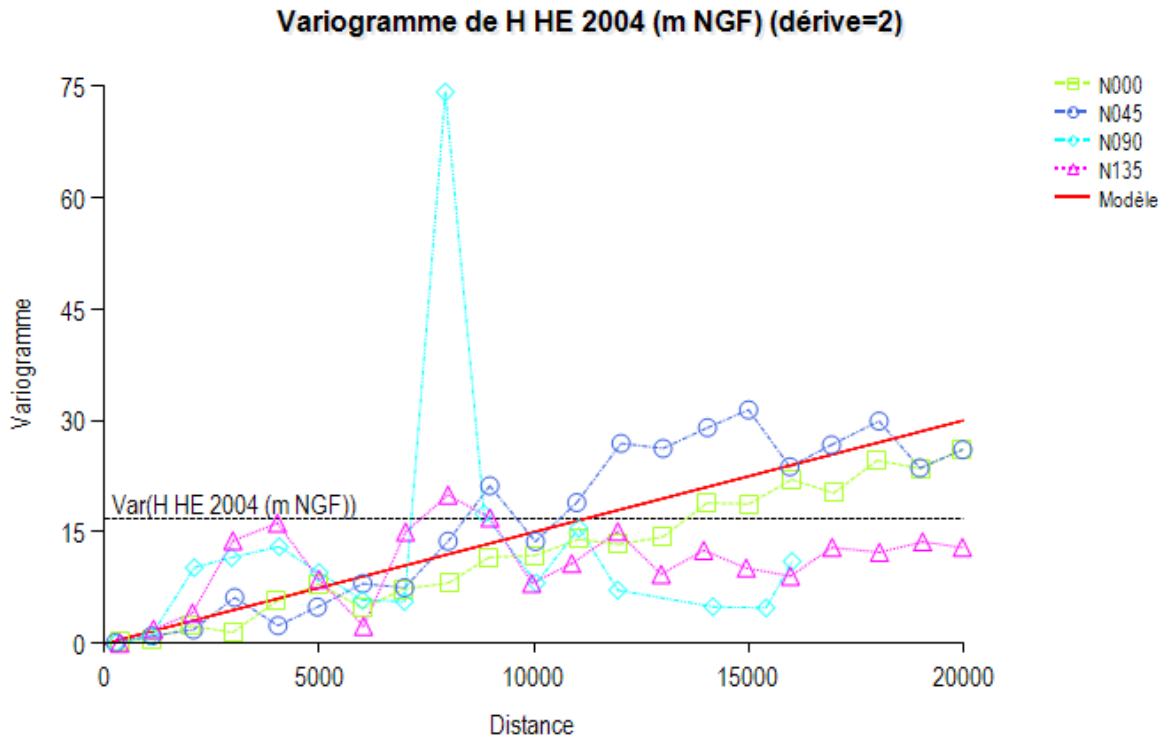
- la partie amont de la plaine alluviale (entre Tarbes et Riscles),
- la partie aval (entre Dax et Riscle).

Dans la mesure où l'analyse globale réalisée précédemment a montré que le traitement avec soustraction d'une dérive liée aux coordonnées donnait des résultats déjà très corrects, le principe d'une méthode basée sur une dérive liée aux coordonnées a été retenu mais en l'adaptant selon la partie traitée (amont ou aval). Par ailleurs, cette méthode basée sur l'analyse et l'ajustement d'un variogramme sera comparée à deux alternatives de traitement basées sur des méthodes d'interpolation « par défaut » couramment utilisées : le « krigeage linéaire sans dérive » et l'interpolation par la méthode de l'inverse de la distance.

Ces 3 méthodes seront d'abord comparées sur le plan visuel. Puis on les comparera de façon quantitative par une approche de type validation croisée à la section suivante.

4.4.1. Analyse du variogramme des données amont (en amont de Riscle)

Comme précédemment, on enlève une dérive de degré 2 sur les coordonnées. La variance des données brutes amont est de 4586 m², celle du résidu après soustraction de la dérive atteint 17 m², soit une forte réduction de variance. Le variogramme obtenu (Figure 35) peut être ajusté et utilisé pour construire la carte piézométrique de la partie amont (Figure 36).



Données amont (X>396000 ; 136 données)

Figure 35 : Variogramme HE 2004 des données amont, après soustraction d'une dérive de degré 2

Sur la figure 36, la carte « Burgéap » peut être comparée avec celles obtenues soit par krigeage linéaire sans dérive (méthode par défaut proposée par beaucoup de logiciels d'interpolation), soit par krigeage avec prise en compte d'une dérive sur les coordonnées.

Les deux krigeages sont relativement similaires et proches de la version « Burgéap ». La différence principale réside dans la partie en amont de Tarbes, où le faible nombre de données et le travail en extrapolation conduisent à des solutions différentes dépendant des hypothèses de dérive.

Ailleurs, les faibles différences constatées entre les différentes cartes s'expliquent par la densité de mesure qui est suffisante pour très bien contraindre la carte et laisser très peu de marge à l'interpolateur choisi (sachant que les krigeages mis en œuvre passent tous deux par les points d'observation).

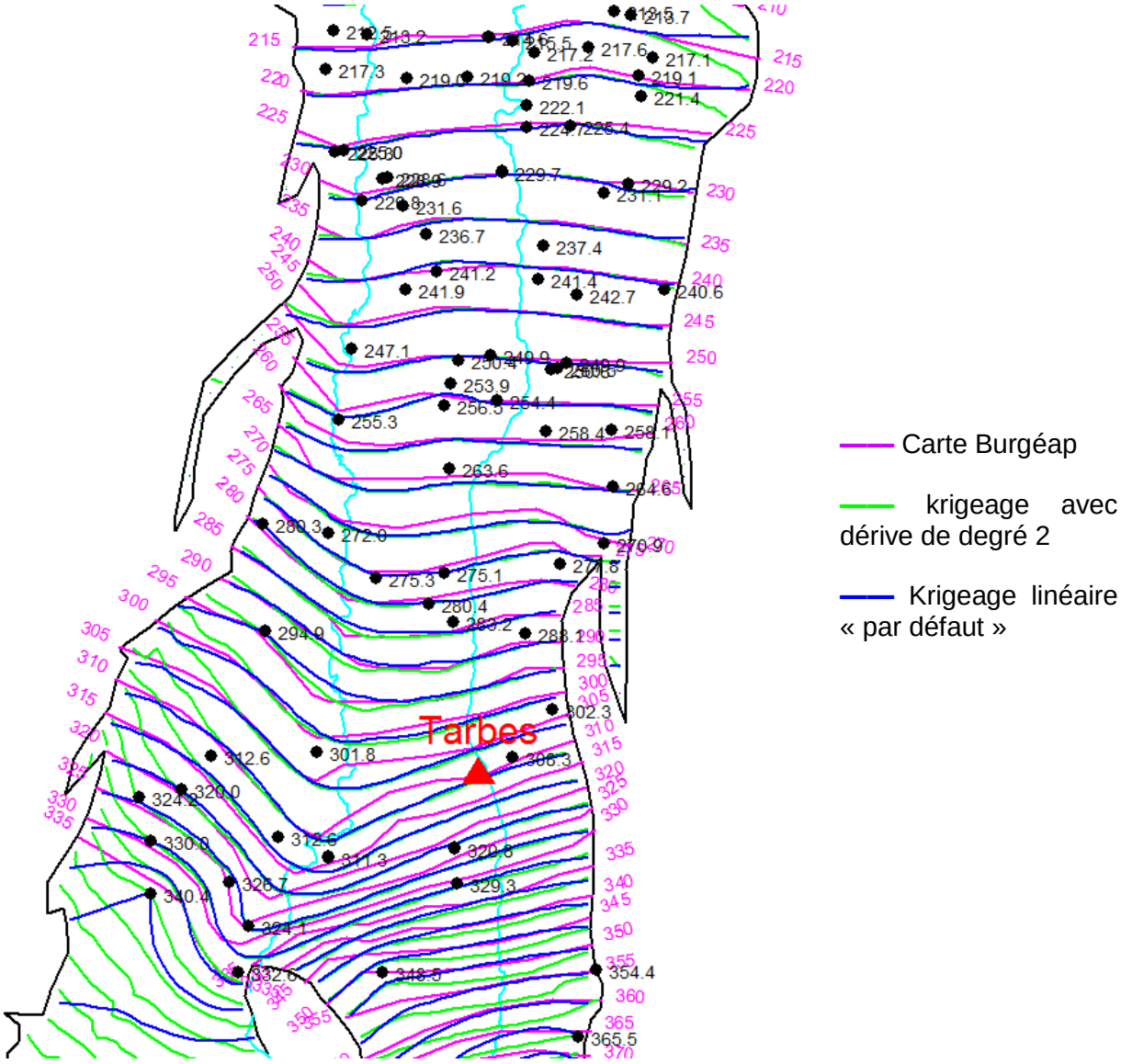
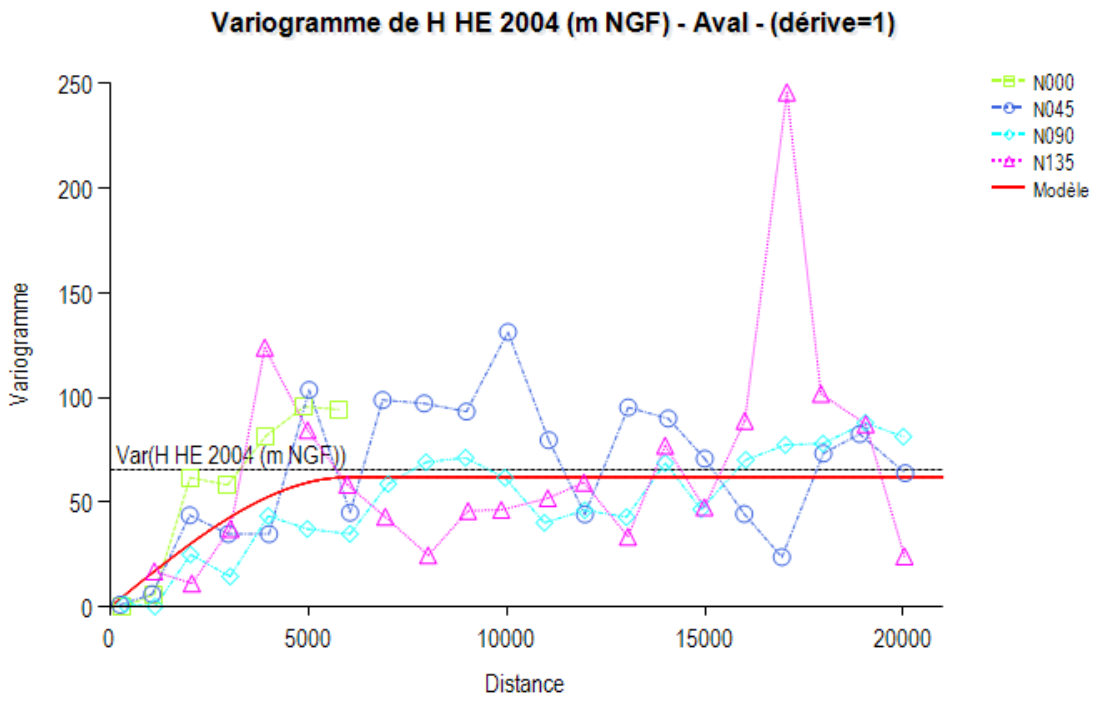


Figure 36 : Carte piézométrique HE 2004. Données amont. Comparaison de deux méthodes

4.4.2. Analyse du variogramme des données aval (en aval de Riscle)

Cette fois, la pente étant plus régulière, on peut se contenter d'enlever une dérive de degré 1 au lieu de degré 2. Le variogramme obtenu (Figure 37) montre une réduction de variance moins importante qu'à l'amont : la variance des données brutes aval atteint 499 m² et celle des résidus, 66 m², ce qui constitue quand même une forte réduction.



Données aval (X<396000 ; 102 données)

Figure 37 : Variogramme HE 2004 des données aval, après soustraction d'une dérive de degré 1

Ce variogramme ajusté permet de construite la carte piézométrique dans la partie aval (Figure 38).

La figure 38 montre que les cartes piézométriques obtenues par krigeage sont assez différentes des cartes « Burgéap », sauf en amont de St Sever.

Entre Dax et Mugron, la carte « Burgéap » ne représente pas les isopièzes 20, 25 et 30 m NGF. Par ailleurs, les isopièzes 10 et 15 m NGF à l'ouest de Mugron sont assez différentes selon les interprétations.

Lorsqu'on examine les données, on constate de fortes variations locales montrant des gradients importants de la nappe. Dans cette zone où la surface piézométrique apparaît plus complexe qu'en amont, il est en fait difficile de comparer les interpolations.

Afin d'aller plus loin dans la comparaison, un dernier test qui a consisté à diviser le jeu de données en deux a été mené (paragraphe suivant).

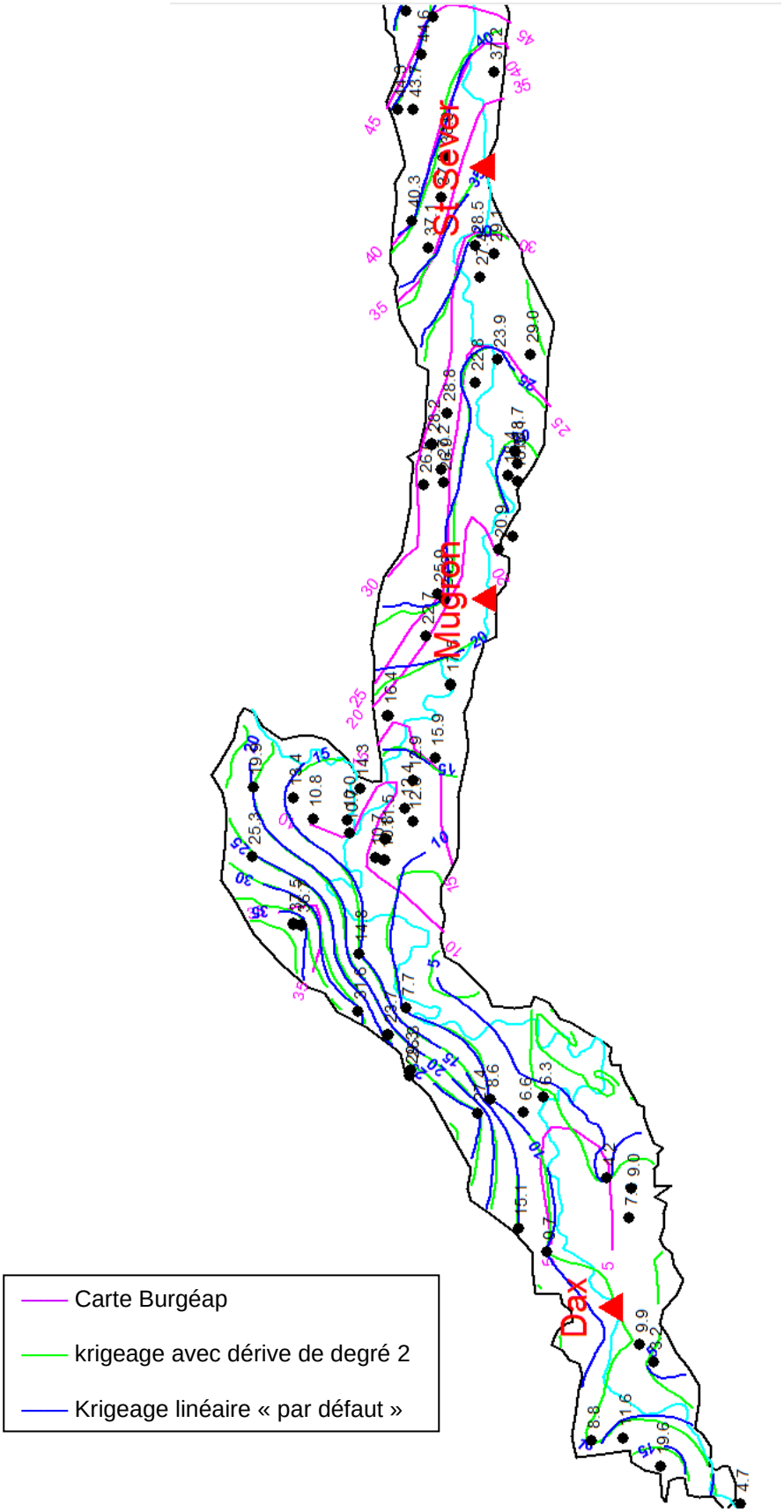


Figure 38 : Carte piézométrique HE 2004. Données aval. Comparaison de deux méthodes

4.5. APPROCHES DISTINGUANT AMONT ET AVAL AVEC REDUCTION DU NOMBRE DE DONNEES

Dans la mesure où la comparaison visuelle à une carte de référence dont on ne connait pas la précision est un exercice difficile dans une zone où la surface piézométrique est complexe, nous avons opté pour une comparaison basée sur la division du jeu de données en deux parties (Figure 39) :

- 25% des données sont sélectionnées de façon aléatoire et servent à l'interpolation,
- Sur les 75% de points restants, la vraie valeur ainsi que la valeur estimée sont connues, on peut donc calculer l'erreur d'estimation,
- des statistiques sur les erreurs d'estimation (min, max, moyenne et écart-type) permettent ensuite de comparer les variantes de calcul envisagées,
- les interpolations obtenues peuvent également être comparées visuellement.

Les deux krigeages précédents ont été comparés de cette manière. On a également ajouté à ces deux krigeages une troisième méthode d'interpolation par l'inverse de la distance au carré.

Les comparaisons des performances de ces 3 méthodes d'interpolation sont présentées en figure 40 pour l'amont et figure 41 pour l'aval.

En ce qui concerne l'amont (Figure 40), c'est nettement le krigeage avec prise en compte d'une dérive de degré 2 qui donne les meilleurs résultats. Ceci confirme les constatations formulées précédemment. La méthode par « inverse distance » donne des résultats nettement moins bons que les deux autres krigeages, ce qui n'est pas surprenant vu que le variogramme de la cote piézométrique n'est pas stationnaire. On peut également noter qu'avec seulement 25% des points, le krigeage avec dérive de degré 2 conduit à des erreurs en moyenne quasi nulles et d'écart-type de 3 m. Il est donc probable que l'on pourrait réduire sensiblement le nombre de points de mesures en amont sans perdre beaucoup de précision sur la carte interpolée.

En ce qui concerne l'aval (Figure 41), la situation est beaucoup plus nuancée. Même si c'est encore la méthode « inverse distance » qui donne les moins bons résultats, les performances des 3 méthodes sont relativement comparables, avec un léger avantage pour le krigeage linéaire. Les écart-types d'erreur obtenus sont quasiment le double de ceux calculés pour la partie amont. Ceci montre que l'aquifère aval présente un comportement relativement complexe et difficilement « interpolable » avec précision, ceci quelle que soit l'approche retenue. Contrairement à la partie amont, il faudrait donc certainement plus de données pour aboutir à une bonne connaissance et à une erreur d'interpolation minimale.

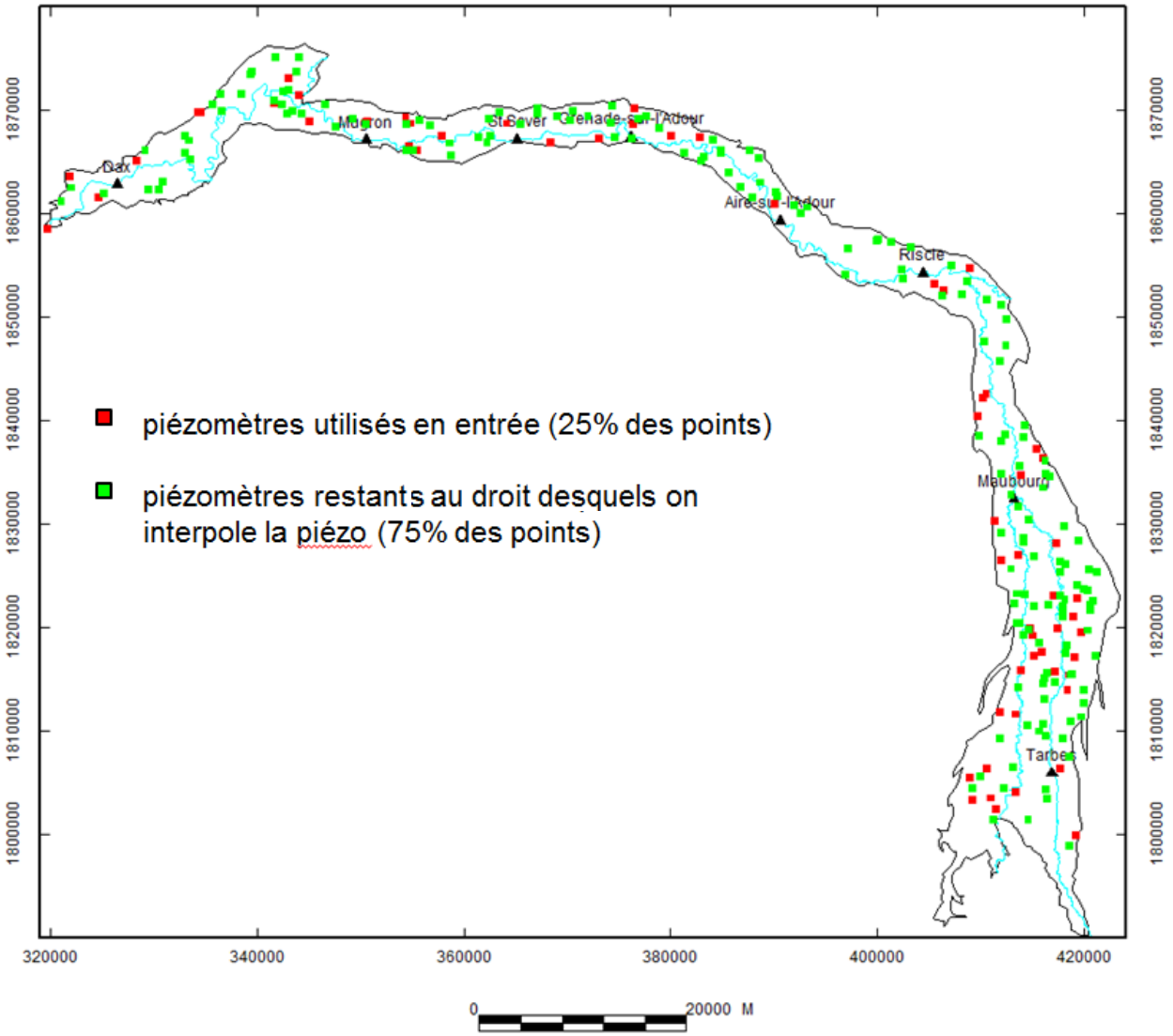


Figure 39 : Division du jeu de données en deux parties : données utilisées et données de validation

Méthode	Erreur mini	Erreur maxi	Erreur moyenne (*)	Ecart-type erreur
Krigeage avec dérive de degré 2 et modèle de variogramme	-17 m	11 m	**0.14 m**	**3.3 m**
Krigeage linéaire « par défaut »	-14 m	27 m	1.9 m	5.3 m
Inverse distance au carré	-34 m	52 m	**3.8 m**	**12.5 m**

(*) 38 points sont utilisés pour en recalculer 97 autres. Les statistiques sont calculées sur les 97 points recalculés

Figure 40 : Comparaison des performances des interpolations, données amont

Méthode	Erreur mini	Erreur maxi	Erreur moyenne	Ecart-type erreur
Krigeage avec dérive de degré 1 et modèle de variogramme	-23 m	13 m	-1.2 m	6.1 m
Krigeage linéaire « par défaut »	-22 m	14 m	-0.8 m	5.6 m
Inverse distance au carré	-21 m	17 m	**-1.6 m**	**6.6 m**

(*) 25 points sont utilisés pour en recalculer 75 autres. Les statistiques sont calculées sur ces 75 points

Figure 41 : Comparaison des performances des interpolations, données aval

4.6. NAPPE DE L'ADOUR, CONCLUSION

Les travaux menés sur la nappe alluviale de l'Adour ont montré que cette nappe présentait un comportement différent de l'amont vers l'aval:

- à l'amont un comportement fortement non stationnaire, mais l'évolution de la côte piézométrique est assez régulière et modélisable de façon relativement performante par un krigeage avec dérive dépendant des coordonnées (dérive de degré 2). Il serait probablement possible de réduire la densité de mesure sans perte significative de précision ;
- à l'aval le comportement est également non stationnaire, mais la surface piézométrique est nettement plus complexe notamment dans ses variations à échelle locale. La modélisation géostatistique est possible mais donne des résultats comparativement moins bons qu'en amont. Une analyse plus fine du comportement de la nappe et l'introduction de contraintes hydrogéologiques serait sans doute nécessaire pour mieux la modéliser d'un point de vue géostatistique (introduction de directions préférentielles locales par exemple).

Du fait de cette différence de comportement, il apparait intéressant, dans l'optique de la réalisation de futures cartes, de privilégier la partie aval, plus complexe par rapport à la partie amont en maximisant le nombre de mesures à l'aval.

Vis-à-vis de la méthode à employer, il apparait de façon générale que la méthode d'interpolation par « inverse distance » est a priori à éviter pour ce type d'aquifère. Enfin, le krigeage linéaire, qui est le krigeage « par défaut » proposé par de nombreux logiciels, représente par contre un compromis acceptable, même s'il n'est pas toujours optimal. Si on l'utilise, il est toutefois recommandé de mettre en œuvre une estimation préalable des erreurs auxquelles il va conduire, en divisant le jeu de données en deux comme dans l'exemple proposé précédemment. Ceci nécessite cependant de disposer d'un nombre suffisant de données.

5. Conclusion

Cette quatrième année d'étude (année 5 de la convention régionale) a permis de finaliser l'inventaire des cartes piézométriques dressées en Région Aquitaine. Au total 276 cartes ont été recensées sur 8 nappes différentes. Sur cet ensemble, 215 sont maintenant disponibles sous SIG au format .shp (Arc Gis). Dans l'optique de rendre cette cartothèque accessible au plus grand nombre, une sélection des 39 cartes les plus représentatives ont été mises en ligne sur l'espace cartographique du SIGES Aquitaine (http://sigesaqi.brgm.fr/). Elles sont également téléchargeables au format .shp via la page GéoSource associée à chaque carte piézométrique. Par ailleurs, 179 cartes sont maintenant disponibles au format image sur le SIGES via sa photothèque (outil permettant d'accéder facilement à des photos, cartes ou illustrations à l'aide d'outils de visualisation, recherche et de téléchargement) à l'URL suivante : http://sigesaqi.brgm.fr/?page=ePhoto.

Dans un second temps, les méthodes développées dans le cadre des deux premières années de ce module (années 2 et 3 de la convention régionale) ont été utilisées pour réaliser un travail méthodologique sur la nappe de l'Adour à partir des données recueillies par le Burgéap (Burgéap, 2004).

L'analyse des mesures issues de la campagne piézométrique réalisée en hautes eaux 2004 sur la nappe de l'Adour a mis en évidence un comportement différent de l'amont vers l'aval.

Dans la partie amont, le comportement est fortement non stationnaire, mais la piézométrie évolue de manière régulière de l'amont vers l'aval. La cote piézométrique peut donc être retranscrite de façon relativement performante par un krigeage avec dérive dépendant des coordonnées (dérive de degré 2). Sur cette partie du réservoir, il serait probablement possible de réduire la densité de mesure sans perte significative de précision.

Dans la partie aval, comme à l'amont, le comportement n'est pas stationnaire, mais la surface piézométrique présente une plus grande complexité avec des variations importantes à échelle locale. La modélisation géostatistique est possible mais donne des résultats comparativement moins bons qu'en amont. Une analyse plus fine du comportement de la nappe et l'introduction de points de mesures complémentaires serait sans doute nécessaire pour améliorer la fiabilité de la carte tracée. Par ailleurs, l'introduction de directions préférentielles locales pourrait permettre de mieux modéliser la distribution des isopièzes d'un point de vue géostatistique.

De façon plus globale, il est ressorti des analyses réalisées que la méthode d'interpolation par inverse distance était a priori à éviter pour ce type d'aquifère.

A contrario, le krigeage linéaire, qui est le krigeage « par défaut » proposé par de nombreux logiciels, constitue un compromis acceptable, même s'il n'est pas toujours optimal. Cependant, son utilisation nécessite au préalable une estimation des erreurs auxquelles il va conduire par la mise en œuvre d'une validation sur un ensemble restreint de l'échantillon (cf. chapitre 4.5).

L'inventaire des cartes sur la région étant relativement exhaustif et les approches méthodologiques ayant concerné les différents types de nappes présentes dans la région (libres, captives, alluviales,…), ce programme ne sera pas renouvelé dans le cadre de la future convention régionale. Cependant dans le cadre la convention pluriannuelle « Gestion des Eaux souterraines en Région Aquitaine » 2015-2020 et du module sur la valorisation des eaux souterraines, de nouvelles cartes pourront venir compléter la cartothèque existante.

Par ailleurs, de nouvelles cartes piézométriques de référence pourront être dressées en appliquant les méthodes géostatistiques testées et développées au cours des deux premières années de ce module (années 2 et 3 de la convention régionale 2008-2013).

6. Bibliographie

Bellegarde R. (1975) - Nappe des sables éocènes en Gironde (situation en 1975) - Rapport BRGM 75 SGN 293 AQI, 14 p., 11 fig., 4 pl.

Bernard D., Both J., Fragonard E., Abrivard J.-L., Guérin Ph., Famechon C. (1982) - Ressources en granulats dans la vallée de l'Adour dans le département des Landes.

Bourgine B. (2012) - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine -Piézométrie des systèmes aquifères : outils de cartographie et optimisation de réseaux de surveillance – Année 2. BRGM/RP-60153-FR, 85 p., 39 fig., 6 tab., 1 ann.

Bourgine B., Pédron N. (2013) - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Piézométrie des systèmes aquifères : outils de cartographie et optimisation de réseaux de surveillance – Module 2 - Année 3. Rapport final. BRGM/RP-62346-FR, 47 p., 28 fig., 1 ann.

Burgéap (2004) - Nappe d'accompagnement de l'Adour - Phase 1 : Etat des lieux des connaissances et inventaire des points d'accès à la nappe - Du piémont jusqu'au confluent avec les Gaves Réunis. Rapport de la phase 1 pour l'Institution Adour, 67 p.

Capdeville J.P. (1990) - Carte géol. France (1/50 000), feuille de Mont-de-Marsan (951) - Bureau de recherches géologiques et minières. Notice explicative par Capdeville J.P. (1990), 41 p.

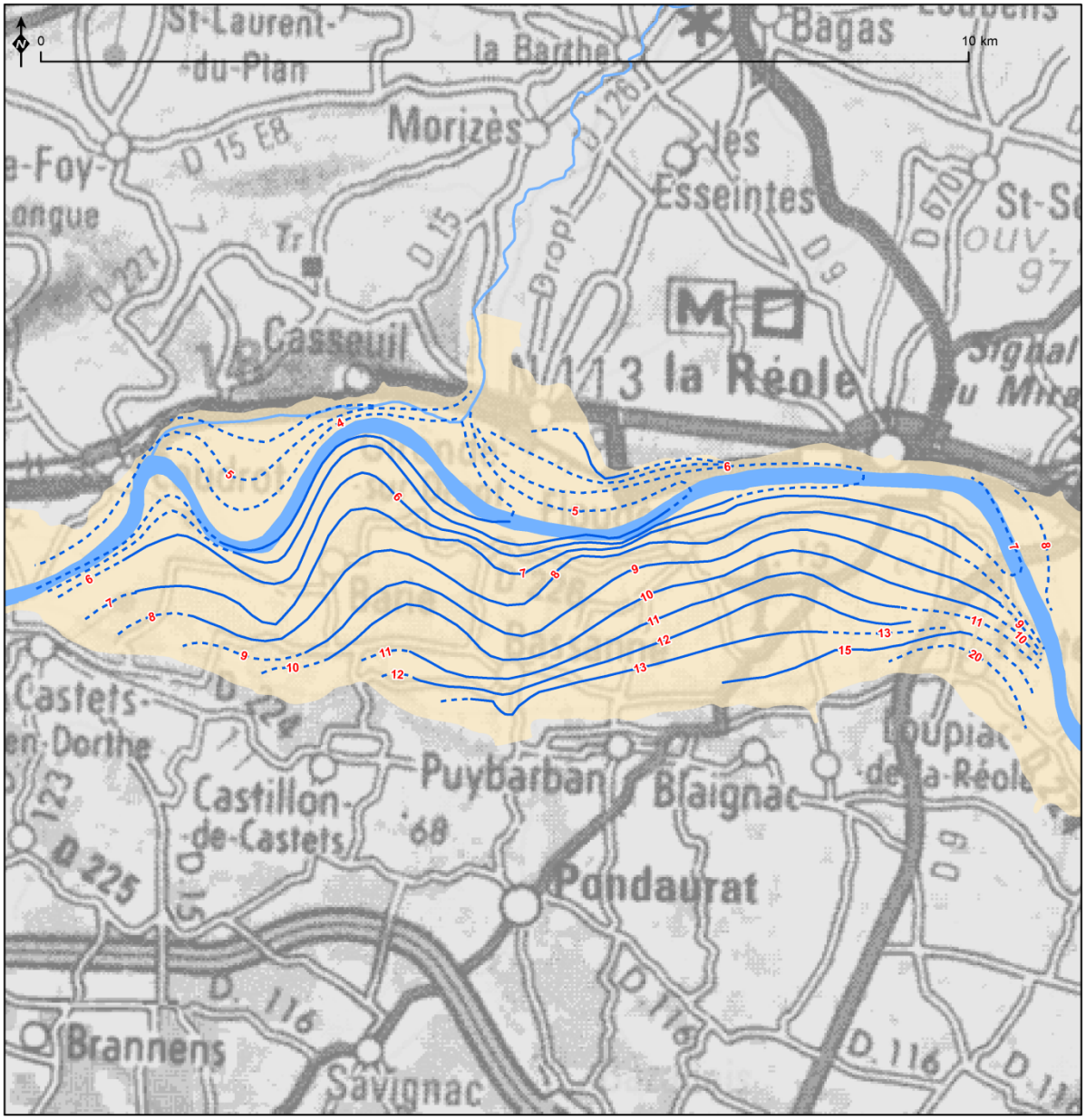
Saltel M., Bourgine B. (2015) - Piézométrie des systèmes aquifères : outils de cartographie et optimisation de réseaux de surveillance – Module 2 - Année 4 - Convention 2008-2013. Rapport final. BRGM/RP-63575-FR, 44 p., 35 fig., 4 ann.

Annexe 1

Exemples de cartes piézométriques uniformisées

CARTE PIÉZOMÉTRIQUE

Alluvions de la Garonne
Année : 1969



Codes géologiques :
MESO : 5062
LISA : 900XXXX
BDRHF V1 : 345b

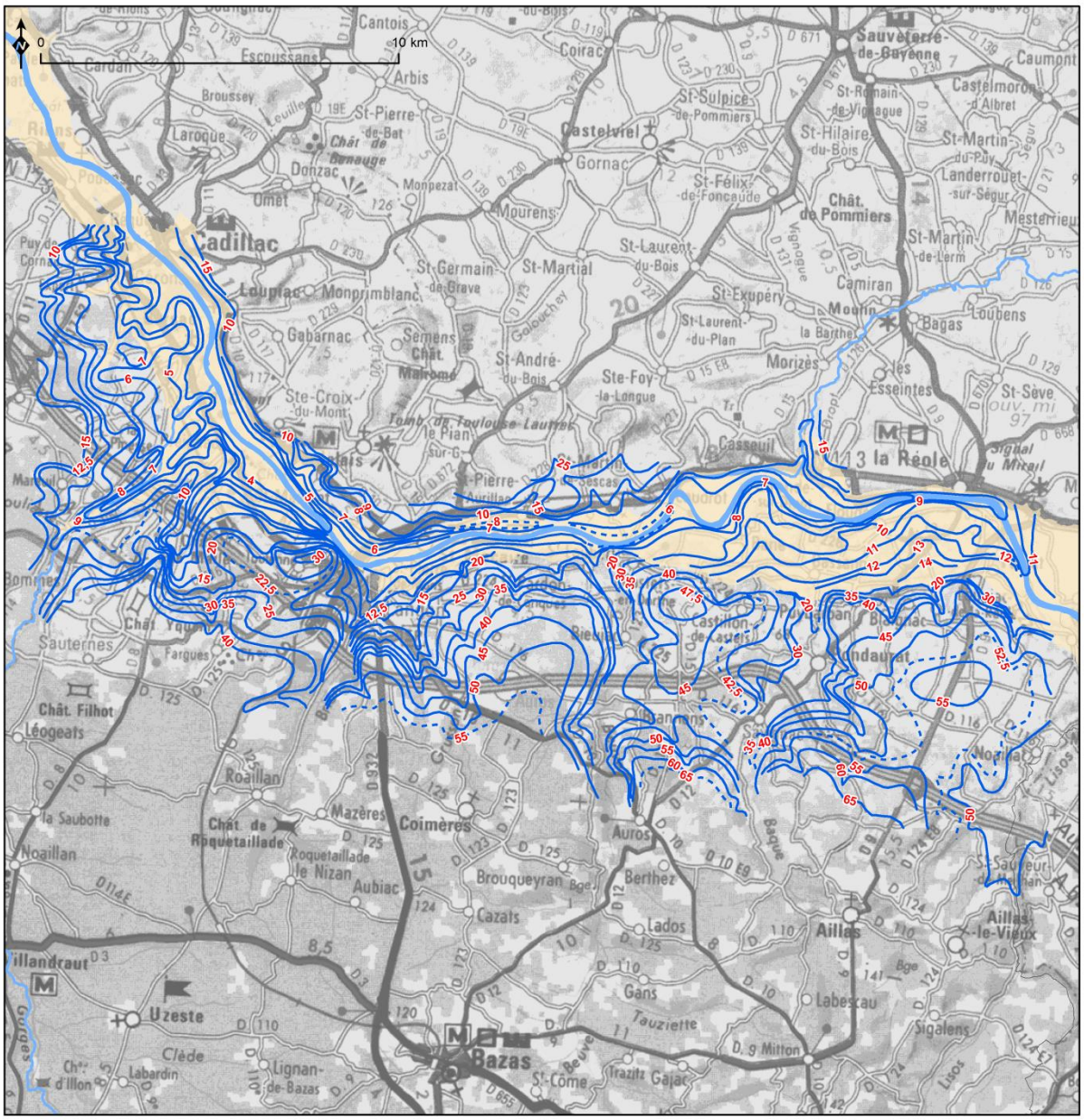
Type
Courbe piézométrique incertaine (m NGF)
Courbe piézométrique (m NGF)

Nappe alluviale

Astié H. et Chamayou J. (1972) Étude hydrogéologieu des alluvions de la Garonne entre la Réole et podensac (Gironde) - 72 SGN 081 AQI

CARTE PIÉZOMÉTRIQUE

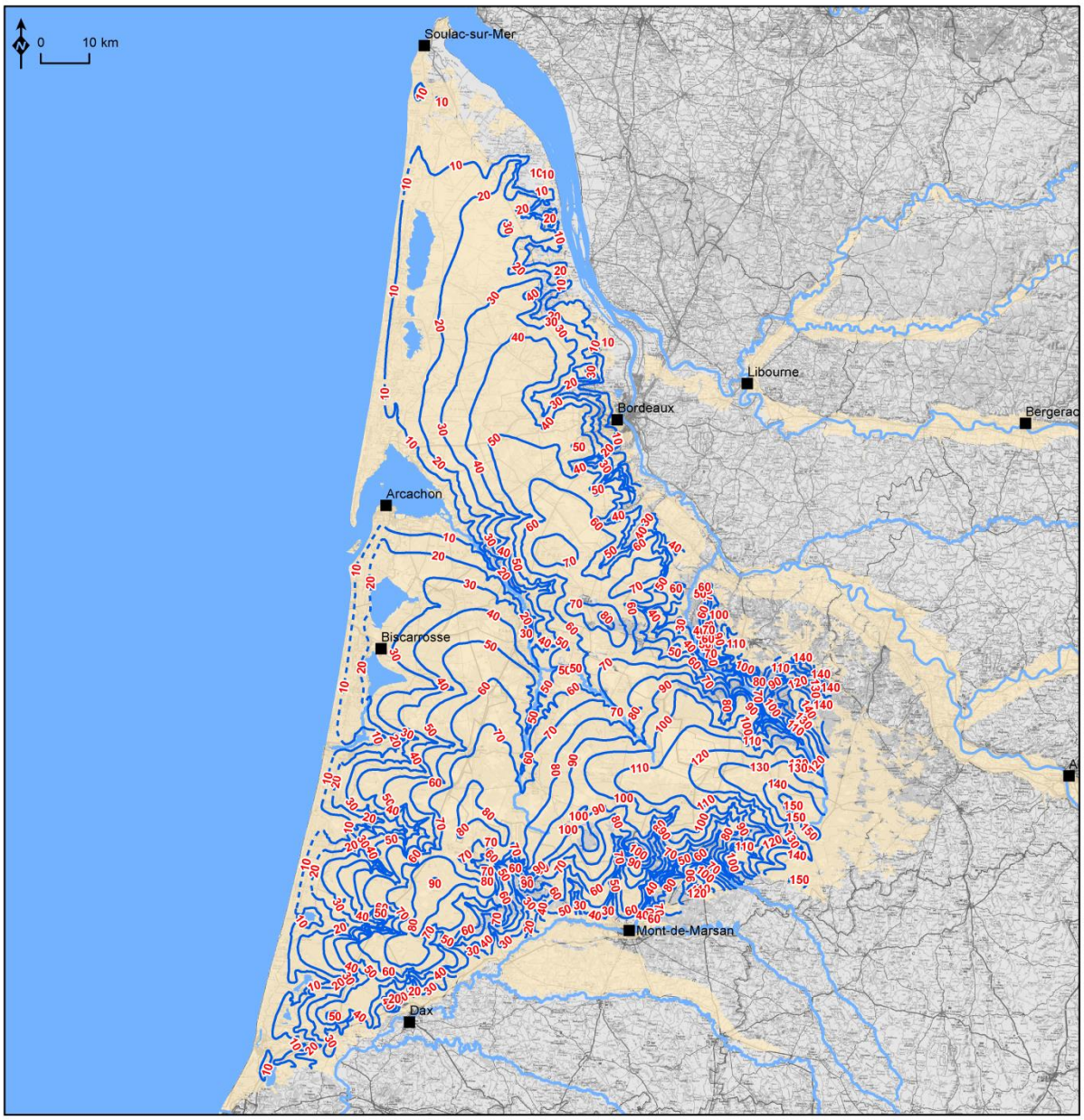
Alluvions de la Garonne
Année : HE 1970



Astié H. et Chamayou J. (1970) Étude hydrogéologieu des alluvions de la Garonne entre la Réole et podensac (Gironde)
Première partie - 70 SGN 309 AQI

CARTE PIÉZOMÉTRIQUE

Plio-Quaternaire , Bassin aquitain
Année : 1985



Codes géologiques :
MESO : 5045/5046/5047
LISA : 306/308/312
BDRHF V1 : 127A0

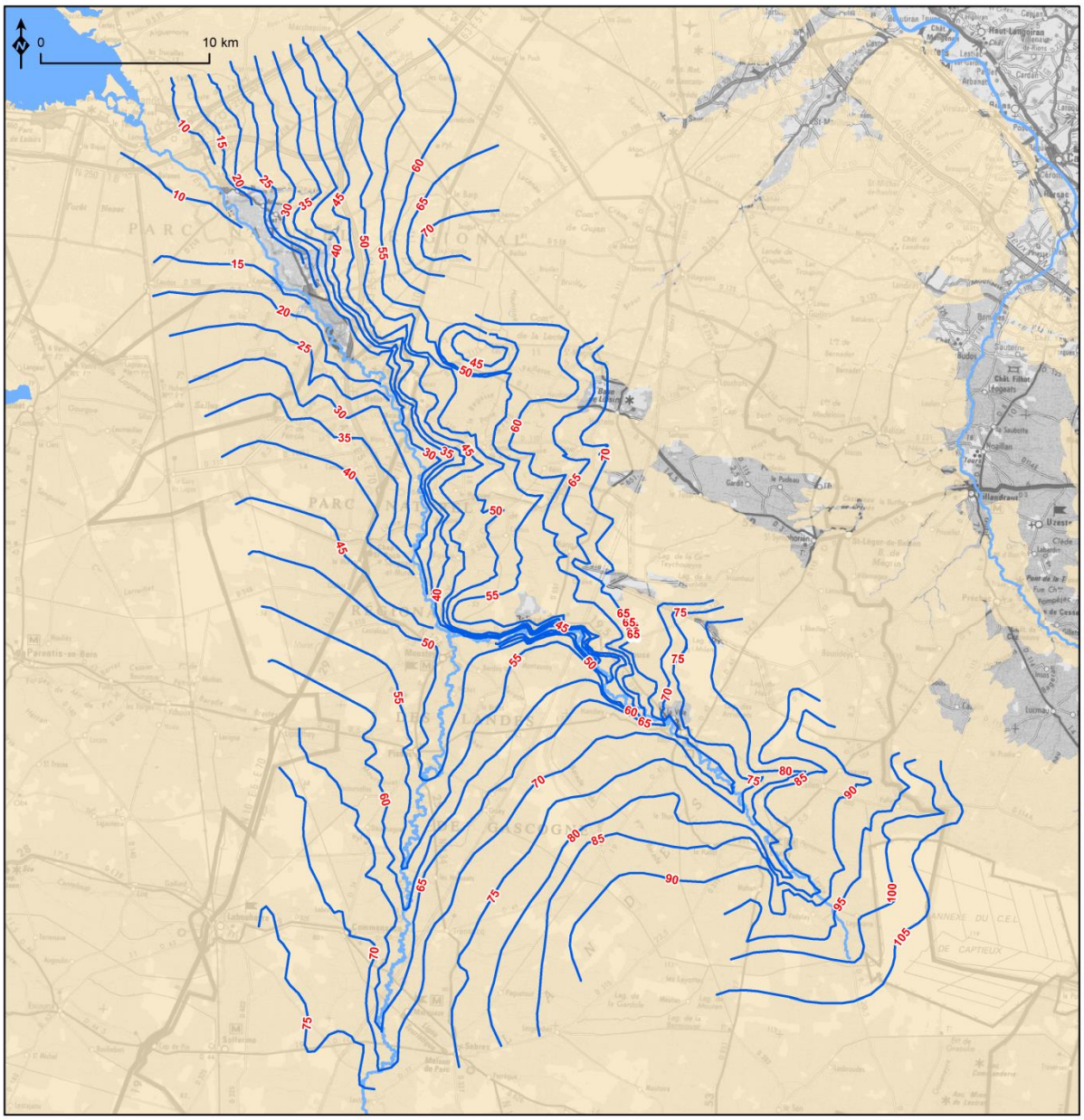
Type
Courbe piézométrique incertaine (m NGF)
Courbe piézométrique (m NGF)

Affleurement du Plio-Quaternaire

Centre D'Hydrogéologie De Bordeaux. (1985) Carte piézométrique de la nappe phréatique des Landes - Etiage 1985

CARTE PIÉZOMÉTRIQUE

Plio-Quaternaire , Bassin de Leyre
Année : Crue 1961



Codes géologiques :
MESO : 5045
LISA : 308AC
BDRHF V1 : 127A0

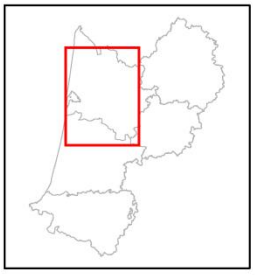
Type
Courbe piézométrique incertaine (m NGF)
Courbe piézométrique (m NGF)

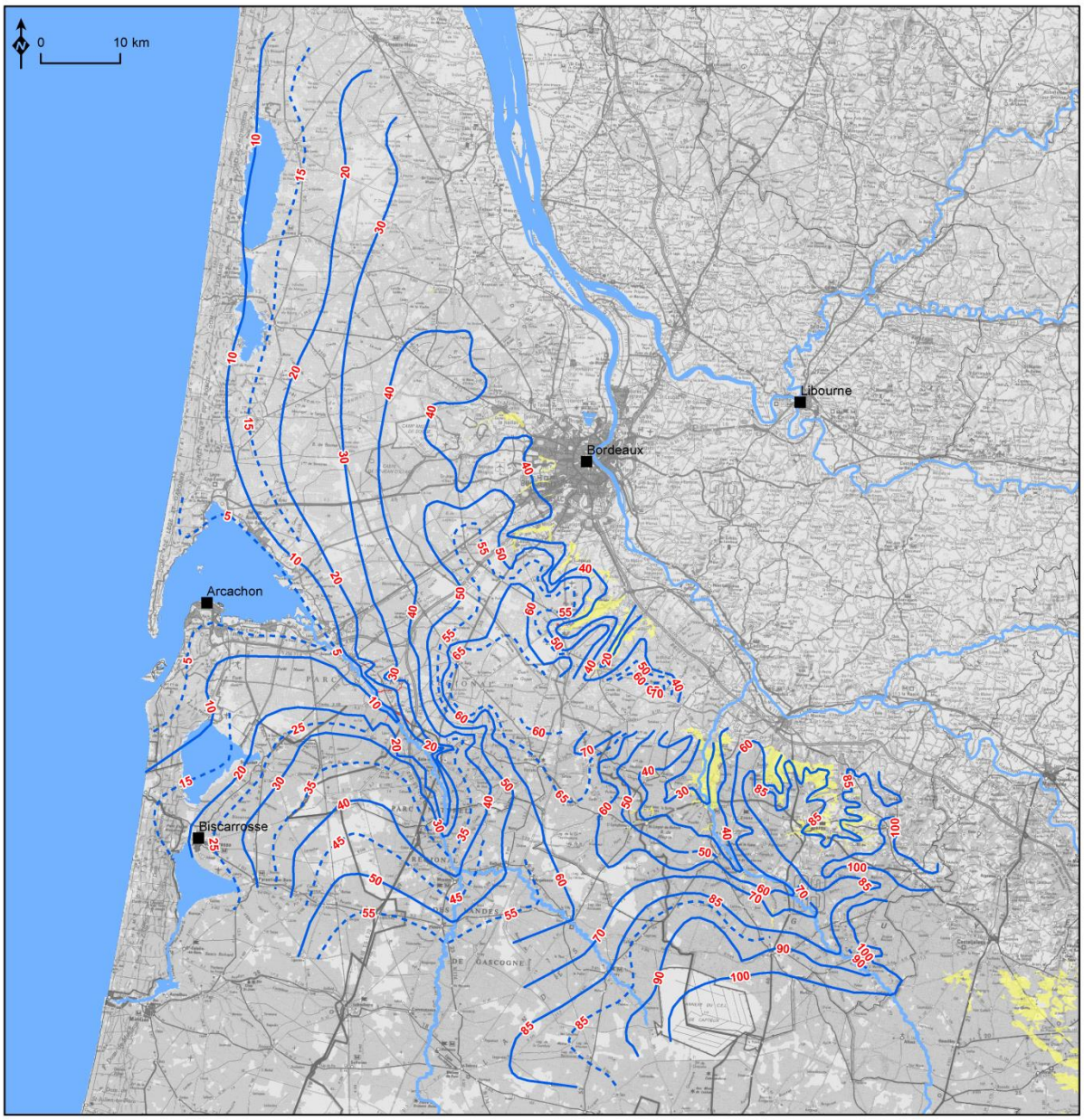
Affleurement du Plio-Quaternaire

d'après le centre d'Hydrogéologie_Géochimie de la faculté des Sciences de Bordeaux - Etude hydrogéologique du bassin de l'Eyre (1961)

CARTE PIÉZOMÉTRIQUE

Miocène , Département de la Gironde
Année : 1960-1973





Codes géologiques :
MESO : 5070/5103/5084/5104
LISA : 316/320
BDRHF V1 : 235

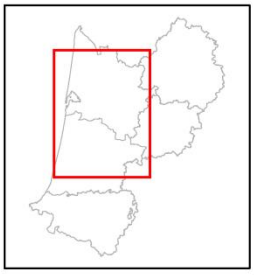
Type
Courbe piézométrique incertaine (m NGF)
Courbe piézométrique (m NGF)

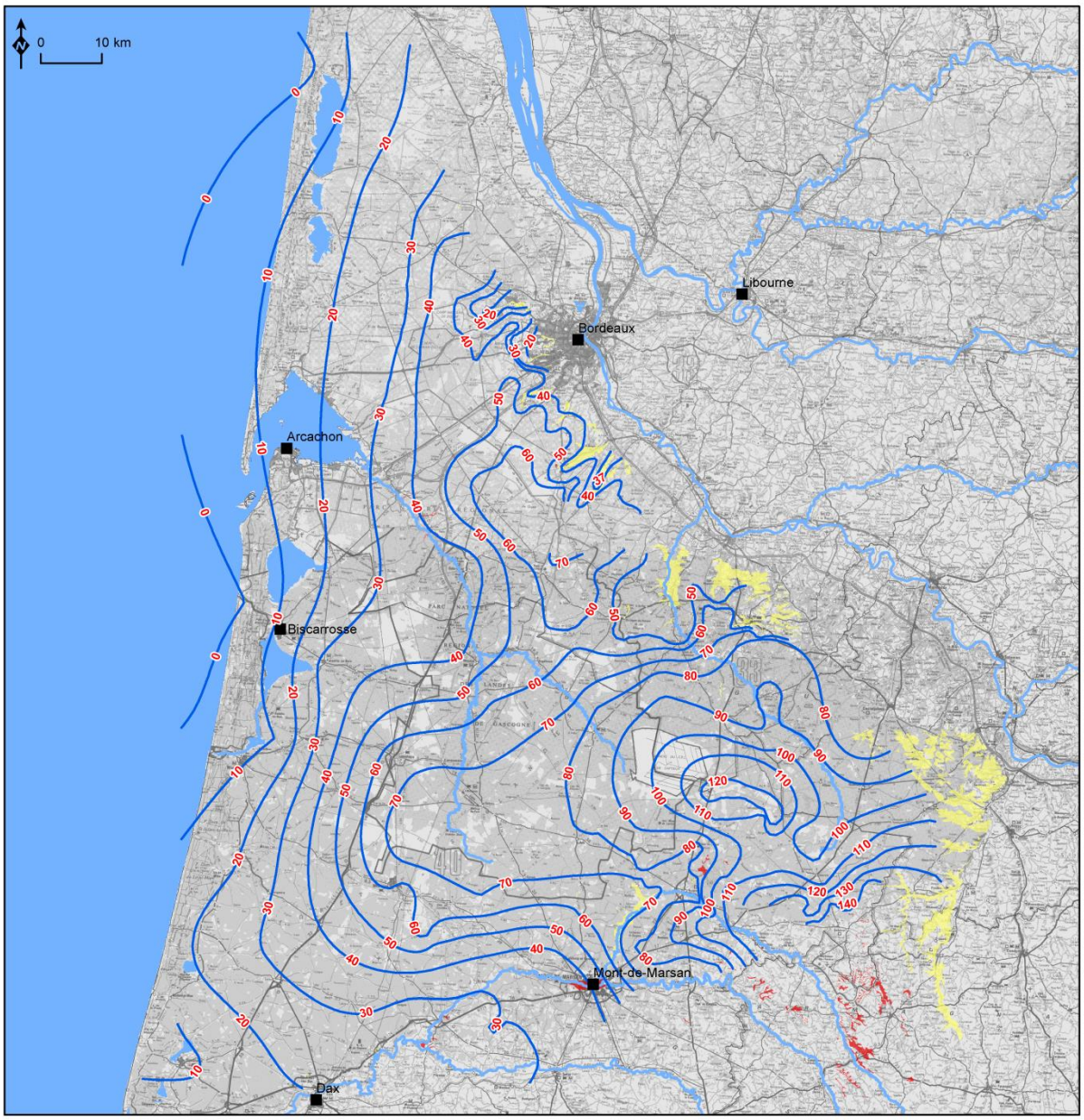
Affleurement de l'Aquitanien
Affleurement de l'Helvétien

Astié H. et Chamayou J. (1977) - Les eaux souterraines en Gironde - Ouvrage BRGM 77 SGN 104

CARTE PIÉZOMÉTRIQUE

Aquitanien , Bassin aquitain
Année : 1998-1999





Codes géologiques :
MESO : 5070/5103
LISA : 320AA01
BDRHF V1 : 235

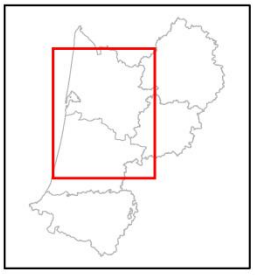
Type
Courbe piézométrique incertaine (m NGF)
Courbe piézométrique (m NGF)

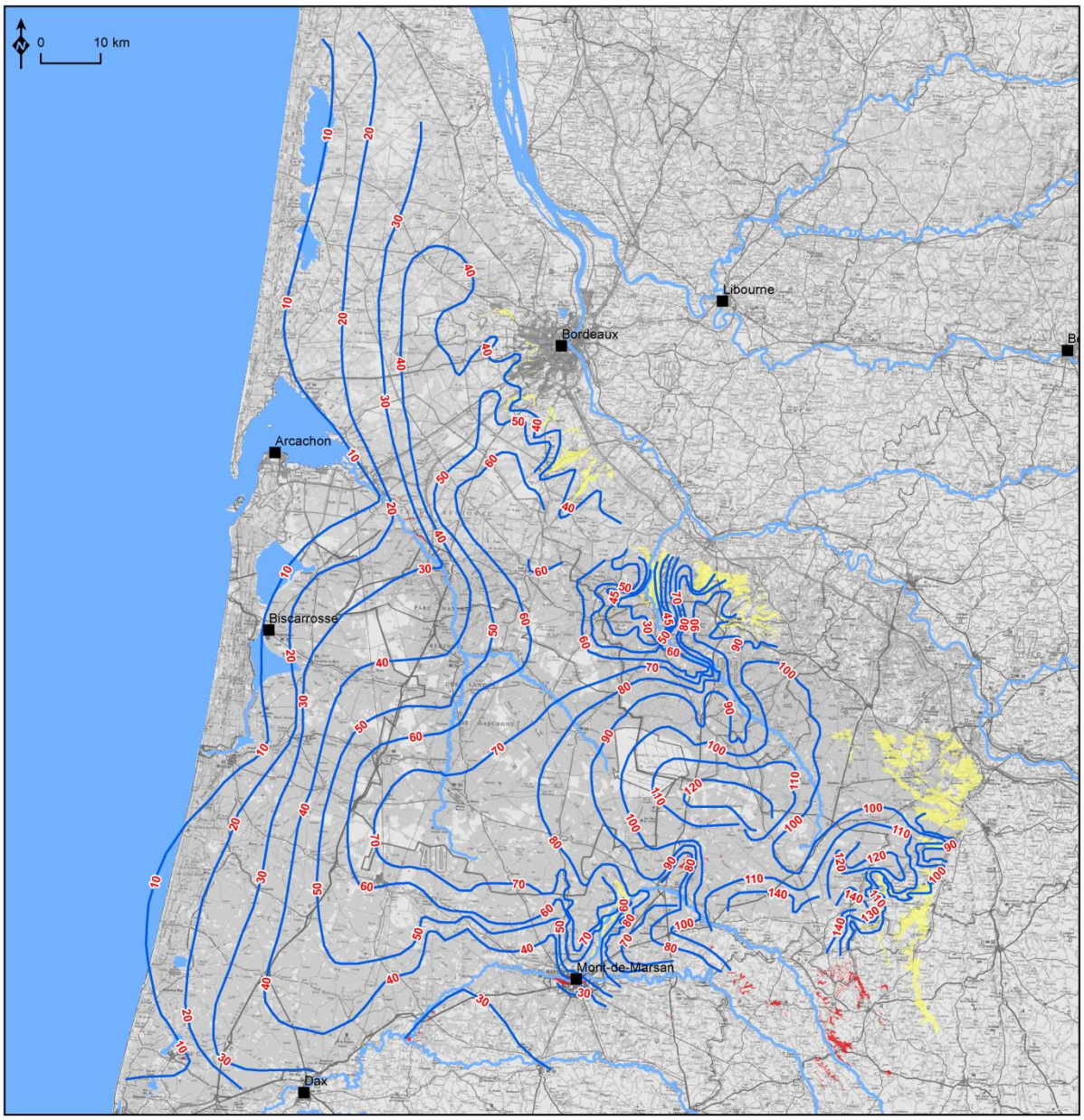
Affleurement de l'Aquitanien
Affleurement de l'Helvétien

Bichot, F., Louis, J.P., Astruc, J.G., Dufour, P. et Platel, J.P. (1999) - Gestion des eaux souterraines en Aquitaine - Année 3 - Evaluation des ressources - Modélisation des aquifères du Miocène, receuil et synthèse de données - Rapport BRGM R 40728

CARTE PIÉZOMÉTRIQUE

Aquitanien , Bassin aquitain
Année : 1998-2000





Codes géologiques :
MESO : 5070/5103
LISA : 320AA01
BDRHF V1 : 235

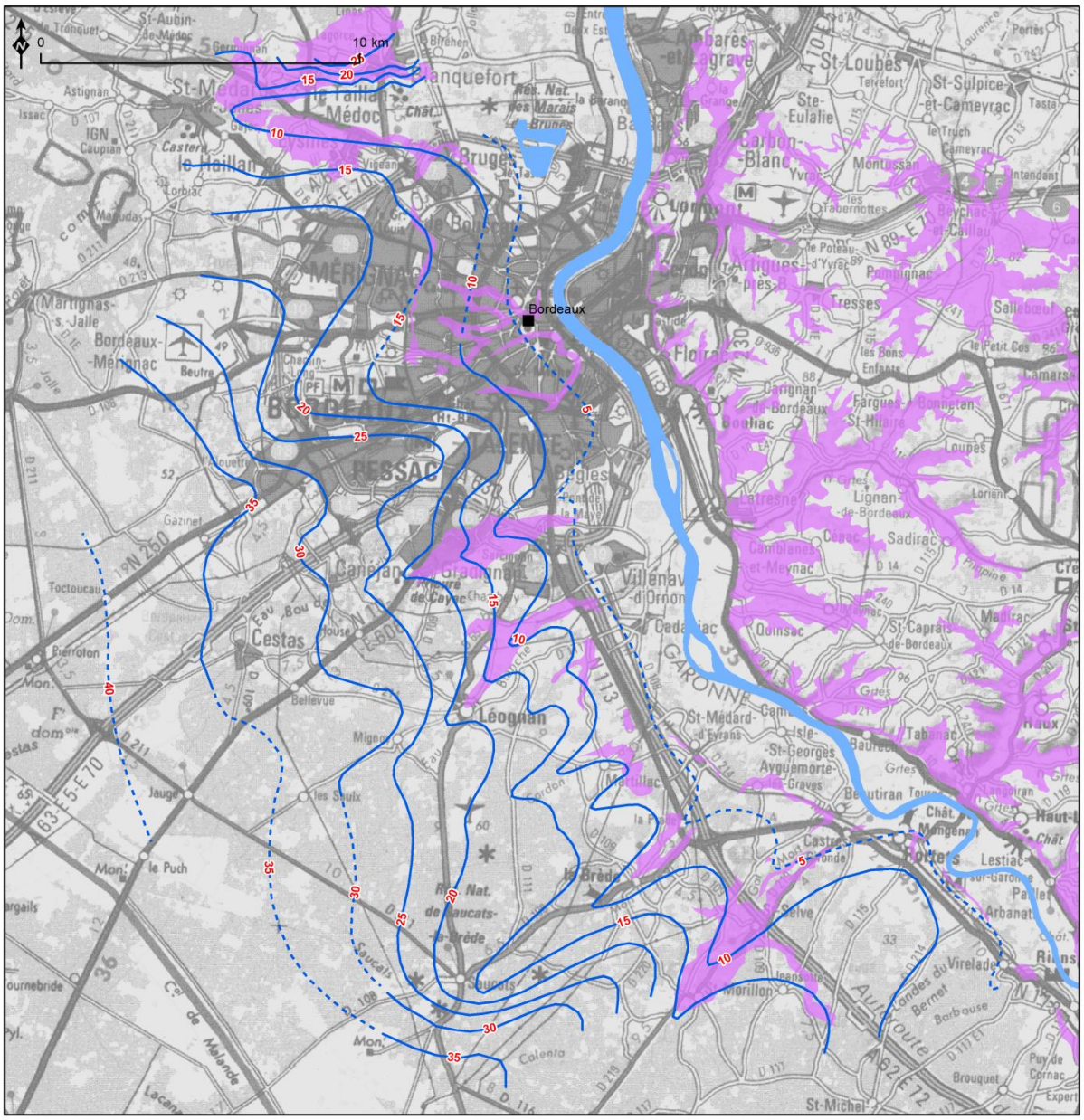
Type
Courbe piézométrique incertaine (m NGF)
Courbe piézométrique (m NGF)

Affleurement de l'Aquitanien
Affleurement de l'Helvétien

Pedron N., Seguin J.J. et Bichot F. (2001) - Gestion des eaux souterraines en Aquitaine - Année 5 - Evaluation des ressources - Rapport BRGM RP 51176 FR

CARTE PIÉZOMÉTRIQUE

Oligocène , Zone Bordelaise
Année : 1978



Codes géologiques :
MESO : 5083
LISA : 324AA01
BDRHF V1 : 230

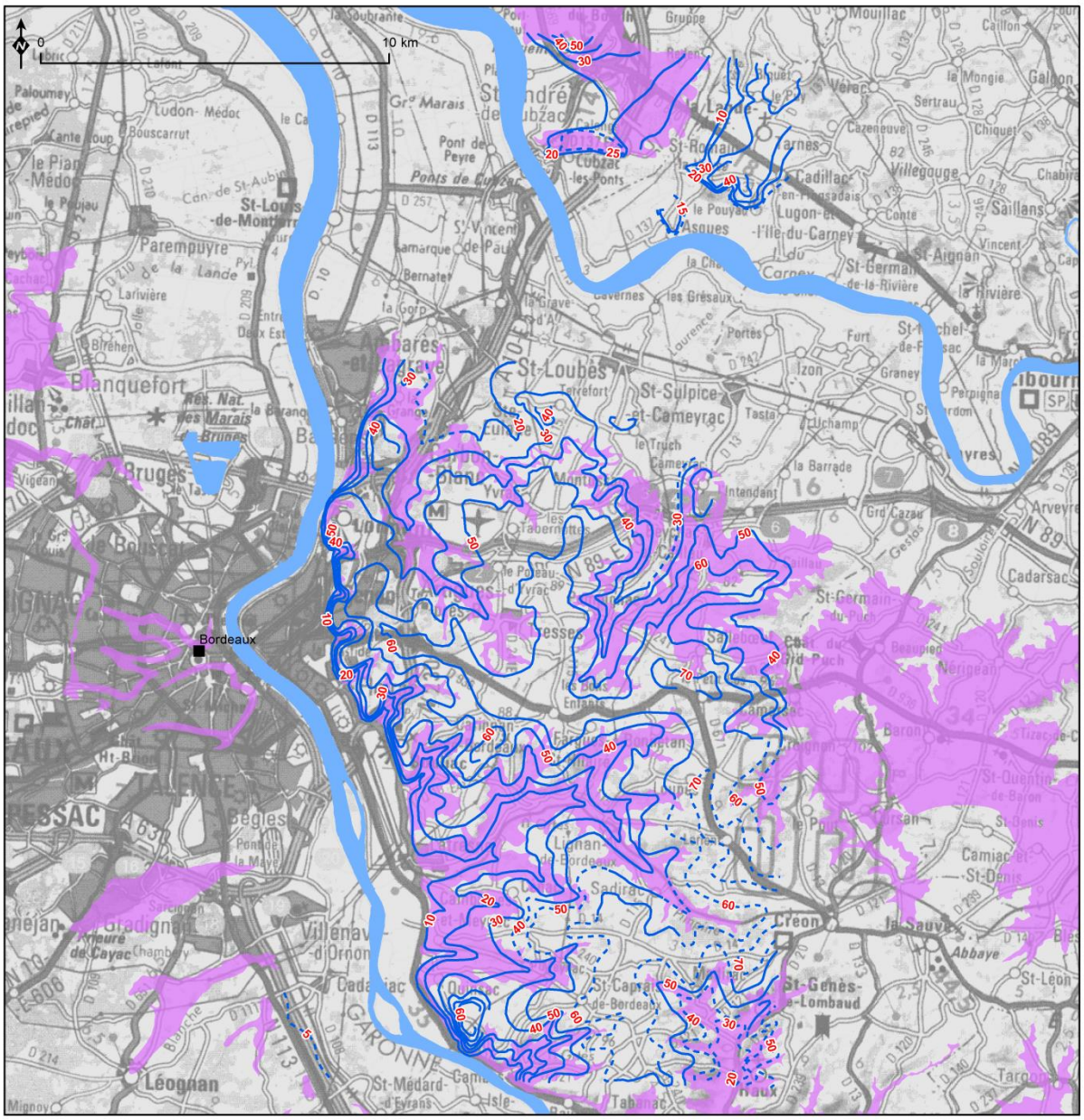
Type
Courbe piézométrique incertaine (m NGF)
Courbe piézométrique (m NGF)

Affleurement de l'Oligocène

Auriol J. et Bellegard R. (1979) - Gestion des nappes en Aquitaine - Compte rendu annuel de surveillance 1978 - Nappes des sables éocènes en Gironde et des calcaires oligocènes dans le bordelais - Rapport BRGM 79 SGN 056 AQI

CARTE PIÉZOMÉTRIQUE

Oligocène , Entre-Deux-Mers
Année : 1966



Codes géologiques :
MESO : 5041/5068
LISA : 324AA03
BDRHF V1 : 126

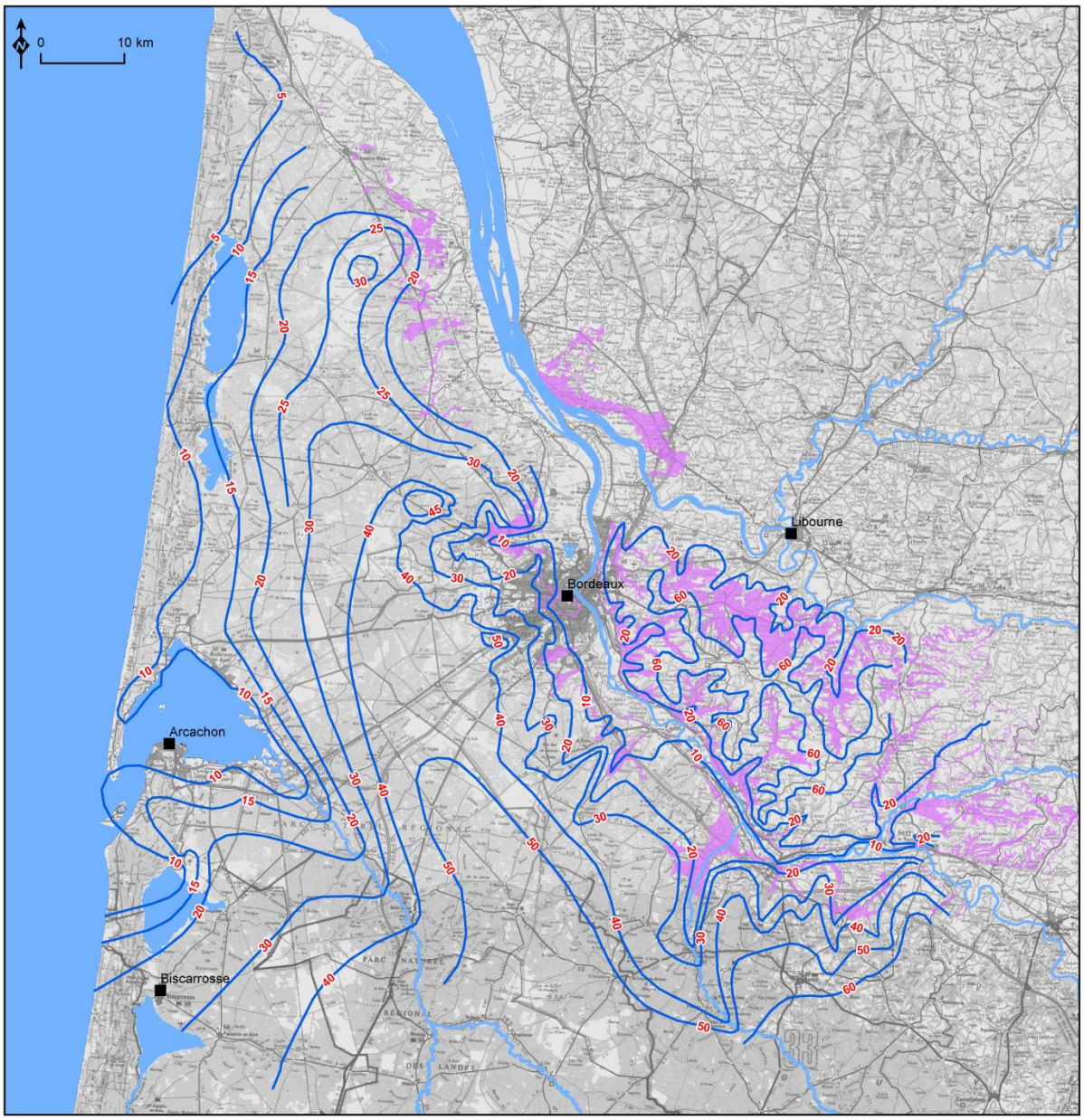
Type
Courbe piézométrique incertaine (m NGF)
Courbe piézométrique (m NGF)

Affleurement de l'Oligocène

Astié H., Bellegarde R., Bourgeois M. et Pratviel L. (1968) - Synthèse des connaissances hydrogéologiques - Feuille topographique au 1/25 000 de Bordeaux (803) et Pessac (827) - Rapport BRGM 68 SGN 011 AQI

CARTE PIÉZOMÉTRIQUE

Oligocène , Département de la Gironde
Année : 1977



Codes géologiques :
MESO : 5041/5068/5083/5102
LISA : 324AA01
BDRHF V1 : 126/230

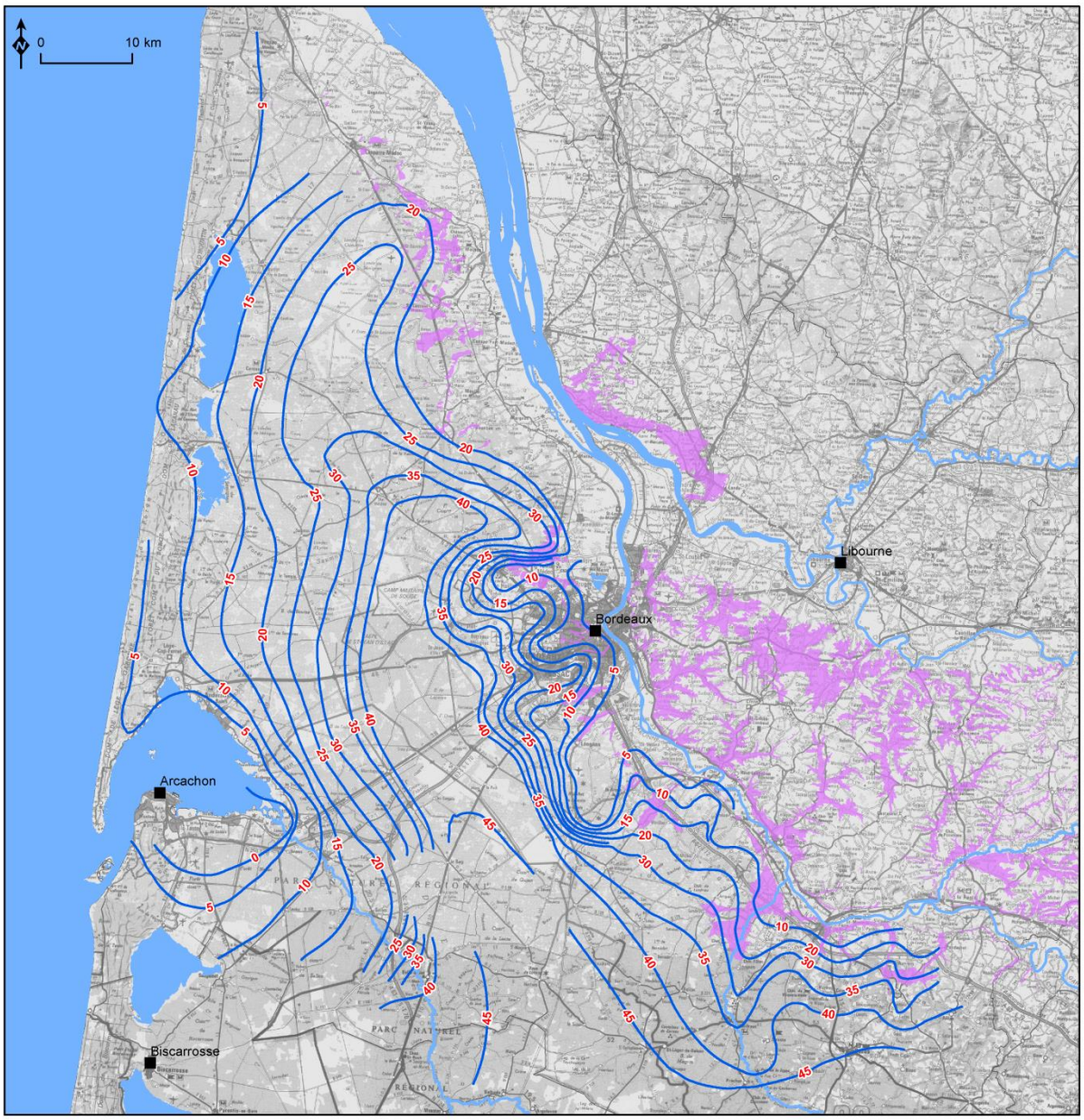
Type
Courbe piézométrique incertaine (m NGF)
Courbe piézométrique (m NGF)

Affleurement de l'Oligocène

Astié H. (1978) - Surveillance et gestion des nappes d'eau souterraines dans le département de la Gironde - Rapport BRGM 78 SGN 481 AQI

CARTE PIÉZOMÉTRIQUE

Oligocène , Département de la Gironde
Année : 1996



Codes géologiques :
MESO : 5083/5102
LISA : 324AA01
BDRHF V1 : 230

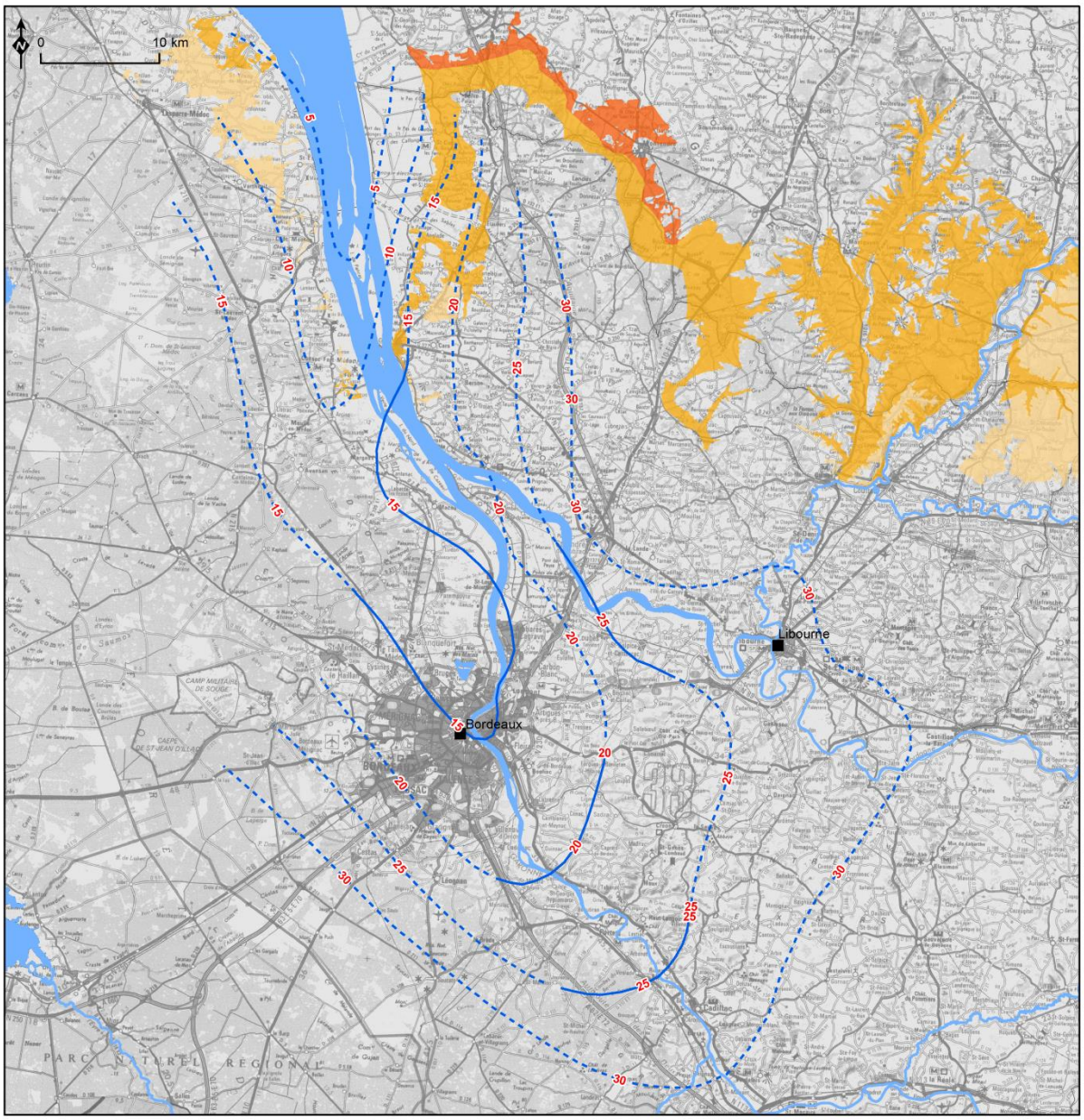
Type
Courbe piézométrique incertaine (m NGF)
Courbe piézométrique (m NGF)

Affleurement de l'Oligocène

Bonnery H., Mauroux B. et Sourisseau B. (1997) - Contrôle qualité et gestion des nappes d'eau souterraine en Gironde (état fin 1996) - Rapport BRGM RR 39683 FR

CARTE PIÉZOMÉTRIQUE

Eocène inf à moy
Année : 1870-1900



Codes géologiques :
MESO : 5071
LISA : 334AG02/334AG03
BDRHF V1 : 214

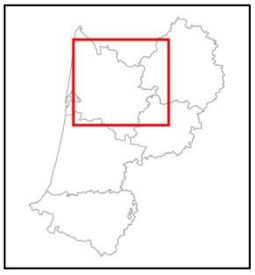
Type
- Courbe piézométrique incertaine (m NGF)
- Courbe piézométrique (m NGF)

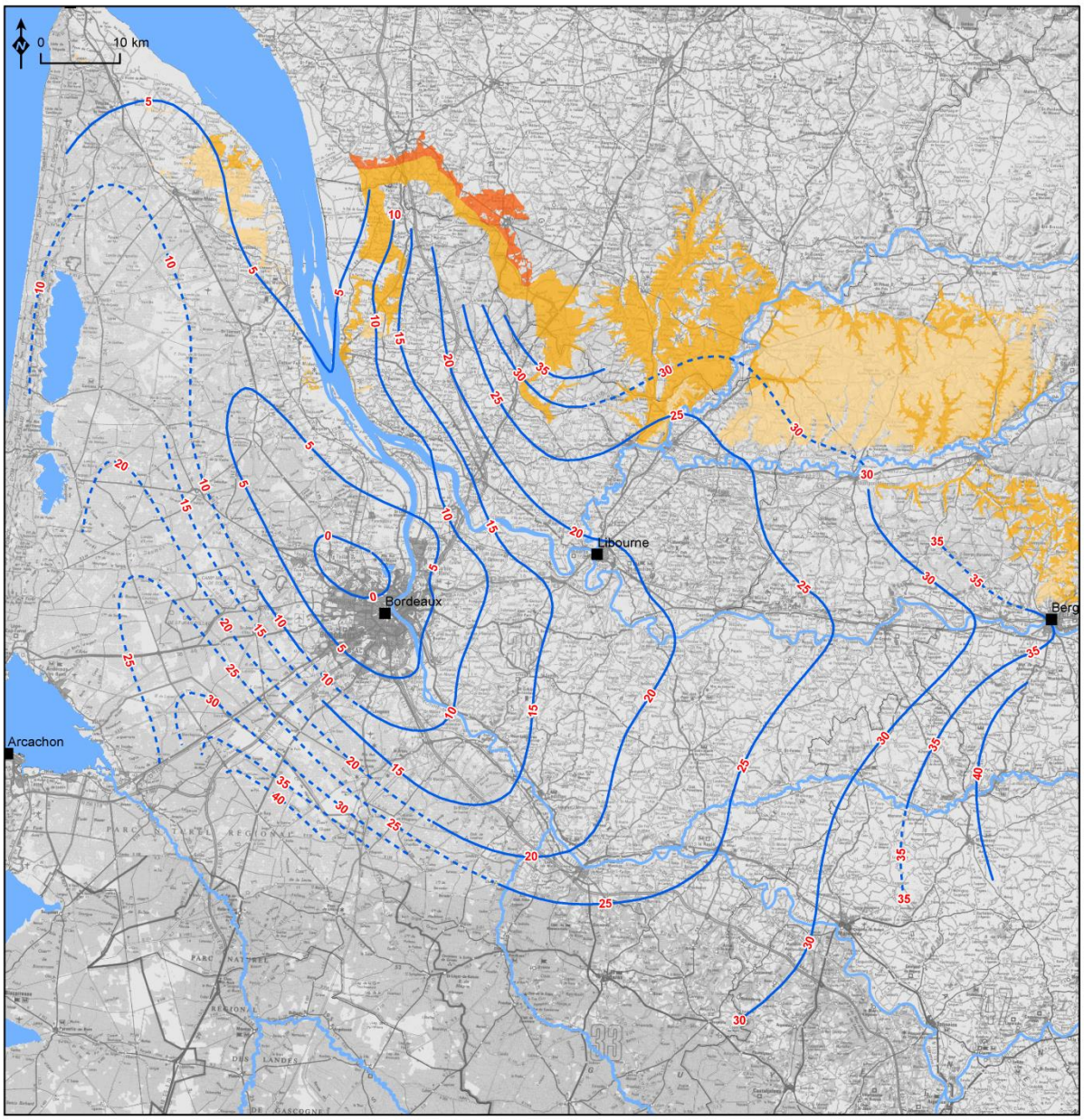
- Affleurement de l'Eocène inférieur
- Affleurement de l'Eocène moyen
- Affleurement de l'Eocène supérieur

Bellegarde R. (1969) - Historique de la piézométrie de la nappe des sables éocènes en Gironde - Rapport BRGM 69 SGN 144 AQI

CARTE PIÉZOMÉTRIQUE

Eocène inf à moy
Année : 1968-1969





Codes géologiques :
MESO : 5101/5071
LISA : 334AG02/334AG03
BDRHF V1 : 214

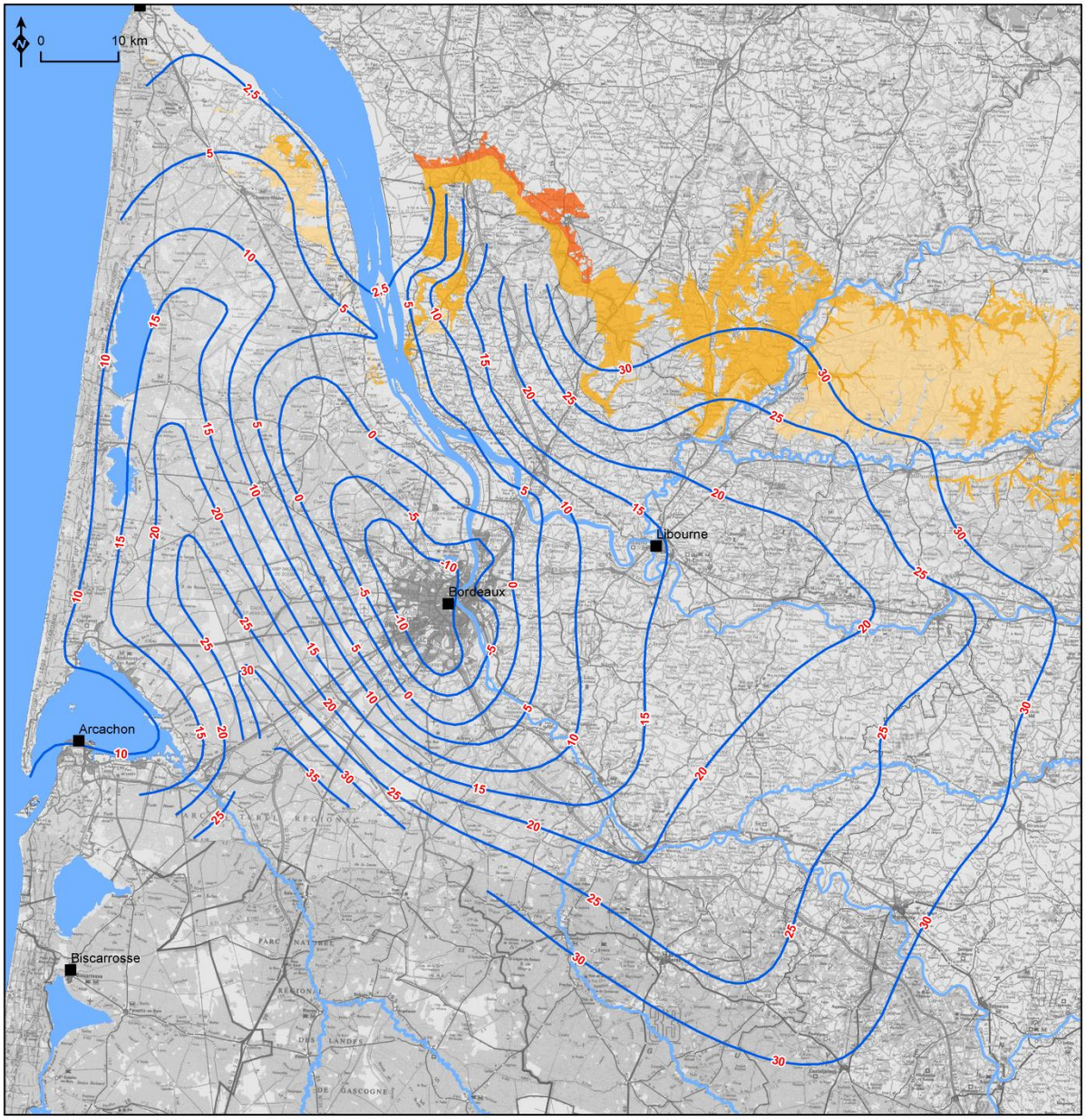
Type
Courbe piézométrique incertaine (m NGF)
Courbe piézométrique (m NGF)

Affleurement de l'Eocène inférieur
Affleurement de l'Eocène moyen
Affleurement de l'Eocène supérieur

Bellegarde R. (1969) - Historique de la piézométrie de la nappe des sables éocènes en Gironde - Rapport BRGM 69 SGN 144 AQI

CARTE PIÉZOMÉTRIQUE

Eocène inf à moy
Année : 1974



Codes géologiques :
MESO : 5101/5071
LISA : 334AG02/334AG03
BDRHF V1 : 214

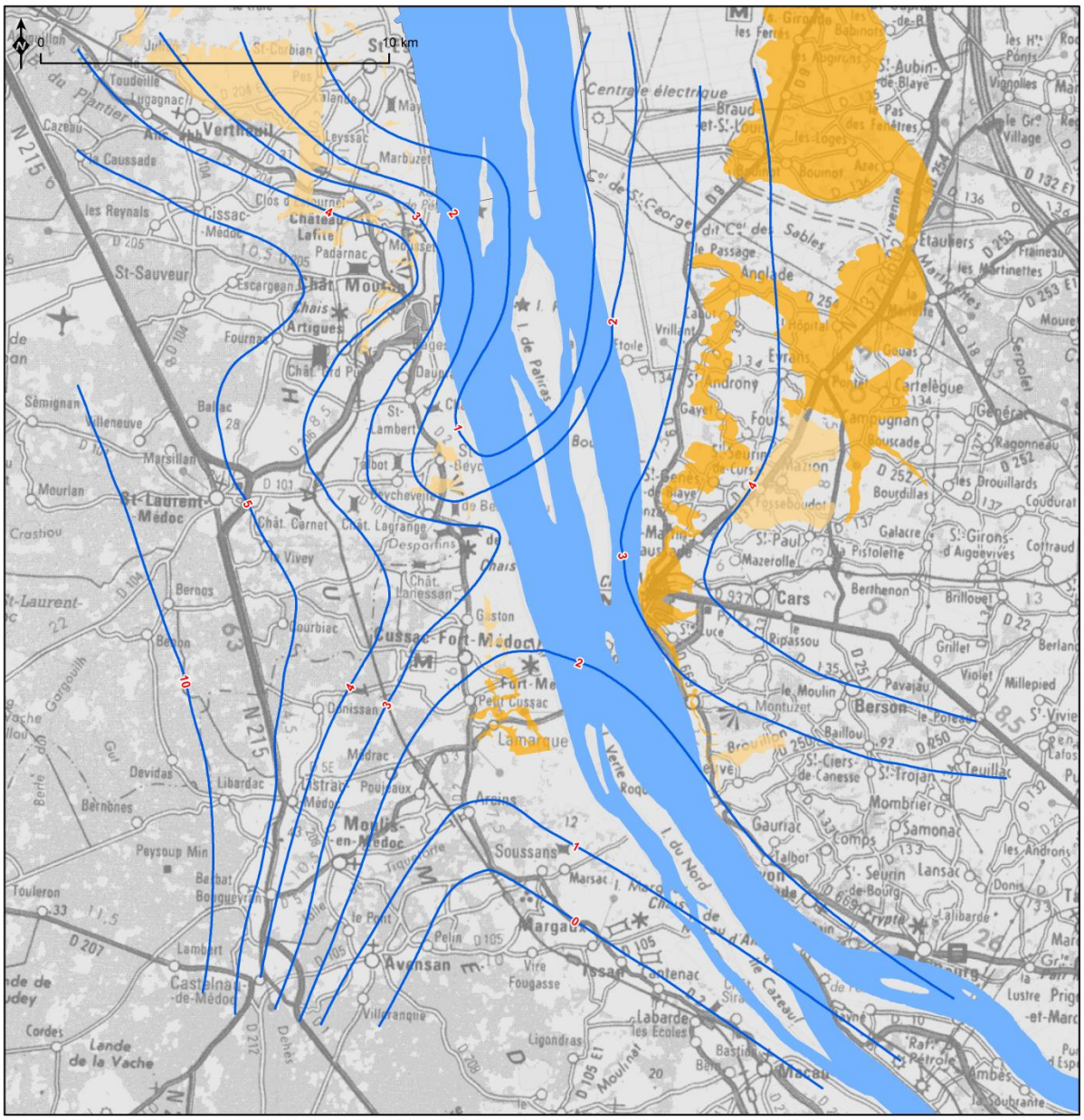
Type
- Courbe piézométrique incertaine (m NGF)
- Courbe piézométrique (m NGF)

- Affleurement de l'Eocène inférieur
- Affleurement de l'Eocène moyen
- Affleurement de l'Eocène supérieur

Bellegarde R. (1974) - Nappe des sables éocènes en Gironde -Prélevements 1973 - Rapport BRGM -74 AQI 060

CARTE PIÉZOMÉTRIQUE

Eocène moy calcaire , Estuaire
Année : 2008

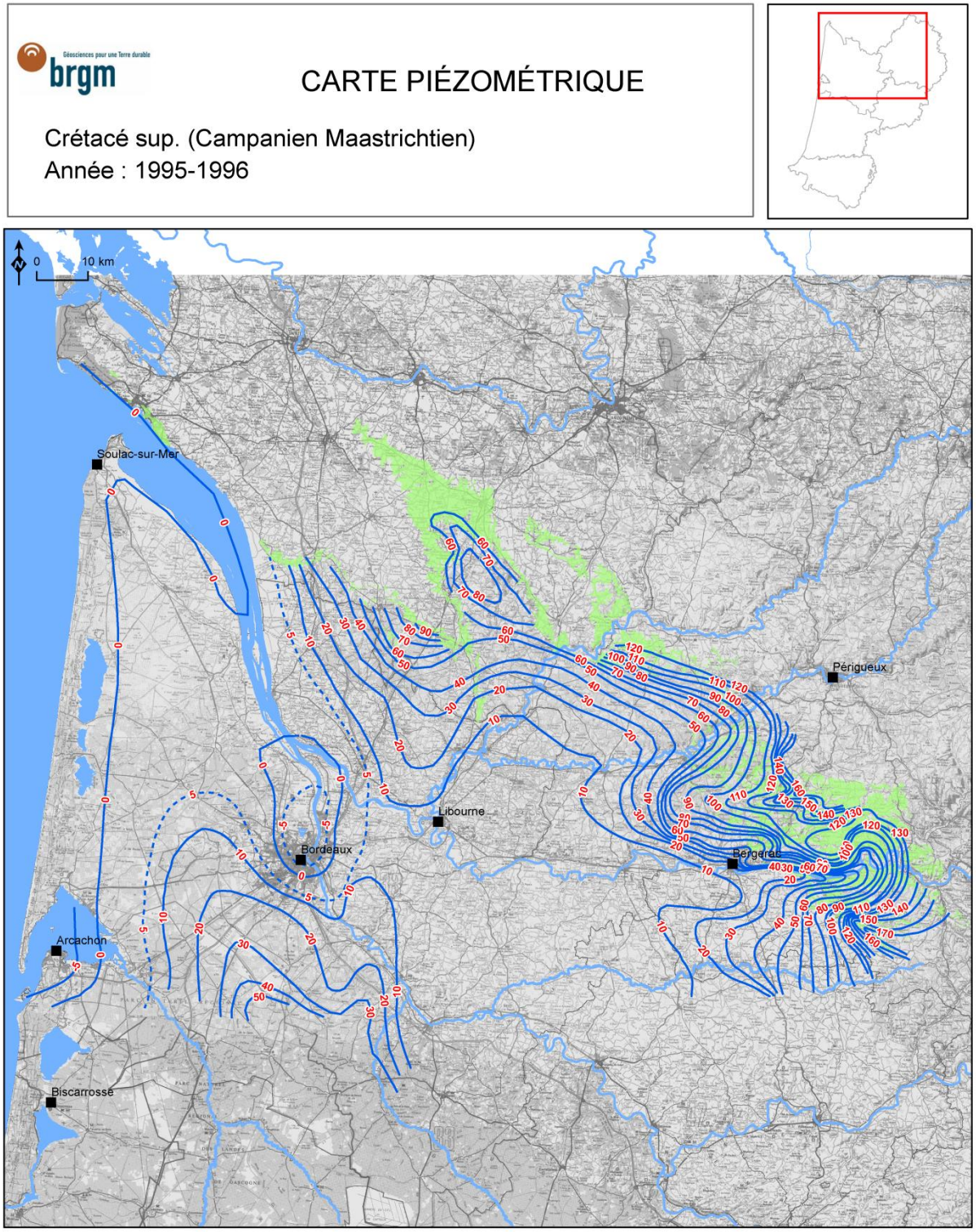


Codes géologiques :
MESO : 5101
LISA : 334AG02/334AG03
BDRHF V1 : 214

Type
- Courbe piézométrique incertaine (m NGF)
- Courbe piézométrique (m NGF)

- Affleurement de l'Eocène moyen
- Affleurement de l'Eocène supérieur

Platel J.P., Pedron N., Saltel M., Fruh E., Grabenstaetter L. et Goudin (2009) Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Caractérisation de la crête piézomètrique de l'Eocène au sud de l'estuaire de la Gironde - Module 2 - Année 1 - Convention 2008-2013 - Finalisation de la modelisation hydrodynamique - Suivi du réseau de surveillance - Rapport BRGM RP 57808 FR



Codes géologiques :

MESO : 5100/5072

LISA : 344AA

BDRHF V1 : 231

Type

Courbe piézométrique incertaine (m NGF)

Courbe piézométrique (m NGF)

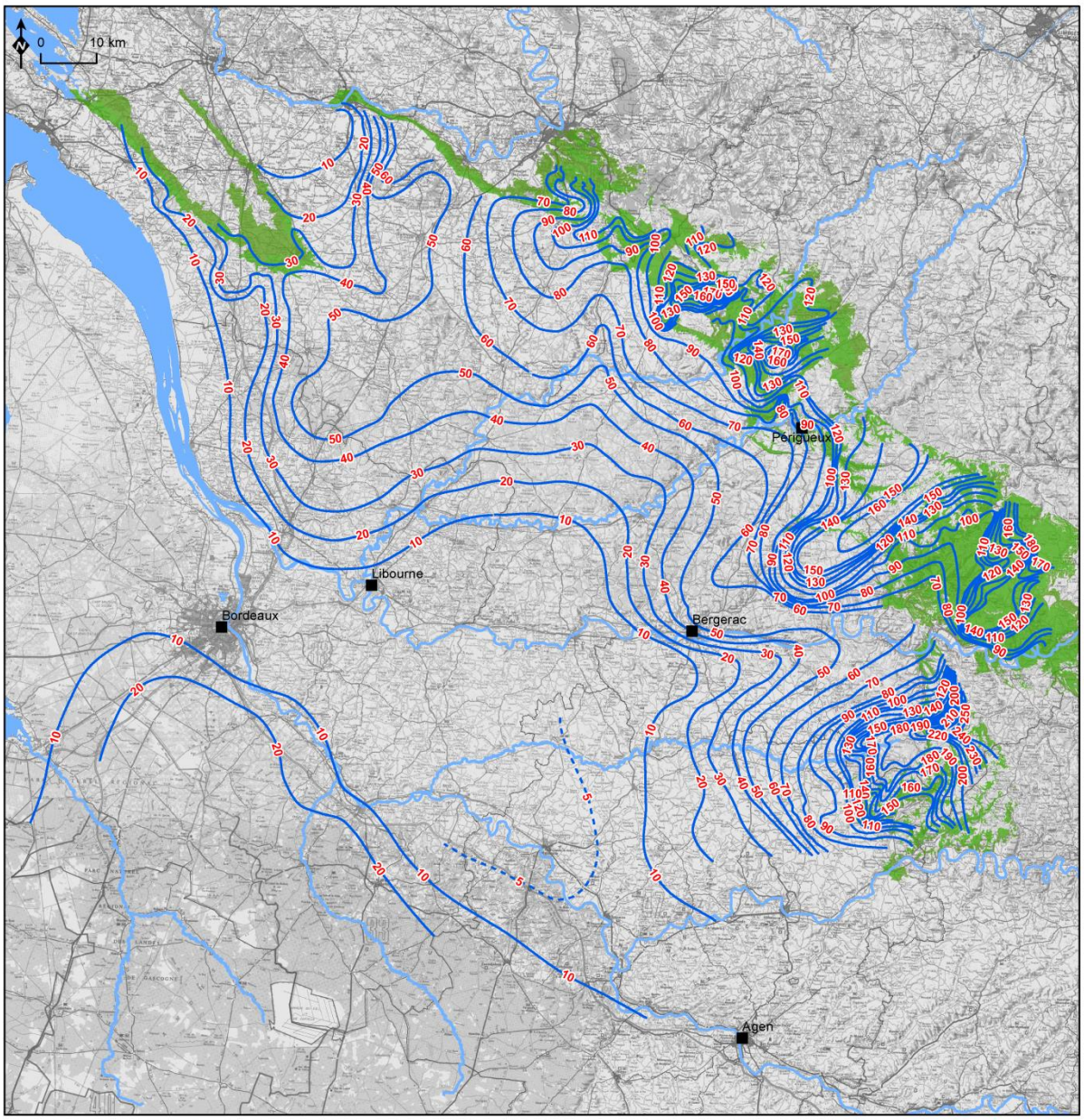
Affleurement du Campanien

Bichot F. et Platel J.P. (1997) - Gestion des eaux souterraines en Aquitaine - Année 1 - Evaluation des ressources - Rapport BRGM R 39331

CARTE PIÉZOMÉTRIQUE

Crétacé sup. (Santonien-Conacien-Turonien)
Année : 1994-1996

Les cartes piézométriques produites ne sont pas corrigées des effets de températures et la distribution des isopièzes pourrait être différente dans les zones les plus profondes du réservoir



Codes géologiques :
MESO : 5073
LISA : 348AA01
BDRHF V1 : 215

Type
Courbe piézométrique incertaine (m NGF)
Courbe piézométrique (m NGF)

Affleurement du Coniacien Santonien
Affleurement du Turonien

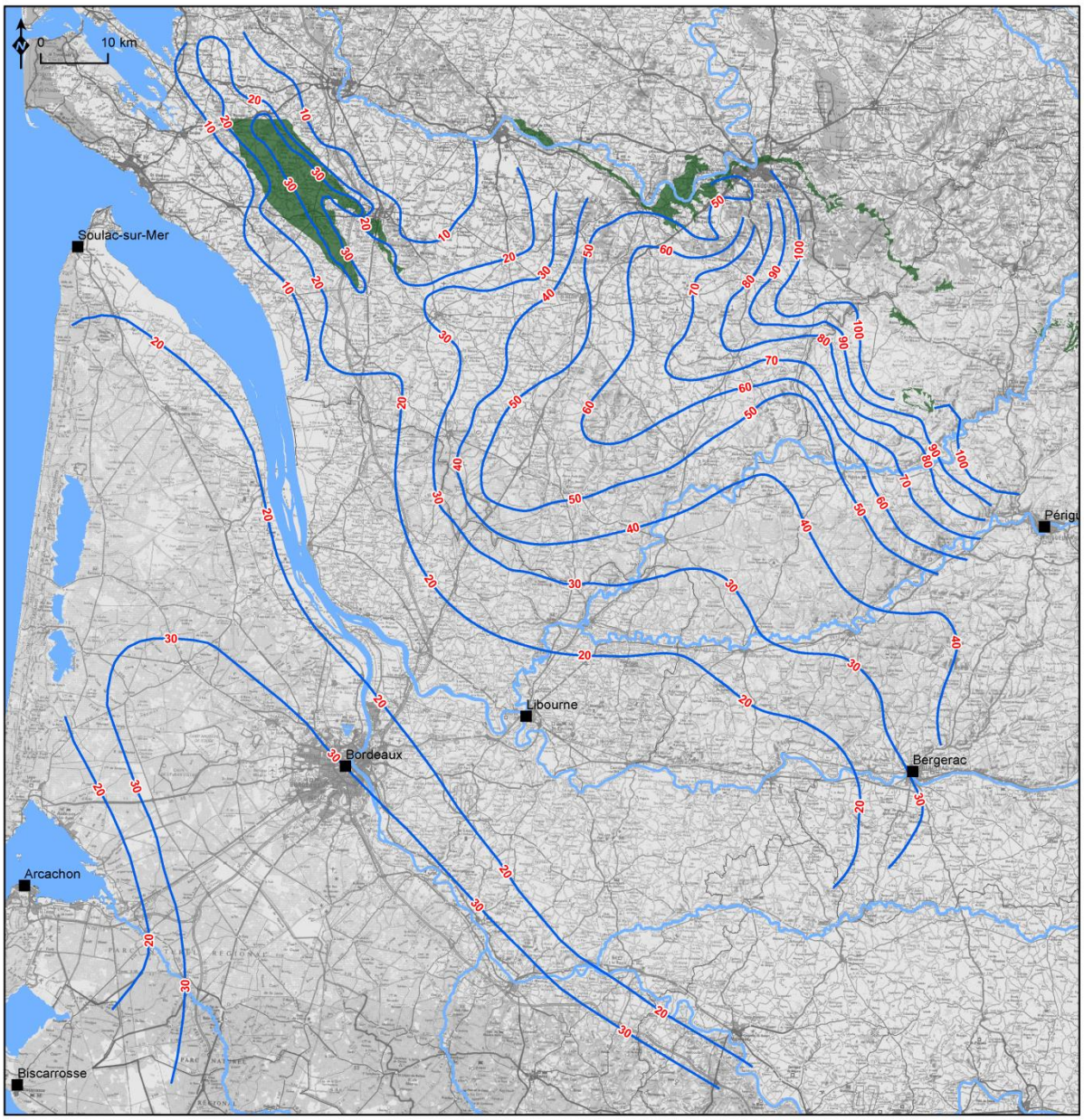
Bichot F. et Platel J.P. (1997) - Gestion des eaux souterraines en Aquitaine - Année 1 - Evaluation des ressources - Rapport BRGM R 39331

brgm

CARTE PIÉZOMÉTRIQUE

Crétacé sup. (Cenomanien)
Année : 1995-1996

Les cartes piézométriques produites ne sont pas corrigées des effets de températures et la distribution des isopièzes pourrait être différente dans les zones les plus profondes du réservoir

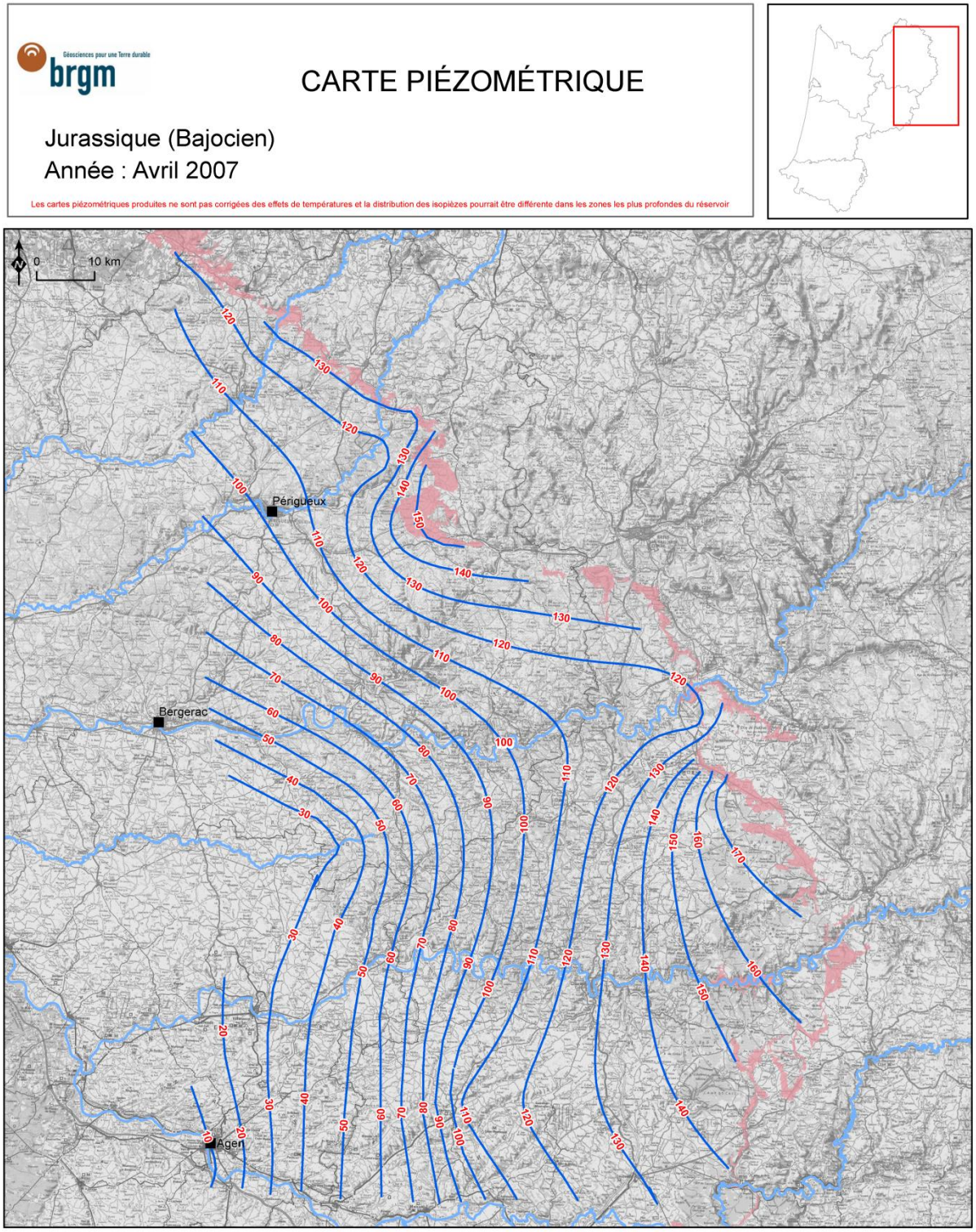


Codes géologiques :
MESO : 5073/5075
LISA : 348AA03/348AE01/348AG02
BDRHF V1 : 215

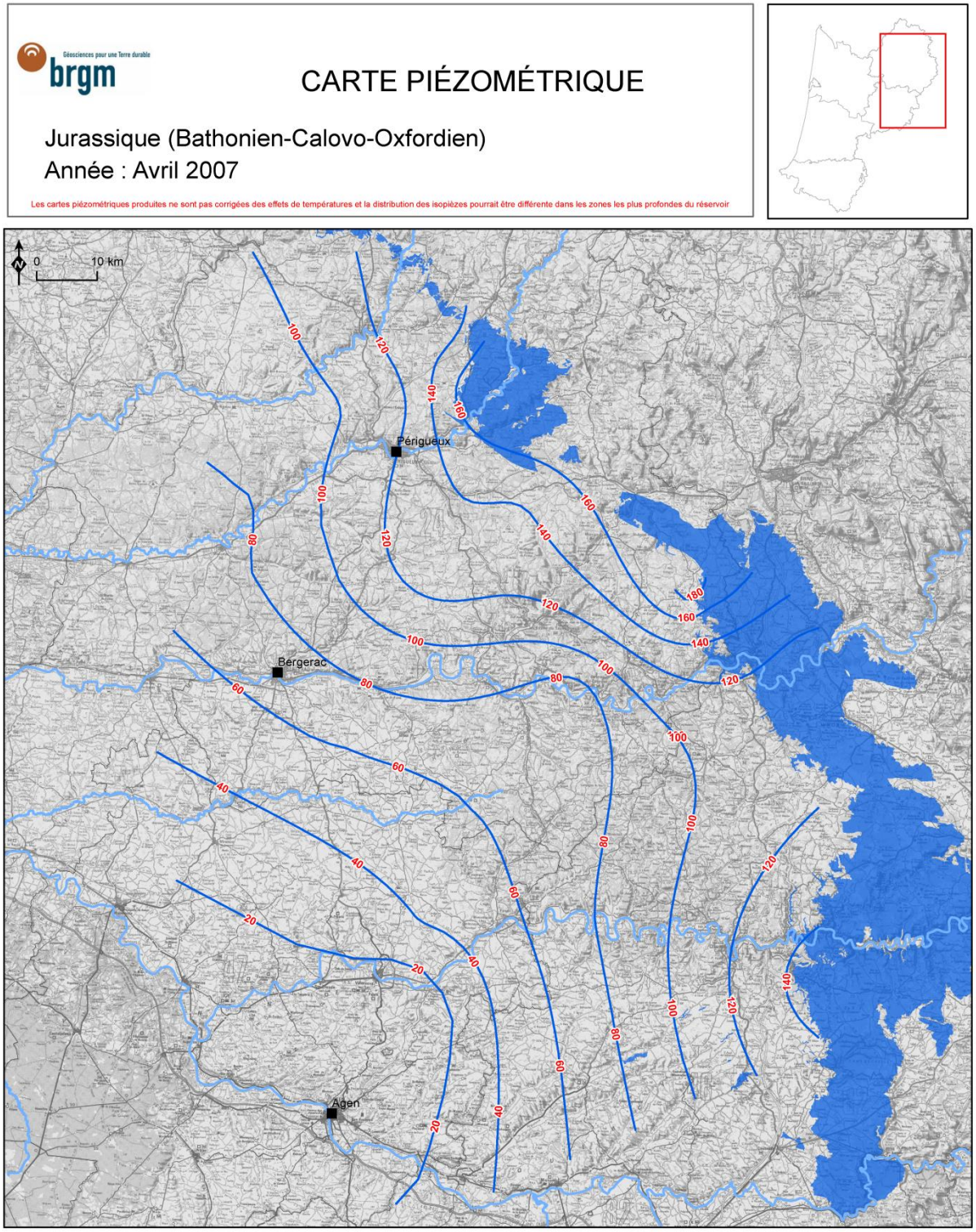
Type
Courbe piézométrique incertaine (m NGF)
Courbe piézométrique (m NGF)

Affleurement du Cénomanien

Bichot F. et Platel J.P. (1997) - Gestion des eaux souterraines en Aquitaine - Année 1 - Evaluation des ressources - Rapport BRGM R 39331



Platel J.P., et al. (2008) Perspectives de gestion des nappes du Secondaire en Agenais-Périgord. Partie 1 - Synthèse géologique et hydrogéologique. situation des nappes du Jurassique et du Crétacé supérieur. BRGM/RP-56419-FR

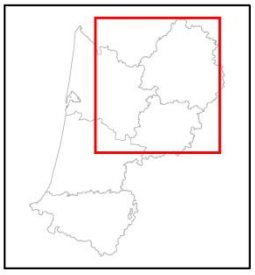


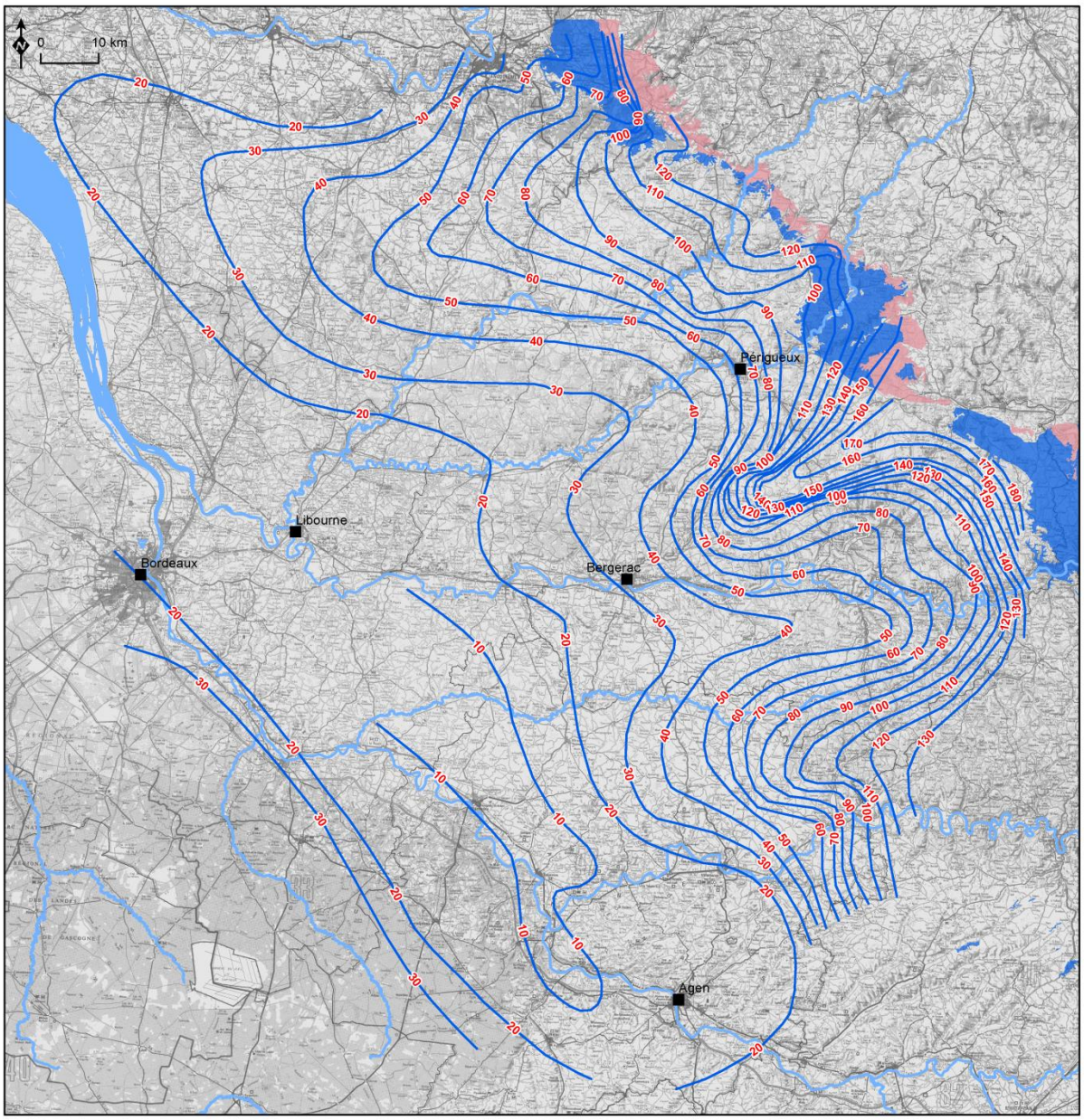
Platel J.P., et al. (2008) Perspectives de gestion des nappes du Secondaire en Agenais-Périgord. Partie 1 - Synthèse géologique et hydrogéologique. situation des nappes du Jurassique et du Crétacé supérieur. BRGM/RP-56419-FR

CARTE PIÉZOMÉTRIQUE

Jurassique moyen et supérieur
Année : 1995-1996

Les cartes piézométriques produites ne sont pas corrigées des effets de températures et la distribution des isopièzes pourrait être différente dans les zones les plus profondes du réservoir





Codes géologiques :
MESO : 5080
LISA : 356/358
BDRHF V1 : 217

Type
Courbe piézométrique incertaine (m NGF)
Courbe piézométrique (m NGF)

Affleurement du Bathonien Callovo Oxfordien
Affleurement du Bajocien

Bichot F. et Platel J.P. (1997) - Gestion des eaux souterraines en Aquitaine - Année 1 - Evaluation des ressources - Rapport BRGM R 39331

Annexe 2

Krigeage avec dérive sur les coordonnées

On utilise ce type de krigeage lorsque la variable étudiée présente une « dérive » ou « tendance » qui dépend des coordonnées : par exemple la profondeur d'une couche qui augmente progressivement lorsqu'on se déplace dans une direction données (la direction de pendage).

Dans ce cas le principe consiste à décomposer la variable en deux :

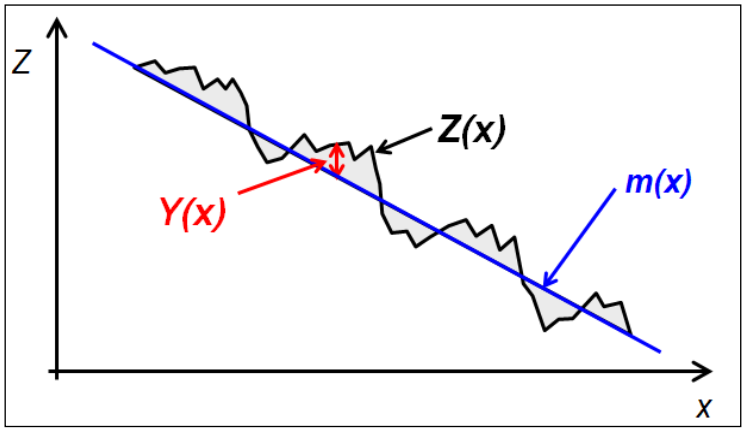
Z(x) = Y(x) + m(x)

Z(x) est la variable d'intérêt (cote piézométrique, altitude du toit d'une couche) au point x

m(x) est la **dérive** ou « tendance générale » pouvant être exprimée sous la forme d'un polynôme de degré *n*, dépendant des coordonnées *(u,v,w)* des points. Avec deux coordonnées *(u,v)* et un degré 2, *m(x)* prend la forme : $m(x) = a + bu + cv + duv + eu^2 + fv^2$. En théorie les coefficients *a, b, c* … des monômes en *u* et *v* peuvent varier localement et ne sont pas constants sur l'ensemble du domaine d'étude

m(x) représente le comportement moyen aux « grandes longueurs d'onde » de *Z(x)*

Y(x) est une variable stationnaire appelée **résidu** : elle représente le « delta » (en rouge ci-dessous) obtenu en soustrayant à *Z(x)* la tendance générale *m(x).* Le variogramme de *Y(x)* doit présenter un palier ou être faiblement non stationnaire (au pire de type linéaire)



Décomposition de la variable en une dérive et un résidu

En pratique on ne peut pas effectuer cette décomposition de façon exacte et on procède de la façon suivante :

1. La dérive (c'est-à-dire les coefficients du polynôme *m(x)*) est estimée par moindres carrés à partir de l'ensemble des *Z(xi)* disponibles ; on obtient ainsi l'estimation *m*(x)*.
2. On construit alors *Y*(xi) = Z(xi) - m*(xi)* qui représente une estimation du résidu au point xi, une fois retranchée de la valeur vraie *Z(xi)* l'estimation de la dérive *m*(xi)*. Le variogramme de *Y** peut alors être calculé et ajusté par un modèle stationnaire.
3. On estime alors par krigeage "universel" la valeur *Z*(x)*. Ceci revient à estimer simultanément *Y*(x)* et les coefficients de la dérive *a*, b**, etc. En théorie, on devrait utiliser le variogramme des résidus vrais *Y(x)*. En pratique, celui-ci n'est pas calculable, et on lui substitue le variogramme des estimations des résidus *Y*(xi)*. Ce variogramme est biaisé par rapport au variogramme vrai des résidus, particulièrement aux grandes distances.

Le krigeage avec prise en compte d'une dérive sur les coordonnées est un peu plus exigeant que le krigeage « ordinaire » en ce sens qu'il nécessite un plus grand nombre de données dans le voisinage d'interpolation. En effet, uniquement pour estimer la dérive au voisinage d'un point donné, il faut au minimum 3 points de donnée si la dérive est de degré 1 (3 points pour estimer un plan) et 6 pour une dérive de degré 2. Ce nombre doit en réalité être sensiblement plus élevé pour avoir une bonne stabilité des coefficients de la dérive ainsi que pour estimer correctement le résidu dans le voisinage.

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

BRGM Direction Régionale Aquitaine
Parc Technologique Europarc
24, avenue Léonard de Vinci
33600 Pessac - France
Tél. : 05 57 26 52 70