

Document public



Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine

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

Module 2 - Année 3
Convention 2008-2013

Rapport final



Prefecture de la région Aquitaine
Secrétariat général pour les affaires régionales



BRGM/RP-62346-FR
Juin 2013



Document public

Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine

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

Module 2 - Année 3

Convention 2008-2013

Rapport final

BRGM/RP-62346-FR

Juin 2013

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 11RGH0404

B. Bourgine, N. Pédron



Préfecture de la région Aquitaine
Secrétariat général pour les affaires régionales



Vérificateur :

Nom : J.J. SEGUIN

Date : 5 Août 2013

Approbateur :

Nom : N. LENOTRE

Date : 7 août 2013

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 : piézométrie, géostatistique, krigeage, carte, nappe, Eocène, Turonien, Aquitaine

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

Bourgine B., N. Pédron (2013) 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.

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.

Sur la période 2011-2012 (année 3 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 de réseaux de surveillance.

L'objectif de ce nouveau module est de concevoir et de mettre au point sur deux années :

- 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,
- un rapport de synthèse détaillant les techniques à mettre en œuvre pour répondre aux objectifs ci-dessus, les données ou paramètres nécessaires pour pouvoir les appliquer, les conditions et précautions d'utilisation, ainsi que quelques exemples de mise en œuvre sur des aquifères de la région Aquitaine, en contexte libre et captif.

La première année d'étude (*Bourgine, 2011*), axée sur les aspects méthodologiques, a permis de tester des méthodes de cartographie des niveaux piézométriques à l'aide de techniques géostatistiques « standard » sur 2 cas réels : un de type captif (Eocène Nord-aquitain), l'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 la nappe du Turonien libre.

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

Les points suivants ont été abordés et développés :

- Interpolation avec conditions aux limites (gradients, conditions de flux nul),
- Raccordement des interpolations en zone de transition nappe libre – nappe captive,
- Calcul de différence de niveaux piézométriques entre deux années consécutives et incertitude associée,
- Critères d'optimisation du réseau de surveillance piézométrique des nappes,
- Comparaison des différentes méthodes géostatistiques, avantages/inconvénients.

Les prochaines années du module seront consacrées à la mise en application des méthodes géostatistiques testées et développées au cours des deux premières années d'étude sur des cas concrets. L'objectif sera d'élaborer des cartes piézométriques de référence sur les principales nappes de la Région Aquitaine.

Sommaire

Sommaire	5
1. Introduction	9
1.1. CONTEXTE GENERAL.....	9
1.2. OBJECTIFS ET PROGRAMME DU MODULE 2	9
2. Prise en compte de données de gradient	11
2.1. INTRODUCTION.....	11
2.2. MISE EN ŒUVRE ET TESTS DU KRIGEAGE AVEC PRISE EN COMPTE DE DÉRIVÉES	11
2.2.1. Application à un cas cité dans la littérature	12
2.2.2. Application à la nappe de l'Éocène nord Aquitain : condition de limite à flux nul ..	17
2.2.3. Application à la nappe de l'Éocène de la Gironde : crête piézométrique	21
3. Raccord de deux modèles géostatistiques dans la transition libre-captif	25
3.1. CAS DE VARIOGRAMMES PROPORTIONNELS.....	26
3.2. CAS DE VARIOGRAMMES NON PROPORTIONNELS.....	27
3.3. APPLICATION À LA NAPPE DE L'ÉOCÈNE NORD AQUITAIN	29
4. Calcul de différence de niveaux piézométriques entre deux années consécutives et incertitude associée	33
4.1. EXEMPLE DE MISE EN ŒUVRE DE CALCUL D'INCERTITUDE SUR LA DIFFÉRENCE ENTRE DEUX SITUATIONS.....	34
5. Critères d'optimisation du réseau de suivi piézométrique des nappes	37
5.1. PRINCIPE	37
5.2. IDENTIFICATION DES PIÉZOMÈTRES REDONDANTS OU NON INDISPENSABLES .	37
5.2.1. Principe : validation croisée	37
5.2.2. Application à l'aquifère de l'Eocène du nord du Bassin aquitain.....	39
5.3. IDENTIFICATION DES ZONES OÙ DENSIFIER LE RÉSEAU	42
5.4. OPTIMISATION DE LA POSITION DES PIÉZOMÈTRES	42

6. Comparaison des différentes méthodes géostatistiques, avantages/inconvénients	43
7. Conclusion	45
8. Bibliographie	47
8.1. GÉOTATISTIQUE.....	47
8.2. PIEZOMÉTRIE	47

Liste des illustrations

Figure 1 : Interpolation directe de la piézométrie à partir des 49 piézomètres seuls.....	13
Figure 2 : Interpolation de la piézométrie à partir des 49 piézomètres + conditions aux limites	14
Figure 3 : Interpolation avec 9 piézomètres + conditions aux limites.....	15
Figure 4 : Comparaison du krigeage avec 49 piézomètres et du krigeage avec 9 piézomètres	16
Figure 5 : Réduction d'écart-type d'interpolation grâce à l'utilisation de conditions aux limites.....	17
Figure 6 : Isopièzes du modèle MONA. Limite sud de l'aquifère éocène nord aquitain. Année 2007	18
Figure 7 : Isopièzes à partir de données de piézomètres + des points d'affleurement. Limite sud de l'aquifère éocène nord aquitain. Année 2007	19
Figure 8 : Isopièzes à partir de données de piézomètres + des points d'affleurement + des conditions aux limites. Limite sud de l'aquifère éocène nord aquitain. Année 2007	20
Figure 9 : Isopièzes du modèle MONA . Crête piézométrique du Médoc. Nappe de l'Eocène nord aquitain. Année 2007	21
Figure 10 : Isopièzes à partir des données seules. Crête piézométrique du Médoc. Nappe de l'Eocène nord aquitain. Année 2007	22
Figure 11 : Isopièzes à partir des données + conditions de flux nul. Crête piézométrique du Médoc. Nappe de l'Eocène nord aquitain. Année 2007	23
Figure 12 : Isopièzes à partir des données + conditions de flux nul+ piézomètre 08512X0001. Crête piézométrique du Médoc. Nappe de l'Eocène nord aquitain. Année 2007	24
Figure 13 : Variogrammes bruts des données en zone captive ("Piézomètres") et des données en zone libre ("Affleurements")	25
Figure 14 : Variogrammes normés des données en zone captive ("Piézomètres") et des données en zone libre ("Affleurements")	26
Figure 15 : Raccordement des deux interpolations dans la zone de recouvrement (coupe verticale) par pondération linéaire dépendant des distances.....	28
Figure 16 : Raccordement des deux interpolations dans la zone de recouvrement (coupe verticale) par pondération linéaire dépendant de la valeur de Z.....	29
Figure 17 : Limite (fictive et approximative) entre nappe libre et nappe captive. Nappe de l'Eocène, année 2007	30
Figure 18 : Visualisation du poids attribué à l'interpolation "nappe captive" dans la zone de raccordement captif-libre	30
Figure 19 : Variogrammes des données pour la nappe captive (en haut) et la nappe libre (en bas)	31
Figure 20 : Résultat de la combinaison de deux interpolations.....	32
Figure 21 : Variogramme de la différence de cote piézométrique 2009 - 2007	34
Figure 22 : Carte de la différence 2009-2007. En haut calcul direct, en bas calcul par différence de deux co-krigeages.....	35
Figure 23 : Ecart-type d'interpolation de la différence par krigeage direct.....	36
Figure 24 : Principe de la validation croisée.....	38
Figure 25 : Validation croisée du niveau piézométrique. Aquifère Eocène Nord Aquitain, année 2007	40
Figure 26 : Sélection de piézomètres à éliminer	40

Figure 27 : Isopièzes avec la totalité des piézomètres et en enlevant 17 piézomètres	41
Figure 28 : Carte des écart-types avec toutes les données et sans les 17 piézomètres	41

Liste des annexes

Annexe 1 : Prise en compte de conditions aux limites dans les équations de krigeage	49
---	----

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. Sur la période 2011-2012 (année 3 de la convention), le programme porte 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** : Reconnaissance des potentialités aquifères du Plio-Quaternaire 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 seconde année d'investigation de cette nouvelle étude.

D'une façon plus large, cette étude s'inscrit dans le cadre des actions de Service Public du BRGM (fiche 11RGH0404). Elle est cofinancée par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, le BRGM et le Conseil Régional Aquitaine.

1.2. OBJECTIFS ET PROGRAMME DU MODULE 2

La 2^{ème} année du module (année 3 de la convention) a été consacrée à l'amélioration des méthodes proposées en année 1 (année 2 de la convention), au développement/tests de nouvelles méthodes, à la rédaction d'un tableau de « bonnes pratiques » présentant les différentes méthodes envisageables et leurs avantages/inconvénients.

Les points suivants ont été abordés et développés :

- Interpolation avec conditions aux limites (gradients, conditions de flux nul),
- Raccordement des interpolations en zone de transition nappe libre – nappe captive,
- Calcul de différence de niveaux piézométriques entre deux années consécutives et incertitude associée,
- Critères d'optimisation du réseau de surveillance piézométrique des nappes,

- Comparaison des différentes méthodes géostatistiques, avantages/inconvénients.

Ce rapport rend compte de l'ensemble de ces investigations et détaille les différentes techniques à mettre en œuvre, les données ou paramètres nécessaires pour pouvoir les appliquer et les conditions et précautions d'utilisation.

2. Prise en compte de données de gradient

2.1. INTRODUCTION

La cote piézométrique d'un aquifère résulte :

- du champ de perméabilité de l'aquifère et de sa géométrie,
- des entrées (pluie efficace, réinjection) et des sorties (pompage, exutoires naturels) – avec leurs variations temporelles,
- des conditions aux limites et en particulier celles à flux nul : faille, variation latérale de faciès, ligne de partage des eaux, limite d'érosion, Celles-ci pouvant se manifester sur les marges de l'aquifère ou en son sein.

Lorsqu'un hydrogéologue trace une carte piézométrique à partir des données piézométriques disponibles, il s'appuie sur son expertise afin d'intégrer ces contraintes physiques qui s'imposent à la piézométrie d'un aquifère.

Dans cette étude, on cherche à produire une interpolation directe de la surface piézométrique à partir de méthodes objectives sur laquelle l'hydrogéologue puisse s'appuyer. Pour cela, il est important de prendre en compte le maximum d'informations auxiliaires disponibles et plus particulièrement les « conditions aux limites » qui peuvent être les suivantes :

- Niveau piézométrique imposé (cote d'un lac ou d'un cours d'eau par exemple) : elles sont prises en compte comme des données de piézométrie en des points discrétisant le contour du lac ou le cours d'eau.
- Existence d'une limite à flux nul (ligne de partage des eaux, variation latérale de faciès par exemple) : dans ce cas le gradient de piézométrie doit être nul dans la direction orthogonale au contour.

Les méthodes géostatistiques permettent l'interpolation conjointe d'une variable et de son gradient dans une direction quelconque. On parle de « co-krigeage d'une variable et de ses dérivées ». Nous allons illustrer l'application de ces méthodes.

Des informations complémentaires sur ces méthodes sont données en annexe et en bibliographie (Chilès, 2012).

2.2. MISE EN ŒUVRE ET TESTS DU KRIGEAGE AVEC PRISE EN COMPTE DE DÉRIVÉES

Le caractère opérationnel de l'interpolation avec données de gradients ou de dérivées partielles a été testé sur plusieurs cas :

- cas cités dans la littérature : pour validation de la méthode,
- cas tirés des aquifères aquitains : pour application à des cas pratiques.

Deux approches sont possibles pour le krigeage avec prise en compte de dérivées :

- approche analytique « exacte »,
- calcul approché basé sur la prise en compte de gradients « macroscopiques ».

Dans le premier cas le système de krigeage utilise la relation mathématique qui existe entre la covariance de la piézométrie et la covariance de la dérivée de la piézométrie (Chilès et Delfiner, 2012, page 320). Toutefois, cette relation ne peut être utilisée simplement que dans le cas d'une covariance isotrope. Par ailleurs, la covariance de la piézométrie doit être deux fois dérivable, ce qui limite le choix des modèles de covariance possible.

Afin de pouvoir traiter tous les cas de figure, une approximation est proposée pour le calcul des gradients. Le calcul exact de la dérivée dans une direction est remplacé par un calcul approché où l'on fait intervenir la différence de cote piézométrique ΔZ sur une certaine distance Δh dans cette direction : dérivée = $\Delta Z / \Delta h$. C'est ce qu'on appelle le gradient « macroscopique » sur une distance Δh .

Pour pouvoir mettre en œuvre une telle interpolation, il faut alors :

- des points où la piézométrie Z est connue,
- des points où le gradient piézométrique ΔZ est connu dans une direction donnée, avec une distance Δh d'application de ce gradient.

Pour ce second type de données le cas le plus courant est l'existence d'une limite à flux nul. Cette limite est discrétisée en une série de points P_i . En chacun de ces points P_i la condition de flux nul se traduit par une contrainte de $\Delta Z = 0$ dans une direction perpendiculaire à la limite au point P_i , ce ΔZ étant appliqué sur une distance Δh fixée par l'utilisateur.

Nous allons illustrer ce principe par 3 exemples ci-après :

- exemple test tiré de la littérature,
- exemple de la nappe de l'Eocène nord Aquitain: application d'une limite étanche,
- exemple de la nappe de l'Eocène nord Aquitain: crête piézométrique.

2.2.1. Application à un cas cité dans la littérature

L'exemple ci-après est tiré de Chilès & Delfiner (2012, p 320 à 324), citant une étude non publiée de J.P. Delhomme et datant de 1979. Dans cet exemple on considère un aquifère dans lequel les bordures indiquées en orange sur la figure 1 sont étanches. En conséquence les courbes isopièzes doivent être perpendiculaires à cette limite. Cet aquifère est reconnu par 49 piézomètres. Une interpolation directe de la piézométrie à partir des 49 données de piézométrie conduit à la carte illustrée Figure 1. On peut constater qu'en plusieurs endroits les courbes isopièzes ne sont pas perpendiculaires à la limite étanche (notamment les secteurs cerclés de rouge sur la Figure 1).

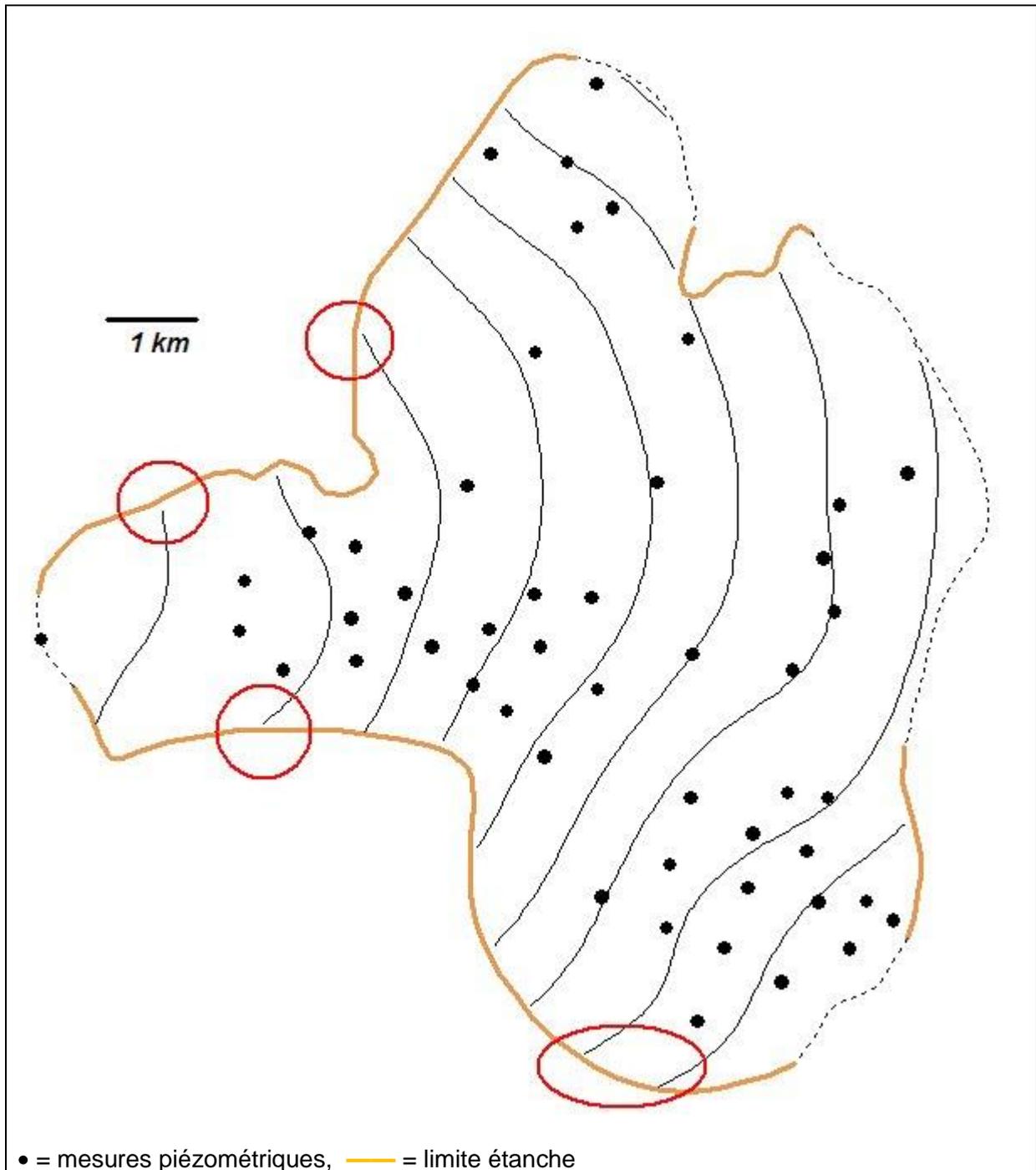


Figure 1 : Interpolation directe de la piézométrie à partir des 49 piézomètres seuls.

Afin d'améliorer la carte, on peut introduire des conditions aux limites (limite étanche) sous la forme de données de gradient nul sur des points de discrétisation. Le résultat obtenu est illustré Figure 2. Sur cette figure on a matérialisé les conditions aux limites de type « gradient nul » par des segments de couleur rouge perpendiculaires aux limites étanches. La longueur du segment matérialise la longueur du gradient macroscopique.

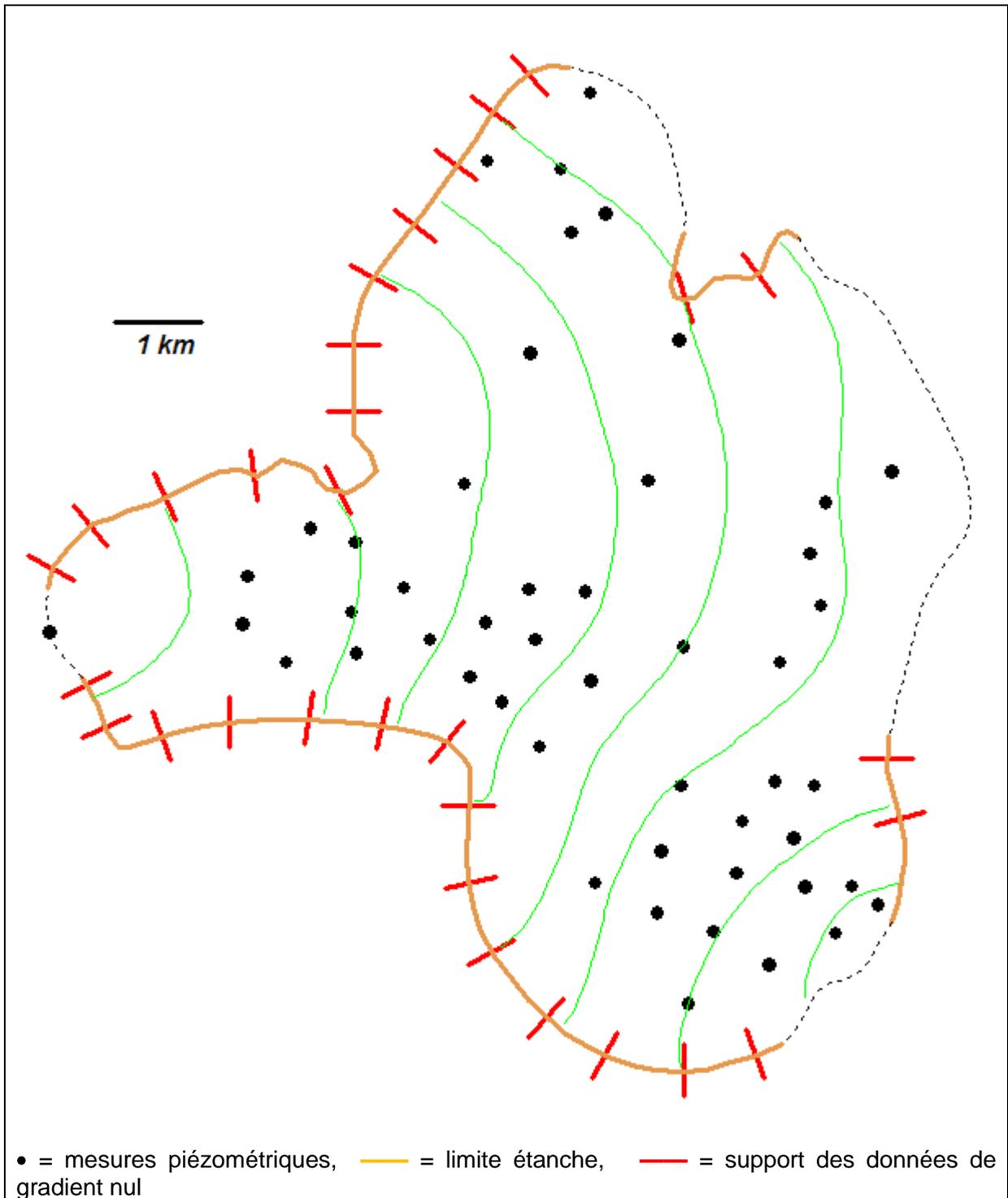


Figure 2 : Interpolation de la piézométrie à partir des 49 piézomètres + conditions aux limites

On peut noter que les nouvelles courbes isopièzes obtenues sont cette fois-ci bien perpendiculaires aux limites étanches.

L'introduction de conditions aux limites permet de contraindre fortement l'interpolation dans des cas comme celui illustré ci-dessus. On peut alors exploiter la connaissance de ces conditions aux limites pour réduire le nombre de piézomètres. La Figure 3 montre ainsi le résultat obtenu lorsqu'on réduit le nombre de piézomètres à 9 seulement.

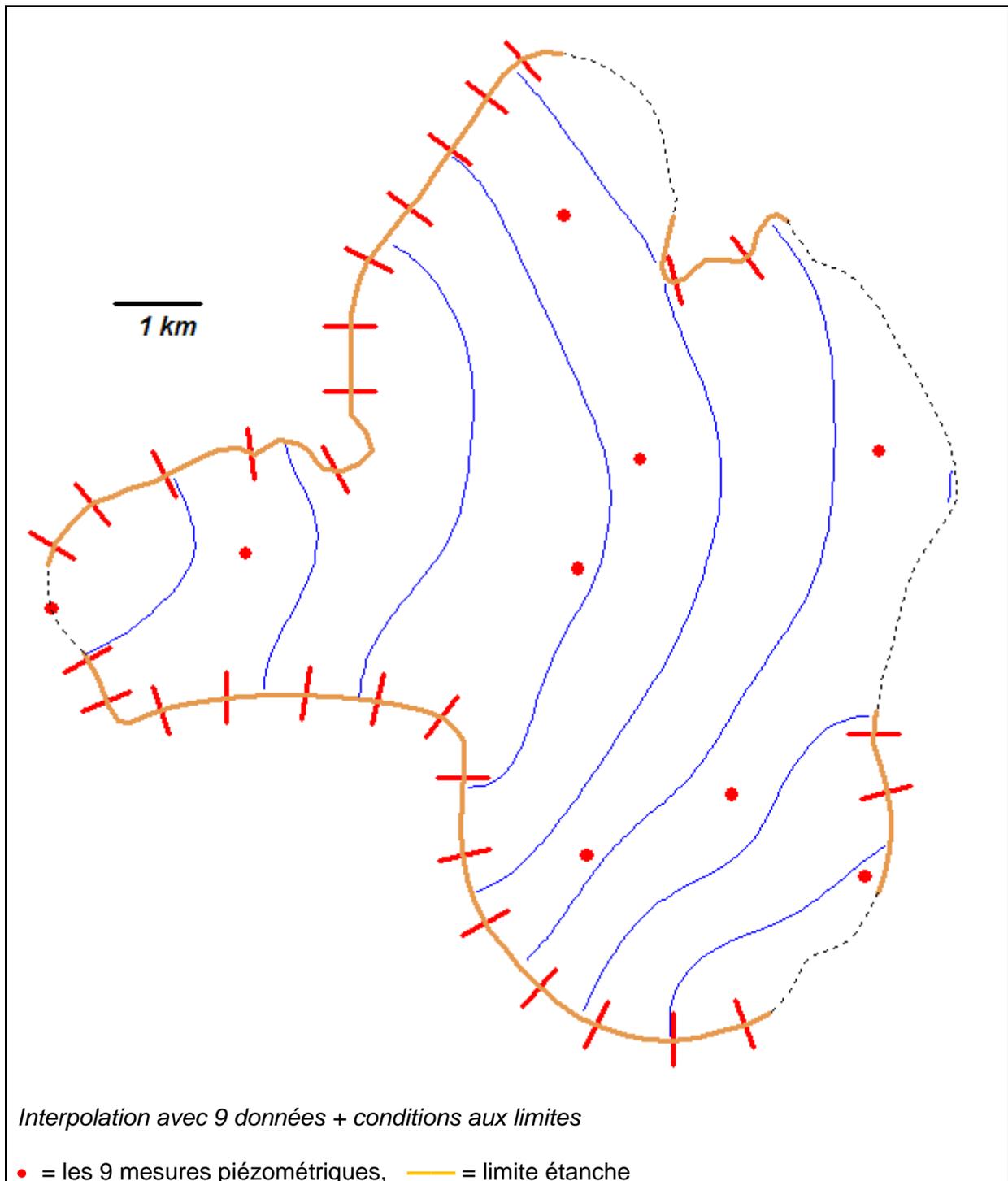


Figure 3: Interpolation avec 9 piézomètres + conditions aux limites

La comparaison des résultats obtenus avec seulement 9 piézomètres par rapport aux 49 piézomètres initiaux montre que les deux cartes sont assez proches et respectent les conditions aux limites (introduites dans les deux calculs). Des différences sont observées dans la partie sud, mais ces différences pourraient être atténuées en ajoutant un piézomètre ou en plaçant les piézomètres retenus de façon différente.

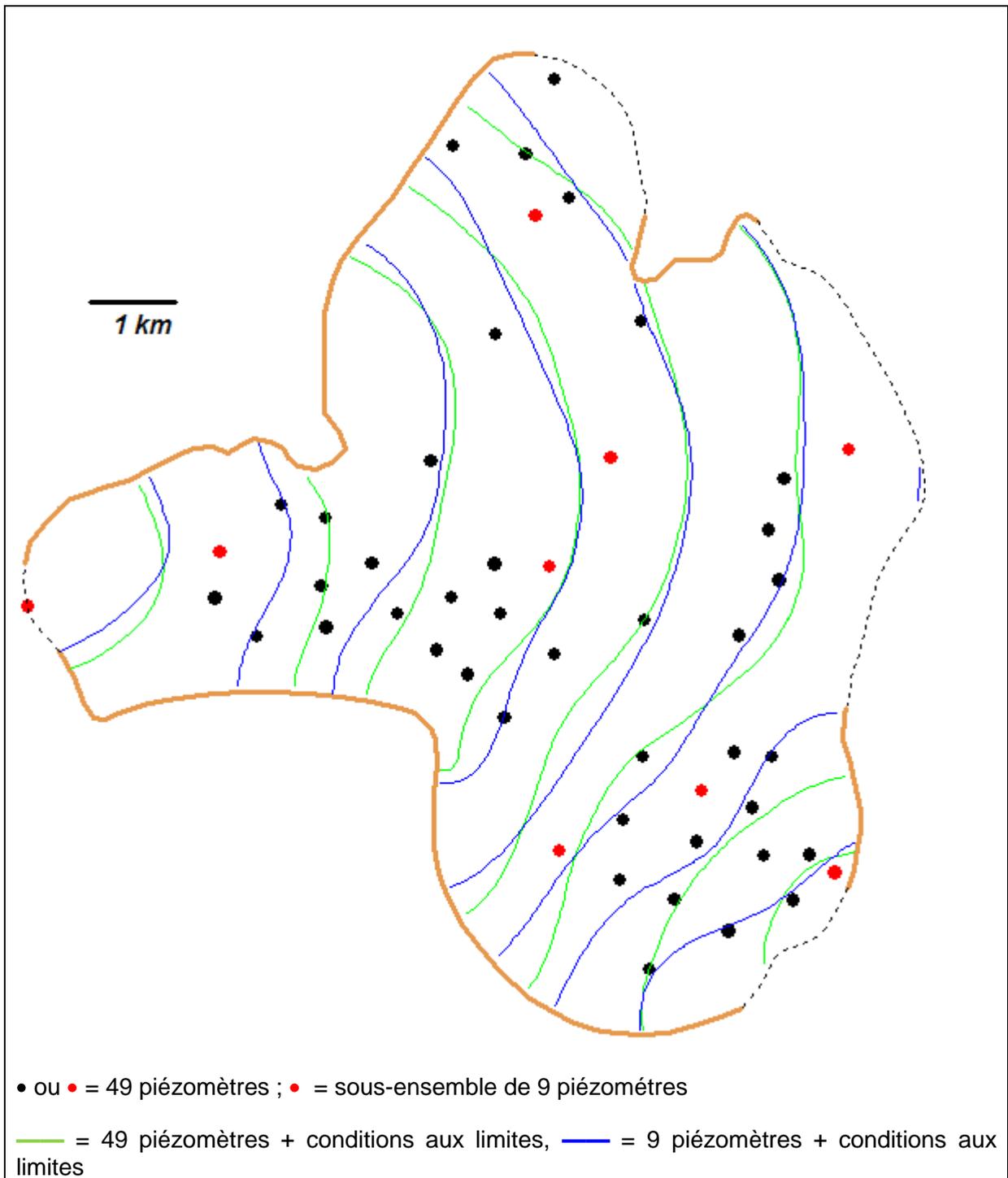


Figure 4: Comparaison du krigeage avec 49 piézomètres et du krigeage avec 9 piézomètres

L'intérêt d'ajouter des données de flux nul sur les limites étanche consiste également en une réduction des écarts-type d'interpolation. La Figure 5 montre comment l'introduction de conditions aux limites réduit l'écart-type d'interpolation. Cette réduction est surtout sensible dans les zones éloignées des données et contraintes par les conditions aux limites.

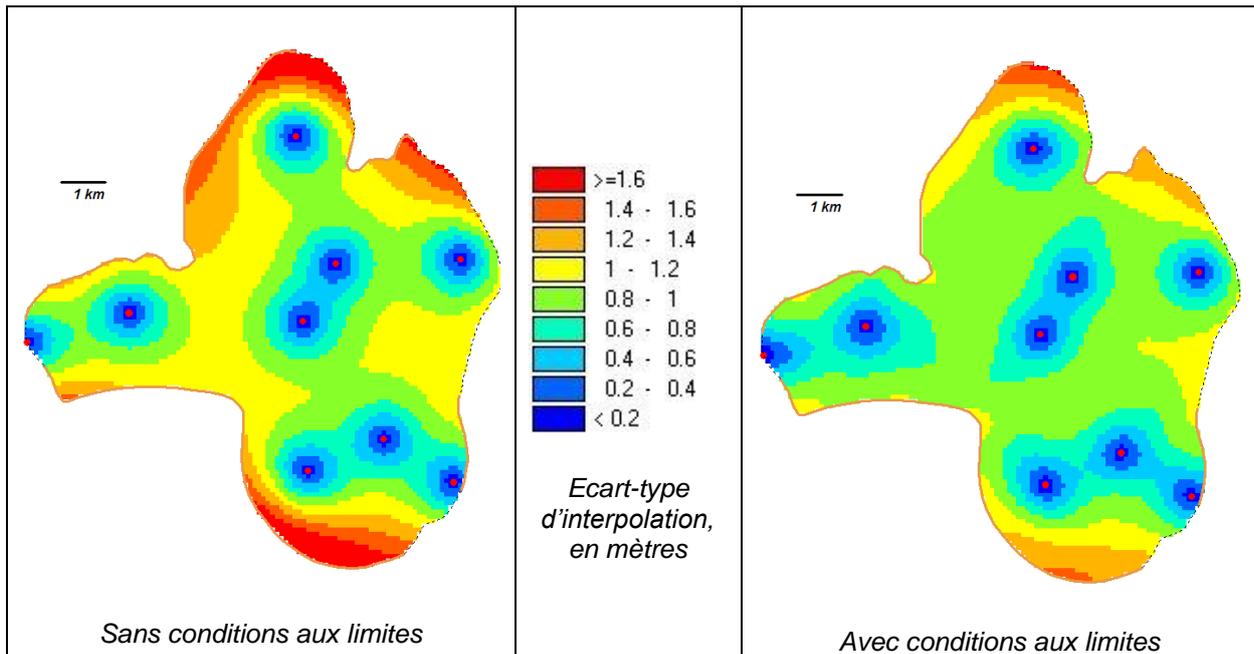


Figure 5 : Réduction d'écart-type d'interpolation grâce à l'utilisation de conditions aux limites

Dans l'exemple montré ci-dessus, la mise en œuvre du krigeage avec données de gradient nécessite :

- de définir des points de discrétisation en nombre suffisant,
- de choisir la distance d'application du gradient macroscopique.

Après quelques essais, 30 points de discrétisation des conditions aux limites ont été introduits, et une distance de 600 m a été choisie pour la longueur de calcul du gradient macroscopique. Ces valeurs ont été choisies de façon à obtenir une bonne perpendicularité des isopièzes par rapport aux limites à flux nul. La distance de 600 m conditionne en partie la distance sur laquelle l'isopièze restera perpendiculaire au contour.

2.2.2. Application à la nappe de l'Éocène nord Aquitain : condition de limite à flux nul

Le test précédent ayant permis de vérifier que les résultats étaient conformes aux résultats attendus sur un cas publié, cette méthode a été appliquée à la nappe de l'Eocène nord Aquitain.

La limite sud-est de l'aquifère constitue une limite à flux nul. Les sables et calcaires lacustres passent latéralement à des formations molassiques peu perméables. C'est ce que traduisent les isopièzes issues du modèle MONA au nord et à l'est de Villeneuve sur Lot (Figure 6) : celles-ci sont perpendiculaires à cette limite.

Le calcul des isopièzes dans cette zone, par interpolation directe des données fournies par les piézomètres et les points d'affleurement de la nappe conduit à la carte de la Figure 7. On peut constater sur cette carte que les isopièzes montrent un tracé assez irrégulier au nord-est de Villeneuve sur Lot, tracé qui paraît peu réaliste, ceci d'autant plus qu'aucune donnée factuelle ne justifie ce comportement. En fait le calcul dans cette zone se fait plus en extrapolation qu'en interpolation. De plus la répartition dissymétrique et non homogène des données génère des « artefacts » de calcul.

On constate également sur la Figure 7 que les valeurs des isopièzes au nord de Villeneuve ne sont pas du tout compatibles avec celles de la carte MONA. Par exemple l'isopièze « 40 » se retrouve décalée vers l'ouest de plus de 10 km. Même si le modèle MONA n'est pas nécessairement calé avec beaucoup d'informations dans cette zone qui manque de données, l'interpolation directe paraît insuffisamment contrainte.

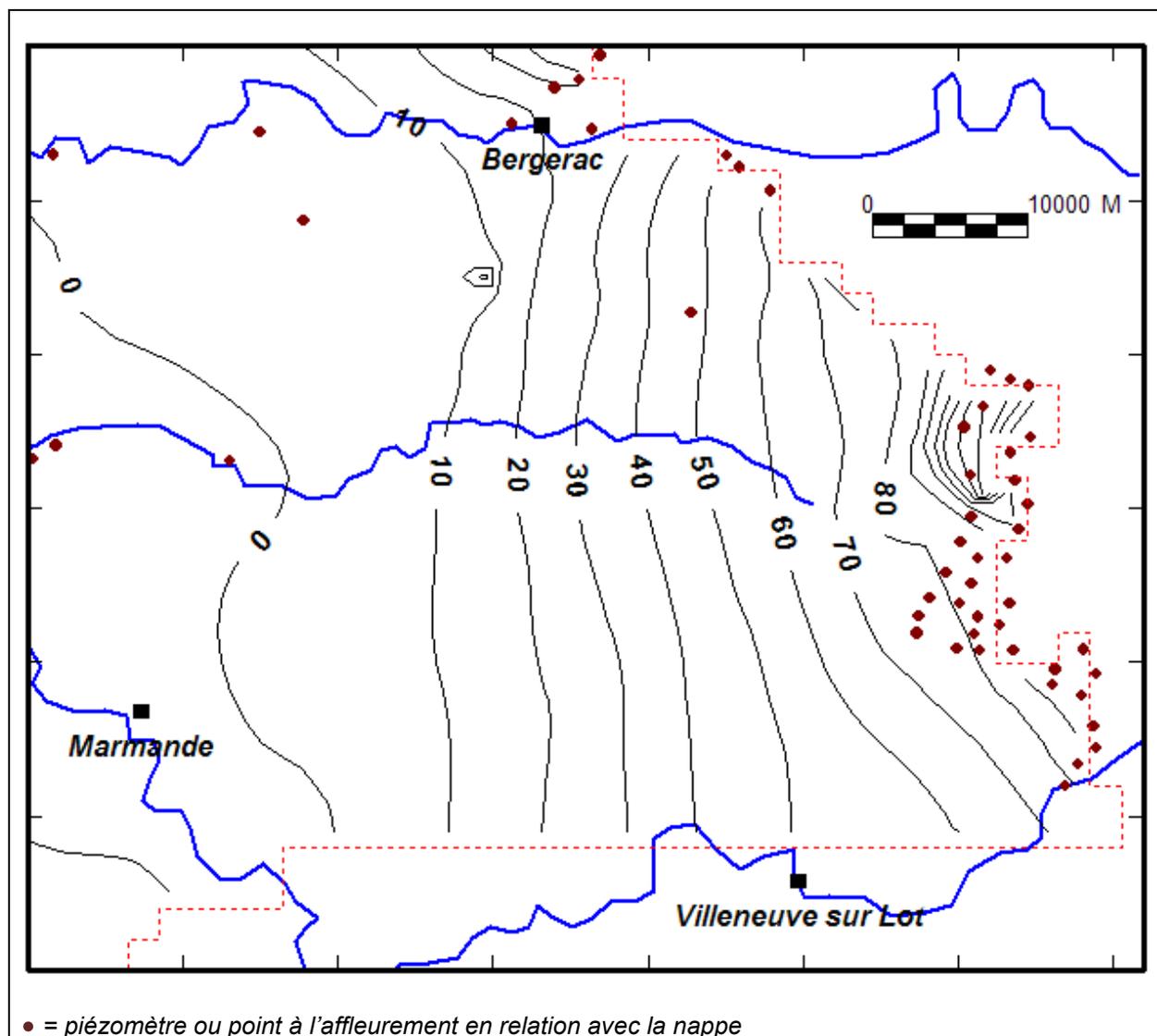


Figure 6: Isopièzes du modèle MONA. Limite sud de l'aquifère éocène nord aquitain. Année 2007

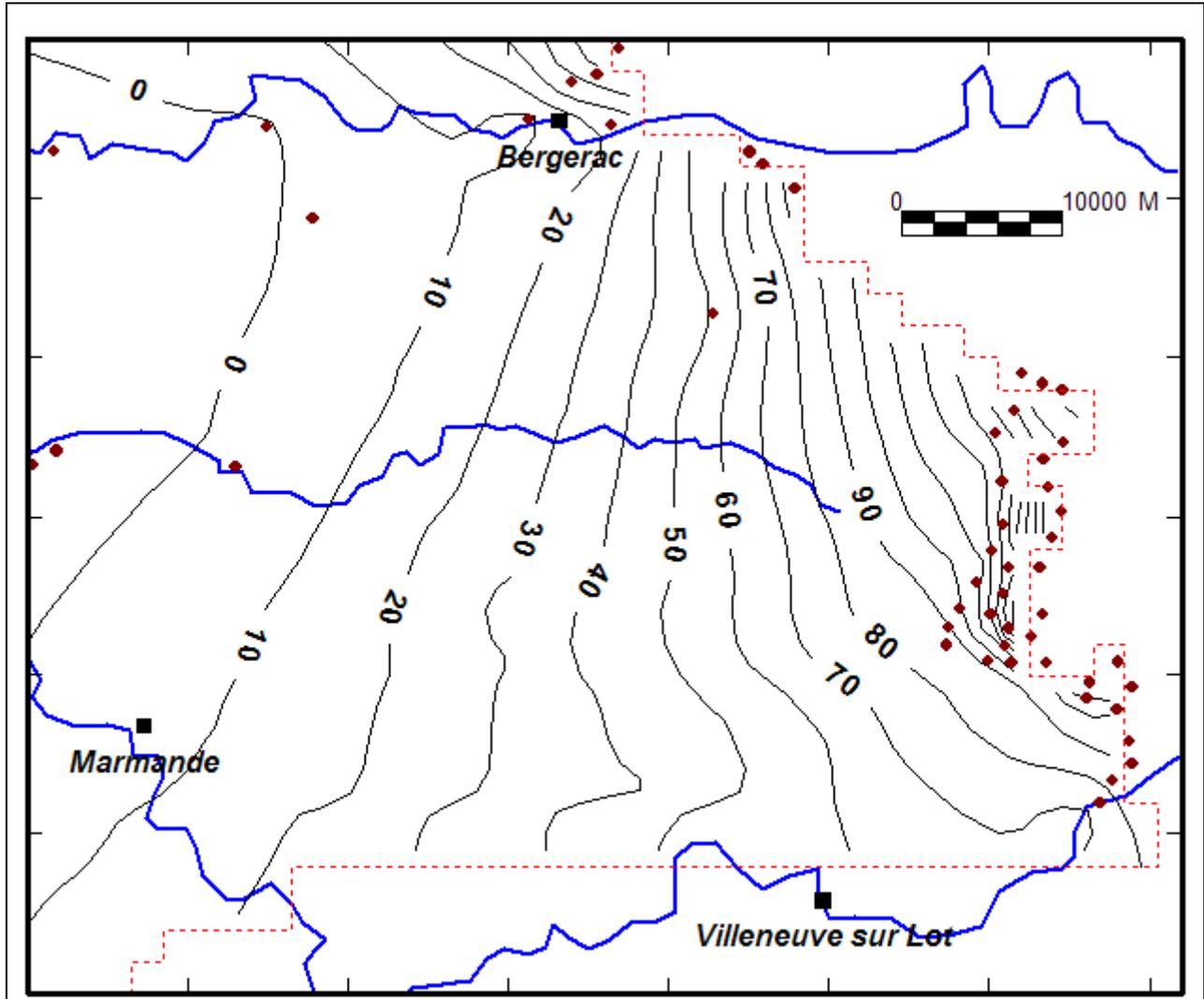


Figure 7: Isopièzes à partir de données de piézomètres + des points d'affleurement. Limite sud de l'aquifère éocène nord aquitain. Année 2007

Afin de mieux contraindre le tracé obtenu Figure 7, des conditions de flux nul ont été introduites sur la limite sud de l'aquifère.

Ainsi, 9 points de condition de flux nul ont été digitalisés le long de la limite. Les points et traits rouge sur la Figure 8 matérialisent la position des 9 points et l'orientation des isopièzes souhaitée en ces points (et dans la zone autour).

La nouvelle carte obtenue ainsi est plus conforme à ce que l'on peut attendre :

- isopièzes plus régulières et globalement perpendiculaires à la limite,
- courbe isopièze « 40 » plus conforme à celle du modèle MONA.

On note que dans la partie sud-ouest de la zone (autour de Marmande), les courbes isopièzes « 0 » et « 10 » ne sont pas du tout conformes à ce que l'on attendrait si l'on prend comme référence le modèle MONA. Ceci vient du fait qu'on ne dispose d'aucune donnée au sud-ouest et au sud de Marmande. Le calcul géostatistique s'effectue purement en extrapolation et donne un résultat de mauvaise qualité dans cette zone, alors que le modèle MONA est contraint par

les équations de l'hydrodynamique intégrant d'autres paramètres (notamment la géométrie de l'aquifère, les champs de perméabilités et d'emmagasinement (mêmes approximatifs) et les conditions de flux (entrées/sorties).

Ceci montre les limites de l'interpolation géostatistique lorsqu'on est en extrapolation : sans donnée, le résultat peut être de mauvaise qualité. Pour améliorer la qualité de l'interpolation dans la région de Marmande, il faudrait introduire des données complémentaires. Ce pourrait être par exemple le champ de perméabilité de la formation Eocène, que l'on pourrait prendre en compte comme une dérive externe. Il est théoriquement possible de combiner l'introduction d'une dérive externe et de données de gradient, mais nous n'avons pas testé cette possibilité faute de logiciel permettant d'introduire simultanément ces 2 contraintes.

La conclusion de ce test est donc la suivante :

- l'introduction de conditions aux limites peut améliorer très nettement l'interpolation (l'extrapolation) dans les zones où on dispose de peu de données,
- les conditions aux limites ne peuvent cependant pallier complètement le manque de données en extrapolation : en effet il faut au moins une donnée pour caler la valeur absolue du niveau de la nappe.

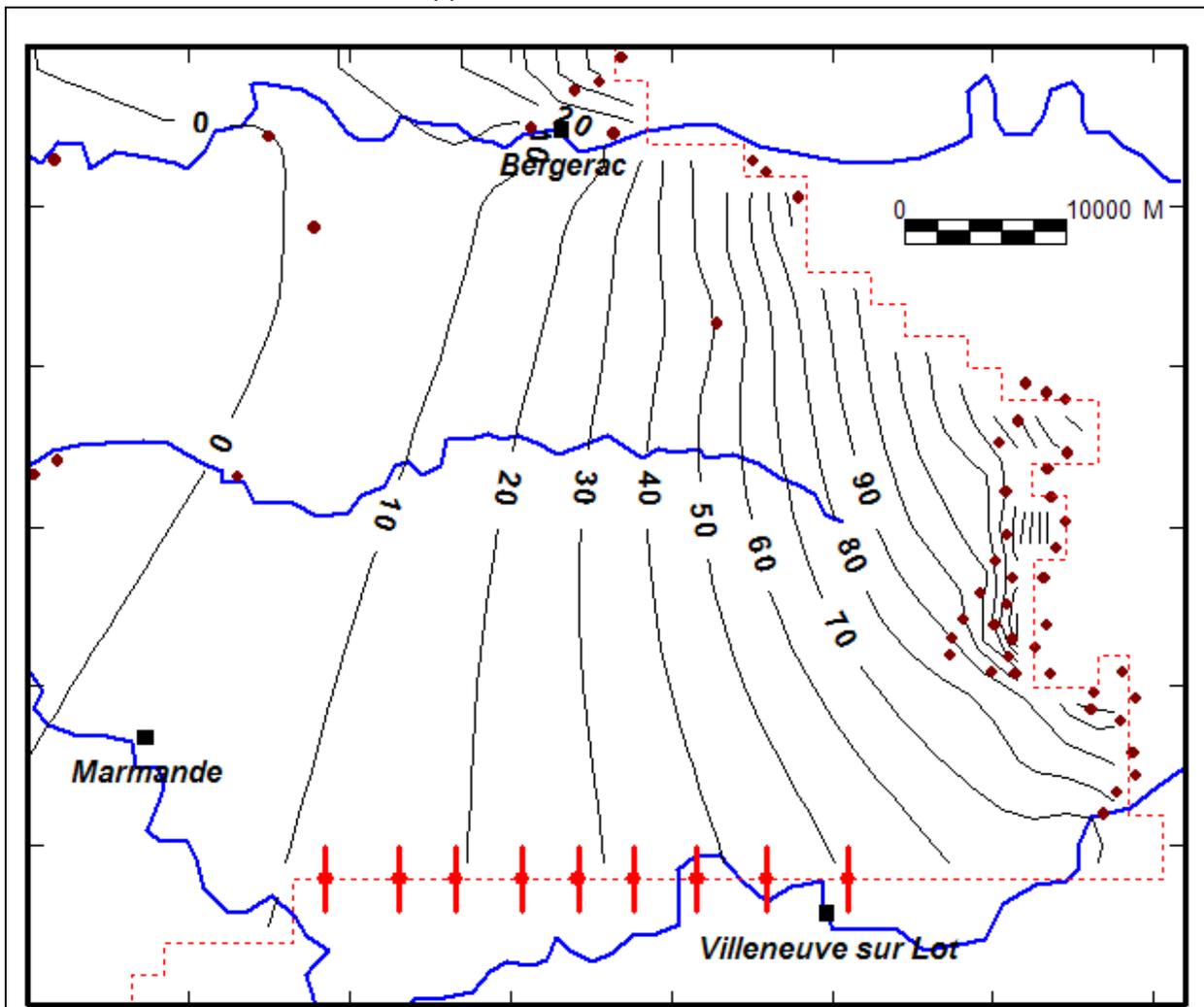


Figure 8: Isopièzes à partir de données de piézomètres + des points d'affleurement + des conditions aux limites. Limite sud de l'aquifère éocène nord aquitain. Année 2007

2.2.3. Application à la nappe de l'Éocène de la Gironde : crête piézométrique

Le test précédent concernait l'application de contraintes de direction en bordure de domaine. Nous avons testé également la possibilité d'utiliser les données de gradient dans une zone plus centrale. Nous avons choisi pour cela la crête piézométrique du Médoc située au nord-ouest de Bordeaux. La Figure 9 représente les isopièzes du modèle MONA obtenues dans cette zone.

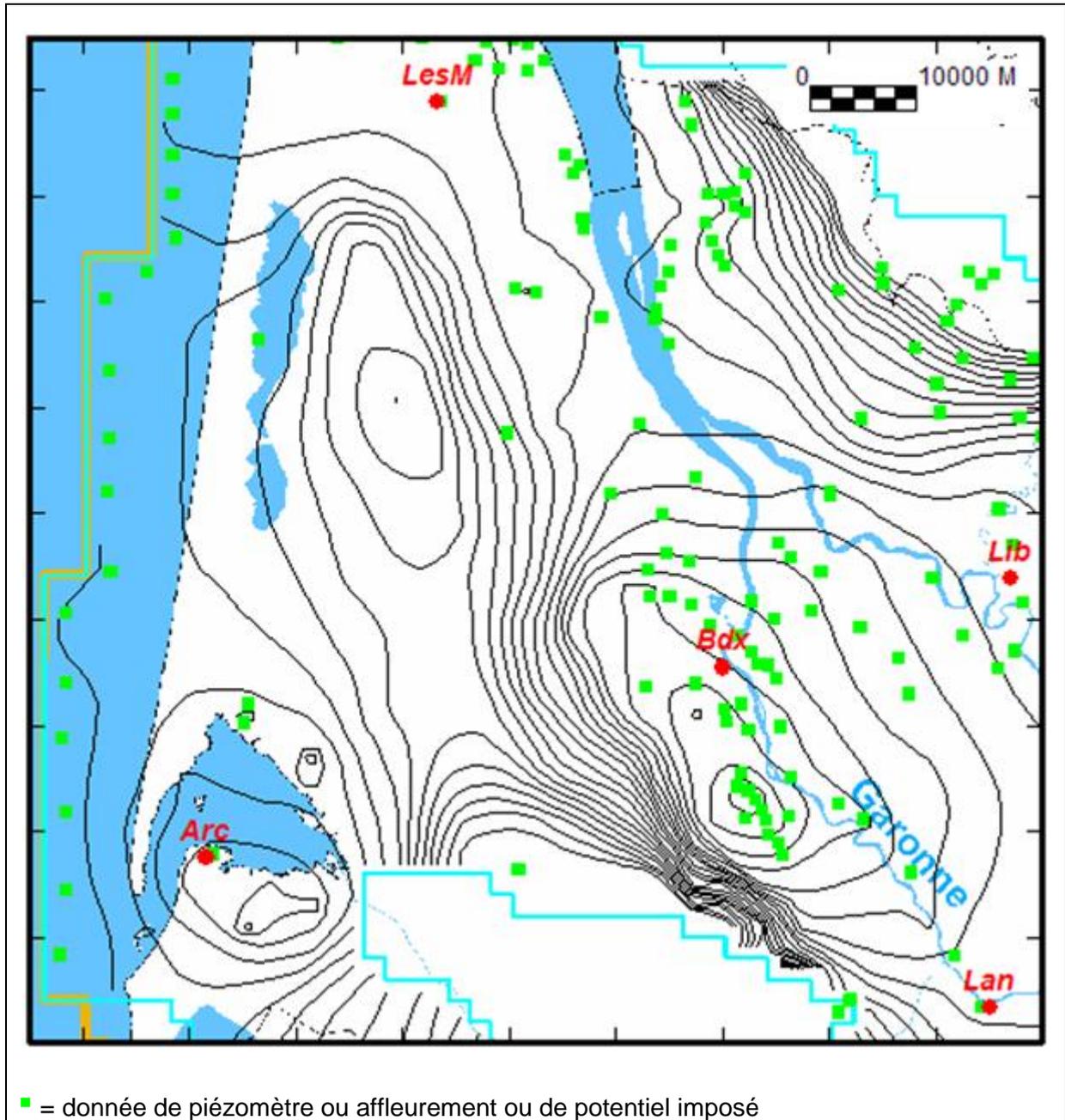


Figure 9: Isopièzes du modèle MONA . Crête piézométrique du Médoc. Nappe de l'Eocène nord aquitain. Année 2007

Le calcul direct par krigeage de la carte piézométrique à partir des données des piézomètres, des affleurements et de potentiel imposé conduit à la carte de la Figure 10 (dans cet exemple nous avons introduit des données de potentiel imposé identiques à celles qui étaient prises en

compte dans le modèle MONA, ces données étant celles visibles le long de la limite ouest du modèle – points situés en mer).

Cette figure montre que la crête piézométrique est globalement reproduite. Toutefois on note une grande instabilité dans le tracé des courbes isopièzes notamment dans la zone située à mi-distance des villes d'Arcachon (Arc) et Lesparre-Médoc (LesM). Cette instabilité vient probablement d'un mauvais conditionnement par manque de données dans la zone.

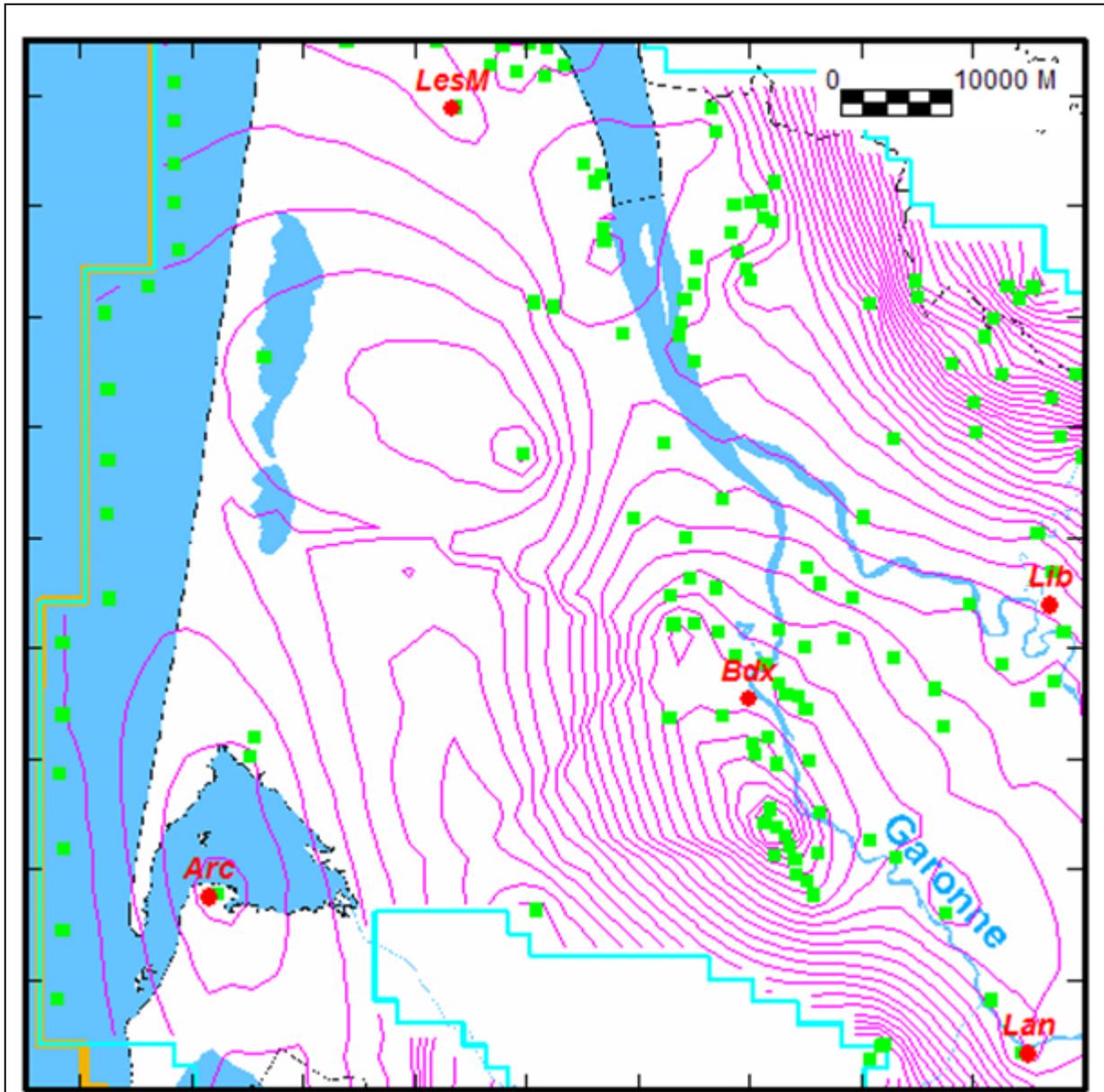


Figure 10: Isopièzes à partir des données seules. Crête piézométrique du Médoc. Nappe de l'Eocène nord aquitain. Année 2007

Si l'on introduit les données supplémentaires apportées par la connaissance d'une crête piézométrique dans ce secteur, on obtient le résultat de la Figure 11. Sur cette figure on a matérialisé la ligne de crête, ainsi que les vecteurs orthogonaux correspondant aux contraintes de direction imposées aux isopièzes.

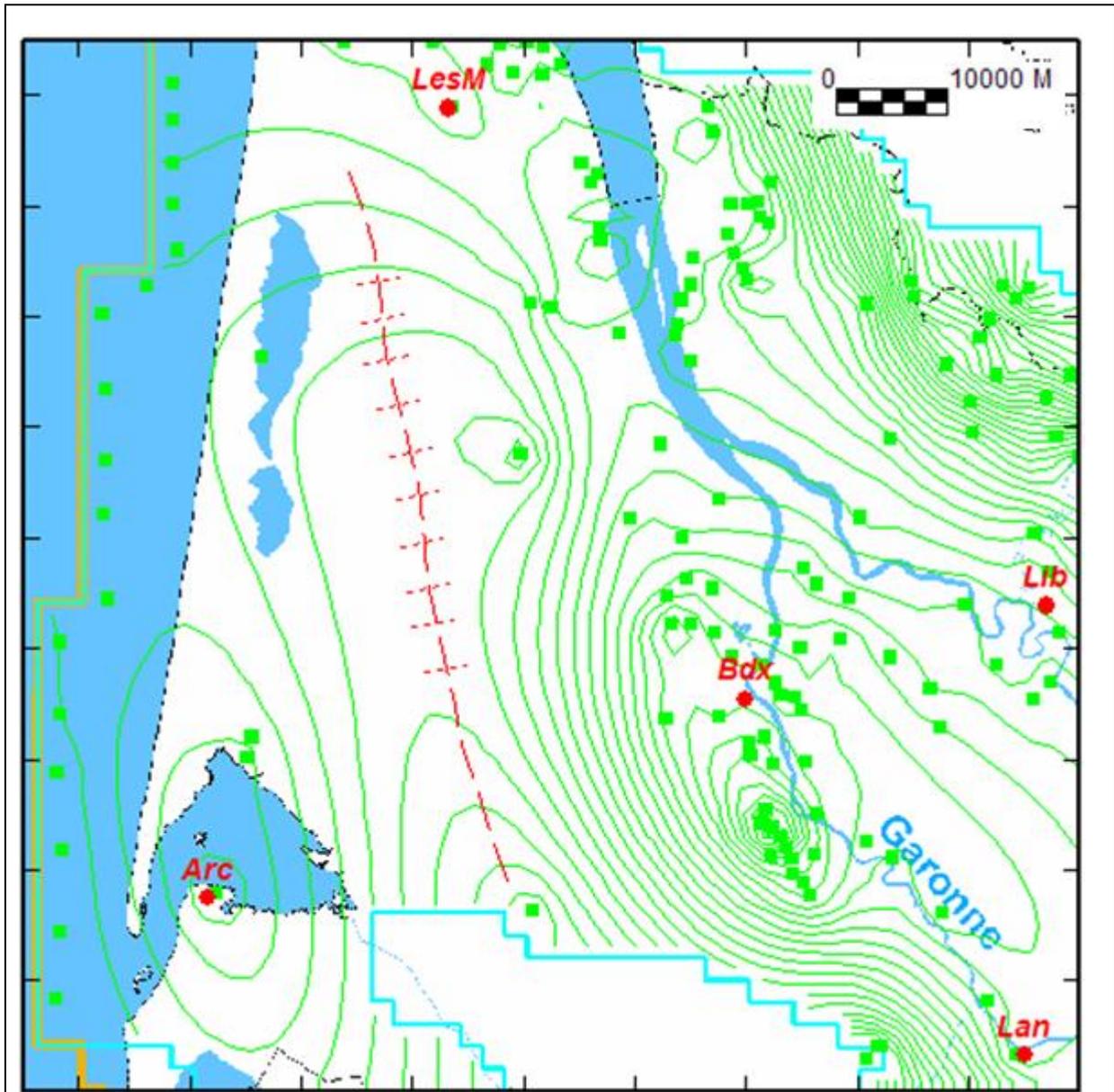


Figure 11: Isopièzes à partir des données + conditions de flux nul. Crête piézométrique du Médoc. Nappe de l'Eocène nord aquitain. Année 2007

Le résultat obtenu Figure 11 paraît beaucoup plus conforme à ce qui est attendu. Une différence significative peut cependant être observée au sud de la dépression de Bordeaux où les courbes sont beaucoup plus resserrées dans la carte issue de MONA.

Ceci est dû à l'absence d'information dans cette zone, alors que MONA intègre la géométrie, les champs de perméabilité et d'emmagasinement, et conditions de flux (entrées/sorties). Si on ajoute aux données le piézomètre 08512X0001 (non mesuré en 2007) on obtient la carte de la Figure 12, qui se rapproche bien de celle obtenue par le modèle MONA.

Encore une fois l'introduction de conditions aux limites permet d'améliorer le tracé mais ne dispense pas d'avoir des mesures aux endroits « stratégiques ».

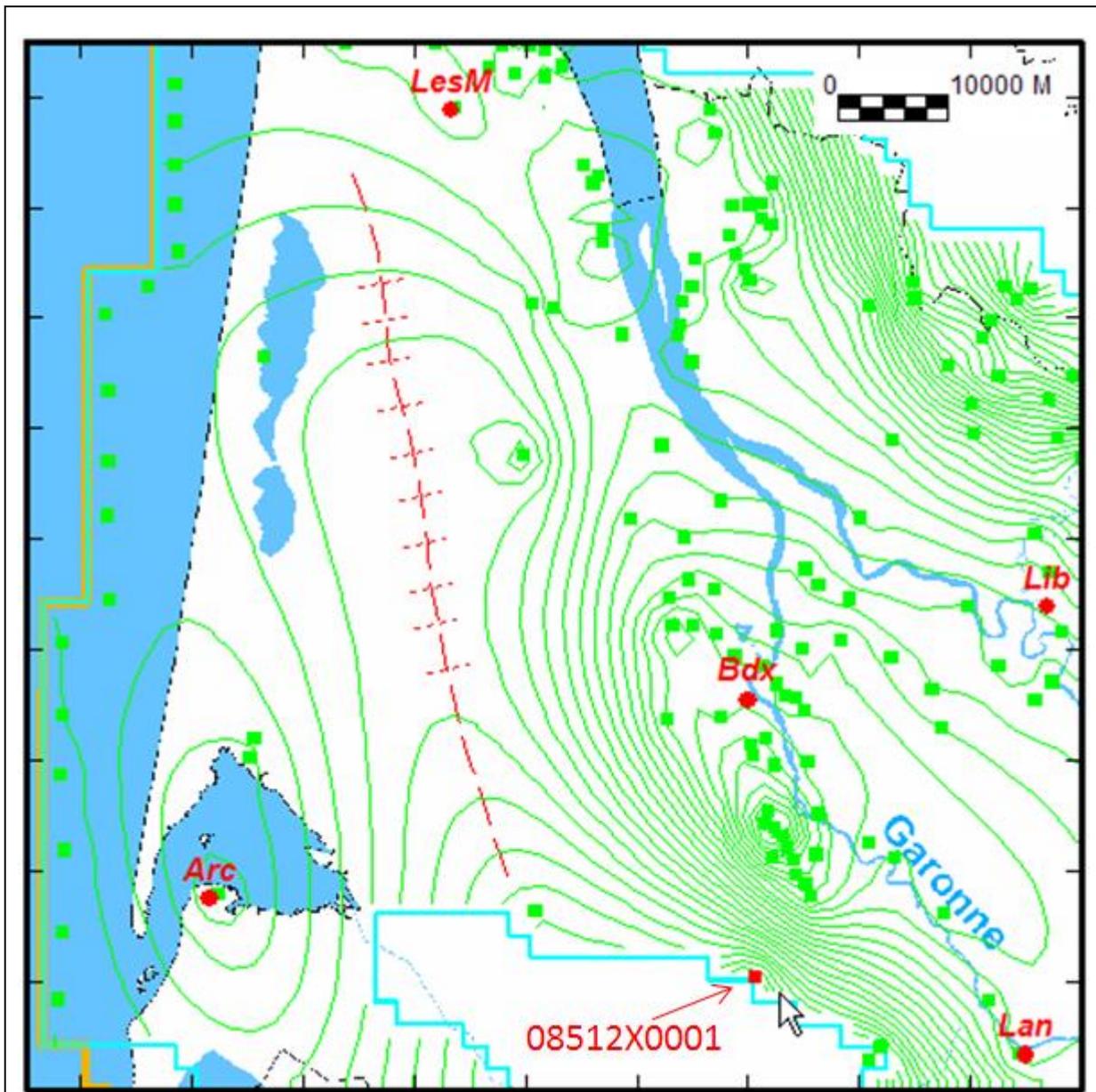


Figure 12: Isopièzes à partir des données + conditions de flux nul+ piézomètre 08512X0001. Crête piézométrique du Médoc. Nappe de l'Eocène nord aquitain. Année 2007

3. Raccord de deux modèles géostatistiques dans la transition libre-captif

Lorsque la cartographie concerne un secteur dans lequel la nappe passe de l'état libre à captif, il peut être indispensable de réaliser deux traitements géostatistiques distincts. En effet si le comportement de la nappe est différent en zone libre et en zone captive, il faudra adapter les traitements géostatistiques en fonction du domaine concerné.

Sur le plan géostatistique, la différence de comportement de l'aquifère se traduit par un comportement différent du variogramme des données « nappe libre » d'une part, et « nappe captive » d'autre part.

La figure suivante illustre le comportement du variogramme de la cote piézométrique de la nappe de l'Eocène du nord du Bassin aquitain. On a reporté sur un même graphique le variogramme des cotes piézométriques des piézomètres situés en zone captive (en rouge), et celui des ouvrages situés en nappe libre complétés des données d'affleurements (en noir, légende « Affleurements »).

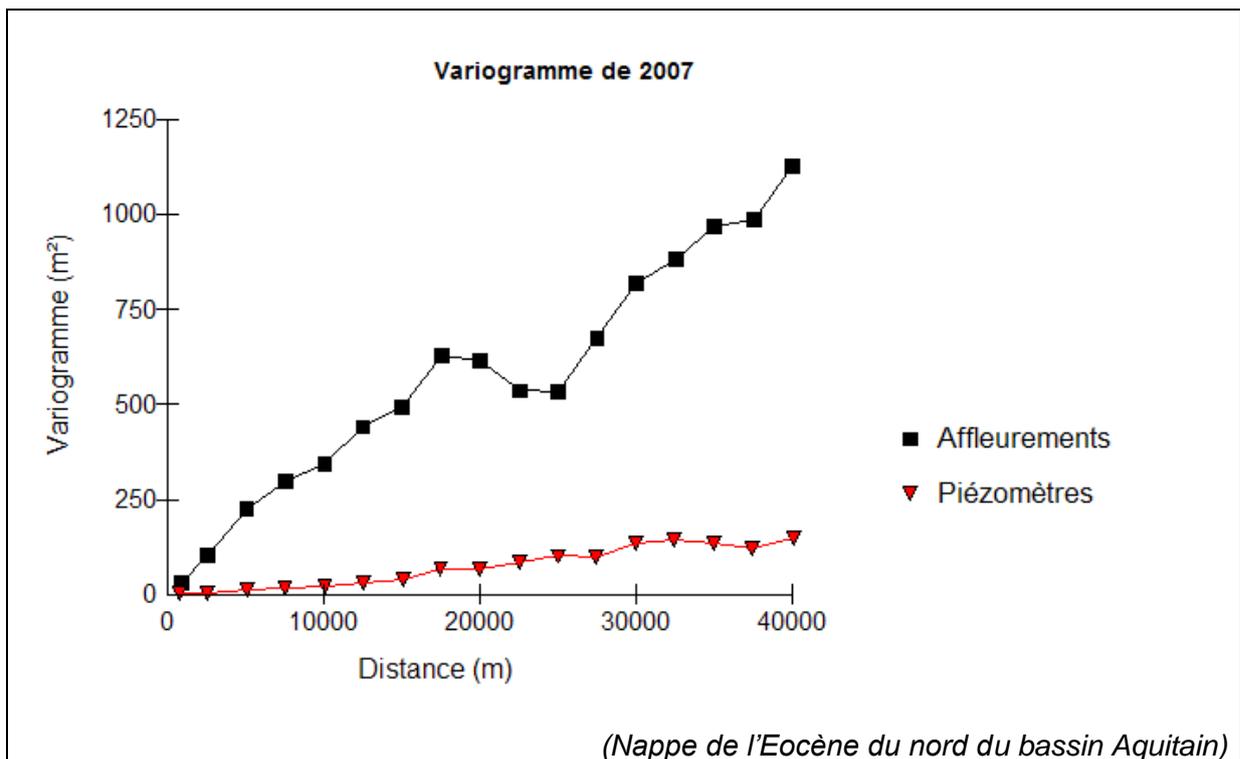


Figure 13: Variogrammes bruts des données en zone captive ("Piézomètres") et des données en zone libre ("Affleurements")

On note que les valeurs du variogramme sont nettement plus élevées dans les zones d'affleurement, ce qui correspond à une variabilité plus importante de la nappe en zone libre.

À première vue il n'est pas envisageable d'interpoler conjointement les données des deux types du fait de comportements très différents en terme d'amplitude de variation.

En effet si les données sont mélangées et qu'on calcule le variogramme global toutes données confondues, les données d'affleurement vont l'emporter, ce qui conduira à des biais principalement sur le calcul en nappe captive, en particulier sur l'évaluation de l'écart-type d'interpolation qui sera alors surestimé (du moins dans le cas de la figure ci-dessus).

Toutefois, dans le cas présent, on se trouve malgré tout dans une situation relativement favorable. En effet si l'on calcule chaque variogramme en le normant par la variance des données utilisées pour le calcul (« variogramme normé »), on constate que les deux variogrammes se retrouvent quasiment confondus, au moins jusqu'à une distance de 15 km.

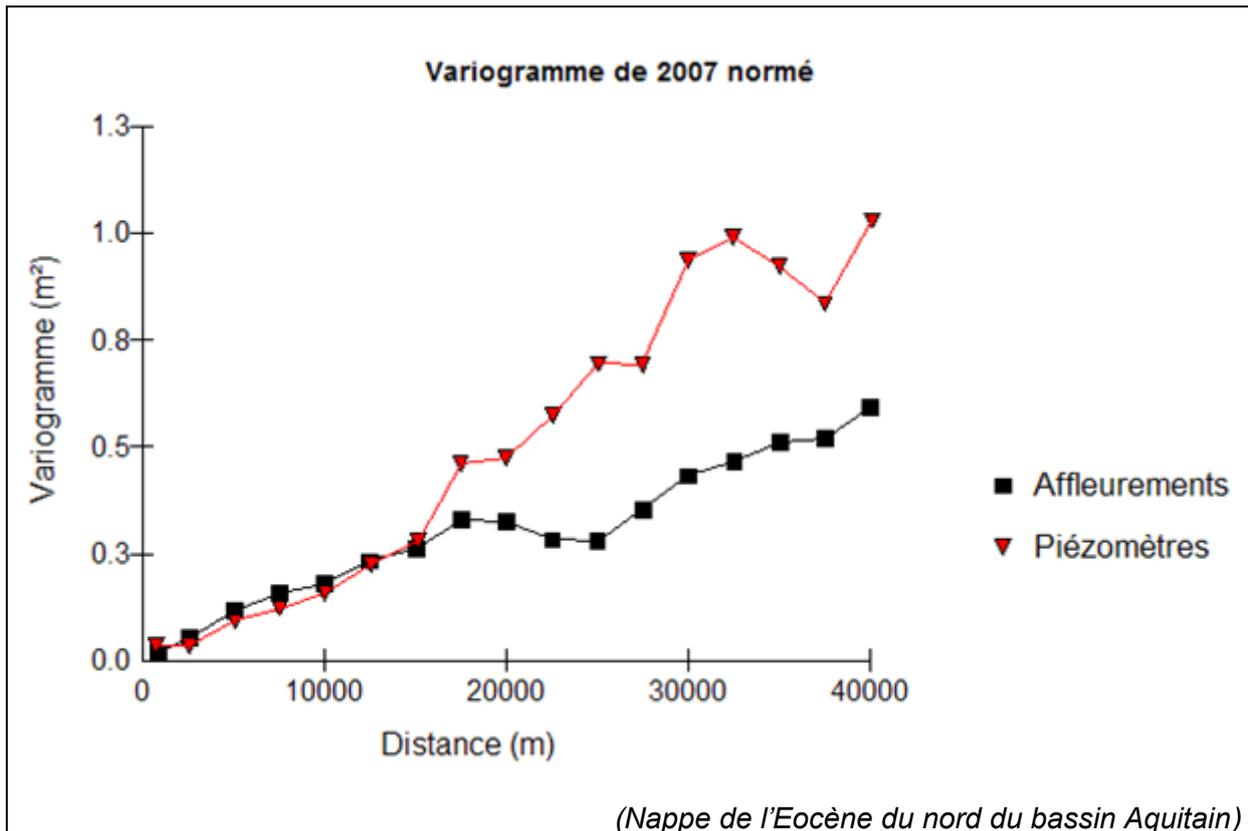


Figure 14: Variogrammes normés des données en zone captive ("Piézomètres") et des données en zone libre ("Affleurements")

3.1. CAS DE VARIOGRAMMES PROPORTIONNELS

Dans le cas de variogrammes proportionnels (à la variance) il est possible de réaliser la cartographie en utilisant un modèle de variogramme calé sur les variogrammes expérimentaux normés (le variogramme de la Figure 14). Les valeurs interpolées ainsi seront correctes, mais pas l'écart-type d'interpolation. Il faudra multiplier l'écart-type d'interpolation par l'écart-type des données locales afin d'obtenir une valeur plus réaliste. Pour effectuer ce traitement dans un logiciel de géostatistique il faut :

- pouvoir calculer séparément le variogramme des données en zone libre et en zone captive et normer ces variogrammes. Si l'outil géostatistique ne dispose pas de l'option de normation des variogrammes, on pourra toujours créer une variable égale à la cote piézométrique divisée par l'écart-type des données correspondantes,

- ajuster les variogrammes normés par un modèle unique,
- réaliser l'interpolation avec ce modèle,
- puis multiplier l'écart-type de krigeage obtenu par l'écart-type des données du voisinage. En général, celui-ci peut être calculé dans les SIG qui disposent de fonctions permettant de calculer l'écart-type dans une fenêtre glissante.

3.2. CAS DE VARIOGRAMMES NON PROPORTIONNELS

Dans le cas où les variogrammes expérimentaux ne sont pas proportionnels, on peut procéder de différentes façons pour obtenir une meilleure cartographie :

- effectuer deux calculs indépendants (un en zone libre, un en captif, avec les modèles de variogrammes correspondants) puis les raccorder de façon appropriée,
- effectuer un seul calcul, mais avec un modèle de variogramme qui varie de façon progressive de la zone captive à la zone libre.

Plus précisément ces deux méthodes nécessitent les étapes suivantes :

- effectuer deux calculs puis les raccorder :
 - o un calcul est effectué en zone nappe libre, avec le variogramme des données de nappe libre et les données de la nappe libre + les données de nappe captive situées dans la zone de recouvrement,
 - o un calcul est effectué en zone nappe captive, avec le variogramme des données de nappe captive et les données de la nappe captive + quelques données d'affleurement dans la zone de recouvrement,
 - o chaque estimation est effectuée en réalité sur une zone un peu plus grande de façon à obtenir une zone de recouvrement correspondant à la zone de transition libre-captif,
 - o dans la zone de recouvrement on effectue un post traitement pour raccorder de façon continue les deux interpolations.
- effectuer un calcul « glissant » avec un modèle de variogramme variant de façon continue :
 - o dans ce cas les données sont « mélangées » mais en chaque point ou nœud de grille à interpoler on utilise un modèle de variogramme local,
 - o ce modèle de variogramme local doit avoir été calé au préalable à partir du variogramme expérimental calculé sur les données locales.

La seconde méthode permet en théorie de s'adapter au mieux aux propriétés et variabilité locales de l'aquifère. Toutefois cette technique, dite de « moving geostatistics » (pour « géostatistique glissante »), n'est pas disponible dans la plupart des logiciels courants de géostatistique. Par ailleurs tout repose sur la qualité de l'ajustement du modèle de variogramme local et sur la représentativité du variogramme expérimental local, qu'il n'est pas toujours facile de vérifier / contrôler. En effet les phases de calcul et ajustement du variogramme sont réalisées de façon automatique et l'intervention de l'utilisateur n'est pas toujours possible. Il est

également envisageable de diviser manuellement la zone d'intérêt en un certain nombre de sous-zones, de calculer puis ajuster le variogramme dans chaque sous-zone, puis d'interpoler les paramètres du modèle de variogramme de façon à obtenir un modèle de variogramme qui varie de façon continue d'un point à l'autre.

La première méthode (deux calculs séparés puis raccordés) permet en général d'obtenir un résultat satisfaisant en première approximation. Cette méthode peut être utilisée dans un logiciel géostatistique « standard » en réalisant deux interpolations séparées, à condition que ce logiciel soit ensuite capable de combiner les deux interpolations, ce qui suppose qu'il dispose d'une « calculatrice » élémentaire pour combiner deux grilles.

La combinaison des 2 interpolations est alors effectuée de façon à passer progressivement de l'interpolation en zone captive à l'interpolation en zone libre, via une pondération linéaire :

- soit P_c^* le niveau piézométrique calculé dans la partie captive (+ zone de recouvrement)
- soit P_l^* le niveau piézométrique calculé dans la partie libre (+ zone de recouvrement)
- le niveau piézo P^* final sera calculé comme (cf croquis ci-dessous) :
 - o $P^* = P_c^*$ dans la partie strictement captive
 - o $P^* = P_l^*$ dans la partie strictement libre
 - o $P^* = \frac{P_c^* \cdot (d-x) + P_l^* \cdot x}{d}$ dans la zone de transition
 - o x étant la distance à la limite de la partie strictement captive et d la largeur de la zone de transition (zone de raccordement) captif – libre

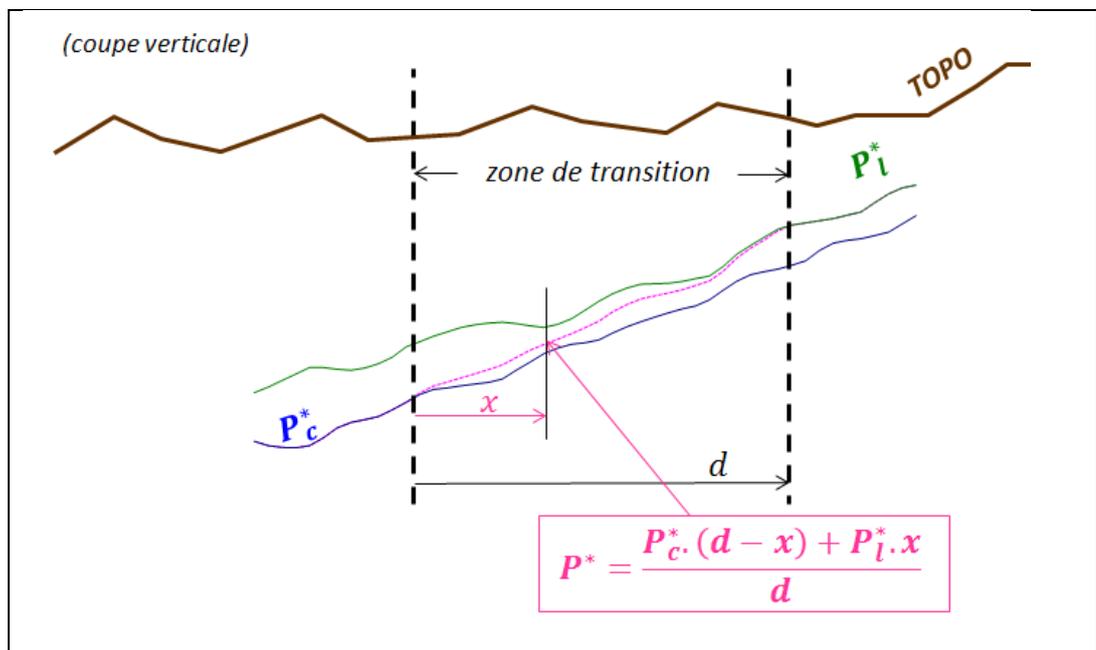


Figure 15: Raccordement des deux interpolations dans la zone de recouvrement (coupe verticale) par pondération linéaire dépendant des distances

Le calcul des distances x et d peut être effectué à l'aide d'opérations dans un SIG (système d'information géographique).

Dans le cas particulier où l'on peut considérer que le passage libre-captif se fait entre deux altitudes fixes Z_1 et Z_2 on peut également pondérer les deux interpolations en effectuant un raccord linéaire entre les deux valeurs de Z :

$$P^* = P_c^* \cdot \frac{(Z_2 - P_c^*)}{Z_2 - Z_1} + P_l^* \cdot \frac{(P_c^* - Z_1)}{Z_2 - Z_1}$$

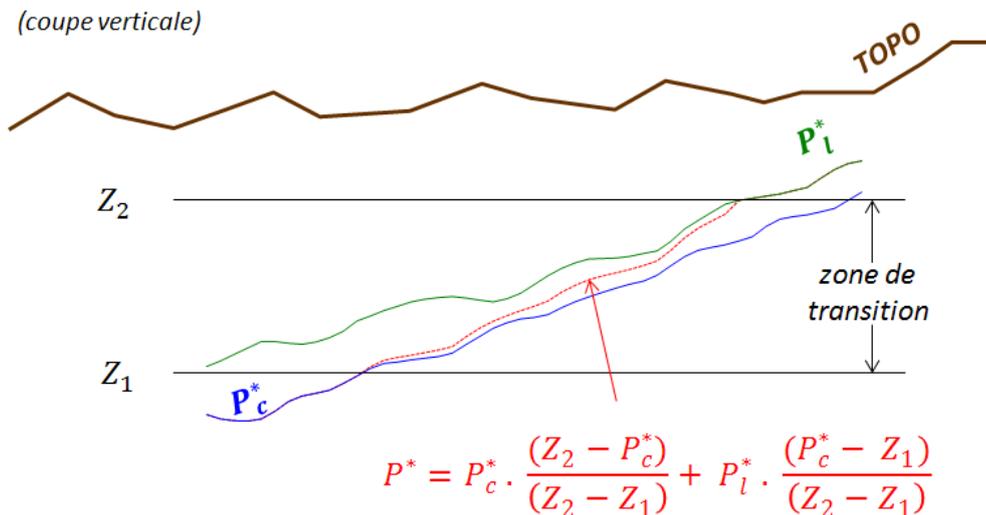


Figure 16: Raccordement des deux interpolations dans la zone de recouvrement (coupe verticale) par pondération linéaire dépendant de la valeur de Z

Les écarts-types d'interpolation seront pondérés de façon similaire.

3.3. APPLICATION À LA NAPPE DE L'ÉOCÈNE NORD AQUITAIN

À titre d'exemple nous allons illustrer la méthode de raccordement par pondération linéaire fonction des distances.

Tout d'abord il convient de définir la limite entre nappe libre et nappe captive. Cette limite est visualisée en rouge sur la Figure 17.

En réalité la limite réelle passe plus près des affleurements, mais nous l'avons saisie ainsi pour les besoins de l'exemple.

Dans un second temps il faut définir la largeur de la transition entre nappe libre et nappe captive. Dans l'exemple proposé ici nous l'avons choisie d'une largeur de $d=10$ km.

Ensuite il faut calculer les coefficients qui permettent de réaliser les raccords linéaires entre les deux interpolations, c'est-à-dire les coefficients $(d-x)/d$ et x/d mentionnés Figure 15.

Le coefficient $(d-x)/d$ correspond au poids attribué à l'interpolation des données de nappe captive et varie de 1 (en limite de zone de transition côté nappe captive) à 0 (en limite de zone de transition côté nappe libre).

Ainsi la Figure 18 représente les variations du coefficient $(d-x)/d$, la couleur rouge représentant les valeurs proches de 1 et la couleur bleu celles proches de 0.

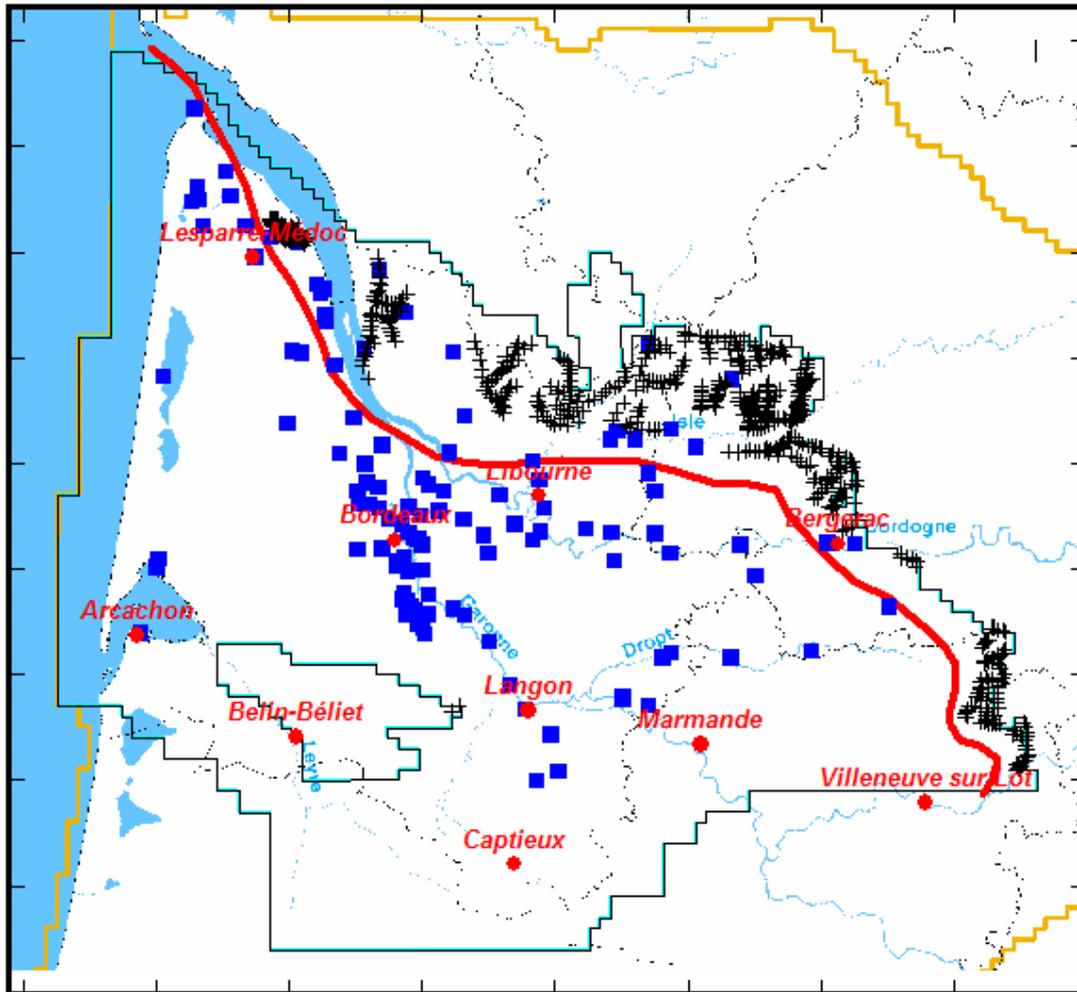


Figure 17: Limite (fictive et approximative) entre nappe libre et nappe captive. Nappe de l'Eocène, année 2007

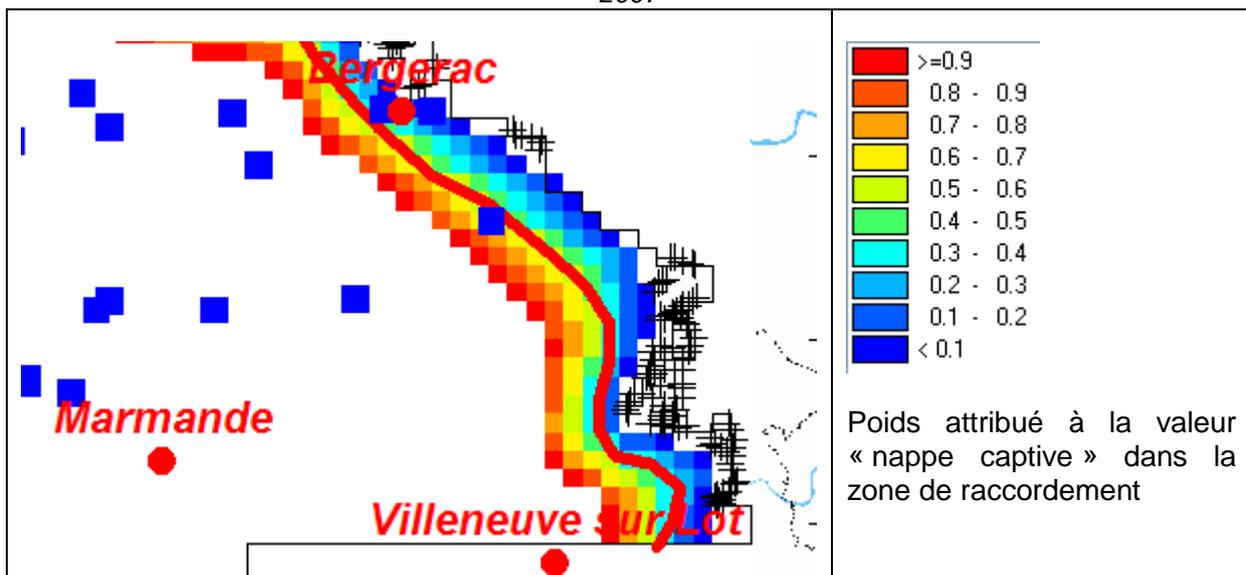


Figure 18: Visualisation du poids attribué à l'interpolation "nappe captive" dans la zone de raccordement captif-libre

Ces coefficients déterminés, on calcule le variogramme des données en nappe libre et de données en nappe captive (figure 19).

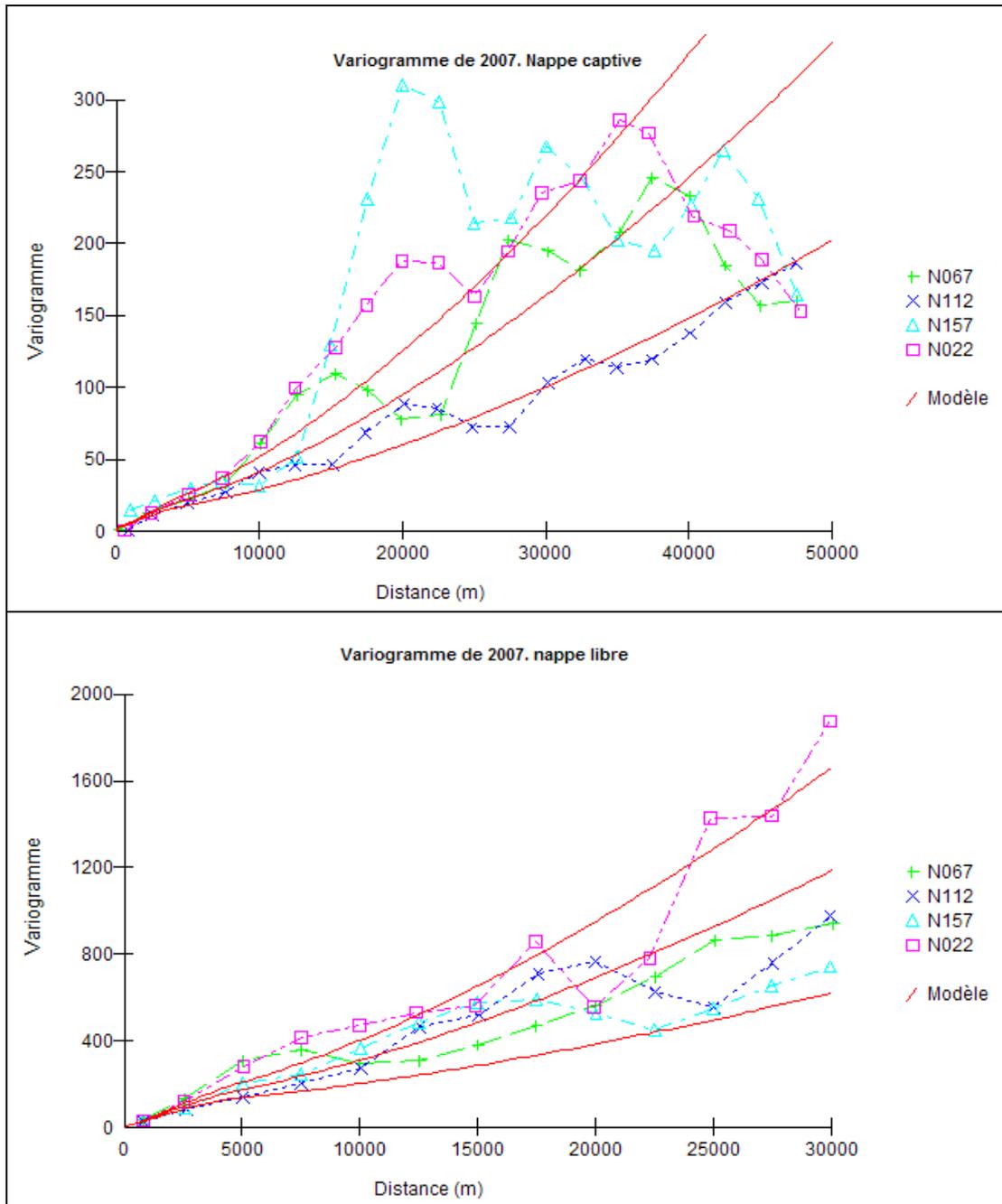


Figure 19: Variogrammes des données pour la nappe captive (en haut) et la nappe libre (en bas)

Les interpolations de la cote piézométrique sont ensuite réalisées dans chaque domaine agrandi de la zone de recouvrement. Les pondérations des deux interpolations sont ensuite réalisées dans la zone de raccordement. La pondération est effectuée également sur les écarts-types.

Dans le cas présents les variogrammes sont quasiment proportionnels et pour l'interpolation des données en nappe captive, nous avons également pris en compte les données de nappe libre situées en zone de transition (et réciproquement). Les interpolations elles-mêmes se raccordent donc presque. Par contre les écarts-types sont assez différents d'une zone à l'autre

du fait de la grande différence des valeurs de variogramme (voir les échelles sur l'axe Y des courbes de la Figure 19).

La Figure 20 illustre le résultat du raccordement sur une coupe SW-NE située au nord de Bordeaux.

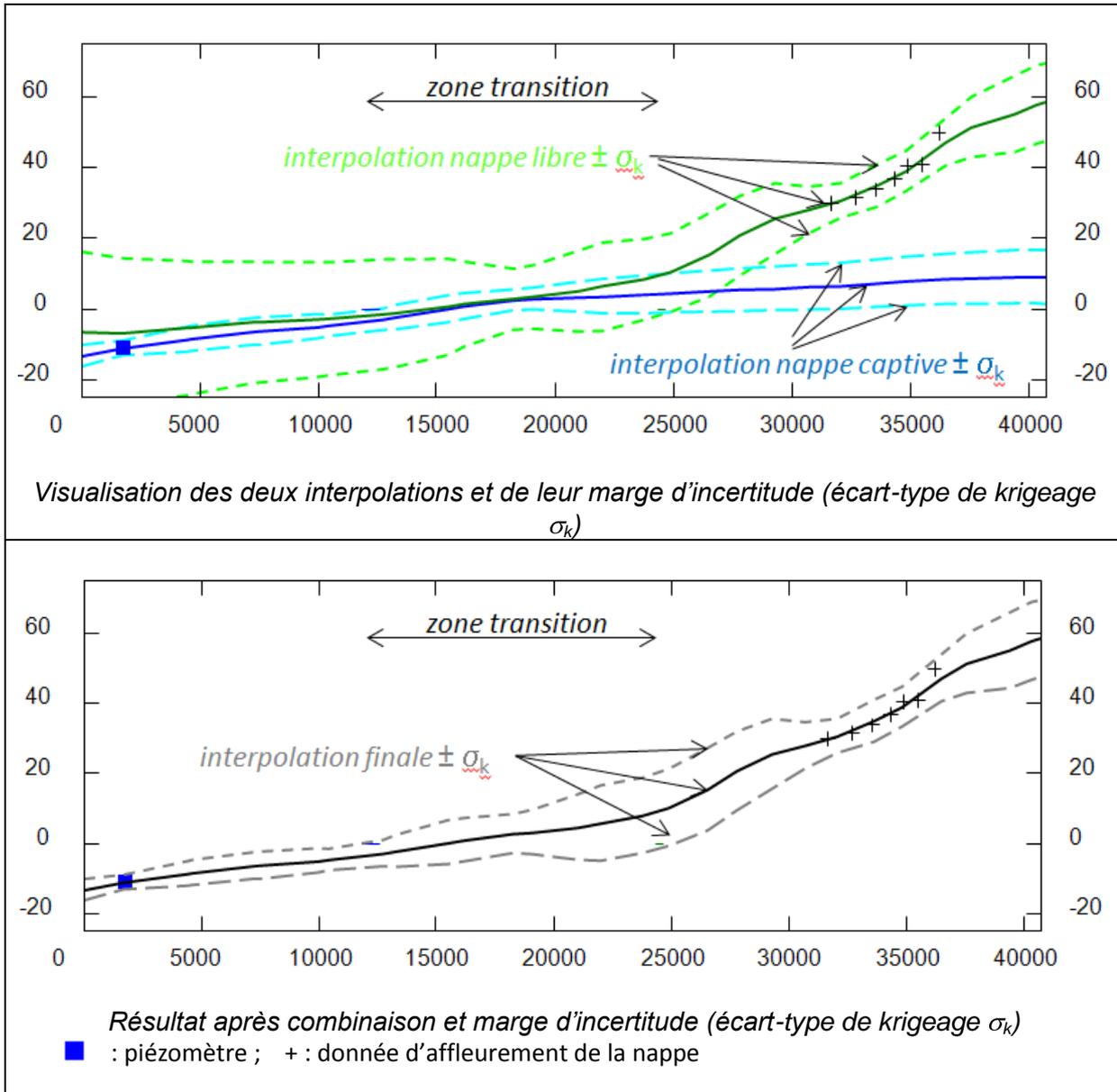


Figure 20: Résultat de la combinaison de deux interpolations

4. Calcul de différence de niveaux piézométriques entre deux années consécutives et incertitude associée

Pour calculer la différence entre deux années consécutives $n-1$ et n des niveaux piézométriques $P_n(x)$ et $P_{n-1}(x)$ ainsi que l'incertitude associée à cette différence plusieurs méthodes sont possibles :

- Krigeage direct de la différence $D(x) = P_n(x) - P_{n-1}(x)$ entre deux situations. On obtient comme résultat le krigeage $D(x)$ et la variance d'erreur associée,
- (co)-krigeage de chaque situation et calcul de la différence entre les deux (co)-krigeages. On obtient comme résultats les deux co-krigeages $P_n^*(x)$ et $P_{n-1}^*(x)$ dont on déduit la différence : $D^*(x) = P_n^*(x) - P_{n-1}^*(x)$

Ces deux méthodes présentent les caractéristiques suivantes :

- Krigeage de la différence entre deux situations :
 - Avantage : calcul direct, l'incertitude peut être obtenue directement. Cette méthode est plus simple à mettre en œuvre,
 - Inconvénient : on ne peut calculer la différence $D(x) = P_n(x) - P_{n-1}(x)$ que pour les piézomètres mesurés à la fois à l'année $n-1$ et à l'année n . On ne peut donc pas prendre en compte les points où la mesure n'est disponible qu'à une seule des deux situations, ce qui peut réduire le nombre de points pris en compte,
 - Cette méthode est à privilégier si la grande majorité des mesures sont disponibles aux deux dates.
 - (co) krigeage de chaque situation puis calcul des différences :
 - Avantage : on dispose de plus de points car on peut utiliser les piézomètres qui ne sont mesurés qu'à l'année $n-1$ ou qu'à l'année n ,
 - Inconvénient : le calcul d'erreur est délicat voire impossible. En effet, les erreurs de chaque interpolation sont corrélées et pour calculer la variance de l'erreur d'interpolation sur la différence entre deux interpolations, il faut évaluer le coefficient de corrélation entre les deux erreurs d'estimation. Or ce coefficient n'est pas calculé par les logiciels habituels. Si on le connaissait, on pourrait calculer la variance d'estimation de la différence, $\sigma_D^2(x)$, par l'expression :
 - $$\sigma_D^2(x) = \sigma_{P_n(x)}^2 + \sigma_{P_{n-1}(x)}^2 - 2 \cdot \rho_{EP_n(x), EP_{n-1}(x)} \cdot \sigma_{P_n(x)} \cdot \sigma_{P_{n-1}(x)}$$
- Avec :
- $\sigma_{P_n(x)}^2$ = variance de krigeage de $P_n(x)$; $\sigma_{P_n(x)}$ = écart-type de krigeage
 - $\sigma_{P_{n-1}(x)}^2$ = variance de krigeage de $P_{n-1}(x)$
 - $\rho_{EP_n(x), EP_{n-1}(x)}$ = coefficient de corrélation entre $EP_n(x)$ (erreur d'estimation de $P_n(x)$) et $EP_{n-1}(x)$ (idem pour $P_{n-1}(x)$)

4.1. EXEMPLE DE MISE EN ŒUVRE DE CALCUL D'INCERTITUDE SUR LA DIFFÉRENCE ENTRE DEUX SITUATIONS.

Cet exemple est donné pour la nappe de l'Eocène nord aquitain, au cœur de la zone Centre du SAGE Nappes Profondes de Gironde (entre Bordeaux, Libourne et Langon).

Le calcul est réalisé entre l'année 2009 et l'année 2007. En 2007, on dispose de 119 piézomètres et en 2009 de 197. Parmi ces piézomètres, 115 disposent d'une mesure à la fois en 2007 et en 2009 et peuvent ainsi être exploités pour le calcul direct des différences.

Le variogramme est calculé sur les données de piézomètres uniquement (principalement en zone captive).

Le variogramme expérimental moyen (toutes directions confondues) est ajusté :

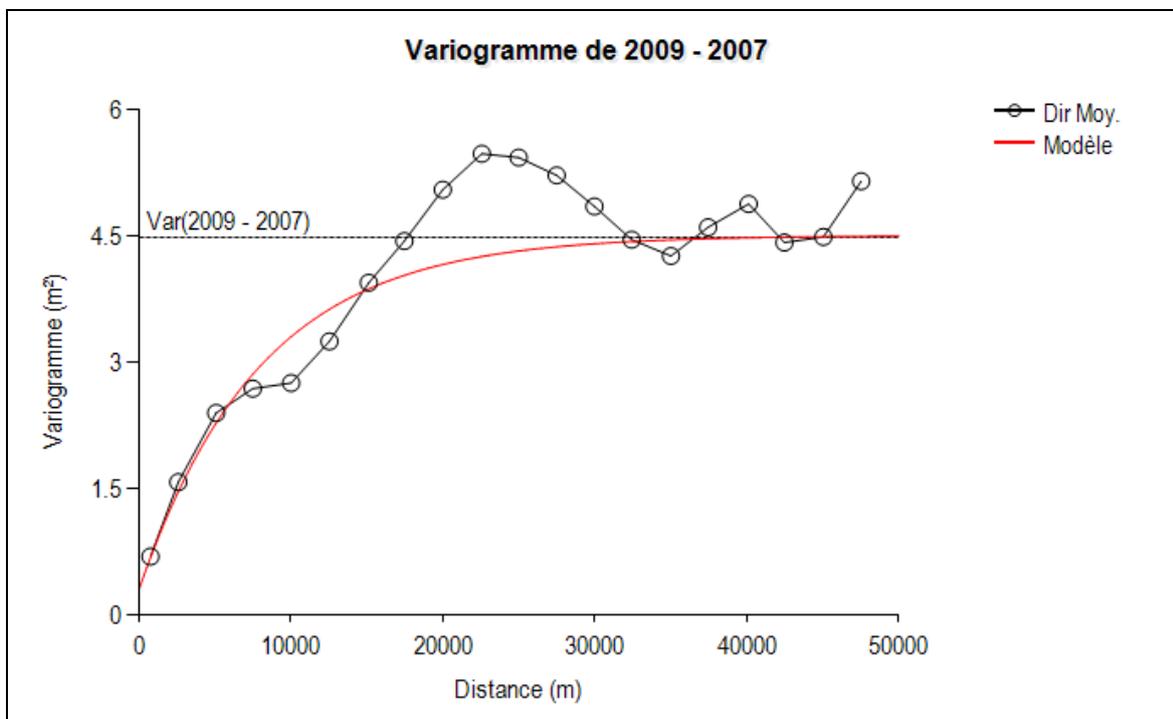


Figure 21: Variogramme de la différence de cote piézométrique 2009 - 2007

Ce variogramme permet l'interpolation de la différence de cote piézométrique (Figure 22, partie supérieure), ainsi que de l'écart-type d'estimation associé (Figure 23).

À titre de comparaison on réalise également un co-krigeage de la situation 2007 en utilisant les données de 2007 et de 2009, puis un co-krigeage de la situation 2009 en utilisant ces mêmes données. Ensuite on calcule la différence de façon à obtenir une autre valeur de la différence entre les deux années (Figure 22, partie inférieure).

Malheureusement comme signalé précédemment il n'est pas possible de connaître la carte d'incertitude sur cette différence.

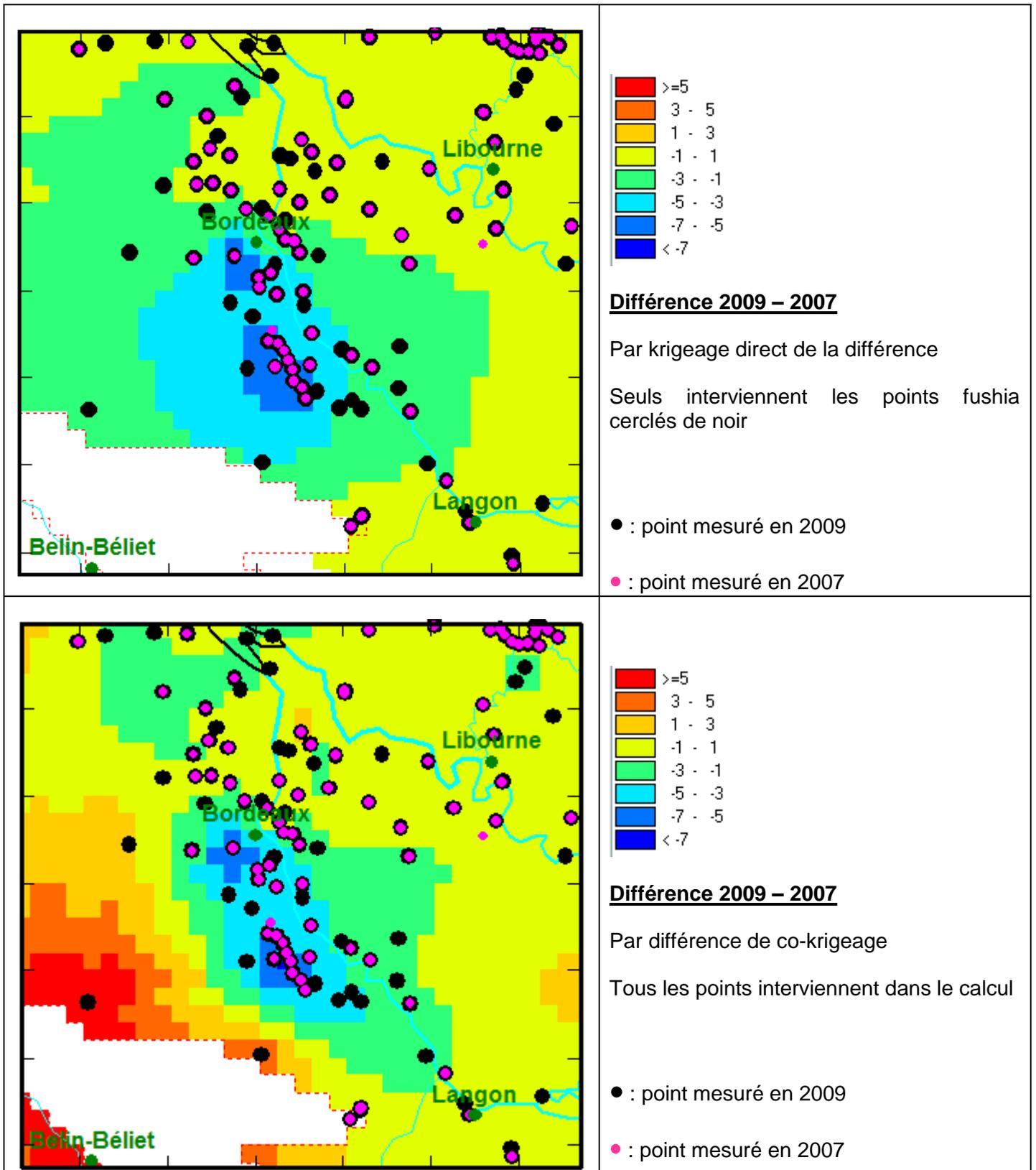


Figure 22: Carte de la différence 2009-2007. En haut calcul direct, en bas calcul par différence de deux co-krigeages

La comparaison des deux cartes montre que la carte obtenue par différence des deux co-krigeages (figure 22, partie inférieure) paraît plus réaliste en particulier au nord de Belin Beliet. En effet le co-krigeage peut exploiter les piézomètres (en noir) disponibles en 2009, piézomètres que le krigeage direct des différences ne peut prendre en compte.

Dans les zones où les mesures sont disponibles aux deux dates (points fuchsia cerclés de noir), on peut constater que les méthodes donnent des résultats très comparables.

La carte des écarts-types (Figure 23) de l'interpolation directe des différences montre bien que cette différence est mal estimée au nord de Belin Beliet.

Du fait que l'on dispose de beaucoup plus de données en 2009 par rapport à 2007, le co-krigeage paraît plus performant mais a l'inconvénient de ne pas pouvoir fournir l'erreur sur la différence des co-krigeage (du moins dans la version actuelle des logiciels).

Dans le cas où les réseaux de piézomètres sont similaires en nombre et en implantation d'une année sur l'autre, le co-krigeage perd une grande partie de ses avantages sur le krigeage direct. En particulier la différence entre deux années consécutives a plus de chances de présenter un comportement stationnaire (variogramme à palier, comme sur la Figure 21), alors que les variogrammes de la cote piézométriques sont souvent non stationnaires, comme ceux de la Figure 13 et de la Figure 14. De ce fait leur ajustement/interprétation est plus délicat, notamment en multivariable.

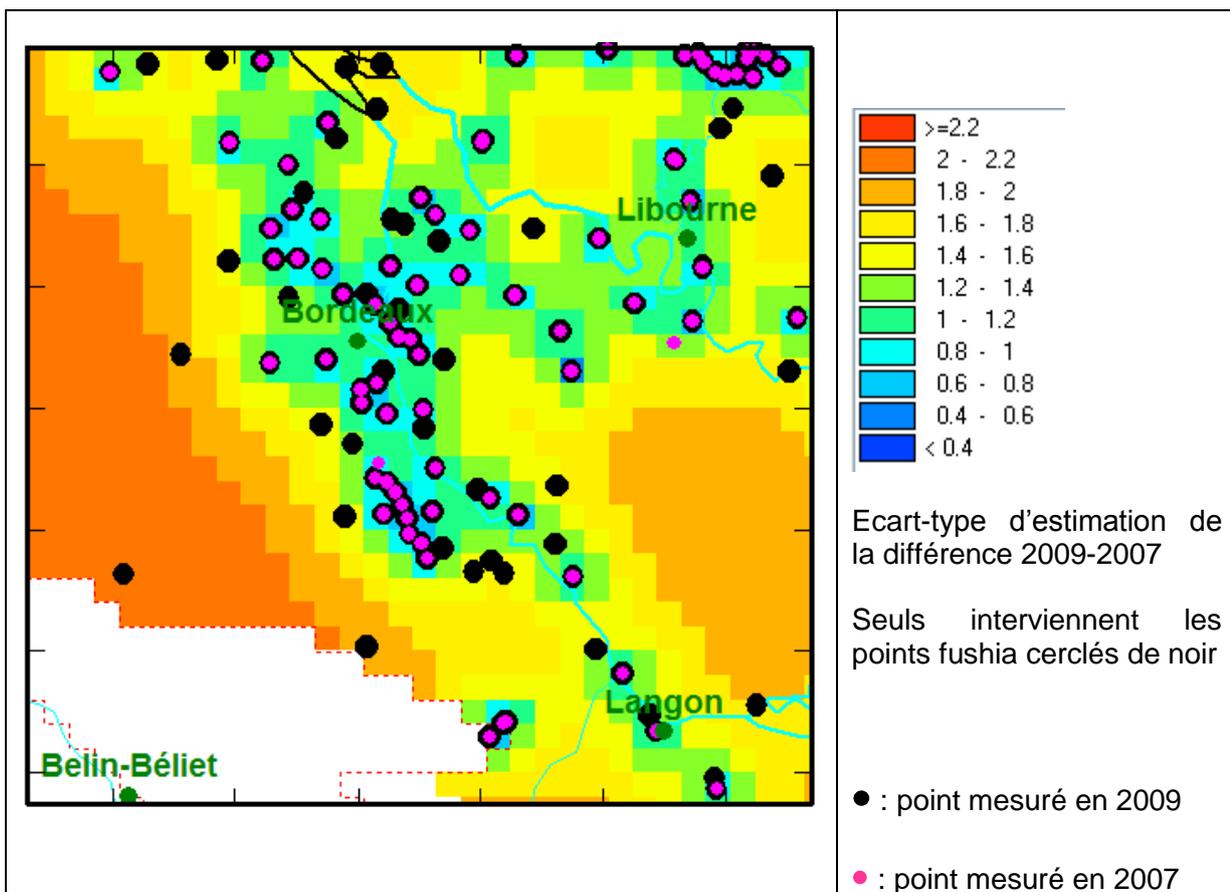


Figure 23: Ecart-type d'interpolation de la différence par krigeage direct

5. Critères d'optimisation du réseau de suivi piézométrique des nappes

5.1. PRINCIPE

Les outils géostatistiques peuvent contribuer à l'optimisation d'un réseau de suivi piézométrique (ou plus généralement d'un réseau suivi d'une autre variable), dans la mesure où, lorsque le variogramme est connu, il est possible de calculer l'erreur d'interpolation que l'on obtient en tout point (où l'on ne dispose pas de mesure) lorsqu'on cherche à estimer la valeur en ce point à partir des points de mesure.

En effet, d'un point de vue mathématique, il suffit de connaître le modèle de variogramme (c'est à dire la variabilité du phénomène dans l'espace, voire dans le temps) ainsi que les coordonnées des points de mesure pour prévoir l'erreur d'interpolation en un point donné.

À partir de l'analyse de l'erreur d'interpolation il est possible d'aborder l'optimisation d'un réseau de suivi piézométrique sous trois angles :

- identifier les piézomètres redondants ou non indispensables,
- identifier les zones où densifier le réseau,
- à nombre de piézomètres constant, où placer ces piézomètres ?

La géostatistique propose des réponses à ces questions par le biais de l'analyse de la précision d'estimation selon le nombre et la position des piézomètres.

Ce chapitre du rapport reprend certains éléments méthodologiques abordés au cours de la première année d'étude (Bourgine, 2011) et propose un exemple d'application sur la nappe captive de l'Eocène du nord du Bassin aquitain. Pour mémoire, dans le précédent rapport, un exemple avait été présenté sur la nappe du Turonien sur le secteur de Mareuil-Périgueux.

5.2. IDENTIFICATION DES PIÉZOMÈTRES REDONDANTS OU NON INDISPENSABLES

Il n'est évidemment pas nécessaire de maintenir des piézomètres redondants ou qui apportent peu d'information par rapport à leur environnement.

5.2.1. Principe : validation croisée

Pour identifier les piézomètres qui pourraient être éliminés, une technique relativement simple à utiliser est celle de la validation croisée. Un exemple d'utilisation de cette technique a été présenté par exemple par Olea and Davis (1999a et b)

Schématiquement la validation croisée consiste à effectuer une estimation de la valeur d'une variable en chaque point de donnée x où la variable est connue, à partir des autres points de données où cette variable est connue, sans utiliser la donnée au point x . On ré-estime chaque point à partir des voisins, comme si on ne connaissait pas la valeur au point lui-même.

En chaque point de donnée on dispose alors de deux valeurs :

- la valeur réelle $Z(x)$
- la valeur estimée (interpolée) à partir des points voisins : $Z^*(x)$
- l'écart-type d'estimation $\sigma_k(x)$ si on a utilisé un modèle géostatistique.

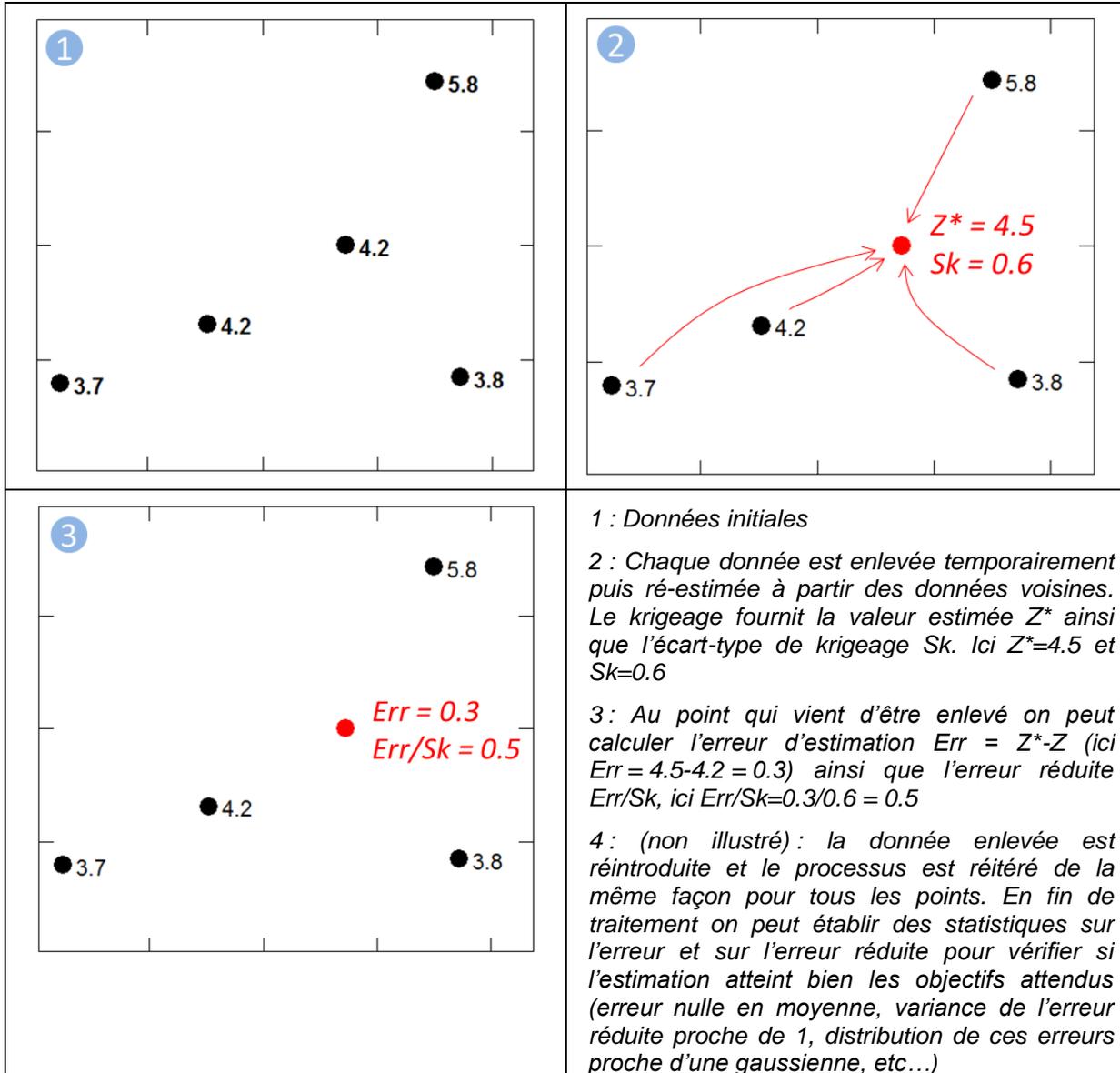


Figure 24 : Principe de la validation croisée

Ce processus est répété pour tous les points x où la variable est connue : on ré-estime la valeur en ce point à partir des autres données en faisant comme s'il n'existait pas.

On peut alors calculer en tout point qui disposait d'une mesure :

- l'erreur d'estimation $Err(x) = Z^*(x) - Z(x)$, et dans le cas d'une estimation par modèle géostatistique :
- l'erreur réduite : $Ered(x) = \frac{Err(x)}{\sigma_k(x)}$

Les résultats de la validation croisée sont fournis sous forme de statistiques et de cartes :

- ✓ statistiques sur les erreurs et les erreurs réduites : moyennes, nuages de corrélation, histogrammes
- ✓ cartes des erreurs $Err(x)$ ou carte des erreurs réduites $Ered(x)$
- ✓ nuages de corrélation ($Z^*(x)$; $Z(x)$)
- ✓ nuages de corrélation ($Z^*(x)$; $Err(x)$) ou ($Z^*(x)$; $Ered(x)$)

5.2.2. Application à l'aquifère de l'Eocène du nord du Bassin aquitain

La Figure 25 visualise la carte des résultats de la validation croisée. Les symboles « + » représentent les piézomètres re-estimés avec une erreur réduite inférieure à 2.5, les symboles « • » ceux estimés avec une erreur réduite supérieure à 2.5

L'examen de cette carte apporte différents renseignements utiles pour l'optimisation du réseau :

- les points « bien » ré-estimés (erreur réduite faible et surtout erreur de ré-estimation faible) sont ceux qui sont en accord avec leur voisinage. Une partie de ces points peut être éliminée si l'on se fixe un critère d'erreur maximale à ne pas dépasser. Par exemple (Figure 26), on commence par identifier les piézomètres pour lesquels l'erreur de ré-estimation est inférieure à 0.5 mètre (20 piézomètres). Puis on élimine une partie de ces piézomètres (ici 17 piézomètres) et on recalcule la carte sans ces 17 points (Figure 27). On peut constater que ces isopièzes sont très proches des précédentes. La comparaison des cartes des écarts-types permet de vérifier si ces écart-types n'ont pas trop augmentés et restent dans la gamme des valeurs souhaitées (Figure 28). Là encore les cartes sont très proches.
- les points « mal » ré-estimés (ronds rouges ou bleus sur la carte Figure 25) sont des points en contradiction avec leur voisinage. Il peut s'agir soit d'une erreur de saisie/report de valeur ou une mesure en niveau dynamique (forage dont l'arrêt n'a pas été suffisant avant de faire la mesure), auquel cas le point doit être éliminé, soit d'un point qui présente un comportement « atypique » par rapport à son voisinage. Par exemple une crête piézométrique ou un creux piézométrique isolé. Dans ce cas le point ne doit pas être enlevé mais au contraire conservé. Il sera sans doute souhaitable de densifier le réseau autour de ce point pour bien cerner les variations locales autour de ce point s'il s'agit d'un endroit sensible.

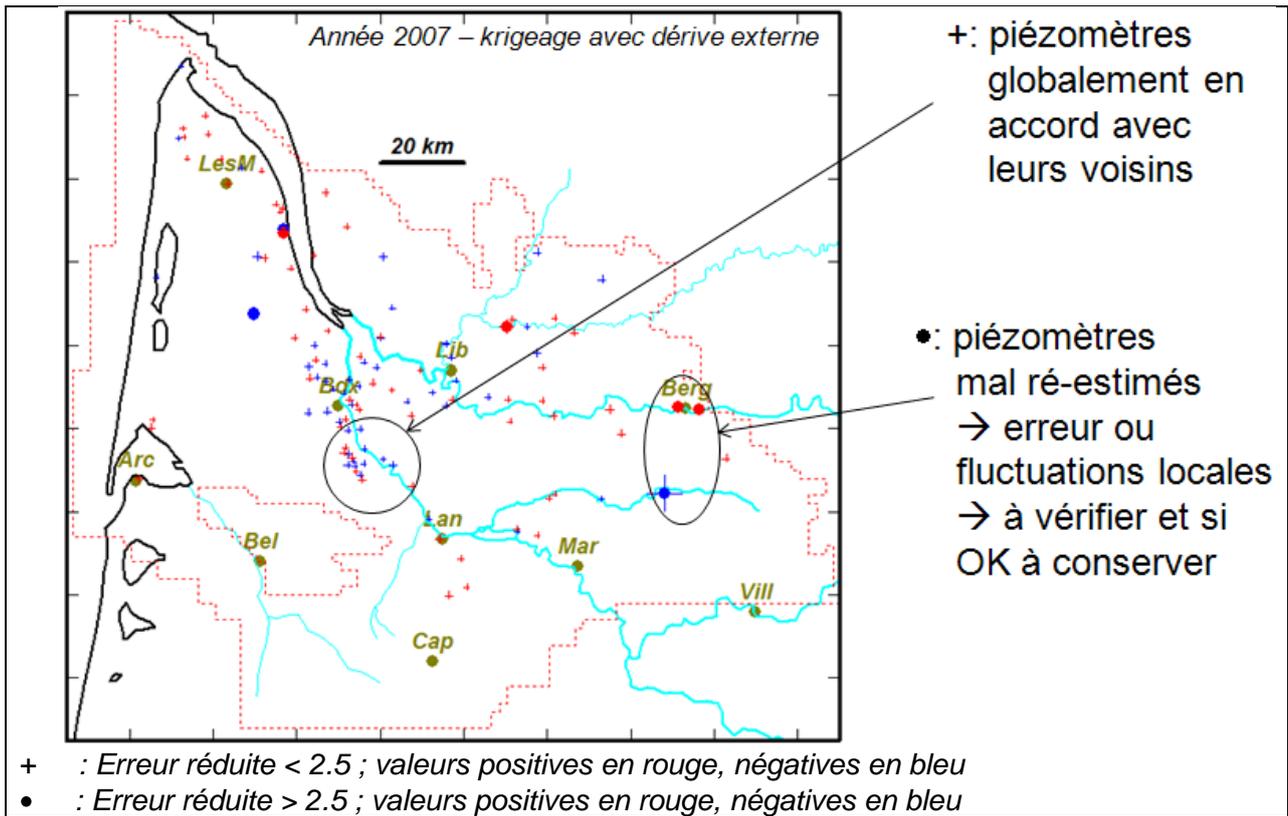


Figure 25: Validation croisée du niveau piézométrique. Aquifère Eocène Nord Aquitain, année 2007

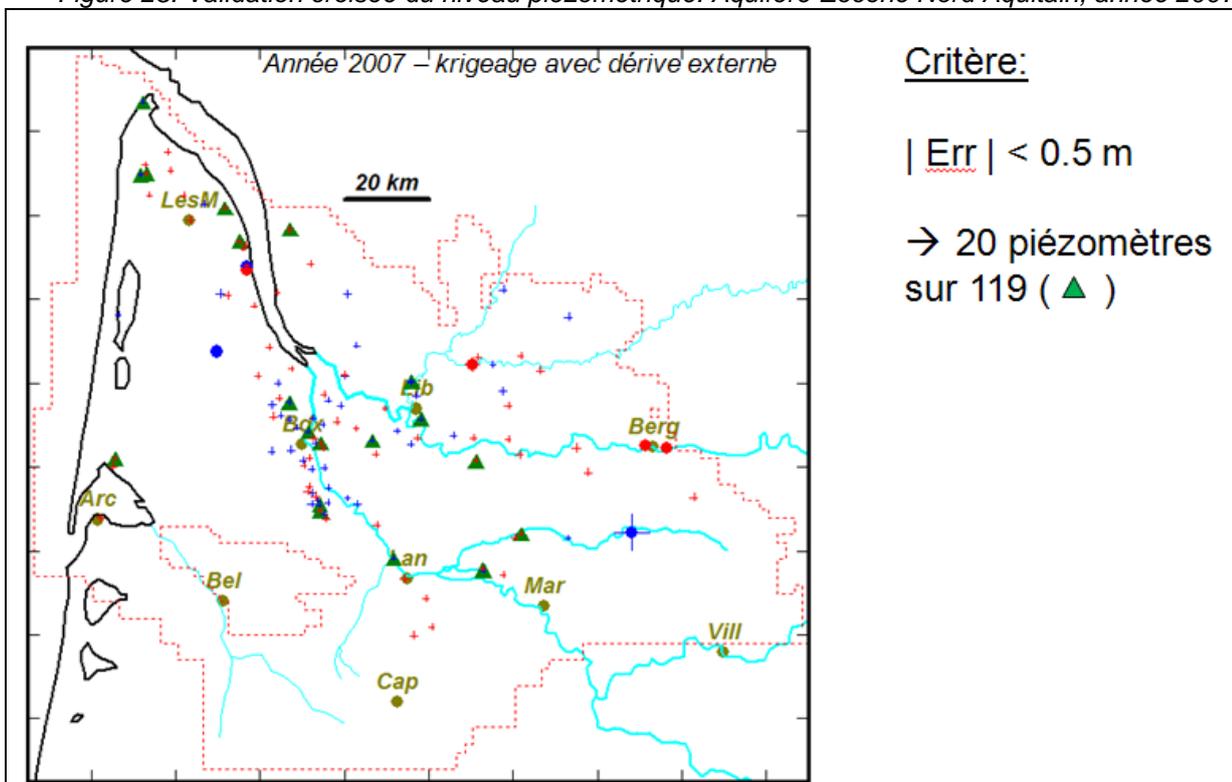


Figure 26 : Sélection de piézomètres à éliminer

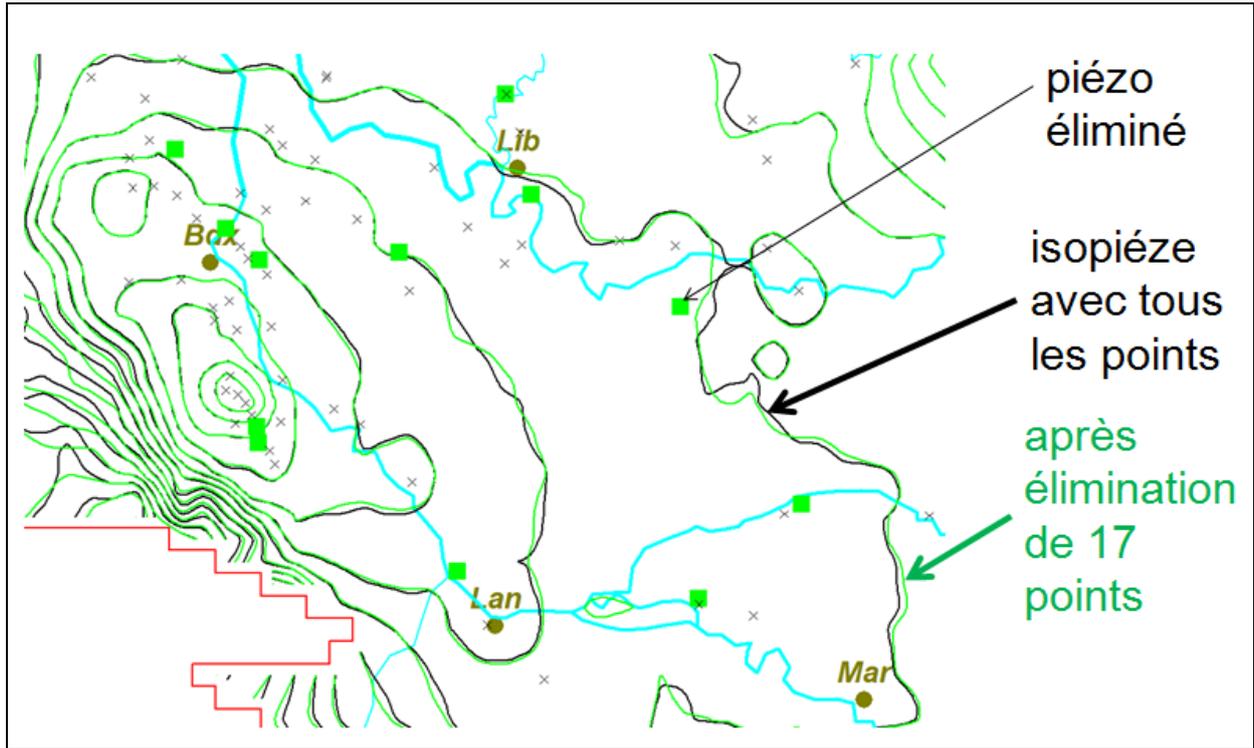


Figure 27: Isopièzes avec la totalité des piézomètres et en enlevant 17 piézomètres

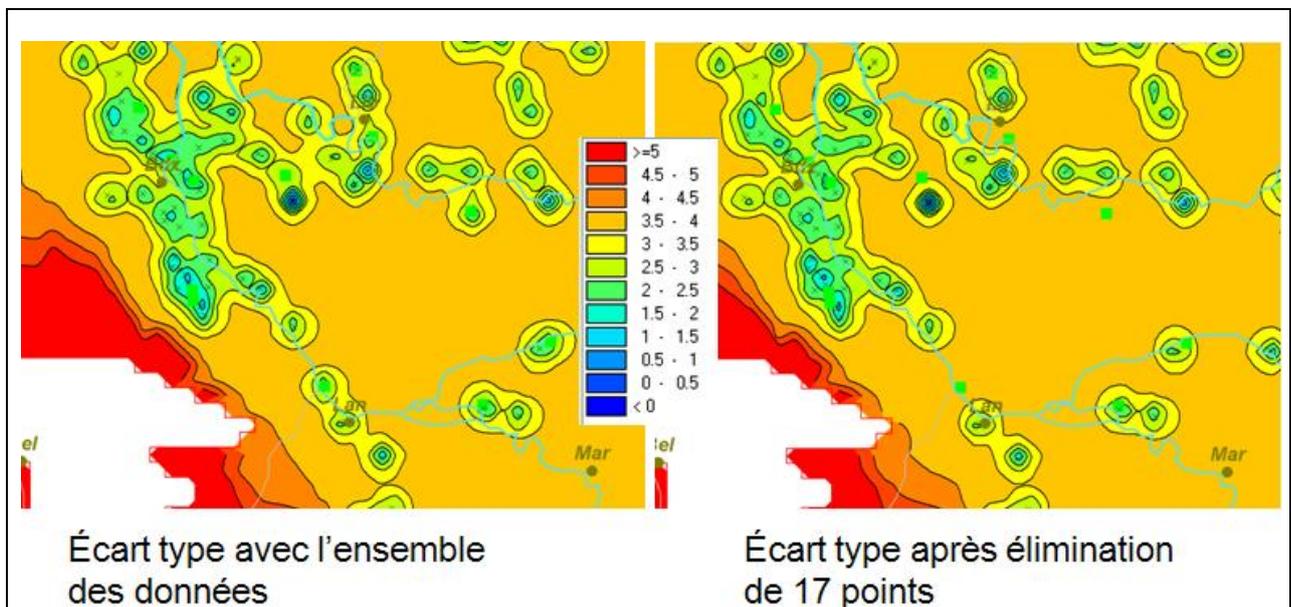


Figure 28: Carte des écart-types avec toutes les données et sans les 17 piézomètres

5.3. IDENTIFICATION DES ZONES OÙ DENSIFIER LE RÉSEAU

Outre les zones situées près des points mal ré-estimés lors de la validation croisée (cf. plus haut), il peut être utile de densifier le réseau si une précision nécessaire est demandée sur l'estimation de la cote piézométrique.

Cette identification se basera sur la carte des écart-types d'interpolation obtenue avec les données déjà disponibles.

Par exemple sur la Figure 28 les erreurs d'estimation sont supérieures à 5 m dans le coin sud-ouest autour de l'anticlinal de Villagrains-Landiras (zone lacunaire en blanc sur la figure). Si l'erreur maximale souhaitée est de 4.5 m, il faudra implémenter au moins un piézomètre de plus dans cette zone.

5.4. OPTIMISATION DE LA POSITION DES PIÉZOMÈTRES

Le principe d'optimisation de la position des piézomètres à nombre fixé de piézomètre consiste à calculer la carte des écarts-types obtenus pour un jeu de n piézomètres que l'on positionnera selon diverses hypothèses. Pour chaque hypothèse, le variogramme étant connu, il est possible de calculer la carte des écart-types (il est inutile de connaître la valeur du niveau piézométrique). On pourra ainsi visualiser les zones mal estimées et les mettre en regard de l'enjeu.

À notre connaissance il n'existe pas vraiment de méthode automatique pour optimiser la position des piézomètres, sachant que celle-ci est en partie conditionnée par les accès et l'environnement (urbain, industriel, agricole, ...). Il s'agira donc de comparer plusieurs scénarios et d'évaluer pour chacun les incertitudes associées.

L'application de ces méthodes géostatistiques montre bien qu'il est possible d'améliorer sensiblement la représentativité d'un réseau de mesure tout en rationalisant le nombre des points qui le compose. Il n'en reste pas moins vrai que les réseaux de suivi s'appuient bien souvent sur des ouvrages existants (question de coût) et que les lacunes d'informations piézométriques sont souvent liées à l'absence d'ouvrages. Dans les secteurs non renseignés, et en fonction des enjeux, il peut être pertinent de créer des piézomètres dédiés à cet objectif.

6. Comparaison des différentes méthodes géostatistiques, avantages/inconvénients

Le tableau ci-dessous résume les principaux avantages/inconvénients et les domaines d'application des différentes techniques géostatistiques présentées dans ce rapport et dans celui de l'année dernière (Bourgine ; 2011).

Technique	Intérêt, application	Limitations	Facilité de mise en oeuvre
Krigeage direct de niveau piézométrique	Très simple à mettre en oeuvre	Conditions aux limites non prises en compte; Limitations dans les cas non stationnaires	+++
Co-krigeage du niveau piézométrique à partir de 2 dates	Simple. Permet de prendre en compte les données d'une autre année. Intérêt si disponibilité d'une campagne à haute densité d'informations et calcul à une autre date.	Conditions aux limites non prises en compte Technique un peu plus complexe mais qui reste accessible. Technique sans intérêt si les données sont toutes mesurées aux deux dates	++
Co-krigeage niveau piézo + dérivée partielles	Permet de prendre en compte des contraintes physiques	Technique délicate à mettre en oeuvre. Pas/peu de logiciel existant	-
(co)-Krigeage avec dérive externe basée sur les cartes issues d'un modèle hydrodynamique existant	Permet de prendre en compte un modèle bien calé Intègre les contraintes physiques	Technique relativement simple mais sujette à instabilités numériques. Pas disponible dans tous les logiciels. Nécessite de disposer de cartes piézométriques issues d'un modèle hydrodynamique bien calé	+
Krigeage avec dérive externe = variable dérivée de la topographie	Pour les nappes libres, permet de prendre en compte corrélation entre niveau piézométrique et la topographie ou autre variable corrélée à la piézométrie	Technique relativement simple mais sujette à instabilités numériques. Pas disponible dans tous les logiciels.	+

Différences de niveau piézo entre deux dates par Krigeage direct des différences	Estimation des variations de cote piézométrique entre deux situations + incertitude Facile à mettre en oeuvre	Applicable si la grande majorité des données sont disponibles aux deux dates. Ne prend pas en compte les piézomètres disponibles à une seule des deux dates	++
Différences entre deux dates par différence des Co-Krigeages des niveaux piézométriques à chaque date	Permet de prendre en compte des piézomètres mesurés seulement à l'une des deux dates. Résultat en théorie meilleur que le calcul direct.	L'erreur sur la différence n'est en général pas fournie par les logiciels	+

Les différentes techniques géostatistiques présentées dans ce document ne peuvent pas être mises en œuvre sans logiciel. Parmi les différents outils géostatistiques existants, citons :

- GDM (<http://gdm.brgm.fr/>): développé par le BRGM, GDM permet le krigeage « ordinaire » standard, le krigeage universel et le krigeage avec dérive externe, ainsi que de nombreuses autres fonctions, notamment les calculs et ajustements de variogrammes, la validation croisée. Ce logiciel fait l'objet d'une distribution commerciale mais est fourni gratuitement aux universitaires et étudiants sous réserve de ne l'utiliser qu'à des fins d'enseignement ou de recherche, et de mentionner son utilisation dans les publications. En outre, une extension « GdmToolBox » permet de réaliser des traitements complémentaires tels que le krigeage avec prise en compte de gradients ou de conditions de flux nul. Cette extension est également rendue disponible auprès des universités/étudiants et est également utilisée pour l'enseignement (université d'Orléans, ENAG, ...). Le co-krigeage n'est pas encore disponible dans GDM.
- Surfer est un logiciel très répandu qui permet également de réaliser des interpolations par krigeage. À notre connaissance, sa dernière version ne proposait pas de krigeage avec dérive externe, ni avec des données de gradient, ni du co-krigeage. On ne peut donc l'appliquer qu'à des cas standards relativement simples,
- Isatis est certainement le logiciel qui comporte le plus de fonctions géostatistiques (krigeage standard, universel et avec dérive externe, co-krigeage, krigeage avec gradients), mais son coût reste élevé,
- ArcGIS propose en version de base quelques fonctions géostatistiques, mais de mauvaise qualité. Par contre son extension Geostat Analyst propose un grand nombre de possibilités. Nous ne l'avons pas testée récemment,
- Enfin, le centre de géostatistique (Mines ParisTech) a développé une bibliothèque R-GEOS disponible sous R, qui comporte de nombreuses fonctions géostatistiques. Là encore l'utilisation est possible à des fins non commerciales. Le logiciel R dispose lui aussi de fonction géostatistiques. Nous n'avons pas testé si les calculs proposés donnaient des résultats corrects.

7. Conclusion

Cette seconde année d'étude (année 3 de la convention régionale) a été consacrée à l'amélioration des méthodes géostatistiques proposées lors de la première année (Bourgine, 2011), au développement/test de nouvelles méthodes, à la rédaction d'un tableau de « bonnes pratiques » présentant les différentes méthodes envisageables et leurs avantages/inconvénients.

Les différentes méthodes géostatistiques testées et développées sur des cas théoriques et réels (Eocène et Turonien) au cours de ces deux années ont permis de montrer tout l'intérêt pour l'hydrogéologue de s'appuyer sur ces outils.

En effet, ils permettent d'élaborer des cartes piézométriques homogènes, reproductibles et comparables dans le temps tout en y associant une incertitude qui permet de discriminer les secteurs où les cartes peuvent être considérées comme fiables de ceux où il existe une méconnaissance importante.

L'application de ces méthodes peut également permettre d'optimiser des campagnes de mesures piézométriques et des réseaux de mesures (suppression/ajout de points) en fonction de critères objectifs (erreur maximale souhaitée, nombre d'ouvrages optimum ou maximum pour une nappe...).

Néanmoins, la mise en œuvre de certaines de ces méthodes, notamment lorsqu'elles sont combinées, nécessite une bonne expertise aussi bien en géostatistique qu'en hydrogéologie.

Certaines d'entre elles ne sont applicables qu'à des cas très simples (krigeage direct) et d'autres permettent de prendre en compte l'essentiel des contraintes physiques externes (gradients, topographie...) en fonction du type de nappe (libre/captive). Le présent rapport s'est efforcé de lister les différentes méthodes, leurs contraintes et leur plus ou moins grande facilité de mise en œuvre.

Il faut garder à l'esprit que la qualité des rendus obtenus à l'aide des méthodes géostatistiques reste dépendante de la qualité et du nombre de données disponibles et, dans le cas du co-krigeage, de la nécessité d'avoir des sites d'acquisition évoluant peu d'une année sur l'autre. *In fine*, seule l'expertise de l'hydrogéologue permet de garantir la cohérence et la qualité des cartes produites.

Par ailleurs, l'application de ces méthodes géostatistiques montre bien qu'il est possible d'améliorer sensiblement la représentativité d'un réseau de mesure tout en rationalisant le nombre des points qui le compose. Il n'en reste pas moins vrai que les réseaux de suivi s'appuient bien souvent sur des ouvrages existants (question de coût) et que les lacunes d'informations piézométriques sont souvent liées à l'absence d'ouvrages. Dans les secteurs non renseignés, et en fonction des enjeux, il peut être pertinent de créer des piézomètres dédiés à cet objectif.

Dans le contexte actuel où de nombreux outils de gestion et de planification des ressources en eaux souterraines de type SAGE se mettent en place, ces méthodes géostatistiques fournissent à l'hydrogéologue des éléments lui permettant d'appuyer les acteurs/décideurs dans la gestion opérationnelle des ressources en eau souterraine (production d'indicateur d'évolution des nappes, rationalisation/optimisation des réseaux de mesures).

Les prochaines années du module seront consacrées à la mise en application des méthodes géostatistiques testées et développées au cours des deux premières années d'étude sur des cas concrets. L'objectif sera d'élaborer des cartes piézométriques de référence sur les principales nappes de la Région Aquitaine.

8. Bibliographie

B. Bourguine, N. Pédron (2011) 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.

8.1. GÉOSTATISTIQUE

Chilès J.P., Delfiner P. (2012). Geostatistics: Modelling Spatial Uncertainty, 2nd edition, Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics, 699 p.

Olea R.A. and J.C. Davis (1999a). Optimizing the High Plains aquifer water-level observation network, K.G.S. Open File Report 1999-15 (http://www.kgs.ku.edu/Hydro/Levels/OFR99_15/)

Olea R.A. and J.C. Davis (1999b). Sampling Analysis and Mapping of Water Levels in the High Plains Aquifer of Kansas: Kansas Geological Survey Open-File Report No. 99-11, 35 p. (http://www.kgs.ku.edu/Hydro/Levels/OFR99_11/index.html)

+ bibliographie du rapport BRGM/RP-60153-FR

8.2. PIEZOMÉTRIE

Corbier P., Abou Akar A., Mazurier C. (2010). Contrôle qualité et gestion des nappes d'eaux souterraines en Gironde. Etat des connaissances à fin 2009. Rapport final - BRGM/RP-59202-FR

Mauroux B., Winckel A. et Dufour P. (2003). Piézométrie de l'aquifère Turonien-Coniacien dans la partie occidentale du Département de la Dordogne : Année 1 - BRGM/RP-52258-FR, 38 p., 6 fig., 5 ann.

Mauroux B., Saplaïroles M. et Winckel A. (2004). Piézométrie et qualité de l'aquifère Turonien-Coniacien dans la partie occidentale du Département de la Dordogne : Année 2. Rapport final - BRGM/RP-52666-FR.

Saltel M., Pédron N., Platel J.-P., Bourguine B. et Gutierrez T. (2011). Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine -Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes – Module 1 – Année 2 – BRGM/RP-59 959-FR, 63 p., 38 fig., 6 ann.

Annexe 1

Prise en compte de conditions aux limites dans les équations de krigeage

Prise en compte de conditions aux limites

La cote piézométrique d'un aquifère est fonction des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère (perméabilité K , emmagasinement S), des entrées d'eau (recharge par les pluies, directe ou indirecte, réinjection), des prélèvements – avec leurs variations temporelles - et des conditions aux limites. La modélisation hydrodynamique consiste à déterminer les valeurs inconnues des paramètres (K et S , parfois la recharge), en général par "essais-erreurs", en initialisant les paramètres inconnus et en réduisant progressivement les écarts entre niveaux observés et calculés ("calage" du modèle). Des chroniques piézométriques et des cartes de référence sont nécessaires pour réaliser ce calage. Pour obtenir une carte la plus précise possible, on cherche à prendre en compte le maximum d'informations auxiliaires disponibles. Pour ce faire on se place dans le cadre des méthodes géostatistiques :

- La piézométrie est considérée comme une réalisation d'une fonction aléatoire $Z(x)$, où x désigne un point de l'espace géographique. Cette fonction aléatoire est caractérisée par sa moyenne $m(x)$, déterministe, et par sa fonction de covariance $\sigma(x, x')$.
- L'interpolation se fera sur la base de données de $Z(x)$ (niveau piézométrique) ainsi que de variables secondaires liées à Z ,
 - o soit statistiquement (niveau piézo à une autre date, contrainte topographique ou niveau piézo calculé à partir d'un modèle hydrodynamique si on en dispose),
 - o soit analytiquement (gradient ou dérivée partielle par exemple).

Conditions aux limites

Les conditions aux limites pouvant être introduites dans les algorithmes géostatistiques sont les suivantes :

- Conditions à charge imposée (Dirichlet). Ces conditions peuvent servir à prendre en compte un niveau piézométrique imposé : cote d'un lac, cours d'eau. On les rentre comme des données de piézométrie en des points discrétisant le contour du lac ou le cours d'eau. A noter toutefois que maintenant dans les logiciels de modélisation hydrodynamique, on travaille en conditions d'échange nappe/rivière et non plus en potentiel imposé. Il reste néanmoins possible d'introduire des potentiels imposés dans les méthodes géostatistique.
- Conditions à flux imposé (Neumann). Une condition de flux nul s'applique pour une limite imperméable, ou une crête piézométrique (ligne de partage des eaux). La valeur de la dérivée partielle $\partial Z / \partial u$ de la piézométrie est nulle dans la direction u orthogonale à un contour Γ . Ici encore on retiendra seulement une série de points discrétisant le contour.
- Contraste de perméabilité : dans le cas où les tubes de courant peuvent être considérés comme de section constante. Prenons deux points x et x' d'une même ligne de courant, et notons u la direction de la ligne de courant en x et u' sa direction en x' . Si les transmissivités $T(x)$ et $T(x')$ sont connues, les gradients de charge vérifient :

$$T(\mathbf{x}) \frac{\partial Z(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{u}} = T(\mathbf{x}') \frac{\partial Z(\mathbf{x}')}{\partial \mathbf{u}'}$$

- Si on connaît seulement le contraste de transmissivité $\tau = T(\mathbf{x}') / T(\mathbf{x})$ entre ces deux points, on peut néanmoins leur associer une donnée $\partial Z(\mathbf{x}') / \partial \mathbf{u}' - \tau \partial Z(\mathbf{x}) / \partial \mathbf{u} = 0$

Pour résumer, les données pouvant être prises en compte concernant la piézométrie sont de trois formes :

- des valeurs numériques de la piézométrie Z ;
- des dérivées partielles $\partial Z / \partial u$ dans une direction u quelconque;
- des combinaisons de dérivées partielles de la forme $\partial Z(\mathbf{x}') / \partial \mathbf{u}' - \tau \partial Z(\mathbf{x}) / \partial \mathbf{u}$.

Equations de krigeage pour la prise en compte de conditions aux limites :

Les équations analytiques ont été publiées dans Chilès et Delfiner (2012, pages 320 et suivantes).



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

BRGM Aquitaine

Parc Technologique Europarc
24, avenue Léonard de Vinci

33600 – Pessac – France

Tél. : 05 57 26 52 70