



**HAL**  
open science

**Influence des méthodes d'interpolation sur les  
représentations 2D des mesures géophysiques =  
Influence of the methods of interpolation on the 2D  
representation of the geophysics measurement**

Emilie Vanoudheusden, Pierre Thierry, François Lebert

► **To cite this version:**

Emilie Vanoudheusden, Pierre Thierry, François Lebert. Influence des méthodes d'interpolation sur les représentations 2D des mesures géophysiques = Influence of the methods of interpolation on the 2D representation of the geophysics measurement. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2010, Jul 2010, Grenoble, France. 8 p. hal-00524309

**HAL Id: hal-00524309**

**<https://brgm.hal.science/hal-00524309>**

Submitted on 7 Oct 2010

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## **INFLUENCE DES METHODES D'INTERPOLATION SUR LES REPRESENTATIONS 2D DES MESURES GEOPHYSIQUES**

### ***INFLUENCE OF THE METHODS OF INTERPOLATION ON THE 2D REPRESENTATIONS OF THE GEOPHYSICS MEASUREMENT***

Emilie VANOUDEUSDEN <sup>1</sup>, Pierre THIERRY <sup>1</sup>, François LEBERT <sup>1</sup>,  
*1 BRGM, Orléans, France*

**RÉSUMÉ** – Suite au traitement de mesures géophysiques, une interpolation entre les profils 1D est souvent réalisée de manière à obtenir une représentation 2D du résultat. Cet article présente, sur un cas particulier, l'influence de certains paramètres de l'interpolation par krigeage sur la qualité des résultats. L'apport d'une interpolation tenant compte d'une interface géologique est aussi présenté.

**ABSTRACT** – Further to geophysical processing, an interpolation between 1D profiles is often realized in order to obtain a 2D representation. Based on a particular case, this article presents the influence of several parameters of kriging on the quality of the results. Contribution of the consideration of a geologic interface for the interpolation is also presented.

### **1. Introduction**

La présence de cavités souterraines naturelles ou anthropiques est souvent à l'origine de problèmes (effondrements, contraintes géotechniques...). Leur détection, au plus tôt, est primordiale pour l'évaluation de la viabilité financière d'un projet.

Les méthodes géophysiques permettent une auscultation du sous-sol le long de tracés linéaires par des méthodes non intrusives. Dans un certain nombre de cas, les résultats s'expriment sous forme de profils verticaux 1D (profondeur – paramètre mesuré), interpolés pour obtenir une représentation 2D du sous-sol. Cette interpolation, même si elle ne constitue pas la seule source d'incertitude, n'est pas sans conséquence sur le résultat de la visualisation finale.

Pour évaluer l'influence de la méthode d'interpolation sur les représentations 2D, nous avons exploité les mesures réalisées lors d'un projet précédent, (Thierry et al. 2004): SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) et trainé électrique (OhmMapper). La géologie est connue par le biais de 50 sondages, disponibles dans la BSS (Banque de Données du Sous-Sol), situés dans un rayon de 1,5 km autour du site d'étude, à proximité du Parc Floral au sud de la Ville d'Orléans.

Cet article présente la comparaison des résultats obtenus par différentes interpolations par krigeage. Il démontre l'influence des paramètres d'interpolation sur les représentations 2D des mesures géophysiques.

## **2. Cadre géologique et hydrogéologique du secteur d'étude**

Cinq formations géologiques différentes sont susceptibles d'être rencontrées sur le site d'étude, soit du plus récent vers le plus ancien :

- les formations actuelles : terres végétales, remblais anthropiques ou colluvions plus ou moins remaniées. Elles sont de natures diverses, le plus souvent sableuses ou sablo-argileuses, et d'épaisseur infra-métrique,
- les alluvions récentes de la Loire, du sable fin au galet,
- les alluvions anciennes : la stratification y est lenticulaire. Sur notre zone d'étude, ces alluvions prennent souvent un faciès sableux fin,
- les sables et marnes de l'Orléanais : formation à stratification lenticulaire de sables, de marnes vertes ou blanches avec calcaires concrétionnés.
- les calcaires de Beauce : calcaires lacustres avec lentilles de marnes et passées meulièrement. Cette formation peut atteindre plus de 50 m de puissance au niveau de la zone d'étude. En toit, cette formation est constituée de marnes, sur plusieurs mètres d'épaisseur, avant de passer à un calcaire compact. Ces formations ont donné lieu à d'importants phénomènes de dissolutions karstiques.

La source du Bouillon (source du Loiret), située à proximité immédiate de notre zone d'étude, constitue la résurgence principale d'un système karstique qui draine le nord-est de l'Orléanais ainsi qu'une partie de la Loire. Les drains d'alimentation de cette résurgence ont été reconnus par des plongeurs-spéléologues sur environ 1000 m. Ces karsts sont généralisés sur l'ensemble du secteur. De nombreux sondages (12 sur les 50 analysés) rapportent la présence de phénomènes d'origine karstiques (cavités franches, remplissage alluvionnaires, passées broyées,...).

## **3. Principes de l'interpolation par krigeage**

Le krigeage (Chilès et Delfiner, 1999) est une procédure d'interpolation qui fournit, à partir des données disponibles, une estimation optimale, linéaire et non-biaisée de la propriété étudiée, dont l'erreur d'estimation est minimisée. L'estimation par krigeage en un point est d'autant meilleure que ce point est proche des points de mesure. Néanmoins l'image obtenue est beaucoup plus « lisse » que la réalité ; elle ne reproduit pas la variabilité réelle de la propriété.

Les avantages du krigeage par rapport à d'autres méthodes d'interpolation plus classiques sont les suivants :

- le krigeage intègre, dans son processus d'estimation, la structure spatiale des données sous forme d'un modèle de variogramme,
- c'est un interpolateur exact puisque la surface obtenue passe par les points expérimentaux (sauf intégration d'un effet de pépité),

L'interpolation par krigeage est utilisée depuis de nombreuses années en sciences de la terre (Rouhani et al. 1996) pour estimer des propriétés de sol sur l'ensemble d'un domaine, optimiser des reconnaissances, simuler des interfaces...

Les résultats du krigeage sont conditionnés par le calage d'un modèle de variogramme sur les données. Par ce calage, on peut prendre en compte une dérive, la plus ou moins grande régularité de la variable interpolée, la distance maximale de corrélation, un comportement anisotrope...

Les résultats de l'interpolation dépendent aussi du choix du voisinage d'interpolation. Ce voisinage représente les points dont les valeurs seront potentiellement utilisées pour calculer la valeur au point sélectionné. Le voisinage mobile, dont la forme est fixe mais dont la position change en fonction du point, est classiquement une ellipse, découpée en plusieurs secteurs angulaires, au sein desquels l'interpolation recherche des points. De cette manière on ne privilégie pas les points situés à très faible distance, tous sur la même ligne, mais on force le système à chercher des valeurs dans les secteurs contenant peu de données.

#### 4. Influence du choix des paramètres d'interpolation des mesures de SASW

##### 4.1. Principes et mise en œuvre de la SASW

L'analyse spectrale des ondes de surface (SASW) permet d'estimer l'évolution de la vitesse de cisaillement  $V_s$  en fonction de la profondeur. Cette vitesse de propagation est fonction des caractéristiques mécaniques du sol (Bitri *et al.* 1998).

Sur notre profil d'étude, le dispositif de mesure se compose de 24 géophones verticaux espacés de 2 m permettant d'enregistrer les vibrations de la surface du sol. La source d'énergie est fournie par un marteau frappé au sol. L'ensemble du dispositif est déplacé le long du profil de manière à investiguer les terrains sur 300 m de long environ, avec un tir tous les 4 m (soit 77 tirs).

Le traitement des données sismiques aboutit donc à 77 profils 1D donnant la vitesse  $V_s$ , valeur constante entre 2 profondeurs. Classiquement, cette vitesse est ensuite affectée au milieu de la couche et les profils sont interpolés sur l'ensemble du tracé, de manière à obtenir une vision 2D, donnant la répartition de la vitesse en fonction de l'abscisse le long du profil et de la profondeur.

##### 4.2. Interpolation « par défaut » des données de SASW

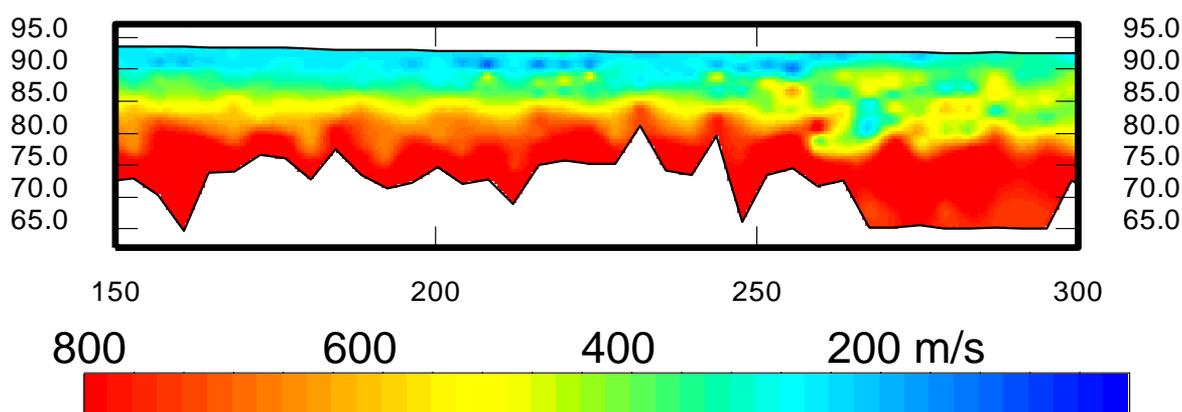


Figure 1 : Interpolation de  $V_s$  - logiciel Surfer - krigeage par défaut

En première approximation, les données 1D peuvent être interpolées par krigeage avec des paramètres par défaut. Parmi les logiciels permettant de traiter, d'interpoler puis de représenter les résultats de mesures géophysiques, le logiciel Surfer (Golden Software) est habituellement utilisé au BRGM. Sa méthode d'interpolation par krigeage propose, par défaut, l'utilisation d'un variogramme linéaire, sans dérive, et un voisinage en cercle (rayon = 151 m – demi étendue des profils), divisé en 4

secteurs angulaires, avec 64 points au maximum pour tous les secteurs et 8 à 16 points par secteur.

La Figure 1 présente le résultat de cette interpolation le long du profil entre les abscisses 150 et 300. Sur cette figure, chaque point noir représente l'emplacement d'une valeur de Vs, au milieu de la couche définie par le traitement des données.

### 4.3. Interpolation avec calcul du variogramme

Le variogramme est un outil classique de géostatistique. Il permet d'appréhender la structure spatiale du phénomène étudié, puis de la modéliser. Il représente l'évolution de la variabilité du phénomène en fonction de l'échelle d'observation. On tient ainsi compte, dans l'interpolation, des distances, des valeurs et des corrélations. Toutes les interpolations qui suivent ont été réalisées avec le logiciel GDM, développé au BRGM.

La Figure 2 présente le variogramme des données de SASW au pas de 1 m. Le variogramme expérimental Figure 2a montre clairement une dérive linéaire dans la direction de la profondeur Z (notée N000 - vert). Cette dérive représente l'augmentation des vitesses Vs avec la profondeur. Après correction de cette dérive ; on continue d'observer une anisotropie, visible entre les directions N000 et N090 (Figure 2b). Cette piste sera explorée par la suite.

Le variogramme avec dérive est modélisé par une combinaison de fonctions sphériques, une de palier 8000 et de portée 2,5, l'autre de palier 5000 et portée 23.

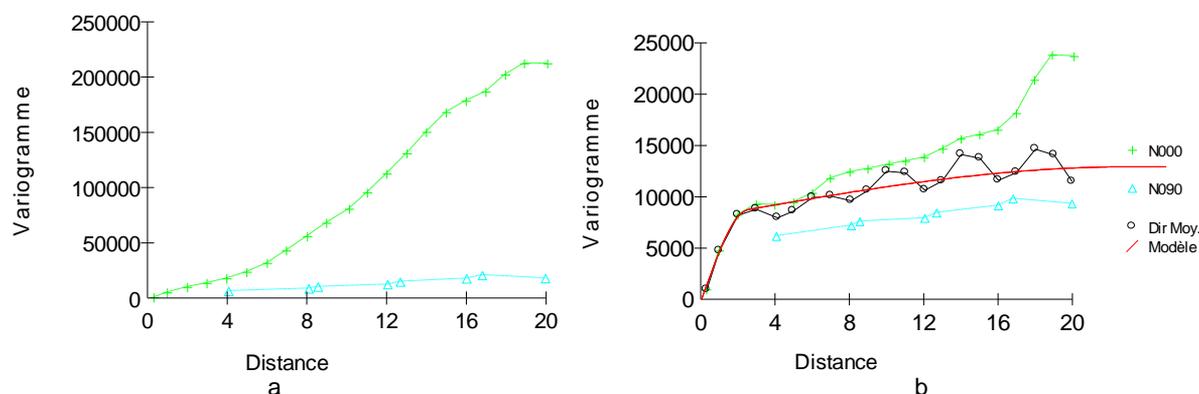


Figure 2 : Variogramme des données de SASW  
a) sans dérive b) avec dérive d'ordre 1

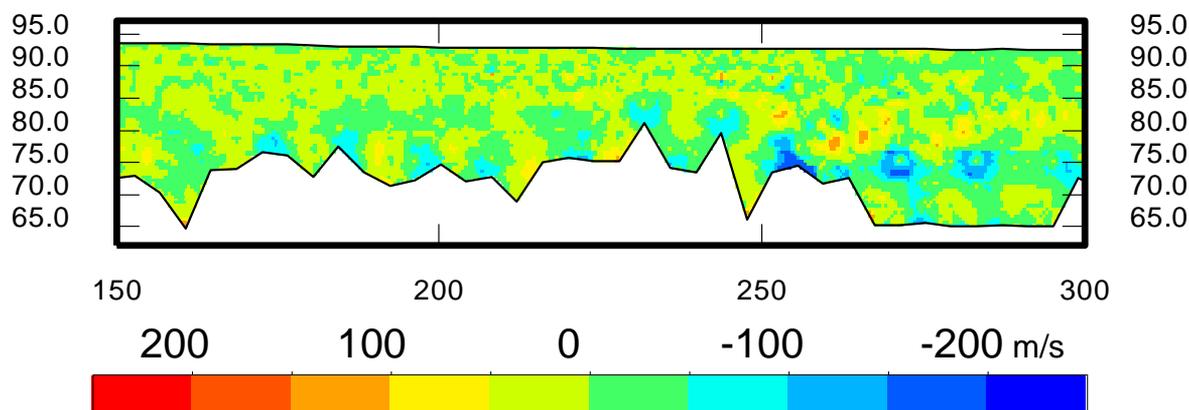


Figure 3 : Différences calculées entre les vitesses Vs déterminées par Krig1 (variogramme ajusté avec dérive linéaire) et l'interpolation par défaut

L'interpolation notée Krig1 est une interpolation par krigeage avec le variogramme ainsi modélisé et les paramètres de voisinage par défaut du logiciel (Tableau 1). La différence entre cette modélisation et la modélisation par défaut (§ 4.2) est présentée Figure 3. Dans la zone centrale, les vitesses peuvent varier jusqu'à 200 m/s, principalement dans les zones de variations rapides des vitesses.

	Nbre pts requis	Taille en X	Taille en Y	Fusion
Krig1	12	Par défaut (300 m)	Par défaut (32 m)	Par défaut (0,3045)
Krig2	24	Par défaut	Par défaut	Par défaut
Krig3	24	22 m	10 m	Par défaut
Krig4	24	22 m	10 m	0,1

Tableau 1 : Paramètres de voisinage des différentes interpolations

#### **4.4. Influence du choix des paramètres du voisinage sur l'interpolation**

##### 4.4.1 Paramètres d'interpolation

A partir du test précédent, différents paramètres du voisinage de modélisation ont été successivement utilisés pour évaluer leur influence sur le résultat.

Le voisinage retenu est invariablement une sélection par octant (soit 8 secteurs angulaires), voisinage le plus approprié pour des données situées sur des profils parallèles ; les paramètres que l'on fait varier sont résumés dans le Tableau 1.

Il est recommandé de rechercher d'autant plus de points de voisinage que les données sont regroupées en profils et que la méthode d'interpolation prend en compte une dérive. A l'inverse, il est parfois contre performant d'agrandir exagérément les voisinages, surtout si la zone d'étude manque d'homogénéité. Les tailles en X et en Y définissent la dimension maximum du rectangle centré sur le point à estimer, à l'intérieur duquel le logiciel effectue sa recherche par octants pour obtenir le nombre de points requis dans le voisinage. Le système de krigeage ne peut pas être résolu si 2 points de mesure ont les mêmes coordonnées, sauf s'il y a un effet de pépite. Aussi, les points proches les uns des autres, sont fusionnés.

##### 4.4.2 Résultats des interpolations

Les différences les plus importantes sont observées lors de la modification de la taille du voisinage en X et en Y.

Le voisinage tel qu'il a été choisi dans Krig3 permet de ne tenir compte que des valeurs de Vs situées sur 2 profils de part et d'autre du point interpolé, à plus ou moins 5 m en profondeur. De cette manière, les variations locales sont privilégiées, ainsi que les corrélations horizontales. Néanmoins, dans l'exemple de cette étude, l'influence du voisinage en termes de représentation 2D semble moins importante que l'utilisation d'un variogramme approprié (Krig1).

#### **4.5. Utilisation d'un variogramme anisotrope**

Comme le montre la Figure 2b, le variogramme expérimental des données présente une anisotropie entre les directions N000 (profondeur) et N090 (abscisse). Cette anisotropie peut être exprimée par la combinaison des fonctions suivantes :

- fonction exponentielle, de palier 9000, de portée 1,5, anisotropie géométrique de direction N000 et de portée 4,

- fonction sphérique, de palier 12000, de portée 40, anisotropie zonale (1D) de direction N000.

Ainsi, l'interpolation (Figure 4) est obtenue par krigeage utilisant un modèle de variogramme dans la direction N000 et un autre modèle dans la direction N090. Les paramètres de voisinage sont ceux de Krig3.

On remarque que cette représentation privilégie les structures horizontales : ce qui apparaissait avec le variogramme isotrope sous forme de « ronds » ponctuels apparaît maintenant sous forme de lentilles horizontales, nettement plus conforme aux modes de dépôts sédimentaires attendus dans ce contexte.

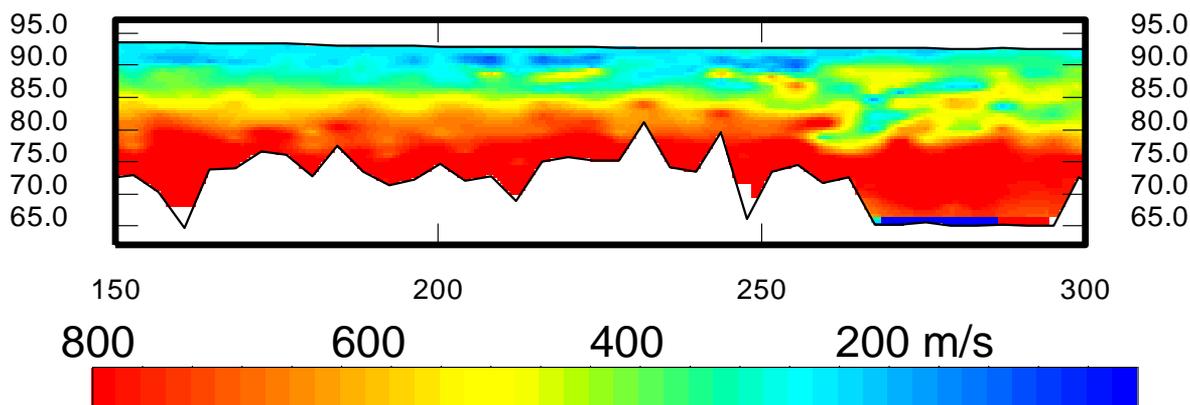


Figure 4 : Interpolation Vs – modèle de variogramme anisotrope et dérive linéaire

## 5. Interpolation des mesures de OhmMapper

### 5.1. Principes et mise en œuvre du OhmMapper

Le OhmMapper (Geometrics) est un instrument de mesure de la résistivité électrique du sous-sol par électrodes capacitives, trainées sur le sol, ce qui permet l'acquisition de profils quasi continus. Le dispositif de mesure est analogue à un dispositif dipôle-dipôle. Pour cette étude, nous avons utilisé un dispositif de 4 dipôles récepteurs de 10 m, avec des électrodes espacées de 5 m ; l'espacement entre le dipôle émetteur (long de 10 m) et le premier récepteur était de 2,5 m.

A la fin de la procédure de traitement (compilation, inversion), on obtient une répartition de la résistivité dans une « grille de blocs » quadrangulaires, déformée parallèlement à la topographie. La largeur de ces blocs est de 2,5 m, leur épaisseur est croissante avec la profondeur. Dans cette étude, l'inversion a été menée avec 6 couches de blocs.

Pour permettre l'interpolation des données sur une grille de maille inférieure, ces données ont été remodelées en profils 1D donnant la résistivité en fonction de la profondeur. La valeur de résistivité du bloc a été affectée en 1 point, au milieu du bloc. On dispose alors de 139 profils 1D, entre les abscisses 19 et 363

### 5.2. Influence du choix du variogramme et des paramètres de voisinage

Dans un premier temps, une analyse similaire à celle présentée pour les mesures SASW, sur l'influence du choix du variogramme (variogramme linéaire par défaut, variogramme isotrope ajusté aux données, variogramme anisotrope) et sur l'influence des paramètres du voisinage d'interpolation, a été menée.

Comme précédemment, on remarque l'intérêt d'ajuster un modèle de variogramme aux données, ainsi que de limiter le voisinage de recherche des points pris en compte pour l'estimation (taille en X et en Y).

### 5.3. Prise en compte d'une interface géologique

Les données disponibles dans la BSS ont permis de calculer un modèle numérique multicouche, et en particulier d'établir l'interface entre les alluvions et les formations miocènes au niveau du profil de mesure.

Les sondages étant relativement éloignés du tracé, ce modèle ne constitue qu'une première approximation. Cependant, il s'agit là, généralement, de la seule représentation de la réalité du terrain disponible au début d'un projet d'urbanisme.

Cette interface géologique définit, au sein de notre espace de sous-sol investigué par la méthode électrique, deux ensembles présentant théoriquement des valeurs de résistivité différentes. Considérer ces ensembles de manière indépendante lors de l'interpolation doit permettre d'améliorer celle-ci.

La Figure 5 montre le variogramme de l'ensemble des données ainsi que le variogramme des données susceptibles d'être situées dans la formation miocène. Ainsi, vis-à-vis des données, on voit bien l'intérêt de raisonner au sein de chaque couche géologique. Concernant la couche d'alluvions, du fait de sa faible épaisseur, le variogramme suivant la profondeur n'est pas représentatif ; le variogramme utilisé pour l'interpolation est donc calé sur les données suivant la direction des abscisses N090. La Figure 6 présente les différentes interpolations entre les abscisses 150 et 300, respectivement sans tenir compte de l'interface, et en réalisant des interpolations séparées dans les 2 ensembles.

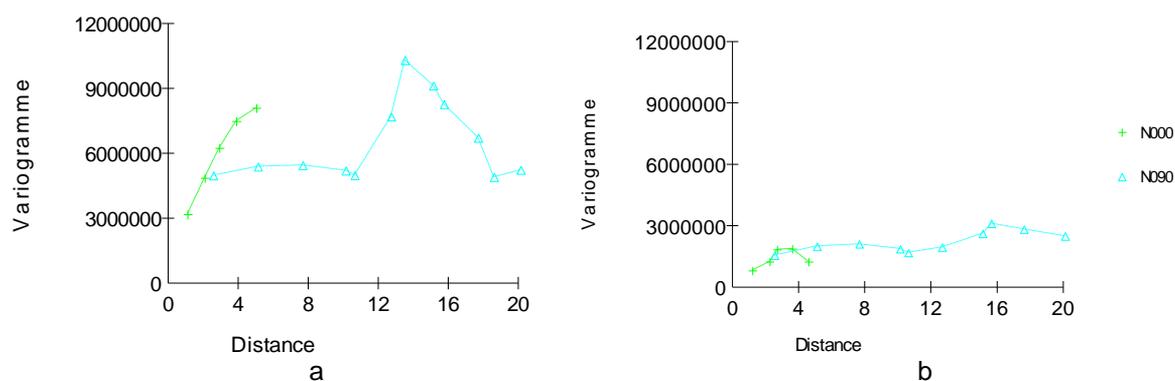


Figure 5 : Variogramme des données de résistivité a) avec l'ensemble des données b) en se limitant aux données susceptibles d'être dans la formation miocène

En première approche les deux représentations sont très proches. On note cependant que l'interpolation tenant compte de l'interface Figure 6b) permet de différencier certaines des anomalies de faibles résistivités dans les calcaires de Beauce qui, dans cette seconde interpolation, atteignent l'interface, par exemple aux abscisses 235 (ellipse noire) et 280. Par rapport à notre objectif, ces deux anomalies peuvent être interprétées comme des zones décomprimées au sein des calcaires, sous une faible épaisseur d'alluvions.

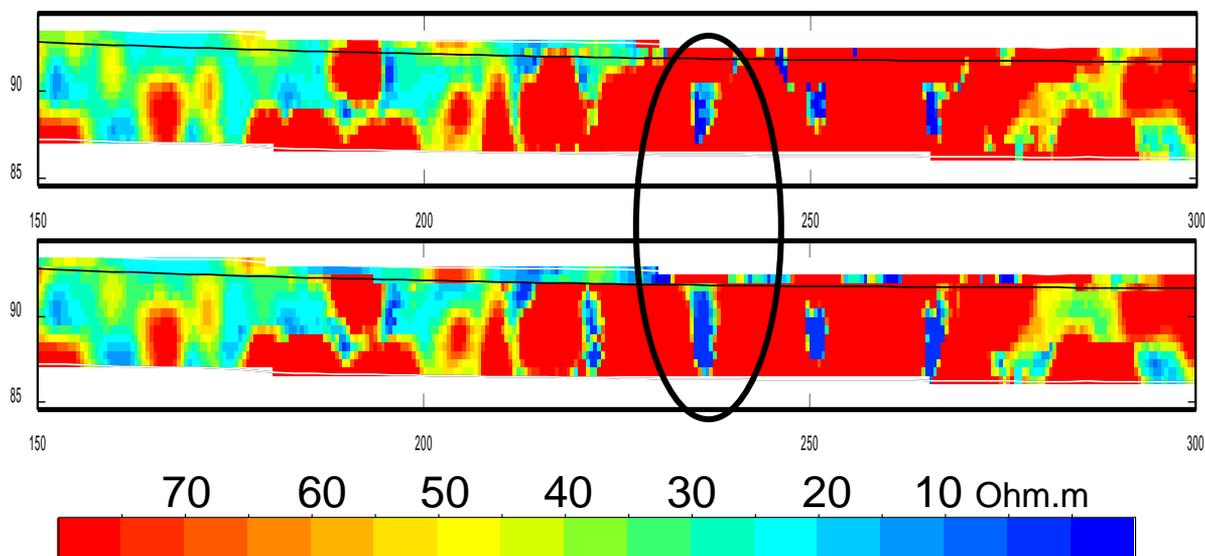


Figure 6 : Interpolation de la résistivité sans tenir compte de l'interface géologique (figure du haut) et en tenant compte d'une interface alluvions-miocènes (figure du bas) – L'interface alluvions/miocène est représentée par le trait noir – axe Z dilaté

## 6. Conclusions

Par rapport à notre question initiale de l'influence des paramètres de l'interpolation par krigeage sur les représentations 2D des mesures géophysiques, notre étude a permis de mettre en évidence, sur ce simple exemple, l'importance de l'utilisation d'un variogramme approprié, calé sur les données, tenant compte de l'anisotropie. L'introduction de discontinuités d'ordre géologique dans l'interpolation a permis de mieux différencier les caractéristiques des différentes anomalies.

Ces premiers résultats ouvrent vers différentes perspectives. Un travail similaire pourrait être réalisé sur des données de tomographie, aboutissant à une comparaison des résultats inversés en 2D puis interpolé en 3D avec les résultats inversés directement en 3D. Il pourrait aussi être intéressant de comparer les erreurs induites par l'interpolation avec les erreurs liées à la méthode SASW elle-même (acquisition et inversion).

## 7. Références bibliographiques

- Bitri A., Le Begat S. and Baltassat J.M. (1998) Shear wave velocity determination of soils from in-situ Rayleigh wave measurements. Proceedings of the 4<sup>th</sup> EEGS Meeting, Barcelona, Spain, pp. 503-506.
- Chilès J.P., Delfiner P. (1999) Geostatistics: modeling spatial uncertainty, Wiley series in probability and statistics.
- Thierry P., Debeglia N., Bitri A. (2004) Geophysical and geological characterisation of karst hazards in urban environment : applications to Orléans (France), Bull Eng Geol Env Vol. 64, Number 2.
- Rouhani S., Srivastava R.M., Desbarats A.J., Cromer M.V., Johnson A.I (1996) Geostatistics for environmental and geotechnical applications, ASTM STP 1283.