



# Modélisation de haute résolution de l'enveloppe d'un aquifère libre par approche géostatistique

Routin Grégory, Erwan Gloaguen et René Lefebvre  
INRS-Eau Terre Environnement, Québec City, Québec, Canada

## ABSTRACT

Collocated cokriging was used to define the spatially varying internal structure of an unconfined aquifer using sparse direct data and over-sampled indirect data: 1) surface topography was based on 17 land surveyed points and a digital elevation model, 2) the water table was defined on the basis of 17 groundwater levels and surface water levels combined to the interpolated surface elevation, and 3) the aquifer base was obtained from 7 rock depths from boreholes and outcrop elevations together with interpolated GPR travel times from 20 km of surveys.

## RÉSUMÉ

Le cokrigage colocalisé a permis de définir la structure interne variable dans l'espace d'une nappe libre avec des données directes éparses et des données indirectes denses : 1) la topographie de la surface a été définie avec 17 points arpentés et un modèle numérique de terrain, 2) la surface libre a été tracée avec 17 mesures de niveau d'eau dans des puits et des élévations de cours d'eau avec la topographie interpolée de la surface et 3) la base de l'aquifère a été obtenue de 7 élévations du roc en forage et d'affleurements combinés aux temps de parcours interpolés de 20 km de levés géoradar.

## 1 INTRODUCTION

« La description de l'hétérogénéité des aquifères représente un des défis les plus importants de la recherche hydrogéologique » (De Marsily et al. 2005). En effet, au cours des deux dernières décennies, le développement continu des capacités de simulation numérique a permis aux modèles de faire une représentation de plus en plus détaillée des systèmes d'écoulement complexes (Frind et al. 2006; Boutin et al. 2004; Pontlevoy et al. 2004). Cependant, les capacités des simulateurs à intégrer des propriétés hétérogènes ont largement dépassé les possibilités des méthodes conventionnelles de caractérisation hydrogéologique à produire les données requises pour bien définir la distribution spatiale de ces propriétés dans les modèles (Rubin et Hubbard 2005). Ces hétérogénéités sont en effet essentielles afin de caractériser l'architecture et la continuité d'unités de perméabilité variable, régissant la structure des zones sources de contamination, la migration des panaches de contaminants dissous, et leur éventuelle réhabilitation.

Les méthodes de caractérisation conventionnelles sont mal adaptées pour donner de l'information sur la continuité des unités ou la distribution de leurs propriétés hydrauliques. Aussi, l'ajout de forages supplémentaires à un site déjà très caractérisé fournira peu d'information nouvelle. De plus, même lorsque de tels travaux très détaillés sont réalisés, ils ne permettent généralement pas de caractériser adéquatement l'hétérogénéité d'un aquifère (Ouellon et al. 2006).

Il est aussi essentiel de connaître avec précision la structure interne d'un aquifère, car celle-ci contrôle en partie l'écoulement. Ceci est d'autant plus important en présence d'un panache de contamination. Il convient non seulement de caractériser précisément la piézométrie (influençant grandement la migration du panache), mais

aussi les dépressions topographiques du niveau de base de l'aquifère (le roc dans cette étude), pouvant être de possibles lieux de piégeages et/ou d'accumulation de contaminants.

Nos travaux avaient pour but de développer une approche hydrogéophysique et géostatistique pour la définition de la structure interne d'une nappe libre. Cette approche est basée sur le cokrigage de données primaires éparses et de données secondaires densément échantillonnées (Desbarat, 2001).

## 2 SITE D'ÉTUDE

La figure 1 montre la région d'étude, qui est le sous-bassin versant dans lequel se trouve la propriété de la Régie intermunicipale de gestion des déchets des Chutes-de-la-Chaudière (RIGDCC). Cette région fait 12 km<sup>2</sup> et est située à Saint-Lambert-de-Lauzon, à 20 km de la ville de Québec. La RIGDCC gère l'enfouissement des déchets pour les municipalités de la rive sud de Québec. La Régie gère un site d'enfouissement sanitaire (SES) en exploitation répondant aux normes en vigueur, incluant la présence d'une membrane imperméable à sa base ainsi que la récupération et le traitement du lixiviat généré dans le SES. La propriété de la Régie comprend aussi un ancien dépotier désaffecté recouvert par une membrane et avec un drainage de surface, mais sans membrane à la base des déchets. En 24 ans d'exploitation, de 1974 à 1997, 900 000 tonnes de déchets ont été enfouis dans ce dépotier en provenance de sources municipales, agricoles et industrielles, à partir de 15 municipalités différentes. Ces déchets ont été placés directement sur les dépôts meubles.

L'unité de sable constituant l'aquifère sableux de surface a été mis en place dans un contexte marin littoral. Ce sable est déposé dans une faible dépression locale du socle rocheux qui affleure par endroits autour de la région d'étude, et qui constitue le niveau de base de notre aquifère (étant très peu perméable par rapport à l'aquifère). La limite à l'est de la région d'étude représente une ligne de partage des eaux de surface. Les autres limites suivent des cours d'eau et sont situées à des distances telles que la migration et l'atténuation naturelle du lixiviat émis par l'ancien SES puissent être présumées complètes à l'intérieur de ces limites.

L'ancien SES est localisé sur un haut topographique constituant une ligne de partage des eaux souterraines. Puisque l'écoulement origine de ce site, il ne devrait pas y avoir d'écoulements, sous le site, d'eau souterraine provenant de l'amont du SES.



Figure 1. Site d'étude, bassin versant, puits INRS-ETE et levés géoradars (GPR) (lignes vertes)

### 3 DONNÉES UTILISÉES

#### 3.1 Piézométrie

Les niveaux d'eaux utilisés pour la réalisation de la carte piézométrique proviennent de la caractérisation de la zone d'étude à l'aide d'une foreuse de type Getotech 605D, utilisée pour l'installation de 17 puits, répartis sur l'ensemble du site (Fig. 1). L'élévation des cours d'eaux présents sur le site a aussi été mesurée (Fig. 6). Le niveau d'eau étant très proche de la surface sur ce site (~1m), les cours d'eau sont considérés comme exutoires de la nappe phréatique, leurs élévations correspondant alors au niveau d'eau de la nappe.

#### 3.2 Profondeur au Roc : Utilisation de Données Conventionnelles

La profondeur au roc (niveau de base de l'aquifère) a été mesurée grâce aux données de carottage obtenus par

forage; chaque puits ayant été arpentés et géoréférencés, les coordonnées exactes de profondeur du roc ont pu être extraites, à chaque fois que l'échantillonnage le permettait. Seul 7 forages sur 17 nous ont permis d'atteindre le roc.

La figure 2 montre les données supplémentaires aux données de forages de l'INRS-ÉTÉ. Elle montre aussi la carte géologique numérisée, ainsi que la carte du site d'étude superposée en transparence. N'ayant que 7 points de caractérisation sur un site d'étude de 12 km<sup>2</sup>, il est nécessaire d'utiliser d'autres données externes afin de caractériser la base de l'aquifère. Les données des puisatiers de Québec, autour, et sur la zone d'étude ont pu être récupérées. Ces données comprennent les coordonnées géodésiques, ainsi que l'élévation de chaque puits, et sa profondeur au roc (matérialisé par les points jaunes sur la Fig. 2). Une carte géologique a ensuite été numérisée sous ArcGis. Cette carte géologique numérisée et géoréférencée a permis de pointer sous ArcGis les points d'affleurement du roc, considérant que ces affleurements équivalent à une profondeur du roc égale à zéro mètre (points verts sur la Fig. 2). Les points rouges représentent des affleurements observés sur le terrain (Fig. 2).

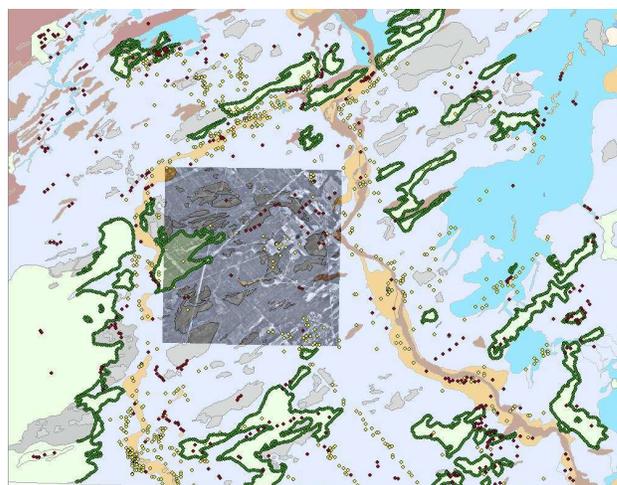


Figure 2. Données conventionnelles utilisées dans l'établissement de la carte de profondeur au roc. Pointé des affleurements du roc. Carte du site d'étude en transparence.

#### 3.3 Profondeur au Roc : Utilisation du Géoradar

Le géoradar, ou GPR (ground penetrating radar), est une méthode géophysique utilisant des impulsions électromagnétiques de hautes fréquences, émises par des antennes proches de la surface, pour connaître la géométrie du sous sol. Un signal est envoyé dans le milieu étudié, et les ondes réfléchies aux différentes interfaces rencontrées sont mesurées par un système d'acquisition. Les réflexions du milieu sont conditionnées par ses propriétés électriques. La différence de permittivité électrique (essentiellement reliée à la teneur

en eau) entre deux zones va induire une réflexion proportionnelle au contraste, ce qui permet de détecter des variations de teneur en eau, des vides, ou des changements de faciès géologiques.

Les lignes vertes sur la figure 1 montrent les 20 km de lignes géoradar effectuées sur la zone d'étude. Des antennes de 100 MHz ont été choisies, afin d'avoir le meilleur compromis entre la résolution et la profondeur d'investigation. Chaque ligne radar passe par des puits afin de corrélérer l'information GPR avec les mesures de forage. Après traitement des données radar, les sondages ont été géoréférencés sous ArcGis. Un pointé des réflexions des ondes électromagnétiques à l'interface sable/roc a ensuite été effectué sous Matlab (Fig. 3). L'ensemble des pointés est représenté en 3D sur la Figure 4. Les réflexions radar semblent indiquer que la topographie de l'interface sable-roc est très irrégulière.

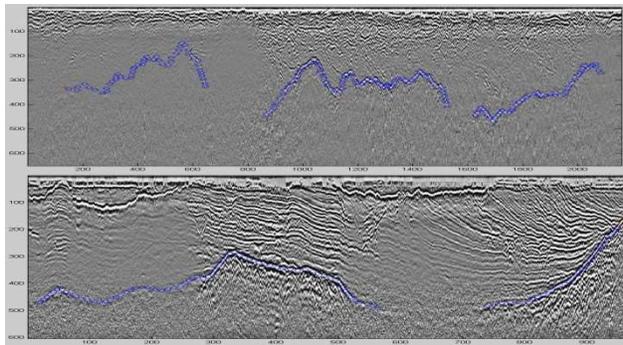


Figure 3. Pointés (points bleus) de l'interface sable/roc de 2 des 30 levés géoradars.

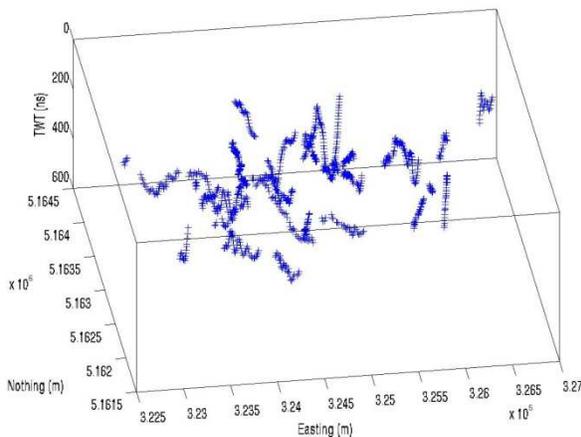


Figure 4. Vue 3D des pointés au roc sur le site d'étude

#### 4 APPROCHE MULTIVARIABLE

L'une des applications principales de la géostatistique multivariable est d'améliorer les prévisions d'une variable principale en exploitant la corrélation avec des variables secondaires.

Les méthodes géostatistiques multivariables peuvent être particulièrement utiles lorsque peu d'observations de la variable à interpoler sont disponibles, et que la ou les variables secondaires sont densément échantillonnées, ce qui est le cas dans notre étude. En effet des cartes de piézométrie et de profondeur au roc ont été obtenues par krigeage ordinaire, mais leurs résolutions étaient insuffisantes en vue de la résolution de caractérisation attendue dans le cadre de cette étude. En pratique, l'utilisation d'une de ces techniques peut améliorer la qualité des prévisions obtenues seulement si les corrélations entre les variables régionalisées auxiliaires et la variable à interpoler sont supérieures à 0.4 en valeur absolue (Asli et Marcotte, 1995).

#### 4.1 Principes du Cokrigeage Colocalisé

Lorsque la seconde variable est plus densément échantillonnée que la variable primaire, le système de cokrigeage devient numériquement instable. Entre autres, les données des variables secondaires qui sont à l'emplacement exact ou très proche de la localisation où l'estimation de la donnée principale doit être effectuée, tendent à masquer l'effet des variables primaires qui sont dans le voisinage. Dans ces conditions, l'estimation n'est soutenue que par les données des variables secondaires. Plusieurs techniques existent pour prendre l'avantage sur le sur-échantillonnage des données secondaires. Parmi les techniques de cokrigeage, le krigeage simple avec dérive externe, et le cokrigeage colocalisé sont les plus utilisées. La technique de cokrigeage colocalisé proposée par Xu et al. (1996) ne prend en compte que les variables secondaires qui sont co-localisées avec le point où l'estimation de la variable primaire doit être effectuée. Une des grandes différences entre le krigeage avec dérive externe et le cokrigeage colocalisé est la manière dont les variables secondaires sont prises en compte (Dubrule, 2003). Dans le cas du krigeage avec dérive externe, la seconde variable supporte l'information sur la moyenne locale de la première variable, alors que lors du cokrigeage colocalisé, la variable secondaire influence directement l'estimation de la variable principale. En outre, contrairement au krigeage, dans le cokrigeage colocalisé l'estimation de la variable principale est aussi guidée par la covariance croisée. L'équation de l'estimation du cokrigeage colocalisé est :

$$Z_{DP}^*(u) = \sum_{i=1}^{n(u)} \lambda_i Z_{DP}(u_i) + \lambda_2 [Z_{radar}(u) - m_2 + m_1] \quad [1]$$

Avec la condition de non biais :

$$\sum_{i=1}^{n(u)} \lambda_i(u) + \lambda_2(u) = 1 \quad [2]$$

Où  $u$  est la localisation où  $Z_{DP}$  doit être estimé,  $\lambda_i$  sont les poids de krigeage de la variable principale, et  $\lambda_2$  est le poids de krigeage de la variable secondaire.

Contrairement au cokrigage classique, le cokrigage colocalisé requiert seulement de calculer et modéliser la covariance de la variable principale ( $C_{11}(h)$ ) et la covariance croisée entre la variable principale et secondaire ( $C_{12}(h)$ ). En posant que les covariances des variables sont proportionnelles (Modèle Markov), le cokrigage colocalisé peut être relaxé un peu plus :

$$C_{12}(h) \approx \frac{C_{12}(0)}{C_{11}(0)} C_{11}(h) \quad [3]$$

Où  $C_{11}(0)$  est la variance de la variable principale, et  $C_{12}(0)$  est la corrélation entre la variable principale et secondaire. Ainsi, le modèle Markov, requiert seulement le calcul de la covariance de la variable principale, et la corrélation simple entre les données principales et secondaires. Il est important de noter que le cokrigage colocalisé impose que la variable secondaire soit disponible aux points d'observation de la variable primaire ainsi qu'en tous les points où une estimation est désirée.

## 5 RÉSULTATS

### 5.1 Piézométrie

#### 5.1.1 Corrélation des variables

Selon Desbarats (2001), l'interpolation du niveau piézométrique en utilisant un modèle numérique d'élevation (MNE) comme variable secondaire donne de très bons résultats par cokrigage colocalisé. Afin d'améliorer la résolution de la surface topographique sur le site d'étude, les 17 points d'arpentage correspondant à la localisation des puits ont été cokrigés en utilisant le MNE comme variable secondaire. Cette variable secondaire est disponible en tout point d'une grille relativement fine (30 m x 30 m) à l'échelle du domaine (12 km<sup>2</sup>), donnant un cas hétérotopique dense, propice au cokrigage colocalisé.

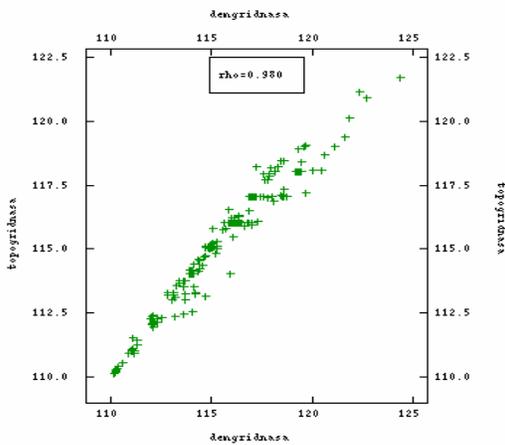


Figure 4. Piézométrie en fonction du MNE cokrigé

Avant l'estimation, il est primordial de vérifier la corrélation entre les deux variables utilisées. La figure 4 montre que la corrélation du MNE en fonction de la piézométrie est de 0,98.

#### 5.1.2 Variogramme expérimental multidirectionnel

Le logiciel utilisé dans cette étude est ISATIS. Il permet de visualiser la carte du variogramme expérimental multidirectionnel (Fig.5). Il représente la semivariance pour chacune des paires de point de mesure en fonction de la distance qui les sépare ainsi que leur angle.

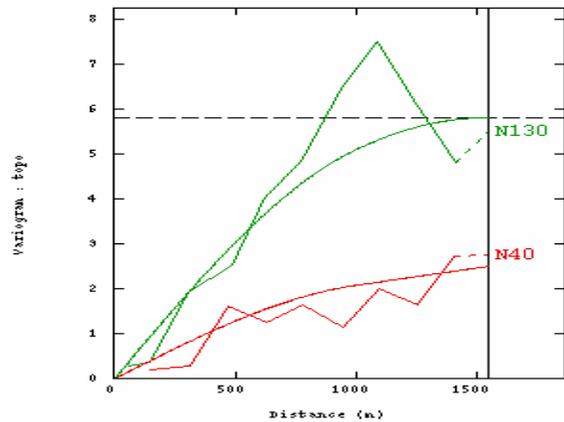


Figure 5. Semi-variogrammes expérimentaux et modèle ajusté aux données piézométriques

La Figure 6 montre la carte variographique multidirectionnelle des mesures piézométriques. Elle représente la variabilité moyenne dans toutes les directions à différents pas de calcul. La position centrale du graphique représente la distance zéro. Les intervalles de distance augmentent du centre vers la périphérie.

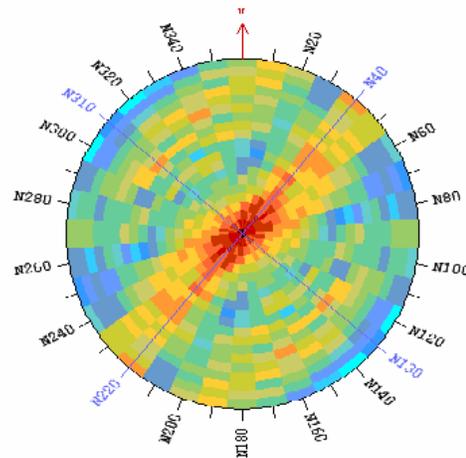


Figure 6. Variogramme expérimental multidirectionnel des données piézométriques

Sur la figure 6, l'amplitude de la variabilité est représentée par les couleurs : les faibles valeurs sont en bleu et les valeurs élevées sont en rouge. Lorsque la variabilité est égale dans toutes les directions, c'est-à-dire lorsque la variation dépend uniquement de la distance de séparation, il s'agit d'un modèle isotrope. Dans le cas présenté sur la Figure 6, on observe une forte variabilité dans l'axe N310 et une faible variabilité dans l'axe N40 du semi-variogramme de surface. Il s'agit d'une anisotropie zonale orientée dans l'axe N310 qui a été modélisée sur la Figure 5.

### 5.1.3 Semi-variogramme

La modélisation du variogramme ainsi que toutes les étapes géostatistiques de cette étude ont été effectuées grâce au logiciel ISATIS. En fonction du modèle choisi, les différents paramètres du variogramme (effet de pépité, plateau et portée) sont calculés automatiquement. Il est possible par la suite de les modifier afin d'améliorer les résultats.

Le variogramme expérimental multidirectionnel nous indiquant une anisotropie zonale dans l'axe N310 (Fig. 5), deux modèles synthétiques sphériques ont été ajustés sur les données expérimentales. Les valeurs de portée et de plateau pour les modèles de semi-variogramme ajustés, sont respectivement de 1500 m et de 5,8 m<sup>2</sup> pour l'axe N130, et de 750 m et 1,8 m<sup>2</sup> pour l'axe N40 (Fig. 5).

### 5.1.4 Cokrigage

La figure 7 représente la carte piézométrique finale, obtenue par cokrigage des données piezo (puits et cours d'eaux) et du MNE (lui-même cokrigé avec l'arpentage), utilisé comme variable secondaire.

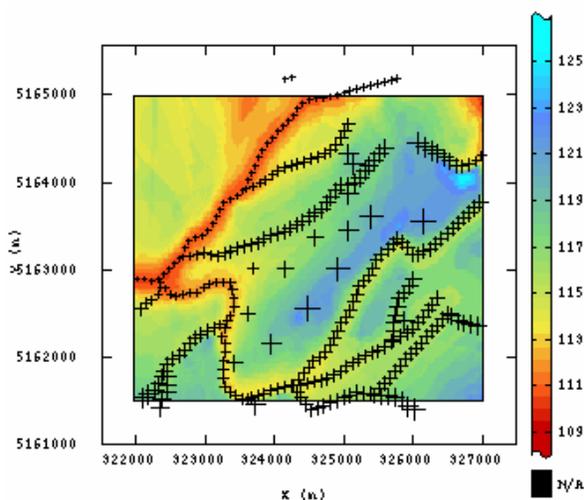


Figure 7. Carte piézométrique obtenue par cokrigage (données conventionnelles + MNE). (Les grosses croix noires = puits ; petites croix noires = élévation des cours d'eau).

Après plusieurs essais, une division sur 12 quadrants a été décidée, avec un nombre de 4 points par quadrants minimum, sans limite maximum, et sans voisinage imposé. Cette carte piézométrique indique un écoulement de type radial des zones élevées (bleues) aux zones moins élevées (jaune à rouge), et en direction des cours d'eau. Les croix représentent les données conventionnelles utilisées lors du cokrigage. La résolution de cette carte est bien meilleure que celle obtenue par krigeage ordinaire des données conventionnelles obtenue lors d'études préalables. Il apparaît donc que l'ajout d'une variable secondaire indirecte permet d'augmenter la résolution de l'interpolation, ce qui permet de mieux caractériser les écoulements du site d'étude.

### 5.1.5 Variance de krigeage

La Figure 8 présente la carte de la variance de krigeage, qui est l'information sur la qualité de l'estimation, en fonction de la distribution spatiale des données et du modèle de variogramme utilisé. Cette carte permet de visualiser les zones à faible variance de krigeage (en rouge et jaune), ainsi que les zones à fortes variances de krigeage (en vert). Les zones bleues représentent les régions où la portée est supérieure à la distance d'influence.

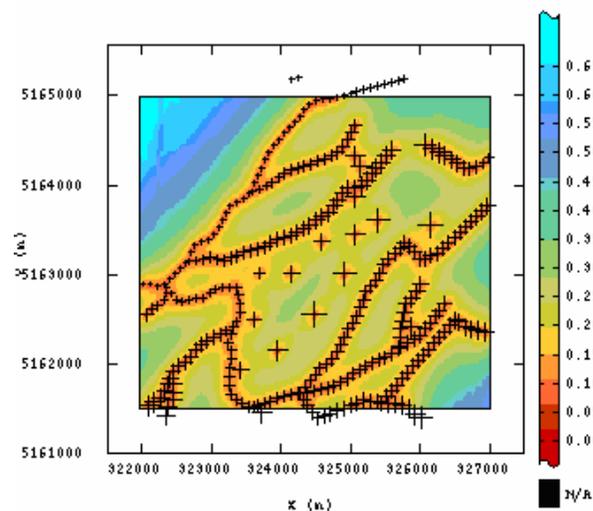


Figure 8. Variance de cokrigage des données piézométriques

Les zones à fortes variances de krigeage étant des zones où la distribution spatiale des données est faible, inversement aux zones bien échantillonnées, à variances faibles. La variance de cokrigage est bien plus faible que la variance obtenue par krigeage ordinaire, indiquant une meilleure estimation de la piézométrie grâce à l'utilisation d'une variable secondaire.

5.2 Profondeur au Roc

5.2.1 Krigeage des données géoradar

La variabilité spatiale du roc est très difficile à imaginer avec des mesures de profondeur en forage uniquement. Une campagne de levés géoradar (GPR) a été effectuée afin de caractériser l'interface sable/roc (niveau de base de l'aquifère) et sa structure interne. Cette technique a été choisie car le signal GPR pénètre jusqu'au roc, permettant de caractériser le niveau de base de manière quasi continue. Les temps de parcours de l'onde GPR entre la surface et l'interface sable-roc (Fig. 3 et 4) ont été interpolés par krigeage ordinaire (Ko) sur l'ensemble de la zone d'étude afin de servir comme variable secondaire dans le cokrigeage colocalisé du roc.

Les valeurs du variogramme expérimental montrent une forte variabilité selon les directions (Fig. 9). Les premiers pics sur la Figure 9 ne sont supportés que par une seule paire de données. Ils n'ont donc pas été considérés dans la modélisation du variogramme. Le variogramme permettant d'ajuster au mieux les données est un variogramme ayant un effet pépité de 50 (ns)<sup>2</sup>, une portée de 500 m et un seuil de 5000 (ns)<sup>2</sup> (ligne rouge sur la Fig. 9).

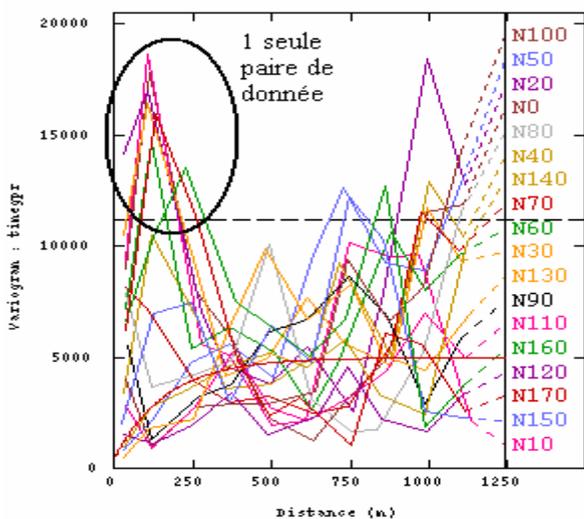


Figure 9. Variogrammes expérimentaux et modèle synthétique des temps de parcours GPR entre la surface et le roc.

La Figure 10 montre le résultat du krigeage ordinaire (Ko) des données GPR. La Figure 10 montre la présence de variations brusques des temps de parcours indiquant une forte variabilité spatiale de l'interface entre le sable et le roc. La Figure 11 montre la variance de krigeage du Ko des données GPR et les données utilisées représentées en blanc. Il y a une faible variance proche des lignes d'acquisition GPR (zones rouges et jaunes) et des zones à plus forte variance lorsqu'on s'éloigne des données (zones bleues).

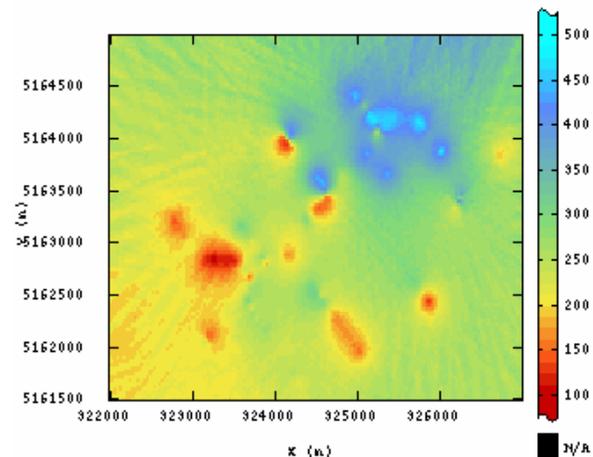


Figure 10. Krigeage ordinaire des données GPR

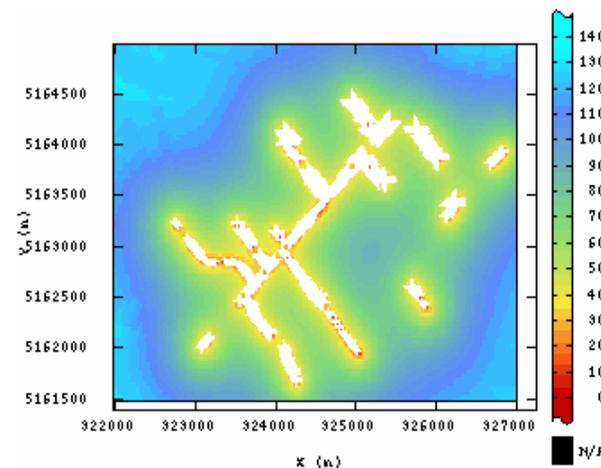


Figure 11. Variance de Krigeage du Ko des données GPR

5.2.2 Cokrigeage des données de profondeur au roc et des données GPR.

La variable principale utilisée dans le cokrigeage est composée des données conventionnelles présentées à la Figure 2 et la variable secondaire est la carte du Ko des données GPR présentées à la Figure 10. Ces deux variables ont un coefficient de corrélation de 0,67, suffisant pour effectuer un cokrigeage colocalisé.

La figure 12 présente le semi-variogramme expérimental des données conventionnelles présentées à la Figure 2. Les variogrammes expérimentaux étant assez similaires, selon les différents axes, un seul modèle de variogramme synthétique a été ajusté sur les données. Ce semi-variogramme synthétique est un modèle exponentiel avec un effet pépité de 10 m<sup>2</sup>, une portée de 5000 m et un seuil de 31 m<sup>2</sup>.

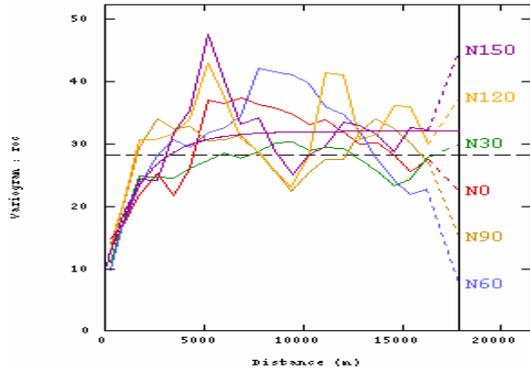


Figure 12. Semi-variogramme expérimental et synthétique des données conventionnelles de profondeur au roc

### 5.2.3 Cokrigage colocalisé de l'épaisseur de l'aquifère

La Figure 13 montre les résultats obtenus par cokrigage colocalisé de l'épaisseur de l'aquifère, en utilisant l'information du GPR. Nous avons constaté une nette amélioration de la résolution par rapport à la carte de profondeur au roc obtenue par  $K_0$  lors d'études préalables. La carte cokrigée représente bien les aspérités de la topographie du roc observées sur les images radar (Fig. 3). Cette forte variation du fond de l'aquifère libre aura une influence majeure sur l'écoulement de l'eau souterraine. Par ailleurs, le modèle de la structure interne de l'aquifère permettra de simuler les écoulements souterrains en se rapprochant le plus possible de la réalité. La Figure 13 montre aussi que la zone d'étude se trouve dans une dépression topographique du roc (zone bleue), encaissée dans une zone de haut topographique (zones rouges). En plus de la variabilité spatiale de petite longueur d'onde, la tendance générale de la topographie du roc va grandement influencer l'écoulement.

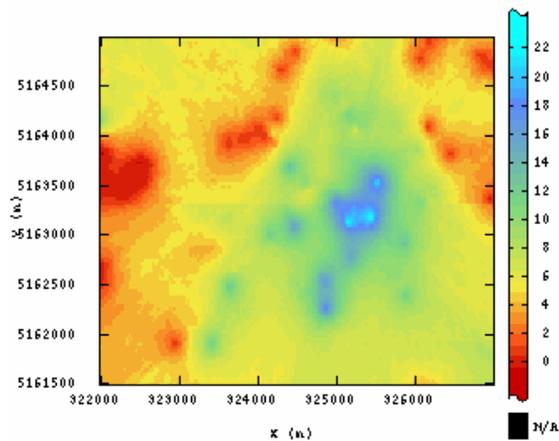


Figure 13. Cokrigage colocalisé de l'épaisseur de l'aquifère

### 5.3 Intégration des Surfaces : Modèle de la Structure Interne de l'Aquifère

La figure 14 présente, avec une exagération verticale de l'ordre de 100, la surface piézométrique du site d'étude (obtenue par cokrigage des données conventionnelles et du MNE), montrée dans les tons de rouge (hautes élévations) et la topographie du roc (obtenue par cokrigage des données conventionnelles et des données radar), indiquée dans les tons de bleu (faibles élévations). Cette carte représente un modèle de l'enveloppe de l'aquifère libre. Elle montre une élévation topographique dans l'axe nord-est / sud-ouest, ainsi qu'une dépression topographique au centre de la zone d'étude. Cette dépression crée un chenal au niveau de la topographie du niveau de base, pouvant influencer sur les écoulements et la migration du lixiviat. Cette carte montre aussi la variabilité spatiale de la topographie de l'interface entre le sable et le roc. Plusieurs dépressions topographiques sont notables, pouvant être autant de lieux de piégeage de contaminants. Il faut noter l'effet non lissé du cokrigage colocalisé dû à l'utilisation de variables secondaires densément échantillonnées. *A contrario*, par construction, une carte de krigeage est plus lisse que les mesures observées car le krigeage n'a pas pour but de reproduire la variabilité spatiale des variables à interpoler mais plutôt de minimiser la variance d'estimation.

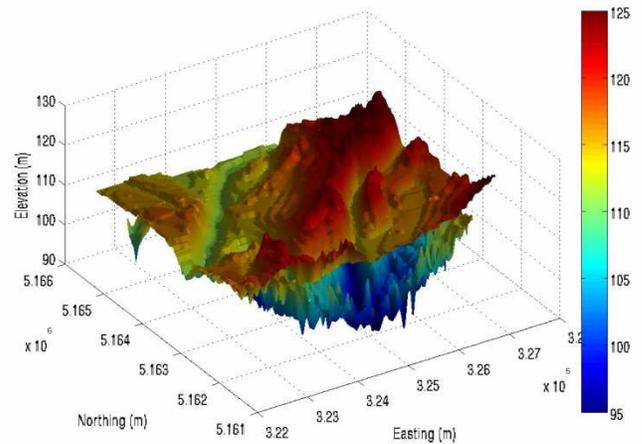


Figure 14. Enveloppe de l'aquifère, comprenant la piézométrie en haut (tons rouges) et la profondeur au roc en bas (tons bleus).

## 6 CONCLUSIONS

La plupart des études d'hydrogéologie environnementale classiques n'utilisent que les données de forages pour la caractérisation de sites. Nous avons montré que l'ajout de données secondaires, souvent disponibles, et intégrées par géostatistique multivariable permet d'améliorer l'estimation spatiale des variables hydrogéologiques d'intérêt. En outre, le cokrigage colocalisé est une méthode géostatistique facile à utiliser et ne nécessitant que la modélisation d'un seul variogramme.

Cette approche géostatistique nous a permis d'augmenter la résolution de caractérisation, tout en économisant du temps et de l'argent, par rapport aux coûts engendrés par une caractérisation conventionnelle de même résolution. De plus, les effets de lissage dus au krigeage (ou à toutes méthodes d'interpolation) ont été réduits grâce à l'utilisation de variables secondaires, permettant ainsi de caractériser les variations topographiques de la base de l'aquifère. Cette grande variabilité spatiale de la structure de l'aquifère aura une forte influence sur l'écoulement de l'eau souterraine. La connaissance de la structure interne de l'aquifère couplée à la modélisation par méthodes géostatistiques des conductivités hydrauliques à l'intérieur de la structure, à venir, permettra une meilleure représentation du système d'écoulement et une modélisation représentative de l'écoulement souterrain et du transport de contaminants dans la zone d'étude.

Il reste néanmoins à étudier l'utilisation du MNE comme seconde variable lors du cokrigeage colocalisé. En effet nous savons que la piézométrie du site ne peut pas suivre de façon régulière et homogène la topographie de surface et que les relations entre la topographie et la surface piézométrique ne sont pas toujours linéairement corrélées, notamment lorsque la topographie est accidentée. Il serait donc intéressant de remplacer le MNE par une variable physiographique, qui correspondrait possiblement mieux à la piézométrie.

Cette étude a montré que le cokrigeage colocalisé et les approches géostatistiques multivariées sont une des avenues possibles pour répondre au besoin de nouvelles méthodes de caractérisation en hydrogéologie. Les méthodes géostatistiques permettent d'intégrer diverses données indirectes souvent sur-échantillonnées par rapport aux variables d'intérêt, afin d'estimer avec une grande résolution les hétérogénéités spatiales des variables hydrogéologiques.

## 7 REMERCIEMENTS

Cette étude a été supportée par la Commission Géologique du Canada (Programme de cartographie hydrogéologique, GW4800-J08 05), par la Régie Intermunicipale de gestion des déchets des chutes de la Chaudière et par une subvention à la découverte du CRSNG à R.L.

## 8 RÉFÉRENCES

- Asli, M., Marcotte, D., 1995. Comparison of Approaches to Spatial Estimation in a Bivariate Context. *Mathematical Geology*, 27(5), p. 641-658
- Baillargeon, S., 2005. Revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations.
- Boutin, A., Lefebvre, R., Blais, V., Martel, R., Therrien, R., Parent, M., 2004: Modeling of groundwater flow and TCE transport in the Valcartier area aquifer system. In D. Demers, D. Leahy, R. Lefebvre, S. Leroueil et R. Martel, ed., *Proceedings, 5<sup>th</sup> Canadian Geotechnical Conference and 5<sup>th</sup> Joint CGS/IAH Conference*, October 24-27, 2004, Quebec City, Canada, ISBN 0-920505-29-5, Session 4B, 36-43.
- De Marcily, Gh., Delay, F., Goncavès, J., Renard, Ph., Teles, V., Violette, S., 2005. Dealing with spatial heterogeneity. *Hydrogeology Journal*, 13, 161-183
- Desbarats A.J. et al., 2001. On the kriging of water table elevations using collateral information from a digital model
- dubrule, O., 2003. *Geostatistics for seismic data integration in earth models*. SEG, Tulsa, OK, USA, 201 pp.
- Frind, E.O., Molson, J.W., Rudolph, D.L., 2006. Well vulnerability: A quantitative approach for source water protection. *Ground Water*, 44(5), 732-742.
- Goovaerts P., 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*. Applied geostatistics series.
- Ouillon T., Lefebvre R., Marcotte D., Boutin A., Blais, V., Parent M., 2006. Hydraulic conductivity heterogeneity of a local deltaic aquifer system from the kriged 3D distribution of hydrofacies from borehole logs, Valcartier, Canada. *Journal of hydrology*, Paper HYDROL5550.
- Pontlevoy, O., Lefebvre, R., Therrien, R., Martel, R., Ouellet, M., Lamontagne, C., Racine, C., 2004: Numerical modeling of groundwater flow in interconnected granular and rock aquifers at the Ville Mercier DNAPL-contaminated site, Quebec, Canada. In D. Demers, D. Leahy, R. Lefebvre, S. Leroueil et R. Martel, ed., *Proceedings, 5<sup>th</sup> Canadian Geotechnical Conference and 5<sup>th</sup> Joint CGS/IAH Conference*, October 24-27, 2004, Quebec City, Canada, ISBN 0-920505-29-5, Session 4B, 20-27.
- Rubin, Y., Hubbard, S., 2005. *Hydrogeophysics*. Springer, Water Science and Technology Library, Vol. 50, 523 pp.