



Évaluation du recouvrement quaternaire et topographie du roc de la Ceinture de roches vertes de l'Abitibi : implications pour l'exploration minérale

Guillaume Rongier, Guillaume Allard et Olivier Rabeau

MB 2014-35

Avertissement

Ce document est une copie fidèle du manuscrit soumis par l'auteur, sauf pour une vérification sommaire destinée à assurer une qualité convenable de diffusion.

ÉVALUATION DU RECOUVREMENT QUATERNAIRE ET TOPOGRAPHIE DU ROC DE LA CEINTURE DE ROCHES VERTES DE L'ABITIBI : IMPLICATIONS POUR L'EXPLORATION MINÉRALE

Guillaume Rongier (ENSG – Université de Lorraine)

Guillaume Allard (MERN)

Olivier Rabeau (MERN)

Résumé

La région de l'Abitibi renferme des évidences de multiples avancées et retraits de la marge glaciaire du Secteur du Labrador de l'inlandsis Laurentidien. Les glaciations récentes ont entraîné le dépôt d'importantes couches de sédiments quaternaires. Dans les régions où il y a une forte couverture, les cartes de profondeur au socle et de topographie du socle rocheux sont utiles dans de nombreux domaines : hydrogéologie, géotechnique, relevés géophysiques, exploration minière, etc. Dans le cas plus particulier du domaine minier, ces cartes peuvent aider à mettre en évidence des zones de préservation de roc altéré (saprolite). Ces zones d'altération du socle – qui concentrent certains éléments représentant une ressource potentiellement économique – peuvent avoir été protégées de l'érosion glaciaire dans certains secteurs où la topographie du roc favorise leur préservation. Quelques occurrences de saprolite ont été récemment documentées dans la zone d'étude. Des travaux visant à définir des zones potentielles pour la découverte de saprolite sous le recouvrement quaternaire ont été initiée dans la portion ouest de la ceinture verte de l'Abitibi. Des cartes de profondeur au socle ont été générées sur une superficie de 23 000 km² en se basant sur des données d'affleurements, de till mince et de forages. Ces données proviennent de sources variées : Commission géologique du Canada, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, compagnies minières et Ministère du Développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques. Suite à un processus de validation, une base de données homogénéisée a été générée. Les 416 984 points de données de profondeur au socle présentent une distribution exponentielle et une répartition spatiale principalement regroupée autour des zones habitées et des centres miniers. Suite à divers essais, l'interpolation à l'aide de krigeage a été privilégiée afin d'estimer la profondeur au socle sur l'ensemble de la zone d'étude. Par la suite, la topographie du socle rocheux est obtenue par soustraction de cette profondeur à la topographie de surface. Le meilleur modèle est par la suite sélectionné par validation croisée et comparaison avec des éléments géomorphologiques et structuraux connus (eskers, failles). Les zones de préservation potentielle de saprolite ont été interprétées comme étant les secteurs de grande profondeur au socle qui ne correspondent pas à une structure d'esker connue. La relation entre les fosses profondes et les différentes failles aurifères de l'Abitibi permet de mieux cibler les secteurs potentiels pour l'exploration des gisements supergènes.

Abstract

In regions affected by the passage of the Labrador sector of the Laurentide ice sheet, mineral exploration is complicated by a complex sequence of ice flow events documented by measurements of striations and other erosional marks taken from multifaceted rock outcrops. In fact, these recent glaciations led to the deposition of significant layers of quaternary sediments. In areas where the quaternary overburden is substantial, depth-to-bedrock and bedrock surface elevation maps can be useful in many fields: hydrogeology, geotechnics, geophysics surveys, mineral exploration, etc. In the case of the mineral exploration, these maps can be used to highlight areas of preserved saprolite. These chemically weathered rocks, which concentrate some economically interesting elements, may have been preserved locally from the glacial erosion by a favorable bedrock topography. Some

occurrences of saprolite have been recently documented in the study area. This paper presents a study aiming to define potential areas where saprolite may have been preserved under the quaternary sediments in the western part of the Abitibi greenstone belt in Quebec. Depth-to-bedrock maps have been generated over an area of 23 000 km² by using outcrops, areas of thin till coverage and diamond drillings data. These data were collected from different sources: Geological Survey of Canada, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, mining companies and Ministère du Développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques. After a validation process, a homogenized data base was generated in an ArcGIS format. The 416 984 depth-to-bedrock data points offer a good coverage of the study area, but present an exponential statistical distribution and are mainly localized near cities and mining camps. Following several tests, ordinary kriging interpolation was favored in order to estimate the depth-to-bedrock distance over the entire study area. The bedrock topography was afterwards calculated by the subtraction of the depth-to-bedrock distance to the surface topography. The best model was then chosen by cross-validation and comparison with geomorphological and structural elements (eskers, faults). The areas of potential preservation of saprolite have been interpreted as sectors of high depth-to-bedrock which don't correspond to a known esker structure. The relationship between the deep pits and the different gold-bearing faults were then used to target potential supergene gold deposit.

Mots clés : topographie, socle rocheux, profondeur, sédiments quaternaires, interpolation, krigeage, saprolite, ressources minérales .

Table des matières

Introduction	8
1 Description de la zone d'étude	9
1.1 Géologie du socle rocheux	10
1.2 Géologie des formations superficielles quaternaires.....	11
2 Étude des données	14
2.1 Sources	14
2.1.1 Données de forages.....	14
2.1.2 Données de surface	15
2.1.3 Données topographiques	18
2.2 Préparation.....	18
2.2.1 Données de forages.....	18
2.2.2 Données de surface	19
2.3 Analyses.....	21
3 Méthodes employées.....	23
3.1 Interpolation de la profondeur au socle rocheux.....	23
3.1.1 Les krigeages linéaires	24
3.1.2 Les krigeages non-linéaires.....	25
3.1.3 Choix de la méthode.....	27
3.2 Validation des modèles	28
3.3 Intégrations des forages n'atteignant pas le socle.....	29
4 Résultats	30
4.1 Validation par la géologie	32
4.2 Validation croisée	33
4.3 Discussion sur le modèle	34
5 Interprétation	35
5.1 Zones profondes.....	35
5.2 Application à l'exploration minérale	35
Conclusions et perspectives	37
Références.....	38

Annexe A. Étude d'autres méthodes d'interpolation.....	42
Interpolation pondérée par l'inverse de la distance	42
Interpolation par voisinage naturel.....	43
Spline avec tension	45
Annexe B. Résultats de l'interpolation de la profondeur au socle rocheux par double-krigeage	47
Annexe C. Interpolation de l'élévation de la surface du socle rocheux	54
Analyse des données	54
Résultats	55

Table des illustrations

Figure 1 - Schéma mettant en évidence un exemple de préservation de saprolite dans une fosse du socle rocheux. En effet la flexion du glacier lorsque celui-ci passe au niveau d'une la fosse est très limitée, notamment à cause de son épaisseur de plusieurs kilomètres. Ceci préserve de l'érosion les lithologies se trouvant dans les fosses.....	9
Figure 2 - Carte reprenant la zone d'étude avec différentes villes, routes, lacs et cours d'eau (d'après les données du MERNF et de la NASA (voir la partie 2.1.3)).....	10
Figure 3 - Carte géologique simplifiée de la partie québécoise de la Sous-province de l'Abitibi (modifiée d'après Moore et al. (2012)). Le cadre rouge correspond à la zone d'étude. FPDM : Faille de Porcupine-Destor Manneville; FCLL : Faille de Cadillac-Larder Lake; GBR : Groupe de Blake River.	11
Figure 4 - Carte géologique des formations quaternaires de la région d'étude (d'après les données de la Commission géologique du Canada). MH : Moraine d'Harricana.	12
Figure 5 - Carte des profondeurs maximales du lac Ojibway sur la région d'étude (modifiée d'après Nadeau (2011)).....	13
Figure 6 - Carte des forages disponibles dans le cadre de cette étude après contrôle et préparation des données (voir partie 2.2).	15
Figure 7 - Carte de localisation des différentes zones de socle affleurant et de till mince dans la région étudiée (réalisée à partir des données quaternaires de la CGC).....	16
Figure 8 - Carte de localisation des données ponctuelles de socle rocheux affleurant dans la zone d'étude après contrôle et préparation des données (voir partie 2.2).....	17
Figure 9 - Carte de la topographie de la zone d'étude réalisée à partir du MNT extrait des données SRTM de la NASA.	17
Figure 10 - Synthèse des différents types de données et des traitements effectués.	18
Figure 11 - Carte de l'ensemble des données de profondeur au socle rocheux dans la zone d'étude (incluant une zone tampon de 5 km).....	20
Figure 12 - Carte de l'ensemble des données de forages n'atteignant pas le socle rocheux (forages provenant de SIGÉOM et du MDDELCC).	20
Figure 13 - Histogramme des données de profondeur au socle rocheux (données en m).	21
Figure 14 - Cartes de Voronoï des moyennes, des écarts-types et des entropies des données de profondeur au socle rocheux.	22

Figure 15 - Schéma illustrant différents modèles de variogrammes théoriques. Les points séparés par une distance supérieure à la portée n'ont plus de lien entre eux.....	24
Figure 16 - Schéma reprenant le principe d'intégration des forages n'atteignant pas le socle rocheux : 1. réalisation d'un premier modèle à partir des données de socle ; 2. sélection parmi les forages n'atteignant pas le socle de ceux plus profonds que le modèle ; 3. réalisation d'un nouveau modèle à partir des données initiales et des forages n'atteignant pas le socle sélectionnés précédemment.....	29
Figure 17 - Carte variographique et modèle de variogramme employé pour l'interpolation par krigeage ordinaire.	30
Figure 18 - Carte de profondeur au socle rocheux résultant de l'interpolation par krigeage ordinaire avec le modèle de variogramme présenté en Figure 17.....	31
Figure 19 - Carte de l'erreur d'interpolation associée à la Figure 18.	31
Figure 20 - Carte de la topographie du socle rocheux obtenue par soustraction au MNT de la carte de la Figure 18.....	32
Figure 21 - Carte de profondeur au socle rocheux finale avec les éléments géologiques reconnaissables. FPDM : Faille de Porcupine-Destor Manneville; FCLL : Faille de Cadillac-Larder Lake ; FDC : Failles Debonne - Chicobi ; ZDLN : Zone de déformation de Laflamme-Nord ; GBR : Groupe de Blake River ; FD : Formation de Deguisier ; BLC : Batholite de La Corne ; BPT : Batholite de Pascalis-Tiblemont.	33
Figure 22 - Artéfact mis en évidence sur la carte de profondeur au socle rocheux finale.....	34
Figure 23 - Carte de localisation des données de forages où ont été identifiés des saprolites (carte réalisée à partir des données du MERN et de la CGC).....	36
Figure 24 - Carte de localisation des zones potentielles de préservation de saprolites.	37
Figure 25 - Carte de profondeur au socle rocheux obtenue à l'aide d'une interpolation pondérée par l'inverse de la distance.	43
Figure 26 - Schéma récapitulant le principe de l'interpolation par voisinage naturel : 1. un premier diagramme de Voronoï est calculé sans le point s_0 à estimer ; 2. un second diagramme est calculé cette fois avec s_0 ; 3. les deux diagrammes sont superposés afin de déterminer l'aire A_{α} d'influence sur s_0 associée à chaque point s_{α} du voisinage de s_0 – ici s_1 , s_3 , s_4 et s_5	44
Figure 27 - Carte de profondeur au socle rocheux obtenue à l'aide d'une interpolation par voisinage naturel.....	45
Figure 28 - Carte de profondeur au socle rocheux obtenue à l'aide d'une interpolation par spline avec tension.	46
Figure 29 - Carte variographique et modèle de variogramme employé pour l'interpolation par krigeage d'indicatrices.....	47
Figure 30 - Carte de probabilité résultant de l'interpolation par krigeage d'indicatrices avec le modèle de variogramme présenté en Figure 29.....	48
Figure 31 - Carte de l'erreur d'interpolation associée à la Figure 30.	48
Figure 32 - Carte variographique et modèle de variogramme employé pour l'étape d'interpolation par krigeage ordinaire du double-krigeage.....	49
Figure 33 - Carte de profondeur au socle résultant de l'interpolation par krigeage ordinaire des données non affleurantes avec le modèle de variogramme présenté en Figure 32.....	49
Figure 34 - Carte de l'erreur d'interpolation associée à la Figure 33.	50
Figure 35 - Carte de profondeur au socle rocheux résultant du double-krigeage.	50

Figure 36 - Carte variographique et modèle de variogramme employé pour l'étape d'interpolation par krigeage ordinaire du double-krigeage.....	51
Figure 37 - Carte de l'erreur d'interpolation associée à l'interpolation de l'indice d'approfondissement.....	52
Figure 38 - Carte de profondeur au socle résultant de la multiplication de la distance aux affleurements en logarithme décimal avec l'interpolation de l'indice d'approfondissement par krigeage ordinaire réalisée avec le modèle de variogramme présenté en Figure 36.....	52
Figure 39 - Carte de profondeur au socle rocheux résultant du double-krigeage.....	53
Figure 40 - Histogramme des données d'élévation du socle rocheux (données en m).	54
Figure 41 - Cartes de Voronoï des moyennes, des écarts-types et des entropies des données d'élévation du socle rocheux.....	55
Figure 42 - Carte variographique et modèle de variogramme employé pour l'interpolation par krigeage ordinaire.	56
Figure 43 - Carte de la topographie du socle rocheux résultant de l'interpolation par krigeage ordinaire avec le modèle de variogramme présenté en Figure 42.	56
Figure 44 - Carte de l'erreur d'interpolation associée à la Figure 43.	57
Figure 45 - Carte de profondeur au socle rocheux obtenue par soustraction au MNT de la carte de la Figure 43.....	57

Introduction

Dans les secteurs enfouis sous un épais recouvrement de sédiments quaternaires, la profondeur au socle rocheux et sa topographie sont des données importantes pour de nombreux domaines. En hydrogéologie ces éléments permettent d'évaluer la quantité d'eau souterraine disponible - que ce soit dans les fractures du socle ou dans certaines formations quaternaires sus-jacentes - mais aussi de comprendre sa dynamique d'écoulement (Bolduc *et al.*, 2004). Cette évaluation du réseau hydrogéologique permet par la suite d'affiner les politiques de gestion des eaux. En géotechnique connaître précisément la profondeur au socle rocheux est indispensable afin de s'assurer de la stabilité des constructions. En géophysique, les sédiments quaternaires sus-jacents au socle peuvent faire varier la réponse d'un site suivant leur consolidation et leur épaisseur, leur teneur en eau et les ondulations de la surface du socle rocheux - par exemple dues à des vallées ou des dépressions.

Dans le domaine minier, l'étude de la surface du socle rocheux et de l'épaisseur de sédiments quaternaires non-consolidés sus-jacents permet non seulement de mieux évaluer les coûts liés aux forages, mais pourrait également révéler de nouvelles ressources minérales. En effet les gisements de la ceinture de roches vertes abitibiennes sont réputés pour leur richesse en Au, Cu, Zn et Ni. Historiquement les gisements recherchés et exploités dans la ceinture de l'Abitibi se sont formés à l'Archéen. Certains, comme les sulfures massifs volcanogènes (Cu-Zn) ou les gisements de Ni magmatique, sont syngénétiques - formés de façon synchrone à leur roche hôte. D'autres, comme les gisements d'Au orogénique, sont épigénétiques - formés quelques dizaines de millions d'années plus tard. Depuis peu, des saprolites ont été mises en évidence lors de forages effectués pour l'étude des dépôts de surface au sein de la ceinture (Allard et Deschênes, 2011). Ces zones d'altération météorique seraient d'âge tertiaire ou quaternaire (Kimpe *et al.*, 1984) et un enrichissement supergène en métaux leur est souvent associé. Dans le monde plusieurs gisements sont en exploitation dans ce type de roches, comme les gisements de Ni en Nouvelle-Calédonie. Au Québec, la plupart de ces zones ont été érodées par les dernières glaciations, mais certaines ont pu être préservées de l'érosion glaciaire à la faveur de vallées ou de dépressions marquées du socle rocheux (Figure 1). Ces zones potentiellement économiques sont très peu documentées dans la ceinture abitibiennne : la priorité étant le socle rocheux, l'ensemble des matériaux non-consolidés sus-jacents ne sont pas détaillés, ce qui inclut d'éventuels saprolites. L'étude de la profondeur au socle et de la surface du socle rocheux pourrait amener à mettre en évidence des zones à fort potentiel de préservation de saprolites dont la localisation permettrait d'ouvrir de nouveaux secteurs à l'exploration minérale.

Des études de la profondeur au socle et de sa topographie ont déjà été effectuées dans d'autres régions du Canada, comme en Ontario (Gao *et al.*, 2006) et en Alberta (Slattery *et al.*, 2011), ou aux États-Unis dans l'Illinois (Dixon-Warren et O'Malley, 2004) et le Connecticut (Meyer *et al.*, 2008). La méthode consiste à recueillir et préparer des données d'affleurements du socle ainsi que des données de forages - voire des données géophysiques - puis à les utiliser pour concevoir une carte de profondeur au socle et une carte de la topographie du socle rocheux. Deux approches peuvent alors être envisagées (Chung et Rogers, 2012) :

- soit interpoler la topographie du socle et en déduire la profondeur par soustraction à la topographie de surface ;

- soit interpoler la profondeur au socle et en déduire sa topographie par soustraction à la topographie de surface.

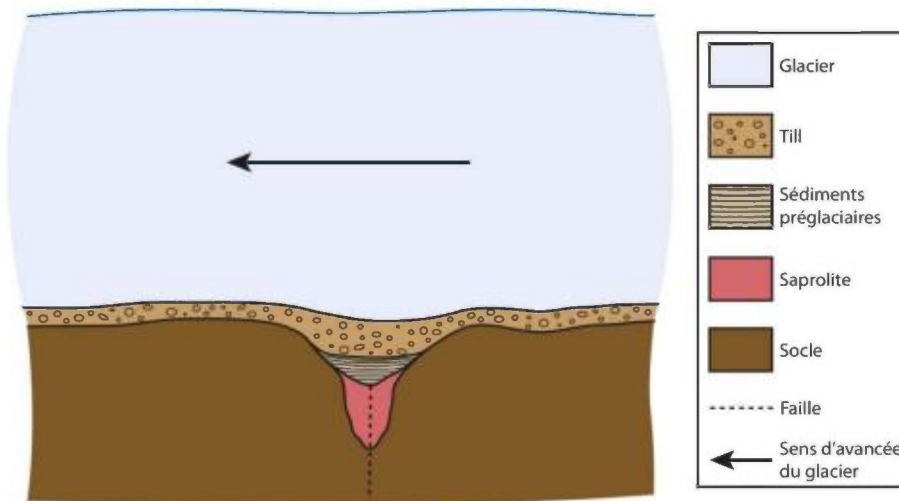


Figure 1 - Schéma mettant en évidence un exemple de préservation de saprolite dans une fosse du socle rocheux. En effet la flexion du glacier lorsque celui-ci passe au niveau d'une fosse est très limitée, notamment à cause de son épaisseur de plusieurs kilomètres. Ceci préserve de l'érosion les lithologies se trouvant dans les fosses.

Quelques études ont été réalisées dans la Sous-province de l'Abitibi mais sur des zones réduites (Boisvert et Parent, 2008 ; Boudour, 2011) et non à l'échelle régionale. Pour cela, cette Sous-province présente plusieurs avantages, notamment en terme d'abondance de données grâce aux travaux de cartographie du MERN et aux travaux des compagnies minières compilés par le gouvernement.

Des premiers tests visant à évaluer les deux approches mentionnées au paragraphe précédent n'ont pas permis d'obtenir des résultats probants avec la première méthode. En effet la topographie du socle passe au-dessus de celle de surface dans certaines zones, parfois sur des dizaines de mètres (voir annexe C). La seconde approche est donc privilégiée. L'objectif de ce projet est alors de rassembler les données disponibles afin de réaliser une carte de la profondeur au socle puis d'en déduire une carte de la topographie du socle. Ces deux cartes permettraient de mettre en évidence des vallées ou des fosses dans le socle rocheux qui auraient pu permettre la préservation de saprolites.

Dans une première partie, la géologie de la zone étudiée et plus généralement celle de la Sous-province de l'Abitibi sera passée en revue, notamment en ce qui concerne le socle et les formations quaternaires. Une deuxième partie détaillera les données disponibles ainsi que leur préparation et analyse. Dans un troisième temps, les méthodes de détermination de la profondeur au socle rocheux et de sa topographie seront explicitées. Enfin deux dernières parties détailleront les résultats et proposeront un début d'interprétation.

1 Description de la zone d'étude

La zone étudiée se situe dans le sud-ouest de la Sous-province de l'Abitibi, sur les feuillets SNRC (Système national de référence cartographique) 32C, 32D, 32E et 32F. Elle s'étend sur environ

185 km d'est en ouest et 130 km du nord au sud le long de la frontière entre le Québec et l'Ontario, soit une superficie d'environ 23 000 km². Elle est délimitée au sud par la Faille Cadillac et s'étend au nord jusqu'aux villes de Val-Paradis à l'ouest et Lebel-sur-Quévillon à l'est (Figure 2). Lors des calculs de profondeur au socle rocheux, cette zone a été étendue de 5 km afin d'éviter des problèmes d'effets de bords.

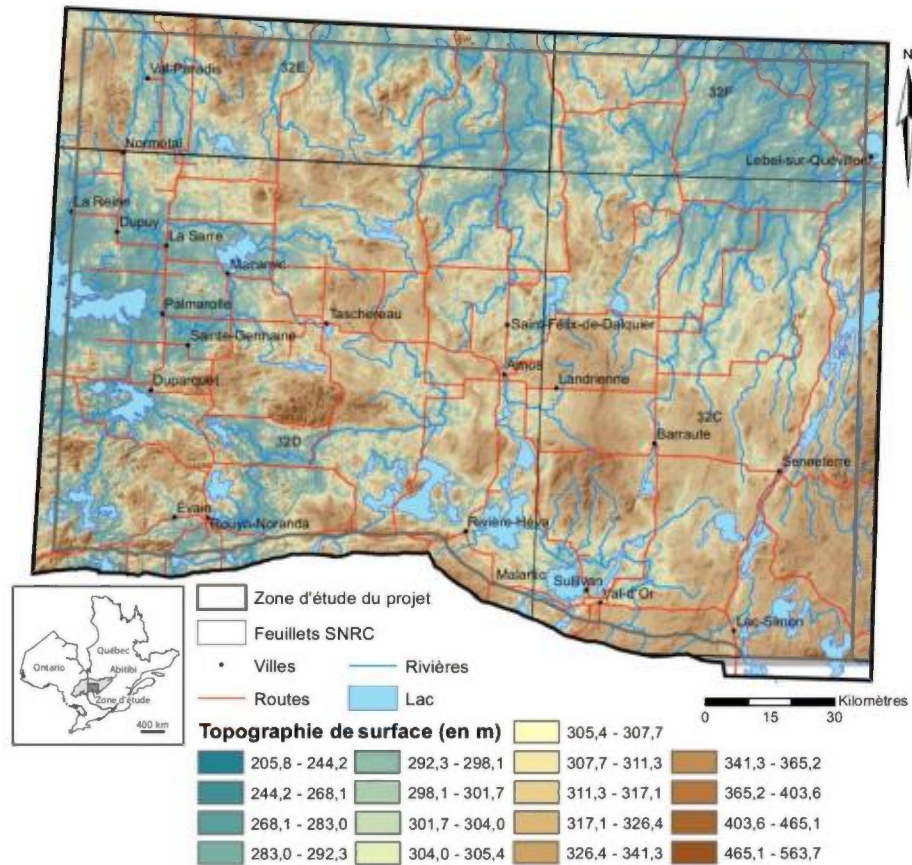


Figure 2 - Carte reprenant la zone d'étude avec différentes villes, routes, lacs et cours d'eau (d'après les données du MERN et de la NASA (voir la partie 2.1.3)).

Deux ensembles géologiques principaux peuvent être différenciés en surface dans le sud-ouest de la Sous-province de l'Abitibi :

- le socle rocheux, une ceinture de roches vertes archéenne dont il est le plus grand représentant avec une superficie de 310 par 720 km (Goutier *et al.*, 2009) ;
- les sédiments quaternaires superficiels mis en place lors du dernier épisode glaciaire et qui sont à l'origine du recouvrement d'une part importante du socle archéen.

1.1 Géologie du socle rocheux

La Sous-province de l'Abitibi est une ceinture de roches vertes située dans la province archéenne du Supérieur. Elle est composée de séquences de roches volcaniques ultramafiques, mafiques et felsiques et de roches sédimentaires organisées selon une tendance est-ouest et intrudées par des roches plutoniques (Figure 3). L'ensemble de ces roches est métamorphisé au faciès des schistes verts. La mise en place de la plupart de ces éléments est datée de 2735 à 2640 Ma

(Mueller *et al.*, 2009) et s'intègre dans un contexte d'évolution d'arcs océaniques et de collision arc-arc (Mueller *et al.*, 1996 ; Daigneault *et al.*, 2004).

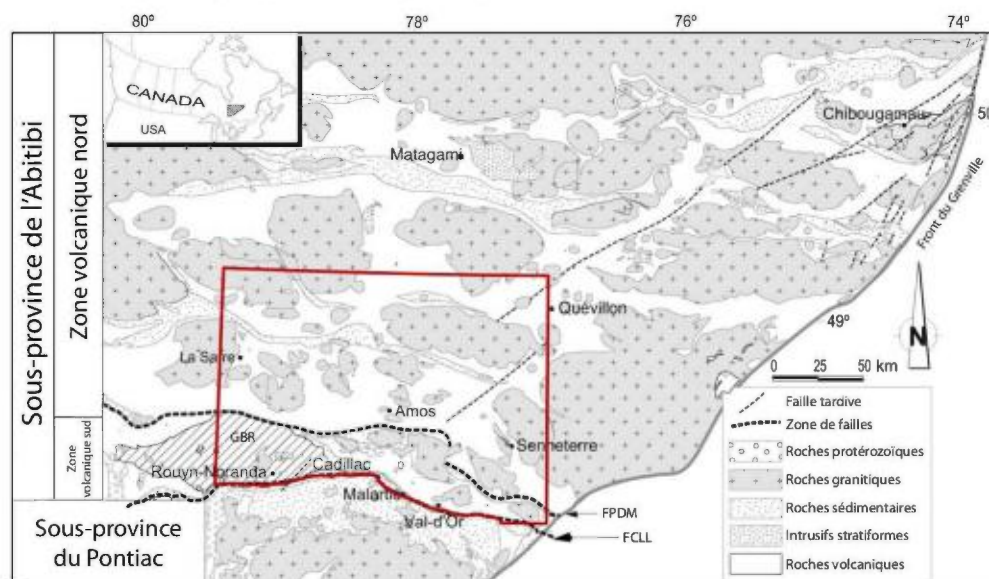


Figure 3 - Carte géologique simplifiée de la partie québécoise de la Sous-province de l'Abitibi (modifiée d'après Moore *et al.* (2012)). Le cadre rouge correspond à la zone d'étude. FPDM : Faille de Porcupine-Destor Manneville; FCLL : Faille de Cadillac-Larder Lake; GBR : Groupe de Blake River.

La Sous-province de l'Abitibi représente la deuxième plus grande concentration de sulfures massifs volcanogènes (SMV) au monde, après la Péninsule Ibérique, avec une centaine de gisements totalisant plus de 760 millions de tonnes de minerai (Goutier *et al.*, 2009). À ces SMV s'ajoutent des minéralisations aurifères de type orogénique (Groves *et al.*, 1998) et disséminées dans des syénites (Robert, 2001) ainsi que des granites et pegmatites à métaux rares et des gisements primaires de Ni. Ces différents systèmes offrent à la région un fort potentiel pour des types de métaux variés : Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Ni, Co, Mo, Li, ...

Mais ces éléments ne sont pas toujours directement accessibles. En effet ce socle rocheux est partiellement recouvert par des sédiments quaternaires non-consolidés, dont l'épaisseur peut atteindre par endroits quelques dizaines à plus de cent mètres. Ce recouvrement rend souvent difficile l'utilisation des méthodes classiques d'exploration minière.

1.2 Géologie des formations superficielles quaternaires

L'Amérique du Nord a été affectée par plusieurs grandes glaciations quaternaires. Cependant les sédiments superficiels quaternaires (Figure 4) proviennent en majorité de la glaciation wisconsinienne, dernière en date, et de la fonte de l'inlandsis Laurentidien recouvrant l'est de l'Amérique du Nord. Quatre unités principales peuvent être définies, formant de la plus ancienne à la plus récente une séquence idéale de la stratigraphie quaternaire de l'Abitibi :

les dépôts glaciaires (till) : diamicton mis en place directement par le glacier. Ce sédiment se compose de particules de toutes dimensions, allant de l'argile au grain de sable, jusqu'à des fragments de plusieurs mètres de diamètre. Il est dû à l'abrasion du glacier lorsque celui-ci s'écoule, formant de nombreux fragments anguleux polygéniques ;

les dépôts fluvioglaciaires : sédiments provenant de la fonte du glacier qui entraîne une circulation d'eau dans des tunnels sous-glaciaires. Ces tunnels permettent le transport et le dépôt du matériel détritique, formant alors des eskers. Les fragments constituant ce matériel sont émoussés et les dépôts triés : les graviers sont déposés en premiers, puis les sables, alors que les argiles sont transportés plus en aval ;

les dépôts glaciolacustres : sédiments mis en place dans le lac proglaciaire Ojibway. Il s'agit d'un important dépôt argileux recouvrant une grande partie de l'Abitibi. Ces argiles sont transportées lors du retrait du glacier. Ils ne sont déposés que lorsque le niveau du lac formé par l'accumulation d'eau de fonte au front du glacier atteint 30 à 50 m. Des varves peuvent être observées dans ces dépôts : elles forment des alternances de lits clairs et de lits sombres. Un lit clair et un lit sombre forment un couplet et marquent une année. Les lits sombres sont formés d'argiles et correspondent à la saison hivernale. Les lits clairs correspondent à la saison estivale et sont formés de silts, correspondants à un régime de plus haute énergie notamment dû à la fonte des glaciers en été ;

les dépôts postglaciaires : dépôts faisant suite à la déglaciation. Ils sont représentés par des dépôts éoliens, alluviaux et par d'importants dépôts organiques.

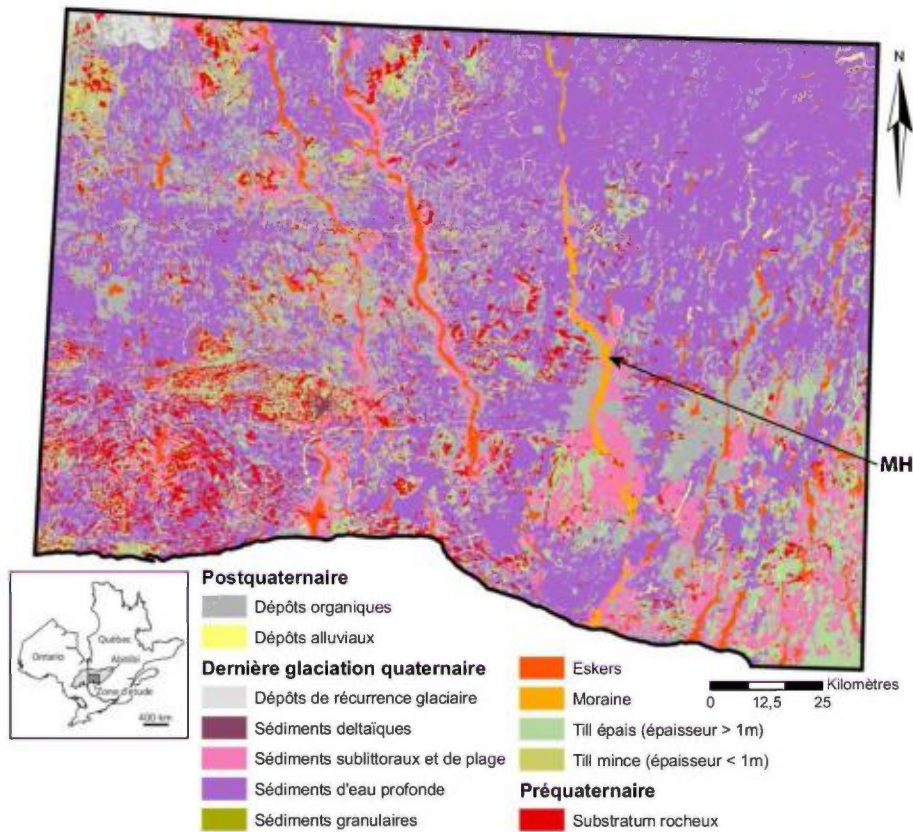


Figure 4 - Carte géologique des formations quaternaires de la région d'étude (d'après les données de la Commission géologique du Canada). MH : Moraine d'Harricana.

Ce secteur contient des indices de multiples avancées et retraits de la marge glaciaire de la région du Labrador et de l'inlandsis Laurentidien (Parent *et al.*, 1995 ; Veillette *et al.*, 1999). Ces différents mouvements sont caractérisés par des variations significatives des directions d'écoulement

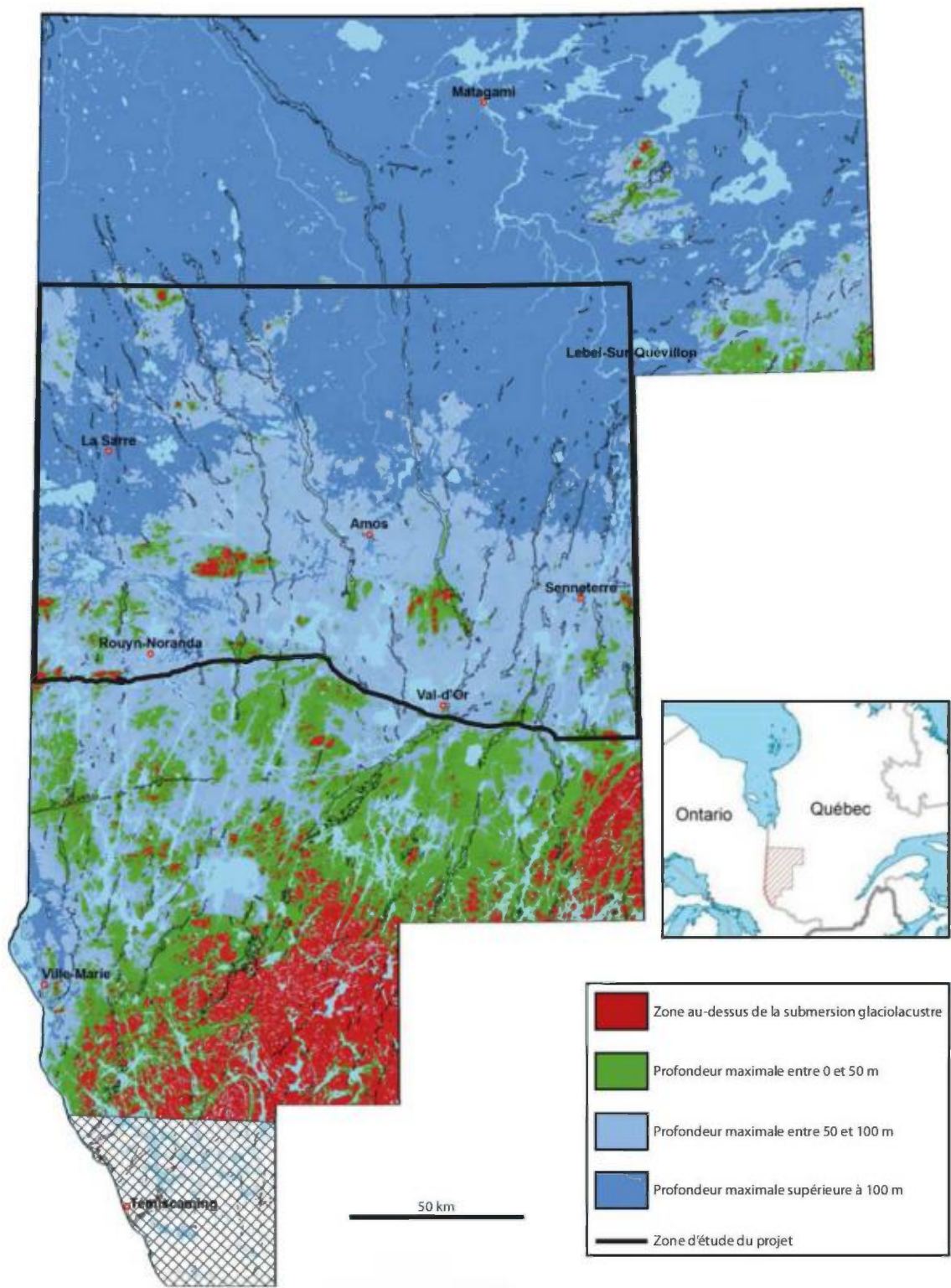


Figure 5 - Carte des profondeurs maximales du lac Ojibway sur la région d'étude (modifiée d'après Nadeau (2011)).

qui affectent les dispersions glaciaires (Parent *et al.*, 1996) impliquant une stratigraphie et des transports glaciaires très complexes. L'étude des stries sur le socle rocheux permet de mettre en évidence les différents écoulements glaciaires de la région. Un ancien mouvement nord-ouest a été rapidement suivi d'un écoulement vers l'ouest puis d'un écoulement majeur vers le sud-ouest durant le maximum glaciaire. Durant la déglaciation du territoire, l'inlandsis a été scindé en deux le long de la Moraine d'Harricana (Veillette *et al.*, 1994). La glace à l'ouest de la moraine s'écoulait vers le sud-est tandis que la masse de glace à l'est de la moraine s'écoulait vers le sud-ouest.

À partir de ce maximum la fonte des glaces de l'inlandsis Laurentidien a peu à peu fait reculer sa marge glaciaire jusqu'à atteindre l'Abitibi il y a environ 10 000 ans. Le recul de cette marge a permis la formation d'eskers. La plupart de ces eskers présentent une orientation nord-sud perpendiculaire au front glaciaire qui se retirait vers le nord.

En parallèle de la mise en place de ces eskers, l'eau de fonte s'est accumulée le long du front glaciaire - celui-ci empêchant le drainage naturel vers la Baie James au nord-ouest - formant le lac glaciaire Ojibway. Ce lac a recouvert une part importante de la Sous-province de l'Abitibi et du nord de l'Ontario sur une durée estimée d'après les dépôts varvaires à environ 2 110 ans (Veillette *et al.*, 1994). Le lac a ainsi atteint des profondeurs importantes qui ont permis le dépôt de grandes quantités d'argiles, particulièrement au nord de l'Abitibi (Figure 5).

L'effondrement du glacier il y a 8 000 ans a permis le drainage complet du lac vers la Baie James. Par la suite les dépôts nouvellement exondés ont subis l'influence du vent, formant de grands champs dunaires, puis de la végétation qui a stabilisé l'ensemble. Ces formations sont depuis reprises par le réseau hydrographique actuel.

La zone étudiée se situe en bordure de l'ancien lac Ojibway (Figure 5). Les zones de socle affleurant sont donc encore relativement nombreuses, mais une légère tendance à l'augmentation de la proportion de sédiments, notamment argileux, vers le nord est notable.

L'ensemble des études géologiques réalisées sur le socle rocheux et sur les formations quaternaires permettent d'avoir accès à une quantité importante de données. Or ces données revêtent une importance capitale afin d'étudier la profondeur au socle rocheux.

2 Étude des données

L'ensemble des données recueillies pour ce projet proviennent de différentes sources, mais principalement de la base de données du MERN, le SIGÉOM (système d'information géominière), qui contient la totalité des travaux du MERN ainsi qu'une compilation exhaustive des travaux des compagnies d'exploration. De plus plusieurs données proviennent de la Commission géologique du Canada (CGC) et le Ministère du Développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). Trois types de données sont utilisés : des données de forages, des données de surface et des données topographiques.

2.1 Sources

2.1.1 Données de forages

Les données de forages proviennent de travaux réalisés dans l'ensemble de la Sous-province de l'Abitibi. Ces travaux couvrent une grande partie de la zone étudiée (Figure 6), mais sont concentrés dans les camps miniers et près des centres habités.

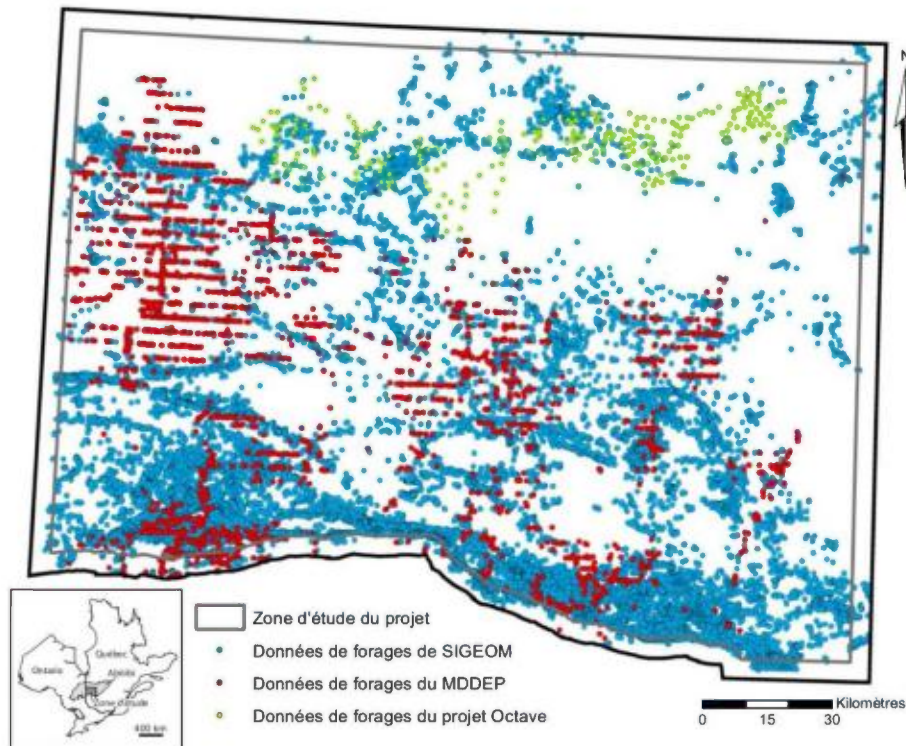


Figure 6 - Carte des forages disponibles dans le cadre de cette étude après contrôle et préparation des données (voir partie 2.2).

La plupart correspondent à des forages aux diamants réalisés par l'industrie minière et rassemblés par le MERN ou à des forages réalisés dans le cadre de projets du MERN lui-même. Au total les données de 49 780 forages aux diamants sont ainsi récupérées.

Les forages compilés par le MDDELCC forment une seconde source de données. Ceux-ci ont été réalisés dans le cadre des études environnementales du ministère lui-même ou pour des particuliers, par exemple pour la réalisation de puits. Spatialement, ils forment des lignes qui suivent les zones d'habitations, avec un développement essentiellement au sud-ouest. Au total 3 540 forages sont ainsi récupérés, dont 563 n'atteignent pas le socle. Ces derniers ont été mis de côté.

Depuis 2006, le MERN et la CGC ont entrepris d'importants levés de forages dans le nord de la Sous-province de l'Abitibi, dans la région de la rivière Octave. Dans cette région, les problèmes posés par l'importante couverture de dépôts glaciolacustres et par la rareté des affleurements rocheux ont été contournés par des travaux de forage systématique. Il s'agit d'un levé par forage rotasonic combinant l'étude des dépôts quaternaires et du soubassement rocheux. Ces données représentent 228 forages.

2.1.2 Données de surface

Les données de surface sont généralement interprétées par photos aériennes ou directement sur le terrain dans le cadre de différents projets de cartographie. Une première source de données provient donc des cartes quaternaires de la région de l'Abitibi issue des travaux de la CGC (Veillette et Pomares, 2003 ; Veillette, 2004, 2007a, 2007b ; Thibaudeau et Veillette, 2005 ; Paradis, 2005, 2007a, 2007b, 2007c ; Veillette et Thibaudeau, 2007). Deux éléments sont pris en compte :

- les zones de socle affleurant ;
- les zones de till mince, c'est-à-dire les zones où le till est présent en surface mais mesure moins d'un mètre d'épaisseur. Ces zones représentent les emplacements où la structure du socle est visible à travers le till en photo aérienne grâce à cette très faible épaisseur.

8 467 zones de socle rocheux affleurant sont ainsi extraites et 4 834 zones de till mince (Figure 7).

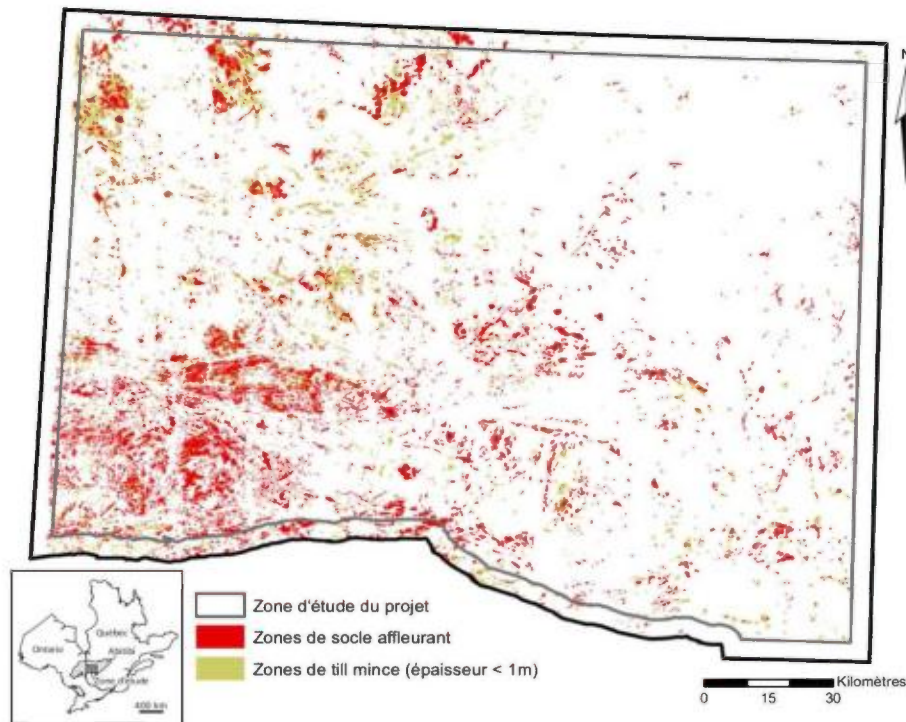


Figure 7 - Carte de localisation des différentes zones de socle affleurant et de till mince dans la région étudiée (réalisée à partir des données quaternaires de la CGC).

D'autres éléments viennent en complément : les données de terrain recueillies par les géologues du MERN renseignent sur les zones de socle rocheux affleurant, tout comme certaines données de la CGC. Ces données représentent respectivement 10 712 et 36 901 points de socle affleurant (Figure 8). Des données concernant les zones de socle affleurant sont aussi extraites par le MERN lors de compilations géologiques, fournissant ici 45 635 points.

Comme pour les forages ce sont surtout les zones au sud-est de la zone d'étude qui apportent le plus de données. Ce manque de données apparent au nord s'explique par une épaisseur de sédiments quaternaire plus importante due au lac Ojibway (Figure 5).

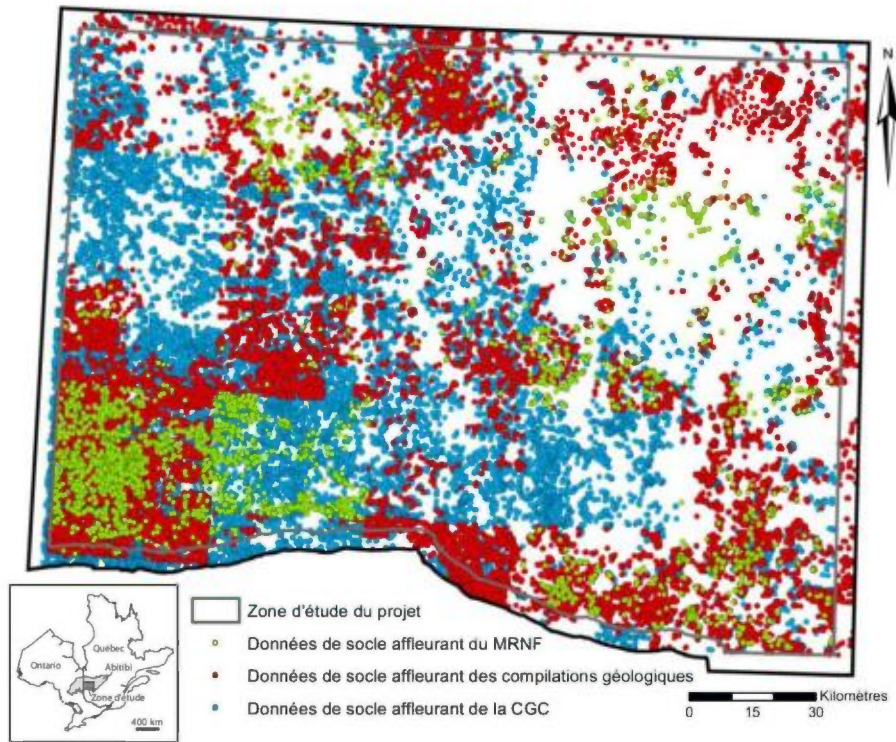


Figure 8 - Carte de localisation des données ponctuelles de socle rocheux affleurant dans la zone d'étude après contrôle et préparation des données (voir partie 2.2).

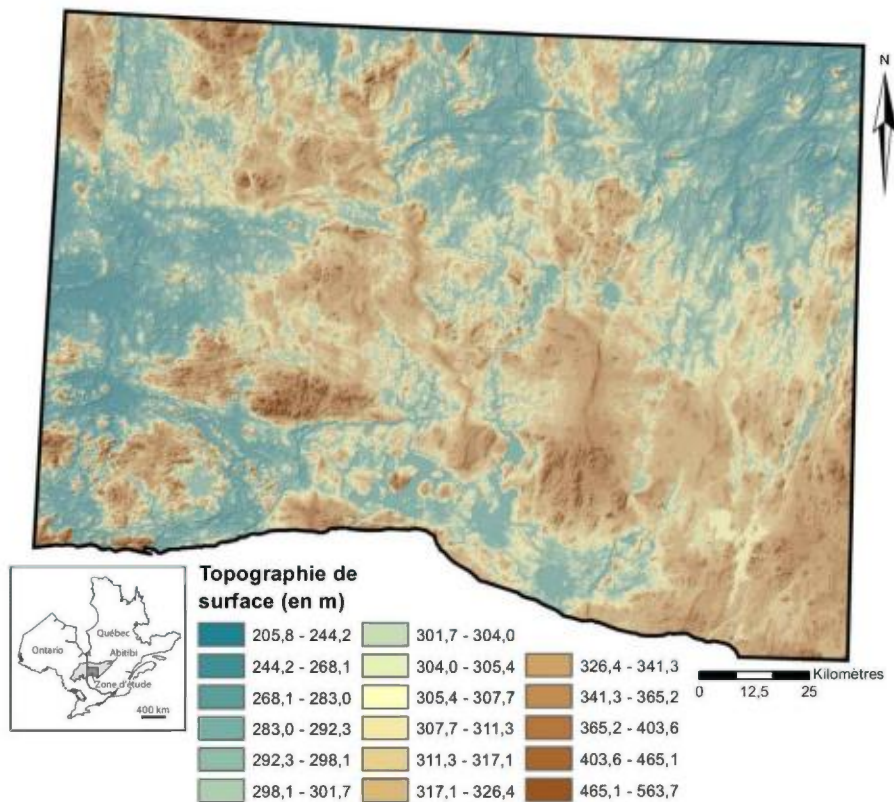


Figure 9 - Carte de la topographie de la zone d'étude réalisée à partir du MNT extrait des données SRTM de la NASA.

2.1.3 Données topographiques

Les données topographiques prennent la forme d'un modèle numérique de terrain (MNT), modèle en trois dimensions de la topographie de surface de la zone étudiée. Le MNT utilisé pour ce projet provient des données de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) acquises lors de la mission « Shuttle Radar Topography Mission » (SRTM)¹. Cette mission a été réalisée en février 2000 et a duré 11 jours. Le but était de produire une carte haute résolution des reliefs terrestre. Pour cette étude une carte de la topographie de la région de l'Abitibi a été extraite de la base de données SRTM avec une résolution de 90 m (Figure 9).

2.2 Préparation

Les données disponibles ne peuvent être utilisées telles quelles. Il convient de contrôler leur validité et de les mettre en forme afin de faciliter leur traitement (Figure 10). Du fait de la grande quantité d'éléments disponibles une vérification statistique est effectuée dans un premier temps en insistant notamment sur les extremums.

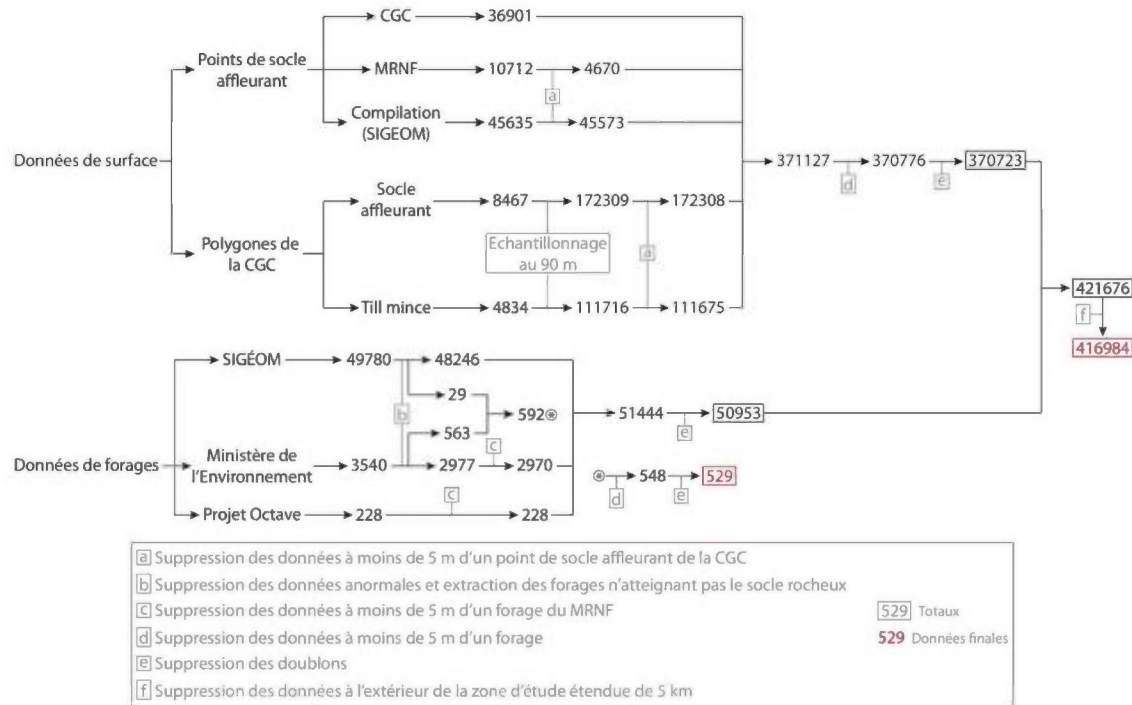


Figure 10 - Synthèse des différents types de données et des traitements effectués.

2.2.1 Données de forages

Sur les forages en particulier cette vérification a mis en évidence un nombre important d'éléments irréguliers. La base de données renfermait des forages avec des profondeurs au socle allant jusqu'à 800 m et certains forages ne présentaient pas de données d'azimut ou de pendage essentielles à leur traitement. D'autres avaient un pendage inférieur à 5 ° - souvent 1 ou 2 ° - ce qui amène à penser à des erreurs de saisie.

¹ D'après le site internet de la NASA consulté en juin 2012 : <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/index.html>

Puisque les forages n'ont pu être tous vérifiés, des critères de sélection ont été mis en place, critères intégrant les forages :

- avec une profondeur de socle rocheux de plus de 100 m ;
- sans données d'azimut ou de pendage ;
- avec un pendage de moins de 5 °.

L'étude des rapports desquels ont été extraits ces données a permis de déceler des erreurs dans les reports de profondeurs, notamment des oublis de conversion pieds/mètres expliquant une partie des profondeurs aberrantes ou des forages correspondant en réalité au prolongement d'autres forages. La plupart des puits sans données d'azimut ou de pendage n'ont jamais été trouvés dans les rapports correspondants. De plus ils présentaient souvent des profondeurs de socle aberrantes, notamment en comparaison des autres forages des mêmes rapports. Ils ont par conséquent été supprimés, tout comme les forages avec un pendage inférieur à 5 °. En parallèle un contrôle rapide a été effectué sur les autres forages présents dans les rapports mais ne répondant pas aux critères précédents. Quelques erreurs de reports ont ainsi été corrigées également, mais surtout les puits qui ne traversent que des sédiments quaternaires et n'atteignent pas le socle ont été rassemblés avec ceux du MDDELCC identifiés précédemment.

Au total 1 505 forages ont été supprimés et 29 ont été identifiés comme n'atteignant pas le socle. Afin d'être complètement rigoureux, tous les forages devraient être contrôlés, notamment pour isoler ceux n'atteignant pas le socle rocheux. Néanmoins les erreurs réalisées sur de faibles profondeurs ont moins d'impact sur la suite de l'étude puisqu'elles peuvent masquer une zone de profondeur importante mais ne peuvent pas en ajouter.

Dans un deuxième temps les données restantes ont été homogénéisées au format UTM NAD83 en zone 18 et les forages ont été verticalisés. En effet les coordonnées horizontales disponibles sont celles du collet du trou en surface. Or la plupart des puits ne sont pas verticaux, donc le point localisant la surface du socle ne se situe pas aux mêmes coordonnées horizontales. Il convient donc dans un premier temps de recalculer ces coordonnées horizontales pour qu'elles correspondent au point d'intersection de la surface du socle rocheux. Ensuite la position du socle rocheux est extraite pour chaque type de données sous forme d'un point comprenant les coordonnées horizontales et la profondeur au socle rocheux.

Un dernier contrôle consiste à éliminer les doublons. Au total 491 points ont été identifiés comme doublons dans les données de forages et ont été supprimés.

2.2.2 Données de surface

Les données d'affleurements issues des cartes géologiques quaternaires sont disponibles sous forme de polygones et de points. Les polygones ont été échantillonnés afin d'obtenir pour chacun d'entre eux un maillage de points de 90 m de résolution. Une profondeur au socle nulle a été attribuée aux zones de socle affleurant. Le même traitement a été effectué avec les zones de till mince. Cependant une valeur de 1 m a été attribuée aux points de till mince. Les données d'affleurements du MERN sont déjà disponibles sous forme ponctuelle dans la base de données SIGÉOM.

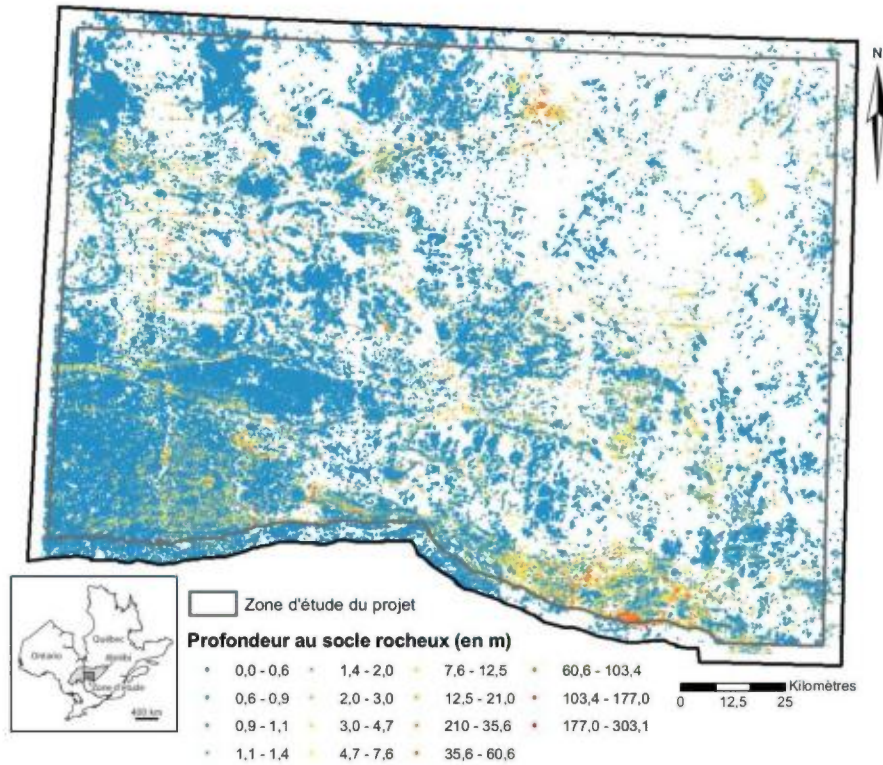


Figure 11 - Carte de l'ensemble des données de profondeur au socle rocheux dans la zone d'étude (incluant une zone tampon de 5 km).

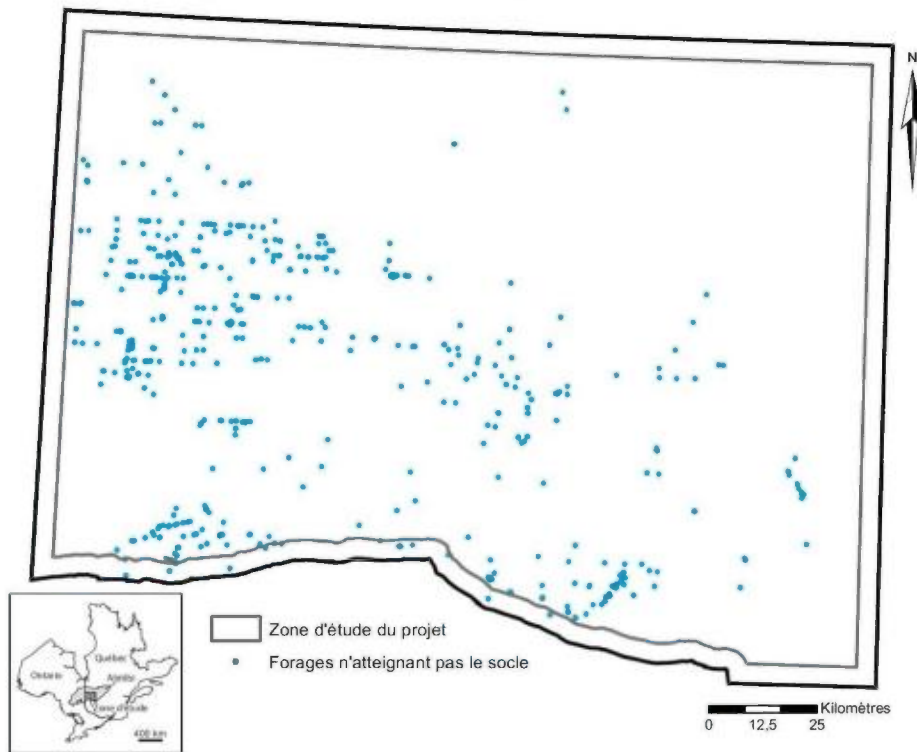


Figure 12 - Carte de l'ensemble des données de forages n'atteignant pas le socle rocheux (forages provenant de SIGÉOM et du MDDELCC).

Les données du MERN et les points issus des polygones ont ensuite été comparées aux affleurements ponctuels de la CGC : tout point à moins de 5 m d'un point de la CGC a été supprimé. La même opération a été renouvelée mais en prenant les forages comme source de référence : aucune donnée de surface ne doit se trouver à moins de 5 m d'un forage. Ces suppressions réduisent le nombre de données de surface de 371 127 à 370 776 points.

Tous ces points ont ensuite été homogénéisés de la même manière que les forages, sous forme de points comprenant les coordonnées horizontales au format UTM NAD83 en zone 18 et la profondeur au socle rocheux.

Finalement 416 984 points de données (Figure 11) sont utilisés dans l'étude - avec le MNT - pour les calculs de profondeur et d'élévation, accompagnés de 529 forages n'atteignant pas le socle rocheux (Figure 12).

2.3 Analyses

Spatialement les données sont irrégulièrement espacées et réparties, avec une concentration plus importante au sud-ouest au détriment du nord-est (Figure 11). L'histogramme qui leur est associées a permis de mettre en évidence la très forte proportion de données affleurantes par rapport aux données de forages (Figure 13). Le nombre très important de points de profondeur nulle engendre une distribution exponentielle. Ce caractère très asymétrique et éloigné d'une distribution normale peut poser problème lors de l'interpolation. En effet certaines techniques comme le krigeage fournissent des résultats plus robustes avec une distribution normale.

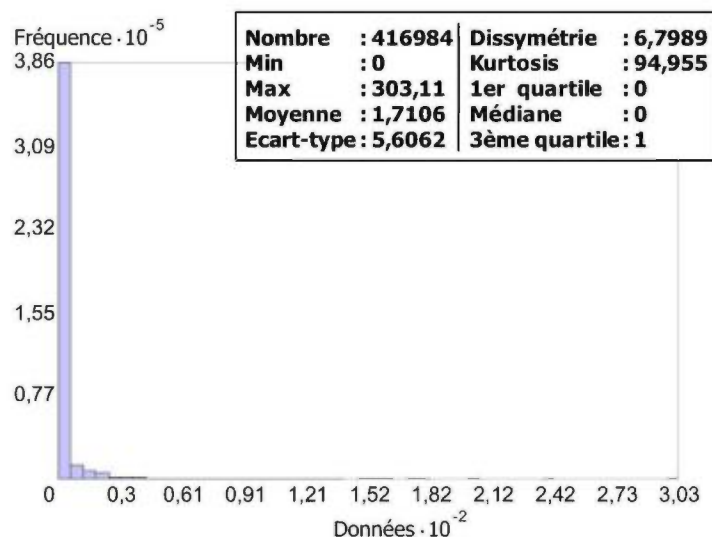


Figure 13 - Histogramme des données de profondeur au socle rocheux (données en m).

Les cartes de Voronoï de la moyenne, de l'écart-type et de l'entropie sont utilisées afin de vérifier si les variations locales sont globalement constantes dans la zone d'étude, donc que certaines régions n'ont pas de valeurs plus irrégulières que d'autres régions. Ceci permet d'évaluer la stationnarité des données, utile pour le krigeage notamment. Ces cartes sont construites à l'aide de statistiques locales à partir de chaque cellule du diagramme de Voronoï associé aux données et de ses voisines immédiates (ESRI, 2003). Ainsi la moyenne ou l'écart-type affiché dans une cellule est calculé d'après la valeur de cette cellule et de celles des cellules adjacentes. L'entropie est basée sur

le même principe de voisinage associé à la séparation en cinq classes des valeurs des cellules. Elle est calculée avec la formule suivante :

$$Entropie = \sum_{i=1}^5 [(p)_i \log(p_i)]$$

où p_i est la proportion de cellules dans chaque classe.

L'entropie minimale apparaît lorsque toutes les cellules sont dans la même classe.

La carte de Voronoï de la moyenne (Figure 14) laisse entrevoir des zones plus régulières que d'autres - par exemple au nord-ouest - même si la moyenne n'apparaît pas constante sur l'ensemble du champ.



Figure 14 - Cartes de Voronoï des moyennes, des écarts-types et des entropies des données de profondeur au socle rocheux.

La carte de Voronoï de l'écart-type (Figure 14) laisse entrevoir des zones très irrégulières par rapport à d'autres - par exemple au nord-ouest - donc une variable non stationnaire. La carte de l'entropie (Figure 14) est plus mesurée. En effet, hormis des zones au sud-ouest et au nord-est, l'ensemble apparaît plus régulier. Dans ce cas les données ne sont pas si éloignées de la stationnarité, même si cette dernière ne semble pas totale. Leur répartition irrégulière doit jouer un rôle important dans cette mauvaise stationnarité. Mais cette dernière - tout comme la distribution exponentielle - peut être en partie contrebalancée par le nombre conséquent de données disponibles, en particulier au sud-ouest.

Enfin, même si de plus grandes profondeurs au socle sont attendues dans les zones nord par rapport aux zones sud, les données n'affichent pas réellement de tendance nette. Ceci peut appuyer l'hypothèse de données peu éloignées de la stationnarité. Ces considérations permettent notamment de déterminer quelles méthodes d'interpolation peuvent être employées.

3 Méthodes employées

Plusieurs techniques d'interpolation sont envisageables, comme l'inverse de la distance pondérée, le voisinage naturel ou encore le krigeage. Moyennant des hypothèses plus strictes que les autres techniques, cette dernière possède de nombreux avantages : c'est un interpolateur exact qui tient compte des corrélations spatiales entre les données et qui minimise l'erreur d'estimation. Elle donne aussi accès à cette erreur, permettant ainsi de visualiser l'incertitude de la prédiction. Ces avantages font ici privilégier l'utilisation des techniques de krigeage au détriment des autres méthodes d'interpolation, même si certaines d'entre elles ont également été testées (voir annexe A).

3.1 Interpolation de la profondeur au socle rocheux

Le krigeage a été développé par Georges Matheron (2 Décembre 1930 - 7 Août 2000) au début des années 1960 (Matheron, 1962, 1963a, 1963b) à partir de travaux sud-africains consacrés aux mines d'or du Witwatersrand, notamment ceux de Krige (1951) dont le nom a été utilisé par Matheron pour nommer cette technique. Comme toute méthode d'interpolation son but est d'estimer les valeurs d'une variable en des points de l'espace non-échantillonnés à partir de valeurs uniquement connues ponctuellement et dispersées. Pour cela, il se base sur une combinaison linéaire des valeurs des points d'un voisinage prédéterminé :

$$Z^*(s) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i(s_i)$$

où $Z^*(s)$ est la valeur estimée au point $s = (x, y)$, $Z_i(s_i)$ un des points du voisinage et λ_i le poids associé à ce point.

Le krigeage se distingue alors des autres méthodes d'interpolations par le calcul des poids λ_i qui prend en compte différents éléments :

- les distances entre le point à estimer et les points de valeurs connues ;
- les distances entre les points de valeurs connues ;
- la corrélation spatiale entre les données, donc la covariance C ou le variogramme γ .

Le variogramme part du principe que deux points proches l'un de l'autre devraient en moyenne plus se ressembler que deux points éloignés. Il se base donc sur la variance de la différence entre la variable aléatoire Z au point s et au point $s + h$, avec $s = (x, y)$ et $h = (x_h, y_h)$. D'après le principe précédent cette variance devrait être d'autant plus faible que les deux points sont proches. Le variogramme γ est alors défini comme étant :

$$\gamma(s, s + h) = \frac{1}{2} \text{Var}(Z(s) - Z(s + h))$$

Il permet de prendre en compte les structures des données dans l'interpolation. Pour cela un modèle de variogramme précis doit être défini à partir du variogramme expérimental fourni par les données (Figure 15).

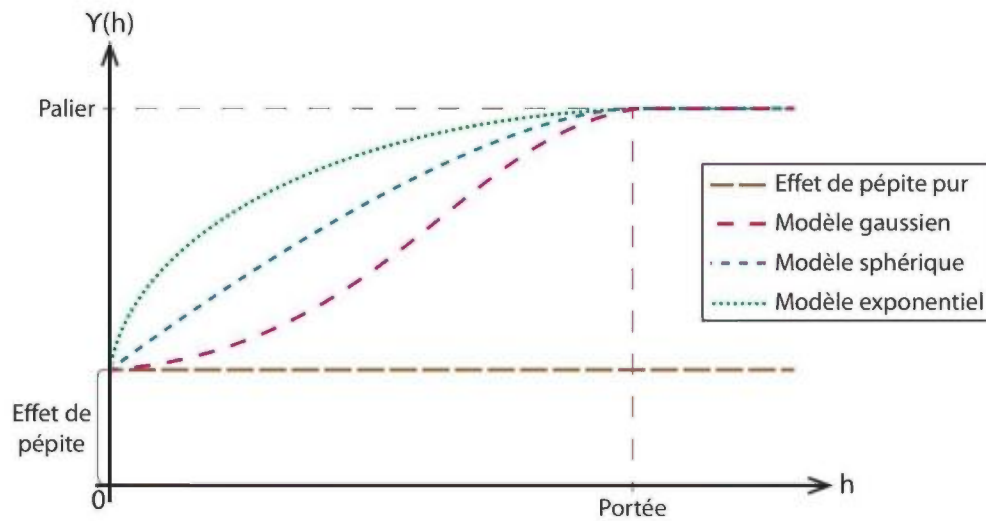


Figure 15 - Schéma illustrant différents modèles de variogrammes théoriques. Les points séparés par une distance supérieure à la portée n'ont plus de lien entre eux.

Lors de l'interpolation, le krigeage cherche à minimiser l'erreur d'estimation ΔZ en lui astreignant :

- une moyenne nulle (contrainte de non-biais) :

$$E(\Delta Z) = E(Z^*(s) - Z(s)) = 0$$

où $Z^*(s)$ est la valeur estimée au point $s = (x, y)$ et $Z(s)$ la valeur exacte au point $s = (x, y)$;

- une variance minimale, donc des erreurs minimales :

$$\sigma^2(\Delta Z) = \sigma^2(Z^*(s) - Z(s)) \text{ minimum}$$

où $Z^*(s)$ est la valeur estimée au point $s = (x, y)$ et $Z(s)$ la valeur exacte au point $s = (x, y)$;

C'est cette condition de variance minimale qui sert de base pour construire le système de krigeage dont la résolution permet de déterminer les poids λ_i .

Néanmoins la combinaison linéaire sur laquelle se base le krigeage peut subir des variations suivant les techniques. Le module *Geostatistical Analyst* du logiciel ArcGIS permet de tester certaines d'entre elles.

3.1.1 Les krigeages linéaires

Le modèle de base du krigeage suppose que la variable Z est une fonction aléatoire décomposable comme suit :

$$Z(s) = \mu(s) + \epsilon(s)$$

où μ est la structure déterministe pour l'espérance de Z et ϵ une fonction aléatoire stationnaire d'espérance nulle et de structure de dépendance connue, souvent grâce à l'analyse variographique.

À partir de cette décomposition plusieurs types de krigeage peuvent être définis, notamment le krigeage simple, le krigeage ordinaire et le krigeage universel.

3.1.1.1 Le krigeage simple

Le krigeage simple (Matheron, 1970) part du principe que μ est une constante connue m , donnant :

$$Z(s) = m + \epsilon(s)$$

Cette technique de krigeage repose sur une hypothèse de stationnarité du deuxième ordre. Or dans le cadre de ce projet l'étude des données a démontré que d'une part la moyenne n'est pas constante sur la zone d'étude (Figure 14), et que d'autre part l'hypothèse de stationnarité n'est pas totalement respectée. Ces deux éléments tendent à éliminer le krigeage simple, dont les hypothèses ne sont pas suffisamment vérifiées.

3.1.1.2 Le krigeage ordinaire

Le krigeage ordinaire (Matheron, 1970) part du principe que μ est une quasi-constante inconnue, donnant :

$$Z(s) = \mu + \epsilon(s)$$

Le terme « quasi-constante » signifie qu'il suffit que l'espérance soit constante à l'intérieur du voisinage de krigeage et non plus sur l'ensemble du champ étudié. Cette hypothèse moins stricte que celle de l'espérance constante du krigeage simple est plus acceptable dans le cadre de cette étude, puisque la carte de Voronoï de la moyenne montre de nombreuses zones où la moyenne varie peu (Figure 14). Le krigeage ordinaire est basé sur une hypothèse de stationnarité intrinsèque - là encore moins stricte que pour le krigeage simple - même si ici le problème de stationnarité demeure.

3.1.1.3 Le krigeage universel

Le krigeage universel (Matheron, 1969) part du principe que μ est une combinaison linéaire de fonctions dépendant des coordonnées spatiales, donnant :

$$Z(s) = \sum_{j=0}^P (f_j(s)\beta_j) + \epsilon(s)$$

où f_j sont des fonctions définies par l'utilisateur et β_j des paramètres inconnus

En cela le krigeage universel part de l'hypothèse que les données sont non-stationnaires, puisque la moyenne n'est pas la même sur l'ensemble du champ. Cette dernière est tout de même gouvernée par des fonctions donnant une tendance aux valeurs le long du champ. Or l'étude des données n'a pas permis d'identifier de tendance nette dans la zone d'étude, empêchant par là même d'utiliser cette technique.

3.1.2 Les krigeages non-linéaires

La géostatistique non-linéaire a été développée afin de pallier aux limites de son homologue linéaire sur deux points principaux. D'une part lorsque le but n'est pas d'estimer la variable elle-même, mais une fonction non-linéaire de celle-ci, par exemple estimer la probabilité de dépasser un certain seuil. D'autre part lorsque la distribution des données n'est pas normale, ce qui peut rendre

les estimations non-optimales. C'est le cas ici avec une distribution exponentielle comprenant un grand nombre de valeurs nulles. Un autre moyen de gérer ce problème consiste à appliquer des transformations sur les données afin d'obtenir une distribution normale - comme par exemple le passage au logarithme. Néanmoins les transformations disponibles dans ArcGIS avec les techniques de krigeage linéaire ne peuvent pas être utilisées, notamment à cause des valeurs nulles.

3.1.2.1 Le krigeage disjonctif

Le krigeage disjonctif reprend le principe du krigeage ordinaire, mais contrairement à ce dernier il ne cherche pas à trouver une estimation en tant que combinaison linéaire des données mais en tant que combinaison linéaire de fonctions des données, ce qui donne :

$$f(Z(s))^* = \sum_{i=1}^n f_i(Z_i(s_i))$$

Cette méthode requiert tout d'abord une distribution bigaussienne. Dans ArcGIS le krigeage disjonctif permet l'utilisation de la « normal score transformation ». Cette fonction d'anamorphose gaussienne permet de transformer une distribution quelconque en distribution normale (ESRI, 2003). Néanmoins Rivoirard (1994) rappelle que si une variable Z comprend par exemple 50 % de valeurs nulles, l'attribution à une de ces valeurs d'une valeur gaussienne est arbitraire, avec un risque important de rendre l'estimation elle aussi arbitraire. En outre le krigeage disjonctif est très exigeant en terme de stationnarité (Rivoirard, 1994), alors que cette hypothèse n'est pas correctement respectée ici. Ces éléments amènent à privilégier d'autres techniques.

3.1.2.2 Le krigeage d'indicatrices

Le krigeage d'indicatrices est basé sur le même principe que le krigeage ordinaire, mais au lieu d'interpoler la variable aléatoire continue Z en tous points, il interpole une indicatrice I à partir d'un seuil c défini par l'utilisateur (Journel, 1983) :

$$I(s, c) = \begin{cases} 1 & \text{si } Z(s) \leq c \\ 0 & \text{si } Z(s) > c \end{cases}$$

La combinaison de différents krigeages à différents seuils permet d'obtenir la fonction de répartition discrétisée de la variable Z . Cette fonction est ensuite utilisée pour déterminer diverses estimées, notamment des probabilités. Dans le cadre de cette étude cet aspect est intéressant afin d'obtenir des cartes représentant la probabilité d'être dans une zone de profondeur au socle supérieure à un seuil donné. Néanmoins afin d'obtenir une fonction de répartition correcte il convient de combiner suffisamment de krigeages à différents seuils, ce qui multiplie les calculs et la complexité du problème.

3.1.2.3 Le double-krigeage

Le double-krigeage est une technique initialement employée en météorologie, notamment pour les cartes de précipitations. En effet les précipitations peuvent être intermittentes et laisser de grandes zones sans pluie, donc avec des données de précipitations nulles. Elles tendent alors souvent à prendre une distribution exponentielle, comme dans le cas présent avec la profondeur au socle, avec une stationnarité douteuse. Une solution proposée par Barancourt *et al.* (1992) consiste à faire appel à deux étapes de krigeage :

1. délimitation des zones de précipitation par krigeage d'indicatrices. Cette méthode permet d'obtenir une carte de la probabilité d'être supérieur à 0. Le choix d'un seuil permet ensuite d'obtenir une carte nulle dans les zones sans précipitation et valant 1 ailleurs ;
2. interpolation des données de précipitation uniquement - donc sans données nulles - à l'aide d'un krigeage ordinaire.

La même technique peut être reprise ici : la première étape permet de délimiter les zones d'affleurement, la seconde de déterminer la profondeur au socle en dehors de ces zones affleurantes. Un inconvénient de cette technique vient du manque de continuité entre les zones affleurantes et non-affleurantes. En outre réaliser le krigeage ordinaire sur toute la zone d'étude amène à mettre en continuité des zones normalement non-contiguës. Mais éliminer les données affleurantes, donc les données nulles, pour ce krigeage ordinaire permet d'appliquer des transformations pour se rapprocher éventuellement d'une distribution normale.

3.1.2.4 Le krigeage multivariable

Le krigeage multivariable - ou cokrigeage - permet de prendre en compte les éventuelles corrélations spatiales entre plusieurs variables dans le calcul des valeurs estimées. Dans le cas à u variables Y_i , l'estimateur devient :

$$Z^*(s) = \sum_{i=1}^u \sum_{j=1}^{n_i} \lambda^i_j Y_i(s_j)$$

Il permet donc l'estimation d'une variable principale en lien avec une ou des variables secondaires. Les versions développées sont les mêmes que pour le krigeage monovarié : cokrigeage simple, cokrigeage ordinaire, cokrigeage universel, etc.

Plusieurs variables peuvent ici être envisagées en tant que variables secondaires, notamment le MNT (Nyquist *et al.*, 1996) ou encore la conductivité (Boudour, 2011).

3.1.3 Choix de la méthode

L'étude des différentes techniques de krigeage a permis d'éliminer de nombreuses méthodes. Les krigeages simple et universel ne peuvent être envisagés du fait de la forme de ϵ , qui n'est ni constant ni organisé selon une tendance nette. Le krigeage disjonctif doit lui aussi être écarté notamment à cause de la mauvaise stationnarité. Le krigeage d'indicatrices pourrait s'avérer intéressant mais dans ArcGIS il ne permet pas d'estimer la profondeur. Le krigeage multivariable pourrait également s'avérer intéressant. Seuls deux éléments ont été testés afin de fournir des variables secondaires : le MNT et la conductivité apparente. Le premier ne montre aucune corrélation avec la profondeur au socle rocheux. Le deuxième est plus influencé par les roches du socle que par les sédiments et ne fournit pas de corrélation non plus. Contrairement à (Nyquist *et al.*, 1996) ce n'est pas l'élévation du socle qui est ici interpolée, et contrairement à Boudour (2011) une inversion des données de conductivité n'a pu être testée. Restent alors le double-krigeage et le krigeage ordinaire.

L'un des inconvénients du premier est la mauvaise continuité entre les zones affleurantes et les zones de profondeur au socle non nulle. L'indice d'approfondissement (Boisvert et Parent, 2008) - résultat de la division de la profondeur au socle par la distance logarithmique décimale aux affleurements - permet de prendre en compte les affleurements dans le krigeage ordinaire mais de

manière détournée. Mais les tests effectués n'ont pas donnés de résultats significatifs (voir annexe B). Néanmoins un des intérêts du double krigeage est de gérer la distribution exponentielle. Or il s'avère que lors de l'étape de krigeage ordinaire la grande proportion de données de till mince à 1 m donne une nouvelle distribution exponentielle très marquée. Le fait qu'une valeur soit prépondérante limite alors grandement les bénéfices d'une transformation. En outre même si la gestion de la stationnarité est meilleure que pour un krigeage ordinaire classique, la multiplication des interpolations par le double krigeage ainsi que le choix d'un seuil suite au krigeage d'indicatrices augmentent l'incertitude autour de la carte finale.

L'ensemble de ces éléments amènent à privilégier le krigeage ordinaire qui semble proposer une meilleure robustesse de par sa plus grande simplicité. En outre les gains alloués par le double krigeage ne compensent pas assez ses inconvénients.

3.2 Validation des modèles

La vérification du bon comportement des modèles issus des interpolations peut se faire dans un premier temps par comparaison des cartes de profondeur au socle aux éléments connus de la géologie quaternaire. Les structures comme les eskers devraient apparaître sur le modèle puisqu'ils représentent des zones de grande épaisseur de sédiments. De plus certains éléments de la géologie du socle, comme les failles, peuvent former des fosses ensuite remplies par les sédiments quaternaires. Si la localisation et la continuité de ces éléments sont correctement représentées, le modèle est convenable.

Une autre moyen de valider les modèles passe par la validation croisée (Isaaks et Srivastava, 1990 ; Goovaerts, 1997 ; Wackernagel, 2003). Cette méthode permet d'étudier le comportement d'un modèle sur les zones de valeurs inconnues. Pour cela elle parcourt un à un les points de données. En chaque point elle réalise une estimation par krigeage en tenant compte du voisinage mais pas de la valeur exacte du point. Chaque point se retrouve alors avec une valeur estimée en plus de sa valeur exacte. La comparaison de ces deux valeurs pour l'ensemble des points permet alors de valider ou non le modèle de variogramme ainsi que le voisinage utilisé lors de l'interpolation. ArcGIS fournit les critères suivant pour déterminer si un modèle est convenable ou non (ESRI, 2003) :

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2} \approx \min$$

soit : la moyenne quadratique doit être minimale ;

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n n_i} \approx 0$$

soit : la moyenne arithmétique standardisée doit être la plus proche possible de 0 ;

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n n_i^2} \approx 1$$

soit : la moyenne quadratique standardisée doit être la plus proche possible de 1 ;

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i^2} \approx \sqrt{\frac{1}{e} \sum_{i=1}^e e_i^2}$$

soit : la moyenne de l'erreur de krigeage doit être la plus proche possible de la moyenne quadratique ;

où, avec Z_i^* l'estimation par krigeage au point i et Z_i la valeur exacte au même point,

$$e_i = Z_i^* - Z_i \text{ et, avec la variance de krigeage } \sigma_i^2 \text{ au point } i, n_i - \frac{e_i}{\sigma_i}.$$

Ces deux méthodes de validation utilisées conjointement permettent la sélection d'un unique modèle, considéré comme le modèle final.

3.3 Intégrations des forages n'atteignant pas le socle

Au total 529 forages n'atteignant pas le socle rocheux ont été isolés lors de la préparation des données. Un premier modèle d'interpolation n'utilisant pas ces forages a été sélectionné à l'aide des techniques de validation décrites précédemment. Les profondeurs au socle rocheux de chacun des forages isolés ont alors été comparées aux profondeurs estimées par le modèle aux mêmes localisations (Gao *et al.*, 2006) (Figure 16). Dans les cas où la profondeur estimée est supérieure à

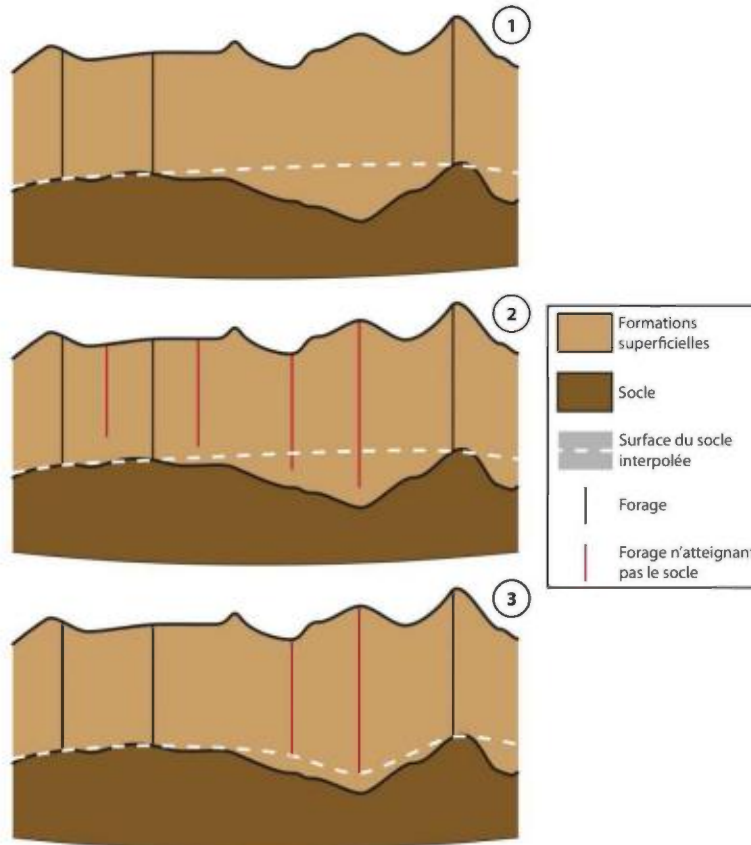


Figure 16 - Schéma reprenant le principe d'intégration des forages n'atteignant pas le socle rocheux :
 1. réalisation d'un premier modèle à partir des données de socle ; 2. sélection parmi les forages n'atteignant pas le socle de ceux plus profonds que le modèle ; 3. réalisation d'un nouveau modèle à partir des données initiales et des forages n'atteignant pas le socle sélectionnés précédemment.

celle donnée par le forage, celui-ci n'a pas été conservé. Inversement si la profondeur estimée est inférieure à celle donnée par le forage, il a été intégré aux restes des données utilisées pour l'interpolation. Ceci a permis d'ajouter des forages supplémentaires et d'améliorer la justesse du modèle, même si l'opération tend à sous-estimer la profondeur réelle.

4 Résultats

Un premier modèle basé sur les 416 984 données initiales a permis de sélectionner les forages n'atteignant pas le socle à intégrer, soit 455 forages sur les 529 disponibles. Le modèle final retenu (Figure 18, Figure 19 et Figure 20) est issu d'un krigeage ordinaire avec un variogramme exponentiel isotrope (Figure 17) et sans transformation des données. Le variogramme présente un nuage de points très peu concentré, possible conséquence de la distribution exponentielle, ce qui rend plus difficile le choix d'un modèle et confère une plus grande importance à la validation. La portée est relativement faible par rapport à l'étendue de la zone d'étude. L'effet de pépite est assez important, ce qui témoigne des incertitudes autour des valeurs des données.

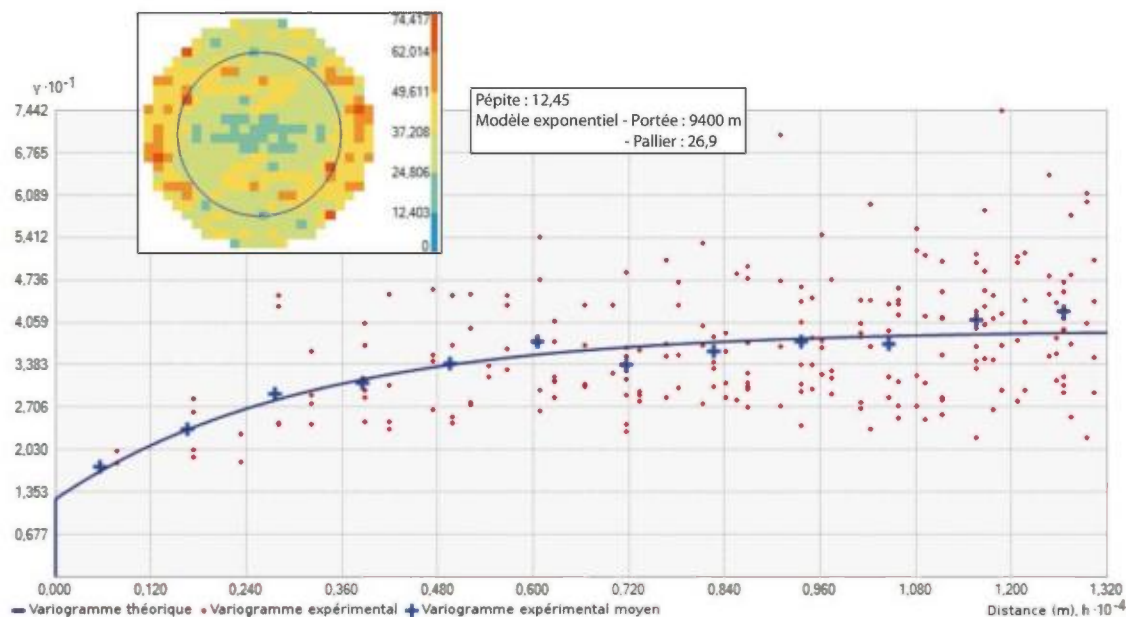


Figure 17 - Carte variographique et modèle de variogramme employé pour l'interpolation par krigeage ordinaire.

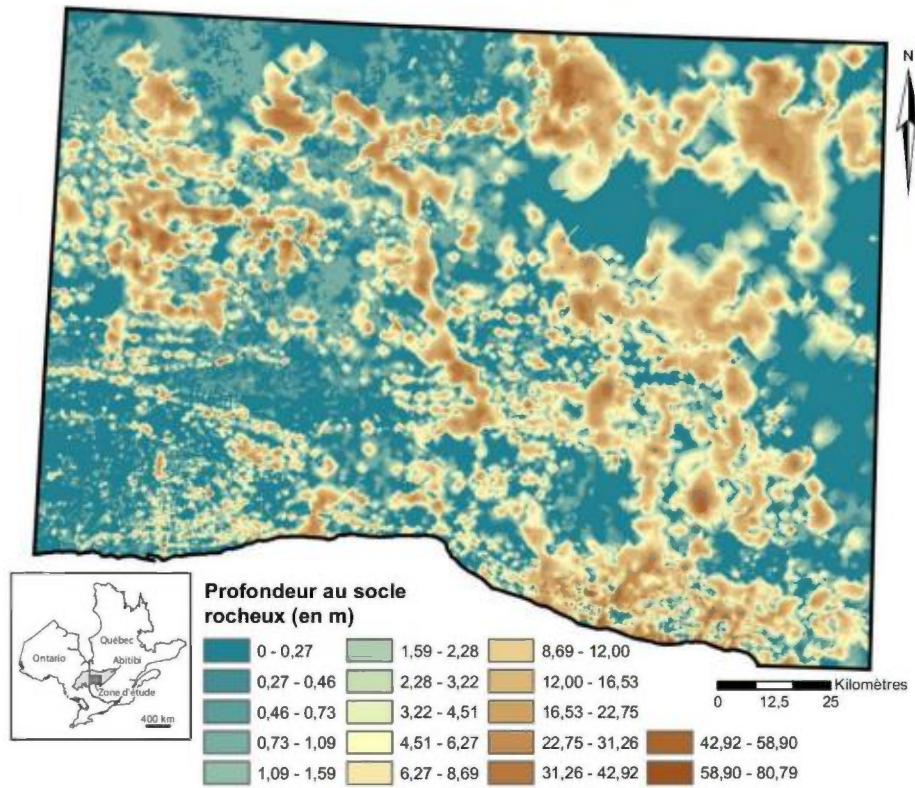


Figure 18 - Carte de profondeur au socle rocheux résultant de l'interpolation par krigeage ordinaire avec le modèle de variogramme présenté en Figure 17.

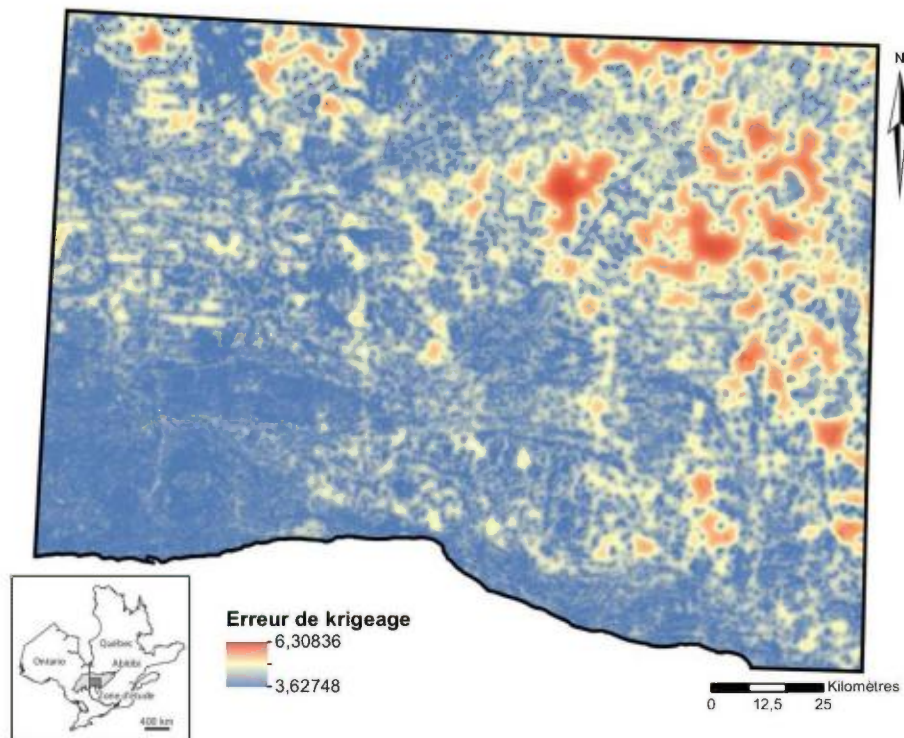


Figure 19 - Carte de l'erreur d'interpolation associée à la Figure 18.

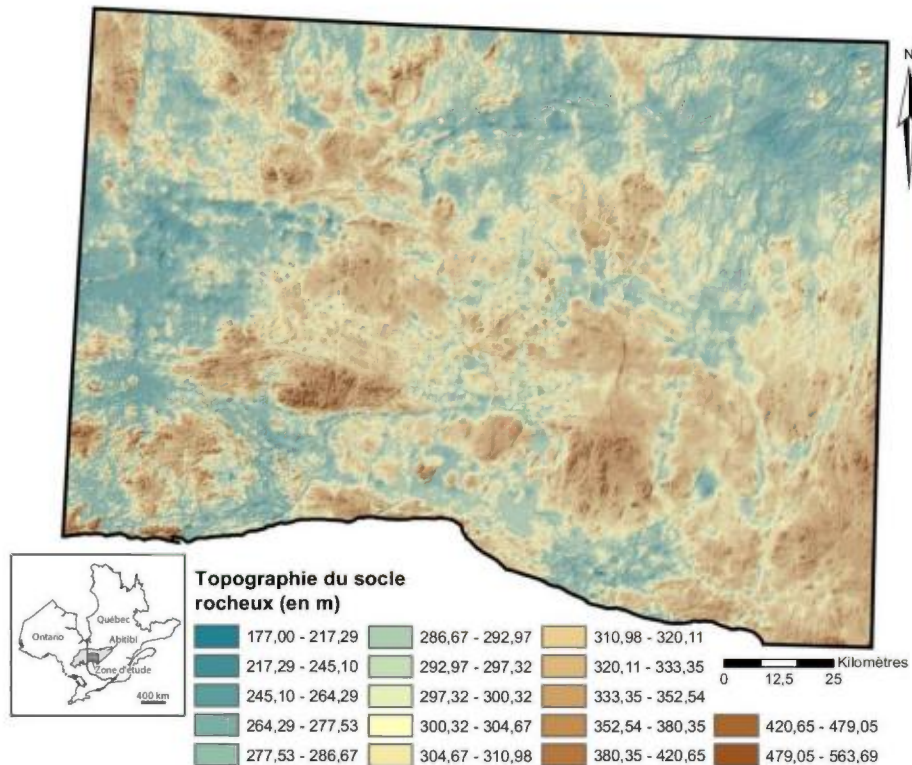


Figure 20 - Carte de la topographie du socle rocheux obtenue par soustraction au MNT de la carte de la Figure 18.

4.1 Validation par la géologie

En tant que structures de grandes dimensions les failles et les eskers s'avèrent jouer un rôle prépondérant dans le choix de l'anisotropie. En effet les failles vont plutôt définir une anisotropie est-ouest alors que les eskers une anisotropie nord-sud, soit à 90°. Afin de bien représenter toutes ces structures, il convient de choisir un variogramme isotrope ou avec une faible anisotropie. Ici la première solution a été privilégiée, notamment parce qu'aucune anisotropie nette ne ressort de la carte variographique (Figure 17). La comparaison entre les zones de profondeur au socle importante, les failles et les eskers permet de mettre en évidence une très bonne correspondance (Figure 21). Dans les zones affleurantes, le Groupe de Blake River ainsi que la Formation de Deguisier - les deux étant séparés par la Faille Porcupine-Destor Manneville - sont connus comme étant riches en affleurements et sont ici très bien distinguables en tant que zones de très faible profondeur au socle rocheux. De plus, certains grands plutons comme le Batholite de La Corne et le Batholite de Pascalis-Tibemont, très compétents et observables sur plusieurs affleurements, sont également très bien visibles sur la carte. Somme toute, beaucoup d'éléments géologiques et géomorphologiques de l'Abitibi sont reconnaissables et affichent une bonne continuité.

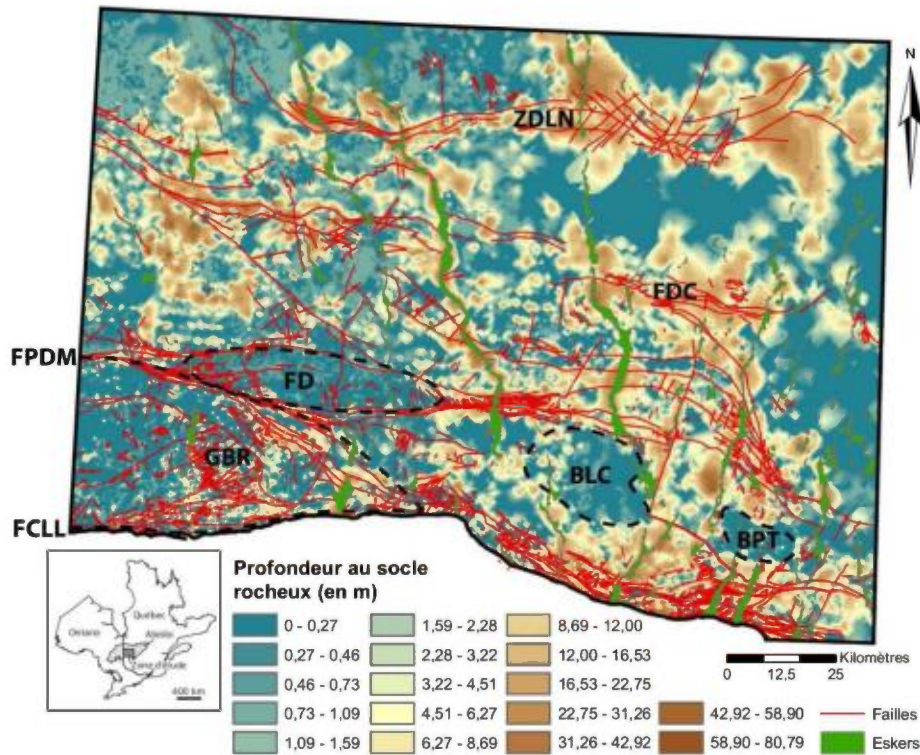


Figure 21 - Carte de profondeur au socle rocheux finale avec les éléments géologiques reconnaissables. FPDM : Faille de Porcupine-Destor Manneville; FCLL : Faille de Cadillac-Larder Lake ; FDC : Failles Debonne - Chicobi ; ZDLN : Zone de déformation de Laflamme-Nord ; GBR : Groupe de Blake River ; FD : Formation de Deguisier ; BLC : Batholite de La Corne ; BPT : Batholite de Pascalis-Tiblemont.

4.2 Validation croisée

Étant donné que la géologie est globalement bien respectée par les modèles - excepté en cas de forte anisotropie ou de portée de variogramme trop faible - la validation croisée a été privilégiée afin de déterminer le modèle final. Celui-ci (Figure 18) présente les résultats suivant :

Tableau 1. Résultats de validation croisée du modèle retenu pour interpoler la profondeur au socle rocheux.

Paramètre de validation	Résultat
moyenne quadratique	3,8071
moyenne arithmétique standardisée	0,0023
moyenne quadratique standardisée	0,9703
moyenne de l'erreur de krigeage	3,7940

Il correspond au modèle validant le mieux possible l'ensemble des paramètres de validation croisée. Certains modèles présentent de meilleurs résultats dans certains paramètres mais au détriment d'autres. Néanmoins les variations restent faible et au final influencent peu la carte de profondeur.

4.3 Discussion sur le modèle

Un premier point vient du fait que ce modèle tend à sous-estimer la profondeur réelle, et ce pour plusieurs raisons :

- le lissage du krigeage, qui ne permet pas de rendre compte des zones abruptes ;
- la distribution exponentielle dont la moyenne est très faible du fait de la grande proportion de valeurs nulles. Or les estimations de krigeage tendent vers la moyenne avec l'éloignement aux données ;
- l'utilisation d'une résolution de 90 m pour la carte de profondeur. En effet la carte est créée en affichant pour chaque cellule la valeur estimée à son centre. Or le lissage du krigeage et le fait que les données de forages soient souvent entourées de données d'affleurements tendent à moins bien rendre compte des zones de grande profondeur sur la carte, surtout lorsque les points de forages sont éloignés d'un centre de cellule.

Le manque de données est visible dans certaines zones, par exemple dans la zone nord de la Moraine d'Harricana où la continuité de cette dernière se perd. La sous-estimation ressort aussi au niveau de la topographie du socle (Figure 20), notamment au nord où certaines rivières ressortent. Néanmoins il paraît inévitable que la carte issue de la soustraction au MNT soit influencée par ce dernier. Malgré cela la carte affiche une profondeur au socle moyenne de 4,6 m alors que les données de forages prises seules fournissent une moyenne d'environ 12 m. Compte tenu de la grande proportion de données affleurantes ou de faible profondeur, il paraît normal que la moyenne diminue notablement.

Certaines zones affichent également des artéfacts rectangulaires ou en forme de pics, notamment visible à petite échelle (Figure 22). Ces éléments mettent en évidence les limites de la méthode, notamment vis-à-vis de la distribution non-normale et de la stationnarité discutable des données. En outre ce modèle affiche des erreurs d'estimation assez élevées (Figure 19).

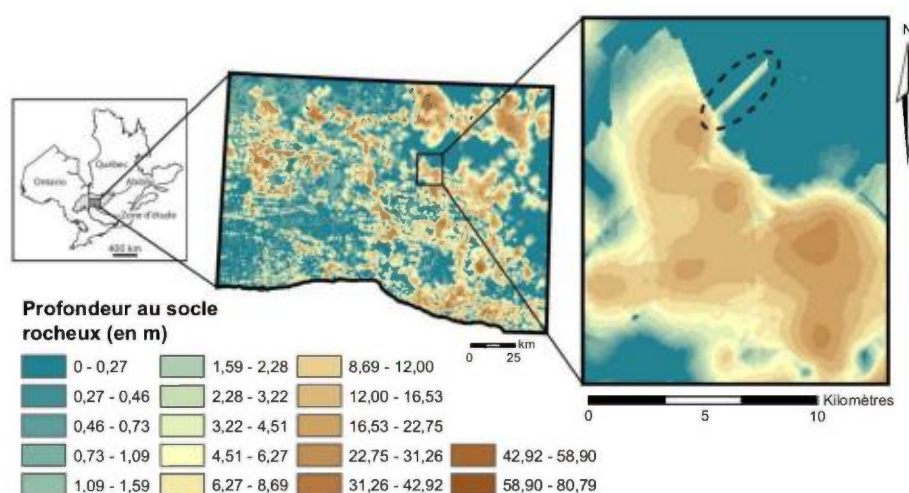


Figure 22 - Artéfact mis en évidence sur la carte de profondeur au socle rocheux finale.

Par contre il respecte bien la géologie de la zone d'étude et répond bien à la validation croisée. Le grand nombre de données permet tout de même de limiter les problèmes liés à l'interpolation. De plus les tests réalisés avec d'autres méthodes n'ont pas forcément été plus concluant (voir les annexes). Somme toute, ce modèle constitue une estimation convenable de la

profondeur au socle rocheux - éventuellement qualifiable de minimale - même si certains détails doivent être analysés avec précaution.

5 Interprétation

5.1 Zones profondes

Comme mentionné précédemment, la grande majorité des secteurs présentant une importante profondeur au roc sont principalement liés aux eskers et aux zones de failles connus (Figure 21). La correspondance avec les eskers s'explique par les importants dépôts de sédiments fluvioglaciaires mis en place lors de la déglaciation. Les fortes profondeurs au socle près des failles s'expliquent pour leur part par la présence d'une zone de dommage et de fortes schistosités en périphérie de ces structures créant ainsi de fortes dépressions dans le socle. De plus certaines failles de la Sous-province ont agi comme conduits à de grandes quantités de fluides hydrothermaux impliquant d'importantes zones d'altération. Ces zones sont souvent riches en carbonates ou en micas blancs qui rendent la roche hôte très friable et plus sensible à création de fosses lors de processus d'érosion.

La plupart des autres secteurs de grandes profondeurs ne pouvant être expliquée par ces entités peuvent être attribuables à la présence d'eskers enfouis. Ces derniers représentent des structures d'esker qui sont ensevelies sous les dépôts argileux du lac Ojibway. Ils sont identifiés lors des campagnes de cartographie quaternaire par photo-interprétation dans la continuité des eskers visibles et identifiables. Néanmoins certaines zones ne peuvent être expliquées par la présence d'esker ou de failles. C'est le cas notamment des zones profondes autour de Palmarolle, de celles au sud-ouest de Lebel-sur-Quévillon ou encore de celles au sud de Val-Paradis. Ces zones sont pour la plupart dans des secteurs où les données sont moins abondantes. Il se peut donc qu'ils représentent des artéfacts dus à la méthode d'interpolation. Des investigations plus approfondies seraient nécessaires afin de déterminer leur origine.

5.2 Application à l'exploration minérale

La carte de profondeur au socle rocheux (Figure 18) ainsi que la carte d'incertitudes associée (Figure 19) peuvent s'avérer utiles à plusieurs niveaux pour les intervenants de l'industrie minérale. Tout d'abord ces cartes permettent une évaluation sommaire des coûts associés à un forage avant d'atteindre le socle rocheux. En effet, puisque les coûts d'un forage sont directement proportionnels à sa longueur, l'accès à un outil de gestion identifiant des secteurs possédant un recouvrement quaternaire important permet une meilleure appréciation des coûts liés à une campagne d'exploration.

La carte générée permet aussi de cibler certains secteurs économiquement intéressants ayant peut-être été négligés historiquement par l'industrie minérale. En effet la récente campagne de forages effectuée par le MERN de 2008 à 2011 afin d'étudier le recouvrement quaternaire d'un secteur autour de la rivière Octave a permis de mettre à jour la présence de saprolite (Allard et Deschênes, 2011). Cinq des 228 forages effectués ont recoupé des zones où le socle rocheux avait subi une importante altération (Figure 23). Ces zones saprolitiques présentaient des enrichissements en certains métaux. Quelques autres sites au Québec où le même type de lithologie avait été décrit ont été répertoriés (Kimpe *et al.*, 1984, 1985, Bédard et David, 1991). Il est fort probable que des saprolites aient été forés dans le passé ailleurs dans la ceinture de roches vertes de l'Abitibi, mais

qu'ils n'aient pas été identifiés correctement. À cause de leur caractère très friable - similaire à des sédiments non consolidés - ils ont sans doute été considérés comme des sédiments quaternaires et n'ont donc jamais été analysés.

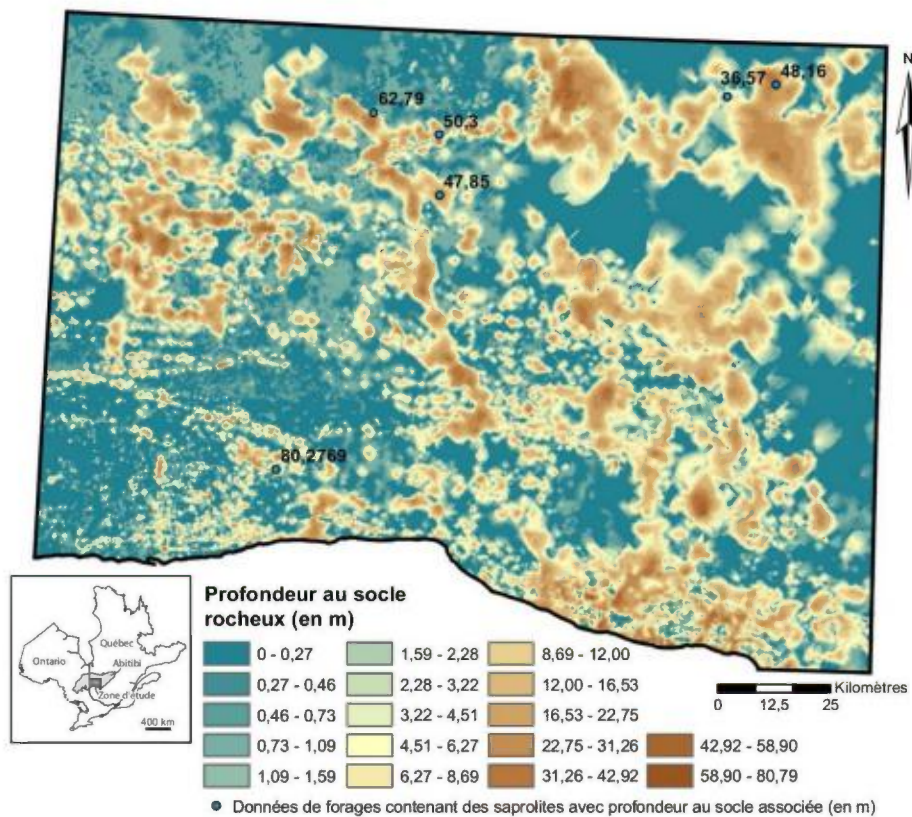


Figure 23 - Carte de localisation des données de forages où ont été identifiés des saprolites (carte réalisée à partir des données du MERN et de la CGC).

La carte des profondeurs au socle rocheux peut aider à localiser des emplacements où des saprolites ont été conservés. Les zones où la profondeur au socle rocheux est la plus importante représentent en cela des secteurs propices. Comme mentionné précédemment, les failles et les eskers du secteur étudié contrôlent spatialement l'emplacement des zones profondes. Cependant ces eskers ne sont pas associés à des fosses dans le roc, mais plutôt à d'importants dépôts de sables et graviers fluvioglaciaires émergents de la plaine argileuse du lac Ojibway. De plus, l'écoulement sous-glaciaire canalisé par ces structures a entraîné un lessivage de la surface du socle qui a contribué à l'érosion des saprolites. Seules les zones profondes associées aux failles sont donc ciblées.

En plus de contribuer à la préservation des saprolites, les failles sont directement associées à la mise en place des gisements aurifères de type orogéniques qui sont grandement répandus dans la ceinture de roches vertes de l'Abitibi (Dubé et Gosselin, 2007). Les failles ayant permis la circulation de fluides hydrothermaux aurifères peuvent donc renfermer des minéralisations aurifères épigénétiques. Ces minéralisations auraient potentiellement bénéficié d'un enrichissement supergène tardif. Des gisements aurifères supergènes dans les saprolites ont déjà été décrits et exploités en Australie, notamment Paddington (Robertson et Munckton, 1995) et Hannan South (Schiller et Ivey, 1990).

Des emplacements potentiels de zones aurifères ayant subies un enrichissement supergène en Au ont été identifiés à l'aide de la carte des profondeurs au socle rocheux (Figure 18) et des forages ayant mis en évidence des saprolites (Figure 23). Même si ces forages, du fait de leur faible nombre, ne peuvent être considérés comme représentatifs, ils forment les seules données disponibles sur les saprolites dans la zone étudiée. La profondeur au socle minimale pour ces forages est de 36,57 m : la profondeur des sites retenus est alors fixée comme devant être supérieure à 30 m. La sélection des sites a été faite en superposant les emplacements des failles, des indices aurifères (interception de plus d'un gramme par tonne) et des mines passées et présentes (Figure 24). À partir de ces éléments des secteurs ayant une profondeur au socle supérieure à 30 m et localisés sur des failles porteuses de minéralisations ont été identifiés. Malgré le peu de données concernant les saprolites dans la Sous-province de l'Abitibi, ces emplacements peuvent être considérés comme des secteurs possédant un potentiel intéressant pour des gisements supergènes aurifères (Figure 24).

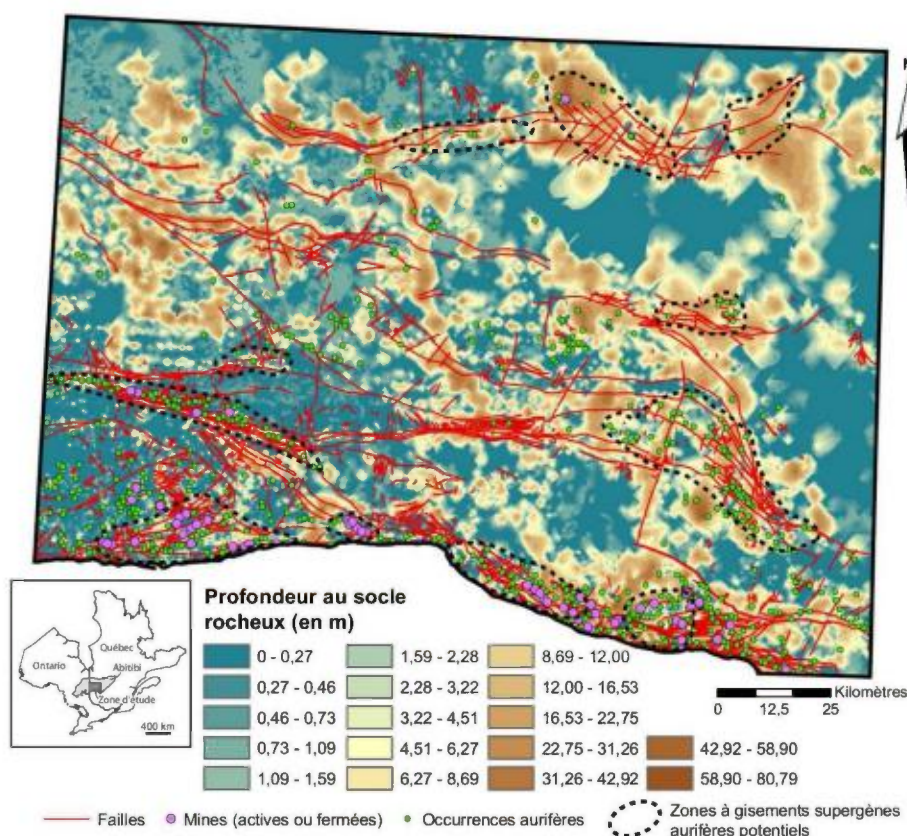


Figure 24 - Carte de localisation des zones potentielles de préservation de saprolites.

Conclusions et perspectives

Le projet entrepris a permis de générer une carte de profondeur au socle rocheux ainsi qu'une carte de topographie du roc pour une des régions les plus riches au monde en terme de ressources en métaux précieux et usuels. Ces cartes pourront être d'une grande utilité pour les futures études hydrogéologiques, géotechniques et géophysiques dans le secteur. De plus, elles auront un impact dans le domaine de l'exploration minière. En fait, ces dernières pourront être utilisées afin de mieux estimer les coûts des campagnes de forage en fonction de leur localisation. De plus, malgré les données très fragmentaires concernant les saprolites dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue,

le projet a permis de démontrer le potentiel de conservation de ce type de lithologie ainsi que le potentiel aurifère associé à l'enrichissement supergène. Ce type de ressources minérales a été jusqu'ici ignoré malgré l'exploration intensive effectuée dans la ceinture abitibienne.

Les cartes obtenues donnent une bonne idée des caractéristiques globales de profondeur au socle et de sa topographie puisque l'ensemble des données couvre la totalité de la zone d'étude. Le krigeage ordinaire a été privilégié afin d'estimer la profondeur au socle rocheux. Cependant la stationnarité est affectée par l'irrégularité dans la disposition des données ainsi que leur distribution exponentielle due à la grande proportion de données d'affleurements et de till mince. Ces éléments réduisent l'optimalité de la technique choisie.

La courte durée du stage dans le cadre duquel s'est effectué le projet a limité les travaux à ce qui est présenté dans ce rapport. Certaines pistes pourraient être explorées afin de bonifier le travail. Le double krigeage pourrait s'avérer intéressant à développer plus précisément afin de tenter de palier aux limites du krigeage ordinaire. Mais le problème principal reste celui de la distribution que jusqu'à présent le double krigeage non plus n'a pas permis de régler. L'échantillonnage des zones d'affleurement et des zones de till mince au 90 m pourrait être revu afin d'améliorer la distribution statistique. Augmenter le nombre de forages permettrait aussi de pallier ce problème, néanmoins il faudrait au moins dix fois plus de forages qu'actuellement pour rééquilibrer leur proportion par rapport aux données de surface, soit un nombre particulièrement conséquent. L'intégration de données géophysiques – notamment de données sismiques faible profondeur – permettrait d'améliorer grandement l'interpolation. Néanmoins, ce type de données n'existe pas pour le secteur. Finalement l'utilisation des données géochimiques de surface et la validation par forage de quelques zones profondes pourrait s'avérer intéressant afin de confirmer la présence de saprolite dans cette région de l'Abitibi.

Références

- G. Allard et P.-L. Deschênes : Reconnaissance géologique de la région de la rivière Octave. *Congrès Québec exploration 2011 (affiche)*, 2011.
- C. Barancourt, J. Creutin et J. Rivoirard : A Method for Delineating and Estimating Rainfall Fields. *Water Resources Research*, 28:1133–1144, 1992.
- P. Bédard et P. P. David : La météorisation sur les hauts plateaux de la Gaspésie (Québec) : quelques aspects. *Géographie physique et Quaternaire*, 45(2):195–211, 1991.
- É. Boisvert et M. Parent : Carte isopaque des formations superficielles, secteur Normétal/Lebel-sur-Quévillon, Abitibi, Québec. *Commission géologique du Canada, Dossier public 5830, échelle 1/250 000*, 2008.
- A. Bolduc, M.-N. Riverin, R. Lefebvre, S. Paradis et F. Fallara : Modélisation de l'architecture 3D du segment sud de l'esker Saint-Mathieu - Berry reliée à la circulation de l'eau souterraine, région d'Amos, Abitibi. *Proceeding of 57 Canadian Geotechnical Conference - 5rd Joint IAH-CNC/CGS*, p. 14–21, 2004.
- Z. Boudour : Détermination de l'épaisseur du mort-terrain par inversion des données électromagnétiques aéroportées. *Mémoire de Maîtrise, Université du Québec à Montréal*, 2011.

- J. Chung et J. D. Rogers : Estimating the position and variability of buried bedrock surfaces in the St. Louis metro area. *Engineering Geology*, 126:37–45, 2012.
- R. Daigneault, W. U. Mueller et E. H. Chown : Abitibi greenstone belt plate tectonics : the diachronous history of arc development, accretion and collision. *Dans : Eriksson, P., Altermann, W., Nelson, D., Mueller, W. U., Catuneanu, O. (éditeurs), The Precambrian Earth : tempos and events, Developments in Precambrian Geology, vol.12, Elsevier, p. 88–103, 2004.*
- A. B. Dixon-Warren et S. M. O'Malley : Bedrock Topography of Antioch Quadrangle, Lake County, Illinois and Kenosha County, Wisconsin. *Illinois State Geological Survey, Illinois Preliminary Geologic Map Series, IPGM Antioch-BT, 1 :24,000, 2004.*
- B. Dubé et P. Gosselin : Greenstone-hosted quartz-carbonate vein deposits. *Dans : Goodfellow, W.D. (éditeur), Mineral Deposits of Canada : A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods : Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 5, p. 49–73, 2007.*
- ESRI : *Using ArcGIS Geostatistical Analyst*. ESRI, 2003.
- C. Gao, J. Shirota, R. Kelly, F. Brunton et S. van Haaften : Bedrock topography and overburden thickness mapping, southern Ontario. *Sedimentary Geoscience Section, Ontario Geological Survey. Miscellaneous Release, p. 43, 2006.*
- P. Goovaerts : *Geostatistics for natural resources evaluation*. Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York, 1997. ISBN 0-19-511538-4. 483p.
- J. Goutier, P. Mercier-Langevin, T. Monecke, M. Houlié et P. Pilote : Contexte géologique et métallogénique du Groupe de Blake River, de l'Assemblage Kidd-Munro et des groupes de Malartic et de Kinojévis, Sous-province de l'Abitibi, Ontario et Québec. *Congrès Abitibi 2009, Abitibi Cuivre - Excursions Géologiques, p. 5–7, 2009.*
- D. Grimley et T. McTighe : Bedrock Topography of Maple Park Quadrangle, Kane and DeKalb Counties, Illinois. *Illinois State Geological Survey, Illinois Preliminary Geologic Map, IPGM Maple Park-BT, 1 :24,000, 2004.*
- D. Groves, R. Goldfarb, M. Gebre-Mariam, S. Hageman et F. Robert : Orogenic gold deposits : A proposed classification in the context of the crustal distribution and relationship to other deposit types. *Ore Geology Reviews*, 13(1-5):7–27, 1998.
- E. H. Isaaks et R. M. Srivastava : *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, USA, 1990.
- A. G. Journel : Nonparametric estimation of spatial distributions. *Mathematical Geology*, 15(3):445–468, 1983.
- C. R. D. Kimpe, P. Lasalle et M. R. Laverdière : A sub-till saprolite and the overlying soil profile near Mount Orford, Southern Quebec. *Can. J. Soil Sci.*, 64:577–585, 1984.
- C. D. Kimpe, C. Wang, M. Laverdière et P. LaSalle : Variability within a saprolite deposit near Quebec City, Canada. *Can. J. Soil Sci.*, 22:781–785, 1985.
- D. Krige : A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society*, 52:119–139, 1951.

- G. Matheron : *Traité de géostatistique appliquée, Tome I*. Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, vol. 14, 1962.
- G. Matheron : Principles of geostatistics. *Economic Geology*, 58:1246–1266, 1963a.
- G. Matheron : *Traité de géostatistique appliquée, II : Le Krigeage*. Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, vol. 24, 1963b.
- G. Matheron : *Le krigeage universel*. Les cahiers du Centre de morphologie mathématique de Fontainebleau, Fascicule 1. École de Mines de Paris, Fontainebleau., 1969.
- G. Matheron : *La théorie des variables régionalisées, et ses applications*. Les cahiers du Centre de morphologie mathématique de Fontainebleau, Fascicule 5. École de Mines de Paris, Fontainebleau., 1970.
- T. H. Meyer, M. J. Metcalf, G. A. Robbins et M. A. Thomas : Bedrock Surface Elevation, Coventry Quadrangle, Connecticut. *Connecticut Geological Survey*, 1 :24,000, 2008.
- L. Moore, W. Mueller et R. Daigneault : In situ hydroclastic fragmentation of subaqueous ponded lavas ; New Senator caldera, Abitibi greenstone belt, Quebec, Canada. *Precambrian Research*, 2012.
- W. U. Mueller, R. Daigneault, J. Mortensen et E. Chown : Archean terranedocking : Upper crust collision tectonics, Abitibi greenstone belt, Quebec, Canada. *Tectonophysics*, 265:127–150, 1996.
- W. U. Mueller, J. Stix, P. Corcoran et R. Daigneault : Subaqueous calderas in the Archean Abitibi greenstone belt : an overview and new ideas. *Ore Geol. Rev.*, 35:4–46, 2009.
- S. Nadeau : Estimation de la ressource granulaire et du potentiel aquifère des eskers de l’Abitibi-Témiscamingue et du sud de la Baie-James (Québec). *Mémoire de Maîtrise, Université du Québec à Montréal*, 2011.
- J. Nyquist, W. Doll, R. Davis et R. Hopkins : Cokriging surface topography and seismic refraction data for bedrock topography. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 1(1):67–74, 1996.
- J. Paradis : Géologie des formations en surface et histoire glaciaire, Lac Castagnier, Québec. *Commission géologique du Canada, Carte 1991A*, 2005.
- J. Paradis : Géologie des formations en surface et histoire glaciaire, Lac Blouin, Québec. *Commission géologique du Canada, Carte 2017A*, 2007a.
- J. Paradis : Géologie des formations en surface et histoire glaciaire, Lebel-sur-Quévillon, Québec. *Commission géologique du Canada, Carte 2018A*, 2007b.
- J. Paradis : Géologie des formations en surface et histoire glaciaire, Rapide-des-Cèdres, Québec. *Commission géologique du Canada, Carte 1992A*, 2007c.
- M. Parent, S. Paradis et E. Boivert : Ice-flow patterns and glacial transport in the eastern Hudson Bay region : implication for the late Quaternary dynamics of the Laurentide Ice Sheet. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 32:2057–2070, 1995.
- M. Parent, S. Paradis et A. Doiron : Palimpsest glacial dispersal trains and their significance for drift prospecting. *J. Geochem. Explor.*, 56:123–140, 1996.
- J. Rivoirard : *Introduction to Disjunctive Kriging and Non-Linear Geostatistics*. Oxford University Press, 1994.

- F. Robert : Syenite-associated disseminated gold deposits in the Abitibi greenstone belt. Canada. *Min. Deposita*, 36:503–516, 2001.
- I. Robertson et A. Munckton : The Paddington gold deposit. Dans : Butt, C.R.M., Anand, R.R. & Smith, R.E. (éditeurs), *Regolith geology and exploration geochemistry in the Yilgarn Craton, Western Australia. Excursion 3 Guide. 17th International Geochemical Exploration Symposium. EGRU, James Cook University, Townsville*, p. 111–118, 1995.
- J. Schiller et M. Ivey : Hannan South gold deposit. Dans : Hughes, F.E. (éditeur), *Geology of the mineral deposits of Australia and Papua New Guinea. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Monograph 14*, p. 443–447, 1990.
- R. Sibson : A brief description of natural neighbour interpolation. Dans : Barnett, V. (éditeur), *Interpreting Multivariate Data, Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics : Applied Probability and Statistics, John Wiley & Sons Inc., New York*, p. 21–36, 1981.
- S. R. Slattery, A. A. Barker, L. D. Andriashek, G. Jean, S. A. Stewart, H. Moktan et T. G. Lemay : Bedrock topography and sediment thickness mapping in the Edmonton–Calgary Corridor, central Alberta : an overview of protocols and methodologies. *Energy Resources Conservation Board, ERCB/AGS Open File Report 2010-12*, p. 16, 2011.
- P. Thibaudeau et J. Veillette : Géologie des formations en surface et histoire glaciaire, Lac Chicobi, Québec. *Commission géologique du Canada, Carte 1996A*, 2005.
- J. Veillette : Evolution and paleohydrology of glacial lakes Barlow and Ojibway. *Quaternary Science Reviews*, 13(9-10):945–997, 1994.
- J. Veillette : Géologie des formations en surface et histoire glaciaire, Cadillac, Québec. *Commission géologique du Canada, Carte 2019A*, 2004.
- J. Veillette : Géologie des formations en surface et histoire glaciaire, Rivière Harricana, Québec. *Commission géologique du Canada, Carte 1993A*, 2007a.
- J. Veillette : Géologie des formations en surface et histoire glaciaire, Rivière Waswanipi, Québec. *Commission géologique du Canada, Carte 1997A*, 2007b.
- J. Veillette, A. Dyke et M. Roy : Ice-flow evolution of the Labrador Sector of the Laurentide Sheet : a review, with new evidence from northern Quebec. *Quaternary Science Reviews*, 18:993–1019, 1999.
- J. Veillette et J. Pomares : Géologie des formations en surface et histoire glaciaire, Lac Matagami, Québec. *Commission géologique du Canada, Carte 1994A*, 2003.
- J. Veillette et P. Thibaudeau : Géologie des formations en surface et histoire glaciaire, Rivière Wawagosic, Québec. *Commission géologique du Canada, Carte 1995A*, 2007.
- H. Wackernagel : *Multivariate Geostatistics*. Springer, 2003.

Annexe A. Étude d'autres méthodes d'interpolation

De nombreuses méthodes d'interpolations peuvent être employées afin d'estimer la profondeur au socle ou l'élévation du socle. Si le krigeage a été privilégié ici, d'autres méthodes ont été testées.

Interpolation pondérée par l'inverse de la distance

Tout comme le krigeage, l'interpolation pondérée par l'inverse de la distance est un interpolateur exact qui base son estimation sur les distances entre le point à estimer et ses voisins, en partant du principe que l'influence d'un point diminue avec la distance. Il utilise pour cela la même combinaison linéaire que le krigeage. La seule différence vient du calcul des poids λ_i qui est beaucoup moins complexe :

$$\lambda_\alpha = \frac{d_\alpha^{-p}}{\sum_{i=1}^n d_i^{-p}}$$
$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

où λ_α est le poids associé à la valeur de la variable au point α , d_α représente la distance entre le point à estimer et le point α , p est le facteur de pondération, n le nombre de points dans le voisinage et d_i représente la distance entre le point à estimer et le point i .

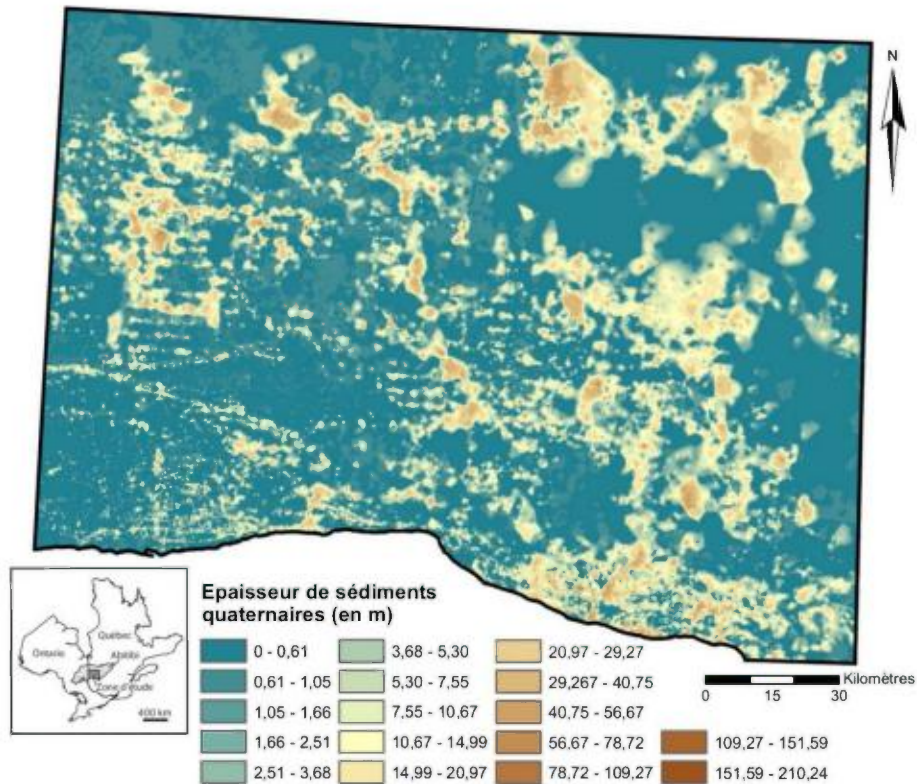


Figure 25 - Carte de profondeur au socle rocheux obtenue à l'aide d'une interpolation pondérée par l'inverse de la distance.

Cette méthode présente l'avantage d'être plus simple que le krigeage et d'avoir des temps de calculs plus faibles. Mais inversement elle considère moins la structure spatiale des données et ne permet pas de visualiser l'erreur d'estimation. En outre des données irrégulièrement réparties peuvent poser problème.

Dans le cas de l'étude un facteur de pondération P de 2 a été utilisé avec un voisinage isotrope. Au final cette technique donne une carte de profondeur au socle où les forages ont tendance à ressortir sous forme de zones circulaires ponctuelles peu réalistes, au détriment de la continuité des structures et notamment des eskers (Figure 25).

Interpolation par voisinage naturel

L'interpolation par voisinage naturel base son estimation sur un voisinage formé des points les plus proches du point à estimer en appliquant une pondération basée sur une aire associée à chaque point du voisinage (Sibson, 1981). La détermination du voisinage et des aires s'appuie sur deux diagrammes de Voronoï (Figure 26).

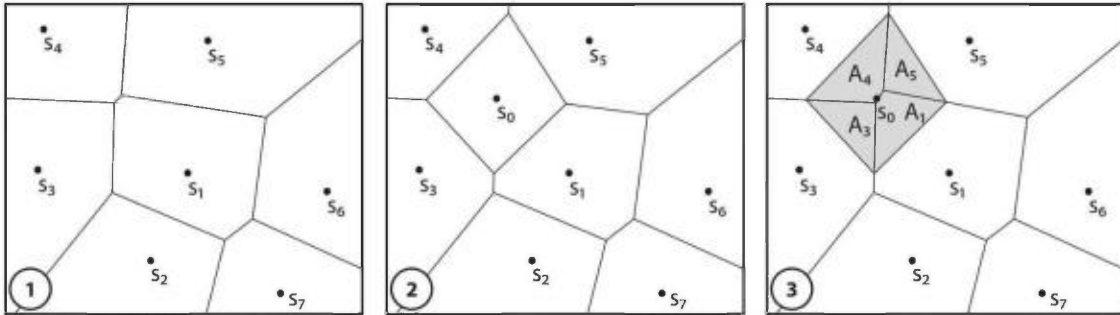


Figure 26 - Schéma récapitulant le principe de l'interpolation par voisinage naturel : 1. un premier diagramme de Voronoï est calculé sans le point s_0 à estimer ; 2. un second diagramme est calculé cette fois avec s_0 ; 3. les deux diagrammes sont superposés afin de déterminer l'aire A_α d'influence sur s_0 associée à chaque point s_α du voisinage de s_0 – ici s_1, s_2, s_4 et s_5 .

L'estimateur reste le même que pour l'interpolation pondérée par l'inverse de la distance ou le krigeage et une fois encore c'est le calcul des poids d'estimation λ_α qui change :

$$\lambda_\alpha = \frac{A_\alpha}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

où λ_α est le poids associé à la valeur de la variable au point α , n le nombre de points dans le voisinage, A_α l'aire associée au point α et A_i représente l'aire associée au point i .

Contrairement à l'interpolation pondérée par l'inverse de la distance cette méthode est particulièrement efficace pour les données irrégulièrement réparties. En outre elle est simple à utiliser puisque qu'aucun paramètre particulier n'est nécessaire. Le résultat est plutôt satisfaisant, même si les structures apparaissent très lisses (Figure 27). Néanmoins cette méthode n'a qu'une vision très limitée des structures des données et conserve toujours un caractère très local. Enfin elle aussi ne fournit pas d'erreur d'estimation.

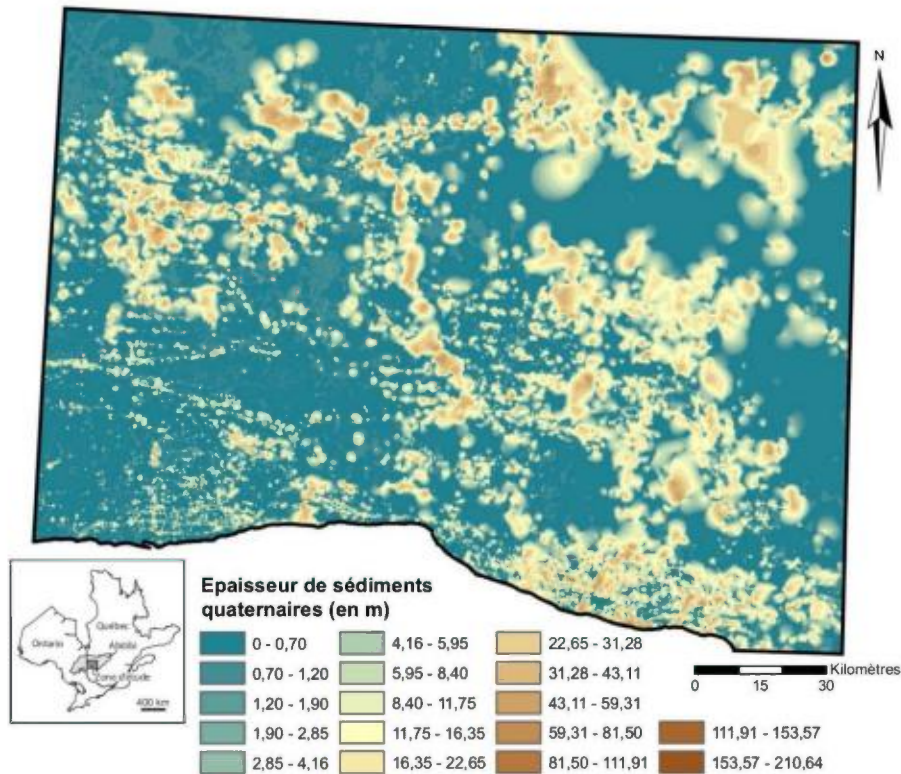


Figure 27 - Carte de profondeur au socle rocheux obtenue à l'aide d'une interpolation par voisinage naturel.

Spline avec tension

Contrairement aux techniques précédentes, les techniques de splines ne sont pas des techniques d'interpolation basée sur une analyse point par point, bien que ce soient là encore des techniques d'interpolation exactes. Elles estiment les valeurs en utilisant une fonction mathématique qui minimise la courbure de la surface globale passant par les données. La technique de spline avec tension permet de mieux contrôler la raideur de la surface afin d'obtenir un aspect moins lisse.

Bien que cette technique apparaisse plusieurs fois dans la littérature (Dixon-Warren et O'Malley, 2004 ; Grimley et McTighe, 2004) elle est peu adaptée quand les données varient de manière abrupte, comme c'est souvent le cas ici entre les données d'affleurement et celles de forages. Les continuités des structures ne sont donc pas aussi marquées que pour le krigeage (Figure 28). Et tout comme les méthodes précédentes, elle ne fournit pas d'erreur d'estimation.

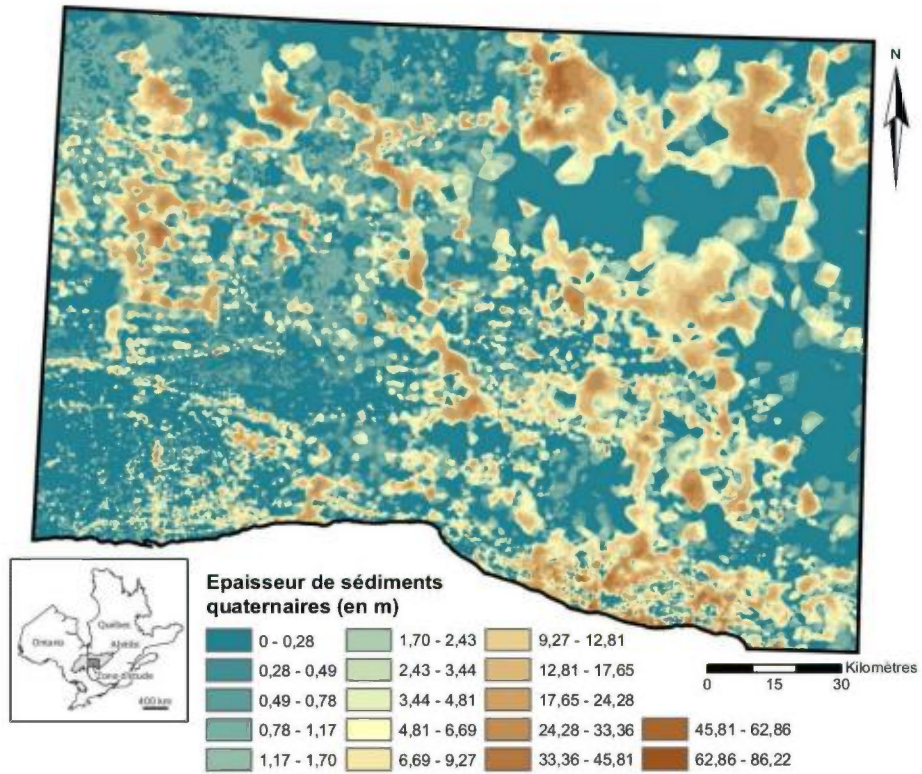
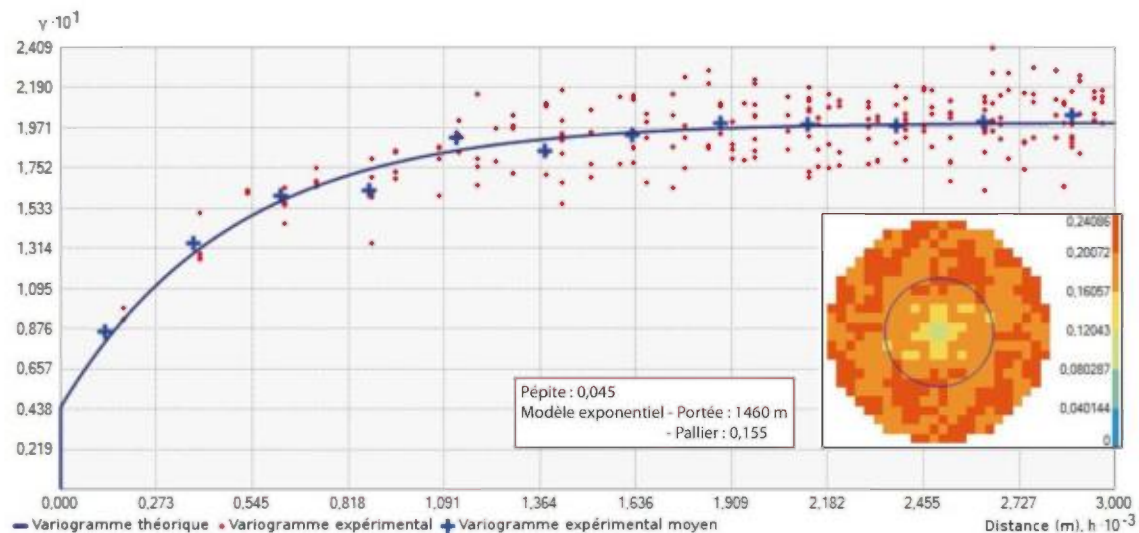


Figure 28 - Carte de profondeur au socle rocheux obtenue à l'aide d'une interpolation par spline avec tension.

Annexe B. Résultats de l'interpolation de la profondeur au socle rocheux par double-krigeage

Plusieurs tests impliquant la technique de double-krigeage ont été effectués. La première étape de krigeage d'indicatrices permet d'obtenir une carte de probabilité d'avoir une profondeur au socle rocheux supérieure à 0 m (Figure 30) ainsi que l'erreur d'estimation associée (Figure 31), qui s'avère assez élevée. Le variogramme utilisé (Figure 29) présente une portée beaucoup plus faible que ceux utilisés dans les autres types de krigeage, mais le modèle reste exponentiel et isotrope. Ce dernier est plus simple à définir que pour le krigeage ordinaire pour les mêmes données, signe que la mauvaise distribution influence le variogramme expérimental. De cette carte est extraite une propriété binaire valant 0 au-dessous d'un certain seuil et 1 au-dessus. Ce seuil est déterminé de manière à englober un maximum de données affleurantes dans les zones à 0 et de données non-affleurantes dans celles à 1. Ici un seuil de 0,3 donne 89,26 % des données d'affleurements dans les zones nulles et 98,91 % des données non-affleurantes dans celles valant 1. La majorité de ces données non-affleurantes étant prises en compte, c'est ce seuil qui a été utilisé.

La seconde étape - l'interpolation des données non-affleurantes par krigeage ordinaire (Figure 33) - se fait toujours avec un variogramme exponentiel isotrope (Figure 32), avec cette fois une portée très importante. Le nuage de point est particulièrement concentré dans les faibles distances, mais la précision se perd lorsque celles-ci augmentent. Les erreurs d'estimation s'avèrent localement très élevées (Figure 34).



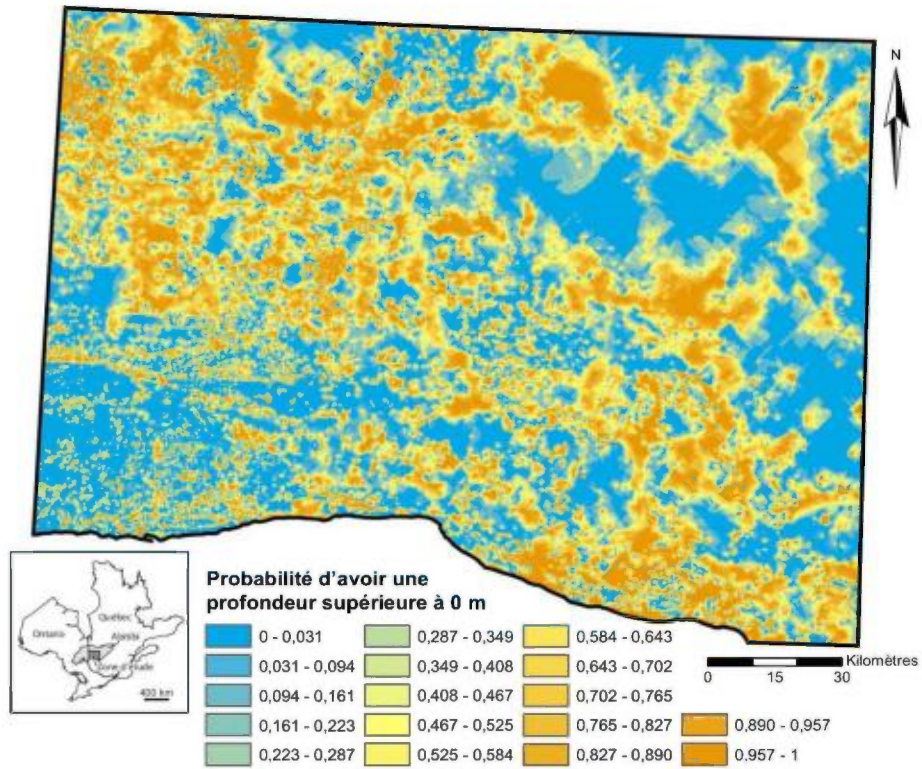


Figure 30 - Carte de probabilité résultant de l'interpolation par krigeage d'indicatrices avec le modèle de variogramme présenté en Figure 29.

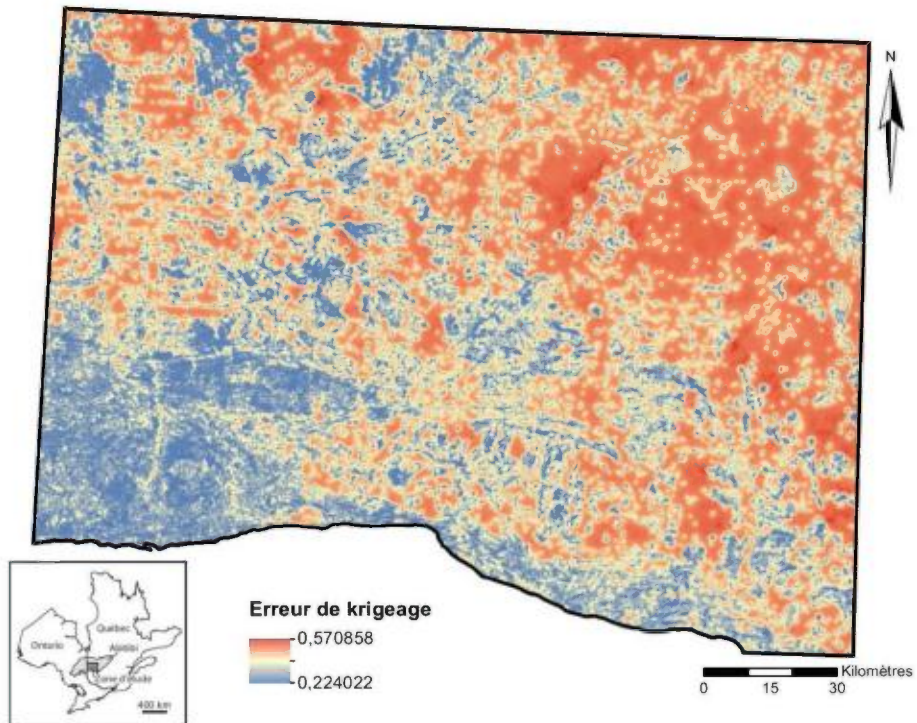


Figure 31 - Carte de l'erreur d'interpolation associée à la Figure 30.

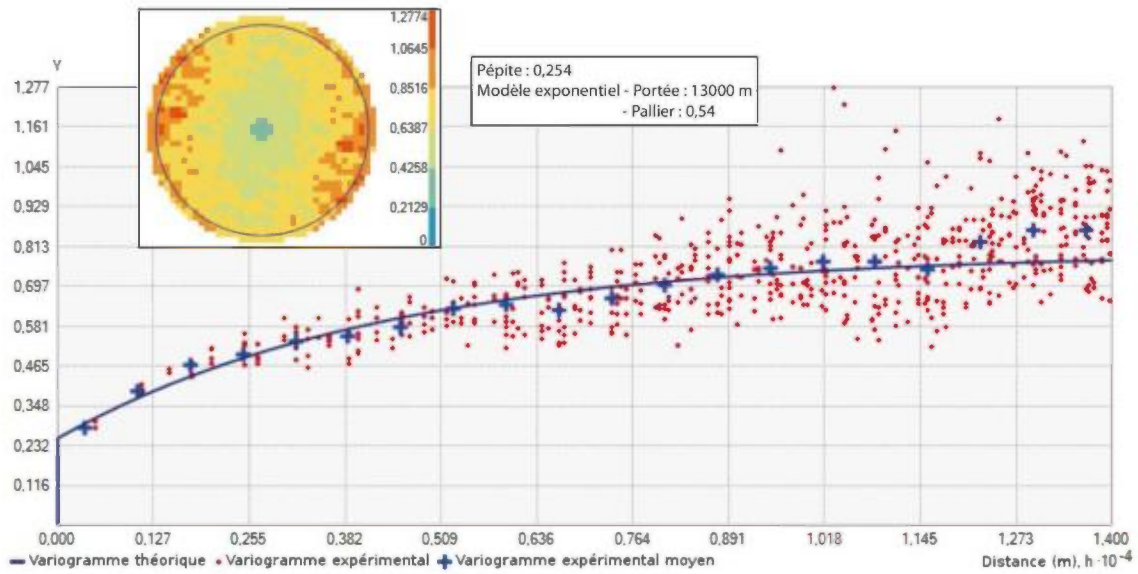


Figure 32 - Carte variographique et modèle de variogramme employé pour l'étape d'interpolation par krigeage ordinaire du double-krigeage.

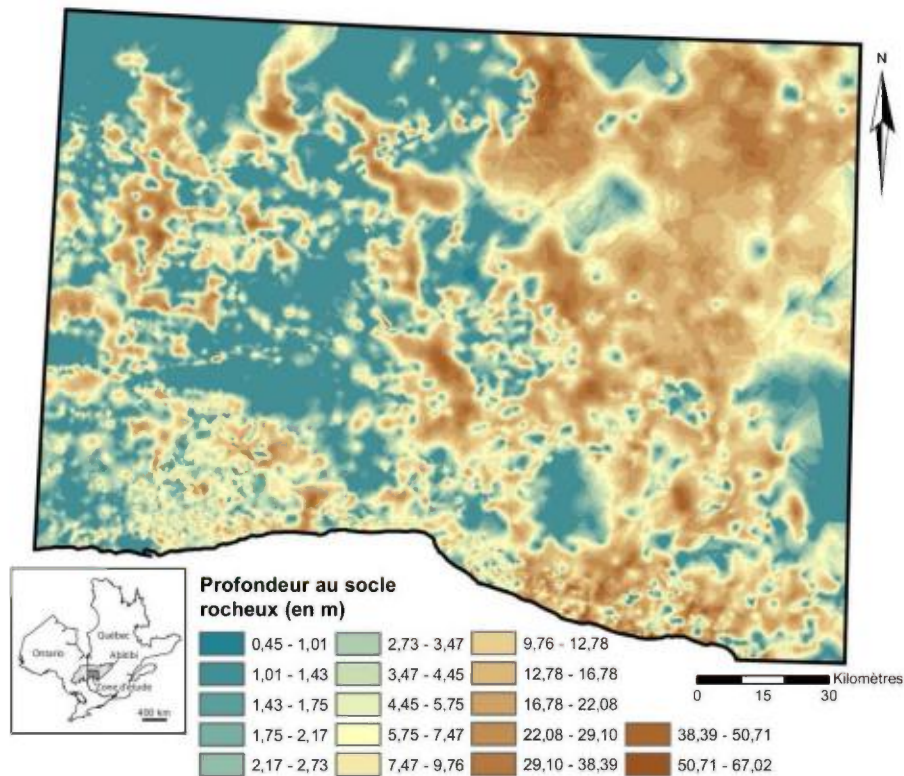


Figure 33 - Carte de profondeur au socle résultant de l'interpolation par krigeage ordinaire des données non affleurantes avec le modèle de variogramme présenté en Figure 32.

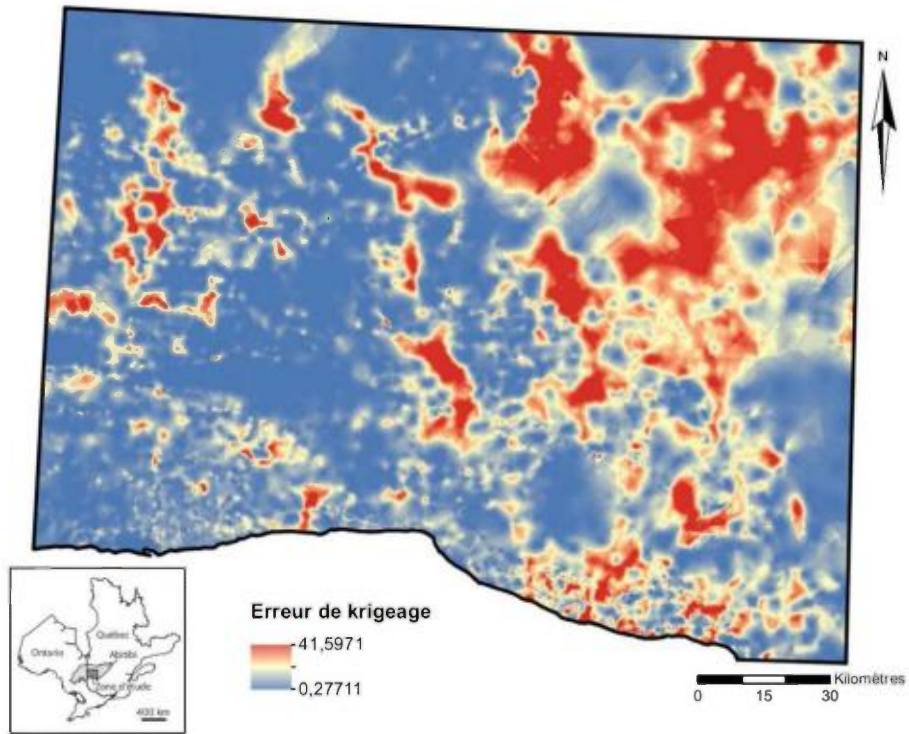


Figure 34 - Carte de l'erreur d'interpolation associée à la Figure 33.

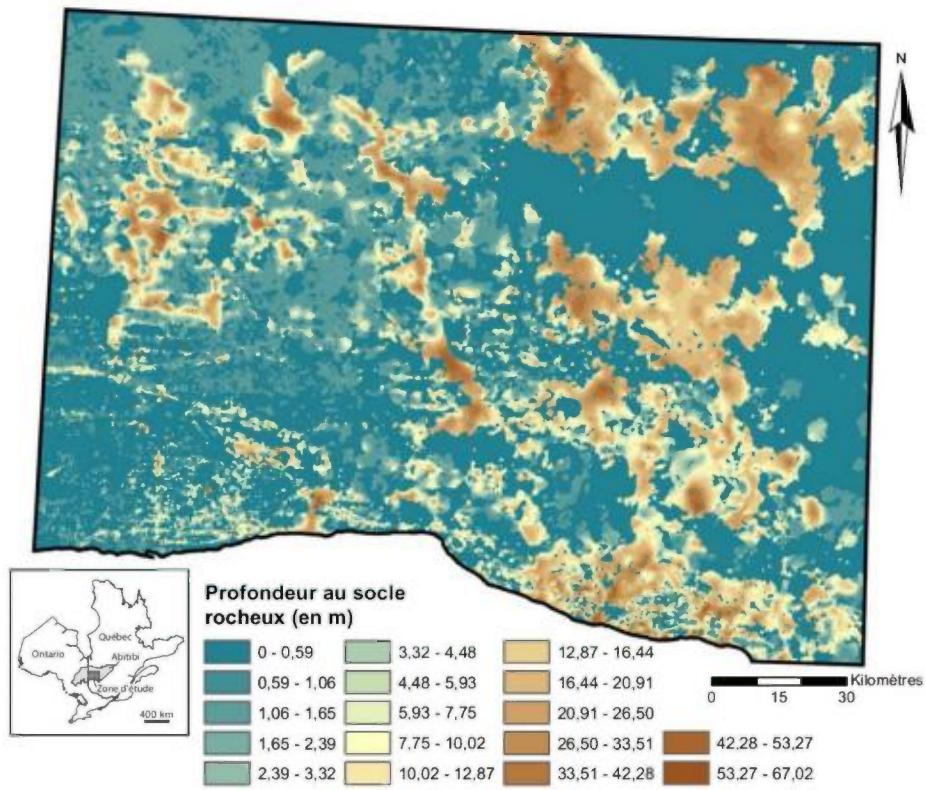


Figure 35 - Carte de profondeur au socle rocheux résultant du double-krigeage.

La carte de profondeur au socle finale est obtenue en multipliant la carte issue du krigeage ordinaire avec la carte de probabilité seuillée à 0,3 (Figure 35). Les discontinuités entre les zones affleurantes et non-affleurantes sont alors nettement visibles. En outre la carte tend à faire ressortir de grandes plages affleurantes - notamment au nord - ce qui n'est pas forcément le cas dans la réalité.

Plutôt que d'interpoler la profondeur au socle rocheux, interpoler un indice d'approfondissement (Boisvert et Parent, 2008) pourrait permettre d'augmenter la continuité entre les zones affleurantes et celles non-affleurantes. Cet indice est le résultat de la division de la profondeur au socle par la distance logarithmique décimale à l'affleurement le plus proche. Ceci permet tout de même de prendre en compte les données d'affleurements dans le krigeage ordinaire, même si elles ne sont pas utilisées en tant que telles. Le modèle de variogramme utilisé est toujours exponentiel isotrope (Figure 36), avec une portée plus faible que celle de la Figure 32 mais toujours une concentration des points qui diminue lorsque la distance augmente. L'erreur d'estimation est ici globalement beaucoup plus faible (Figure 37). La carte d'indice d'approfondissement obtenue est multipliée par la distance logarithmique décimale aux affleurements, donnant la profondeur au socle (Figure 38). Celle-ci est alors multipliée par la carte de probabilité seuillée à 0,3 afin de compléter le double-krigeage (Figure 39).

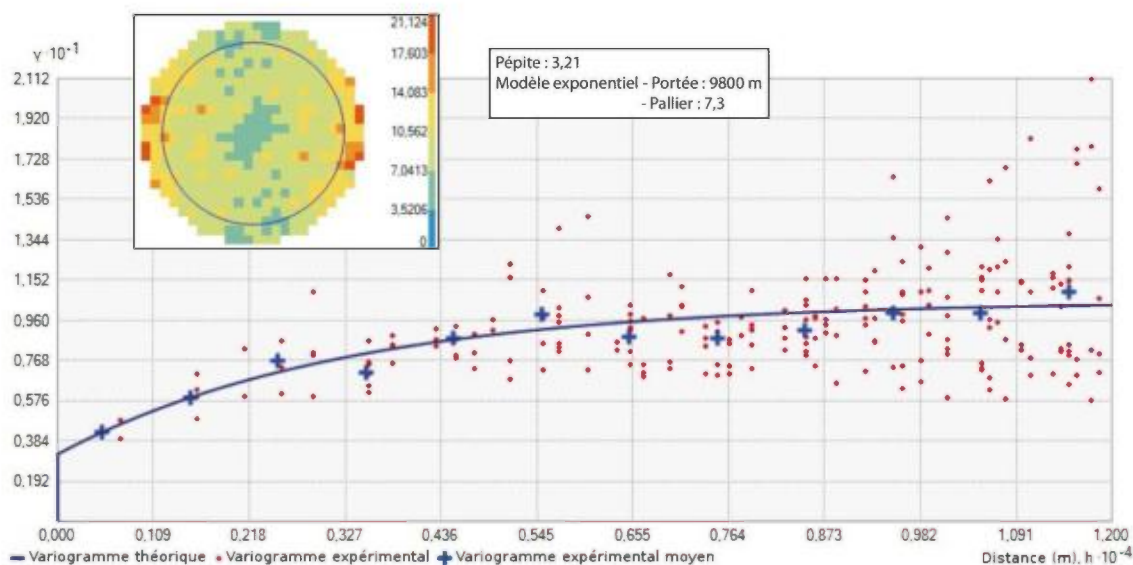


Figure 36 - Carte variographique et modèle de variogramme employé pour l'étape d'interpolation par krigeage ordinaire du double-krigeage.

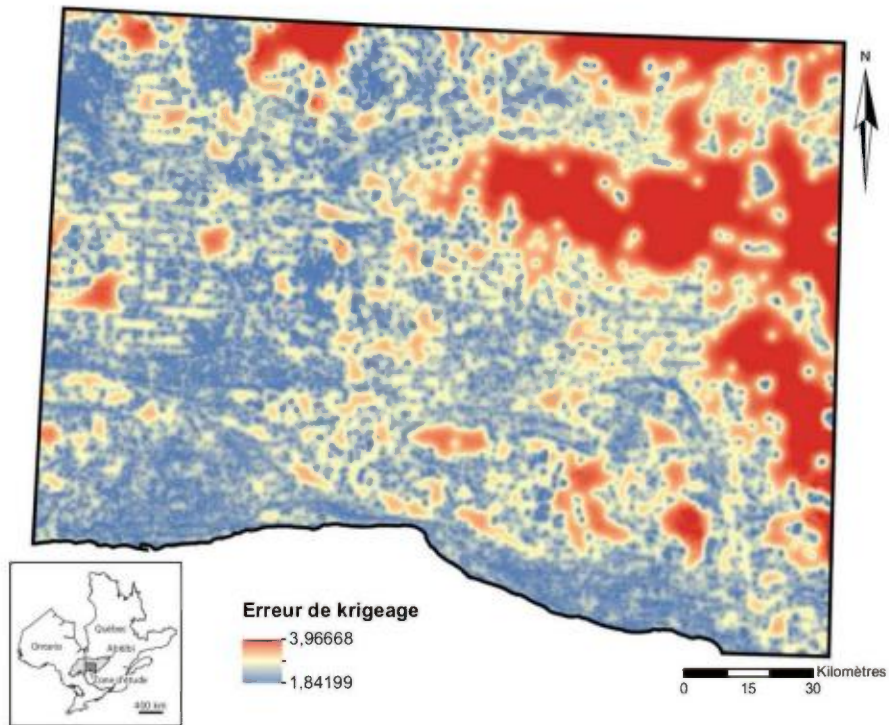


Figure 37 - Carte de l'erreur d'interpolation associée à l'interpolation de l'indice d'approfondissement.

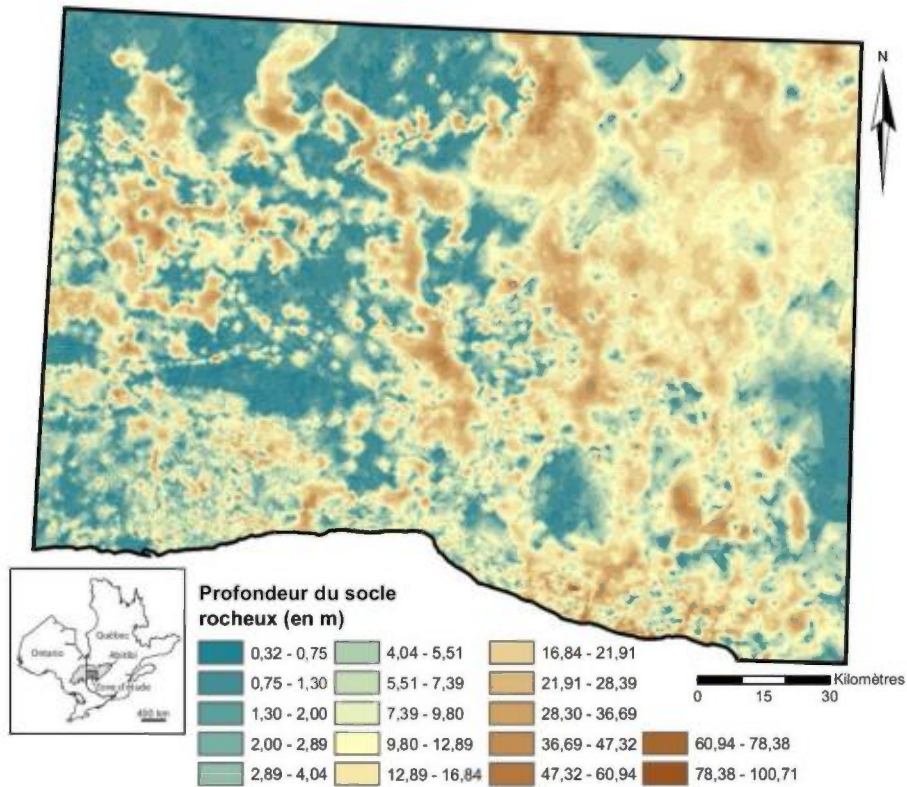


Figure 38 - Carte de profondeur au socle résultant de la multiplication de la distance aux affleurements en logarithme décimal avec l'interpolation de l'indice d'approfondissement par krigeage ordinaire réalisée avec le modèle de variogramme présenté en Figure 36.

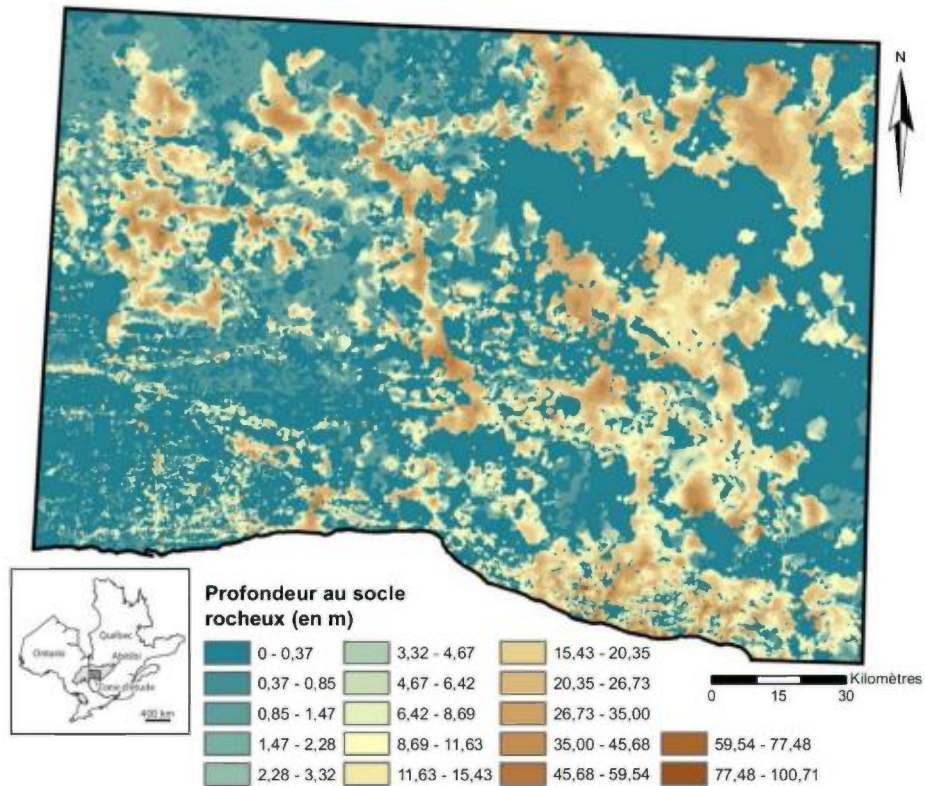


Figure 39 - Carte de profondeur au socle rocheux résultant du double-krigeage.

Finalement l'utilisation de l'indice d'approfondissement n'améliore pas de manière significative la continuité entre les zones. Par contre il tend à augmenter l'extension des structures et à rendre les pentes plus lisses. Ceci permet par endroit d'améliorer leur continuité, notamment au niveau des eskers. Le lissage au niveau des pentes est une des raisons pour lesquelles l'indice d'approfondissement n'a pas été utilisé dans le cadre d'un krigeage ordinaire avec l'ensemble des données. En effet il tend alors à estomper les fosses formées par les failles et les buttes que forment les eskers, alors que ces éléments sont normalement assez marqués.

Annexe C. Interpolation de l'élévation de la surface du socle rocheux

Cette méthode consiste à interpoler l'élévation du socle rocheux au lieu de sa profondeur. À partir des données de profondeur, l'élévation du socle est déduite par extraction pour chaque point de l'élévation du MNT aux mêmes coordonnées puis soustraction de la profondeur à cette élévation.

Analyse des données

Si les données d'élévation du socle restent irrégulièrement espacées, leur distribution est quasiment gaussienne (Figure 40). De même les cartes de Voronoï laissent apparaître une moyenne relativement constante sur de larges zones et des variations d'écart-type relativement régulières sur l'ensemble de la zone d'étude (Figure 41), laissant supposer une bonne stationnarité. Aucune tendance n'apparaît dans ces données.

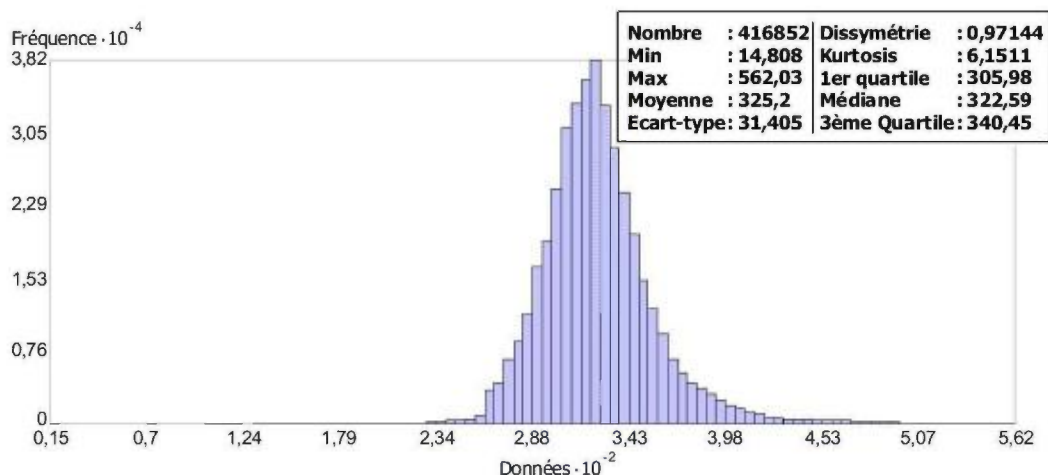


Figure 40 - Histogramme des données d'élévation du socle rocheux (données en m).

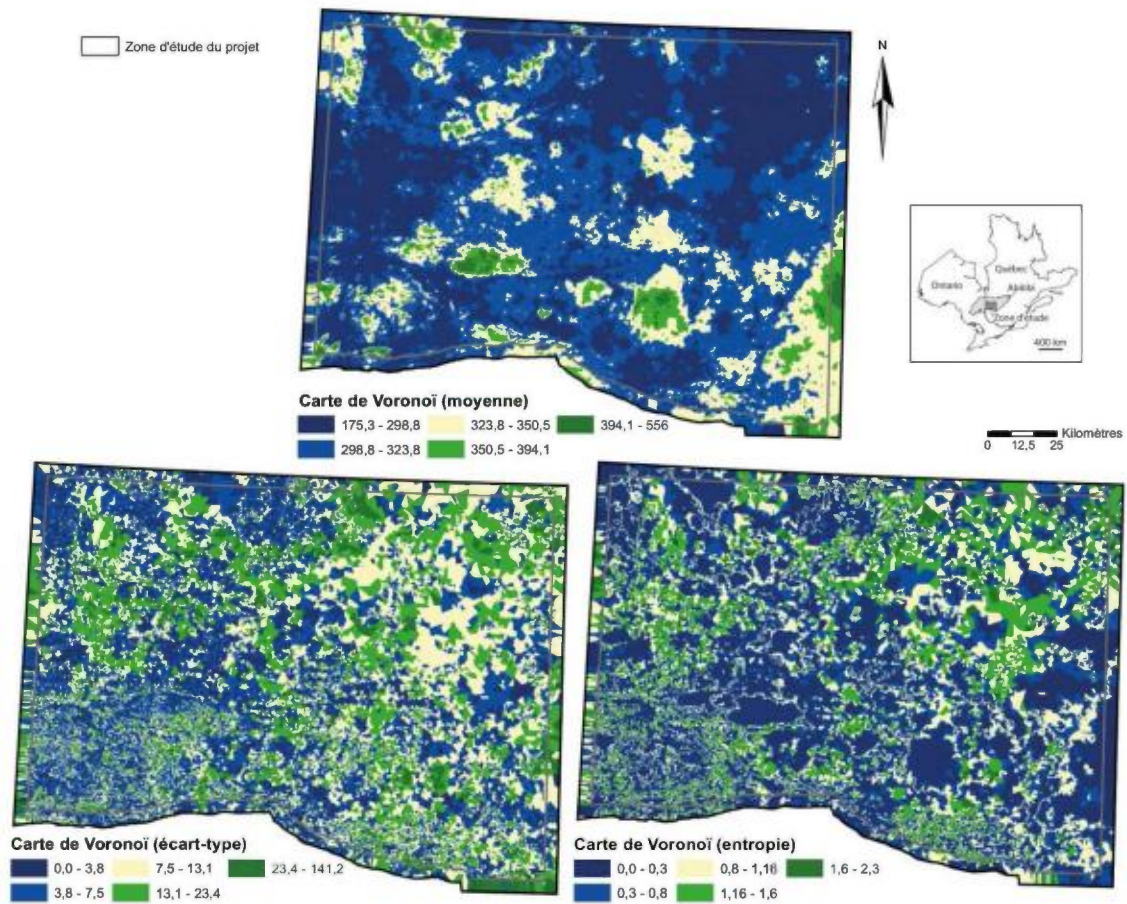


Figure 41 - Cartes de Voronoï des moyennes, des écarts-types et des entropies des données d'élévation du socle rocheux.

L'élévation du socle respecte donc mieux les éléments nécessaires à la pleine efficacité du krigeage que la profondeur au socle. Aucune transformation n'est nécessaire. Un krigeage ordinaire semble relativement bien adapté du fait de l'absence de tendance ou de moyenne constante sur l'ensemble de la zone d'étude.

Résultats

Le modèle retenu (Figure 43) ici est basé sur les 416 984 données initiales. Il est le produit d'un krigeage ordinaire avec un variogramme de type K-Bessel de paramètre 0,5 et une légère anisotropie est-ouest

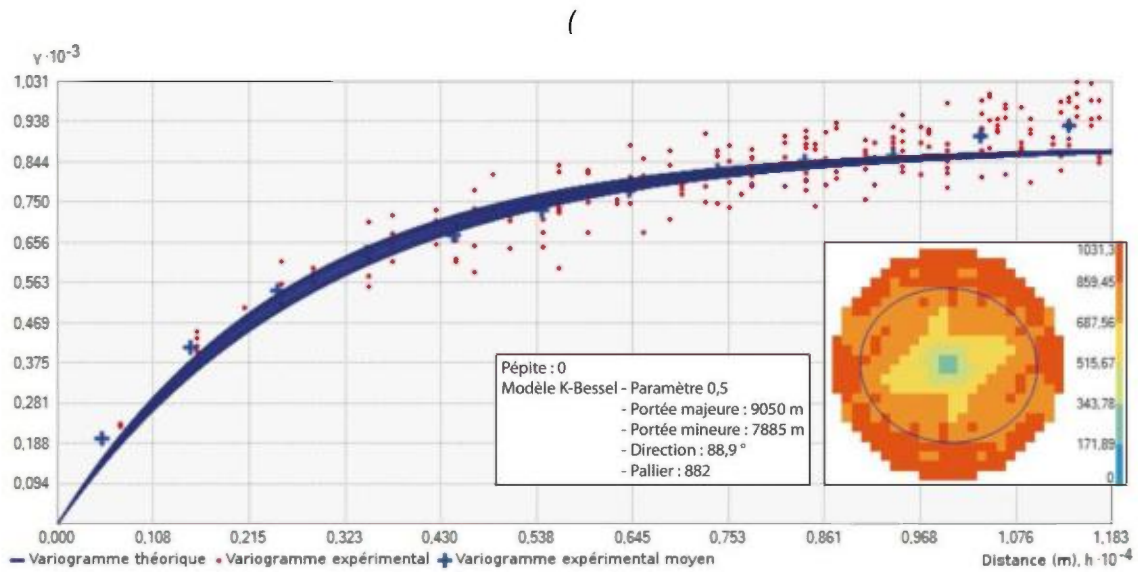


Figure 42). Le nuage de points est ici plus concentré que pour les données de profondeur au socle. Le modèle est alors plus simple à définir. La validation géologique se fait essentiellement grâce aux fosses marquant les failles. La validation croisée donne les résultats suivant :

Tableau 2. Résultats de validation croisée du modèle retenu pour interpoler l'élévation du socle rocheux.

Paramètre de validation	Résultat
moyenne quadratique	3,9118
moyenne arithmétique standardisée	0,0066
moyenne quadratique standardisée	1,0208
moyenne de l'erreur de krigeage	5,1567

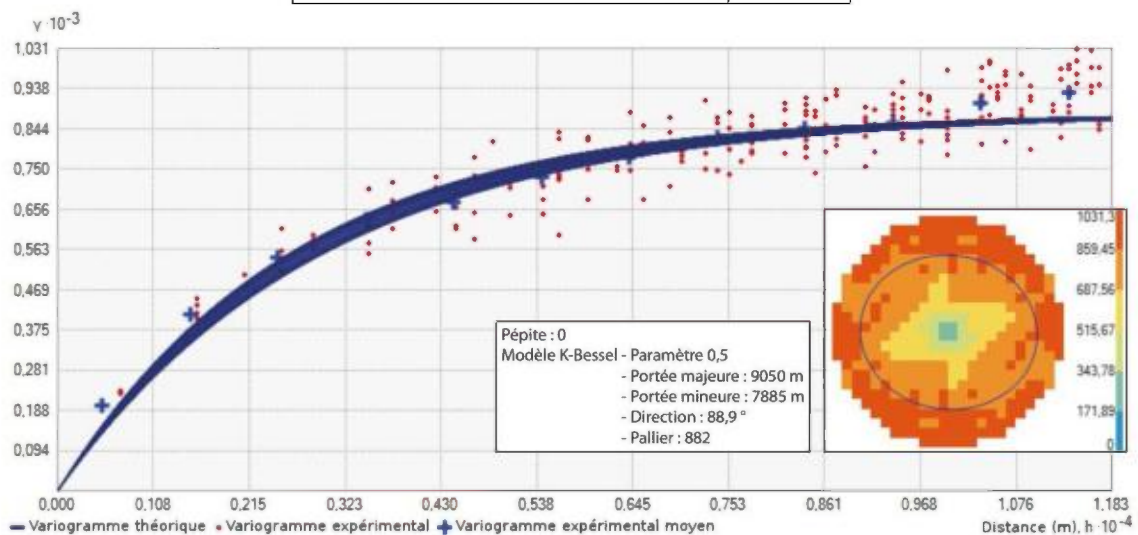


Figure 42 - Carte variographique et modèle de variogramme employé pour l'interpolation par krigeage ordinaire.

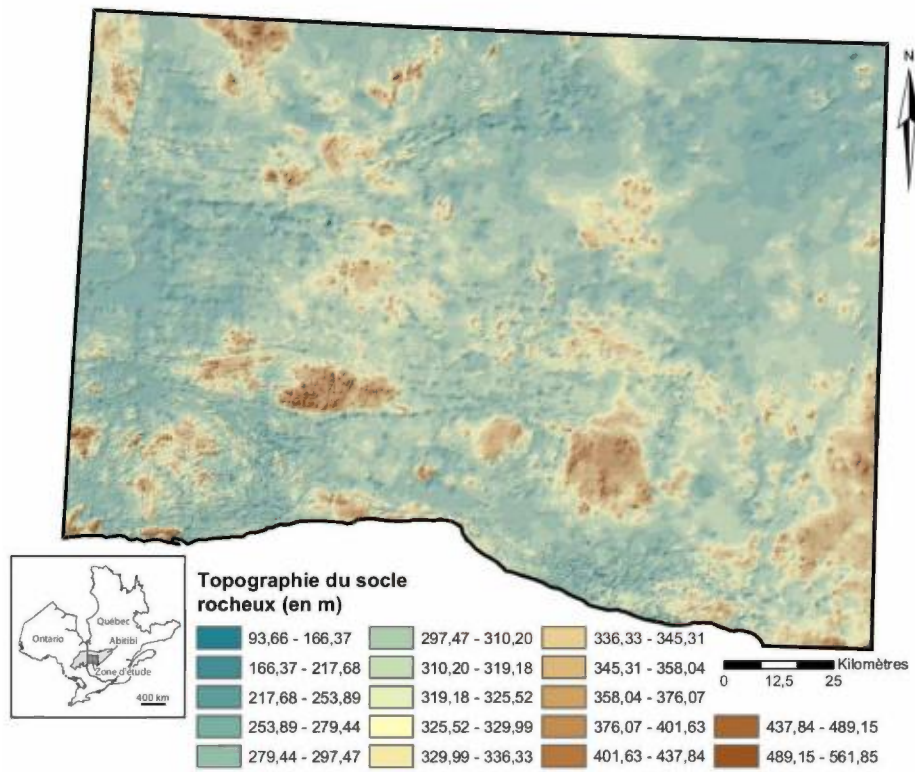


Figure 43 - Carte de la topographie du socle rocheux résultant de l'interpolation par krigeage ordinaire avec le modèle de variogramme présenté en

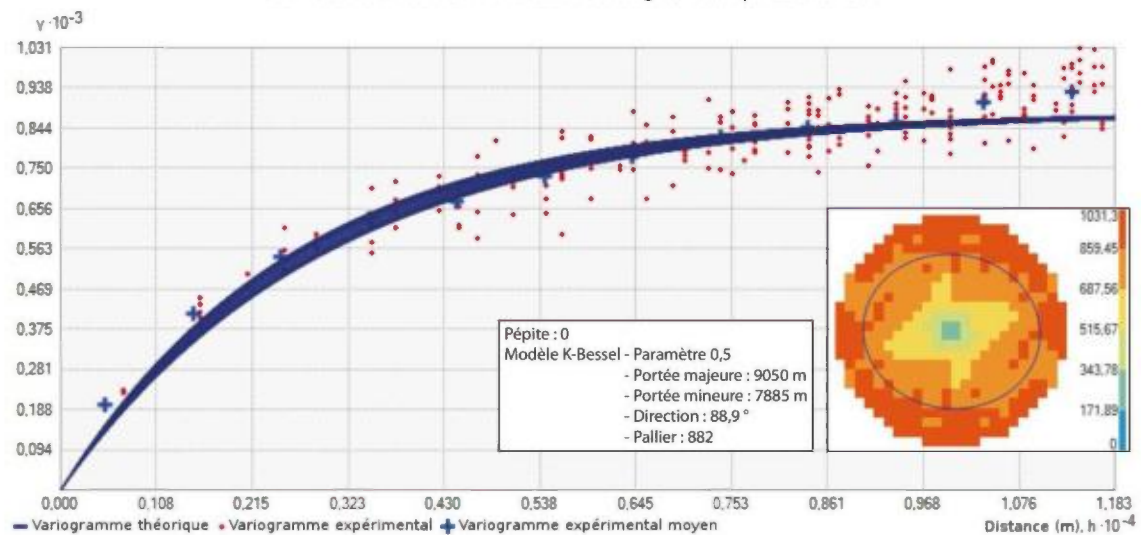


Figure 42.

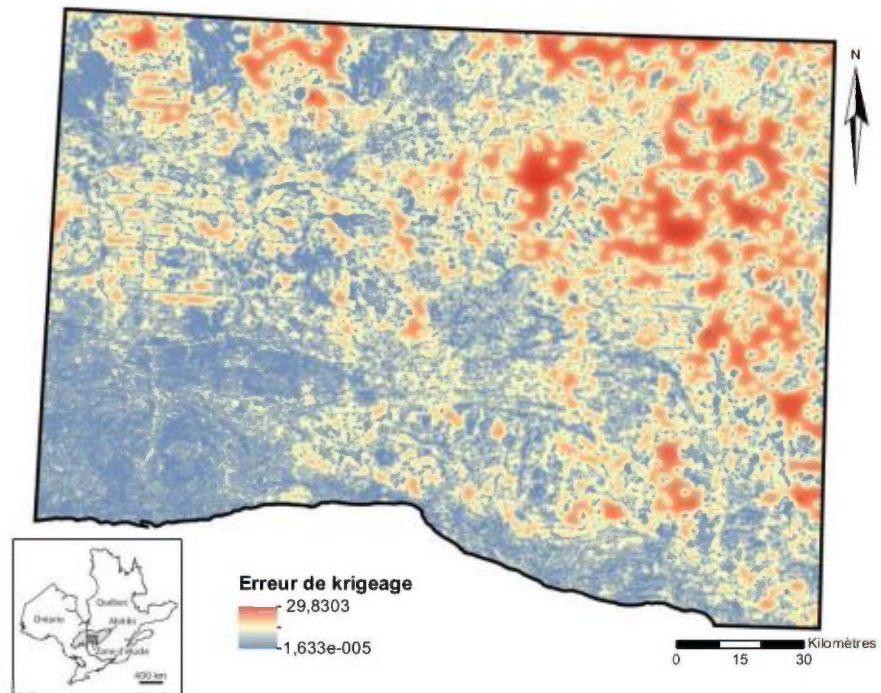


Figure 44 - Carte de l'erreur d'interpolation associée à la Figure 43.

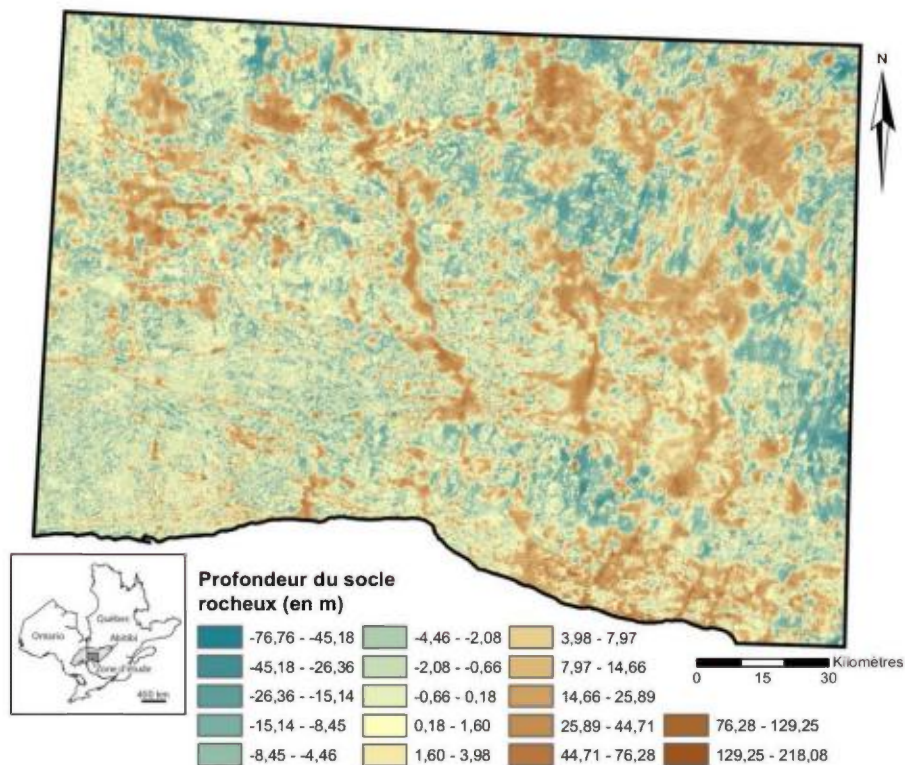


Figure 45 - Carte de profondeur au socle rocheux obtenue par soustraction au MNT de la carte de la Figure 43.

La carte de profondeur au socle rocheux est obtenue en soustrayant la topographie du socle ainsi obtenue au MNT (Figure 45). Néanmoins celle-ci met en évidence un problème majeur : en effet une part importante de la carte est composée de valeurs négatives. Ceci signifie que dans ces

zones la topographie du roc est supérieure au MNT. Gao *et al.* (2006) met en évidence différents cas où ce problème apparaît :

- des changements abrupts de relief au niveau du MNT mais où les données sont insuffisantes pour qu'ils soient marqués sur l'interpolation de l'élévation du socle ;
- des dépressions - vallées, rivières ou lacs - où là encore les données sont insuffisantes pour qu'elles soient marquées sur l'interpolation de l'élévation du socle.

Une solution serait de reprendre les valeurs du MNT dans les zones où la profondeur au socle est négative, même si cela peut engendrer des problèmes de continuité entre les zones affleurantes et les zones couvertes de sédiments. Néanmoins la zone d'étude a fait l'objet de nombreux travaux, notamment cartographiques, et les données d'affleurements rassemblées dans le cadre de ce projet représentent vraisemblablement quasiment toutes les zones d'affleurements. Dans ce cas une grande partie des zones négatives ne peuvent provenir d'affleurements mal représentés par le krigeage. Ce sont plutôt des zones avec une certaine profondeur au socle. Cette profondeur doit être supérieure à 1 m, car si ces sédiments étaient des tills minces les photos aériennes auraient permis de les mettre en évidence. Dans ce cas il est possible de diminuer l'élévation du socle dans les zones négatives de 3 m, soit prendre en compte une profondeur au socle de 3 m. Cette solution donnerait alors une élévation du socle minimum dans ces zones.

Mais ici si une partie du problème peut être imputée au krigeage, une autre vient de l'utilisation de grilles 2D avec une résolution de 90 m. En effet l'élévation exacte des forages ne fait pas partie des données de ces derniers, mais est extraite du MNT. ArcGIS donne alors accès à deux options :

- soit l'élévation extraite correspond à celle des centres des cellules où se trouvent les points ;
- soit l'élévation résulte d'une interpolation bilinéaire à partir des valeurs des centres des cellules.

Mais dans les deux cas cela introduit un biais dans la valeur d'élévation. En effet sur 90 m la topographie de surface peut présenter des changements très abrupts que l'extraction depuis le MNT ne peut prendre en compte. Afin de limiter le problème, il conviendrait donc de partir d'un MNT avec une résolution plus fine - ce qui permettrait de diminuer le biais d'extraction.

Ces solutions devraient éliminer une partie des zones de socles se trouvant au-dessus du MNT. Mais en l'état la méthode n'est pas applicable, et se contenter de reprendre les valeurs du MNT au niveau des zones problématiques sans prendre en compte le biais d'extraction induit un biais dans l'interpolation qui peut être important. En outre la question de quelle élévation attribuer aux zones négatives résiduelles reste ouverte. Si celles-ci ne sont pas trop nombreuses, utiliser une profondeur au socle de 3 m est envisageable. Dans le cas contraire il faudrait trouver d'autres solutions.