



1. Introduction

Le nombre de kimberlites diamantifères connues en Amérique du Nord a augmenté de façon significative au cours des dix dernières années. Nous estimons la population de kimberlites au Canada et aux États-Unis à plus de 880, dont environ 455 sont considérées diamantifères (Faure, 2006). Ce grand nombre de nouvelles découvertes rend maintenant possible l'application de techniques empiriques d'évaluation du potentiel minéral à l'exploration diamantifère. Nous présentons un modèle de potentiel minéral pour les kimberlites diamantifères d'Amérique du Nord. Celui-ci est basé sur un réseau de neurones artificiel qui utilise les données géophysiques régionales comme entrée et la localisation des kimberlites diamantifères connues comme données à être modélisées.

2. Technique d'évaluation du potentiel minéral

La technique d'évaluation du potentiel minéral par réseaux neuronaux fait partie du groupe de méthodes qui sont dites "empiriques". Ces techniques utilisent directement les données en entrée pour déduire les règles qui dictent la localisation des minéralisations connues. Dans les techniques empiriques, la connaissance d'un expert est cependant requise pour déterminer quelles sont les couches qui sont susceptibles d'être importantes pour le modèle, même si la manière exacte par laquelle chaque couche contribue au potentiel n'est pas connue.

3. Réseaux neuronaux artificiels

Les réseaux neuronaux constituent une méthode empirique puissante qui est basée sur la structure et l'interaction des neurones biologiques. Chaque neurone artificiel (ou biologique) est une entité simple qui effectue un traitement très simple. Ce sont les connexions entre ces composants simples en de vastes réseaux qui fournissent de puissantes capacités de traitement aux réseaux. Comme leur équivalent biologique, les réseaux neuronaux artificiels peuvent "apprendre" d'exemples qui leur sont fournis et appliquer le résultat de cet apprentissage à de nouveaux cas dont le résultat n'est pas connu. Dans un projet de cartographie du potentiel minéral, un réseau de neurones peut apprendre à reconnaître la combinaison et les caractéristiques d'un ensemble de données géoscientifiques qui expliquent le mieux la localisation des gisements. Le potentiel minéral de l'ensemble de la région à l'étude peut ensuite être évalué grâce à cet apprentissage. Plusieurs études antérieures montrent l'utilité de cette technique d'évaluation du potentiel (Pan et Harris, 2000 ; Singer et Kouda, 1996 ; Brown et al., 2000 ; Bougrain et al., 2003).

4. Région à l'étude et localisation des kimberlites diamantifères en Amérique du Nord

Le modèle d'évaluation du potentiel s'étend sur la majeure partie du Canada et des États-Unis (Fig. 1). Il couvre les régions émergées ainsi que les plates-formes continentales adjacentes. Il est cependant restreint par la disponibilité de certaines couches en entrée. La localisation de 419 kimberlites diamantifères en Amérique du Nord a été utilisée comme couche cible pour le modèle de potentiel minéral (Fig. 1).

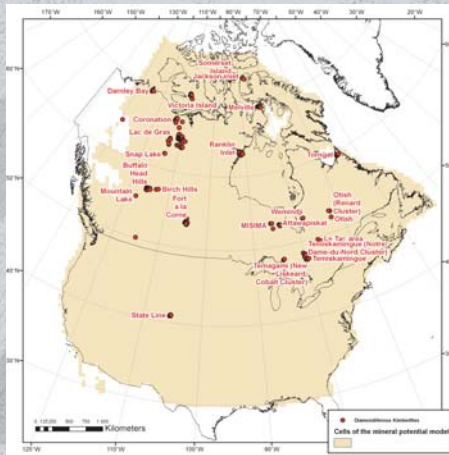


Figure 1 : Région à l'étude et localisation des kimberlites diamantifères en Amérique du Nord (tiré de Faure, 2006).

5. Couches brutes et dérivées en entrée

Tomographie sismique 3D du manteau

La tomographie sismique donne un aperçu en trois dimensions des variations relatives de compositions et de températures actuelles du manteau (Fig. 2). Des anomalies de fortes vitesses caractérisent les secteurs de basses températures comme les racines cratoniques fortement appauvries, alors que les faibles vitesses indiquent des régions plus jeunes et métasomatées ou tectoniquement actives.

Pour la présente étude, le modèle de vitesse d'ondes en cisaillement du manteau supérieur sous l'Amérique du Nord a été utilisé (Godey et al., 2003). La structure tridimensionnelle des vitesses est disponible jusqu'à une profondeur de 250 km. La lithosphère sous-cratonique archéenne présente des vitesses relativement élevées (~ +6%) qui persistent jusqu'à 230 km sous le Lac de Gras. La région tectonique active de la Cordillère de l'Ouest est quant à elle caractérisée par de faibles vitesses (~ -7%). Des tranches situées à des intervalles de 10 km entre 30 et 250 km ont été utilisées en entrée pour le modèle de potentiel minéral (Fig. 3). Des gradients horizontaux de vitesses à chaque

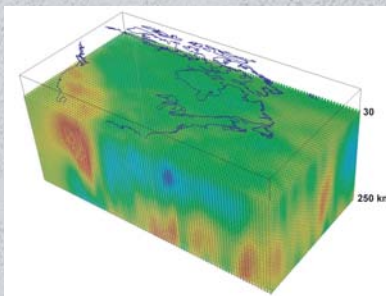


Figure 2 : Modèle tridimensionnel des perturbations de vitesse des ondes de Raleigh pour l'Amérique du Nord.

profondeur ont également été calculés et utilisés dans le modèle (Fig. 4).

Anomalies gravimétriques de Bouguer

Les anomalies gravimétriques de Bouguer sont causées par des variations dans les densités et les épaisseurs de la croûte et du manteau. Dans le domaine continental, les anomalies gravimétriques négatives les plus importantes correspondent aux zones sismiquement actives de la Cordillère et du "Basin And Range" (Fig. 5). Les cratons archéens montrent généralement des anomalies négatives par rapport aux terrains plus récents.

Profondeur du Moho

La topographie du Moho préserve des caractéristiques induites par les processus tectoniques ayant affecté la lithosphère (Fig. 6). Des changements importants de la profondeur du Moho correspondent à des zones de subduction fossiles et à des marges en extension (actives ou fossiles). Les données utilisées proviennent du modèle "Crust 5.1" de Mooney et al., 1998.

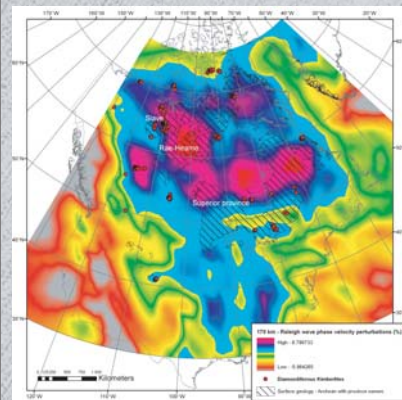


Figure 3 : Perturbations de vitesse des ondes de Raleigh à une profondeur de 170 km.

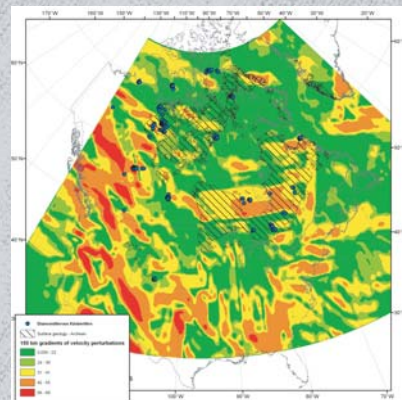


Figure 4 : Gradients horizontaux des perturbations de vitesse à une profondeur de 150 km.

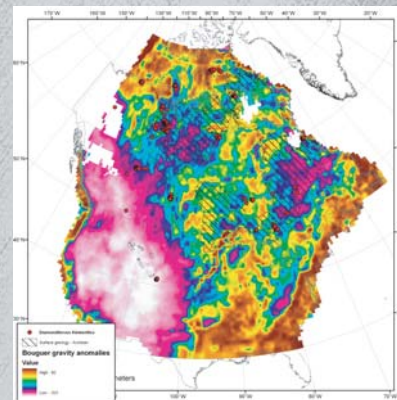


Figure 5 : Anomalies gravimétriques de Bouguer. (source : DNAG, 1989)

6. Pré-traitement des données

Toutes les couches en entrée ont été transformées en cellules de 50 x 50 km. Les couches ayant au départ une précision plus grande ont été réduites par le calcul de moyennes. À l'inverse, les couches ayant une résolution plus faible ont été interpolées. Le modèle contient 7698 cellules. De celles-ci, 71 contiennent des kimberlites diamantifères connues. Chacune des cellules a été assignée "1", si au moins une kimberlite diamantifère y est connue, et "0" dans le cas contraire. Ceci forme une couche binaire qui est utilisée pour l'entraînement du réseau de neurones.

L'entraînement d'un réseau de neurones requiert normalement un nombre sub-égal de cellules de gisements par rapport aux cellules "stériles". Toutefois, le nombre de gisements disponibles est la plupart du temps très faible dans le meilleur des cas, ce qui signifie qu'un choix difficile de cellules stériles doit être fait pour accommoder ce faible nombre de gisements. Une technique d'addition de bruit (Brown et al., 2003) peut être utilisée pour créer un certain nombre de gisements synthétiques générés semi-aléatoirement pour l'entraînement. Cette technique a démontré son efficacité à améliorer les résultats d'entraînement.

Ici, 700 kimberlites synthétiques ont été ajoutées en utilisant un bruit de 20% généré semi-aléatoirement.

7. Traitement de données par un réseau de neurones de type "generalized feed-forward, back-propagation"

Un réseau de neurones de type "generalized feed-forward, back-propagation" a été entraîné en utilisant les données en entrée ainsi que la couche cible décrites précédemment. Le logiciel de traitement par réseaux neuronaux utilisé est NeuroSolution 4.01. Les cellules disponibles ont été divisées en cellules d'entraînement (50%), de contre validation (25%) et de test (25%). Le réseau utilisé avait les caractéristiques suivantes :

- 48 neurones dans la couche en entrée
- 8 neurones dans la couche cachée
- Algorithme d'apprentissage : "Quickpropagation" avec pas de 0.04 et momentum de 0.5.
- 10 passes avec 5000 cycles maximum par passe et un arrêt après l'augmentation dans au moins 50 cycles de l'erreur moyenne au carré du groupe de contre-validation.
- Le réseau avec l'erreur moyenne au carré la plus faible dans le groupe de contre-validation a été retenu comme le meilleur réseau et utilisé pour produire la carte de potentiel.

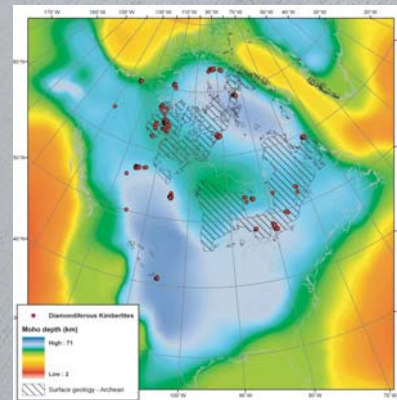


Figure 6 : Profondeur du Moho (du modèle "Crust 5.1" de Mooney et al. 1998).

Tableau 1

Sortie	Départ	Kimberlite diamantifère	Stérile
Kimberlite diamantifère		158	381
Stérile		27	1531
Performance		Kimberlite diamantifère	Stérile
Erreur moy. au carré		0.13	0.13
R		0.45	0.45
Taux de réussite		85.4	80.0

8. Résultats et interprétation

Résultats de classification sur les cellules tests

80% des cellules du groupe test déclarées stériles au départ ont été classées comme étant stériles par le réseau (Tableau 1). 20% des cellules jugées stériles au départ ont été considérées favorables par le réseau en raison de leurs ressemblances avec des cellules contenant des kimberlites connues. 85% des cellules contenant des kimberlites diamantifères connues ont été correctement classées comme favorables. Ces résultats indiquent que le réseau de neurones est capable de déterminer une combinaison des cellules en entrée qui prédit la localisation des kimberlites connues par rapport aux secteurs stériles.

Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité est une méthode qui peut être utilisée pour déterminer de façon semi-quantitative l'importance des couches en entrée. Les résultats de l'analyse de sensibilité sont présentés sur les figures 7 et 8. Les secteurs les plus favorables sont caractérisés par de fortes vitesses et des gradients de vitesse horizontaux élevés dans les parties inférieures du modèle topographique (profondeur de 150 à 230 km), de fortes vitesses dans les parties supérieures du modèle (50 - 90 km) ainsi que par des anomalies gravimétriques négatives.

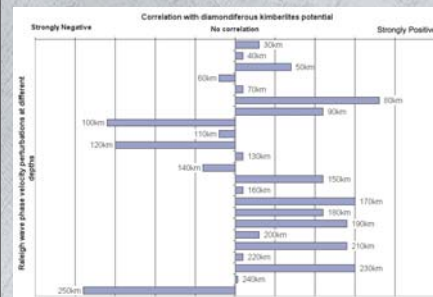


Figure 7 : Analyse de sensibilité pour les perturbations de vitesses des ondes de Raleigh.

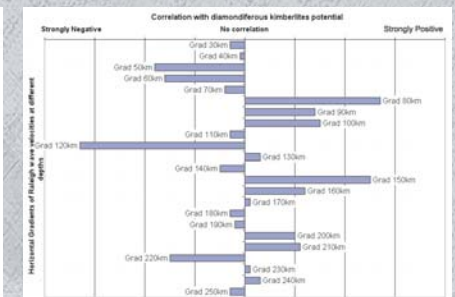


Figure 8 : Analyse de sensibilité pour les gradients horizontaux des perturbations de vitesses des ondes de Raleigh.

Discussion et interprétation

Le modèle de potentiel minéral pour les kimberlites diamantifères en Amérique du Nord est montré à la figure 9. Les régions les plus favorables pour les kimberlites diamantifères ne coïncident pas verticalement avec les portions les plus froides et profondes des cratons, mais entourent plutôt les racines de fortes vitesses sismiques à des profondeurs variant de 160 à 200 km (Fig. 10). Cette observation supporte de façon générale l'hypothèse que les kimberlites sont confinées aux marges des cratons (Kennedy, 1965; Griffin et al. 2004). Nous suggérons plus précisément que les secteurs favorables sont situés autour des quilles cratoniques à l'intérieur de cet intervalle de profondeur (Faure et al., 2006). Ceci est particulièrement évident sous les cratons de Slave-Rae-Heare, dans lesquels les champs de kimberlites du Lac de Gras et de Rankin Inlet sont localisés aux marges ouest et est respectivement d'une région circulaire de fort potentiel.

Une caractéristique particulièrement intéressante de la carte de potentiel minéral est la présence d'une importante zone E-O de forte favorabilité qui relie les kimberlites des Basses-Terres de la Baie d'Hudson en Ontario (Attawapiskat) avec les kimberlites de la Baie James et des monts Otish au Québec (Fig. 9). Le parautochtone grenvillien au centre du Québec et au Labrador apparaît également comme une cible régionale intéressante.

Nos résultats sont cohérents avec la profondeur du champ de stabilité du diamant et avec la limite lithosphère-aesthosphère telle qu'évaluée par les xénolithes des kimberlites (Griffin et al. 2004; Fig. 7). Cette forte association avec de forts gradients de vitesses indique que les terrains les plus intéressants sont ceux qui sont situés aux frontières entre des blocs de température/composition différentes ou situés sur des structures mantelliques profondes.

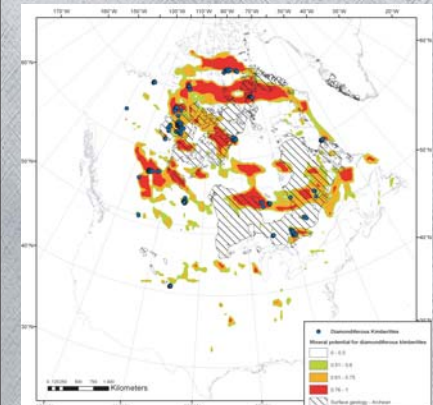


Figure 9 : Modèle de potentiel minéral pour les kimberlites diamantifères en Amérique du Nord.

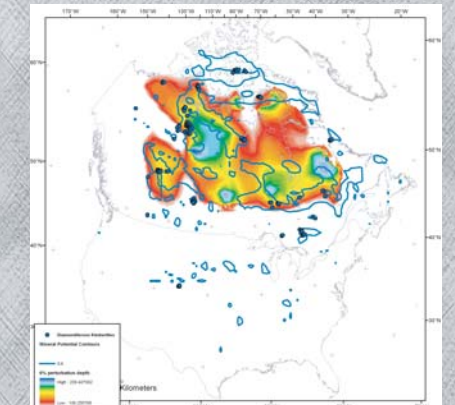


Figure 10 : Contour 0.6 du modèle de potentiel pour les kimberlites diamantifères en Amérique du Nord superposé avec une image de la profondeur à laquelle la perturbation +6% des vitesses des ondes sismiques est atteinte.

Références

Bougrain, L., Gonzalez, M., Bouchot, V., Cassard, D., Lips, A.L.W., Alexandre, F., Stein, G. 2003. Knowledge Recovery for Continental-Scale Mineral Exploration by Neural Networks. *Natural Resources Research*, 12, no 3 : pp.173-181.

Brown, W., Groves, D.I., Gedeon, T. 2000. Artificial Neural Networks: a new method for mineral prospectivity mapping. *Australian Journal of Earth Sciences*, no 47 : pp.757-770.

Brown, W., Gedeon, T., Groves, D.I. 2003. Use of Noise to Augment Training Data : a Neural Network Method of Mineral-Potential Mapping in Regions of Limited Known Deposits Examples. *Natural Resources Research*, 12, no 2 : pp. 141-152.

Clowes, R.M., Hammer, P.T.C., Fernandez Viejo, G., and Welford, J.K., 2005. Lithospheric structure in northwestern Canada from LITHOPROBE seismic refraction and related studies: A synthesis. *Can. J. Earth Sci.* 42: 1277-1293.

DNAG Gravity Anomaly Map of North America. Geophysics of North America CD-ROM, National Geophysical Data Center, 1989.

Faure, S. 2006. World Kimberlites and Lamproites CONSOREM Database (Version 2006-1). Consortium de Recherche en Exploration Minérale CONSOREM, Université du Québec à Montréal, Numerical Database on www.consorem.ca.

Faure, S., Godey, S. and Fallara, F. 2006. A new guide for regional exploration of diamondiferous kimberlites using 3D tomography of the North American lithospheric mantle. *GAC-MAC Abstract*.

Godey, S., Snieder, R., Villaseñor, A. and Benz, H. 2003. Surface wave tomography of North America and the Caribbean using global and regional broad-band networks: phase velocity maps and limitations of ray theory. *Geophysical Journal International*, 152: 620-632.

Griffin, W.L., O'Reilly, S.Y., Doyle, B.J., Pearson, N.J., Coopersmith, H., Kivi, K., Malkovetsa V., Pokhilenko, N. 2004. Lithosphere mapping beneath the North American plate. *Lithos* 77 (1-4):873-922.

Kennedy, W.Q., 1965. The influence of basement structure on the evolution of the coastal (Mesozoic and Tertiary) basins, in Ion, D.C., ed., *Salt basins around Africa: The Institute of Petroleum*, London, p. 7-16.

Mooney, Laske and Masters, Crust 5.1: a global crustal model at 5x5 degrees. *JGR*, 103, 727-747, 1998.

Singer, D.A., Kouda, R. 1996. Application of a feedforward neural network in the search for Kuroko deposits in the Hokuroko district, Japan. *Mathematical Geology* 28 : pp.1017-1023.

Remerciements

Nous voudrions remercier les personnes suivantes pour leur contribution essentielle à ce projet : Stéphanie Godey pour le modèle de tomographie 3D, Francine Fallara pour la représentation 3D de la tomographie et Isabelle Lapointe et Claude Dallaire pour la conception de cette affiche.