Étude de faisabilité pour l'imagerie des karsts sur la côte des Îles-de-la-Madeleine avec le géoradar

Rapport de recherche No R-1179 Novembre 2009

Étude de faisabilité pour l'imagerie des karsts sur la côte des Îles-de-la-Madeleine avec le géoradar

Bernard Giroux

Institut national de la recherche scientifique Centre Eau Terre Environnement

Rapport de recherche 1179

17 Novembre 2009

Table des matières

1.	Introduction1
2.	Principe général du géoradar2
3.	Mise en œuvre
3.1.	Matériel
3.2.	Sites
3.	2.1. Site du parc de Gros-Cap4
3.	2.2. Secteur Étang-des-Caps
4.	Résultats7
4.1.	Profils de Gros-Cap7
4.2.	Profil du secteur Étang-des-Caps8
4.3.	Vitesse de propagation
4.4.	Profondeur de pénétration
4.	4.1. Gros-Cap
4.	4.2. Étang-des-Caps9
4.5.	Résolution9
4.6.	Influence du relief de la falaise
5.	Conclusion12

1. Introduction

La présence de karsts le long de la côte des Îles-de-la-Madeleine est une source de préoccupation pour le Ministère de la Sécurité Publique du Québec. Ces karsts, en s'érodant sous l'effet des marées, s'effondrent et entraînent un risque pour les résidants et les infrastructures de la côte.

Le géoradar est une méthode géophysique qui permet de cartographier les structures souterraines présentant un contraste de permittivité diélectrique. Ce contraste est très important entre la roche et l'air, ce qui permet de croire qu'il sera possible d'utiliser cette technique pour

- Cartographier les karsts le long de la côte;
- Déterminer la profondeur du toit des karsts et ainsi fournir une information relative au risque causé par les karsts.

Une limitation importante du géoradar est la profondeur de pénétration restreinte dans les sols et roches présentant une conductivité électrique élevée. Or, la conductivité des roches le long de la côte n'est pas connue. Par ce projet, on cherche à déterminer la profondeur de pénétration admissible dans le contexte géologique des côtes des Îles-de-la-Madeleine, en fonction des types d'antenne radar disponibles (la fréquence des antennes influence directement la profondeur de pénétration de l'onde : plus la fréquence est élevée, plus faible est la pénétration). Une seconde caractéristique du géoradar est la résolution admissible, c'est-à-dire la capacité à détecter des structures de petite taille. La résolution est également fonction de la fréquence des antennes; plus la fréquence est élevée, meilleure est la résolution. Il y a ainsi un compromis entre profondeur de pénétration et pouvoir de résolution. Il faut donc déterminer quelle fréquence offre le meilleur compromis. Par ailleurs, la géométrie particulière de la côte et le fait que les mesures seront effectuées à proximité de falaises peut entrainer une ambiguïté sur le positionnement des structures détectées. En effet, une forme dans le relief de la falaise pourrait avoir une signature similaire à celle d'un karst situé en dessous du profil radar, et pourrait entrainer une «fausse alarme» lors de l'interprétation. Cette ambiguïté peut être levée par des modélisations numériques.

Les objectifs spécifiques du projet sont donc

- 1. Déterminer la profondeur de pénétration admissible du géoradar sur des sites sélectionnés, représentatifs des formations géologiques le long de la côte;
- 2. Déterminer la résolution de la méthode, c'est-à-dire la taille minimale des karsts qui pourront être détectés;
- 3. Déterminer par des modélisations numériques si des formes dans le relief de la falaise peuvent avoir une signature similaire à celle de karsts.

2. Principe général du géoradar

Le géoradar est une méthode géophysique qui permet de cartographier les structures souterraines présentant un contraste de permittivité diélectrique (Davis et Annan, 1989). Dans un milieu poreux comme des sables, la variation de la teneur en eau est le facteur principal déterminant ce contraste. Ainsi, une variation de la porosité et/ou de la saturation en eau dans le milieu générera une réponse mesurable avec le géoradar si (1) le contraste est suffisamment élevé pour générer un signal plus énergétique que le bruit ambiant, et (2) si ce contraste se situe à une profondeur à l'intérieur des limites de détectabilité de la méthode.

Le principe d'opération est le suivant. Une impulsion électromagnétique de haute fréquence est émise par une antenne. Cette impulsion induit une onde électromagnétique EM qui se propage dans le sol. Lorsque cette onde parvient à une structure présentant un contraste de propriété diélectrique, une partie de l'énergie de l'onde est réfléchie ou réfractée. L'énergie réfléchie et réfractée est enregistrée à une antenne réceptrice. La mesure de cette onde permet de construire une image du sous-sol.



Figure 1 - Illustration du principe du géoradar.

L'onde EM est atténuée dans le sol, et sa profondeur de pénétration est finie. La fréquence de l'onde et la conductivité électrique du milieu dictent la profondeur de pénétration de l'onde. La fréquence influence également la résolution de la technique, c'est-à-dire la capacité à imager des objets ou structures de petites dimensions. Plus la fréquence est élevée, meilleure est la résolution, mais plus faible est la pénétration. Les équipements peuvent être utilisés avec des antennes de différentes fréquences, et il s'agit de déterminer quelle antenne offre le meilleur compromis entre pénétration et résolution.

3. Mise en œuvre

3.1. Matériel

Les mesures ont été effectuées avec un système RAMAC de Malå (<u>www.malags.se</u>). Des antennes de 50, 100 et 200 MHz ont été testées. Lors de l'acquisition, les antennes étaient montées sur des patins en bois spécialement conçus à cet effet (voir Figure 2). Le positionnement des mesures était assuré par un GPS NovAtel relié à la console du RAMAC. La précision du positionnement est de l'ordre de 2 à 4 mètres. Les patins sont tractés par un deuxième opérateur tandis que le système acquière les données en continu. La vitesse de progression est relativement lente, pour permettre un échantillonnage adéquat. Cette vitesse est de l'ordre de 50 minutes par km linéaire.



Figure 2 – Illustration du géoradar utilisé lors de la campagne de mesure. La photo de gauche montre l'équipement en entier : la console est dans le sac à dos, le GPS au dessus du sac, et un moniteur à l'avant permet de visualiser les données en temps réel. La photo de gauche montre également les antennes de 100 MHz, alors que la photo de droite montre les antennes de 50 MHz (de plus grande dimension), montées sur deux paires de patins.

3.2. Sites

Deux sites ont été sondés : le premier dans le parc de Gros-Cap et le second sur la rive ouest de l'île-du-Havre-Aubert, le long du chemin de Étang-des-Caps. Sur ces deux sites, la roche en présence est un grès rouge rencontré à plusieurs endroits le long de la côte (Formation gréseuse du Cap-aux-Meules). Les mesures ont eu lieu les 6 et 7 octobre 2009. Des pluies fortes ont empêchée l'acquisition des données une partie de la journée du 6 ainsi que toute la journée du 8 octobre, le système ayant une résistance limitée à l'eau.



Figure 3 – Localisation des sites sondés avec le géoradar : Gros-Cap (gauche) et Étang-des-Caps (droite).

3.2.1. Site du parc de Gros-Cap

Le premier secteur investigué est celui du site de l'auberge de jeunesse à Gros-Cap. Après discussions avec Frédéric Côté, de la direction du parc de Gros-Cap, un secteur à l'est du Cap a été choisi, où un énorme karst s'avance dans la falaise et où une cheminée surgit à proximité (Figure 4).



Figure 4 – Position approximative des karsts à proximité des profils radar (gauche) et photographie de la cheminée (droite).

Quatre profils ont été acquis sur ce site : deux profils à 100 MHz, un troisième à 50 MHz et un dernier à 200 MHz. L'emplacement des profils est indiqué à la Figure 5. De plus, deux séries de mesures en point miroir commun (CMP) ont également été effectuées, à 50 MHz et à 100 MHz.



Figure 5 – Emplacement des profils radar dans le secteur du parc de Gros-Cap.

3.2.2. Secteur Étang-des-Caps

Le deuxième secteur investigué est situé sur la rive ouest de l'Île-du-Havre-Aubert, le long du chemin Étang-des-Caps. Le profil est situé le long de la falaise, où plusieurs karsts sont visibles (Figure 6). Étant donnée les résultats obtenus à Gros-Cap, seules les antennes de 50 MHz ont été utilisées dans ce secteur. Un profil et une série de mesures en point miroir commun (CMP) ont été acquis avec ces antennes. Le long du profil, nous avons noté la présence de piquets installés pour mesurer la progression de l'érosion.



Figure 6 – Localisation du profil radar dans le secteur Étang-des-Caps (gauche), et exemple de karst visible de la côte (droite, photographie prise de la position indiquée par l'étoile verte sur l'image de gauche).

L'acquisition des données dans ce secteur est relativement lente en raison des hautes herbes dans lesquelles les antennes de 50 MHz, longues de deux mètres et qui sont perpendiculaires à la direction de progression, ont tendance à coincer.



Figure 7 – Utilisation des antennes 50 MHz dans les hautes herbes.

4. Résultats

4.1. Profils de Gros-Cap

Les profils suivants ont été utilisés pour déterminer la profondeur de pénétration et la résolution en fonction de la fréquence. Leur localisation est illustrée en page 5. Ils sont orientés nord-sud, l'extrémité gauche (position 0 sur l'axe des distances) correspond au point le plus au nord. Il est à noter que les profils ne démarrent pas tous exactement à la même position.

Un traitement minimal est appliqué à ces profils : correction statique, filtre passe-bande et gain de type *energy decay*. On observe un certain nombre de réflexions sur ces profils, mais leur origine ne correspond pas aux structures visibles de la surface (i.e. cheminée, karst indiqué par la flèche rouge sur la Figure 4), à l'exception d'un faible réflecteur situé entre 90 et 100 m sur le profil 100 MHz (Figure 9).



Figure 10 – Profil 200 MHz (DAT_0017).

4.2. Profil du secteur Étang-des-Caps

Le profil suivant a été utilisé pour déterminer la profondeur de pénétration dans le secteur Étangdes-Caps. Sa localisation est illustrée en page 6. Il est *grosso modo* orienté nord-sud, l'extrémité gauche (position 0 sur l'axe des distances) correspond au point le plus au sud.

Un traitement minimal est appliqué à ce profil : correction statique, filtre passe-bande et gain de type *energy decay*. Plusieurs fortes réflexions sont visibles sur le profil. L'amplitude des réflexions laisse supposer qu'elles sont causées par un fort contraste d'impédance EM, tel qu'à une interface air-roche.



Figure 11 – Profil 50 MHz (DAT_0025).

4.3. Vitesse de propagation

Afin de déterminer la profondeur de pénétration admissible, il faut d'abord évaluer la vitesse à laquelle se propage l'onde radar dans le sol. Les mesures en point miroir commun sont utilisées à cet effet. Sur les deux sites, la vitesse est estimée à 0.061 m/ns, ce qui est relativement lent. Une telle vitesse est indicatrice d'une teneur en eau élevée, de l'ordre de 39% en volume si l'on se base sur la formule de Topp¹. La porosité du grès est donc élevée.



Figure 12 – Résultats de l'analyse de vitesse pour les sites de Gros-Cap (gauche) et Étang-des-Caps (droite).

4.4. Profondeur de pénétration

Les résultats diffèrent considérablement entre le site de Gros-Cap et celui de l'Étang-des-Caps. Sur les deux sites, la roche est un grès rouge. La différence entre l'atténuation aux deux sites

¹ Topp, G. C.; Davis, J. L. & Annan, A. P., 1980. Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines, Water Resour. Res., 16, 574-582.

indique que, soit la composition minéralogique (contenu en argile) diffère sensiblement d'un site à l'autre, soit la teneur en ions dissous dans l'eau diffère d'un site à l'autre.

4.4.1. Gros-Cap

La profondeur d'investigation à Gros-Cap est faible. Elle varie de 5 m si on utilise des antennes de 50 MHz, à au mieux 3 m pour des antennes de 200 MHz. Avec les antennes 100 MHz, la profondeur de pénétration est d'au mieux 4 mètres.

La forte atténuation du signal radar pourrait être expliquée par un contenu en argile élevé dans le grès. Sur le terrain, nous avons également constaté que cette roche est très friable et de granulométrie relativement fine. Ces facteurs (argile et granulométrie fine) contribuent à augmenter la conductivité électrique de la roche, ce qui a pour conséquence d'accroître l'atténuation.

4.4.2. Étang-des-Caps

Compte tenu de la faible pénétration observée à Gros-Cap, seule les antennes de 50 MHz ont été utilisées à Étang-des-Caps. Par contre, la pénétration est dans ce cas plus de deux fois supérieure, et des réflecteurs sont visibles jusqu'à 12 m de profondeur. Les antennes 100 MHz devrait offrir une pénétration intéressante, de l'ordre de 10 m, mais n'ont pu être testées en raison de la mauvaise température.

4.5. Résolution

La résolution est fonction de la longueur d'onde λ de l'onde radar qui se propage dans le sol. Plus λ est courte, plus des objets rapprochés de petite dimension pourront être distingués l'un de l'autre dans les sections radar. La longueur d'onde est fonction de la vitesse de l'onde v et de sa fréquence f, tel que $\lambda = v/f$. En théorie, si deux interfaces produisant une réflexion sont séparées de plus de $\lambda/4$, alors ces réflexions ne seront pas superposées et il sera possible déterminer la présence de ces deux réflecteurs. Le Tableau 1 indique les valeurs obtenues.

Fréquence de l'antenne [MHz]	Fréquence effective ² [MHz]	λ [m]	λ/4 [m]
50	50	1.22	0.30
100	90	0.67	0.17
200	140	0.44	0.11

Tableau 1 – Longueur d'onde effective et résolution théorique pour les antennes de 50, 100 et 200 MHz.

En pratique, la limite de résolution se situe plutôt autour de $\lambda/2$, ceci en raison de la largeur de l'ondelette qui comporte plus d'une oscillation (voir Figure 13).

² En raison du couplage électromagnétique entre l'antenne et le sol, la fréquence effective du signal peut être inférieure à la fréquence nominale de l'antenne, celle-ci étant généralement calibrée dans l'air.



Figure 13 – Illustration de la résolution en fonction de la longueur d'onde.

L'examen des profils présentés plus haut montre que les antennes 50 MHz offrent une résolution nettement insuffisante pour l'imagerie des structures proches de la surface, i.e. à moins de 2 à 3 mètres. À 100 MHz, le niveau de détail est meilleur, et à 200 MHz la résolution permet un degré de distinction encore plus fin, au détriment de la pénétration. Cela est illustré par les profils de Gros-Cap, sur lesquels il difficile de localiser le tunnel identifié par la flèche rouge sur la Figure 4, et dont la profondeur du sommet est estimée à environ 1.5 mètre. Seul le profil 100 MHz (Figure 9, à la distance 30 m) permet de l'identifier relativement clairement.

4.6. Influence du relief de la falaise

Il est important de noter que les réflexions observées sur un profil radar ne sont pas nécessairement causées par un réflecteur situé à la verticale sous le profil. En effet, une structure ou un objet positionné de façon latérale à la direction du profil peut causer une réflexion apparaissant dans le profil. La Figure 14 illustre deux cas hypothétique où deux objets causeraient une réflexion apparaissant au même temps sur le profil radar. De fait, en se basant sur des mesures acquises le long d'un seul profil, tout réflecteur situé sur le demi-cercle ne peut être localisé sans ambiguïté. Pour lever l'ambiguïté, il faut effectuer un certain nombre de profils parallèles de façon à constituer un cube 3D (Figure 15).

La visite sur le terrain nous a permis de constater que les karsts peuvent prendre des formes plus complexes qu'anticipées : formes de coude, cheminées, falaises inclinées (Figure 6), etc. Dans le cas où la pénétration est suffisante et permet de mesurer la signature des karsts, il apparaît incontournable de pouvoir compter sur des levés 3D pour permettre de localiser sans ambiguïtés la position des structures. Ces levés sont constitués de profils parallèles rapprochés, séparés d'un mètre pour les levés 50 MHz et de 50 cm pour les levés 100 MHz, qui sont traités conjointement de façon à construire le cube radar. Les levés 3D entraînent des contraintes additionnelles par rapport aux levés 2D, qui se traduisent par des coûts plus élevés et des délais de traitement et d'interprétation plus longs. Le positionnement doit être précis, ce qui requiert l'utilisation d'un GPS différentiel ou d'un système de positionnement en temps réel par station totale. Le

traitement des données 3D est en outre plus lourd que pour les profils 2D seuls, et demande une expertise plus poussée.

Figure 14 – Réflecteur latéral et ambiguïté de localisation.

Figure 15 – Exemple de cube radar.

5. Conclusion

Les mesures acquises à Gros-Cap et Étang-des-Caps montrent un fort contraste de l'atténuation du signal radar, celle-ci étant élevée à Gros-Cap. La profondeur de pénétration varie *grosso modo* de 4 à 12 mètres. Une forte variabilité de l'atténuation d'un site à un autre compromet le succès de la méthode dans un cadre d'application général. Dans le cas où des sites à risque élevé (par exemple dans le cas de karsts à proximité d'infrastructures) et identifiés «à faible atténuation» sont ciblés, le radar offre un bon potentiel pour imager les karsts, sous les réserves suivantes :

- Considérant la géométrie des structures à imager (par exemple en coude ou en cheminée, tel que rencontré à Gros-Cap), des levés 3D s'imposent pour permettre une interprétation sans ambiguïté des données. Une couverture 3D est cependant beaucoup plus longue à obtenir; il faut compter environ une journée de travail sur le terrain pour couvrir une superficie de l'ordre de 50 m par 50 m. Il faut également compter plusieurs jours pour traiter les données et produire le cube radar, et les coûts pour réaliser ce type de levé sont facilement un ordre de grandeur plus élevés que pour la réalisation de profils 2D.
- L'imagerie des karsts peut être restreinte par le fait que pour pouvoir faire les mesures de façon sécuritaire, il faut garder une distance minimale entre le bord de la falaise et les points de mesure. Cependant, cette contrainte est limitée compte tenu du fait que le radar est pressenti pour pouvoir déterminer l'extension des karsts à l'intérieur de la falaise.

Sur les sites identifiés à faible atténuation, il serait vraisemblablement possible d'utiliser les antennes 100 MHz qui offrent une meilleure résolution que les antennes 50 MHz. Les antennes 100 MHz présentent en outre l'avantage d'être plus compactes (dipôle d'un mètre de long, contre deux mètres dans le cas des 50 MHz) et ainsi plus facilement manœuvrable dans les herbes hautes telles que rencontrées à Étang-des-Caps.

Secteur	Fréquence	Fichier	Type de levé
Gros-Cap	100 MHz	DAT_0014	Profil
Gros-Cap	100 MHz	DAT_0015	Profil
Gros-Cap	50 MHz	DAT_0016	Profil
Gros-Cap	200 MHz	DAT_0017	Profil
Gros-Cap	100 MHz	DAT_0018	CMP
Gros-Cap	50 MHz	DAT_0019	CMP
Étang-des-Caps	50 MHz	DAT_0024	Profil
Étang-des-Caps	50 MHz	DAT_0025	Profil
Étang-des-Caps	50 MHz	DAT_0026	CMP

A. Description des fichiers de données