

Développement d'approches hydro-géophysiques pour la prospection et la protection des aquifères - Étude de cas

Rapport final

Par :
Anne-Sophie Renou



Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue
Groupe de recherche sur l'eau souterraine
Campus d'Amos, 341, rue Principale Nord, 5^e étage, Amos (Québec) J9T 2L8

Rapport de recherche n° : PE01.ASR

Avril 2018

Pour nous joindre :

Groupe de recherche sur l'eau souterraine
Institut de recherche en mines et en environnement
Université du Québec en Abitibi Témiscamingue
Campus d'Amos, 341, rue Principale Nord, 5e étage
Amos (Québec) J9T 2L8
<http://gres.uqat.ca/>

Table des matières

1. INTRODUCTION	6
1.1. MISE EN CONTEXTE	6
1.2. APPLICATION DES APPROCHES GEOPHYSIQUES EN HYDROGEOLOGIE.....	6
1.3. OBJECTIFS DE L'ETUDE	8
2. SITES D'ETUDE.....	9
2.1. ÉCOLE DE ST-ATHANASE.....	9
2.2. SITE D'EXTRACTION DE SABLE ET GRAVIER.....	17
2.3. SITE MINIER ABANDONNE DARIUS O'BRIEN.....	23
3. APPROCHES METHODOLOGIQUES.....	30
3.1. MÉTHODE RADAR	30
3.1.1. Instruments disponibles.....	30
3.1.2. Traitement et interprétation des données.....	31
3.2. MÉTHODE ÉLECTRIQUE.....	34
4. RÉSULTATS ET DISCUSSION	35
4.1. SITE DE L'ÉCOLE DE SAINT-ATHANASE	35
4.1.1. Interprétation des profils de résistivité électrique.....	36
4.1.2. Interprétation des profils GPR	38
4.1.3. Interprétation de la grille GPR #1	47
4.1.4. Interprétation de la grille GPR #2	51
4.1.5. Interprétation de la grille GPR #3, #4 et #5	53
4.2. SITE MINIER DARIUS – O'BRIEN	60
4.3. SITE D'EXTRACTION DE SABLE ET GRAVIER.....	64
5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	68
6. REFERENCES	70

Table des figures

Figure 1 : Plan de localisation du secteur de l'école de Saint-Athanase	10
Figure 2 : Topographie du secteur de l'école de Saint-Athanase.....	11
Figure 3 : Dépôts de surface du secteur de l'école de Saint-Athanase	12
Figure 4: Géologie du roc du secteur de l'école de Saint-Athanase.....	13
Figure 5: Compilation des puits du secteur de l'école de Saint-Athanase	14
Figure 6: Estimation du niveau de l'eau du secteur de l'école de Saint-Athanase selon les données du SIH	15
Figure 7 : Puits de l'école, situé dans la portion NE du terrain	16
Figure 8 : Aire de jeux de l'école et affleurement de roc	16
Figure 9 : Aire d'accumulation de débris à la limite NE de la propriété.....	17
Figure 10 : Plan de localisation du secteur du site d'extraction de sable et gravier	18
Figure 11 : Topographie du secteur du site d'extraction de sable et gravier	19
Figure 12 : Dépôts de surface du secteur du site d'extraction de sable et gravier.....	20
Figure 13: Géologie du roc du secteur du site d'extraction de sable et gravier	21
Figure 14: Compilation des puits du secteur du site d'extraction de sable et gravier.....	22
Figure 15 : Plan de localisation du secteur du site d'extraction de sable et gravier	24
Figure 16 : Topographie du secteur du site d'extraction de sable et gravier	25
Figure 17 : Dépôts de surface du secteur du site d'extraction de sable et gravier.....	26
Figure 18: Géologie du roc du secteur du site d'extraction de sable et gravier	27
Figure 19: Compilation des puits du secteur du site d'extraction de sable et gravier.....	28
Figure 20: Vue de la portion sommitale de la digue investiguée.....	29
Figure 21: Vue du cours d'eau situé immédiatement au nord de l'aire d'accumulation de rejets miniers	29
Figure 22 : Assemblage des dispositifs radar	30
Figure 23 : illustration de données radar en plan (a-c) et en coupe (b-d) et de la corrélation identifiée par le module <i>SliceView</i>	33
Figure 24 : Résistivimètre SYSCAL pro SWITCH 72 d'IRIS Instruments.....	34
Figure 25 : Positions des données GPR sur le terrain de l'école de Saint-Athanase.....	35
Figure 26 : Profil de la façade nord-ouest (mode Wenner)	37
Figure 27 : Profil de la façade nord-ouest (mode Schlumberger)	37
Figure 28 : Profil de la façade nord-ouest (mode dipôle-dipôle)	37
Figure 29 : Profil de la façade nord-est (mode Wenner)	37
Figure 30 : Profil de la façade nord-est (mode Schlumberger)	37
Figure 31 : Profil de la façade nord-est (mode dipôle-dipôle)	38
Figure 32 : Positions des profils de GPR géoréférencés et des différents points de références.....	38
Figure 33 : Plan niveau des réflecteurs GPR - profondeur 10 cm	39
Figure 34: Plan niveau des réflecteurs GPR - profondeur 20 cm	40
Figure 35 : Plan niveau des réflecteurs GPR - profondeur 30 cm	40
Figure 36 : Plan niveau des réflecteurs GPR - profondeur 40 cm	41
Figure 37 : plan niveau, profondeur 50 cm	41
Figure 38 : Plan niveau des réflecteurs GPR - profondeur 60 cm	42
Figure 39 : Plan niveau des réflecteurs GPR - profondeur 70 cm	42
Figure 40: Plan niveau des réflecteurs GPR - profondeur 90 cm	43
Figure 41 : Plan niveau des réflecteurs GPR - profondeur 1,05 m	43
Figure 42 : Plan niveau des réflecteurs GPR - profondeur 1,25 m	44
Figure 43 : Plan niveau des réflecteurs GPR - profondeur 2 m	44
Figure 44 : Plan niveau des réflecteurs GPR - profondeur 2,90 m	45
Figure 45: Plan niveau des réflecteurs GPR - profondeur 3,15 m	45
Figure 46 (1 de 2): Plans niveaux de la grille 1	47
Figure 46 (2 de 2): Plans niveaux de la grille 1	48
Figure 47 : Profil montrant l'interface entre granulats et particules fines, ligne X44 de la grille 1	49
Figure 48 : Mesure de la vitesse ligne X6 de la grille sous le stationnement	50
Figure 49 (1 de 2): Plans niveaux de la grille 2	51

Figure 49 (2 de 2): Plans niveaux de la grille 2	52
Figure 50 (1 de 3): Plans niveaux de la grille 3	53
Figure 50 (2 de 3): Plans niveaux de la grille 3	54
Figure 50 (3 de 3): Plans niveaux de la grille 3	55
Figure 51 (1 de 3): Plans niveaux de la grille 4	56
Figure 51 (2 de 3): Plans niveaux de la grille 4	57
Figure 51 (3 de 3): Plans niveaux de la grille 4	58
Figure 52 : Plans niveaux de la grille 5	59
Figure 53 : localisation des données GPR au site Darius – O’Brien.....	60
Figure 54 : Profil #50 (la digue), 1ère section droite : de 0 à 120 m.....	61
Figure 55: Profil #50, 2 ^e section droite : de 120 à 260 m	61
Figure 56 : Profil #50, 3 ^e section droite : de 260 à 370 m	62
Figure 57 : Profil #50, 4 ^e section droite : de 370 à 550 m	62
Figure 58 : Profil #50, 5 ^e section droite : de 550 à 690 m	63
Figure 59 : Profil #50, 6 ^e section droite : de 690 à 740 m	63
Figure 60 : Situation des lignes de profils au GPR, site de la sablière	64
Figure 61 : Mesure de la vélocité, site de la sablière.....	64
Figure 62 : Coupe du long de la sablière, ligne 3	65
Figure 63: Coupe du long de la sablière, ligne 4	65
Figure 64 : Coupe du long de la sablière, ligne 5	66
Figure 65: Coupe en largeur de la sablière, ligne 6	67
Figure 66 : Coupe en largeur de la sablière, ligne 7.....	67
Figure 67: Cartographie des zones de remaniement de surface sur le plancher de la sablière	68

1. Introduction

1.1. Mise en contexte

Il est estimé que près de 50% de la population mondiale s’approvisionne en eau potable à partir des aquifères (WWAP, 2009). L’eau souterraine représente une ressource stratégique notamment parce qu’elle s’avère généralement moins vulnérable à la contamination bactériologique en comparaison aux eaux de surface. Au Québec, selon le Ministère du Développement durable, de l’Environnement, et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), c’est environ 20% de la population qui dépend de l’eau souterraine pour son approvisionnement. La vaste majorité de la population rurale de la province dépend d’un approvisionnement en eau souterraine. Or, le suivi de la qualité de l’eau issue des puits privés et la protection de leurs aires d’alimentation ne fait pas l’objet d’un encadrement strict dans le cadre législatif québécois et la responsabilité de s’assurer de la qualité de l’eau issue d’un puits privé incombe à son propriétaire. Il en résulte que de nombreuses installations de captage ne font pas l’objet d’un suivi exhaustif et représentent ainsi un risque pour la santé des utilisateurs. Dans un tel contexte, l’identification des sources de contamination constitue un enjeu prioritaire pour la protection de la santé publique. La localisation précise des sources de contamination anthropiques enfouies (p.ex. : installations septiques, déchets, sols contaminés) constitue un défi particulier car l’absence d’indices visuels en surface empêche parfois une évaluation des risques de contamination des aquifères. En ce sens, le développement d’approches permettant de détecter les sources de contamination anthropiques enfouies et les caractéristiques des aquifères au sein des zones à risque représente un enjeu majeur.

1.2. Application des approches géophysiques en hydrogéologie

L’évaluation des caractéristiques physiques et chimiques des aquifères constitue un élément central dans la perspective de documenter leur vulnérabilité face aux contaminants issus de sources ponctuelles enfouies. Or, une telle évaluation représente un défi, notamment en raison de l’accès complexe à la ressource en sous-surface. Les études hydrogéologiques reposent généralement sur le déploiement d’approches invasives telles que la réalisation de forages et l’installation de puits et piézomètres destinés au suivi de la ressource en eau souterraine. En plus de s’avérer onéreuses et de fournir des informations ponctuelles, de telles approches engendrent des impacts physiques en surface et peuvent être difficiles à déployer à proximité de structures anthropiques, spécialement dans les secteurs où la position exacte des infrastructures enfouies n’est pas documentée. Les approches géophysiques non-invasives représentent une piste de solution valable à cette problématique. En outre, les approches par méthode radar et électrique présentent un potentiel d’application en hydrogéologie.

L’approche radar (*ground penetrating radar*, ci-après GPR) fonctionne par l’émission, la propagation, la réflexion et la réception d’ondes électromagnétiques et permet de détecter les contrastes diélectriques dans les premiers mètres ($\approx 10\text{ m}$) sous la surface du sol. Annan (2005) fournit une description quantitative des principes physiques sous-jacents à l’approche GPR alors que Neal (2004) propose une revue de littérature exhaustive relative à l’application de la méthode. De nombreuses études relatives à l’évaluation de l’architecture des dépôts meubles et des discontinuités structurales y sont discutées. Il s’agirait, selon toute vraisemblance, de l’application la plus répandue du GPR en sciences de la Terre à l’heure actuelle. En date de ce jour, il ne semble pas exister de revue de littérature exhaustive en lien avec les applications de la méthode GPR en hydrogéologie. Les travaux récents de Paz et al., (2017) dressent néanmoins un portrait de l’utilisation du GPR pour l’étude des écosystèmes dépendants de l’eau souterraine. Les auteurs soulignent notamment que l’approche s’avère efficace afin d’évaluer la position

de la nappe d'eau souterraine, surtout pour les sols à texture grossière où la frange capillaire est de faible envergure. Les travaux de [Doolittle et al., \(2006\)](#) ont d'ailleurs permis de révéler l'utilité de l'approche GPR dans la perspective de préciser l'évaluation de la position de la nappe d'eau souterraine (et par le fait même de la configuration des écoulements) dans un aquifère granulaire à nappe libre instrumenté de puits d'observation. Dans les sols à texture fine, les études révèlent que le sommet de la frange capillaire peut être détecté par le GPR, alors que la position de la nappe ne peut y être évaluée précisément ([Paz et al., 2017](#)). D'un point de vue théorique, la constante diélectrique d'un sol dépend en partie de la teneur et des caractéristiques du fluide qu'il contient (p. ex. : voir [Annan, 2003](#)). Il en résulte que le GPR peut, sous certaines conditions, être utilisé afin d'évaluer (1) les teneurs en eau au sein de la zone non-saturée et (2) la géométrie d'un panache de contamination. À titre d'exemple, les travaux de [Huisman et al., \(2003\)](#) dressent un portrait des principales techniques utilisées afin d'évaluer la teneur en eau des sols à partir de données GPR. Ces techniques se basent essentiellement sur l'analyse des changements de vitesse de propagation de l'onde électromagnétique (en réponse aux contrastes de constante diélectrique) résultant des variations de teneurs en eau dans la zone non saturée. Les travaux de [Garambois et al., \(2002\)](#), lesquels s'appuient sur l'utilisation d'analyses de type CMP (*common mid-point*), ont notamment permis de produire un profil des teneurs en eau de la zone non saturée d'une unité sableuse à partir d'équations empiriques et différentielles. Les travaux de [Kowalsky et al., \(2004\)](#) ont de surcroît révélé l'utilité des données GPR, lorsqu'utilisées en parallèles avec d'autres approches, dans la perspective de contraindre les valeurs de perméabilité en zone non saturée. [Benson \(1995\)](#) et [Daniels et al., \(1995\)](#) ont quant à eux mis en évidence l'applicabilité de l'approche GPR pour la délimitation de panaches de contamination aux hydrocarbures. L'effet de la teneur en hydrocarbures au sein d'un mélange sol-air-eau-hydrocarbure aurait vraisemblablement un impact significatif sur les propriétés électriques ([Benson, 1995](#)) et diélectriques ([Daniels et al., 1995](#)) des formations géologiques, engendrant ainsi des éléments distinctifs sur les profils GPR. De façon similaire, des études ont permis de mettre en lumière l'utilité de la méthode radar pour la délimitation d'intrusions salines au sein d'aquifères côtiers (p. ex. : voir [Hagrey et al., 2000](#)). Finalement, l'efficacité du GPR pour la localisation d'infrastructures enfouies est largement documentée, en raison des contrastes diélectriques engendrés par les matériaux anthropiques (p. ex. : voir [Annan, 2005](#)).

L'approche électrique repose sur l'injection de courant dans le sol et sur la mesure de la différence de potentiel engendrée en différents points de l'espace. Elle permet d'évaluer la résistivité électrique des unités géologiques jusqu'à des profondeurs de quelques dizaines de mètres. [Sameoulian et al., \(2005\)](#) proposent un portrait exhaustif des applications de la méthode électrique pour la caractérisation des sols et l'évaluation de la stratigraphie. En plus de décrire les principes physiques fondamentaux sous-jacents à l'application de la méthode électrique, les auteurs traitent des effets induits par la teneur et la conductivité électrique de l'eau porale sur la résistivité des formations géologiques. Les premiers développements théoriques et empiriques associés aux liens entre la teneur et la conductivité d'un fluide poral et la résistivité d'une formation géologique remontent aux travaux d'[Archie \(1942\)](#) et de [Winsauer et al., \(1952\)](#). De façon générale, il est maintenant reconnu que la résistivité d'un sol décroît avec une augmentation (1) de la teneur en eau au sein des pores et (2) de la charge en ions dissous au sein de l'eau porale. Il en résulte que l'approche électrique permet non seulement de distinguer les contrastes entre les unités géologiques présentes en sous-surface (i.e. d'évaluer l'architecture des formations géologiques), mais également d'en déduire des informations relatives à la teneur en eau et à sa charge dissoute. À titre d'exemple, les travaux de [Garambois et al., \(2002\)](#) ont permis d'évaluer la teneur en eau au sein de la zone non saturée d'une unité sableuse sur la base de mesures de résistivité électrique. Les résultats issus de cette étude ont notamment permis d'illustrer la cohérence entre les mesures réalisées par les méthodes GPR et électrique. Les travaux de [Naudet et al., \(2004\)](#) ont quant à eux mis en lumière le potentiel d'application de la méthode électrique pour l'évaluation des charges dissoutes au sein de l'eau souterraine. [Slater \(2007\)](#) suggère de surcroît que les approches géophysiques électriques peuvent être

utilisées afin d'estimer la perméabilité des formations géologiques, à travers le lien indirect qui existe entre la granulométrie, la porosité, et les propriétés électriques d'une formation saturée. À cet effet, [Kazakis et al., \(2016\)](#) ont notamment développé une approche couplant des essais de pompage et des profils verticaux de résistivité électrique et permettant d'estimer la distribution spatiale des conductivités hydrauliques au sein d'un aquifère sédimentaire, démontrant ainsi l'applicabilité de la méthode électrique en hydrogéologie.

Malgré les développements précités et les avantages reconnus des méthodes géophysiques, ces dernières demeurent généralement sous-exploitées dans le domaine de l'hydrogéologie appliquée. À l'heure actuelle, peu de firmes spécialisées offrent des services en géophysique à l'échelle du Québec. Les défis associés à l'établissement du protocole d'acquisition (p. ex. : choix des fréquences, courants d'injection, temps d'acquisition, configurations des antennes et électrodes, etc.) et de traitement (p. ex. : inversions, rehaussements, repositionnements, etc.) des données pourraient expliquer en partie cette lacune. En ce sens, toute démarche contribuant à l'établissement de protocoles efficaces et accessibles pour l'acquisition et le traitement de données géophysiques pourraient promouvoir leur utilisation en hydrogéologie.

1.3. Objectifs de l'étude

S'insérant dans le contexte préétabli, la présente étude a pour objectif général de **contribuer au développement protocoles efficaces pour la localisation de structures enfouies et l'évaluation de l'architecture des formations géologiques par approche géophysique**. Les approches retenues sont le radar (GPR) et la résistivité électrique (RE). L'emphase est mise davantage sur le GPR car cette méthode permet un déploiement plus rapide que la RE, une caractéristique qui peut s'avérer avantageuse pour une application systématique par les firmes de consultants en hydrogéologie. Les démarches réalisées se concentrent sur la détection, la délimitation et la caractérisation d'infrastructures anthropiques susceptibles d'engendrer un risque envers les aquifères. Les objectifs spécifiques sont de développer le potentiel d'application des approches géophysiques pour :

- 1- Localiser des installations septiques enfouies ;
- 2- Délimiter l'étendue des sols perturbés et/ou de déchets enfouis sous des zones d'excavation ;
- 3- Évaluer l'intégrité de digues.

Trois sites distincts sont retenus pour la réalisation des objectifs spécifiques. Une emphase particulière sera portée sur l'objectif spécifique 1, pour lequel des investigations plus poussées ont été réalisées. Du point de vue appliqué, les démarches associées à la réalisation de ces objectifs contribueront à améliorer les protocoles relatifs à l'acquisition et au traitement de données géophysiques dans le cadre d'études hydrogéologiques visant à évaluer les risques d'origine anthropique envers la ressource en eau souterraine. Ces protocoles seront développés dans la perspective de permettre leur application par des consultants privés. Du point de vue scientifique, les travaux contribueront à améliorer les connaissances relatives à la caractérisation des aquifères par approches géophysiques.

2. Sites d'étude

2.1. École de St-Athanase

Le village de St-Athanase (Figure 1) est situé dans les hauts sommets du Témiscouata, au Bas-Saint-Laurent, et compte quelques 309 habitants (MAMROT, S.D.). La topographie du secteur (Figure 2) montre une alternance de crêtes et de dépressions, pour des élévations allant de 280 m à 580 m. La carte des dépôts de surface du secteur d'étude (Figure 3) révèle une alternance de zones d'affleurements rocheux et de zones d'accumulation de till. Le site de l'école de Saint-Athanase se situe à la limite SO d'une zone d'affleurement. La présence de till n'y est pas exclue, alors que des remblais anthropiques sont aussi susceptibles d'y être observés. Le socle rocheux du secteur à l'étude (Figure 4) est caractérisé par une alternance de bandes de roches (méta)sédimentaires d'orientation SO-NO. Des failles régionales, de même orientation, sont observées dans la portion NO du territoire. Le terrain de l'école de Saint-Athanase se situe au sein d'une bande de grès, siltstone, ardoise et calcaire. Différentes sources de données permettent de caractériser l'eau de l'aquifère de la zone d'étude (Figure 5). En périphérie du terrain de l'école, les données du système d'information hydrogéologique (SIH) et les analyses d'eau de forage au roc constituent les informations les plus utiles. Les données du SIH suggèrent que le niveau de l'eau se trouve à environ 15 m sous la surface du sol de part et d'autre de l'école de Saint-Athanase (Figure 6).

L'école du village s'approvisionne en eau grâce à un puits d'environ 80 m de profondeur installé dans le roc et possède selon toute vraisemblance un système d'évacuation des eaux usées composé d'une fosse septique et d'un champ d'épuration. Le puits (Figure 7) est situé dans la portion NE du terrain de l'école, à proximité immédiate des aires de jeux (Figure 8). La présence d'un affleurement rocheux à quelques mètres du puits (Figure 9) supporte l'interprétation voulant que la couverture de till et de remblai est de faible épaisseur au niveau du terrain de l'école. Depuis maintenant plus de 5 ans, l'école est dans l'impossibilité d'assurer un approvisionnement en eau potable à ses élèves et à son personnel en raison de problématiques liées à la quantité et à la qualité de la ressource. Des consultants ont abordé cette problématique et certaines recommandations ont été soumises, notamment en lien avec des changements relatifs à la filtration de l'eau brute et à la réfection du système d'évacuation des eaux usées (Pelletier, M., *Écol'eau, Service technique et traitement des eaux, communication personnelle*). L'eau demeure néanmoins chargée en particules alors que des bactéries pathogènes y sont mesurées en quantités variables au fil du temps. Les informations actuellement disponibles ne permettent pas de dresser un portrait robuste du niveau de contamination de l'aquifère, notamment parce que le puits de l'école fait l'objet de procédures de nettoyage régulières. En ce qui a trait aux eaux usées, selon les informations fournies par l'administration de l'école, il semblerait que la fosse septique n'ait pas été vidangée depuis au moins 5 ans, l'accès à cette dernière est enfoui et difficile à localiser. Il y a 3 ans environ, le stationnement de l'école s'est effondré de quelques 20 cm au-dessus de la position probable de la fosse septique et la dépression a subséquemment été comblée par du remblai et de l'asphalte. Outre les installations septiques proximales, l'inspection du site a permis l'identification de débris partiellement enfouis à la limite NE du terrain de l'école (Figure 9). La présence de végétation en surface empêche une évaluation précise de l'étendue de cette zone d'accumulation de débris. Le répertoire des terrains contaminés du MDDELCC indique qu'un seul site est recensé à Saint-Athanase, pour un cas de contamination aux hydrocarbures pétroliers. Ce terrain se situe toutefois à l'extérieur du périmètre urbain du village et ne représente pas de risque pour l'école. Finalement, il est à noter qu'un terrain situé à environ 70 m au sud-ouest de l'école a hébergé un garage commercial par le passé.

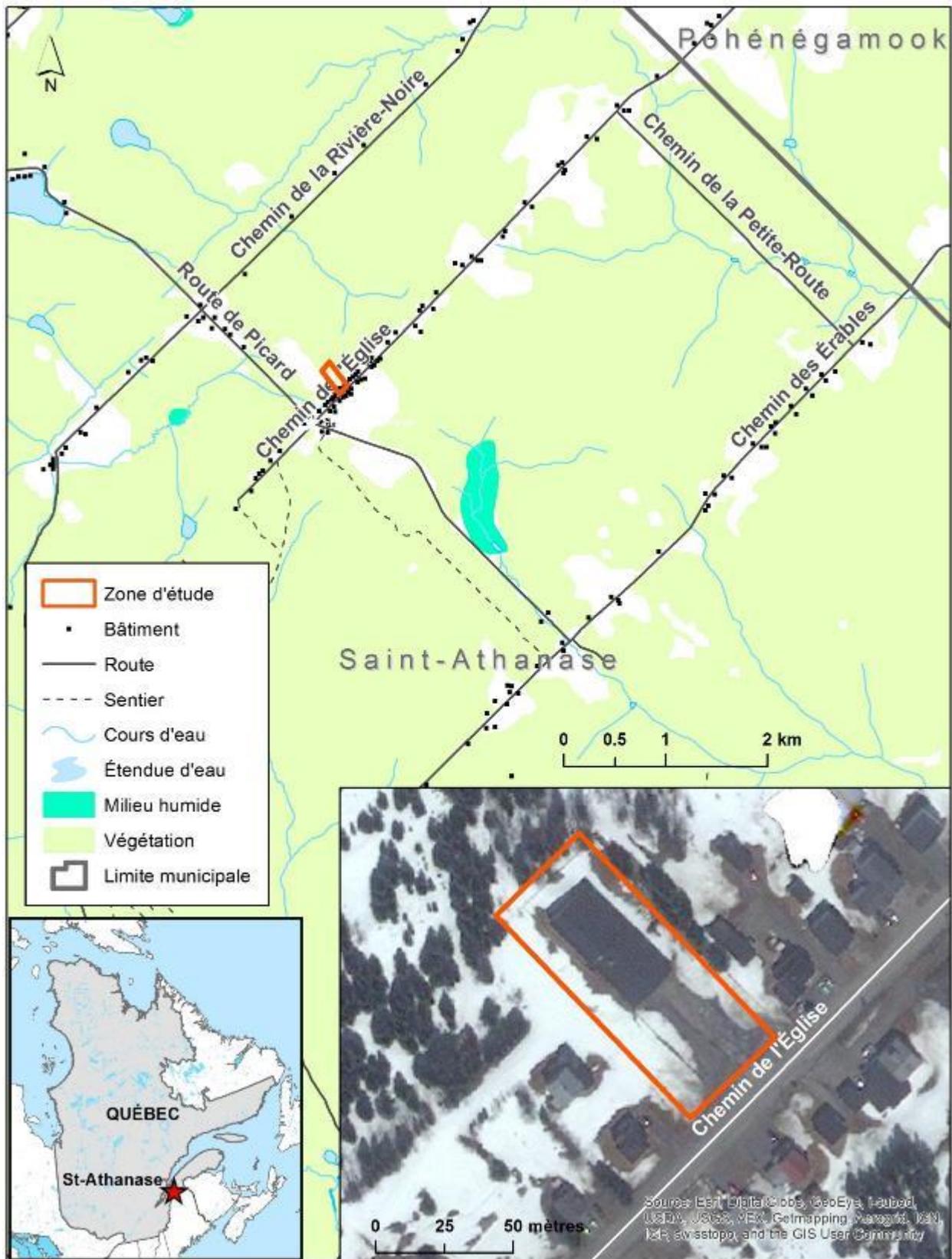


Figure 1 : Plan de localisation du secteur de l'école de Saint-Athanasie

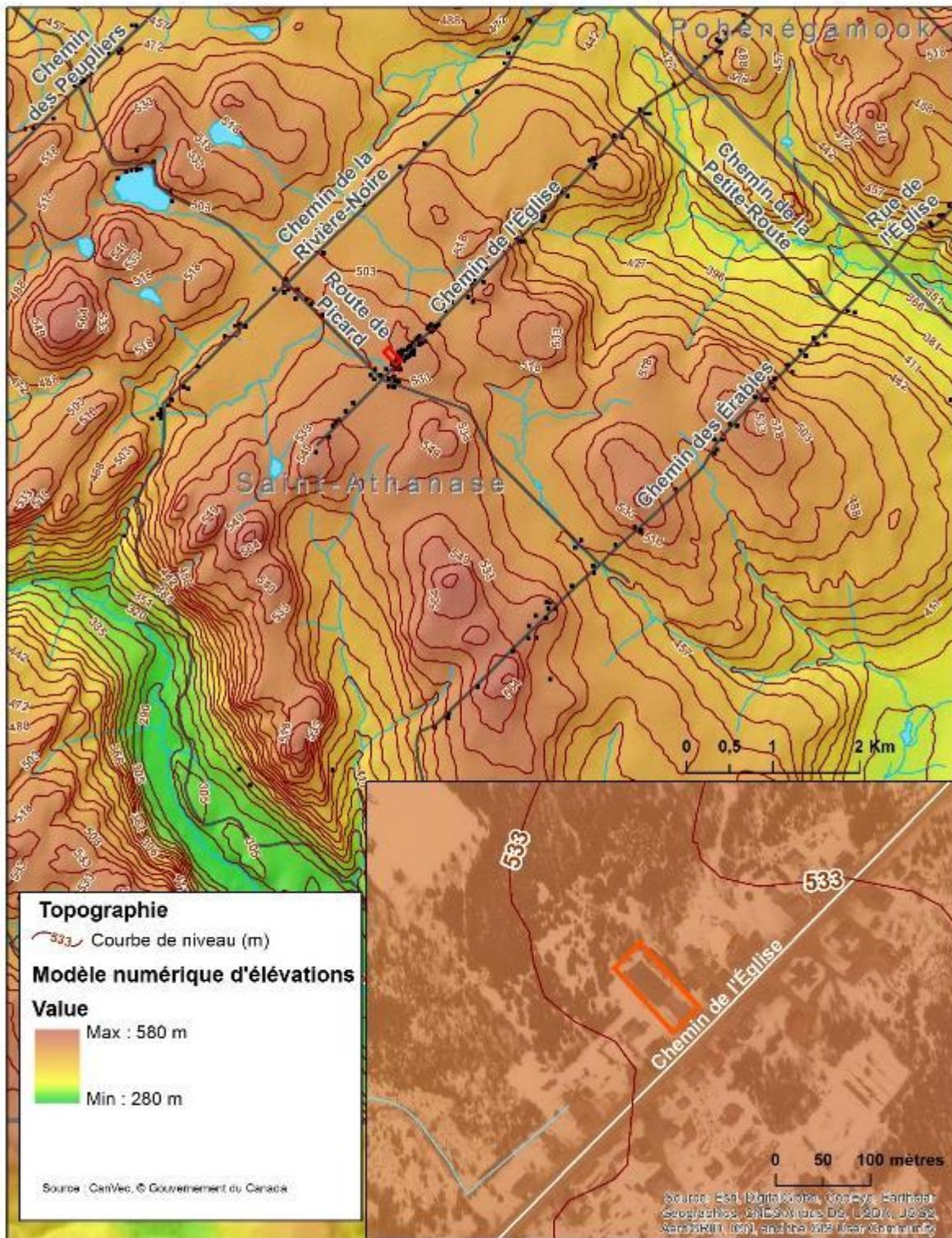


Figure 2 : Topographie du secteur de l'école de Saint-Athanasie

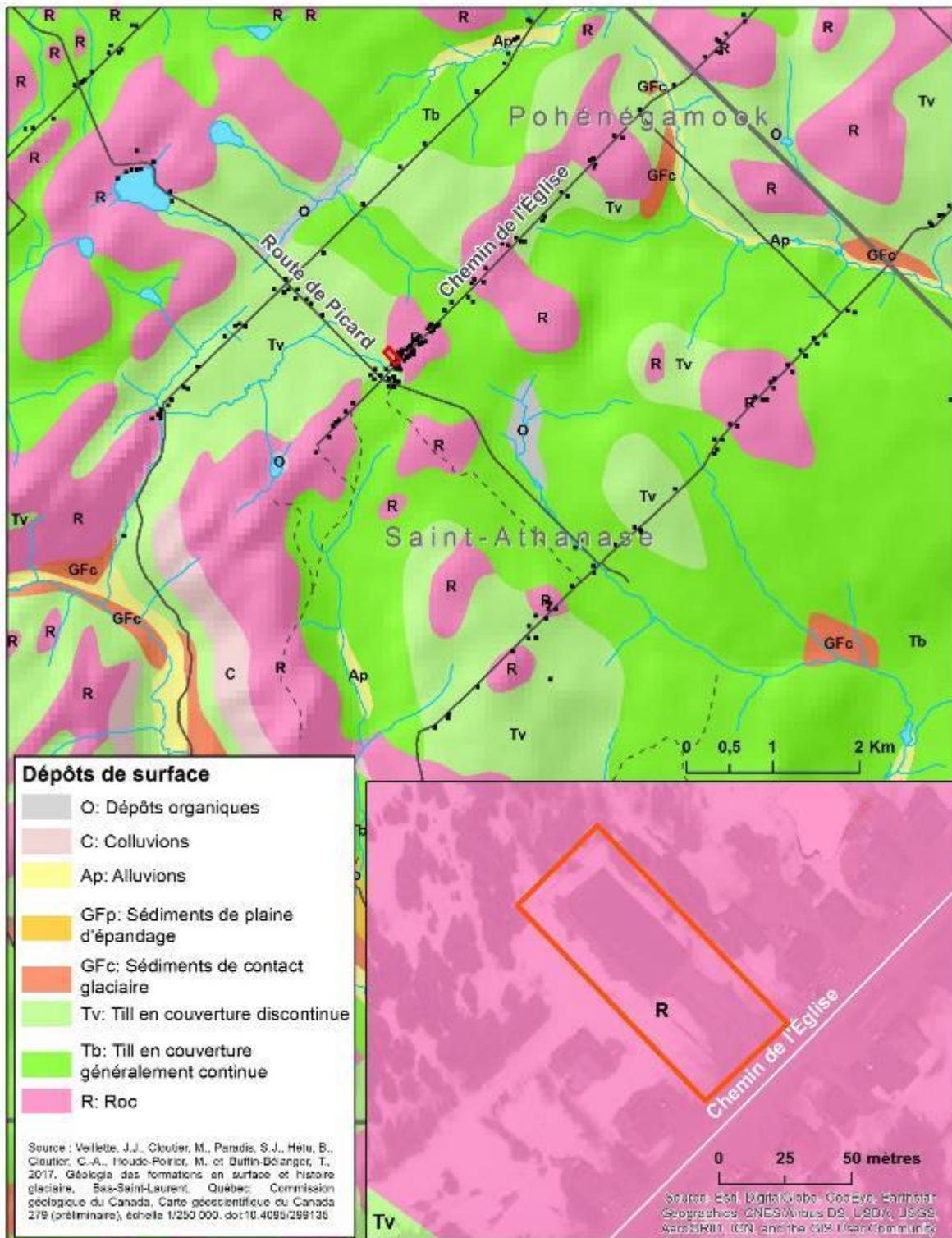


Figure 3 : Dépôts de surface du secteur de l'école de Saint-Athanase

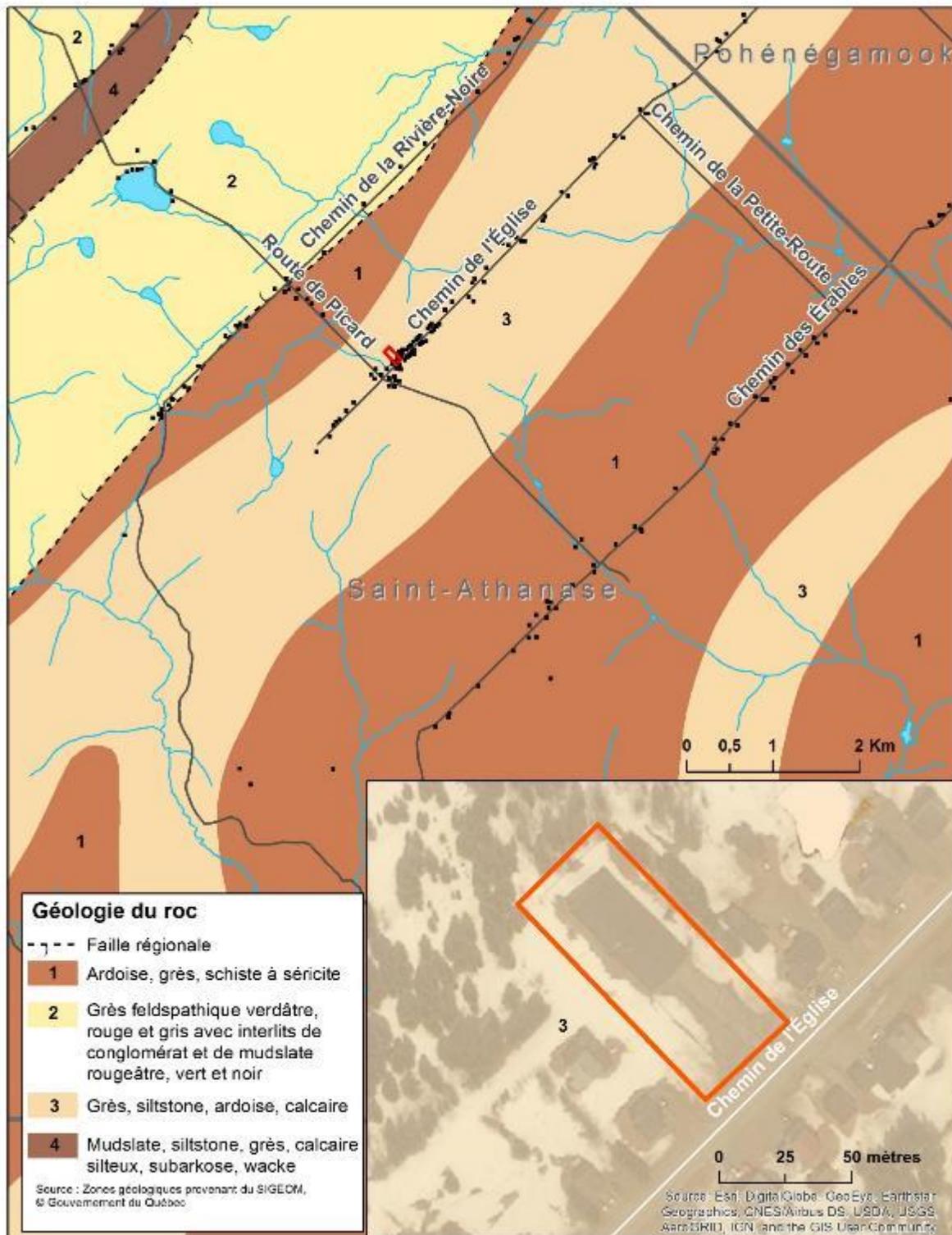


Figure 4: Géologie du roc du secteur de l'école de Saint-Athanase

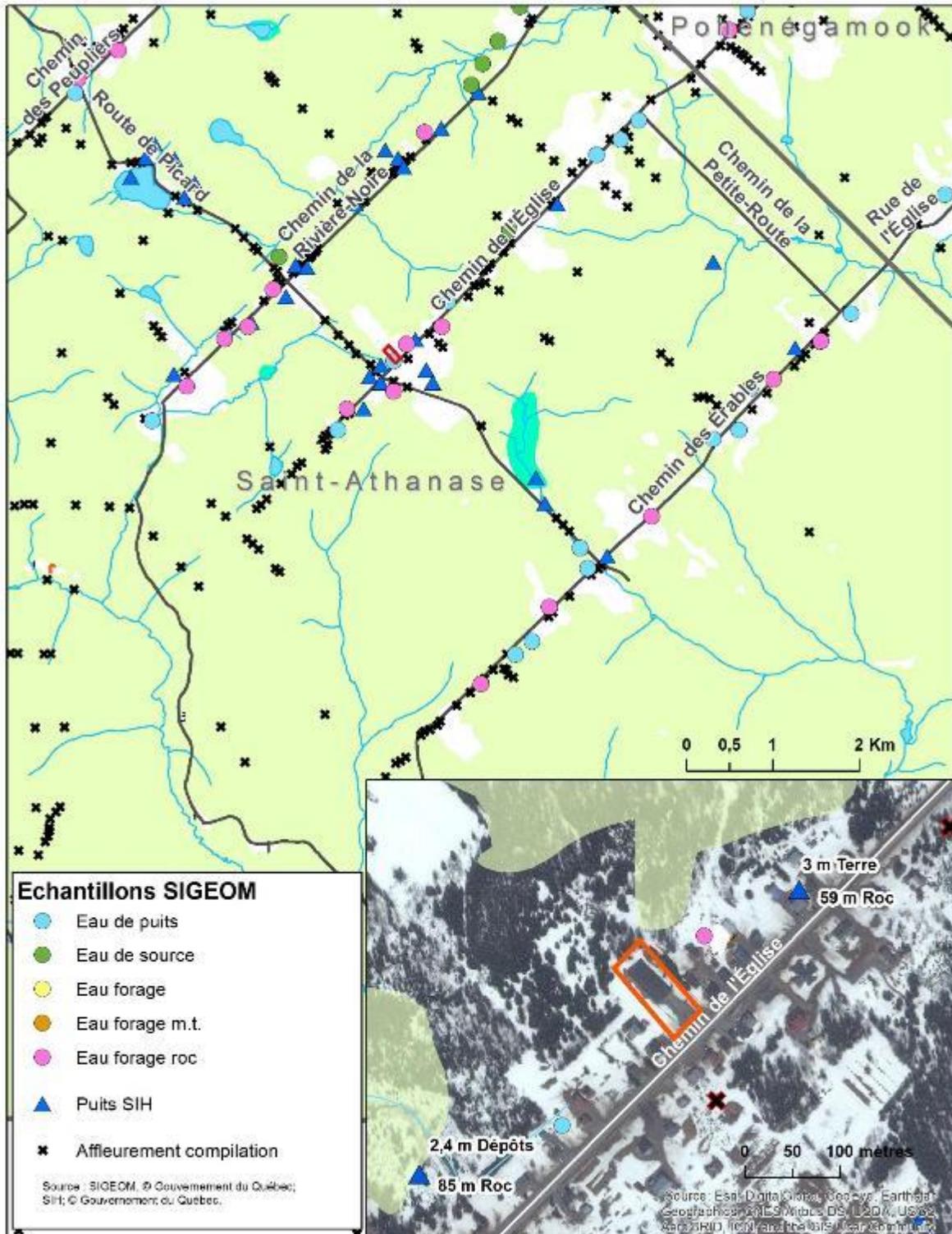


Figure 5: Compilation des puits du secteur de l'école de Saint-Athanase

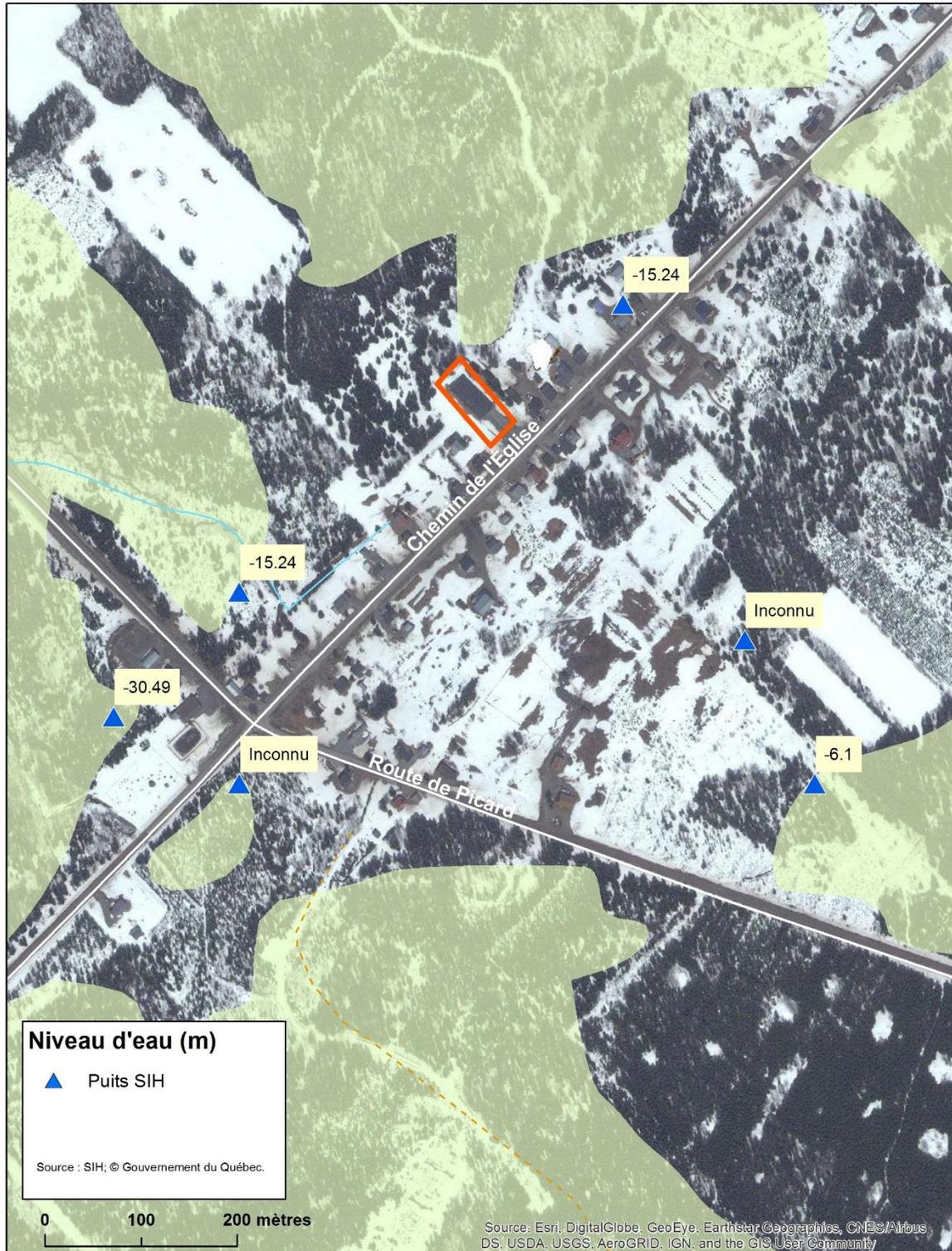


Figure 6: Estimation du niveau de l'eau du secteur de l'école de Saint-Athanasie selon les données du SIH



Figure 7 : Puits de l'école, situé dans la portion NE du terrain



Figure 8 : Aire de jeux de l'école et affleurement de roc



Figure 9 : Aire d'accumulation de débris à la limite NE de la propriété

2.2. Site d'extraction de sable et gravier

Le site d'extraction de sable et gravier retenu dans le cadre de la présente étude (Figure 10) est situé du côté est de la rue St-Joseph sud, à environ 2 km au nord-est du lac Beau, dans la municipalité de Rivière-Bleue. La topographie du secteur (Figure 11) montre une alternance de buttes et dépressions, pour des élévations allant de 183 m à 533 m. De façon générale, l'élévation du sol décroît de l'est vers l'ouest, pour atteindre la valeur de 183 m le long des berges du lac Beau. La carte des dépôts de surface du secteur d'étude (Figure 12) révèle principalement une alternance de zones d'affleurements rocheux et de zones d'accumulation de till. Des sédiments de contact glaciaire, de plaine d'épandage ainsi que des alluvions sont observés dans la portion nord-ouest de la zone d'étude. Selon les données cartographiques disponibles, le site d'extraction de sable et gravier se trouverait au sein de sédiments de contact glaciaire. Les données géologiques libres de droit (et gratuites) disponibles ne permettent pas une description détaillée de la nature du substrat rocheux dans le secteur du site d'extraction de sable et gravier. Néanmoins, les données disponibles permettent de conclure que le socle rocheux du secteur à l'étude (Figure 13) est dominé par les shales, grès, calcaires et ardoises de la Formation de Témiscouata (Groupes de St-Francis et de Fortin). En périphérie du site d'extraction de sable et gravier, les données du système d'information hydrogéologique (SIH) sont très limitées, alors que les données du SIGEOM permettent d'identifier une source (exfiltration ponctuelle d'eau souterraine) à environ 250 m au nord-est du site d'extraction. L'élévation de cette source, jugée représentative de la position de la nappe d'eau souterraine, est d'environ 180 m. Plus au sud-est, le niveau du lac Beau (183 m) est aussi jugé représentatif du niveau de la nappe.

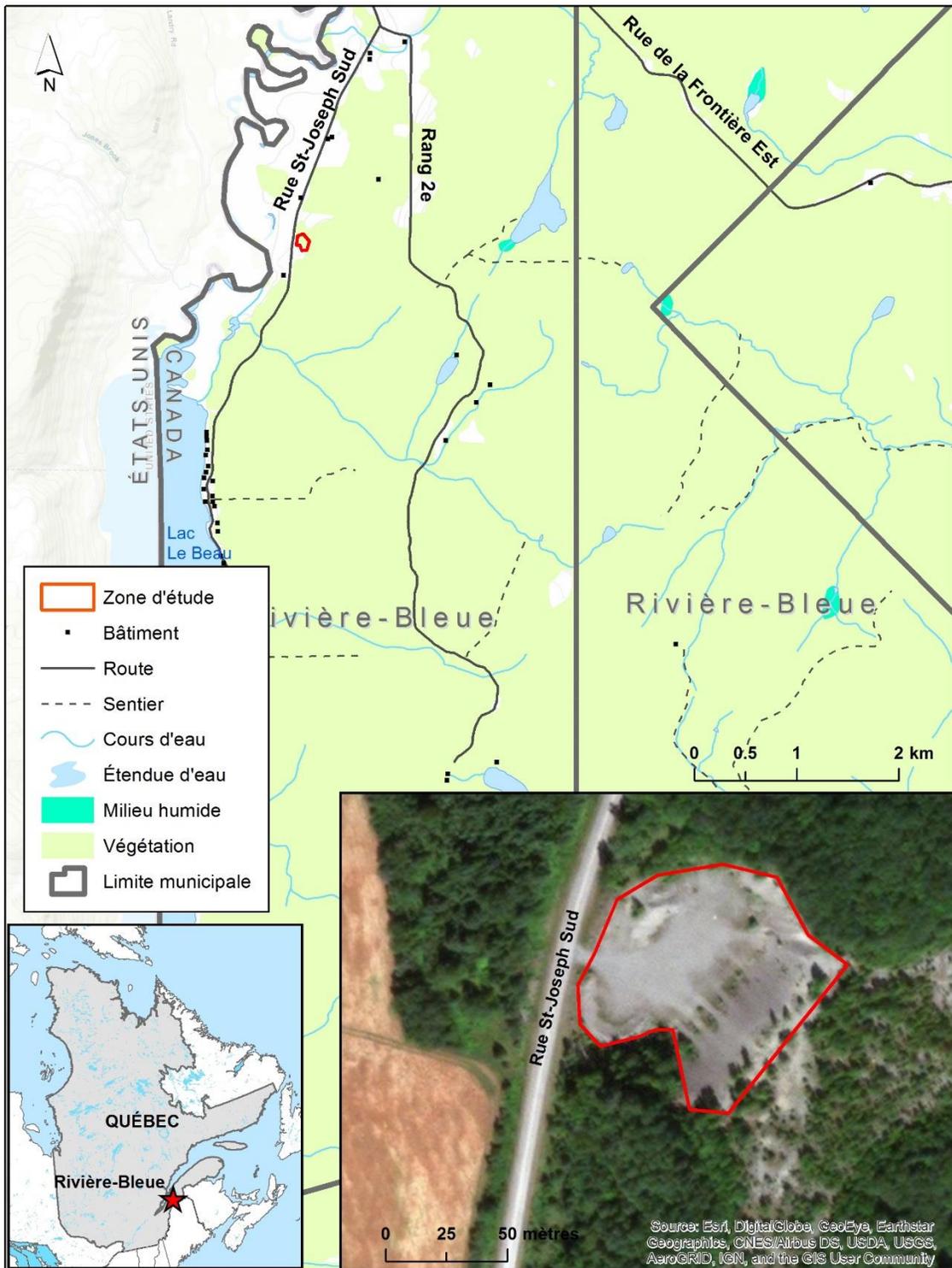


Figure 10 : Plan de localisation du secteur du site d'extraction de sable et gravier

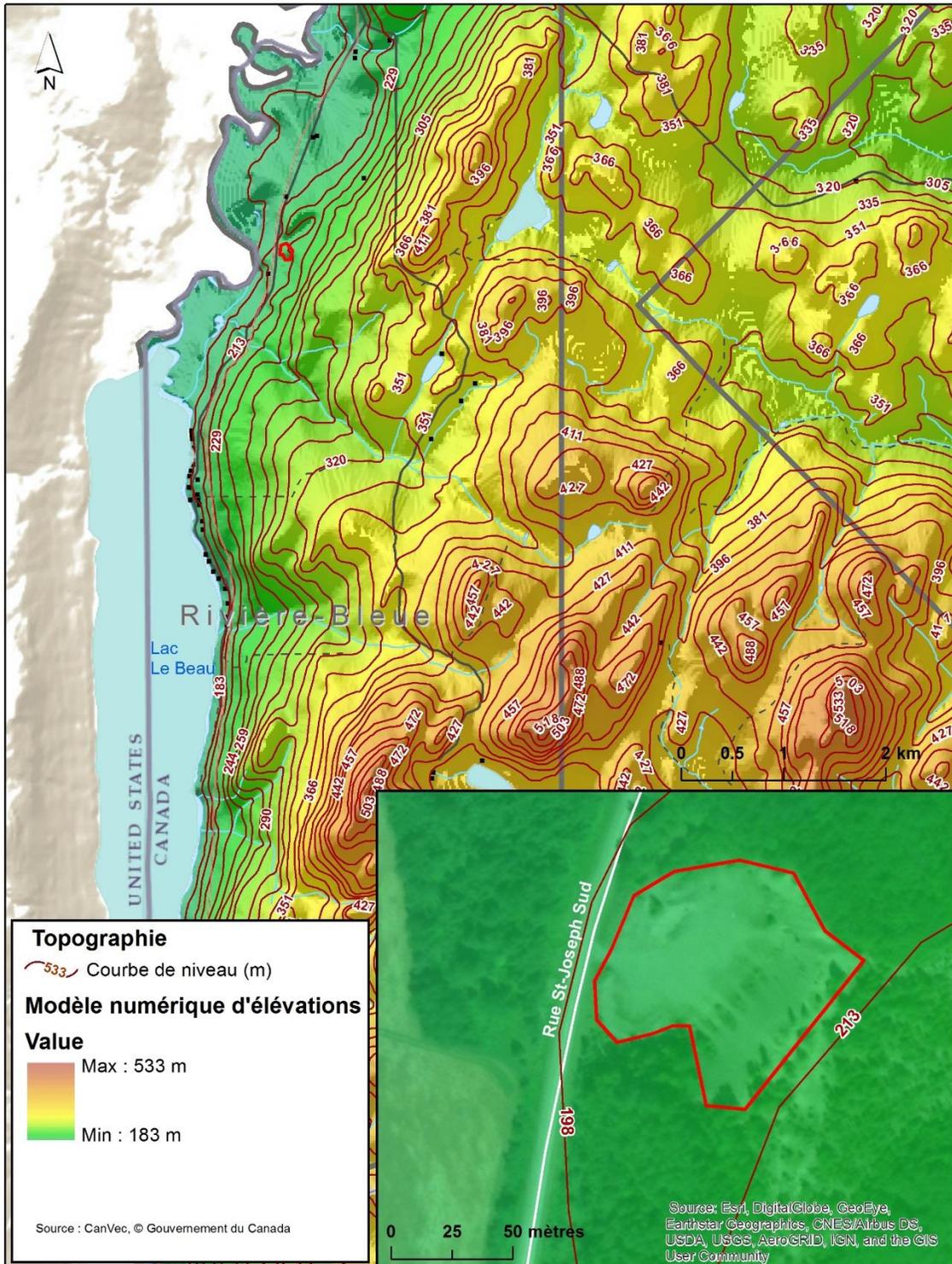


Figure 11 : Topographie du secteur du site d'extraction de sable et gravier

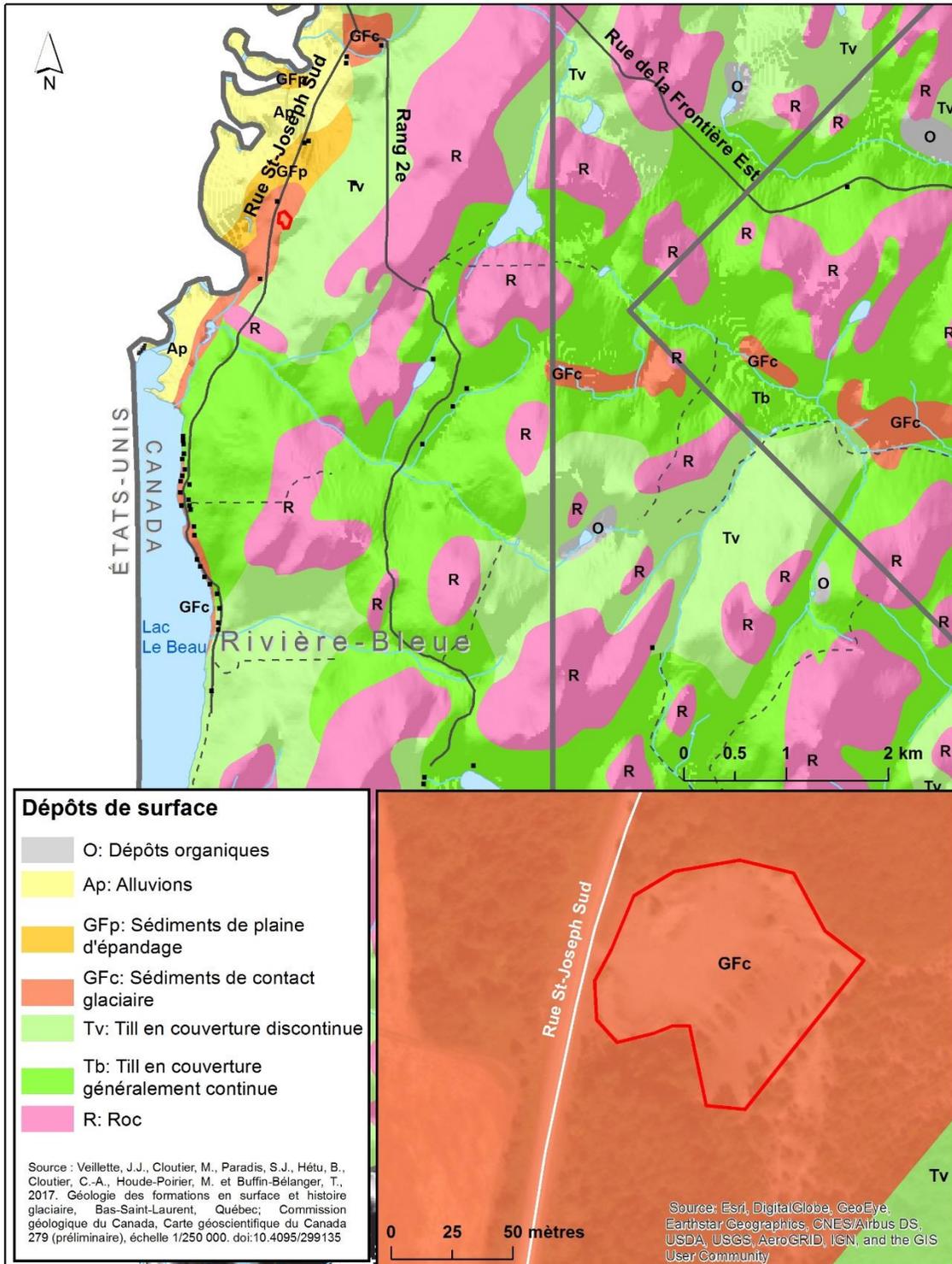


Figure 12 : Dépôts de surface du secteur du site d'extraction de sable et gravier

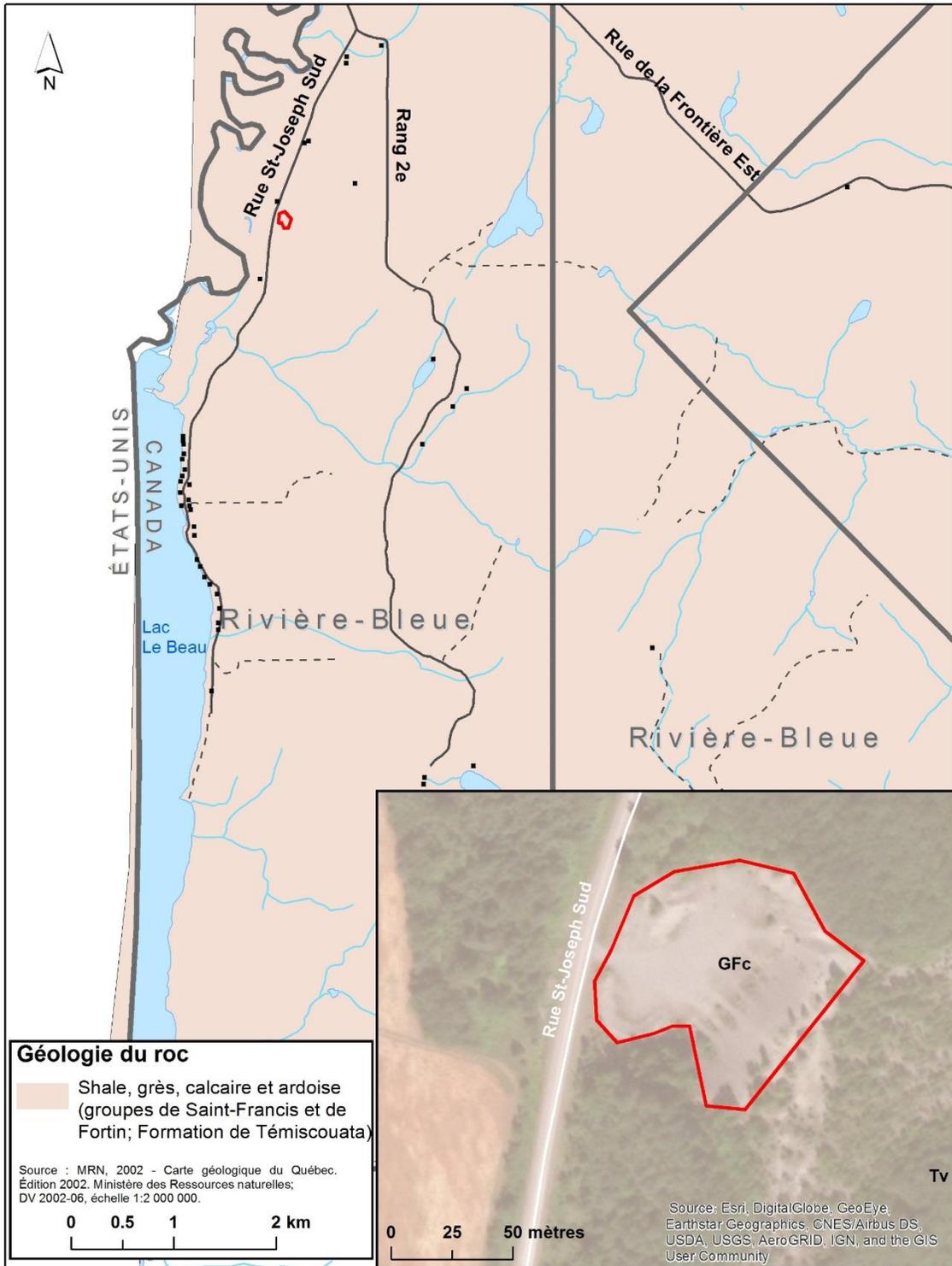


Figure 13: Géologie du roc du secteur du site d'extraction de sable et gravier

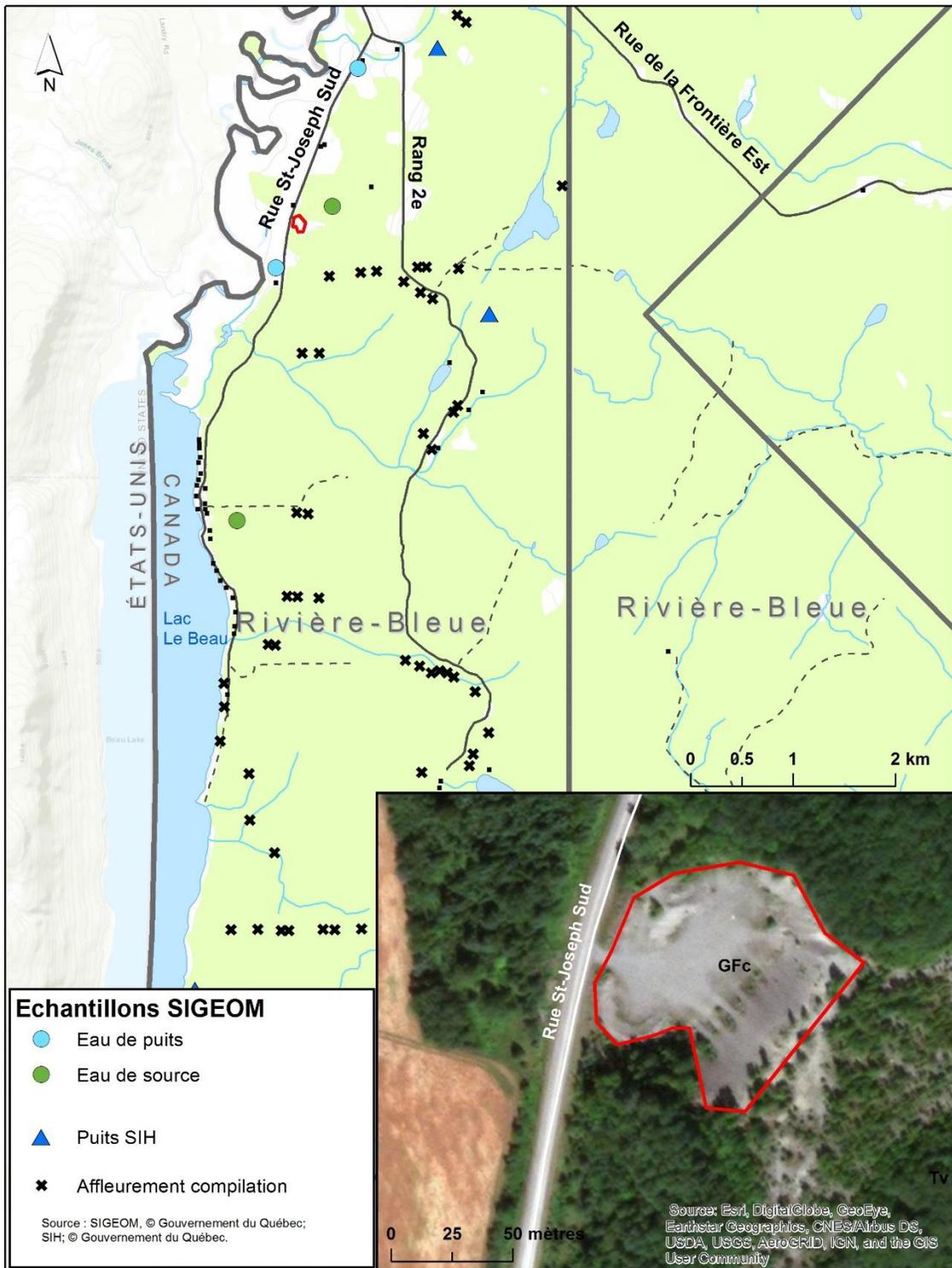


Figure 14: Compilation des puits du secteur du site d'extraction de sable et gravier

2.3. Site minier abandonné Darius O'Brien

Le site minier retenu dans le cadre de la présente étude est celui de Darius O'Brien, lequel est situé à environ 200 m au nord-ouest du périmètre urbain de la municipalité de Cadillac (Figure 15). Selon les informations fournies par l'entreprise responsable du site depuis la fin des années 1990 (*Radisson Ressources Minières, S.D.*), il s'agit d'une mine d'or découverte en 1924 où la phase de production s'est étendue de 1933 et 1956. À cette époque la mine portait le nom O'Brien. Dans les années 1970, le site change de propriétaire et est à nouveau exploité, mais cette fois sous le nom Darius. Selon le Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles (MERN, 2016), l'élaboration du scénario de restauration débutera au cours des prochaines années pour le site Darius O'Brien. En date de ce jour, deux principales aires d'accumulations de rejets miniers sont observées au site Darius O'Brien (zone sud-ouest et zone nord-est), tel qu'illustré dans l'encart au bas de la Figure 15. Le profil radar acquis dans le cadre de la présente étude cible spécifiquement les digues ceinturant l'aire d'accumulation nord-est. La topographie du secteur (Figure 16) montre un relief peu accidenté, pour des élévations allant de 295 m à 370 m. Le site Darius O'Brien se trouve à une élévation d'environ 315 m. La carte des dépôts de surface du secteur d'étude (Figure 17) révèle plusieurs affleurements rocheux ceinturés d'accumulations de till dans les secteurs de plus haute élévation, alors que les dépôts glaciolacustres d'eau profonde (silt et argile) prédominent dans les zones de plus basse altitude. Le site Darius O'Brien est vraisemblablement sis sur ces sédiments fins. La cartographie du socle rocheux du secteur à l'étude (Figure 18) révèle que le site Darius O'Brien se trouve directement au nord de la Faille de Cadillac, au sein de roches sédimentaires de la Sous-Province Géologique de l'Abitibi. En périphérie du site visé, les données du système d'information hydrogéologique (SIH) sont très limitées, alors que les données de forage du SIGEOM sont nombreuses (Figure 19). Les Figures 20 et 21 illustrent les conditions rencontrées au site le jour de la réalisation des profils radar. On y note la ceinture de digues surélevée par rapport à l'aire d'accumulation de rejets miniers (Figure 20), ainsi qu'un cours d'eau situé immédiatement au nord (Figure 21), lequel reçoit vraisemblablement des exfiltrations d'eau provenant de l'aire d'accumulation.

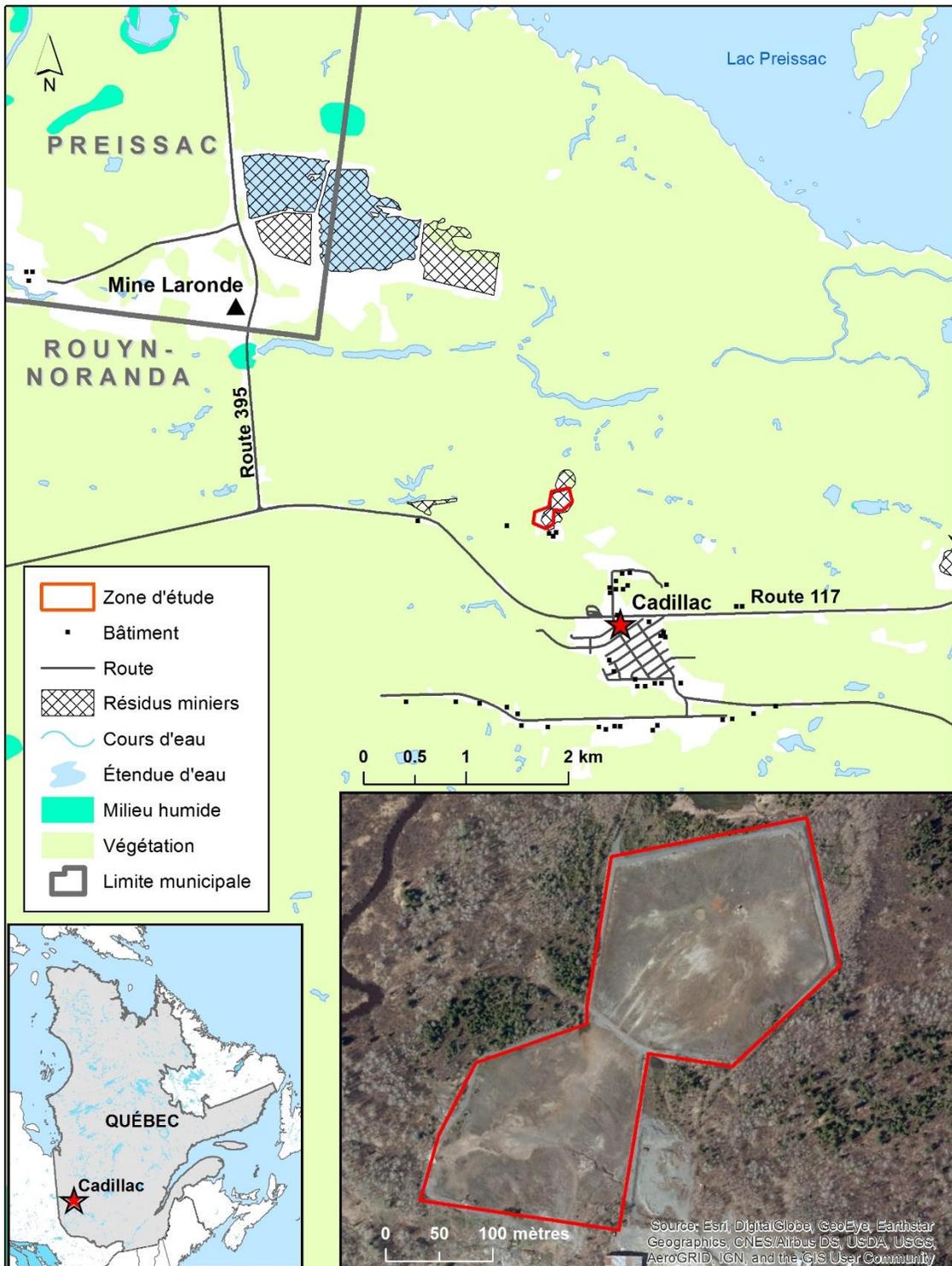


Figure 15 : Plan de localisation du secteur du site d'extraction de sable et gravier

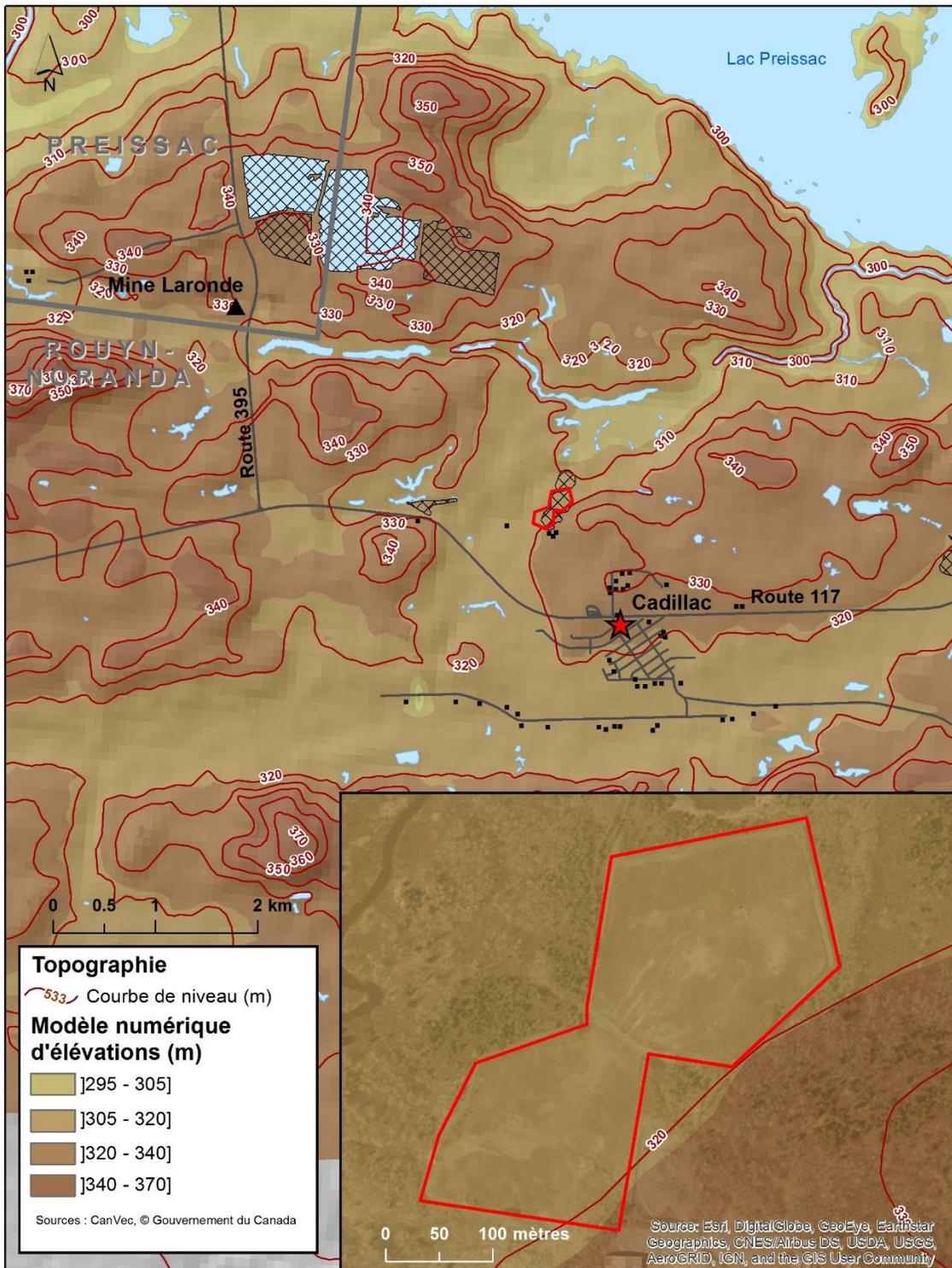


Figure 16 : Topographie du secteur du site d'extraction de sable et gravier

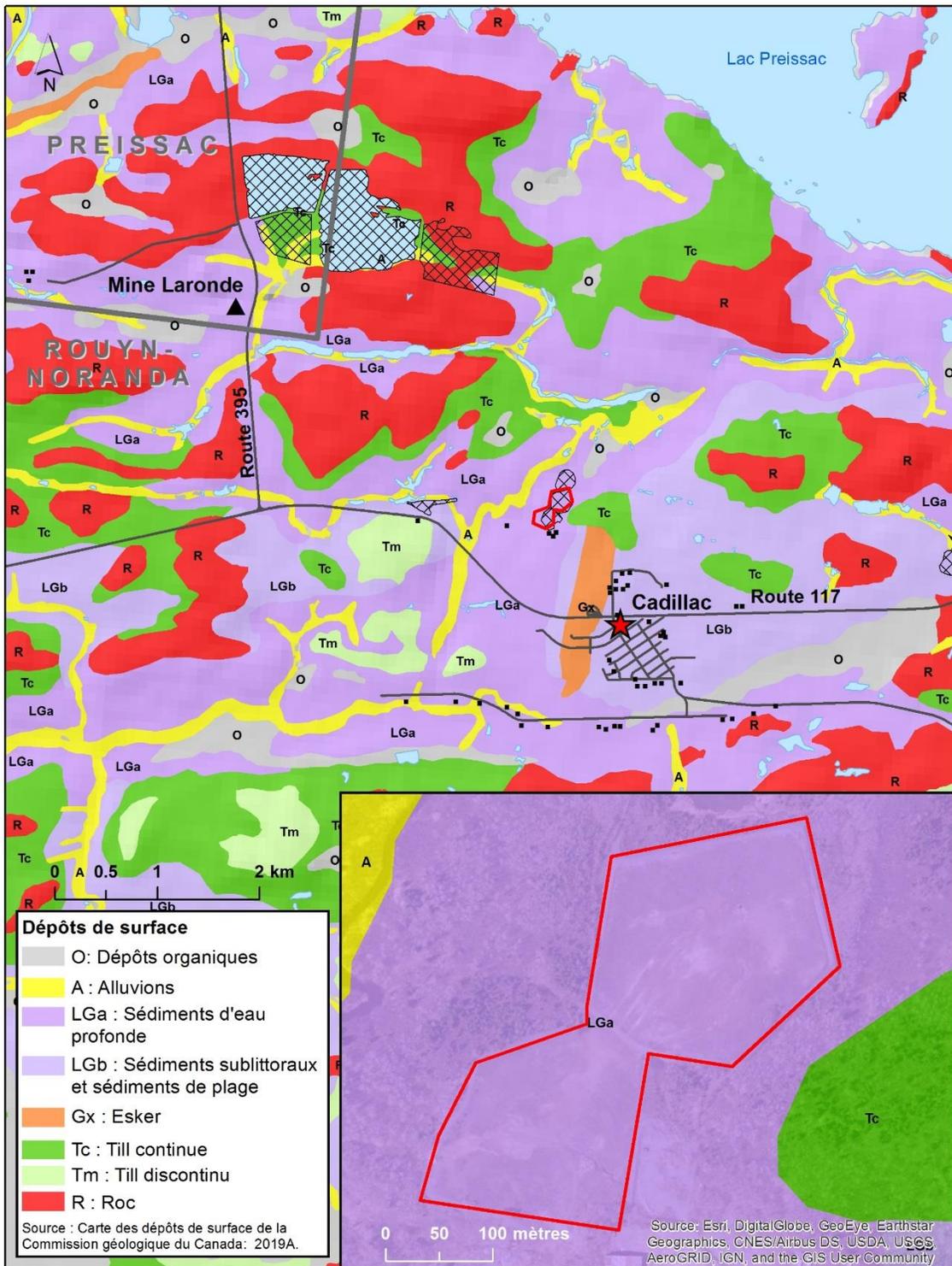


Figure 17 : Dépôts de surface du secteur du site d'extraction de sable et gravier

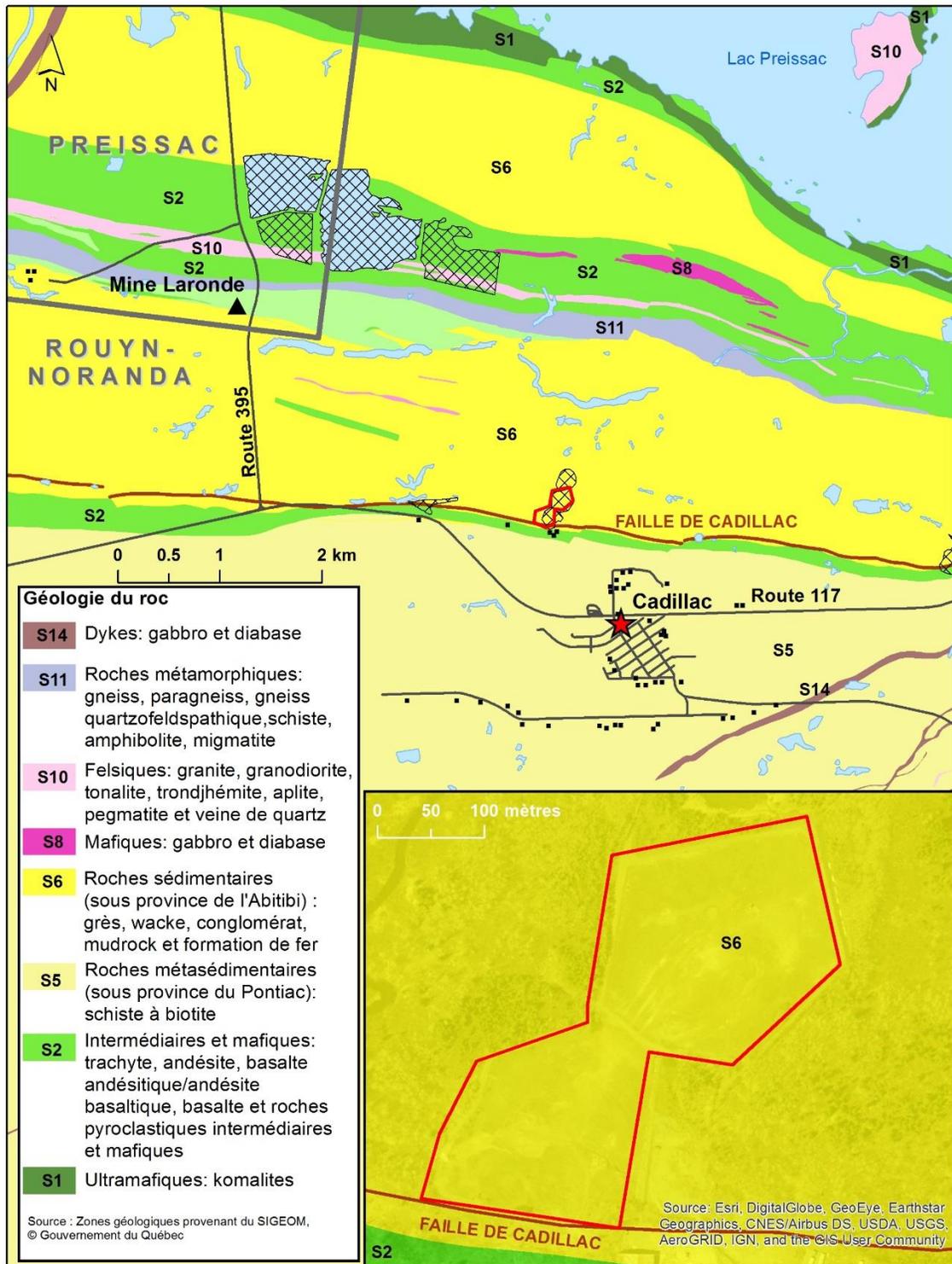


Figure 18: Géologie du roc du secteur du site d'extraction de sable et gravier

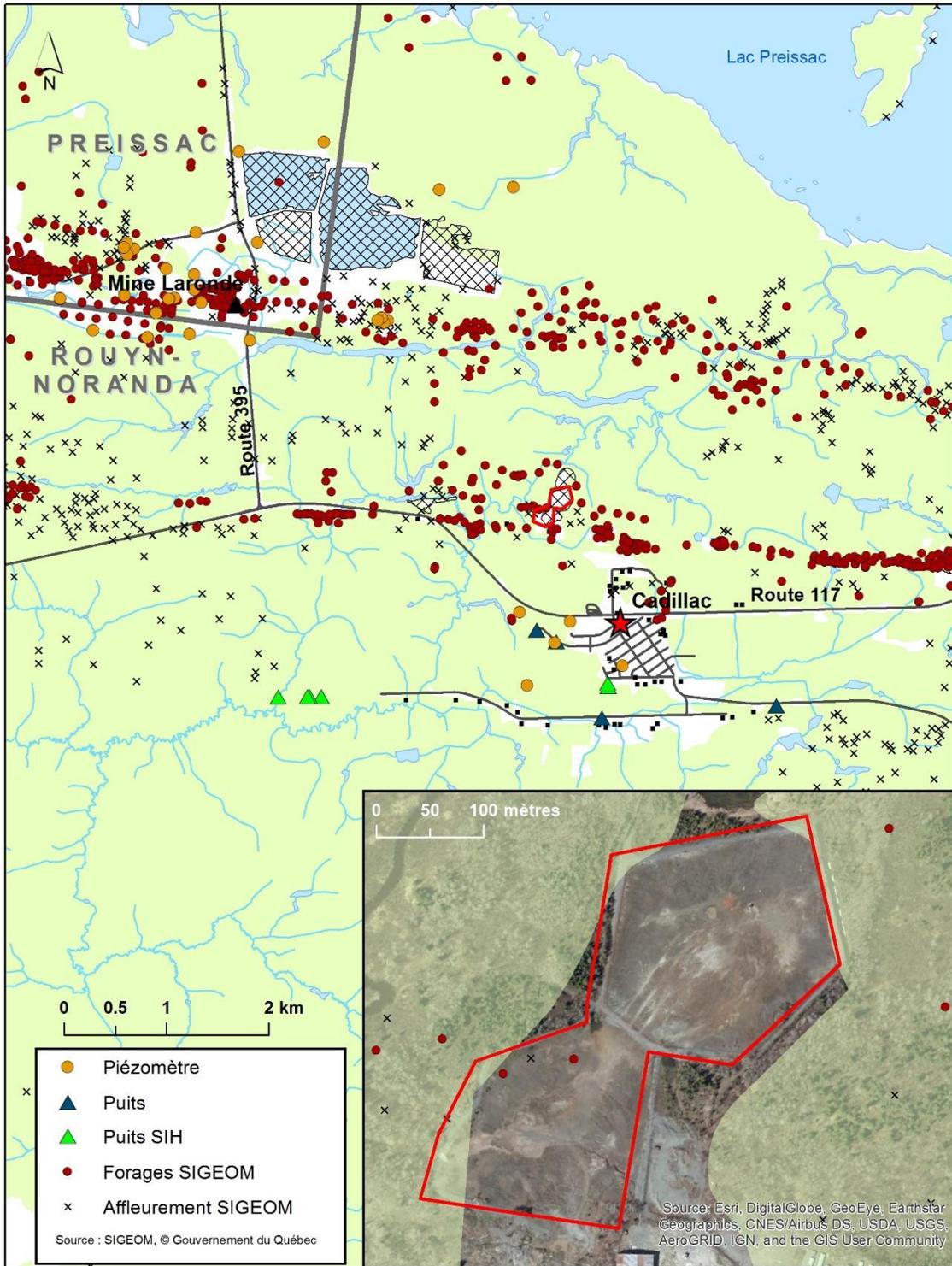


Figure 19: Compilation des puits du secteur du site d'extraction de sable et gravier



Figure 20: Vue de la portion sommitale de la digue investiguée



Figure 21: Vue du cours d'eau situé immédiatement au nord de l'aire d'accumulation de rejets miniers

3. Approches Méthodologiques

La présente étude a permis le développement d'approches pour l'acquisition et le traitement de données GPR pour la délimitation de structures enfouies. La méthodologie ainsi développée s'avère entièrement novatrice par rapport aux travaux antérieurs du GRES-UQAT. Pour le volet relatif à l'application de la résistivité électrique, il a été jugé préférable de ne pas modifier les protocoles méthodologiques proposés par le GRES-UQAT. La description de cette approche est entièrement tirée des guides de terrain fournis dans le cadre du cours GNM1019 – Géophysique appliquée, eux-mêmes appuyées sur des informations issues des travaux de [Cloutier et al., \(2015\)](#). Afin de permettre une visualisation optimale des données terrain, il a été choisi de présenter la localisation des données de terrain dans la section résultats. En ce sens, la section méthodologique se limite à une description des approches d'acquisition et de traitement des données. La localisation exacte des travaux est présentée à la section 4.

3.1. Méthode radar

3.1.1. Instruments disponibles

Deux dispositifs radar de *Sensors & Software* ont été employés dans le cadre de la présente étude. Le modèle *Noggin Plus* ([Figure 22a](#)) consiste en un dispositif dont les antennes émettrice et réceptrice sont incluses à une enceinte blindée favorisant la propagation des ondes vers le sol. Le *Noggin Plus* a été utilisé avec un bolide de transport sur roues de *Sensors & Software*. Le modèle *Pulse EKKO Pro* ([Figure 22b](#)) consiste en un dispositif comportant deux antennes non blindées. La motricité de l'appareil ainsi que l'homogénéité de la collecte des données sont assurées par l'emploi d'une luge construite à cette fin. Pour les deux dispositifs employés, la position des points de mesure a été évaluée à l'aide d'un GPS différentiel de type *Trimble GNSS R8*. La configuration retenue pour la collecte des données radar est présentée au [Tableau 1](#). Le *Noggin Plus* a aussi été employé pour l'acquisition de données au niveau de quadrillages précis. Pour ces mesures, l'appareil a été déplacé sur une toile où un quadrillage de 25 cm de maille était tracé et dont la position des quatre coins était évaluée à l'aide du GPS différentiel.

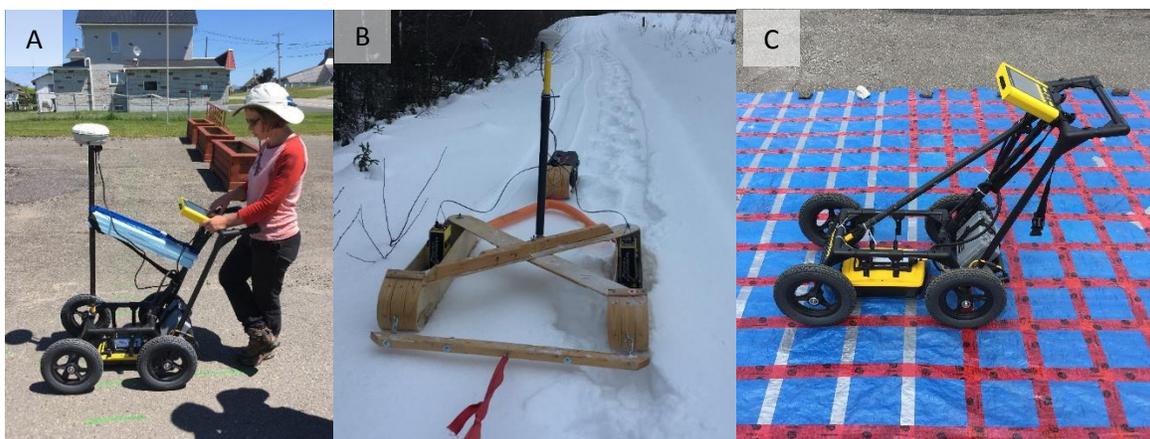


Figure 22 : Assemblage des dispositifs radar. (a) *Noggin Plus*; (b) *Pulse Ekko Pro*; (c) toile quadrillée

Paramètres	Pulse EKKO Pro	Noggin Plus
Fréquence (antennes)	100 MHz	500 – 1000 MHz
Espacement entre les antennes	1 m	Coïncidentes (enceinte blindée)
Mode d'échantillonnage	Free run	
Pas d'échantillonnage	2 s	5 cm
Fenêtre d'acquisition	≤ 1 000 ns	≤ 500 ns
Répétitions (stacking)	16	4
Type de relevé	Réflexion	

Tableau 1 : Paramétrage utilisé pour la collecte des données

Une attention particulière doit être portée sur la sécurité lors de l'utilisation du GPR. Afin d'assurer la sécurité des utilisateurs, certaines règles de base ont été établies dans le cadre de la présente étude, en collaboration avec l'équipe du coordonnateur en santé et sécurité au travail du service des ressources humaines de l'UQAT. Lors de l'acquisition des données, une distance minimale de 2 m a été conservée entre l'opérateur et le GPR. Un registre des heures d'utilisation a été compilé et l'utilisation de l'appareil a été limitée aux besoins de recherche. L'appareil n'a pas été opéré par une personne enceinte ou portant un dispositif cardiaque. Advenant l'utilisation de l'appareil à proximité d'un aéroport, les responsables de l'aéroport doivent être avisés et consultés avant l'acquisition de données. L'utilisateur du GPR est de surcroît responsable de consulter la documentation disponible avant l'utilisation de l'appareil :

- <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/radiation/83ehd-dhm98/index-fra.php>
- <http://www.hydroquebec.com/champs/limites-exposition.html>;
- <https://www.sensoft.ca/support/faq/>;
- <http://transition.fcc.gov/oet/rfsafety/>;
- <http://www.osha.gov/SLTC/radiofrequencyradiation>)

3.1.2. Traitement et interprétation des données

Le traitement des données acquises par l'appareil permet une représentation des résultats sous forme de profils où sont rapportées en abscisse les positions des points de mesure et en ordonnée les temps d'aller-retour des ondes électromagnétiques. Une conversion basée sur l'estimation de la vitesse de propagation de l'onde (v) (Tableau 2) au sein des milieux investigués permet d'évaluer la profondeur des réflecteurs.

Matériaux	Vitesse de propagation de l'onde électromagnétique en zone saturée (m/ns)	Vitesse de propagation de l'onde électromagnétique en zone non saturée (m/ns)
Argile ¹	0,05 à 0,07	0,09 à 0,12
Eau ¹	0,03	-----
Glace ²	0,16	-----
Limon ¹	0,05 à 0,07	0,09 à 0,12
Roc ¹	0,12 à 0,13	-----
Sable ¹	0,05 à 0,08	0,1 à 0,2
Sable et gravier ¹	0,06	0,09 à 0,13
Tourbe ¹	0,03 à 0,06	-----

Tableau 2 : Vitesse de propagation des ondes électromagnétiques. ¹Neal (2004); ²Annan (2005).

Les données de terrain ont été traitées afin de rehausser le ratio signal sur bruit à l'aide du logiciel *Ekko Project 5* (*Sensors & Software, 2017a*). La séquence de traitement est basée sur la réalisation d'essais itératifs fondés sur des stratégies établies dans la littérature scientifique ([Woodward et al., 2003](#); [Burke, 2008](#); [Cloutier et al., 2015](#)). Le logiciel permet la représentation des données en plan et en coupe. La représentation en coupe s'avère utile principalement pour la représentation des données au niveau de tronçons rectilignes de profils radar. Cette représentation 2D permet une illustration visuelle du spectre d'amplitude de l'onde captée par le récepteur radar sur un profil où la position est représentée en abscisse et où le temps d'aller-retour de l'onde est représenté en ordonnée. Le temps d'aller-retour de l'onde (T) peut être converti en profondeur (D) suivant un calcul appuyé sur une estimation de la vitesse de propagation de l'onde (v) et sur la distance de séparation des antennes radar (x):

$$T = \frac{2}{v} \sqrt{D^2 + \left(\frac{x}{2}\right)^2}$$

Équation 1

La représentation des données en coupe permet l'identification de structures sédimentaires (réflecteurs généralement continus sur une portion significative du profil) ainsi que de structures ponctuelles enfouies (réflecteurs en forme d'hyperboles sur les profils). [Neal \(2004\)](#) et [Annan \(2003\)](#) fournissent une description détaillée du traitement et de l'interprétation de données en coupe.

Le module *SliceView* de *Ekko Project 5* (*Sensors & Software, 2017b*) permet le traitement et la représentation des données GPR en plan. Cette représentation s'avère spécialement appropriée pour la représentation de données acquises par la réalisation de profils irréguliers (non rectilignes) ou de quadrillages de terrain. Le module *SliceView* permet notamment la représentation de la corrélation spatiale (en plan) de réflecteurs identifiables au sein d'un jeu de données radar. Ces corrélations spatiales peuvent être représentées en plan pour différentes profondeurs. Il est ainsi possible de visualiser les relations spatiales entre les cibles identifiables dans plusieurs lignes GPR voisines l'une de l'autre. Le module *SliceView* permet la représentation de l'intensité (l'amplitude) du signal mesuré en différents points de l'espace. Cette représentation est optimale pour la localisation de cibles linéaires (e.g. : tuyaux, les barres d'armature, fondations) et ponctuelles (e.g. : blocs, objets archéologiques). Fournie à titre d'exemple, la [figure 23](#) (tirée de *Sensors & Software, 2017b*), illustre le principe de représentation des données en plan. La [Figure 23b](#) illustre une vue en coupe présentant deux hyperboles. La juxtaposition de données acquises sur un quadrillage permet de représenter l'orientation des cibles correspondant à ces réflecteurs selon une vue en plan ([Figure 23a](#)), pour la profondeur correspondant à la tranche identifiée à la [Figure 14b](#). Dans ces conditions, la juxtaposition des données en plan permet l'identification de deux cibles linéaires perpendiculaires ([Figure 23a](#)). Les [Figures 23b-c](#) illustrent le même principe, mais cette fois pour un réflecteur linéaire unique.

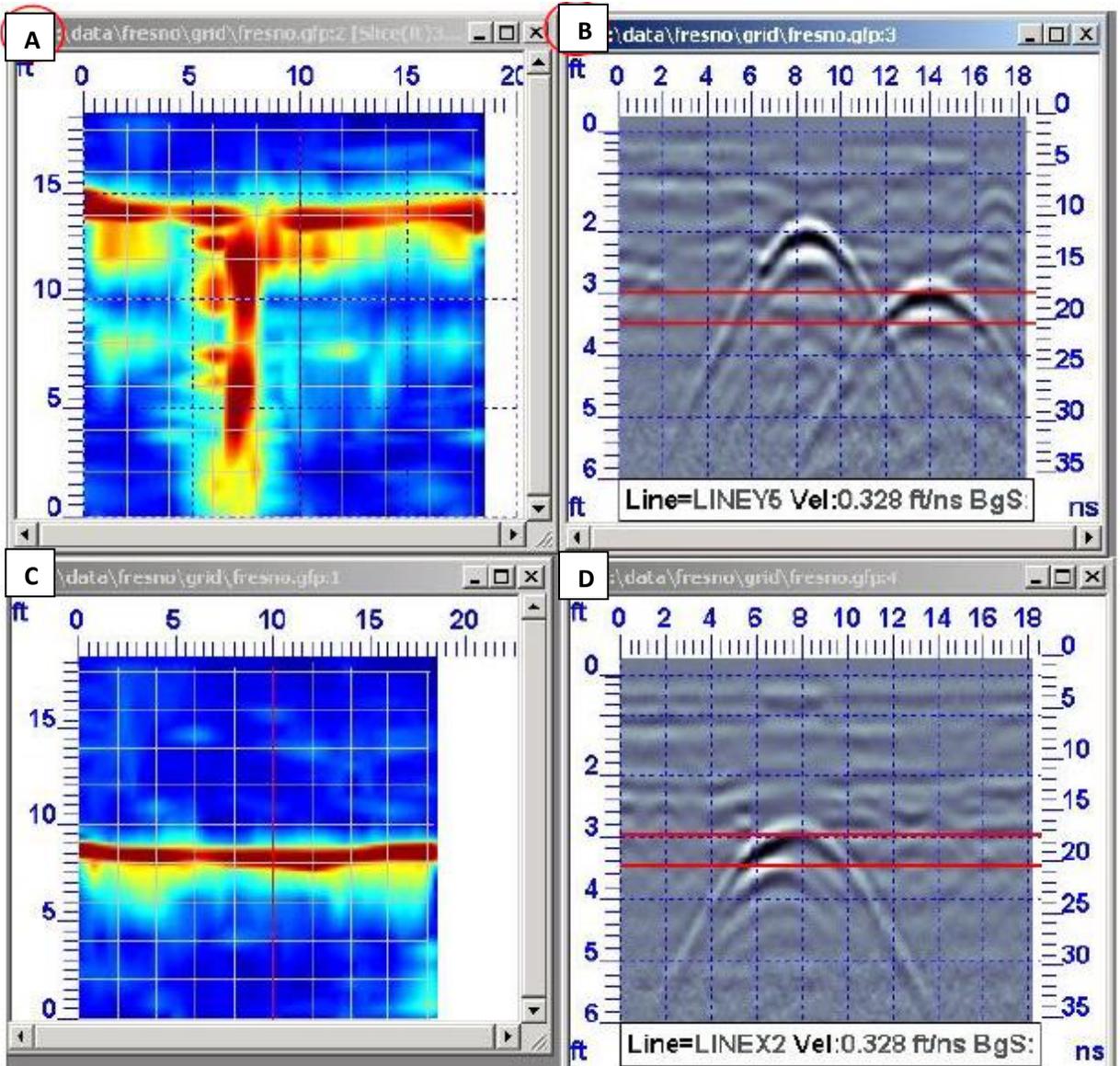


Figure 23 : illustration de données radar en plan (a-c) et en coupe (b-d) et de la corrélation identifiée par le module *SliceView* (Figure tirée de *Sensors & Software*, 2017b)

3.2. Méthode électrique

Un résistivimètre de type *SYSCAL Pro SWITCH 72* conçu par *IRIS Instruments* sera employé dans le cadre de la sortie de terrain (Figure 24). Les électrodes ($n \leq 72$) seront enfoncées dans le sol à intervalles réguliers (espacements ≤ 5 m). En terrain résistif, de l'eau sera utilisée afin d'accroître la propagation du courant électrique injecté. Les séquences utilisées seront configurées avec le logiciel *ELECTRE PRO* d'*IRIS Instruments*. Les pseudo-sections seront acquises plus d'une fois, en employant sur les mêmes sites différentes configurations et paramétrages. Les configurations de Wenner, Schlumberger et dipôle-dipôle ont été utilisées dans le cadre de l'étude.



(A) Câbles déployés (360 m) et reliés à l'appareil localisé en position centrale; (B) Appareil alimenté par une pile externe; (C) Électrodes enfoncées dans le sol et reliées au câble central.

Figure 24 : Résistivimètre SYSCAL pro SWITCH 72 d'IRIS Instruments

L'inversion des pseudo-sections a été effectuée en utilisant le logiciel *RES2DINV* de *GEOTOMO SOFTWARE* (Sandmeier, 2008). La méthodologie employée afin d'inverser les données peut différer d'une pseudo-section à l'autre. Des essais ont été réalisés et des filtres expérimentés afin de traiter les données de terrain. Les tests méthodologiques réalisés sont basés sur le guide accompagnant le logiciel d'inversion (Loke, 2011) et sur des expérimentations réalisées antérieurement par le GRES-UQAT (Cloutier et al., 2015). Le tableau 3 présente une compilation de plages de valeurs de résistivité possibles pour différents matériaux géologiques. Notons que la teneur en eau et la conductivité de l'eau contribuent significativement aux variations de résistivité intra-matériaux.

Matériaux	Résistivité (ohm.m)						
	10^{-1}	10^0	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5
Argiles			■	■			
Tills				■	■		
Sables et graviers					■	■	
Shales			■				
Grès				■	■		
Conglomérats					■	■	
Charbons et lignites			■	■			
Calcaires et dolomies				■	■		
Eau salée	■	■					
Eau douce			■	■			
Glace de mer				■	■		
pergélisol					■	■	

Tableau 3 : Plages de résistivités approximatives pour différents matériaux géologiques (Adapté de Sameoulian et al., 2005)

4. Résultats et discussion

4.1. Site de l'école de Saint-Athanase

La figure 25 illustre la position des données acquises à l'école de Saint-Athanase. Les données GPR ont été collectées à l'aide de l'appareil *Noggin Plus*, suivant la procédure décrite à la section 3.1. Le couplage entre l'appareil radar et un GPS différentiel a permis la collecte de données suivant un patron de marche hétérogène, la position des réflecteurs pouvant être identifiée avec précision sans avoir à procéder avec la collecte de données le long de profils rectilignes. L'adoption d'un patron de marche hétérogène s'avère plus efficace et rapide que la réalisation de profils rectilignes dans la perspective de balayer en entier la surface d'un terrain, à la recherche de structure enfouies. Dans le cas présent, le balayage a été effectué afin de localiser les installations septiques enfouies, les informations disponibles ne permettant pas de prédire avec précision la position de ces dernières. Les points bleus rapportés à la figure 25 illustrent la position des mesures collectées le long des profils radar. Cinq grilles plus précises ont aussi été réalisées à l'aide du *Noggin Plus*, avec antennes de 500 MHz et 1000 MHz, à cinq endroits où la présence de structures enfouies était suspectée suite à une analyse préliminaire des données. La position des points d'identification des grilles, tels que rapportés à la figure 25, représentent l'origine ($x = 0$; $y = 0$) des graphiques permettant d'illustrer les données GPR collectées sur ces grilles. Deux profils de résistivité ont également été réalisés le long des façades nord-ouest et nord-est de l'école afin d'évaluer l'épaisseur des dépôts meubles sus-jacents au socle rocheux. Ces profils ont été réalisés avec 72 électrodes séparées de 50 cm chacune, pour une longueur d'investigation horizontale de 36 m.

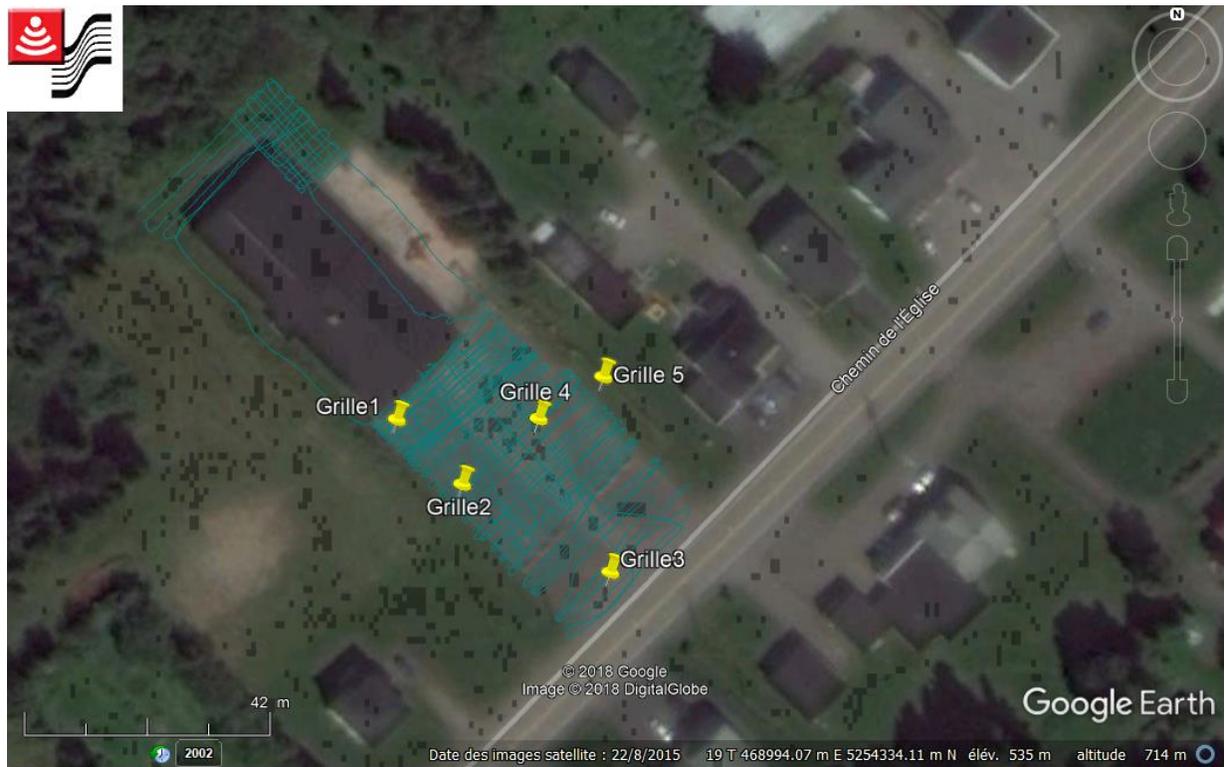


Figure 25 : Positions des données GPR sur le terrain de l'école de Saint-Athanase

4.1.1. Interprétation des profils de résistivité électrique

Les profils de résistivité électrique interprétés pour les modes Wenner, Schlumberger et dipôle-dipôle sont représentés aux figures 26 à 31. De façon générale, il est assumé que les profils en mode Wenner permettent une meilleure représentation des structures subhorizontales, alors que les profils en mode dipôle-dipôle s'avèrent plus efficaces pour la détection des structures verticales (Samèoulian et al., 2005). En ce sens, les profils collectés en mode Wenner sont utilisés pour évaluer la position du contact entre les dépôts meubles et le socle rocheux, alors que les profils collectés en mode dipôle-dipôle sont davantage utilisés pour la représentation des discontinuités structurales verticales au sein du roc. Il est assumé que le socle rocheux présentera des valeurs de résistivité plus élevées par rapport aux dépôts meubles sus-jacents. Les interprétations proposées ci-dessous se limitent à une présentation qualitative des profils réalisés.

Les résultats associés au profil réalisé à proximité de la façade nord-ouest de l'école sont rapportés aux figures 26 à 28. Les résultats associés au mode de collecte Wenner (Figure 26) suggèrent que la surface du socle rocheux se trouve à moins de 12 cm de profondeur vers le centre du profil. On note un approfondissement de part et d'autre de cette portion centrale, pour des profondeurs excédant 1,6 m aux deux extrémités du profil. Le profil mesuré en mode Schlumberger (Figure 27) semble généralement cohérent avec celui acquis en mode Wenner, on y note un approfondissement graduel de la profondeur de la surface du roc de part et d'autre de la portion centrale du profil. Finalement, le profil acquis en mode dipôle-dipôle (Figures 28) ne permet pas d'identifier des structures verticales marquées au sein du socle rocheux.

Les résultats associés au profil réalisé à proximité de la façade nord-est de l'école sont rapportés aux figures 29 à 31. Les résultats associés aux modes de collecte Wenner et Schlumberger (Figures 29 et 30) suggèrent que la surface du socle rocheux se trouve des profondeurs d'environ 1,5 m à 2 m le long du profil. Le profil acquis en mode dipôle-dipôle (Figure 28) ne permet pas d'identifier des structures verticales marquées au sein du socle rocheux. Néanmoins, ce profil permet d'identifier une zone de résistivité électrique plus faible à des profondeurs supérieures à 4,5 m. Il n'est pas exclu que cette zone de faible résistivité soit associée à la présence de la nappe d'eau souterraine.

En ce qui a trait à la morphologie des dépôts sus-jacents au socle rocheux, il est assumé ici que les profils représentent essentiellement des remblais anthropiques masquant la rugosité du socle rocheux afin de niveler le terrain de l'école. De façon générale, les données de résistivité suggèrent que ces remblais n'excèderaient pas 2 m d'épaisseur au niveau des zones sondées, alors que la position de la nappe d'eau souterraine se trouverait au sein du socle rocheux. En ce sens, les données de résistivité électrique permettent d'émettre l'hypothèse voulant que les installations septiques de l'école soient installées à faible profondeur (< 2m) au sein d'un remblai non saturé. Cette information servira de point de départ pour l'interprétation des données GPR telles que discutées à la section 4.1.2.

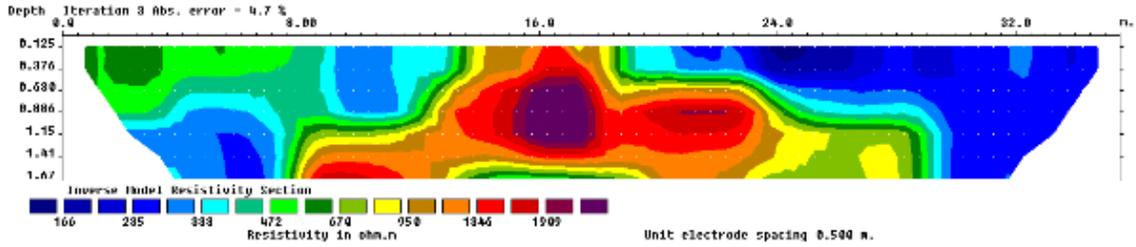


Figure 26 : Profil de la façade nord-ouest (mode Wenner)

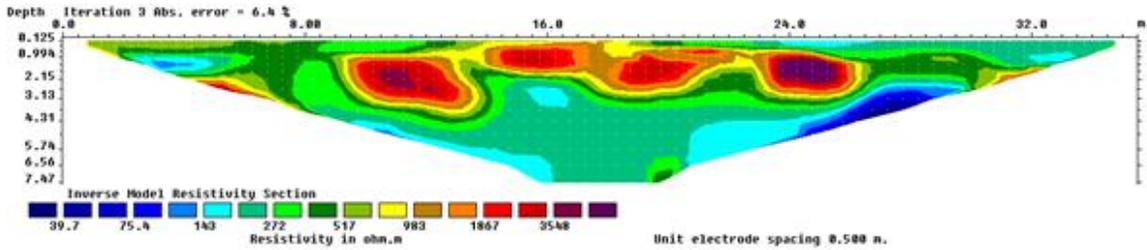


Figure 27 : Profil de la façade nord-ouest (mode Schlumberger)

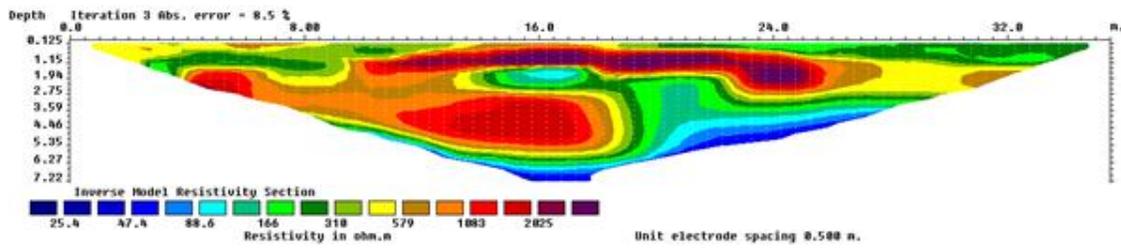


Figure 28 : Profil de la façade nord-ouest (mode dipôle-dipôle)

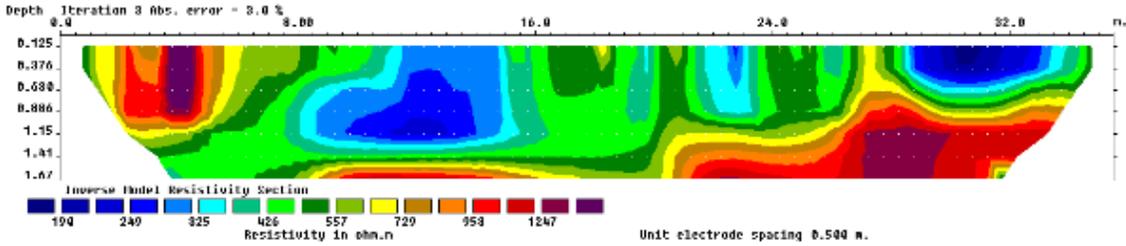


Figure 29 : Profil de la façade nord-est (mode Wenner)

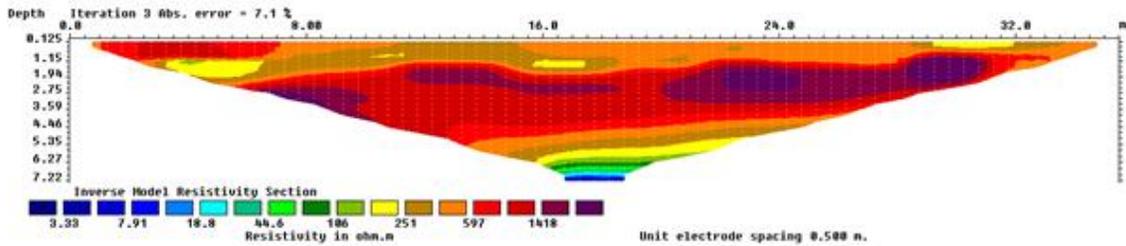


Figure 30 : Profil de la façade nord-est (mode Schlumberger)

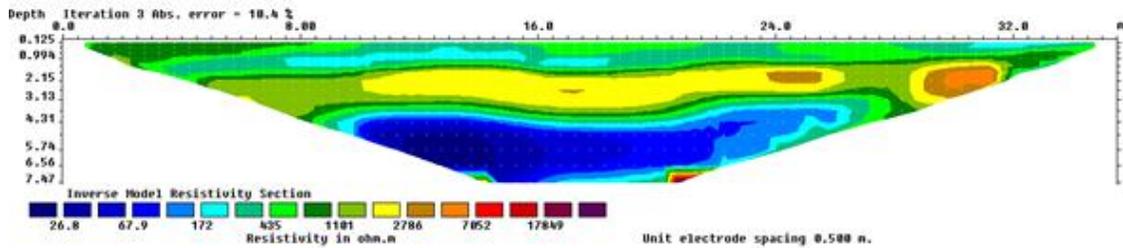


Figure 31 : Profil de la façade nord-est (mode dipôle-dipôle)

4.1.2. Interprétation des profils GPR

Les données radar associées au balayage général du site sont illustrées à la figure 32, où chacun des points jaunes représente un site d'acquisition de données GPR ponctuelle. Les profils radar sont subséquemment produits en juxtaposant les données associées aux sites d'acquisition ponctuels. Les points rouges illustrés à la figure 32 illustrent la distribution spatiale des principaux réflecteurs identifiables grâce à une interprétation visuelle des données. Ces réflecteurs prennent ici la forme d'hyperboles résultant de la présence d'objets enfouis ponctuels ou rectilignes (et dont l'orientation est perpendiculaire à l'orientation du déplacement de l'appareil lors de la collecte des données). Ces données permettent d'identifier deux principaux secteurs d'intérêt en ce qui a trait à la présence de structures enfouies. D'une part, les données suggèrent un alignement de réflecteurs selon un axe NO-SE, le long de la limite NE du terrain de l'école, entre celle-ci et la route. La seconde zone d'intérêt suit également une orientation NO-SE, mais se trouve près de la limite SO du terrain de l'école, entre cette dernière et la route. L'alignement de ces réflecteurs selon un axe parallèle à l'allongement du terrain, et dans une configuration permettant de relier l'école au réseau d'égout se trouvant sous la route suggère qu'il pourrait s'agir de conduites associées au système d'évacuation des eaux usées.



Figure 32 : Positions des profils de GPR géoréférencés et des différents points de références

En complément à la [figure 32](#), les [figures 33 à 45](#) illustrent en plan la distribution des réflecteurs détectés au sein des données GPR pour différentes tranches de profondeur. Les images sont traitées grâce au logiciel *Ekko Project*, lequel permet l'utilisation d'une procédure de détection automatisée des hyperboles au sein d'un jeu de données. Sur les [figures 33 à 45](#), chaque point de teinte verdâtre à rougeâtre illustre la position d'une hyperbole. Plus la teinte du point illustrée s'approche du rouge, plus le sommet de l'hyperbole identifiée se trouve près du plan de profondeur étudié. Cette approche permet donc de positionner les réflecteurs dans l'espace en trois dimensions.

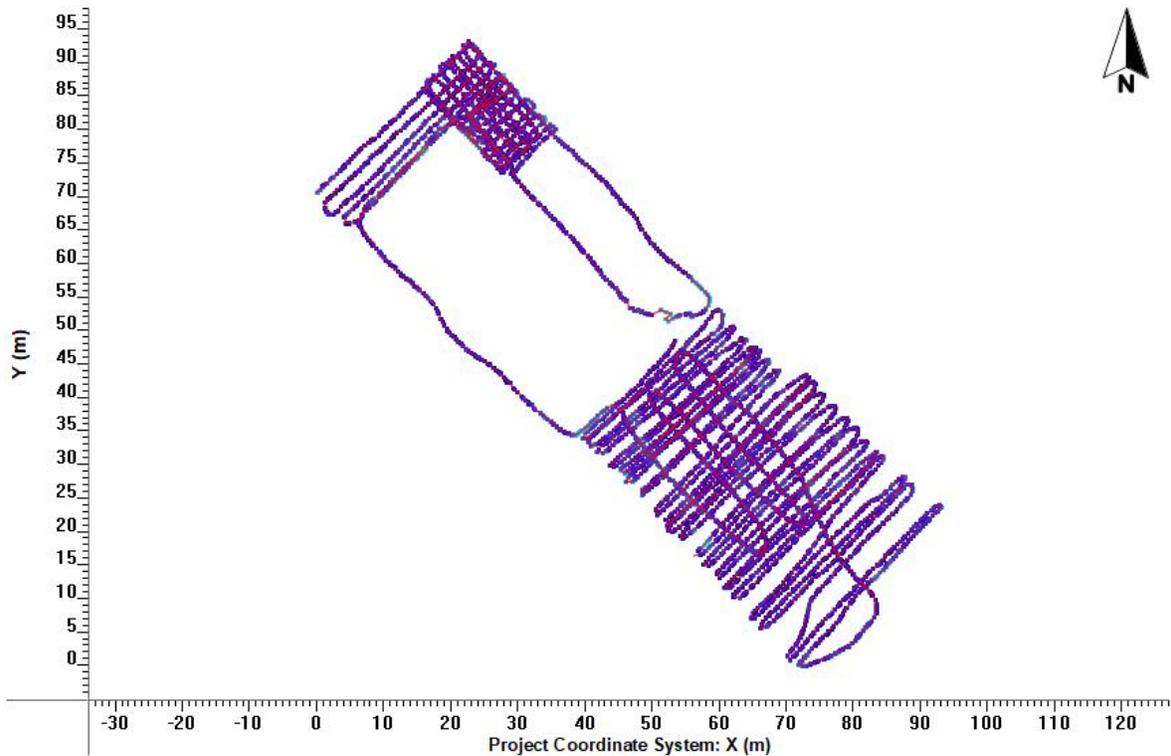


Figure 33 : Plan niveau des réflecteurs GPR - profondeur 10 cm

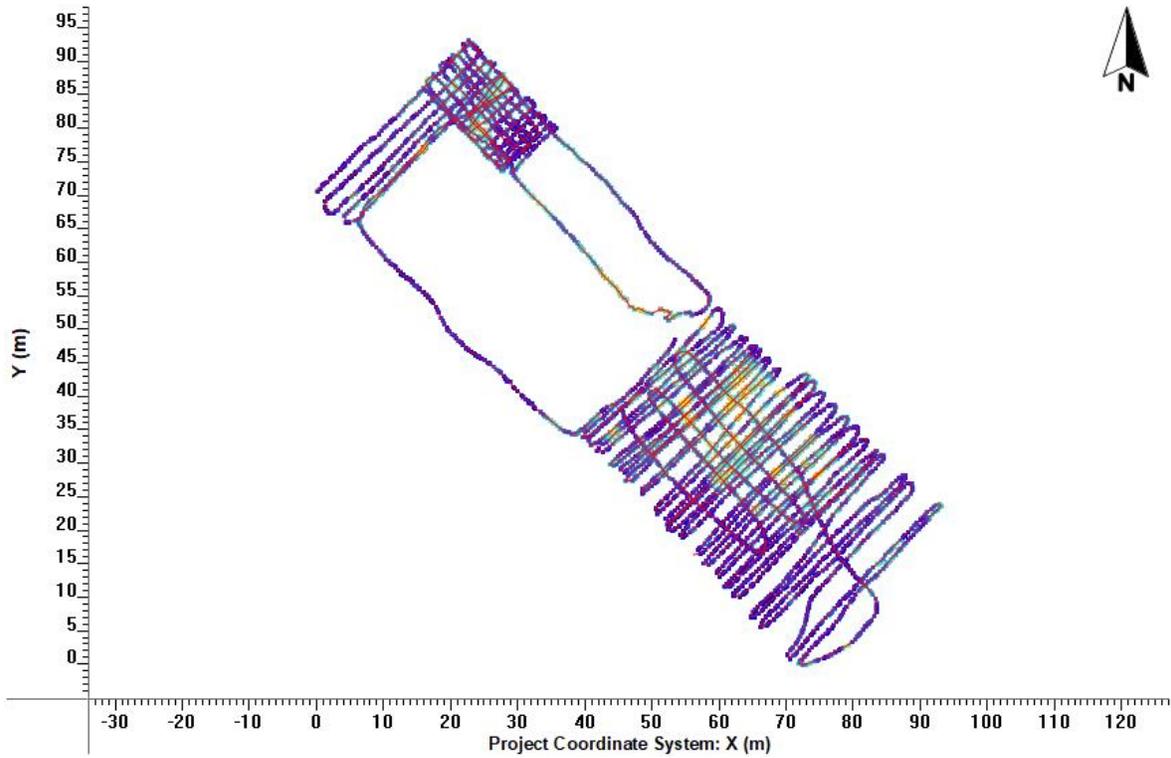


Figure 34: Plan niveau des réflecteurs GPR - profondeur 20 cm

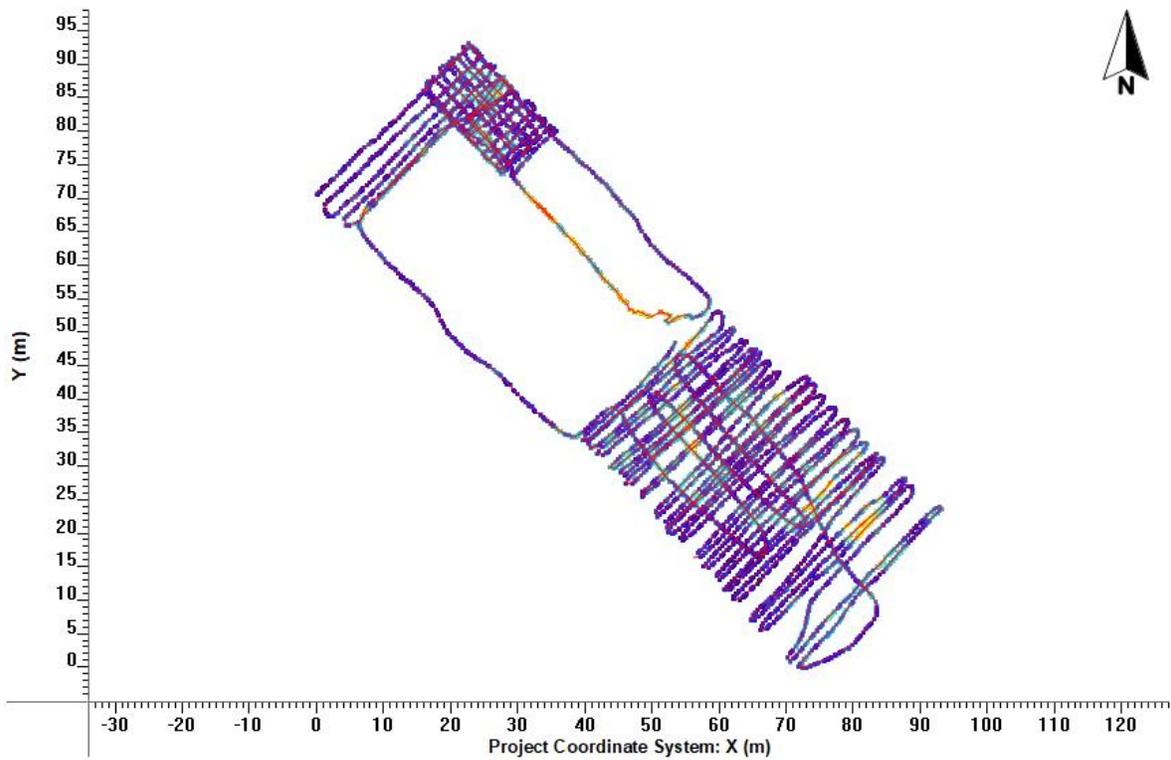


Figure 35 : Plan niveau des réflecteurs GPR - profondeur 30 cm

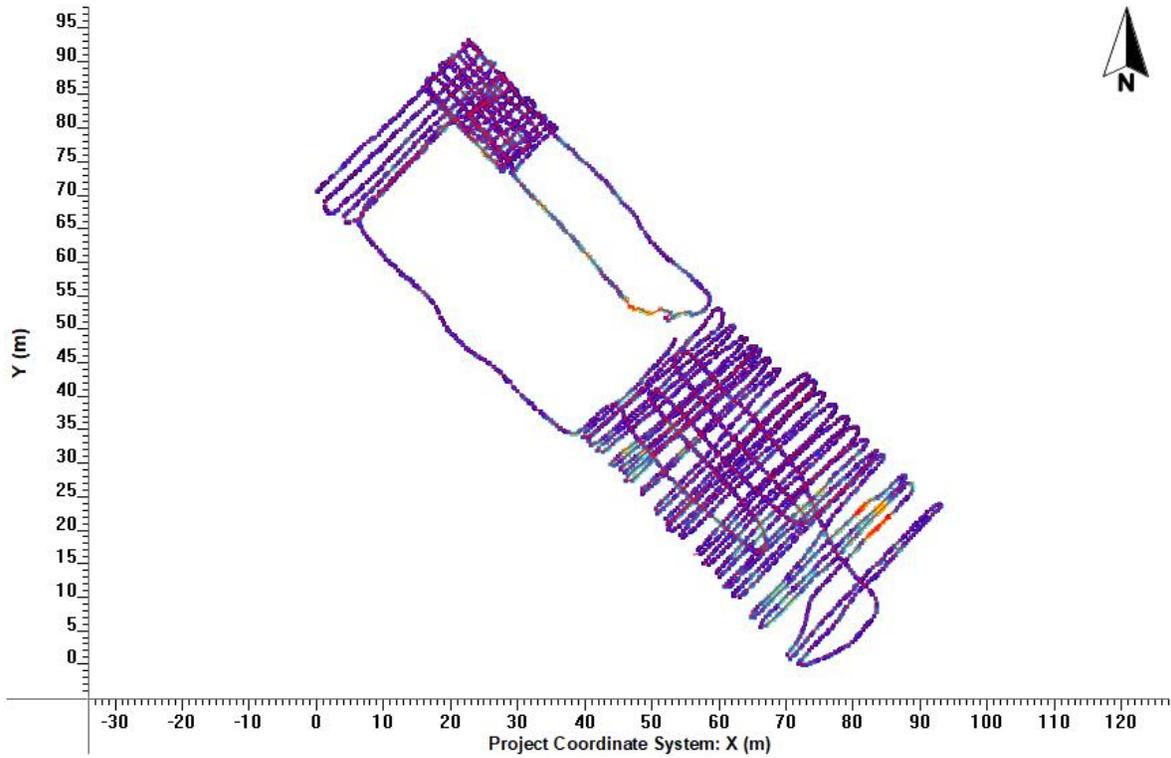


Figure 36 : Plan niveau des réflecteurs GPR - profondeur 40 cm

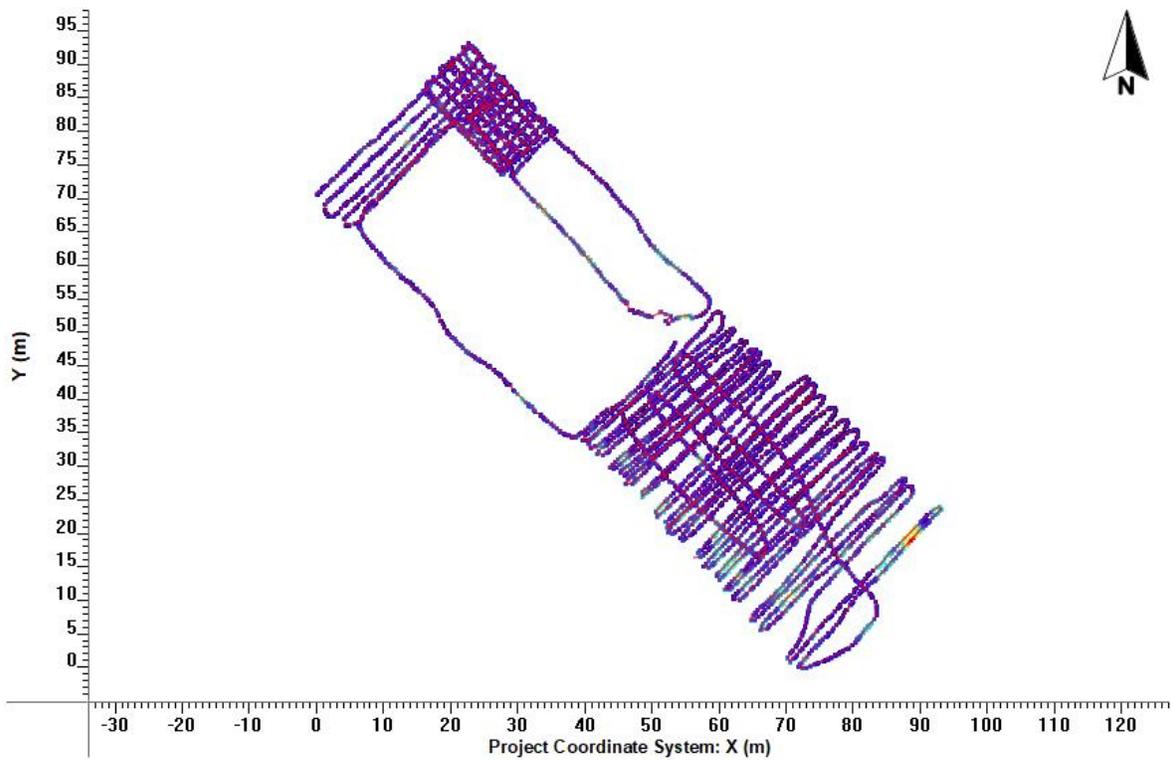


Figure 37 : plan niveau, profondeur 50 cm

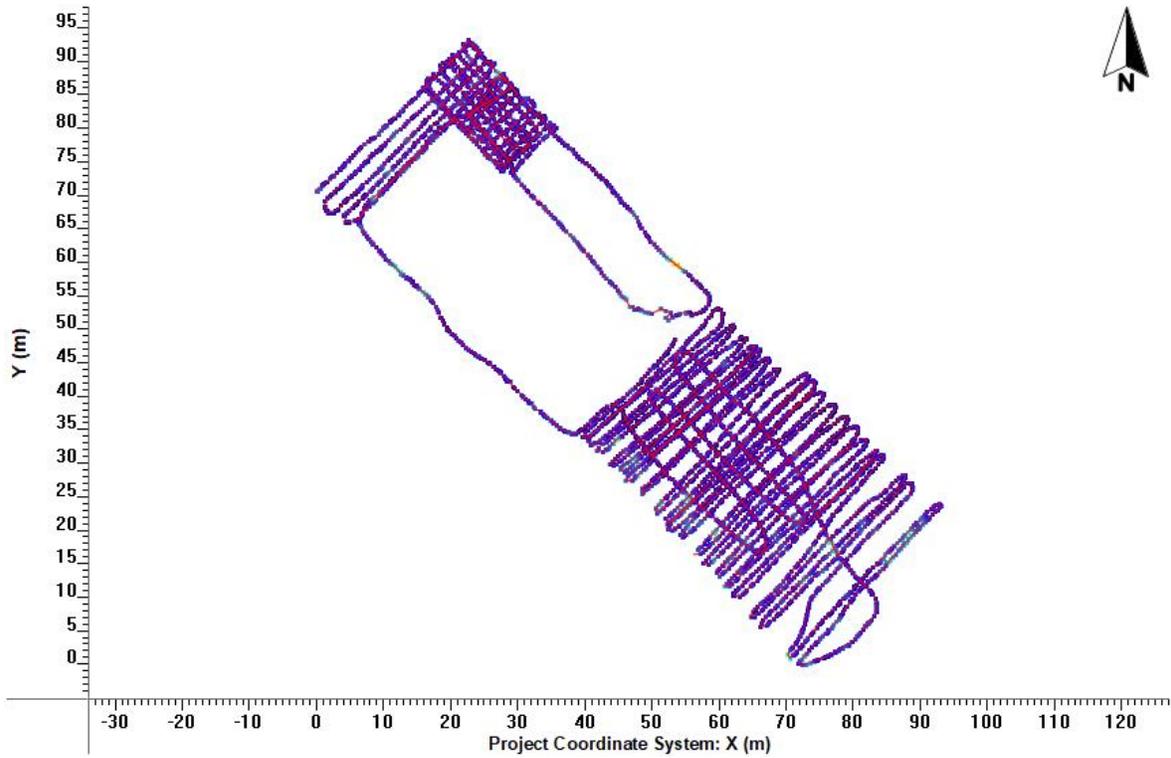


Figure 38 : Plan niveau des réflecteurs GPR - profondeur 60 cm

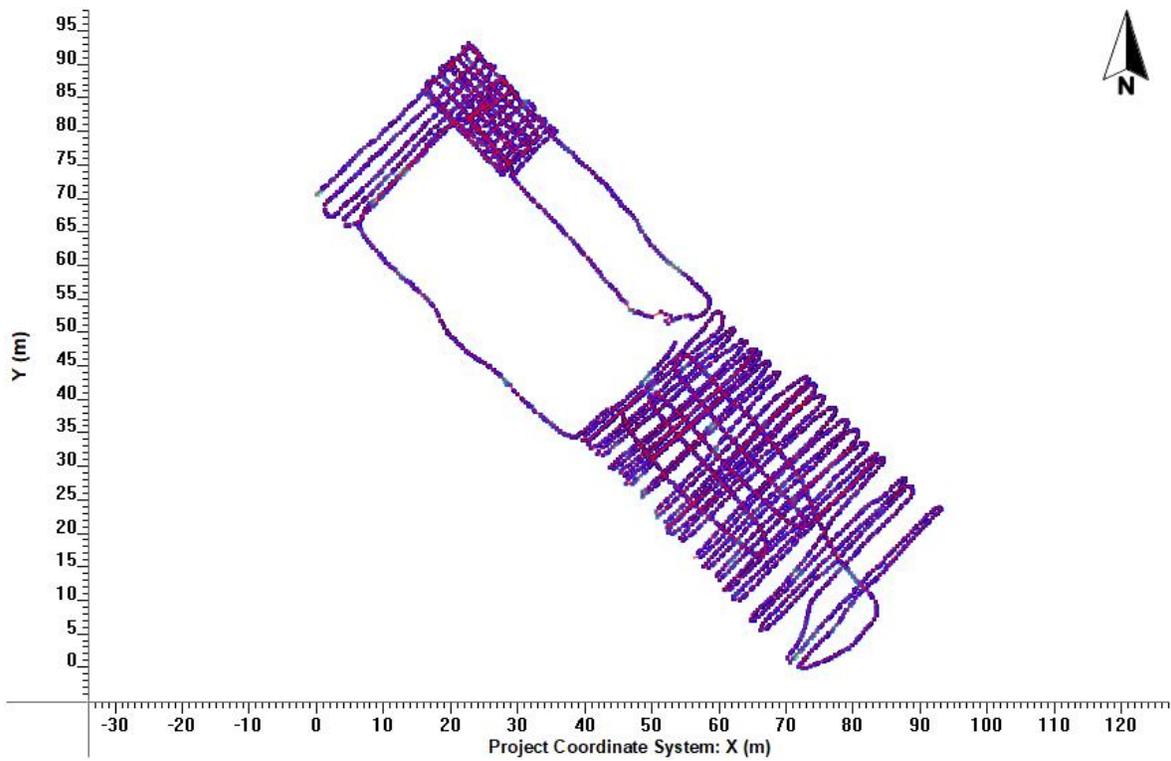


Figure 39 : Plan niveau des réflecteurs GPR - profondeur 70 cm

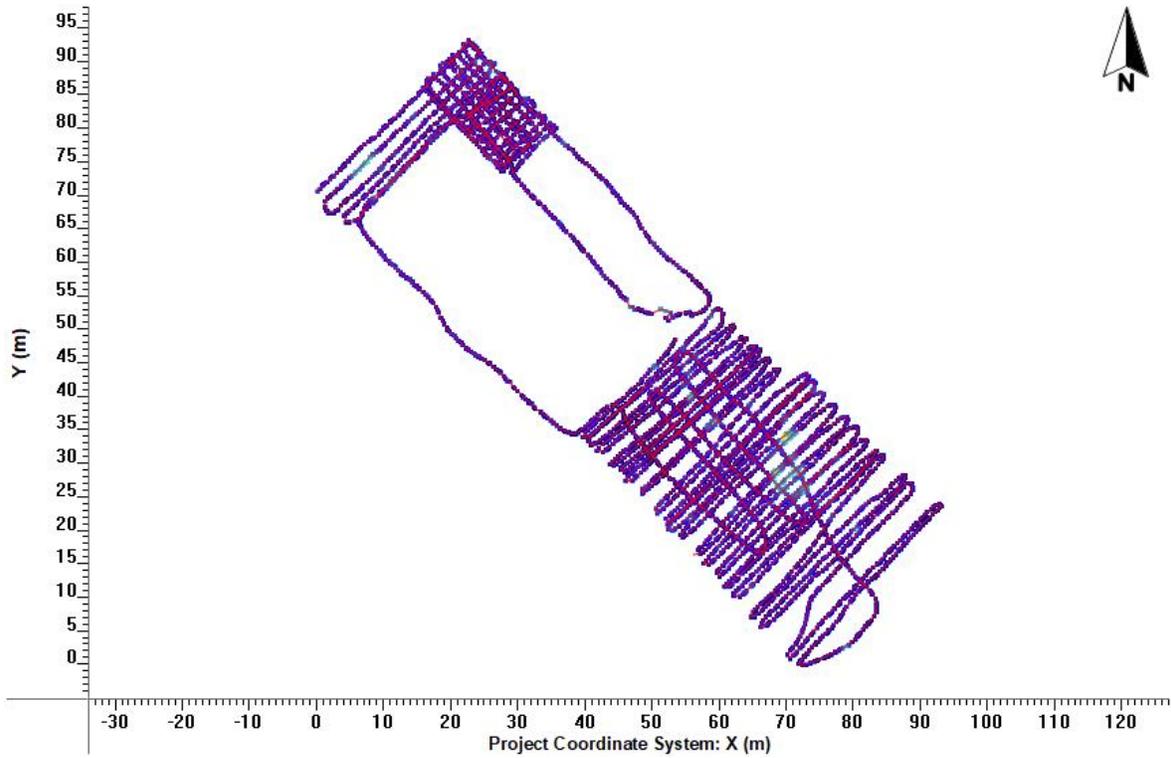


Figure 40: Plan niveau des réflecteurs GPR - profondeur 90 cm

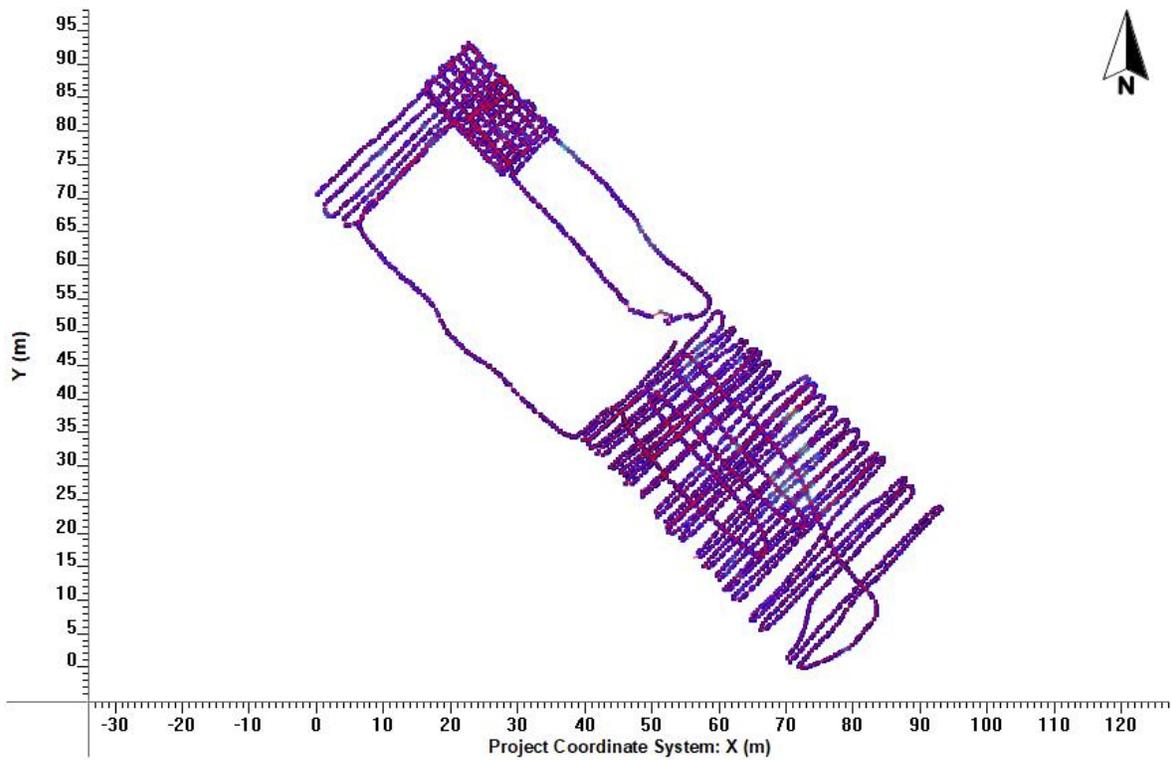


Figure 41 : Plan niveau des réflecteurs GPR - profondeur 1,05 m

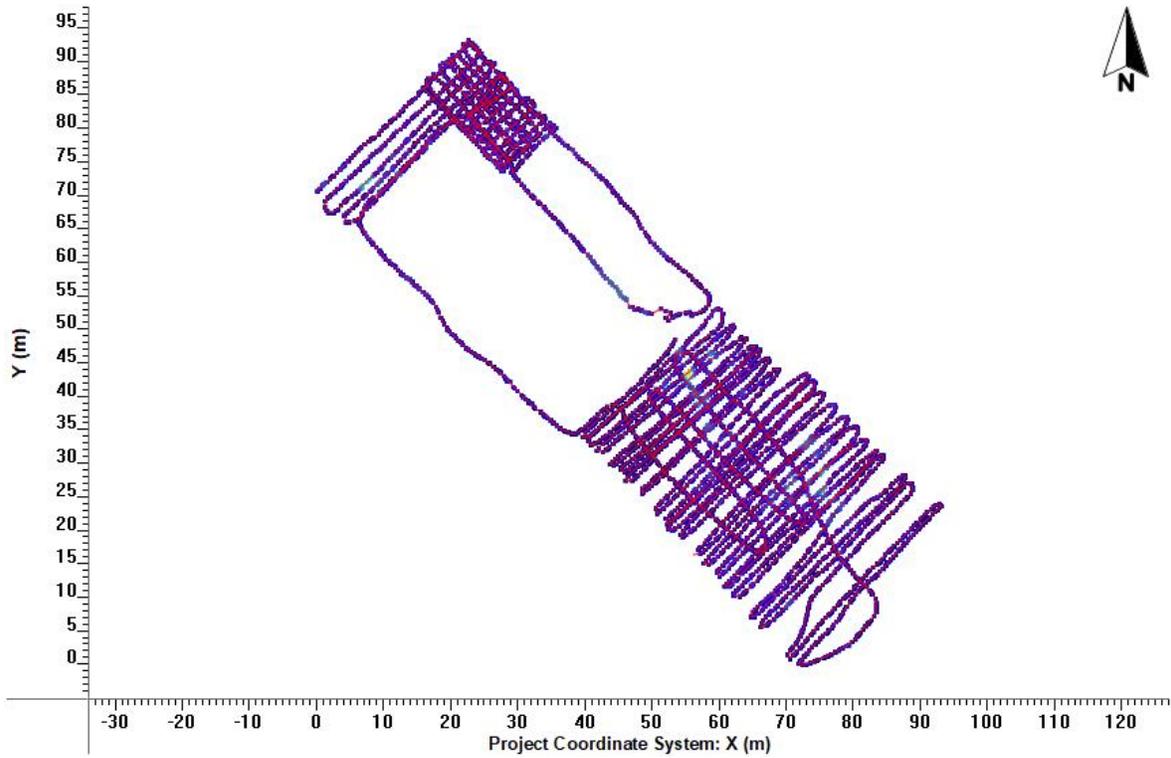


Figure 42 : Plan niveau des réflecteurs GPR - profondeur 1,25 m

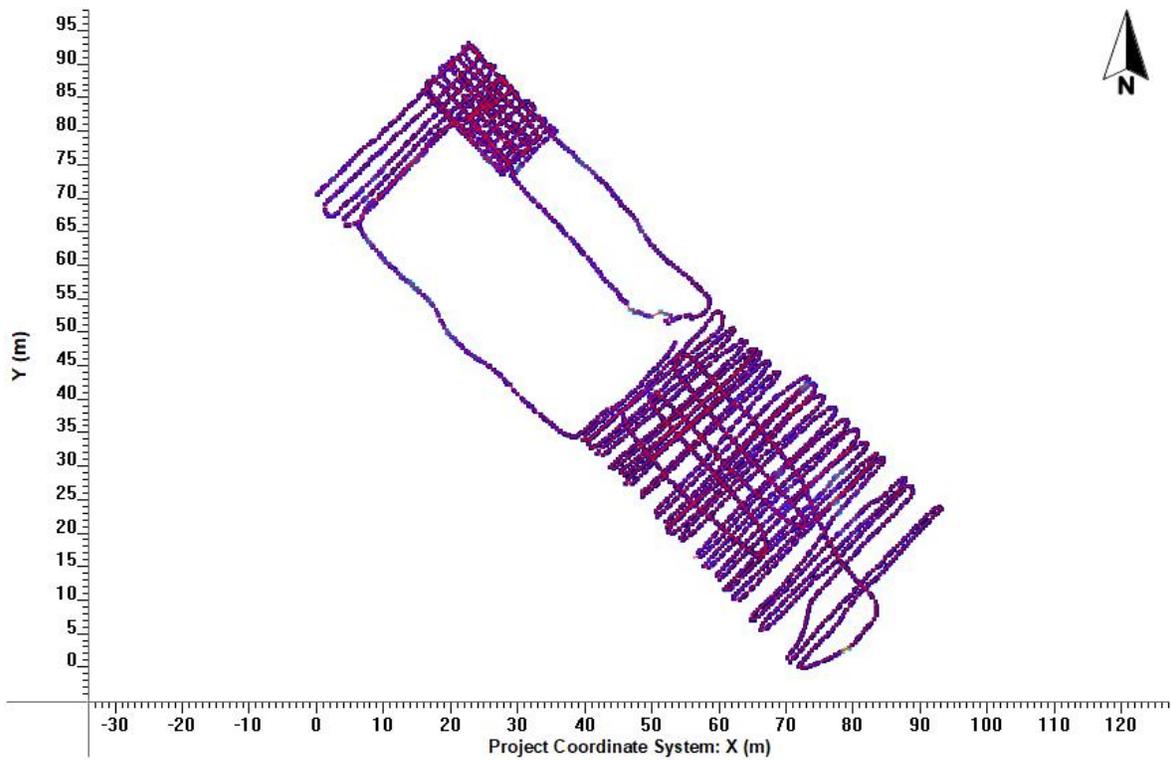


Figure 43 : Plan niveau des réflecteurs GPR - profondeur 2 m

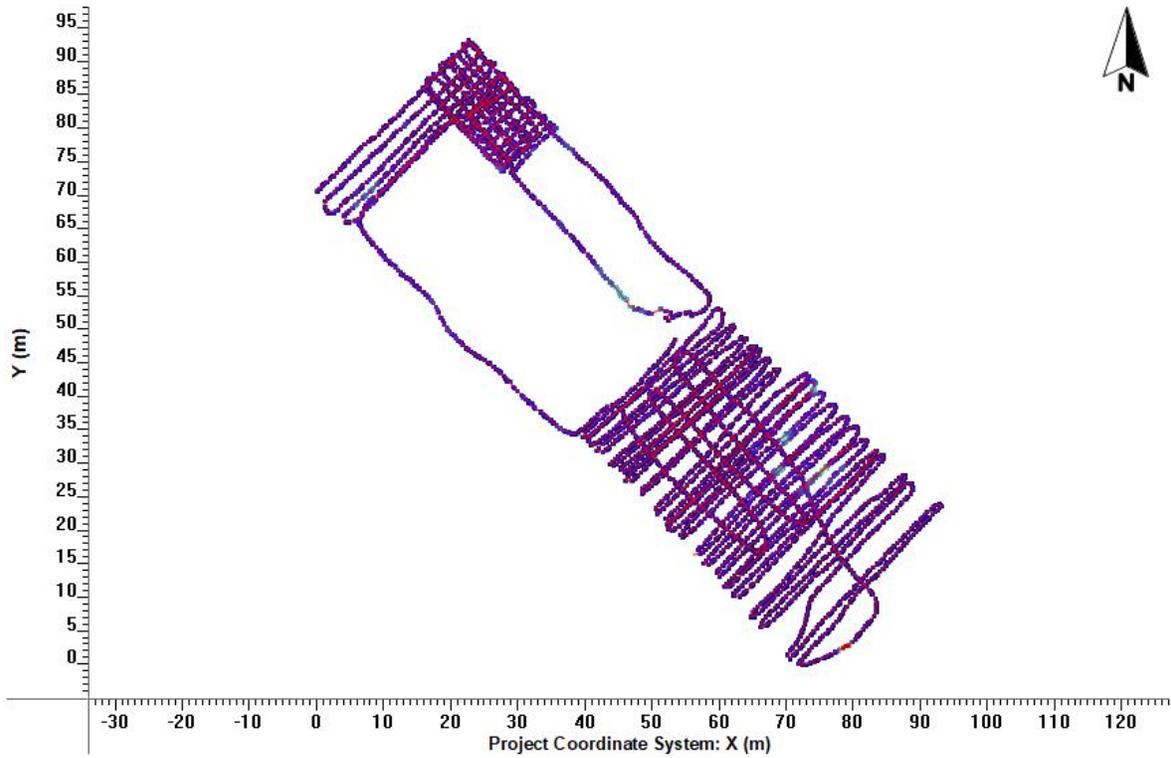


Figure 44 : Plan niveau des réflecteurs GPR - profondeur 2,90 m

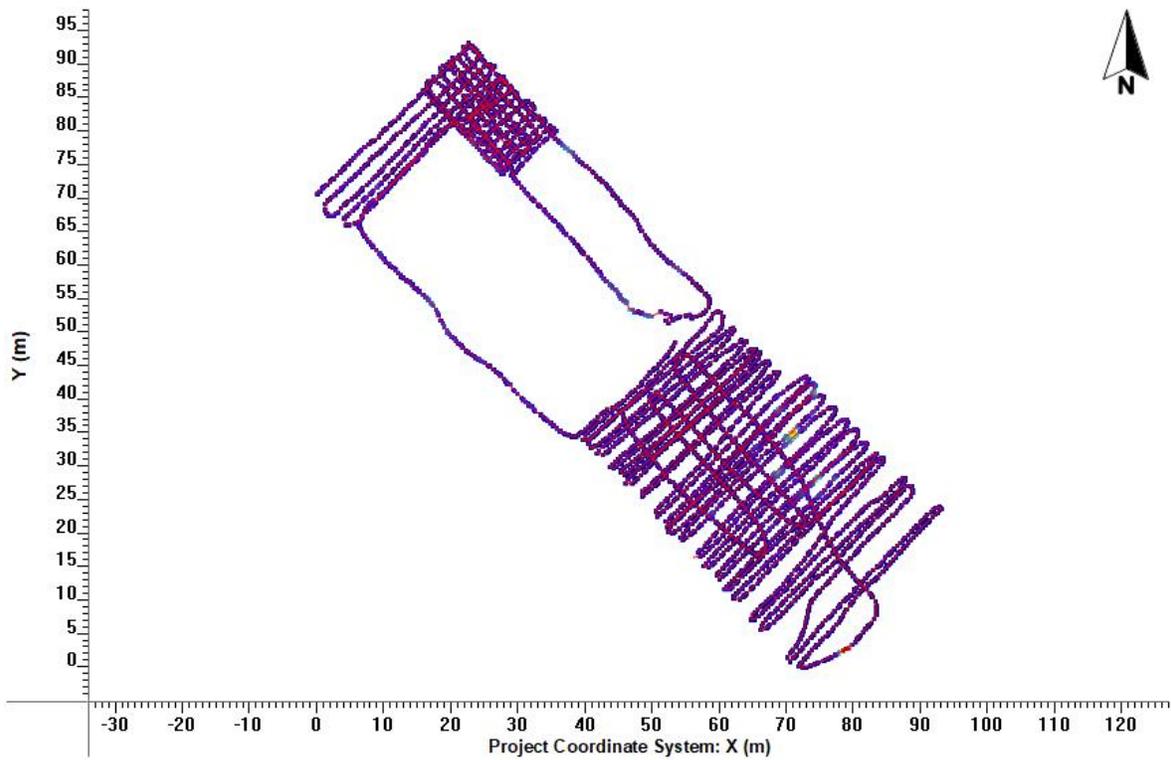


Figure 45: Plan niveau des réflecteurs GPR - profondeur 3,15 m

L'interprétation des données par tranches de profondeur (Figures 33-45) permet de préciser les hypothèses émises au lien avec l'interprétation visuelle préliminaire des données (Figure 32). De façon générale, les réflecteurs observés suggèrent la présence de structures enfouies et détectables jusqu'à une profondeur de 1,60 m. Dans la portion nord-ouest de la propriété (derrière l'école et près des aires de jeu), les principaux réflecteurs correspondent vraisemblablement à des remontées ponctuelles du socle rocheux ou à des interférences associées aux structures métalliques supportant les modules de jeux. Dans la portion SO de la propriété, les réflecteurs identifiés correspondent vraisemblablement à des hétérogénéités au sein du remblai (p. ex. : blocs et cailloux) ou aux structures associées aux installations septiques. Les secteurs caractérisés par l'absence de réflecteurs sont ici interprétés comme des milieux exempts d'hétérogénéité en termes de constante diélectrique ou de zones se trouvant en deçà de la profondeur de pénétration des ondes radar. Il est à noter que la pente naturelle du socle rocheux devrait impliquer des épaisseurs de remblais plus importantes à l'extrémité sud-ouest de la propriété. En ce sens, il n'est pas exclu que la profondeur de pénétration des ondes ne permette pas de sonder la sous-surface jusqu'à la surface du roc dans ce secteur, notamment si les remblais présentent une matrice à granulométrie fine favorisant l'atténuation. La réalisation de profils avec une fréquence plus basse (p. ex. : 200 MHz) aurait pu s'avérer intéressante afin de sonder la sous-surface jusqu'à de plus grandes profondeurs.

4.1.3. Interprétation de la grille GPR #1

Cinq zones ont été identifiées pour la réalisation de quadrillages restreints (Figure 25). Ces quadrillages permettent d'évaluer de façon plus précise la position de structures enfouies. La figure 46 (A à L) illustre les résultats associés à la grille GPR #1, pour différentes tranches de profondeur.

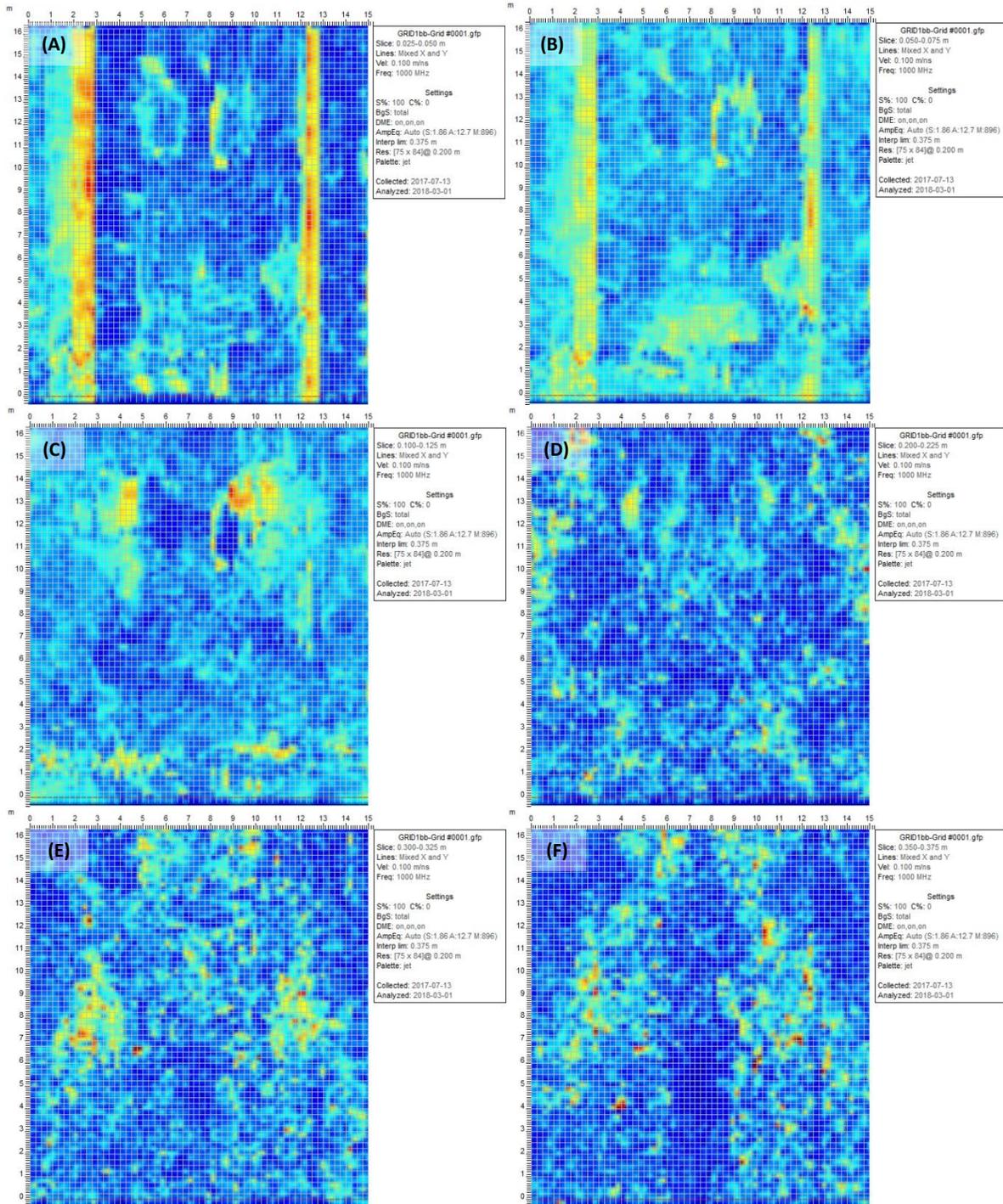


Figure 46 (1 de 2): Plans niveaux de la grille 1 (les profondeurs des plans sont définies comme suit : A=2,5cm; B=5 cm; C=10 cm; D=20 cm; E=30 cm; F=45 cm; G=40 cm; H=45 cm; I=50 cm; J=55; K=80 cm; L=162 cm)

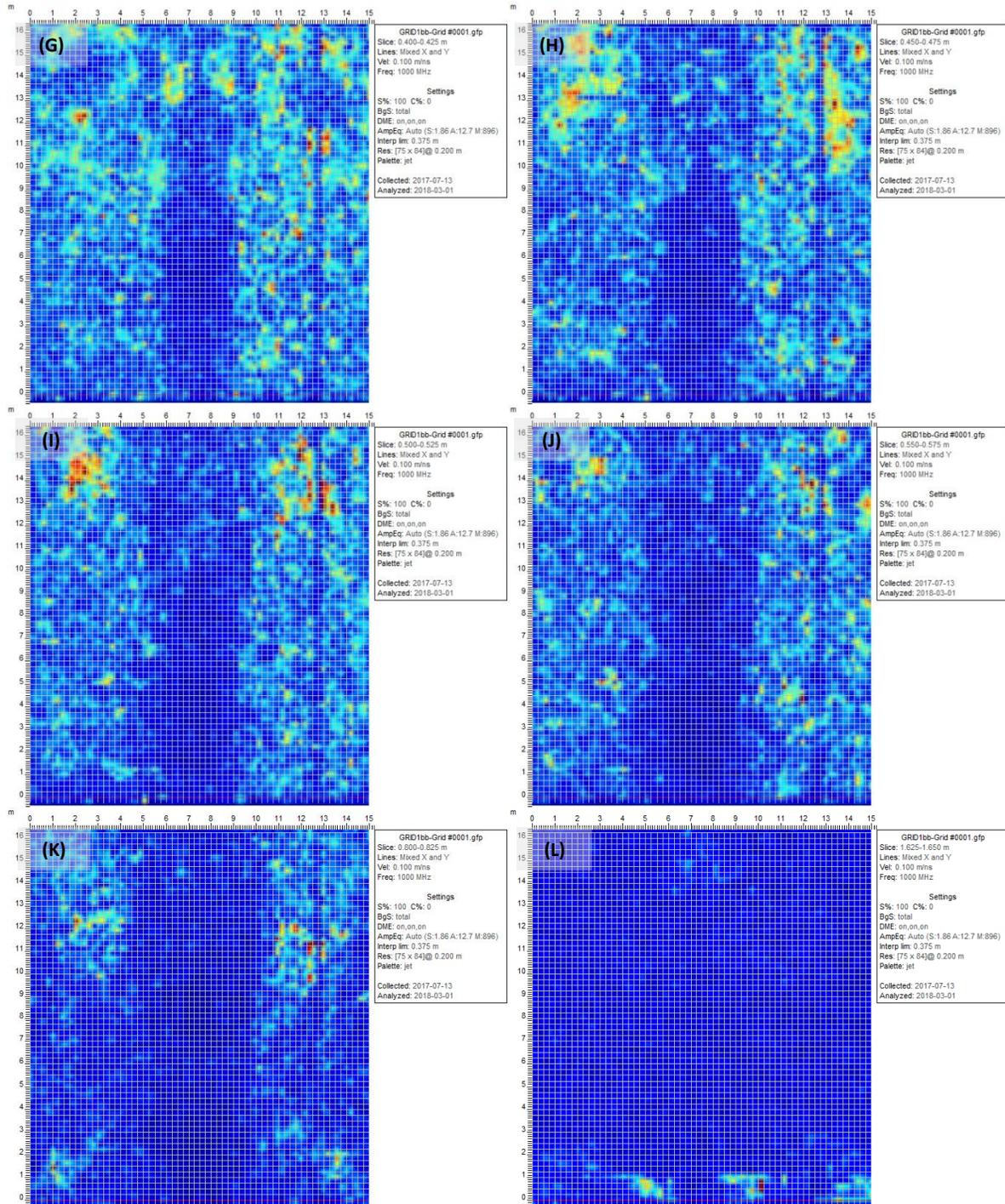


Figure 46 (2 de 2): Plans niveaux de la grille 1 (les profondeurs des plans sont définies comme suit : A=2,5cm; B=5 cm; C=10 cm; D=20 cm; E=30 cm; F=45 cm; G=40 cm; H=45 cm; I=50 cm; J=55; K=80 cm; L=162 cm). Les profondeurs plus grandes, bien que disponibles, ne sont pas montrées ici

Les données rapportées à la [figure 46](#) suggèrent la présence de structures enfouies à faible profondeur sous la surface du sol. Pour les profondeurs inférieures à 10 cm ([Figure 46 A et B](#)), deux réflecteurs rectilignes se dessinent selon une orientation parallèle à l'ordonnée des grilles. Il pourrait s'agir de tuyaux enfouis à faible profondeur. De plus, le plan collecté à une profondeur de 25 cm ([Figure 46 E](#)) tend à indiquer la présence de deux structures enfouies. Il pourrait vraisemblablement s'agir d'infrastructures associées aux installations septiques de l'école, qui seraient situées près de la limite sud-ouest du bâtiment. Outre les structures potentielles précitées, les autres réflecteurs identifiés à la [figure 46](#), lesquels sont distribués de façon non systématique dans l'espace, correspondent vraisemblablement à des hétérogénéités (p.ex. : blocs et cailloux) se trouvant au sein du remblai. Finalement, à une profondeur de 162 cm ([Figure 46 L](#)), un réflecteur est observé sur toute la largeur du profil, en $y=0$. Il pourrait vraisemblablement s'agir de remblai se trouvant à la base du solage de l'école. Ce réflecteur s'observe jusqu'à 1,9 m de profondeur (non illustré à la [figure 46](#)). Les zones en bleu sur les différents plans de la [figure 46](#) peuvent représenter des secteurs homogènes et exempts de structures enfouies ou des zones où l'atténuation causée par les particules fines masque le signal radar. En complément aux interprétations rapportées ci-dessus, la [figure 47](#) illustre le profil en coupe (2D vertical selon l'abscisse) en $x=44$ cm, alors que la [figure 48](#) illustre la sélection d'une hyperbole pour l'estimation de la vitesse de propagation de l'onde GPR. Cette dernière suggère une vitesse de propagation de l'onde radar de 0,110 m/ns.

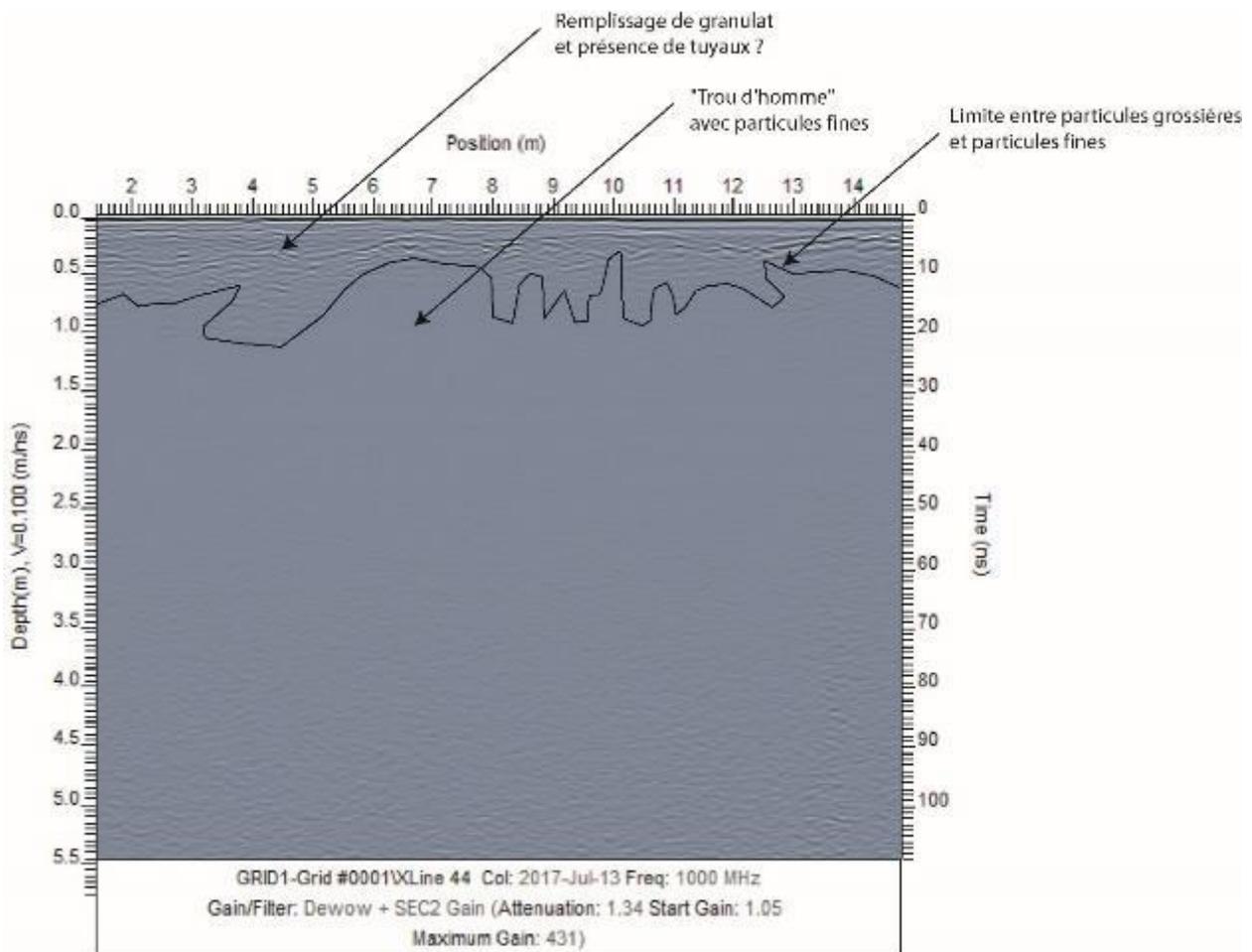


Figure 47 : Profil montrant l'interface entre granulat et particules fines, ligne X44 de la grille 1

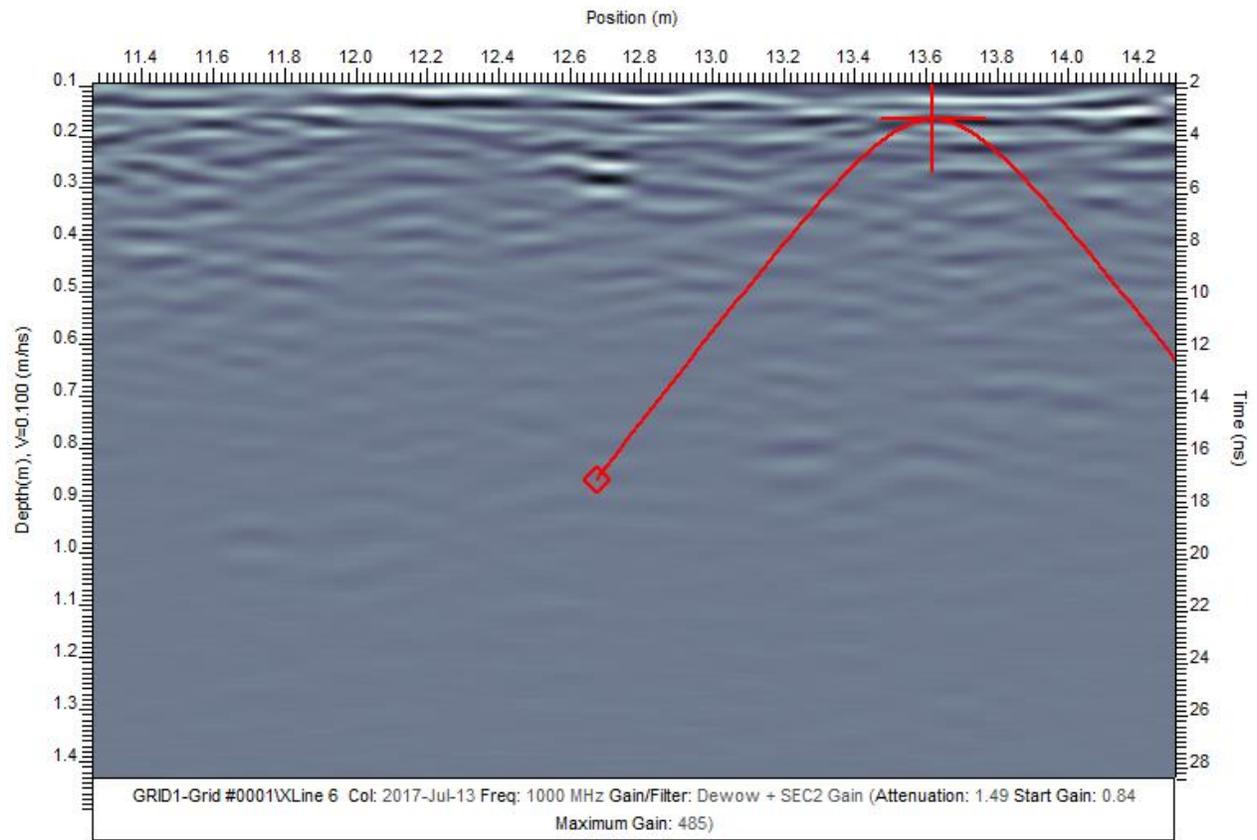


Figure 48 : Mesure de la vélocité ligne X6 de la grille sous le stationnement

4.1.4. Interprétation de la grille GPR #2

Tout comme la grille GPR #1, la grille GPR #2 est située près de la limite sud-ouest du terrain de l'école, et les deux grilles pourraient permettre de représenter la continuité de structures enfouies se trouvant entre l'école et la rue (voir figure 25 pour la localisation). La figure 49 (A à L) illustre les résultats associés à la grille 2, pour différentes tranches de profondeur.

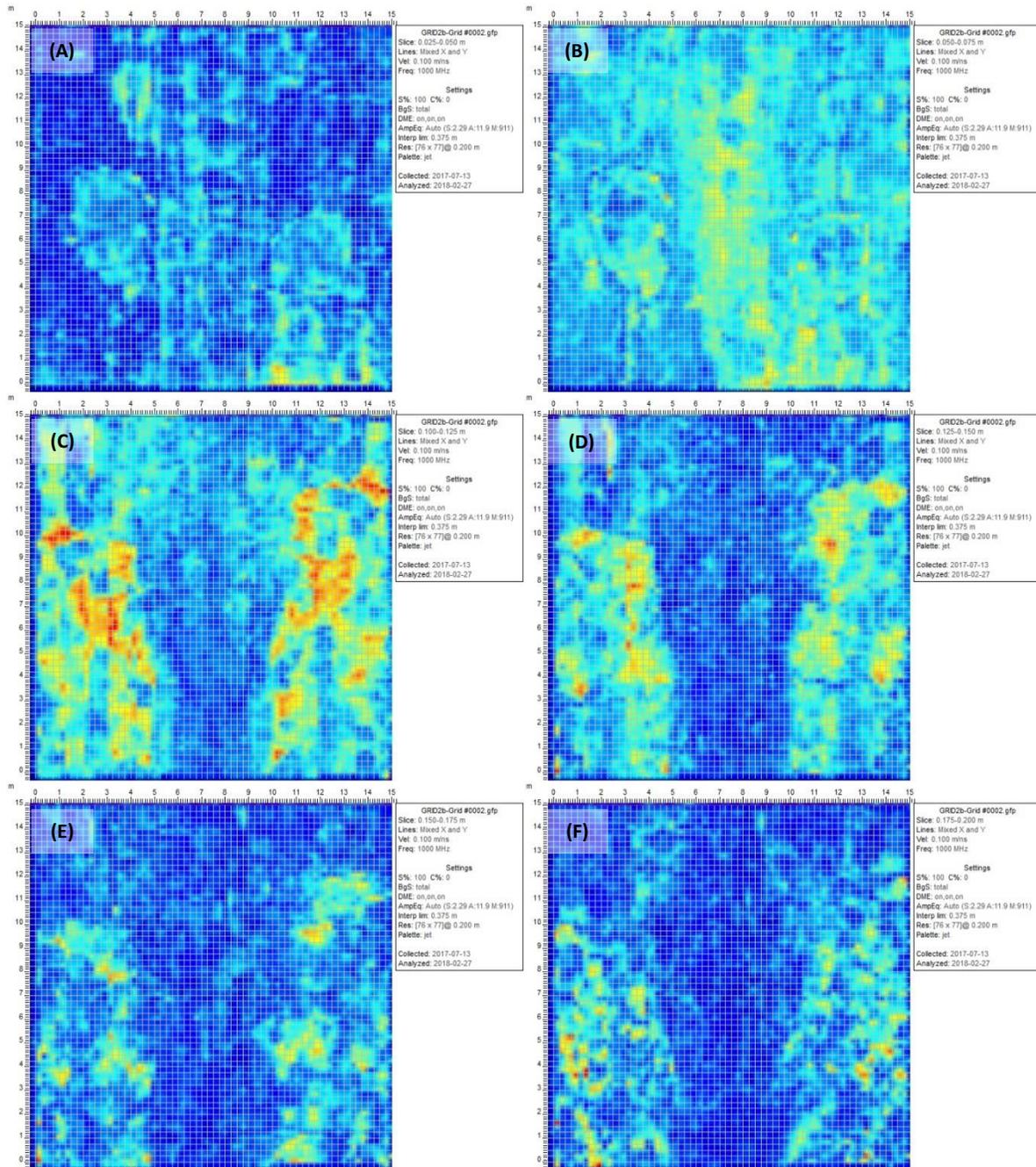


Figure 49 (1 de 2): Plans niveaux de la grille 2 (les profondeurs des plans sont définies comme suit : A=2,5cm; B=5 cm; C=10 cm; D=12,5 cm; E=15 cm; F=17,5 cm; G=22,5 cm; H=35 cm; I=42,5 cm; J=47,5; K=50 cm; L=62,5 cm)

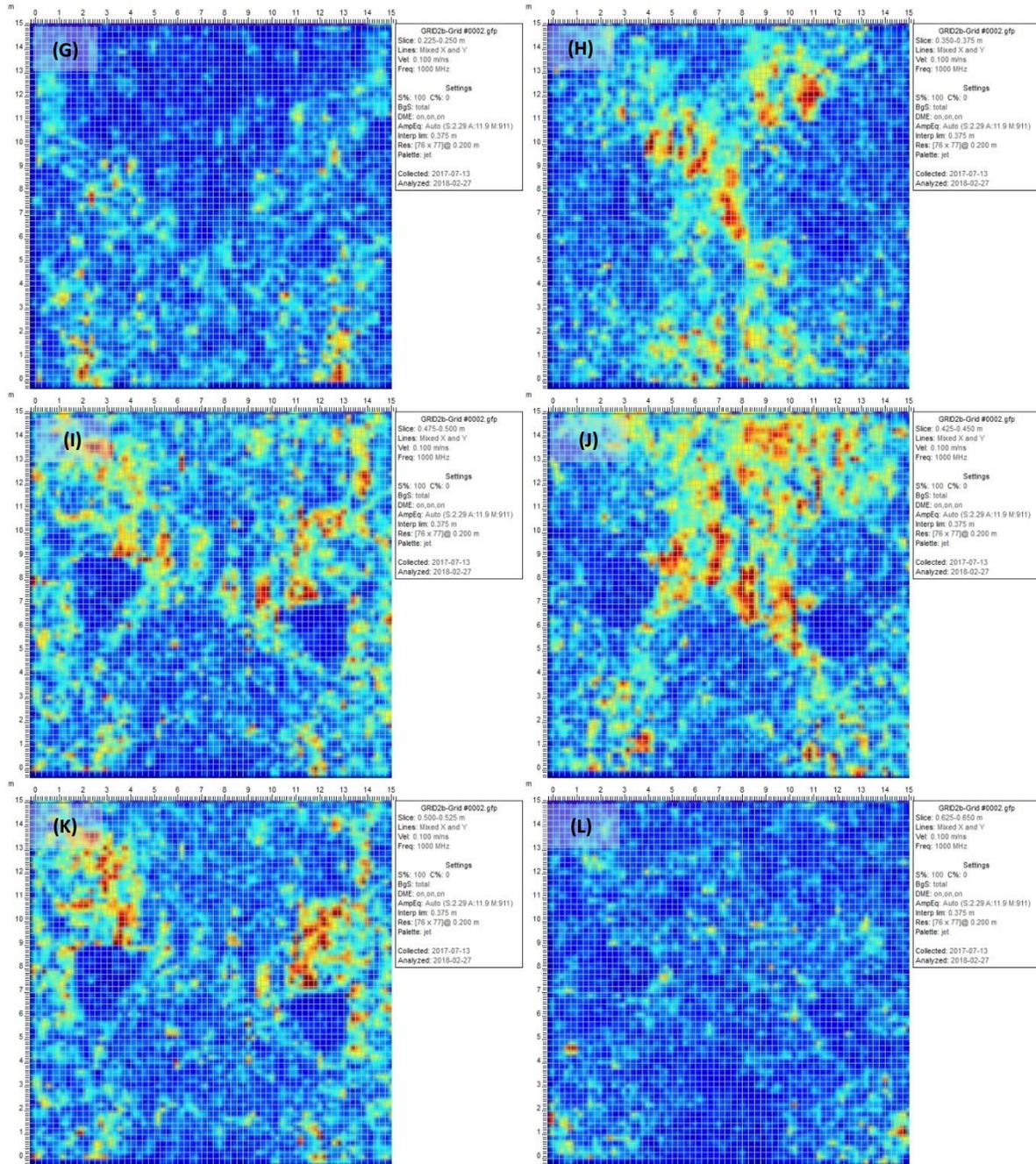


Figure 49 (2 de 2): Plans niveaux de la grille 2 (les profondeurs des plans sont définies comme suit : A=2,5cm; B=5 cm; C=10 cm; D=12,5 cm; E=15 cm; F=17,5 cm; G=22,5 cm; H=35 cm; I=42,5 cm; J=47,5; K=50 cm; L=62,5 cm). Les profondeurs plus grandes, bien que disponibles, ne sont pas montrées ici

Comme c'était le cas pour la grille GPR #1, la grille GPR #2 suggère la présence de structures enfouies. Les données rapportées pour les tranches de profondeur allant de 5 cm à 10 cm tendent à révéler deux structures enfouies, ces dernières ayant des formes plus ou moins circulaires (centrées sur les coordonnées [3;9] et [13;11] aux figures 49 B et C). Les données collectées à plus grande profondeur (p. ex. : voir le plan à 12,5 cm de profondeur, Figure 49 D et plans subséquents) tendent à indiquer la

présence de deux bandes de réflecteurs clairement définis, de part et d'autre de la portion centrale de la grille selon l'abscisse. Ces réflecteurs correspondent selon toute vraisemblance à la position supérieure de structures anthropiques enfouies. Ces bandes deviennent moins distinctes avec la profondeur, possiblement en raison de l'atténuation des ondes. Finalement, deux structures circulaires sont clairement visibles sur les figures 49 I, J et K (aux positions [3;7] et [12;6] selon les coordonnées de la grille). Ces structures pourraient vraisemblablement représenter des infrastructures associées aux installations septiques. À des profondeurs excédant 80 cm, les réflecteurs sont plus rares et moins marqués. Les structures anthropiques ne se démarquent plus dans les données. À cette profondeur, les antennes ne sont plus autant efficaces et l'information est limitée. Un colmatage des installations septiques par du matériel fin pourrait expliquer cette observation.

4.1.5. Interprétation de la grille GPR #3, #4 et #5

Les données associées aux grilles GPR #3, 4 et 5 sont présentées, par tranches de profondeur, aux figures 50 à 52, respectivement. De façon générale, les trois grilles permettent d'illustrer certaines variations hétérogènes en ce qui a trait à la distribution spatiale des réflecteurs. Néanmoins, en l'absence de réflecteurs positionnés suivant un patron systématique (p. ex. : en l'absence de réflecteurs présentant des formes ou orientations particulières), il semble juste de proposer que les données radar ne suggèrent pas la présence d'infrastructures anthropiques enfouies, mais plutôt des assemblages hétérogènes de remblai et/ou la surface du socle rocheux. Les données associées à ces grilles ne seront pas discutées en détails.

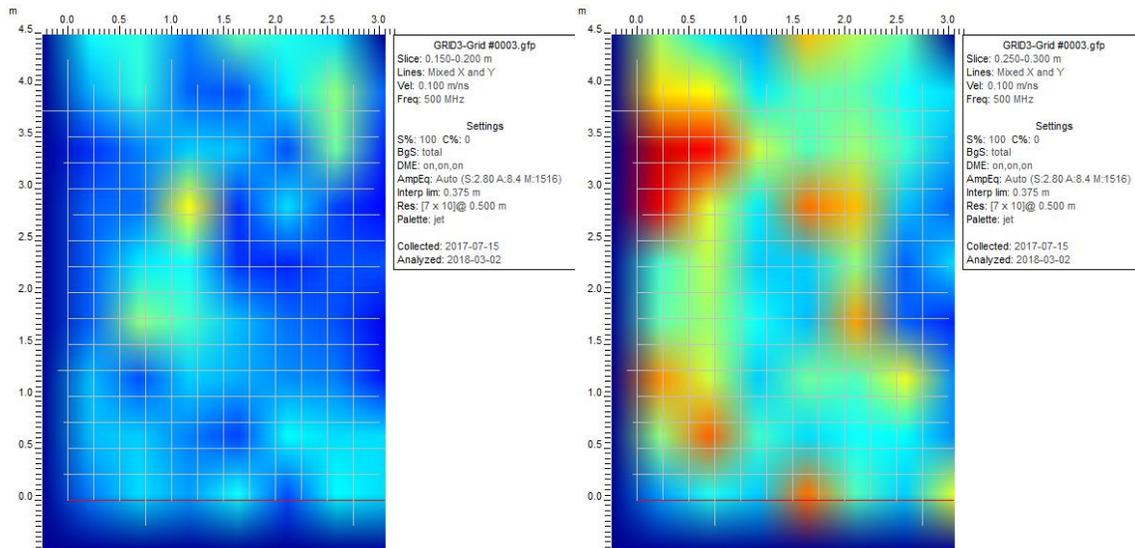


Figure 50 (1 de 3): Plans niveaux de la grille 3 (les profondeurs des plans sont indiquées dans les encadrés)

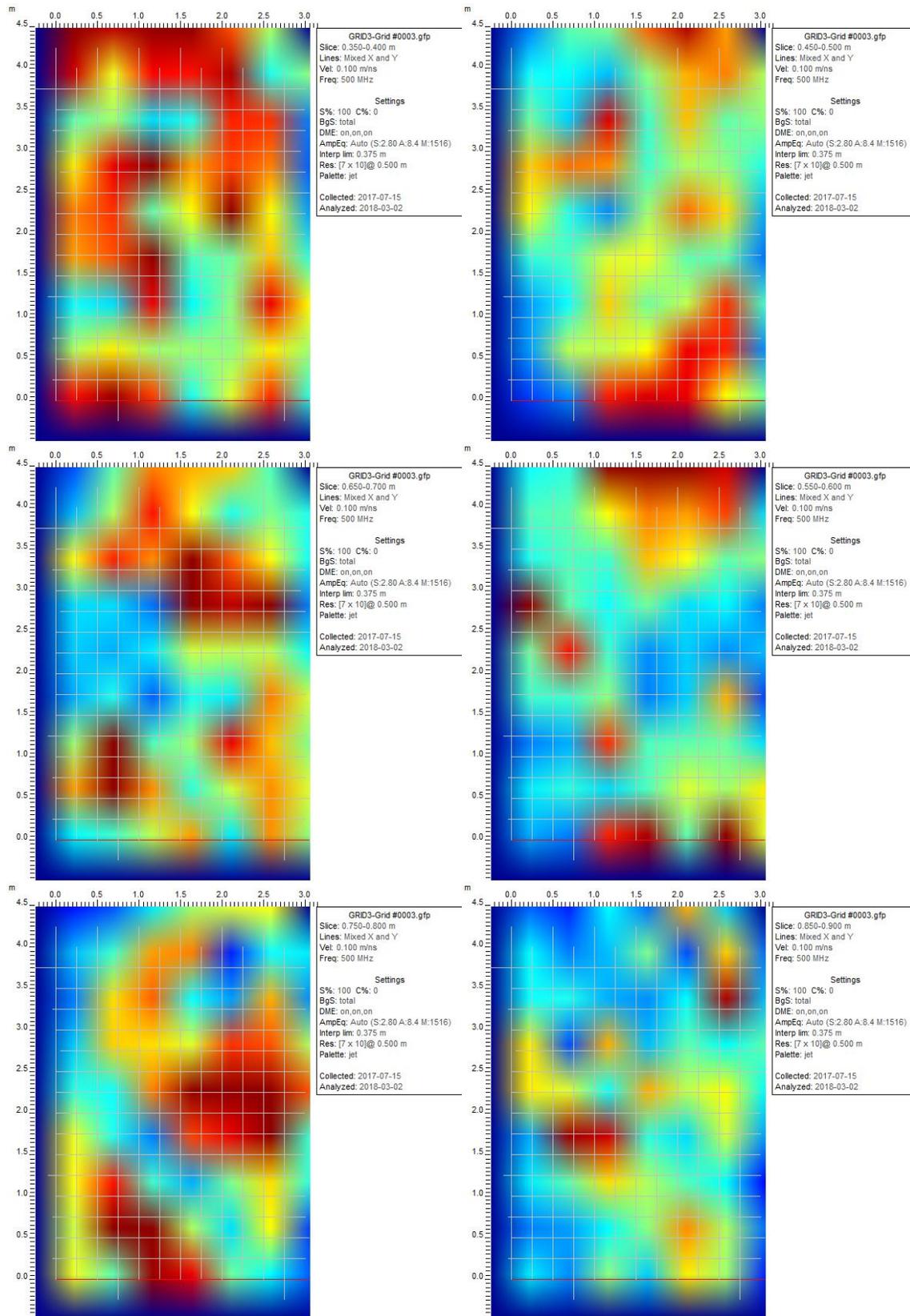


Figure 50 (2 de 3): Plans niveaux de la grille 3 (les profondeurs des plans sont indiquées dans les encadrés)

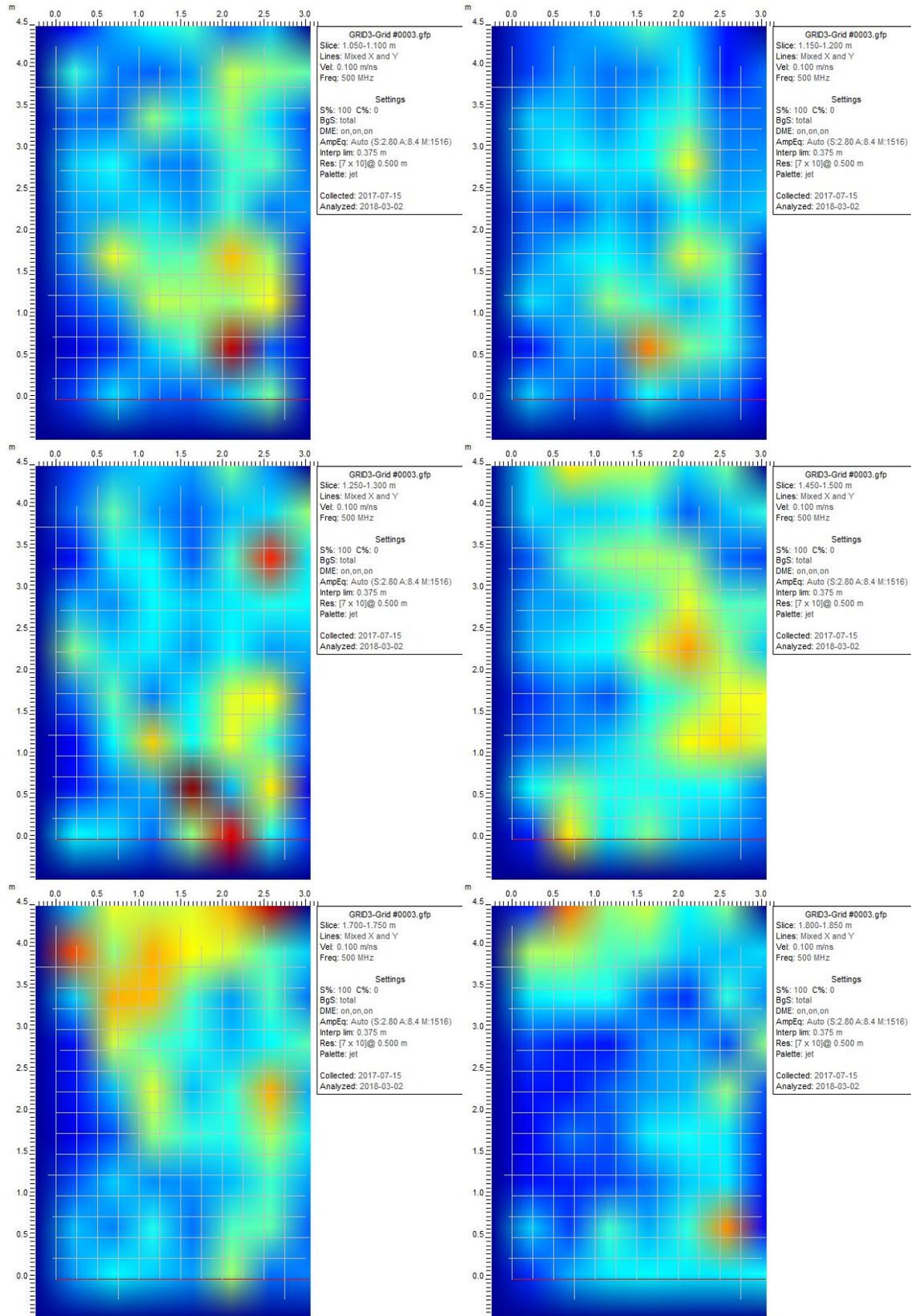


Figure 50 (3 de 3): Plans niveaux de la grille 3 (les profondeurs des plans sont indiquées dans les encadrés)

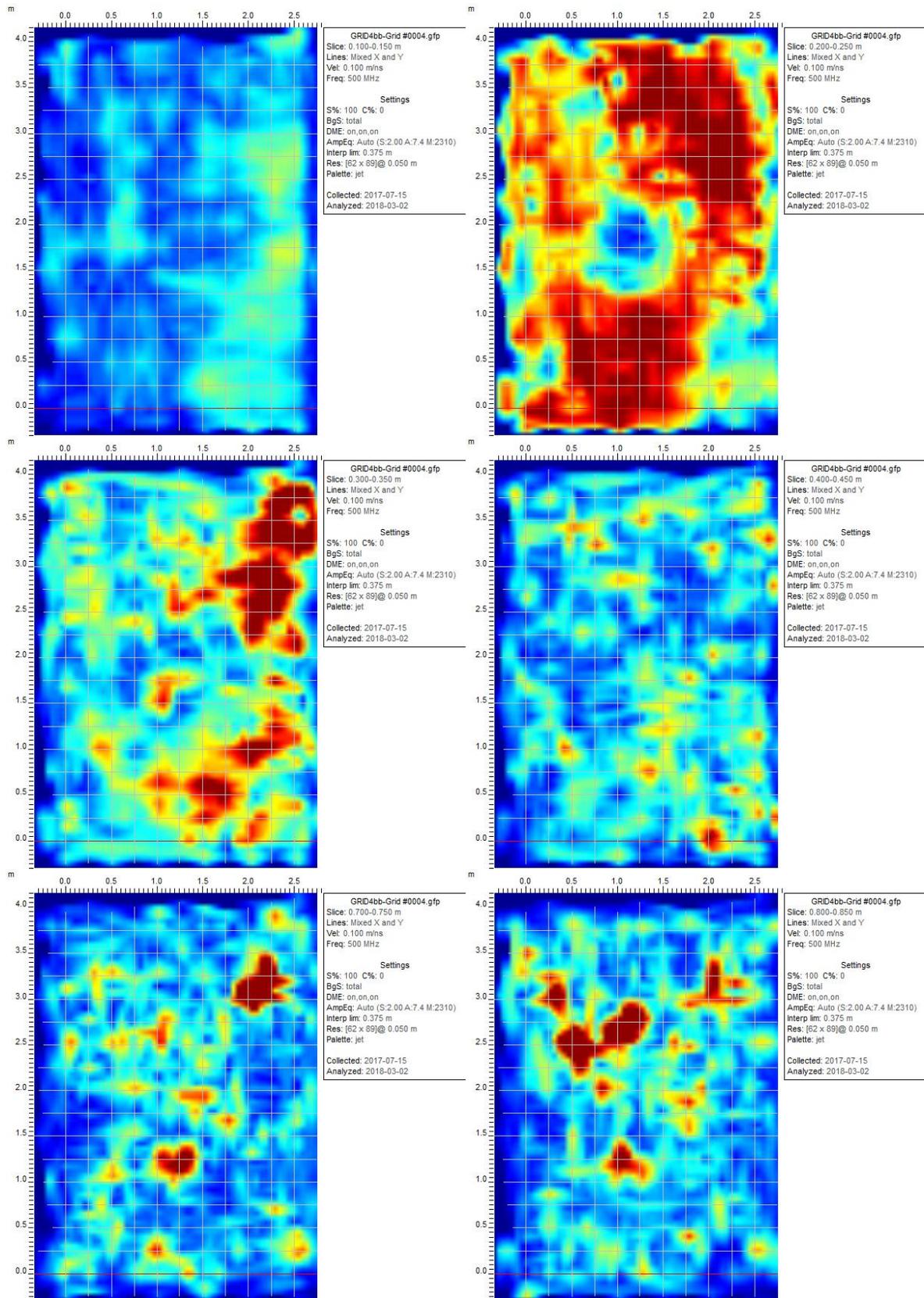


Figure 51 (1 de 3): Plans niveaux de la grille 4 (les profondeurs des plans sont indiquées dans les encadrés)

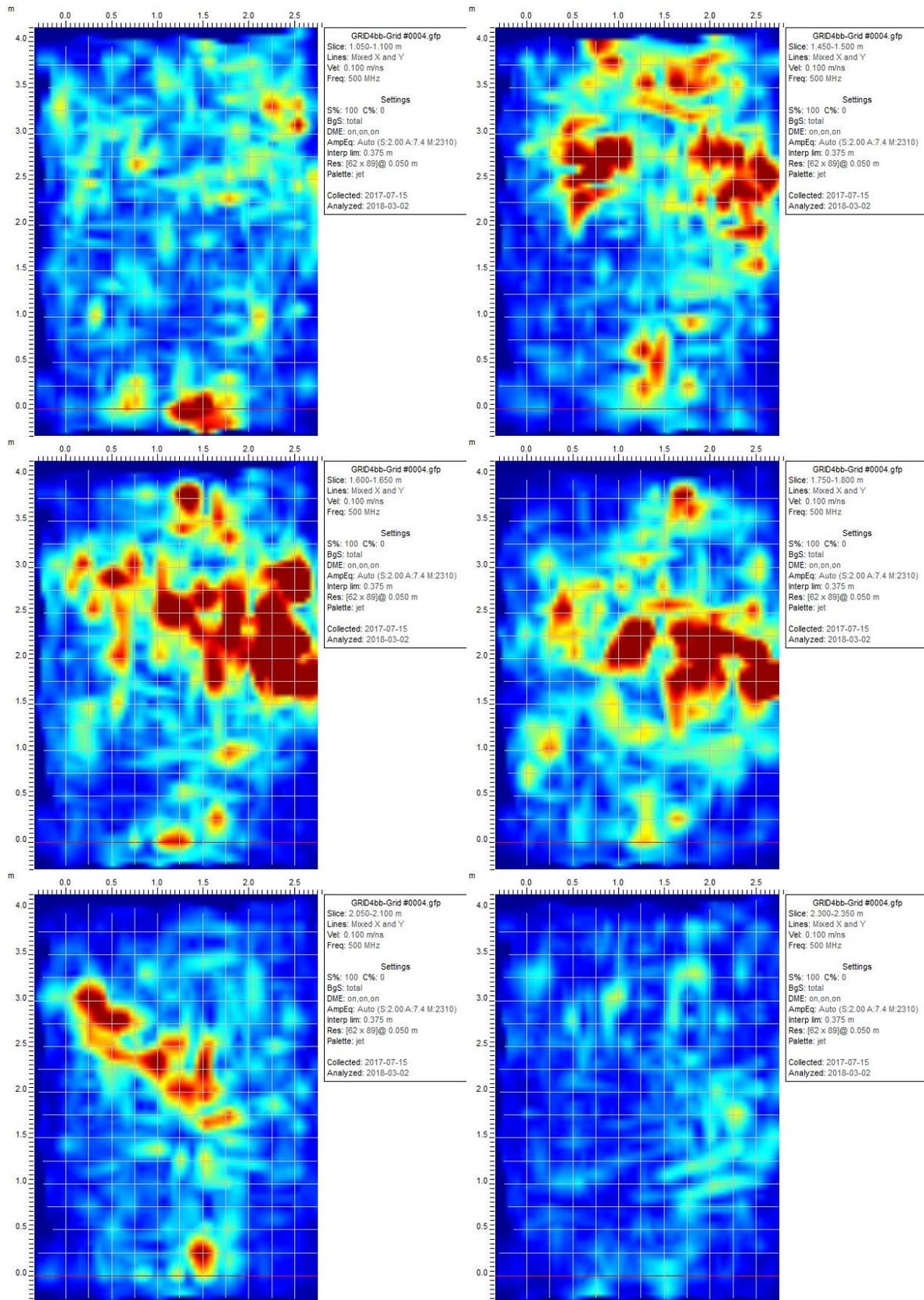


Figure 51 (2 de 3): Plans niveaux de la grille 4 (les profondeurs des plans sont indiquées dans les encadrés)

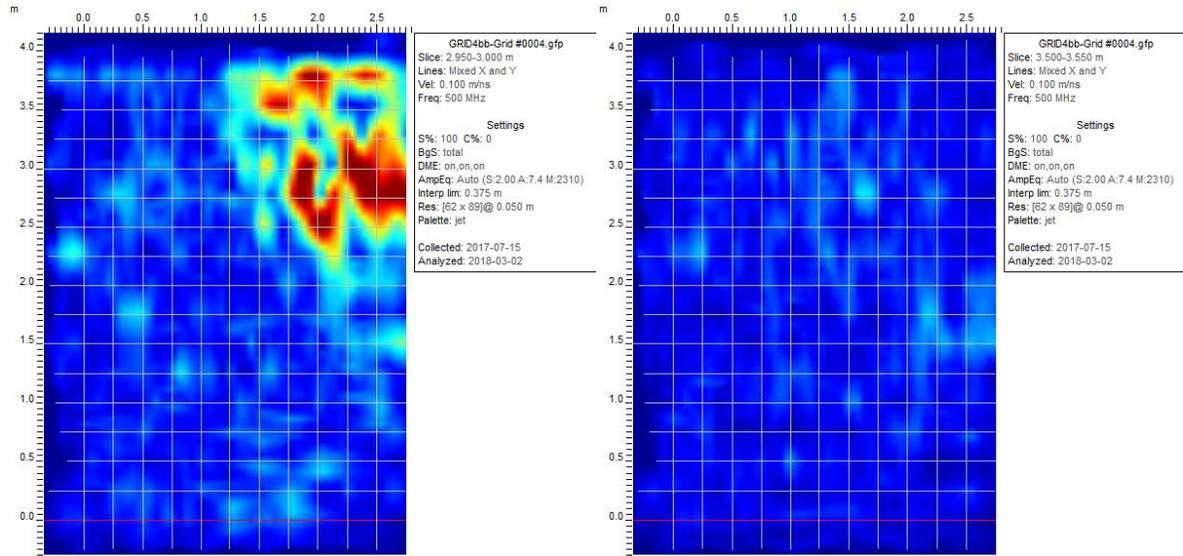


Figure 51 (3 de 3): Plans niveaux de la grille 4 (les profondeurs des plans sont indiquées dans les encadrés)

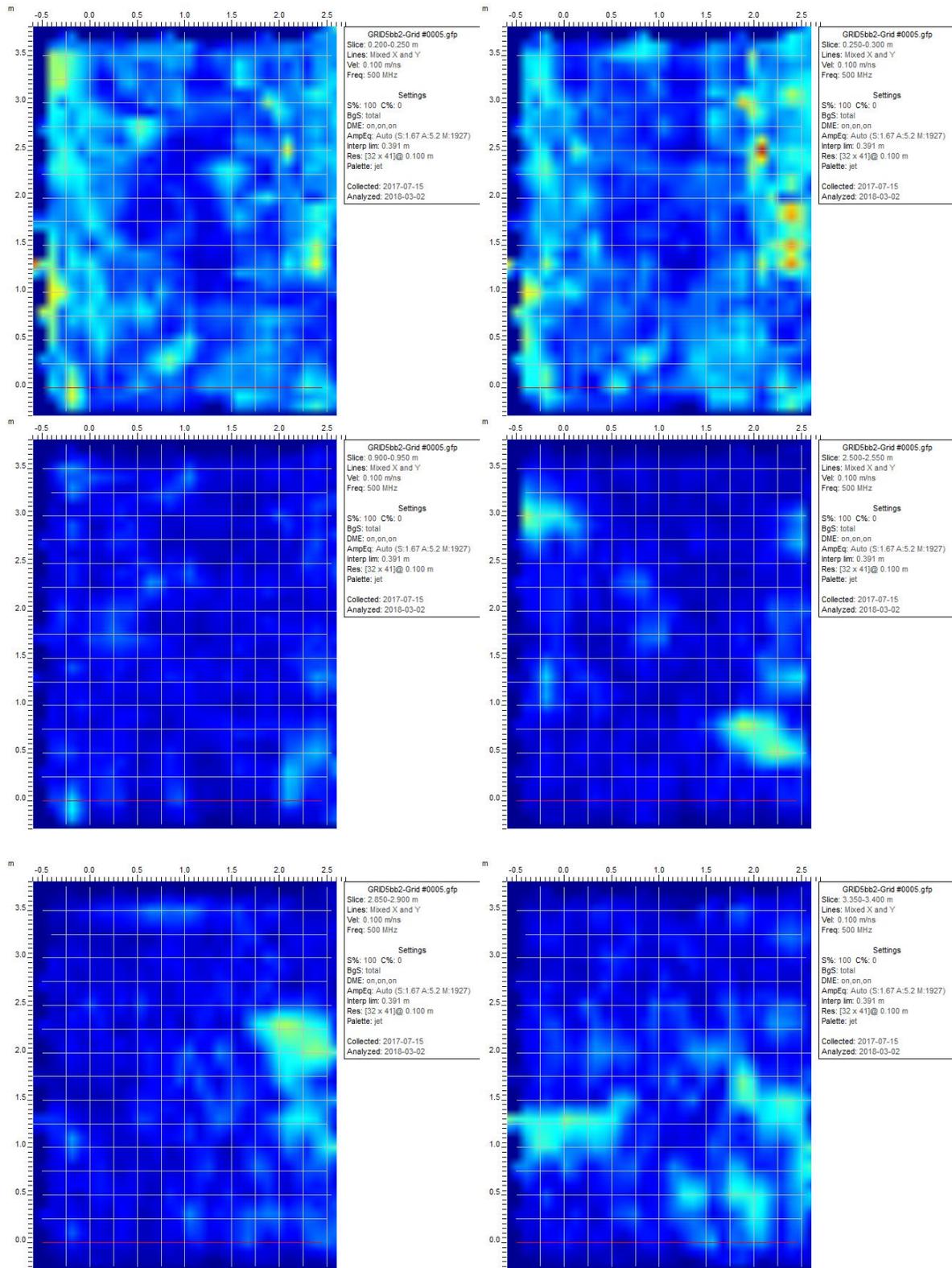


Figure 52 : Plans niveaux de la grille 5 (les profondeurs des plans sont indiquées dans les encadrés)

4.2. Site minier Darius – O'Brien

Les travaux réalisés dans le cadre de la présente étude au niveau du site Darius – O'Brien consistent en des essais préliminaires visant à évaluer l'efficacité d'un appareil *Pulse Ekko Pro* équipé d'antennes de 100 MHz pour l'évaluation de la structure de digues en sous-surface. Les données collectées à ce site ont permis de couvrir la digue ceinturant le secteur nord de l'aire d'accumulation de rejets miniers (Figure 53). Les données GPR ont été collectées en simultanément avec l'acquisition de données GPS, permettant ainsi une localisation précise des données en plan (x,y). Dans le cas présent, l'utilisation d'un GPS portable n'offre pas la possibilité d'obtenir des profils topographiques fiables. En ce sens, seules les données en plan (x,y) sont utilisées comme référence de localisation, alors que les données selon l'axe vertical (z) sont traitées en termes de profondeur sous la surface, et non d'altitude absolue. Par mesure de simplification, les données issues des six sections rectilignes de la digue sont présentées de façon séparée aux figures 54 à 59. En guise d'analyse préliminaire, les données sont interprétées principalement dans l'objectif d'évaluer si l'appareil radar permet de détecter des zones hétérogènes au sein de la digue. Ultiment, lors de travaux ultérieurs, ces informations permettront d'évaluer le potentiel d'application de la méthode radar pour le suivi de l'intégrité de digues en contexte minier.

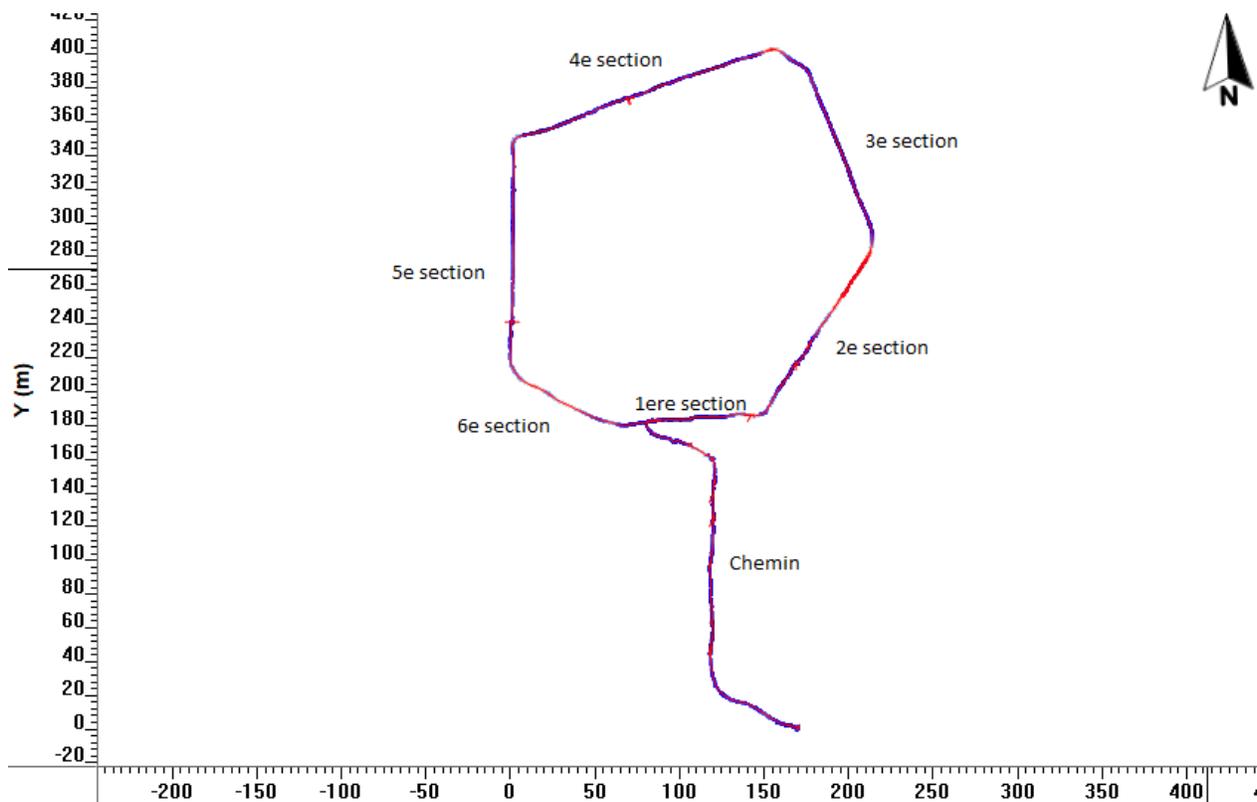


Figure 53 : localisation des données GPR au site Darius – O'Brien

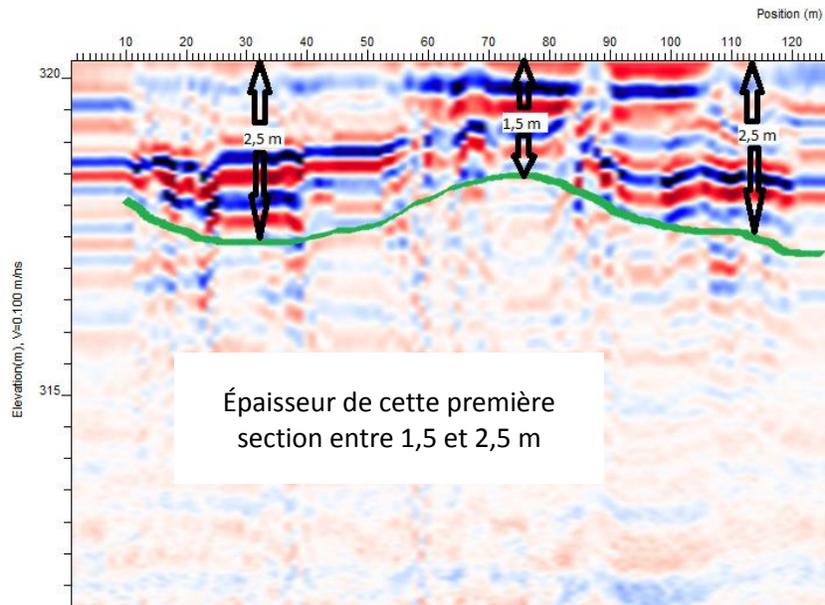


Figure 54 : Profil #50 (la digue), 1ère section droite : de 0 à 120 m

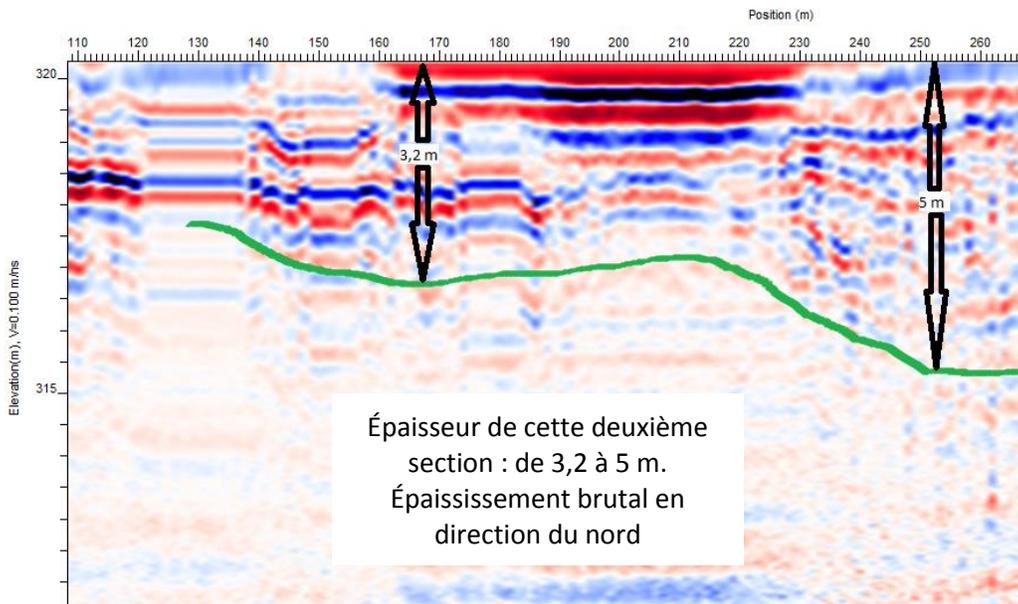


Figure 55: Profil #50, 2° section droite : de 120 à 260 m

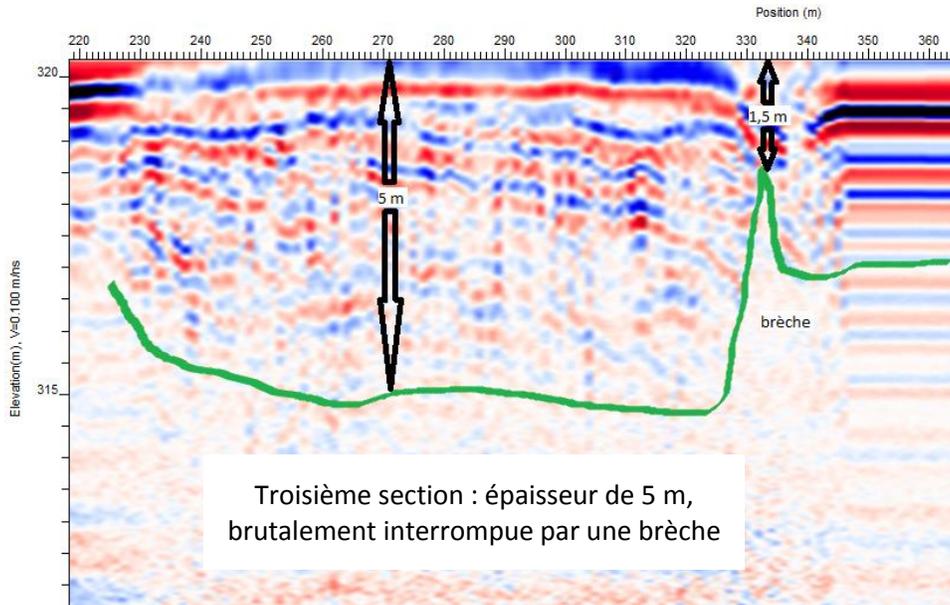


Figure 56 : Profil #50, 3^e section droite : de 260 à 370 m

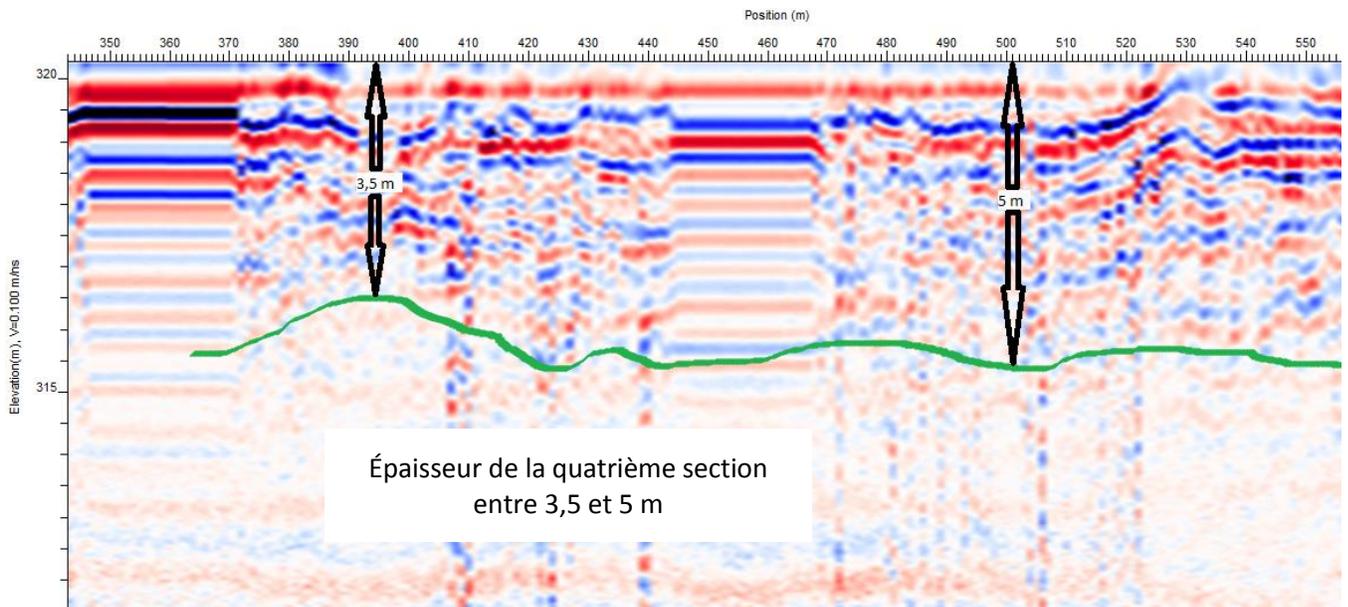


Figure 57 : Profil #50, 4^e section droite : de 370 à 550 m

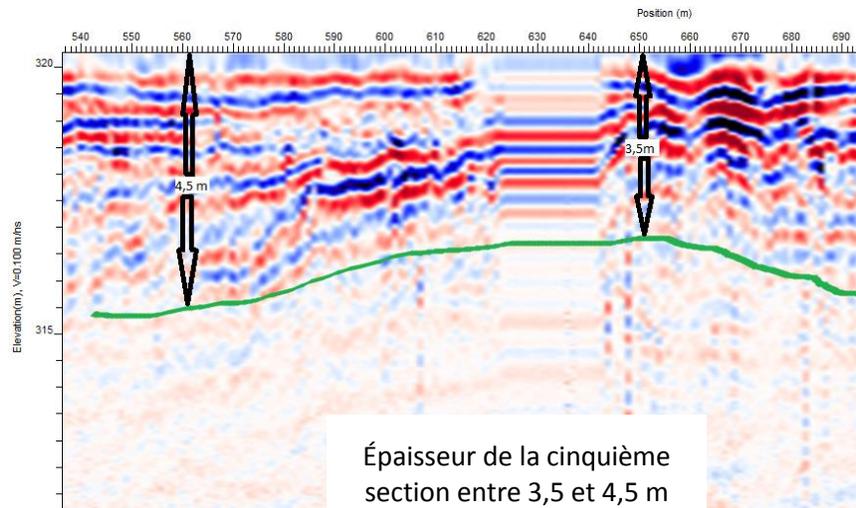


Figure 58 : Profil #50, 5^e section droite : de 550 à 690 m

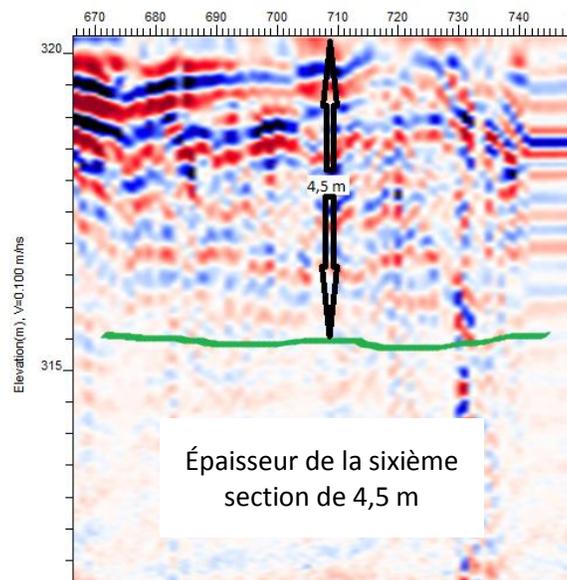


Figure 59 : Profil #50, 6^e section droite : de 690 à 740 m

De façon générale, les données GPR recueillies le long de la digue révèlent des épaisseurs allant de 1,5 à 5m, en assumant une vitesse de propagation de l'onde de 0,1 m/ns. Plusieurs réflecteurs parallèles sont observés au sein de la digue, ce qui pourrait refléter la présence de couches au sein du matériel de remblai utilisé pour la création des digues. Une seule discontinuité marquée s'observe au sein des données, près de la position 330 m de la 3^e section de digue. Une évaluation plus approfondie des conditions de terrain, à l'été 2018, devrait permettre de mieux identifier la cause de cette observation. Pour ce qui est de la section 4 de la digue, immédiatement au sud d'un cours d'eau en drainant les exfiltrations, les données ne permettent pas d'identifier de discontinuités majeures. En ce sens, il n'est pas exclu que les exfiltrations observées à la base de la digue soient le résultat de processus d'écoulement diffus au sein de la digue et du matériel géologique sous-jacent. Ici encore, des analyses plus approfondies devront être effectuées afin de préciser les conditions d'écoulement au sein de la digue. Les données collectées dans le cadre de la présente étude confirment le potentiel d'application de la méthode GPR pour l'évaluation de l'intégrité de digues en contexte minier.

4.3. Site d'extraction de sable et gravier

Cinq profils GPR ont été réalisés au niveau de la base d'un site d'extraction de sable et gravier afin d'évaluer le potentiel d'application du GPR pour la délimitation de secteurs affectés par remaniement (excavation et remblayage subséquent) (Figure 60). De telles informations s'avèrent spécialement pertinentes pour le repérage de déchets anthropiques ayant pu être déposés au fond de certaines excavations. Dans le cadre de la présente étude, les travaux se limitent à l'évaluation du potentiel d'application du GPR pour la détection de zones sous-terraines où la structure naturelle des horizons stratigraphiques est perturbée. Afin d'évaluer l'étendue verticale des zones de remaniement, la vitesse de propagation de l'onde radar a été estimée sur la base d'hyperboles observables au sein du jeu de données (Figure 61). La vitesse de propagation ainsi obtenue est de $0,1 \text{ m/ns}$, ce qui correspond à un environnement sableux non saturé. Les données associées aux profils radar sont présentés aux figures 62 à 66.

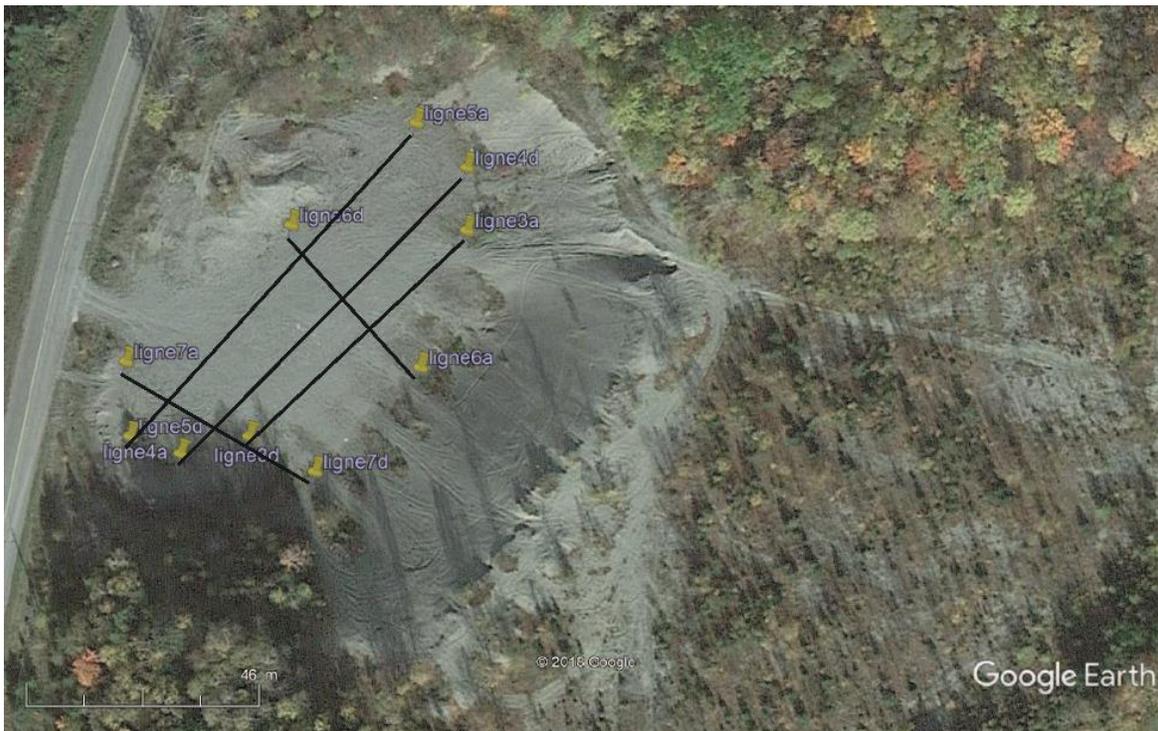


Figure 60 : Situation des lignes de profils au GPR (d=départ, a=arrivée), site de la sablière

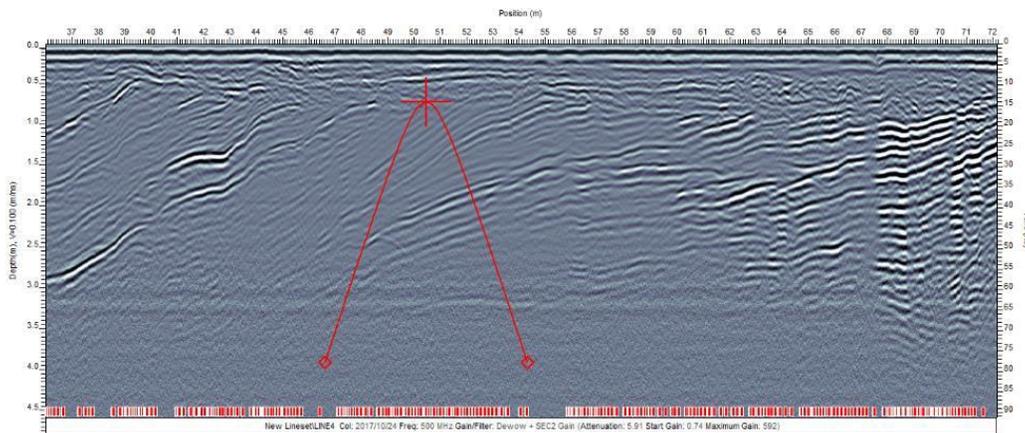


Figure 61 : Mesure de la vitesse, site de la sablière

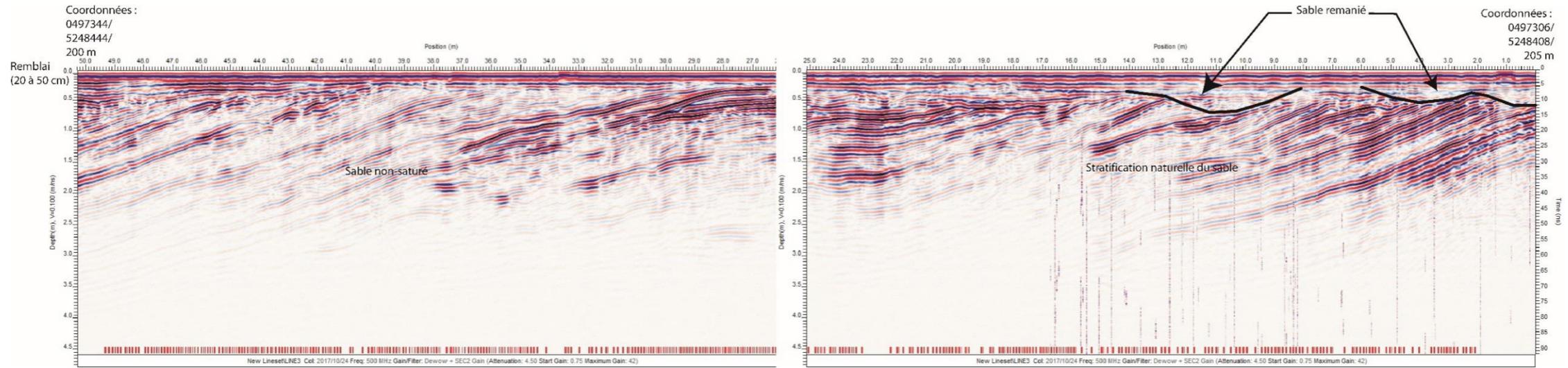


Figure 62 : Coupe du long de la sablière, ligne 3

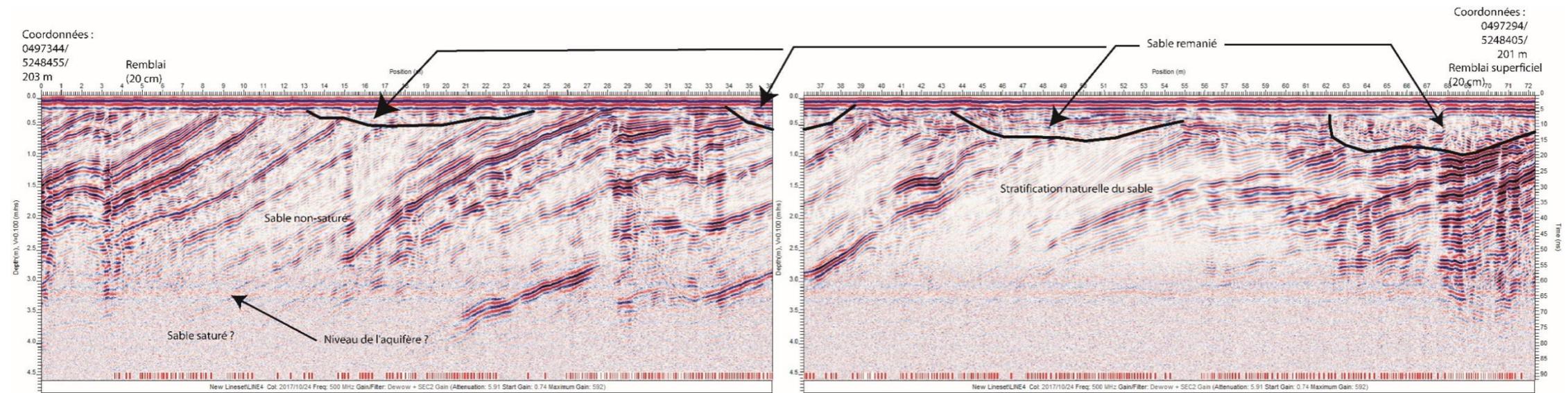


Figure 63: Coupe du long de la sablière, ligne 4

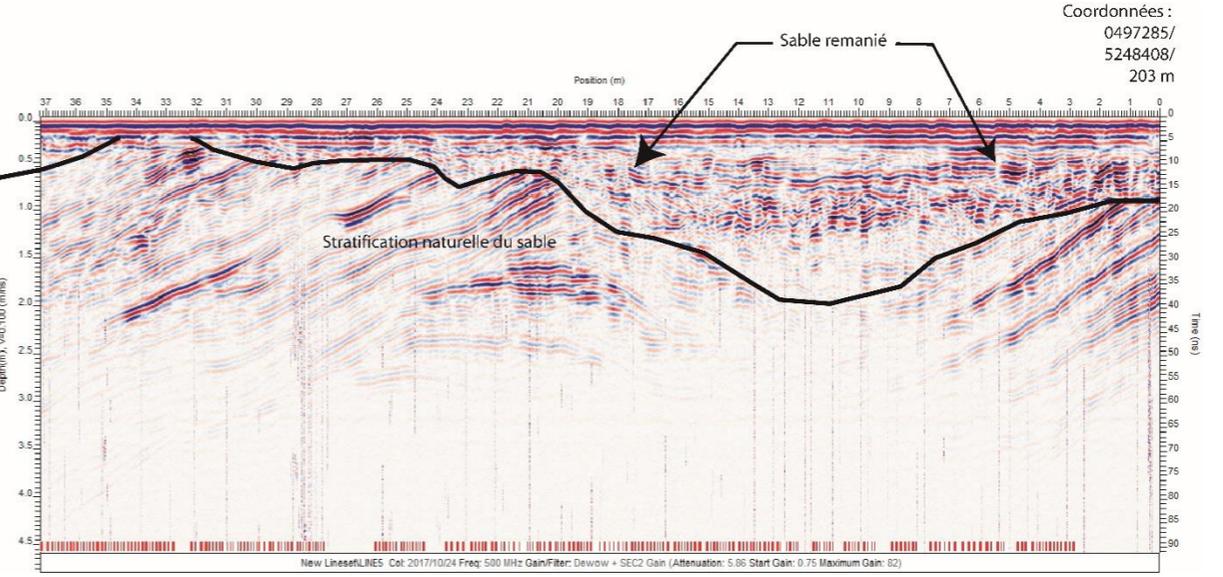
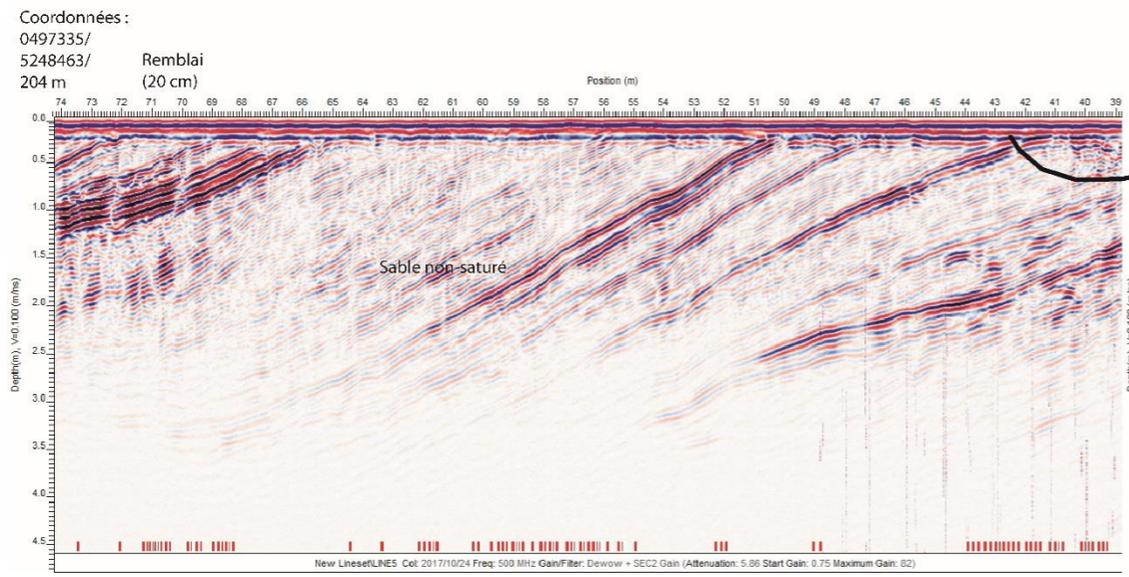


Figure 64 : Coupe du long de la sablière, ligne 5 (Lignes 3, 4 et 5 sont parallèles)

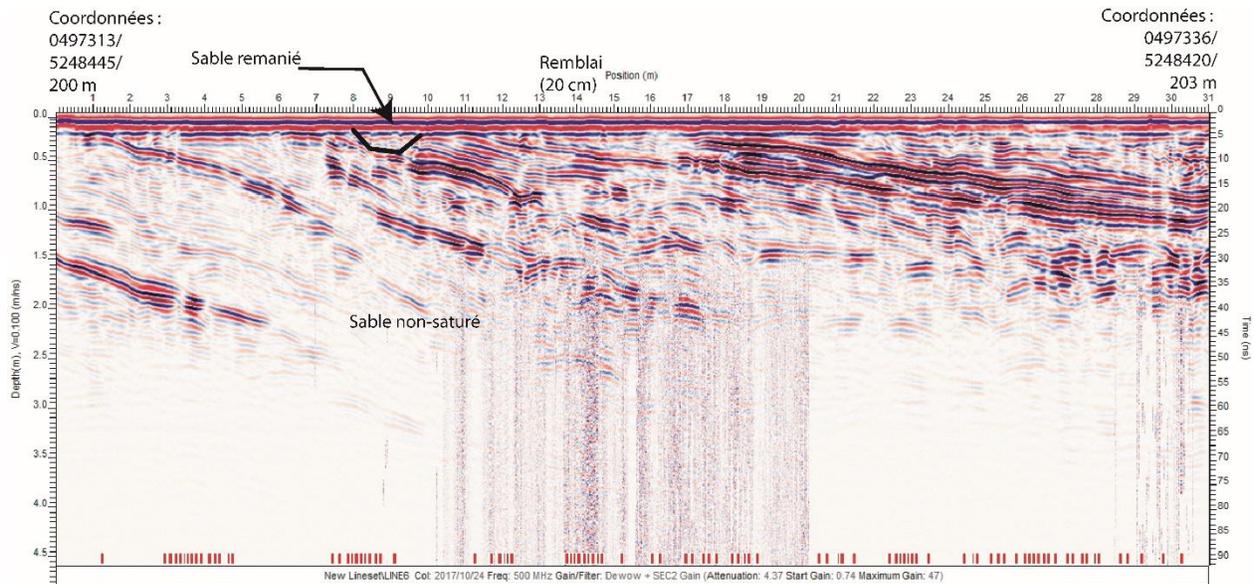


Figure 65: Coupe en largeur de la sablière, ligne 6

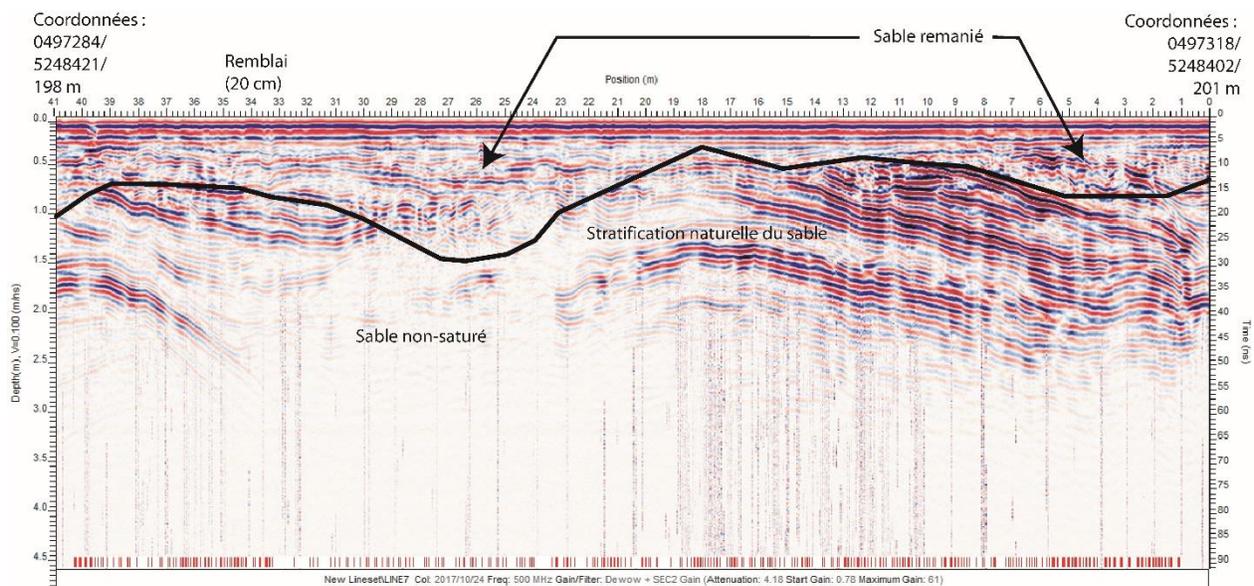


Figure 66 : Coupe en largeur de la sablière, ligne 7 (6 et 7 sont parallèles)

Les profils de la sablière montrent clairement des zones de remaniement de surface où les données suggèrent la présence d'irrégularités dans le sol. Une épaisseur de remblai de sable a été déposée par-dessus le tout pour niveler la surface du sol. Le profil de la ligne 4 semble montrer le niveau de l'aquifère. Cependant cette observation n'a pas été confirmée sur les autres profils. Il n'est donc pas exclu que le réflecteur puisse correspondre à une interférence ou une onde de basse fréquence.

Les données GPR associées aux différents profils permettent, dans l'ensemble, de délimiter une zone sous laquelle les dépôts de sable et gravier ont été remaniés par l'action humaine (Figure 67). En ce sens, les travaux réalisés dans le cadre de la présente étude permettent de conclure que la méthode GPR s'avère efficace pour la délimitation de zones perturbées sous les sites d'extraction de sable et gravier.

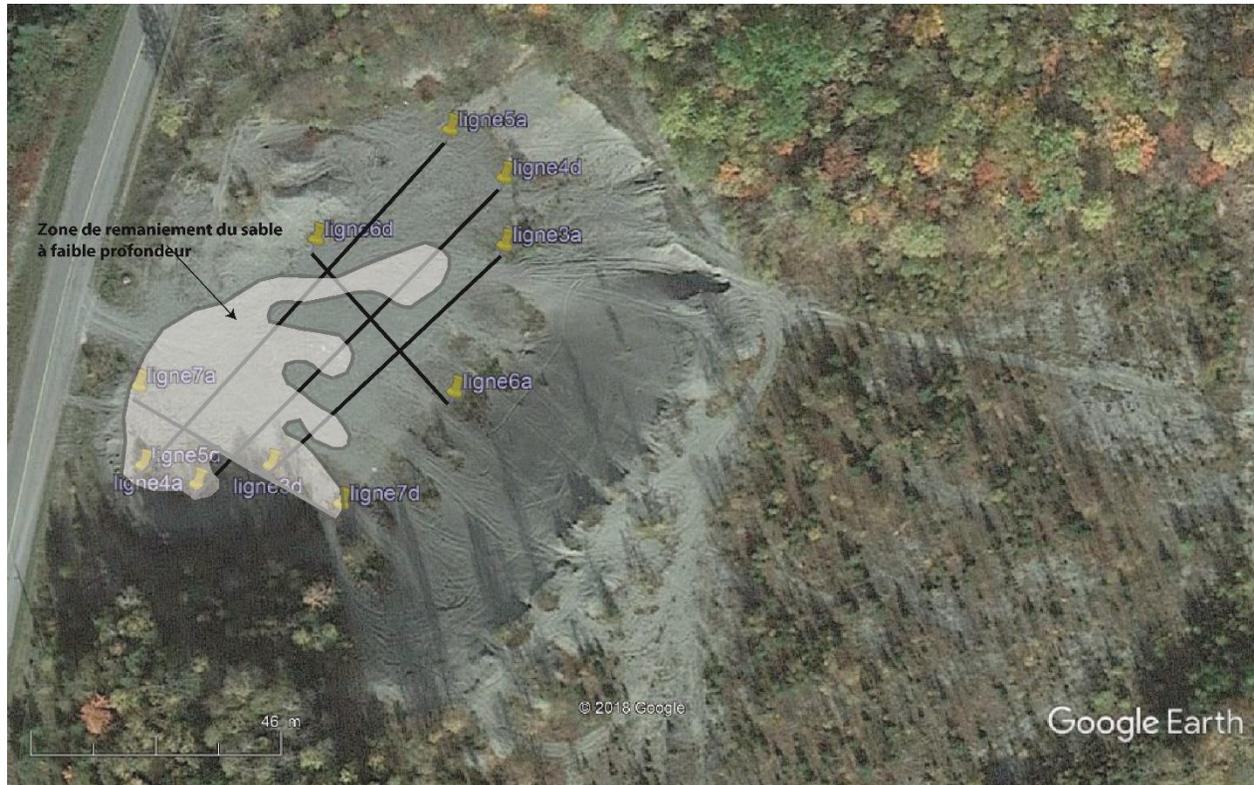


Figure 67: Cartographie des zones de remaniement de surface sur le plancher de la sablière

5. Conclusions et perspectives

La présente étude avait pour objectif contribuer au développement protocoles efficaces pour la localisation de structures enfouies par approche géophysique, avec une emphase sur le GPR. Plus spécifiquement, les travaux réalisés aux sites de Saint-Athanase, Rivière-Bleue et Darius – O’Brien avaient pour objectif d’évaluer l’efficacité du GPR pour (1) localiser des installations septiques enfouies, (2) délimiter l’étendue des sols perturbés sous des zones d’excavation et (3) évaluer l’intégrité de digues, respectivement. Les travaux réalisés ont permis de comparer deux appareils radar et de comparer l’efficacité d’acquisition des données selon différentes approches.

Les deux types de GPR utilisés pour les différents sites sont le *Pulse Ekko Pro* et le *Noggin*, de la compagnie *Sensors & Software*. La grande facilité d’utilisation du *Noggin* a montré des avantages significatifs sur le terrain par rapport au *Pulse Ekko*. De façon générale, le dispositif de déplacement du *Noggin* est plus convivial, la collecte de données est plus simple, le changement des antennes plus rapide et l’ordinateur de contrôle (DVL) offre plus de flexibilité sur les modes d’acquisition. En revanche, les inconvénients du *Noggin* concernent la profondeur d’investigation plus limitée des antennes de haute fréquence (500 MHz et 1000 MHz). Sur le site de St Athanase, des antennes de plus basses fréquences (50 MHz – 200 Mhz) auraient pu permettre une meilleure évaluation de la position de l’interface entre les dépôts meubles et le socle rocheux. De façon similaire, une plus grande profondeur de pénétration au site d’extraction de sable et gravier aurait pu permettre une évaluation de la position de la nappe d’eau souterraine avec plus de certitude. En revanche, les strates de la sablière, ainsi que les zones remaniées de surface ont pu être très bien cartographiées, jusqu’à 4 mètres de profondeur, en raison de la haute résolution associée aux

hautes fréquences. Pour la digue de Darius O'Brien, les antennes de 100 MHz se sont avérées adéquates pour cartographier l'épaisseur de la digue, et ainsi visualiser une hétérogénéité ponctuelle dans la partie nord de la digue.

Les quadrillages GPR (deux tailles différentes) réalisés au site de Saint-Athanase suggèrent que plus le quadrillage est grand, plus l'interprétation sera facile et visuelle avec le logiciel *Ekko-Project*. Au niveau de la sablière, avec 5 lignes perpendiculaires, une cartographie exhaustive des zones remaniées a été possible, sans besoin d'avoir recours aux quadrillages. Un quadrillage avec lignes rapprochées dans cette sablière aurait pu donner une cartographie plus détaillée, mais n'aurait vraisemblablement pas contribué davantage à l'atteinte de l'objectif de la campagne. En ce qui a trait à la digue Darius - O'Brien, la faible largeur de la structure limite le potentiel d'application des quadrillages restreints, spécialement en conditions hivernales. Les travaux du site de Saint-Athanase ont permis d'évaluer la zone où se trouvent vraisemblablement les installations septiques enfouies. Sur le plan méthodologique, des études subséquentes conduites avec des objectifs similaires pourraient bénéficier des améliorations suivantes :

- 1) Utiliser le Noggin avec antenne de 200 MHz et effectuer un grand profil linéaire sinueux avec référence GPS sur tout le terrain de l'école, afin d'augmenter la profondeur d'acquisition ;
- 2) Utiliser le Noggin avec antenne de 200 MHz et faire de grands quadrillages serrés sur la totalité du stationnement de l'école, afin d'augmenter la profondeur d'acquisition ;
- 3) Après traitement des grands quadrillages, faire des petits quadrillages serrés concentrés sur des points précis, avec des fréquences plus élevées.

Finalement, les travaux réalisés dans le cadre de la présente étude permettent de dresser une liste des avantages et inconvénients associés à l'utilisation du GPR dans le cadre d'études environnementales :

Avantages :

- Technique non destructrice très discrète;
- Mesures rapides;
- Peu coûteux, en comparaison aux approches de forage;
- Appareils relativement légers et mobiles;
- Complémentarité avec les données de forage,
- Mise en évidence de la position des structures enfouies.

Inconvénients :

- Interprétation qui doit être couplée avec une autre méthode (p. ex. : forage, excavation);
- L'arpentage doit être fait pour une meilleure interprétation;
- Interprétation difficile et incertaine en l'absence de données complémentaires;
- Faible profondeur d'investigation à haute fréquence;
- Support du GPR à bien évaluer en fonction du type de terrain et du type de traction;
- En termes de sécurité pendant les manipulations, nous devons être distants du GPR (2 mètres) et des lignes électriques du résistivimètre, ce qui demande une logistique bien étudiée,
- Les fréquences GPR offrent un compromis entre la résolution et la pénétration, l'utilisation de plusieurs fréquences est donc souvent requise.

6. Références

- André, F., Jonard, F., Jonard, M., Lambo, S., 2016. In situ characterization of forest litter using ground-penetrating radar. *Journal of Geophysical Research : Biogeosciences*, 121, p. 879-894.
- Annan, A. P. 2005. Ground-Penetrating Radar. In *Near-surface geophysics*, edited by Dwain K. Butler. Society of exploration geophysicists. Tulsa, Oklahoma (USA). 732 p.
- Archie, G.E., 1941. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Dallas Meeting, October 1941.
- Benson, A.K., 1995. Applications of ground penetrating radar in assessing some geological hazards : examples of groundwater contamination, fault, cavities. *Journal of Applied Geophysics* 33, pp 177-193.
- Burke, M. J. 2008. GPR Investigations of the Sedimentary Architecture of Jökulhlaup Eskers : Skeioararjökull, Iceland and Bering Glacier, Alaska. Thèse de Doctorat, University of Northumbria, Newcastle, U.K., 313 pages.
- Cloutier, V., Rosa, E., Nadeau, S., Dallaire, P.-L., Blanchette, D., et Roy, M., 2015. Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines de l'Abitibi-Témiscamingue (partie 2). Rapport final déposé au Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec. Rapport de recherche P002.R3. Groupe de recherche sur l'eau souterraine, Institut de recherche en mines et en environnement, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 313 p., 15 annexes, 24 cartes thématiques (1:100 000).
- Daniels, J.J., Roberts, R., Vendl, M., 1995. Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminants. *Journal of Applied Geophysics* 33, pp 195-207.
- Doolittle, J.A., Jenkinson, B., Hopkins, D., Ulmer, M., Tuttle, W., 2006. Hydrogeological investigations with ground-penetrating radar (GPR) : estimating water-table depths and local ground-water flow pattern in areas of coarse-textured soils. *Geoderma* 131, pp 317-329.
- Garanbois, S., Sénéchal, P., Perroud, H., 2002. On the use of combined geophysical methods to assess water content and water conductivity of near-surface formations. *Journal of Hydrology* 259, pp 32-48.
- Han, X., L., Liu, J., T., Zhang, J., Zhang, Z., C., 2016. Identifying soil structure along headwater hillslopes using ground penetrating radar based technique. *J. Mt., Sci* (2016) 13(3) : p 405-415.
- Hu, Z., Shan, W., 2015. Landslide investigations in the northwest section of the lesser Khingan range in China using combined HDR and GPR methods. *Bull Eng Geol Environ* (2016) 75: p 591–603.
- Huisman, J.A., Hubbard, S.S., Redman, J.D., Annan, A.P., 2003. *Vadose zone J.*, Vol. 2, November 2003.
- Johnson, T.C., Slater, L.D., Ntarlagiannis, D., Day-Lewis, F.D., Elwaseif, M., 2012. Monitoring groundwater-surface water interaction using time-series and time-frequency analysis of transient three-dimensional electrical resistivity changes. *Water Resources research*, Vol. 48, W07506.
- Kazakis, N., Vargemezis, G., Voudouris, K.S., 2016. Estimation of hydraulic parameters in a complex porous aquifer system using geoelectrical methods. *Science of the total environment* 550, pp 742-750.
- Knight, R. J. et A. L. Enders. 2005. An introduction to rock physics principles for near-surface geophysics. In *Near-surface geophysics*, edited by Dwain K. Butler. Society of exploration geophysicists. Tulsa, Oklahoma (USA). 732 p.

- Kowalsky, M.B., Finsterle, S., Rubin, Y., 2004. Estimating flow parameter distributions using ground-penetrating radar and hydrological measurements during transient flow in the vadose zone. *Advances in water resources* 27, pp 583-599.
- Loke, M. H. 2011. Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Guide du logiciel RES2DINV (www.geotomosoft.com). 150 p.
- Ministère des Affaires Municipales, Région et Occupation du Territoire (MAMROT), Gouvernement du Québec. s.d.a. Répertoire des municipalités. En ligne <http://www.mamrot.gouv.qc.ca/repertoire-des-municipalites/fiche/municipalite/13100/>. Consulté en avril février 2017.
- Neal, A. 2004. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Sciences Reviews*, no 66, pp. 261-330.
- Naudet, V., Revil, A., Rizzo, E., Bottero, J.Y., Begassat, P., 2004. Grounwater redox conditions and conductivity in a contaminant plume from geoelectrical investigations. *Hydrology and earth system sciences*, 8(1), pp 8-22.
- Paz C., Alcalá F.J., Carvalho J.M., Ribeiro L., 2017. Current uses of ground penetrating radar in groundwater-dependent ecosystems research. *Sci. Total. Environ.* 2017 Oct 1, 595, pp 868-885.
- Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., Richard, G., 2005. Electrical resistivity survey in soil science : a review. *Soil and Tillage Research* 83, pp 173-193.
- Sandmeier, K. J. 2008. ReflexW (version 5.0.) program for processing and interpretation of reflection and transmission data. Karlsruhe, Germany, Sandmeier Software.
- Slater, L., 2007. Near surface electrical characterization of hydraulic conductivity : from petrophysical properties of aquifer geometrics – a review. *Surv Geophys* 28, pp 169-197.
- Tregubov, O. D., 2015, Experience in using GPR to study new frozen-ground formations in subgrade structures. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 52, No. 5, November, 2015 (Russian Original No. 5, September-October, 2015) 6p.
- Winsauer, W.O., Shearin, H.M., Masson, P.H., Williams, M., 1952. Resistivity of brine-saturated sands in relation to pore geometry. *Bulletin of the American association of petroleum geologists*, Vol. 36, No. 2 pp 253-277, 15 figs.
- Woodward, J., P. J. Ashworth, J. L. Best, G. H. Sambrook Smith et C. J. Simpson. 2003. The use and application of GPR in sandy fluvial environments: methodological considerations. In *Ground Penetrating Radar in Sediments*, C. S. Bristow & H. M. Jol (eds), p. 127-142. London: The Geological Society of London, Special Publication 211.
- WWAP - World Water Assessment Programme. (2009). The United Nations. *World Water Development Report 3: water in a changing world*. Paris: UNESCO.
- YEUNG, S. W., YAN, W. M., HAU C. H. B., 2016. Performance of ground penetrating radar in root detection and its application in root diameter estimation under controlled conditions. *SCIENCE CHINA Earth Sciences*, January 2016, Vol.59 No.1: pp 145–155.