

Reference List

Record Number:

Author, Monographic: Richer-Laflèche, M.//Monette, Y.

Author Role:

Title, Monographic: Prospection géophysique sur le site archéologique du Parc du Sacré-Coeur, secteur du Trait-Carré (Ville de Québec)

Translated Title:

Reprint Status:

Edition:

Author, Subsidiary:

Author Role:

Place of Publication: Québec

Publisher Name: INRS-Eau, Terre & Environnement

Date of Publication: 2007

Original Publication Date: Mars 2007

Volume Identification:

Extent of Work: x, 86

Packaging Method: pages incluant 2 annexes

Series Editor:

Series Editor Role:

Series Title: INRS-Eau, Terre & Environnement, rapport de recherche

Series Volume ID: 925

Location/URL:

ISBN: 978-2-89146-537-3

Notes:

Abstract:

Call Number:

Keywords:

**PROSPECTION GÉOPHYSIQUE SUR LE
SITE ARCHÉOLOGIQUE DU PARC
DU SACRÉ-CŒUR,
SECTEUR DU TRAIT-CARRÉ
(VILLE DE QUÉBEC)**

Rapport de recherche N° R-925

Mars 2007

Prospection géophysique sur le site archéologique du Parc du Sacré-Cœur, secteur du Trait-Carré

(Ville de Québec)



Rapport de recherche N° R-925

Rapport préparé par

Marc Richer-LaFlèche et Yves Monette

Institut National de la Recherche Scientifique
Centre Eau, Terre et Environnement
(INRS-ETE)

Mars 2007

ISBN : 978-2-89146-537-3

Résumé

Ce rapport de recherche rend compte de travaux de prospection géophysique de la sub-surface effectués sur le site du Parc du Sacré-Cœur à Charlesbourg, au centre de l'arrondissement historique du Trait-Carré.

Diverses méthodes de caractérisation de la sub-surface ont été déployées sur ce site afin de localiser les vestiges de la première église de Charlesbourg, construit en 1697 et démolie en 1836. Les méthodes utilisées incluent deux sondes d'induction électromagnétique (l'une opérant sur une seule fréquence et une deuxième opérant simultanément sur trois fréquences) et du géoradar. Deux levés géoradar ont été effectués sur le site : un premier avec une antenne de 500 MHz et une seconde avec une antenne de 800 MHz. Que ce soit pour le géoradar ou pour la sonde d'induction électromagnétique, l'utilisation de différentes fréquences permet d'investiguer la sub-surface à des profondeurs variables. Ainsi, plus la fréquence est élevée, moins la profondeur d'investigation est profonde et inversement.

Les levés d'induction électromagnétique mettent en évidence un domaine plus résistif dans le secteur sud du parc, et surtout dans le secteur sud-ouest. Ce domaine représente la zone où se tenait jadis l'église. Ces levés ont également permis de localiser deux linéaments très conducteurs dans le secteur ouest du parc, partant du statuaire et se dirigeant d'une part vers le nord-ouest, et d'autre part vers le sud-ouest. Ces linéaments pourraient être associés à la présence de fils électriques dont la fonction reste à préciser, mais on peut croire qu'ils auraient pu alimenter un système d'éclairage.

Quant aux levés géoradar, ils ont permis de localiser précisément les murs de fondation ouest, nord et sud de l'église. Le mur ouest, qui est également le mur de façade de l'église semble présent sur toute sa longueur, soit environ 11 m. Les murs nord et sud semblent quant à eux en partie arasés dans le secteur est. En partant du mur ouest, nous avons pu suivre les murs nord et sud sur plus de 20 m de longueur et quelques reliques de fondations localisées ici et là le long de ces tracés indiquent que l'église devait faire environ 30 m de longueur dans l'axe est-ouest. Quant au mur est, il semble qu'il ait été complètement démoli. S'il devait y avoir des traces de ce mur, c'est sous la forme d'une tranchée de construction qu'elles se présenteraient et seules des sondages archéologiques pourraient en témoigner.

Remerciements

De nombreuses personnes ont participées de près ou de loin à la bonne marche des travaux et nous tenons à les remercier. D'abord nos remerciements vont à monsieur William Moss, archéologue principal de la Ville de Québec, pour nous avoir permis d'effectuer cette étude et pour l'intérêt qu'il a manifesté tout au long des travaux. La prospection géophysique de sites archéologiques n'est pas courante au Québec, ni au Canada, mais le potentiel des méthodes électromagnétique et géoradar, est depuis longtemps reconnu ailleurs dans le monde. C'est grâce à l'ouverture d'esprit d'archéologues comme William Moss que l'archéogéophysique pourra éventuellement faire sa niche au Québec et servir l'archéologue dans la localisation de vestiges enfouis et dans la programmation des travaux de terrain..

Merci André Nault, arpenteur pour la Ville de Québec, et à notre assistante Marie-Soleil Bruyère étudiante au 1^{er} cycle en archéologie à l'Université Laval, pour leur aide lors de la mise en place du dispositif de lignes. Merci à Bruno Boussicault (géophysicien et étudiant gradué de l'INRS-ETE) pour son aide et ses avis lors de l'interprétation des données.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	III
REMERCIEMENTS	V
TABLE DES MATIÈRES.....	VII
TABLE DES FIGURES	IX
1 Mandat.....	1
2 Problématique	3
3 Localisation et milieu physique.....	5
4 Historique du site du Parc du Sacré-Coeur.....	9
4.1 Description de l'ancienne église et du cimetiere.....	11
5 Photographies de terrain.....	13
6 Méthodologie	15
6.1 Levés électromagnétiques.....	15
6.1.1 Sonde GEM-2 de Geophex.....	15
6.1.2 Sonde EM-31 de Geonics.....	16
6.1 Levé GÉORADAR.....	17
6.1.3 Élimination du bruit de fond.....	21
6.1.4 Accentuation du signal de retour pour compenser l'atténuation du signal radar. ..	22
7 Présentation des données.....	23
7.1 Présentation et interprétation des données de conductivité électrique apparentes	23
7.1.1 Levé EM-31	23
7.1.2 Conductivité apparente : dipôle vertical (pénétration maximale de 6 m)	23
7.1.3 Levé GEM-2.....	27
7.2 Présentation et interprétation des résultats des levés Géoradar 500 et 800 MHz. ...	38
7.3 Validation des résultats des levés géophysiques :.....	40
8 Conclusions et recommandations	43
Références bibliographiques	45
Annexe A.....	47
Annexe B.....	71

TABLE DES FIGURES

Figure 1.	Plan de localisation du Parc Sacré-Coeur, secteur historique du Trait-Carré (Ville de Québec, Qc).	5
Figure 2.	Photo aérienne avec du Parc Sacré-Coeur. Notez la localisation du statuaire au centre du parc et de l'église actuelle au Sud.	6
Figure 3.	Plan du réseau de lignes et stations du site du Parc Sacré-Coeur. Les lignes sont numérotées de 0 à 46 et les stations de 0 à 42. Le point 0,0 est situé au NE de la carte.	7
Figure 4.	Plan de la commune du Trait-Carré et de la réserve des Jésuites, vers 1730. Carte tirée du rapport de Légaré (2005).	10
Figure 5.	Vue aérienne de Charlesbourg en 1937. Photo tirée du rapport de Légaré (2005). Notez la présence de l'actuelle église Saint-Charles-Borromée au centre du village.	11
Figure 6.	Plans de la première église de Charlesbourg dont la construction a été complétée en 1697. Notez que le schéma est une reconstitution hypothétique qui demande à être vérifiée lors de fouilles archéologiques. Source : Villeneuve 1986 : 20.	12
Figure 7.	Photographies montrant différents éléments interférents lors du levé géophysique sur le site du Parc Sacré-Coeur. A) Affiche B) statue centrale et aménagement du terrain C) arbres matures dans le parc D) église actuelle au sud du périmètre E) détails de l'assise de la statue F) lignes électriques de 60 Hz bordant la limite sud du périmètre.	13
Figure 8.	Photographies montrant différents éléments significatifs du site du Parc Sacré-Coeur. A) ligne 4 bordant le coté Est du périmètre (vue vers le sud), B) ligne de base Est-Ouest avec piquets de bois, C) ligne 42 en bordure de la 1 ^{re} Avenue (Ouest du périmètre), D) imposante clôture métallique longeant le boulevard Louis-XIV (Sud du périmètre).	14
Figure 9.	La sonde d'induction électromagnétique GEM-2 multifréquences couplée à un système de positionnement DGPS sub-métrique (photo : quai de la Garde côtière du Canada, Port de Québec). Opérateur : Yves Monette.	16
Figure 10.	Détails de la sonde EM-31 de <i>Geonics</i> utilisée sur le site du parc du Sacré-Cœur.	17
Figure 11.	Système Géoradar RAMAC de la compagnie <i>Mala</i> . Le système comporte une antenne blindée, une roue de précision (évaluation des distances) ainsi qu'un moniteur permettant de visualiser les spectres radar en temps réel.	18
Figure 12.	Géoradar RAMAC X3M de la compagnie MALA (Suède) composé d'une antenne blindée de 500 MHz et de son moniteur permettant une visualisation des acquisitions en temps réel.	19
Figure 13.	Évolution du signal radar lors de sa pénétration dans le sol. Notez la réflexion de l'onde lors du passage d'un horizon à l'autre. Cette réflexion témoigne d'un contraste de permittivité diélectrique entre les différents matériaux. Le diagramme du centre montre le signal enregistré par l'appareil (en volt). Notez également la diminution normale (atténuation) du signal avec l'accroissement de la profondeur.	21
Figure 14.	Exemple de filtrage des données géoradar RAMAC 500 MHz lors d'un levé dans une usine du canal Lachine (LaFlèche <i>et al.</i> 2005). A) données brutes,	

	B) données avec filtre DC, C) données filtrées avec un gain variable en fonction du temps.....	22
Figure 15.	Carte de la conductivité apparente mesurée par induction électromagnétique à l'aide de la sonde EM-31. Le mode d'acquisition est en dipôle vertical et la profondeur maximale d'investigation est d'environ 6 mètres. Notez que le levé a été réalisé en suivant le réseau de lignes du périmètre.	24
Figure 16.	Carte de la composante en phase mesurée par induction électromagnétique à l'aide de la sonde EM-31. Le mode d'acquisition est en dipôle vertical et la profondeur maximale d'investigation est d'environ 6 mètres. Notez que la valeur de la composante en phase est une bonne approximation de la susceptibilité magnétique des matériaux présents dans les sols et remblais.....	26
Figure 17.	Carte montrant l'importance de l'interférence reliée à la circulation de courants électriques dans la ligne de transport située en bordure du boulevard Louis-XIV. Notez que les premiers 5 m sont significativement impactés par cette interférence. Prendre note que le point 0:0 qui figure en bas à gauche de la figure est en réalité le coin Nord-Est du périmètre.	27
Figure 18.	Carte de la conductivité apparente mesurée par induction électromagnétique à l'aide de la sonde GEM-2 (fréquence de 4050 Hz). Le mode d'acquisition est en dipôle vertical. Notez que le levé a été réalisé en suivant le réseau de lignes du périmètre.	29
Figure 19.	Carte de la conductivité apparente mesurée par induction électromagnétique à l'aide de la sonde GEM-2 (fréquence de 7290 Hz). Le mode d'acquisition est en dipôle vertical. Notez que le levé a été réalisé en suivant le réseau de lignes du périmètre.	31
Figure 20.	Carte de la conductivité apparente mesurée par induction électromagnétique à l'aide de la sonde GEM-2 (fréquence de 18270 Hz). Le mode d'acquisition est en dipôle vertical. Notez que le levé a été réalisé en suivant le réseau de lignes du périmètre.	33
Figure 21.	Carte de la composante en phase mesurée par induction électromagnétique (données filtrées: les données inférieures à 0 sont éliminées) à l'aide de la sonde GEM-2 et pour une fréquence d'induction de 4050 Hz. Le mode d'acquisition est en dipôle vertical. Le point 0:0 constitue l'extrémité N-E du périmètre.....	35
Figure 22.	Carte de la composante en phase mesurée par induction électromagnétique (données filtrées: les données inférieures à 0 sont éliminées) à l'aide de la sonde GEM-2 et pour une fréquence d'induction de 7290 Hz. Le mode d'acquisition est en dipôle vertical. Le point 0:0 constitue l'extrémité N-E du périmètre.....	36
Figure 23.	Carte de la composante en phase mesurée par induction électromagnétique (données filtrées: les données inférieures à 0 sont éliminées) à l'aide de la sonde GEM-2 et pour une fréquence d'induction de 18270 Hz. Le mode d'acquisition est en dipôle vertical. Le point 0:0 constitue l'extrémité N-E du périmètre.....	37
Figure 24.	Plan du Parc du Sacré-Cœur présentant des sections des murs de fondation nord, sud et ouest telles que révélées par les levés géoradar avec l'antenne de 500 MHz.	39
Figure 25.	Fondations de la première église de Charlesbourg telles que mises au jour en novembre 2006 par l'équipe d'archéologie de la Ville de Québec. Notez que ces fondations ont été détectées par géoradar avec une antenne de 500 MHz. Photos prises par Caroline Thibault, Ville de Québec.....	41

Levés géophysiques sur le site du Parc Sacré-Coeur (secteur historique du Trait Carré).

1 Mandat

Suite à des discussions avec M. William Moss, archéologue principal de la Ville de Québec, nous avons élaboré un plan d'intervention pour permettre une caractérisation du site du Parc Sacré-Cœur situé dans le secteur historique du Trait-Carré (Ville de Québec).

Il a été convenu que le périmètre du parc soit systématiquement couvert par des levés électromagnétiques (EM-31, GEM-2) et géoradar (antennes de 500 et 800 MHz).

Les intervenants de l'INRS-ETE ont eu la responsabilité d'établir un réseau de lignes parallèles espacées de 2 m. Ce dispositif a permis de réaliser les levés de précision dans un cadre géométrique précis.

2 Problématique

Selon les travaux des historiens et archéologues consultés, le terrain du parc Sacré-Cœur est localisé dans un secteur occupé depuis le 17^e siècle. Les vestiges d'une chapelle du 17^e siècle ainsi que d'un cimetière catholique, utilisé jusqu'à la fin du 19^e siècle, seraient enfouis sous le sol du parc Sacré-Cœur.

Compte tenu du potentiel archéologique du site, confirmé par la présence de travaux antérieurs et de documents historiques, les chercheurs de l'INRS-Eau, Terre et Environnement ont proposé la réalisation de levés géophysiques de sub-surface pour vérifier la présence d'anomalies pouvant révéler des éléments ou structures anthropiques dans le parc. Plus spécifiquement, l'objectif premier était de délimiter avec précision la localisation des fondations de l'ancienne église et si possible de localiser des sépultures.

L'approche géophysique consiste en l'utilisation de techniques non destructives qui permettent une reconnaissance rapide des propriétés du terrain. Lors de l'étude du site du Parc Sacré-Coeur, nous avons réalisé des levés électromagnétiques et géoradar. Ces méthodes complémentaires couvrent un large spectre des propriétés physiques des matériaux de la sub-surface.

Notons que dans le cas de prospections archéo-géophysiques de fondations anciennes recouvertes de remblais, les propriétés physiques suivantes peuvent être modifiées. Premièrement, les murs de pierre sont des structures électriquement très résistives et donc peu conductrices. Ces matériaux devraient produire des anomalies peu conductrices lors de levés d'induction électromagnétique (levé conductimètre EM-31 de *Geonics* et GEM-2 de *Geophex*). Dépendamment de la nature des pierres et de la proportion de mortier utilisées lors de la construction des fondations, les matériaux devraient montrer une susceptibilité magnétique différente de celle des sols et remblais adjacents. En plus de la conductivité électrique, les contrastes de permittivité diélectrique devraient être élevés entre le remblai et les fondations de l'église, ce qui suggère l'utilisation systématique du géoradar.

3 Localisation et milieu physique

Le site du Parc Sacré-Coeur est localisé dans le secteur historique du Trait-Carré (anciennement Charlesbourg) de la Ville de Québec (Figure 1) et plus spécifiquement à proximité de l'actuelle église du Saint-Charles-Borromée. Le Parc Sacré-Coeur, est situé au Nord de l'actuelle église du Trait-Carré. Il est bordé par le boulevard Louis-XIV et la 1^{re} Avenue (Figures 2 et 3). Les photographies aériennes montrent bien les caractéristiques géographiques actuelles du secteur (Figures 1 et 2).

La figure 3 montre un plan du réseau de lignes réalisé sur le site du Parc du Sacré-Coeur. Ce plan souligne la forme du périmètre ainsi que le système de numérotation des lignes et stations. Le secteur du Parc du Sacré-Cœur est légèrement impacté par l'influence de champs électromagnétiques en provenance d'une ligne de transport électrique qui borde le boulevard Louis-XIV (Figure 3) et par la présence d'une clôture en fer délimitant le parc.

Pour ce qui est de la topographie, le secteur peut être considéré comme plat à l'exception d'un promontoire central utilisé comme assise du statuaire. L'examen détaillé de la photo aérienne (figure 2) ne permet pas de souligner la présence de fondations enfouies dans le sol.

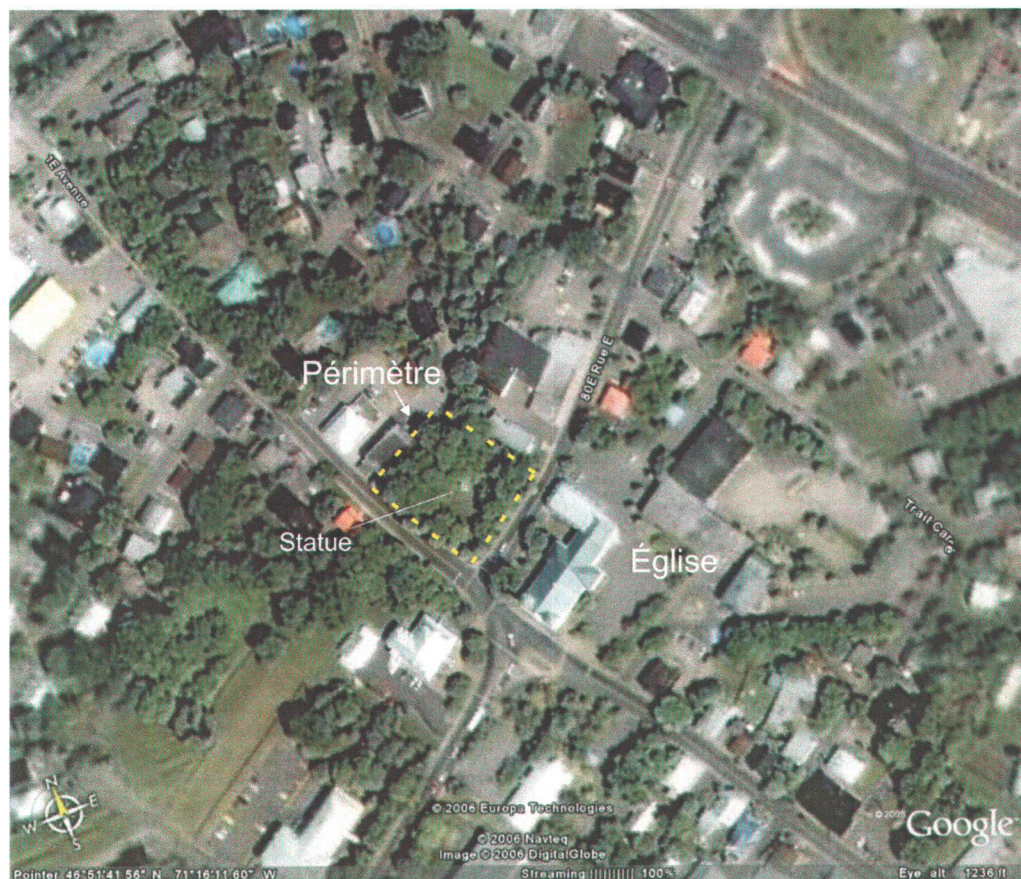
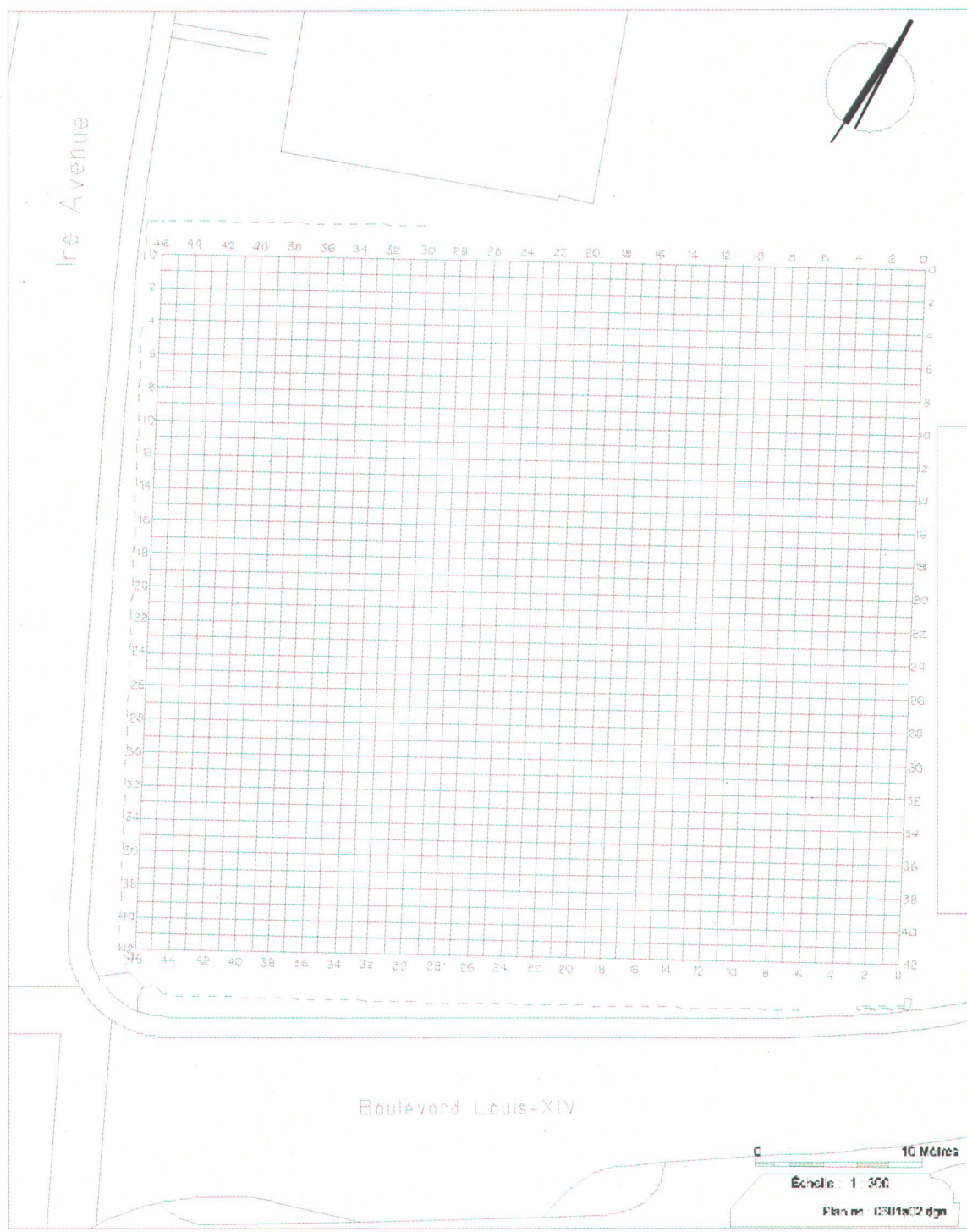


Figure 1. Plan de localisation du Parc Sacré-Coeur, secteur historique du Trait-Carré (Ville de Québec, Qc).



Figure 2. Photo aérienne avec du Parc Sacré-Coeur. Notez la localisation du statuaire au centre du parc et de l'église actuelle au Sud.

Réseau de lignes et stations



SERVICE DE L'AMÉNAGEMENT
DU TERRITOIRE

Figure 3. Plan du réseau de lignes et stations du site du Parc Sacré-Coeur. Les lignes sont numérotées de 0 à 46 et les stations de 0 à 42. Le point 0,0 est situé au NE de la carte.

4 Historique du site du Parc du Sacré-Coeur

Le présent projet de recherche fait partie d'un plus vaste programme d'intervention archéologique motivée par la volonté de la Fabrique de la paroisse Saint-Charles-Borromée, de la Société d'histoire de Charlesbourg et du Conseil d'arrondissement de Charlesbourg de mettre en valeur les vestiges de la première église de Charlesbourg, située au coin de la 1^{re} Avenue et du boulevard Louis-XIV (la 80^e rue), dans l'arrondissement historique de Charlesbourg.

L'arrondissement historique de Charlesbourg occupe une superficie de quelques 20 hectares, soit environ 2 kilomètres carrés. Son périmètre suit les lignes séparatrices des lots à l'ouest de la 1^{re} Avenue sur des distances variant de 40 à 150 mètres, tandis qu'à l'est, il correspond plus ou moins au tracé des rues (1^{re} Avenue au nord, 83^e Rue Est, boulevard Henri-Bourassa (incluant la propriété du moulin des Jésuites), 74^e Rue, 77^e Rue et 1^{re} Avenue au sud) (Légaré, 2005).

Le village de Charlesbourg appartenait à l'origine à la seigneurie de Notre-Dame-des-Anges, concédée aux Pères jésuites par Henri de Lévy, duc de Ventadour, vice-roi de Nouvelle-France, le 10 mars 1626. Le 25 juin 1685, les Jésuites cèdent la réserve du Trait-Carré à la fabrique de Charlesbourg, soit « trois arpents pour le presbytère, sa cour et son jardin; ce qui est nécessaire pour l'église paroissiale et le cimetière au lieu désigné par les pères; le restant à la fabrique ». Dès 1688, il est question de construire une église en pierre. La vaste paroisse de Saint-Charles-Borromée est érigée canoniquement le 26 septembre 1693 (Légaré, 2005).

La construction de cette première église a été terminée en 1697 et elle fut démolie en 1836 pour être remplacée par l'église actuelle (Ville de Québec 2004 : 14-15). L'ancienne église ayant été située au nord de la nouvelle, ses vestiges gisent donc en tout ou en partie dans le parc du Sacré-Coeur.

Après sa démolition, le site qu'elle occupait fut utilisé comme cimetière jusqu'au début du XX^e siècle, donc pendant quelque 70 ans. L'archéologue Daniel Simoneau (Ville de Québec 2004 : 22-23) estime que le tissu archéologique du parc du Sacré-Coeur est intègre et que son potentiel est élevé. Outre les vestiges de l'église et des sépultures, les travaux de mise en valeur prévus risquent de mettre au jour les restes du mur d'enceinte du cimetière, d'un charnier et d'un autre bâtiment.

Le plan de la figure 4 montre la localisation de la commune du Trait-Carré vers 1730. Le coin N-Est du carré correspond au site de l'ancienne église de Charlesbourg. La figure 5 présente une vue aérienne du secteur du Trait-Carré datant de 1937. Notez la présence de l'actuelle église Saint-Charles-Borromée.

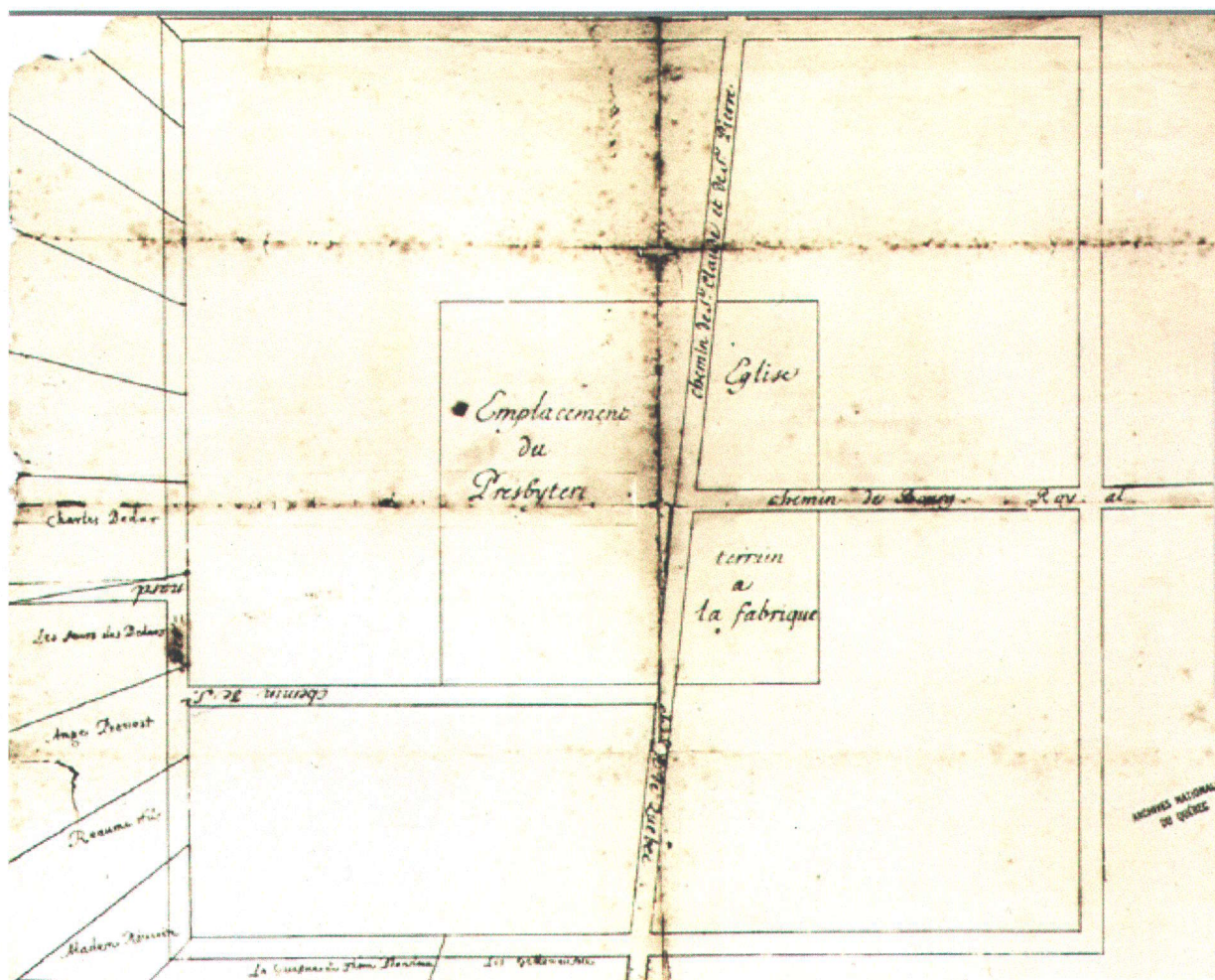


Figure 4. Plan de la commune du Trait-Carré et de la réserve des Jésuites, vers 1730. Carte tirée du rapport de Lègaré (2005).

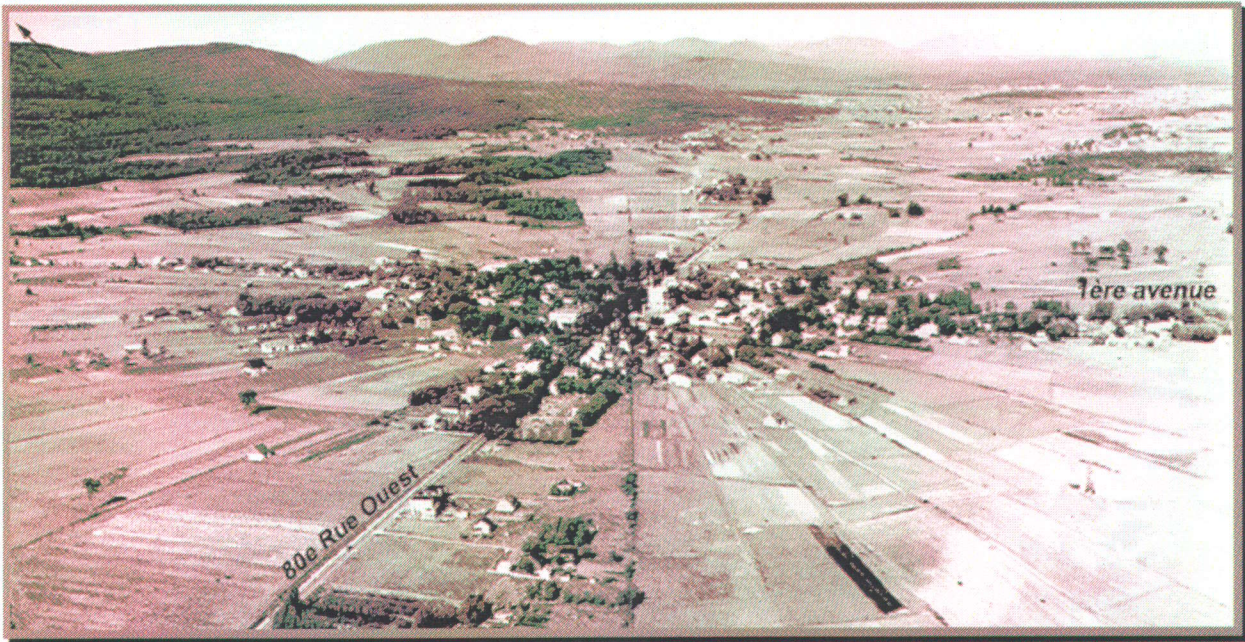
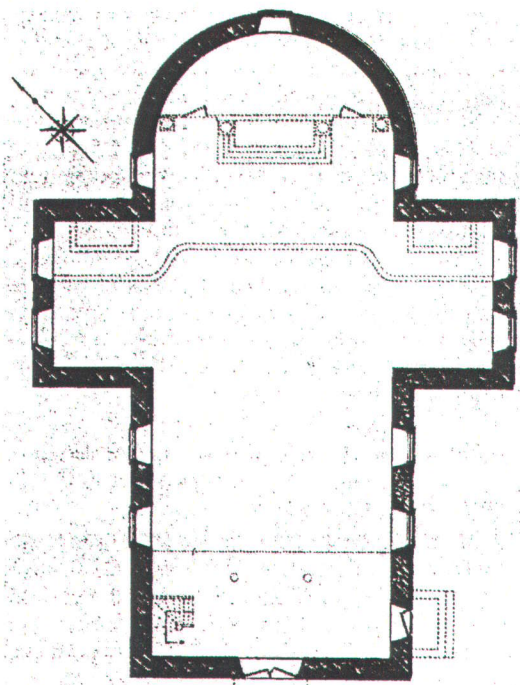


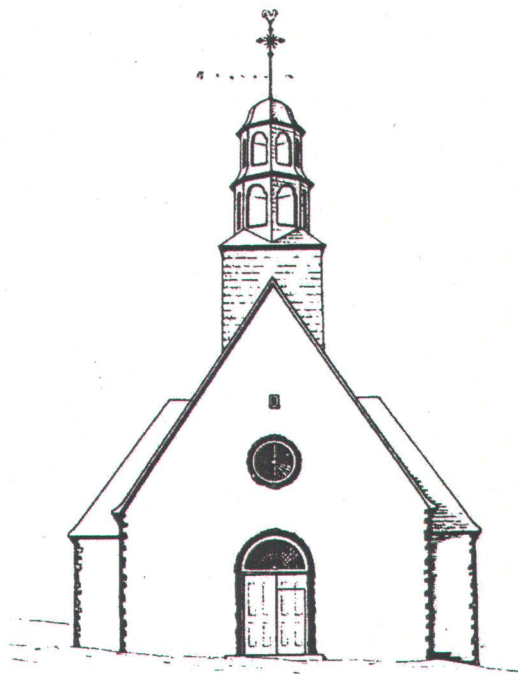
Figure 5. Vue aérienne de Charlesbourg en 1937. Photo tirée du rapport de Légaré (2005). Notez la présence de l'actuelle église Saint-Charles-Borromée au centre du village.

4.1 Description de l'ancienne église et du cimetière

Selon les documents fournis par William Moss, archéologue principal de la Ville de Québec, l'aspect architectural de la première église de Charlesbourg pourrait ressembler à celui présenté à la figure 6. Notez que ces dessins sont des reconstitutions hypothétiques qui nécessitent une validation par recoupement d'autres dossiers historiques et surtout par des investigations archéologiques qui devraient permettre de vérifier les spécificités des fondations de l'église (fouilles).



Reconstitution hypothétique du plan au sol de la première église de pierre de Charlesbourg.
Dessin de Denis Castonguay.



Reconstitution hypothétique de la façade de la première église de pierre de Charlesbourg.
Dessin de Denis Castonguay.

Figure 6. Plans de la première église de Charlesbourg dont la construction a été complétée en 1697. Notez que le schéma est une reconstitution hypothétique qui demande à être vérifiée lors de fouilles archéologiques. Source : Villeneuve 1986 : 20.

5 Photographies de terrain

Les figures 7 et 8 présentent des photographies de terrain montrant des éléments significatifs et potentiellement interférents lors de s travaux géophysiques. Notez la présence de clôtures métalliques (Figure 8d), d'une ligne de transport d'électricité (Figure 7f) et de la statue au centre du parc (Figures 7b et 8b).

La figure 7c montre que les arbres du parc sont très matures et relativement espacés. Ceci facilite les travaux de géophysique sur le terrain. Notez qu'il est probable que les racines des arbres puissent produire des anomalies sur les spectres Géoradar.

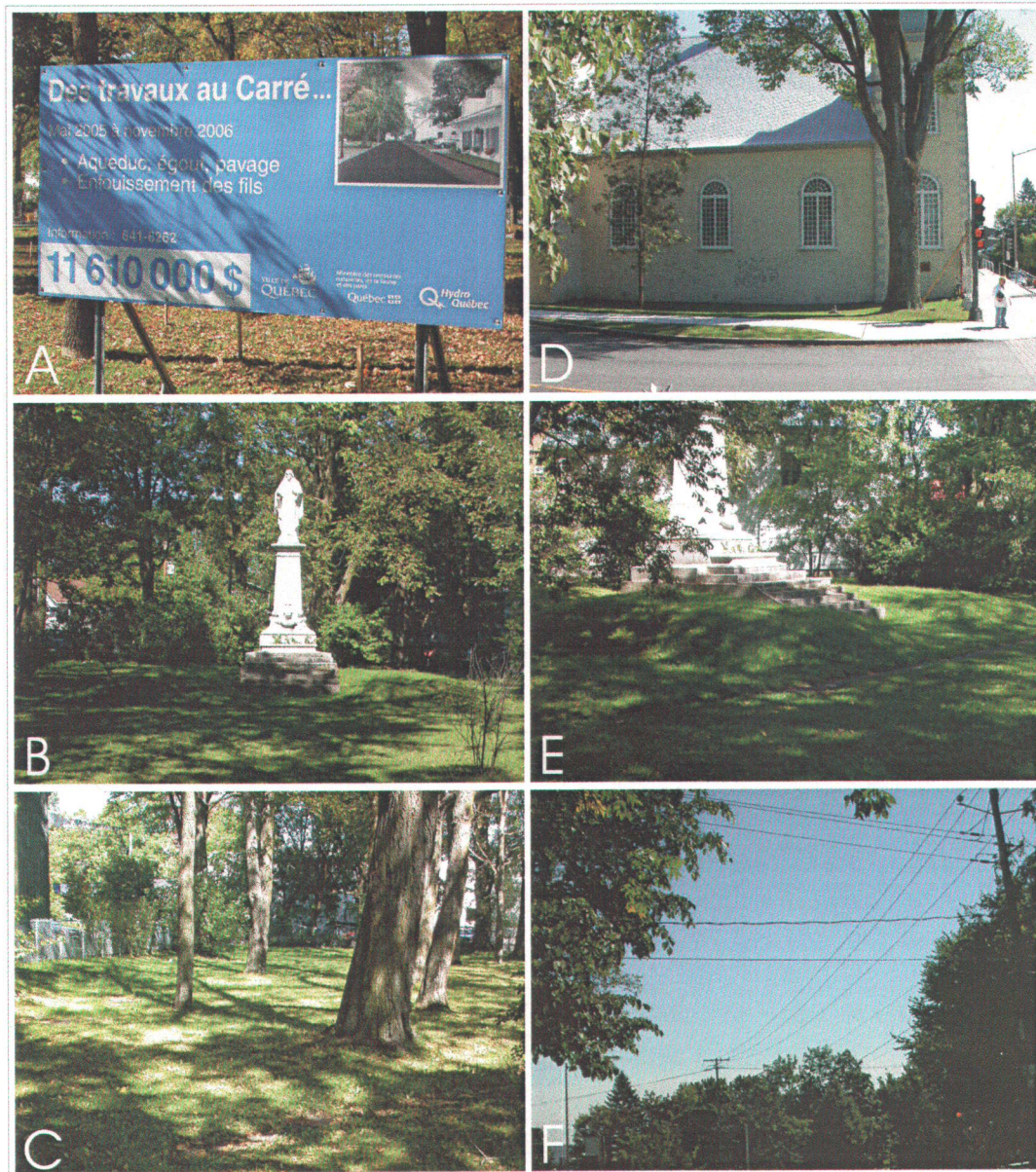


Figure 7. Photographies montrant différents éléments interférents lors du levé géophysique sur le site du Parc Sacré-Coeur. A) Affiche B) statue centrale et aménagement du terrain C) arbres matures dans le parc D) église actuelle au sud du périmètre E) détails de l'assise de la statue F) lignes électriques de 60 Hz bordant la limite sud du périmètre.



Figure 8. Photographies montrant différents éléments significatifs du site du Parc Sacré-Coeur. A) ligne 4 bordant le côté Est du périmètre (vue vers le sud), B) ligne de base Est-Ouest avec piquets de bois, C) ligne 42 en bordure de la 1^{re} Avenue (Ouest du périmètre), D) imposante clôture métallique longeant le boulevard Louis-XIV (Sud du périmètre).

6 Méthodologie

6.1 Levés électromagnétiques

6.1.1 Sonde GEM-2 de Geophex

Dans un premier temps, nous avons réalisé un levé d'induction électromagnétique à l'aide d'une sonde GEM-2 de *Geophex* (Figure 9). Cette sonde a la particularité de pouvoir émettre plusieurs fréquences simultanément (de 300Hz à 96 000Hz) et de mesurer simultanément les champs magnétiques secondaires associés à la circulation de courants de Foucault dans le sol. Cette caractéristique permet théoriquement d'investiguer des profondeurs variables des matériaux présents en sub-surface. Ainsi, les faibles fréquences pénètrent plus profondément et les hautes plus superficiellement. Dans le cas présent, nous avons choisi trois fréquences d'induction électromagnétique (4050 Hz, 7290 Hz et de 18270 Hz). En plus de ces fréquences, la sonde mesure les perturbations électromagnétiques reliées à la circulation de courants dans les lignes de transport électrique. Pour le site du Parc du Sacré-Coeur, l'impact de la ligne de transport électrique longeant le boulevard Louis-XIV peut être mesuré sur une distance de 5 m.

La sonde GEM-2 est plus compacte et légère que la sonde EM-31. La distance entre l'émetteur T_x et le récepteur R_x est seulement de 1,83 m. Tout comme la sonde EM-31, la sonde GEM-2 possède un port de communication DB9 (RS232) permettant l'acquisition d'un signal GPS simultanément à l'enregistrement des données instrumentales. Dans le meilleur des cas, la sonde GEM-2 peut acquérir les données à une fréquence de 30 Hz (30 mesures par seconde). Ceci permet la réalisation de levés à très haute résolution spatiale.



Figure 9. La sonde d'induction électromagnétique GEM-2 multifréquences couplée à un système de positionnement DGPS sub-métrique (photo : quai de la Garde côtière du Canada, Port de Québec). Opérateur : Yves Monette.

6.1.2 Sonde EM-31 de *Geonics*

Une sonde de conductivité électrique à induction électromagnétique EM-31 (*Geonics*) a été utilisée pour vérifier les contrastes de conductivité électrique des sols, remblais et autres matériaux présents sur le site du levé (Figure 10). Dans un contexte de prospection archéométrique, la technique permet de localiser la présence de zones peu conductrices pouvant être associées à des murs et fondations enfouis, à des débris de bâtiments et aussi à des zones excavées pour des sépultures. La fréquence d'induction de la sonde est de 9800 Hz. Pour ce type d'appareil, la pénétration verticale du signal est fonction de la fréquence d'induction utilisée et de l'espacement entre l'émetteur (Tx) et le récepteur (Rx) (fixé à 3,66 m pour la sonde EM-31). Pour une induction à 9800 Hz et un espacement Tx-Rx de 3,66 m il est normalement possible d'investiguer les premiers 6 m sous la surface (interface air-sol).

Notons que lors de la prospection électromagnétique, l'appareil peut être influencé par des conducteurs métalliques comme des câbles électriques enfouis, de la tuyauterie, etc. Ceci explique pourquoi nous devons mesurer et identifier sur le terrain toutes perturbations naturelles ou anthropiques pouvant influencer les résultats du levé électromagnétique. L'instrument est manipulé par une seule personne et peut fonctionner en modes continu ou discontinu. Lors du levé, l'appareil mesurait en mode continu (2 mesures par seconde) les composantes en phase et en quadrature du champ électromagnétique. Les données de la composante en quadrature sont transformées en données de conductivité électrique apparente. Les données de la composante en phase reflètent les variations de susceptibilité magnétique des matériaux. Cette propriété permet d'identifier sur le terrain la présence d'objets métalliques. Le bruit de fond de l'appareil est de 0,1 mS/m pour la conductivité (signal en quadrature) et de 0,03 ppt pour le signal de la composante en phase. La précision instrumentale est de 5% pour une mesure de conductivité électrique de l'ordre de 20 mS/m.

Notons que les levés magnétométriques et d'induction électromagnétique n'ont jamais été réalisés à proximité l'un de l'autre. De plus, toutes les précautions nécessaires ont été prises pour que les opérateurs n'aient pas en leurs possessions d'objets métalliques pouvant fausser les résultats.



Figure 10. Détails de la sonde EM-31 de *Geonics* utilisée sur le site du parc du Sacré-Cœur.

6.1 Levé GÉORADAR

Dans le cadre du levé sur le site du Parc Sacré-Coeur, nous avons utilisé un système géoradar RAMAC de la compagnie *Mala* (Suède). Le système utilisé comportait une antenne blindée de 500 MHz et une autre de 800 MHz. Le blindage des antennes minimise les interférences électromagnétiques provenant de sources anthropiques en milieu urbain. L'antenne de 500 MHz a été sélectionnée dans le but de maximiser l'investigation de la sub-surface entre 0,25 et 3 m de profondeur tandis que celle de 800 MHz a été sélectionnée dans le but d'accroître la résolution spatiale du levé géoradar. À plus basse fréquence, notez que la résolution aurait été insuffisante pour localiser des objets et structures enfouies superficiellement et d'un autre côté, les antennes de très haute fréquence utilisées en génie civil ne permettent pas d'investiguer une profondeur de plus de 50 cm. Les figures 11 et 12 montrent des systèmes géoradar RAMAC de *Mala*.



Figure 11. Système Géoradar RAMAC de la compagnie *Mala*. Le système comporte une antenne blindée, une roue de précision (évaluation des distances) ainsi qu'un moniteur permettant de visualiser les spectres radar en temps réel.

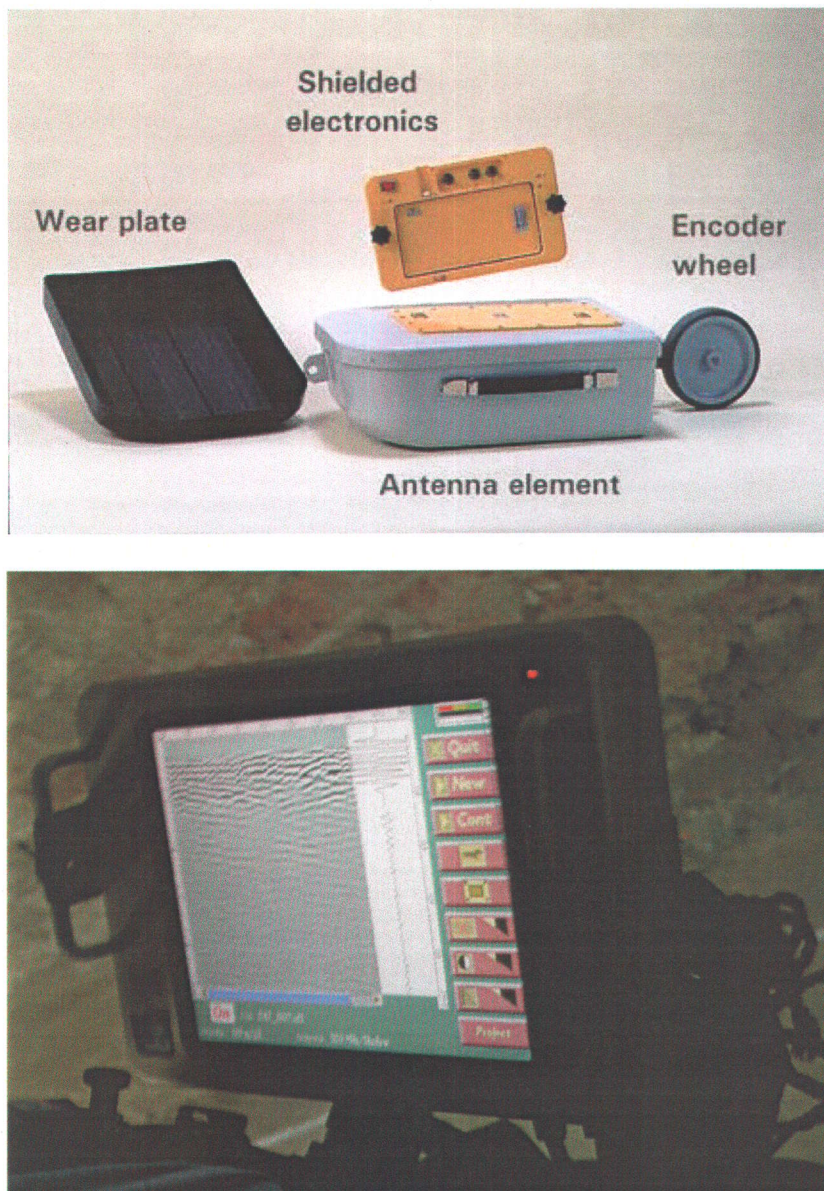


Figure 12. Géoradar RAMAC X3M de la compagnie MALA (Suède) composé d'une antenne blindée de 500 MHz et de son moniteur permettant une visualisation des acquisitions en temps réel.

La méthode de prospection au géoradar est une technique d'investigation de la sub-surface particulièrement efficace en raison de sa capacité de reproduire des informations structurales en fonction de la profondeur. Les applications communes du géoradar touchent la détection de câble, de tuyauterie, d'obus et mines anti-personnelles, de vides souterrains (cavernes, tunnels) ainsi que la prospection de site archéologique.

Le géoradar, ou GPR (*ground penetrating radar*) est une méthode géophysique existant depuis une trentaine d'année et développée pour la prospection de sub-surface. Il utilise des impulsions électromagnétiques de hautes fréquences (entre 10 et 2000 mégahertz) émises par une antenne spéciale optimisée pour permettre une reconnaissance de la géométrie des différentes unités naturelles et des objets anthropiques contenus dans le sous-sol. Quand les ondes frappent la limite entre deux matériaux différents ou entre un matériau et le vide, elles sont renvoyées à un récepteur

(antenne) (Figure 13). Les résultats sont présentés sous forme d'une coupe transversale où la profondeur relative est estimée en temps aller-retour des ondes. Les ondes EM ne pénètrent pas aussi profond que les ondes acoustiques (ex. sismiques) mais donnent une mesure de plus haute résolution. Le radar détecte des cibles qui ont une impédance électrique contrastée par rapport au sol environnant.

Les spectres directement obtenus à partir de l'appareillage sont pertinents pour une localisation immédiate de structures enfouies. Dans de très nombreux cas, l'imagerie doit être rehaussée afin d'accentuer certains caractères propres aux couches plus profondes. Pour ce faire, des filtres sont appliqués aux données primaires afin de corriger certaines dérives instrumentales. Compte tenu de l'atténuation rapide de la propagation des ondes électromagnétiques dans le sol, les données doivent souvent être corrigées afin d'augmenter l'intensité du signal en appliquant un gain exponentiel en fonction de l'accroissement de la profondeur.

La profondeur d'investigation du géoradar est fonction de la longueur d'onde utilisée (antenne) et de la nature des matériaux dans le sol. La pénétration du signal radar est inversement proportionnelle à la fréquence d'émission de l'antenne. Ainsi une antenne de 1000 MHz permet de sonder des structures à moins de 1 m de profondeur tandis qu'une antenne de 10 MHz peut sonder à 50m de profondeur. Notez que la résolution du levé décroît en fonction de la diminution de la fréquence ce qui limite l'utilisation du signal provenant de sources très profondes. Pour des couches géologique continues (stratigraphiques) cette résolution est suffisante mais pour localiser de petites structures anthropiques, la résolution devient rapidement insuffisante et la discrimination des éléments ou structures anthropiques s'avère difficile.

Le signal radar se propage bien dans les matériaux sableux, graveleux et les remblais mais devient inutilisable en présence d'horizons riches en minéraux argileux. Ces derniers sont électriquement très conducteurs ce qui empêche la pénétration verticale des ondes électromagnétiques dans les couches plus profondes du sol. Lors de la rencontre de ces matériaux argileux, les ondes sont soit réfléchies ou, le plus souvent, dispersées latéralement. Dans le cas du Québec, certaines régions sont recouvertes de dépôts argileux accumulés dans les anciennes mers postglaciaires du Québec méridional (Champlain, Goldthwait et LaFlamme) et ces dernières peuvent limiter sinon empêcher l'utilisation de ce type d'instrument.

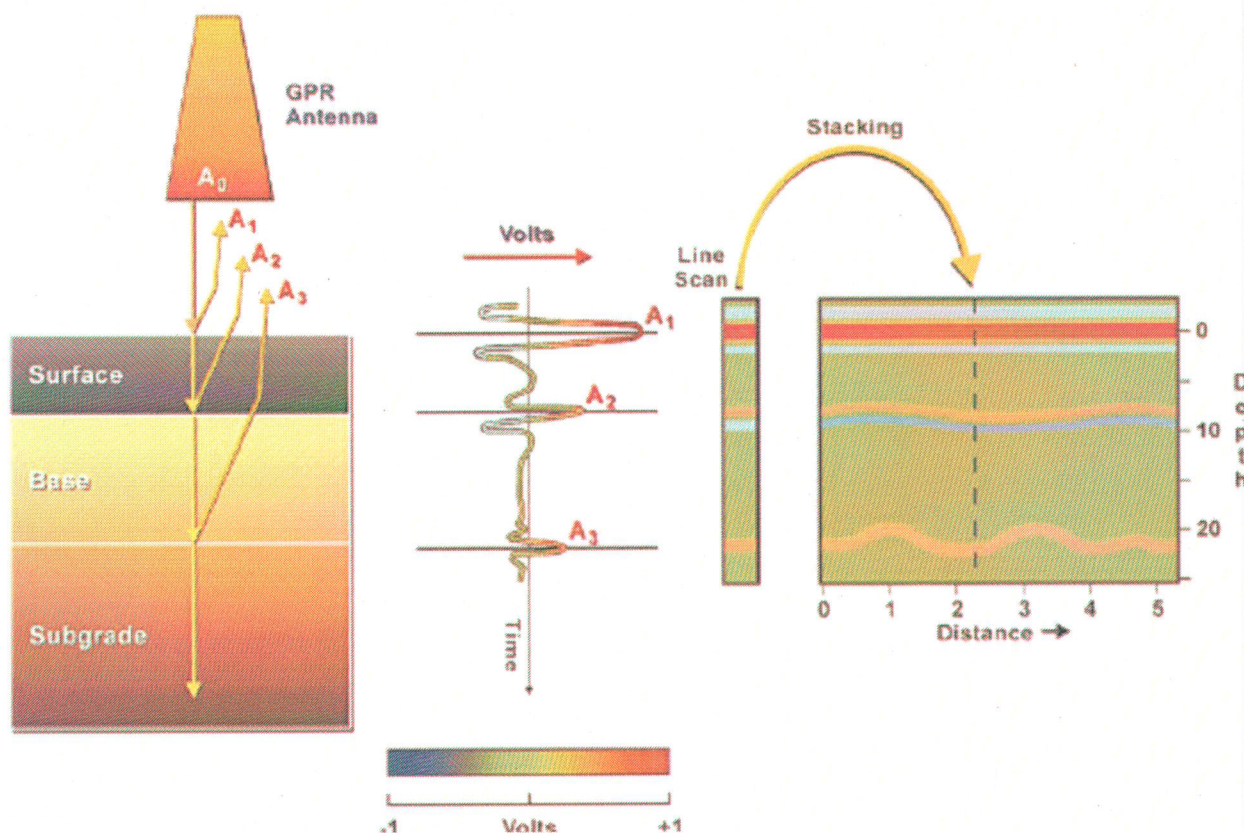


Figure 13. Évolution du signal radar lors de sa pénétration dans le sol. Notez la réflexion de l'onde lors du passage d'un horizon à l'autre. Cette réflexion témoigne d'un contraste de permittivité diélectrique entre les différents matériaux. Le diagramme du centre montre le signal enregistré par l'appareil (en volt). Notez également la diminution normale (atténuation) du signal avec l'accroissement de la profondeur.

6.1.3 Élimination du bruit de fond

La majorité des levés de géoradar présentent des lignes horizontales causées par de nombreux facteurs (ex. Conyers et Goodman, 1997). Les premières lignes les moins profondes sont généralement causées par l'espace physique entre l'antenne et le récepteur ainsi que par l'enregistrement du signal radar initial lorsque l'antenne essaie de coupler l'énergie radar avec le sol. Dans certains cas, une partie des premières bandes horizontales est reliée à des interférences provenant d'ondes de transmission de signaux de télévision, d'ondes FM, d'ondes de transmissions téléphoniques (cellulaires) et de systèmes de télécommunication des forces policières. Dans certains cas, les lignes de transport électrique de haute tension peuvent interférer avec les données géoradar.

Pour minimiser les risques d'interférences en milieu urbain, il est fortement recommandé d'utiliser des antennes géoradar blindées (*shielded antenna*). Le blindage consiste en une cage métallique fermée de tous les cotés à l'exception du coté du sol. Ainsi, la majorité des ondes électromagnétiques aériennes sont bloquées par la présence d'une cage de Faraday.

La majorité des logiciels de traitement de données géoradar ont la possibilité d'éliminer automatiquement le bruit de fond instrumental. Dans certains cas, cette procédure peut éliminer des réflecteurs horizontaux correspondant à des structures réelles dans le sol. Dans ce cas, l'analyste doit demeurer vigilant.

6.1.4 Accentuation du signal de retour pour compenser l'atténuation du signal radar.

Comme toutes ondes électromagnétiques, les ondes émises par l'antenne du géoradar sont rapidement atténuées en fonction de l'accroissement de la profondeur dans le sol et de la conductivité électrique des matériaux rencontrés. Pour compenser ce phénomène physique, des filtres numériques permettent d'amplifier le signal d'une façon progressive en accentuant de plus en plus le signal de retour provenant de sources plus profondes (Figure 14). Les intervenants qui utilisent les données de géoradar appliquent majoritairement ce type de correction.

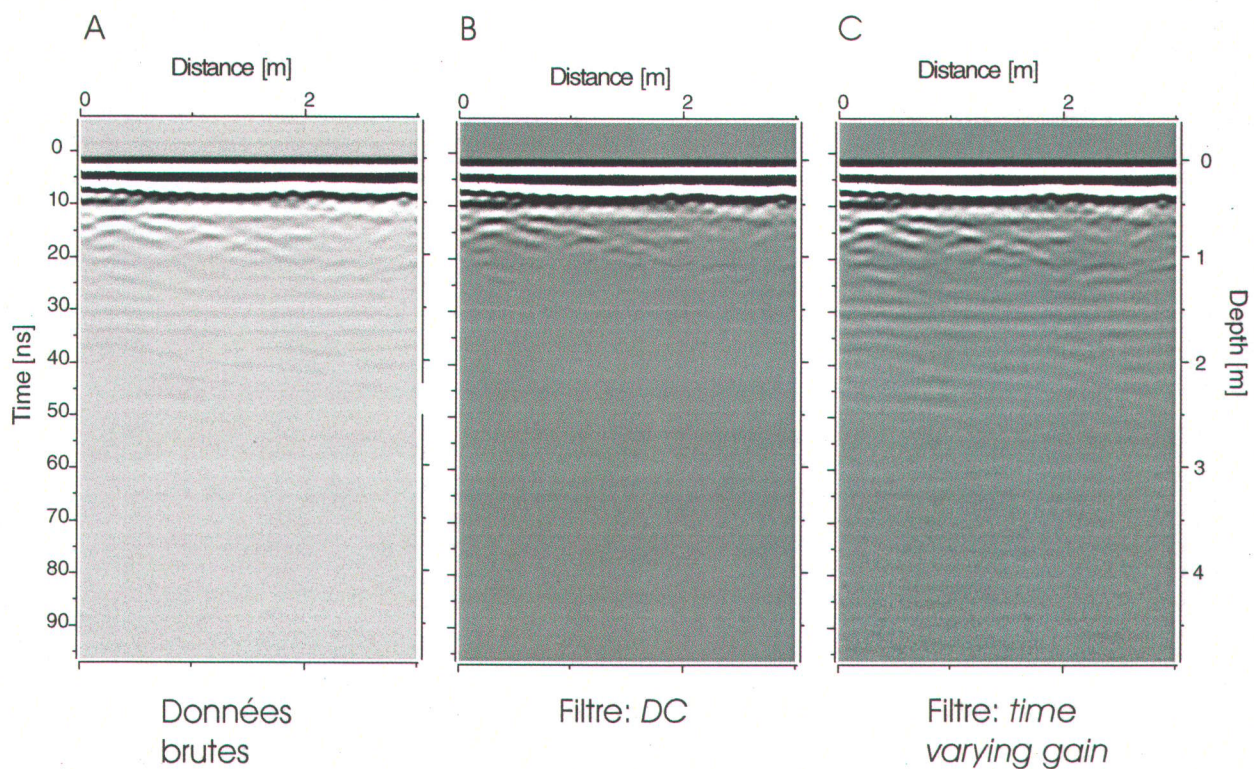


Figure 14. Exemple de filtrage des données géoradar RAMAC 500 MHz lors d'un levé dans une usine du canal Lachine (LaFlèche *et al.* 2005). A) données brutes, B) données avec filtre DC, C) données filtrées avec un gain variable en fonction du temps.

7 Présentation des données

7.1 Présentation et interprétation des données de conductivité électrique apparentes

7.1.1 Levé EM-31

7.1.2 Conductivité apparente : dipôle vertical (pénétration maximale de 6 m)

Les données de conductivité apparente, mesurées par la sonde EM-31, sont généralement moins affectées par les perturbations énumérées dans la section précédente. La carte de conductivité apparente montre dans un premier temps la présence d'une structure résistive (donc peu conductrice) localisée dans la partie centre-sud du périmètre (entre les stations 30 à 40 et les lignes 12 à 33) (Figure 15). Cette structure montre une orientation dominante parallèle au boulevard Louis-XIV. Le côté Sud de l'anomalie est très régulier et rectiligne tandis que le côté nord (vers le bas de la carte) présente un caractère plus diffus (Figure 15). Toute cette zone pourrait correspondre à la position des vestiges l'ancienne église.

Une autre structure, centrée sur l'actuelle statue du parc (entre les stations 18 à 22 et les lignes 19 à 25), montre une anomalie de faible conductivité qui devient coalescente avec l'anomalie précédente. Ce secteur montre des conductivités se rapprochant de 0 mS/m, ce qui est typique de matériaux solides non poreux comme la pierre calcaire ou le béton ayant été utilisé pour la construction de la statue et de son assise.

Il est intéressant de souligner la présence de deux anomalies linéaires (alignements SO et NO), prenant origine près de la statue et s'éloignant progressivement vers la 1^{re} Avenue (côté ouest du périmètre). Ces alignements pourraient être d'anciens sentiers aménagés dans le but de mettre en valeur la statue du parc. Les matériaux utilisés sont électriquement très résistifs comme en témoigne le deuxième diagramme de la figure 15. L'alignement SO suggère la présence de blocs discontinus et très résistifs pouvant correspondre à des pierres ou blocs de béton (si plus récent). L'alignement NO est toutefois plus homogène et les pierres ne semblent pas avoir été impliquées dans la construction de cette structure.

Les clôtures métalliques bordant le parc semblent répondre différemment en fonction de la proximité de câbles électriques. La circulation de courants alternatifs dans les lignes de transport d'électricité, à proximité des clôtures, permet une induction de courants électriques secondaires dans les structures métalliques. Cette circulation secondaire provoque la formation de champs électromagnétiques secondaires détectables par les sondes d'induction électromagnétique. Ainsi, l'induction de courants secondaires produit une forte interférence du côté sud du périmètre (en bordure du boulevard Louis-XIV). A l'opposé, cette interférence est négligeable en bordure de la 1^{er} Avenue (absence de ligne de transport électrique). Ceci témoigne de l'impact des lignes électriques sur les données géophysiques acquises en milieu urbain.

Malgré ces interférences, il est intéressant de souligner que l'essentiel du périmètre répond adéquatement au levé d'induction électromagnétique.

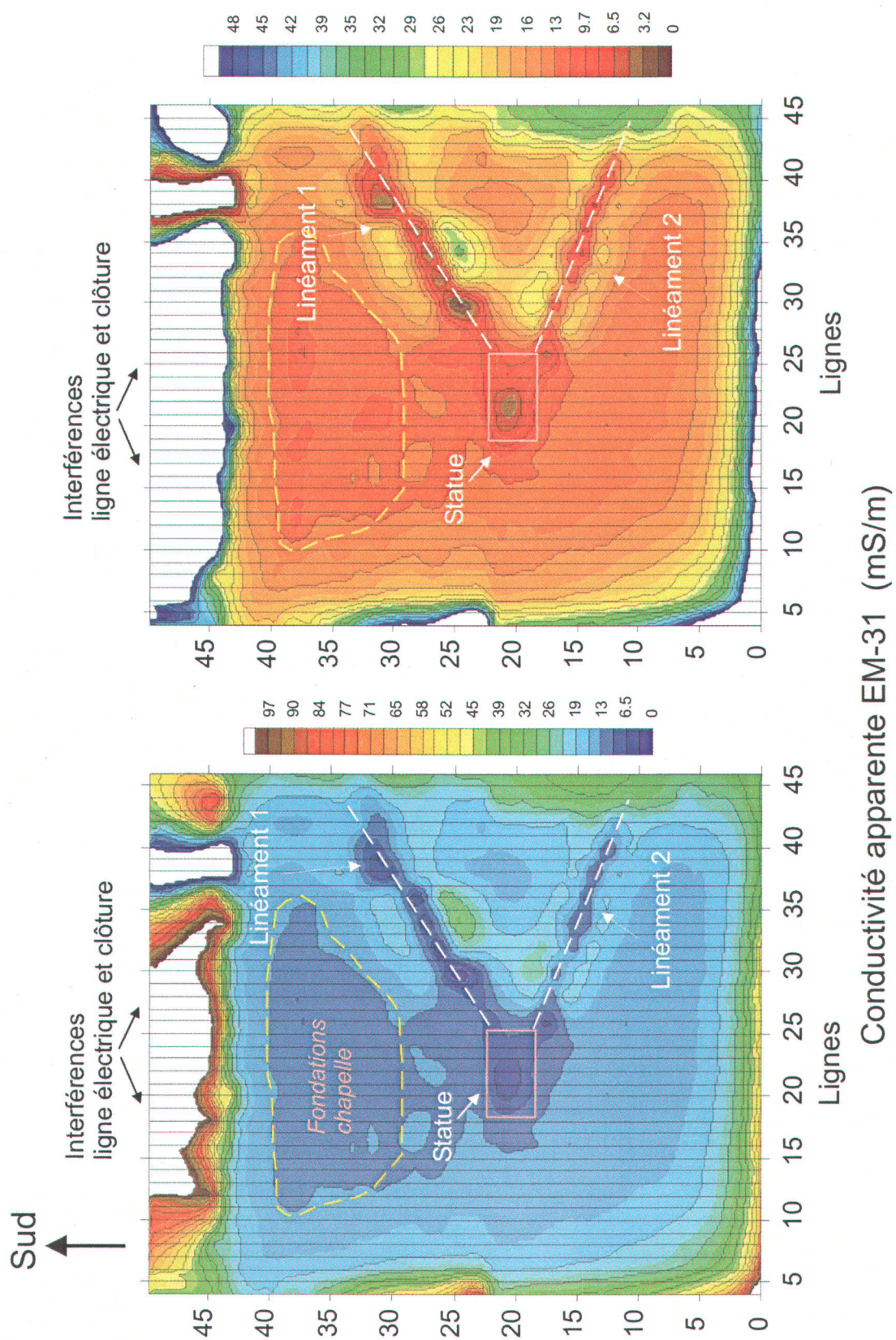


Figure 15. Carte de la conductivité apparente mesurée par induction électromagnétique à l'aide de la sonde EM-31. Le mode d'acquisition est en dipôle vertical et la profondeur maximale d'investigation est d'environ 6 mètres. Notez que le levé a été réalisé en suivant le réseau de lignes du périmètre.

7.1.2.1 Susceptibilité magnétique indiquée par la composante en phase du levé d'induction électromagnétique EM-31

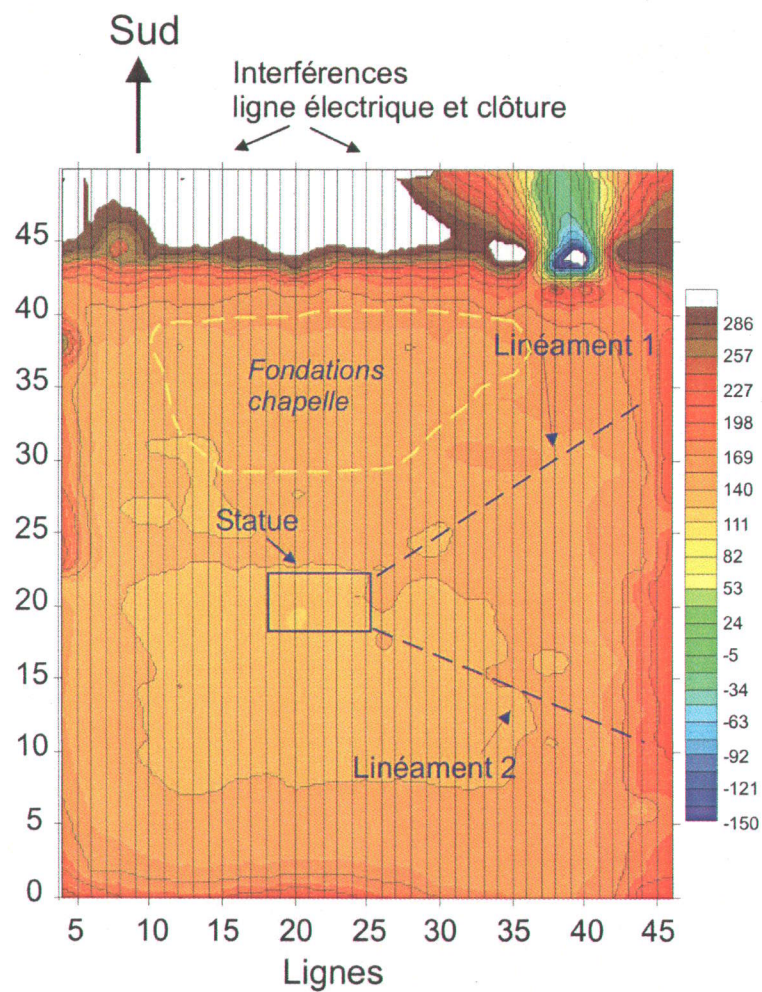
Afin d'évaluer les contrastes de susceptibilité magnétique (approximés par la composante en phase du levé d'induction électromagnétique) nous présentons en plan les variations des valeurs de la composante en phase mesurée par la sonde EM-31 (Figure 16).

La figure 9 présente les données de la composante en phase prélevées dans le mode d'acquisition en dipôle vertical (pénétration maximale de 6 m). La figure 16 montre de très fortes conductivités qui bordent le périmètre du parc du Sacré-Cœur. Ces anomalies sont strictement reliées à la présence des clôtures métalliques. Notez que la partie sud du périmètre bordant le boulevard Louis-XIV montre de très forts contrastes reliés au couplage clôture-ligne électrique. Ce phénomène atteint son paroxysme entre les lignes 38 à 42.

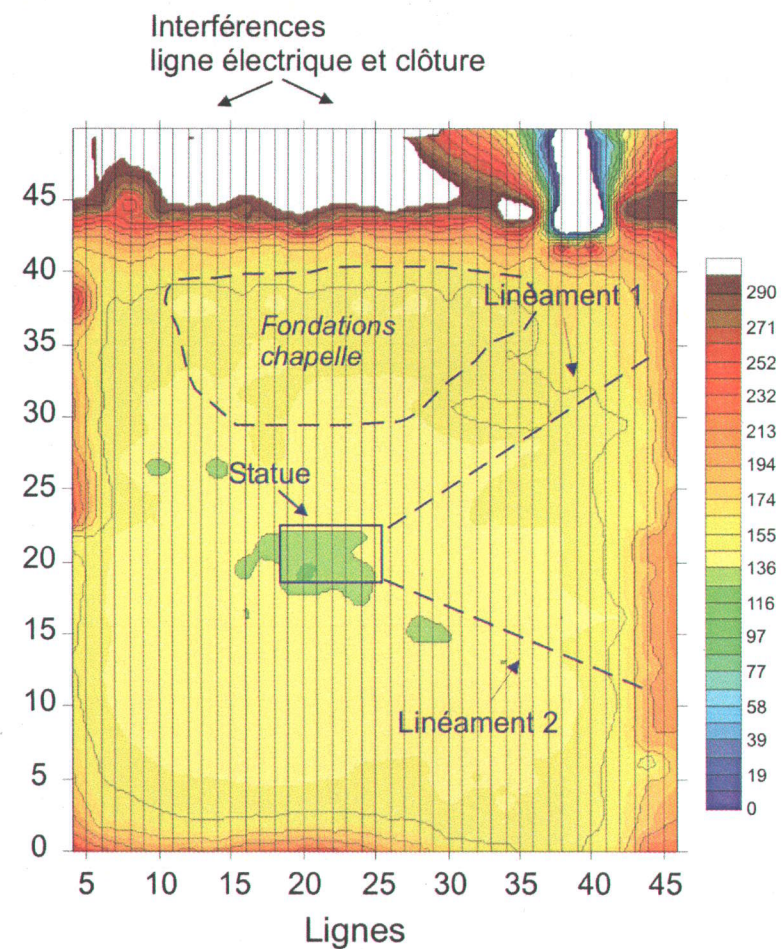
Dans l'ensemble, la sonde EM-31 ne montre pas d'éléments significatifs à l'intérieur du parc. Le secteur de la statue montre une chute significative de susceptibilité magnétique reflétant la présence de matériaux calcaires.

Notez également que la géométrie de la sonde EM-31 ne permet pas la détection de petits objets métalliques. Pour ce faire il faut préférentiellement utiliser une géométrie plus compacte où la distance séparant l'émetteur du récepteur est plus courte.

Figure 16. Carte de la composante en phase mesurée par induction électromagnétique à l'aide de la sonde EM-31. Le mode d'acquisition est en dipôle vertical et la profondeur maximale d'investigation est d'environ 6 mètres. Notez que la valeur de la composante en phase est une bonne approximation de la susceptibilité magnétique des matériaux présents dans les sols et remblais.



Susceptibilité magnétique estimée à partir de la composante en phase: levé EM-31



7.1.3 Levé GEM-2

Avant d'interpréter les données provenant du levé d'induction électromagnétique GEM-2 (multifréquences) nous avons évalué l'intensité du signal EM relié à la circulation du courant dans la ligne de transport électrique bordant le boulevard Louis-XIV.

La figure 17 montre très clairement une accentuation du signal *Power Line* de la sonde GEM-2 en se rapprochant du boulevard Louis-XIV. Comme le montre la figure 7f, une ligne de transport d'électricité borde le boulevard Louis-XIV. L'intensité du signal passe de 0,4 au Nord-Est à moins de 3×10^{-2} dans la partie sud du parc du Sacré-Coeur. Cette observation montre qu'il faut faire attention à l'interprétation des données géophysiques dans ce secteur. Un signal beaucoup plus atténué est observé le long de la 1^{re} Avenue. Ce dernier pourrait être associé à des conduites souterraines.

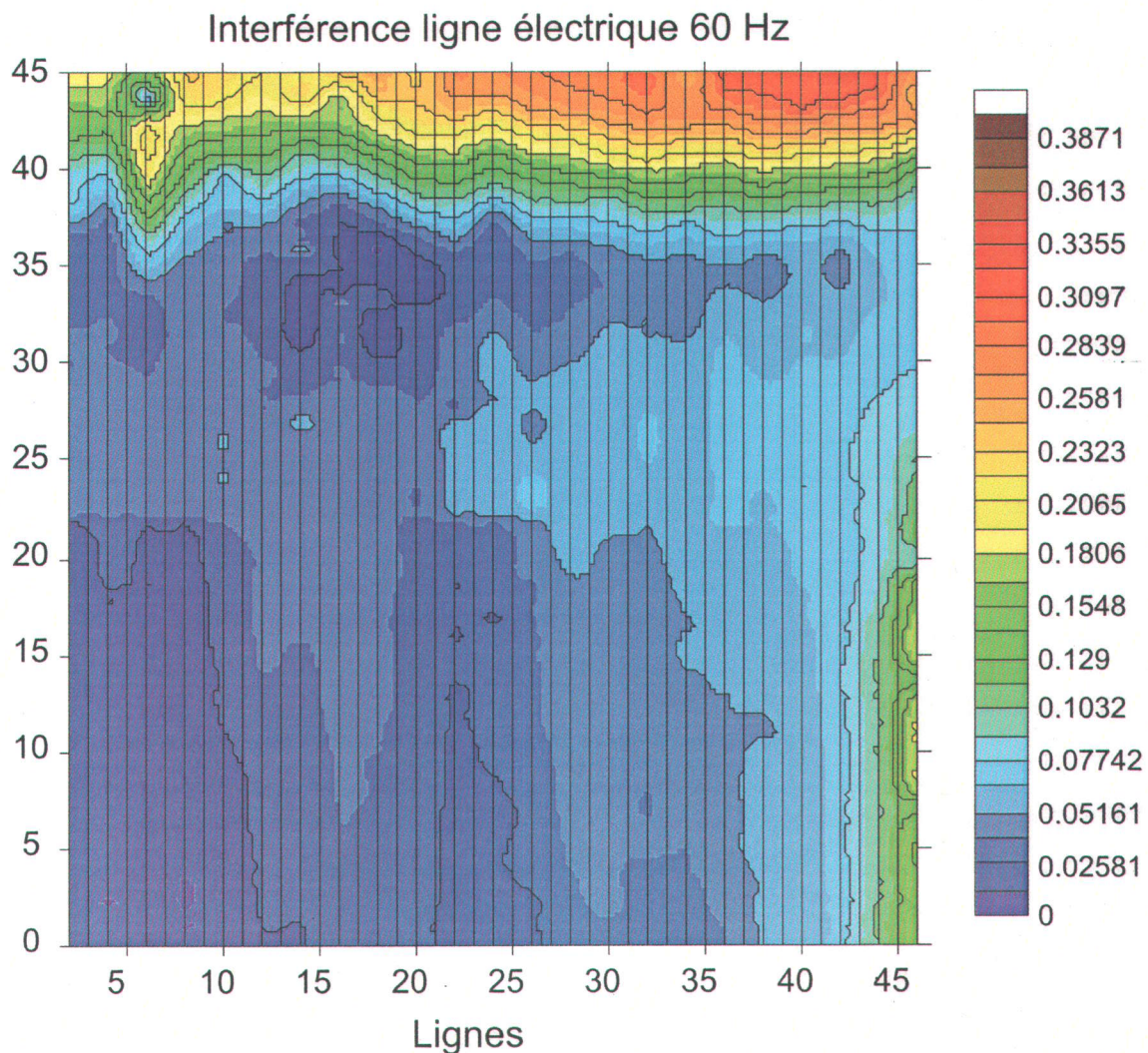


Figure 17. Carte montrant l'importance de l'interférence reliée à la circulation de courants électriques dans la ligne de transport située en bordure du boulevard Louis-XIV. Notez que les premiers 5 m sont significativement impactés par cette interférence. Prendre note que le point 0:0 qui figure en bas à gauche de la figure est en réalité le coin Nord-Est du périmètre.

7.1.3.1 Conductivité apparente mesurée par la sonde GEM-2.

Les figures 18 à 20 montrent les valeurs de conductivité apparente mesurées par induction électromagnétique à des fréquences de 4050, 7290 et 18270 Hz. Ces fréquences ont été sélectionnées pour investiguer des profondeurs variables dans les sols et remblais du parc. De plus, nous avons vérifié par calcul que notre sélection de fréquence permettait de minimiser les interférences reliées à la circulation d'électricité dans les lignes de 60 Hz d'Hydro-Québec. Ce choix de fréquence ne serait pas indiqué pour la réalisation de levés en Europe car les lignes de transport d'électricité européennes sont normalement à une fréquence de 50 Hz.

Compte tenu de l'objectif archéologique du projet, nous n'avons pas sélectionné de basse fréquence (ex. 350 Hz) pouvant investiguer jusqu'à 30-40m de profondeur. Le domaine de fréquences sélectionné permet une investigation de quelques dizaines de cm à possiblement 10 m (profondeur qui est fonction de la fréquence d'induction et de la résistivité du roc et du remblai).

Pour une fréquence de 4050 Hz, les cartes de la figure 18 montrent des valeurs de conductivité normales situées entre 0 et 60 mS/m. Les plus faibles valeurs sont observées près de la statue et les valeurs les plus élevées en bordure des clôtures métalliques limitant le parc du Sacré-Cœur. Le diagramme de droite sur la figure 18 présente les données filtrées en éliminant les données supérieures à 74 mS/m. Cette procédure permet de rehausser le contraste entre les valeurs de conductivité intermédiaires. Certains éléments observés sur les cartes du levé EM-31 sont également apparents sur la figure 18. Entre autre, les linéaments SO et NO s'alignant sur le secteur de la statue sont visibles mais moins contrastés par rapport aux données du EM-31. Le secteur de la statue est également marqué par une faible conductivité apparente (0-20 mS/m). Le secteur sud montre également la présence de structures résistives mais plus discontinues que sur le levé EM-31. Cette différence entre les deux levés souligne le fait qu'à 4050 Hz, la sonde GEM-2 pénètre plus profondément le sol et renvoie un signal reflétant l'intégration d'un plus grand volume de roc, sol et remblais. Notez que les structures résistives du secteur probablement associé à l'ancienne église sont toujours parallèles au boulevard Louis-XIV.

La figure 18 (données filtrées de 0 à 73 mS/m) montre de plus une zone plus conductrice située entre les lignes 18 à 20. Ce secteur est parsemé de fortes valeurs de conductivité discontinues pouvant refléter la présence d'objets métalliques.

A une échelle différente, les données du GEM-2 montrent beaucoup de variabilité à l'intérieur d'un intervalle relativement court (inf. à 3 m). Ces perturbations pourraient entre autres refléter la présence d'anciennes sépultures individuelles.

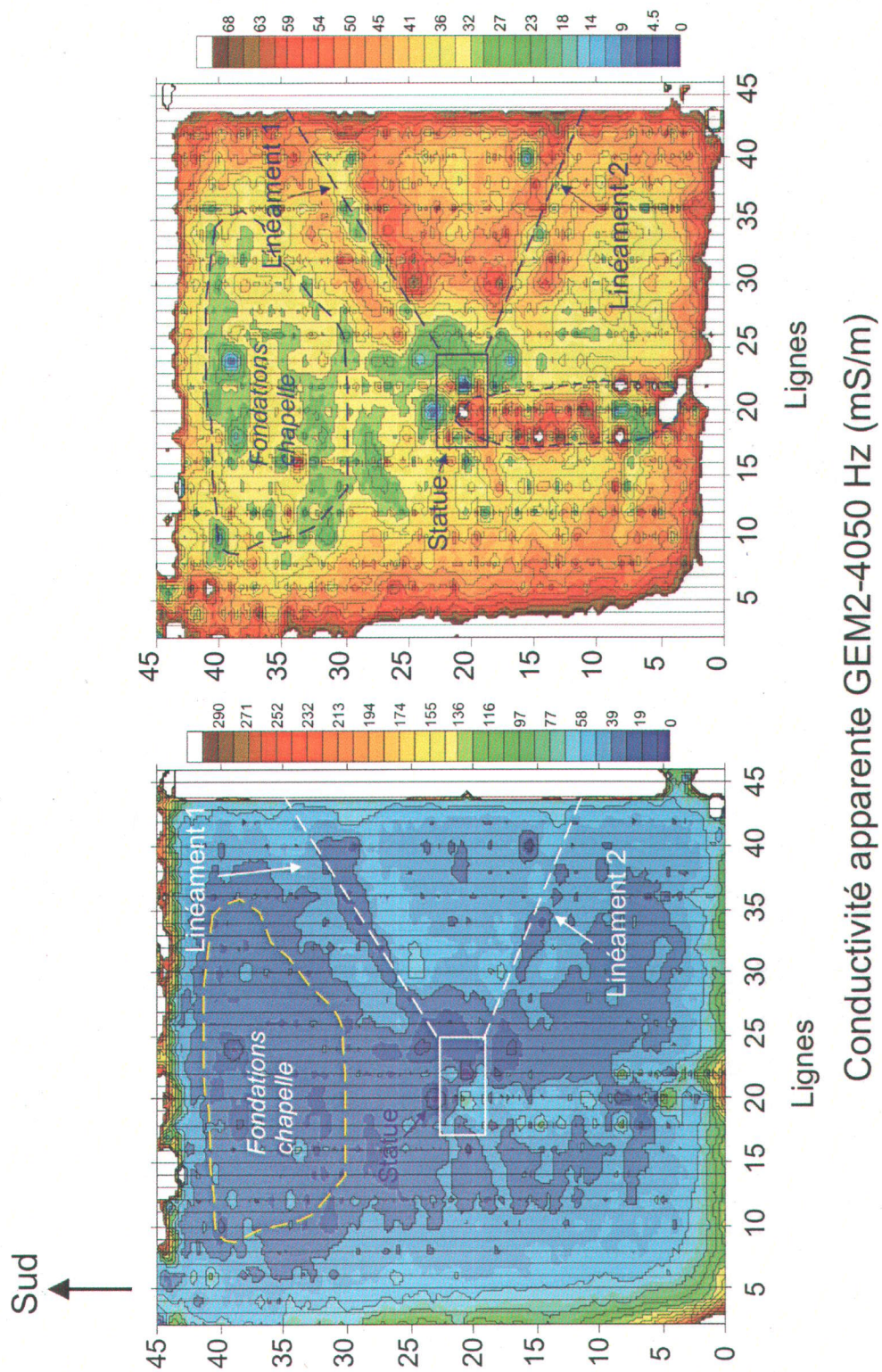


Figure 18. Carte de la conductivité apparente mesurée par induction électromagnétique à l'aide de la sonde GEM-2 (fréquence de 4050 Hz). Le mode d'acquisition est en dipôle vertical. Notez que le levé a été réalisé en suivant le réseau de lignes du périmètre.

Pour une fréquence de 7290 Hz, les cartes de la figure 19 montrent des valeurs de conductivité normales situées entre 0 et 70 mS/m. Les plus faibles valeurs sont observées près de la statue et les valeurs les plus élevées en bordure des clôtures métalliques délimitant le parc du Sacré-Cœur. Le diagramme de droite sur la figure 19 présente les données filtrées en éliminant les données supérieures à 70 mS/m. Cette procédure permet de rehausser le contraste entre les valeurs de conductivité intermédiaires.

Certains éléments observés sur les cartes du levé EM-31 sont apparents sur la figure 19, comme les linéaments SO et NO, s'alignant sur le secteur de la statue, qui sont très visibles et beaucoup plus contrastés que sur les cartes de la figure 15. Pour une fréquence d'induction de 7290 Hz, nous pouvons observer des détails concernant la structuration des anomalies associées aux linéaments SO et NO (I et II). Entre autres, notons la présence d'une zone axiale plus résistive qui est bordée par des épaulements plus conducteurs que les valeurs normalement observées dans les remblais du parc. Ce secteur mériterait d'être sondé par les archéologues pour vérifier la nature des matériaux présents dans ces structures anthropiques.

Le secteur sud (vers le haut de la carte) montre la présence de structures résistives géométriquement plus restreintes que ce qui est indiqué sur les cartes du levé EM-31 et du levé GEM-2 à 4050 Hz (Figures 15 et 17).

La figure 19 (données filtrées de 0 à 73 mS/m) montre encore la présence de la zone plus conductrice située, entre les lignes 17 à 20, au nord de la statue (bas de la carte). Ce secteur est encore parsemé de fortes valeurs de conductivité discontinues pouvant refléter la présence d'objets métalliques. Cette hypothèse devrait être vérifiée par des sondages archéologiques.

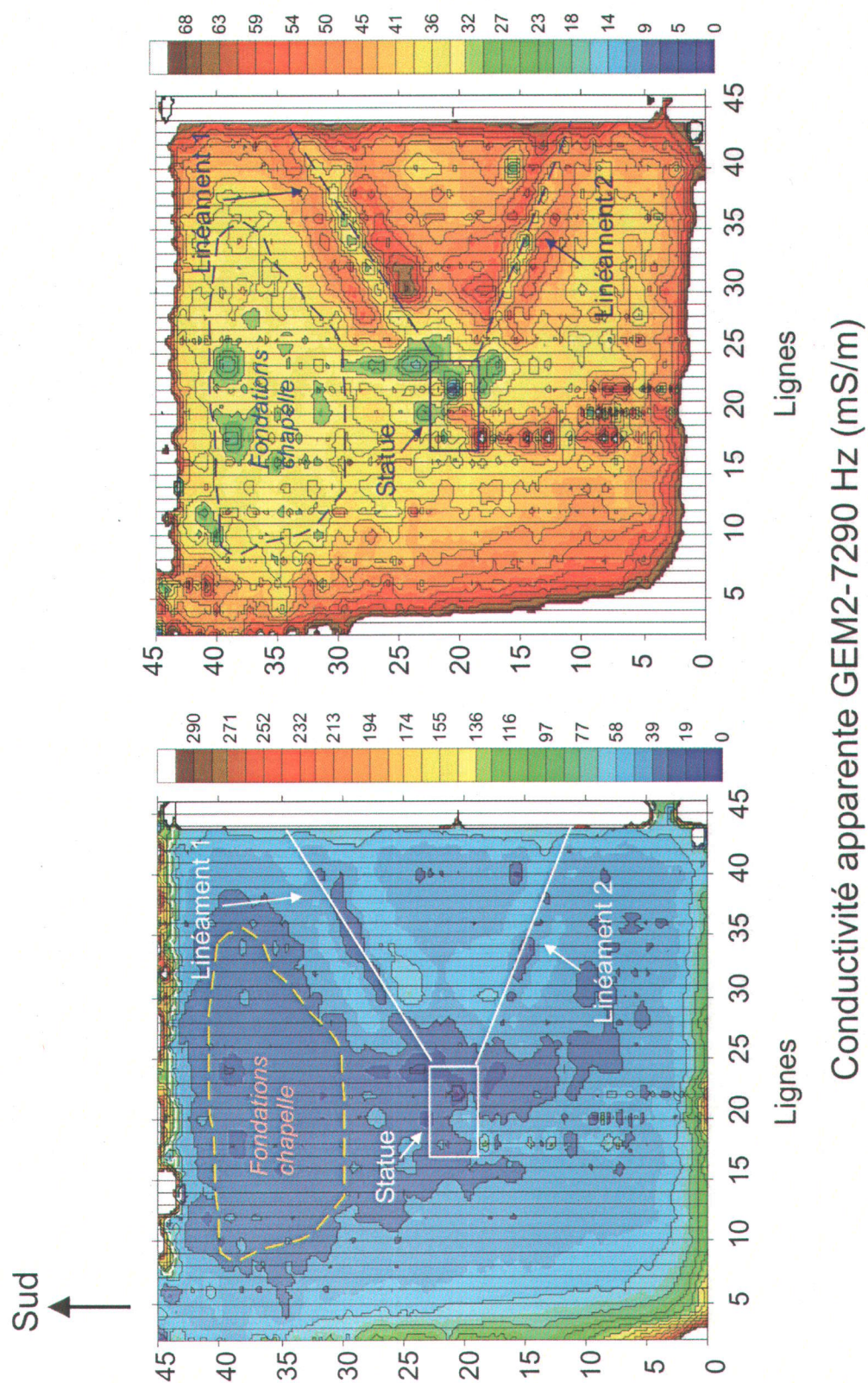


Figure 19. Carte de la conductivité apparente mesurée par induction électromagnétique à l'aide de la sonde GEM-2 (fréquence de 7290 Hz). Le mode d'acquisition est en dipôle vertical. Notez que le levé a été réalisé en suivant le réseau de lignes du périmètre.

Pour une fréquence de 18270 Hz, les cartes de la figure 20 montrent des valeurs de conductivité apparente variant sur une large gamme (entre 0 et 310 mS/m). Les plus faibles valeurs sont également observées près de la statue et les valeurs les plus élevées en bordure des clôtures métalliques limitant le parc du Sacré-Cœur. Notez que la zone d'emprise de l'interférence reliée aux clôtures diminue proportionnellement avec l'augmentation de la fréquence d'induction utilisée par la sonde GEM-2. Ainsi pour une induction de 18270 Hz, la figure 20 montre la présence d'une bordure d'environ 2 m potentiellement interférée par la circulation, dans les structures métalliques des clôtures, de courants électriques induits.

Le diagramme de droite de la figure 20 présente les données filtrées en éliminant les données supérieures à 73 mS/m. Cette procédure permet de rehausser le contraste entre les valeurs de conductivité intermédiaires.

Certains éléments observés sur les cartes du levé EM-31 et du GEM-2 (4050 et 7290 Hz) sont apparents sur la figure 20. Par exemple, les linéaments SO et NO, s'alignant sur la statue, sont marqués et beaucoup plus contrastés que sur les cartes précédentes. Pour la fréquence d'induction de 18270 Hz, nous pouvons observer des détails concernant la structuration des anomalies associées aux linéaments SO et NO (anomalies I et II sur les plans). Entre autre, notons la présence d'une zone axiale plus résistive qui est bordée par des épaulements plus conducteurs que les valeurs normalement observés dans les remblais du parc.

Le secteur sud (vers le haut de la carte) montre la présence d'une structure résistive rectangulaire qui correspond vraisemblablement aux vestiges de l'ancienne église. En faisant abstraction de la signature associée au secteur de la statue, on peut déjà confirmer l'efficacité du levé GEM-2 en haute fréquence d'induction sur ce site.

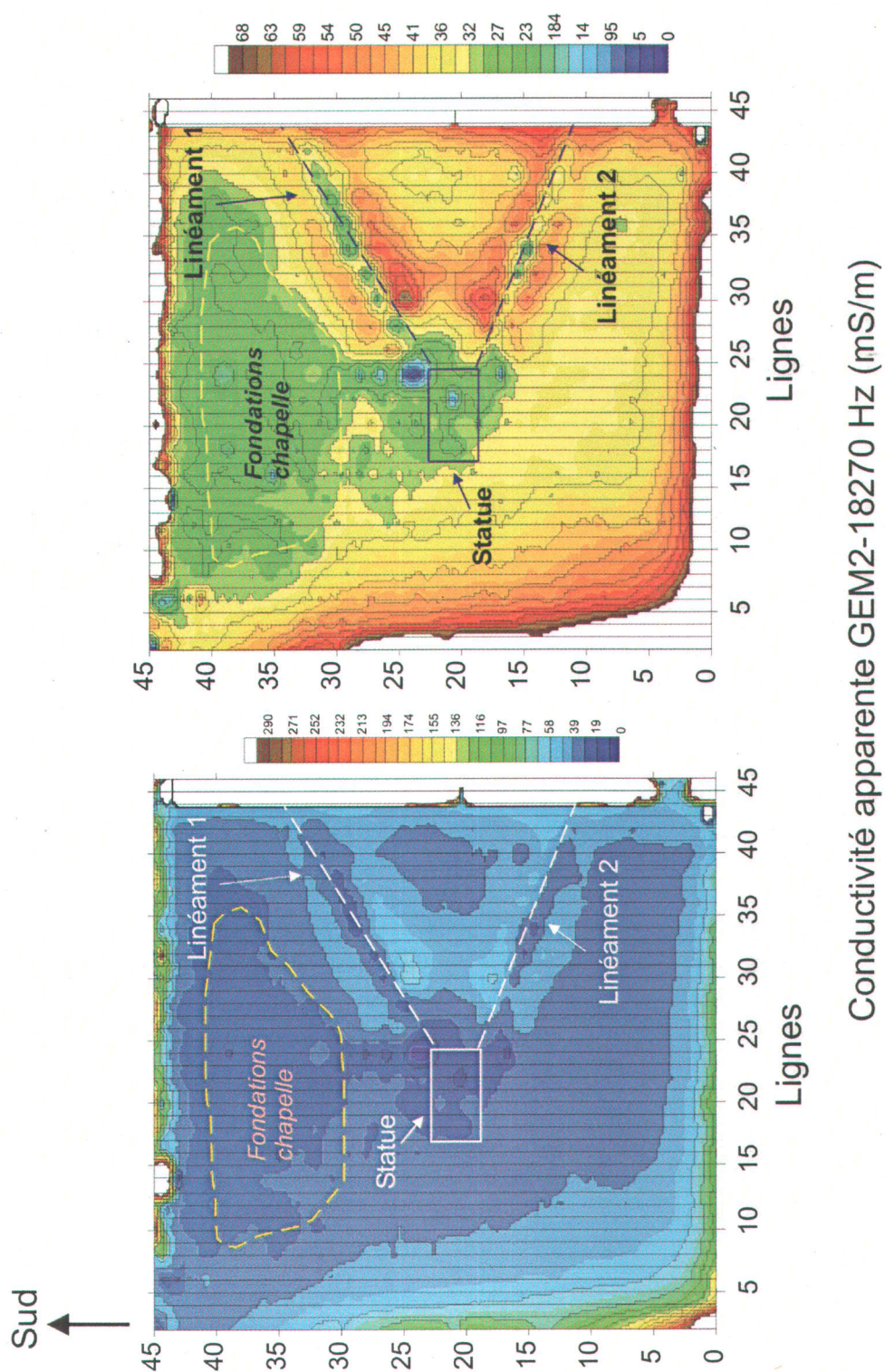


Figure 20. Carte de la conductivité apparente mesurée par induction électromagnétique à l'aide de la sonde GEM-2 (fréquence de 18270 Hz). Le mode d'acquisition est en dipôle vertical. Notez que le levé a été réalisé en suivant le réseau de lignes du périmètre.

7.1.3.2 Estimation de la susceptibilité magnétique induite à partir de la composante en phase du levé GEM-2.

Afin d'évaluer les contrastes de susceptibilité magnétique (approximés par la composante en phase du levé d'induction électromagnétique) nous présentons en plan les variations des valeurs de la composante en phase mesurée par la sonde GEM-2 pour différentes fréquences d'induction (Figures 21, 22 et 23).

La figure 21 présente les données de la composante en phase prélevées dans le mode d'acquisition en dipôle vertical pour une fréquence de 4050 Hz. La figure 21 montre de fortes signatures en bordure du boulevard Louis-XIV. Ces anomalies sont encore une fois reliées à la présence de la clôture métallique et aux interférences associées à la ligne de transport d'électricité qui longe ce boulevard. Notez que l'impact des clôtures semble moins important lorsque ces dernières sont éloignées des lignes électriques aériennes.

Le seul éléments d'intérêt observé sur la carte des données filtrées à moins de 20 mS/m (Figure 21) est la présence de petites anomalies discontinues et alignées nord-sud entre les lignes 17 à 22 et les stations 0 à 23. Cette zone anomalique est également présente sur les cartes de conductivité apparente mesurée par la sonde GEM-2.

La figure 22 présente les données mesurées pour une induction de 7290 Hz. Dans l'ensemble, les rares anomalies observées ressemblent à celles mesurées pour une induction à 4050 Hz. Entre autre, les anomalies alignées nord-sud entre les lignes 17 à 22 et les stations 0 à 23 sont apparentes.

La figure 23 montre les résultats obtenus pour une induction à 18270 Hz. À cette haute fréquence, la pénétration du champ électromagnétique primaire est relativement faible (0-1m) ce qui permet de mettre en évidence des anisotropies peu profondes et donc facilement accessibles aux archéologues. Certaines anomalies sont présentes au voisinage immédiat de la statue centrale tandis que d'autres sont présentes dans des endroits plus stratégiques comme le secteur probable de l'ancienne église. Dans ce dernier secteur, on peut déceler trois anomalies ponctuelles sur les lignes 18, 24 et 32 à la hauteur de la station 38. Ces anomalies devraient idéalement être vérifiées lors de sondages archéologiques. Une autre anomalie ponctuelle significative est localisée sur la ligne 40 entre les stations 15 et 16. Ces anomalies devraient correspondre à la présence d'objets métalliques enfouis dans le sol.

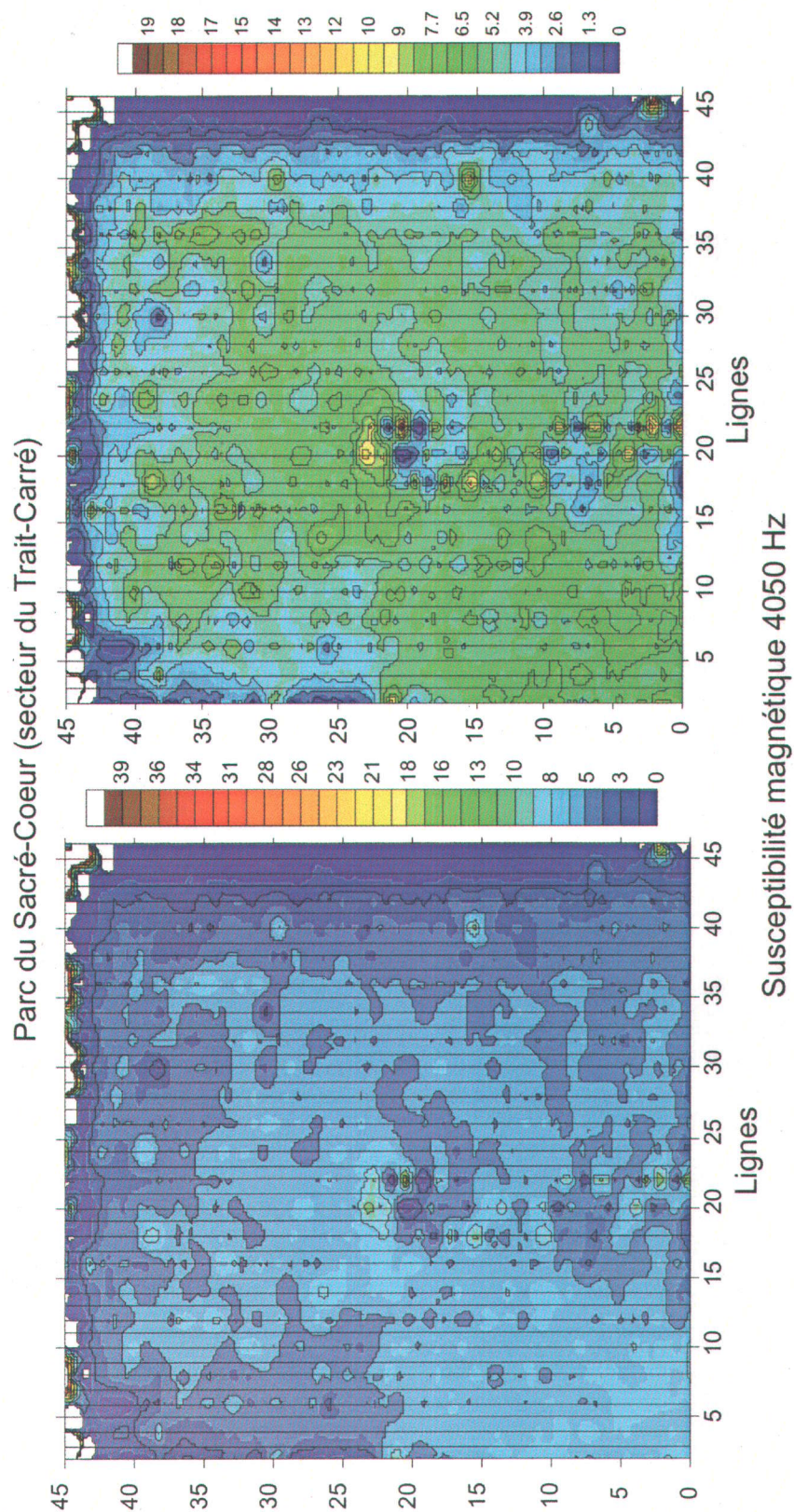


Figure 21. Carte de la composante en phase mesurée par induction électromagnétique (données filtrées: les données inférieures à 0 sont éliminées) à l'aide de la sonde GEM-2 et pour une fréquence d'induction de 4050 Hz. Le mode d'acquisition est en dipôle vertical. Le point 0:0 constitue l'extrémité N-E du périmètre.

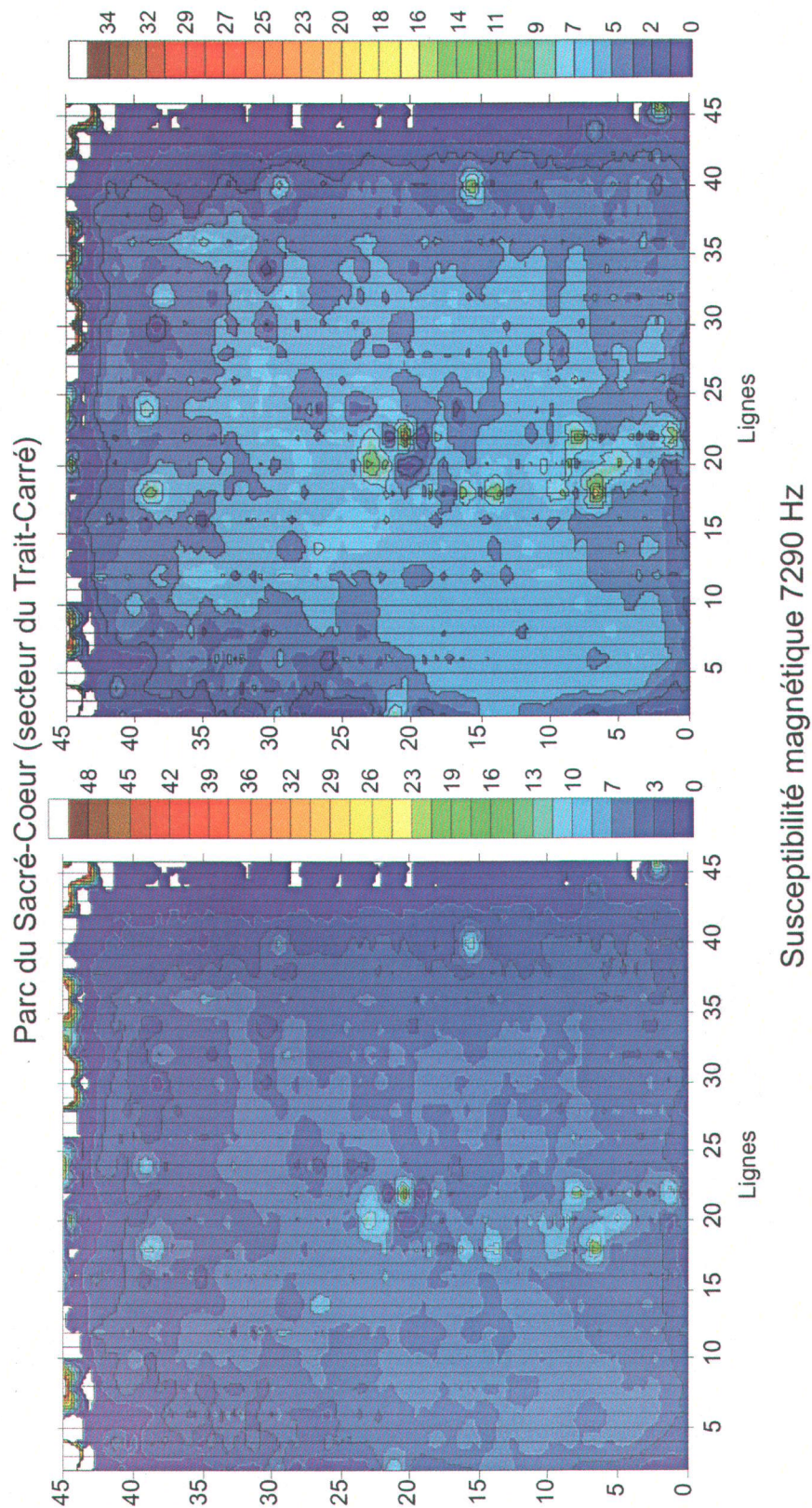


Figure 22. Carte de la composante en phase mesurée par induction électromagnétique (données filtrées: les données inférieures à 0 sont éliminées) à l'aide de la sonde GEM-2 et pour une fréquence d'induction de 7290 Hz. Le mode d'acquisition est en dipôle vertical. Le point 0:0 constitue l'extrémité N-E du périmètre.

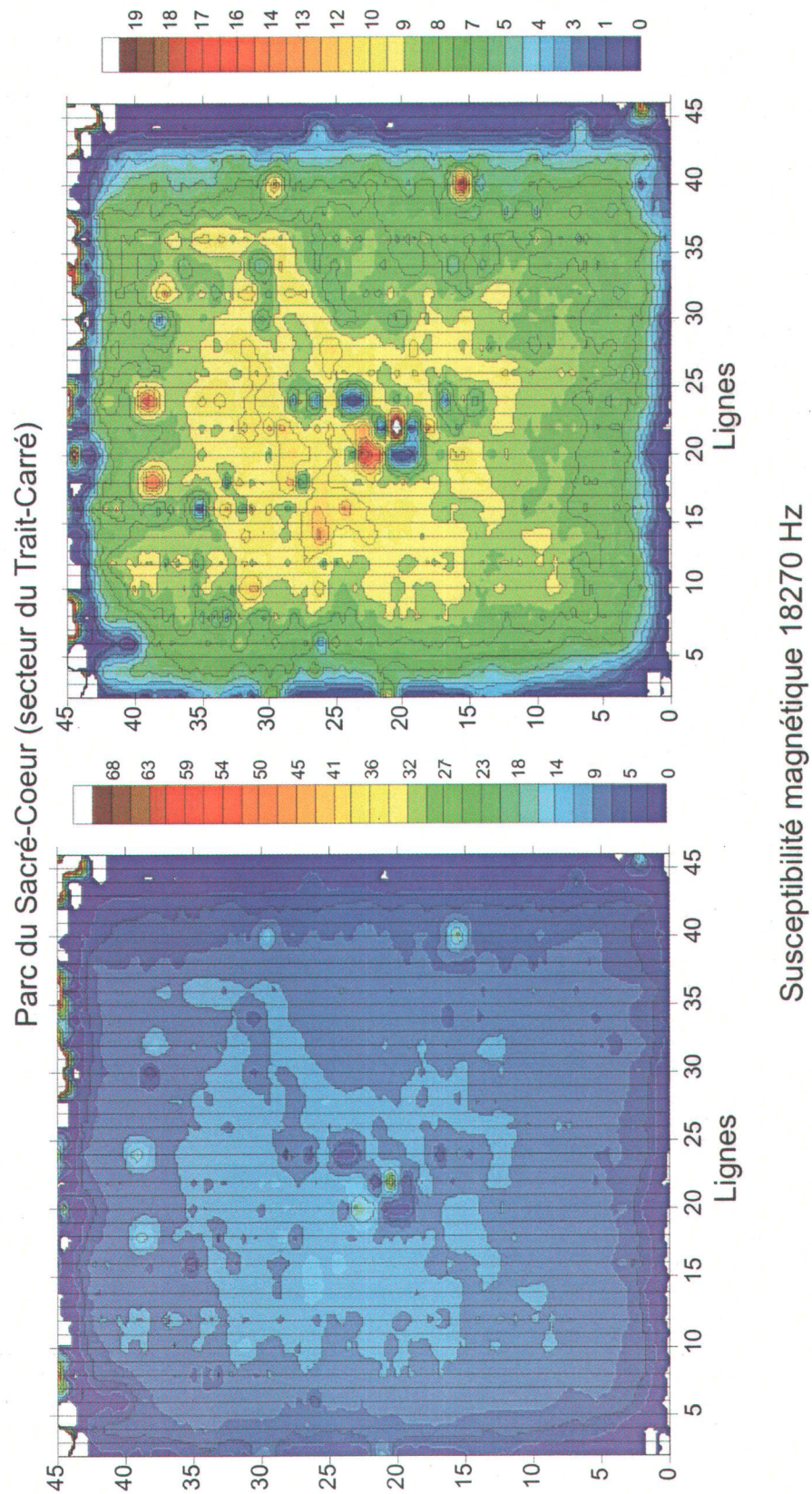


Figure 23. Carte de la composante en phase mesurée par induction électromagnétique (données filtrées: les données inférieures à 0 sont éliminées) à l'aide de la sonde GEM-2 et pour une fréquence d'induction de 18270 Hz. Le mode d'acquisition est en dipôle vertical. Le point 0:0 constitue l'extrémité N-E du périmètre.

7.2 Présentation et interprétation des résultats des levés Géoradar 500 et 800 MHz.

La figure 3 présente un plan montrant les différentes lignes ayant fait l'objet du levé Géoradar sur le site du Parc du Sacré-Coeur. Ces levés ont été réalisés en double sur l'ensemble de la surface du parc au moyen d'antennes de 500 et 800 MHz. Comme mentionné plus haut, l'antenne de 500 MHz permet d'investiguer 0-3 m sous la surface du sol alors que l'antenne de 800 MHz permet de scruter de la surface à environ 1,5 m de profondeur.

Certaines zones restreintes, localisées dans le secteur de la statue, n'ont pas fait l'objet de mesures en raison de la présence de la statue ou de son assise de pierre. Lorsque qu'un arbre était présent sur un segment de ligne, l'opérateur du géoradar a contourné l'arbre tout en continuant l'acquisition des données. Un maximum de précaution a été apporté pour minimiser toutes distorsions linéaires des données. Plusieurs balises (*flag*) ont été enregistrées sur les profils géoradar pour noter le passage de piquets d'arpentage lors du levé.

Les données présentées dans l'annexe A ont été modifiées après avoir appliqué un du filtre AC ainsi qu'un filtre pour compenser l'atténuation du signal en fonction de la profondeur. Pour ce faire, nous avons fixé un gain linéaire de 40 ainsi qu'un gain exponentiel de 15. Rappelons que l'énergie de propagation de l'onde radar s'atténue rapidement en fonction de la distance dans le sol ce qui implique que les horizons ou réflecteurs situés plus en profondeur sont difficilement discernables. Pour l'interprétation des résultats, l'amplification du signal est donc nécessaire. Toutefois, soulignons que la procédure d'amplification du signal entraîne aussi une augmentation proportionnelle du bruit de fond, ce qui limite la profondeur d'investigation d'un levé géoradar.

Notons d'abord que les résultats des levés effectués avec l'une et l'autre antenne n'ont pas la même valeur. En effet, les sections obtenues au moyen de l'antenne de 800 MHz sont beaucoup moins révélatrices quant à la présence de murs dans le secteur sud du par cet c'est pourquoi la discussion qui suit s'appuie exclusivement sur les résultats des levés géoradar à 500 MHz.

Les profils réalisés dans le secteur sud des lignes 26 à 42 montrent des spectres radars contrastés et caractérisés par la présence de deux structures verticales parallèles, faisant environ 1 m d'épaisseur chacune et distancées l'une de l'autre d'environ 11 mètres. Ces deux structures sont ancrées à plus de 2 m de profondeur et constituent certainement les fondations de l'ancienne église de Charlesbourg construite à la fin du 17^e siècle.

Les levés géoradar permettent de suivre les murs de fondation nord, sud et ouest sur plusieurs mètres. Les profils des lignes 21 à 40 présentent des vestiges du mur sud entre les stations 40 et 44 m, alors que le mur nord est présent sur les levés des lignes 27 à 38 entre les stations 28 et 32 m. À l'est, on retrouve aussi des vestiges des fondations sur les levés des lignes 6, 8, 10, 12, 14, 16 et 18 et ce essentiellement en rapport avec le mur sud ; seules les lignes 14 et 16 indiquent aussi de possibles vestiges au niveau des stations 20 et 28 m respectivement.

Les vestiges de l'église se présentent avec un léger angle par rapport au tracé actuel du boulevard Louis-XIV. Or ce décalage est tout à fait pertinent dans le cas présent puisqu'il indique une modification de tracé originel du tracé. En effet, lorsque l'on superpose les vestiges de l'église sur des plans anciens, on note une disposition parfaitement parallèle de la rue et de l'église (André Nault, comm. pers.).

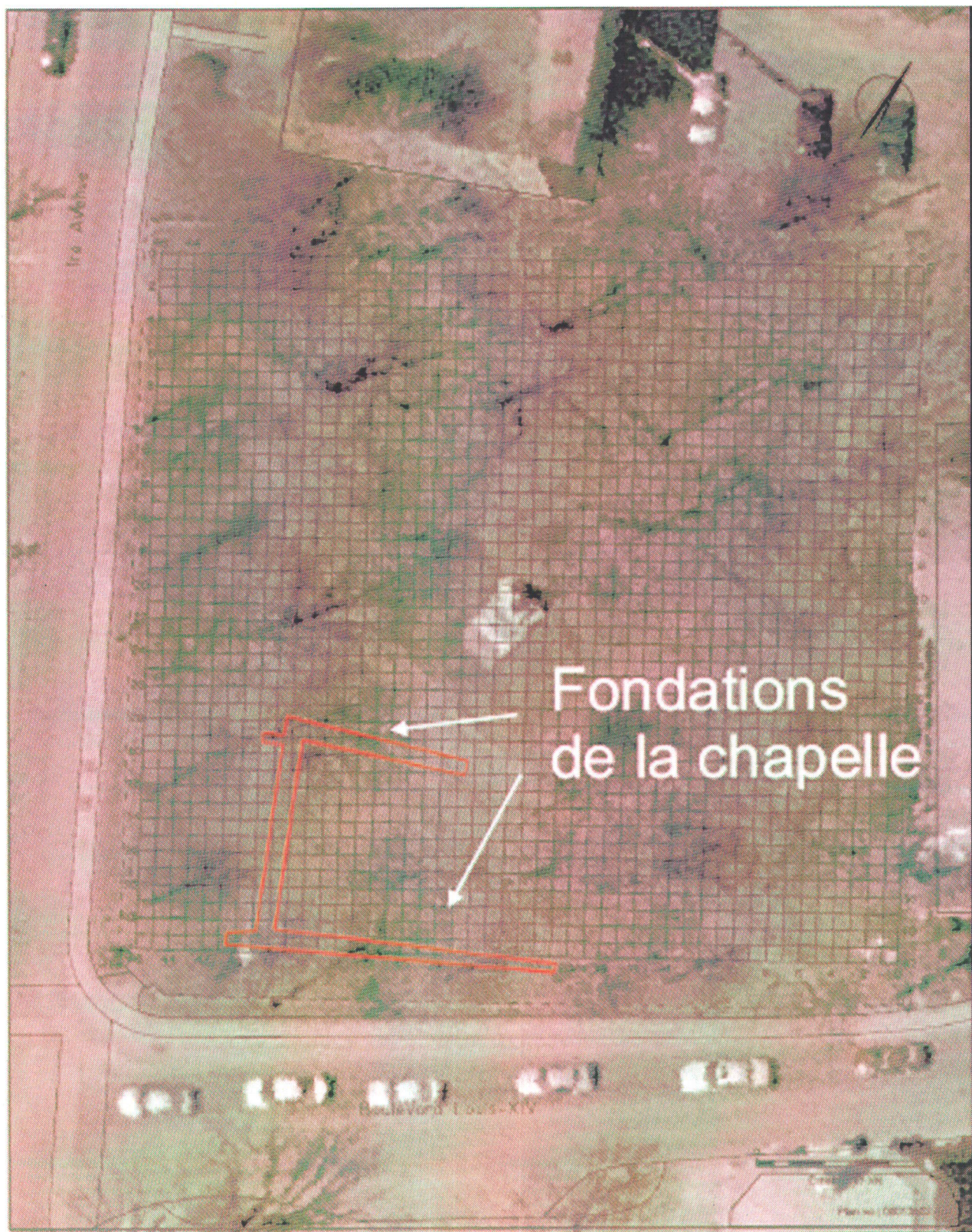


Figure 24. Plan du Parc du Sacré-Cœur présentant des sections des murs de fondation nord, sud et ouest telles que révélées par les levés géoradar avec l'antenne de 500 MHz.

Quelle forme avait donc cette chapelle ? S'agit-il d'une église en forme de croix latine comme Villeneuve le croit ? Les indices que nous avons jusqu'à maintenant ne nous permettent pas encore d'avoir une idée globale de la forme de l'église. Seules les interventions archéologiques prévues pour le printemps 2007 pourront éclaircir ce point. Notons toutefois que des vestiges architecturaux semblent notamment présents sur les lignes 4, 8, 10 et 12 entre les stations 36 et 44, donc à la limite est de l'église.

Quant à la présence de sépultures, les levés géoradar présentent de nombreux réflecteurs hyperboliques qui pourraient y être associée, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'église. En revanche, la résolution des levées, espacés de 2 m, semble insuffisante pour mettre en évidence de telles anomalies (faible contraste par rapport au bruit ambiant). Dans la littérature, les levés géoradar menés dans le but de localiser des sépultures se font à très haute résolution dans un espace quadrillé au 50 cm (Conyers et Goodman, 1997). Dans le cadre actuel, il serait risqué de tenter d'interpréter certains réflecteurs hyperboliques en tant que sépultures. Notons également que si des sépultures se trouvaient accolées à un mur, la puissance du réflecteur générée par ce dernier pourrait masquer sinon oblitérer complètement le réflecteur créé par la sépulture.

7.3 Validation des résultats des levés géophysiques :

Peu de temps après la fin des travaux de géophysique, la Ville de Québec a mandaté le paléoanthropologue Robert Laroque pour entreprendre des sondages archéologiques. Ceux-ci visaient à poursuivre les travaux d'inventaire du site et en même temps, à valider les résultats de l'étude géophysique. Avant de quitter le site du parc du Sacré-Cœur, l'équipe de l'INRS-ETE a soigneusement délimité à la peinture de marquage et à l'aide de piquet de bois les limites intérieures et extérieures des fondations de l'ancienne église. À partir de ces éléments, les archéologues ont implanté des sondages dont les résultats sont clairement représentés sur la photo de la figure 25.

L'équipe d'archéologues a intersecté les murs nord, sud et ouest de l'église et ce à moins de 15 cm de ce qui avait été prédit à partir des données géophysiques. Ces résultats confirment la qualité des levés géophysiques tout en démontrant le potentiel de telles méthodes dans l'optimisation de la recherche archéologique.

Notons enfin que les sondages archéologiques ont également permis la mise au jour de plusieurs ossements humains témoignant des activités d'inhumation qui se sont déroulées sur le site au cours du 18^e siècle. Les sondages archéologiques de l'automne 2006 ont été implantés de façon à intersecter les murs de fondation et les ossements exhumés ne sont pas des sépultures complètes. Notons toutefois que des ossements ont été trouvés à la fois à l'intérieur du carré de l'église et à l'extérieur.

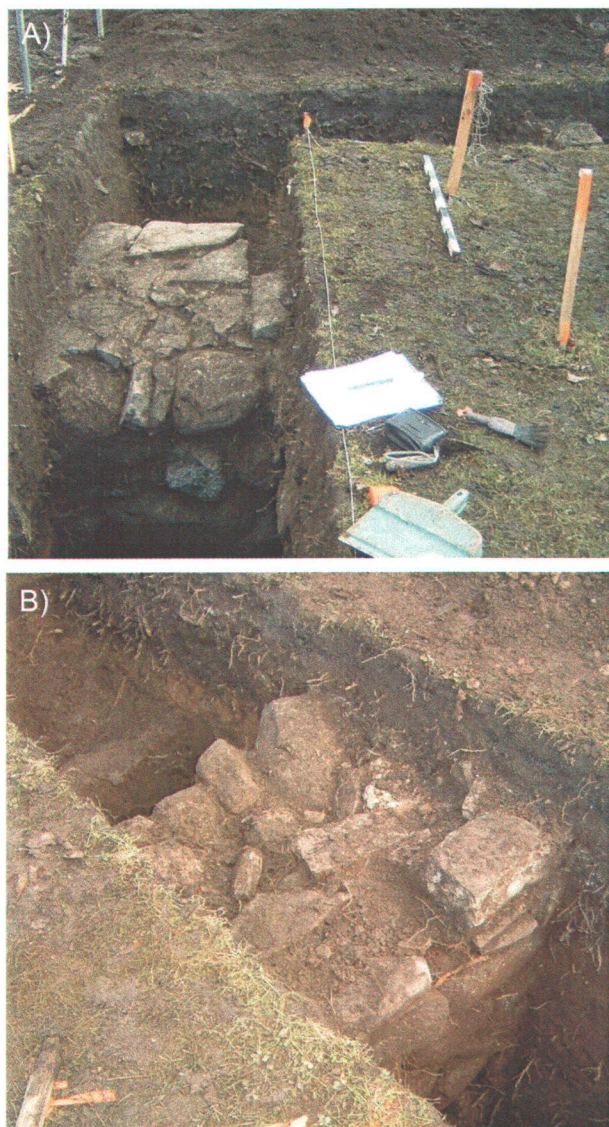


Figure 25. Fondations de la première église de Charlesbourg telles que mises au jour en novembre 2006 par l'équipe d'archéologie de la Ville de Québec. Notez que ces fondations ont été détectées par géoradar avec une antenne de 500 MHz. Photos prises par Caroline Thibault, Ville de Québec.

8 Conclusions et recommandations

Les travaux de géophysique réalisés sur le site du parc du Sacré-Coeur permettent de mettre en évidence plusieurs éléments d'intérêt archéologique :

- 1) D'abord, les fondations de la première église de Charlesbourg se concentrent dans la portion sud du parc, près de l'actuel boulevard Louis-XIV;
- 2) Les méthodes géophysiques exploitées dans le cadre de ces travaux ont permis de localiser les vestiges des fondations nord, sud et ouest de l'église avec une grande exactitude;
- 3) D'après nos levés, les murs de fondation font près de 1 m d'épaisseur et sont ancrés à environ 2 m sous la surface actuelle du parc;
- 4) Dans la portion sud-est du parc, les murs de fondation semblent en partie arasés ce qui complique l'interprétation des levés géoradar. Notons toutefois que les murs nord et sud semblent dans un bon état de conservation sur une distance de plus de 20 m au sud comme au nord;
- 5) Les dimensions probables de l'église sont d'environ 11 m de largeur par au moins 30 m de longueur;
- 6) Les levés d'induction électromagnétique indiquent que la zone sud de parc forme un domaine dont la conductivité et la susceptibilité magnétique contrastent par rapport au bruit de fond ambiant. On note globalement un abaissement des valeurs dans le secteur sud du parc, là où reposent les vestiges de la première église.

Les méthodes géophysiques de caractérisation de la sub-surface déployées dans le cadre de ces travaux se sont avérées fort efficaces, et tout particulièrement le géoradar. La performance du géoradar relève à la fois de la fréquence de l'antenne utilisée (500 MHz), mais également des propriétés du sol, lequel permettait une très bonne pénétration des ondes. Le fait que le site n'est pas fait l'objet d'occupations subséquentes à la destruction de l'église a également joué en notre faveur. En effet, lorsque de multiples occupations se superposent, entremêlées de niveaux de destruction, de remblaiement et de surfacage, le déchiffrement des données devient alors très complexe et les subtilités ou faibles contrastes sont alors noyés dans un bruit de fond énorme.

Ce site comporte un potentiel archéologique indéniable et il serait important de le préserver de toute altération potentielle. Ainsi, si des interventions archéologiques sont à prévoir dans un avenir proche, le secteur sud est à privilégier, et notamment le secteur sud-est entre les lignes 4 et 12, et entre les stations 36 et 44. Des fouilles de ce secteur permettraient de vérifier la présence du mur est de l'église. De même, afin de préciser la forme de l'église, une tranchée pourrait être pratiquée à environ 2 m au nord du mur nord, et parallèle à celui-ci, afin d'évaluer la présence d'ailes telles qu'illustrées sur le plan hypothétique de Villeneuve (1986).

Des sondages pourraient également être pratiqués sur les linéaments identifiés dans le secteur ouest du parc. De petits sondages pourraient également être implantés dans le secteur nord du parc, entre les lignes 4 et 18, et entre les stations 0 et 8 m car de bons réflecteurs y ont été observés, ancrés à environ 60 cm de la surface. Ces réflecteurs pourraient correspondre à la construction de fondations pour un bâtiment secondaire.

Enfin, ce site contient également un potentiel certain pour la recherche en paléanthropologie et si des fouilles visant l'exhumation de sépultures étaient programmées, il serait pertinent d'effectuer un nouveau levé géoradar à très haute résolution (lignes espacées de 25 cm) dans un périmètre réduit, afin de localiser les cibles potentielles et d'optimiser les fouilles proprement dites.

Références bibliographiques

COMMISSION DES BIENS CULTURELS DU QUÉBEC. 2005. *Étude de caractérisation de l'arrondissement historique de Charlesbourg*, Québec, Commission des biens culturels du Québec.

CONYERS, L.B. et GOODMAN, D. 1997. *Ground-penetrating radar: An Introduction for Archaeologists*. Walnut Creek, CA: Altamira Press.

PICARD, Philippe. 1990. *Bibliographie de l'histoire du Trait-Carré et bâtiments patrimoniaux*. Charlesbourg.

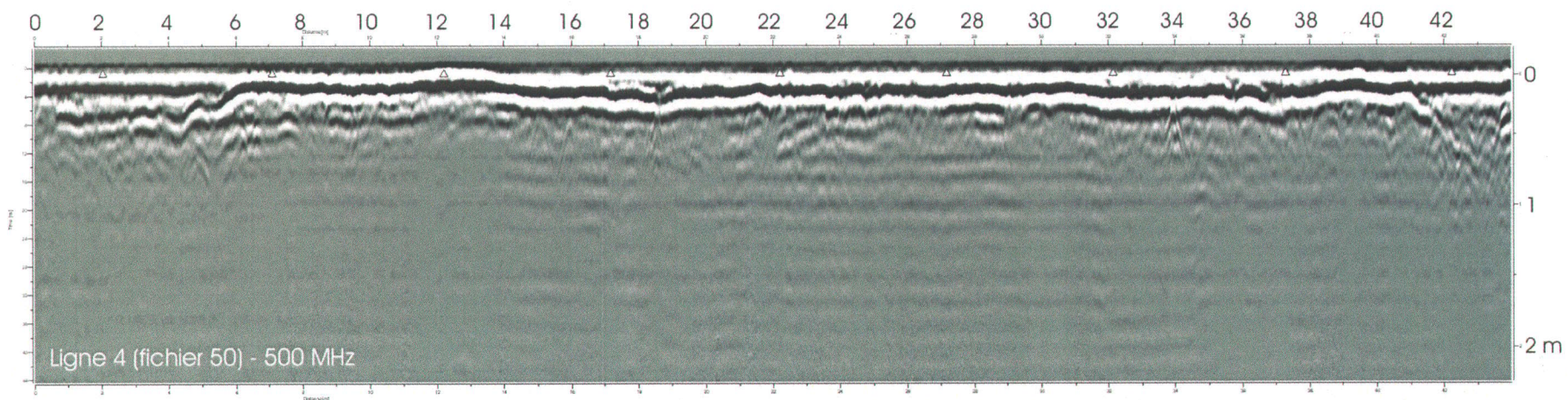
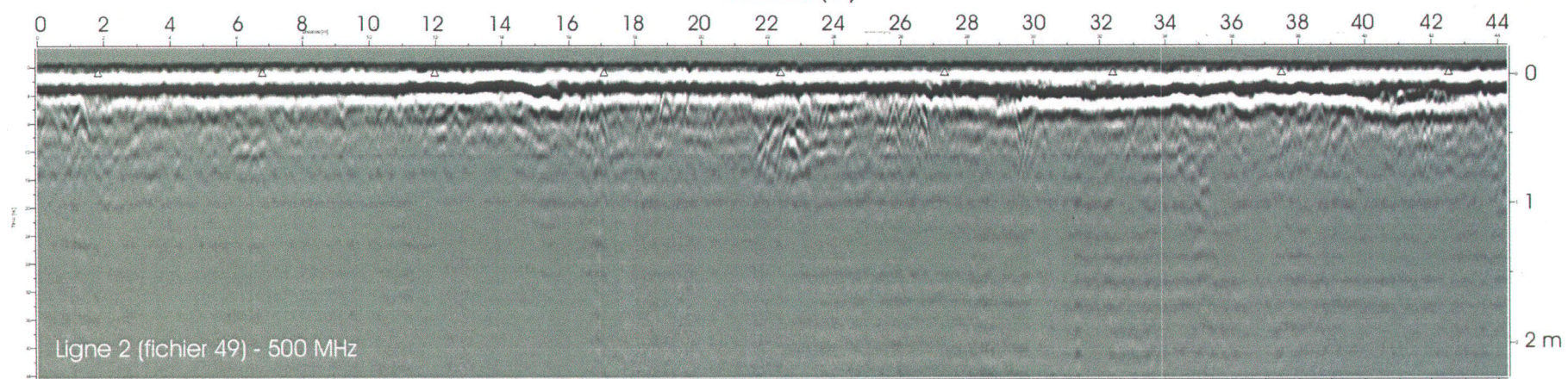
SIMONEAU, Daniel. 2004. *Le Trait-Carré de Charlesbourg. Évaluation générale du potentiel archéologique de la période historique*. Ville de Québec, Division design, architecture et patrimoine, Service de l'aménagement du territoire.

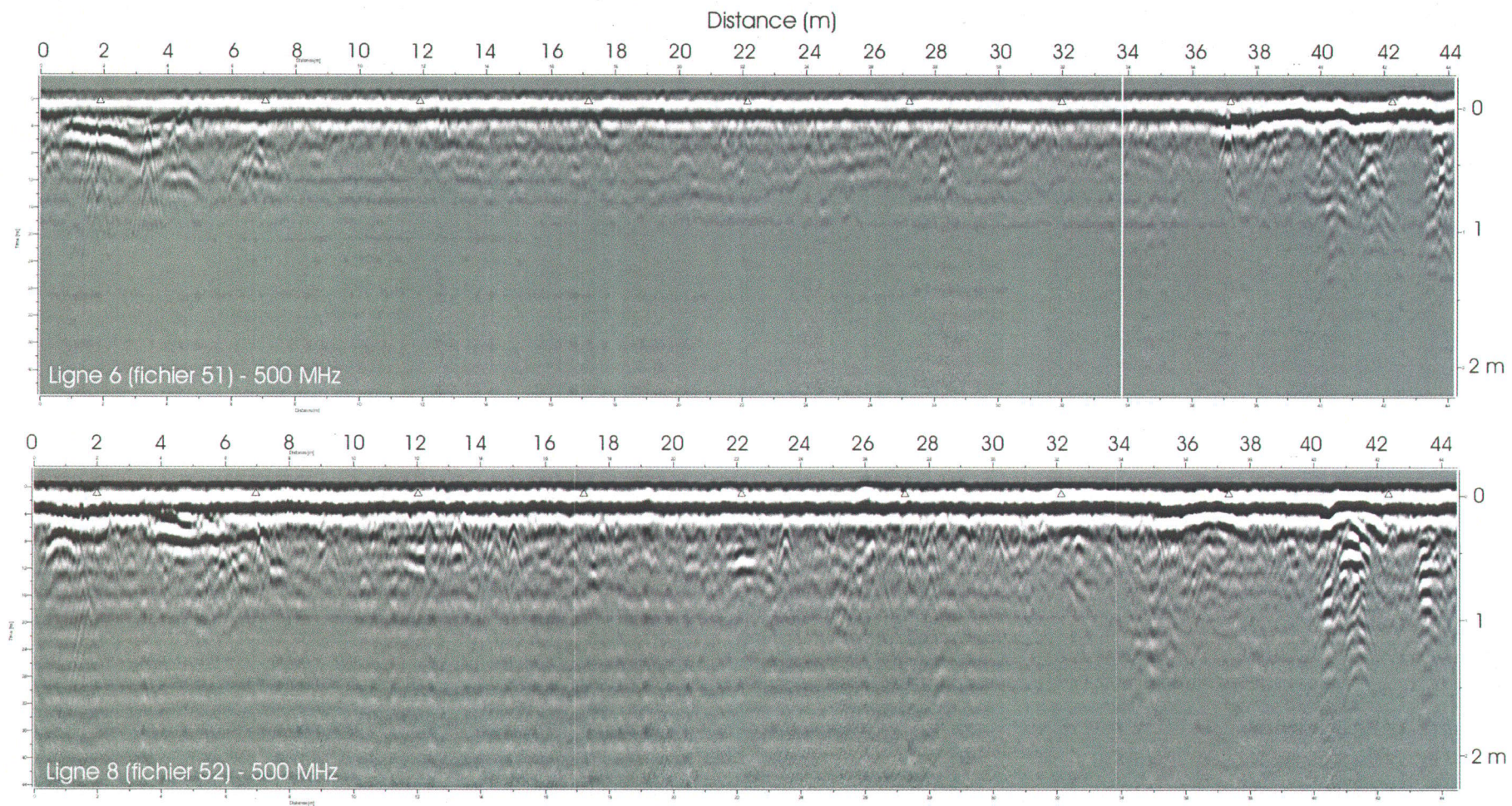
VILLENEUVE, René. 1986. *Les églises de Charlesbourg*. Québec, Pélican.

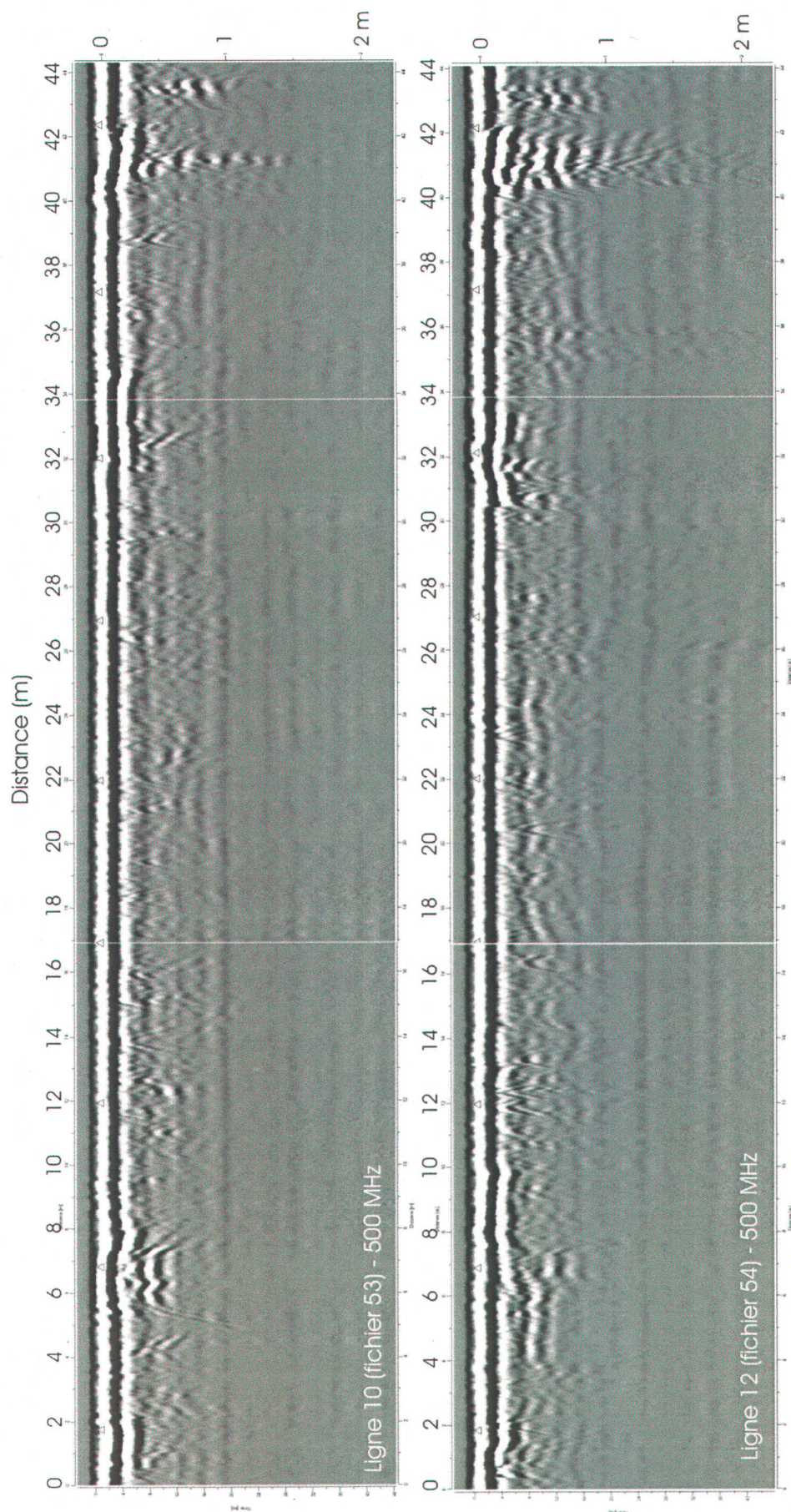
ANNEXE A

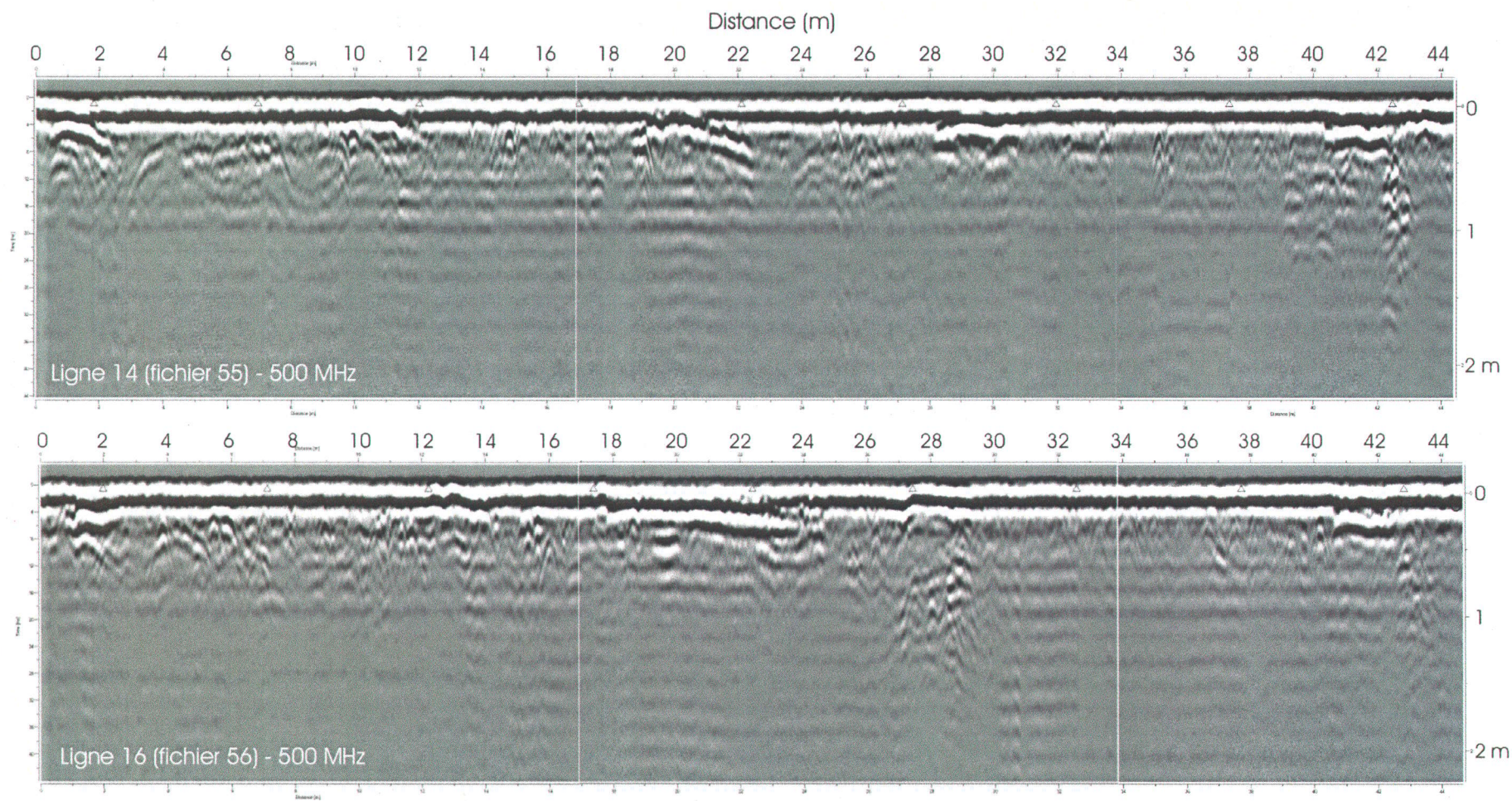
**Sections tomographiques produites au moyen du
Géoradar RAMAC de MALA
Antenne blindée de 500 MHz**

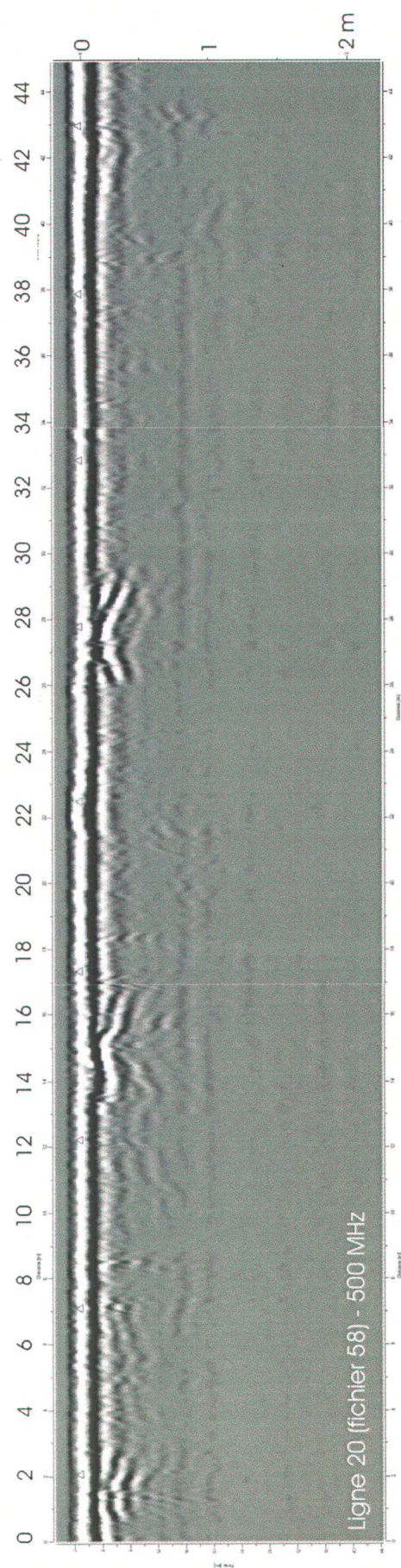
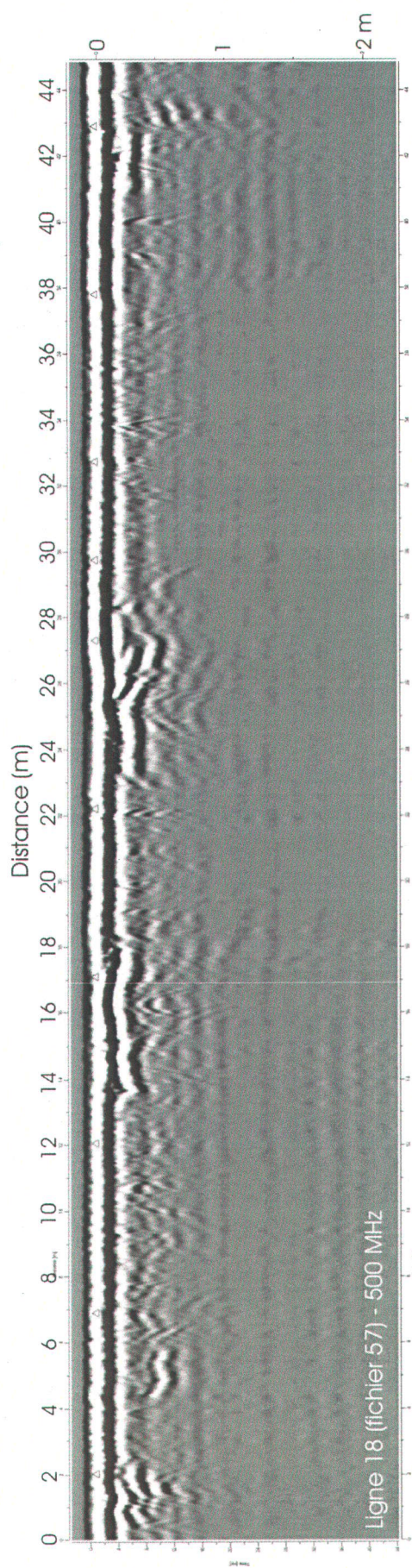
Distance (m)

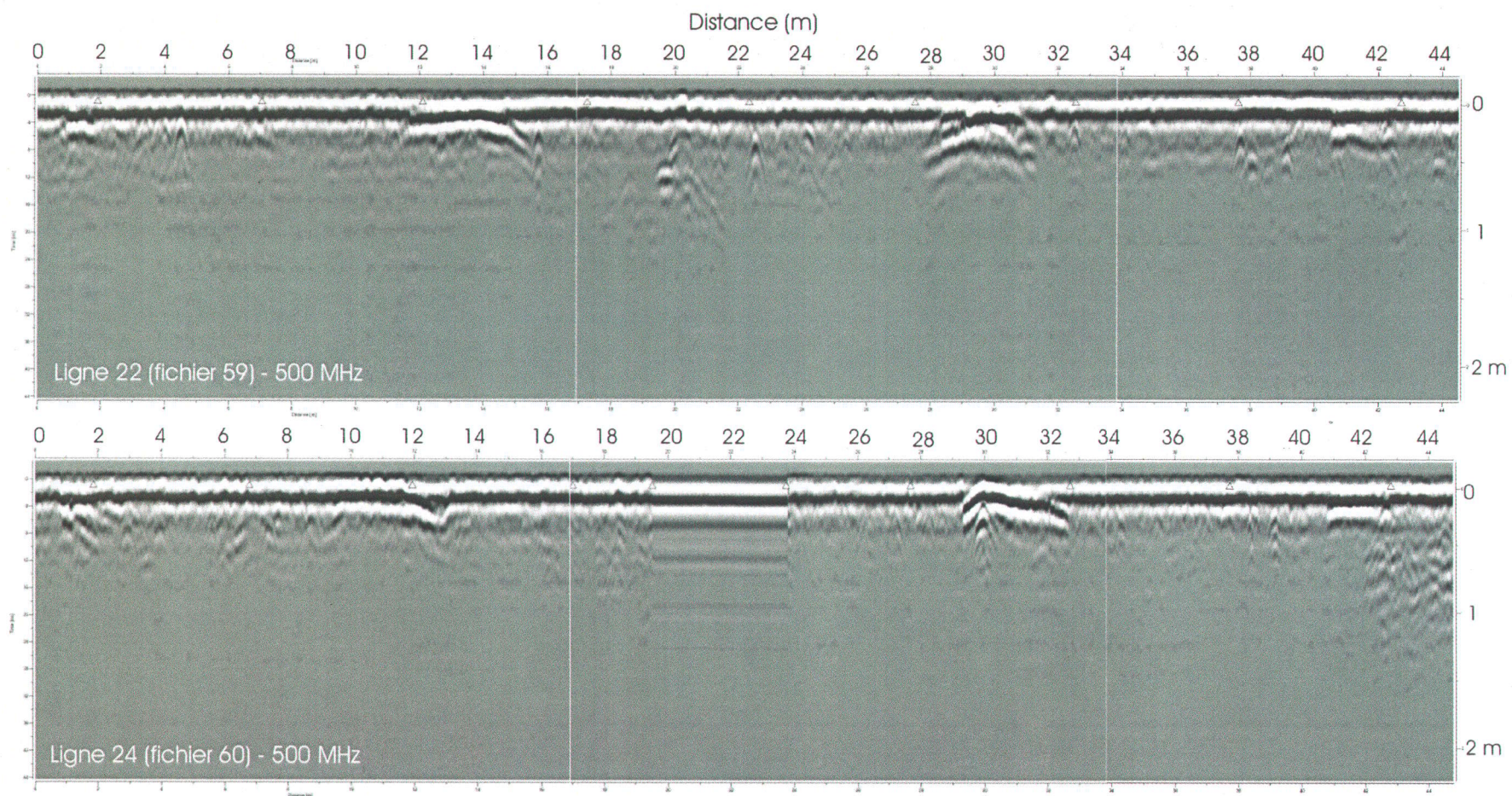


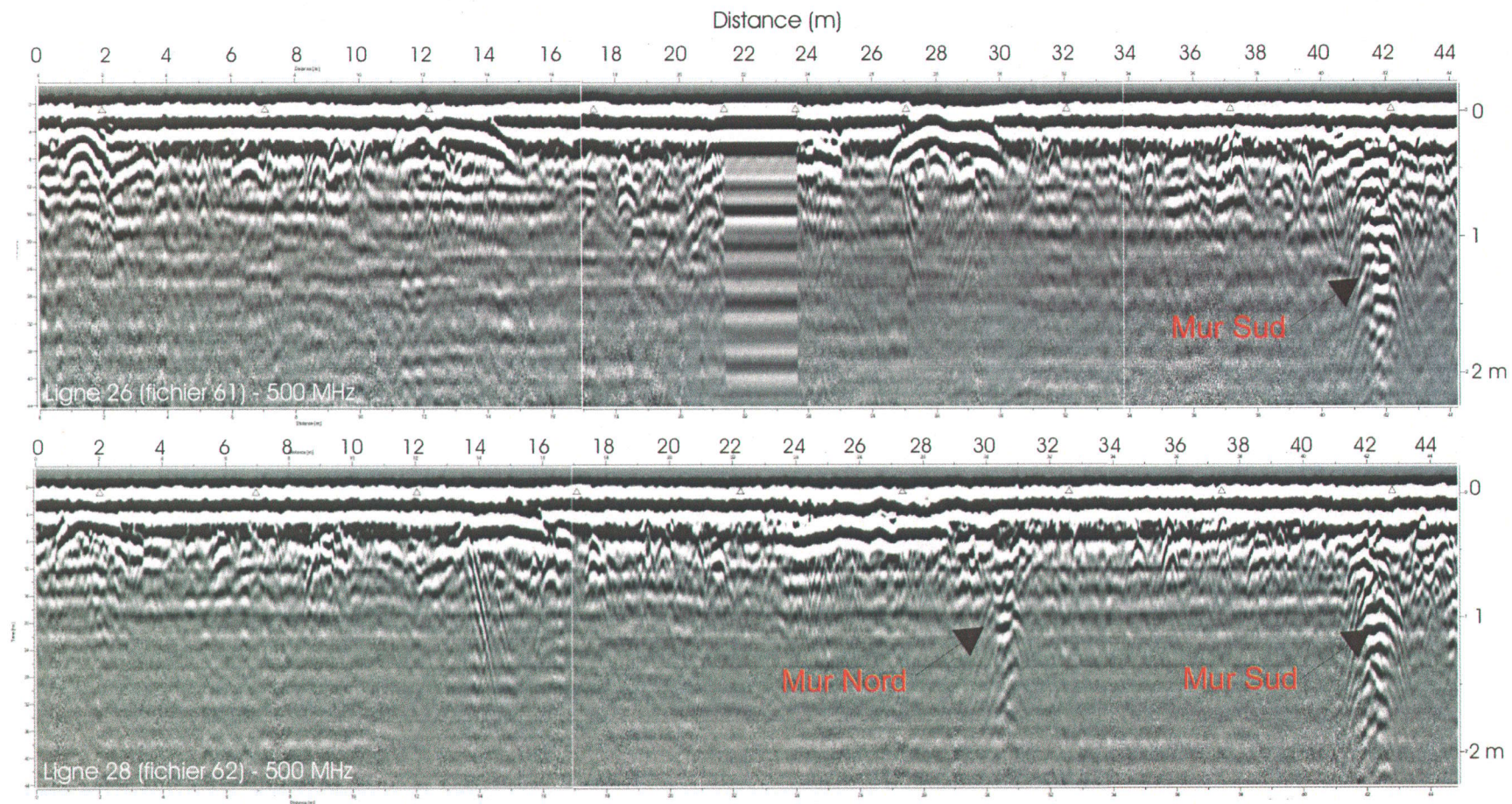


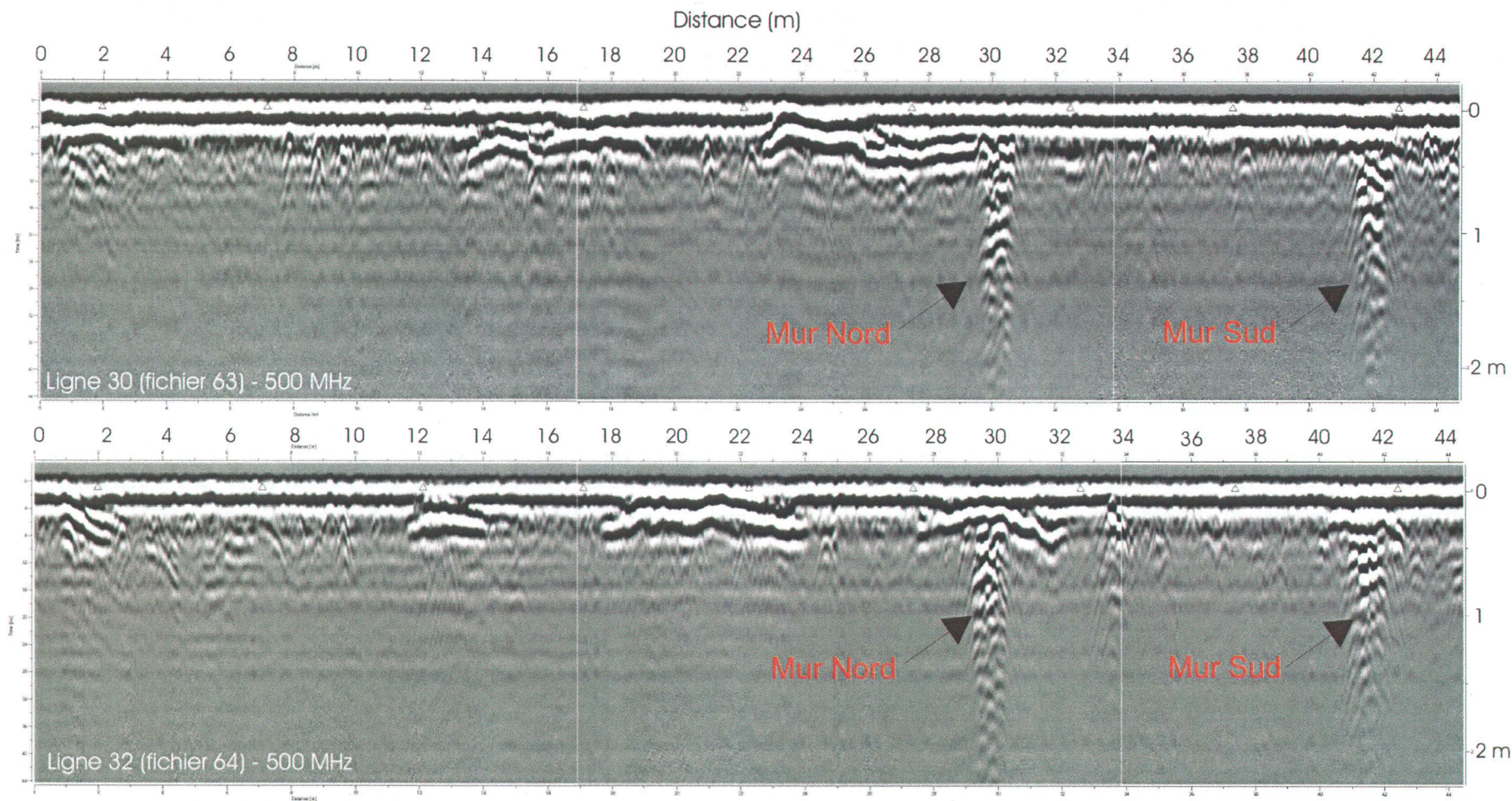


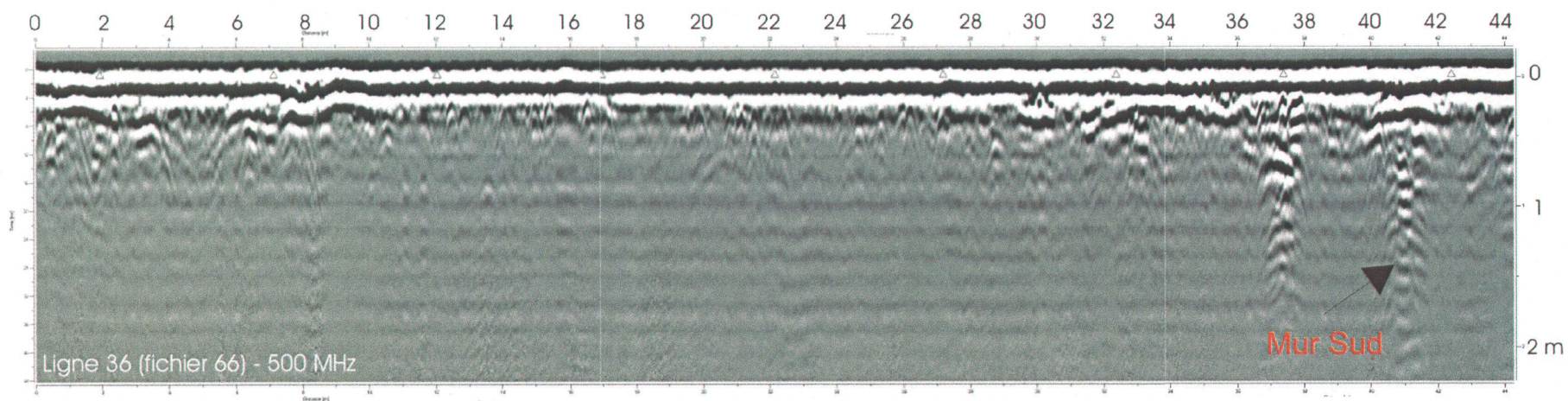
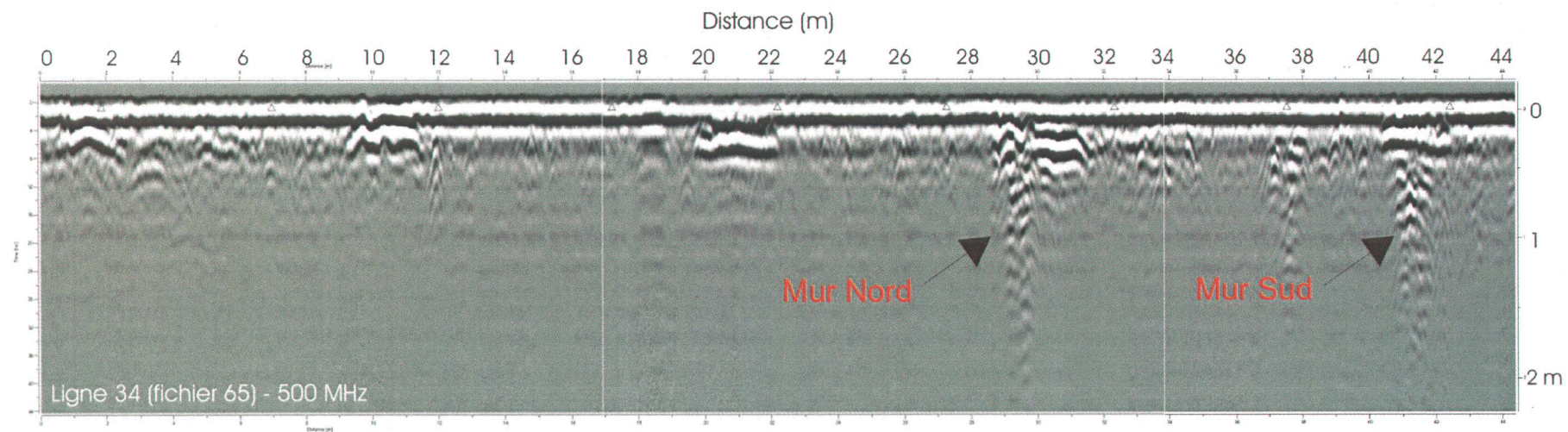


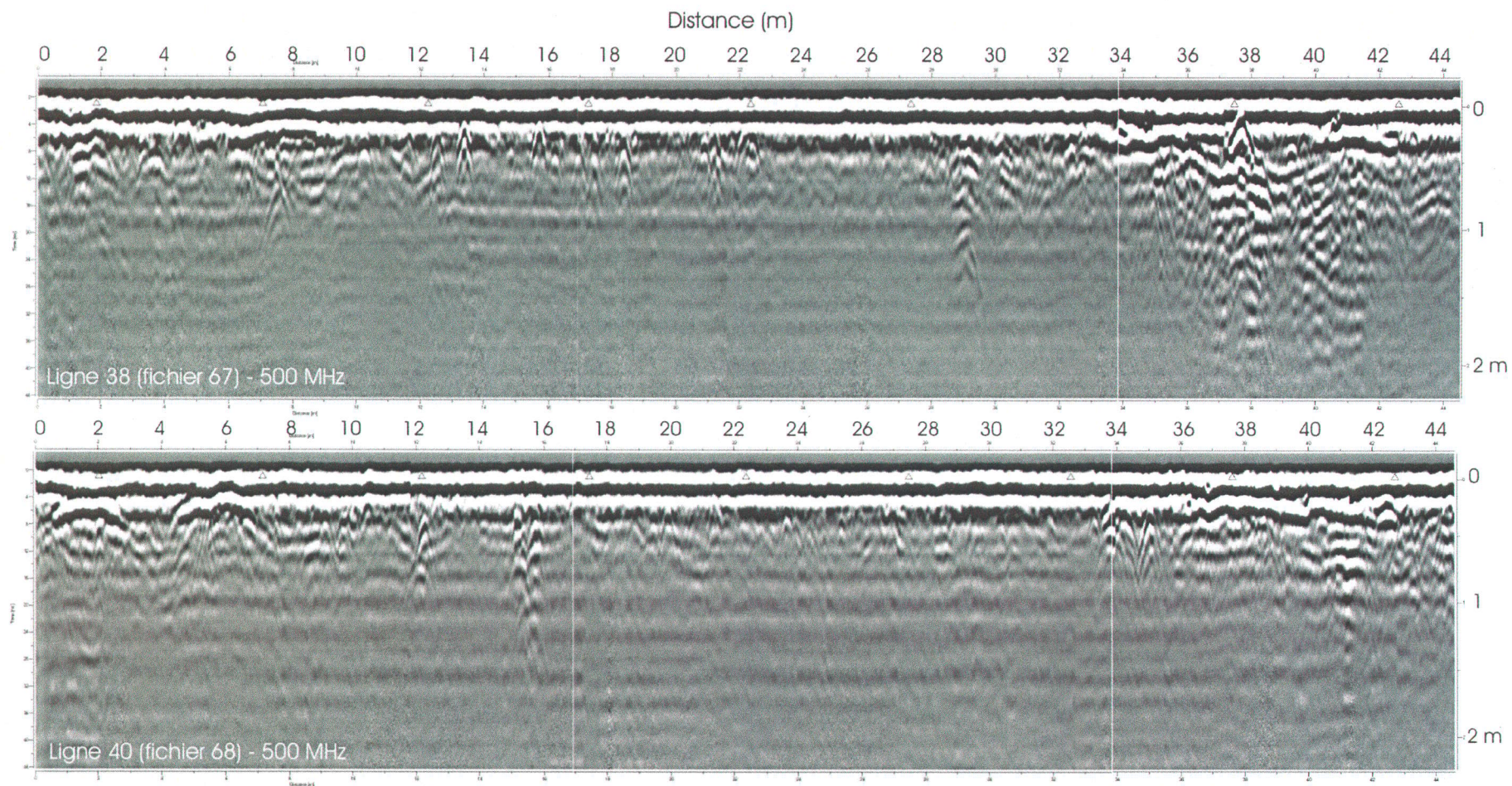


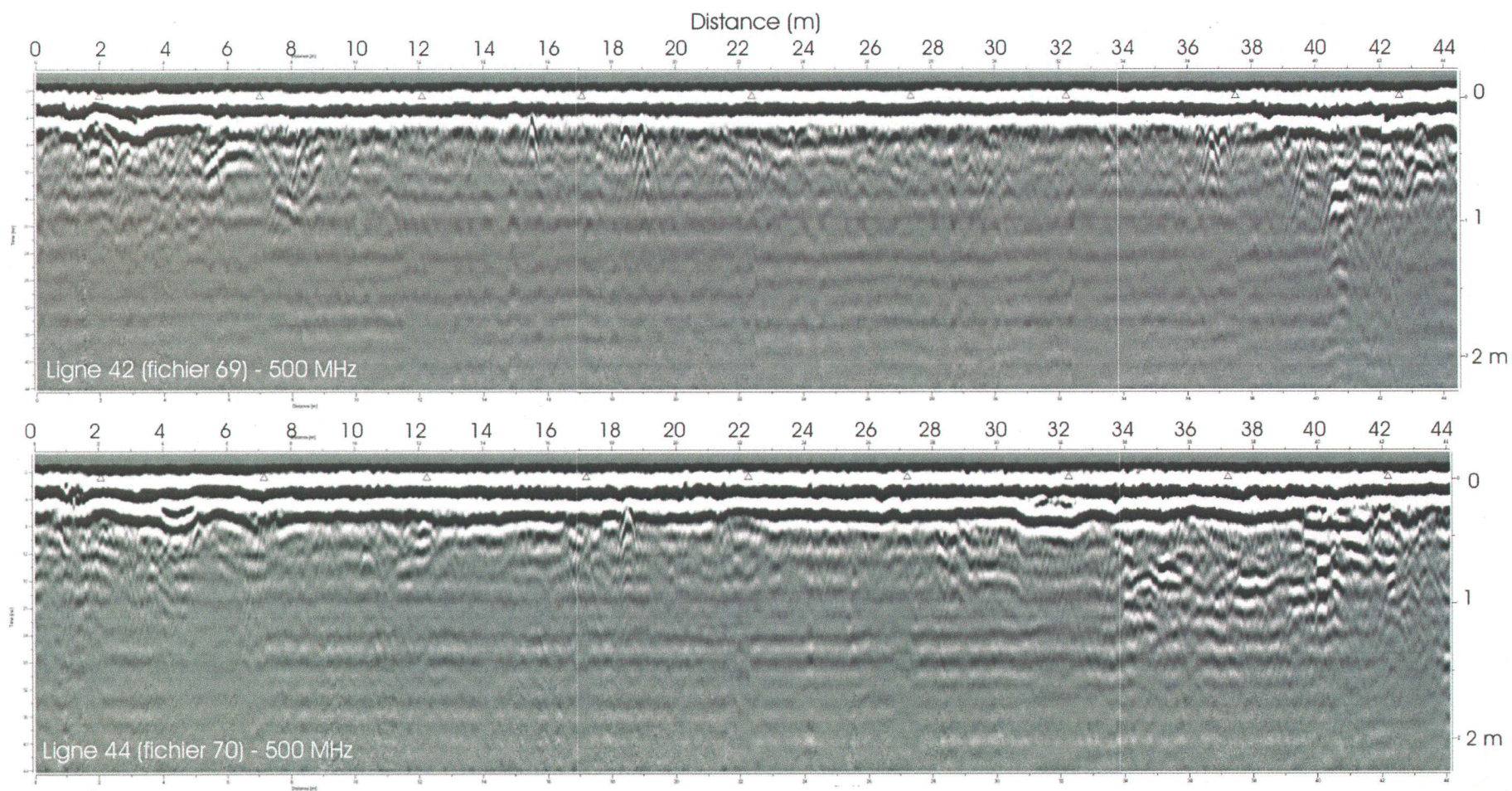


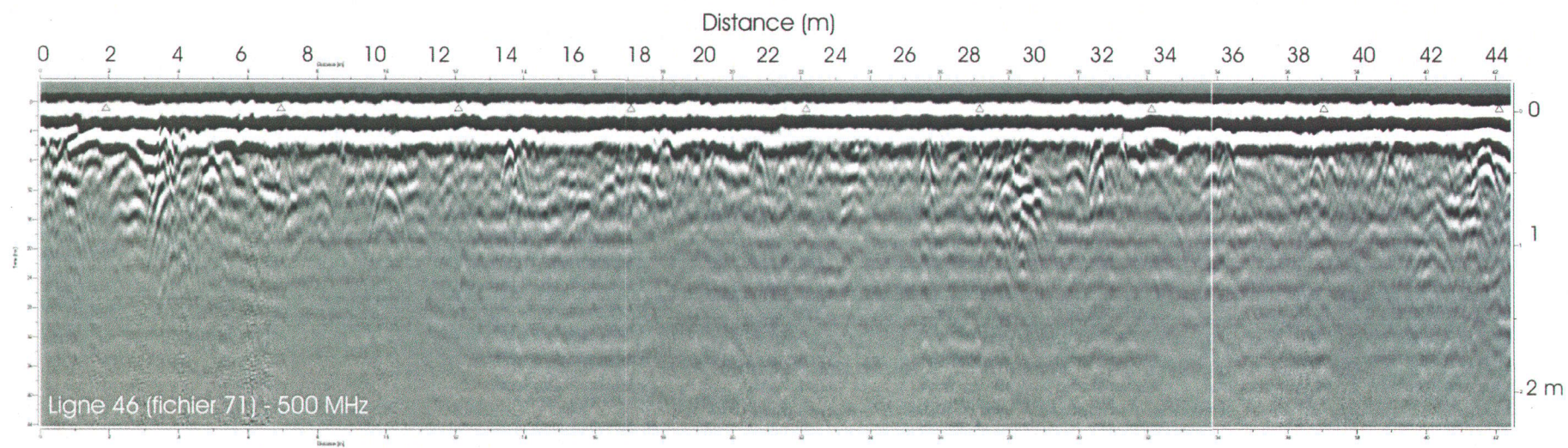


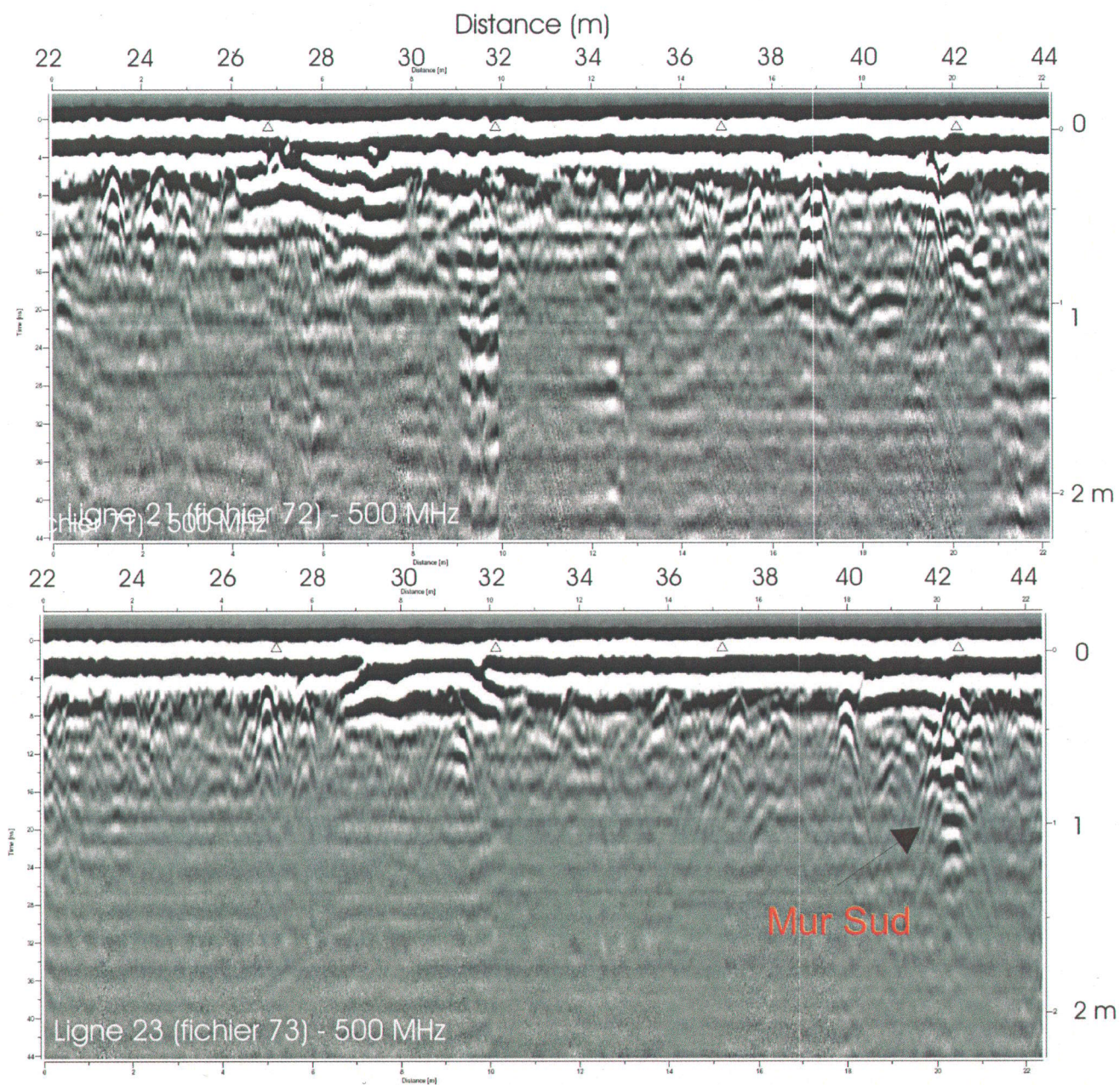


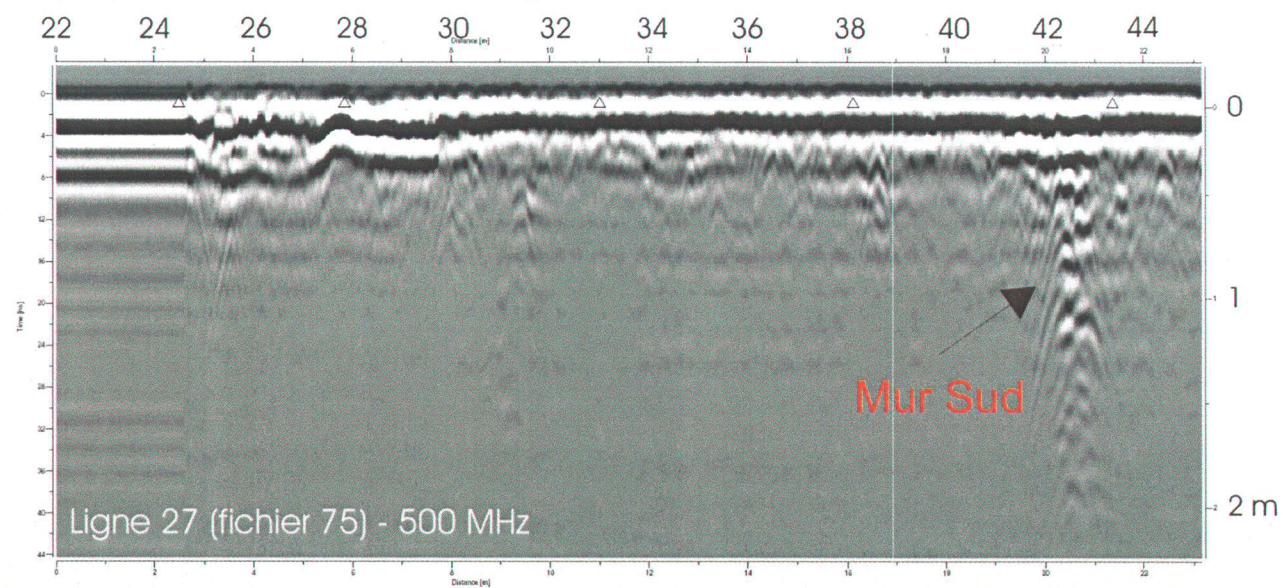
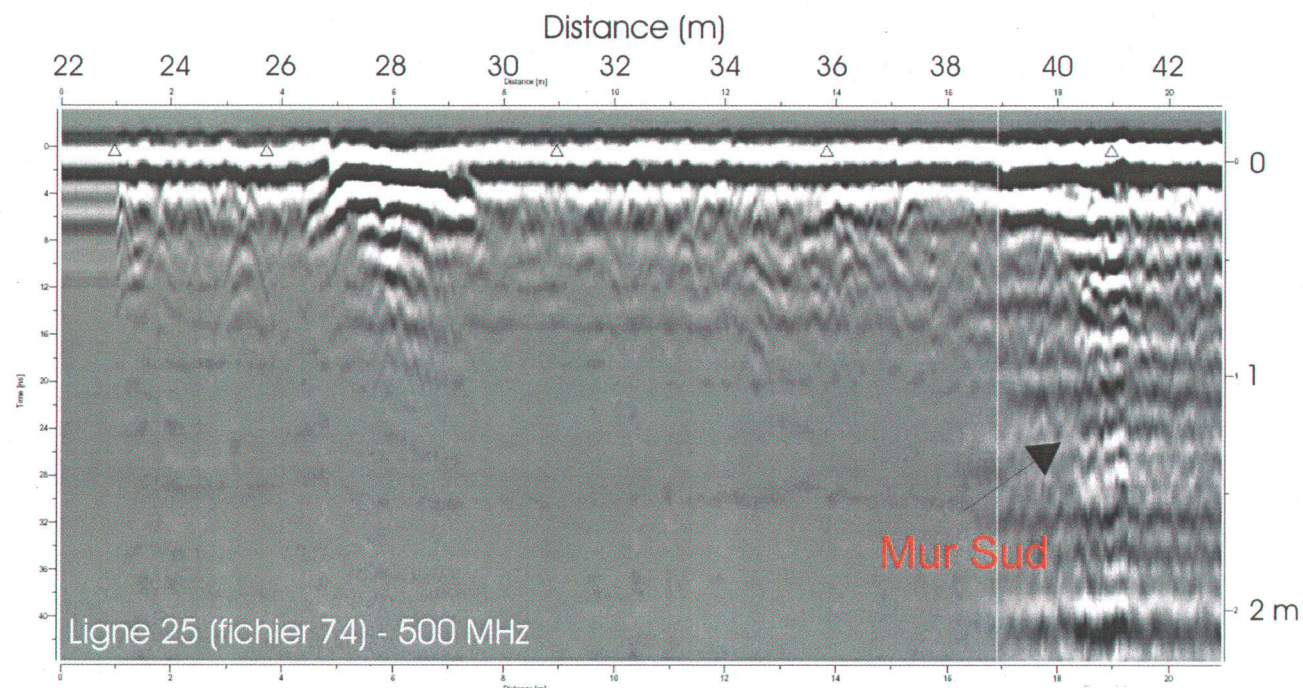


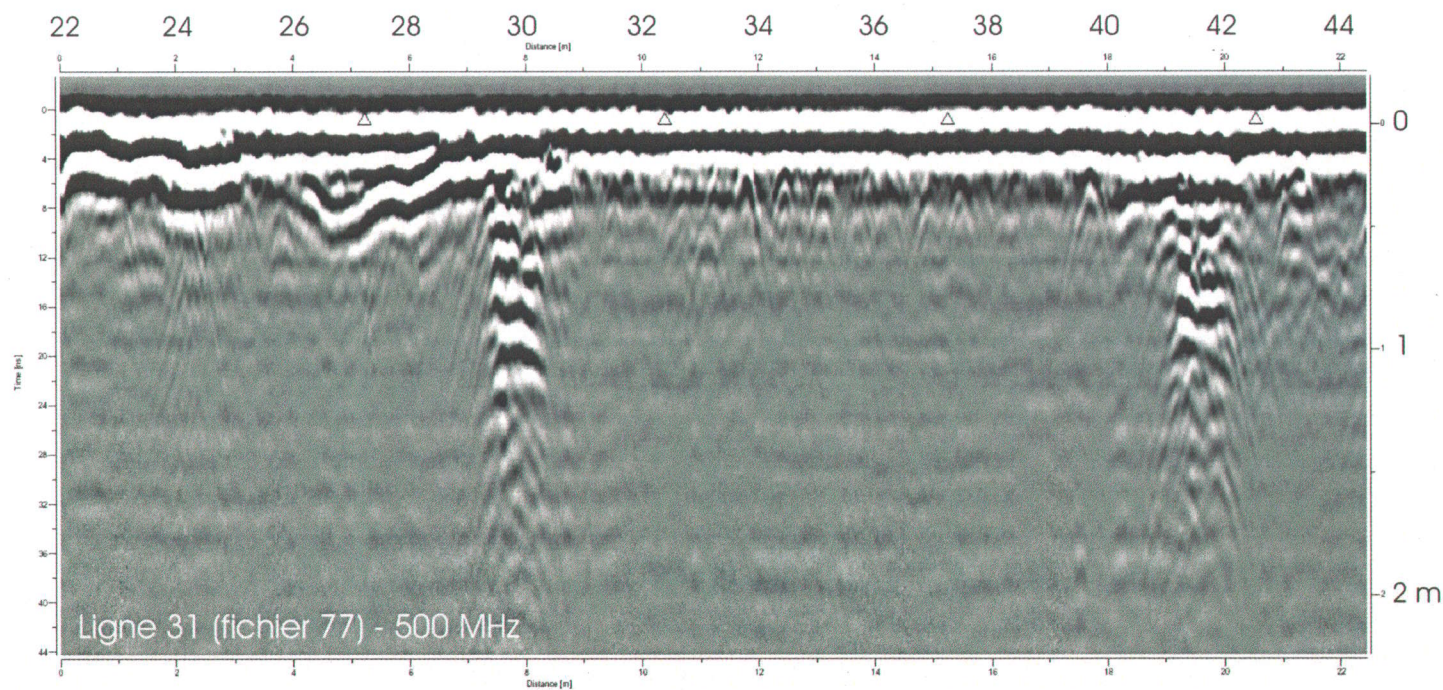
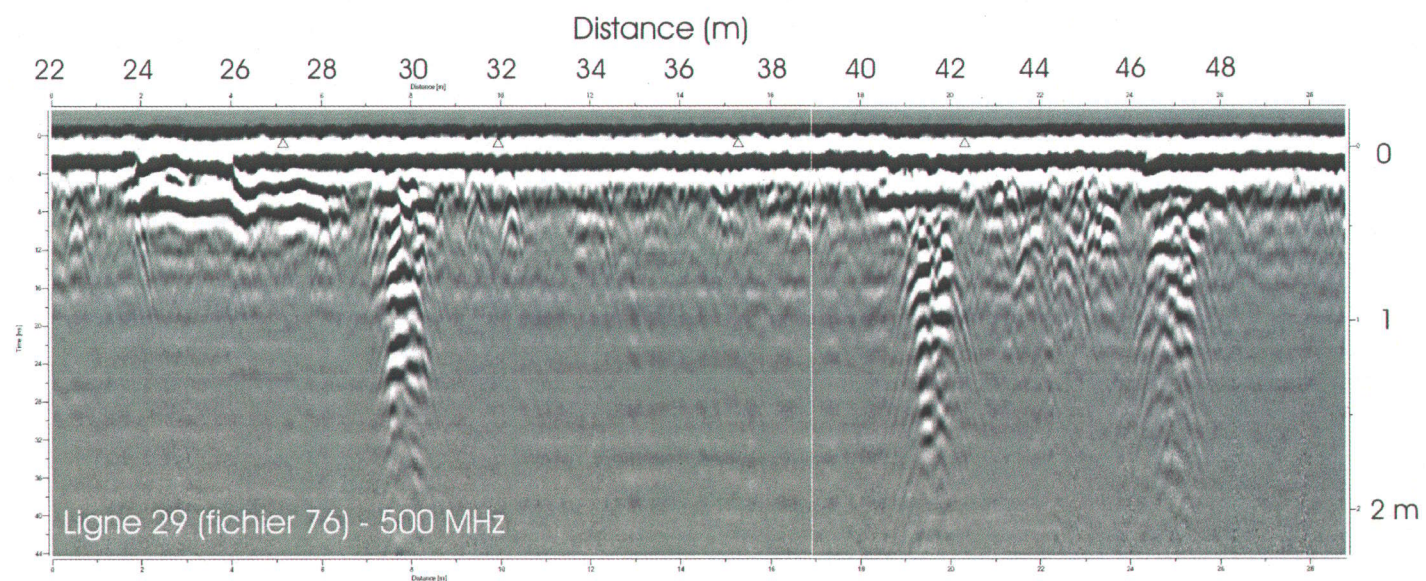


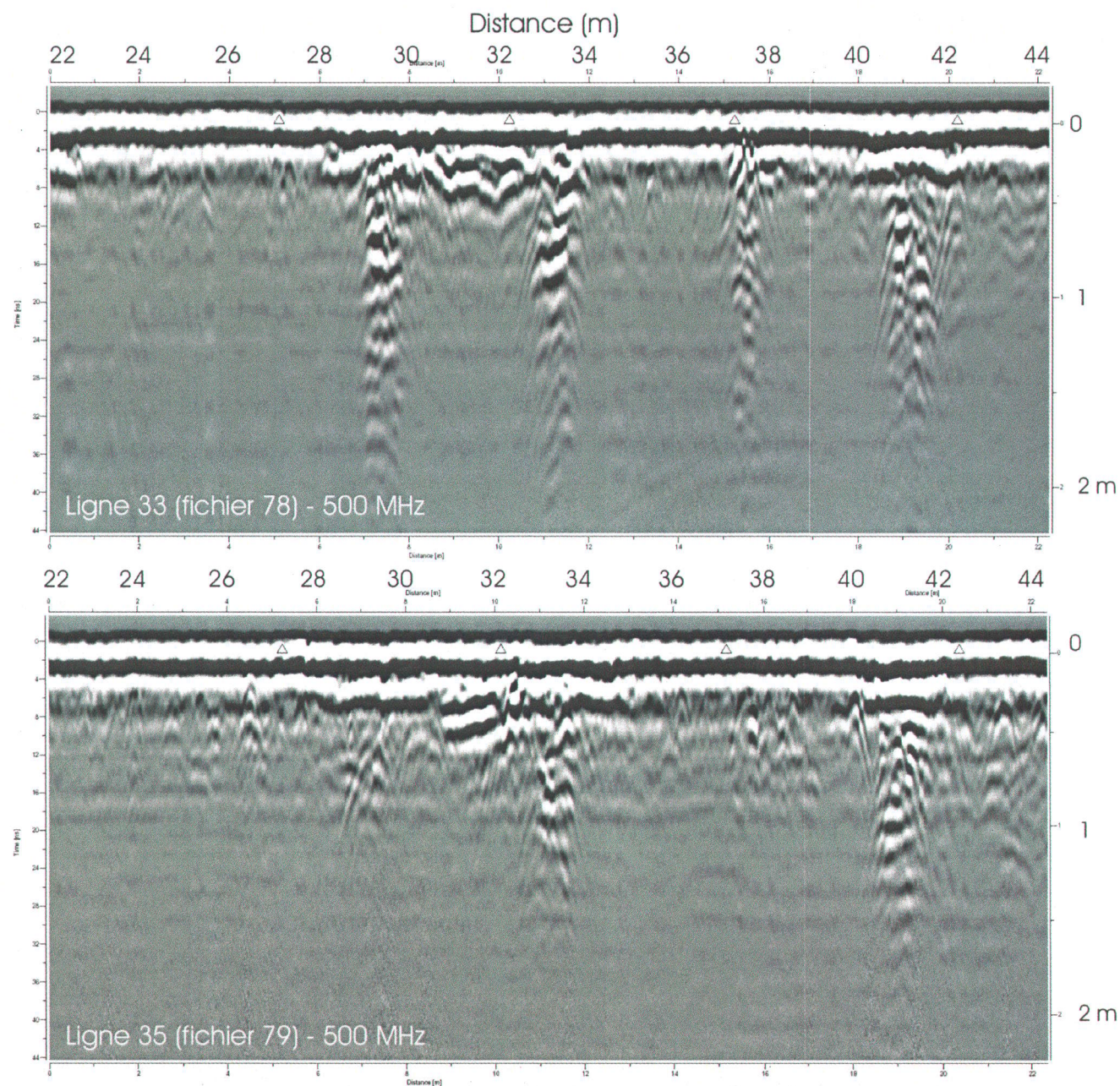


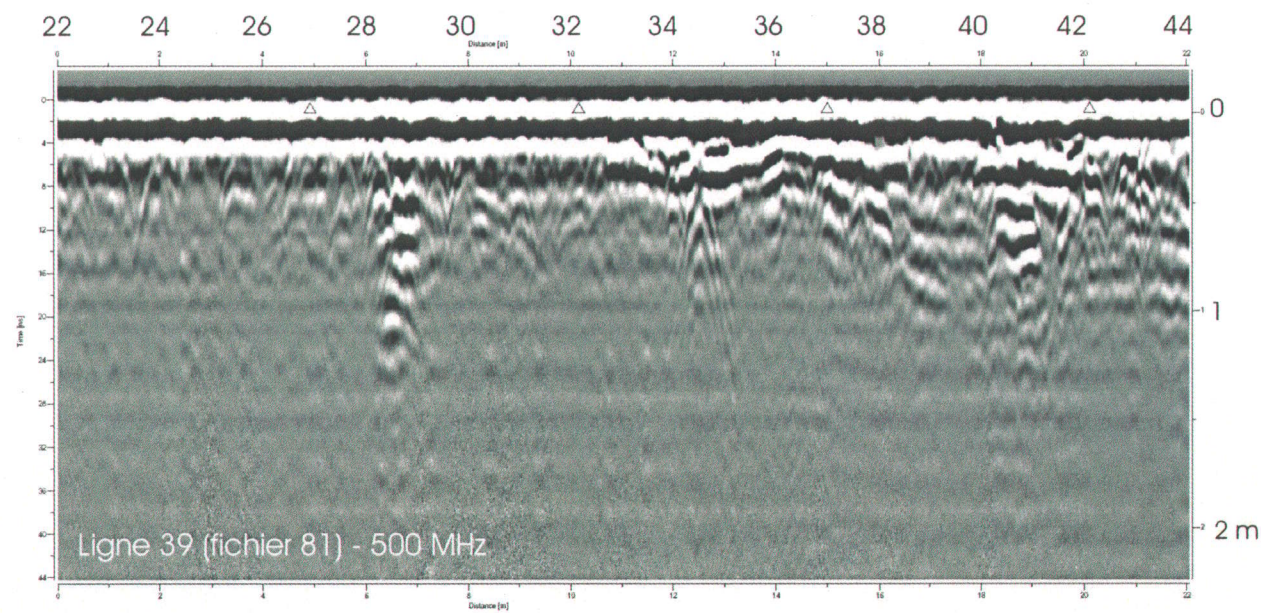
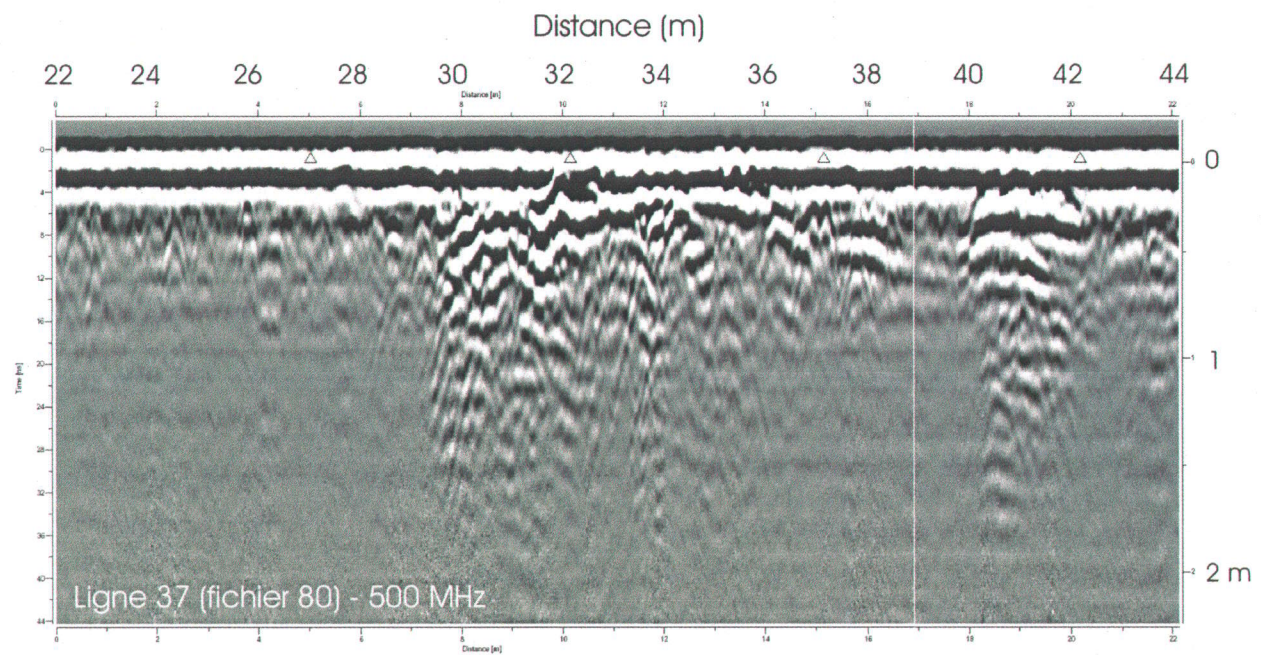


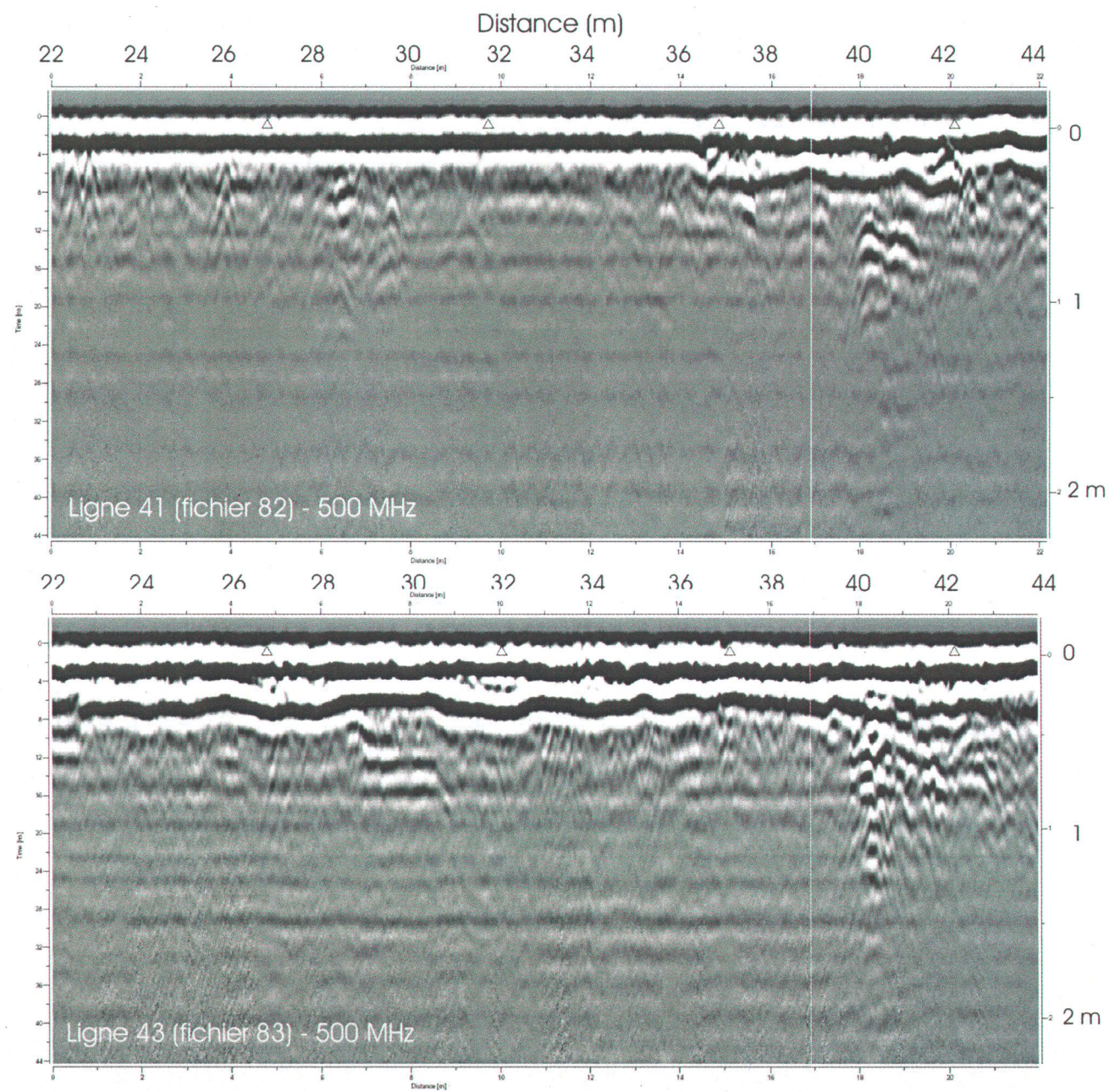




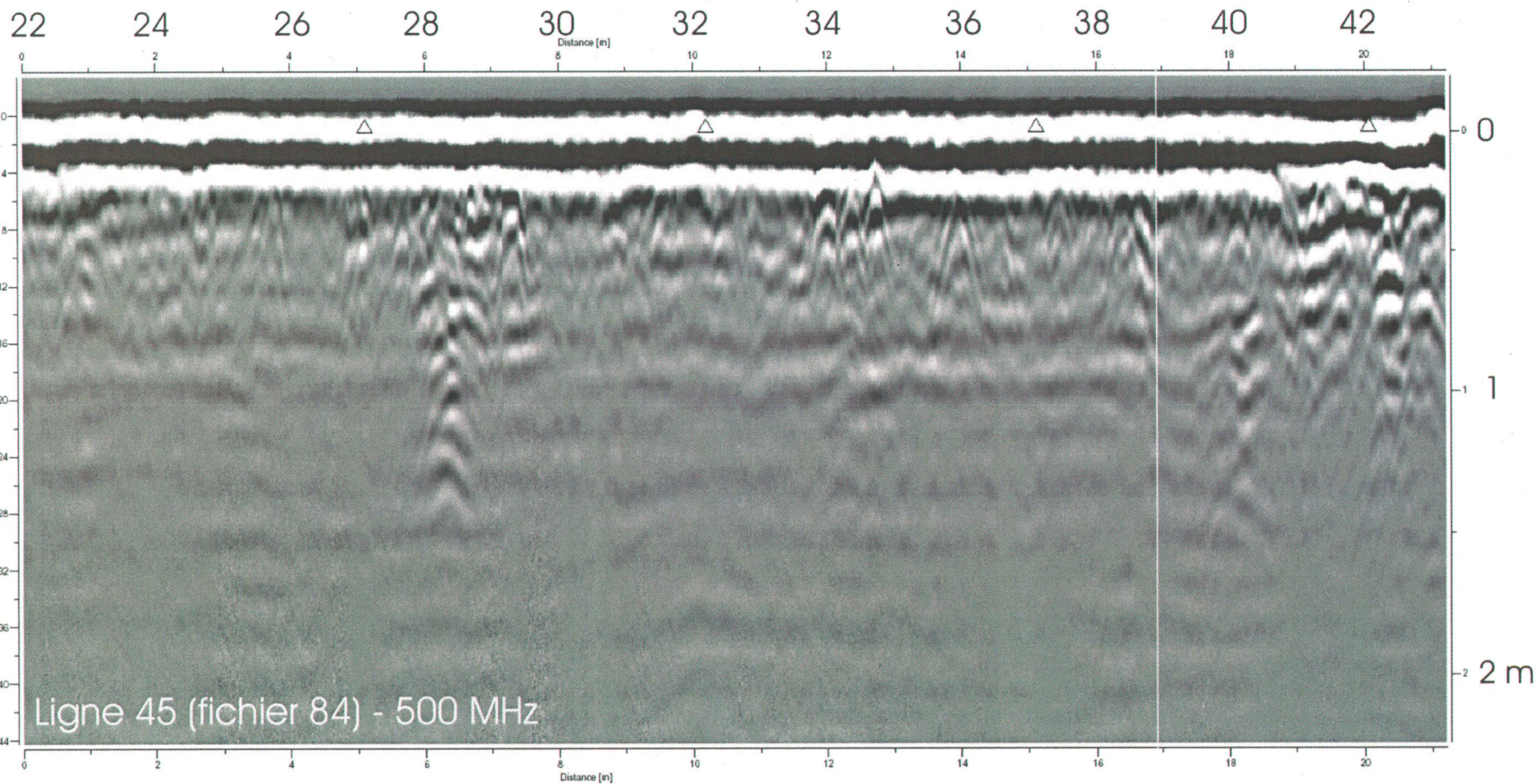


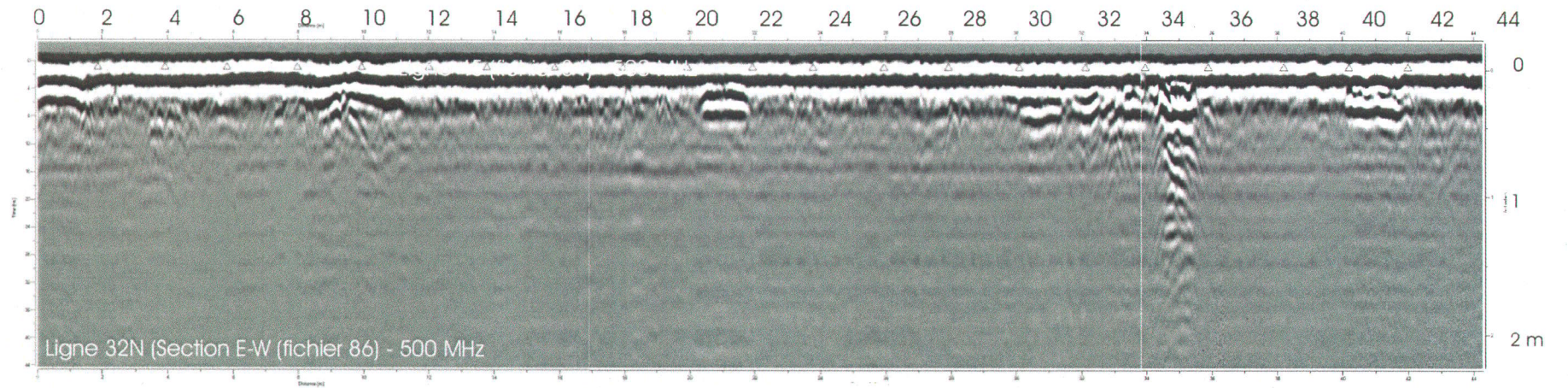
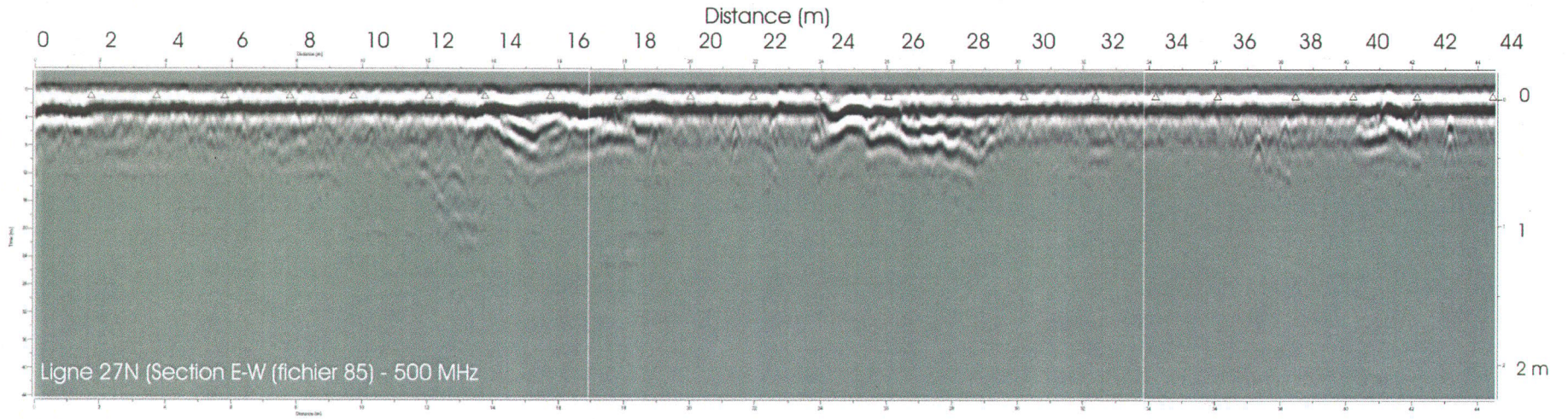


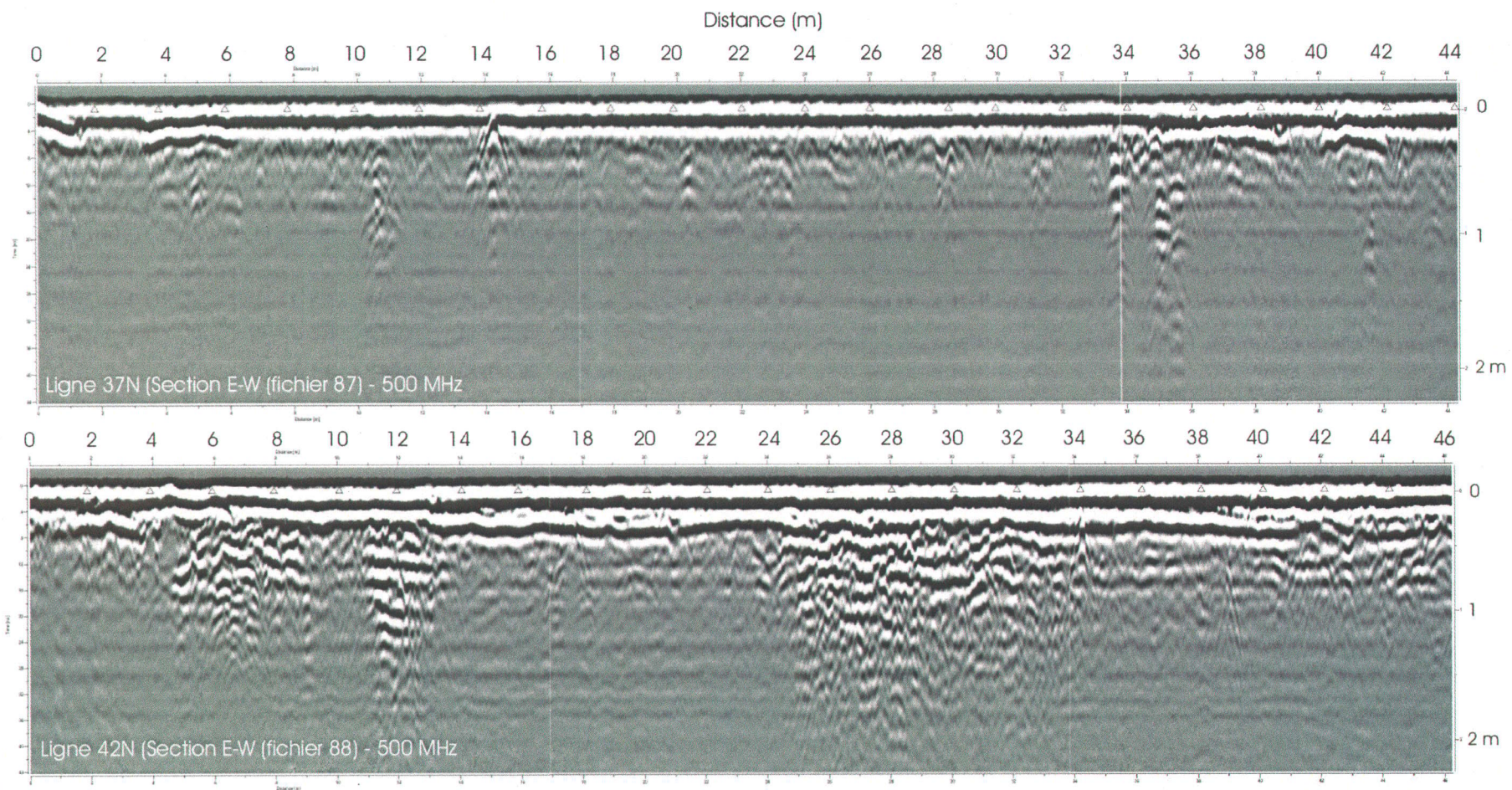




Distance (m)





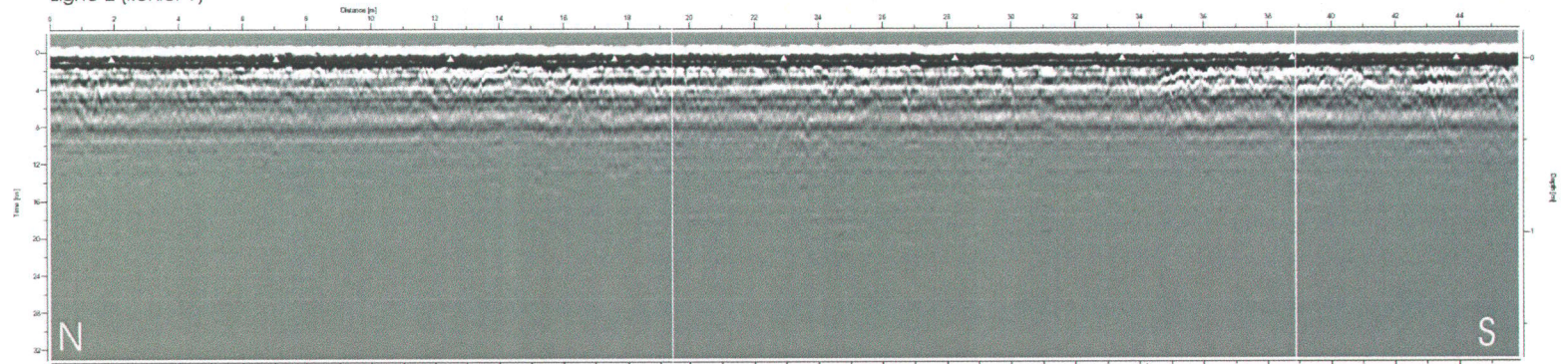


ANNEXE B

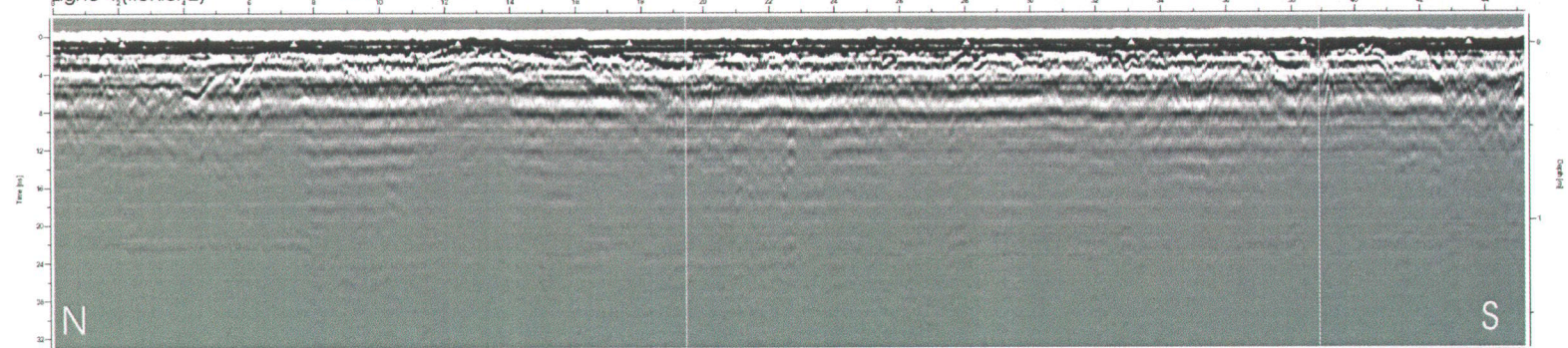
**Sections tomographiques produites au moyen du
Géoradar RAMAC de MALA
Antenne blindée de 800 MHz**

Parc Sacré-Coeur (Ville de Québec)

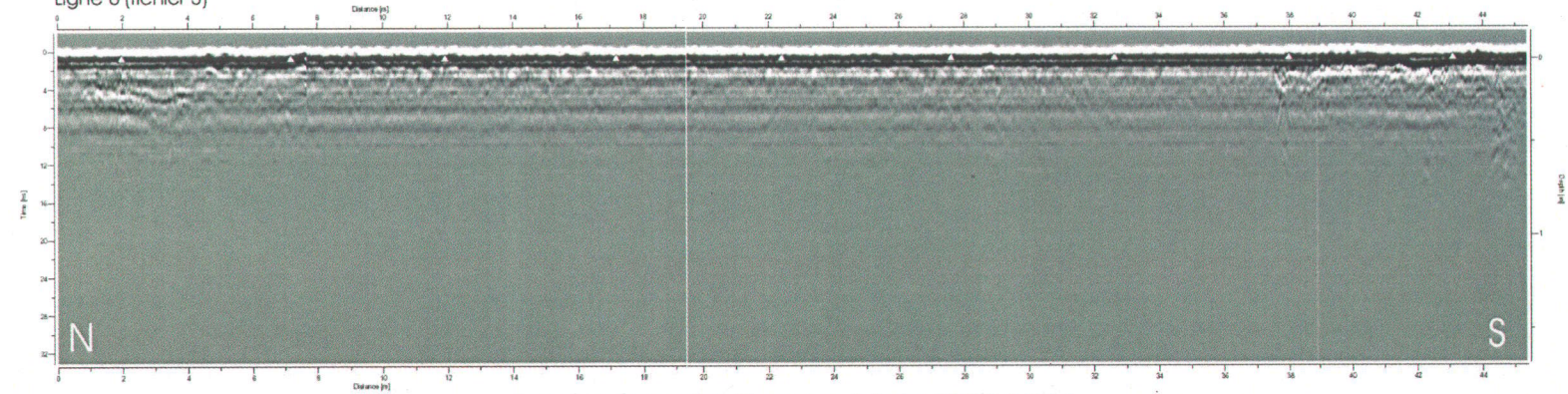
Ligne 2 (fichier 1)



Ligne 4 (fichier 2)



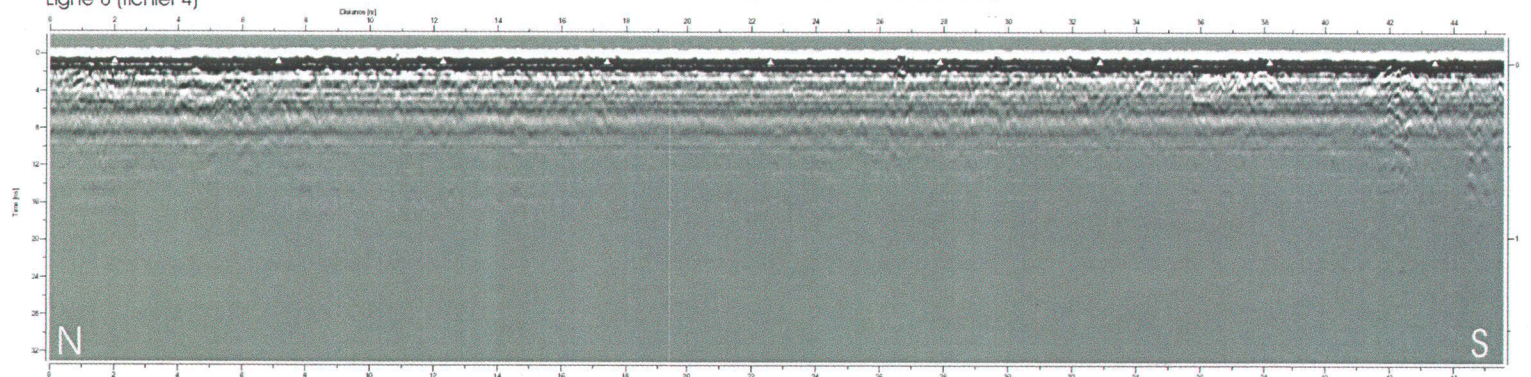
Ligne 6 (fichier 3)



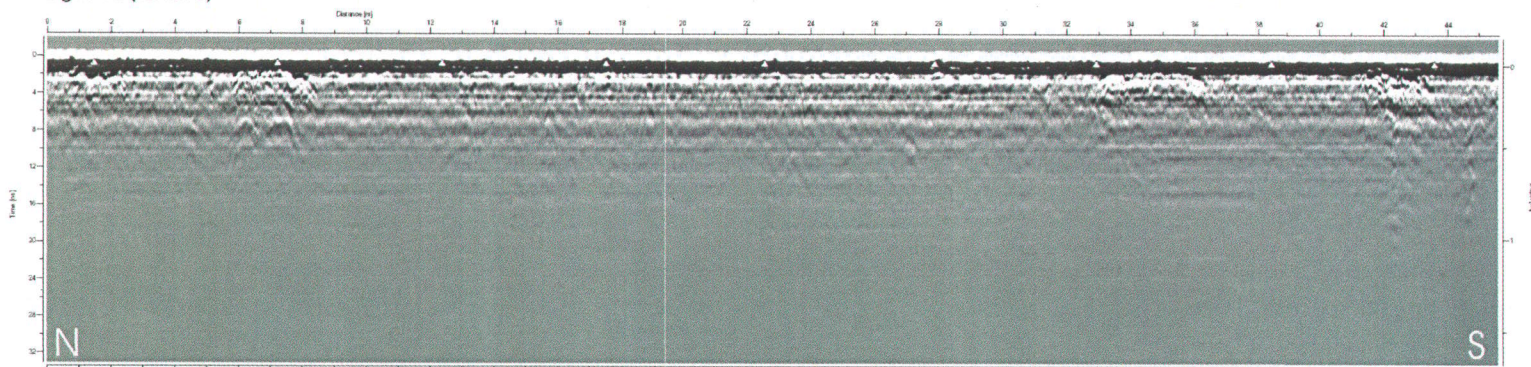
- Levé géoradar Ramac-Mala (800 MHz) -

Parc Sacré-Coeur (Ville de Québec)

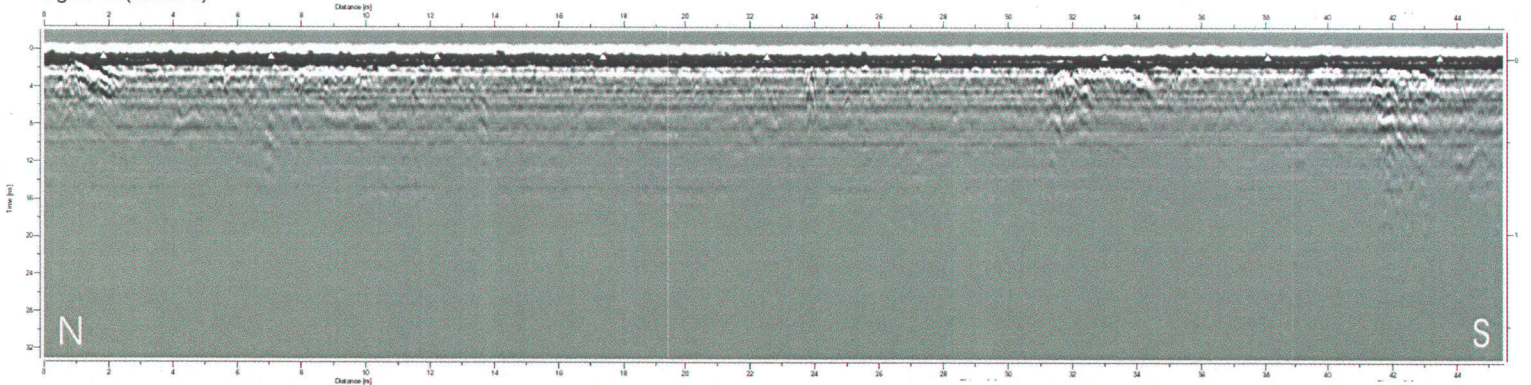
Ligne 8 (fichier 4)



Ligne 10 (fichier 5)



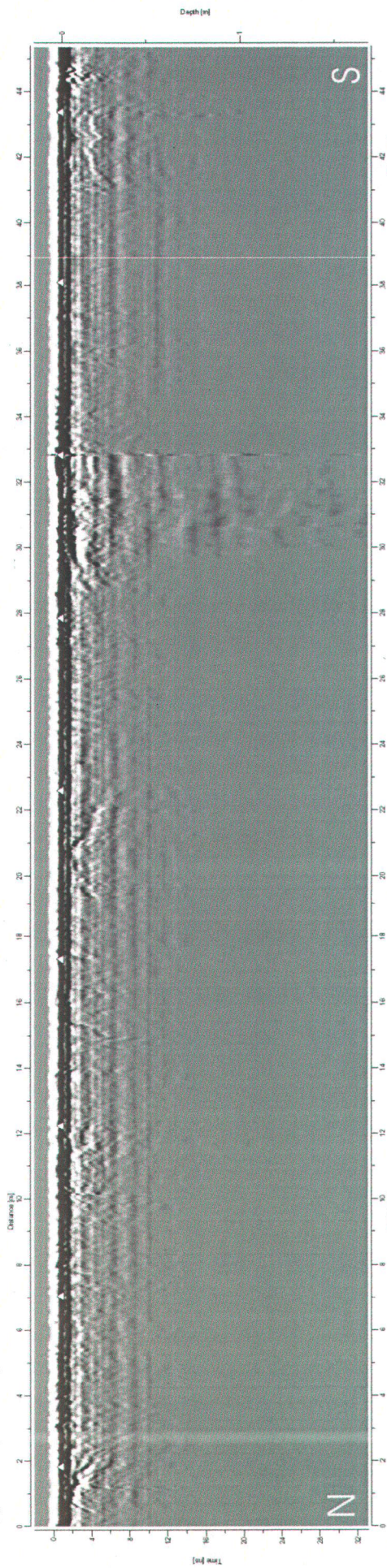
Ligne 12 (fichier 6)



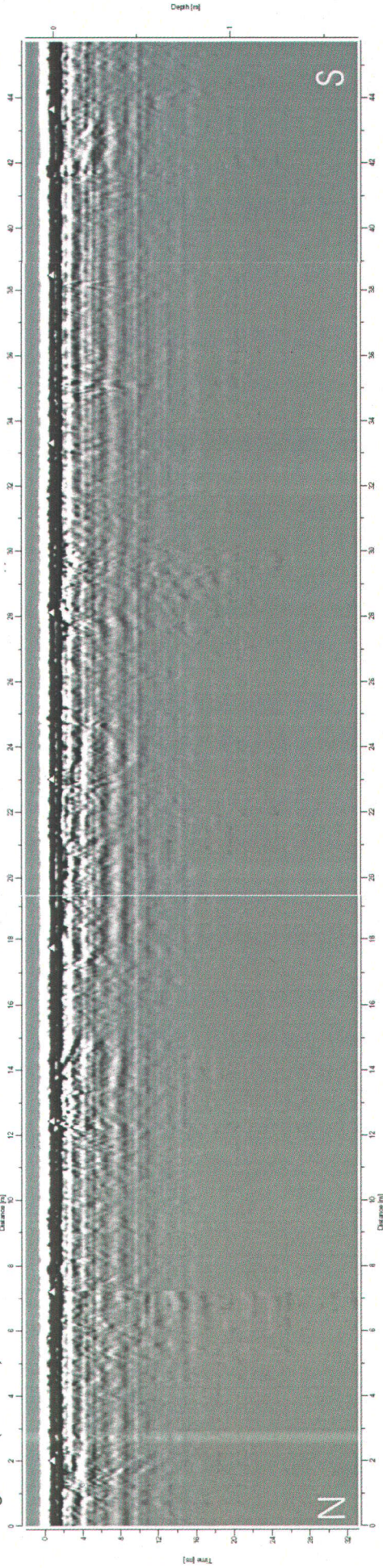
- Levé géoradar Ramac-Mala (800 MHz) -

Parc Sacré-Coeur (Ville de Québec)

Ligne 14 (fichier 7)



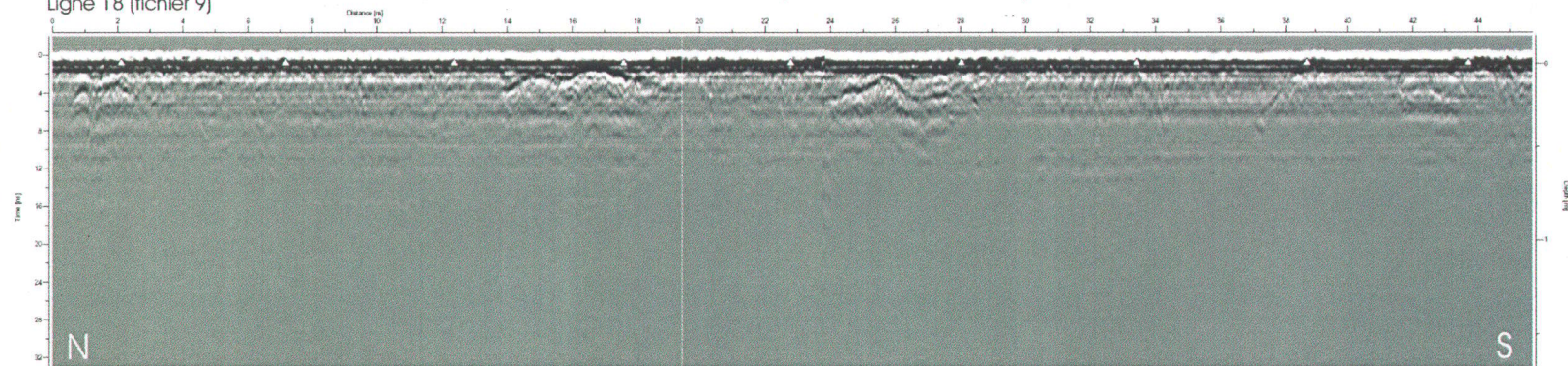
Ligne 16 (fichier 8)



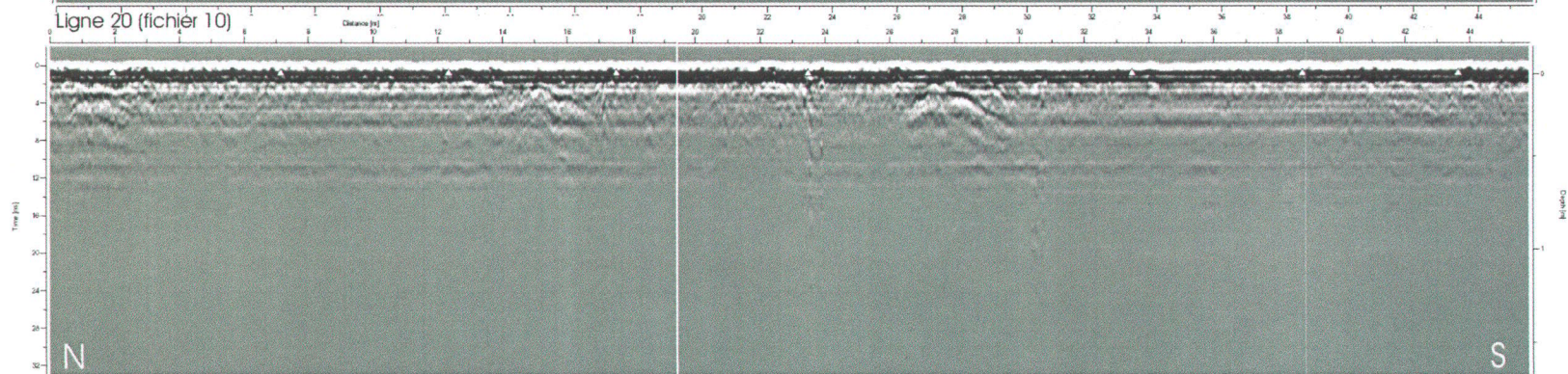
- Levé géoradar Ramac-Mala (800 MHz) -

Parc Sacré-Coeur (Ville de Québec)

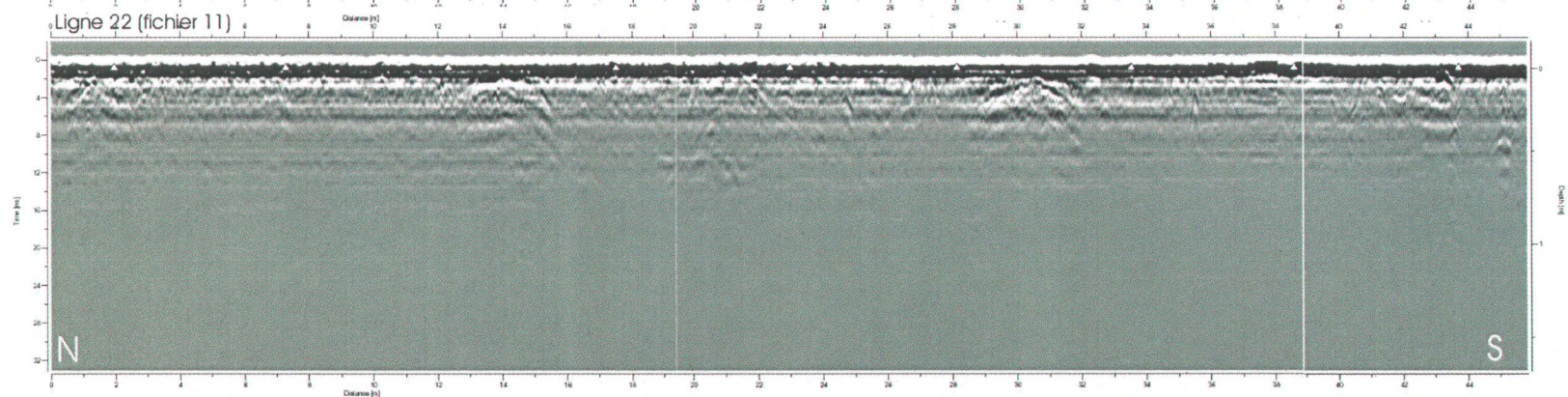
Ligne 18 (fichier 9)



Ligne 20 (fichier 10)



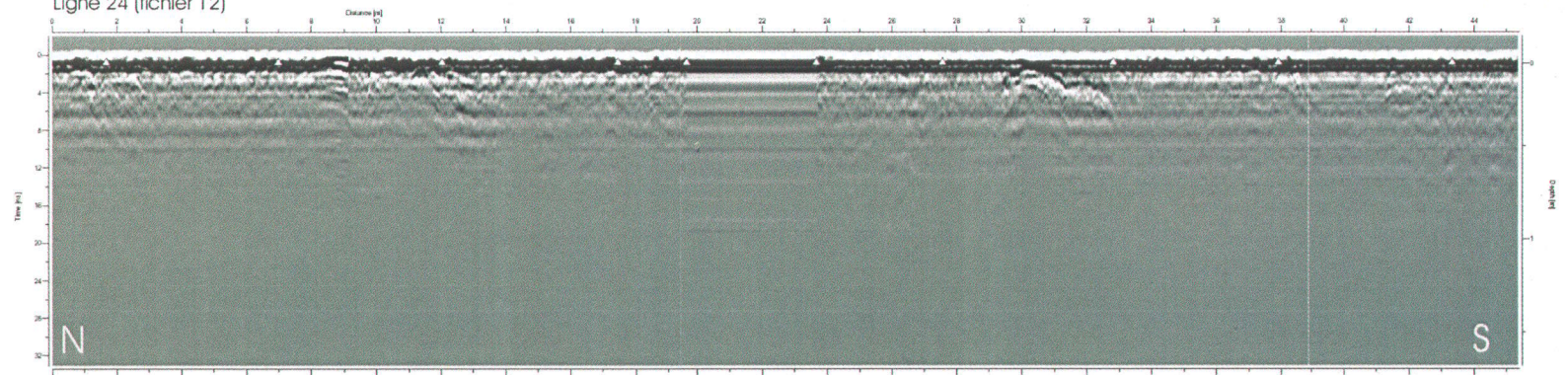
Ligne 22 (fichier 11)



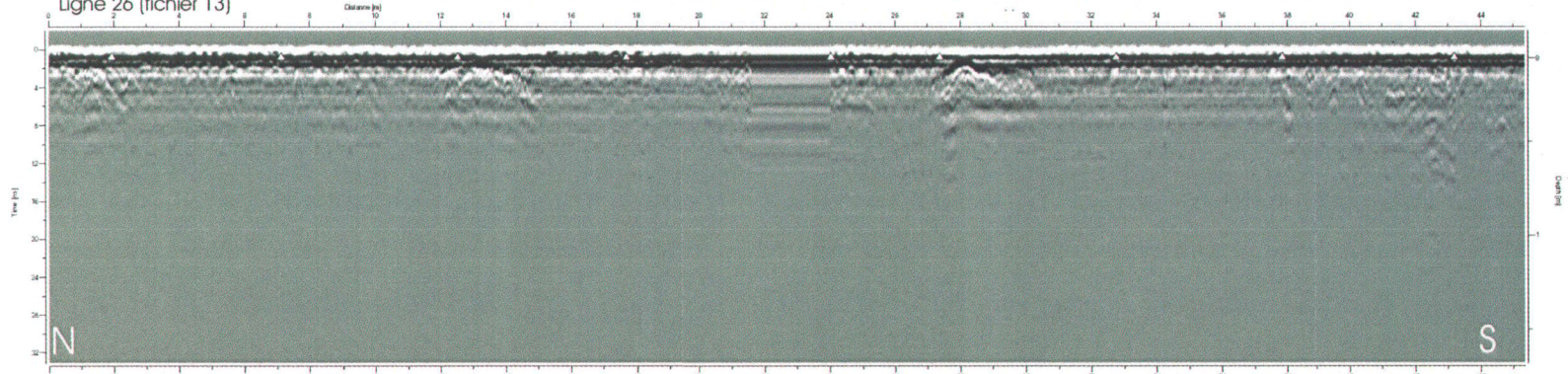
- Levé géoradar Ramac-Mala (800 MHz) -

Parc Sacré-Coeur (Ville de Québec)

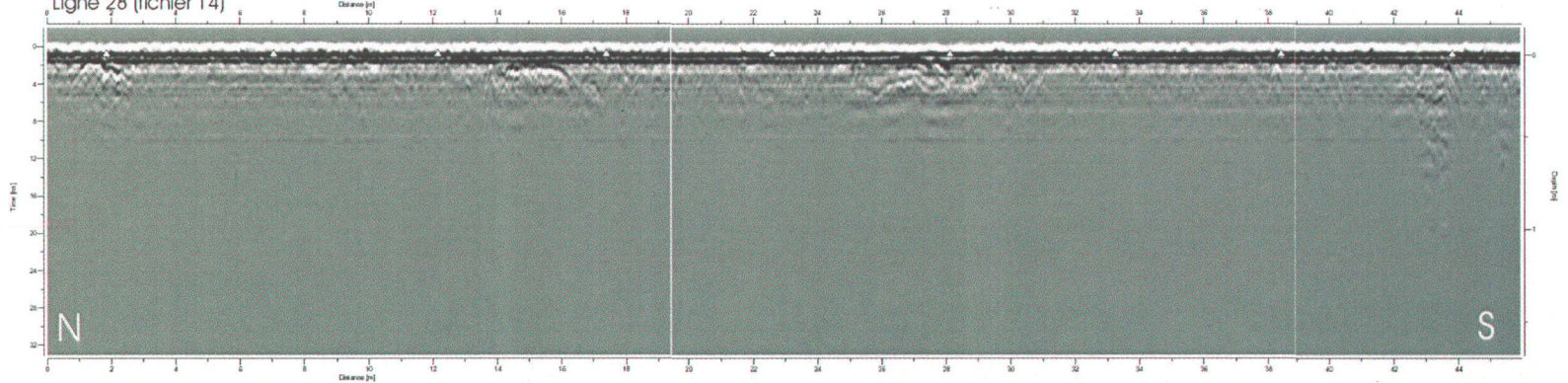
Ligne 24 (fichier 12)



Ligne 26 (fichier 13)



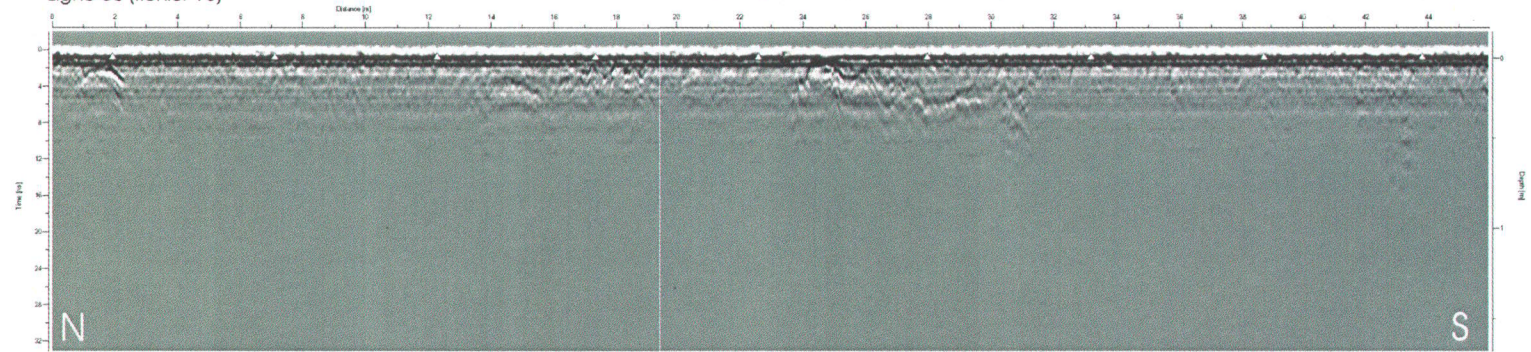
Ligne 28 (fichier 14)



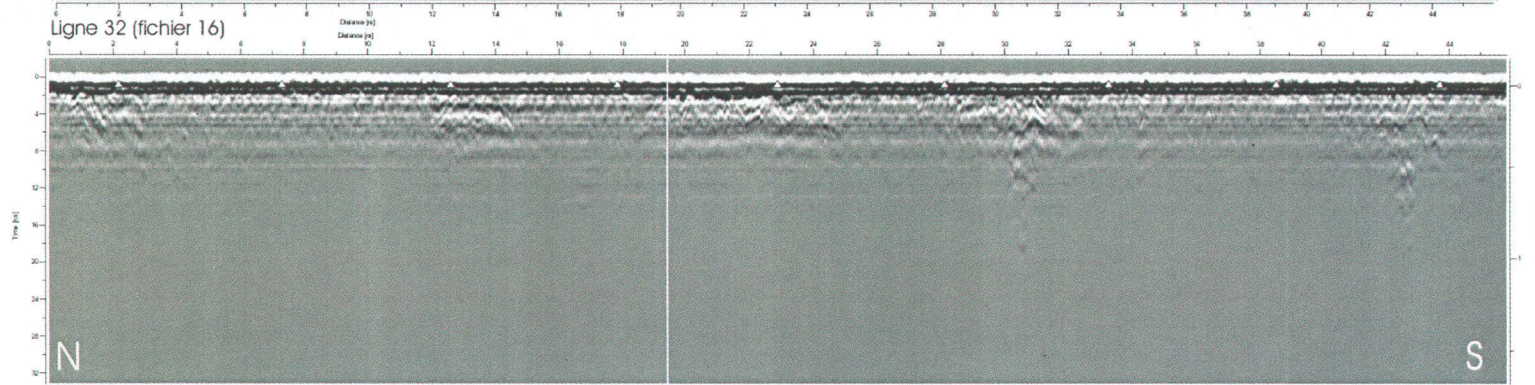
- Levé géoradar Ramac-Mala (800 MHz) -

Parc Sacré-Coeur (Ville de Québec)

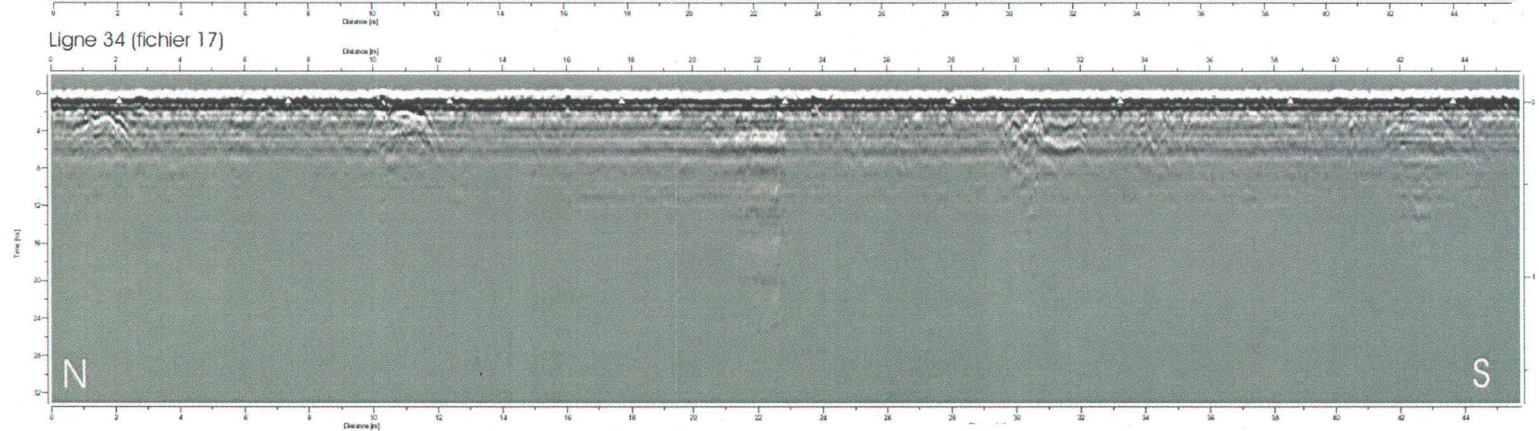
Ligne 30 (fichier 15)



Ligne 32 (fichier 16)



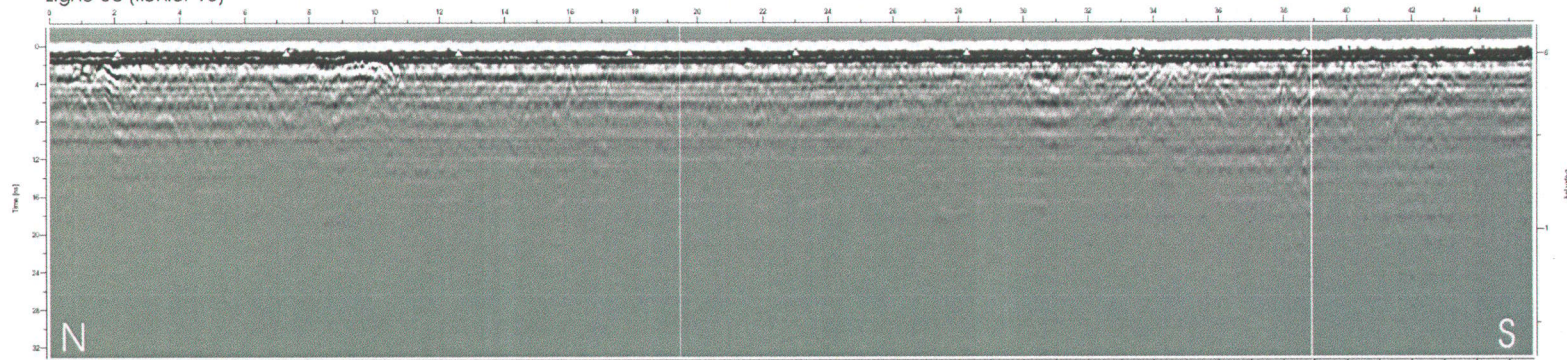
Ligne 34 (fichier 17)



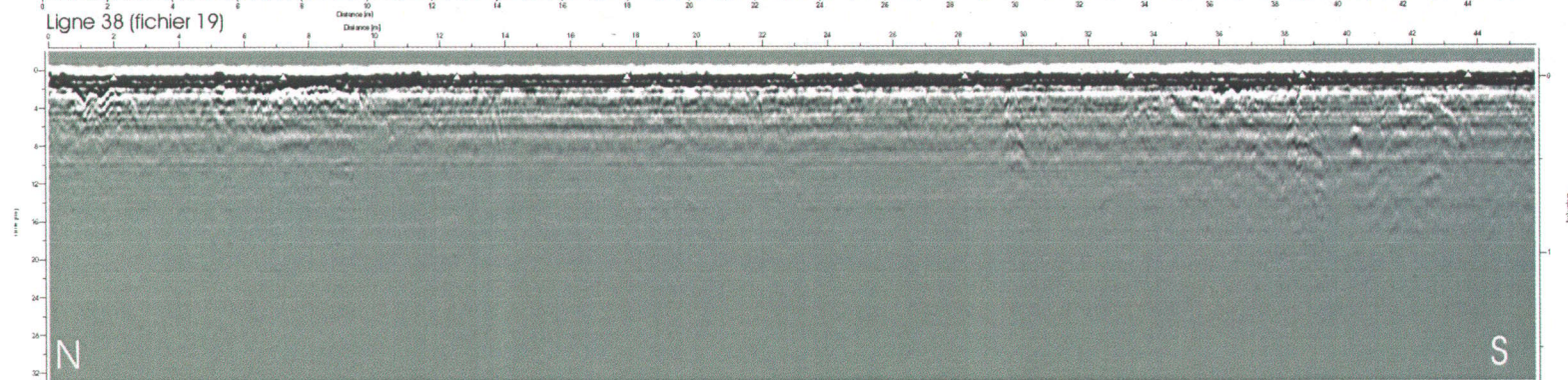
- Levé géoradar Ramac-Mala (800 MHz) -

Parc Sacré-Coeur (Ville de Québec)

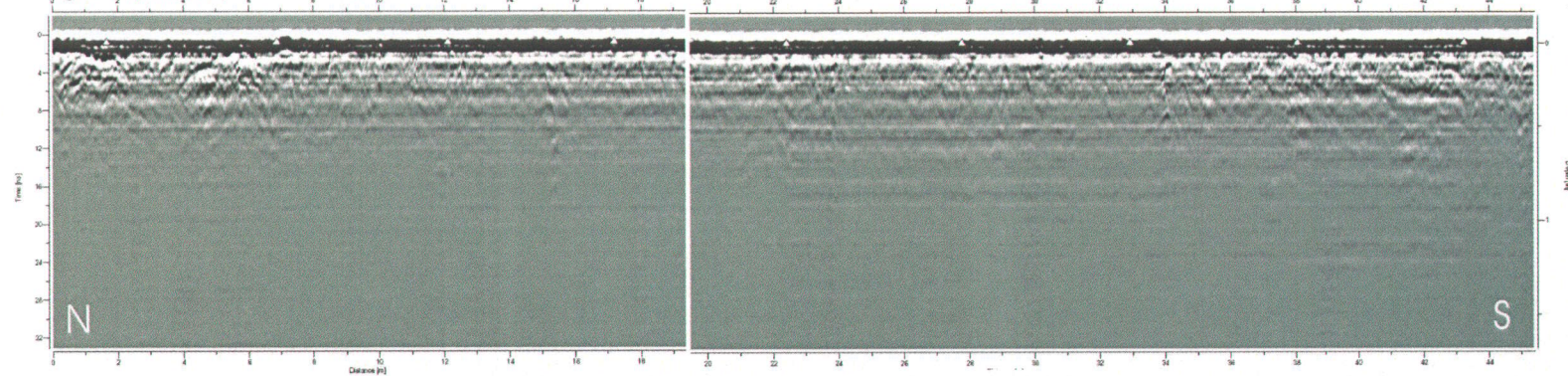
Ligne 36 (fichier 18)



Ligne 38 (fichier 19)



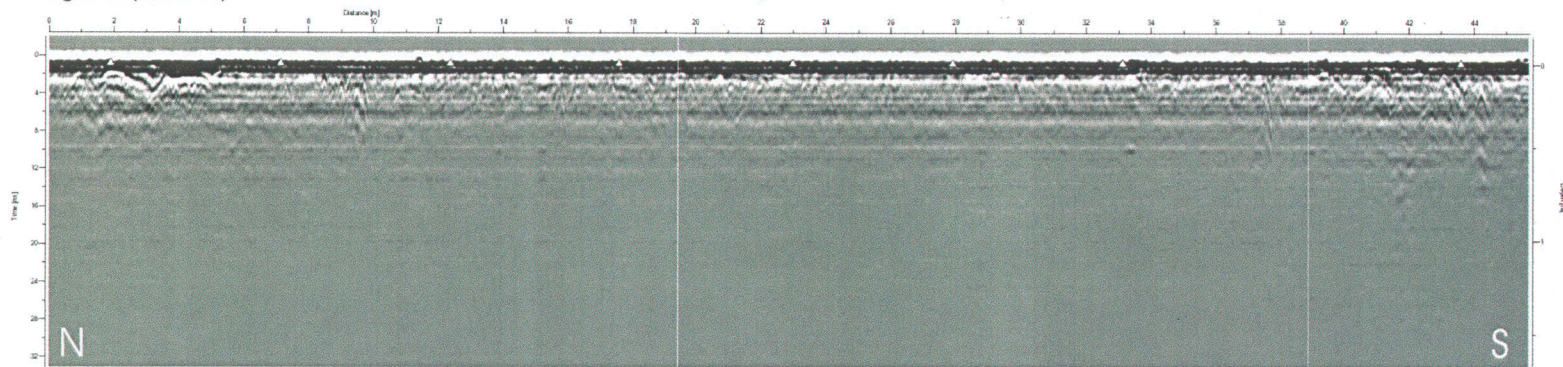
Ligne 40 (fichier 20)



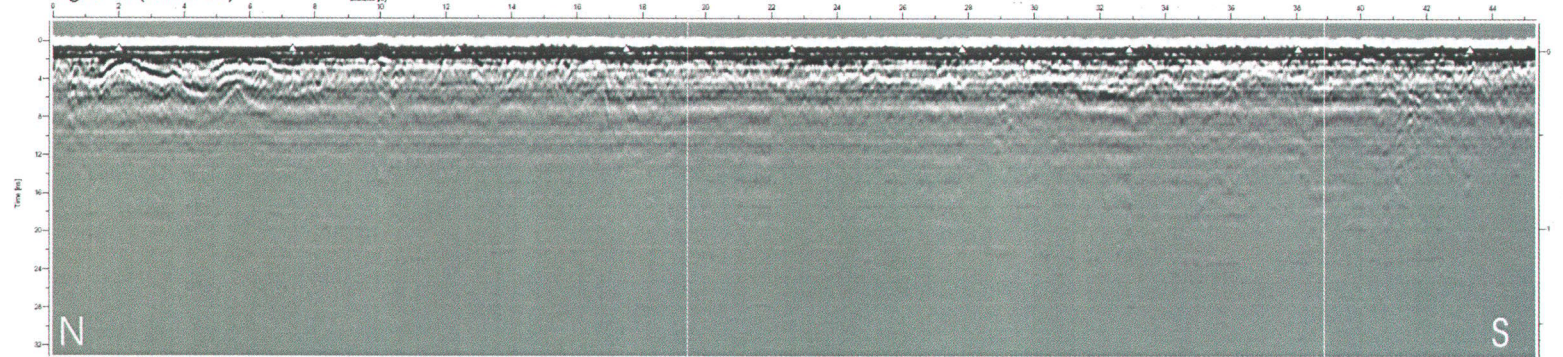
- Levé géoradar Ramac-Mala (800 MHz) -

Parc Sacré-Coeur (Ville de Québec)

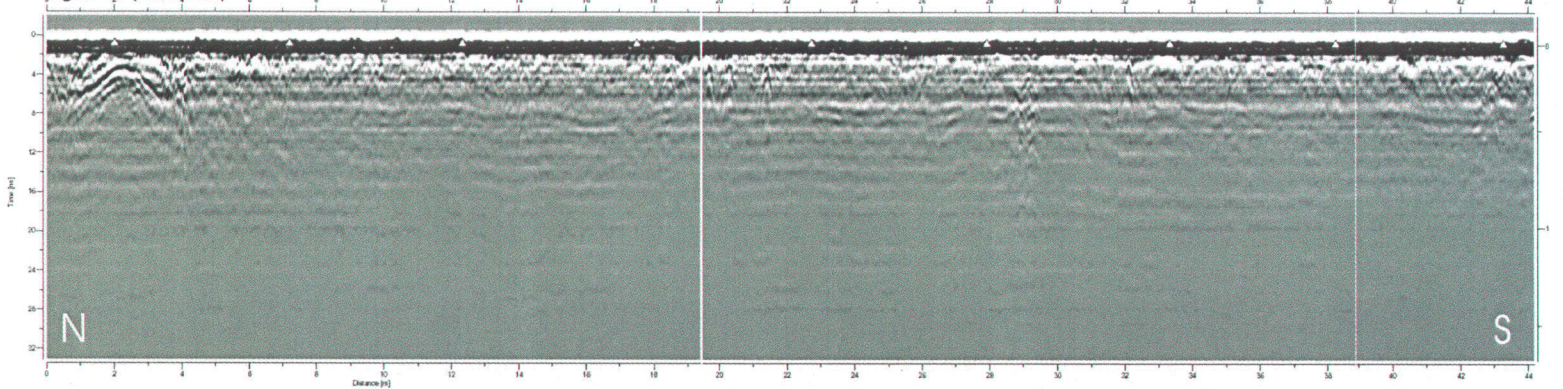
Ligne 42 (fichier 21)



Ligne 44 (fichier 22)

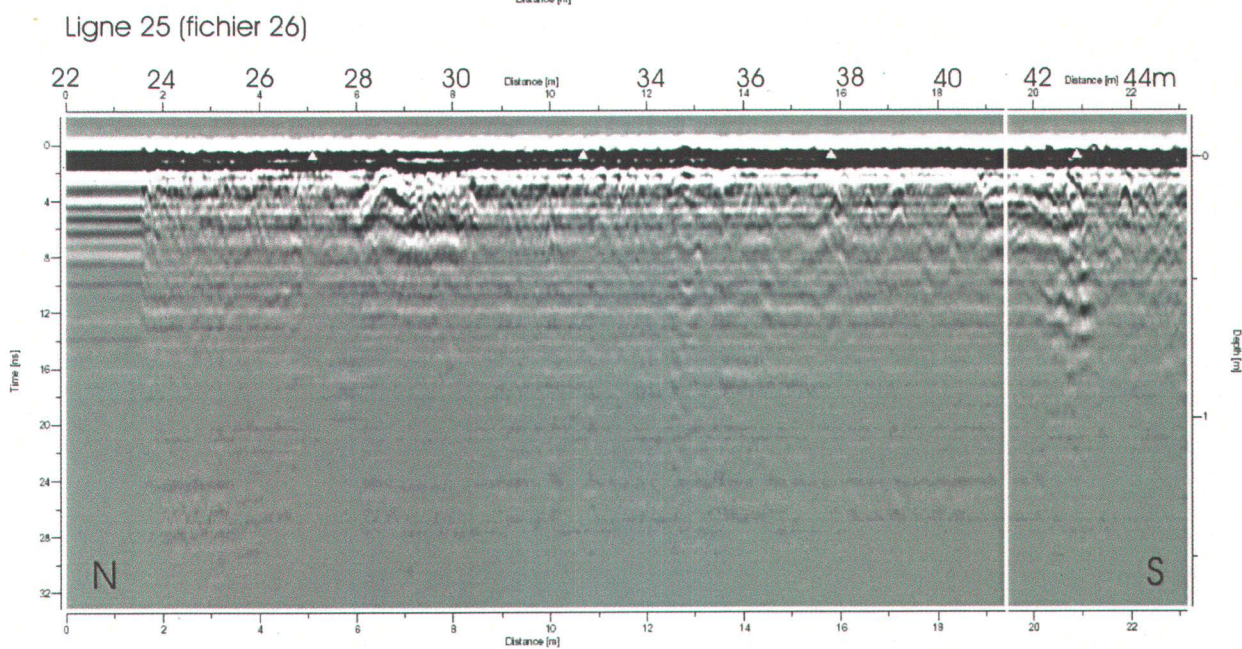
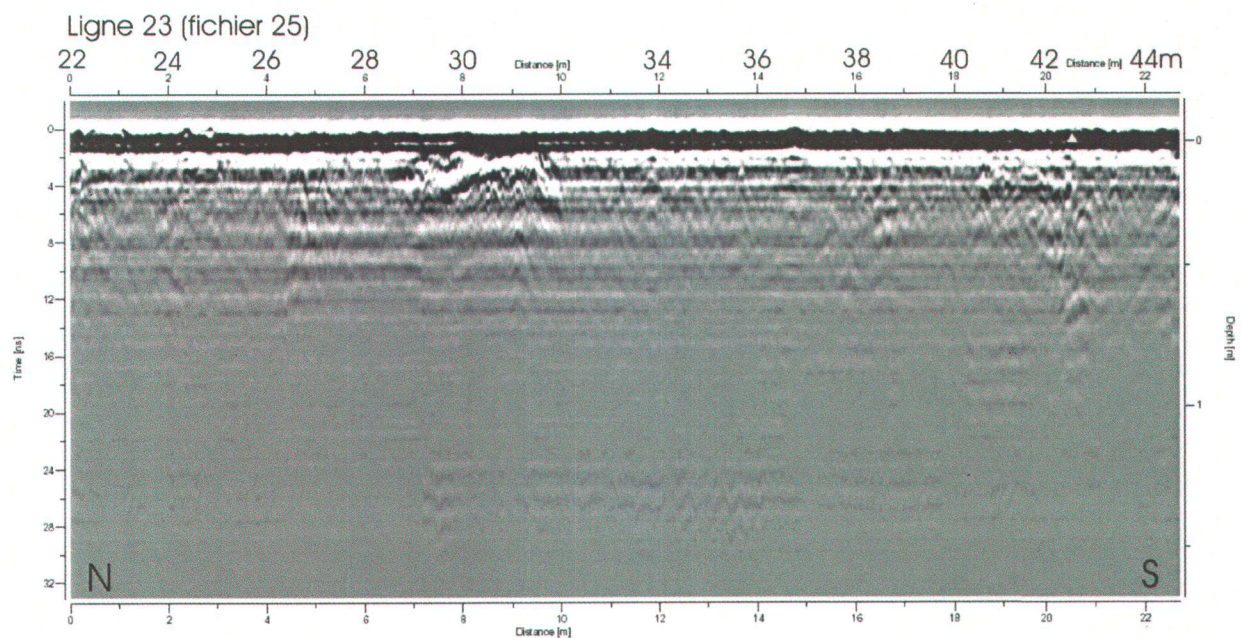


Ligne 46 (fichier 23)



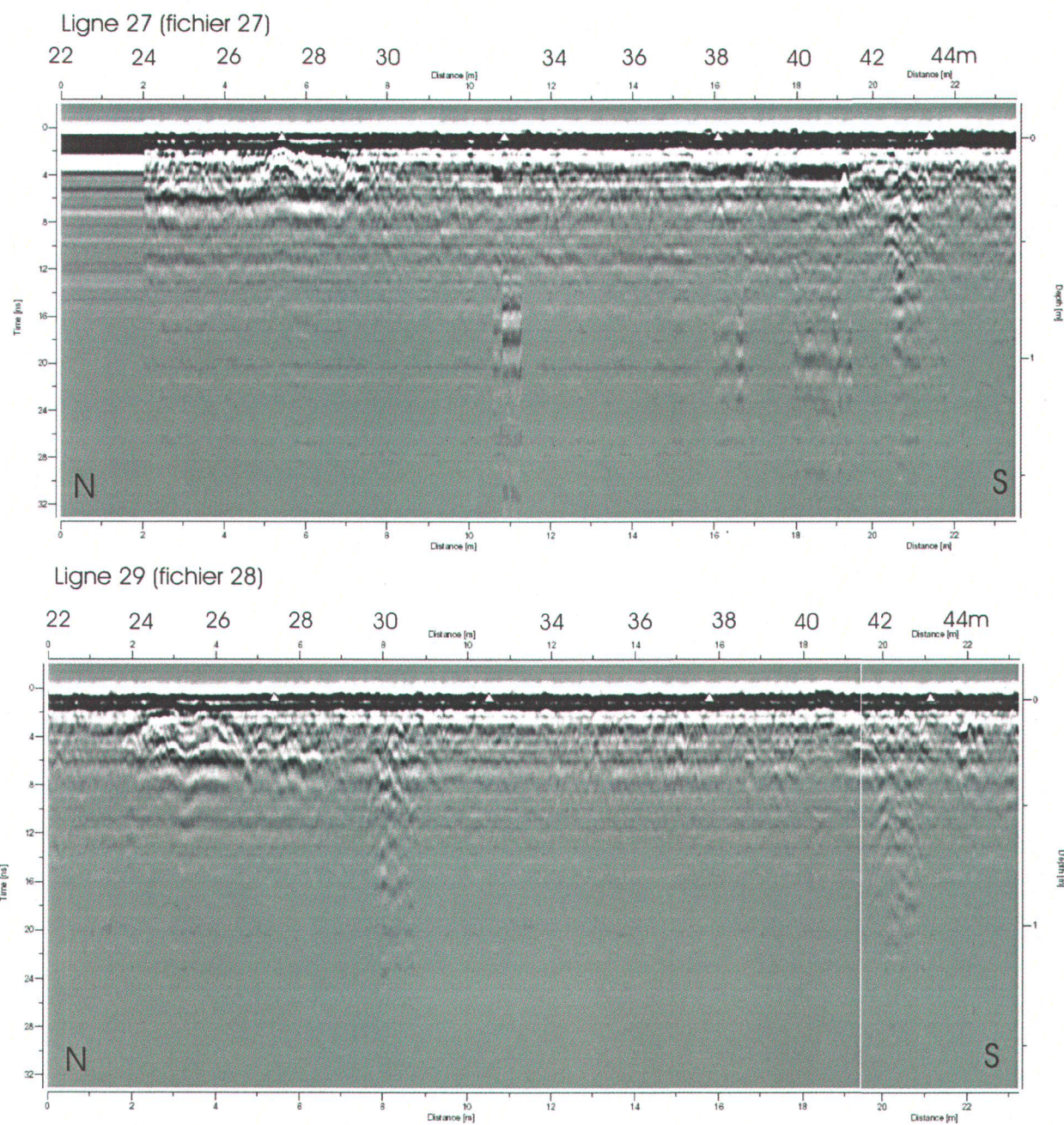
- Levé géoradar Ramac-Mala (800 MHz) -

Parc Sacré-Coeur (Ville de Québec)



- Levé géoradar Ramac-Mala (800 MHz) -

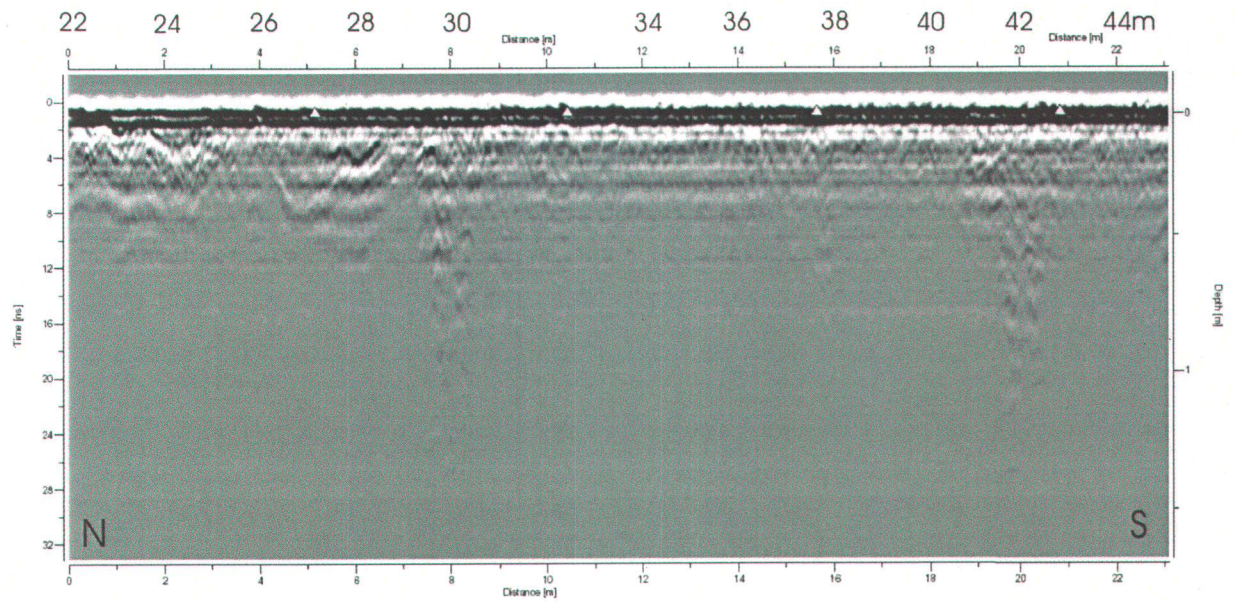
Parc Sacré-Coeur (Ville de Québec)



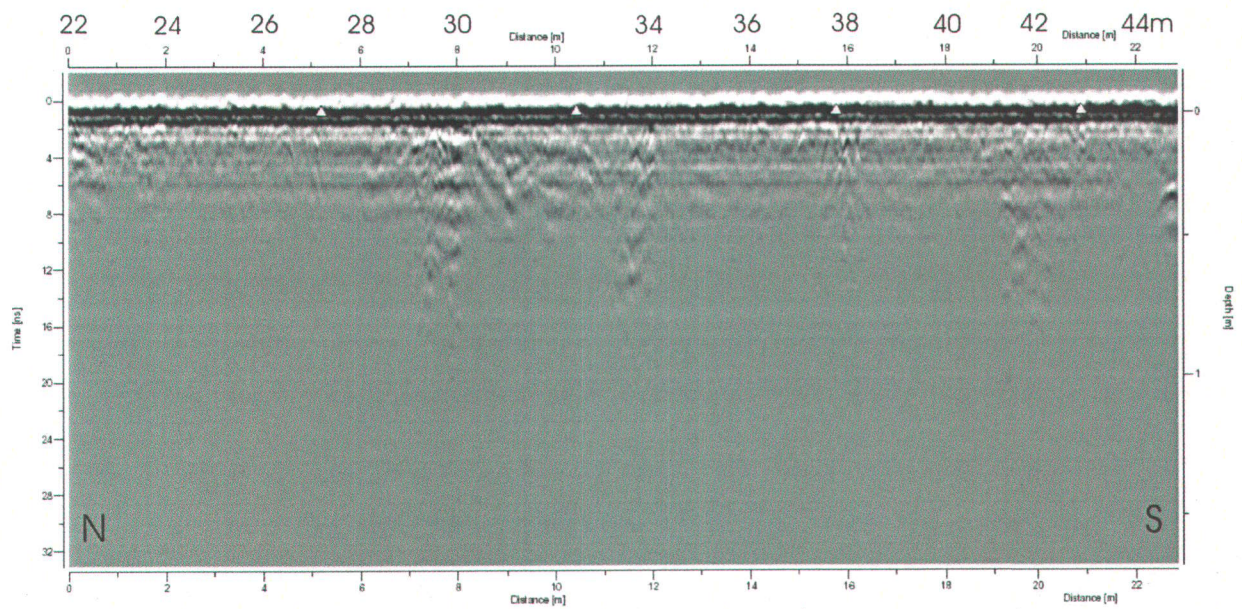
- Levé géoradar Ramac-Mala (800 MHz) -

Parc Sacré-Coeur (Ville de Québec)

Ligne 31 (fichier 29)



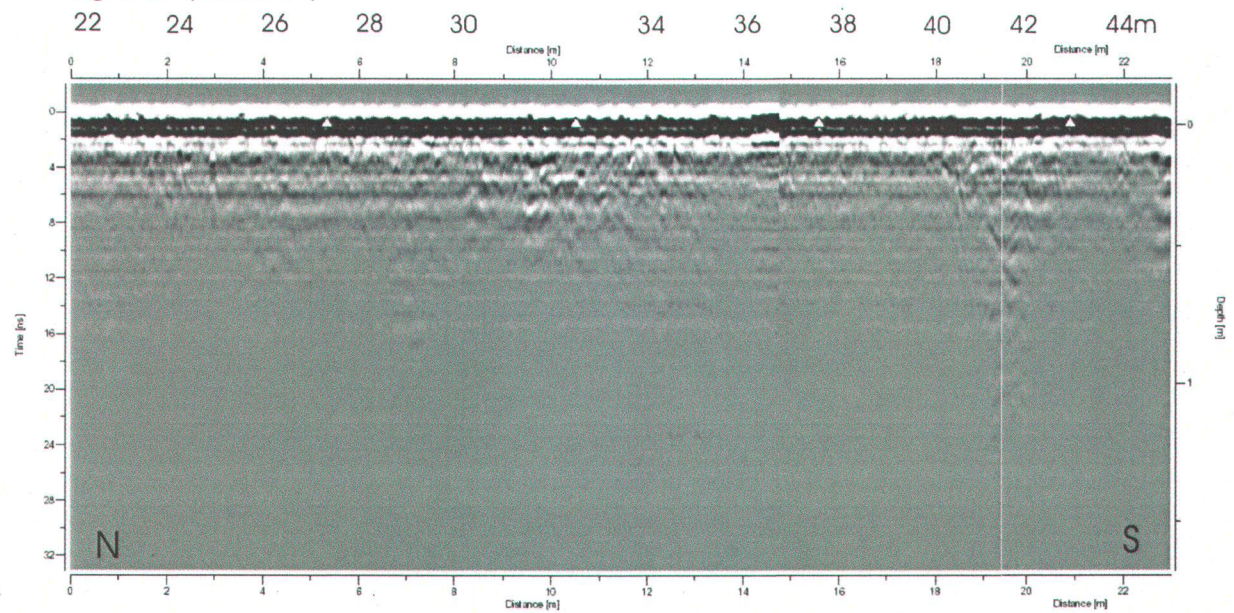
Ligne 33 (fichier 30)



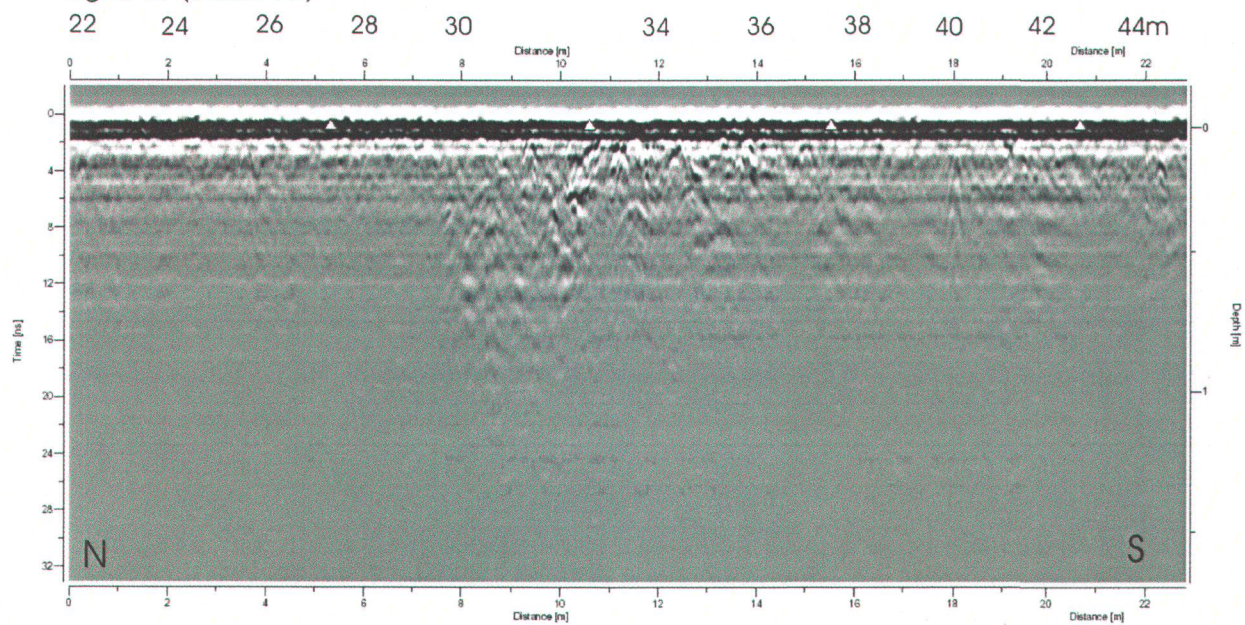
- Levé géoradar Ramac-Mala (800 MHz) -

Parc Sacré-Coeur (Ville de Québec)

Ligne 35 (fichier 31)

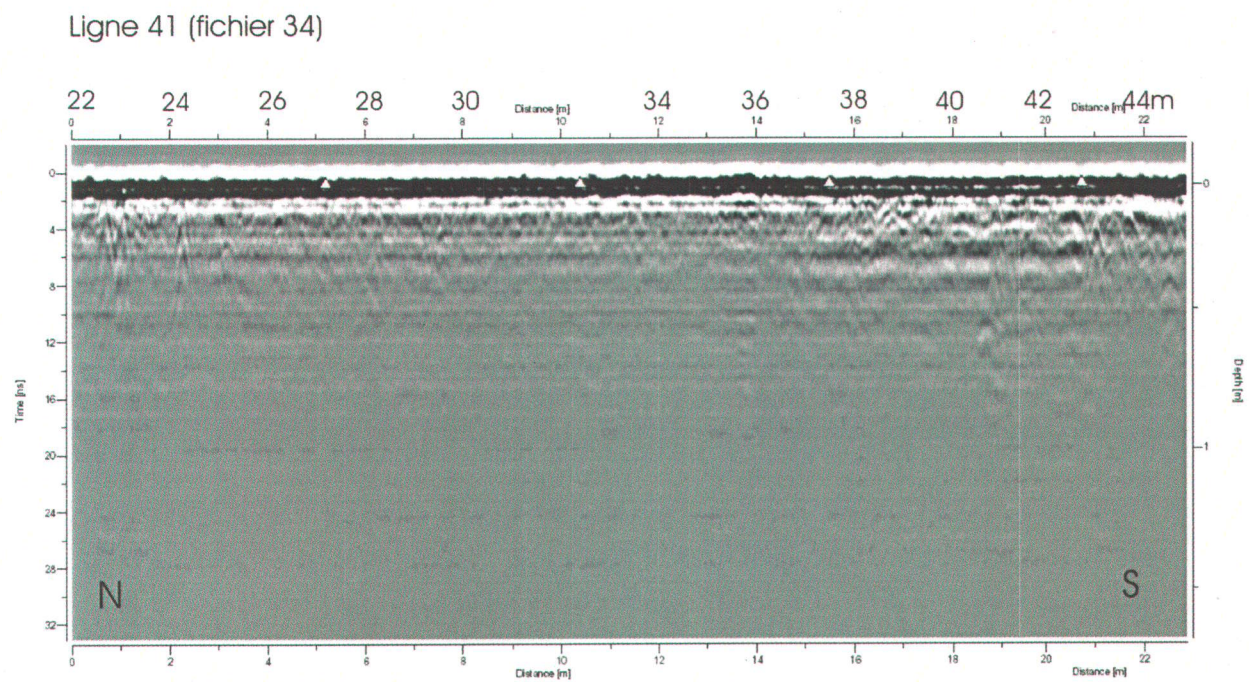
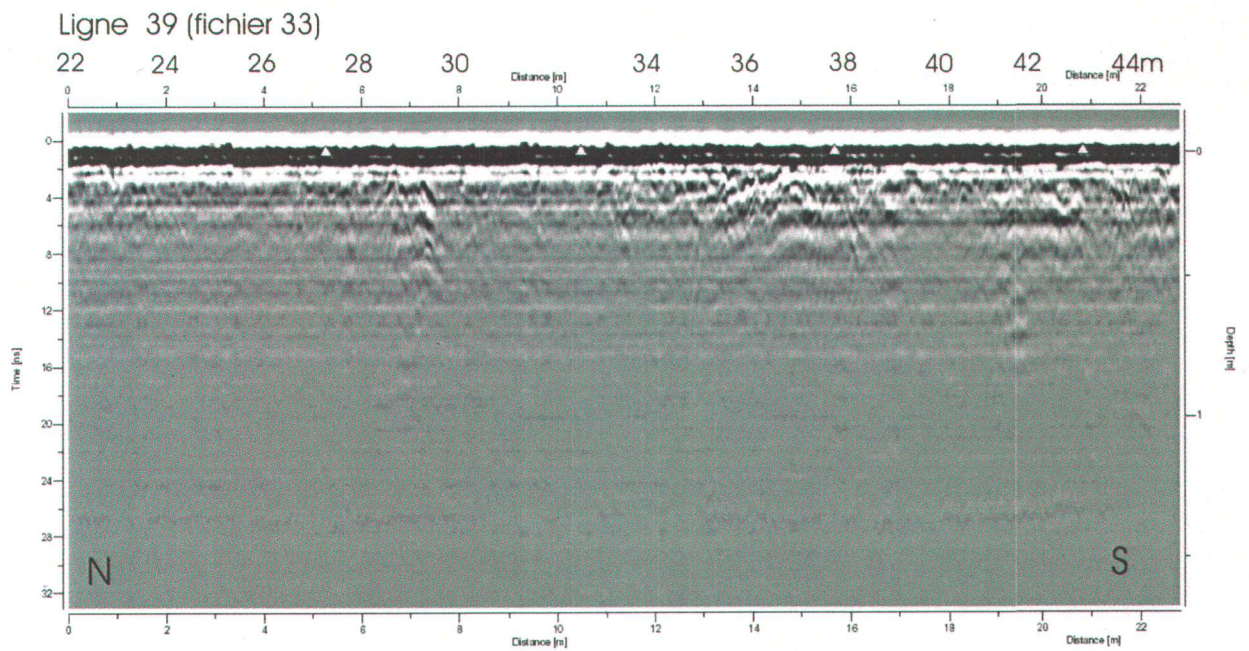


Ligne 37 (fichier 32)



- Levé géoradar Ramac-Mala (800 MHz) -

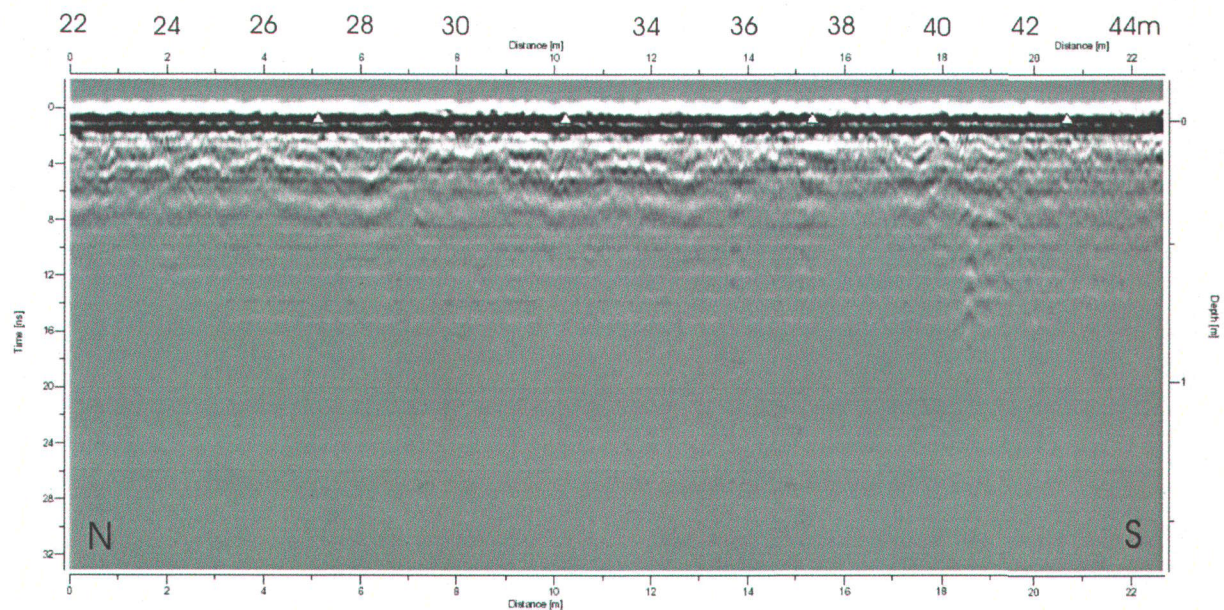
Parc Sacré-Coeur (Ville de Québec)



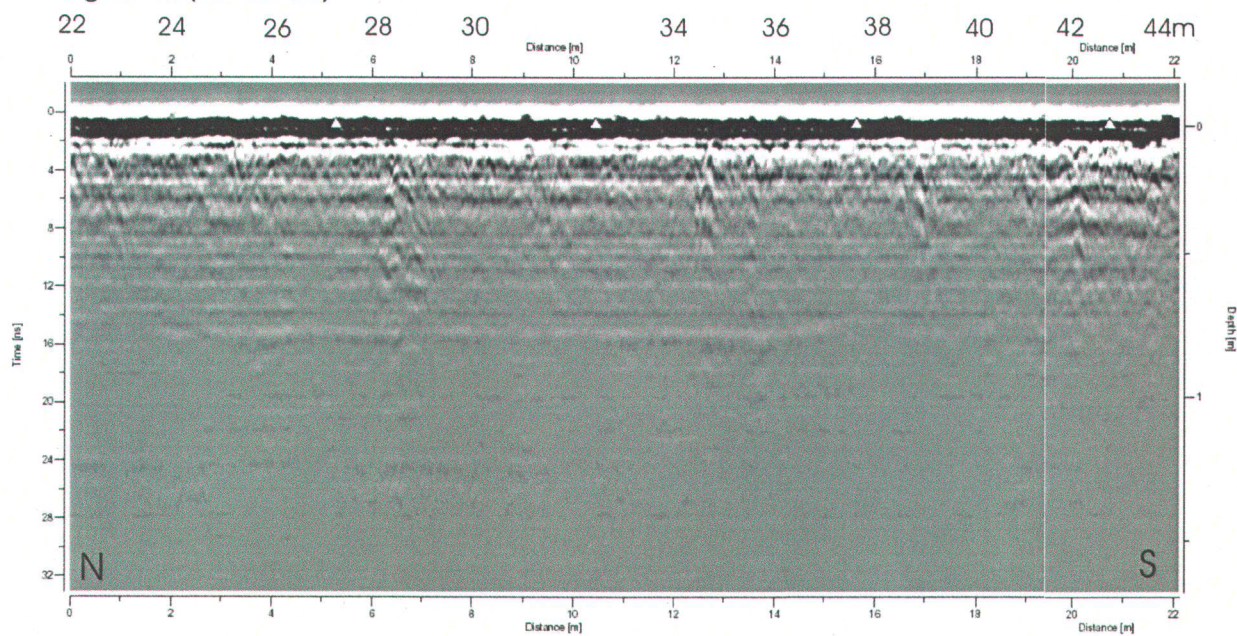
- Levé géoradar Ramac-Mala (800 MHz) -

Parc Sacré-Coeur (Ville de Québec)

Ligne 43 (fichier 35)



Ligne 45 (fichier 36)



- Levé géoradar Ramac-Mala (800 MHz) -