



HAL
open science

Nouveaux aspects architecturaux de la chapelle Notre-Dame-du-Val de Sotteville-sur-Mer (76) révélés par photogrammétrie et géophysique de subsurface

Cyrille Fauchard, Laure Aillaud, Astrid Legrand, Vincent Guilbert, Cyril
Ledun, Raphael Antoine, Bruno Beaucamp

► To cite this version:

Cyrille Fauchard, Laure Aillaud, Astrid Legrand, Vincent Guilbert, Cyril Ledun, et al.. Nouveaux aspects architecturaux de la chapelle Notre-Dame-du-Val de Sotteville-sur-Mer (76) révélés par photogrammétrie et géophysique de subsurface. Cerema. 2021. hal-04099376

HAL Id: hal-04099376

<https://hal.science/hal-04099376>

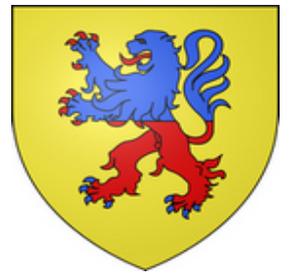
Submitted on 16 May 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License



Nouveaux aspects architecturaux de la chapelle Notre-Dame-du-Val de Sotteville-sur-Mer (76) révélés par photogrammétrie et géophysique de subsurface

Rapport Cerema/ENDSUM



Référence du dossier

Numéro d'affaire SIGMA : C19RR0037
Numéro d'étude ou de lot SIGMA : Sotteville-sur-Mer, chapelle Notre Dame du Val

Références de la commande

Mairie de Sotteville-sur-Mer, Association "Pour que vive la Chapelle du Val"
37 Rue de Beaumont, 76 740 Sotteville-sur-Mer
http://www.sotteville-sur-mer.fr/

Étude suivie par

Cyrille Fauchard et <i>al.</i> – ENDSUM Rouen
Tél : 0235689295 / fax 0235688100
Mél : cyrille.fauchard@cerema.fr

Historique des rapports remis pour cette étude

Version	Auteur.e.s	Commentaires
1	Laure Aillaud	Rapport de stage ingénieur, EOST - École et Observatoire des Sciences de la Terre - Université de Strasbourg et CNRS, Bâtiment Descartes - 5, rue René Descartes - F-67084 Strasbourg cedex
2	Astrid Le-grand	Rapport de stage IUT de l'Université de Rouen Normandie, IUT de Rouen, Building A - 1st floor, Rue Lavoisier, 76130 Mont-Saint-Aignan, France.
3	Cyrille Fauchard, Laure Aillaud, Astrid Legrand, Vincent Guilbert, Cyril Ledun, Raphaël Antoine, Bruno Beaucamp	Rapport de recherche appliquée intitulé "Nouveaux aspects architecturaux de la chapelle Notre-Dame-du-Val de Sotteville-sur-Mer (76) révélés par photogrammétrie et géophysique de subsurface"

Validation

<p>Le 17/02/2021 Par : Sylvain Thuleau Directeur du Laboratoire de Rouen</p>
--

Référence intranet

http://www.cerema.fr/

Cerema Normandie Centre/DGI/ENDSUM

10, Chemin de la Poudrière
 CS 90245
 F-76121 Le Grand-Quevilly Cedex

Siège social : Cerema Cité des Mobilités - 25, avenue François Mitterrand, CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex
 Tel : +33 (0)4 72 14 30 30 - www.cerema.fr

Table des matières

1	Résumé de l'étude	5
2	Introduction	6
3	Situation et géologie locale	7
4	Histoire de Notre-Dame-du-Val	9
5	Résultats des mesures photogrammétriques et géophysiques	11
5.1	Introduction	11
5.2	Mesures photogrammétriques	11
5.2.1	MNT intérieur	11
5.2.2	MNT extérieur	12
5.3	Résultats géophysiques : radar et imagerie de résistivité électrique	14
5.3.1	Implantation et caractéristiques des mesures	14
5.3.2	Résultats radar 3D	16
5.3.3	Résultats IRE	16
6	Discussion et interprétation	20
7	Conclusion	24
8	Remerciements	25
9	Annexes	27
9.1	Le GPR	27
9.1.1	Principe et application	27
9.1.2	Notion de permittivité diélectrique	28
9.1.3	Interprétation des signaux radar 1D, 2D et 3D	28
9.1.4	Ensemble des coupes radar horizontales de z=32,25 m à 29 m (NGF)	30
9.2	L'Imagerie de Résistivité Électrique (IRE)	30
9.2.1	Principe et application	30
9.2.2	Notion de résistivité électrique	30

9.2.3 Ensemble des coupes IRE autour de la chapelle	40
---	----

1 Résumé de l'étude

Cette étude présente les travaux menés par l'équipe ENDSUM (Evaluation Non Destructive des Structures et des Matériaux) du Cerema Normandie Centre sur la chapelle Notre-Dame-du-Val située à Sotteville-sur-Mer (76). Ce travail émane d'une demande de la mairie de Sotteville-sur-Mer, en lien avec l'association "Pour que vive la Chappelle-du-Val" et du soutien de la Direction des Affaires Culturelles de Normandie (DRAC).

Cette chapelle est aujourd'hui désacralisée et montre depuis quelques années des signes de vieillissement. Des travaux de restauration sont envisagés et, dans ce cadre, des investigations géophysiques des abords de la chapelle ont été demandées.

Des photos depuis le sol et depuis un drone ont été prises pour construire des modèles photogrammétriques intérieur et extérieur en trois dimensions (3D) de la chapelle. Le géoradar (ou Ground Penetrating Radar : GPR) et l'imagerie de résistivité électrique (IRE) sont deux méthodes de prospection non destructives qui ont été déployées sur le terrain entourant la chapelle. Les mesures radar révèlent clairement les traces d'un ancien transept dont les croisillons sont visibles des deux côtés du bâtiment et qui coïncident parfaitement avec la présence d'ouvertures aujourd'hui comblées, et dont les traces architecturales sont encore visibles depuis l'intérieur de la chapelle. Les mesures électriques soulignent la présence d'un socle électriquement résistant dont la nature est à préciser et les principales anomalies de résistivité corrélées aux anomalies radar permettent de confirmer la présence de matériaux servant d'assise aux croisillons disparus. Ces anomalies mériteraient des sondages pour confirmer leur nature et mettre en valeur le potentiel patrimoine architectural. Enfin, la restitution de l'ensemble des mesures au sein d'un modèle photogrammétrique 3D offre une visualisation des résultats très explicite, intégrant l'architecture de la chapelle et les mesures géophysiques.

2 Introduction

La prospection géophysique de subsurface consiste à imager le proche sous-sol de manière non destructive par des méthodes de mesures physiques. Deux grandes familles se distinguent. La première regroupe les méthodes sensibles aux grandeurs électromagnétiques (la résistivité, et son inverse, la conductivité, la permittivité diélectrique et la perméabilité magnétique). Elles utilisent un spectre large allant du courant continu aux hyperfréquences. La seconde comprend les méthodes sensibles aux contrastes de masse volumique et regroupe les méthodes sismiques et gravimétriques¹. Dans le domaine de l'archéologie, les méthodes les plus employées sont généralement celles permettant une prospection rapide et efficace de grandes surfaces de terrain : les méthodes radar (le radar géologique, encore appelé Ground Penetrating Radar ou GPR) et les méthodes magnétiques font ainsi partie du panel classique utilisé pour de nombreuses études archéologiques. Des méthodes à moins grand rendement, mais permettant aussi une imagerie précise sont souvent jointes aux autres méthodes. Il s'agit de l'Imagerie de Résistivité Électrique (IRE)² et des méthodes sismiques (réflexion, réfraction et en ondes de surface). Enfin, l'essor des drones et leur capacité à prendre des photos haute résolution a permis ces dernières années de développer la construction de modèles 3D des paysages, des structures du génie civil et de l'habitat, basés sur la photogrammétrie. Associés à un géoréférencement précis, issu de l'acquisition de points GNSS³, ces modèles enrichissent aujourd'hui les outils cartographiques et permettent une restitution et une interprétation des mesures géophysiques très explicites.

Dans ce travail, nous proposons l'utilisation de trois méthodes de mesures pour étudier les abords de la chapelle Notre-Dame-Du-Val située à Sotteville-sur-Mer (Normandie, France) : la photogrammétrie terrestre et par drone, le GPR et l'IRE. Plusieurs photos prises au sol et par drone mènent à la construction d'un modèle 3D photogrammétrique, de l'intérieur et de l'extérieur de la chapelle. Le GPR utilisé est multi-canaux : il possède plusieurs antennes, permettant d'imager les contrastes diélectriques du sous-sol en trois dimensions. L'IRE est utilisée selon plusieurs protocoles et permet d'imager des tranches de sol selon la profondeur. Elle complète localement les mesures radar et offre une plus grande profondeur d'investigation. Les corrélations entre structures internes et externes des modèles photogrammétriques avec les anomalies géophysiques mènent à de nouvelles interprétations, enrichissant l'histoire de la chapelle, jusqu'alors peu renseignée.

1. Nous excluons ici les méthodes nucléaires qui tendent à disparaître et qui sont très peu utilisées dans le cadre de la prospection de subsurface

2. Souvent aussi appelée Tomographie de Résistivité Électrique ou TRE

3. Global Navigation Satellite System

3 Situation et géologie locale

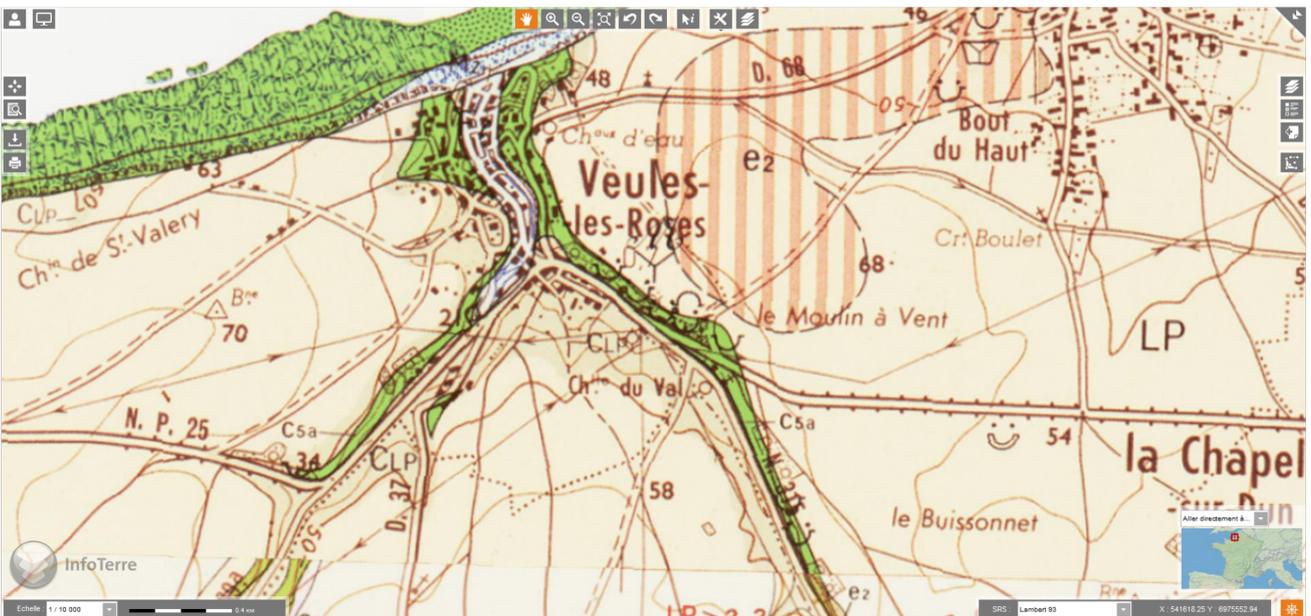
La chapelle Notre-Dame-du-Val est située sur la commune de Sotteville-sur-Mer en Seine Maritime (Normandie, France), sur le plateau calcaire du pays de Caux (voir la figure 3.1, a)). Elle est placée en léger contrebas d'une petite vallée. L'inspection visuelle montre que la surface du sol entourant l'édifice se situe entre 0,8 à 1 m plus haut que la surface du sol de la nef. On peut donc supposer que, (i) soit la construction de l'édifice a fait l'objet d'une excavation pour s'implanter sur un sol mécaniquement plus stable que les formations de surface, (ii) soit des colluvions provenant de l'amont se sont déposées au cours du temps autour de l'édifice.

La géologie locale est représentée sur la figure 3.1, b). La chapelle est située sur les limons de plateau (LP, figure 3.1, c)). Il est très probable que la formation calcaire du Santonien, figurant sur la carte géologique de l'autre côté de la route où se situe la chapelle, se retrouve sous la couverture de colluvions, telles que les fouilles archéologiques de 1993 l'ont révélé (Fajon (1993), voir partie 4).

a)



b)



c)

- | | |
|---|--|
|  LP - limons non différenciés |  C6 - Campanien : craie blanchâtre à silex. |
|  e2 - Thanétien : sables | Subdivisions définies par études |
|  e4 - Cuisien inférieur : formation de | des foraminifères (g,h) |
| Varengeville | |
|  Fz - Quaternaire : alluvions récentes |  C5 - Santonien : craie blanche à silex |
| | abondants. Subdivisions définies |
|  e3 - Sparnacien : sables et argiles à | par études des foraminifères (d,e,f) |
| Ostrcodes et Mollusques, argiles à silex | |

FIGURE 3.1 – a) Situation géographique de Notre-Dame-du-Val (Sotteville-sur-Mer, Normandie, France). b) Zoom sur la géologie locale (1/10000) de la carte géologique imprimée au 1/50000 et c), légende géologique (source : <https://infoterre.brgm.fr/>).

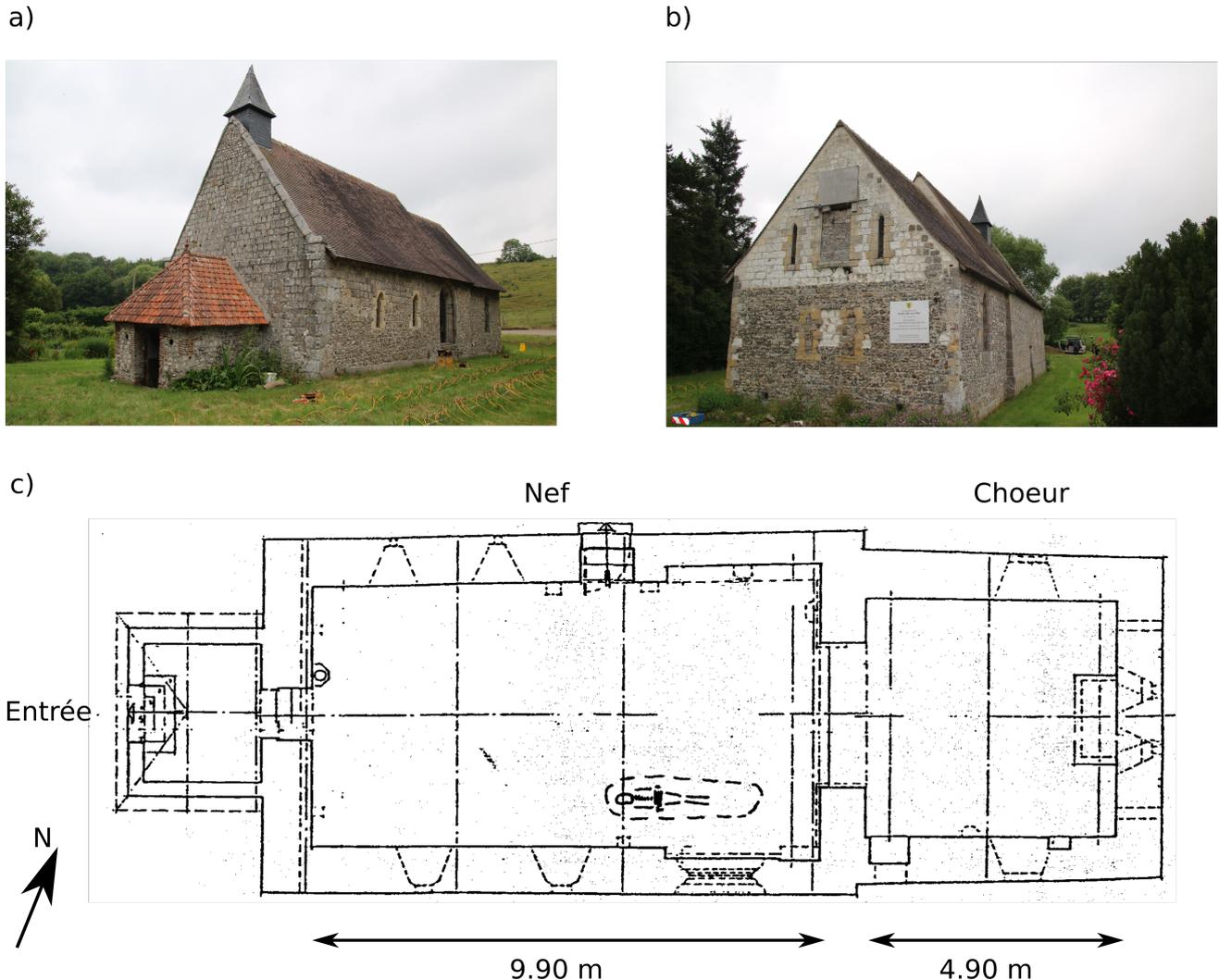


FIGURE 4.1 – a) Vue nord et b) sud de la chapelle Notre-Dame-du-Val (Sotteville-sur-Mer, Normandie, France). c) Plan de la chapelle extrait de (Fajon, 1993).

4 Histoire de Notre-Dame-du-Val

Il existe peu d'éléments historiques référencés concernant la chapelle Notre-Dame-du-Val de Sotteville-sur-Mer. Seuls les travaux de Fajon (Fajon (1993)) apportent un éclairage historique argumenté sur l'édifice. D'autres éléments historiques peuvent être déduits d'une recherche d'archives minutieuse, telle qu'elle a été menée par Desriaux (2018). Cependant, peu d'éléments architecturaux peuvent en être extraits et seule une connaissance historique de l'architecture des édifices religieux pourra enrichir les résultats des travaux que nous présentons.

La date de création de la chapelle Notre-Dame-du-Val et de la léproserie dont elle dépendait, n'est pas précisément connue mais leurs premières mentions apparaissent au cours du XVe siècle (1434-1435). Des éléments architecturaux (fenêtre de chevet ogivale et arc du mur sud en plein cintre) laissent supposer une construction au XIIe ou XIIIe siècle et des remaniements notables au XVIe et XVIIe siècle. La léproserie a cessé de fonctionner après 1695. Le plan actuel de la chapelle est reporté sur la figure 4.1 et est une reproduction des travaux de Fajon (1993). La chapelle est composée d'une nef à un seul vaisseau, longue de 9,90 m puis se rétrécit de 30 cm de chaque côté au début du transept. Le coeur de la chapelle est un carré de 4,90 m de côté. L'analyse des niveaux de sols apporte des informations importantes pour l'interprétation de nos mesures géophysiques (voir section interprétation). En effet, sous le pavage en grès et silex, le niveau de sol est identifié et comporte des calcaires altérés correspondant probablement

à la couche calcaire du Santonien (voir partie 3). Enfin, on notera la présence d'un défunt inhumé à 1,1 m de profondeur au sud de la nef, s'agissant probablement d'une personne attachée au service de la chapelle.

5 Résultats des mesures photogrammétriques et géophysiques

5.1 Introduction

Nous avons mené des mesures de photogrammétrie par drone et à pied, de GPR et d'IRE. Leurs résultats après traitements spécifiques sont restitués sous le logiciel Paraview. Les méthodes géophysiques sont décrites en annexe de ce document.

5.2 Mesures photogrammétriques

L'objectif des relevés photographiques est d'obtenir des modèles 3D des structures observées pour y intégrer les représentations des mesures géophysiques. Cela permet une analyse plus complète, une visualisation plus aisée des résultats dans l'espace, et de faciliter les corrélations potentielles entre les structures visibles et les structures enterrées.

Préalablement à ces relevés, des cibles photogrammétriques ont été disposées au sol autour de la chapelle, puis leur coordonnées ont été relevées avec un récepteur GNSS¹. Au sein de la chapelle, des mesures entre points remarquables (distances entre piliers ou blocs de pierre bien identifiables sur les photos, hauteurs des ouvertures, largeurs des voûtes) ont été précisément relevées. Cette étape est essentielle pour confier une métrique fiable au modèle 3D construit ensuite.

Nous avons réalisé deux campagnes de prise de photo dans le domaine visible :

- un vol à 30 m de hauteur avec un drone Phantom 4 PRO au-dessus de la chapelle et de ses abords. 159 photos ont été prises ;
- un relevé photographique à pied autour et à l'intérieur de la chapelle. 164 photos ont été prises.

Les caractéristiques de la caméra sont données dans le tableau 5.1. Les caractéristiques des clichés obtenus au sein de la chapelle dépendent ici de la distance entre l'opérateur et la cible. Cette distance étant variable, la taille des pixels entre photo n'est pas constante. Mais on évalue que leur dimension est inférieure à 1 cm (appareil photo Canon 70D, distance moyenne opérateur/cible inférieure à 5 m).

Ces deux campagnes ont permis de construire deux nuages de points 3D par technique photogrammétrique grâce au logiciel Agisoft Metashape Pro, contenant respectivement, sur le nuage de points extérieur, 33 017 610 points, avec une résolution de 9,4 mm/px, une densité des points de 1,13 points/cm² et une erreur totale de 1,67 cm, et sur le nuage de point intérieur, 192 867 330 points, une résolution de 1,79 mm/px, une densité de 31,1 points/cm², et une erreur totale de 2,90 cm. Ces nuages de points ont ensuite été maillés afin d'obtenir un modèle 3D complet de l'intérieur et de l'extérieur de la chapelle.

5.2.1 MNT intérieur

Sur les figures 5.1 et 5.2 est représenté le MNT intérieur, vu respectivement depuis le nord et le sud. Ces vues globales montrent l'intérieur de la chapelle vu de l'extérieur.

La vue est donc biaisée et c'est depuis l'intérieur de la chapelle qu'il faut observer ce MNT. On a donc réalisé deux coupes représentant le demi-MNT vue nord et le demi-MNT vue sud, respectivement sur les figures 5.3 et 5.4. Tout d'abord, les résultats montrent que les prises de photos n'ont pas été optimisées car les MNT présentent des trous : l'objectif n'était pas la reconstruction complète intérieure de l'architecture, mais de posséder les éléments architecturaux principaux, et ce, sur les façades notamment. La reconstruction totale de l'intérieur de la chapelle n'est pas complète, due notamment à la présence d'échafaudages dans la partie du coeur et d'un nombre insuffisant de photos à l'entrée.

1. Global Navigation Satellite System

	Vol du 18/06/2020, Phantom 4 PRO
Caméra	Caméra intégrée Phantom 4 PRO
Dim. (px)	5472 x 3648
Dist. focale	8,8 mm
Taille photosite	2,4 μm
Hauteur de vol	30 m
Taille pixel au sol	8,2 mm
Temps d'exposition	auto, entre 1/320 s et 1/80 s
Taille de l'image au sol	44,8 x 29,8 m

TABLE 5.1 – Caractéristiques de la caméra embarquée sur le drone utilisé pour le vol du 18 juin 2020 au-dessus de la chapelle de Sotteville-sur-Mer.

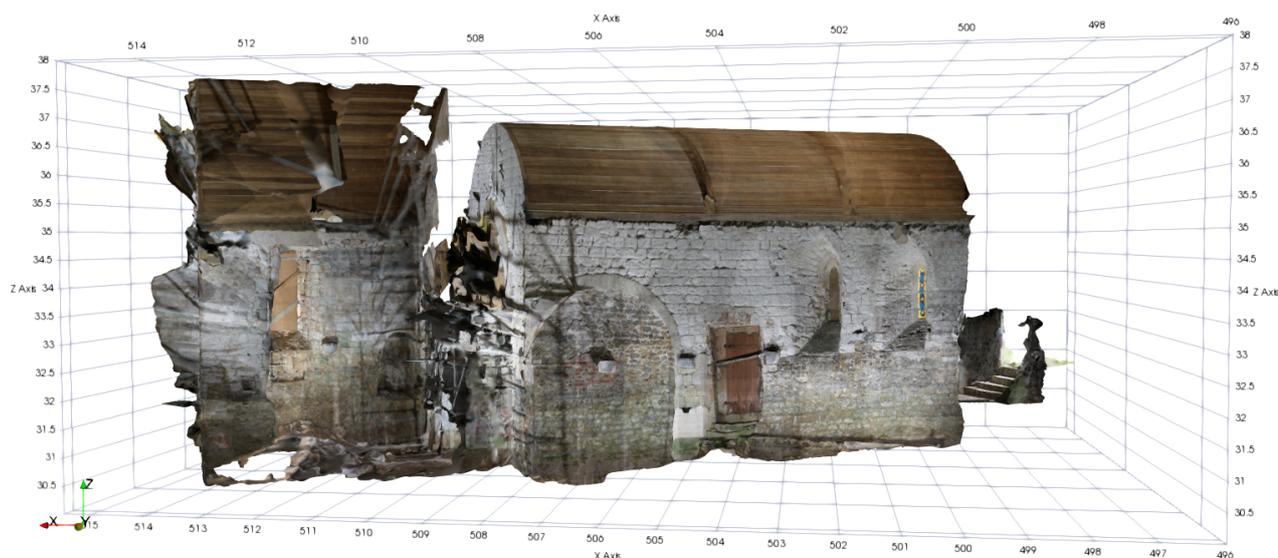


FIGURE 5.1 – MNT intérieur de la chapelle, vu de l'extérieur depuis le nord

En revanche, la nef est parfaitement restituée et il est important de souligner la présence d'arches intérieures comblées sur les flancs nord et sud à la frontière de la nef et du coeur.

5.2.2 MNT extérieur

Le MNT extérieur est représenté respectivement vus du nord et du sud sur les figures 5.5 et 5.6. L'essentiel de la structure est bien représenté et peut servir de support pour la visualisation des résultats géophysiques présentés dans les parties suivantes.

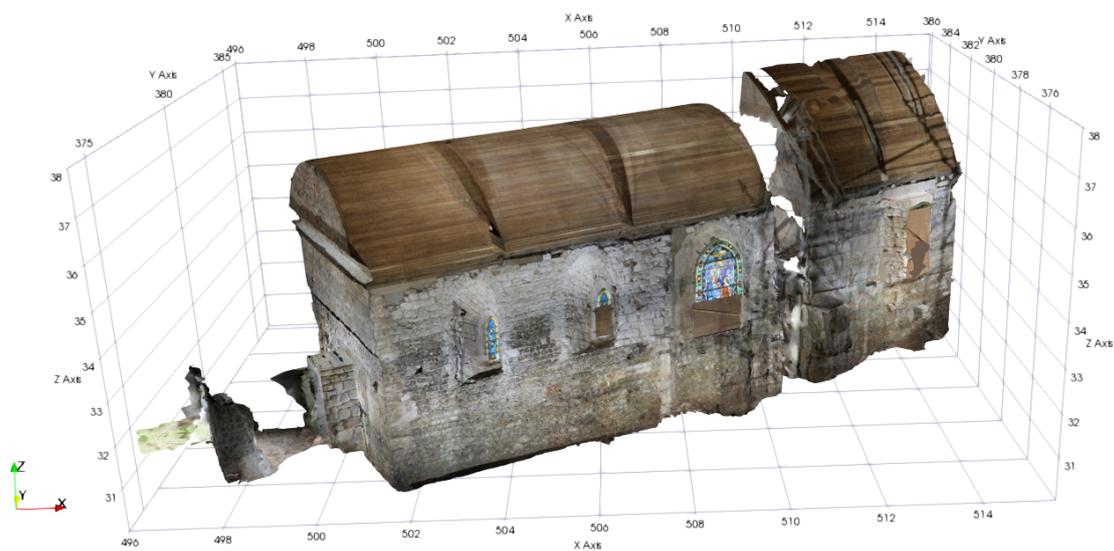


FIGURE 5.2 – MNT intérieur de la chapelle, vu de l'extérieur depuis le sud



FIGURE 5.3 – Demi-MNT intérieur de la chapelle, vu de l'extérieur depuis le nord

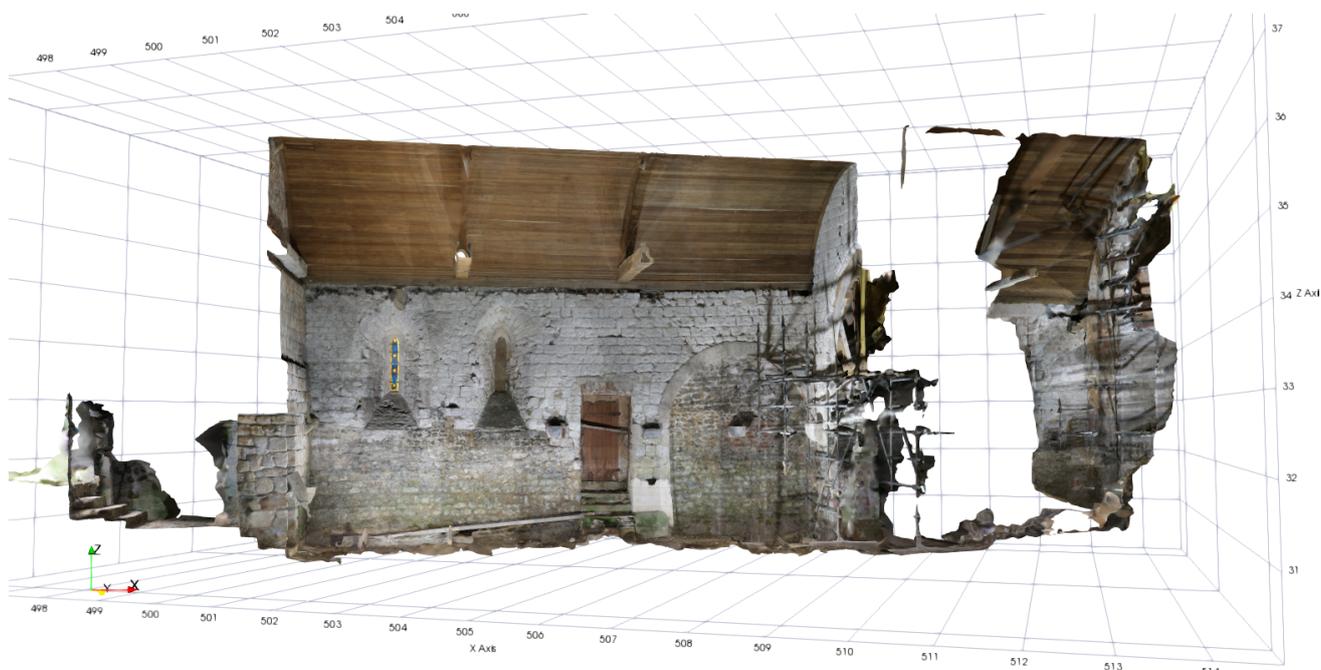


FIGURE 5.4 – Demi-MNT intérieur de la chapelle, vu de l'extérieur depuis le sud

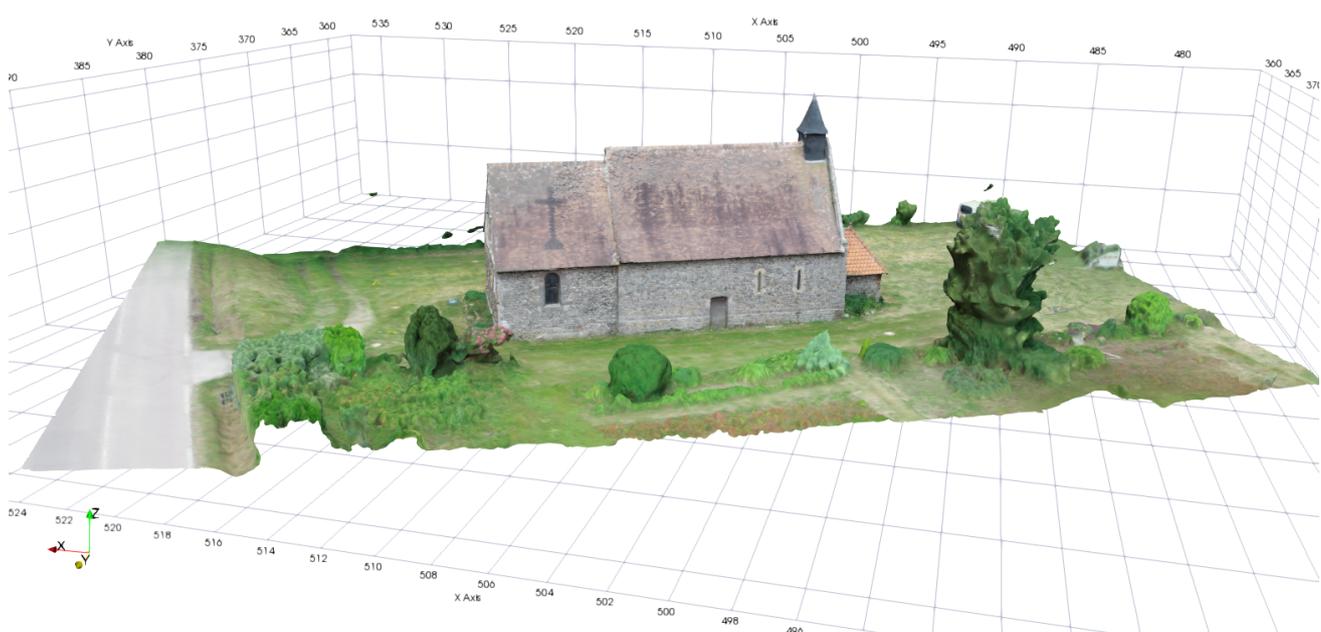


FIGURE 5.5 – MNT extérieur de la chapelle, vu de l'extérieur depuis le nord

5.3 Résultats géophysiques : radar et imagerie de résistivité électrique

5.3.1 Implantation et caractéristiques des mesures

Les principes des méthodes radar 3D et de l'imagerie de résistivité électrique sont présentés en annexe du document. Les zones mesurées au radar 3D et l'implantation des profils de résistivité électrique sont respectivement présentés sur les figures 5.7 et 5.8.

Pour les mesures radar 3D, nous avons utilisé le radar IDS à 200 MHz, possédant 7 couples d'émetteurs et de récepteurs, répartis sur une largeur de 80 cm. Nous avons donc délimité les abords autour de la chapelle de manière à recouvrir totalement la surface par bande de 80 cm. Un ensemble de traitements, déjà décrits par [Aillaud \(2020\)](#) est appliqué aux signaux de manière à obtenir des coupes horizontales

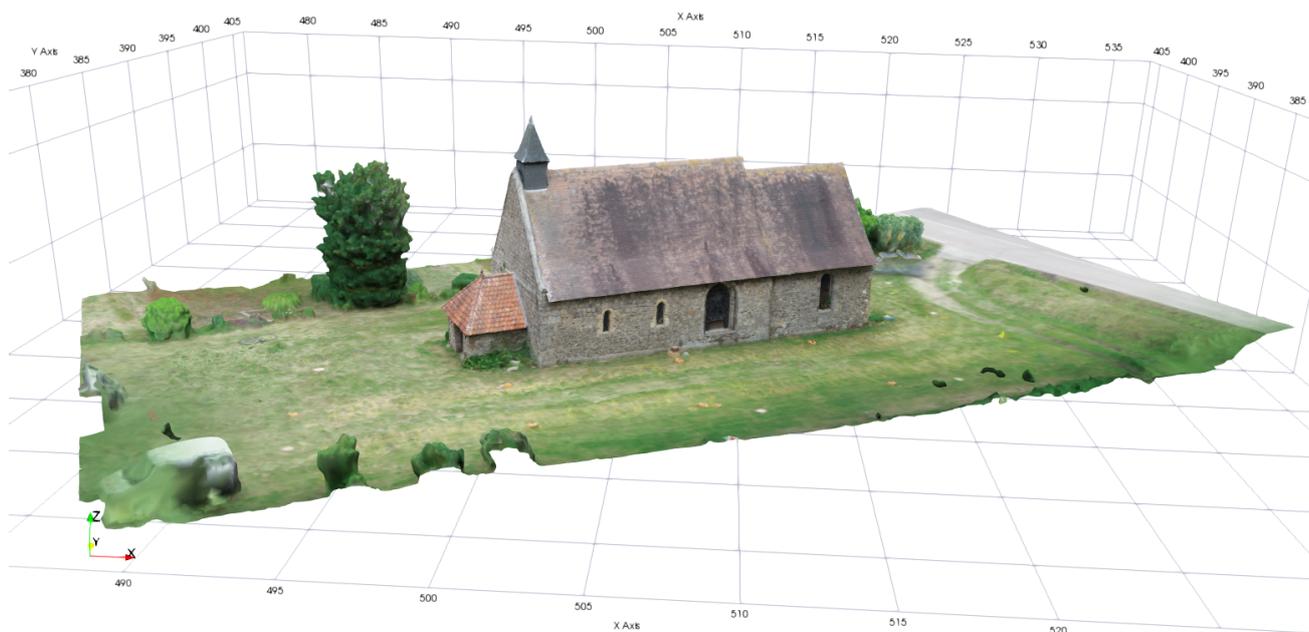


FIGURE 5.6 – MNT extérieur de la chapelle, vu de l'extérieur depuis le sud

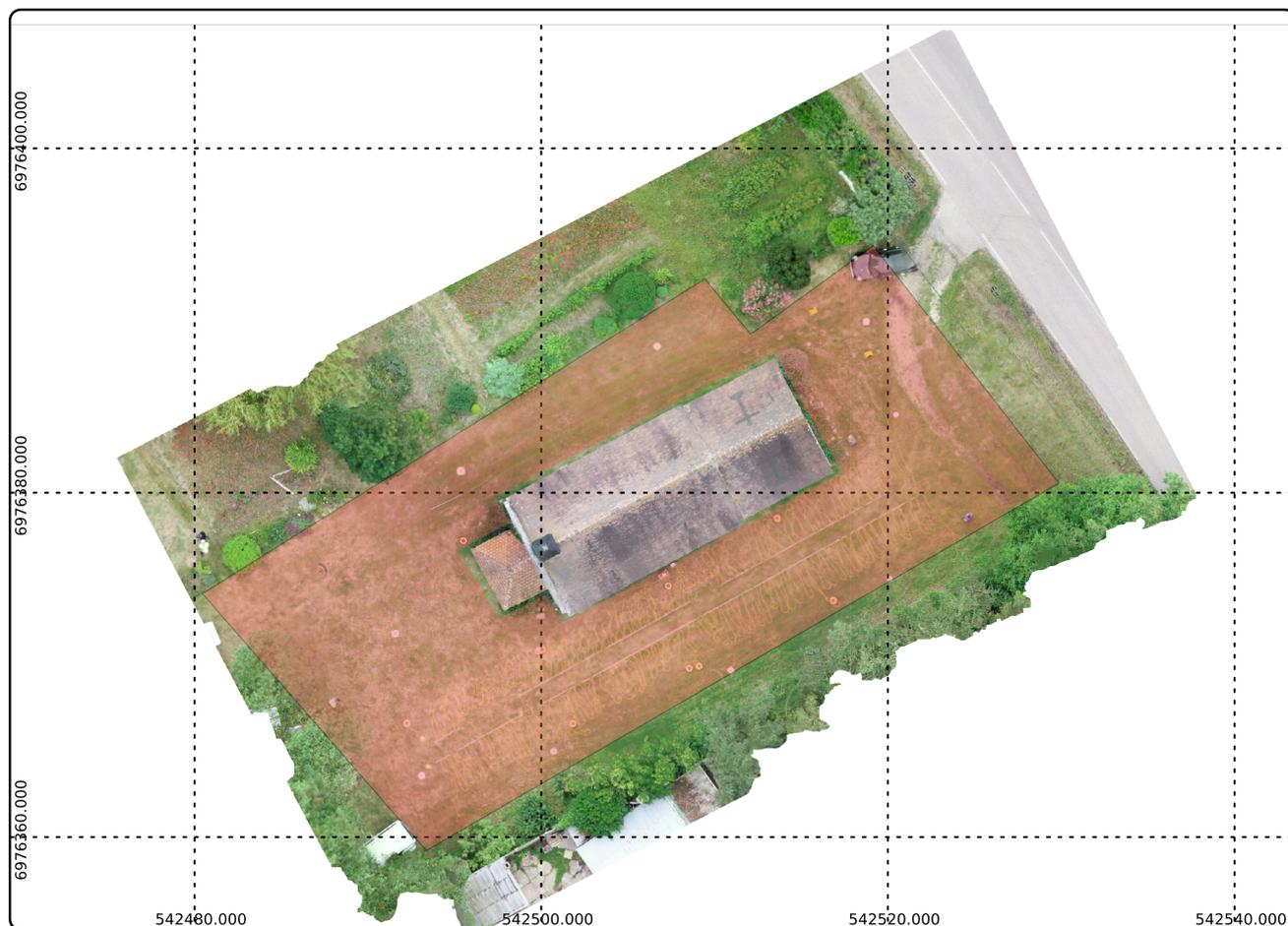


FIGURE 5.7 – Zone des mesures radar 3D représentant environ une aire de 1000 m^2 , extrait de [Aillaud \(2020\)](#).

(cartes de couleur) représentant les coordonnées (x,y) de la parcelle et, en couleur, les contrastes de permittivité relatives au changement de matériaux au sein du sous-sol.

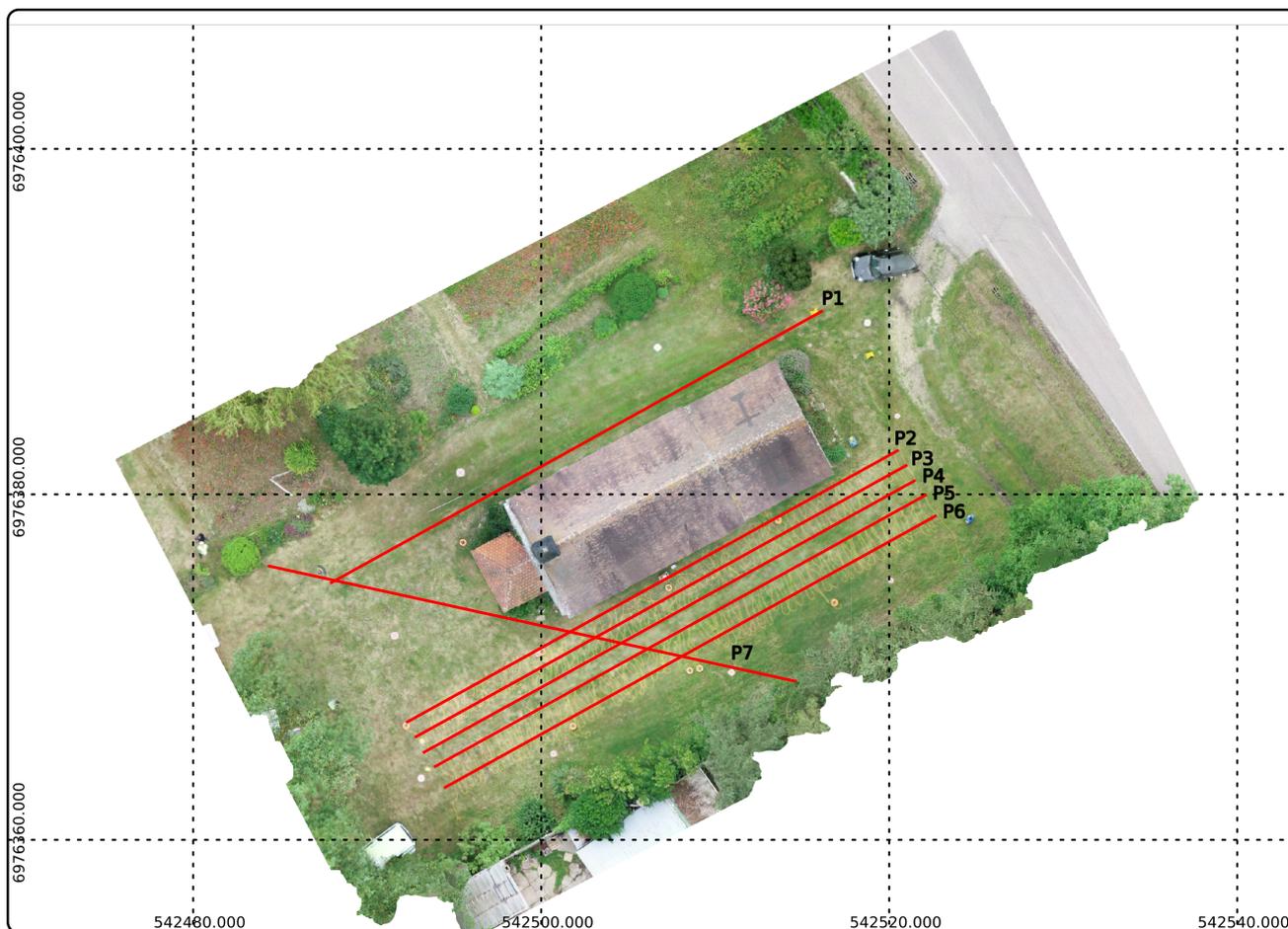


FIGURE 5.8 – Implantation des 7 profils d'imagerie de résistivité électrique.

5.3.2 Résultats radar 3D

Les coupes radar dans le plan horizontal (O, x, y), de l'altitude NGF 32.25 m à 29 m par pas de 25 cm, sont représentées en annexe. Nous montrons ici les coupes radar les plus significatives, révélant des structures immédiatement attenantes à la chapelle. Il s'agit en particulier des figures 5.9, 5.10 et 5.11 qui montrent clairement des structures souterraines à partir de 1,5 m environ, de forme ovoïde, sur les flancs sud-est et nord-ouest de la chapelle. Leur emplacement correspond au pied des voûtes visibles seulement à l'intérieur de la chapelle, qui ont anciennement dû être comblées. On peut donc supposer que l'on redécouvre ici les fondations d'anciens croisillons du transept dont la chapelle a pu être pourvue par le passé. On notera sur les figures 5.9 et 5.10 la présence probable d'un réseau orienté sud-est nord-ouest ainsi que la signature très marquée d'une zone remblayée au nord est, proche de la route. De multiples anomalies ponctuelles sont visibles, mais elles ne peuvent pas être interprétées sans des sondages.

5.3.3 Résultats IRE

Pour les tomographies de résistivité électrique, cinq profils, P2 à P6, ont été réalisés à 1 m, 2 m, 3 m, 4 m et 5 m de la façade sud-est de l'église. Le profil P1 est situé à 1 m de la façade nord. Le profil P7 a une orientation sud-est nord-ouest, recoupe les profils P2 à P6 et recouvre en partie la surface attenante à l'entrée de la chapelle.

Le profil P2 est composé de 64 électrodes espacées de 0,75 m, soit une longueur totale de 47,25 m. Les profils P1 et P3 à P7 comportent aussi 64 électrodes, distantes de 0,5 m, soit une longueur totale de 31,50 m. L'acquisition des mesures a été réalisée selon deux protocoles : Wenner-Schlumberger et

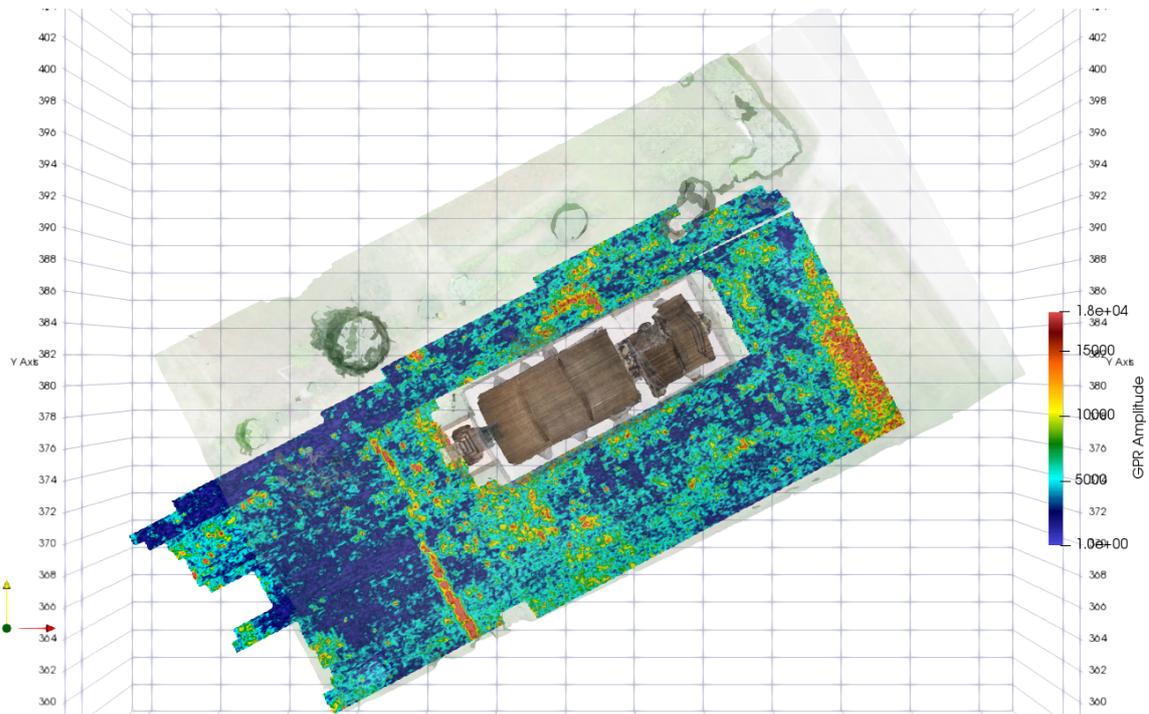


FIGURE 5.9 – Coupe radar horizontale à 30,75 m de hauteur, soit à 1,5 m de profondeur

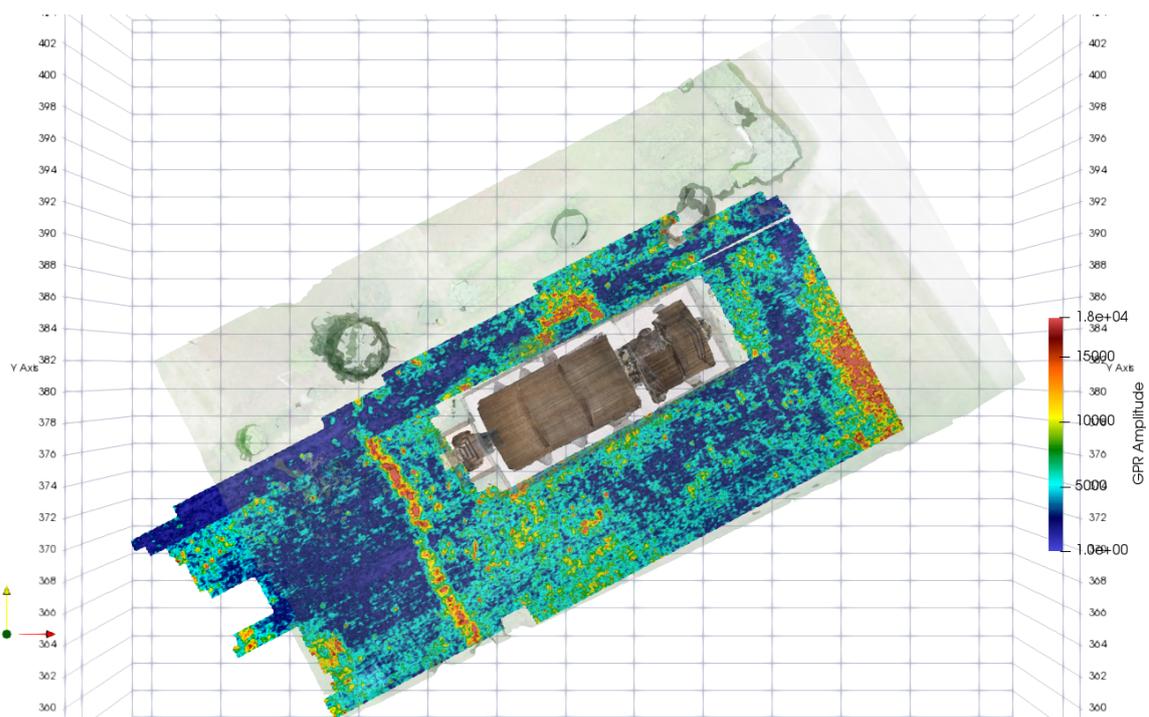


FIGURE 5.10 – Coupe radar horizontale à 30,5 m de hauteur, soit à 1,75 m de profondeur.

Dipôle-Dipôle. Nous montrons ici les coupes P2, P1 et P7 en protocole Dipôle-Dipôle. L'ensemble des 7 coupes en protocole Dipôle-Dipôle est montré en annexe de ce rapport.

La coupe P1 (figure 5.12) présente une première couche avec des résistivités de l'ordre de 50 à 150 $\Omega.m$ correspondant à la terre végétale et probablement à des matériaux sablo-limoneux. On distingue ensuite nettement dans la première partie du profil de fortes résistivités pouvant correspondre au calcaire Santonien évoqué en première partie, situé à environ 1,5 m de profondeur sous le coeur de la chapelle et à moins de 1 m au commencement de la nef. On peut supposer que cette dernière partie est une zone remblayée pour donner une assise aux constructions.

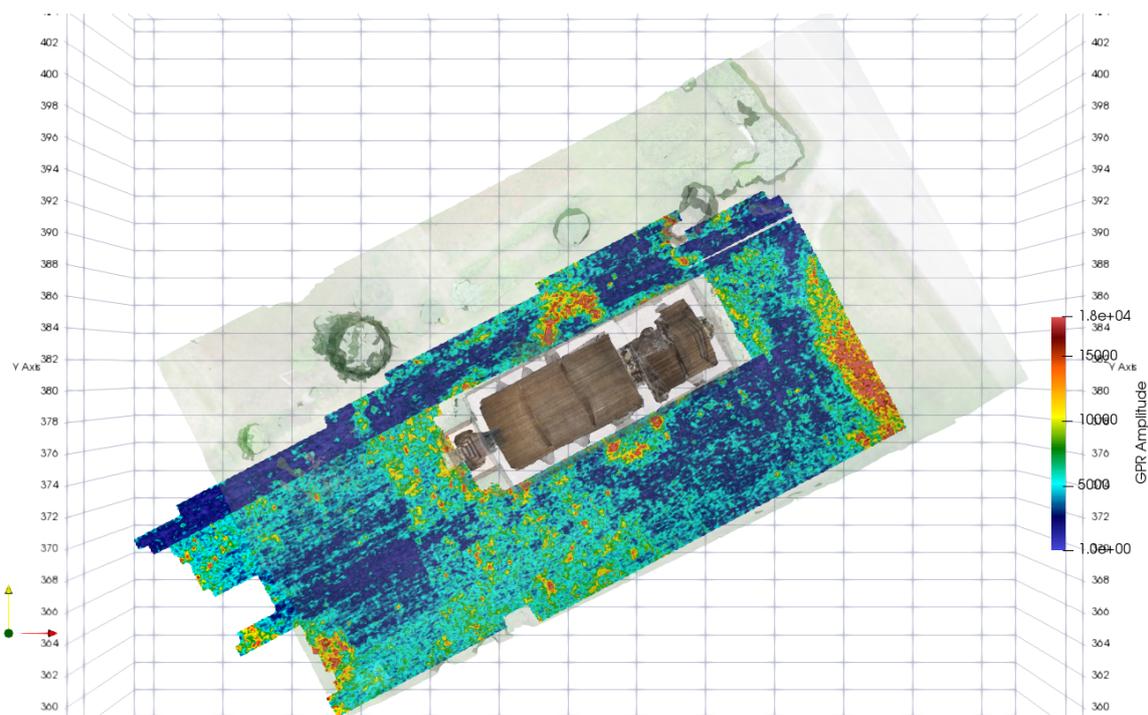


FIGURE 5.11 – Coupe radar horizontale à 30,25 m de hauteur, soit à 2 m de profondeur.

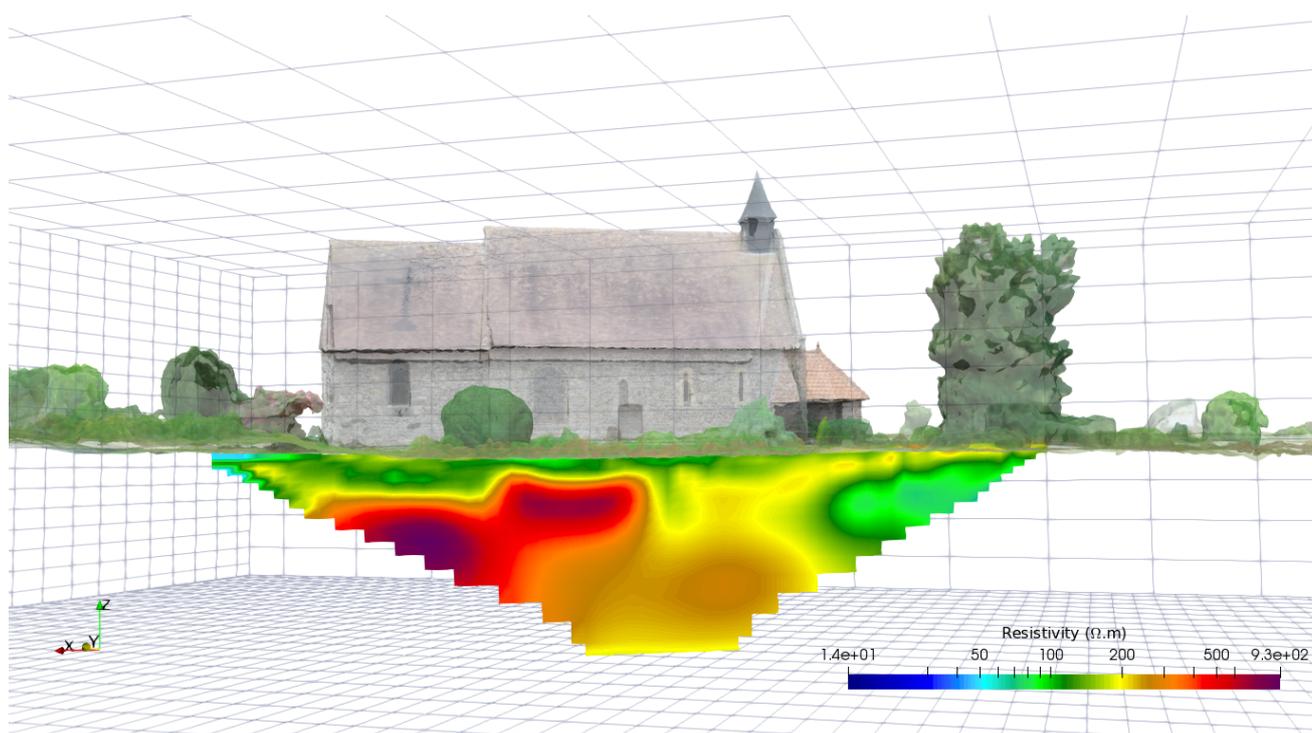


FIGURE 5.12 – Coupe IRE P1 à 1 m de la façade nord de la chapelle.

Le profil P2 présenté sur la figure 5.13 est situé le long de la face sud. Il présente des caractéristiques similaires, mais l'épaisseur de la première couche est ici plus inférieure à 50 cm. On note là encore une partie plus résistante sous la nef juste avant le coeur de la chapelle.

Le profil transverse P7 présenté sur la figure 5.14 reproduit pour partie la géologie locale des profils P1 et P2 et on note des parties très résistantes devant l'entrée de l'église. Sur l'ensemble des profils IRE (voir annexe), il semble que la chapelle ait été construite sur un sol très résistant, probablement calcaire, pour assurer une bonne assise à l'édifice. Il est très probable aussi que les constructeurs aient

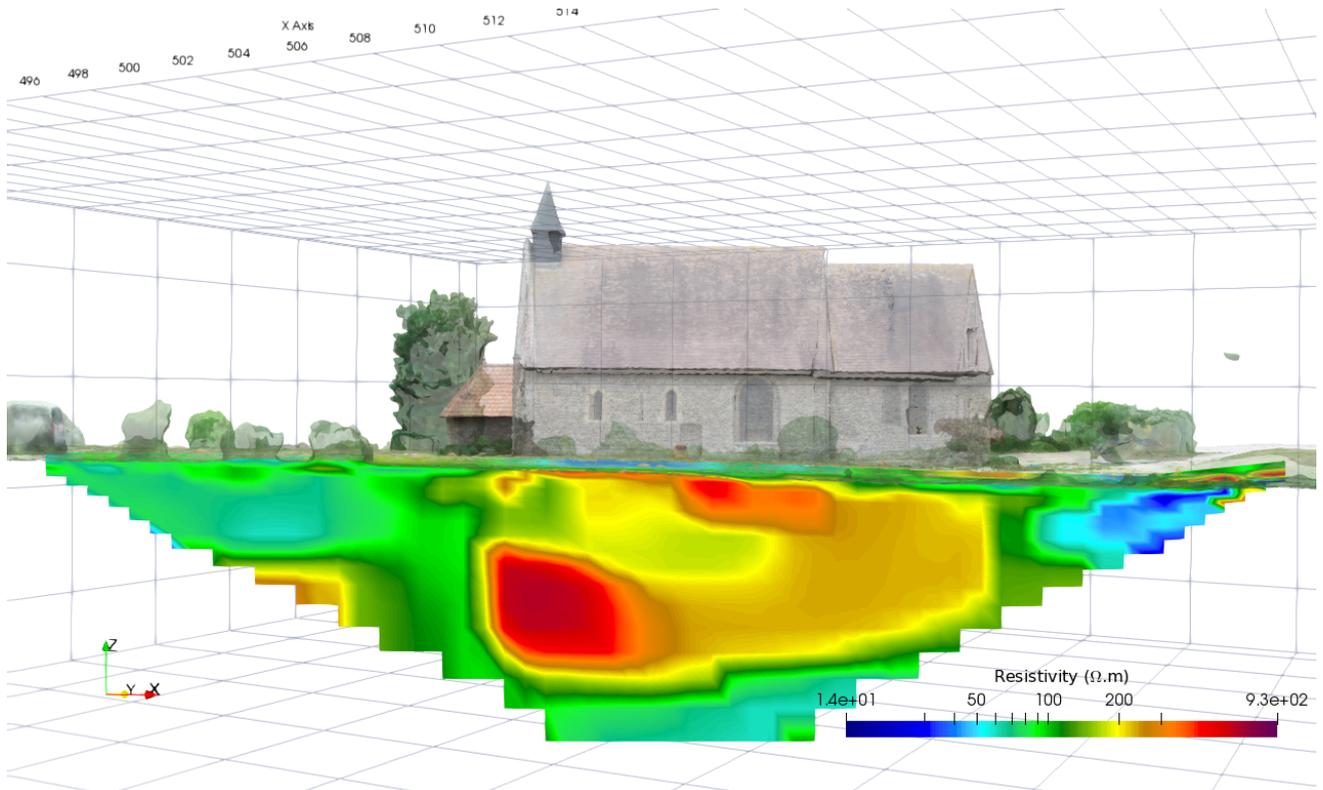


FIGURE 5.13 – Coupe IRE P2 à 1 m de la façade sud de la chapelle.

dû déblayer la couche de surface pour atteindre des niveaux mécaniquement satisfaisants.

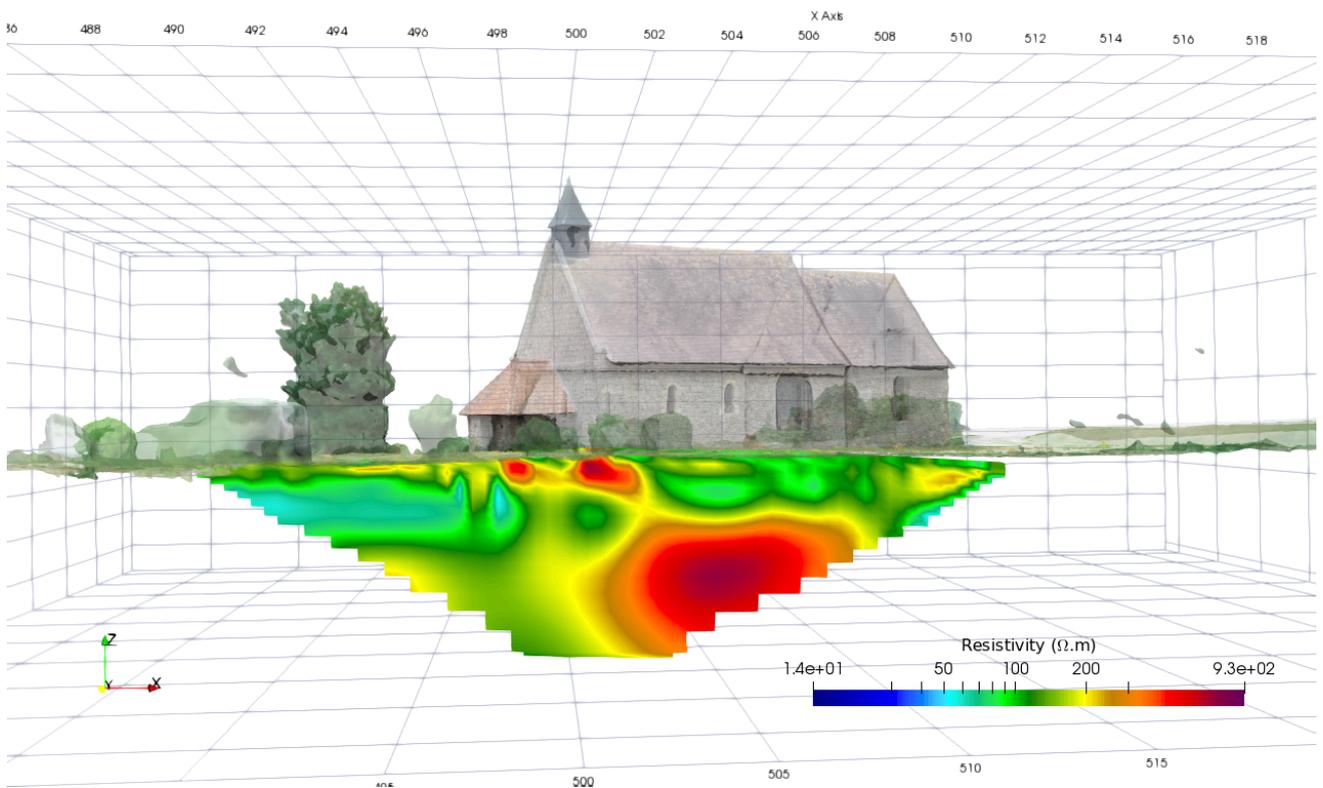


FIGURE 5.14 – Coupe IRE sud-est nord-ouest passant devant l'entrée de la chapelle.

6 Discussion et interprétation

Le bilan des mesures de la chapelle Notre-Dame-du-Val repose sur plusieurs types de données, encore rarement combinées dans la littérature scientifique :

- un relevé photographique par drone de l’extérieur et de ses abords ;
- un relevé photographique de l’intérieur ;
- des mesures radar 3D sur le terrain environnant ;
- des mesures IRE sur ce même terrain.

Le MNT produit par photogrammétrie mène à la restitution complète de l’architecture extérieure de la chapelle. Ce modèle constitue le socle représentatif de nos mesures et peut servir de base à de futures études architecturales ou à des travaux de restauration. Celui-ci est disponible en haute définition (taille de pixel inférieur au cm).

Le MNT intérieur est incomplet du fait de la présence d’échafaudages le jour des mesures. En revanche, le modèle permet de mieux observer les vestiges d’anciennes ouvertures, côtés nord et sud, au niveau du transept. Ces ouvertures menaient certainement à d’anciens croisillons, et donnaient ainsi la forme de croix vue du ciel habituellement rencontrée pour ces édifices religieux.

Cette hypothèse est corroborée par les mesures géophysiques. Premièrement, les coupes radar 3D montrent clairement l’existence d’assises semi-circulaires sur le terrain, qui apparaissent à partir de 1 m de profondeur de la façade nord et à 1,5 m de profondeur de la façade sud. Ces profondeurs devraient être contrôlées par sondage pour être précisées. Les bases de ces formes semi-circulaires correspondent parfaitement aux bases des arches visibles sur le modèle intérieur. C’est là l’un des résultats majeurs de la prospection.

Deuxièmement, les coupes IRE montrent que les bâtisseurs ont rejoint un horizon géologique stable (le calcaire du Santonien), horizon qui avait été mis en évidence par des fouilles anciennes que relate [Fajon \(1993\)](#). Ces horizons géologiques, en mesure de supporter le poids de l’édifice sont mis en évidence par les mesures IRE sur les profils P1 (façade nord) et P2 (façade sud). On notera que cet horizon géologique local est très résistant sous la chapelle, et plus proche de la surface sous les zones des croisillons disparus. Il est ainsi probable que des travaux de remblaiement aient consisté à surélever la couche mécaniquement stable pour accueillir ces croisillons.

L’ensemble de cette analyse est reporté sur les figures 6.1 et 6.2. La figure 6.3 propose une synthèse des principales anomalies :

- figure 6.3 f1), réseau ;
- figure 6.3 f2), zone d’anomalies devant l’entrée ;
- figure 6.3 f3), potentielles fondations des croisillons nord et sud du transept ;
- figure 6.3 f4) et f5), anomalies ponctuelles non interprétées ;
- figure 6.3 f6), zone de remblai près de la route ;
- figure 6.3 f7), zone hétérogène avec de nombreuses anomalies dans le premier mètre de profondeur.

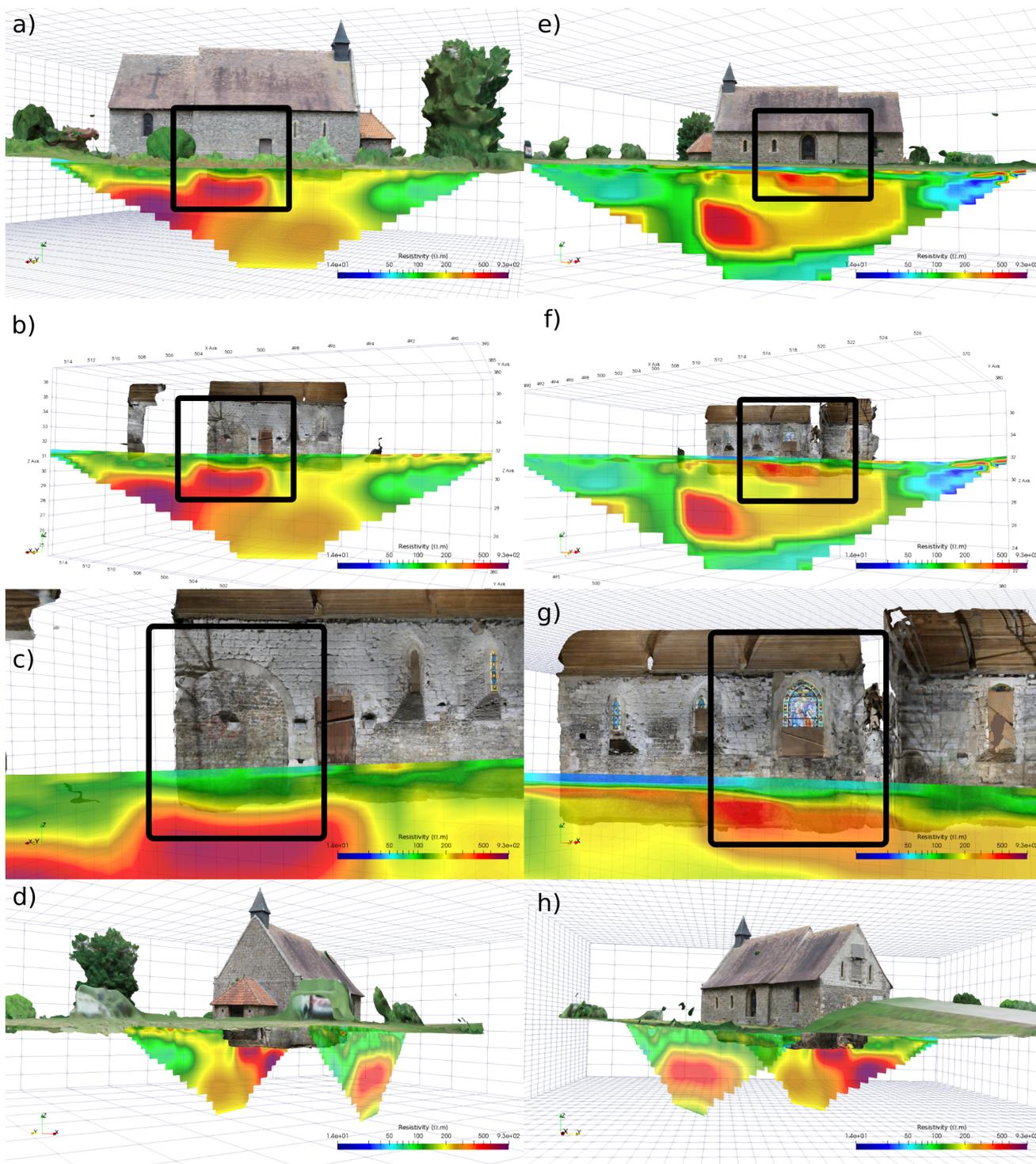


FIGURE 6.1 – a) Profil IRE P1 avec MNT extérieur, et b) avec MNT intérieur. e) Profil IRE P2 avec MNT extérieur, et f) avec MNT intérieur. Le cadre noir met en évidence une assise surélevée par rapport au niveau calcaire du Santonien, base de la construction des croisillons nord et sud. Sur les figures c) et g), les zooms mettent en évidence la position de ses assises directement avec les arches du MNT intérieur. Les vues globales d) et h) montrent l'assise générale de la chapelle sur le calcaire Santonien.

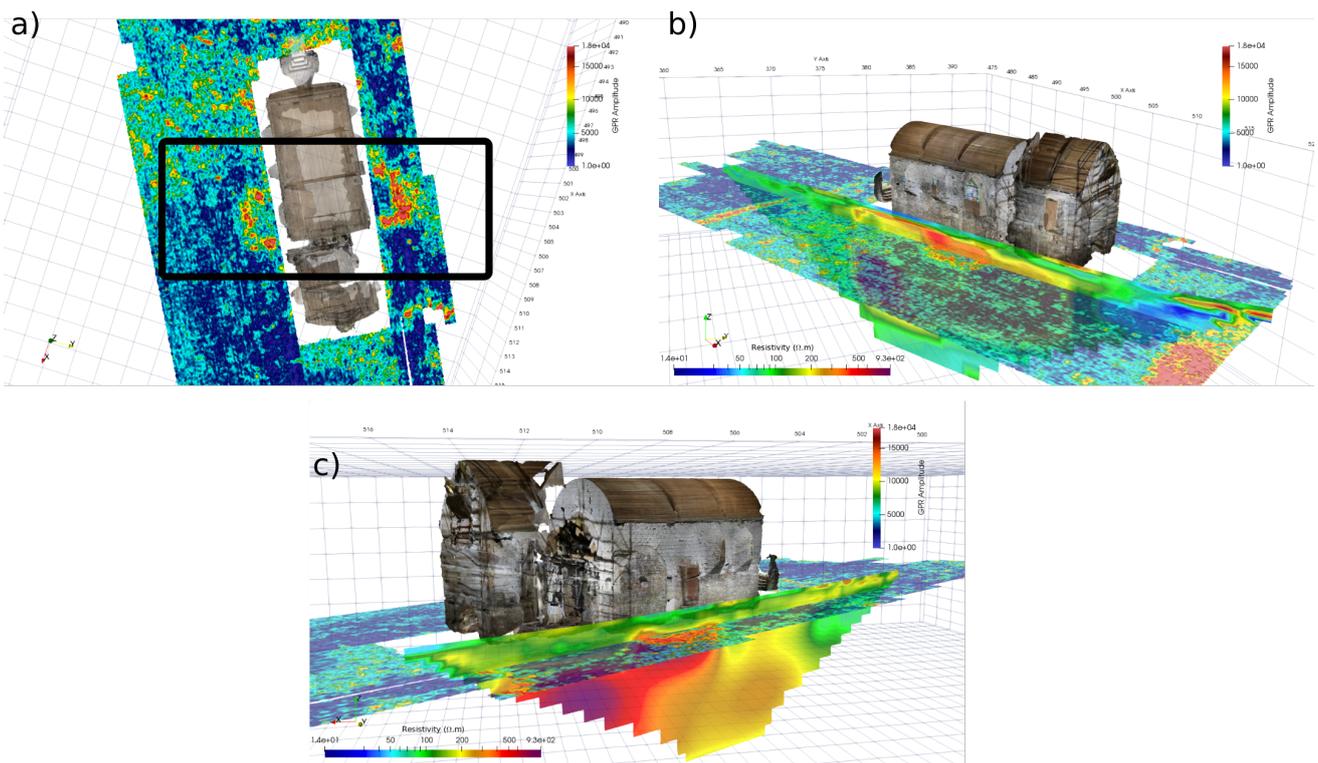


FIGURE 6.2 – a) Coupe radar 3D à 1,5 m de profondeur environ, avec MNT intérieur vu du ciel. Le cadre noir met en évidence les assises semi-circulaires des croisillons nord et sud du transept. Les figures b) et c) montrent la combinaison des mesures radar à 1,5 de profondeur et des profils P2 et P1, respectivement. On voit la concordance parfaite entre les signatures radar des croisillons et le niveau surélevé, de forte résistivité des coupe IRE.

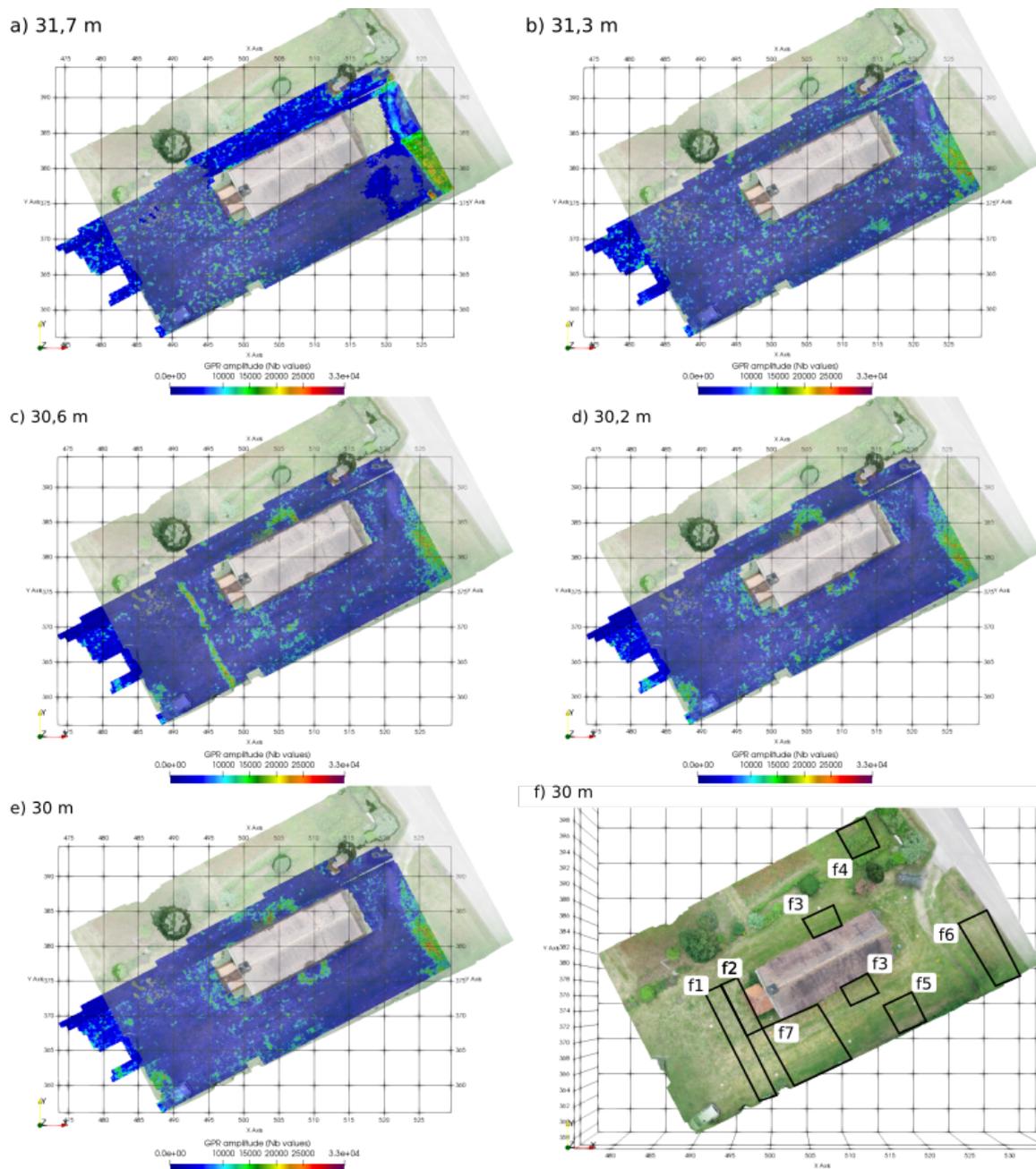


FIGURE 6.3 – De a) à e), coupes horizontales radar à 31,7 m,, 31,3 m, 30,6 m, 30,2 m et 30 m de hauteur (NGF). Sur la figure f), synthèse des principales anomalies : f1), réseau ; f2), zone d’anomalies devant l’entrée ; f3) potentielles fondations des croisillons nord et sud du transept ; f4) et f5), anomalies ponctuelles non interprétées et f6), zone de remblai près de la route et f7) zone hétérogène avec de nombreuses anomalies dans le premier mètre de profondeur.

7 Conclusion

A la demande de la mairie de Sotteville-sur-Mer (France, Seine-Maritime), de l'association "Pour que vive la Chapelle du Val" et de la Direction Régionale de Normandie (DRAC), des prospections visuelles et géophysiques ont été réalisées pour préciser l'histoire architecturale de la chapelle Notre-Dame-Du-Val situé à Sotteville-sur-Mer (76) au printemps 2020.

Ces prospections ont consisté en des relevés photographiques de l'extérieur de la chapelle et de ses abords par drone et de l'intérieur de l'édifice, à pied. Elles ont été complétées par des mesures géophysiques radar 3D et IRE, menées sur les terrains environnants la chapelle.

Cette campagne de mesures a permis de relever de manière précise le MNT intérieur de la chapelle, puis du MNT de l'extérieur de la chapelle et de ses abords. Ces MNT pourront servir de base à de futures études architecturales ou des travaux. Le MNT intérieur de la chapelle, mettant en évidence la présence d'anciennes ouvertures, est proposé. Ce modèle intérieur permet une correspondance immédiate entre d'anciennes ouvertures que l'on observe de manière évidente et les structures révélées par le radar 3D : des croisillons du transept ont fort probablement été présentes durant l'histoire de la chapelle et ont aujourd'hui disparu. Les assises de ces croisillons sont de plus confirmées par les IRE, qui révèlent des fondations spécifiques. Ces dernières mesures précisent par ailleurs la géologie locale et montrent que les bâtisseurs ont eu l'objectif d'asseoir l'édifice sur un horizon géologique mécaniquement stable, le calcaire du Santonien.

L'ensemble des éléments concluants de cette étude mériterait des fouilles afin de confirmer nos conclusions.

8 Remerciements

Nous remercions la mairie de Sotteville-sur-Mer et l'association "Pour que vive la Chapelle du Val" pour leur sollicitation. Nous tenons aussi à remercier Paul-Franck Thérain, ingénieur du Patrimoine, officiant au moment de la demande pour la Direction des Affaires Culturelles de Seine Maritime, et aujourd'hui membre du Conseil Départemental de Seine-Maritime. Nous remercions Laurine Courtois, architecte des Bâtiments de France de la Drac Normandie pour les échanges culturels et scientifiques sur l'histoire de l'édifice. Enfin, nous tenons à remercier Emmanuel Fajon pour sa contribution aux travaux présentés ici, ainsi que Charles Le Coeur, ancien directeur du Laboratoire de Géographie Physique (UMR 8591 Meudon), qui nous a permis de préciser la géologie locale.

9 Annexes

9.1 Le GPR

9.1.1 Principe et application

Le GPR permet d'imager la subsurface pour des profondeurs allant de quelques cm à quelques dizaines de m. Son principe, illustré sur la figure 9.1 repose sur la propagation des ondes électromagnétiques (OEM) sur un spectre allant de quelques dizaines de MHz à plusieurs GHz. Une impulsion électrique est émise dans le domaine temporel par une antenne émettrice en général placée sur (ou au-dessus) le sol. Lorsqu'elle rencontre un contraste diélectrique, une partie de l'énergie de l'onde poursuit son chemin dans le sol, une autre est réfléchiée vers la surface puis captée par une antenne réceptrice. On mesure alors le temps de propagation de cette onde et l'amplitude du champ électrique correspondant (en V/m)¹. On voit que, si la vitesse des OEM est connue, on peut en déduire simplement la profondeur du contraste rencontré.

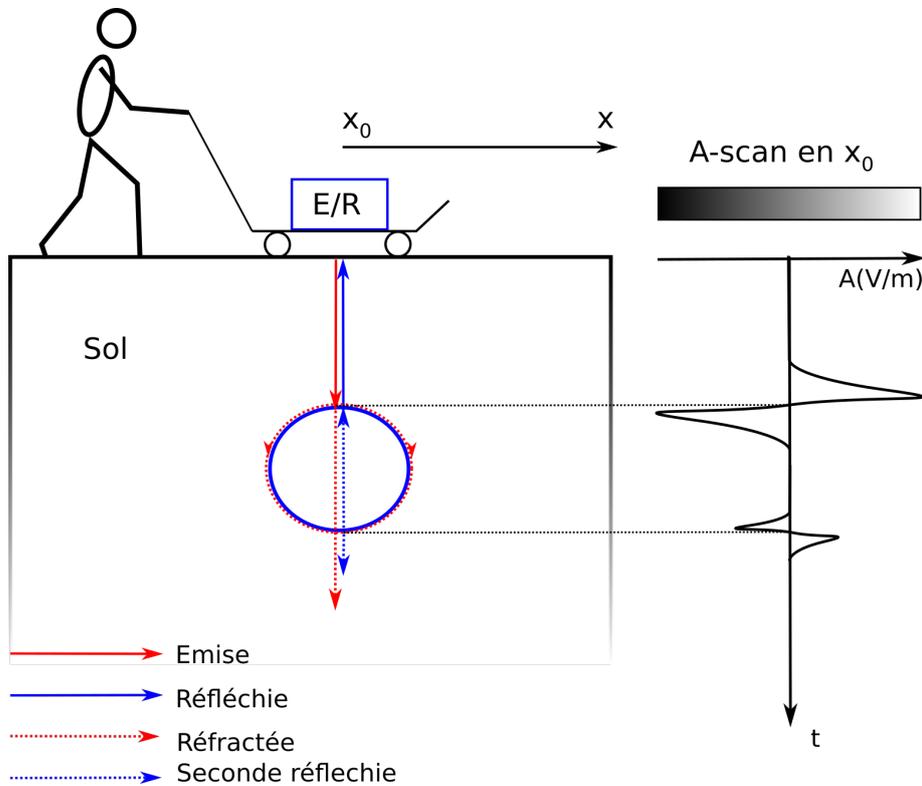


FIGURE 9.1 – Principe de la mesure radar.

Le GPR s'applique dans de nombreux domaines tels que la géologie (détermination de contact entre différents milieux, recherche de fractures), le génie civil (auscultation de structures, évaluation de chaussées, recherche de cavité), l'hydrogéologie (détermination de la profondeur de nappe phréatique), l'archéologie (recherche d'objets enfouis). Le sol doit être suffisamment résistant (d'un point de vue électrique, supérieur à $100 \Omega.m$) pour que les ondes puissent se propager. Les sables, les limons peu argileux, les roches plutôt sèches se prêtent bien à l'application du GPR. Les argiles, les limons argileux, les bétons sont des milieux défavorables à l'application de la méthode.

Le GPR peut être constitué d'une seule antenne émettrice/réceptrice (mode monostatique), deux

1. On notera que dans son principe comme dans la représentation de son résultat de mesure, le GPR est similaire à l'échographie ou aux méthodes sismiques, mais ces deux dernières techniques utilisent un autre type d'ondes, les ondes acoustiques.

antennes une émettrice, une réceptrice (mode bistatique) ou plusieurs antennes émettrices/réceptrices (mode multistatique). L'auscultation radar se fait en déplaçant l'ensemble du dispositif sur la surface du sol, le long d'un profil. Pour une meilleure pénétration, des antennes de type papillon sont spécifiquement développées. Elles sont en contact avec le sol pour minimiser le contraste d'impédance entre l'antenne et le sol. Les deux antennes sont reliées à une batterie et à un boîtier générateur d'ondes électromagnétiques, lui-même relié à un ordinateur portable qui permet une visualisation des données en cours d'acquisition [Bano \(2000\)](#).

9.1.2 Notion de permittivité diélectrique

Dans l'air, assimilé au vide, la vitesse des OEM est $c = 3.10^8 m.s^{-1}$. Dans la matière (le sol), les OEM sont sensibles aux variations de permittivité diélectrique. C'est une grandeur complexe notée $\epsilon_r^* = \epsilon_r' - i\epsilon_r''$ (i est le nombre imaginaire défini par $i = \sqrt{-1}$).

La partie relative réelle notée ϵ_r' rend compte des phénomènes capacitifs de la matière. Dans l'air, cette grandeur est : $\epsilon_0 = 1$: lorsque les OEM se propagent, une partie de l'énergie électromagnétique est stockée par la matière et la vitesse v des OEM est réduite telle que :

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r'}} \quad (9.1)$$

Lorsque l'émission des OEM cesse, cette énergie est quasiment immédiatement dissipée.

La partie relative imaginaire ϵ_r'' correspond aux phénomènes de relaxation de polarisation et de conduction électrique. La relaxation de polarisation apparaît quand des moments dipolaires tels que les molécules d'eau, s'orientent en fonction du champ et de sa fréquence et dissipent l'énergie associée sous forme de chaleur (principe du four micro-ondes). La conduction électrique décrit le déplacement de particules chargées (électrons, ions) dans le sol sous l'effet du champ électromagnétique. Ce déplacement génère aussi de la dissipation de chaleur (effet Joule). La grandeur associée est la conductivité électrique $\sigma(S/m)$. Son inverse est la résistivité électrique $\rho(\Omega.m)$.

Ainsi, si l'on connaît la permittivité diélectrique réelle des matériaux que l'on observe, on peut déduire la vitesses des OEM par la simple relation de l'équation 9.1, et en analysant les signaux radar, connaître la profondeur des contrastes rencontrés. Des analyses plus poussées, basées sur l'influence de la fréquence sur la permittivité mesurée, et sur l'étude de la permittivité relative imaginaire, permettent de mieux décrire la nature des objets, mais nous n'aborderons pas ici ce sujet.

9.1.3 Interprétation des signaux radar 1D, 2D et 3D

Le résultat d'une mesure radar en 1D est un point fixe au-dessus de la surface, nommé A-scan. Sur la figure 9.2, a), le A-scan représente en abscisse l'amplitude du champ électrique mesuré, et en ordonnées, le temps de propagation de l'onde ou la profondeur si on connaît la vitesse.

Si on réalise plusieurs A-scans le long d'un profil, on obtient un B-scan (2D, figure 9.2, b)), qui représente en abscisse, le déplacement effectué par le radar, en ordonnée le temps de propagation des ondes (ou la profondeur) et en échelle de couleur l'amplitude des contrastes diélectriques dans le sol.

Si on dispose d'un radar qui possède plusieurs couples d'antennes émettrices-réceptrices (figure 9.2, c), on a alors plusieurs B-scans le long d'un même profil sur une largeur donnée (en général de 0.5 à 1.5 m de large). En couvrant complètement la surface d'un terrain par plusieurs passages le long de profils parallèles, on peut obtenir un C-scan (3D, figure 9.2, d)). C'est une coupe horizontale du signal radar à une profondeur donnée représentant en abscisse et ordonnée, les dimensions de la parcelle auscultée et en échelle de couleur, les amplitudes des contrastes rencontrées dans le sol.

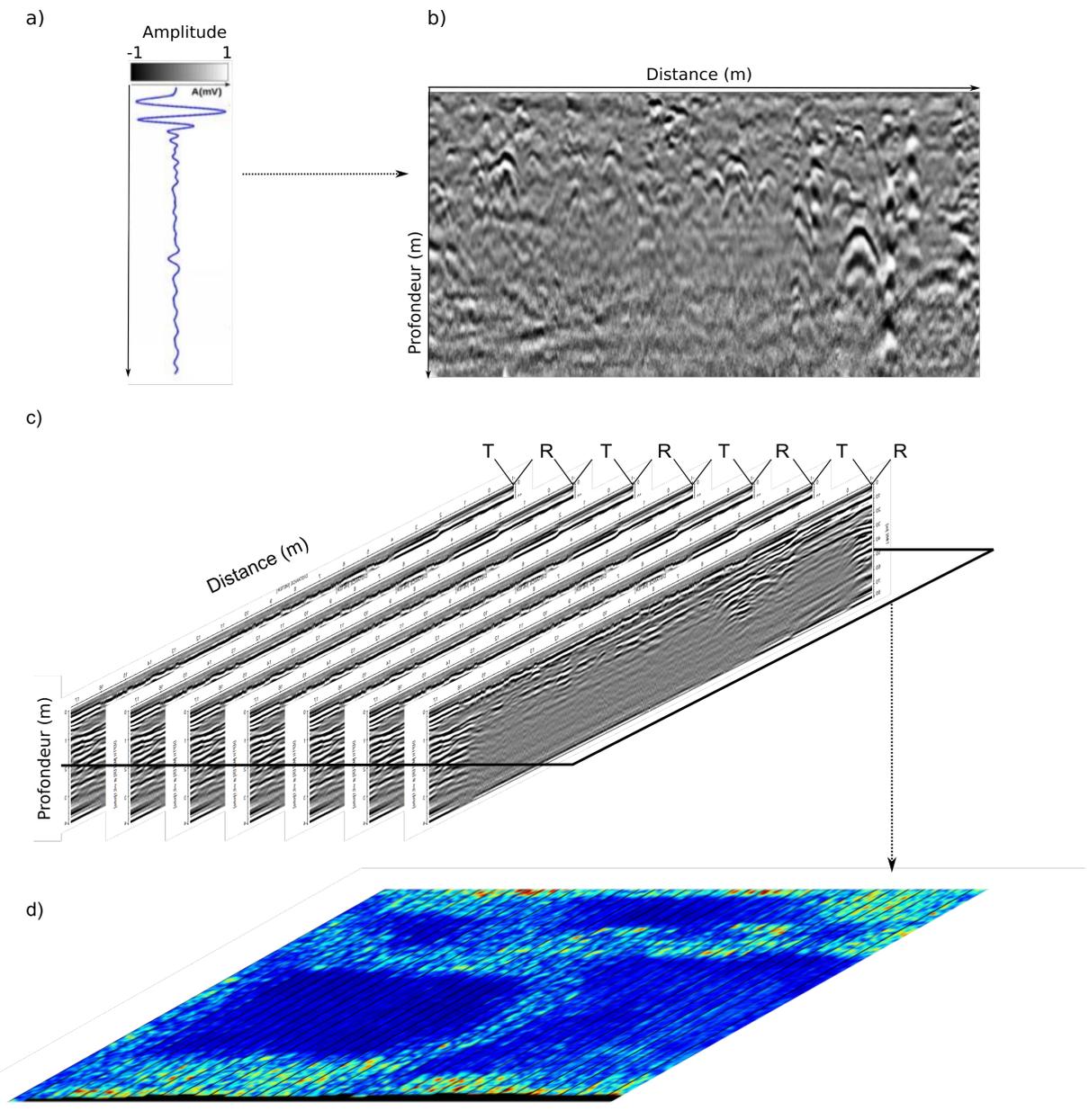


FIGURE 9.2 – Principe de l'imagerie radar 1, 2 et 3D. a) A-scan, signal radar en un point. b) B-scan ou radargramme, juxtaposition des A-scans le long d'un profil, l'amplitude est en dégradé de gris. c) Principe du radar 3D de cette étude : 7 couples d'émetteurs-récepteurs permettent l'enregistrement de 7 B-scans par passage, permettant d'extraire d) des coupes horizontales après plusieurs passages sur le terrain à ausculter. Document montrant l'abside originelle de l'abbaye du Bec-Hellouin, d'après Fauchard et al. (2018).

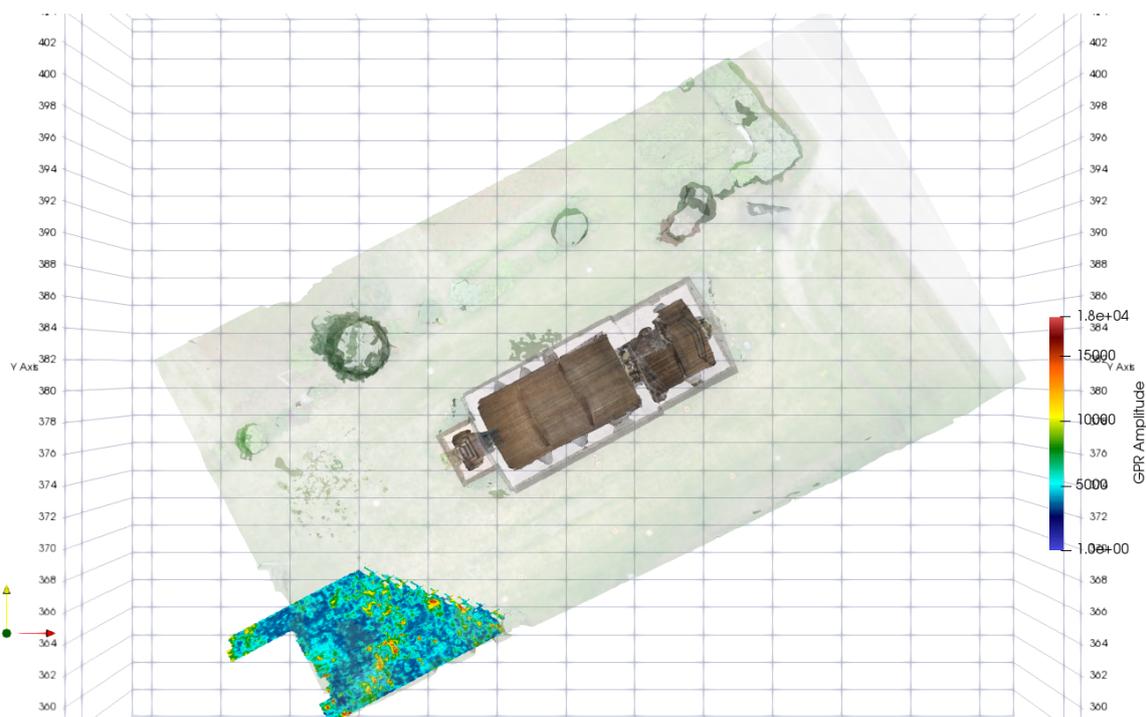


FIGURE 9.3 – Coupe radar horizontale en surface.

9.1.4 Ensemble des coupes radar horizontales de $z=32,25$ m à 29 m (NGF)

Nous présentons dans cette partie l'ensemble des coupes radar 3D obtenues de l'altitude 32,5 m (la plus proche de la surface) à l'altitude 29 m (la plus profonde).

9.2 L'Imagerie de Résistivité Électrique (IRE)

9.2.1 Principe et application

Le principe de l'IRE est basé sur l'injection d'un courant (quasi) continu d'intensité $I(A)$ dans le sol entre deux électrodes de courant, notées A et B, et la mesure de la différence de potentiel $\Delta V(V/m)$ aux bornes de deux autres électrodes notées M et N. Ce dispositif forme un quadripôle comme illustré sur la figure 9.17. La présence de particules conductrices dans le sol (ions, électrons) permet au courant de circuler. C'est le cas des terrains humides, des argiles, des limons argileux, des roches et terrains fracturés où circulent des fluides conducteurs (eau, polluants). Au contraire, l'absence de particules chargées empêche le courant de circuler mais n'interdit pas à la méthode la mesure de potentiels électriques. C'est le cas des sables secs, limons peu argileux, roches. Ainsi la méthode électrique est sensible à la fois aux terrains conducteurs comme aux terrains résistants.

9.2.2 Notion de résistivité électrique

La méthode électrique étant sensible aux conducteurs comme aux résistants, la description de la grandeur physique mesurée se fait généralement en terme de résistivité ($\Omega.m$) offrant une gamme explicite (cf. Table 9.1) de valeurs liées à la nature des matériaux. Elle est l'inverse mathématique de la conductivité ($\sigma = \frac{1}{\rho}$, en S/m). La résistivité électrique dépend de la nature des matériaux géologiques *in situ*, de la teneur en eau, de l'argilosité, de la porosité et de la température. La distribution de résistivité du sous-sol permet de déterminer sa géométrie interne et donne une idée de la nature des matériaux traversés par le courant, d'autant plus si l'on a des connaissances *a priori* sur la géologie locale [Chouteau & Giroux \(2006\)](#).

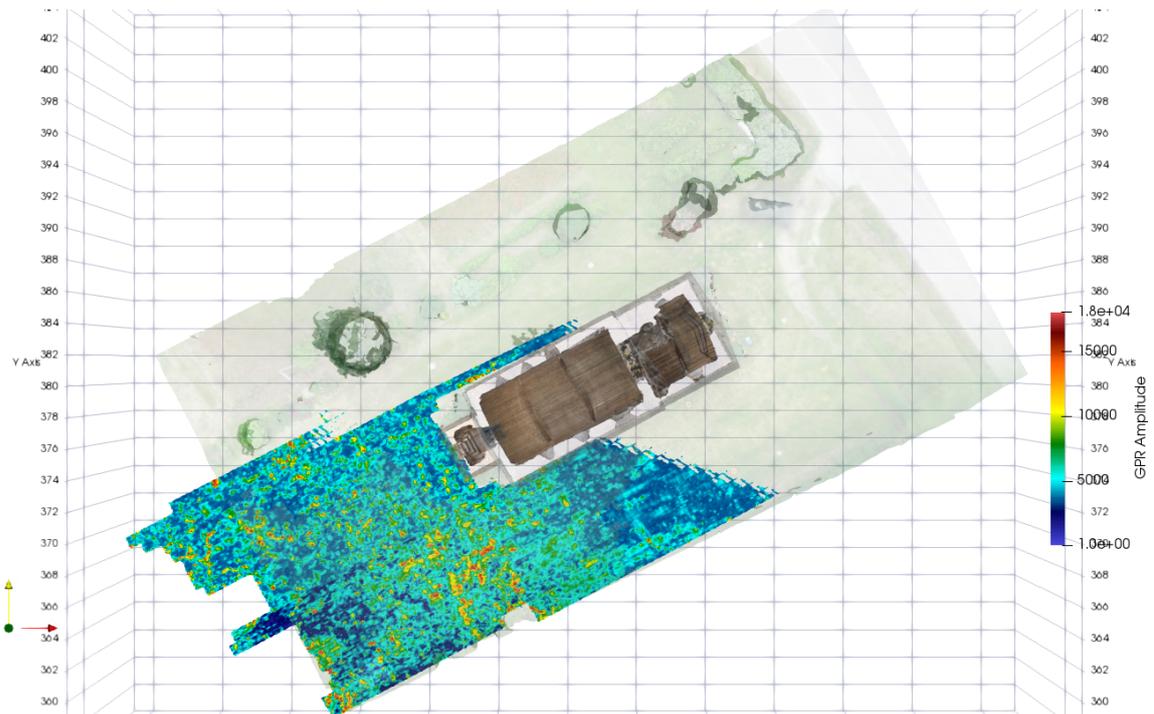


FIGURE 9.4 – Coupe radar horizontale à 0,25 m de profondeur.

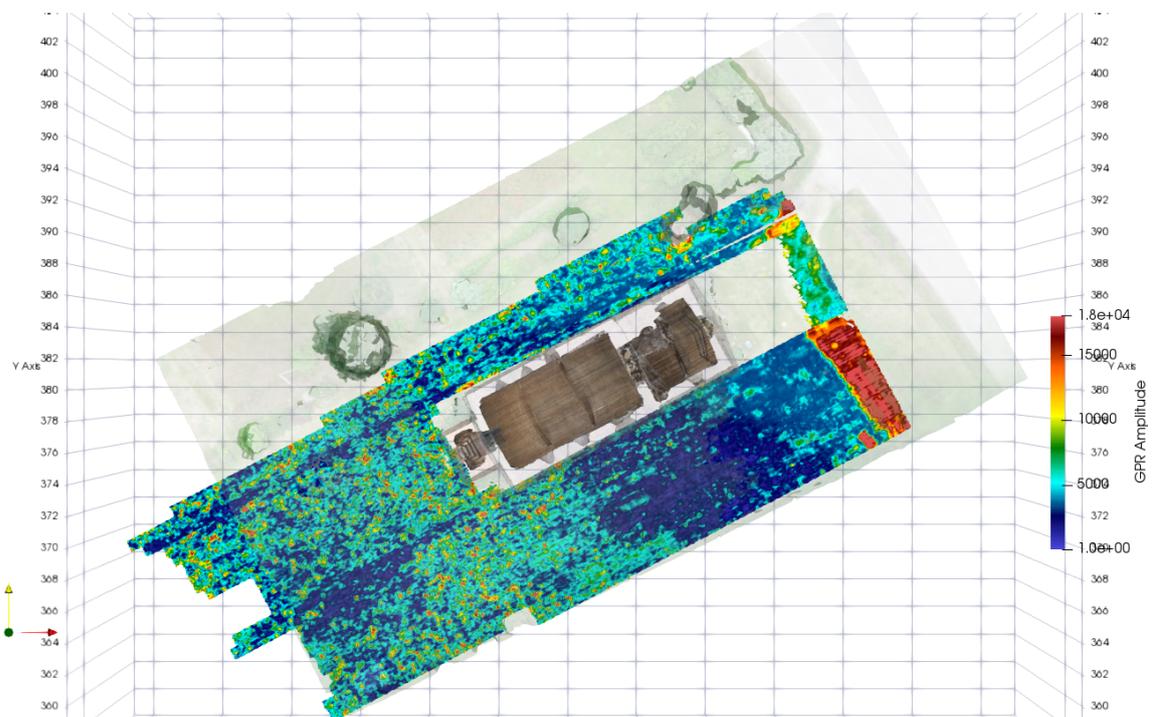


FIGURE 9.5 – Coupe radar horizontale à 0,5 m de profondeur.

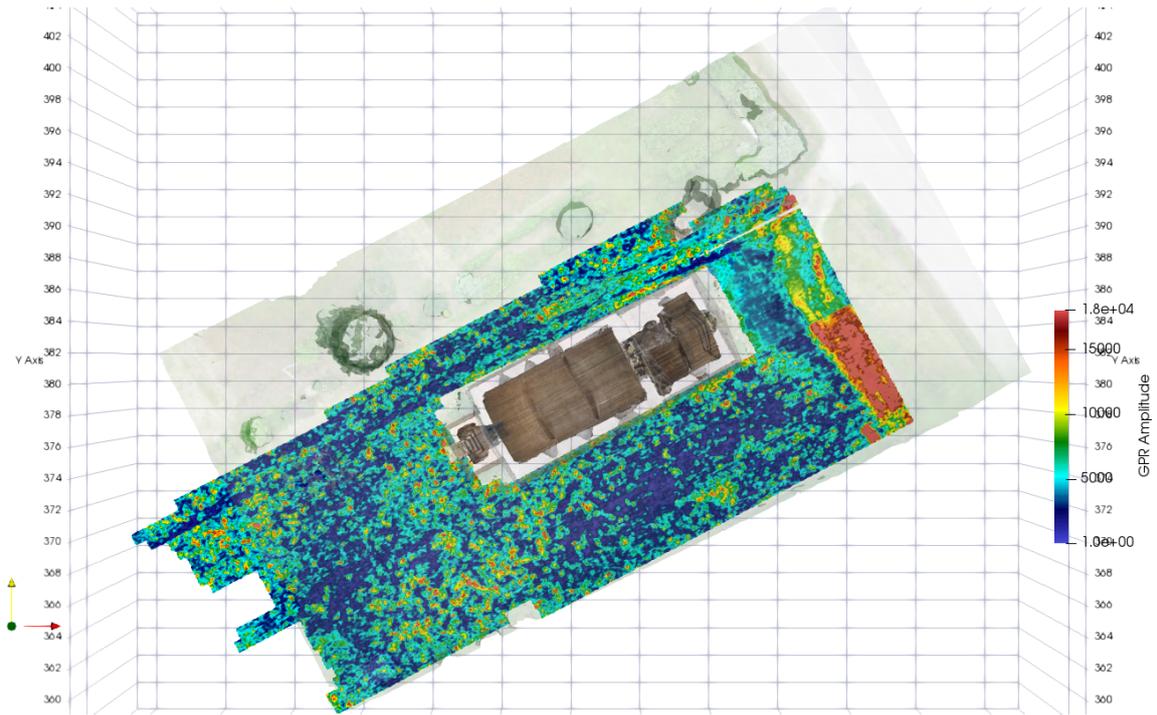


FIGURE 9.6 – Coupe radar horizontale à 0,75 m de profondeur.

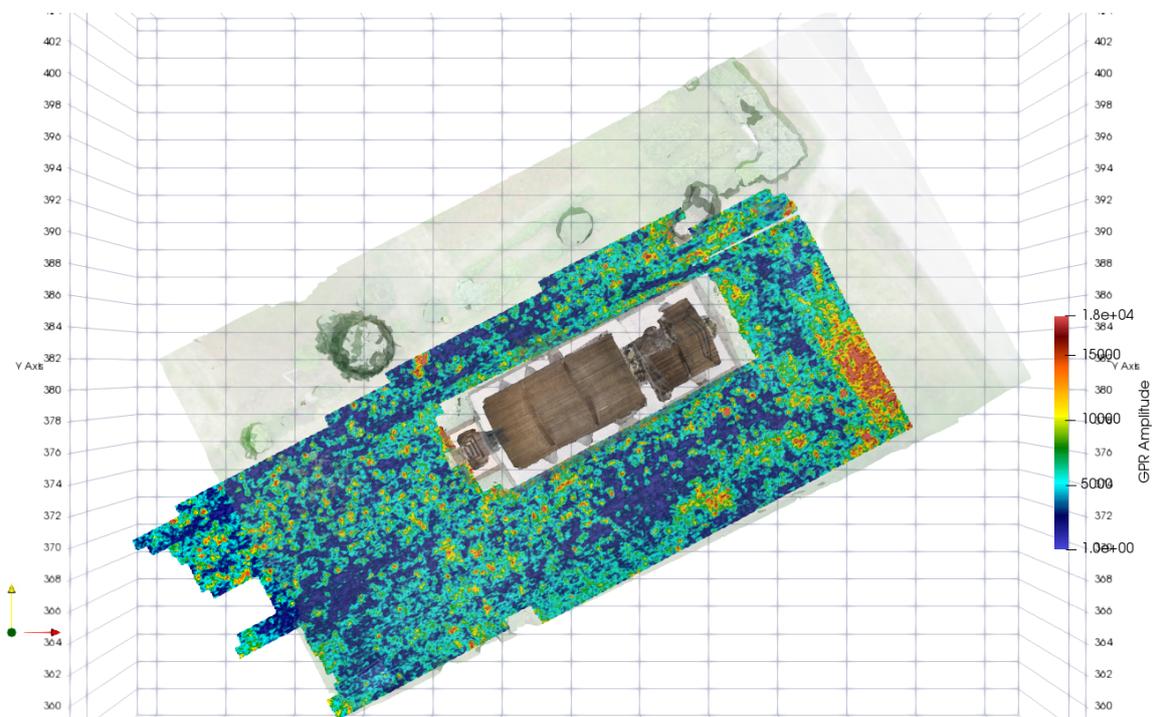


FIGURE 9.7 – Coupe radar horizontale à 1 m de profondeur.

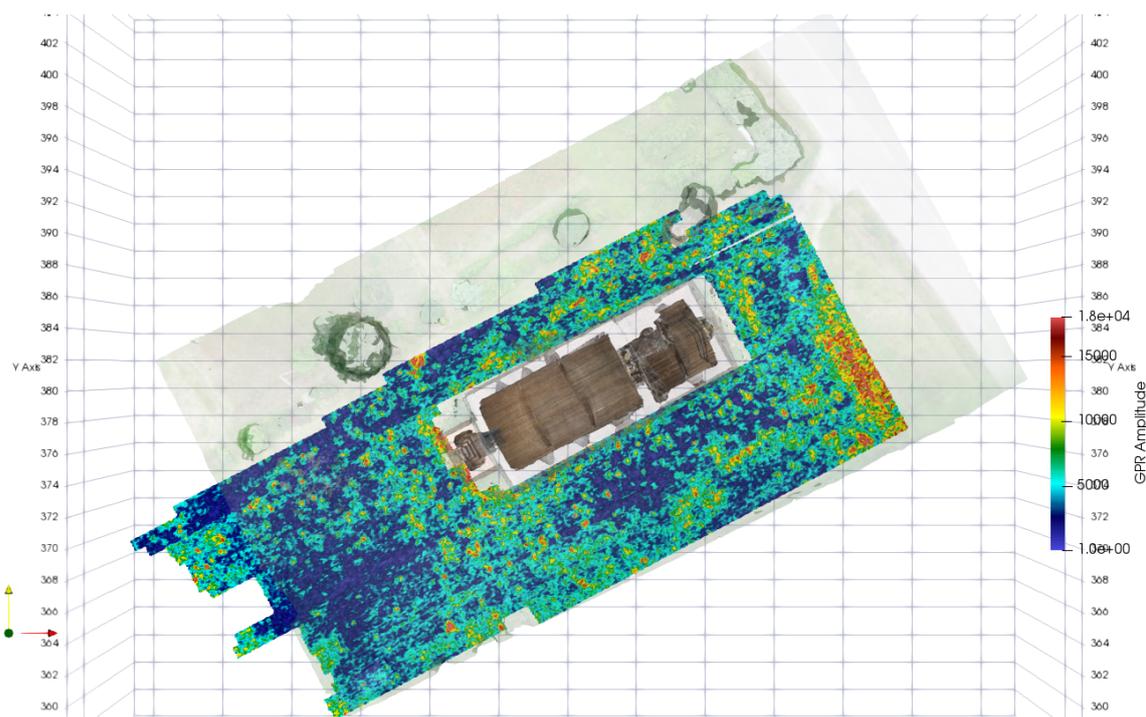


FIGURE 9.8 – Coupe radar horizontale à 1,25 m de profondeur.

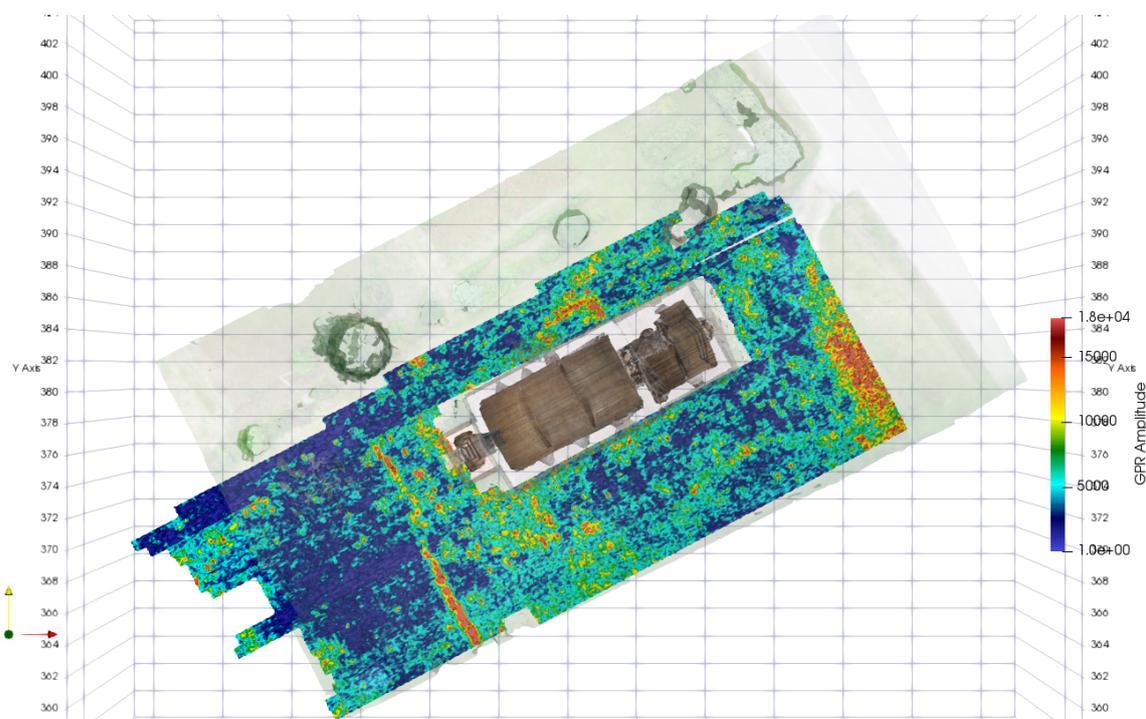


FIGURE 9.9 – Coupe radar horizontale à 1,5 m de profondeur.

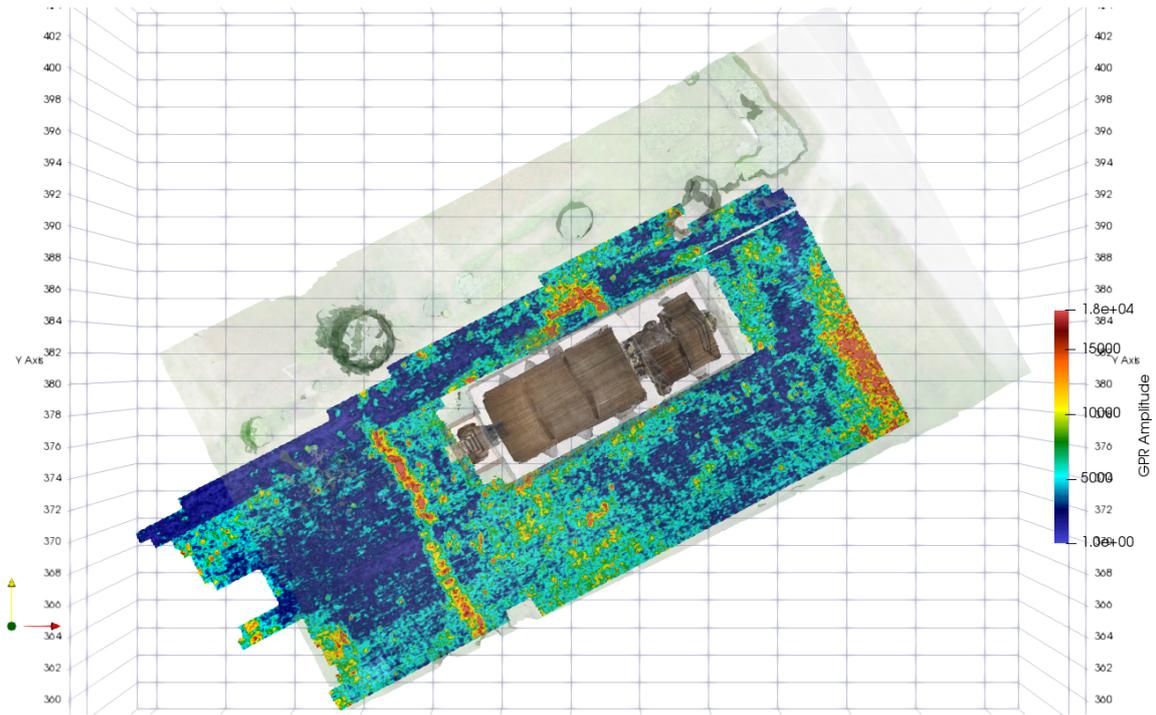


FIGURE 9.10 – Coupe radar horizontale à 1,75 m de profondeur.

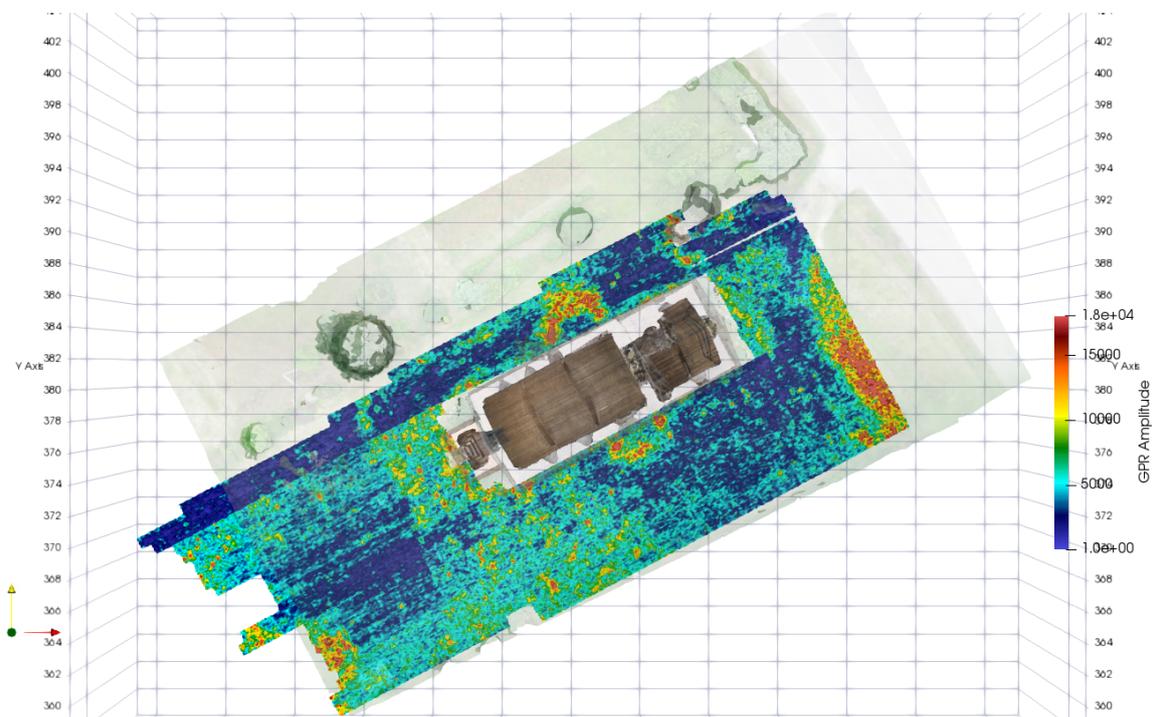


FIGURE 9.11 – Coupe radar horizontale à 2 m de profondeur.

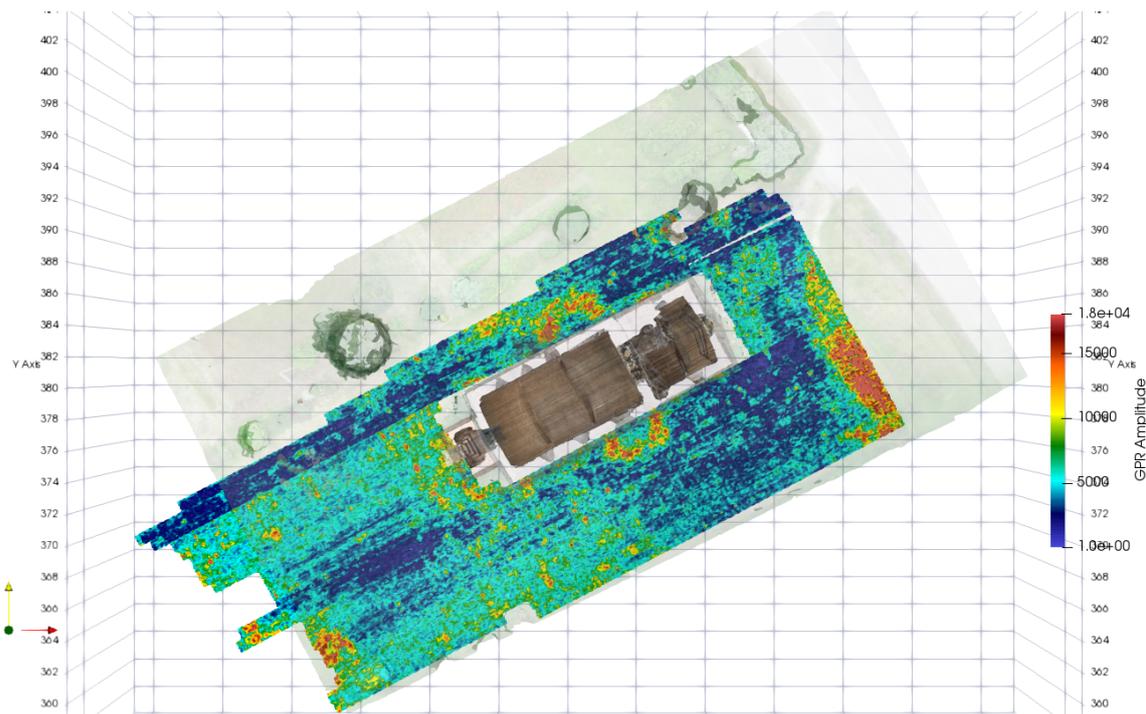


FIGURE 9.12 – Coupe radar horizontale à 2,25 m de profondeur.

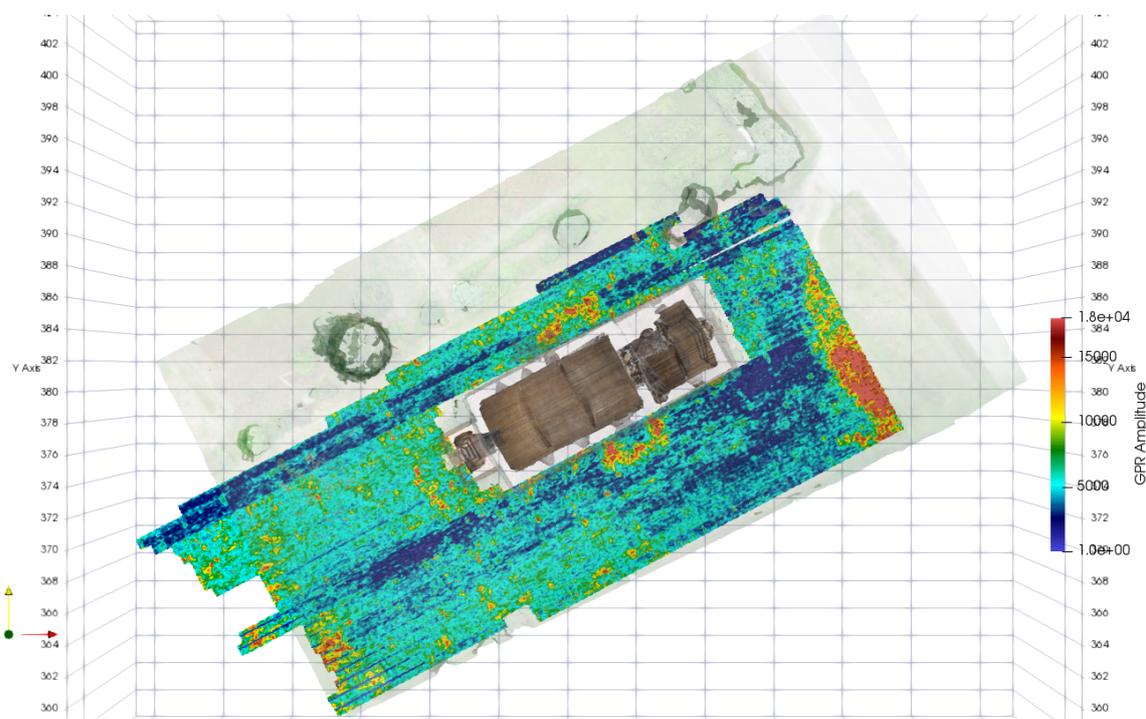


FIGURE 9.13 – Coupe radar horizontale à 2,5 m de profondeur.

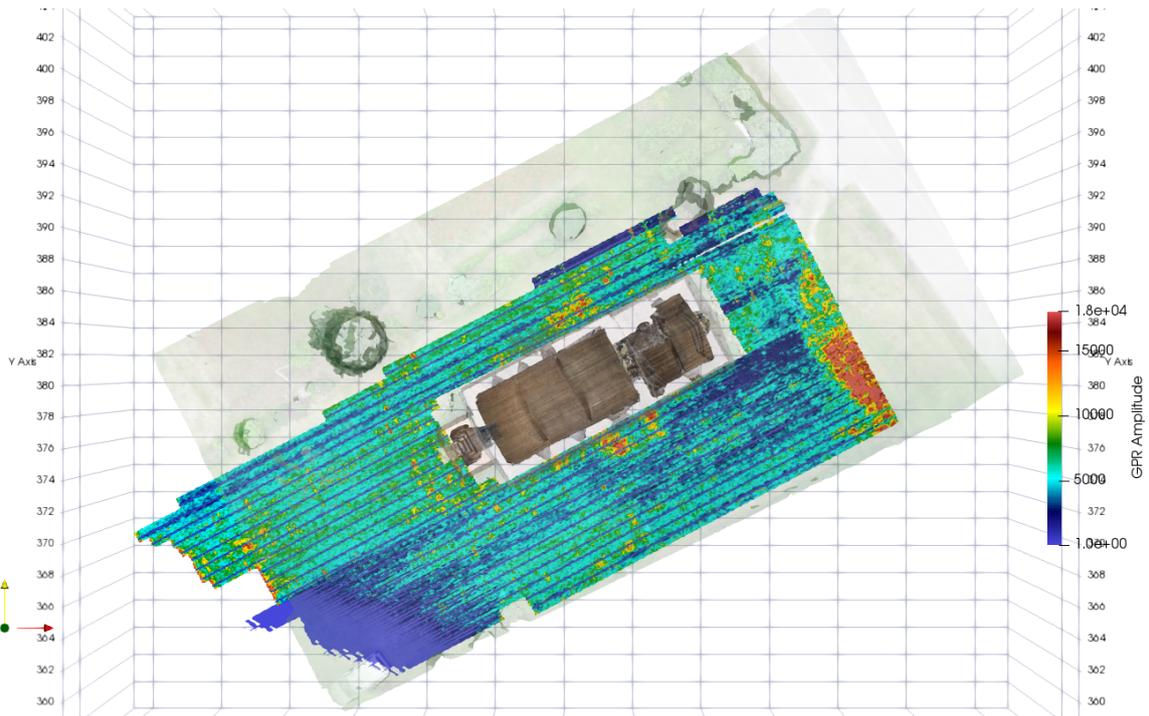


FIGURE 9.14 – Coupe radar horizontale à 2,75 m profondeur.

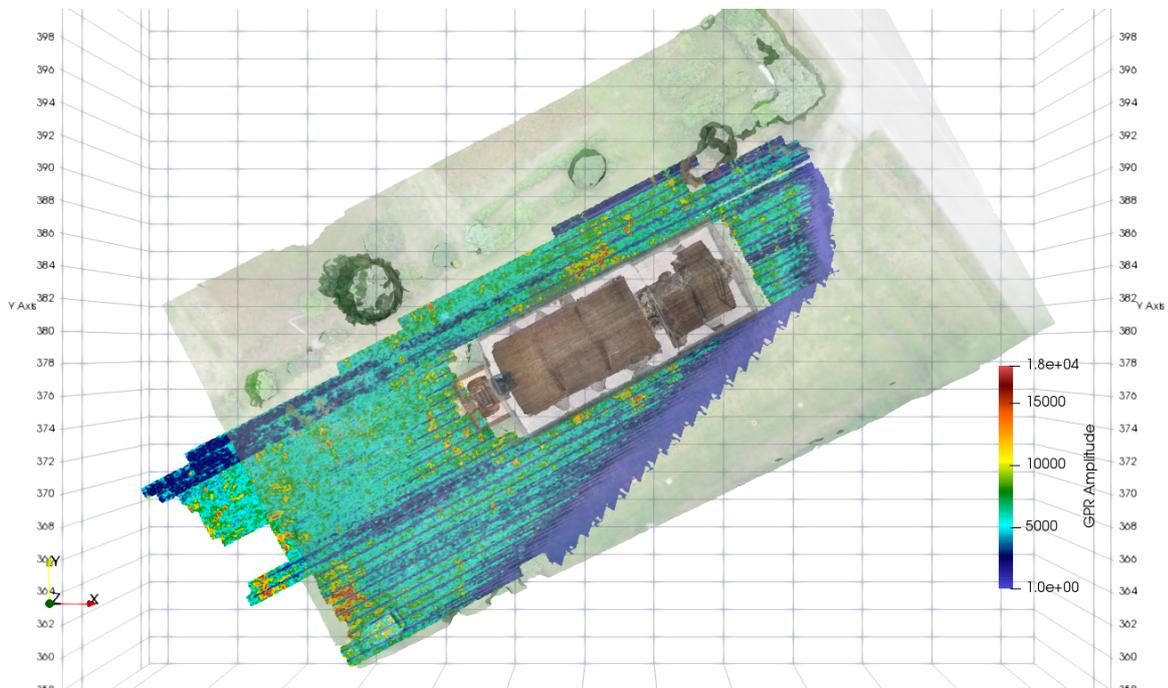


FIGURE 9.15 – Coupe radar horizontale à 3 m profondeur.

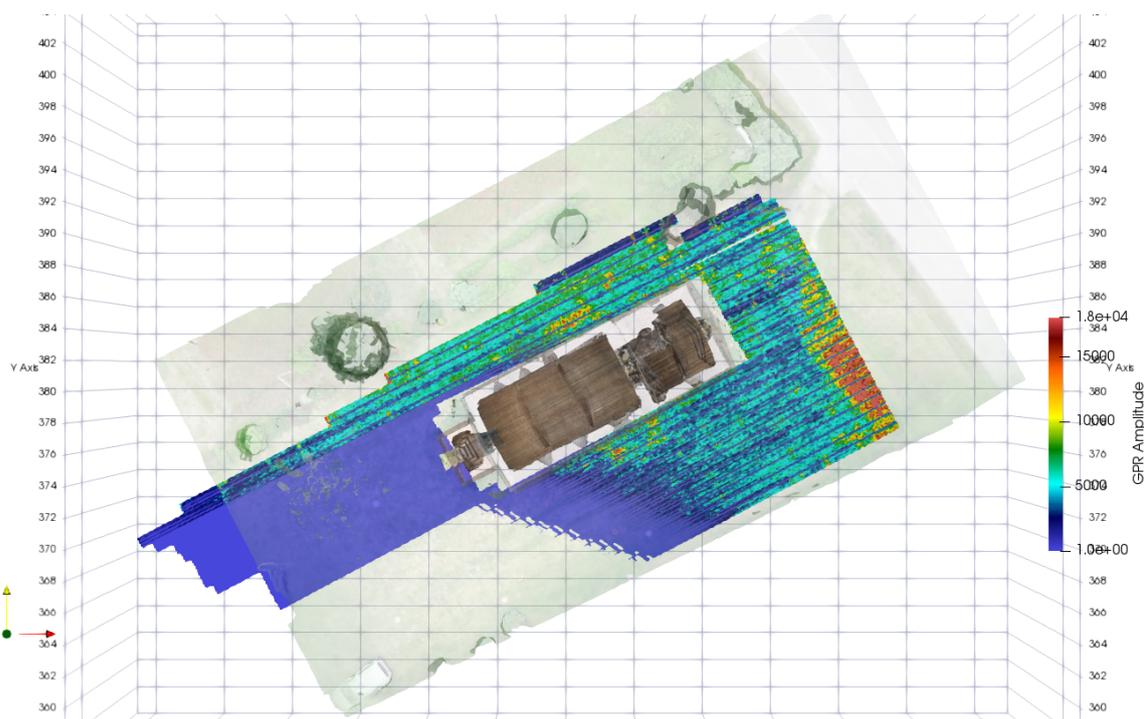


FIGURE 9.16 – Coupe radar horizontale à 3,25 m profondeur.

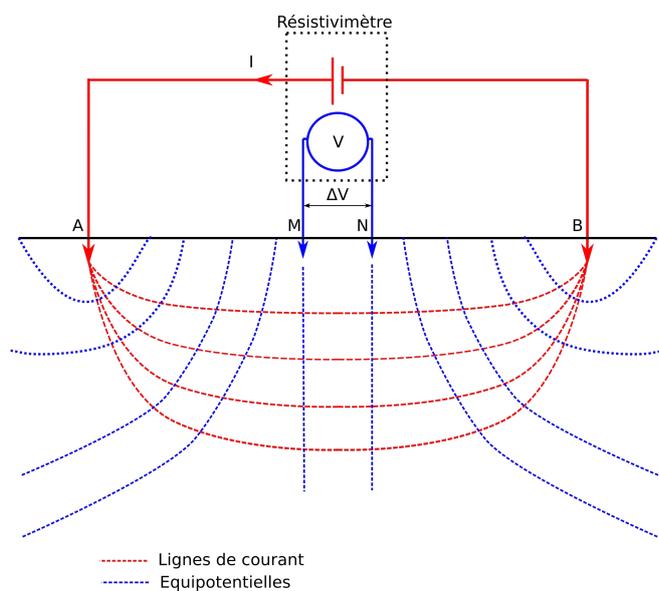


FIGURE 9.17 – Principe de la méthode électrique. Injection d'un courant via les électrodes A et B, et mesure de la différence de potentiel entre les électrodes M et N.

Dans le cas simple du quadripole de la figure 9.17, la différence de potentiel s'écrit :

$$\Delta V = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{MA} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{NA} + \frac{1}{NB} \right) = \frac{\rho I}{2\pi} f \quad (9.2)$$

Où f définit le facteur géométrique du dispositif. La résistivité du sous-sol est donc :

$$\rho = \frac{2\pi \Delta V}{fI} \quad (9.3)$$

Matériaux	Constante diélectrique	Résistivité ($\Omega.m$)
Eau (20° C)	80,36	
Eau de mer (A 1,43 GHz)	70-72	0,2
Argile	7 – 43	1 – 100
Sable tassé	2,9 – 105	
Basalte	12	10 – 1,3.10 ⁷
Grès	4,7 – 12	1 – 6,4.10 ⁸
Granite	4,8 – 18,9	4,5.10 ³ – 1,3.1 ⁶
Quartz	4,2 – 5	4.10 ¹⁰ – 2.10 ¹⁴

TABLE 9.1 – Constante diélectrique (autour de 1 GHz, autour de 20°) et résistivité électrique de quelques roches et minéraux, d'après [Telford et al. \(1990\)](#). On notera que la constante diélectrique dépend fortement de la fréquence, particulièrement pour l'eau. Elle dépend aussi fortement de la salinité pour l'eau de mer ([Lang et al., 2016](#)). Les deux paramètres dépendent aussi de la température.

Lorsque le courant circule dans le sol, il crée des différences de potentiel que l'on peut mesurer en surface à différentes positions. Le placement des électrodes d'injection de courant et de mesure de potentiel mène à un grand nombre de combinaisons possibles, modifiant le facteur géométrique f . La géométrie de ce placement définit un protocole (Wenner, Schlumberger, Dipole-Dipole, Pole-Dipole...). Ils sont choisis selon les anomalies recherchées, leur forme géométrique *a priori*, le type de terrain...

Principe de l'imagerie

Le principe de l'imagerie de résistivité électrique repose :

- sur la mesure de la résistivité selon des combinaisons variées de f (protocoles de mesures) ;
- sur le calcul par des logiciels spécifiques du modèle mathématique qui donnerait la solution la plus proche de ce qui est mesuré.

Ce processus, appelé inversion, commence d'abord par une étape d'initialisation du modèle de calcul. Pour cela, on subdivise le milieu étudié en cellules élémentaires auxquelles on affecte une résistivité initiale (ce type de cellule dépend de la méthode de modélisation choisie : différences finies ou éléments finis). On calcule ensuite la différence au sens des moindres carrés (en général, appelée minimisation) entre les résistivités calculées et les résistivités mesurées. Si cette différence est trop grande, alors les résistivités calculées sont modifiées et le processus de minimisation reprend, selon des principes mathématiques qui permettent d'arriver à une solution possible, c'est-à-dire, à un modèle inverse qui s'approche au mieux de la répartition des matériaux dans le sous-sol. La figure 9.18 donne un exemple de résistivités mesurées, calculées puis inversées après 6 itérations, avec une erreur quadratique moyenne de 2,5% entre les résistivités calculées et mesurées.

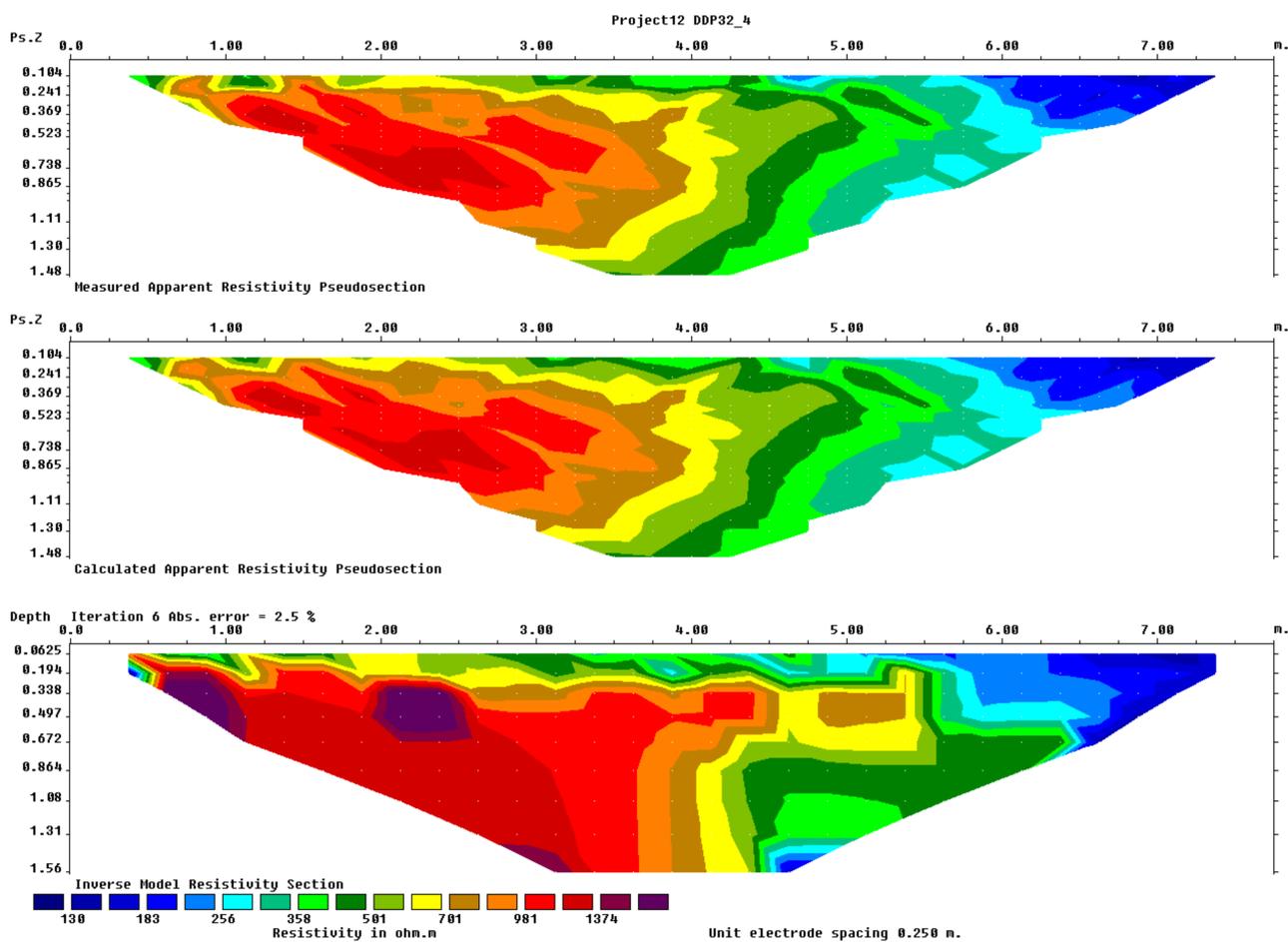


FIGURE 9.18 – Principe de la méthode électrique. Injection d'un courant via les électrodes A et B, et mesure de la différence de potentiel entre les électrodes M et N.

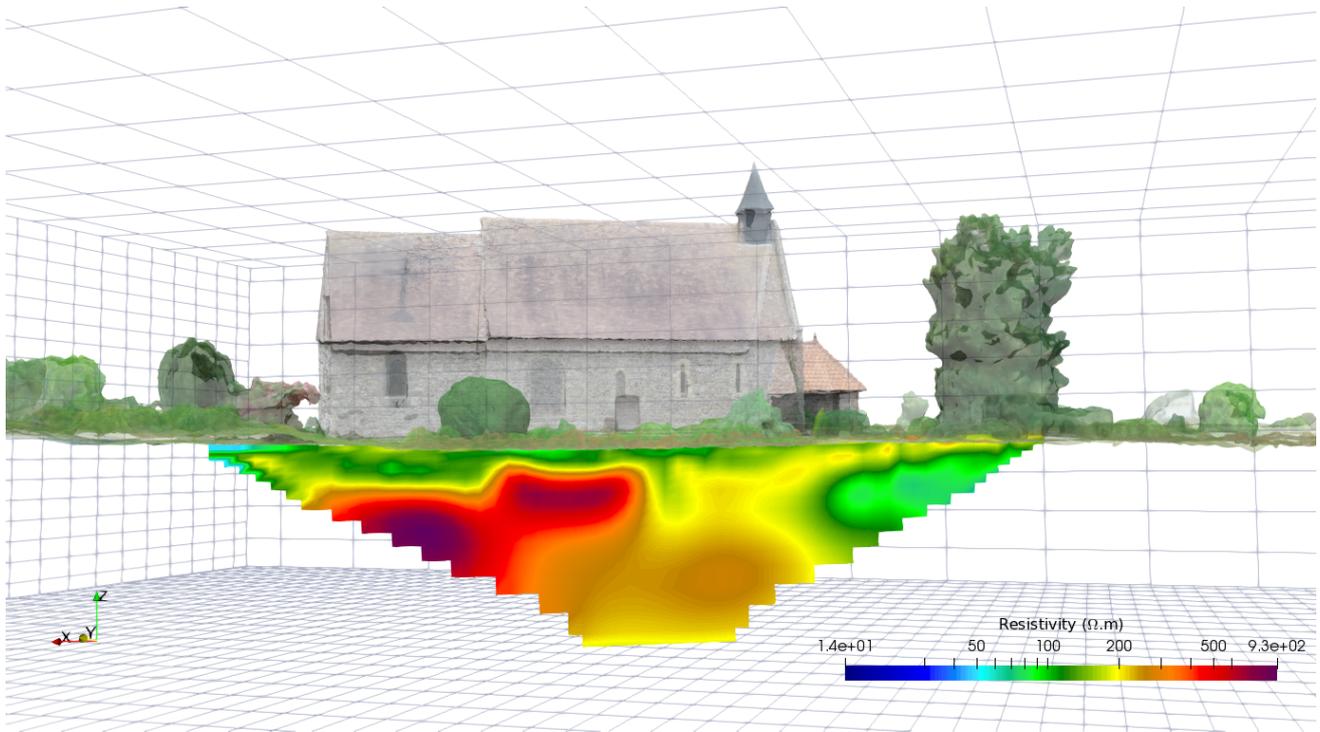


FIGURE 9.19 – Coupe IRE à 1 m de la façade nord de la chapelle.

9.2.3 Ensemble des coupes IRE autour de la chapelle

Nous présentons dans cette partie l'ensemble des coupes IRE obtenues sur les abords de la chapelle. Le plan de ces coupes est donnée sur la figure 5.8.

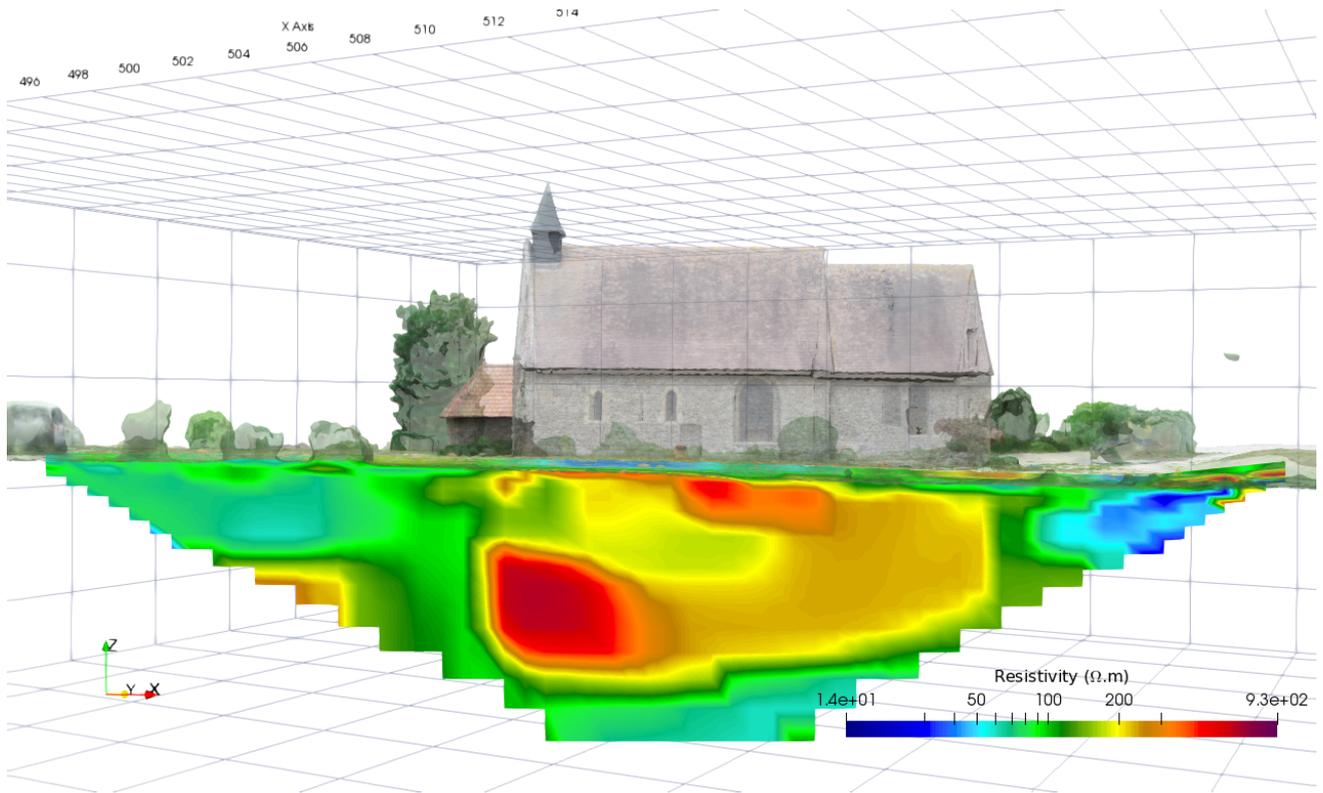


FIGURE 9.20 – Coupe IRE à 1 m de la façade sud de la chapelle.

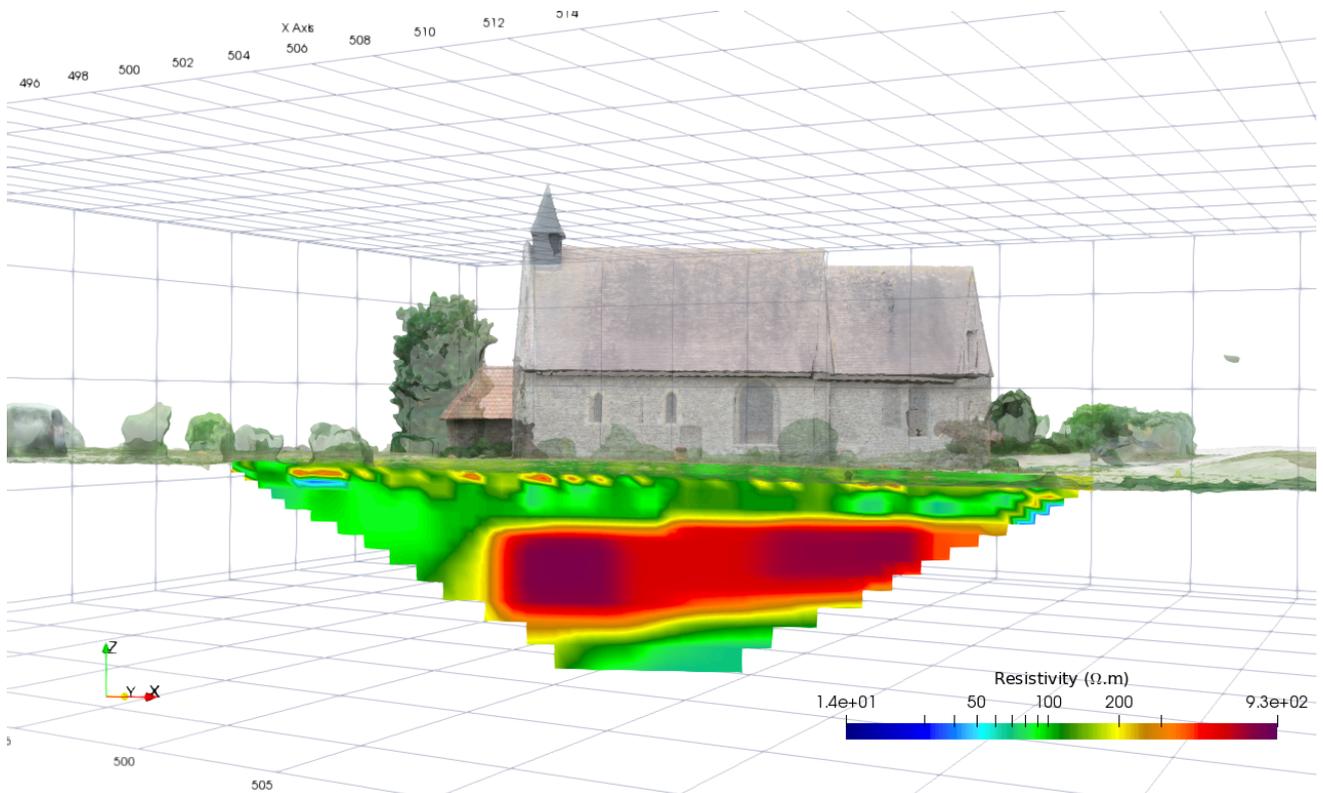


FIGURE 9.21 – Coupe IRE à 2 m de la façade sud de la chapelle.

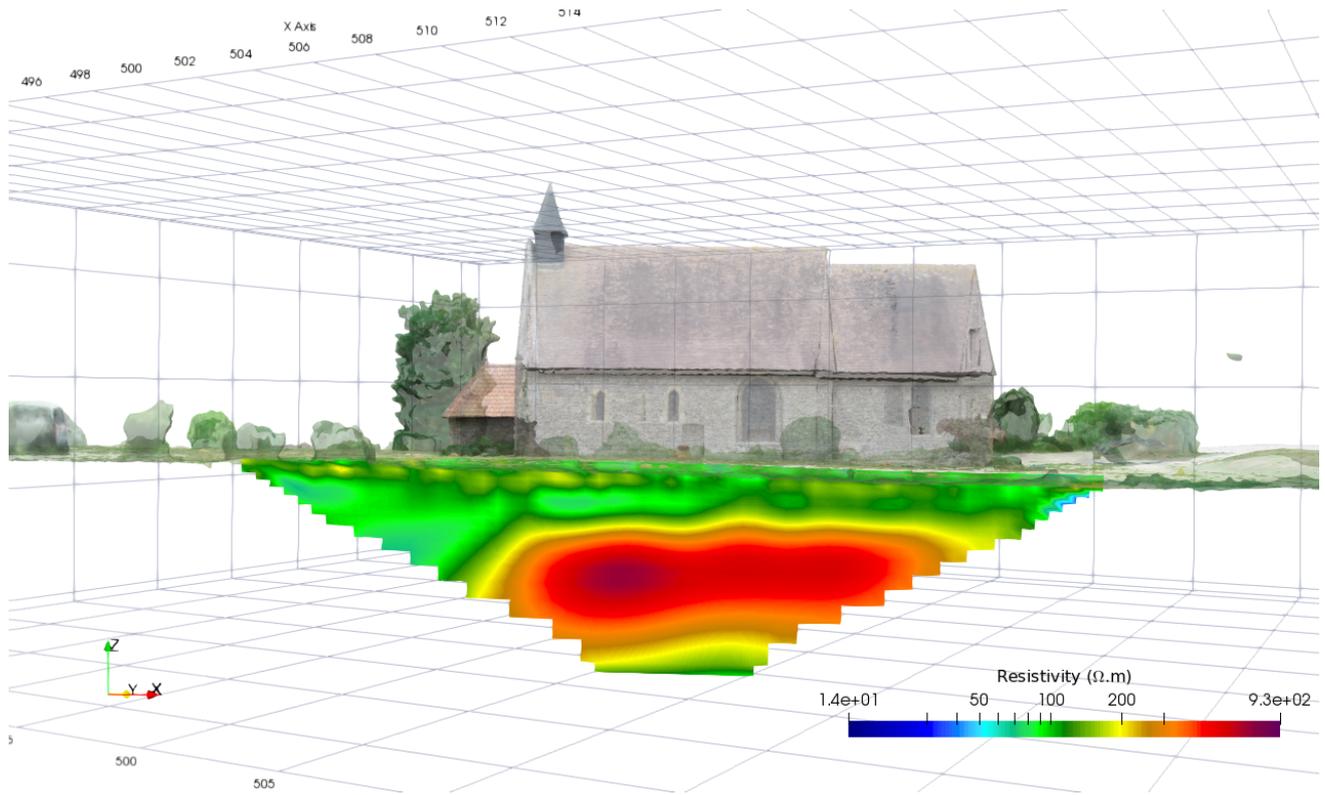


FIGURE 9.22 – Coupe IRE à 3 m de la façade sud de la chapelle.

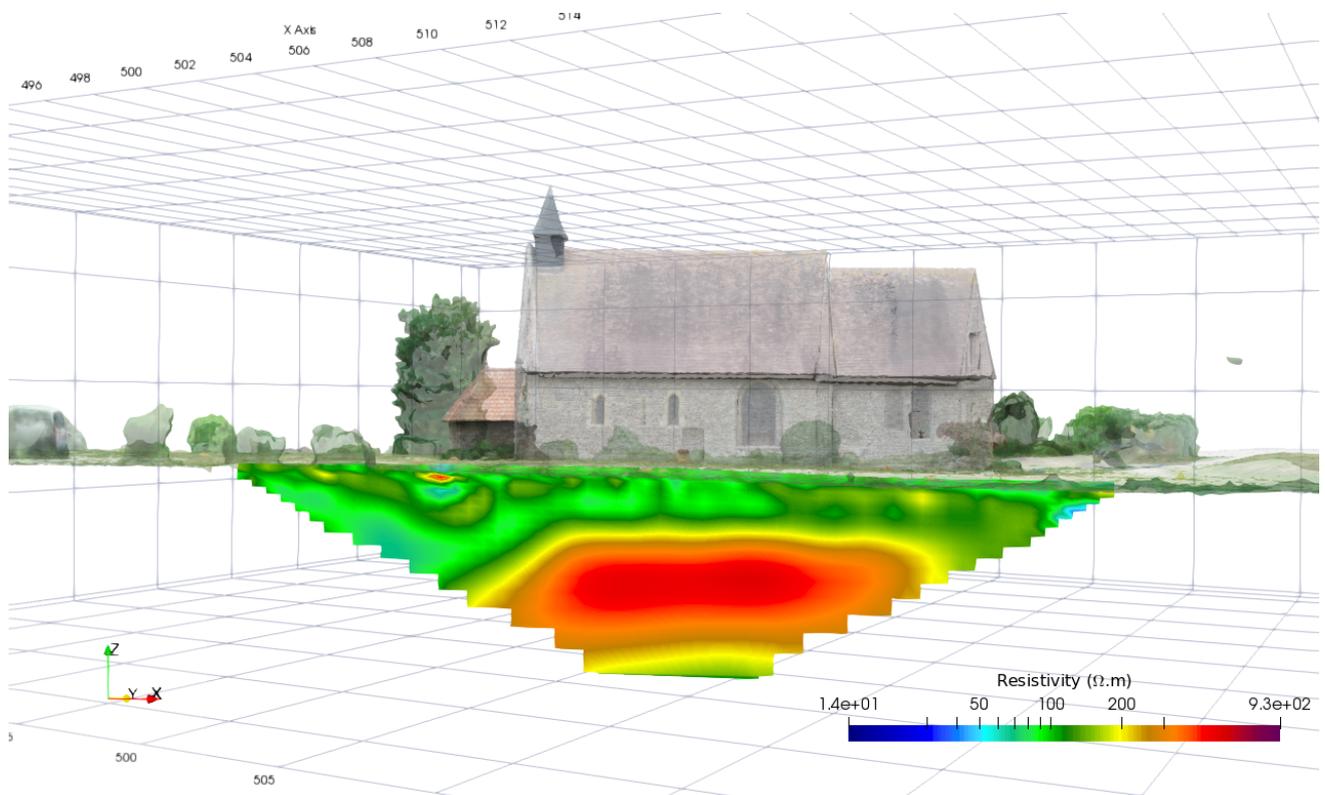


FIGURE 9.23 – Coupe IRE à 4 m de la façade sud de la chapelle.

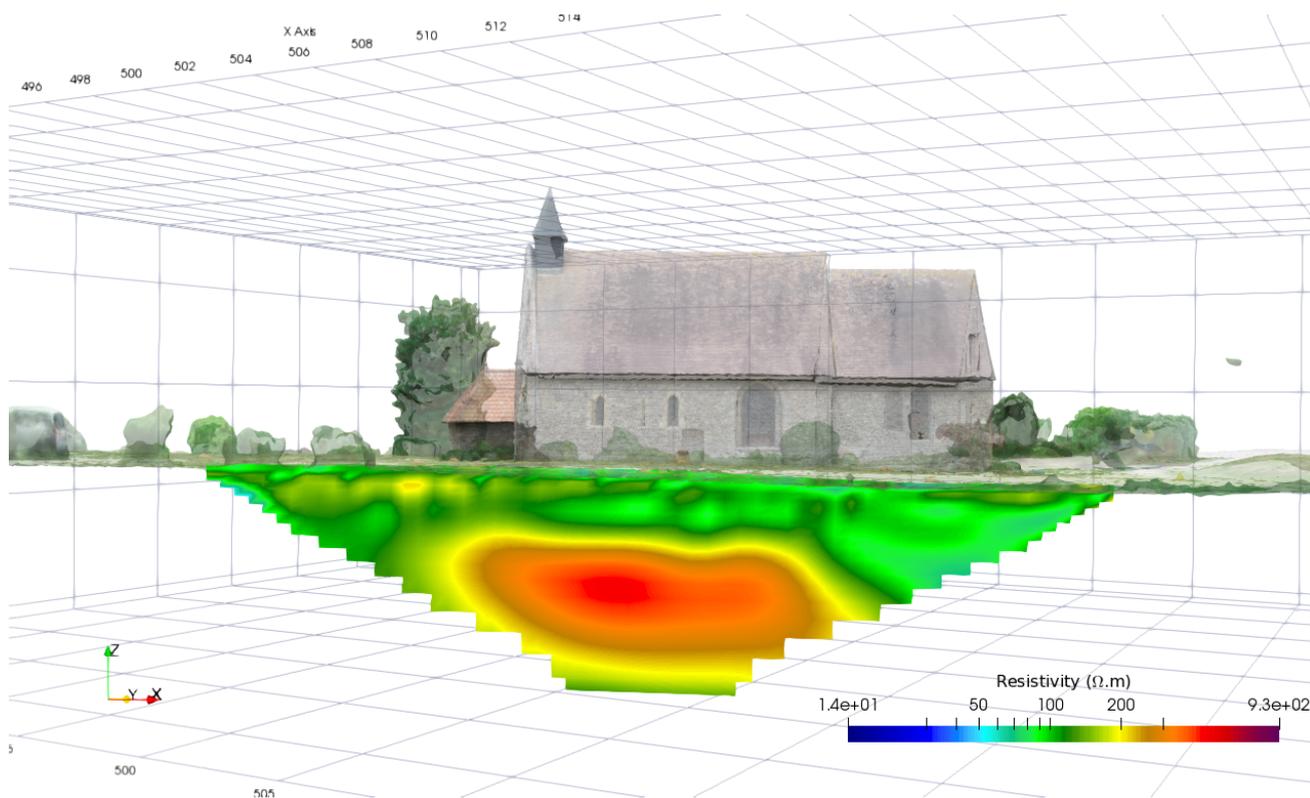


FIGURE 9.24 – Coupe IRE à 5 m de la façade sud de la chapelle.

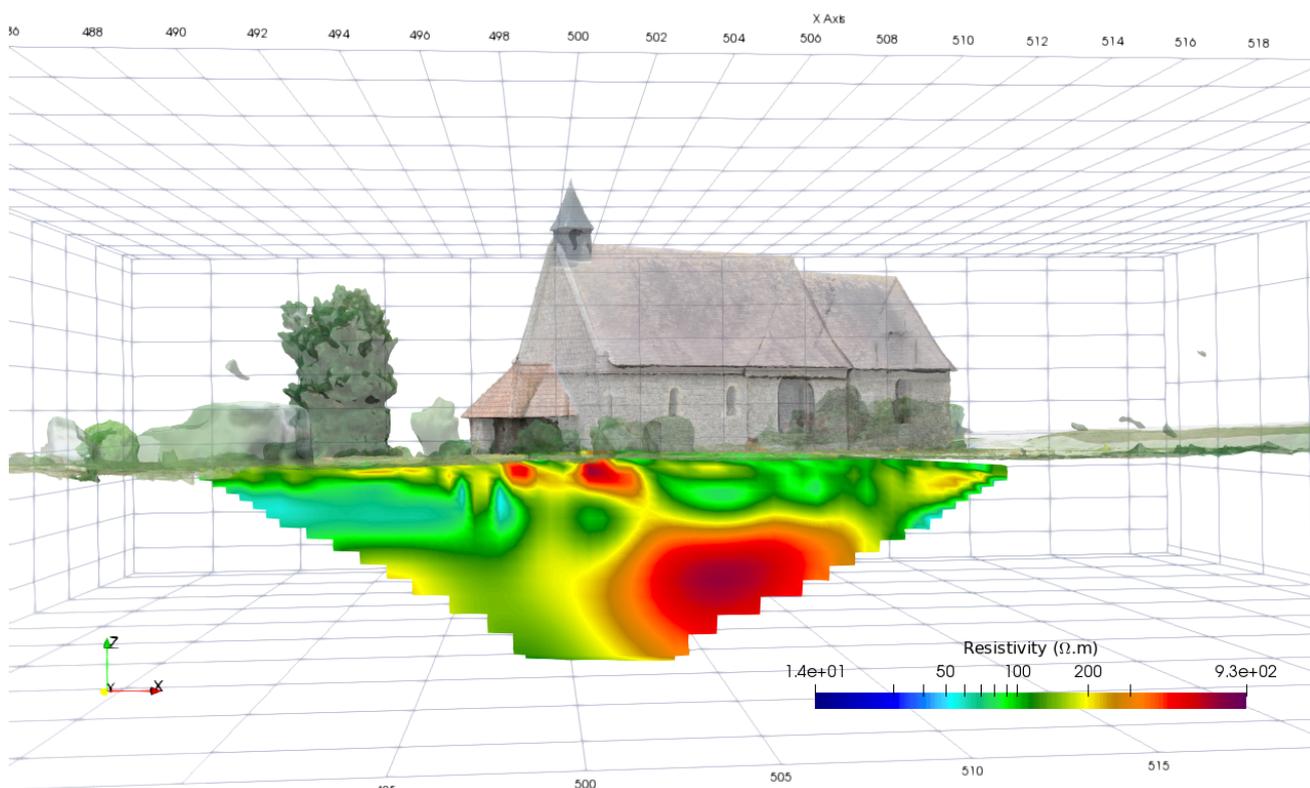


FIGURE 9.25 – Coupe IRE sud-est nord-ouest passant devant l'entrée de la chapelle.

Bibliographie

- Aillaud, L., 2020. *Application radar pour l'archéologie et les risques naturels*, Master's thesis, Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre.
- Bano, M., 2000. *Imagerie de la proche surface par géoradar*, Ph.D. thesis, Université de Strasbourg, Institut de Physique du Globe de Strasbourg.
- Chouteau, M. & Giroux, B., 2006. Méthodes Électriques - Notes de cours.
- Desriaux, L., 2018. Notre-Dame-du-Val - Etude documentaire historique.
- Fajon, P., 1993. "La Chapelle du Val" de Sotteville-sur-Mer, *Connaissance de Dieppe et de sa région*, pp. 15–17.
- Fauchard, C., Saley, A., Camerlynck, C., Fargier, Y., Antoine, R., & Therain, P.-F., 2018. Discovery of the Romanesque church of the Abbey of our lady of Bec (Le Bec-Hellouin, Normandy, France) by means of geophysical methods, *Archaeological Prospection*.
- Lang, R., Zhou, Y., Utku, C., & Le Vine, D., 2016. Accurate measurements of the dielectric constant of seawater at l band, *Radio Science*, **51**(1), 2–24.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E., 1990. *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, Cambridge, 2nd edn.

