

# Acquisitions multi-méthodes au dessus de cavités

Dans ce chapitre nous présentons deux études de cas : la localisation d'une galerie technique sur le campus de la faculté des Sciences d'Orsay et des mesures au-dessus d'une salle souterraine à l'abbaye de l'Ouye. Dans ces deux cas, nous présentons les interprétations des mesures de résistivité électrique et des mesures radar de sol.

## 5.1 Tests au-dessus d'une galerie technique

Le campus de la faculté des Sciences de l'Université Paris Sud à Orsay a été construit dans les années 1960. Lors de la construction des bâtiments il a été installé une galerie technique reliant chaque groupe de bâtiments pour y faire passer tous les câbles et les tuyaux. Cette galerie fait plusieurs centaines de mètres de long. Elle est de section rectangulaire, d'environ 2 m sur 2, enterrée dans le sous-sol à une profondeur variable en fonction de sa localisation sur le campus. Plusieurs bouches d'accès et/ou d'aération témoignent de sa présence en surface.

### 5.1.1 Instrumentation

Nous avons utilisé deux jeux d'antennes blindées, le premier centré sur 500 MHz et l'autre sur 250 MHz, du système RAMAC Malâ. Les traces ont été acquises tous les 5 cm le long de profils mono-déport. Différents profils ont été acquis perpendiculairement à la galerie pour la repérer précisément puis un profil longitudinal à la galerie (Fig. 5.1). Un multi-déport, noté  $W_1$ , a été effectué avec les antennes 250 MHz, au dessus de la galerie dans le

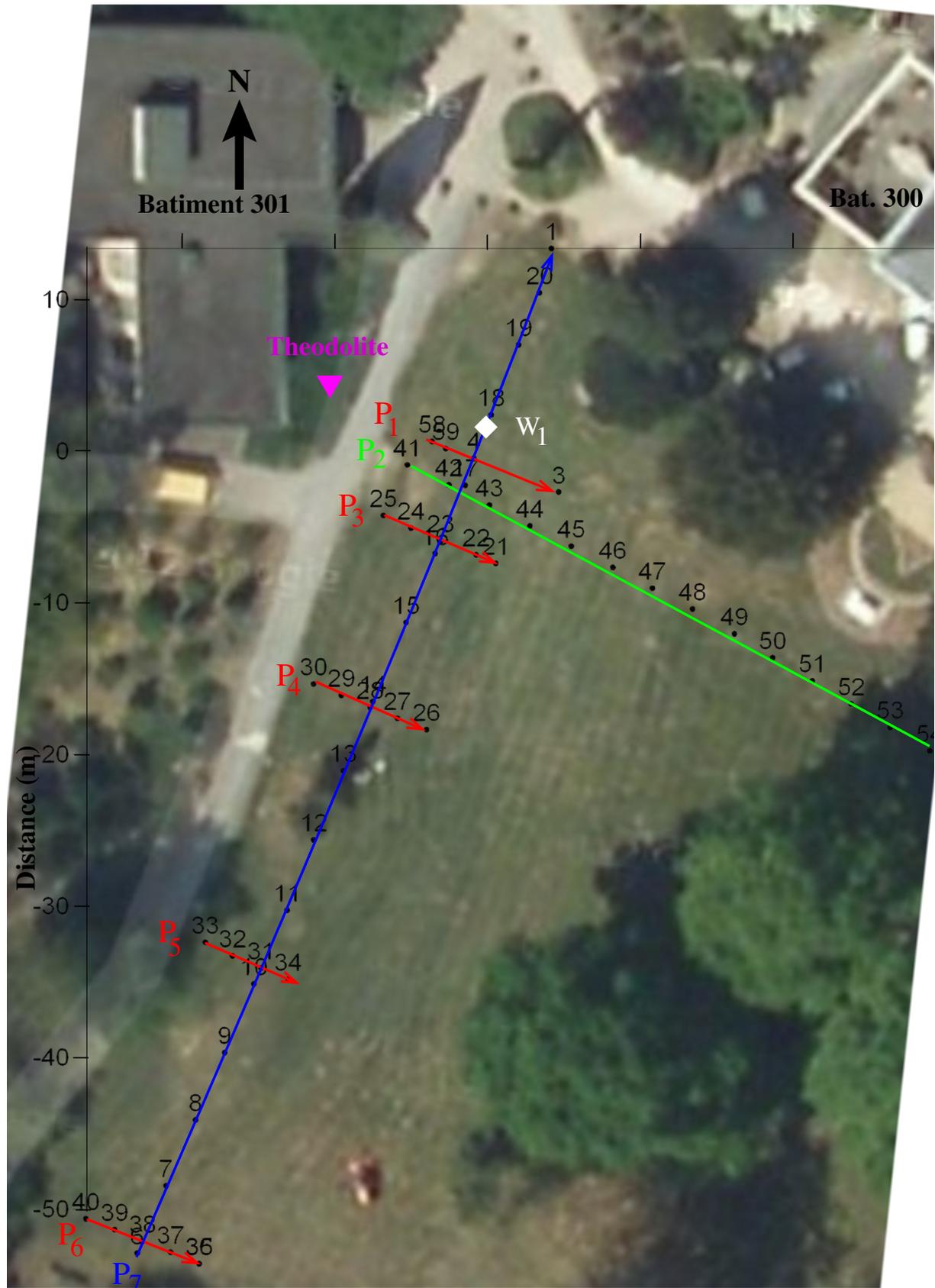


FIGURE 5.1: Localisation des profils radar et électrique au dessus de la galerie technique du campus d'Orsay. L'emplacement du théodolite est indiqué par le triangle rose, les numéros correspondent aux points visés. Le profil radar type WARR,  $W_1$ , indiqué par le losange blanc a été acquis le long du profil  $P_7$ . Le profil  $P_7$ , en bleu, est acquis au-dessus de la galerie technique. Des mesures radar et de résistivité électrique ont été acquis le long du profil  $P_2$ , en vert.

but de déterminer les vitesses et de tester l'idée développée dans le chapitre 2 c'est-à-dire, la mise en évidence d'inversion de polarisation sur l'onde réfléchie.

Un profil perpendiculaire à la galerie a été privilégié pour y faire un panneau de mesures de résistivité électrique : le profil  $P_2$ . Pour ces mesures nous avons utilisé un système de type Junior Syscal de la marque Iris instruments avec 48 électrodes avec une configuration de type Wenner et une distance inter-électrodes de 1 m, puis 0.4 m et 0.25 m. Tous les profils ont été repérés grâce à un théodolite laser dont l'emplacement est indiqué sur la Fig. 5.1. Ces mesures ont permis l'enregistrement précis de la topographie.

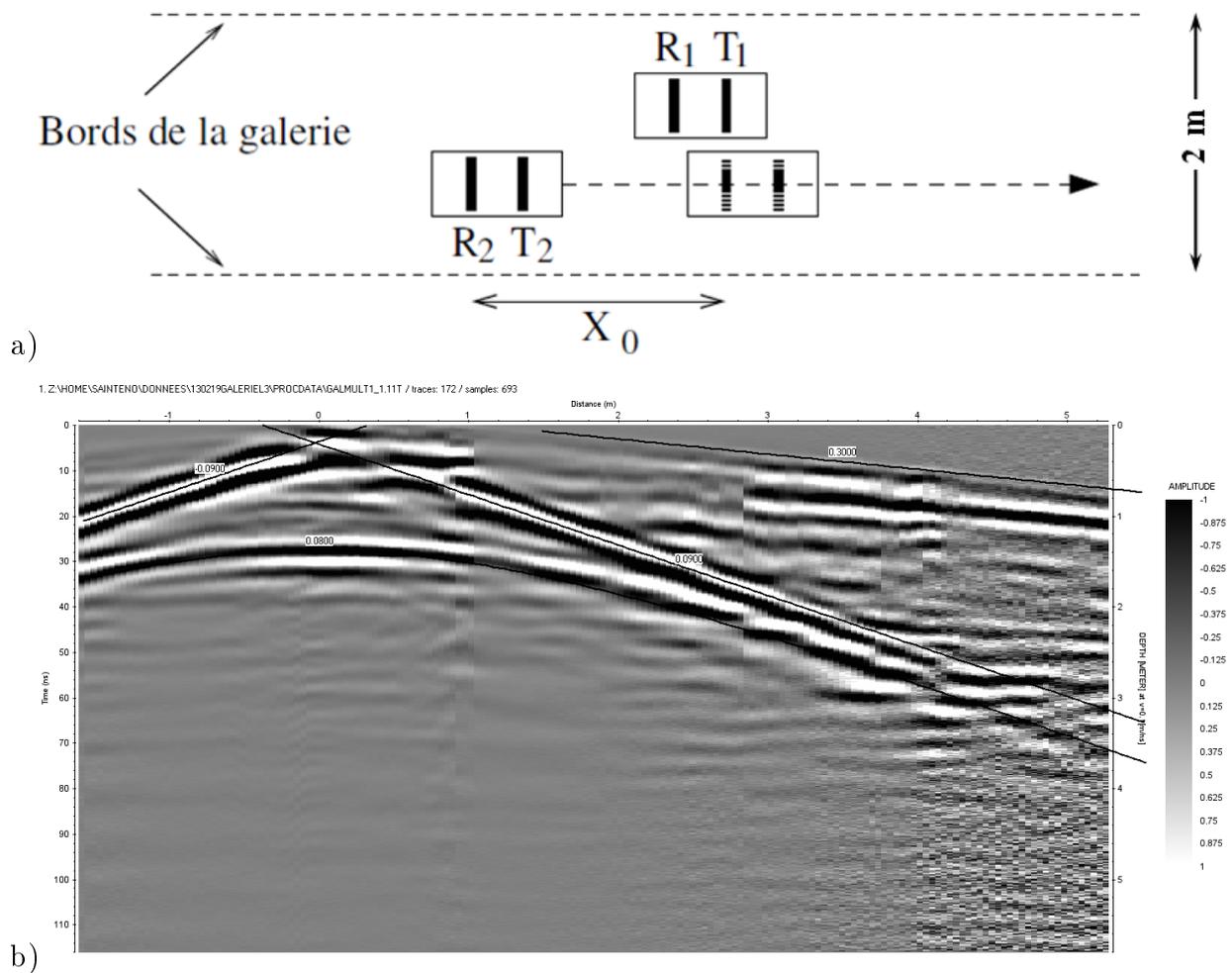


FIGURE 5.2: a) Schéma expliquant l'acquisition du radargramme multi-déport montré en b).

### 5.1.2 Analyse du profil radar multi-déport

Le profil multi-déport a été fait avec des antennes 250 MHz. Une boîte était fixe et l'autre a été tirée le long d'un profil en partant d'environ 1 mètre avant la boîte fixe, jusqu'à environ 5 m, après comme expliqué sur la Figure 5.2a. Cette méthode permet d'utiliser les ondes directes dans le sol pour positionner correctement le déport initial sur le profil de la Fig. 5.2b. Par contre, le déport minimum est non nul puisque les antennes sont alors bout-à-bout (comme indiqué pour le déport  $X_0$  de la Fig. 5.2a) La distance centre à centre est alors mesurée à 40 cm sur les antennes 250 MHz. Les pentes des ondes directes dans le sol indiquent une vitesse de propagation en surface de 0.09 m/ns. En se repérant sur le maximum de l'onde directe, le temps zéro est corrigé de  $0.4/0.09$  soit 4.4 ns. En prenant ce temps comme référence, le maximum de l'onde réfléchie est alors ajusté par une hyperbole correspondant à une vitesse de propagation de 0.08 m/ns. Cette différence est tout-à-fait acceptable en sachant que l'onde directe dans l'air se propage à la surface du sol alors que la réfléchie a traversé toute la couche de sol entre la surface et le toit de la galerie. En utilisant la vitesse de 0.08 m/ns, le toit de la galerie est alors estimé à 1.1 m de profondeur. Un forage effectué à la tarière manuelle donne une profondeur de 1.05 m au centre de l'antenne immobile.

Par contre, il est impossible de mettre en évidence visuellement une inversion de polarité de l'onde réfléchie sur la Fig. 5.2b. Une explication plausible est que la galerie soit faite d'éléments en béton armé et que la conductivité électrique des armatures empêche de voir l'effet recherché. Cet exemple nous confirme que l'inversion de polarité de la réfléchie est difficilement observable et utilisable pour mettre en évidence une cavité dans les données radar de terrain.

### 5.1.3 Analyse des profils radar mono-déport

La Figure 5.3 présente les mesures radar acquises à 500 MHz et à 250 MHz sur les 12 premiers mètres du profil P2. Ces profils ont été migrés en utilisant la méthode de Stolt avec une vitesse de 0.085 m/ns. Ils ont été gainés avec un AGC et corrigés de la topographie mesurée par le théodolite. Le profil 250 MHz 5.3b permet de positionner clairement les limites latérales de la galerie. La profondeur de son toit est aux alentours de 1 m.

Le profil P7 acquis du Sud vers Nord le long de la galerie est présenté sur la Figure 5.4, avant et après corrections topographiques. Sur la Fig. 5.4a, les mesures effectuées à la tarière manuelle le long du profil ont été reportées pour comparaison. Les différences sont peut-être dues à la présence de cailloux au-dessus de la galerie.

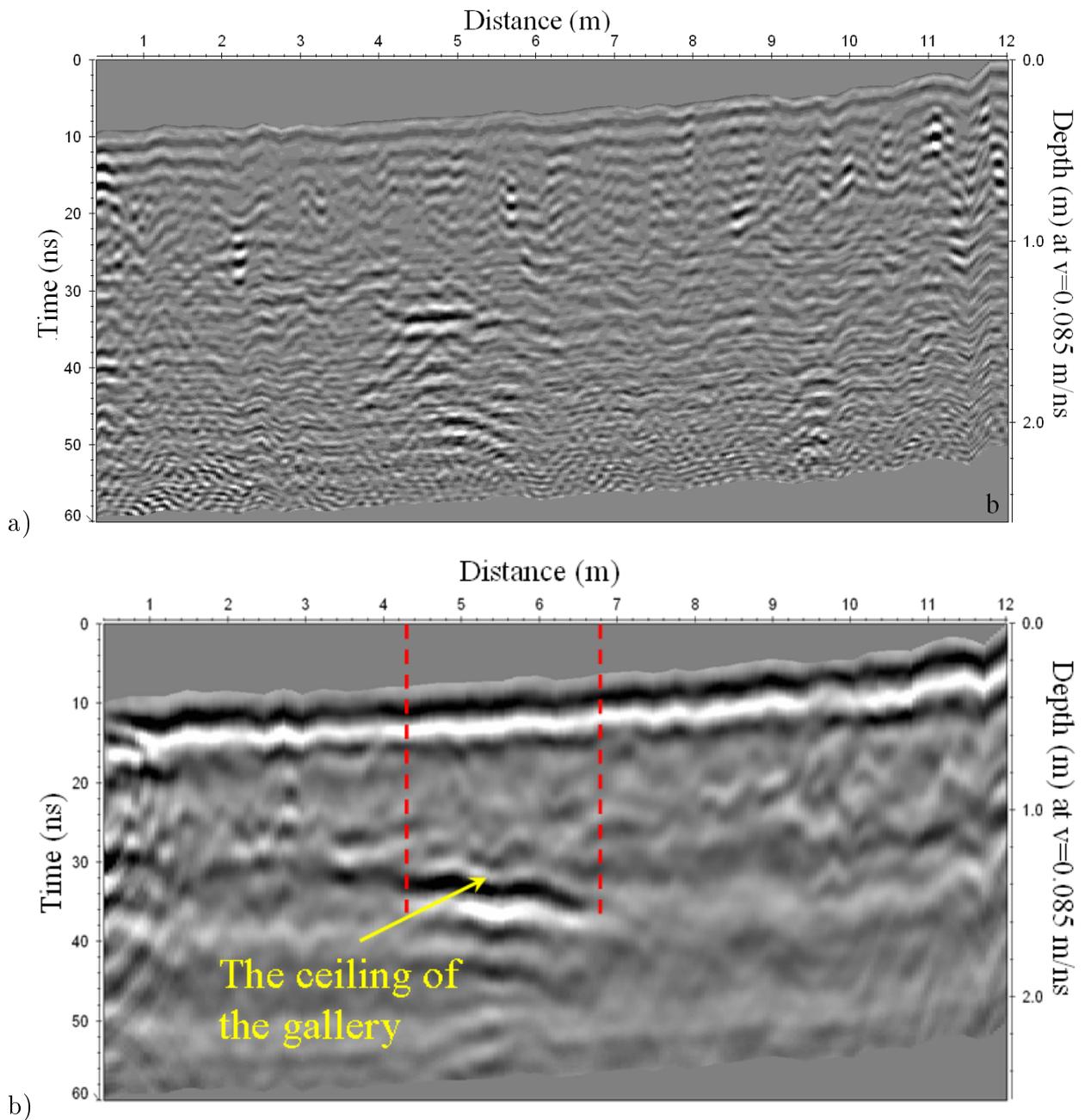


FIGURE 5.3: Profil P2 acquis perpendiculairement à l'axe de la galerie avec des antennes a) 500 MHz, et b) 250 MHz.

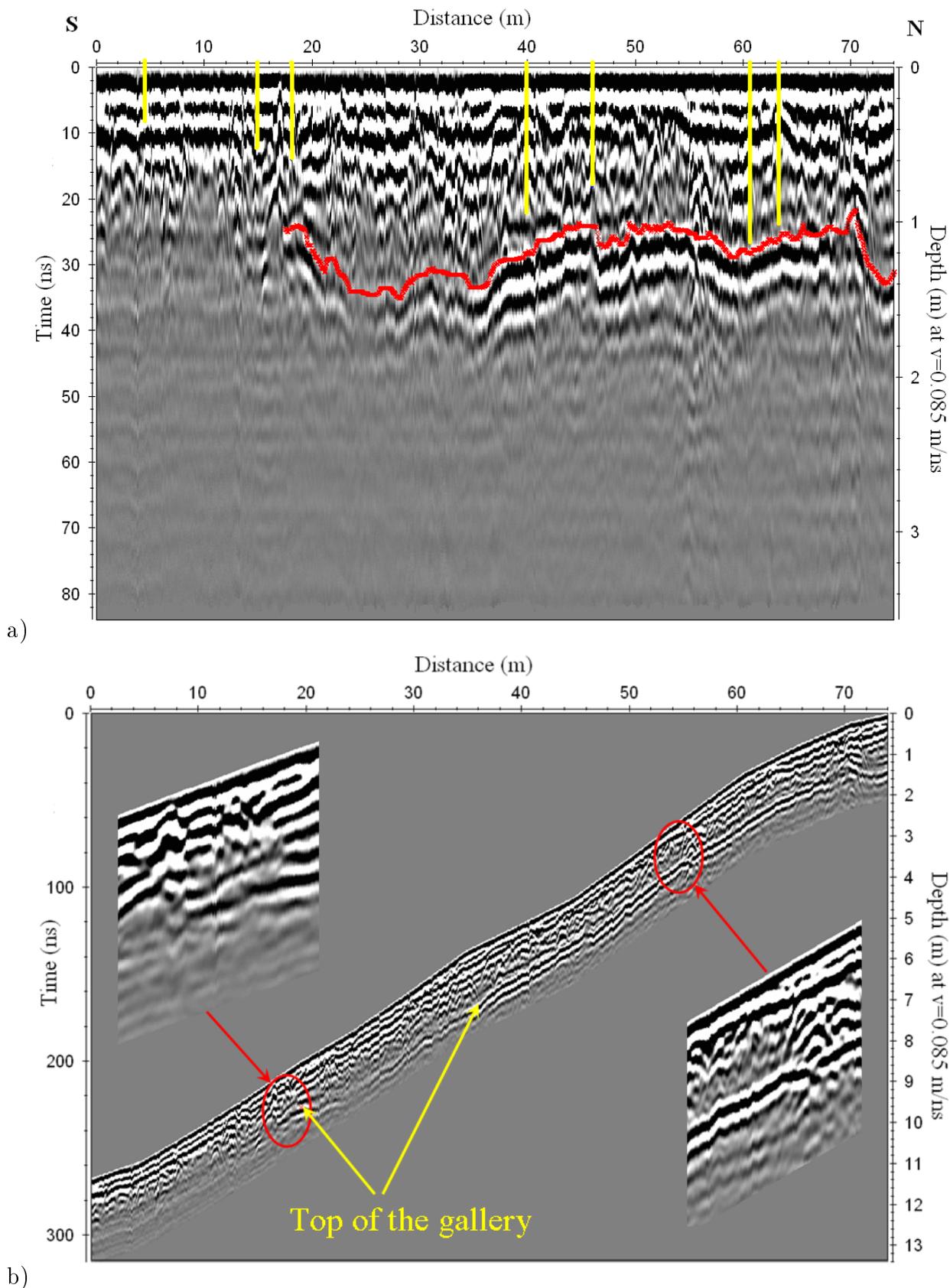


FIGURE 5.4: Profil P7 acquis avec des antennes 250 MHz au-dessus de la galerie repérée par les différents profils radar perpendiculaires a) avec les profondeurs du toit de la galerie mesurées à la tarière manuelle, et b) avec les corrections topographiques.

#### 5.1.4 Inversion des mesures électriques

Trois profils de résistivité électrique ont été acquis en mode Wenner le long de la ligne P2 de la Figure 5.1 avec trois distances inter-électrodes différentes, 1, 0.4 puis 0.25 m. Le logiciel RES2DINV a été utilisé pour inverser les pseudo-sections obtenues en utilisant des options classiques d'inversion et en incluant les mesures de topographie enregistrées au théodolite. Les modèles de distribution de résistivité inversées pour chaque distance inter-électrodes sont présentés sur la Figure 5.5. Ces résultats nous montrent que pour un espacement des électrodes de 1 m, Fig. 5.5a, les variations de résistivité du sous-sol commencent à être identifiables seulement à partir d'une profondeur de 2 m. La galerie recherchée étant positionné sur la partie Ouest du profil, en limite du modèle n'est pas discernable sur ce modèle. Sur le modèle obtenu avec un espacement de 0.4 m, Fig. 5.5b, on observe une zone de haute résistivité entre 3.2 et 6 m de position latérale. Avec un espacement de 0.25 m, Fig. 5.5c, nous pouvons déjà identifier sur ce modèle, une zone de haute résistivité de forme rectangulaire entre 4 m et 6.5 m.

En cherchant le modèle de distribution de résistivité électrique qui présente un contraste fort de résistivité entre deux blocs à la position correspondante à l'interface du toit de la galerie identifiée sur le radargramme (Fig. 5.3b), nous obtenons au bout de 7 itérations le modèle de la Fig. 5.6. Ce modèle explique aussi bien les mesures obtenues que sans information a priori (erreur quadratique de 1.7% au bout de 7 itérations).

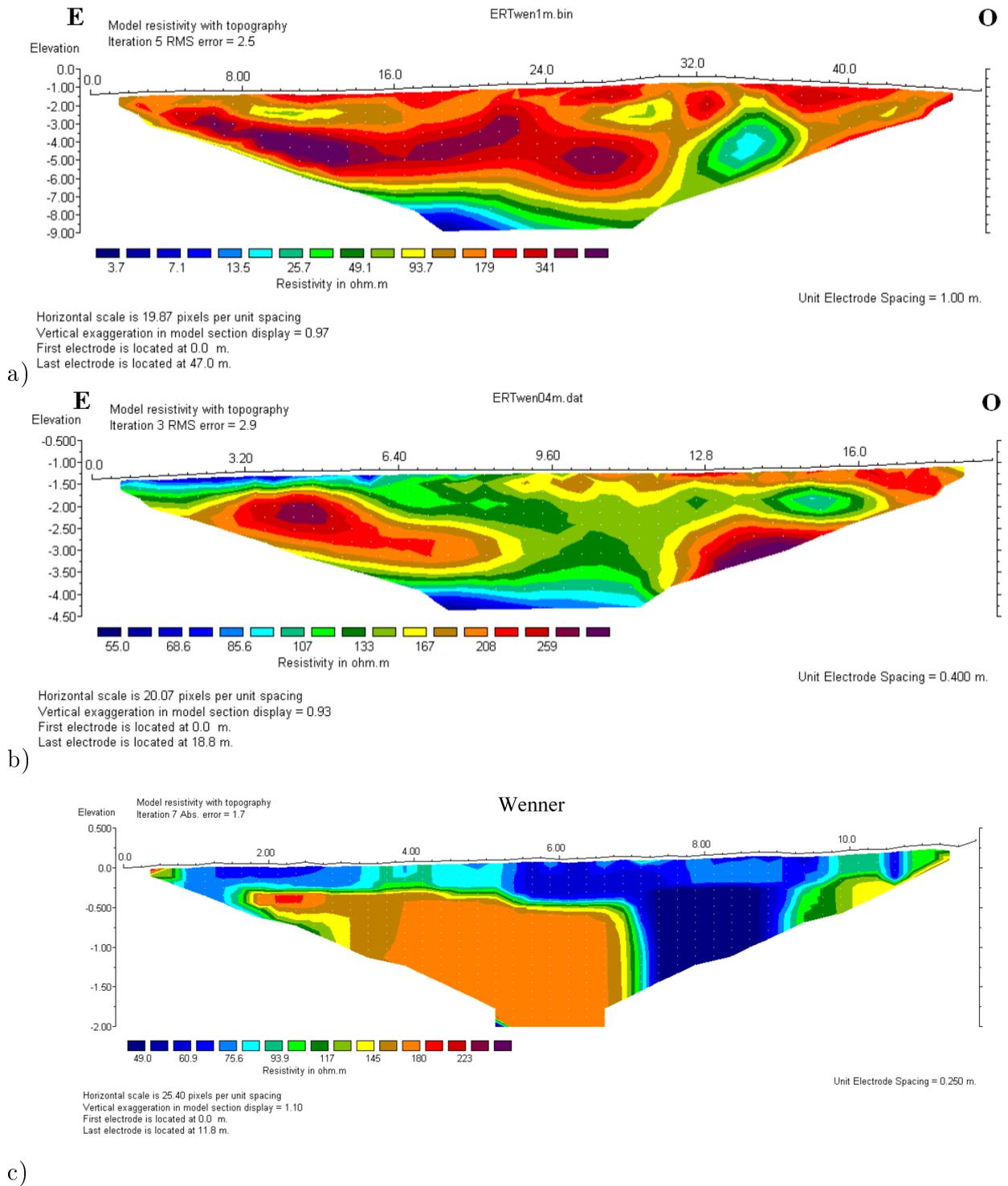


FIGURE 5.5: Modèles de distribution de résistivité électrique inversés à partir des mesures faites le long du profil P2 avec des électrodes espacées de a) 1 m, b) 0.4 m et c) 0.25m.

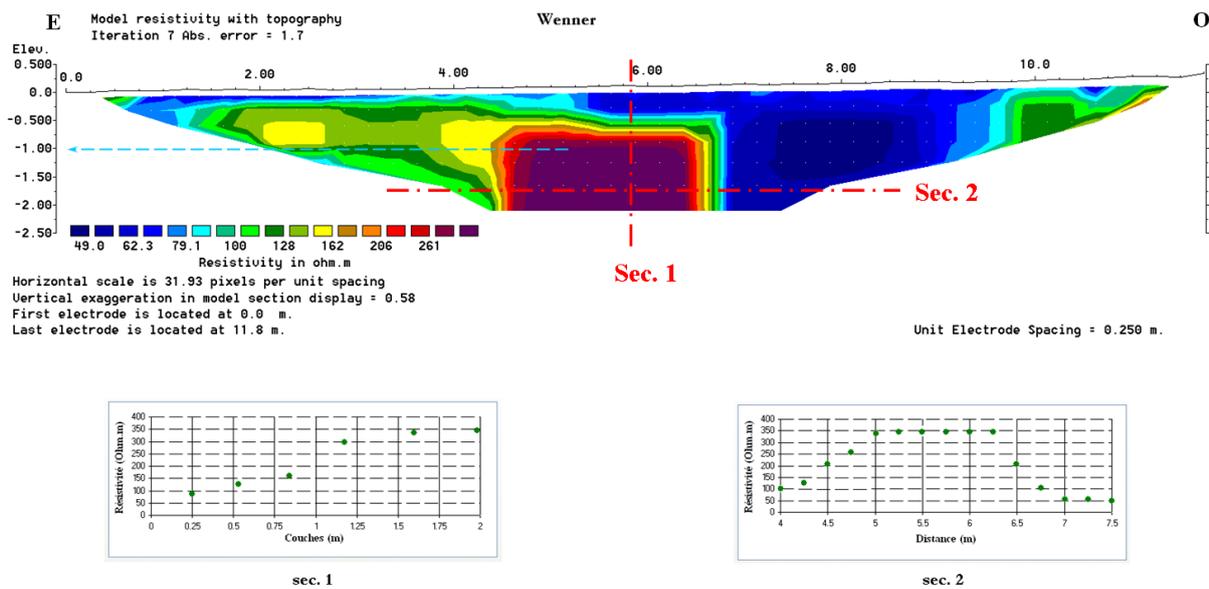


FIGURE 5.6: Modèle de distribution de résistivité électrique inversé à partir des mesures faites le long du profil P2 avec des électrodes espacées de 0.25 m en incluant une interface positionnée par le radargramme 5.3b en information *a priori*.

### 5.1.5 Conclusion

Les mesures radar permettent de situer une anomalie aux dimensions correspondantes à la galerie technique. Par contre en utilisant seulement les données radar il n'y a pas d'arguments pour dire qu'il s'agit d'une cavité au lieu de quoi que ce soit d'autre. Les mesures de résistivité électrique quand à elles, indiquent directement une zone de plus haute résistivité à l'emplacement de la galerie. Si l'on inclue une interface horizontale de largeur et à la profondeur détectées par le radar comme information *a priori* lors de l'inversion du profil de résistivité, l'effet est visuellement impressionnant. L'inversion converge au bout de 7 itérations sur un modèle expliquant les données avec une erreur quadratique de 1.7%. Les deux méthodes géophysiques sont clairement complémentaires sur cet exemple. Les profils radar indiquent qu'il est nécessaire de diminuer la distance inter-électrode pour avoir une résolution suffisante dans la tomographie électrique pour mettre en évidence la cible.



## 5.2 Tests au dessus d'une salle souterraine

Une deuxième série de tests de complémentarité du radar de sol et des mesures de résistivité électrique a été menée au-dessus d'une salle souterraine connue dans l'abbaye de l'Ouye, située près de Dourdan en Essonne. Ces résultats ont été présentés lors du 6ème International Workshop on Advanced GPR, en juin 2011, à Aix-la-Chappelle en Allemagne.



## GPR profiling and electrical resistivity tomography for buried cavity detection : a test site at the Abbaye de l'Ouye (France)

Cavity detection with joined GPR and ERT measurements

N.Boubaki, A. Saintenoy, P. Tucholka

IDES - UMR 8148 CNRS, Université Paris Sud 11,

Bâtiment 504, 91405 Orsay cedex, France

*Abstract* – The abbaye de l'Ouye (France) presents an underground room situated under a flat graveled path perfect for testing the complementarity of two geophysical methods, ground-penetrating radar (GPR) and electrical resistivity tomography (ERT), for buried cavity detection. One GPR mono- offset profile was acquired along with a 2D ERT profile on the surface above the cavity of known dimensions. We use our field site to test 2D ERT data acquisition and inversion parameters and how to complete GPR data information with ERT and vice-versa. As expected, the mono-offset GPR profile contains strong reflections on the ceiling and the floor of the room. Arrival times of those reflections are translated to depth using classical GPR data processing techniques. The measured electrical apparent resistivities were inverted using the Loke (2001) software with three different options : i) no a priori information, ii) a priori information included as high resistivity value in an area determined from the GPR reflections, iii) a priori information included as boundary positions derived from the GPR reflections.

*Keywords* : Ground penetrating radar; void detection; Electrical Resistivity Tomography

### I. INTRODUCTION

Our basement contains a dense network of underground cavities. These sub-surface voids make many buildings or infrastructures unstable or cause them to collapse. Therefore, it is of major interest to be able to detect underground cavities in urban environment.



FIGURE 5.7: Location map of the study area. The limits of the underground room are represented in yellow. The geophysical profiles were acquired along the green line.

Different geophysical investigations have been carried out on this purpose with diverse methods such as gravity, seismic, electrical and electromagnetic measurements (Butler, 1984; Pellerin, 2002; Roth et al., 2002; Negri and Leucci, 2006; El Khammari et al., 2007). The main difficulties reside in the necessity for dense station spacing to reduce spatial aliasing, and high quality data to resolve small features. We decided to focus on two geophysical methods : Ground Penetrating Radar (GPR) and Electrical Resistivity Tomography (ERT).

The GPR is one of the most recommended non-destructive techniques used in near surface mapping studies (Davis and Annan, 1989; El Khammari et al., 2007). It allows fast and dense data acquisition in urban environment. GPR data sensitivity to dielectric permittivity variations makes it a common tool to detect the underground cavities (natural or man-made), because the reflections due to the cavities (air) and the surrounding rocks are potentially strong.

The ERT is a common method to investigate shallow depth structures (Oldenburg and Li, 1999; van Schoor, 2002). Two-dimensional resistivity imaging is used successfully for detection of underground cavities because the electrical resistivity of the void is higher than that of surrounding rocks and this difference may be the most outstanding physical feature of a cave.

In this paper we test complementarity of the two method over an existing cave at the Abbaye de l'Ouye.

## II. SITE OF INVESTIGATION

We have carried out our study in the garden of an abbey (Abbaye de l'Ouye) located near the town of Dourdan (France). We have acquired GPR and ERT profiles above the underground room (yellow lines) along the green line as indicated in Figure 5.7. The underground room is 4.8 m wide by 9.6 m. The vaulted ceiling has a height of 2.6 m at its apex. Some masonry stones are visible from inside the room. The profiles were acquired along a path of gravels covering some argileous soil.

## III. INSTRUMENTATION

The GPR mono-offset profile was acquired using 250 MHz antennas with a RAMAC Malåsystem.

Those 250 MHz antennas were selected as the most suitable for this work due to their optimum compromise between penetration and resolution. Traces were collected every centimeter. Each trace consisted of 1024 samples for a time window of 80 ns. To help for velocity analysis we acquired also a multi-offset profile (not shown here). All GPR data were processed using the REFLEXW Sandmeier software. We applied time zero correction, dewow filtering, and compensated the amplitude attenuation due to geometrical divergence. To interpret our GPR data, we simulated radargrams using GprMax which solves Maxwell's equations using the finite-difference time-domain method (Giannopoulos, 2005).

For the ERT survey, we used the Wenner configuration [10]. The measuring device is constituted by a resistivimeter connected to an arrangement of 48 electrodes with an electrode spacing of 1 m and 0.5 m. We derived resistivity model sections from the measured apparent resistivity pseudo-section using the RES2DINV (ver.3.59.66) software package (Loke and Barker, 1996).

## IV. RESULTS AND DISCUSSION

### A. GPR and ERT data comparison

In order to make a direct comparison, GPR and resistivity survey lines were acquired along a coincident profile (green line in Figure 5.7). In Figure 5.8, we present our results. Figure 5.8c shows the processed GPR mono-offset profile with reflections that come from the roof and bottom of the cavity. From hyperbolas fitting and the multi-offset profile analysis, we determined a velocity of 0.08 m/ns for the electromagnetic wave propagating in the soil. Using this velocity, we migrated the GPR profile with the Stolt method (Figure 5.8d). To have an idea of the expected GPR signal over the cavity we simulated the radargram shown Figure 5.9. The time delay between the first and the second reflection on the simulated radargram (Figure 5.9b) matches the observed one on the measured radargram Figure 5.8c. An inversion of signal polarization between the two reflections is clearly visible on the simulated radargram (Fig. 5.9b) but not so easily on the measured radargram (Fig. 5.8c). The red arrows on Fig. 5.8 show the time delay taken for the depth estimate for the first layer. The time zero was set to the maximum amplitude of

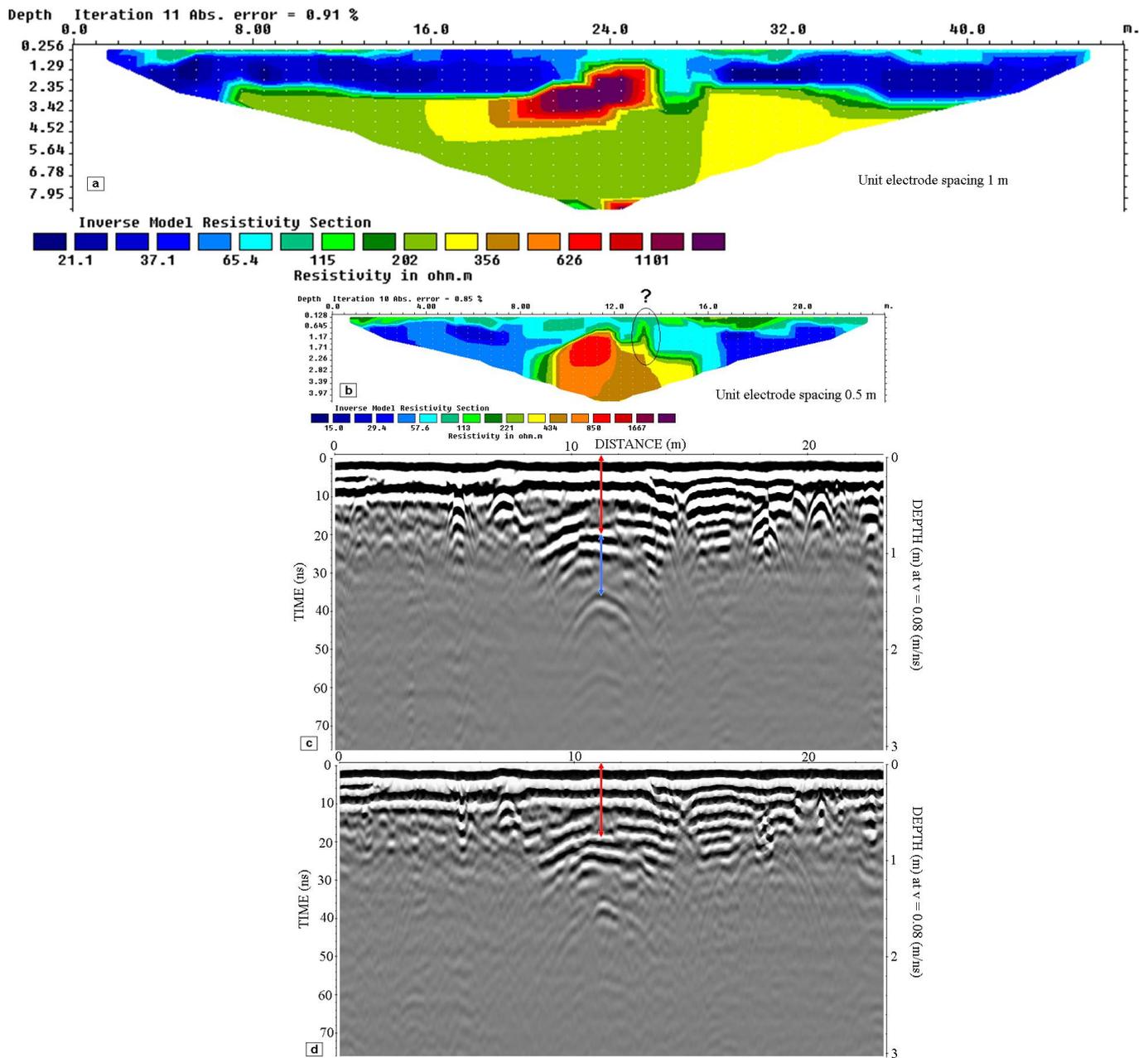


FIGURE 5.8: Geophysical results as inversed electrical resistivity variations with no a-priori information with a) unit electrode spacing of 1 m, b) unit electrode spacing of 0.5 m, and processed radargrams corrected for divergence attenuation compensation c) non migrated data, d) using Stolt migration routine with a velocity of 0.08 m/ns.

the soil direct wave. The transmitter and receiver being 31 cm, the thickness is estimated to 1 m. The blue arrow (Fig. 5.8c) indicates the time delay between the reflections coming from the roof and the floor of the cavity. Knowing the air velocity is 0.3 m/ns the time delay is converted to a height of 2.6 m. As results, it is possible from GPR data to estimate the top layer thickness, to laterally position the middle of the underground cavity, and to evaluate its height. Even

with the migrated data, it is difficult to status on the kind of permittivity variations creating the reflections. The inversion of polarization is not clear and the migrated profile is wrong about the second reflection on the cavity bottom / soil interface.

Figures 5.8a and 5.8b are the inversed electrical resistivity sections obtained after 10 iterations using a least-squares inversion routine offered in RES2DINV without using *a priori* information.

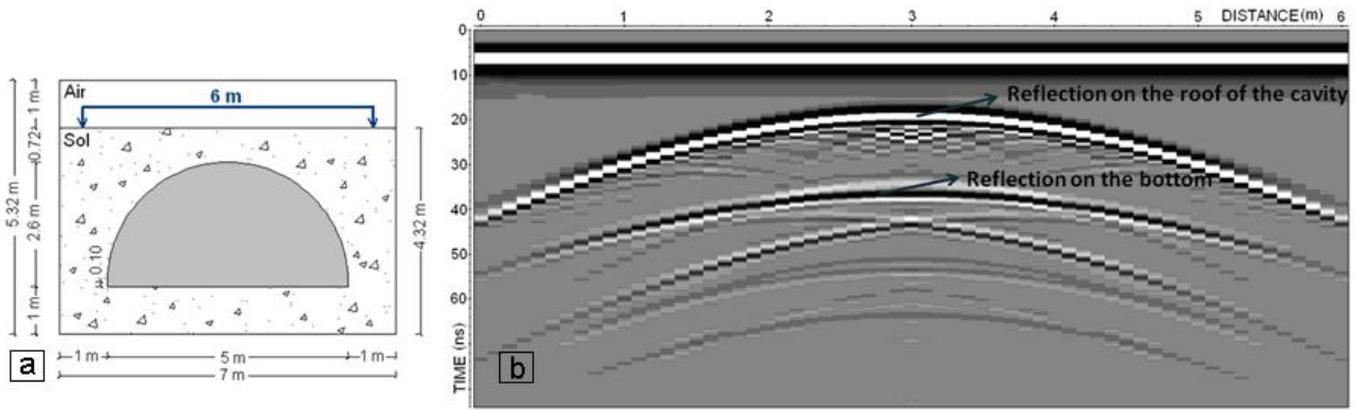


FIGURE 5.9: a) Geometry of the model and b) its simulated radargram (no gain applied). The soil properties are 14 for the dielectric permittivity and 0.01 S/m for the DC electrical conductivity c) radargram acquired along the profile.

Fig. 5.8a is obtained with a unit electrode spacing of 1 m. To get a better resolution, the profile was acquired a second time using a unit electrode spacing of 0.5 (Fig. 5.8b). The root mean square error between the simulated apparent resistivities and the 360 measured ones is around 0.9% for both electrode spacing. These first inversions of the ERT data alone confirms the interest of using electrical resistivity imaging in order to detect cavities in the soil structure; the region of high resistivity anomaly (400 - 1000 Ohm m) coincides with the reflections observed on the radargram (Figure 5.8c) and corresponds to the cavity zone. However the boundaries of the cavity are not very precise on the right side. Both geophysical signals seem to be annoyed by a higher resistivity zone encircled with a question mark on Fig. 5.8b (an old chimney?).

#### B. Using GPR data as a priori information for ERT data inversion

We used the radargram to define the limits of the cavity, using arrival time-picking of the top reflection after migration of the data (velocity of 0.08 m/ns) and assuming a flat floor for the cave. We introduce this information by two methods in the inversion of the electrical resistivity measurements with a unit electrode spacing of 0.5 m. First we imposed a high resistivity of 20000 Ohm.m inside the limits determined by the GPR. Those limits were approximated using trapezoidal elements as shown as the black line in Fig. 5.10b. The result of the 10th iteration of the inversion in Fig. 5.10a gives an image of the

cavity that is closer to the measured dimensions of the cavity (Fig. 5.9a). It respects the information coming from the radargram and it fits as well the resistivity measurements as the model in Fig. 5.8a as the RMS errors are comparable on the two models.

As a second test, we introduced the GPR information as sharp boundaries (black line on Fig. 5.10b) allowing the model to take any electrical resistivity distribution. The inversed ERT after 10 iterations is shown in Fig. 5.10b. The image of the cavity section is less precise than in Fig. 5.10a but it still fits what we know from the cavity size and the data fit is still as good as for the two other models (RMS error of 0.80%). In Figure 5.11, we show the interpolated images of Figure 5.10.

## V. CONCLUSIONS

From our results, it is clear that from mono-offset GPR profiling alone, it is difficult to determine precisely the cavity boundary even after data migration. The electrical resistivity measurements inversed on their own indicates a high resistivity area at the place of the cavity. The top soil-cavity roof interface seems to be partly resolved when using the smaller electrode spacing but the underground room floor position is not clearly defined even using the larger electrode spacing. Introducing GPR information such as depth of the ceiling and a shape for the cavity coming from the migrated image help to construct an electrical resistivity model that fits the reality.

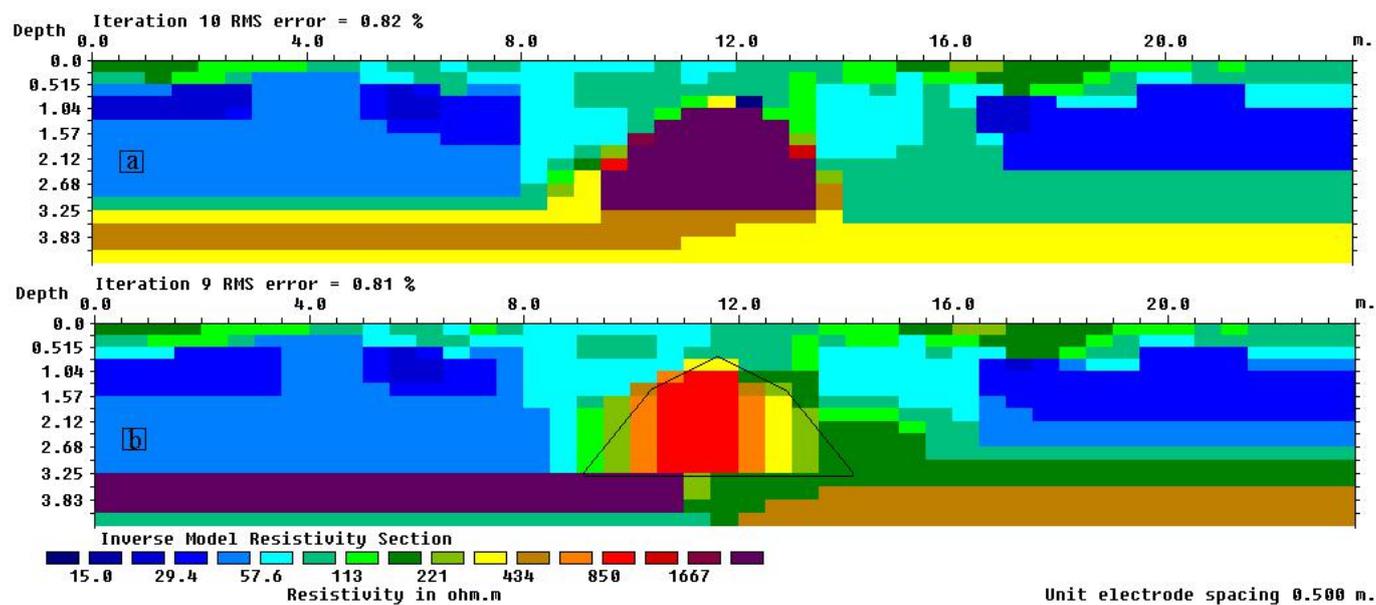


FIGURE 5.10: Inversed electrical resistivity section using a priori information as a) imposing a high resistivity value of 20000 ohm.m and a damping factor weight of 1 inside a zone derived from GPR data, b) imposing sharp boundaries located from the GPR data.

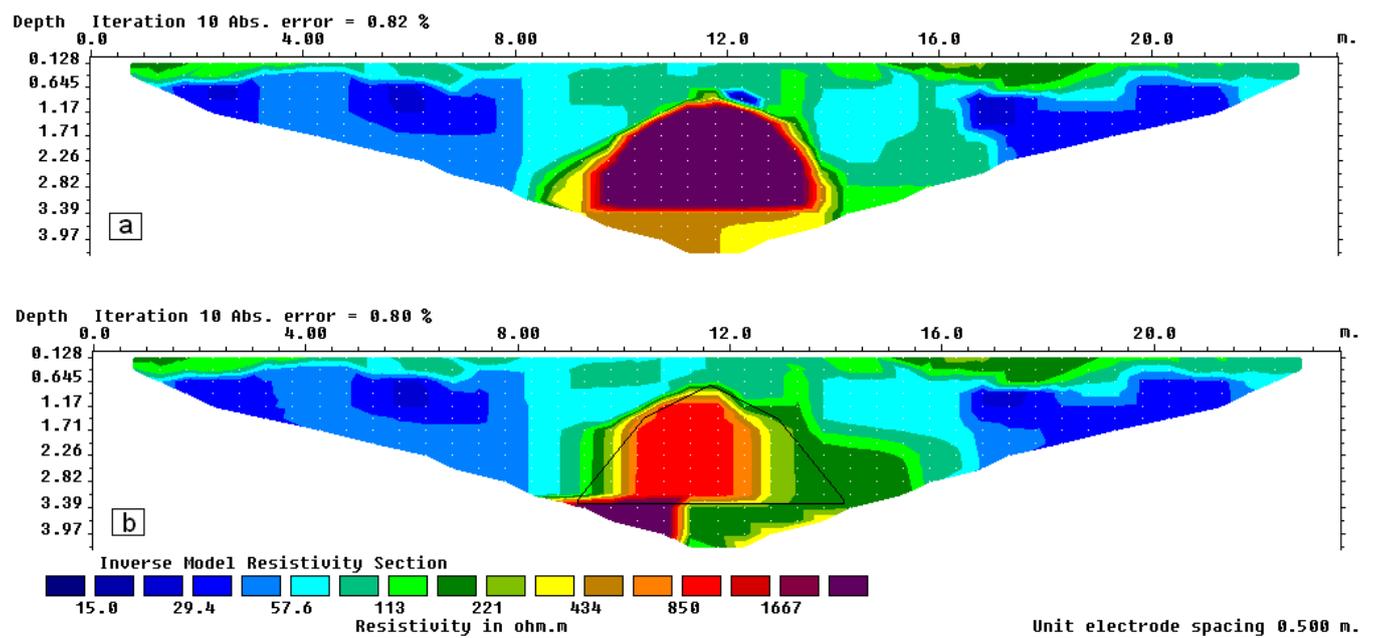


FIGURE 5.11: Interpolated images of Fig. 5.10 results.



# Conclusions et perspectives

## Conclusions

Les vides souterrains non connus sont potentiellement dangereux pour l'homme surtout en milieux urbains. L'objectif de cette thèse était de tester deux méthodes géophysiques, le radar de sol et la tomographie par mesures de résistivité électrique, pour localiser et déterminer les cavités souterraines dans le proche sous-sol.

Dans un premier temps, nous avons étudié le radar de sol. Nous avons effectué une analyse théorique pour exploiter les profils radar multi-dépôts acquis au dessus de cavités par la mise en évidence d'une inversion de polarité de la réfléchie sur leur toit. Cette idée se révèle malheureusement inexploitable dans les données radar de terrain soit à cause d'un manque de résolution lié à une couche trop mince au dessus du toit (cas des mesures faites à Sainte-Mesme), soit un manque d'espace pour acquérir des données avec un dépôt suffisant pour observer le phénomène (cas des mesures à l'abbaye de l'Ouye), soit une couche de matériau imperméable (cas de la galerie technique du campus d'Orsay).

Nous avons ensuite poursuivi notre analyse théorique, pour comprendre les variations de l'amplitude de l'onde réfléchie sur le toit d'une cavité en fonction de sa profondeur et de sa taille. Cette analyse explique l'effet des couches minces et met en évidence une relation logarithmique entre la profondeur et la taille d'une cavité à section carrée pour donner une réflexion d'amplitude maximale. Selon cette relation, il est possible de déterminer la taille d'une cavité qui donne une réflexion d'amplitude maximale à partir de sa profondeur.

Puis nous avons présenté deux applications archéologiques de la détection de cavité par des mesures radar de sol de surface. La première met en évidence un caveau voûté oublié dans l'église de Sainte-Mesme et la deuxième confirme la présence de galeries liées à l'exploitation du silex par les hommes du néolithique sur le site de Krzemionki en Pologne.

Dans un deuxième temps, nous avons étudié l'apport de faire des mesures de résistivité électrique en plus de mesures radar de sol. Nous proposons d'utiliser le radar en premier pour déterminer l'échelle et le positionnement du profil électrique sur des zones potentiellement à risque. Puis, nous utilisons le profil électrique pour déterminer si ces zones sont

plus résistantes électriquement ou pas. Finalement, nous incluons les informations radar sous forme d'information *a priori* pour inverser un modèle de distribution de résistivité électrique plus proche de la réalité. Cette démarche a été appliquée avec succès dans deux études de cas tests : au-dessus d'une galerie technique de section carrée de 2 m de côté à 1 m de profondeur, et au-dessus d'une salle souterraine voûtée.

## Perspectives

Sur le site de Krzemionki, en Pologne, des mesures de résistivité électrique doivent être acquises pour confirmer les interprétations des radargrammes réalisés. Il serait également intéressant de réaliser des mesures sur un autre site similaire en France : les minières néolithiques de silex de Spiennes (Mons).

Lors de nos applications nous avons été souvent limités par la difficulté d'enfoncer les électrodes dans le sol. Ceci est impossible dans la plupart des bâtiments. Il serait intéressant d'utiliser des appareils de mesures de résistivité à couplage capacitif comme OhmMapper proposé par Iris Instrument (Sabo, 2008) qui permettent de faire des mesures de manière non destructive. Cependant, ce genre d'appareil présente moins de degré de liberté pour l'espacement inter-électrode ce qui limite la taille des cavités à détecter.

D'un point de vue personnel, je souhaiterais appliquer ce que j'ai développé lors de ma thèse pour l'auscultation non destructive dans le domaine du génie civil en sites urbains. J'ai à l'esprit les différents effondrements d'immeubles liés à la présence de cavités non connues qui ont eu lieu dans mon pays d'origine, la Syrie, notamment à Alep. De plus, l'évaluation du vieillissement des structures en béton est un défi technique majeur rencontré par les ingénieurs civils d'aujourd'hui.