



Centre d'Ingénierie des Systèmes en Télécommunication, Electromagnétisme et Electronique  
Ester Technopole  
87 069 Limoges

Rapport de stage

# Prospections des sols pour la recherche des chemins des courants telluriques et la détection de contamination

Julie CROUSEAUD  
Soutenu le 11 juin 2007



Année Universitaire 2006-2007

INSTITUT UNIVERSITAIRE TECHNOLOGIQUE du Limousin  
Département MESURES PHYSIQUES  
Allée Andrée Maurois  
87 065 Limoges CEDEX  
Licence professionnelle Protection de l'environnement  
Mention « Mesure de la Qualité des Milieux : air, eaux, sols »

Responsable du stage à CISTEME : Monsieur **Julien Fougeyrollas**  
Enseignant chargé du suivi du stage : Monsieur **Bruno Beillard**

## Remerciements

Je remercie tout d'abord Monsieur Bernard Jecko d'avoir accepté que je réalise mon stage à CISTEME.

Je remercie également Monsieur Bruno Beillard pour ses conseils ainsi que pour avoir prêté une partie de son terrain pour la réalisation d'un grand nombre d'essais.

Je remercie Monsieur Julien Fougeyrollas pour son aide lors des manipulations, même lorsque le temps était très hostile.

Je remercie Monsieur Christophe Guiffaut pour le prêt du GPR ainsi que Monsieur Antoine Bouvier pour ses conseils.

Je remercie tous les étudiants de la salle CEM, Fanny, Julien, Nicolas B, Nicolas V ainsi que Pierre pour leur bonne humeur.

Je remercie également les membres de CISTEME qui m'ont toujours accueillis chaleureusement à ESTER.

## Table des matières

Introduction .....	4
I.Contexte.....	5
I.1.Présentation de CISTEME.....	5
I.2.Présentation de RTE .....	5
I.3.Présentation du protocole GPSE.....	6
I.4.Problématique .....	6
II.Démarche .....	7
III.Méthodes de mesure .....	8
III.1.Méthode électrique.....	8
III.1.1.Principe.....	8
III.1.2.Matériel utilisé.....	10
III.1.3.Manipulations.....	11
III.1.4.Exemple de résultat .....	12
III.2.Méthode magnétique .....	13
III.2.1.Principe.....	13
III.2.2.Matériel utilisé.....	15
III.2.3.Manipulations.....	16
III.2.4.Exemple de résultat .....	16
III.3.Méthode GPR.....	17
III.3.1.Principe .....	18
III.3.2.Matériel utilisé.....	18
III.3.3.Manipulations.....	19
III.3.4.Exemple de résultat .....	19
III.4.Méthode magnéto-tellurique .....	20
III.4.1.Principe.....	20
III.4.2.Matériel utilisé.....	20
III.4.3.Manipulations.....	21
III.4.4.Exemple de résultat .....	22
III.5.Comparaison des méthodes.....	22
Conclusion et perspectives .....	25
Glossaire.....	27
Bibliographie .....	28
Annexes .....	29

## Introduction

Afin d'assurer une plus grande sécurité électrique dans les élevages et d'essayer de résoudre certains problèmes de pathologie encore inexpliqués, un Groupe Permanent de Sécurité Electrique a été créé en 1999 par le ministère de l'agriculture et de la pêche.

Les symptômes observés dans les exploitations peuvent mettre en cause une influence de phénomènes électriques. C'est dans le but de formaliser une méthodologie d'analyse et de diagnostic électrique et environnemental mais également de mettre en œuvre des solutions concrètes pour éliminer les problèmes, qu'une convention de collaboration a été mise en place entre le Réseau de Transport d'Electricité et CISTEME.

L'année dernière une étude<sup>[7]</sup> permis de démontrer l'importance de la prise en compte du domaine environnemental (l'air, l'eau et le sol) pour identifier les sources ou les vecteurs des pathologies observées.

Le sol a en effet une importance capitale puisqu'il peut être la cause ou le vecteur de pathologies à deux niveaux.

Tout d'abord au niveau électrique, puisque les courants circulants dans le sol peuvent engendrer une nuisance pour l'animal. Mais également au niveau environnemental, puisque l'eau et les objets contenus dans le sol peuvent entraîner des troubles chez les animaux.

L'objectif de ce stage est dans un premier temps d'identifier différentes méthodes non destructives permettant d'obtenir des images des sols faisant ressortir les zones potentiellement dangereuses (chemins privilégiés des courants, présence d'eau, objets enterrés). Dans un second temps, ces méthodes devront être testées puis comparées afin d'identifier à terme laquelle est la mieux adaptée pour répondre à la problématique.

## I. Contexte :

### I.1. Présentation de CISTEME :

L'association CISTEME (Centre d'Ingénierie des Systèmes en Télécommunication, Electromagnétisme et Electronique) a été créée en 1995 par le professeur Bernard JECKO. Elle est basée sur le parc d'Estér Technopole à Limoges.

CISTEME est associé avec le laboratoire de recherche X-LIM département OSA (Ondes et Systèmes Associés). Une mission de CISTEME est d'aider au transfert de technologies, issues de la recherche appliquée développée à X-LIM, vers les entreprises. Mais CISTEME doit également contribuer à former des élèves ingénieurs ou des futurs techniciens au travers de stages de durée plus ou moins longue.

Les domaines d'activité développés par CISTEME sont :

- les réseaux sans fil et leurs services associés,
- les antennes intégrées,
- les systèmes Ultra Large Bande,
- la CEM,
- le bioélectromagnétisme<sup>1</sup>.

La figure 1 présente Pulsar qui a été élaboré pour l'armée par CISTEME. C'est un système Ultra Large Bande embarqué permettant l'obtention d'images pour la détection et la localisation de mines.

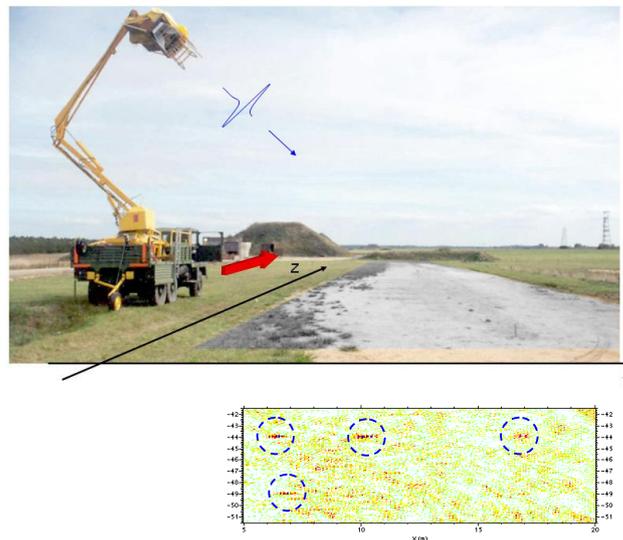


Figure 1 : Pulsar sondant un champ contenant des mines et exemple de résultat

Mon stage s'inscrit dans les deux derniers domaines : CEM et bioélectromagnétisme. Il est le fruit de l'accord entre CISTEME et le Réseau de Transport d'Electricité (RTE) de France.

### I.2. Présentation de RTE :

---

<sup>1</sup> Voir glossaire

RTE est le gestionnaire du réseau de transport d'électricité allant de 400 kV à 63 kV. Les missions de RTE sont de gérer les infrastructures de réseau, les flux d'électricité sur le réseau et de contribuer au bon fonctionnement du marché de l'électricité. Le réseau RTE transport plus de 500 milliards de kW/h sur plus de 100 000 km de lignes. La figure 2 présente le réseau RTE en janvier 2003.

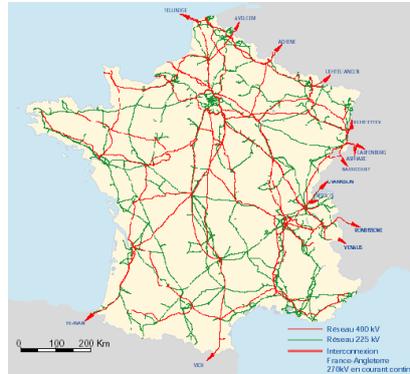


Figure 2 : Réseau RTE en janvier 2003

Vu la densité du réseau électrique Haute Tension, des lignes surplombent de nombreuses exploitations agricoles et sont quelques fois accusées de provoquer des troubles sur la santé des animaux.

### I.3.Présentation du protocole GPSE :

Le ministère de l'agriculture et de la pêche a mis en place en 1999 le Groupe Permanent de la Sécurité Electrique. Il a été réactivé le 29 novembre 2005. Son but d'assurer une plus grande sécurité électrique dans les élevages et de résoudre un certain nombre de pathologies encore inexpliquées chez certains éleveurs, où une influence des phénomènes électriques a été suspectée.

Lorsqu'il y a un problème avéré dans une exploitation, un protocole est signé entre le GPSE et l'éleveur. Il comporte des expertises dans différents domaines. Tout d'abord le domaine vétérinaire, puis le domaine zootechnique, et le domaine électrique. Depuis l'année dernière des études ont été réalisées afin d'intégrer un quatrième domaine : le domaine environnemental.

Mon stage s'inscrit dans les deux derniers domaines et vise à établir un mode opératoire permettant de diagnostiquer les pollutions contenues dans le sol et le sous-sol d'une exploitation.

### I.4.Problématique :

La présence d'objets métalliques, de cours d'eau, de failles géologiques<sup>2</sup> ou encore de strates<sup>3</sup> de structures différentes dans les sols peut provoquer des pollutions de différents types.

<sup>2</sup> Voir glossaire

<sup>3</sup> Voir glossaire

Tout d'abord au niveau électrique, puisque ces zones vont offrir une résistivité moins importante par rapport aux autres zones. Elles vont alors favoriser le passage de courants telluriques<sup>4</sup>. Ces courants peuvent se propager vers l'exploitation et en particulier vers la prise de terre. Du fait de la mauvaise équipotentialité entre les différentes structures de l'exploitation, une différence de potentiel va être créée et va être susceptible de traverser un animal qui toucherait deux structures à des potentiels différents.

Ensuite, cette présence peut provoquer des pollutions d'ordre environnemental. En effet, un objet métallique enfouis soumis aux eaux d'infiltration va se corroder. Cette corrosion pourra devenir un « milieu de culture » pour des bactéries éventuellement pathogènes. Mais elle libérera également des ions métalliques qui contamineront le sol.

L'eau polluée (par du métal, des engrais, des nitrates ou une pollution bactérienne par exemple) peut, par infiltration, soit contaminer un cours d'eau de surface, soit être adsorbée par l'herbe (la pollution sera alors concentrée dans cette dernière). Dans les deux cas, les animaux seront contaminés lorsqu'ils iront s'abreuver ou lorsqu'ils brouteront.

L'objectif de ce stage est de déterminer des méthodes non destructives permettant de trouver tout ce qui peut être source de pollution dans un sol (métaux, zones de résistivité faible...). On veut donc obtenir des images du sous-sol faisant ressortir les zones polluées mais également les chemins privilégiés des courants dans le sol (carte de résistivité).

## II. Démarche :

Lors du projet qui a précédé le stage, j'ai établi un cahier des charges<sup>5</sup> qui permettrait de répondre à notre problématique.

Il a fallu ensuite faire une recherche sur les différentes techniques utilisables. Pour cela, j'ai effectué des recherches internet sur les sites de sociétés réalisant des cartographies des sols, des sites de cours théoriques ainsi que des résultats de recherches ou de thèses sur le sujet. Lors de ces recherches j'ai recherché les méthodes les plus utilisées pour des cas similaires, leur principe, leurs applications, leur rapidité d'exécution...

Cette étude a permis de faire ressortir quatre grandes sortes de méthodes qui semblaient correspondre à notre cahier des charges (méthode magnétique, magnéto-tellurique, électrique et GPR) ainsi que d'autres méthodes qui semblaient plus difficiles à mettre en place.

J'ai ensuite recherché des moyens de location et/ ou de prêt de matériel pour tester les méthodes identifiées précédemment.

Il a fallu alors établir des essais à réaliser pour tester les méthodes et les comparer entre-elles. Nous avons pensé à deux sortes d'essais : soit réaliser des cartographies de sols « connus » avec éventuellement des objets déjà enterrés (canalisations par exemple), soit réaliser des mesures comparatives entre un même sol contenant ou non des objets enterrés (réaliser une mesure sur le terrain, puis y enfouir des objets et recommencer les manipulations).

---

<sup>4</sup> Voir glossaire

<sup>5</sup> Voir annexe 1

Pour réaliser ces essais, il a fallu trouver des terrains d'expérimentation. Lors du projet nous avons pensé réaliser ces essais sur un bac à sable qui permettrait d'avoir un environnement contrôlé. Mais presque toutes les méthodes se sont avérées trop encombrantes ou devaient fonctionner sur un sol supposé infini.

Nous avons donc choisi de réaliser des mesures sur un sol extérieur, homogène et assez vaste, dans lequel il serait facile et rapide d'enterrer des objets : une plage.

Après avoir obtenu des autorisations, nous avons ainsi pu réaliser des essais sur la plage Santrop à St Pardoux (23) et sur une plage du Palais sur Vienne (87). Les plages étant artificielles, nous n'avons pu enterrer les objets que de quelques centimètres.

M. Beillard nous a alors proposé de réaliser des essais sur son terrain à La Brugerie (Séreillac, 87). En effet, sur ce terrain nous avons pu enterrer des objets<sup>6</sup> (et les laisser enterrés tout le long du stage afin d'avoir le même sol pour toutes les manipulations), le terrain contenait également des tuyaux enterrés et deux types de sol (goudronné et recouvert de pelouse).

Les terrains d'expérimentation sont répertoriés en annexe 3.

Afin de réaliser des cartographies dans terrains, nous avons également recherché des méthodes de repérage. Nous avons utilisé un GPS ainsi qu'un décamètre.

Après traitement des mesures, nous pourrions ainsi réaliser des cartographies des terrains, les interpréter et conclure sur l'utilisation de chaque méthode.

### III.Méthodes de mesure :

#### III.1.Méthode électrique :

##### III.1.1.Principe :

La prospection électrique est une technique d'exploration géophysique<sup>7</sup> basée sur les variations de résistivité du sous-sol.

Il s'agit de la première technique d'exploration des sous-sols. Elle a été utilisée pour rechercher des minerais métalliques mais aussi des cavités et des fluides. Depuis longtemps elle est largement mise en œuvre pour des prospections pétrolières et minières.

Cette méthode consiste à injecter grâce à deux électrodes un courant électrique d'une intensité connue dans le sol. La différence de potentiel induite est mesurée entre deux autres électrodes (voir figure 3<sup>[6]</sup>). On obtient par la loi d'Ohm la valeur de la résistivité entre les électrodes.

---

<sup>6</sup> Voir annexe 2

<sup>7</sup> Voir glossaire

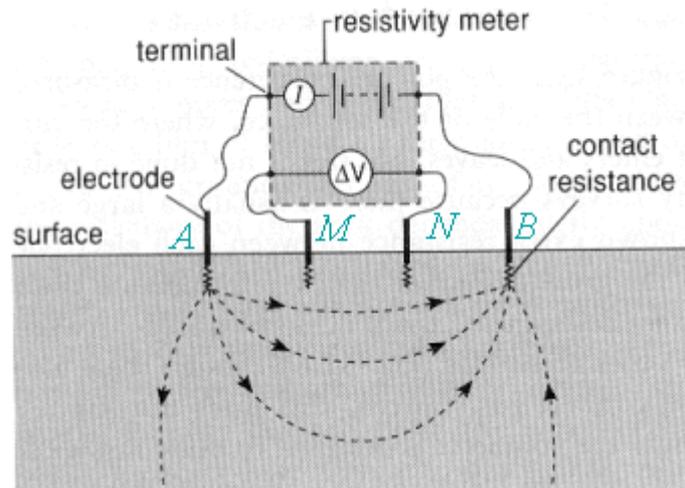


Figure 3 : Principe de prospection électrique

Comme on le voit sur la figure 3, en injectant un courant connu dans les électrodes A et B et en mesurant la différence de potentiel entre les électrodes M et N, on peut alors connaître la résistivité apparente du sol grâce à la formule en figure 4.

$$V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \frac{1}{MA} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{NA} + \frac{1}{NB} \right]$$

Figure 4 : Formule donnant la résistivité du sol

Avec :

- $V_M - V_N$  : différence de potentiel entre N et M en [V],
- $\rho$  : résistivité du sol en [Ohm.m],
- $I$  : intensité du courant injecté en [A],
- $MA, MB, NA, NB$  : distances entre les électrodes en [m].

La théorie nous dit que la résistivité apparente correspond à une moyenne des résistivités des différentes couches de sols sur une profondeur allant jusqu'à environ 75 % de l'écartement entre les électrodes<sup>[4]</sup>. De plus, on peut remarquer que la valeur de la résistivité dépend de la configuration géométrique utilisée.

En effet, il existe plusieurs configurations, nous nous intéresserons plus particulièrement aux trois plus utilisées : Wenner, Schlumberger et Dipôle-dipôle.

- Dispositif de Wenner :

C'est la méthode la plus simple. En effet, l'espacement entre les différentes électrodes est identique (voir figure 5).

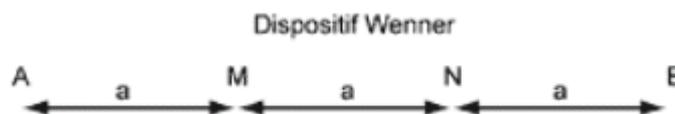


Figure 5 : Configuration des électrodes, dispositif Wenner

La formule de calcul de la résistivité (voir figure 4) est simplifiée et devient :

$$\rho = 2\pi.A.(\Delta V/I)$$

Avec:

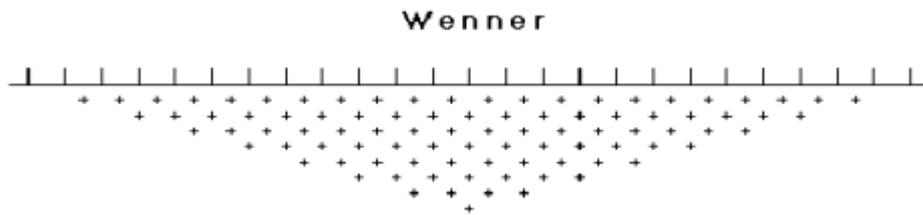
- A: distance entre les électrodes en [m],
- $\Delta V$ : différence de potentiel entre N et M en [V],
- I : intensité du courant injecté en [A],
- $\rho$  : Résistivité du sol en [Ohm.m].

Les avantages et les inconvénients de ce dispositif, ainsi que les autres dispositifs, sont présentés en annexe 4 ainsi que les sensibilités spatiales de chaque dispositif en annexe 5<sup>[1]</sup>.

- Méthodes de mesurage :

Pour utiliser ces dispositifs, on peut utiliser différentes méthodes. Celle que nous allons utiliser est appelée méthode du « panneau électrique ».

Elle consiste à planter un grand nombre d'électrodes le long d'une droite. Un système de commande va alors choisir les électrodes dans lesquelles il injectera un courant et dans lesquelles il mesurera la différence de potentiel. Cela permet d'effectuer les dispositifs détaillés dans la partie précédente sur plusieurs points et à plusieurs profondeurs : on obtient ainsi un panneau de résistivité du sol. Sur la figure 6, on peut voir les points de mesures de résistivités pour la méthode Wenner.



*Figure 6 : Points de mesure d'un panneau électrique avec méthode Wenner*

Il existe d'autres méthodes qui sont présentées en annexe 6.

### III.1.2.Matériel utilisé :

Nous avons utilisé le système Terrameter SAS 4000, Abem LUND loué chez ABEM France (voir annexe 7).

L'unité de base est le Terrameter SAS 4000, il enregistre les lectures et moyenne les résultats de façon continue. Il permet également de piloter le système d'acquisition (choix du programme...).

Le système ABEM LUND peut s'utiliser en combinaison avec le Terrameter. C'est un système multi électrodes qui permet de réaliser des panneaux électriques automatiquement. Il a un temps de cycle d'injection de courant de 2,6 s.

La figure 7 présente le système Terrameter et LUND associés.



Figure 7 : Système Terrameter SAS 4000- ABEM LUND

Le système est alimenté par une batterie de voiture (voir figure 7). Ce système consomme beaucoup d'énergie, il faut donc recharger la batterie complètement après une journée de manipulations.

Le système LUND est relié à deux fils jaunes connectés aux électrodes. Habituellement ce système est utilisé avec 64 électrodes et sont connectées comme sur la figure 8.

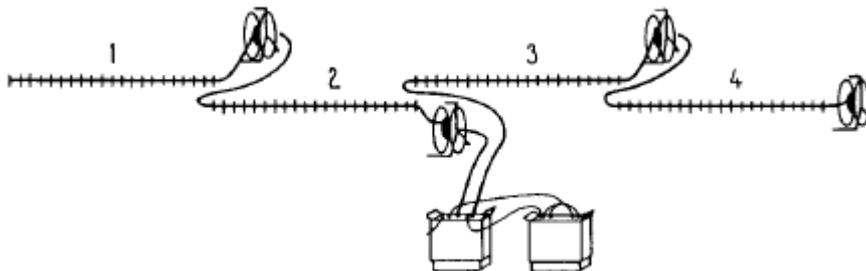


Figure 8 : Câblage des électrodes

Nous avons utilisé un système avec seulement 32 électrodes puisque nos terrains de mesure étaient au maximum de 40 m.

Le système utilisé délivre des courants et des tensions élevées (pouvant aller jusqu'à 1 A et 400 V dans la limite d'une puissance de 100 W). Les mesures de précaution sont récapitulées en annexe 23.

### III.1.3.Manipulations :

- Repérage des mesures :

Pour pouvoir réaliser un repérage dans l'espace des mesures effectuées, nous avons utilisé un décimètre. L'opération consiste à choisir le plus judicieusement possible un axe X et un axe Y pour effectuer les mesures (parallèlement à un grillage par exemple). Les piquets sont plantés à des intervalles réguliers (dans notre cas 1 m) le long du décimètre tendu selon l'axe X. Les coordonnées du panneau électrique sont alors déterminées (dans ce cas, le panneau va de [0 ;0] à [31 ;0] (en m).

Pour réaliser la seconde ligne, le décimètre est décalé selon l'axe des Y du pas choisit et on réitère l'opération.

Les lignes que nous avons effectuées par rapport à l'axe X et l'axe Y sont visibles sur la figure 9.

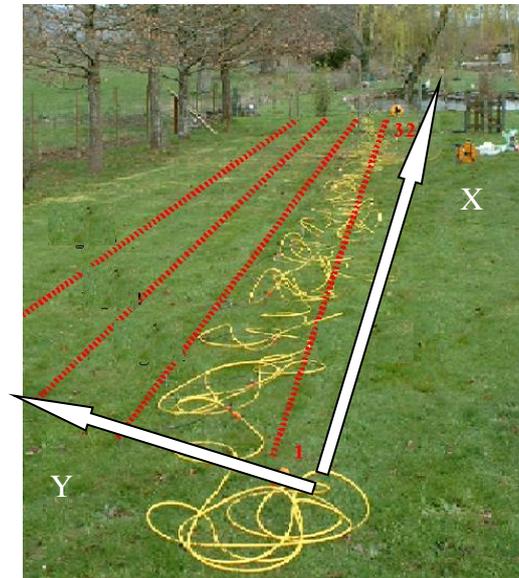


Figure 9 : Lignes de panneau électrique selon les axes X et Y

- Acquisition des mesures et traitements :

Après avoir planté les électrodes comme expliqué précédemment, le Terrameter SAS 4000 est mis en route et une acquisition de données selon un dispositif (Wenner, Schlumberger ou Dipôle-dipôle) est lancée.

Une acquisition de mesures sur un panneau électrique dure environ 30 minutes.

On répète l'opération en décalant le panneau jusqu'à couverture de la zone.

Le traitement des données est expliqué en annexe 8.

- Manipulations effectuées :

Nous avons réalisé des essais sur deux plages : la plage Santrop à St Pardoux (23) et la plage du Palais sur Vienne (87). Malheureusement, au moment de l'exploitation des données il s'est avéré qu'elles étaient inutilisables. En effet, le sable (pourtant très mouillé) n'assurait pas un assez bon contact avec les électrodes, beaucoup de données se sont donc révélées aberrantes et ont donc dû être éliminées (de 40% à 60% environ).

Nous avons ensuite réalisé des essais à La Brugerie sur la zone où les objets avaient été enterrés ainsi que la zone située derrière la maison (contenant un tuyau en PVC enterré entre 1 et 2 m de profondeur). Les détails de ces manipulations sont en annexe 9.

#### III.1.4.Exemple de résultat :

La figure 10 est le résultat obtenu une ligne avec la méthode Wenner.

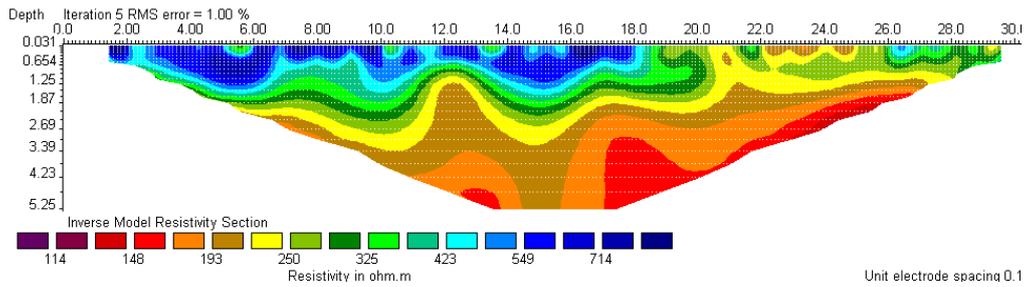


Figure 10 : Résultat obtenu sur une ligne avec le dispositif Wenner

Sur ce panneau, les valeurs de résistivités semblent en contradiction avec les résultats attendus. En effet, lors des mesurages, le terrain était très humide (il avait plu toute la semaine précédente), et la résistivité est cependant plus importante en surface qu'en profondeur (le sol à partir d'environ 0,6 m est constitué de tuffe, résistant). De plus, il apparaît des « lobes » de résistivité ou de conductivité en surface qui semblent correspondre à la position des électrodes. Cela voudrait donc dire que l'implantation des électrodes, et donc leur présence, influence la mesure !

On peut également noter que l'on n'observe pas d'anomalies correspondantes à la présence du disque métallique (à X=16 m) et à la barre métallique (à X=20 m) enterrés. Il en est de même sur les autres lignes, nous pensons que les objets que nous avons enterrés étaient trop petits pour être clairement détectés par cette méthode.

Tout cela montre que, bien que cette méthode offre une acquisition simple à réaliser, elle demande une formation et des années d'expériences afin de maîtriser totalement les traitements ainsi que l'interprétation.

C'est d'ailleurs pour cela que nous avons demandé à un ancien géophysicien, M. Antoine Bouvier<sup>[10]</sup> de nous donner son interprétation pour les résultats obtenus avec différentes méthodes sur une ligne (voir annexe 10).

## III.2.Méthode magnétique :

### III.2.1.Principe :

La prospection magnétique est une technique d'exploration géophysique basée sur les variations de résistivité du sous-sol, détectées par leur effet sur un champ magnétique.

Le dispositif émetteur peut être une boucle de courant générant un champ magnétique qui induit un courant dans le sol. Le dispositif récepteur est une deuxième bobine qui récupère le champ magnétique résultant. C'est le principe utilisé pour le fonctionnement de l'EM34, proposé chez ABEM, utilisé lors d'un précédent stage par M. Julien Fougeyrollas<sup>[7]</sup> (voir figure 11).



Figure 11 : M. Julien Fougeyrollas équipé de la partie réceptrice de l'EM34

La figure 12<sup>[8]</sup> illustre le principe de fonctionnement de cette méthode. Un courant alternatif circule dans une bobine émettrice (Tx). Un champ magnétique primaire  $H_p$  est alors généré. Soit un corps soumis à  $H_p$ , des courants de Foucault sont alors générés dans ce corps et sont la source d'un champ secondaire  $H_s$ . La bobine réceptrice Rx mesure  $H_p$  et  $H_s$ .

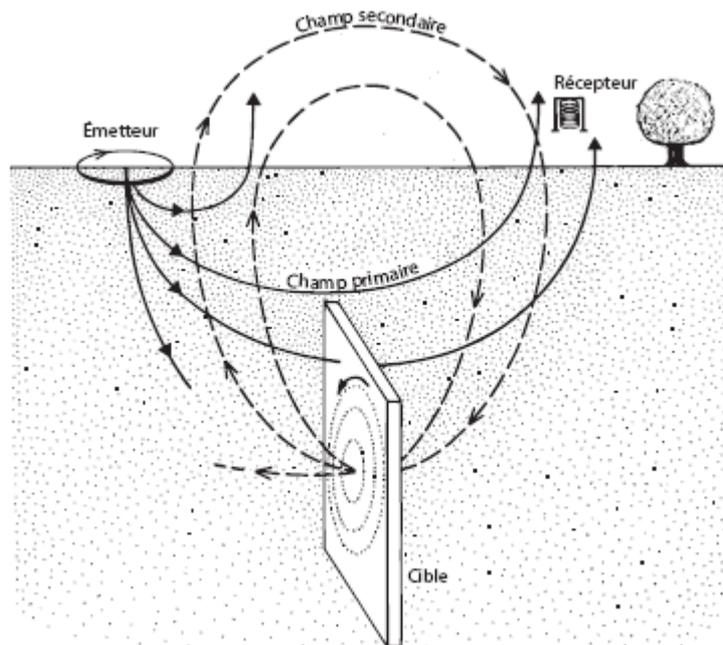


Figure 12 : Principe de la méthode magnétique

La formule liant la conductivité aux champs magnétiques est en annexe 11.

Si le milieu est homogène (ce qui n'est jamais le cas), la conductivité vraie est mesurée. Si le milieu est hétérogène, la conductivité est dite apparente et correspond à une moyenne des conductivités des différentes couches de sol au point de mesurage.

Il existe deux principaux modes de fonctionnement pour la méthode magnétique, le mode dipôle vertical et le mode dipôle horizontal.

En mode dipôles verticaux, les bobines sont orientées perpendiculairement au sol tandis qu'en mode dipôles horizontaux, elles sont orientées parallèlement au sol. Cette différence d'orientation, entraîne des mesures avec des sensibilités très différentes en fonction de la profondeur<sup>8</sup>.

De plus, la profondeur d'investigation en mode vertical est deux fois supérieure à celle en mode horizontal<sup>[8]</sup>.

### III.2.2. Matériel utilisé :

Le matériel que nous avons utilisé est un EM31, loué à ABEM France<sup>9</sup>. Ce dernier est composé d'une barre de 4 m que l'on porte en bandoulière (voir figure 13).



*Figure 13 : Opératrice réalisant des mesures avec l'EM31*

Dans la partie située derrière l'opératrice est contenue la bobine émettrice et dans la partie située devant elle, la bobine réceptrice. Pour acquérir les données, on dispose, au niveau de la hanche d'un « polycorder ». Ce dernier peut être séparé de l'appareil après mesures pour exporter les données vers un ordinateur.

L'EM31 travaille à une fréquence de 9.8 kHz et ses bobines sont espacées de 3.6m. Cela permet de sonder le sol à une profondeur d'environ 6 m en mode dipôle vertical et de 3 m en mode dipôle horizontal<sup>[8]</sup>.

Les mesures s'effectuent automatiquement tous les intervalles de temps  $t$  définis. L'acquisition des mesures peut se faire soit sur la conductivité apparente du sol en mS/m soit sur le composant inphase en ppt (parties par millier), soit les deux en même temps. Le composant inphase correspond au rapport du champ induit sur le champ émit.

Lorsque l'appareil est en fonctionnement, personne ne doit s'approcher de la bobine émettrice car cette dernière émet un champ d'une intensité environ 6 fois supérieure aux valeurs données dans la recommandation du Conseil de l'Union Européenne 199/519/CE et du Décret

---

<sup>8</sup> Voir annexe 12

<sup>9</sup> Voir annexe 7

Français pour la population générale<sup>10</sup>. Les mesures de précaution sont détaillées en annexe 23.

### III.2.3.Manipulations :

- Repérage des mesures :

Pour repérer nos mesures, nous avons utilisé un GPS TRIMBLE<sup>11</sup>. Ce dernier permet suite à des traitements et en payant un abonnement de connaître des positions très précisément.

Nous avons utilisé ce GPS sans traitement des données, ce dernier permet alors d'obtenir une précision d'environ 1 m sur les mesures.

Les positions repérées avec le GPS constituent seulement une indication approximative de la position. Nous avons réalisé également des mesures au décimètre de certaines lignes afin de les ajuster avec les données GPS.

- Acquisition et traitements :

Avant de réaliser des mesures, il faut baliser la zone à cartographier. Comme précédemment, un axe X et un axe Y sont choisis arbitrairement. Des lignes de mesures sont réalisées le long de l'axe X en ayant préalablement configuré le GPS ainsi que l'EM31 (choix du mode : horizontal ou vertical, mesure du composant inphase I et/ou de la conductivité Q...).

A la fin de chaque ligne, l'EM31 est reconfiguré afin d'imposer un nouveau numéro de ligne. On choisit l'espacement entre les lignes, dans notre cas il est d'environ 3 m.

Les traitements sont expliqués en annexe 15.

- Manipulations effectuées :

Nous avons réalisé des manipulations sur différents terrains. Tout d'abord sur le terrain stabilisé de La Borie, en disposant des objets métalliques sur le sol. Puis, sur une plage du Palais sur Vienne, pour étudier la réponse du système à proximité d'eau mais également vis à vis d'objets enterrés. Nous avons également réalisé des essais devant le bâtiment Mesures Physiques à Limoges afin d'étudier les variations de sols ainsi que l'influence de l'inclinaison du système (parallèlement au sol ou à 45° d'inclinaison). Enfin, nous avons effectué un grand nombre de mesures à La Brugerie, sur la partie du terrain contenant les objets métalliques enterrés, sur celles contenant des tuyaux en PVC enterrés etc...

Tous ces résultats sont en annexe 16.

### III.2.4.Exemples de résultats :

Lorsqu'une seule ligne de mesure est réalisée, on obtient un graphique représentant le composant inphase et la conductivité en fonction de la distance. Sur la figure 14, ces deux paramètres augmentent en se rapprochant de l'eau. Ce phénomène est facilement explicable. En effet, la conductivité de l'eau étant supérieure à celle du sable, en passant sur du sable de plus en plus humide la conductivité apparente du sol augmente.

---

<sup>10</sup> Voir annexe 13

<sup>11</sup> Voir annexe 14

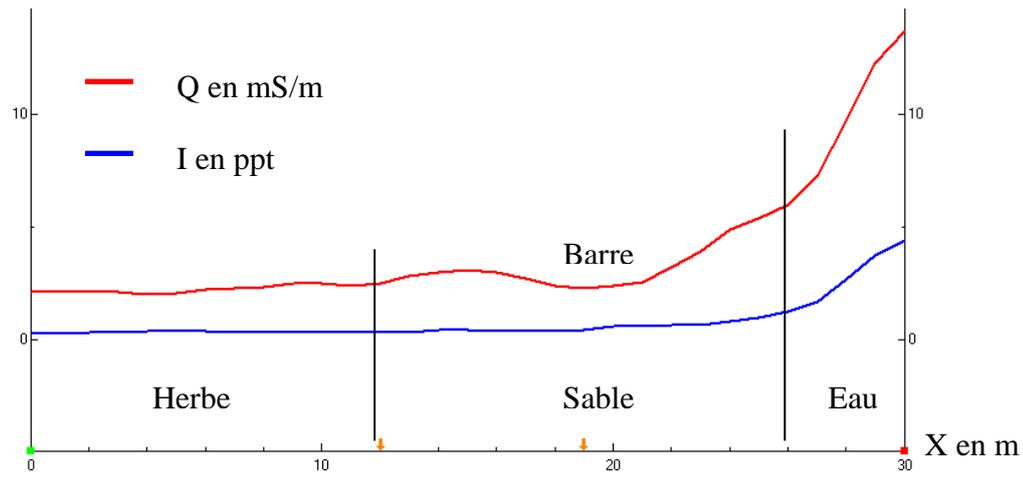


Figure 14 :  $Q$  et  $I$  en fonction du déplacement de l'opérateur vers l'eau

Sur cette figure, la conductivité augmente sensiblement en passant de l'herbe au sable puis diminue à proximité de la barre métallique (posée sur le sable), et augmente énormément en s'approchant de l'eau. Le composant inphase, lui, ne varie qu'à proximité de l'eau.

En réalisant plusieurs lignes parallèles, on obtient une cartographie du terrain en 3D. Sur la figure 15 est représentée l'évolution de la conductivité du sol sur le terrain contenant des objets métalliques enterrés.

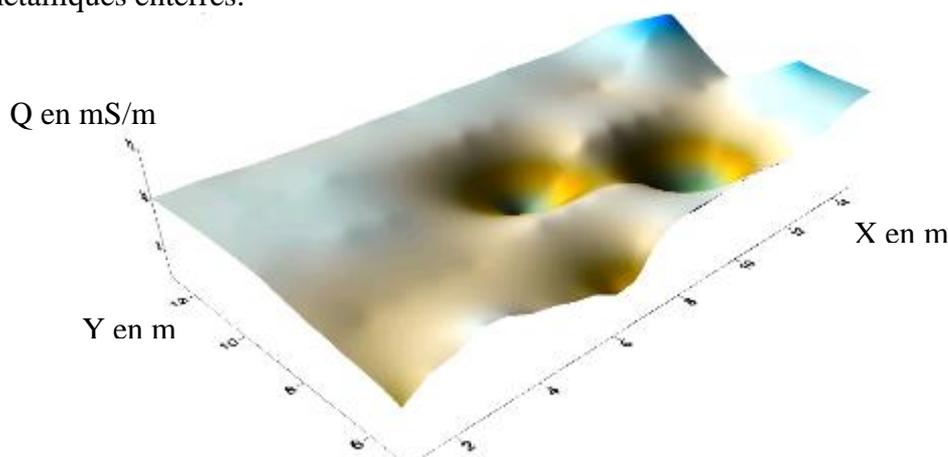


Figure 15 : Conductivité du sol en fonction de  $X$  et de  $Y$

Sur cette figure, la conductivité du sol diminue à proximité des objets métalliques enfouis, ce qui peut sembler absurde étant donné que le métal est plus conducteur que le sol. Il en ressort que cette méthode permet de connaître approximativement l'emplacement d'objets métalliques enfouis.

Le long de l'axe des  $Y$ , à  $X=14$  m, la conductivité augmente. Cela est dû à la présence en surface d'un grillage.

Cette méthode, rapide à utiliser et nécessitant peu de traitements semble idéale. Cependant, certaines mesures sont difficiles à interpréter (surtout en mode horizontal), et surtout elle ne fait peu ou pas ressortir les variations de conductivité des sols, ce qui la rend inadaptée pour la détection des chemins privilégiés des courants telluriques.

### III.3.Méthode GPR :

### III.3.1.Principe :

Le GPR signifie Ground Penetrating Radar, appelé également radar géologique. La figure 16 symbolise le fonctionnement d'un GPR.

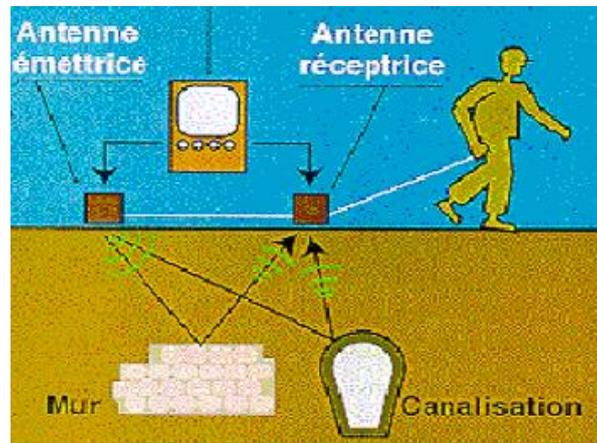


Figure 16 : Principe de fonctionnement d'un GPR

Des impulsions courtes d'onde électromagnétique haute fréquence (MHz à GHz, dans notre cas 250 Mhz) sont envoyées dans le sol. Lorsqu'elles rencontrent des milieux de constantes diélectriques différentes (un objet enfouis par exemple), une partie du signal est renvoyée vers la surface et enregistrée par l'antenne réceptrice du GPR. Plus la fréquence d'émission est élevée, plus la précision est grande, mais moins le signal pénètre profondément.

### III.3.2.Matériel utilisé :

Le matériel utilisé est un RAMAC GPR X3M prêté par le laboratoire de recherches Xlim de la faculté de Sciences de Limoges<sup>12</sup>.

Il est constitué de trois antennes de 250, 500 et 800 MHz et piloté par un ordinateur portable (voir figure 17).



<sup>12</sup> voir annexe 7

*Figure 17 : Opératrice équipée du GPR avec l'antenne de 250 MHz*

L'antenne qui a été le plus utilisée lors de nos essais a été l'antenne de 250 MHz puisque c'est celle qui permet de sonder à la profondeur la plus élevée. Cependant, nous avons également fait des essais avec l'antenne de 500 MHz mais pas avec l'antenne de 800 MHz (les fréquences les plus élevées sont rapidement absorbées par le sol et ne pénètrent pas profondément).

Nous avons effectué une étude<sup>13</sup> sur un simulateur afin de mieux connaître le signal émis par les antennes.

Il ressort de cette étude que l'antenne GPR n'émet pas à 250 MHz mais plutôt vers 125 MHz avec une fréquence d'impulsions de 100 kHz et qu'elle est très peu directive (elle émet presque identiquement sur les côtés que vers le sol). Les mesures de précaution sont détaillées en annexe 23.

### III.3.3.Manipulations :

- Repérage des mesures :

Le GPR est équipé d'une roue codeuse permettant de situer les mesures le long d'une ligne. Comme pour les autres méthodes, des axes X et Y sont choisis arbitrairement et des lignes de mesures parallèles sont réalisées en suivant l'axe X.

- Acquisition et traitements :

La configuration ainsi que l'acquisition des images sont commandées par l'ordinateur portable. L'intervalle de mesure ainsi que des filtres qui seront appliqués lors de la mesure ou en post-traitement sont paramétrables.

Chaque ligne est enregistrée sous un nouveau nom de fichier. Lors de la mesure, le logiciel RAMAC GroundVision permet de visualiser l'image en simultané.

Les images recueillies lors des mesures peuvent être traitées grâce à des filtres sur le logiciel RAMAC GroundVision. Ces filtres sont assez délicats à utiliser et demandent des connaissances sur le sol étudié<sup>14</sup>.

Le logiciel Reflexw permet également de réaliser des filtrages mais également de reconstituer une image en 3D du sol en faisant ressortir les anomalies. Malheureusement, je n'ai pas réussi à utiliser ce logiciel (problème au niveau du transfert des données).

- Manipulations effectuées :

Nous avons réalisé des essais sur un bac à sable à Feytiat afin de déterminer la zone aveugle<sup>15</sup> du GPR. Des essais ont également été réalisés sur la plage de St Pardoux ainsi qu'à La Brugerie. Toutes ces manipulations sont détaillées en annexe 18 et 20.

### III.3.4.Exemple de résultat :

En réalisant une ligne de mesure, on obtient une image du sol (voir figure 18).

---

<sup>13</sup> voir annexe 17

<sup>14</sup> Voir annexe 19

<sup>15</sup> Voir glossaire

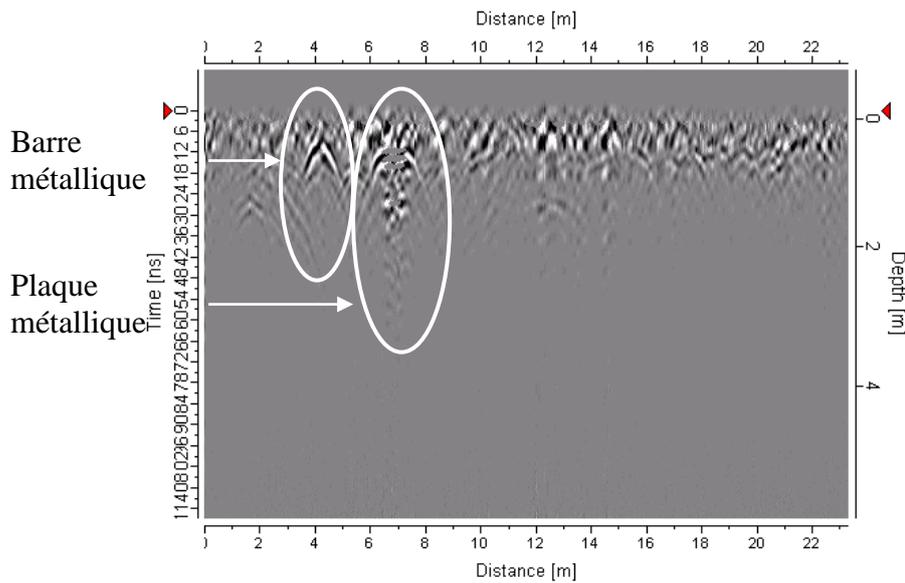


Figure 18 : Image GPR obtenue en passant sur les objets enterrés

Il apparaît deux hyperboles de migrations<sup>16</sup> caractéristiques des images GPR. La première est due à la barre métallique enfouie et la seconde à la plaque métallique (hyperbole plus large avec interférences au centre). De plus, la profondeur indiquée par le GPR correspond à peu près à la profondeur réelle d'enfouissement (40 à 50 cm).

Cependant d'autres petites hyperboles apparaissent mais elles sont difficilement explicables. Cette méthode demande une expérience au niveau du traitement (filtres) mais également pour l'interprétation des images.

Enfin, il semble assez difficile avec cette méthode de déterminer des zones moins résistives, favorisant le passage du courant.

### III.4.Méthode magnéto-tellurique :

#### III.4.1.Principe<sup>[5]</sup> :

La méthode de prospection magnétique au sol s'appuie sur la mesure des composantes du champ magnétique terrestre et les variations occasionnées localement par les différences de susceptibilité magnétique des terrains et des roches.

La susceptibilité est la propriété qu'ont certains matériaux à devenir aimantés en présence d'un champ magnétique ambiant et à créer un champ magnétique secondaire. La plupart des minéraux ont une susceptibilité très faible ou nulle sauf la magnétite ( $Fe_3O_4$ ) et quelques minéraux rares. La magnétite est présente dans presque toutes les roches et sa susceptibilité est extrêmement élevée. Les propriétés magnétiques des matériaux sont quasiment exclusivement liées à ce minéral.

#### III.4.2.Matériel utilisé :

<sup>16</sup> Voir glossaire

Nous avons utilisé un champmètre C.A.42 prêté par la société Chauvin Arnoux<sup>17</sup>. Ce dernier est un mesureur de champ électrique et magnétique BF principalement destiné à contrôler l'émissivité de tout appareillage électrique.

Nous l'utiliserons uniquement dans sa fonction de mesure de champ magnétique. Il est constitué de d'une sonde interne mesurant des champs de 10 Hz à 30 kHz ainsi que de 3 sondes externes. Nous utiliserons le champmètre équipé de la sonde externe MF 05 puisque c'est celle qui permet de mesurer le champ magnétique terrestre ( $f=0$  Hz).

Le champmètre équipé de la sonde MF 05 est sur la figure 19.

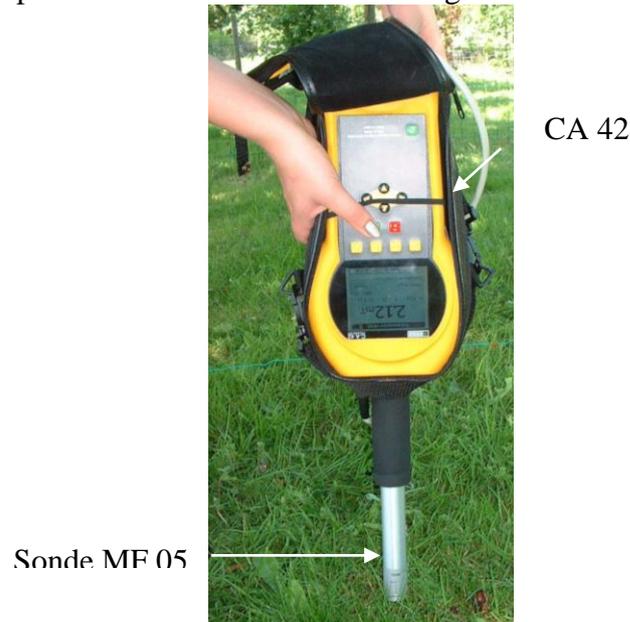


Figure 19 : Réalisation d'un mesurage avec le CA 42

#### III.4.3.Manipulations :

- Repérage des mesures

Pour réaliser une cartographie, nous avons utilisé un décimètre, permettant de quadriller la zone à étudier. Comme avec les autres méthodes, un axe X et un axe Y sont choisis puis le décimètre est tendu le long de l'axe X. Les mesures sont alors réalisées le long de cette ligne avec l'intervalle de mesure choisi (dans notre cas 50 cm). Après avoir réalisé la première ligne, le décimètre est décalé de l'intervalle de mesure choisi, le long de l'axe Y, et on réalise la deuxième ligne de mesures. L'opération est répétée jusqu'à couverture de la zone.

- Acquisition et traitements

On réalise des mesures en configurant le CA 42 avec le filtre DC, qui permet de mesurer le champ continu, et en enregistrant la valeur moyenne (RMS) du champ magnétique total en  $\mu\text{T}$ .

Le CA 42 a une fonction de mise en mémoire des données. A chaque mesure est attribuée une lettre suivie de trois chiffres. On repère donc les lignes avec une lettre et les points sur la ligne avec les chiffres, par exemple ligne 3, point 10 sera enregistré C 009.

---

<sup>17</sup> Voir annexe 7

Les données sont exportables sur PC grâce au logiciel Log42 mais il faut les utiliser avec un logiciel de représentation 3D ou 2D pour obtenir une cartographie (comme le logiciel Surfer ou Excel).

- Manipulations effectuées

Des essais ont été réalisés sur le terrain de La Brugerie contenant des objets enterrés ainsi que sur des zones présentant des différences de surface (herbe, goudron)<sup>18</sup>.

#### III.4.4.Exemples de résultats :

Les résultats obtenus sont peu concluants, comme on peut le voir sur la figure 20 qui représente l'évolution du champ magnétique sur la zone contenant des objets enterrés.

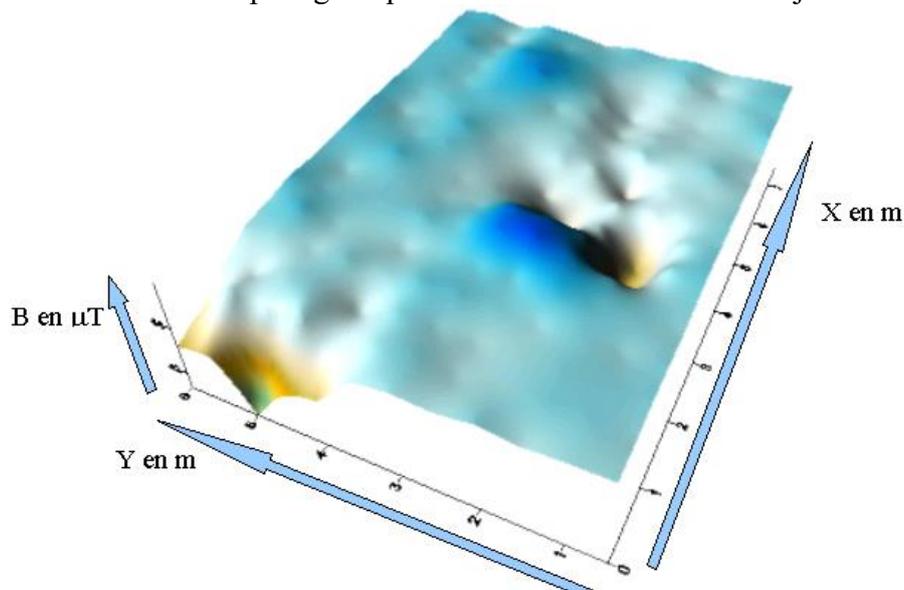


Figure 20 : Evolution du champ magnétique total sur la zone contenant des objets enterrés

Le champ magnétique total varie entre 41  $\mu\text{T}$  et 46  $\mu\text{T}$  sur toute la zone. Il apparaît trois petits pics de baisse de conductivité qui pourraient être, à première vue, apparentés à la présence des objets enfouis. Cependant, en comparant les coordonnées des pics et des objets ainsi qu'en étudiant leurs formes (plaque rectangulaire, disque, barre...), il s'avère que ces anomalies ne doivent pas être dues à la présence des objets. Les différentes anomalies ne sont pas explicables d'après nos connaissances, peut-être sont-elles dues à des perturbations du champ magnétique ?

Afin de pouvoir éliminer ces perturbations, il est préconisé de réaliser des mesures en les soustrayant aux valeurs mesurées simultanément sur une station de référence. Cette différence serait alors le reflet de la déformation des lignes de champ au point de mesure. Il est également important de noter que ce champmètre n'a pas été spécifiquement conçu pour réaliser des mesures géophysiques.

#### III.5.Comparaison des méthodes :

---

<sup>18</sup> Voir annexe 21

<b>Méthodes</b>	<b>Vitesse de mesurage</b> (temps indicatif pour la réalisation d'une ligne de mesures de 32 m)	<b>Interférences</b>	<b>Traitement des mesures</b>	<b>Interprétation des résultats</b>	<b>Réponse à la problématique ?</b>
<b>Electrique</b>	Basse (30 min)	Sol humide ou trop sec (sable)	Complexe	Délicate, supposant formation et expérience	Peut-être si l'on a une formation poussée
<b>Magnétique</b>	Elevée (1 min)	Objets métalliques en surface, lignes sous tension	Simple	Assez simple pour le mode vertical, délicate pour le mode horizontal	Oui pour la détection de métaux enfouis et l'eau en surface Peut-être si l'on a une formation pour les zones moins résistives ?
<b>GPR</b>	Moyenne (5 min)	Proximité d'objets en surface	Complexe	Délicate, supposant formation et expérience	Oui pour la détection d'objets enfouis, mais peu ou pas pour la détection de zones moins résistives
<b>Magnéto-tellurique</b>	Moyennement élevée (3min)	Bruit de fond	Simple	Matériel non adapté, variations infimes	Matériel non adapté

*Tableau 1 : Comparaison des méthodes expérimentées*

Comme on le voit dans le tableau 1, aucune méthode ne répond totalement à notre problématique.

La méthode magnéto-tellurique que nous avons utilisée ne donne aucun résultat concluant. L'utilisation d'un seul champmètre pour identifier les zones « à risque » n'est pas concluante. Cependant, il est possible, qu'en utilisant un appareil dédié à l'étude des sols ainsi qu'en utilisant une méthode soustractive par rapport à une référence, que de bons résultats soient obtenus.

En ce qui concerne la méthode électrique, elle présente le grand désavantage d'être très lente. De plus, elle nécessite une formation spécialisée ainsi que de l'expérience aussi bien pour le traitement que pour l'interprétation. De plus, lors de nos mesures, nous avons remarqué un problème au niveau des électrodes qui pourraient être dues à un terrain trop humide. L'humidité du sol a en effet une influence sur les mesures et, comme on peut le voir dans certaines études scientifiques. Mais, nous avons également remarqué que lorsque le sol était

trop sec, il y avait un mauvais contact sol-électrodes, ce qui entraîne une élimination de beaucoup de valeurs et, souvent, une impossibilité d'interprétation. Il est préconisé de réaliser des mesures sur le même terrain à différentes époques de l'année (hiver et été par exemple) afin de mieux pouvoir les interpréter.

La méthode GPR quant à elle, demande également une formation ainsi que de l'expérience afin de pouvoir maîtriser les paramètres de traitement ainsi que l'interprétation. Lors de nos manipulations, nous n'avons pas identifié de différences de résistivité des sols, cependant les géophysiciens confirmés arrivent à détecter les différentes couches de sols à partir de nombreux traitements de ces images.

Enfin, la méthode magnétique, qui à mon avis réunit le plus d'avantages, puisque rapide, nécessitant peu de traitements et étant assez facile à interpréter, ne répond cependant pas totalement à notre problématique. Tout d'abord, nous n'arrivons pas à expliquer les résultats obtenus en utilisant le mode horizontal. D'un autre côté, en utilisant le mode vertical, nous avons réussi à détecter les métaux enfouis mais pas les objets en PVC. Cette méthode permet également de détecter la présence d'eau en surface, mais nous n'en avons pas détecté en profondeur. Je pense qu'avec une courte formation et explication fournie par un professionnel, nous pourrions utiliser cette méthode.

## Conclusion et perspectives

L'étude et la comparaison de ces différentes méthodes nous a montré que la géophysique et l'étude des sols en général étaient difficilement accessibles aux novices que nous sommes.

En effet, mis à part la méthode magnéto-tellurique qui n'a pas fonctionné sûrement parce que nous n'avions pas un matériel adapté, les autres méthodes nécessitent une formation plus ou moins poussée.

Les méthodes électrique et GPR nécessitent des traitements lourds et leurs interprétations sont très délicates.

La méthode magnétique, bien que donnant des résultats concluants sur quelques aspects de la problématique (détection du métal, de l'eau...), reste toujours assez obscure notamment pour la détection de zones moins résistives.

Cependant, il semble qu'un forage permettrait de pouvoir mieux expliquer les résultats obtenus (notamment pour le panneau électrique) et de faire correspondre les anomalies détectées aux différentes couches de sol.

Dans un second temps, il est également envisageable de tester d'autres méthodes [2,3,4,5], moins utilisées, comme par exemple la réflexion sismique<sup>19</sup>. Mais il semble assez évident que l'expérimentation de ces nouvelles méthodes rencontreraient le même problème que lors de ce stage : le manque d'expérience et de formation.

Il serait donc intéressant de rencontrer des professionnels, comme Mr. Antoine Bouvier<sup>[10]</sup>, qui nous apporteraient la connaissance qu'il nous manque et qui nous aiguilleraient vers les solutions les plus adaptées.

On peut également penser à établir un accord avec des prestataires de services, type Géocarta<sup>[9]</sup>, ce qui permettrait éventuellement de concevoir, ou d'améliorer, un système répondant plus spécifiquement à nos attentes. Il est par exemple envisageable d'adapter un système Ultra Large Bande comme le Pulsar, présenté en figure 1.

Enfin, il serait également intéressant d'expérimenter les méthodes de cartographie développées dans les autres stages réalisés à CISTEME pour le compte d'RTE.

En effet, les électrodes de référence  $\text{CuSO}_4/\text{Cu}$ , sujet de l'étude de M. Julien Bouyoux, permettraient de réaliser une cartographie de la répartition des différences de potentiels continus en intérieur ainsi qu'en extérieur, et peut-être de répondre à notre problématique ? D'un autre côté, le capteur de champ magnétique terrestre, développé par Melle Fanny Murot et Nicolas Barbot, est également une piste intéressante.

---

<sup>19</sup> Voir annexe 22

**Etat d'avancement de la tâche 2.2.4. : Etat de l'art des méthodes de tomographie électrique et électromagnétique appliquées aux sous-sols.**

	Nom du stagiaire	☹	☹	☹	☹	☺	☺	☺	☺	☺
Stage 2005-2006	Julien Fougeyrollas	☹								
Projet 2006-2007	Julie Crouseaud	☹	☹	☹						
Stage 2006-2007	Julie Crouseaud	☹	☹	☹	☹	☹				

Lors de son stage l'année dernière, M. Julien Fougeyrollas a montré qu'une étude des sols permettrait d'expliquer certaines pathologies rencontrées chez des bovins.

Lors de mon projet, j'ai réalisé des recherches sur les différentes méthodes de géophysiques utilisables pour notre problématique.

Enfin, lors du stage, j'ai effectué des essais avec les méthodes choisies précédemment. Malheureusement, les résultats obtenus n'ont pas permis d'identifier une méthode répondant à nos attentes.

Nous pouvons donc considérer que la partie de « dégrossissage » du sujet est réalisée mais que la partie plus délicate du choix, de la maîtrise et peut-être de la création d'instrumentation reste à faire.

Afin de pouvoir terminer cette tâche, il serait donc envisageable de :

- Créer un stage (de niveau DUT ou Licence Pro MQM) sur l'expérimentation du capteur de champ magnétique, développé par Fanny Murot et Nicolas Barbot, et les électrodes de référence, sujet du stage de Julien Bouyoux,
- Donner le sujet de l'adaptation d'un système ULB, type Pulsar, à un doctorant,
- Créer un stage (de niveau Licence, spécialisé en géophysique<sup>[5]</sup>) sur l'interprétation des résultats obtenus lors de mon stage et sur l'expérimentation de nouvelles méthodes.

## Glossaire

- Bioélectromagnétisme :** Le Bioélectromagnétisme se rapporte à l'étude des champs électriques, magnétiques ou électromagnétique produits par les cellules, les tissus ou les organismes vivants.
- Strates :** Couche de roche ou de sol qui se distingue des autres par des caractéristiques internes diverses.
- Failles géologiques :** Plan ou zone de rupture sur lesquels se produisent une déformation cisailante. Ce plan divise un volume rocheux en deux compartiments qui ont glissés l'un par rapport à l'autre.
- Courants telluriques :** Courants parcourant le sol. Ils sont d'origine naturelle : variations du champ magnétique terrestre, éruptions solaires, déplacement de fluides conducteurs dans le champ magnétique... Mais ils ont également de plus en plus une origine artificielle : fuites de réseaux électriques, retour de courants des chemins de fer à courant continu...
- Géophysique :** Branche des sciences de la terre qui s'intéresse à l'étude de la Terre par des méthodes de physique quantitative.
- Zone aveugle :** Zone de sol pour laquelle le GPR ne peut pas donner d'image. Ce phénomène est du à la réflexion d'une partie du signal sur le sol, ce qui entraîne un « aveuglement » du GPR pendant quelques dixièmes de secondes.
- Hyperboles de migration :** Hyperbole caractéristique de l'imagerie GPR. Lorsque le GPR se déplace au-dessus d'un objets enterré, sa distance vis à vis de l'objets diminue (le temps de retour de l'onde réfléchie également), passe par un maximum à la perpendiculaire de l'objet puis diminue, d'où la formation d'une hyperbole.

## Bibliographie

- [1] André DELAPIERRE, Université de Lausanne, *Représentation en 3D d'une partie des vestiges d'une villa gallo-romaine à l'aide des méthodes électriques*, disponible sur [www-sst.unil.ch/pangea/delapierre/orbe.htm](http://www-sst.unil.ch/pangea/delapierre/orbe.htm) , (consulté le 22 mai 2007)
- [2] Geolithe, *Radar géologique, Sismique de réflexion, Sismique de réfraction, Méthodes électriques*, disponible sur [www.geolithe.com](http://www.geolithe.com) rubrique géophysique, (consulté le 22 mai 2007)
- [3] Eastern atlas, *Technologie*, disponible sur [www.eastern-atlas.de/fr/technologie/top\\_technologie.htm](http://www.eastern-atlas.de/fr/technologie/top_technologie.htm), (consulté le 22 mai 2007)
- [4] Géophysique GPR International INC., *Techniques*, disponible sur [www.gprmtl.com/francais/techniques.htm](http://www.gprmtl.com/francais/techniques.htm), (consulté le 22 mai 2007)
- [5] Département de géophysique appliquée, *Principes de la géophysique appliquée*, liens vers cours en ligne et listes de prestataires de service en géophysique, disponible sur <http://www.labos.upmc.fr/sisyphe/dga/geophy/principes.htm>, (consulté le 22 mai 2007)
- [6] Michel CHOUTEAU et Erwan GLOAGUEN, Ecole Polytechnique de Montréal, *Tomographie électrique en génie et en environnement*, (Cours de Tomographie électrique, avril 2003)
- [7] Julien FOUGEYROLLAS, Université de Limoges, IUT du Limousin département Mesures Physiques, *Intégration du domaine environnemental dans le protocole GPSE.Premières démarches*, 14 juin 2006
- [8] Bernard GIROUX, Ecole Polytechnique de Montréal, *Techniques géophysiques de haute résolution, Méthodes électromagnétiques*
- [9] Michel DABAS, Directeur Scientifique de la société Géocarta, [www.geocarta.net](http://www.geocarta.net), joignable à michel.dabas@geocarta.net
- [10] Antoine BOUVIER, Géophysicien retraité, joignable à antoine.p.bouvier@wanadoo.fr

## Annexes

### *Annexe 1: Cahier des charges établit lors du projet*

	<b>Surface</b>	<b>Temps</b>	<b>Profondeurs de sondage</b>	<b>Résolution</b>
<b>Etude générale</b>	100*100 m	3 à 4 h	Jusqu'à 10 m	1 m
<b>Etude détaillée</b>	3*3 m	3 à 4 h	Jusqu'à 10m	20 cm

## Annexe 2 : Plan d'implantation des objets enterrés au fond du terrain de La Brugerie

Nous avons enterré à environ 45 cm de profondeur des objets dans le fond du terrain de La Brugerie. Ces objets sont :

1. une barre métallique creuse de diamètre 4 cm et de longueur 2,15 m.
2. une plaque métallique rectangulaire d'épaisseur 2 mm, de longueur 90 cm et de largeur 70 cm
3. une plaque ronde d'épaisseur 2 mm et de diamètre 20 cm.

La figure 1 est un plan représentant l'implantation des objets.

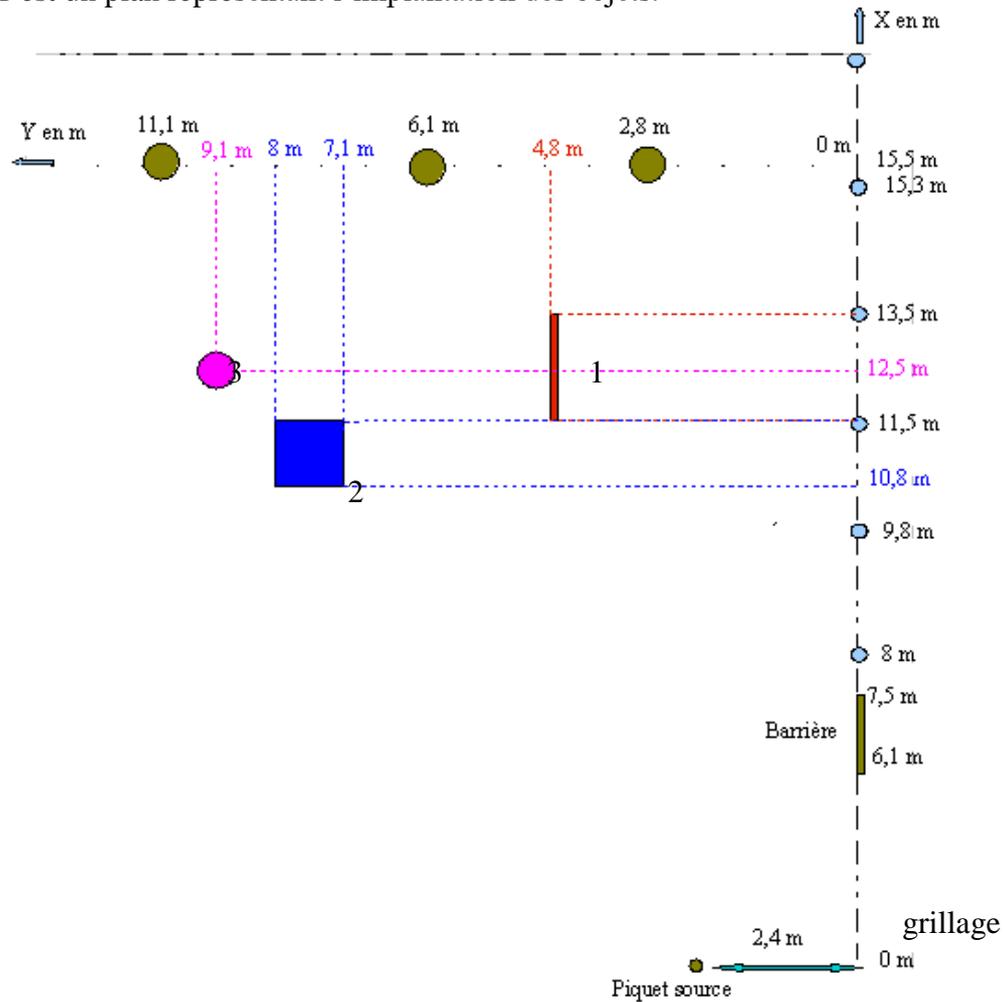


Figure 1 : Plan d'implantation des objets enterrés

Les arbres sont symbolisés par des ronds verts foncés. Attention : les échelles ne sont pas respectées.

**Annexe 3 : Terrains d'expérimentation**

<b>Nom</b>	<b>Nature</b>	<b>Adresse</b>	<b>Intérêt pour l'étude</b>
La Brugerie	Terre, surface goudronnée	Chez M. Bruno Beillard La brugerie 87 620 Séreilhac	Possibilité d'enterrer des objets, sol contenant des tuyaux en PVC, différences de surfaces de sols
Santrop	Sable	Lac de St Pardoux Plage Santrop Haute Vienne	Grande étendue de sable
Palais sur Vienne	Sable et graviers	Le Palais sur Vienne Haute Vienne	Sable en surface, zones plus humides
Stabilisé	Terre battue	Terrain de foot stabilisé Cité La Borie Limoges	Terrain uniforme et dégagé en surface

#### Annexe 4 : Dispositifs de mesure, méthode électrique

- Dispositif Wenner :

D'après l'annexe 4 qui représente les valeurs des sensibilités du système, on peut remarquer que les contours des valeurs de la sensibilité sont quasiment horizontaux à l'aplomb du centre du dispositif. Le dispositif Wenner sera donc recommandé pour détecter des structures horizontales (bonne résolution verticale) mais déconseillé pour les structures verticales.

De plus, cette méthode a un très fort signal et sera donc appropriée pour les terrains avec bruits de fond élevés.

Cependant, c'est le dispositif qui permet de sonder le moins profondément et qui a la plus faible densité de points.

- Dispositif de Wenner-Schlumberger :

Ce dispositif permet d'éloigner des électrodes de courant (A et B) à grande distance tout en gardant M et N proches du centre du dispositif (voir figure 1).

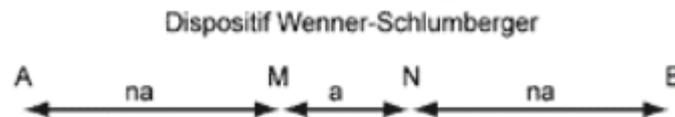


Figure 1 : Configuration des électrodes, dispositif Schlumberger

La forme des contours des valeurs de sensibilité sous le centre du dispositif (annexe 4) n'est ni horizontale ni verticale. Cette forme implique que ce dispositif est aussi sensible aux variations verticales qu'horizontales.

De plus, il a une profondeur de pénétration supérieure de 10% au Wenner et également un plus grand nombre de points d'acquisition ( avec le même nombre d'électrodes).

- Dispositif Dipôle-dipôle :

Pour ce dispositif, l'injection du courant et la mesure de la différence de potentiel sont séparées (voir figure 2).

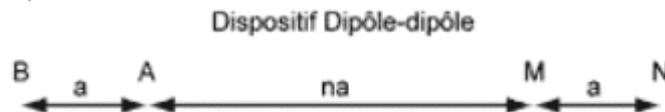


Figure 2 : Configuration des électrodes, dispositif Dipôle-Dipôle

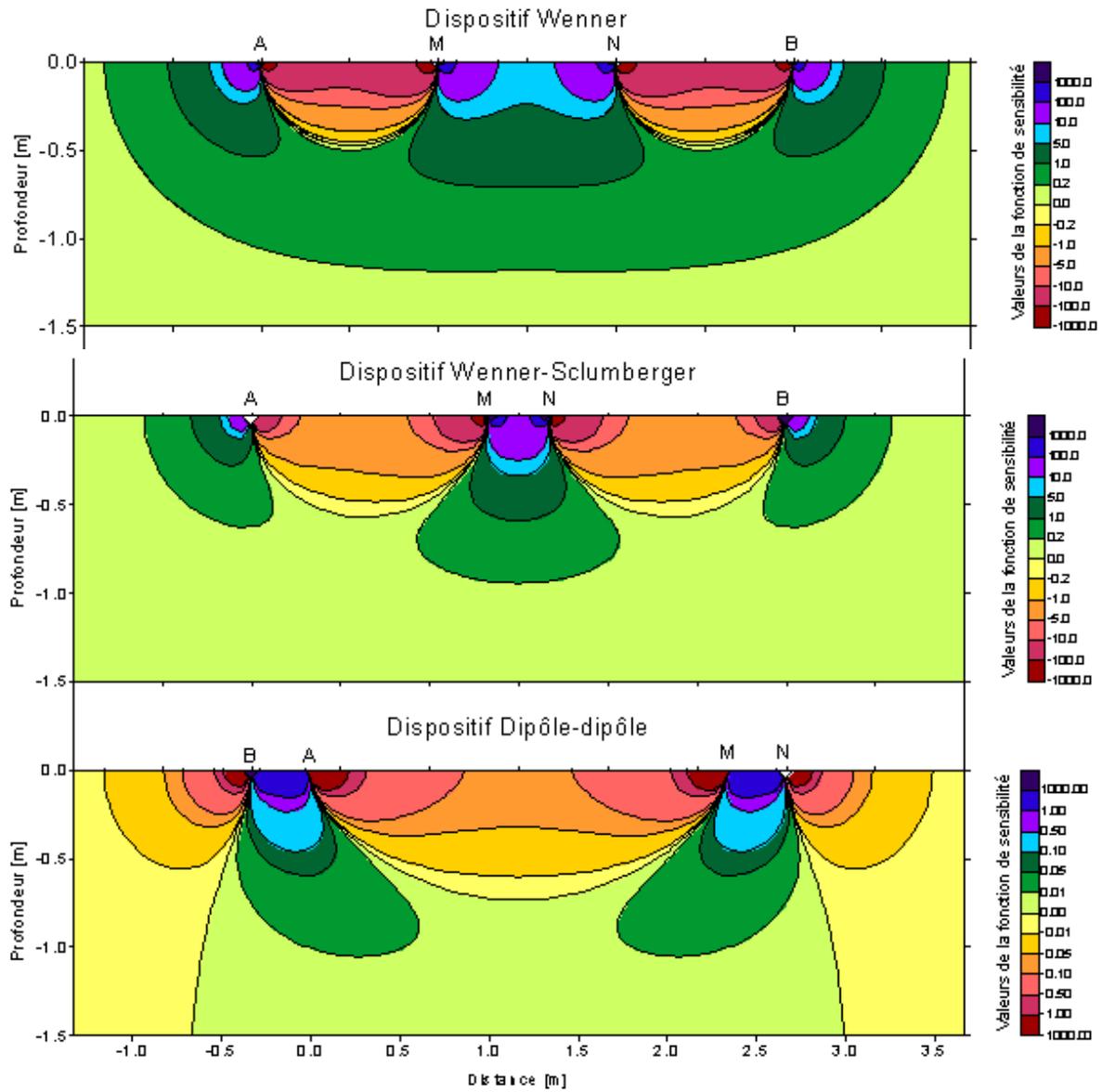
En regardant les contours de la fonction de sensibilité en annexe 4, on constate que les contours de la fonction sont verticaux, le dispositif est donc conseillé pour les structures verticales. Sa profondeur d'investigation est supérieure à celle de Schlumberger ainsi que le nombre de points d'acquisition.

Cependant, les électrodes de mesure de potentiel étant situées en dehors des électrodes de courant, la force du signal est très faible. Ce dispositif est donc conseillé pour une zone dont le bruit de fond est très faible.

- Conclusion :

Sur un sol inconnu, il est donc préférable d'utiliser le dispositif Wenner-Schlumberger puisque ce dernier a un signal assez fort et est sensible aux structures horizontales et verticales.

**Annexe 5 : Sensibilité des mesures de résistivité des sols en fonction de la profondeur et du dispositif utilisé**



## Annexe 6 : Autres méthodes de mesure, méthode électrique

Avec les dispositifs, les mesures s'effectuent de deux manières :

- Méthode du sondage électrique :

Mesures réalisées en un même point, en augmentant symétriquement la distance entre les électrodes (voir figure 1 à gauche). Cette méthode permet de connaître la résistivité du sol en un même point mais à différentes profondeurs. On étudie alors les variations verticales de la résistivité du sol.

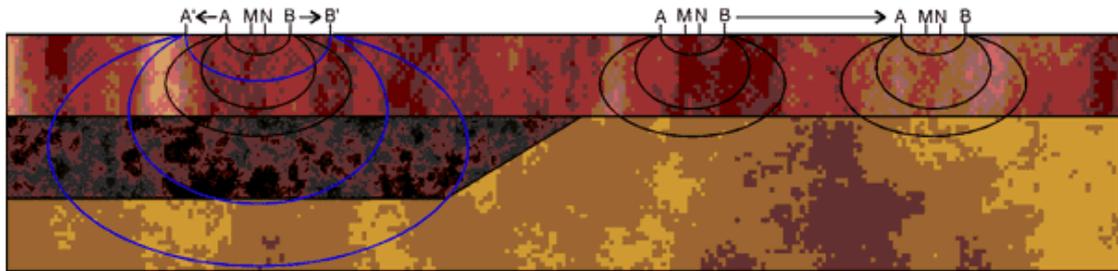


Figure 1 : Principe des méthodes de sondage électrique (à gauche) et de traîné électrique (à droite)

- Méthode de la traîné électrique :

Dans ce cas le dispositif a des dimensions fixes. Les mesures sont réalisées en décalant le dispositif (voir figure 1 à droite). Les valeurs de résistivité obtenues correspondent à une profondeur toujours identique. Cela permet d'étudier les variations horizontales de la résistivité. Cette méthode a été mécanisée par la société Géocarta (voir figure 2) avec un « système râteau ».



Figure 2 : Système râteau électrique

Ce système permet de réaliser des mesures rapidement à plusieurs profondeurs (les deux roues situées vers le véhicule sont les roues d'injection, les autres roues correspondent à la mesure de différence de potentiel).

La méthode du panneau électrique est en fait une combinaison de ces deux précédentes méthodes et permet d'avoir des résistivité à des profondeurs et des points différents le long d'une ligne.

**Annexe 7 : Coordonnées de location et de prêt des appareils utilisés**

<b>Méthode</b>	<b>Appareil</b>	<b>Location/Prêt</b>	<b>Coût</b>
Panneau électrique	Terrameter SAS 4000 avec ABEM LUND	Location : ABEM France BP 56 - 35310 MORDELLES <a href="mailto:abem@abem-france.com">abem@abem-france.com</a> 02.99.85.16.54	600 euros/semaine 1 600 euros/mois
Magnétique	EM31	Location : ABEM France BP 56 - 35310 MORDELLES <a href="mailto:abem@abem-france.com">abem@abem-france.com</a> 02.99.85.16.54	400 euros/semaine 1 200 euros/mois
GPR	RAMAC	Prêt : M. Christophe GUIFFAUT Faculté des Sciences et Techniques 123, avenue Albert Thomas 87060 LIMOGES CEDEX <a href="mailto:christophe.guiffaut@Xlim.fr">christophe.guiffaut@Xlim.fr</a> 05.55.45.77.36	–
Magnéto-tellurique	C.A.42	Prêt : Mme. Nathalie Autier Chavin Arnoux <a href="mailto:info@chauvin-arnoux.fr">info@chauvin-arnoux.fr</a> 02.40.84.01.16	–

## Annexe 8: Traitement des données, méthode électrique

Après mesures, les fichiers du Terrameter sont extraits grâce au logiciel SAS 4000. Les données sont alors en format binaire avec des extensions en .S4K. Le logiciel permet ensuite de convertir ces fichiers pour qu'ils soient utilisables par le logiciel de représentation 2D RES2DINV (les données sont alors en .DAT). Le logiciel permet d'inverser le panneau des résistivités. En effet, nous avons vu précédemment que la résistivité mesurée était en fait la résistivité apparente du sol correspondant à une moyenne des résistivités en différents points. Le logiciel permet d'obtenir la résistivité « vraie » comme on peut le voir sur la figure 1.

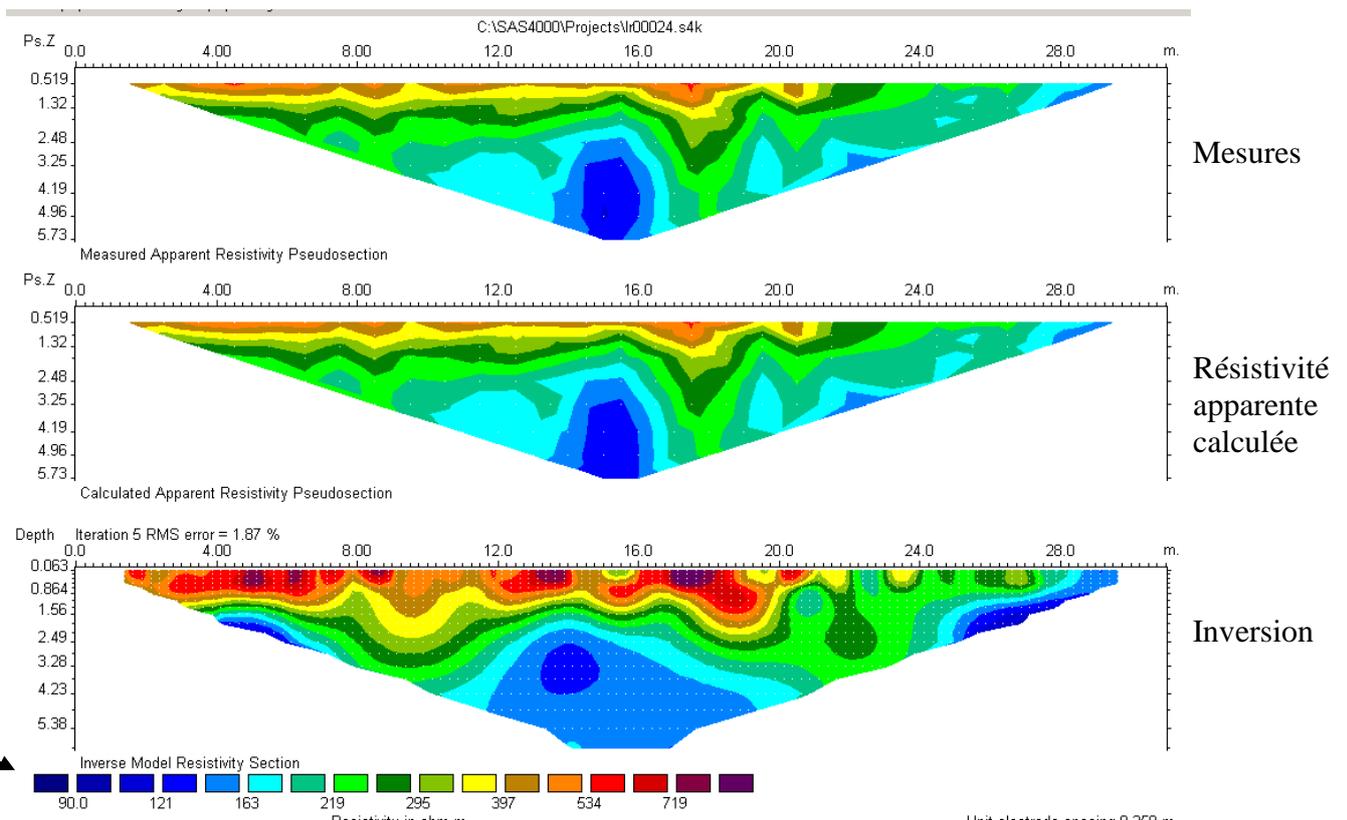


Figure 1 : Résistivité apparente et vraie d'un panneau électrique obtenues avec le logiciel Res2Dinv

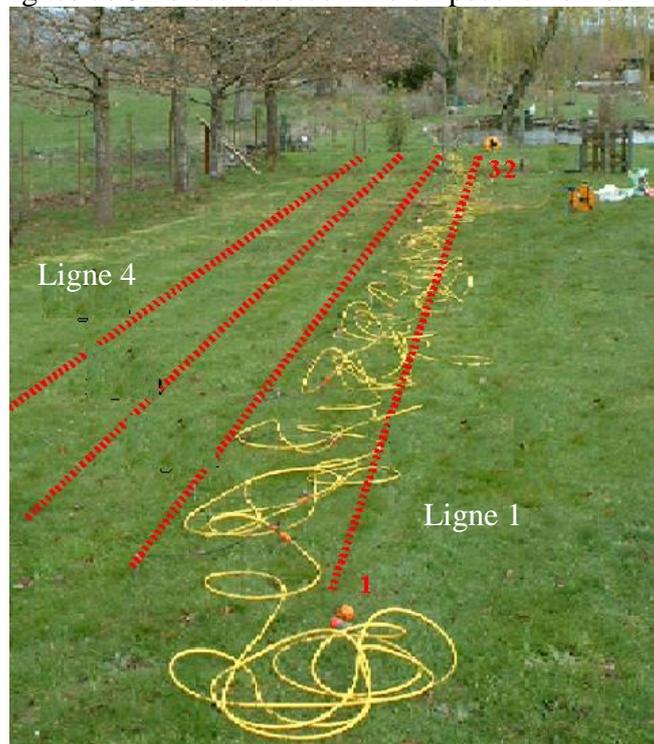
Le panneau du milieu correspond à la résistivité apparente recalculée par le logiciel qui correspond exactement à l'inversion. La différence entre le 1<sup>er</sup> panneau et le second donne le pourcentage d'erreur de l'inversion (notée RMS error, ici de 1.87%).

Ce traitement est précédé par une étape d'élimination (manuelle) des points aberrants.

## *Annexe 9: Résultats et interprétations des essais réalisées avec le système Terrameter LUND*

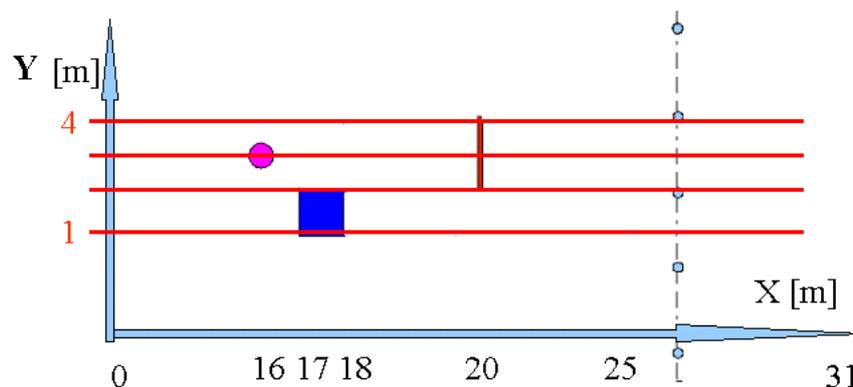
### **Manipulations du 22/03/07 à La Brugerie**

Nous avons réalisé une série de mesures de panneaux électriques au fond de la propriété sur la partie contenant les objets enterrés<sup>20</sup>. Les conditions atmosphériques étaient assez mauvaises : sol très humide (pluie et neige les jours précédents), température comprise entre 5 et 7 °C. Nous avons réalisé 4 lignes de 32 électrodes comme on peut le voir sur la figure 1.



*Figure 1 : Panneaux électriques réalisés au fond de la propriété*

Les lignes se situent sur les objets enterrés (voir figure 2).



*Figure 2 : Disposition des panneaux électriques par rapport aux objets enterrés*

La longueur de chaque panneau est de 31 m puisque les 32 électrodes sont espacées d'un mètre les unes par rapport aux autres.

Nous avons réalisé ces mesures avec les dispositifs Wenner, Schlumberger et Dipôle-Dipôle.

<sup>20</sup> Voir annexe

Les cartographies 2D suivantes sont obtenues :

- Dispositif Wenner

Ligne 1 :

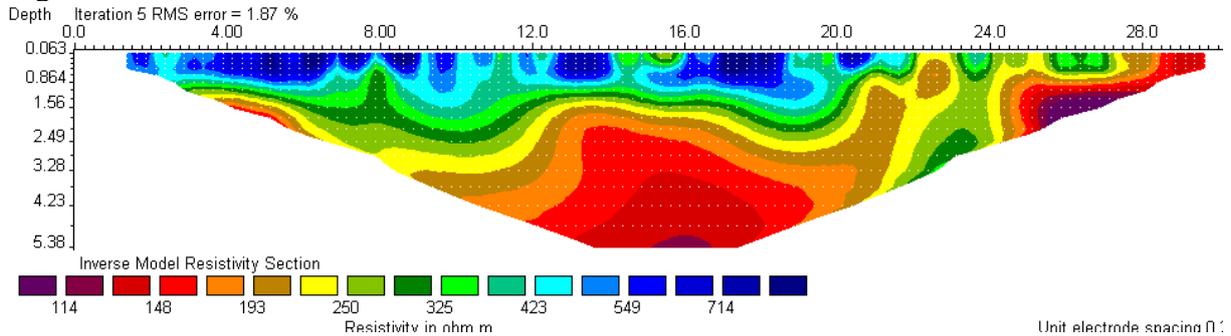


Figure 3 : Panneau n° 1, Dispositif Wenner

La figure 3 est un panneau de résistivité obtenue sur le ligne 1 avec la méthode Wenner. L'axe des abscisses correspond à la longueur de la ligne en mètres, l'axe des ordonnées à la profondeur théorique. L'échelle de couleur correspond à la résistivité du sol en ohm.m. La résistivité la plus faible est en rouge et la plus importante est en bleu foncé.

Il apparaît sur cette section une zone assez résistive à la surface (de 0 m à 21 m environ). La résistivité baisse en profondeur et en allant sur la droite de la ligne (à partir de 23 m environ). La présence de la plaque métallique enterrée entre 17 et 18 m n'apparaît pas. En effet, la zone correspondante sur le panneau est très résistive (de l'ordre de 750 à 800 ohm.m), alors que cette dernière devrait être conductrice puisque contenant un objet métallique.

Ligne 2 :

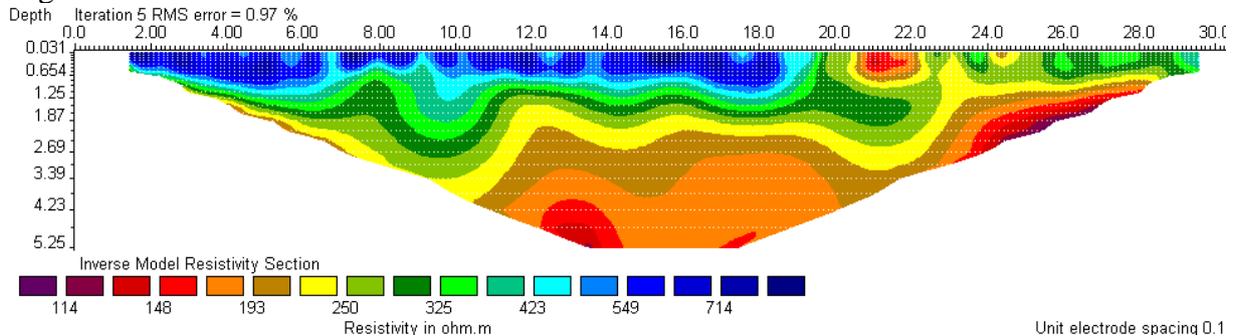


Figure 4 : Panneau n° 2, Dispositif Wenner

Sur cette ligne, la résistivité en surface « s'uniformise » en un bandeau de résistivité d'environ 600 ohm.m de 0 à 19 m. La panneau fait également apparaître un lobe de conductivité entre 21 et 22 m, mais qui ne correspond pas à la plaque métallique enterrée (située entre 17 et 18 m).

Ligne 3 :

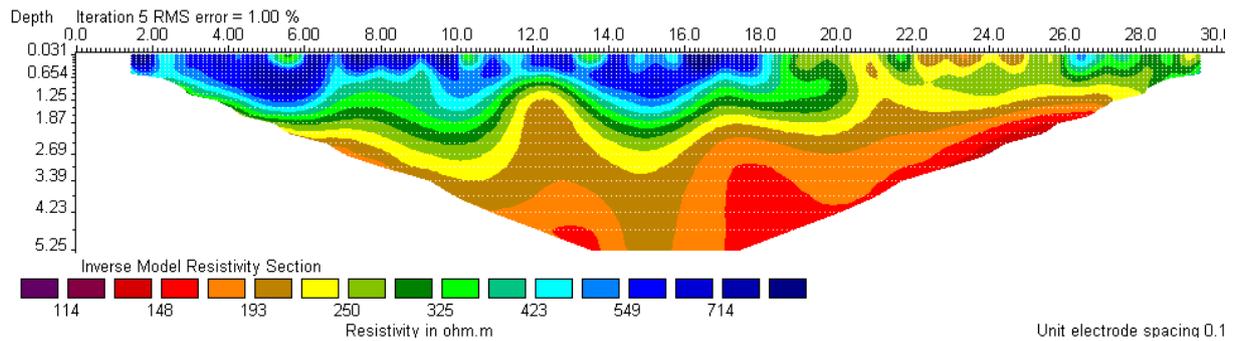


Figure 5 : Panneau n° 3, Dispositif Wenner

La ligne 3 a sensiblement la même allure que les deux lignes précédentes. Le lobe de conductivité entre 21 et 22 m disparaît et est remplacé par une petite zone plus conductrice à 21 m et 0.5 m de profondeur. Cette zone pourrait être attribuée à la présence de la barre métallique. Cette dernière est placée à 20 m mais il peut s'avérer que le traitement ainsi qu'un petit décalage de la ligne puissent expliquer ce décalage de l'image de la barre. Cependant, je ne suis pas sûre que cela corresponde à la barre. De plus, si le terrain avait été inconnu, nous n'aurions pas pu à priori conclure que cela était dû à un objet enfoui.

#### Ligne 4 :

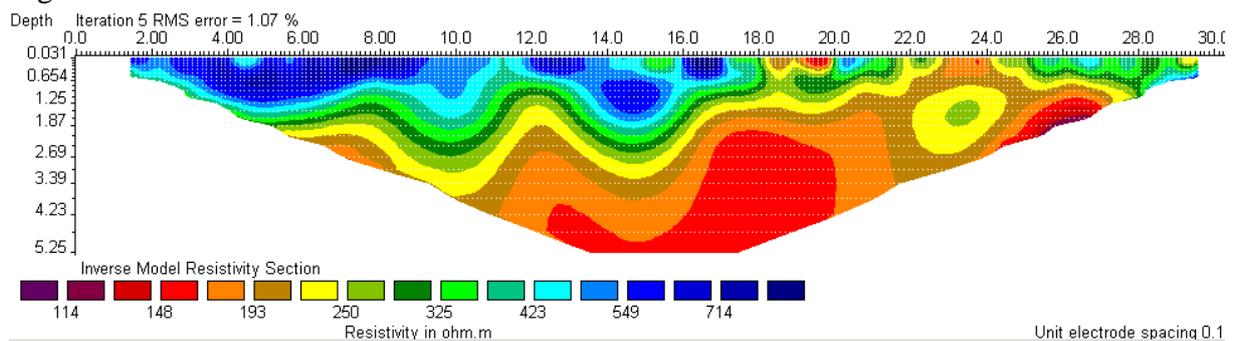


Figure 6 : Panneau n° 4, Dispositif Wenner

Ce panneau a la même allure que précédemment. Cependant, on peut souligner la présence d'une zone plus résistive vers 23 m à 1,80 m de profondeur ainsi qu'une zone conductrice en surface entre 18 à 20 m.

Ces zones ne sont pas interprétables à priori. Enfin, la présence du disque métallique enfouis n'est pas détectable.

- Dispositif Schlumberger

#### Ligne 1 :

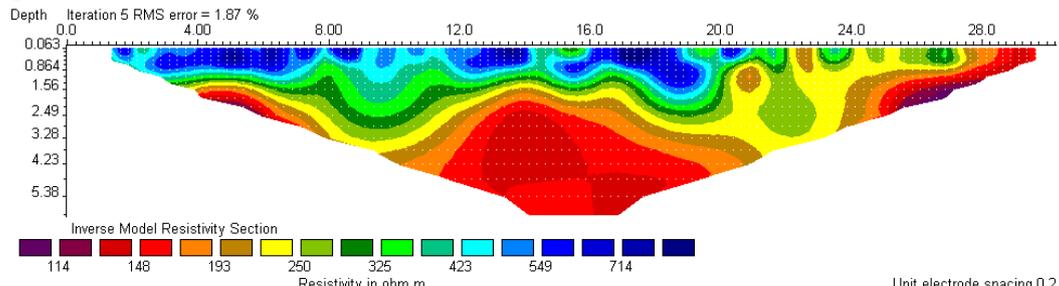


Figure 7 : Panneau n° 1, Dispositif Schlumberger

#### Ligne 2 :

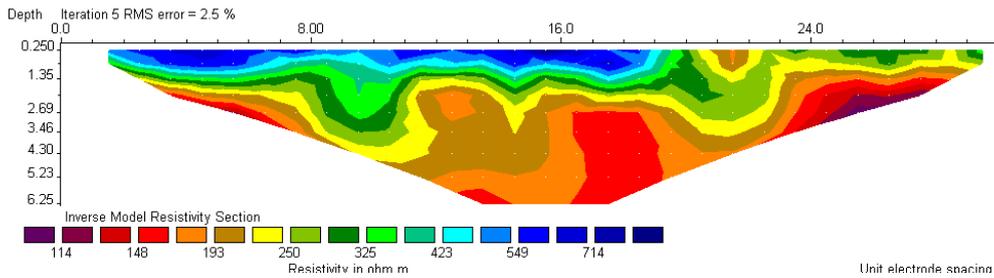


Figure 8 : Panneau n° 2, Dispositif Schlumberger

Ligne 3 :

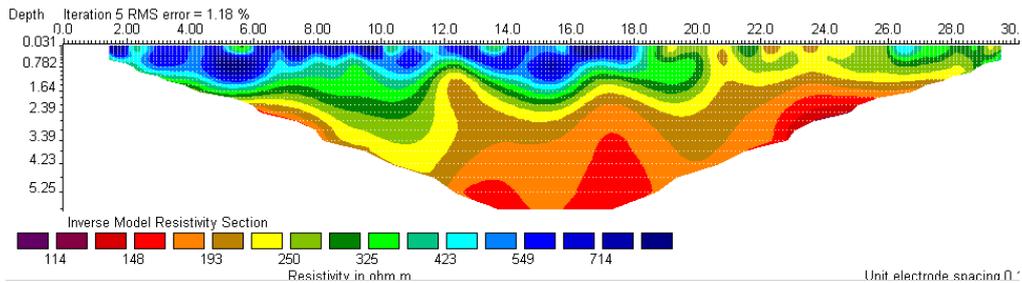


Figure 9 : Panneau n° 3, Dispositif Schlumberger

Ligne 4 :

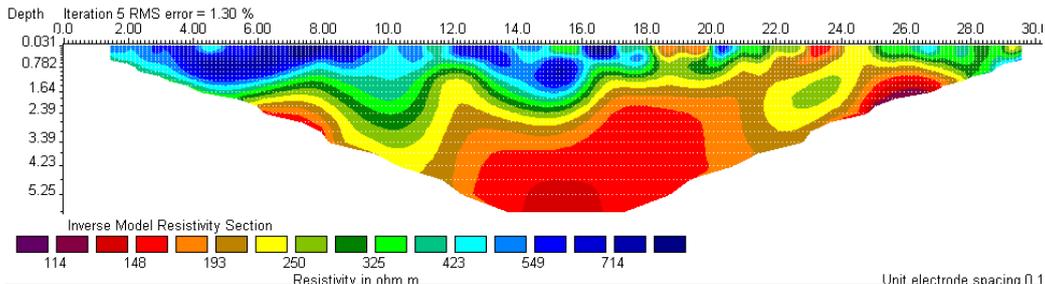


Figure 10 : Panneau n° 4, Dispositif Schlumberger

Les résultats obtenus avec le dispositif Schlumberger sont sensiblement identiques à ceux obtenus avec le dispositif Wenner (zones résistantes en surface, conductivité qui augmente avec la profondeur...). Comme précédemment, la présence des objets n'est pas réellement identifiable.

- Dispositif Dipôle-dipôle

Ligne 1 :

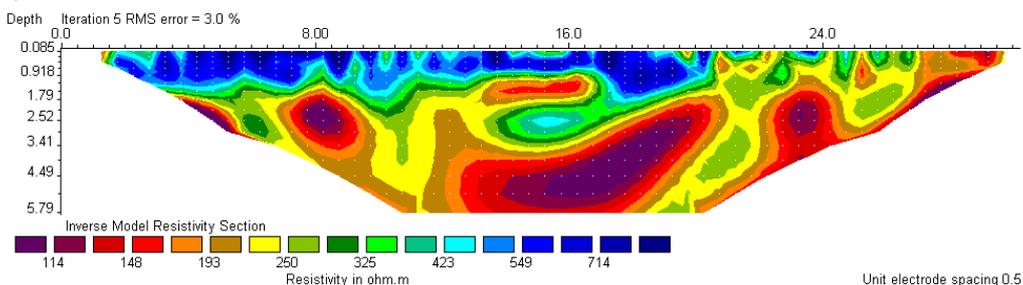


Figure 11 : Panneau n° 1, Dispositif Dipôle-Dipôle

Ligne 2 :

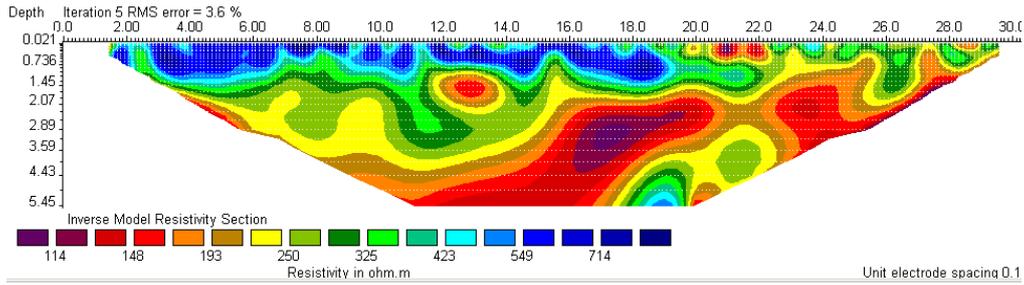


Figure 12 : Panneau n° 2, Dispositif Dipôle-Dipôle

Ligne 3 :

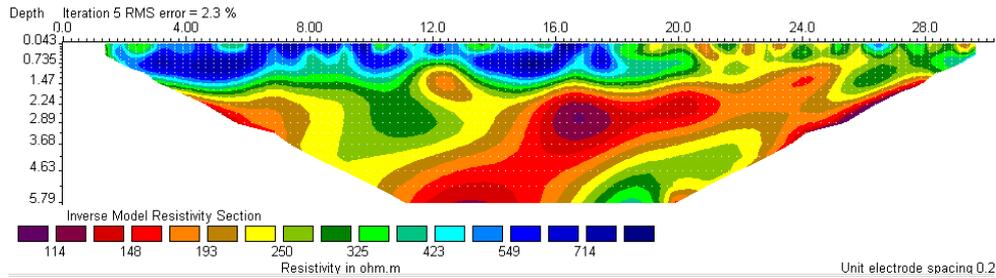


Figure 13 : Panneau n° 3, Dispositif Dipôle-Dipôle

Ligne 4 :

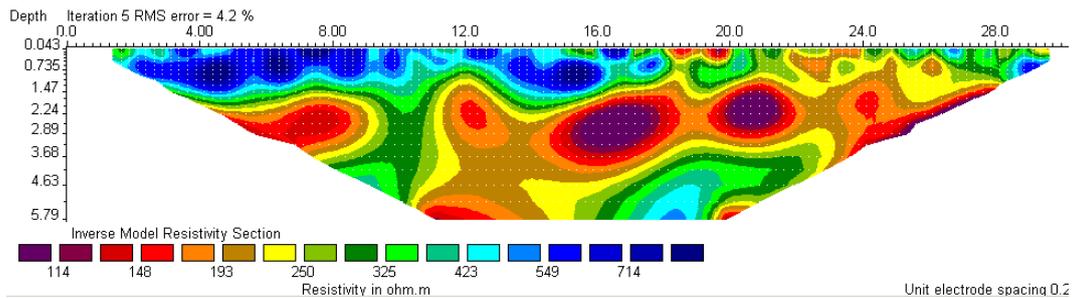


Figure 14 : Panneau n° 4, Dispositif Dipôle-Dipôle

Les résultats obtenus avec le dispositif Dipôle-dipôle sont beaucoup plus confus et compliqués qu'avec les dispositifs précédents. Il sont par conséquent plus difficiles à interpréter. De plus, les zones de conductivité et de résistivité prennent des valeurs plus extrêmes que précédemment.

Nous avons vu dans l'annexe 4 que le dispositif Dipôle-dipôle était plus sensible aux variations verticales de sols. Etant donné que le dispositif Schlumberger, dispositif intermédiaire entre Wenner et Schlumberger, donnait des résultats proches de ceux obtenus avec le dispositif Wenner, je pense que les résultats les plus cohérents sont ceux obtenus avec le dispositif Wenner. Les couches de sols seraient donc plutôt horizontales.

En général, il est important de garder à l'esprit que lors du traitement, le logiciel part de suppositions pour remonter à la résistivité vraie du sol : sol uniforme, variations verticales ou horizontales (mais pas simultanées)...

Nous avons ensuite réalisé cinq lignes de 32 électrodes derrière la maison. En effet, ce terrain contient un tuyaux en PVC (remplis d'air à cette période de l'année) enterré à environ 1 m de profondeur. La figure 15 présente la disposition des panneaux effectués.

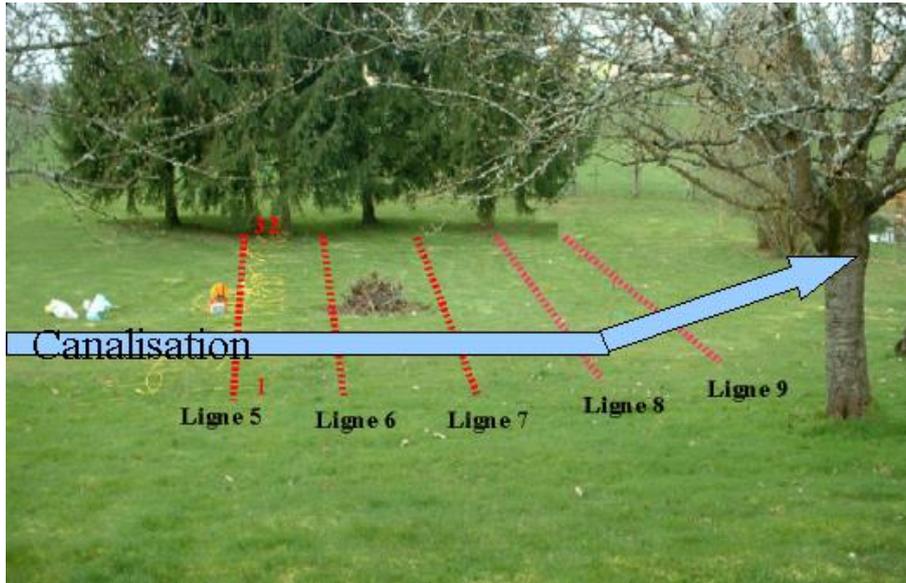


Figure 15 : Disposition des lignes d'électrodes et du tuyau enterré

Nous avons réalisé ces panneaux avec les dispositifs Wenner et Schlumberger. On obtient les résultats suivants.

- Dispositif Wenner

Ligne 5 :

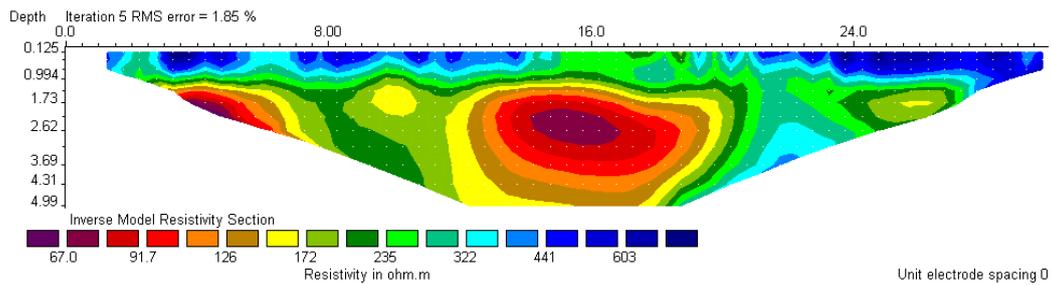


Figure 16 : Panneau n° 5, Dispositif Wenner

Ligne 6 :

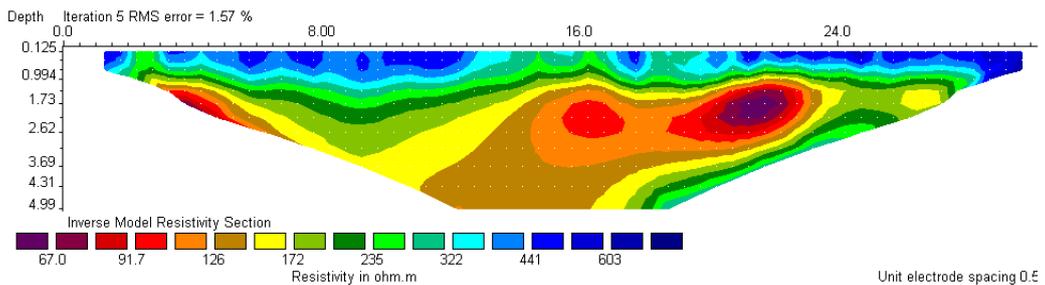


Figure 17 : Panneau n° 6, Dispositif Wenner

Ligne 7 :

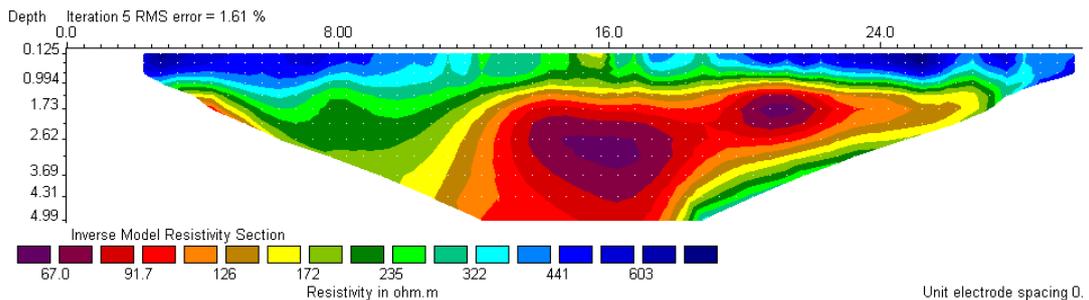


Figure 18 : Panneau n° 7, Dispositif Wenner

Ligne 8 :

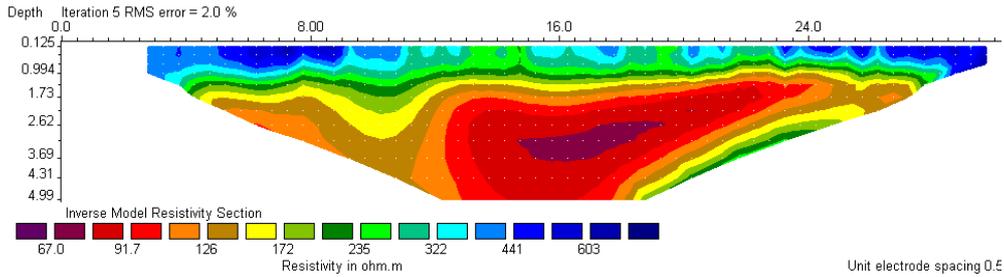


Figure 19 : Panneau n° 8, Dispositif Wenner

Ligne 9 :

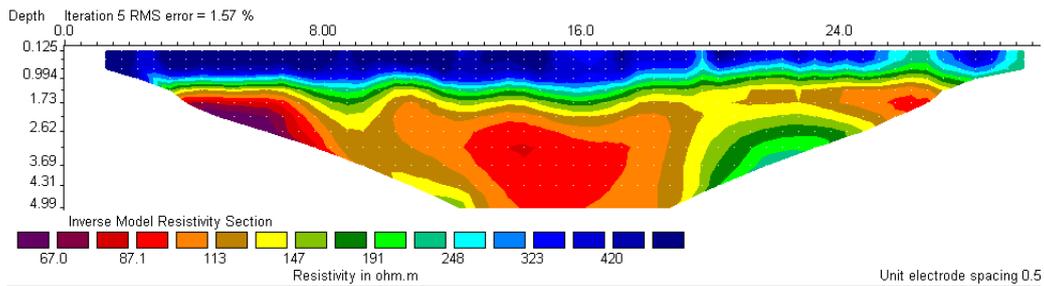


Figure 20 : Panneau n° 9, Dispositif Wenner

Ces panneaux ont sensiblement la même allure que les précédents : résistivité importante en surface, conductivité qui augmente en profondeur.

Il apparaît une zone plus conductrice sur le panneau 5 à environ 2,50 m de profondeur, qui tend à « s'étaler » sur les côté. Peut être est ce dû à une présence d'eau ?

La présence du tuyau en PVC n'est pas décelable. En effet, à cette période de l'année, il est rempli d'air, et devrait alors rendre la zone plus résistive, ce qui n'est pas le cas.

- Dispositif Schlumberger

Ligne 5 :

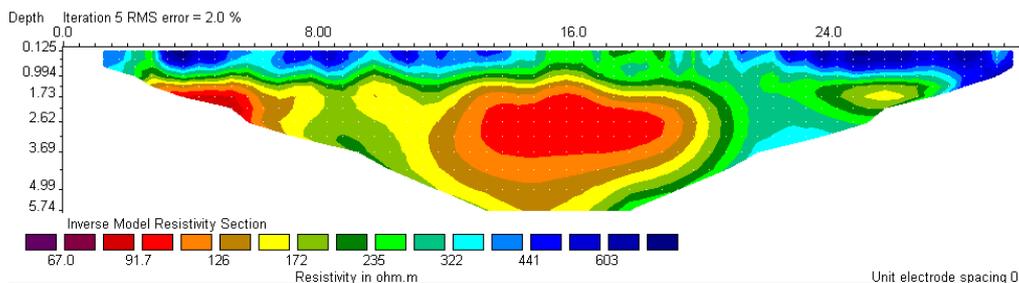


Figure 21 : Panneau n° 5, Dispositif Schlumberger

Ligne 6 :

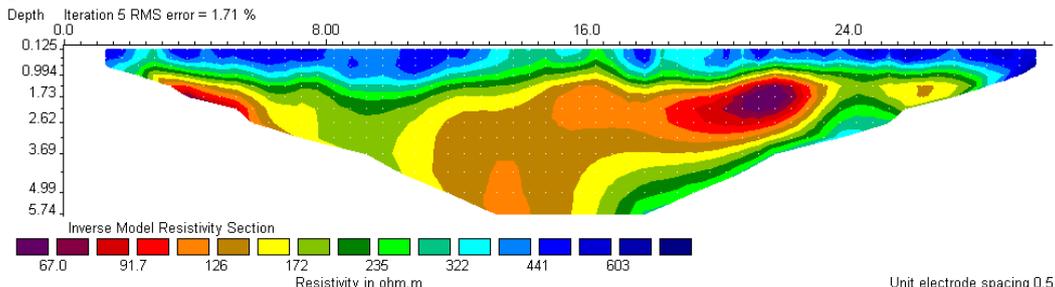


Figure 22 : Panneau n° 6, Dispositif Schlumberger

Ligne 7 :

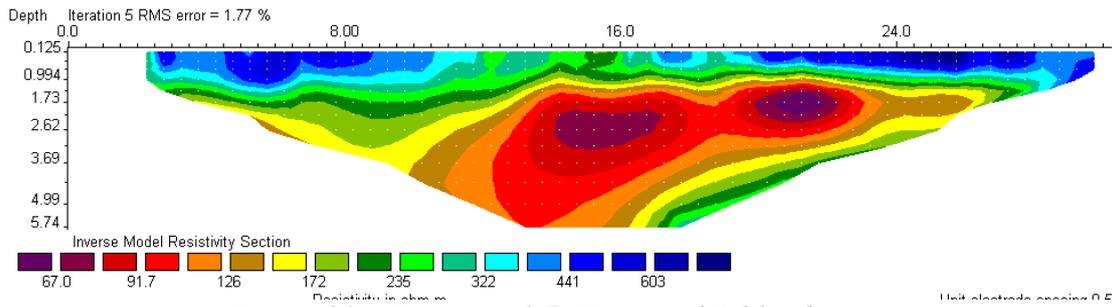


Figure 23 : Panneau n° 7, Dispositif Schlumberger

Ligne 8 :

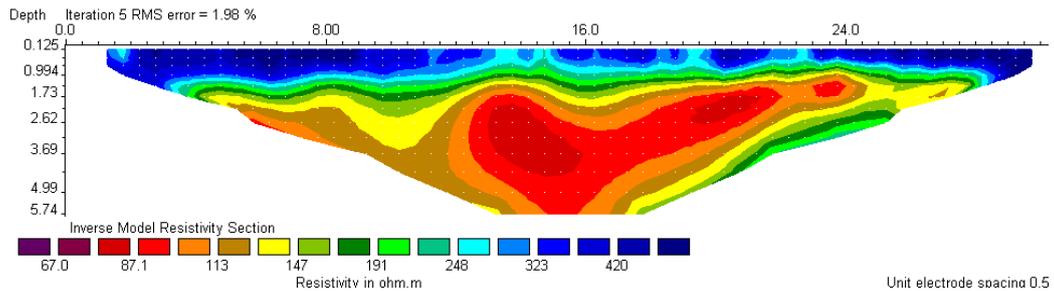


Figure 24 : Panneau n° 8, Dispositif Schlumberger

Ligne 9 :

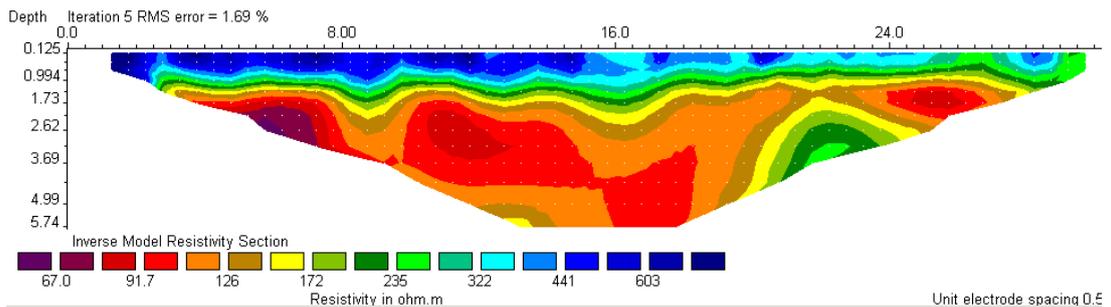


Figure 25 : Panneau n° 9, Dispositif Schlumberger

Comme avec le dispositif Wenner, les profils de sols sont résistants en surface et conducteurs en profondeur. Il apparaît également la même zone conductrice que précédemment.

Ces résultats sont assez difficiles à interpréter étant donné qu'on ne connaît pas réellement la composition du sol en profondeur.

Il serait intéressant de compléter cette méthode avec un carottage qui permettrait d'identifier des différentes zones.

## **Annexe 10: Interprétation de M. Antoine Bouvier des résultats obtenus avec les trois dispositifs (Wenner, Schlumberger et Dipôle-Dipôle) sur la ligne 2**

« Au niveau des trois panneaux réalisés, les résultats sont cohérents, indiquant des variations de résistivité apparente analogues, globalement (diminution des résistivités avec la profondeur et disparition au-delà du point 3, d'un mince recouvrement résistant).

Les sections inversées sont peu différentes mais rendent seulement compte de la limite du logiciel RES 2D qui choisit de façon aléatoire le modèle d'inversion. En particulier, on note depuis la section Wenner jusqu'à la section Dipôle-dipôle le remplacement progressif d'un secteur plutôt résistant en profondeur, au niveau du point 0 (Wenner) à un secteur moins résistant (Schlumberger), devenant conducteur (dipôle-dipôle).

Ainsi, je ne crois pas trop en l'individualisation de la lentille conductrice représentée en dipôle-dipôle, à l'aplomb du point 1 – 1, 5.

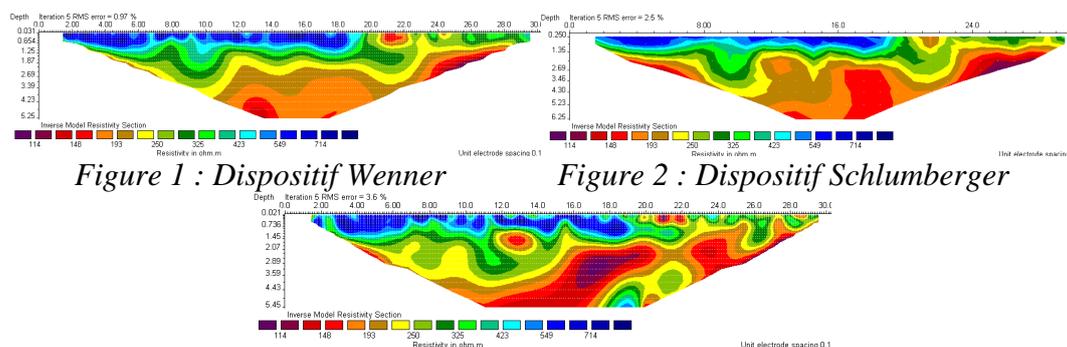
Si vous tenez compte de l'investigation très superficielle réalisée avec les électrodes espacées d'un mètre, il est normal d'enregistrer une variation latérale rapide des résistivités en surface car le sol y est toujours très hétérogène. Même humide (l'eau douce est assez résistante, quelques centaines d'ohm.m), la surface du sol est plus ou moins aérée, avec de l'argile d'altération, des graviers ou sables très localisés.

Sans connaître la nature lithologique du sol, j'attribuerai les secteurs les plus résistants à des secteurs avec développement de graviers ou cailloutis (limons sableux secs éventuellement) et les secteurs plus conducteurs à un enrichissement en argiles.

Le fait que les valeurs de résistivité diminuent en profondeur n'a rien d'anormal et témoignent probablement de niveaux plus riches en argiles (marnes et/ou argiles d'altération par exemple). De plus, en profondeur, les horizons sont plus humides.

Si vous rattachez les données de résistivité à la géologie du secteur étudié (voir sur carte géologique correspondante), tout s'expliquera facilement. »

Cette explication fait encore plus ressortir notre ignorance vis à vis de l'interprétation de cette méthode. M.Antoine Bouvier a réussi à nous donner une explication sans être venu lui-même sur le terrain, ce qui est assez remarquable. Cependant, nous qui connaissons le terrain, pensons que certaines de ces suppositions ne correspondent pas à la réalité : nous n'avons remarqué que très peu de graviers en surface, le sol en profondeur est constitué de tuffe (beaucoup plus résistant que l'argile)...



**Figure 3 : Dispositif Dipôle-dipôle**

**Annexe 11: Formule liant la conductivité du sol aux champs magnétiques mesurés, méthode magnétique**

On peut obtenir la valeur de la conductivité du sol à partir de la mesure du rapport des champs (voir figure 1).

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega \mu_0 s^2} \left( \frac{H_s}{H_p} \right)_Q$$

*Figure 1 : Formule de la conductivité apparente*

Avec :

$\sigma_a$  : la conductivité apparente du sol en [S/m]

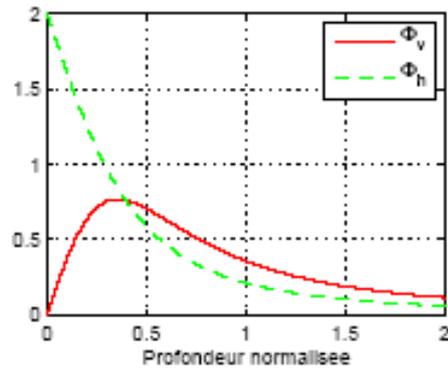
$\omega = 2\pi f$  avec  $f$  la fréquence du champ émis en [Hz]

$s$  : la séparation entre la bobine émettrice et la bobine réceptrice en [m]

$\mu_0$  : la perméabilité magnétique du vide en [H/m]

$\left( \frac{H_s}{H_p} \right)_Q$  : la composante en quadrature

*Annexe 12: Sensibilités en mode vertical et en mode horizontal, méthode magnétique*



*Figure 1 : Sensibilités des mesures en mode dipôles verticaux ou horizontaux en fonction de la profondeur*

Sur la figure 1, sont tracées les variations de la sensibilités des mesurages en fonction de la profondeur, en mode dipôle vertical en rouge et dipôle horizontal en vert. La prospection en mode horizontal permet d'avoir une grande sensibilité en surface, mais qui décroît ensuite rapidement. Au contraire, en mode dipôle vertical, la sensibilité augmente jusqu'à  $z=0.4m$  et diminue plus doucement.

***Annexe 13: Comparaison de l'émission du champ magnétique de l'EM31 par rapport aux normes***

D'après la recommandation du conseil de l'Union Européenne 199/519/CE et le Décret Français 2002 pour la population générale, le champ magnétique émis par une source de fréquence 9,8 kHz à proximité d'une personne doit être inférieur à 6,25  $\mu\text{T}$ .

Nous avons mesuré à l'aide d'un champmètre (EFA-300, prêté par l'IUT Mesures Physiques de Limoges) le champ émis par l'EM 31 fonctionnant à une fréquence de 9,8 kHz. A proximité de l'émetteur le champ est de 35  $\mu\text{T}$ . Il est bien au-dessus de la norme, il ne faut donc en aucun cas s'approcher de la partie émetteur de l'EM 31 lorsque ce dernier fonctionne. Le champ magnétique reçu par l'opérateur réalisant la mesure est d'environ 100 nT, ce qui est en-dessous de la norme.

#### ***Annexe 14: Présentation du GPS TRIMBLE***

Le GPS Pro XRS est constitué d'un sac à dos contenant les batteries ainsi que l'unité centrale, d'un mât relié à une antenne (sphère blanche) et l'un data logger pour l'acquisition des données (figure 1).



*Figure 1 : GPS Pro XRS*

La principe du GPS repose sur l'intersection spatiale. En effet, le GPS mesure la distance entre l'utilisateur et au minimum quatre satellites de positions connues. En effet, le signal envoyé par un satellite correspond à une sphère, lorsque deux sphères se coupent, l'intersection forme un cercle, lorsque trois satellites se coupent, 2 points sont obtenus dont une position invraisemblable. En pratique, il faut donc 4 satellites pour connaître X, Y et Z. Les signaux envoyés par les satellites voyagent à la vitesse de la lumière. En connaissant le temps mis par le signal pour arriver jusqu'au GPS, la distance parcourue peut être calculée grâce à la formule suivante.

$$\text{Distance} = \text{Temps de trajet} \times \text{Vitesse de la lumière}$$

Cependant la composition de l'atmosphère, des satellites très dispersés (ect...) entraînent une erreur sur la position donnée.

Pour le GPS que nous utilisons, elle est d'environ 1 m.

### *Annexe 15: Traitements des données, méthode magnétique*

Le téléchargement des données à partir du polycorder est réalisé avec le logiciel DAT31W. Il permet également de convertir les fichiers en .G31. Les résultats obtenus sont représentés sous forme de courbes (Conductivité/Composant inphase = f (distance parcourue)). A partir des données GPS et des relevés réalisés au décimètre, les longueurs de déplacement sont ajustées.

En général, les données doivent être augmentées de quelques mS/m ou ppt si ces dernières sont proches de zéro, ou négatives (erreur liée à un problème de réglage du zéro sur l'appareil).

Après création d'un fichier XYZ, le logiciel SURFER permet de réaliser une cartographie.

## Annexe 16: Manipulations et résultats obtenus avec l'EM31

### Manipulations du 14 et 15/03/07 entre les bâtiments MP, TC et GMP à l'IUT de Limoges

Le but de ces manipulations était de comparer différentes méthodes d'utilisation de l'EM31. En effet, ce dernier peut fonctionner en mode horizontal ou en mode vertical, mais également en le tenant devant soi ou sur le côté. Nous voulions également savoir si l'inclinaison de la barre de l'EM 31 faisait varier la mesure.

Il faut savoir que l'appareil utilisé (EM31) a été étalonné par ABEM pour être utilisé au niveau du sol. Cependant, nous l'avons utilisé au niveau de la hanche, il faut donc appliquer un facteur correctif aux valeurs de conductivité: en mode vertical la multiplier par 20 %, en mode horizontal la multiplier par 2. Etant donné que l'appareil est utilisé toujours avec le même calibrage et que l'étude se porte principalement sur les variations de valeurs, les valeurs brutes données par l'EM31 seront utilisées.

Nous avons effectué les essais sur une même ligne, représentée par une flèche sur la figure 1.



Figure 1: Terrain d'expérimentation (vue aérienne)

Cette ligne coupe différents types de sol et également des objets en surface comme on peut le voir sur la figure 2.

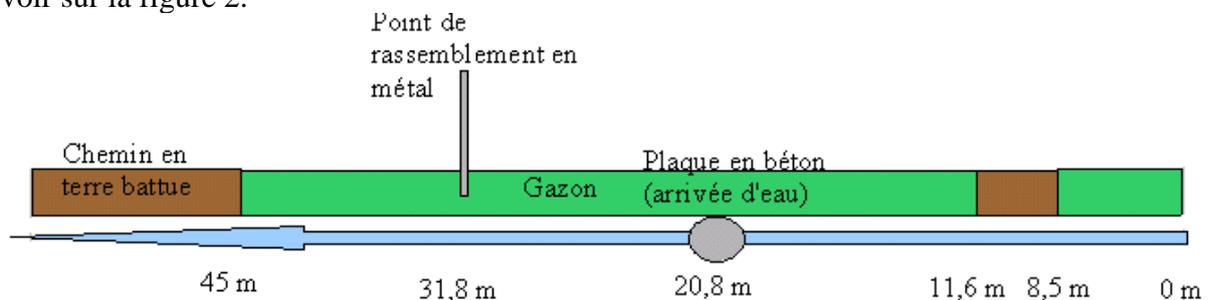


Figure 2: Composition de la ligne étudiée en surface

Résultats obtenus:

- En mode dipôle vertical, en tenant l'EM31 sur le côté:

La conductivité (en mS/m) est représentée en rouge et la composante inphase (en ppt) en bleu.

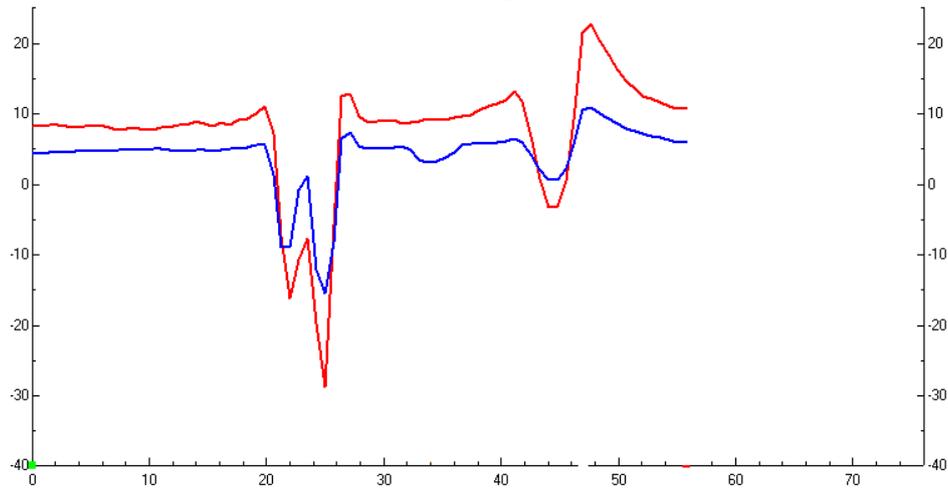


Figure 3 : Conductivité et composant inphase en mode dipôle vertical

Il n'apparaît pas de différence sur Q et I au passage de la surface en terre sur le chemin. On peut voir deux pics très négatifs (jusqu'à -30 mS/m pour Q et -15 ppt pour I) lors du passage sur les plaques bétonnées. La composante inphase diminue également légèrement à proximité du panneau de rassemblement en métal. Enfin, de l'herbe au chemin, les signaux diminuent puis re-augmentent. Cela ne doit pas être dû à la différence de sol (aucune différence n'a été constatée au début de la ligne en coupant le chemin) mais plutôt à la présence d'objets enterrés (peut-être des fils électriques alimentant réverbères).

- En mode dipôle vertical, en tenant l'EM31 devant soi:

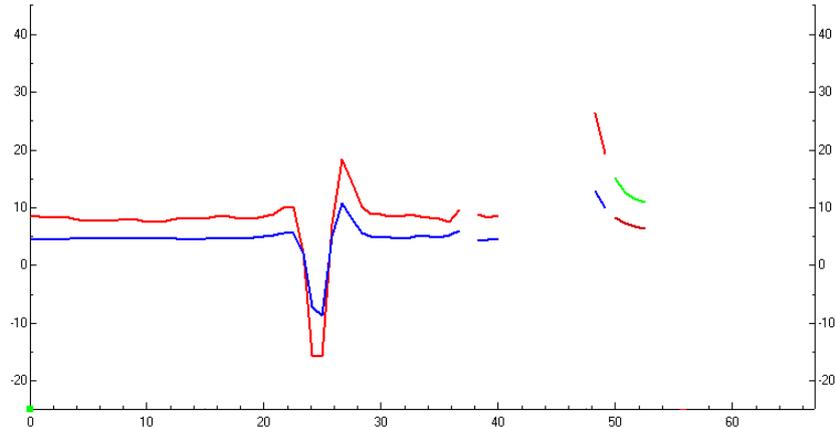


Figure 4 : Conductivité et composant inphase en mode dipôle vertical

Cette figure a sensiblement la même allure que la précédente. Cependant, les deux pics négatifs, sur la figure 3 entre 20 et 30 m sont remplacés par un seul pic négatif. Certaines valeurs manquent sur le graphique, cela peut être dû à une mauvaise inclinaison de l'EM 31 (sur lui-même, en ayant sa barre pour axe de rotation).

- En mode dipôle horizontal

L'EM31 est maintenant tourné de 90° sur lui-même (la barre est l'axe de rotation) (voir figure 5).

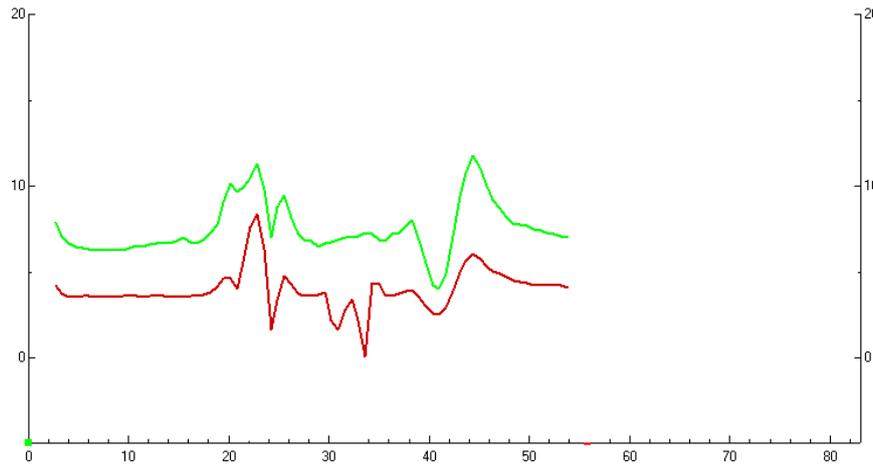


Figure 5: Conductivité et composant inphase en mode dipôle horizontal

La conductivité (en mS/m) est en vert et le composante inphase (en ppt) est en rouge. Des anomalies apparaissent au même endroit que précédemment, mais elles n'ont pas la même forme. Les plaques bétonnées, font ressortir des pics de Q et de I, le panneau métallique ressort plus clairement que précédemment (I fait deux pics vers le bas). Enfin, l'anomalie finale est moins importante que dans les figures 3 et 4.

- En mode dipôle horizontal, barre inclinée à  $45^\circ$ , EM 31 sur le côté:

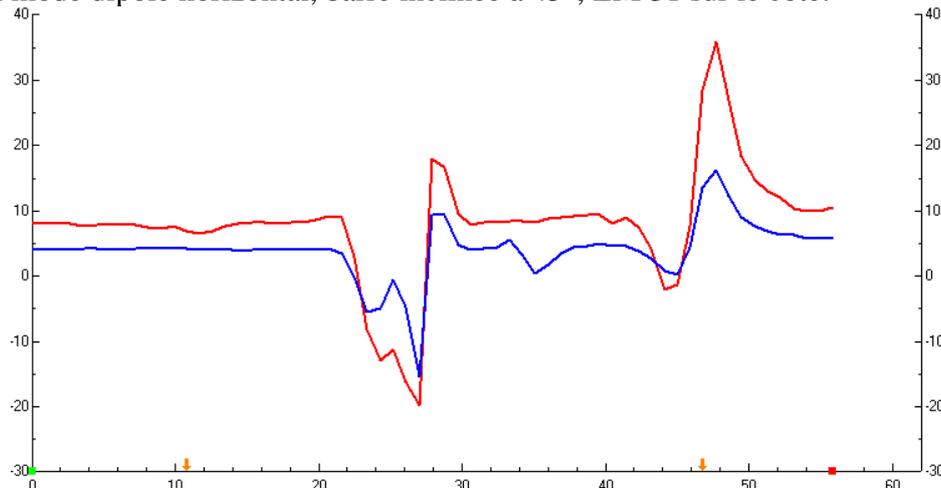


Figure 6: Conductivité et composant inphase en mode dipôle vertical, barre inclinée à  $45^\circ$

Cette figure est à comparer avec le figure 3. Les anomalies sont observables aux mêmes distances mais les valeurs extrêmes sont plus élevées. Cependant, ces valeurs ne doivent pas être prises en compte étant donné que l'appareil n'a pas été conçu pour fonctionner incliné à  $45^\circ$ .

- Conclusion:

D'après cette étude, l'EM31 permet de visualiser des anomalies aussi bien enterrées qu'en surface. Cependant il n'a pas réussi à voir la différence entre la pelouse et le chemin. De plus, le fait de tenir l'EM31 sur le côté ou devant soi (en mode vertical) permet de faire apparaître quelques petites différences mais les même anomalies sont identifiées. Le mode horizontal semble plus sensible aux objets métalliques.

## Résultats et interprétations des essais réalisés avec l'appareil EM31 sur le terrain stabilisé de La Borie

Le but de ces essais est de prendre en main d'appareillage et d'observer ses réponses vis à vis d'objets métalliques posés sur le sol.

Les essais ont été réalisés sur le terrain stabilisé de La Borie à Limoges. La figure 7 est une vue aérienne du terrain.



Figure 7 : Terrain stabilisé

La zone sur laquelle nous avons effectué des mesures est encadré en blanc. Nous avons disposé trois objets métalliques sur le sol. Le plan de disposition des objets est en figure 8.

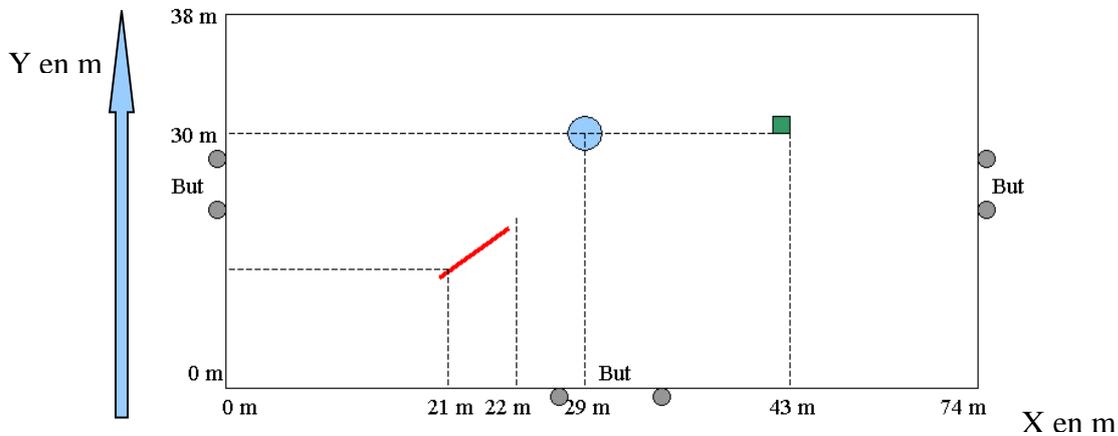


Figure 8 : Plan d'implantation des objets métalliques sur le terrain

Les objets sont :

- une barre métallique de 2,15 m de longueur et de diamètre 4 cm (en rouge),
- un disque métallique de diamètre 20 cm et d'épaisseur 2 mm (en bleu),
- un cube métallique de dimensions 8 x 5 x 5 cm (en vert).

Des lignes de mesures sont tout d'abord réalisées en suivant l'axe des X, en tenant l'EM31 sur le côté, ce dernier fonctionnant en mode vertical.

Les résultats obtenus sont en figure 8 et 9.

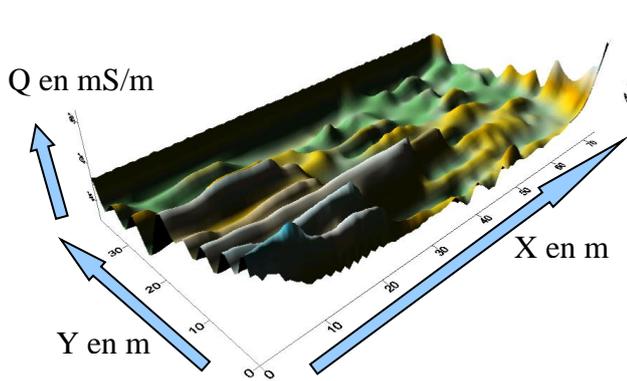


Figure 8 : Conductivité du sol

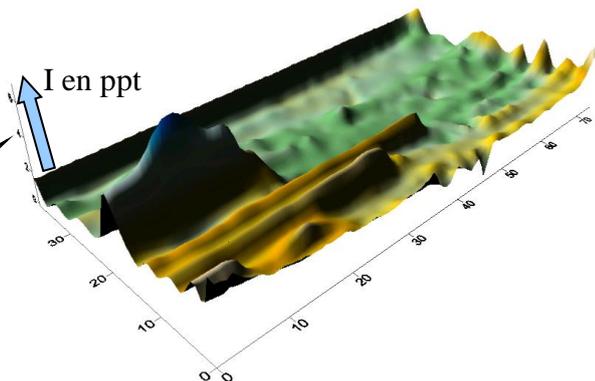


Figure 9 : Composant inphase du sol

Le pas des mesures est d'environ 2 à 3 m. Il apparaît sur les mesures des sortes de vagues le long des lignes effectuées. De plus, la présence des objets posés au sol semble « noyée » dans ces perturbations. Une forte augmentation du composant inphase apparaît sur la figure 9 mais pas sur la figure 8.

Ces résultats sont assez difficiles à interpréter. Je ne sais pas comment expliquer ces « vagues », peut être des perturbations liées au milieu étudié (terrain situé en pleine ville...)?

Nous avons ensuite réalisé des lignes de mesures en suivant l'axe des Y et en tenant l'EM31 devant soit (il est toujours configuré en mode vertical).

Les résultats obtenus sont sur les figures 10 et 11.

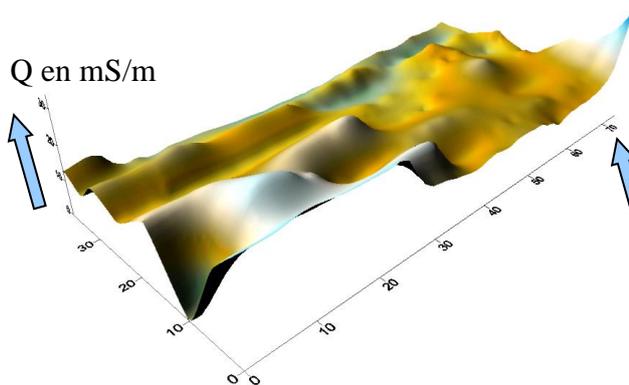


Figure 10 : Conductivité du sol

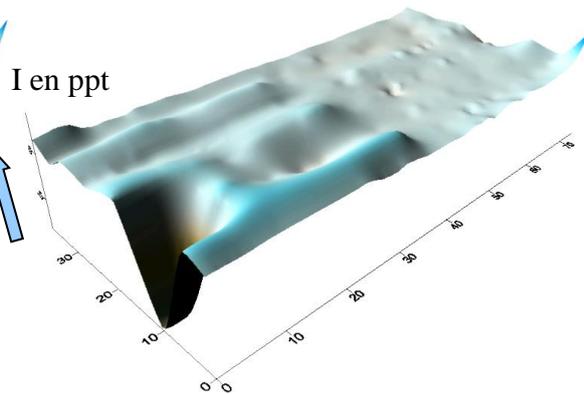


Figure 11 : Composant inphase du sol

Les résultats sont très différents de ceux obtenus précédemment, avec pourtant le même sol et la même configuration.

Il apparaît encore des vagues mais moins prononcées que lors des essais présentés en figures 8 et 9.

Une baisse de conductivité et de composant inphase est également apparue. Elle doit être due au passage près des poteaux de buts en surface.

### Résultats et interprétations des essais réalisés avec l'appareil EM31 sur la plage du Palais sur Vienne

Nous avons réalisé des essais sur la Plage du Palais sur Vienne. En effet, une plage permet d'avoir un sol uniforme et facile à creuser pour y enterrer des objets.

Nous allons ainsi réaliser des mesures sur le terrain sans objets puis sur le terrain contenant des objets. Cela permettra de mieux comprendre quelles anomalies sont apparues à cause des objets.

Une photographie aérienne de la plage du Palais sur Vienne est en figure 12.



Figure 12 : Photographie aérienne du terrain d'étude

Le terrain d'étude a été entouré en rouge. La figure 13 est un plan du terrain d'étude.

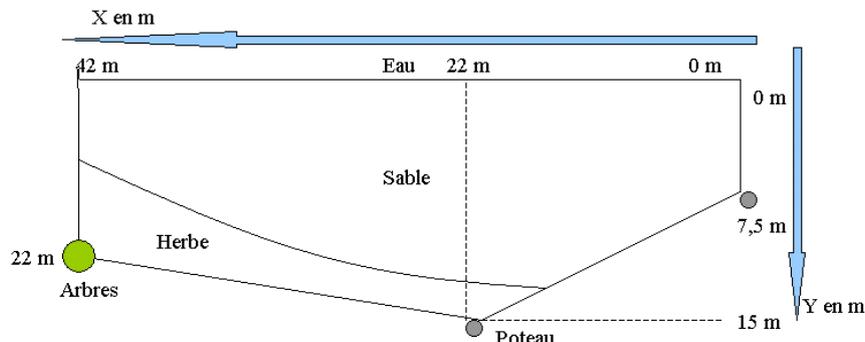


Figure 13 : Plan du terrain d'étude

Le terrain est délimité d'un côté par l'eau et des autres par des lignes reliant deux poteaux et un arbre entre eux.

Nous avons réalisé des mesures sur le terrain ne contenant aucun objet enterré. Des lignes de mesures (7 lignes) ont été réalisées en suivant l'axe des X.

Les résultats obtenus en tenant la barre devant soi puis sur le côté sont respectivement sur les figures 14 et 15.

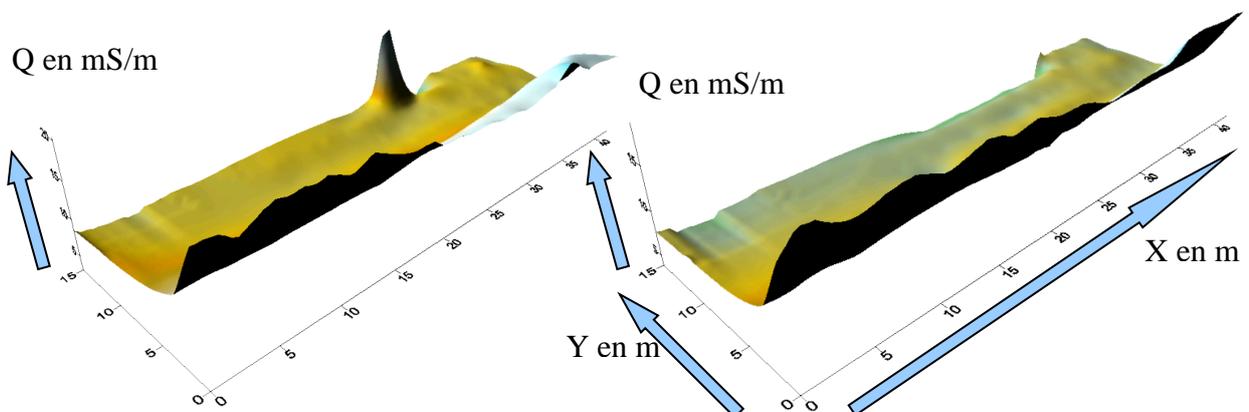


Figure 14 : Conductivité, EM31 devant soi

Figure 15 : Conductivité, EM31 sur le côté

Les résultats sont assez similaires. Les valeurs de conductivités sont d'environ 7 mS/m. La conductivité augmente jusqu'à 15 mS/m lorsqu'on longe l'eau, ce qui est normal étant donné que l'eau de rivière est beaucoup plus conductrice que le sable.

Enfin, il apparaît un pic sur la figure 14 et une baisse de conductivité sur la figure 15, ces deux anomalies doivent être causées par le poteau métallique en surface. Il est étrange cependant, que le poteau crée une augmentation de conductivité lorsque l'EM31 est devant soi et une baisse lorsqu'il est sur le côté...

Nous avons ensuite posé différents objets sur le sol. La figure 16 est un plan représentant le positionnement des objets.

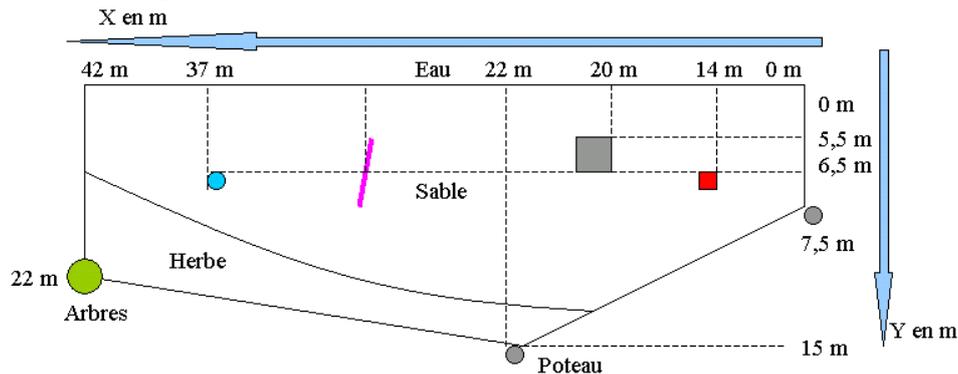


Figure 16 : Plan du terrain d'expérimentation et positionnement des objets

Les objets sont :

- une barre métallique de 2,15 m de longueur et de diamètre 4 cm (en rose),

- un disque métallique de diamètre 20 cm et d'épaisseur 2 mm (en bleu),

- un cube métallique de dimensions 8 x 5 x 5 cm (en rouge),

- une plaque métallique rectangulaire d'épaisseur 2 mm, et de dimensions 90 x 70 cm (en gris).

Des lignes de mesures ont été à nouveau réalisées sur les objets posés sur le sol. L'EM31 est configuré en mode vertical et les mesures sont réalisées en tenant la barre devant soi.

La cartographie obtenue est en figure 17.

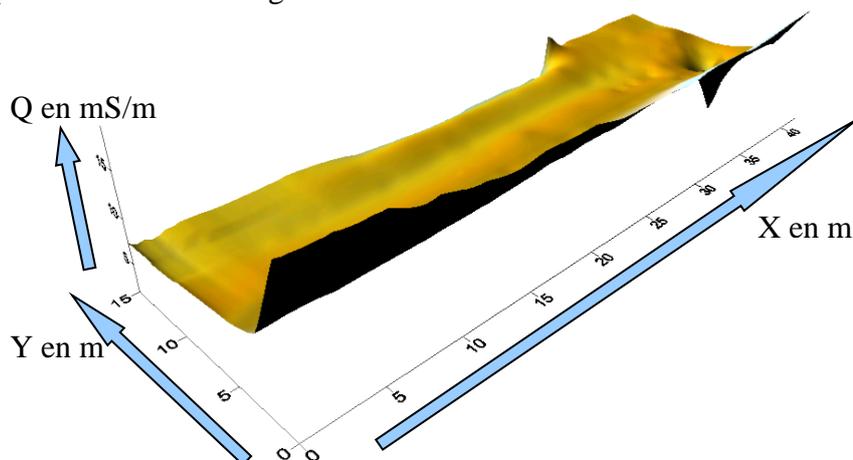


Figure 17 : Conductivité du terrain, objets posés sur le sol

Les objets n'entraînent pas vraiment de différences sur les mesures, seulement le disque métallique qui semble entraîner une baisse de conductivité. Cependant, la baisse de conductivité est décalée par rapport au positionnement réel du disque...

Des essais ont ensuite été réalisés après enfouissement des objets à environ 5 cm de profondeur.

La cartographie obtenue avec l'EM31 configuré en dipôle vertical et en le tenant sur le côté est en figure 18, en le tenant devant soi, en figure 19.

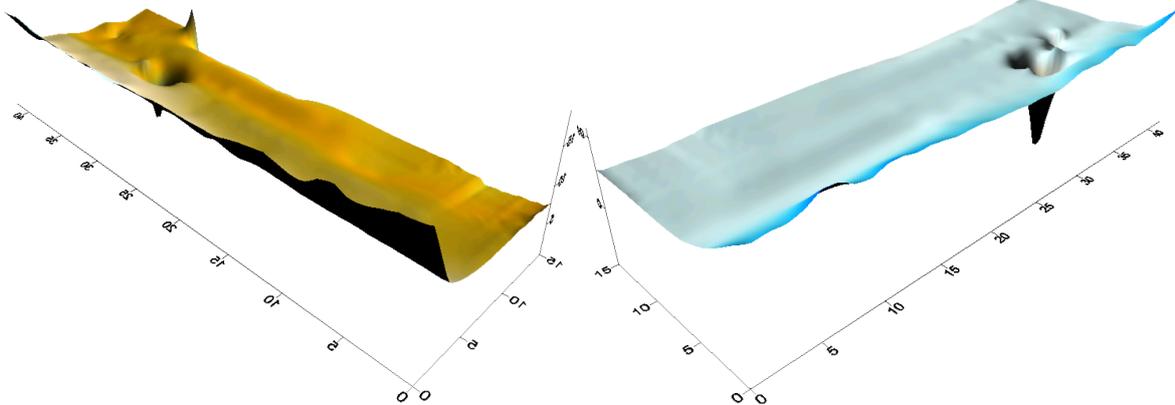


Figure 18 : Conductivité, EM31 sur le côté

Figure 19 : EM31 devant soi

Les résultats sont également similaires à ceux obtenus avec les objets posés sur le sol. Cependant, la baisse de conductivité apparue sur la figure 17 est toujours présente mais semble décalée, vers la position de la barre métallique mais avec la forme de la plaque rectangulaire... Cela est-il dû à une erreur lors de la réalisation de la cartographie ? Si c'était effectivement dû à cela, la position serait différente de la figure 18 à la figure 19, ce qui n'est pas le cas...

Aucune anomalie n'apparaît vis à vis des autres objets.

Enfin, nous avons réalisé deux lignes de mesures en nous déplaçant de l'herbe vers l'eau. La figure 20 représente, sur le plan du terrain, les lignes de mesures réalisées.

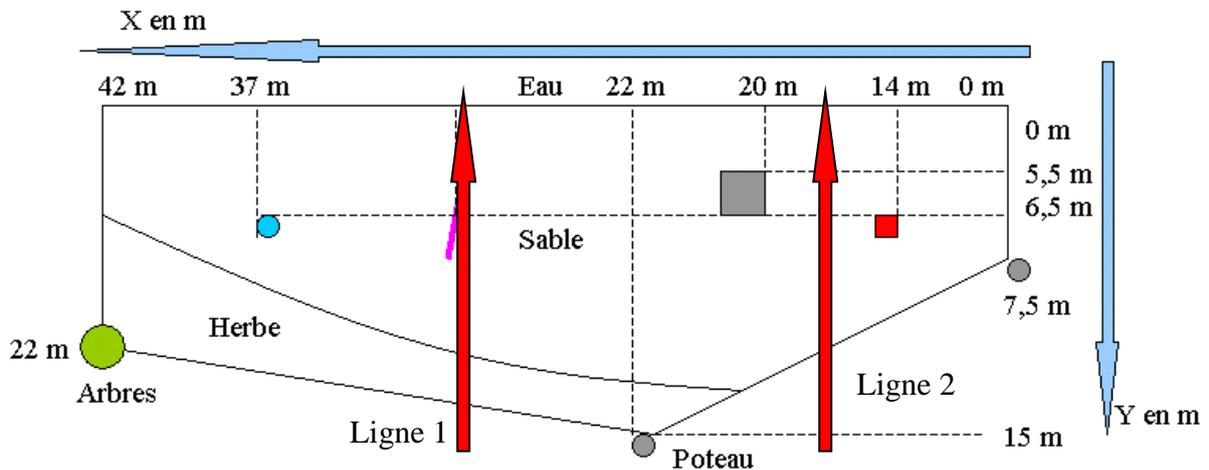


Figure 20 : Lignes de mesures réalisées sur le terrain

Le résultat obtenu pour la ligne 1 est en figure 21.

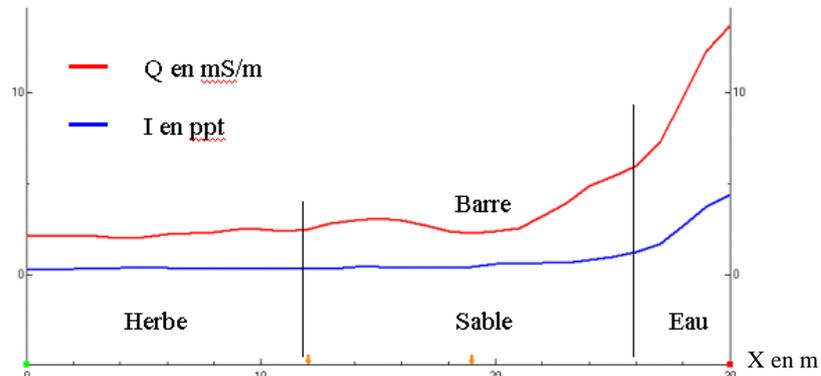


Figure 21 : Conductivité et composant inphase du terrain sur la ligne 1

Sur cette figure, la conductivité augmente sensiblement en passant de l'herbe au sable puis diminue à proximité de la barre métallique (posée sur le sable), et augmente énormément en s'approchant de l'eau. Le composant inphase, lui, ne varie qu'à proximité de l'eau.

L'augmentation de la conductivité à proximité de l'eau est normale étant donné que la conductivité de l'eau est supérieure à celle du sable. Au contraire, la baisse de conductivité à proximité de la barre est étrange, étant donné que le métal est plus conducteur que le sable, la conductivité devrait par conséquent augmenter.

Les résultats obtenus sur la ligne 2, plus humide que la ligne 1, sont sur la figure 22.

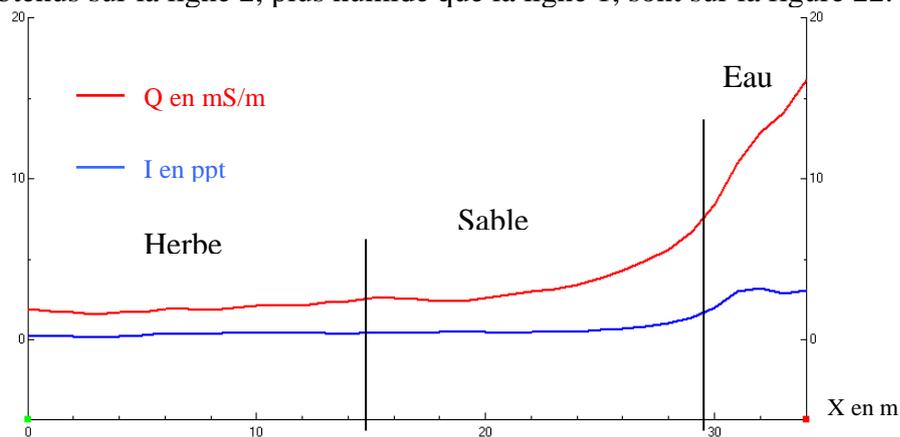


Figure 22 : Conductivité et composant inphase sur la ligne 2

Les résultats sont identiques à précédemment (en éliminant la baisse de conductivité due à la barre métallique).

Le composant inphase semble se stabiliser vers 3,5 ppt au niveau de l'eau.

Le fait que le terrain soit plus humide n'a pas fait varier significativement les résultats.

## Résultats et interprétations des essais réalisés avec l'appareil EM31 à La Brugerie

### I. Cartographie du terrain derrière la maison:

- Photo aérienne

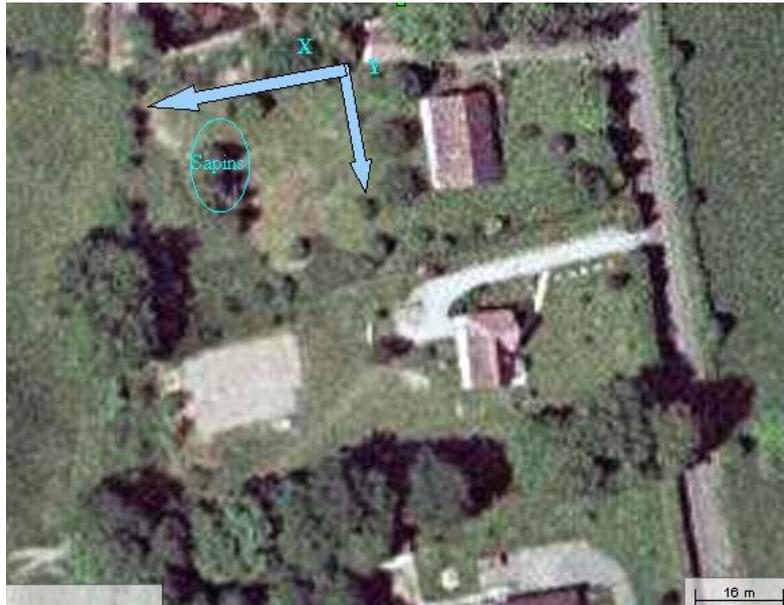


Figure 1 : photographie aérienne du terrain de la Brugerie

Le terrain a été cartographié tout d'abord sur une longueur de 1 à 45 m (ou 47 m) selon l'axe des X et une largeur de 38 m sur l'axe des Y (axes dessinés sur la figure 1). Des lignes de mesures sont effectuées en suivant l'axe des Y.

Dans un premier fichier, 14 lignes sont réalisées (en mode vertical et 11 lignes en mode horizontal) avec l'EM31 et le GPS en évitant les sapins. Un second fichier est ensuite effectué avec seulement l'EM31 au niveau des sapins (le GPS étant brouillé par les branches). Ce fichier est composé de 3 lignes parallèles en suivant l'axe des Y.

Les deux fichiers ont alors été combinés afin d'obtenir une cartographie de tout le terrain derrière la maison.

Lors de ces mesurages, on obtient les valeurs de la conductivité terrestre du sol (noté Q) en millisiemens par mètres (mS/m) et du composant inphase (noté I) en parties par mille (ppt). Deux modes sont utilisés: le mode dipôle vertical et le mode dipôle horizontal.

- Cartographie en mode dipôle vertical

Pour réaliser ce mesurage, l'EM31 est tenu dans sa position normale. Cette méthode de mesurage permet de cartographier le sol à une profondeur d'environ 6m.

Résultats obtenus sur le terrain:

#### Conductivité [mS/m]

Suite aux mesures, la cartographie fait apparaître la conductivité du sol sur tout le terrain (voir figure 2). Le terrain semble assez homogène, présentant une conductivité comprise entre 9 et 18 mS/m. Cependant, quelques « pics » de conductivité apparaissent dans la zone qui va de l'origine [0;0] jusqu'à environ [20;16].

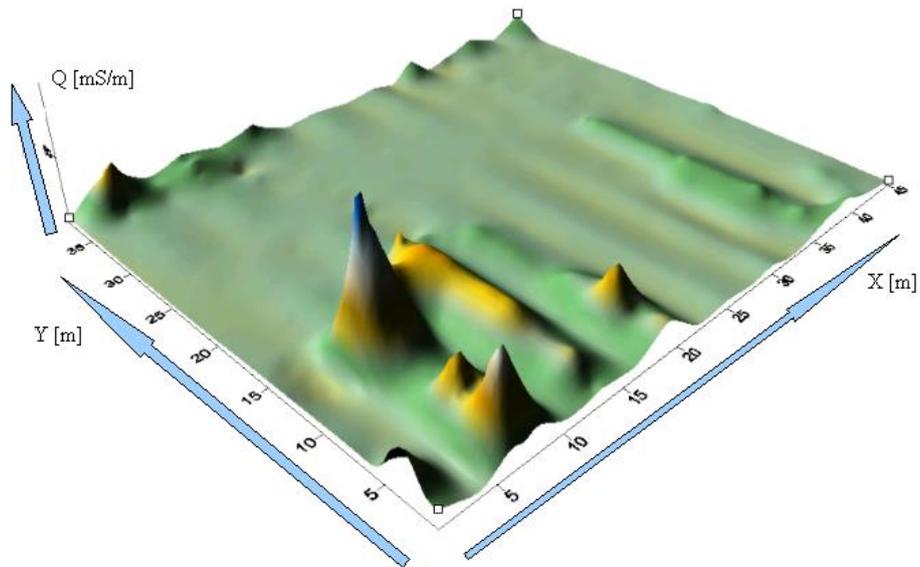


Figure 2 : Conductivité du terrain en mode dipôle vertical

Au point de coordonnées [7;13], la conductivité est de 96 mS/m.

Composant inphase [ppt]:

Suite à la même série de mesurages, la cartographie du terrain représente le composant inphase. Ce composant correspond au rapport du second champ magnétique (induit) sur le premier champ(émit).

La figure 3 présente les résultats des mesurages.

Sur cette figure, il apparaît le même type d'anomalies que précédemment. En effet, une grande partie du terrain semble assez homogène, avec un composant inphase compris entre 3 et 6 ppt. Des valeurs beaucoup plus importantes apparaissent dans le carré qui va de l'origine à environ [20;16] comme sur la figure 1.

Le pic maximum de cette cartographie est situé en [6,8;13] avec un composant inphase de 24,8 ppt.

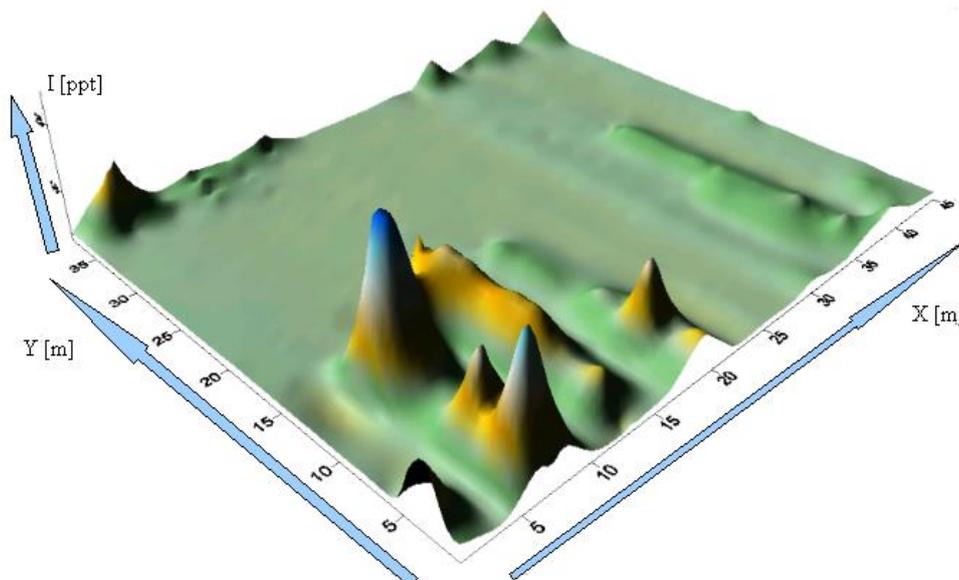


Figure 3: Composant inphase en mode dipôle vertical

- Cartographie en mode dipôle horizontal

Pour réaliser des mesurages en mode horizontal, il faut tourner l'EM31 de 90°, la barre qui le constitue servant d'axe de rotation. Cette méthode permet de mesurer la conductivité du sol ainsi que la composante inphase à 3 m de profondeur.

Résultats obtenus:

Conductivité [mS/m]:

La figure 4 présente la conductivité obtenue en mode dipôle vertical. La cartographie a des points communs mais également de très grosses différences avec celle obtenue en mode dipôle horizontal. En effet, comme précédemment, une grande partie du terrain fait apparaître une conductivité assez uniforme. Les valeurs vont de 7 à 12 mS/m (lors de l'étude en mode dipôle horizontal, Q était comprise entre 9 et 18 mS/m).

Sur la figure 4, il apparaît des valeurs de conductivité très négatives (allant jusqu'à -115 mS/m), ce qui peut sembler incohérent. En effet, la conductivité est une donnée toujours positive (puisque'elle est égale à l'inverse de la résistivité et qu'une résistivité négative n'existe pas!). Cette anomalie s'explique par la présence d'un objet perturbateur (sans doute un métal), peut être en surface.

Sur la figure 2, la conductivité augmente dans la même zone. Mais comment expliquer que cette anomalie fasse apparaître des valeurs très négatives en mode dipôle vertical et pas en mode dipôle horizontal ?

De plus, dans la zone qui était très perturbée en mode dipôle vertical, deux petits pics sont visibles en mode dipôle horizontal pour lesquels la conductivité est de 36 et 38 mS/m.

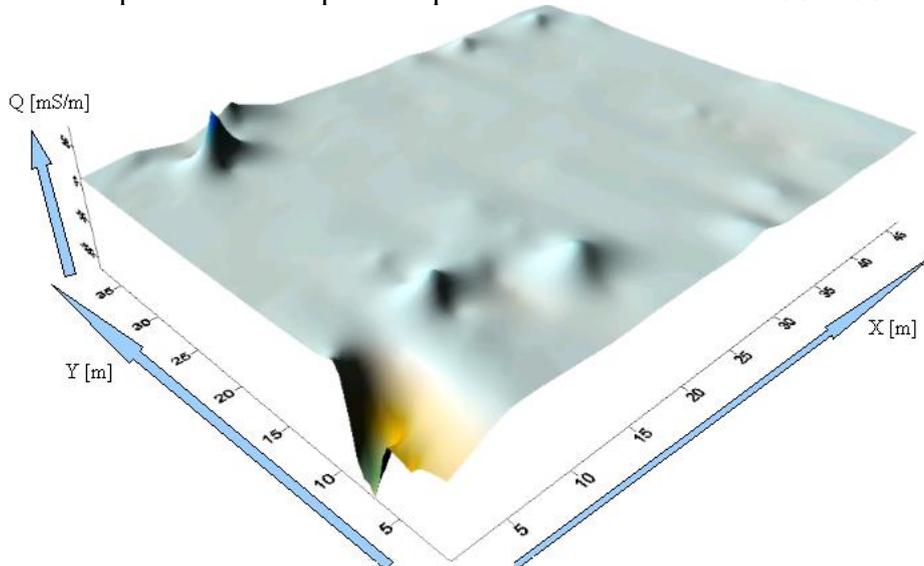


Figure 4: Conductivité en mode horizontal

Deux phénomènes peuvent expliquer ces différences. Soit les anomalies qui ressortent avec le mode dipôle vertical sont à une profondeur de 6 m ou plus (la méthode dipôle vertical permettant de sonder à une profondeur d'environ 6 m) et le mode horizontal ne sondant qu'à 3m ne « verrait » que les « répercussions » de ces anomalies enfouies plus profondément. Soit ces différences viennent du fonctionnement même des deux modes, l'un étant plus sensible à une certaine sorte d'anomalies par rapport à l'autre.

Le pic situé en X=5 et Y=35 peut s'expliquer par la présence d'un système métallique servant à accrocher le linge.

## Composant inphase [ppt]:

La figure 5 représente le composant inphase en mode dipôle horizontal. La cartographie a la même allure que précédemment (figure 4). Comme en mode vertical, une grande partie du terrain laisse apparaître un composant inphase uniforme allant de 3 à 6 ppt.

Cependant, ces mesures en mode horizontal présentent les mêmes différences que les mesures de conductivité étudiées précédemment. La même anomalie fait apparaître des valeurs négatives (jusqu'à -15 ppt). Les deux pics apparus précédemment sont également présents (13 et 14 ppt).

On peut alors se poser les mêmes questions que pour la conductivité en mode horizontal.

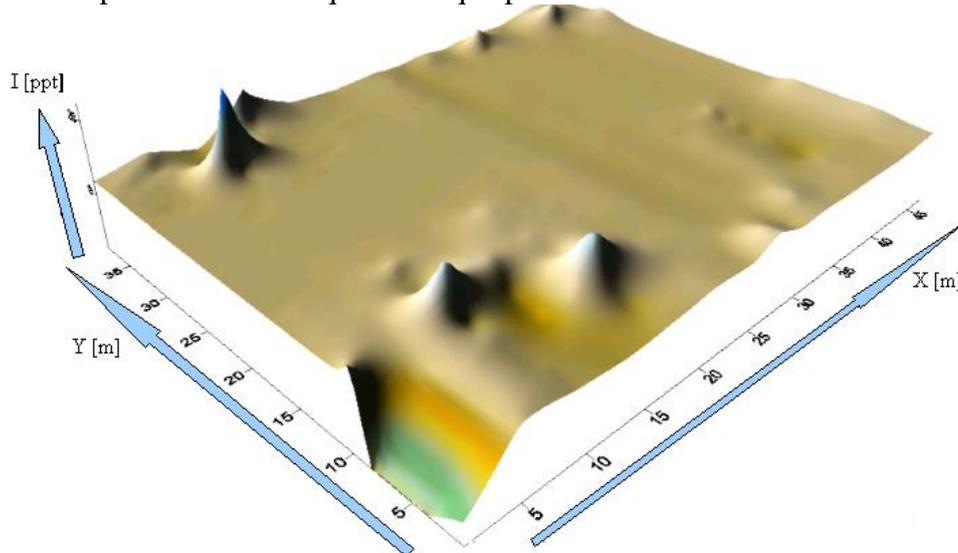


Figure 5: Composant inphase en mode horizontal

## II. Réponses à des éléments perturbateurs:

Dans cette deuxième partie, nous avons considéré une surface de terrain plus petite et nous avons étudiés la réponse de l'EM31 et de ces différents modes face à des objets perturbateurs. Le terrain étudié est situé dans une zone où Q et I sont assez constants. Cette zone s'étant de  $X = [35;47]$  m et  $Y = [1; 13]$  m.



Figure 6: photographie aérienne du second terrain d'étude

La zone d'étude est symbolisée sur la figure 6. La première étude nous a permis de savoir que la conductivité du sol ainsi que la composant inphase sur cette partie du terrain étaient quasiment constants est d'environ, respectivement, 10 mS/m et 5 ppt.

Lors de cette seconde étude, nous avons réalisé 6 lignes parallèlement à l'axe des X. Cependant, la première ligne étant à proximité d'un grillage, nous avons dû systématiquement l'éliminer (le grillage brouillait le signal et faisait apparaître des résultats incohérents).

Les résultats seront donc ceux réalisés avec 5 lignes, pour X allant de 1 m à 15 m et Y allant de 5 m à 13 m (à partir du grillage). Sur la figure 7, la zone étudiée avec l'EM 31 (sans compter la ligne 1) est entourée en pointillé vert.

### 1. Objets posés sur le sol:

Nous avons tout d'abord réalisé des essais en posant les objets perturbateurs sur le sol. La figure 7 est un plan de disposition des objets, ce plan sera le même pour les différents essais (objets enterrés...).

Plan de l'essai:

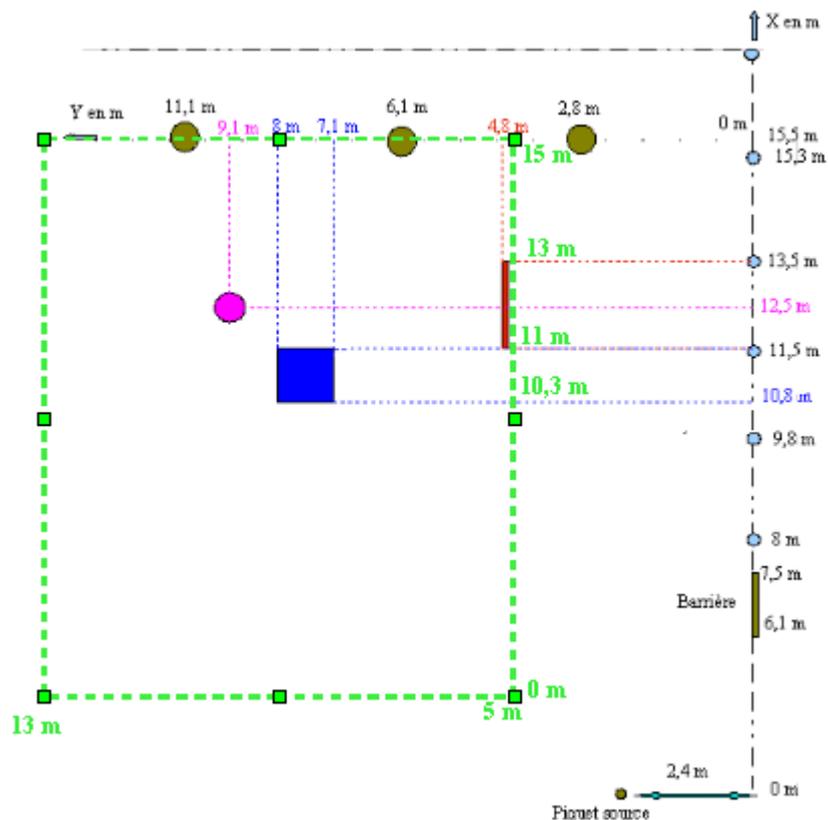


Figure 7: Plan représentant les objets enterrés et les lignes effectuées avec l'EM31

Les objets perturbateurs sont:

- une barre métallique creuse de diamètre 4 cm et de longueur 2,15 m (en rouge).
- une plaque rectangulaire d'épaisseur 2 mm, de longueur 90 cm et de largeur 70 cm (en bleu).
- une plaque ronde d'épaisseur 2 mm et de diamètre 20 cm (en rose).

- Mesures en mode vertical:

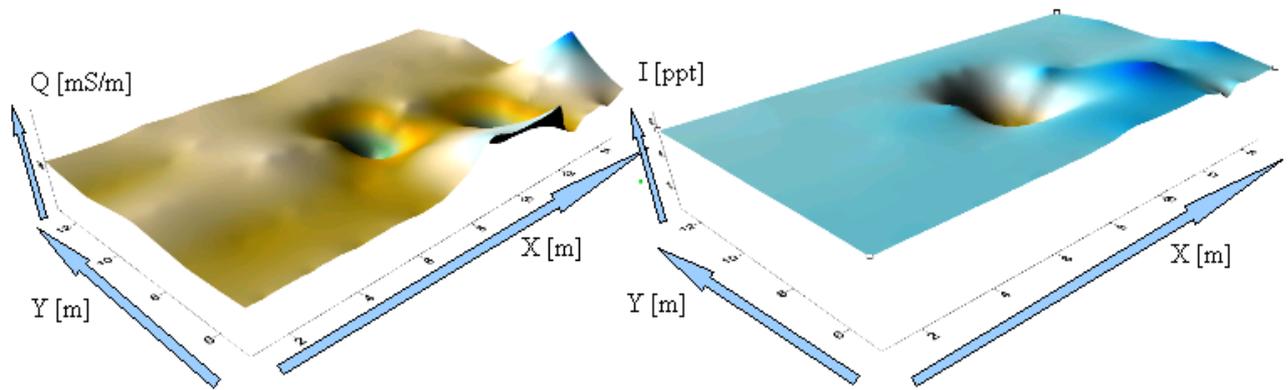


Figure 8: Conductivité

Figure 9: Composant inphase

Sur la figure 8, deux creux et deux pics de conductivité apparaissent. En général, sur cette figure, la conductivité est environ de 10 mS/m.

Il semble évident que le pic ( $Q$  est environ égal à 14,8 mS/m) situé le long de l'axe des  $X$  correspond à la présence du tuyaux en métal.

Les deux creux semblent correspondre à la présence des deux autres objets. Cependant, les creux ne sont pas situés au même endroits que les objets. En effet, le disque est décalé de +2m selon l'axe des  $Y$  est de 0,3 m selon l'axe des  $X$ . La plaque rectangulaire est elle décalée de +1 m selon l'axe des  $X$  et des  $Y$ .

Ce décalage peut être dû aux traitements effectués sur les mesures (les lignes effectuées ont été considérées comme parfaitement parallèles, les lignes de points ont été ajustées selon la longueur réelle de la ligne...).

Un point de conductivité élevée est visible à  $Y=8$  et  $X=15$ . Cette anomalie peut s'expliquer, par exemple, par la présence d'un grillage à proximité de la mesure.

De plus, je ne comprend pas pourquoi le disque et la plaque métallique font apparaître des baisses de conductivité tandis que la barre métallique fait apparaître une hausse de conductivité. Logiquement, la présence d'un métal fait augmenter la conductivité mais ce n'est pas le cas pour le disque et la plaque...

En figure 9, les anomalies sont moins visibles. La moyenne de  $I$  sur la figure est d'environ 4 ppt.

La présence de la plaque rectangulaire apparaît clairement ( $I=-8$  ppt) mais moins les autres objets. Le composant inphase augmente très légèrement à l'emplacement de la plaque métallique ( $I=5$  ppt). Le disque métallique fait apparaître une augmentation de 3 ppt par rapport à la moyenne.

On observe comme en figure 7 la présence d'un pic vers  $Y=8$  m.

La réponse est différente que précédemment, en effet, sur la plaque rectangulaire la conductivité et le composant inphase décroissent tandis que sur le disque métallique, la conductivité décroît et le composant inphase croît.

- Mesures en mode horizontal:

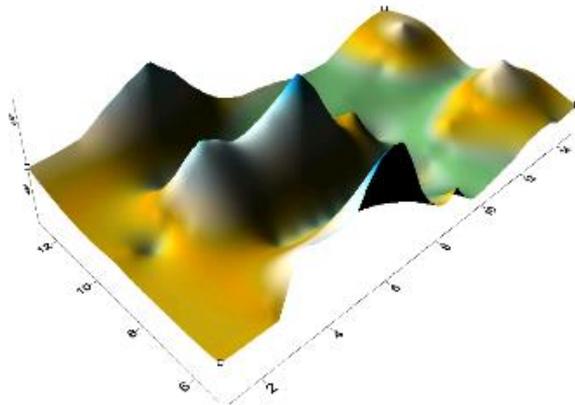


Figure 10: Conductivité

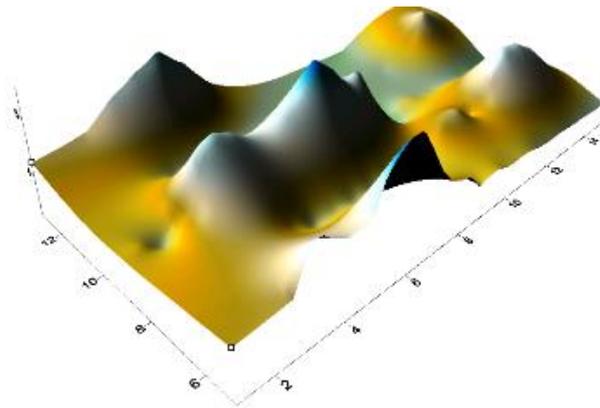


Figure 11: Composant inphase

Les résultats en mode horizontal, sur les figures 10 et 11, semblent très incohérents et difficilement interprétables. En effet, selon l'étude précédente, sans objets, les valeurs de conductivité étaient d'environ 10 mS/m. Lorsque les objets métalliques sont ajoutés, posés au sol, des pics d'environ 16 mS/m et des creux de 7 mS/m apparaissent. De plus, ces pics et ces creux ne correspondent pas au positionnement ni à la forme des objets.

Le même type de phénomène est observable sur la figure 11, en mesurant le composant inphase.

Les éléments perturbent les champs magnétiques par rapport aux mesures sans objets. Mais cette méthode en mode horizontal ne permet apparemment pas de situer les objets ni de les identifier.

## 2. Trous creusés, sans objets:

Nous avons ensuite creusé des trous afin d'enterrer les objets. Nous avons réalisé des mesures avec les trous vides (profondeur d'environ 40 cm) afin de voir si l'EM 31 allait détecter ces manques de matière.

- Mesures en mode vertical:

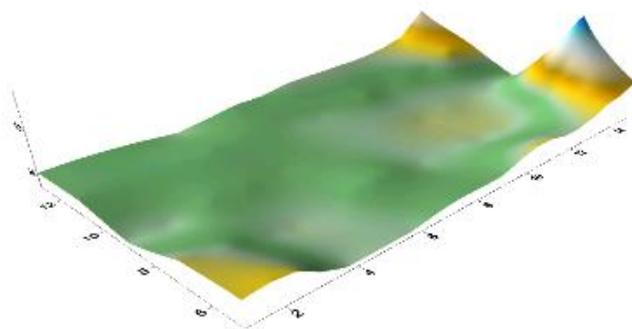


Figure 12: Conductivité

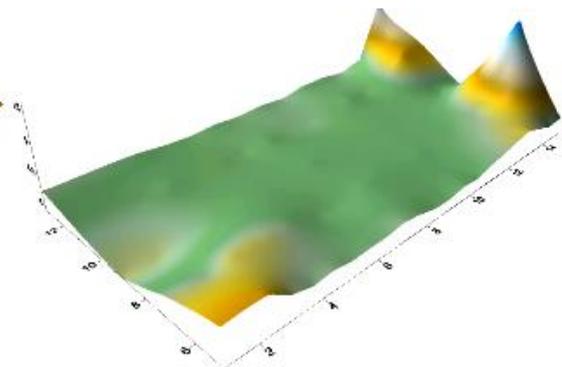


Figure 13: Composant inphase

Sur les deux figures 12 et 13, les trous ne perturbent pas la mesure (les pics pour X= 15 m sont dus à la présence du grillage).

- Mesures en horizontal:

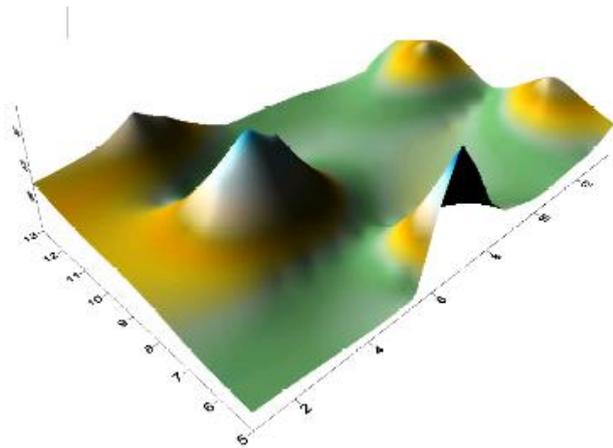


Figure 14: Conductivité

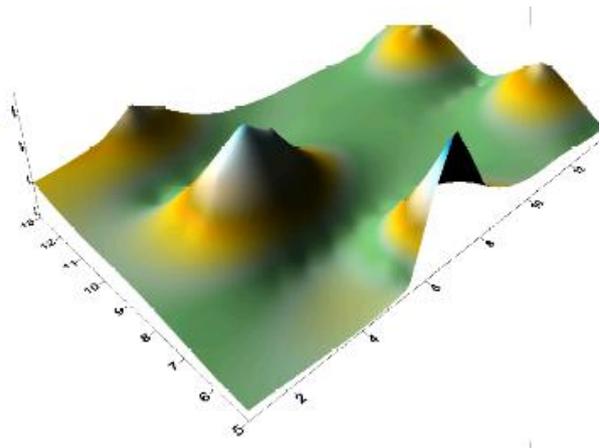


Figure 15: Composant inphase

En mode horizontal, quelques pics de conductivité et de composant inphase situées aux mêmes endroits. Ces anomalies doivent être dues aux trous (puisque'on obtenait des résultats uniformes dans l'étude sans objets, figure 4 et 5) mais comme dans l'étude précédente (figures 10 et 11) les anomalies ne correspondent pas à l'emplacement des trous.

### 3. Objets enterrés:

Enfin, nous avons enterré les 3 objets et nous les avons recouverts de terre, puis nous avons recommencé une série de mesurages.

- Mesures en mode vertical:

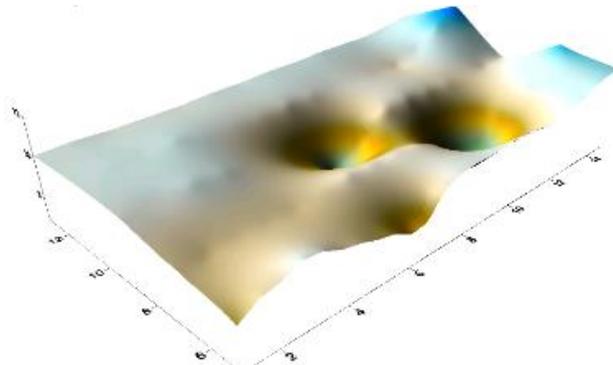


Figure 16: Conductivité

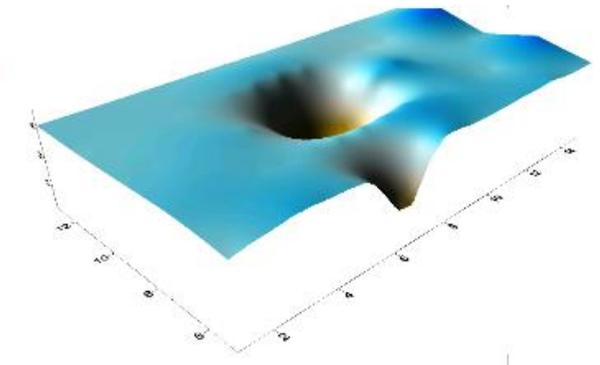


Figure 17: Composant inphase

Sur la figure 16, la présence des trois objets est clairement identifiable. Ces derniers font apparaître une diminution de la conductivité, contrairement aux résultats obtenus en figure 8 avec les objets en surface (la barre faisait apparaître une augmentation de conductivité).

Les anomalies sont situées aux mêmes endroits que sur la figure 8 (décalés par rapport aux positions réelles des objets). Cette constatation peut infirmer l'hypothèse que les décalages étaient dû aux traitements puisque les lignes réalisées ne sont jamais totalement identiques et que les positionnements d'anomalies sont identiques...

Ce décalage serait alors dû à l'appareillage? Au champ secondaire émis par les objets?

Sur la figure 17, un résultat similaire à celui de la figure 9 est obtenu (objets posés sur le sol). Cependant la barre fait également apparaître une diminution du composant inphase. L'anomalie provoquée par la barre la fait apparaître moins longue que réellement (ce qui est aussi à remarquer sur la figure 16). Ceci peut s'expliquer par le fonctionnement de l'EM31 qui

nous donne une valeur moyenne de la conductivité du sol situé entre son émetteur et son récepteur à une profondeur d'environ 6m.

Le disque métallique ne fait pas apparaître d'anomalies significatives sur la figure 17.

Le disque a-t-il des dimensions trop petites pour être détectées (diamètre de 20 cm)?

- Mesures en mode horizontal:

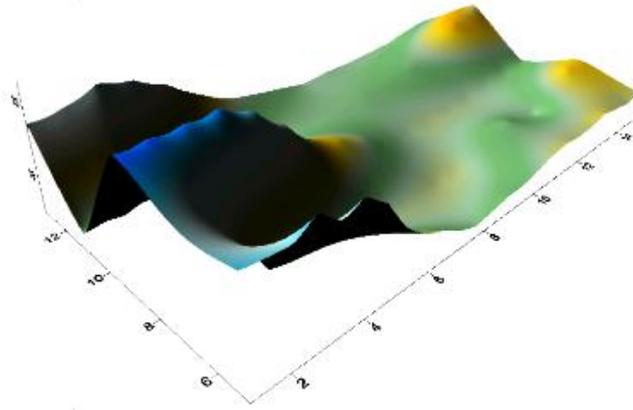


Figure 18: Conductivité

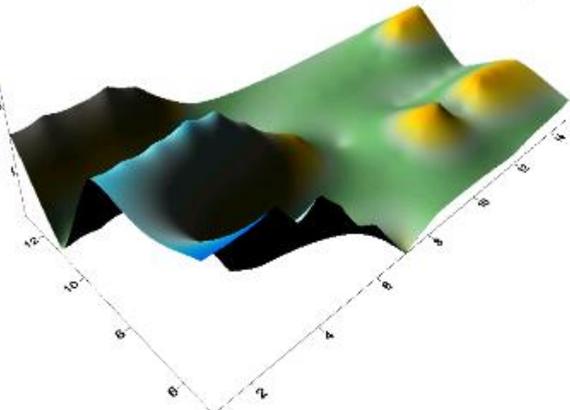


Figure 19: Composant inphase

Comme précédemment, les mesures en mode horizontal me semble assez difficiles à interpréter.

### III. Essais entre maison et le garage:

Nous avons réalisé des essais entre la maison et le garage. Sur la figure 20, sont symbolisées par des flèches les deux lignes réalisées. En effet, sous la ligne 2, le béton fait apparaître une cassure, à environ 1 m sous terre est enterrée une canalisation.



Figure 20: Essais entre la maison et le garage.

Lors de cette expérimentation, nous voulions savoir si l'EM31 permettait de voir la cassure de ciment et/ou le tuyau enterré.

On obtient les résultats suivants:

- en mode dipôle vertical:

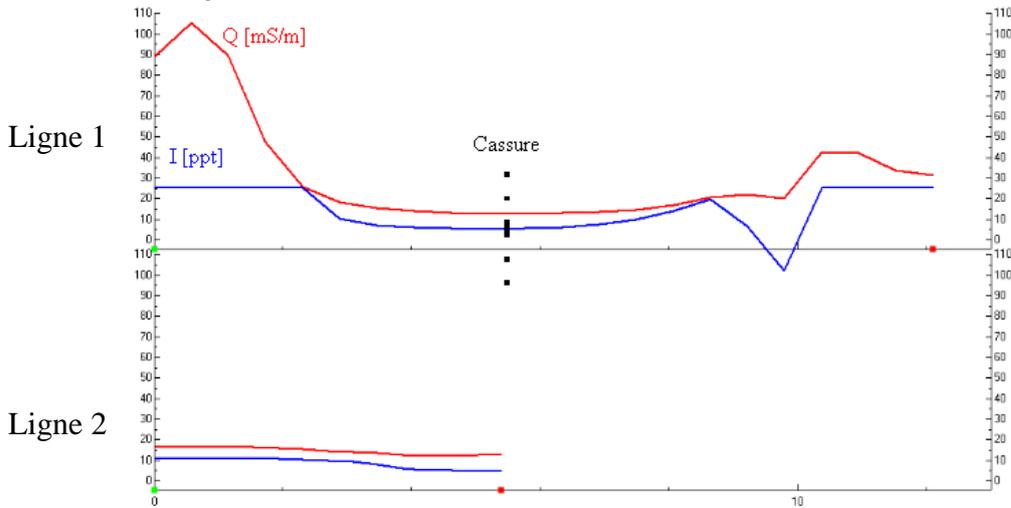


Figure 21: Conductivité et composant inphase en fonction de la distance

Sur la figure 21 est tracé la conductivité (en rouge) en mS/m et le composant inphase (en bleu) en ppt en fonction de la distance depuis le début de chaque ligne en m.

Les résultats de la ligne 1 sont dans la partie supérieure, ceux de la ligne 2 sont dans la partie inférieure de la figure 21.

La ligne 1 fait 12,1 m de long et coupe la ligne 2 sur la cassure à 5,5 m de son début. La ligne 2 fait 5,4 m de longueur et longe la cassure.

Les anomalies en début et en fin de la ligne 1 ne sont pas dues à la présence de la cassure ni du tuyau. Cette méthode ne permet pas de voir des objets en PVC enterrés (la différence de conductivité avec le sol doit être trop minime).

- En mode dipôle horizontal:

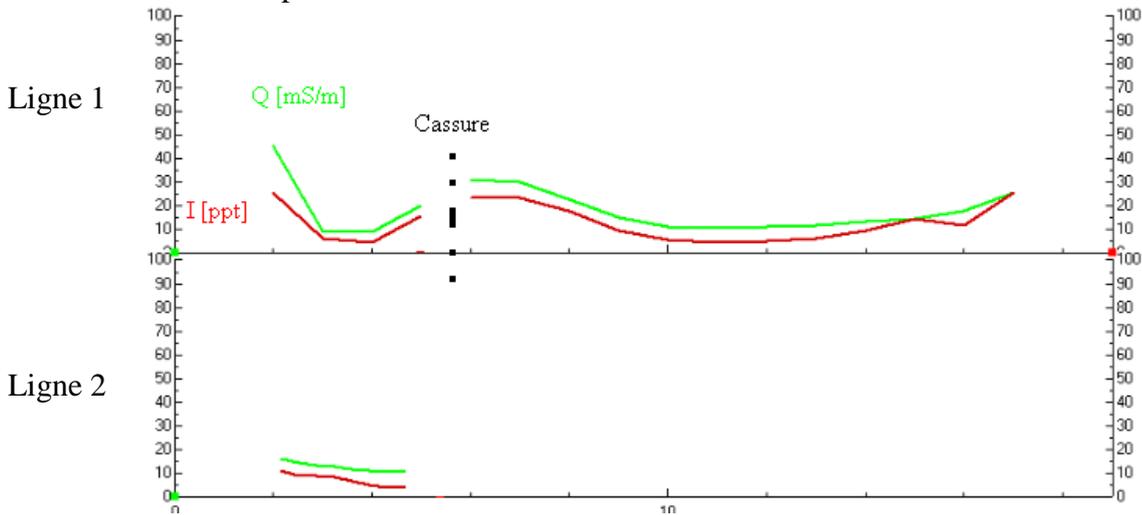


Figure 22: Conductivité et composant inphase en fonction de la distance

La figure 22 présente les résultats obtenus sur les 2 lignes comme précédemment mais en mode horizontal (conductivité en vert et composante inphase en rouge). On peut remarquer qu'il manque des valeurs, cela doit être dû à l'orientation de l'EM 31 qui ne devait pas être parfaitement à 90°.

La conductivité et le composant inphase augmentent à proximité de la cassure. Cependant, il est difficile de conclure sur la détection ou non de la présence du tuyau et de la cassure (l'augmentation est visible sur environ 3 m, sur la ligne 2, les valeurs sont plutôt basses...).

#### IV. Essais à l'entrée de la propriété:

Nous avons ensuite réalisé des essais pour voir si l'on pouvait détecter une canalisation enterrée.

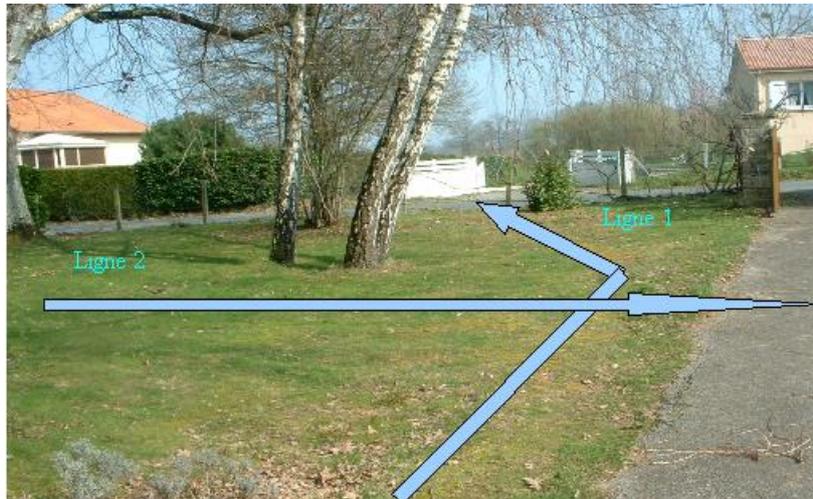


Figure 23: Essais à l'entrée de la propriété

La ligne 1 suit la canalisation tandis que la ligne deux la coupe et traverse ensuite la zone goudronnée (voir figure 22).

La ligne 1 fait 14,7 m de long et la ligne 2 fait 18,7 m.

On obtient les résultats suivants:

- En mode dipôle vertical

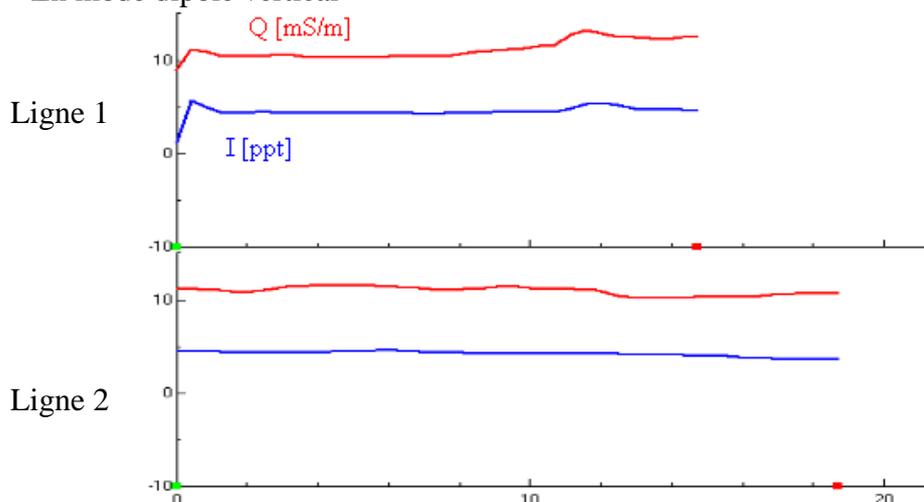


Figure 24 : Conductivité et composant inphase en fonction de la distance

Sur la figure 24, il n'apparaît pas d'anomalies sur la ligne 2 qui passe de l'herbe, contenant la canalisation enterrée (à environ 2 m), à la partie goudronnée.

De plus, en longeant la canalisation, le signal a à peu près les mêmes valeurs que aux début de la ligne 2 sur l'herbe.

On peut donc penser que l'EM31 ne voit pas la différence entre de l'herbe et un sol goudronné.

- En mode dipôle horizontal

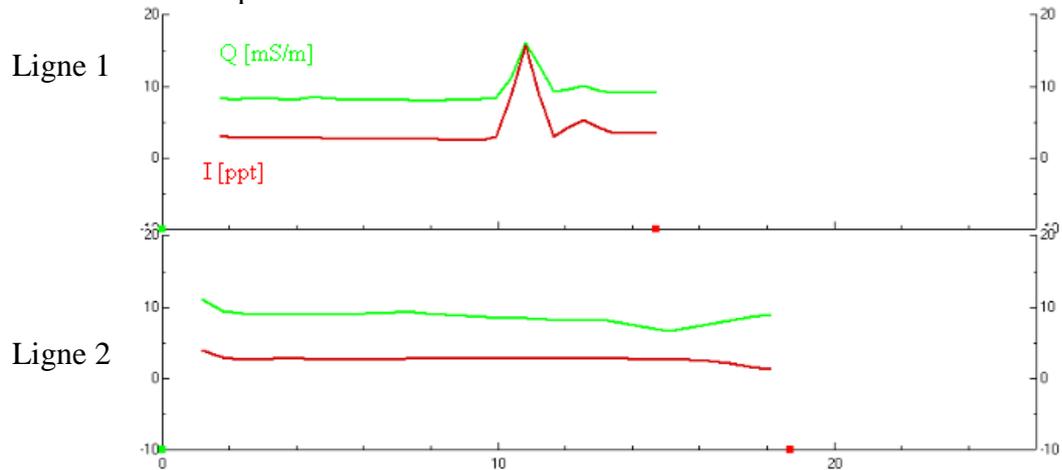


Figure 25: Conductivité et composant inphase en fonction de la distance

Sur cette figure, une anomalie est visible à environ 11 m, je pense que cette dernière n'est pas dû à un objet enterré, ou autre, mais à une perturbation extérieure.

Si cette anomalie est ignorée, les conclusions sont identiques à précédemment.

## V. Essais devant la maison:

Enfin, nous avons effectué 3 lignes devant la maison comme on peut le voir sur la figure 26.

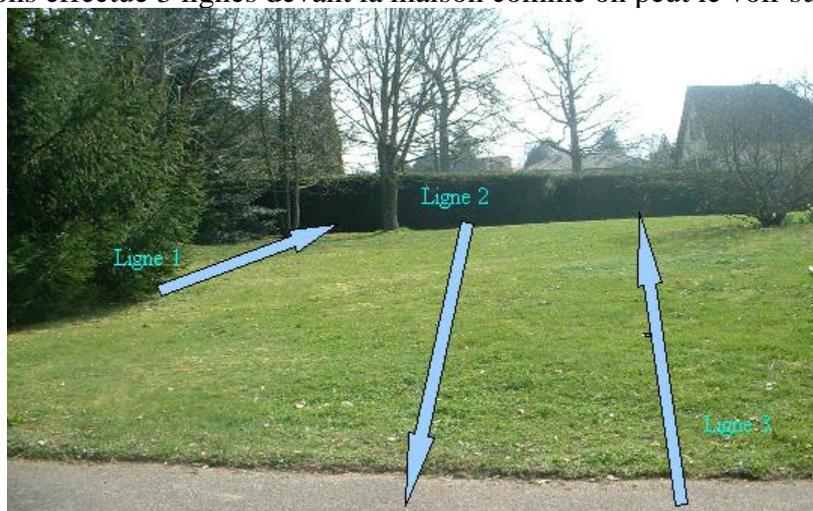


Figure 26: Essais devant la maison

Résultats obtenus:

- En mode vertical

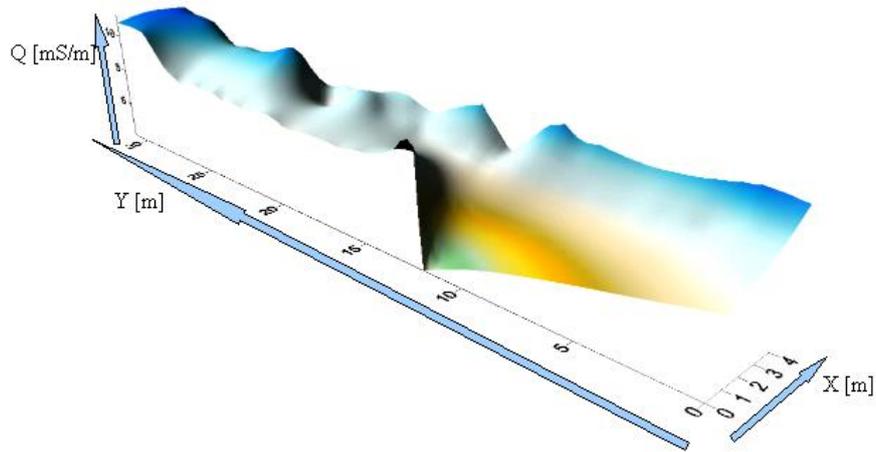


Figure 27: Conductivité en mode vertical

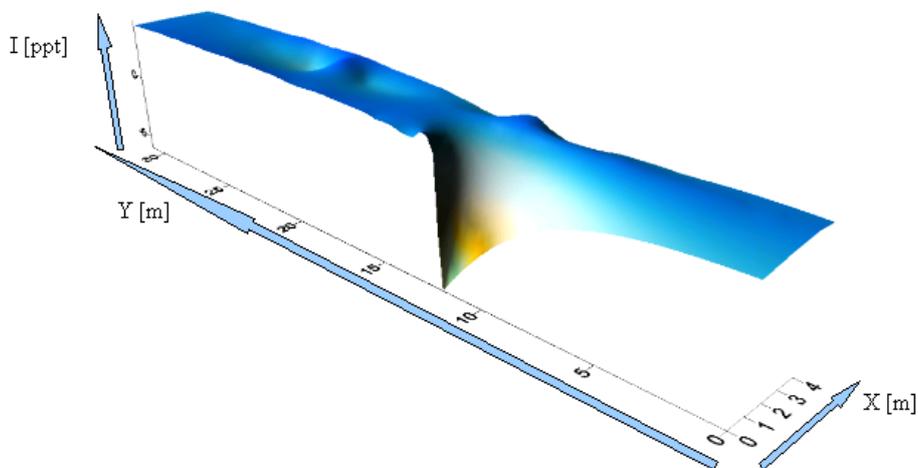


Figure 28: Composant inphase en mode vertical

Ces résultats en figures 27 et 28 sont à prendre « avec des pincettes ». En effet, sur la figure 26, la ligne 1 est plus courte que les deux autres. La cartographie de points obtenus représente donc une sorte de trapèze. Cependant, lorsqu'on traite les données avec le logiciel Sufer, ce dernier extrapole les données manquantes.

Je pense que la surface étudiée est trop petite et trop inconnue pour pouvoir interpréter correctement les résultats. Le point à 12 m peut être négligé, en effet, il ne semble pas cohérent avec le reste de la cartographie (trop négatif et trop isolé).

On peut dire que les résultats sont assez constants, surtout sur la figure 28 et qu'un objet peut être enterré en  $X = 3$  m et  $Y = 21$  à  $23$  m.

- En mode horizontal

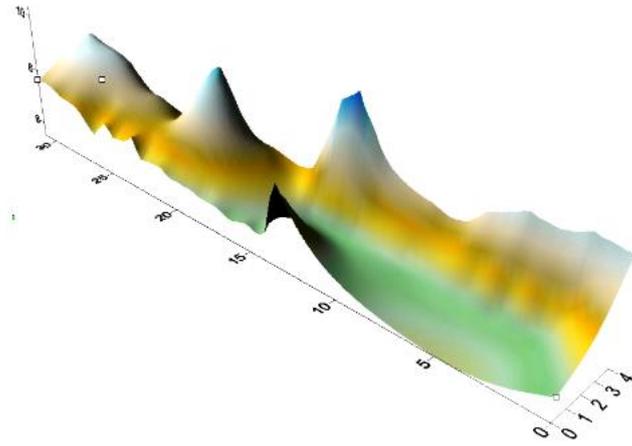


Figure 29: Conductivité en mode dipôle horizontal

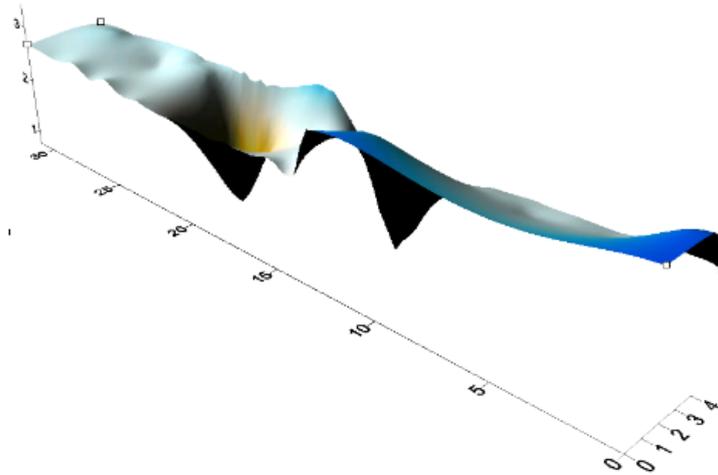


Figure 30: Composant inphase en mode horizontal

Comme nous l'avons vu précédemment, il est très difficile d'interpréter un résultat en mode horizontal. Les résultats sont assez chaotiques, je ne sais pas comment les expliquer.

## VI. Conclusions sur l'EM31:

- Mode horizontal

Suite à cette étude, nous avons pu voir que les mesures en mode horizontal étaient très difficiles à interpréter. En effet, notamment lors de l'étude avec les objets, on obtient de grosses variations de conductivité et de composant inphase mais ces dernières sont difficilement identifiables. En effet, prenons par exemple la figure 10. Sauriez-vous dire dans quel cas nous étions juste en regardant les résultats? Des anomalies, que l'on pourrait à priori attribuer à des objets métalliques (genre barre) disposés suivant l'axe des X à 3 distances Y différentes, apparaissent. En réalité ce n'est pas du tout le cas.

C'est pour cette raison, que si je devais avoir à utiliser l'EM31 ultérieurement, je n'utiliserais pas le mode horizontal pour caractériser un sol.

- Mode vertical

Suite à notre étude, nous pouvons tirer beaucoup de conclusions sur cette méthode, et également soulever beaucoup de questions.

Le mode vertical peut permettre d'obtenir des variations de conductivité et de composant inphase correspondantes à la présence d'objets.

Cependant, ces objets faisaient apparaître des variations tantôt négatives et tantôt positives (pour le même objet). Je n'arrive pas à expliquer ce phénomène.

De plus, la plupart des objets font apparaître une baisse de conductivité alors qu'ils sont en métal et donc plus conducteurs que le sol.

Enfin, le composant inphase varie beaucoup pour certains objets et très peu ou pas pour d'autres. Est-ce une question de composition du métal?

Le composant inphase par exemple ne détecte pas le disque enterré, à mon avis cela est dû aux dimensions trop minimales de l'objet (diamètre de 20 cm) par rapport à la profondeur d'enfouissement (50 cm).

D'une autre part, nous avons remarqué lors de l'étude avec les objets que les anomalies correspondantes à ces derniers étaient décalées par rapport à leurs positions réelles. J'avais tout d'abord pensé que cela était dû au traitement des données et notamment au fait que j'avais ajusté les lignes de points sur les longueurs réelles de lignes.

Cependant, le fait que les anomalies se retrouvent aux mêmes endroits sur différents essais, remet mon hypothèse en question. En effet, les lignes effectuées ne sont jamais totalement les mêmes et les anomalies apparaissent aux mêmes positions...

Cela serait alors dû au fonctionnement de l'appareil ? Ou peut-être au champ magnétique secondaire émis par les objets ?

Avec les essais réalisés le long ou en coupant les canalisations, il semble que l'EM31 n'a pas une sensibilité assez élevée pour faire ressortir des différences de l'ordre de « herbe-goudron » ou de détecter la présence de canalisations en PVC.

Enfin, nous avons également vu que les objets métalliques en surface, comme un grillage par exemple, faussaient complètement la mesure et faisaient apparaître des valeurs aberrantes.

## Annexe 17: Etude des antennes 500 MHz et 250 MHz sur un simulateur

But des essais:

Nous voulions connaître la forme et l'intensité des impulsions émises par les antennes du GPR. Pour cela nous les avons placées sous un simulateur et nous avons regardé leurs impulsions sur un oscilloscope.

I. Antenne de 250 Mhz:

- Essai n°1:

Nous avons voulu savoir les caractéristiques de l'onde envoyée par l'antenne de 250 Mhz. Nous avons donc disposé l'antenne sous le simulateur afin qu'elle émette vers la sortie du système. La figure 1 est une photo de notre dispositif.



Figure 1: dispositif de l'essai n° 1

Nous avons obtenu des impulsions (voir figure 2).

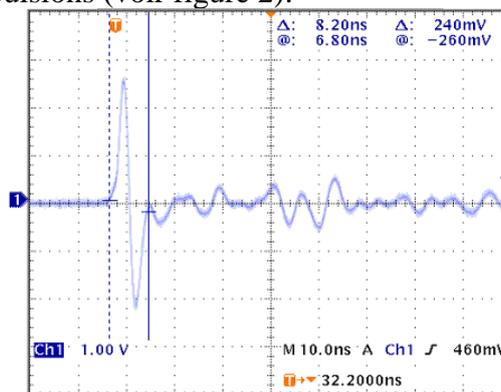


Figure 2: Impulsion émise par l'antenne 250 MHz

La période  $T$  de cette impulsion est de 8,20ns. Sa fréquence est donc:

$$f = (1/T) = 122 \text{ MHz}$$

La fréquence effective de l'antenne n'est que de 122 MHz alors qu'elle doit être de 250 MHz. L'antenne émet des impulsions d'une intensité d'environ 5 V crête à crête.

Nous avons également mesuré le temps séparant deux impulsions ( voir figure 3).

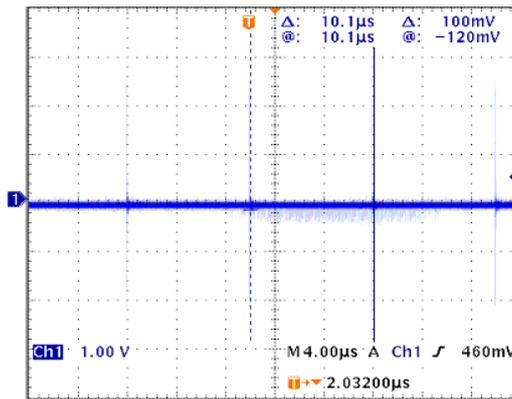


Figure 3: Mesurage de la fréquence de répétition

Le temps entre chaque impulsion est de  $10\mu\text{s}$ , ce qui correspond à une fréquence de 100 kHz.

- Essai n° 2:

Nous avons ensuite disposé l'antenne à plat (émission vers le sol) afin de voir si elle émettait sur les cotés. Une photo de la disposition de l'antenne est en figure 4.

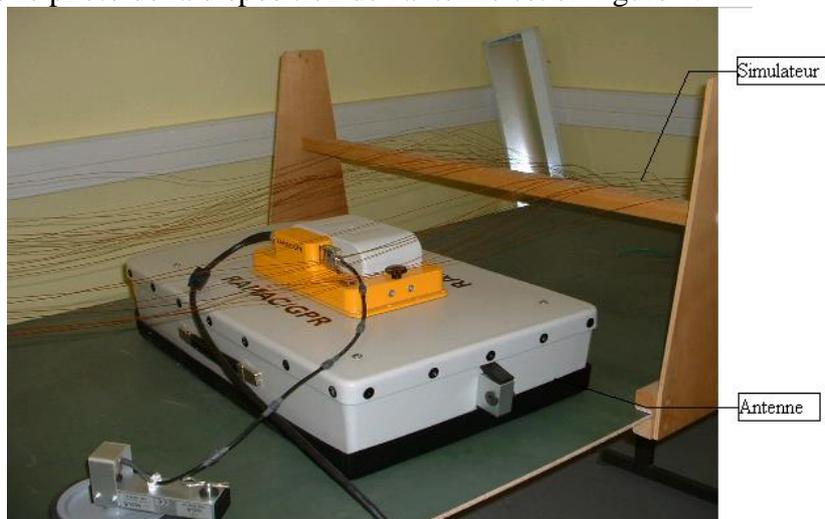


Figure 4: dispositif de l'essai n° 2

Théoriquement, nous ne devrions voir aucun signal sur l'oscilloscope, l'antenne étant supposée être directive. Cependant, nous avons observé un signal (voir figure 5).

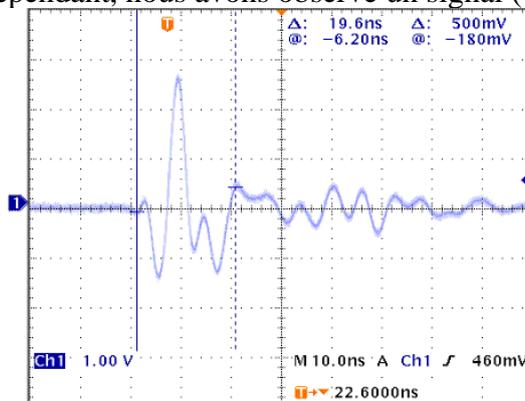


Figure 5: Signal émit par l'antenne sur le côté

Ce signal fait moins ressortir une impulsion nette comme précédemment, mais il montre que l'antenne émet sur les côtés et que l'intensité de son signal est presque de 4 V crête à crête.

- Essai n° 3:

Nous avons alors voulu voir si l'antenne émettait sur les pieds du manipulateur lors des mesurages. Une photo du dispositif est en figure 6.

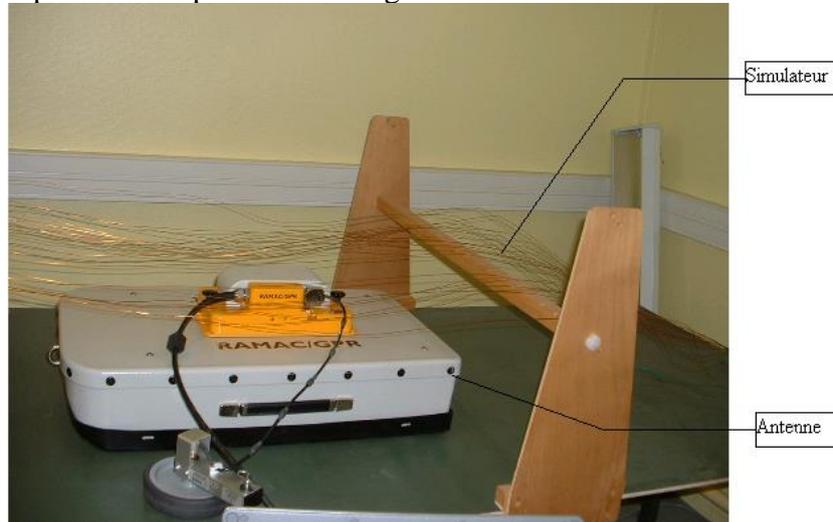


Figure 6: Dispositif pour l'essai n° 3

Nous obtenons le signal suivant (voir figure 7).

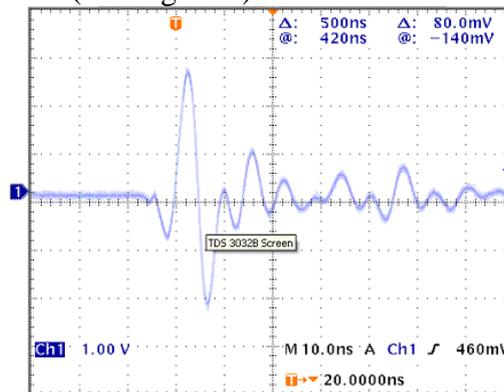


Figure 7: Signal émis par l'antenne sur les pieds du manipulateur

L'antenne émet un signal sensiblement identique aux précédents. On peut donc en conclure que l'antenne n'est pas du tout directive et qu'elle émet un signal aussi bien dans le sol (ce qui est recherché) que en direction des personnes et des objets environnants.

- Essai n° 4:

Enfin, le dernier essai avec l'antenne à 250 Mhz doit permettre de déterminer si l'antenne émet au dessus d'elle, étant donné qu'elle est sensée être blindée. L'antenne est tournée vers l'autre côté du simulateur (voir figure 8).



Figure 8: dispositif pour l'essai n° 4

Le signal émit sur le dessus de l'antenne est beaucoup moins intense que les précédents (voir figure 9).

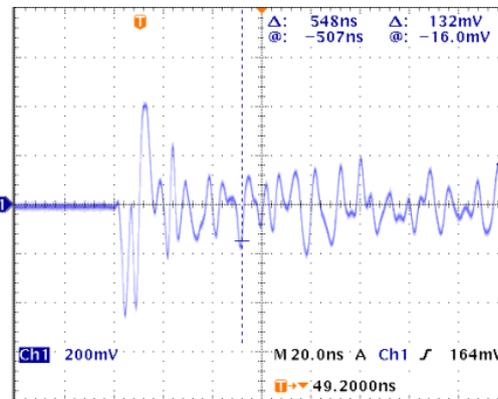


Figure 9: signal émis par l'antenne au-dessus de cette dernière

L'intensité du signal est d'environ 800 mV, ce qui est bien inférieur aux 5V obtenus dans les autres directions.

- Conclusion pour l'antenne de 250 Mhz

Suite à ces quelques essais, nous avons pu voir que l'antenne n'émettait pas du 250 Mhz mais à environ la moitié soit, 125 Mhz. De plus, nous savons maintenant que sa fréquence d'échantillonnage est de 100 kHz.

Enfin, ce n'est pas une antenne directive puisqu'elle émet des impulsions d'environ 5 V crête à crête dans toutes les directions sauf vers le haut puisqu'elle est blindée.

Nous ne pouvons pas conclure sur la dangerosité de l'antenne puisqu'il n'existe pas de réglementation sur les émissions de champ en impulsionnel pour ce genre d'appareil.

## II. Antenne à 500 Mhz:

Nous avons testé l'antenne à 500 Mhz du GPR avec le même dispositif. Cependant, les niveaux des impulsions (en volts) lus sur l'oscilloscope seront à multiplier par deux étant donné que la bande passante de ce dernier s'arrête à 300 Mhz.

- Essai n° 1:

Nous avons placé l'antenne sous le simulateur de façon à ce qu'elle émette vers le sol (voir figure 10).



Figure 10 : Dispositif pour essai n° 1

Le signal émis sur les côtés par l'antenne est en figure 11.

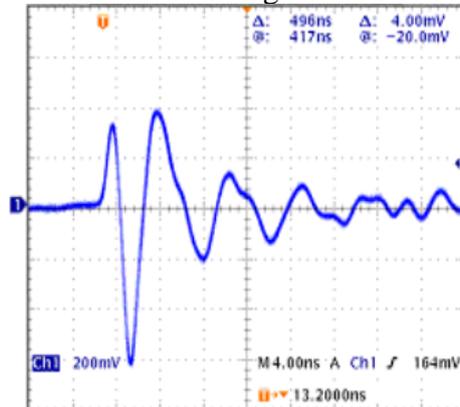


Figure 11: Signal émis par l'antenne sur les côtés

Le signal a une intensité d'environ 2 V, ce qui est inférieur à celle de l'antenne de 250 Mhz.

- Essai n° 2

Cet essai a pour but de voir si l'antenne émet bien à 500 Mhz et à quelle intensité. Nous avons donc tourné son émissions vers la sortie du simulateur (comme l'essai 1 de l'antenne 250 Mhz).

On obtient le signal suivant (voir figure 12).

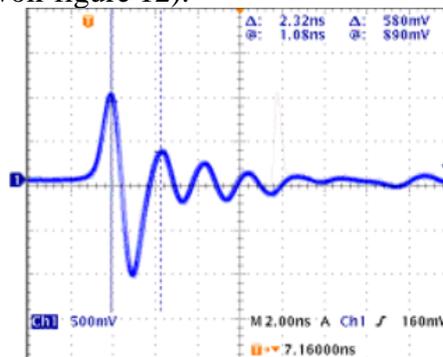


Figure 12: signal émis par l'antenne 500 Mhz

L'impulsion dure 2,32 nS, ce qui correspond à une fréquence de 431 Mhz, ce qui est assez proche de 500 Mhz (l'erreur peut être due au fait que l'on est en dehors de la bande passante de l'oscilloscope).

De plus, l'intensité est d'environ 4 V.

- Conclusion sur l'antenne 500 Mhz

A la suite de ces essais, nous pouvons en conclure que l'antenne de 500 Mhz émet à peu près à cette fréquence et qu'elle est plus directive que la précédente (le signal est atténué sur les côtés de l'antenne). Enfin, l'antenne à 500 Mhz émet une « intensité » d'impulsion moins importante que celle de 250 Mhz.

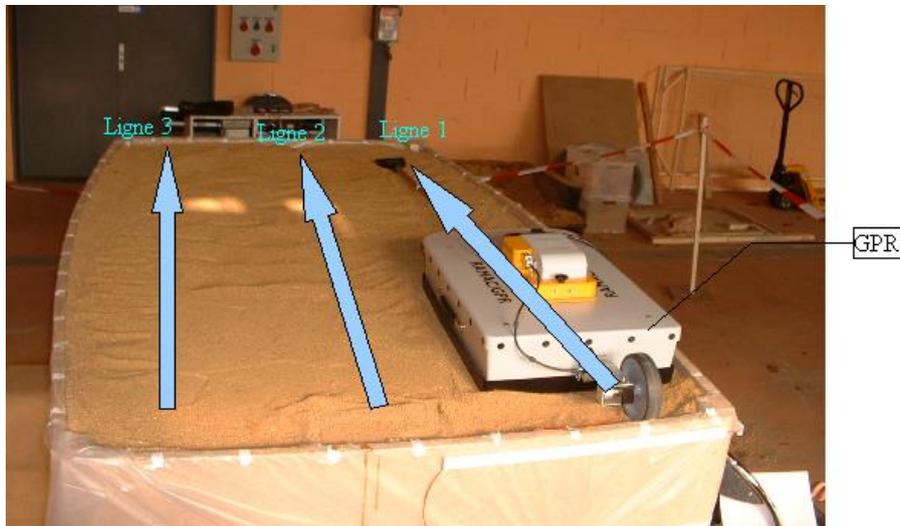
## ***Annexe 18: Résultats et interprétations des manipulations du 16/04/07 sur le bac à sable à Feytiat, méthode GPR***

Lors de ces manipulations, nous avons utilisé un GPR avec une antenne à 250 Mhz. Ces manipulations avaient pour but d'expérimenter différentes options de fonctionnement du GPR. De plus, nous voulions savoir si était possible de détecter une boule métallique. Tous les résultats exposés sont brut, il existe un logiciel de traitement appelé REFLEX mais nous ne l'avons pas encore utilisé.

### **I. Réalisation des mesures:**

Les mesures ont été réalisées dans un bac rempli de sable de dimensions 2,5 m X 1,5 m X 1,5 m (longueur X largeur X hauteur).

Nous avons effectués trois lignes en suivant la longueur du bac comme on peut le voir sur la figure 1.



*Figure 1: Lignes de mesures GPR sur le bac à sable*

Les antennes étant assez encombrantes, les résultats obtenus ne correspondront qu'à un parallélépipède centré au milieu du bac et de dimensions: 1,5 m X 1,2 m X 1,5 m.

### **II. Manipulations pour la détection d'une boule de pétanque enfouie:**

Nous avons effectués des mesures avec le GPR. Ce dernier devait prendre des mesures tous les 2 cm et il a été utilisé avec deux filtres ( DC removal et Subtract Mean Trace Total, ces filtres seront présentés dans la troisième partie).

- Mesure du bac vide:

Afin d'avoir une référence, nous avons réalisé une mesure du bac à sable, ce dernier ne contenant que du sable.

On obtient le résultat brut suivant en figure 2.

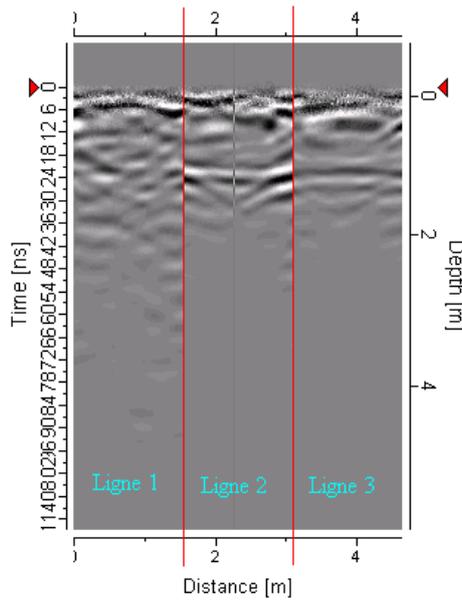


Figure 2: Bac à sable

Le résultat est relativement uniforme, faisant apparaître quelques couches de sable peut être plus humides ou plus compactées.

- Mesure sur le trou sans la boule

Nous avons ensuite réalisé un mesurage après avoir creusé le trou qui devait contenir la boule. Cette mesure sert à savoir si le GPR est capable de faire ressortir un trou dans le terrain sableux.

Le trou est d'environ 20 cm. La photo en figure 3 permet de la situer dans le bac.

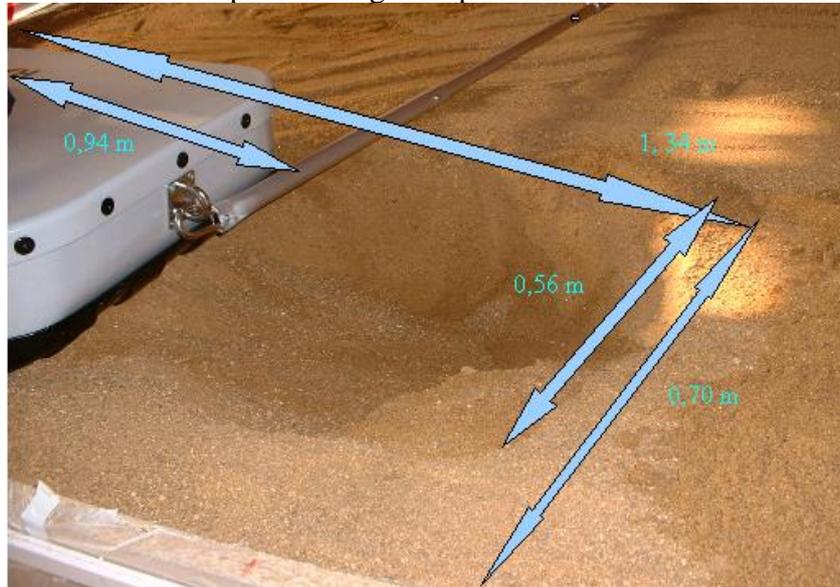


Figure 3: Trou dans bac à sable

L'image en figure 4 est obtenue. D'après la figure 3, le trou se trouve dans la première partie de l'image (jusqu'à environ 50 cm).

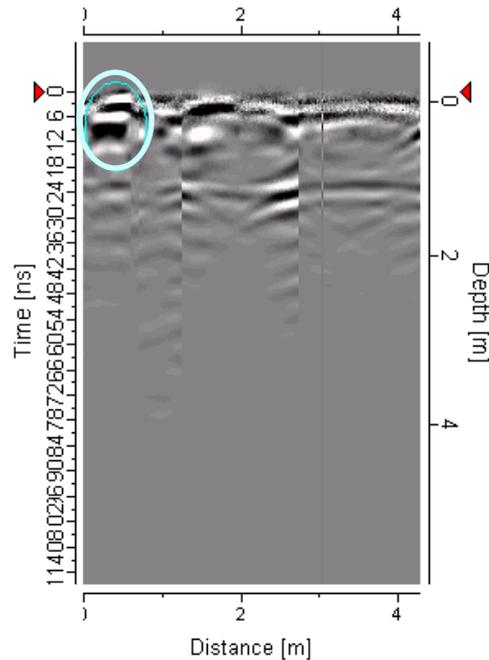


Figure 4: Mesures sur le bac avec le trou (lignes 1, 2 et 3)

Dans la zone entourée en bleu, sont visibles deux bandes noires. Ces dernières doivent être dues à un meilleur couplage entre les antennes. Ceci montre bien que le trou est visible, puisque l'air permet à l'onde émise par le GPR de se déplacer plus vite que dans le sable, ce qui fait apparaître ces bandes noires.

- Mesures sur le trou contenant la boule

La boule utilisée lors de ces manipulations est une boule de pétanque de 700 mg en acier. On la place dans le trou préalablement creusé à une profondeur de 50 cm. Sa position exacte est alors de 0,105 m selon la longueur et 0,045 m selon la largeur. Les résultats sont en figure 5.

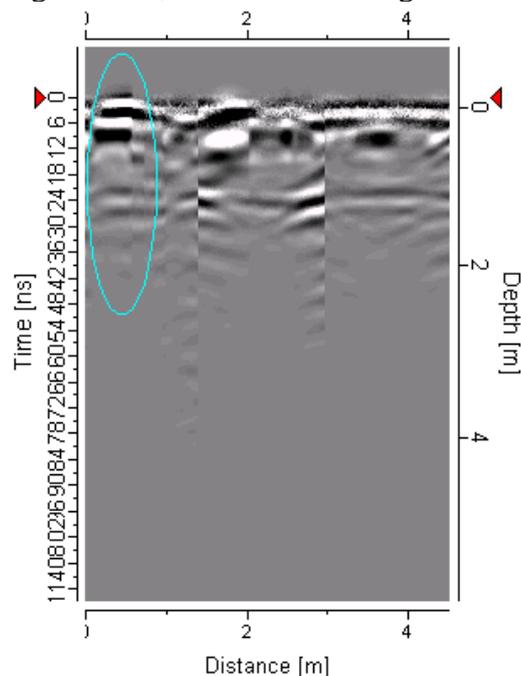
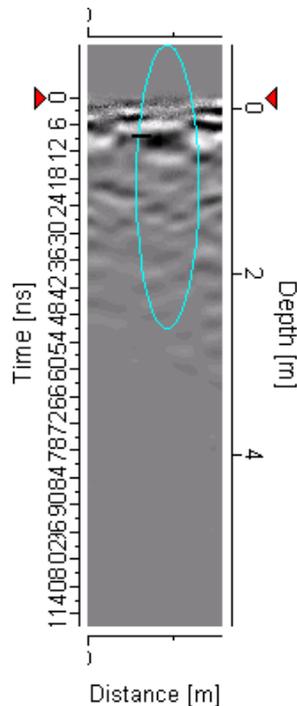


Figure 5: Mesures sur le bac avec le trou et la boule (lignes 1, 2 et 3)

Dans la zone entourée en bleu, les différences avec la mesure effectuée précédemment sans boule ne sont pas visibles.

- Mesures avec la boule enfouie

La boule est maintenant recouverte de sable. La mesure est réalisée uniquement sur la première ligne (voir figure 6). En effet, lors des 3 essais précédents les deux dernières lignes restaient inchangées.



*Figure 6: Mesure sur la ligne 1 avec la boule enfouie*

Il apparaît une zone où le couplage entre les antennes est plus important (zone entourée en bleu). Cette zone ne peut pas être due à la présence d'un trou d'air puisque le trou a été rebouché et le sable tassé. Cette zone semble donc correspondre à la présence de la boule. Cela est logique puisque la vitesse de l'onde dans le métal est plus grande que dans le sable.

- Essai avec la boule enfouie à 15 cm de profondeur

Nous avons fait un essai avec la boule enfouie à 15 cm au lieu de 50 cm. On obtient le résultat en figure 7.

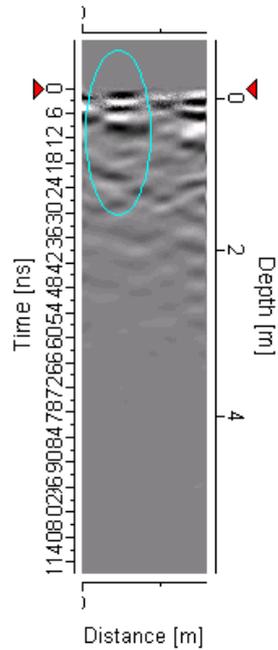


Figure 7: Boule enfouie à 15 cm de profondeur

Des bandes noires apparaissent en surface (entouré en bleu), il est possible que ce soit lié à la présence de la boule mais ce n'est pas flagrant. Cela voudrait dire que les objets situés au moins à 15 cm ne sont pas visibles, ces derniers étant dans la zone d'ombre.

- Conclusion sur la partie détection d'une boule de pétanque:

D'après ces différentes expériences, nous pouvons conclure que le GPR nous a permis de détecter un « trou » mais également une boule de pétanque. Le GPR permet donc de discerner les zones dans lesquelles la vitesse de propagation de l'onde émise est différente de celle du sol environnant. Cependant, ces anomalies ne ressortent pas très clairement sur les images. Afin de mieux connaître les différentes options d'utilisation du GPR, nous allons dans la deuxième partie nous intéresser aux différents filtres que l'on peut appliquer sur la mesure. Enfin, il semble assez étrange que sur les images obtenues on ne voit pas le fond du bac à sable pourtant situé à 1,5 m.

## Annexe 19 : Comparaison des filtres, méthode GPR

Lors de l'acquisition des mesures et en post traitement, le logiciel RAMAC GroundVision qui commande le GPR, propose différents filtres à appliquer. Ces filtres permettent de moyenniser le signal, de l'amplifier etc...

Nous allons étudier ces différents filtres (ils sont au nombre de 8) sur des images obtenues sur la ligne 1 lorsque la boule était enterrée à 50 cm.

### 1.DC-Filter:

Ce filtre permet de diminuer l'offset qui peut apparaître lors des mesurages.

En figure 8, on peut comparer un signal obtenu sans aucun filtre (image du gauche) et avec le filtre DC (image de droite).

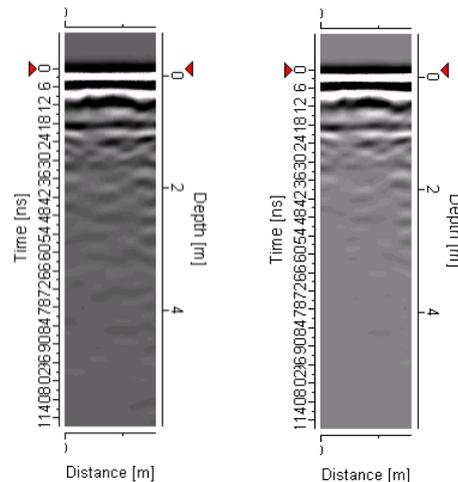


Figure 8: Image brute (g), image avec filtre DC (d)

On ne remarque pas de changement entre les deux images à part une image plus claire suite à l'application du filtre DC.

Nous laisserons ce filtre pour toutes les autres manipulations.

### 2.Subtract mean trace:

Ce filtre soustrait les valeurs obtenues sur une ligne verticale de l'image au autres lignes. Cette action permet de faire ressortir les variations de signal.

On peut choisir entre deux options:

- Running average:

Dans cette option, on choisit la taille d'une fenêtre ( Number of traces to use in filter process). La soustraction sera alors faite en prenant comme référence les valeurs moyennes (calculées sur la fenêtre choisie) au milieu de l'image. Les autres valeurs seront soustraites par rapport à cette référence.

Dans notre cas on obtient le résultat suivant (voir figure 9).

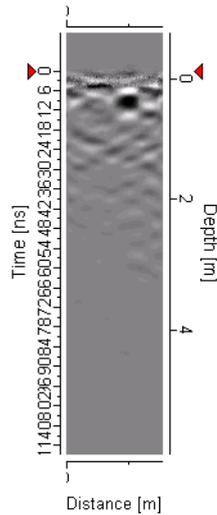


Figure 9: Image obtenue avec filtre SMT, Running average (fenêtre de 60)

- Total average

Cette fois, le logiciel calcule la moyenne de toutes les valeurs pour chaque profondeur. C'est cette moyenne qui est ensuite soustraite aux valeurs de l'image. L'image obtenue avec ce filtre est en figure 10.

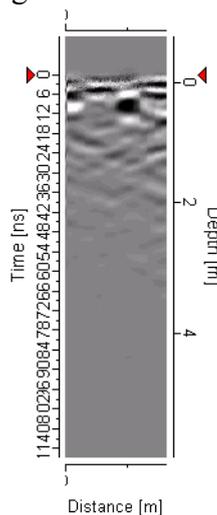


Figure 10: Image obtenue après SMT, Total average

On ne remarque pas de différence entre les images en figure 9 et 10. Cela doit être dû à la longueur de l'image étudiée. La moyenne de la méthode Running average se faisant sur 60 tracés, elle doit être sensiblement la même qu'avec la méthode Total average. Il apparaîtra sans doute des différences en prenant une image sur une plus longue distance.

Ce filtre permet de faire ressortir les anomalies sur une image, nous l'utiliserons donc souvent.

### 3. Time-Gain filter:

Ce filtre permet de compenser l'atténuation du signal en fonction de la profondeur. Il applique donc une fonction de gain sur le signal. Cette dernière est composée d'une partie linéaire et d'une partie exponentielle. Elle peut être réglée par l'utilisateur.

La figure 11 présente une comparaison entre une image obtenue avec seulement le filtre DC (à gauche) et une image obtenue avec le filtre DC, filtre Time-Gain et filtre SMT (à droite).

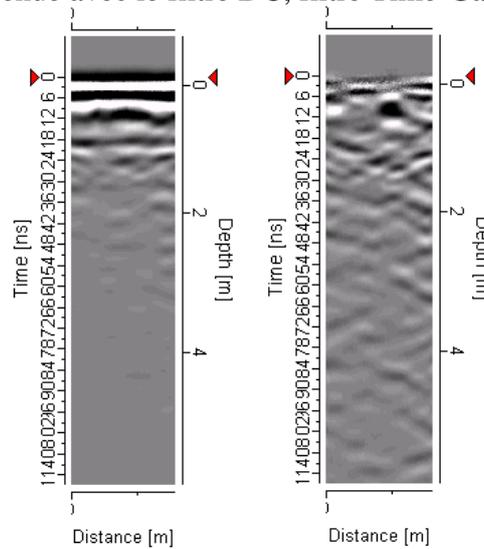


Figure 11: Image avec filtre DC (g), image avec filtre Time-Gain et SMT(d)

Ce filtre fait apparaître beaucoup plus de détails lorsqu'on augmente en profondeur. Cependant, il doit être réglé pour chaque type de sol étudié, ce qui semble assez délicat. Dans un sol moins transparent que le sable, il faudra donc augmenter le gain (gain linéaire et gain exponentiel) par rapport aux mesures dans du sable.

#### 4. Running average filter:

Ce filtre va moyenniser les valeurs de l'image. On peut choisir les dimensions du « masque » dans lequel les valeurs seront moyennées (3X3; 5X5; 6X6 ;7X7 ;9X9 ;11X11).

Ce filtre permet donc de lisser les images avec beaucoup de bruit de fond, mais risque également de faire disparaître certaines anomalies.

On obtient ce type d'image dans notre cas en mode 3X3 (voir figure 12).

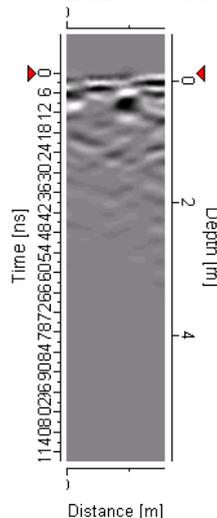


Figure 12: image obtenue après traitements DC, SMT et running average (3X3)

Le résultat est un peu plus « flou ». Si le masque avait été plus grand, l'image aurait été encore moins nette.

### 5. Band pass filter:

Comme son nom l'indique, ce filtre applique un filtre passe-bande sur la mesure. L'utilisation de ce filtre ne se fera que dans une zone très bruitée dans certaines fréquences, qui seront alors éliminées.

### 6. Background removal filter:

Ce filtre applique un filtre passe-haut spatial. On peut choisir entre Normal, Strong ou Extreme, ce qui correspond aux fréquences de coupure (0,01;0,025 ou 0,5).

La figure 13 montre le résultat obtenu après application d'un filtre SMT, DC et Background removal (normal).

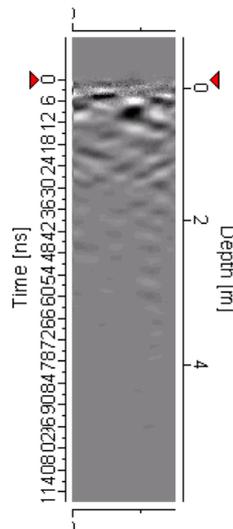


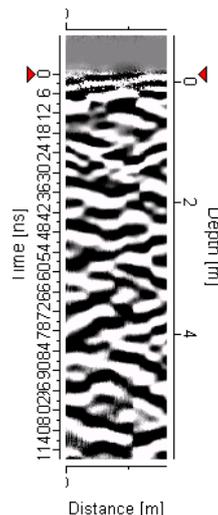
Figure 13: image obtenue avec filtres SMT, DC et BR

On obtient le même résultat que l'image 12.

### 7. Automatic gain control

Ce filtre ajuste le gain de chaque réponse en égalisant l'amplitude moyenne observée dans une fenêtre de temps glissante. Je n'ai pas bien compris l'utilité de ce filtre.

La figure 14 présente une image obtenue en appliquant les filtres DC, SMT et automatic gain control.



*Figure 14: Image avec filtres DC, SMT et automatic gain control*

8. Conclusion sur l'utilisation des filtres:

Suite à cette petite étude, il ressort qu'il serait intéressant d'utiliser certains filtres pour les prochaines manipulations. Il faudra utiliser constamment le filtre DC, le filtre Subtract mean trace (mode Total average) et le filtre Time-Gain (mais il faudra bien régler le gain exponentiel et linéaire!).

L'utilisation des autres filtres reste assez obscure.

**Annexe 20: Résultats et interprétations des autres manipulations effectués avec le GPR du 16/04/07 à St Pardoux, méthode GPR**

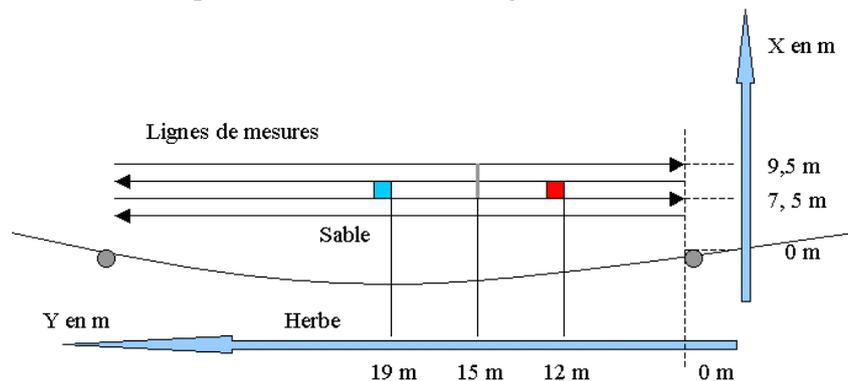
**I. Essais sur la zone contenant des objets enterrés**

Nous avons réalisé des manipulations sur la plage Santrop de St Pardoux. En effet, cette dernière permet de disposer une grande zone de sable, sol assez homogène et facile creuser. La photographie aérienne de la plage de St Pardoux est en figure 1.



*Figure 1 : Vue aérienne de la plage Santrop*

Des objets ont été enterrés sur la zone d'étude. La figure 2 est un plan représentant les lignes de mesures effectuées ainsi que la localisation des objets enterrés.



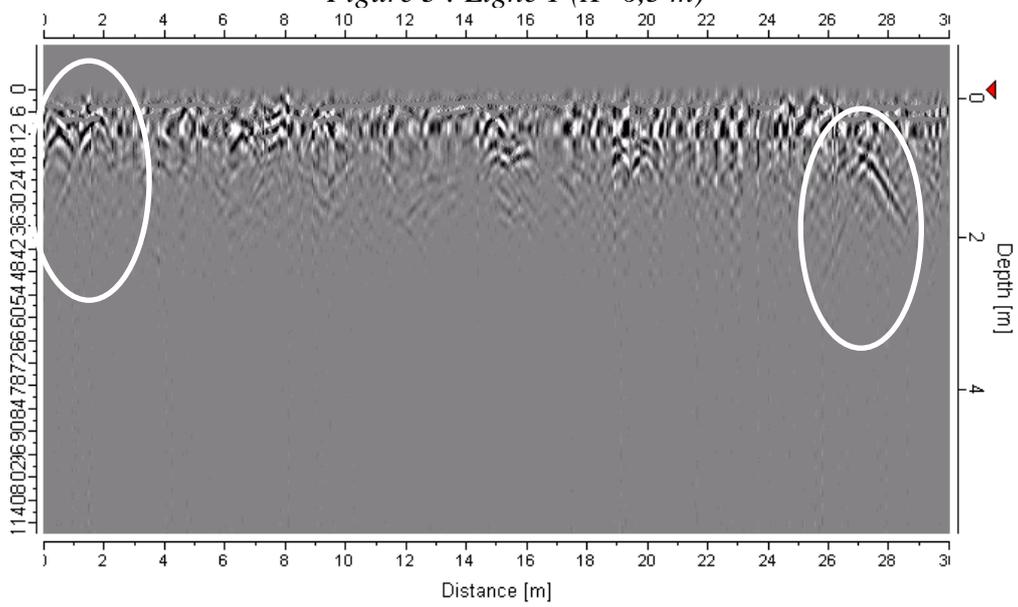
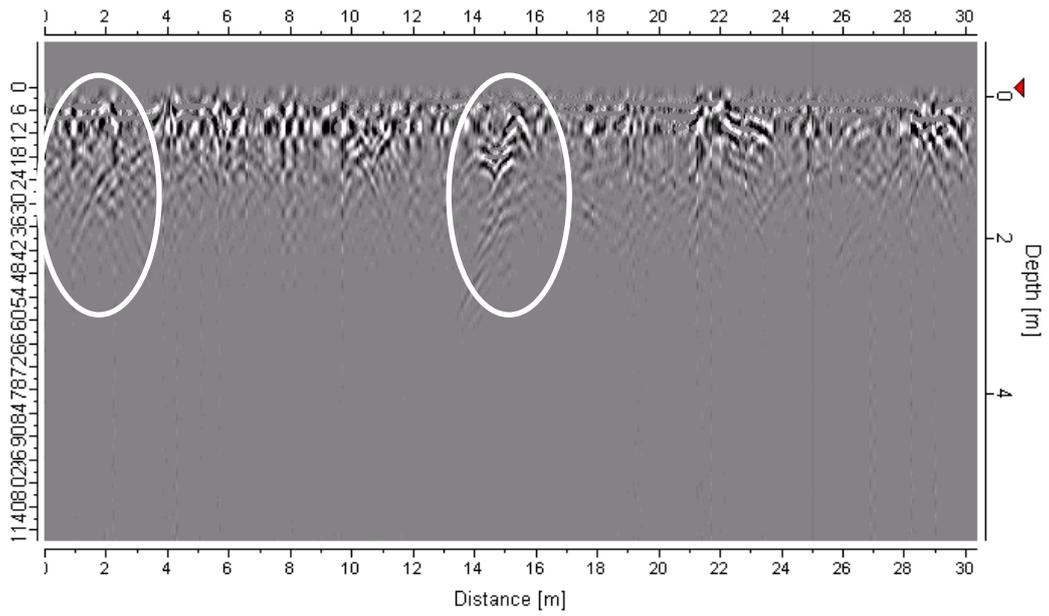
*Figure 2 : Lignes de mesures réalisées et positionnement des objets enterrés*

Les objets enterrés sont :

- un cube métallique de dimensions 8 x 5 x 5 cm (en rouge), enfoui à 5 cm,
- une barre métallique d'environ 2 m de long (en gris), enfouie à 30 cm,
- une plaque métallique trouée de dimensions 15 x 10 x 0,2 cm (en bleu), enfouie à 5 cm.

Les lignes de mesures ont été réalisées le long de l'axe des Y et en se décalant, d'un mètre entre chaque ligne, selon l'axe des X.

Les images obtenues sont en figures 3,4,5 et 6.



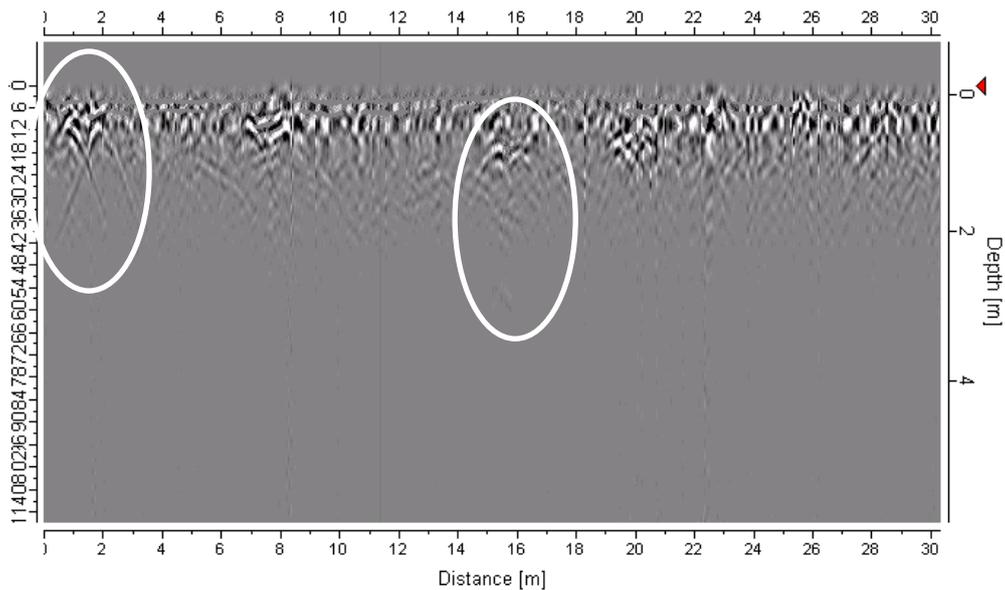


Figure 5 : ligne 3 (X=8,5 m)

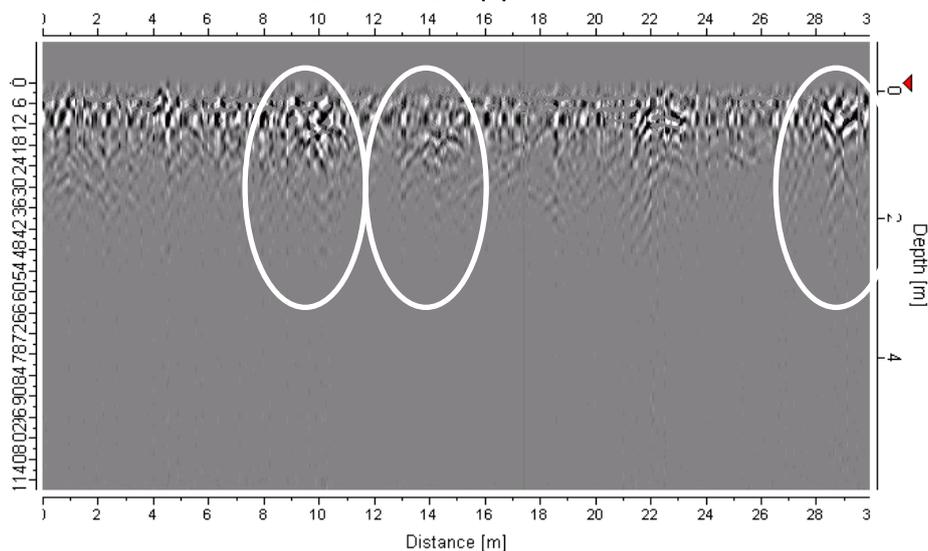


Figure 6 : ligne 4 (X=9,5 m)

Toutes ces images sont traitées avec les filtres DC, Subtract Mean Trace et Time-gain. Les images sont très brouillées et difficiles à interpréter.

Les zones entourées en blanc soulignent la présence d'hyperboles de migration. Il m'apparaît pas clairement la présence des objets enterrés. On divine la présence de la barre métallique enfouie sur la ligne 3 (Y = 15 m) et sur la ligne 1. Cependant, il apparaît un grand nombre d'autres hyperboles non attribuables à la présence des objets que nous avons enterrés.

Il est normal que la plaque métallique et le cube ne ressortent pas sur ces images étant donné qu'ils se situent dans la zone aveugle de l'antenne (ils ne sont pas enterrés assez profond).

## II. Essais avec une boule de pétanque

Nous avons réalisé des essais en enterrant une boule de pétanque, pour étudier la réponse du GPR.

Dans le tableau 1, sont récapitulés les différents essais réalisés ainsi que les images obtenues (le trou est creusé à une profondeur d'environ 25 cm).

Essai	Trou	Trou et boule	Boule recouverte de sable	Trou rebouché sans boule
Image obtenue				

Tableau 1 : récapitulatif des essais réalisés avec la boule de pétanque

Sur la première image, obtenue avec seulement un trou fait dans le sable, il se forme des interférences en forme de « vagues ». Lorsqu'on introduit la boule dans le trou, une hyperbole de migration s'ajoute aux interférences. Après rebouchage du trou, la forme des interférences change mais l'hyperbole de migration reste identique. Enfin, après extraction de la boule, on observe toujours une petite hyperbole et des perturbations. L'hyperbole ne serait alors pas due à la présence de la boule ?

### Résultats et interprétations des manipulations du 19/04/07 à La Brugerie, méthode GPR Antenne 250 MHz

#### I. Essais réalisés au fond du terrain, sur la zone contenant les objets enterrés

Nous avons réalisé des essais sur la zone contenant des objets enterrés à la Brugerie (voir annexe 2). La figure 7 représente les lignes de mesures réalisées sur le plan du terrain.

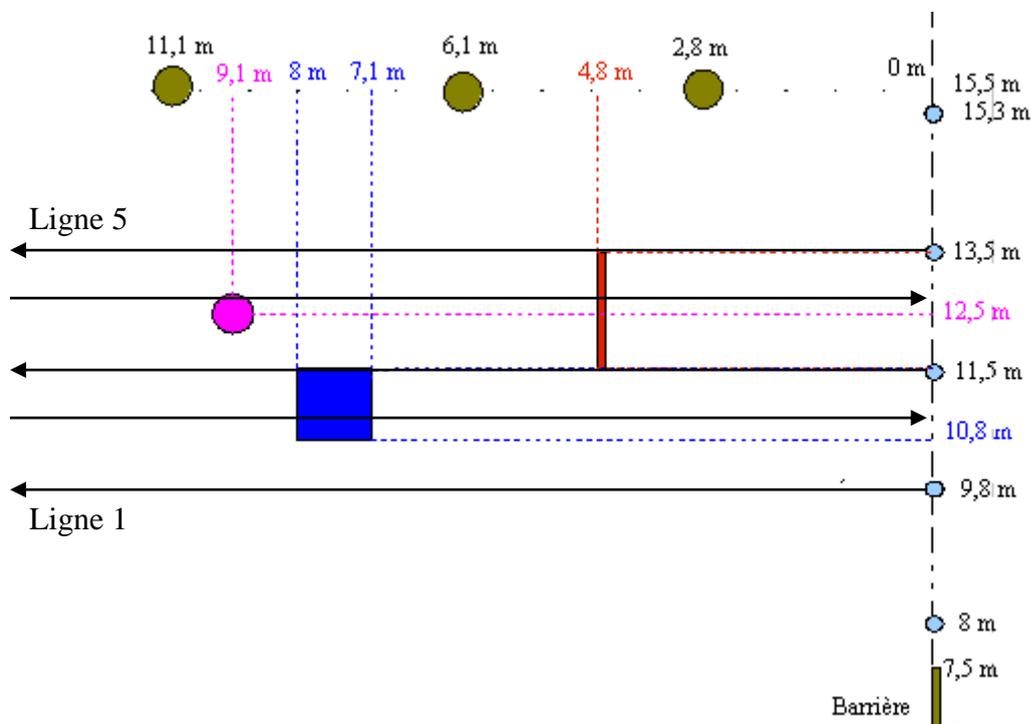
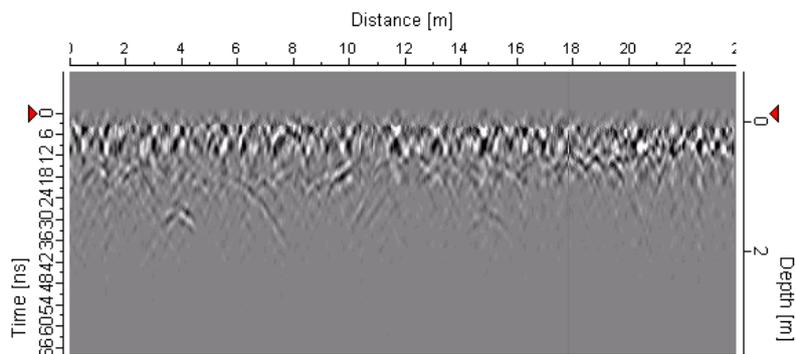


Figure 7 : Plan du terrain et des lignes de mesures réalisées

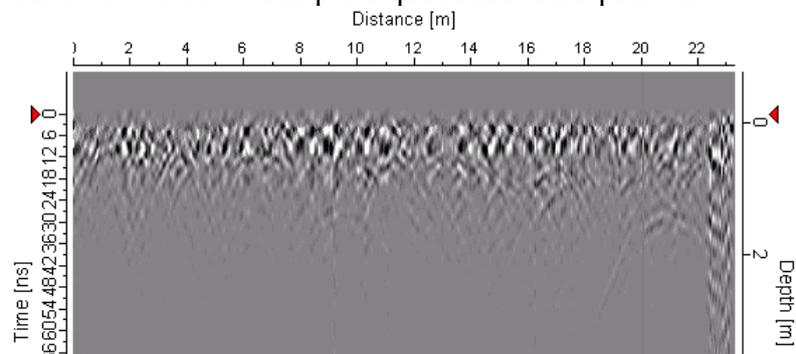
- Antenne de 250 MHz

Nous avons réalisé des lignes de mesures avec l'antenne de 250 MHz. Les résultats de ces mesures sont sur les figures 8, 9, 10, 11 et 12.



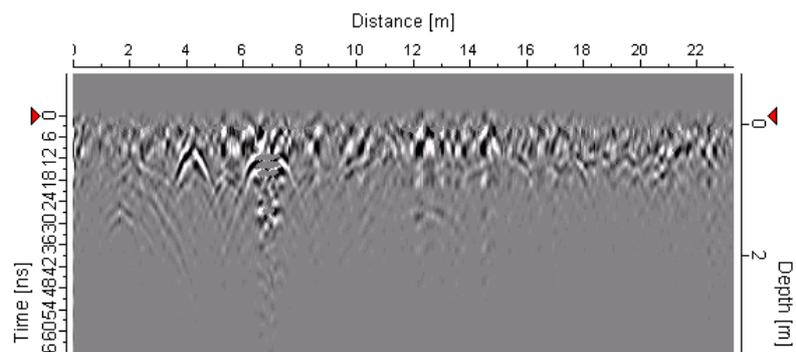
*Figure 8 : Ligne de mesures 1*

Cette ligne ne passe sur aucun objet que nous avons enterré. Cependant, des hyperboles de migrations sont visible. Nous ne savons pas à quoi elles correspondent...



*Figure 9 : Ligne de mesures 2*

La ligne de mesures 2 passe sur la plaque métallique, cependant, aucun signal ne semble correspondre à l'anomalie.



*Figure 10 : Ligne de mesures 3*

La ligne 3 passe sur la barre métallique ainsi que sur la plaque rectangulaire. Leurs signaux sont identifiables : une hyperbole de migration entre 4 et 5 m pour la barre et une autre, plus large et présentant des interférences en son milieu, située entre 6 et 8 m pour la plaque rectangulaire.

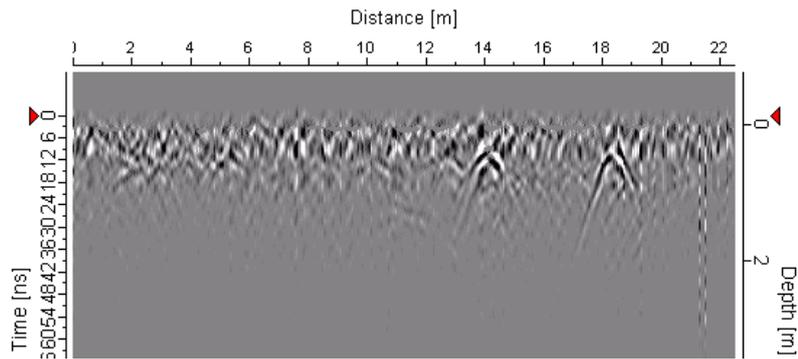


Figure 11 : Ligne de mesures 4

La ligne 4 passe sur le disque ainsi que sur la barre métallique. Deux hyperboles semblent correspondre aux anomalies aux distances 14 et 18 (de plus, la distance de séparation entre les deux hyperboles et la même qu'entre les deux objets : 4 m).

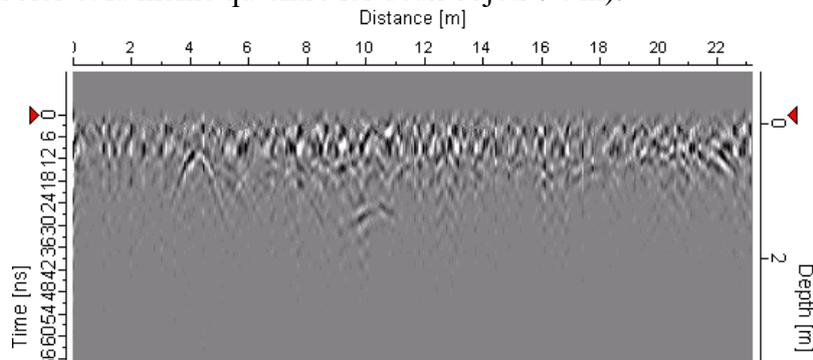


Figure 12 : Ligne de mesures 5

La ligne 5, passant sur l'extrémité de la barre, fait effectivement apparaître une petite hyperbole de migration vers 4 m.

- **Antenne de 500 MHz**

Les résultats obtenus avec l'antenne à 500 MHz ne sont pas très concluants (comme on peut le voir sur la figure 13) : faible pénétration du signal en profondeur, signal très brouillé...

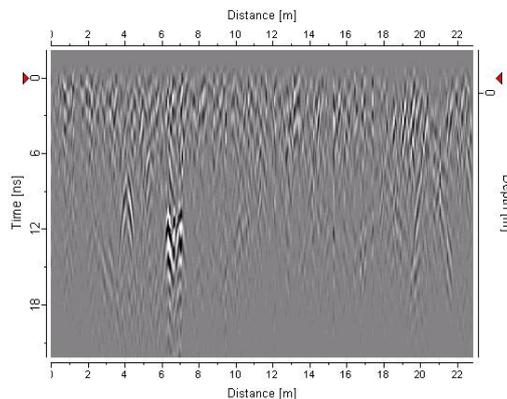


Figure 13 : Ligne de mesures 3, antenne 500 MHz

Sur cette ligne qui passe sur la barre métallique et sur la plaque rectangulaire, apparaissent deux petites hyperboles et une interférences qui peuvent être attribués à la présence des objets enterrés. Le résultat est cependant beaucoup plus difficile à interpréter et beaucoup plus brouillon qu'avec l'antenne de 250 MHz.

## II. Essais réalisés derrière la maison

Des essais ont également été réalisés sur la zone située entre les sapins et la maison (voir photo aérienne en figure 14).



Figure 14 : Vue aérienne de la zone d'expérimentation

Sept lignes de mesures sont réalisées en suivant l'axe des X, les images obtenues sont en figures 15 à 21.

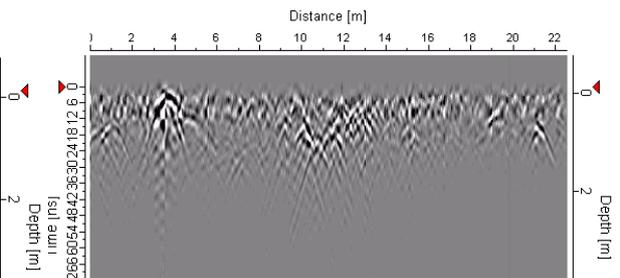
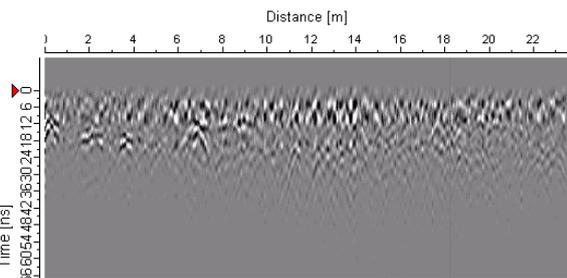
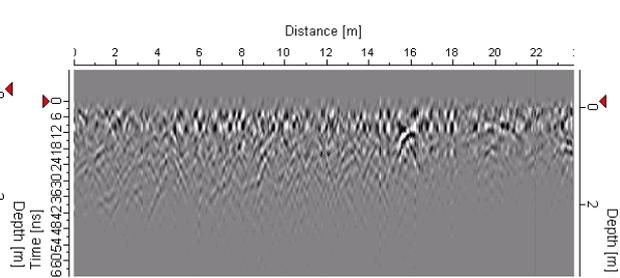
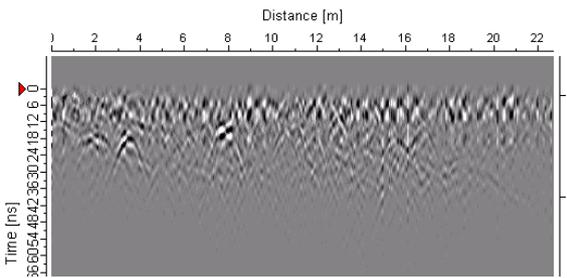
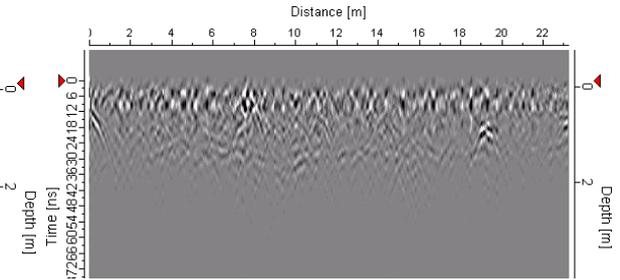
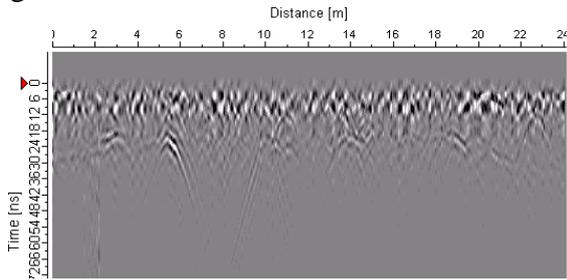


Figure 19 : Cinquième ligne de mesures

Figure 20 : Sixième ligne de mesures

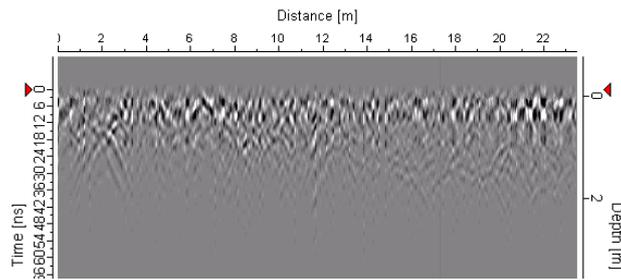


Figure 21 : Septième ligne de mesures

De nombreuses hyperboles sont visibles sur toutes les images à des profondeurs comprises entre environ 20 cm et 1,5 m. Cependant, elles sont difficiles à expliquer : pas de présence de tuyaux (parallèlement à l'axe Y) ou d'objets enterrés ne se trouvent dans cette zone à notre connaissance.

### III. Mesures réalisées sur la zone contenant une zone humide

Sur une partie du terrain est située une zone qui serait plus humide et donc optimum pour creuser un puit. La zone est symbolisée par une croix noire. Nous avons réalisé des lignes de mesures à proximité et sur cette zone afin d'observer quelles images pouvaient être obtenues sur le GPR.

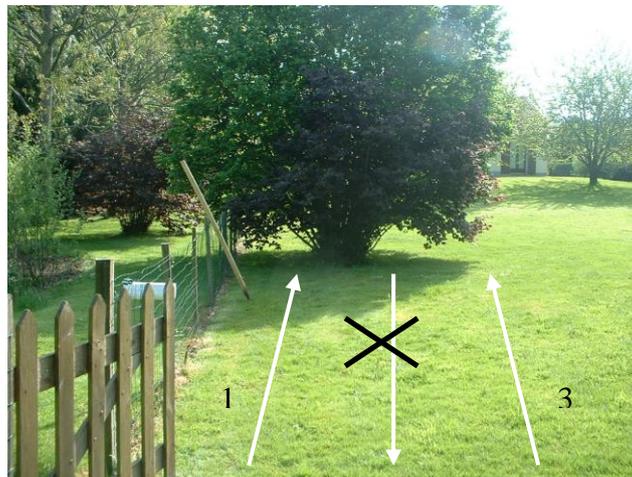


Figure 22 : Lignes de mesures réalisées sur la zone « humide »

Le tableau 2 regroupe les images obtenues sur les trois lignes.

Ligne de mesures	1	2	3
------------------	---	---	---

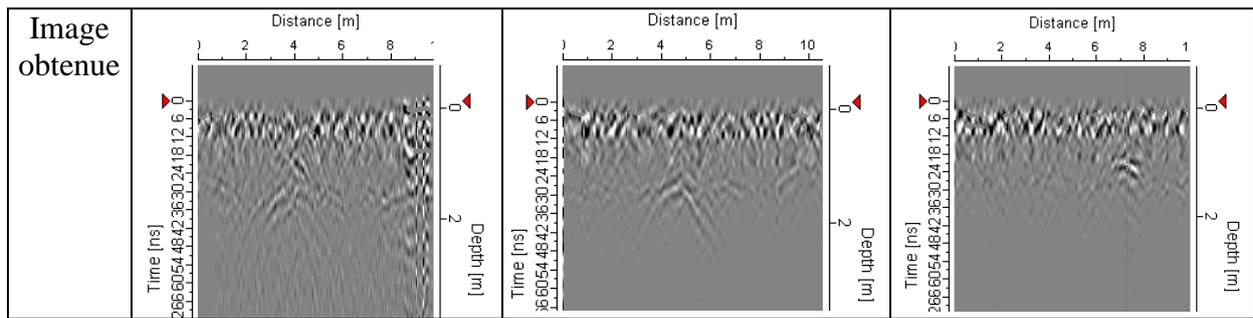


Tableau 2 : Mesures réalisées sur la zone « humide »

Il apparaît une hyperbole de migration à environ 1,8 m de profondeur, est-elle le reflet d'une zone plus humide ?

Un carottage permettrait de savoir si cette zone contient effectivement de l'eau et à quelle profondeur.

#### IV. Essais réalisés en passant sur la cassure

Des essais ont été réalisés avec les deux antennes (250 MHz et 500 MHz) en passant sur la cassure visible sur la figure 23.



Figure 23 : Ligne de mesures réalisée en coupant la cassure

En dessous de cette cassure est enterré un tuyau en PVC à environ 2 m de profondeur.

- Antenne de 250 MHz

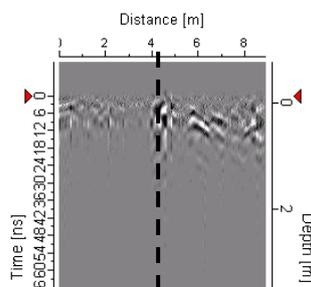


Figure 24 : Passage sur la cassure, antenne de 250 MHz

Sur cette image obtenue avec l'antenne à 250 MHz, la présence du tuyau en PVC n'apparaît pas, la cassure se devienne (au niveau des pointillés noir) grâce à de petites interférences.

- Antenne de 500 MHz

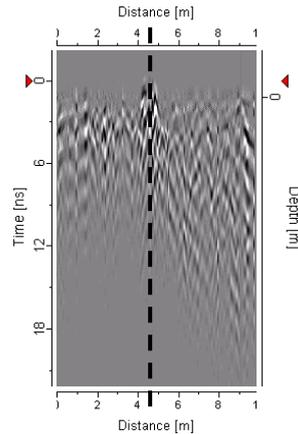


Figure 25 : Passage sur la cassure, antenne de 500 MHz

Comme pour les autres essais avec l'antenne de 500 MHz, le résultat obtenu est très brouillon. La présence de la cassure est quasiment indétectable.

### V. Essais réalisés en passant de l'herbe à la route

Enfin, des essais ont été effectués pour savoir si le GPR permettait de voir des différences de sols, type herbe-goudron par exemple.

La ligne de mesure réalisée est représentée sur la figure 26.

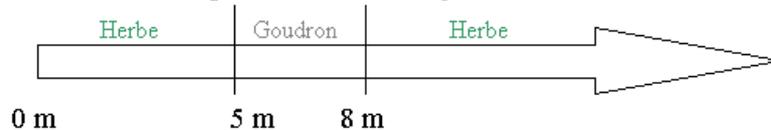


Figure 26 : Ligne de mesure herbe-goudron

L'essai a été réalisé avec l'antenne de 250 MHz, l'image obtenue est sur la figure 27.

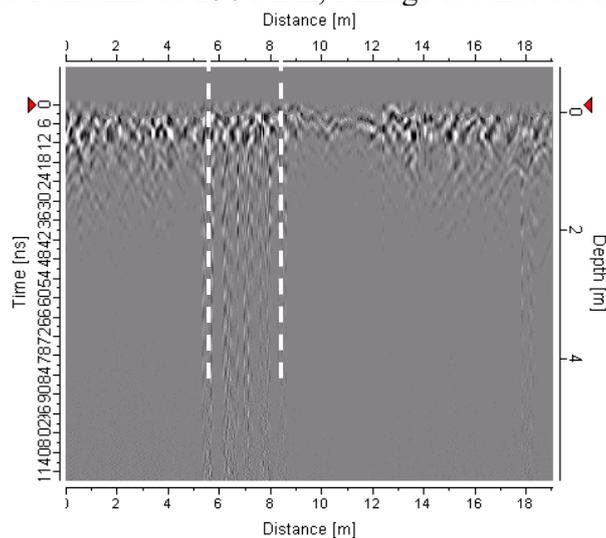


Figure 27 : Passage de l'herbe à une surface goudronnée

Le changement de surface fait apparaître des perturbations (sur le goudron).

### VI. Conclusion

Le méthode GPR présente plusieurs inconvénients. Tout d'abord puisque le traitement des images, les filtres et le logiciel Reflex (création d'images en 3D), ne sont pas du tout maîtrisés. Ensuite car les images GPR même bien traitées demandent une expérience et une formation pour être interprétées. Enfin, l'antenne de 250 MHz a une zone aveugle de 20 cm ce qui limite son utilisation en intérieur. De plus, son signal ne pénètre pas beaucoup en profondeur (lors de nos manipulations, profondeurs maximum pour l'obtention d'une hyperbole : 2,5 m !).

## Annexe 21 : Manipulations et résultats obtenus avec le C.A. 42

### Manipulations du 22/05/07 à La Brugerie

Nous avons réalisé des mesures sur la zone contenant des objets enterrés, comme on peut le voir sur la figure 1.

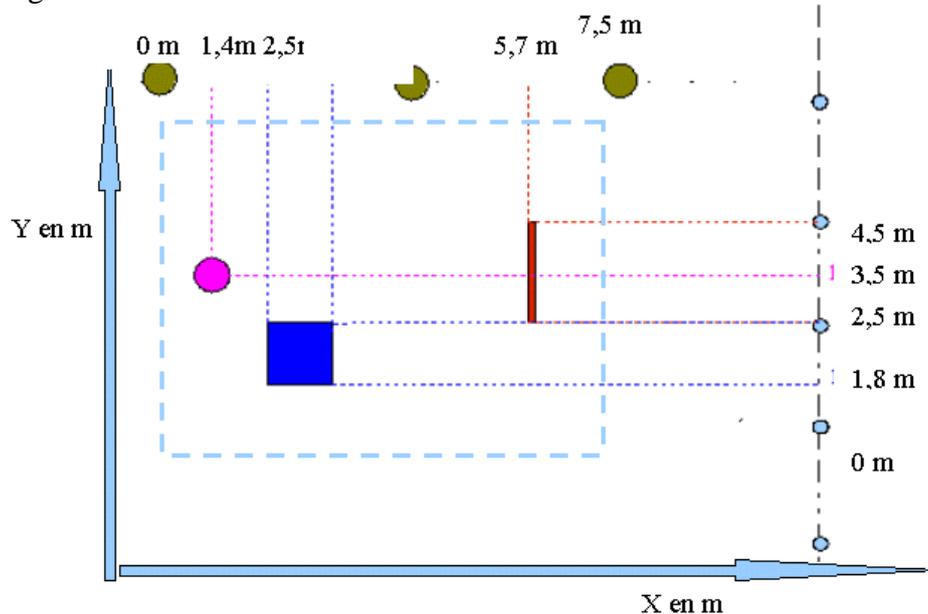


Figure 1 : Plan de mesures sur les objets enterrés

La zone couvre 7,5 m selon X et 6 m selon Y. Le pas de mesure est de 0,5 m. On obtient la cartographie en figure 2.

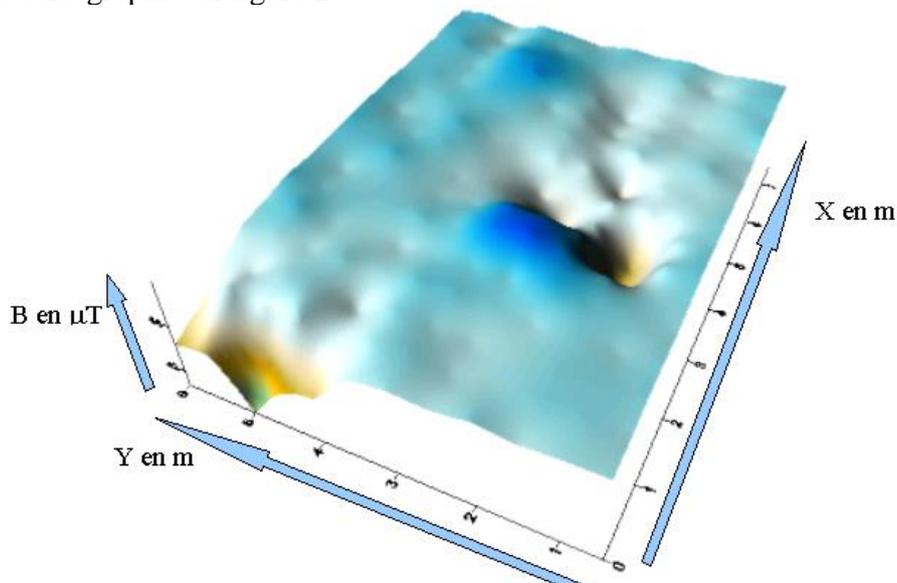


Figure 2 : Résultats obtenus avec le C.A.42 sur la zone contenant les objets enfouis

Le champ magnétique varie entre environ 41  $\mu\text{T}$  et 46  $\mu\text{T}$ , la plupart de la zone se situant vers 45  $\mu\text{T}$ . Les trois petits pics de baisse de champ magnétique ne correspondent pas à l'emplacement des objets enterrés (situés à  $X=3$  et  $Y=1,5$ , à  $X=3,5$  et  $Y=2,5$  et à  $X=4,5$  et

Y=2). Il apparaît également une baisse de champ le long de l'axe des Y ( $B= 41 \mu\text{T}$ ). Ces anomalies ne sont pas explicables, ni par la présence des objets enterrés, ni par des anomalies en surface.

Nous avons également fait des essais pour savoir si ce matériel permettait de voir les changements de couverture de sol (herbe-bitume). Nous avons réalisé une ligne représentée sur la figure 3.



Figure 3 : Ligne réalisée avec le C.A.42

Le résultat obtenu est en figure 4.

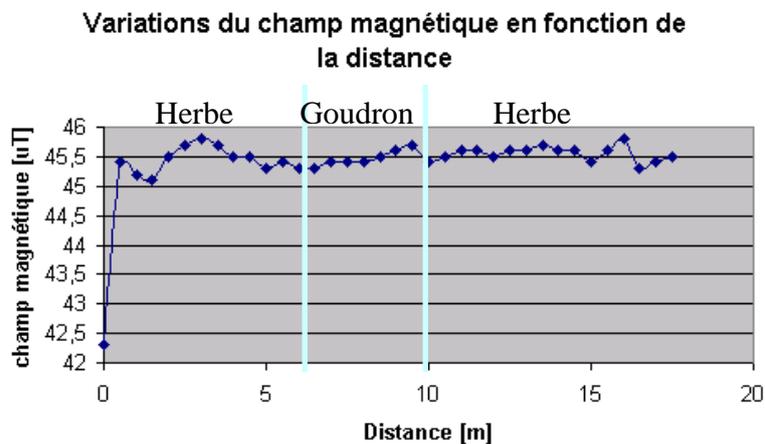


Figure 4 : Mesure avec le C.A.42 sur la ligne

Le CA42 ne semble pas sensible aux variations de surfaces. De plus le champ ne varie que de  $42 \mu\text{T}$  à environ  $46 \mu\text{T}$ . Le champ est au début de la mesure puis qu'il se stabilise vers  $45,5 \mu\text{T}$ .

Enfin, on a réalisé un dernier essai, sur la cassure située près du garage (un tuyaux est enterré à 1 m de profondeur). La ligne est représentée sur la figure 5.



Figure 5 : Ligne réalisée en coupant la cassure

Le résultat obtenu est en figure 6.

Variation du champ magnétique en fonction de la distance

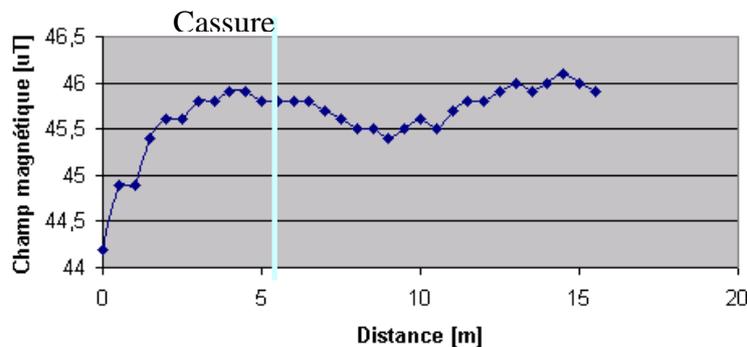


Figure 6 : Mesures avec le CA42 sur la ligne passant sur la cassure

Le CA 42 ne montre quasiment aucune variation au passage sur la cassure. Le champ est faible à proximité du bâtiment puis il augmente vers  $46 \mu\text{T}$ . Les variations entre  $45,5 \mu\text{T}$  et  $46 \mu\text{T}$  peuvent être considérées comme négligeables.

Le fait que aucun résultat probant ne soit obtenu avec le CA42 peut s'expliquer au moins de deux façons. Tout d'abord, du fait que cet appareil n'a pas été spécialement conçu pour réaliser des mesures magnéto-telluriques (des appareils appelés magnétomètres, de type SCINTREX par exemple, sont plus fréquemment utilisés).

Ensuite, par le fait que nous n'avons pas réalisé de mesures soustractives par rapport à une référence. En effet, théoriquement pour réaliser des mesures magnéto-telluriques, il faut disposer de deux appareils de mesure, l'un étant la référence et restant fixe au long de la mesure et l'autre se déplaçant sur la surface étudiée. Les mesures sont réalisées simultanément sur les deux appareils de mesures puis sont soustraites. Une image des objets contenus dans le sol, en ayant éliminé le bruit de fond et les perturbations, est alors obtenue.

## *Annexe 22 : Autres méthodes non destructives de géophysique (liste non exhaustive)*

### I. Méthode sismique

#### **Principe :**

La méthode de prospection sismique utilise une source d'ébranlement pouvant être créée par un coup de masse sur une plaque métallique, l'explosion de dynamite, les vibrations cohérentes d'un camion vibreur, etc...

La source produit une onde de choc qui se propage dans le sous-sol à des vitesses différentes et selon des trajets qui suivent des lois analogues à celles de l'optique. Il se produit ainsi des réflexions, des réfractions et des guidages d'onde.

Les vibrations sont enregistrées à la surface du sol par des capteurs sensibles à la vitesse de déplacement du sol, les géophones. En fonction du dispositif de terrain utilisé, l'analyse des temps d'arrivée des ondes directes, réfléchies, ou réfractées permet de calculer les vitesses sismiques et les épaisseurs des terrains

#### **Profondeur d'investigation :**

Elle dépend essentiellement de la source sismique utilisée et du dispositif :

- masse entre 0 et 30 mètres
- explosif entre 0 et plus d'1 km.

#### **Limites de la méthode :**

- Peu efficace en cas de recherche de structures verticales
- Emploi d'explosifs
- Interprétation délicate
- Méthode assez lourde à mettre en œuvre dans certains cas

### II. Gravimétrie

#### **Principe :**

La méthode de prospection gravimétrique appliquée s'attache à détecter les variations de densité des terrains. Pour calculer l'effet purement géologique des variations de densités, les mesures doivent être corrigées de tous les effets non géologiques. On citera les corrections suivantes : correction à l'air libre, du relief, de latitude, instrumentale... Dans certaines conditions, on peut s'affranchir d'un certain nombre de corrections, c'est alors la gravimétrie "expéditive".

#### **Profondeur d'investigation :**

Cette méthode intègre elle aussi toutes les anomalies sous la surface. De façon analogue au magnétisme, les anomalies superficielles présenteront une longueur d'onde plus réduite.

#### **Limites de la méthode :**

- Corrections fastidieuses,
- Appareillage délicat,
- Interprétation délicate

### III.TDEM

#### **Principe :**

Cette méthode utilise le phénomène de diffusion d'un champ EM transitoire pour déterminer la résistivité électrique des terrains en fonction de la profondeur.

Ce champ EM transitoire est créé par la coupure brusque d'un courant circulant dans une bobine émettrice disposée au sol. La réponse transitoire est mesurée par une bobine réceptrice durant la coupure. La profondeur d'investigation croît avec le temps au cours duquel le champ secondaire est mesuré, après la coupure du champ primaire.

#### **Dispositif de mesure :**

La taille des bobines peut varier de 5 mètres de côté à plus de 100 mètres. Une fois installé, ce dispositif permet de réaliser des sondages en une dizaine de minutes. Des profils peuvent aussi être réalisés

#### **Limites de la méthode :**

- Faible résolution des terrains résistants,
- Difficulté de mise en œuvre en zone très boisée,
- Résolution dans les premiers mètres assez limitée

### IV.Radiométrie

#### **Principe :**

Cette méthode utilise un scintillomètre/spectromètre qui permet de détecter aisément le rayonnement émis par les éléments radioactifs présents dans la nature. Cet appareil, composé d'un cristal spécialisé couplé à un photoamplificateur, permet de détecter une variété d'éléments radioactifs en mesurant la bande énergétique émise.

#### **Limites de la méthode :**

- Interprétation délicate
- Profondeur de sondage faible

**Annexe 23 : Mesures de précaution pour l'utilisation des appareillages**

<b>Appareil</b>	<b>Caractéristiques</b>	<b>Norme</b>	<b>Mesures de précaution</b>
Terrameter LUND	$I_{\max} = 1 \text{ A}$ $V_{\max} = 400 \text{ V}$ $f = 0,38 \text{ Hz}$ (signal carré)	–	Baliser la zone de mesure Se tenir à distance d'au moins 2 m du dispositif en fonctionnement
EM 31	$B_{\max} = 35 \text{ } \mu\text{T}$ (à proximité de la bobine) $f = 9,8 \text{ kHz}$	Décret Français $B_{\max} < 6,25 \text{ } \mu\text{T}$	Baliser la zone de mesures Se tenir à distance d'au moins 2 m du système en fonctionnement
GPR RAMAC	Impulsions électromagnétiques $f = 250 \text{ MHz}$	?	Baliser la zone de mesures Se tenir à distance d'au moins 5 m du système en fonctionnement Opérateur : ne pas passer près de surfaces réfléchissantes
CA 42	Aucun (pas d'émission)	–	Aucune