

LES APPLICATIONS GEORADAR DANS LES INVESTIGATIONS DE SUBSURFACE

Reçu le 18/02/2003 – Accepté le 22/05/2004

Résumé

Le radar est un outil d'investigation géophysique, il est utilisé aujourd'hui dans divers domaines, dans les travaux publics, le génie civil, en archéologie, en hydrogéologie et également dans la tranche superficielle du sol.

Cette double étude théorique et expérimentale a été menée sur le site du Centre de Contrôle Technique de la Construction (C.T.C - Est -Constantine) en collaboration avec M.D.S. Elle a le mérite de poser et de résoudre le problème géophysique spécifique à la méthode de manière globale et définitive. L'objectif est l'évaluation des états des lieux (Etat de diverses canalisations – eaux- gaz et câblages électriques).

L'interprétation finale a permis de mettre en relief les différentes anomalies recherchées et portées sur une carte dressée à ce but.

Mots clés: Radar géophysique, investigations, génie civil, travaux publics, hydrogéologie, archéologie.

Abstract

The radar is a tool for geophysical investigation, it develops in a spectacular way and touches various fields today, in public works, the civil engineering, in archaeology, hydrogeology of the aquifers surface and also in the surface section of the ground.

Experimental setup has been done on the Control Technique Constructions of Constantine (C.T.C) ground. The goal is double on the one hand control of the techniques of investigation by geo radar and on the other hand the experimentation within the framework of evaluation and the inventories of fixtures. State of drain of used water, wiring electric as well as the state of the Gas and water pipelines can be evaluated by the Experimental setup.

Final interpretation made it possible to highlight the various anomalies required and related to a chart drawn up this goal.

Keywords: Georadar, investigation, civil engineering, public works, hydrogeology, archeology.

H. SHOUT¹
M. BENSLAMA¹
M.C. BOURAYOU²
H. AYADI²
R. PETIT³

¹ Laboratoire d'Electromagnétisme et Télécommunication
Université Mentouri
Constantine, Algérie

² Contrôle Technique

de la Construction de l'Est

Constantine

³ Geophysical Survey Systems
Inc. Matériel de Sondage (M.D.S)
24, place Charles Filons
75017 Paris, France

ملخص

الرادار هو وسيلة من بين وسائل لاكتشاف جيوفيزياء الحديثة. تشبه الطريقة الجيوفيزيائية الزلزالية من حيث المبدأ والفعالية، يستعمل الآن في عدة مجالات؛ الأشغال العمومية، الهندسة المدنية، علوم الآثار، الهيدروجيولوجية و كذلك في دراسة الطبقة العليا للأرض. هذه الدراسة المزدوجة النظرية والتطبيقية قمن بها على مركز المراقبة التقنية للبناء- قسنطينة.

الهدف مزدوج من جهة التحكم في تقنية الاكتشاف عن طريق الجيورادار ومن جهة أخرى تجربة في إطار تقييم حالات الأماكن – حالة القنوات، تصريف المياه، حالة الأسلاك الكهربائية تحليل ومعالجة المعطيات المقدمة والمعلق عليها سمح لنا بتوضيح مختلف الظواهر وتم وضعها على خريطة مخصصة لهذا الهدف.

الكلمات المفتاحية: جيورادار، اكتشافات، الهندسة المدنية، الأشغال العمومية، الهيدروجيولوجية، علوم الآثار.

Le Radar géophysique est un outil de prospection par champ électromagnétique de haute fréquence, destiné à scanner à partir de la surface du sol, la tranche de terrain prédéfinie et permet ainsi de mesurer des reconnaissances micro tectoniques (fractures, discontinuité et éventuellement lithologiques) des structures enfouies dans le sous sol [8].

Le radar géophysique est un outil très efficace pour l'investigation des terrains ou des structures béton, de cinq à quarante mètres (5 à 40 m) du sous-sol lorsque la nature des terrains est favorable pour les antennes 80 à 400 MHz et de quelques centimètres à 5 mètres pour la série d'antennes de 1500 à 2000 MHz. Il peut donc rendre de grands services aux géologues, aux hydrogéologues, aux agronomes, aux archéologues, aux ingénieurs des mines et aux entreprises de travaux publics et du génie civil (Fig.1).

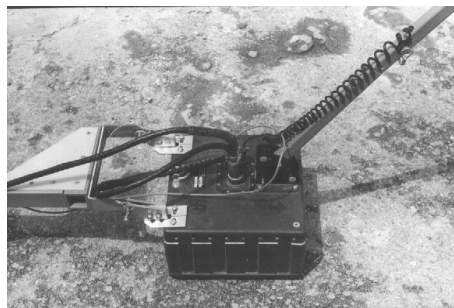


Figure 1:
Antenne 400 MHz montée sur roue.

Les objectifs de l'utilisation radar

Les exemples d'applications du radar sont nombreux et les domaines les plus convoités sont : la géologie [2], le génie civil, la géotechnique, l'environnement, l'hydrogéologie, l'archéologie.

Quant aux objectifs recherchés, on peut citer:

- Les contacts géologiques, les plans de stratification, les plans de fracturation, les excavations remblayées (pour la pose de tubes, pour enterrer des déchets), les différentes couches du revêtement d'une route, voies ferrées et pistes d'aéroport.

- Le contrôle des épaisseurs de béton en galeries ou tunnels, localisation des armatures métalliques dans le béton, les vides naturels, les pertes dans le sol de gasoil ou d'eaux usées, les routes, ruines et poteries ensevelies pour la recherche archéologiques et criminalité.

- La localisation de canalisation (métal, béton, PVC).

L'étude que nous avons menée a porté sur le site du Centre de Contrôle Technique de la Construction (C.T.C - Est -Constantine).

La figure 2 montre la signification des anomalies en fonction des énergies traduites sous forme de contraste de couleur: en (a), les réflexions d'une canalisation en acier (la couleur blanche des réflexions paraboliques indique l'intensité énergétique du signal). En (b), les réflexions, en couleur rouge, l'énergie moins intense au niveau des paraboles de réflexions (cas de tubes en PVC).

Le principe du radar géophysique

Le radar géologique utilise la réflexion d'ondes électromagnétique pour l'exploration des couches superficielles du sous-sol. La méthode radar, mis à part sa profondeur d'investigation limitée, est comparable à la sismique réflexion. L'avantage de cette technique se trouve au niveau du système d'acquisition, contrairement à la sismique réflexion ou réfraction, où l'émetteur et le récepteur du signal sont presque confondus, en terme de

distance (absence de la couverture multiple).

Le dispositif émetteur est une antenne générant une impulsion électromagnétique à très hautes fréquences. La gamme des fréquences centrales utilisées est très étendue. Elle varie de quelques dizaines de MHz au GHz.

Les ondes électromagnétiques propagées dans la formation sont enregistrées sur une antenne réceptrice.

La distance séparant l'antenne émettrice de l'antenne réceptrice varie de quelques centimètres à plusieurs mètres.

Cette antenne émettrice envoie dans le sous-sol des impulsions d'énergie électromagnétique de très brèves durées (quelques nanosecondes). Quand les ondes produites rencontrent un contact entre deux matériaux de compositions différentes, une partie de leur énergie est réfléchi vers le haut tandis que l'autre partie continue à s'enfoncer. Les ondes réfléchies sont captées par une antenne réceptrice, amplifiées, élaborées et finalement transformées en courant électrique, pour être ensuite codées et envoyées à des enregistreurs analogiques ou numériques. Le trans-receveur formé du couple transmetteur receveur est déplacé le long des profils recoupant les objectifs recherchés.

Le spectre de fréquence exploité est compris entre 80 MHz et 2500 MHz, qui correspond à des profondeurs allant de 60 centimètres à 30 mètres.

Principe théorique

Le formalisme de Maxwell conduit à l'établissement des équations de propagation d'une onde électromagnétique. En milieu isotrope homogène, le champ électrique E associé à la propagation d'une onde plane vérifie l'équation [1] :

$$\nabla^2 E = \mu\sigma \frac{\delta E}{\delta t} + \frac{\delta^2 E}{\delta t^2} \quad (1)$$

Le champ d'induction magnétique B vérifie également l'équation ci-dessus. Les constantes de proportionnalité $\varepsilon (\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r)$, $\mu (\mu = \mu_0 \mu_r)$ représentent respectivement la

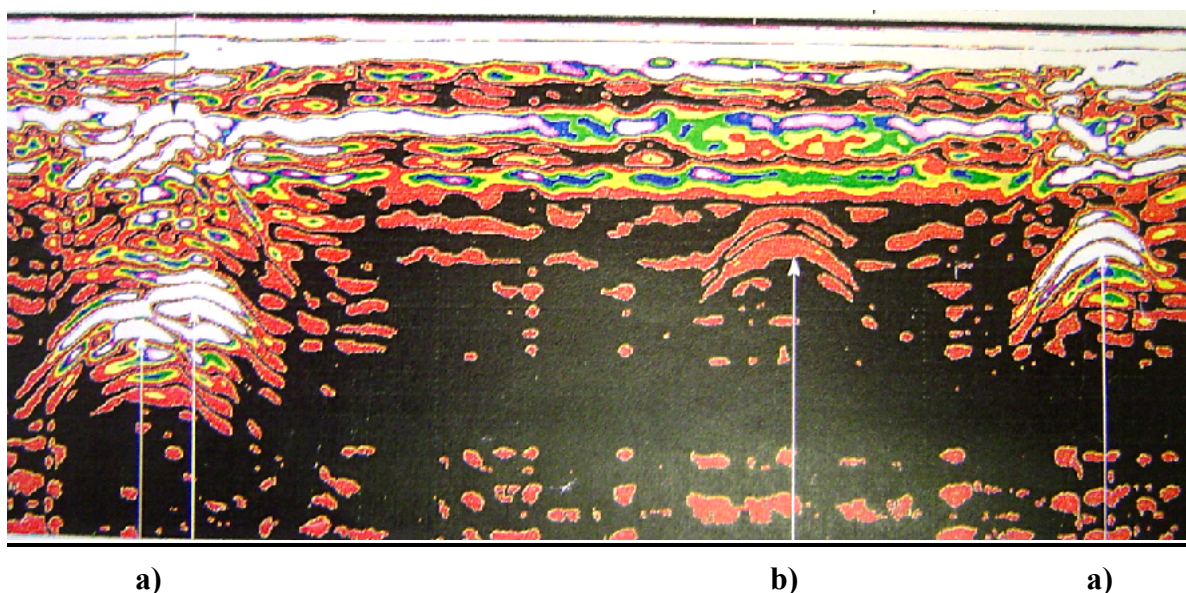


Figure 2: Profil géo radar révélant les différentes anomalies (Acier ; PVC).

permittivité diélectrique et la perméabilité magnétique, et σ , la conductivité du milieu.

Les constantes ε_r et μ_r sont respectivement les permittivité diélectrique et perméabilité magnétique relatives. Les constantes ε_0 et μ_0 sont les permittivité et perméabilité du vide (ou de l'aire). Une onde électromagnétique se propage dans l'aire sans atténuation à

la vitesse c de $3 \cdot 10^8$ m/s avec $\left(c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \right)$.

Le membre de droite de l'équation (1) est composé de deux termes. Le premier terme est un terme de diffusion, le second est un terme de propagation. L'équation de propagation d'une onde acoustique ne comprend pas de terme de diffusion. Pour une propagation suivant la direction Z (vertical), l'équation (1) devient :

$$\frac{\delta^2 E}{\delta Z^2} = \mu\sigma \frac{\delta E}{\delta t} + \frac{\delta^2 E}{\delta t^2} \quad (2)$$

Une solution à l'équation (2) s'écrit :

$$E(z,t) = E_0 e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (3)$$

L'équation (3) est l'expression d'une onde monochromatique de pulsation ω se propageant dans la direction Z à la vitesse de phase $V = \omega/\beta$ avec un coefficient d'atténuation α .

L'amplitude initiale à $t = 0$ est E_0 . Le nombre i est l'imaginaire ($i^2 = -1$)

La combinaison des équations (2) et (3) conduit à établir la relation de dispersion :

$$(\alpha + i\beta)^2 = i\mu\sigma\omega - \mu\varepsilon\omega^2 \quad (4)$$

Les constantes d'atténuation α et de phase β vérifient alors le système d'équation :

$$\begin{cases} (\alpha^2 - \beta^2) = -\mu\varepsilon\omega^2 \\ 2\alpha\beta = \mu\sigma\omega \end{cases} \quad (5)$$

La résolution du système (5) conduit à estimer les constantes d'atténuation α et de phase β :

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon\mu c^2}{2}} \left(-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\varepsilon\omega} \right)^2} \right) \\ \beta = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon\mu c^2}{2}} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\varepsilon\omega} \right)^2} \right) \end{cases} \quad (6)$$

Le terme réel de la relation de dispersion (équation 4) correspond au phénomène de propagation, le terme imaginaire au phénomène de diffusion. Les deux phénomènes coexistent. Cependant, en fonction de la gamme de fréquence ω choisie, il est possible de privilégier l'un ou l'autre des phénomènes.

La quantité $\sigma/\omega\varepsilon$ permet de classer les matériaux :

- En matériaux diélectriques ($\sigma/\omega\varepsilon < 0.01$),
- En matériaux quasi-conducteurs ($0.01 < \sigma/\omega\varepsilon < 100$),
- En matériaux conducteurs ($100 < \sigma/\omega\varepsilon$).

Pour les matériaux qui sont de bons conducteurs, les courants de déplacement sont négligeables devant les courants de conduction, et l'équation (1) se réduit à une équation de diffusion. Pour des matériaux à faible

conductivité et pour des fréquences ω élevées, les courants de déplacement prédominent, les courants de conduction deviennent négligeables et l'équation (1) peut être assimilée à une équation de propagation.

En prospection Radar, on choisit de travailler avec des fréquences ω élevées pour privilégier le phénomène de propagation ($\omega \gg \sigma/\varepsilon$).

Dans ce cas, les constantes d'atténuation α et de phase β peuvent être approchées par les relations :

$$\begin{cases} \alpha \approx \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon\mu c^2}{2}} \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma}{\varepsilon\omega} \right) \\ \beta \approx \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon\mu c^2} \end{cases} \quad (7)$$

A l'exception des objets métalliques ou des formations où les minéraux sont présents en grande abondance [1], la perméabilité magnétique relative μ_r ($\mu_r = \mu/\mu_0$) d'une formation est proche de 1. La quantité $\varepsilon\mu c^2$ est alors proche de la permittivité diélectrique relative ε_r .

Les équation (7) s'écrivent alors :

$$\alpha \approx \frac{1}{2c\varepsilon_0} \frac{\sigma}{\sqrt{\varepsilon_r}} = 60\pi \frac{\sigma}{\sqrt{\varepsilon_r}} = \frac{60\pi}{\rho\sqrt{\varepsilon_r}}$$

$$\beta \approx \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_r}$$

$$\varepsilon_r = (36\pi * 10^9)^{-1} \cdot F/m, \rho = \frac{1}{\sigma}$$

En pratique, l'atténuation de l'onde électromagnétique (onde radar) est exprimée en dB/m et la vitesse $v = \omega/B$ [en m/ μ s ou cm/ns].

La vitesse de l'onde radar est généralement approchée par $v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}}$.

- v : vitesse de l'onde radar, en m / μ s,
- c : vitesse de la lumière dans le vide (300m/ μ s),
- ε_r : permittivité relative du matériau.

L'atténuation de l'onde radar est donnée par :

$$\alpha = 1640 \frac{1}{\rho\sqrt{\varepsilon_r}}$$

- α : atténuation, en dB/m,
- ρ : résistivité du terrain à la fréquence considérée (ω), en $\Omega.m$,
- ε_r : permittivité relative du matériau

La permittivité ε_r varie de 1 pour l'air à 81 pour l'eau. Les minéraux les plus communs ont des permittivités ε_r comprises entre 4 et 9. C'est le contenu en eau qui influence de façon prépondérante la permittivité d'un sol ou d'une roche. Le contenu en eau θ est le produit de la porosité ϕ par la saturation en eau S_w . Des mesures expérimentales réalisés sur une grande diversité d'échantillons de roche ont permis à Topp, Davis et Annan (1980) cités par J.L. Mari *et al.* [1], de proposer une relation empirique liant ε_r à θ sous forme d'une expression

Terrains	Atténuation α (dB/m)	Résistivité ρ (Ω /m)	Permittivité Relative ϵ_r	Vitesse des ondes radar
Argile saturée	51.8	10	8-12	0.06
Marne argileuse	14.5	40	8	0.08
Marne calcaire	5.8	100	8	0.10
Sable saturé	3	100	30	0.06
Calcaire	2	400	4	0.12
Eau douce	1.8	100	81	0.033
Sable sec	0.82	1000	4-6	0.15
Eau pure	0.2	1000	81	0.33
Glace	0.082	10000	4	0.16
Béton sain ou Granite sain	0.06	10000	6.5	0.13

Tableau 1: Paramètres de terrain liés aux ondes radars.

polynomiale du type :

$$\epsilon_r \approx 3.03 + 9.3\theta + 146\theta^2 - 76.7\theta^3$$

Le tableau 1 donne, à titre indicatif, pour différents terrains, des valeurs d'atténuation α , de résistivité ρ et de permittivité relative ϵ_r et de la vitesse des ondes radars dans les différents milieux. La pénétration est limitée par l'atténuation α . La méthode radar est inefficace en terrain conducteur, dans les argiles par exemple [6].

Mise en œuvre du système radar [8]

La mise en œuvre du radar géophysique, dans le cas du système d'acquisition SIR2000, est basé sur l'exploitation du mode d'acquisition **compte pas**.

Le mode d'acquisition de donnée **compte pas** :

Dans ce mode d'acquisition de donnée, l'acquisition est contrôlée par un compte pas attaché à l'antenne; toutes les lignes auront donc les mêmes graduations horizontales. Ce mode est préférable pour les relevés qui demandent une localisation précise des lignes.

Le compte pas doit être calibré sur le site de relevé de mesure avant utilisation.

Paramètres d'acquisition

Afin de bien réussir l'acquisition de données radar, on doit s'assurer, dès le départ, de certaines conditions que le signal radar doit avoir, sachant que l'information utile recherchée se trouve noyée dans ce signal. En conséquence, il y a lieu de s'assurer convenablement de son bon conditionnement.

Les paramètres de départ sont choisis en fonction de la profondeur de la cible: choix du diélectrique, choix de la profondeur d'intérêt (range), choix des gains, choix des filtres, balayage ou scan.

Paramètres d'acquisition de l'antenne 400D utilisée

Les principaux paramètres sont essentiellement les gains, les filtres et la diélectrique des terrains (paramètre caractérisant la nature du milieu et essentiellement du terrain, car le signal électromagnétique pénètre plus ou moins fortement suivant la nature des terrains, comme en sismique, les ondes sont plus amorties en terrains meubles

qu'en terrains très consolidés).

Ainsi, les hautes fréquences sont amorties en terrains humides argileux ou sableux et font écran aux passages des ondes radar; l'investigation reste donc superficielle.

Un choix judicieux de ces paramètres va nous permettre d'obtenir un signal non biaisé. Ainsi, le rapport signal sur bruit sera réduit d'un facteur élevé. Cette phase d'acquisition est fondamentale, car en géophysique on dit souvent, qu'il ne faut pas s'attendre à de bons résultats si les données de départ, au moment de leur acquisition, sont biaisées [3].

Les paramètres pris pour cette antenne sont :

- Profondeur de vue = 5m,
- Diélectrique = 9,
- Mode d'acquisition : Comte pas,
- Range = 100 ns,
- Echantillonnage par balayage = 512,
- Résolution = 8 bits,
- Nombre de point gain = 5,
- Filtre passe Haut = 30 MHz,
- Filtre passe bas = 800 MHz,
- Balayage par seconde = 32.

Acquisition des données radar

L'acquisition des données radar a été effectuée en utilisant le mode compte pas, et suivant l'objectif que nous avons prédéfini au départ, à savoir vérifier s'il existe une corrélation entre les événements recensés sur le site et leur manifestation sur les radar-grammes obtenus.

Ainsi avons-nous retenu pour cette étude 13 profils. La description est reportée sur le tableau 2.

Prétraitement et interprétation des radar-grammes

Procédure d'interprétation des radar-grammes :

L'interprétation qualitative et immédiate.

Dans cette phase d'interprétation, on s'intéresse plutôt à la présence ou à l'absence d'anomalies et leur individualisation; on note également une description sommaire de chaque événement [4].

L'interprétation quantitative suit les traitements appliqués aux radar grammes, qui consiste à transformer réellement et correctement les temps en profondeur ainsi que l'individualisation de chaque anomalie. Cette

Fichiers	Evénements détectés	Profils
3	Conduite d'eau et canalisation des eaux usées.	1
5	Zones très humide.	2
11	Localisation de câbles électriques et d'une canalisation d'eaux usées.	4
12	Câble d'éclairage public et présence d'une canalisation.	5
14	Le passage du radar sur une flaque d'eau montre une zone sombre. - passage de canalisation.	6
16	0-5m : terrain horizontal. 20-26m : réflexion forte correspondant au passage d'une canalisation.	7
25	Présence d'une forte réflexion au niveau des 26 m avec des échos ou multiples.	8
27	Passage de canalisation.	10
28	Hyperbole et forte réflexion.	11
40	Réflexion coïncidant avec celle observée sur le profil 6.	18
48	Passage de câbles électriques..	21
49	Présence de canalisation ou égout.	22
51	Conduite d'eau.	23

Tableau 2: Résultats d'acquisition et d'interprétation des différents radar grammes portés sur des profils. Mode d'acquisition: compte pas.

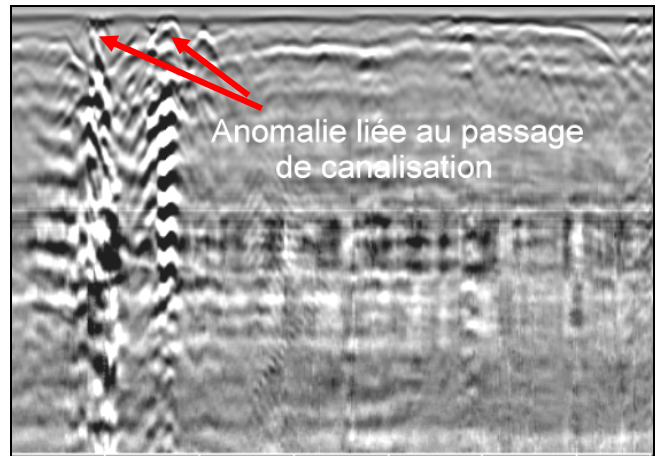


Figure 3: Radar gramme du profil N° 1 montrant le passage de deux conduites.

transformation requiert la détermination de la vitesse moyenne des ondes dans les terrains recouvrant les objectifs:

$$P = V.T/2$$

P: Profondeur ; V : Vitesse moyenne en m/ns ; T : Temps double en nano seconde.

Parmi les applications, celles des filtrages numériques, du calcul des différentes corrections (corrections statiques ou d'altitude) [1], le calcul d'une loi de vitesse, pour retrouver les interfaces plus juste des différents réflecteurs.

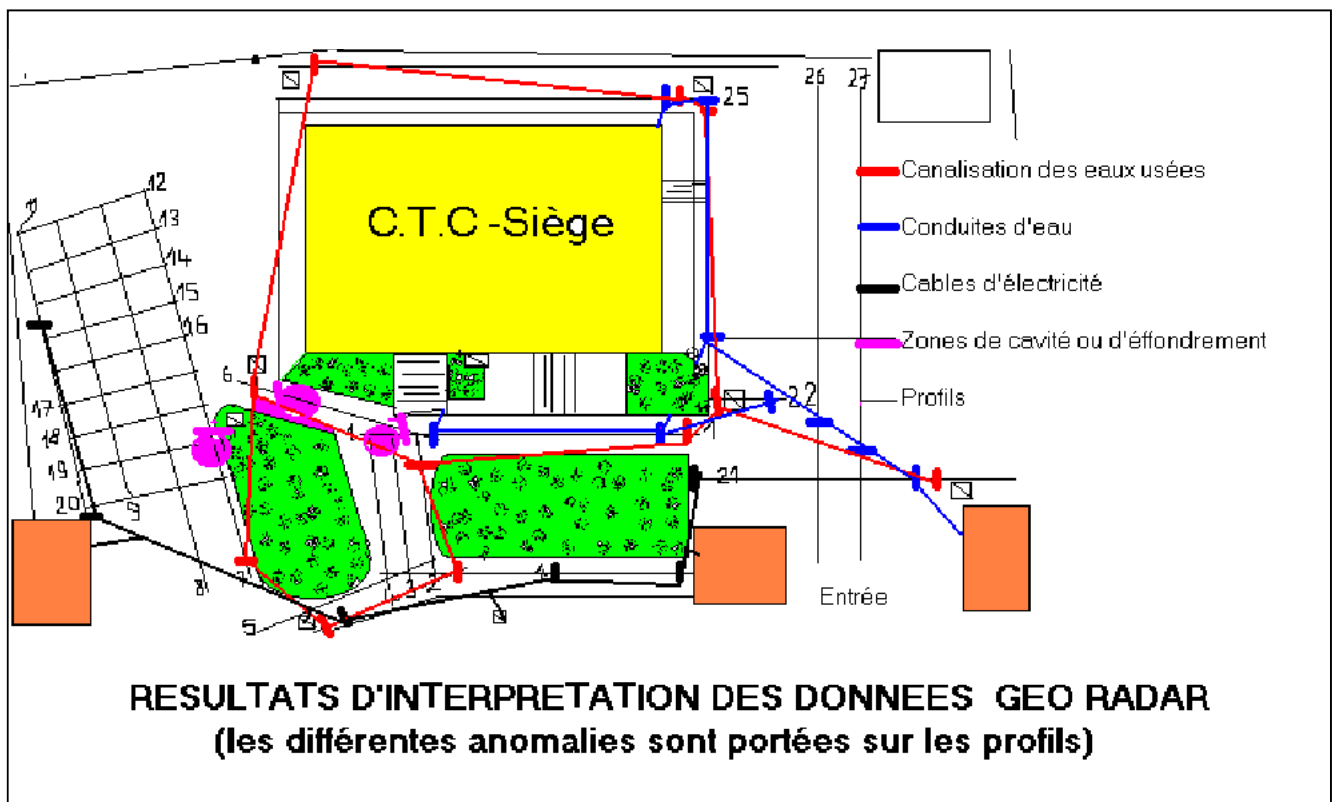


Figure 4: Carte de repérage des anomalies radar sur les profils.

Le dépouillement de ces radar grammes, profil par profil, nous a permis de faire une première interprétation, à savoir la localisation des objectifs recherchés, puisque les anomalies à retrouver sont très localisées; il s'agit de canalisations d'eau potable ainsi que celles d'égouts, les câbles électriques ainsi que des zones très sombres associées à la présence d'eau stagnante (ou zones de broyage). Les profils ont été fixés perpendiculairement à ces anomalies. La résolution du problème inverse était aisée puisque il s'agissait de faire la corrélation entre les anomalies obtenues sur les radar grammes et les anomalies réelles portées sur le plan de position.

Les paramètres à tirer sont la profondeur des anomalies et la description de leur environnement.

L'étude de synthèse consiste à porter sur le plan de situation des profils, les différents événements constatés au niveau de chaque profil, puis chercher au niveau des intersections des profils considérés, la validité de ces anomalies par rapport aux anomalies réelles.

Interprétation des données géoradars

Les résultats (Fig. 3 et 4) montrent la position des diverses anomalies liées au différents événements révélés sur les radar grammes ; ainsi, a-t-on reporté sur les profils, les différentes intersections d'anomalies, qui sont représentés par différentes couleurs :

Le rouge représente le passage des canalisations des eaux usées ou égouts,

Le bleu représente les conduites d'eau potables,

Le noir représente le passage des câbles électriques,

Le violet représente la présence de zones humides (rupture de canalisation, fuite d'eau, zone d'effondrement).

CONCLUSION

Les résultats de cette étude ont permis de cartographier les différents événements liés à la présence de canalisations et des conduites (eau et gaz) ainsi que différents câblages (électricité) enfouis sous terre du Bloc administratif de la

C.T.C Est – Constantine.

Grâce à cet instrument de la famille des équipements de géophysique, nous avons pu étudier et cartographier le terrain de la proche surface et révéler les anomalies dont le contenu est représenté sur les figures 3 et 4.

Ce travail, jadis, était pratiquement impossible à réaliser dans un environnement urbain assez complexe et dense, du point de vue faisabilité et sécuritaire [5].

Cela s'explique également par le fait que ni la sismique ni les méthodes électriques ou électromagnétiques classiques ne pouvaient résoudre ce genre de problème car, d'une part, ces équipements ne sont pas adaptés à un espace urbanisé, et d'autre part, le coût des opérations pour atteindre ces objectifs, revient trop cher.

REFERENCES

- [1]- Mari J-L., Arens G., Chapellier D., Gaudiani P., "Géophysique de Gisement et de Génie civil", Editions Technip, (1998).
- [2]- Lamer A., "Filtrages sismiques par moyenne et antimoyenne", Thèse de doctorat d'Etat, Université Pierre-et-Marie-Curie, Edition Technip, Paris, (1982).
- [3]- Shout H., Dupis A., Baltenberger P., Fabriol H., Gasmi M., Ghorbel N., Théra A., "Contribution de la magnéto-tellurique et de la sismique à l'étude de l'anomalie magnétique du Bassin parisien", *Bull. Soc. Géol. Fr.*, n°5, (1990).
- [4]- Dubois J.C., "Borehole radar experiment in limestone", *Analysis and data processing*, (1995).
- [5]- Tillard S., "Evaluation des performances de la technique radar en prospection géophysique", Thèse, Université de Strasbourg, (1991).
- [6]- Tillard S., Dubois J.C., "Influence of lithologie on radar echoes : Analysis with respect to electromagnetic parameters and rock anisotropy", 4th International Conference on Ground Penetrating Radar, Rovaniemi (P. Hänninen, S. Autio, eds), Geological Survey of Finland, Special Paper, 16, (1992), pp.95-102.
- [7]- Unterberger R.R., "Radar propagation in rock salt", *Geophysical prospecting*, 26, (1978), pp.312-128.
- [8]- Documentation MDS. □