

# Estimation optimale de la profondeur d'un tag-RFID enfoui à partir d'un modèle d'intensité

Vitalia KHOKHLOVA<sup>1,2</sup>, François FRASSATI<sup>1</sup>, Thierry THOMAS<sup>1</sup>, Mikael CARMONA<sup>1</sup>, Olivier MICHEL<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CEA, Leti, 17 avenue des Martyrs, 38054 Grenoble Cedex, France

<sup>2</sup>Université de Grenoble Alpes, GIPSA-Lab, 961 rue de la Houille Blanche, BP 46 F- 38402 Grenoble Cedex, France

vitalia.khokhlova@cea.fr, francois.frassati@cea.fr,  
mikael.carmona@cea.fr, olivier.michel@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

**Résumé** – Cet article porte sur une méthode de localisation d'un tag RFID enfoui. Le principe se base sur l'estimation de l'intensité minimale du champ nécessaire pour exciter le tag en fonction de l'élévation de l'antenne. La méthode est illustrée par simulations et expérimentations réels dans une configuration pratique. L'application visée concerne la localisation des tuyaux enfouis qui représente un défi courant en ingénierie civile.

**Abstract** – This paper concerns a localization method of a buried RFID-tag. The principle relies on measuring the intensity received by an antenna exciting the tag. The principle includes also the estimation of the antenna-soil distance (elevation) using a distance sensor. Then, from the set of measured intensities and antenna elevations, we derive the optimal estimator of the tag depth and activation threshold. The method is illustrated by simulations and with real experiments in a practical configuration. The targeted application concerns buried pipelines localization which is a current issue in civil engineering.

## 1 Introduction.

La détection / localisation de canalisations enfouies est une thématique importante des voiries-réseaux-distributions (VRD). De récentes évolutions de la législation française imposent aux maîtres d'ouvrages l'obligation d'assurer la sécurité des chantiers par la localisation préalable des réseaux. Dans ce contexte, la mise en oeuvre d'un procédé de détection/localisation privilégie les technologies de communication sans-fil aux technologies filaires pour leur simplicité de mise en oeuvre. L'utilisation de la RFID (Radio Frequency IDentification), habituellement cantonnée à l'identification d'objets « taggués », dans une nouvelle application de détection et localisation d'objets enfouis ouvre de nombreuses perspectives. Cette technologie apporte une réponse à la question de l'autonomie énergétique du système de localisation grâce à la télé-alimentation des tags, et permet de surcroît l'identification immédiate de l'objet détecté via un numéro unique, réduisant par nature les fausses détections. Il convient donc d'adapter le fonctionnement des « tags » pour des objets enfouis dans le sol.

Depuis quelques années, le CEA-Leti a développé avec le concours de la société RYB ([www.ryb.fr](http://www.ryb.fr)) un système RFID adapté aux environnements humides, que sont les sols. Il est composé d'un tag, intégré ou fixé à la canalisation enfouie, et d'un lecteur de surface qui permet de télé-alimenter le tag ainsi que de communiquer avec lui. Ce système, nommé ELIOT, est utilisé pour communiquer des données relatives à la canalisation enfouie : nature de la canalisation (eau, gaz, électricité,

etc.), diamètre et profondeur. Ce dernier paramètre peut évoluer au cours du temps (par exemple lors de remblais) et il est important de pouvoir l'estimer à nouveau sans modifier l'intégrité du sol. L'estimation non-destructive de la profondeur d'un tag enfoui est un problème récent. A ce jour, l'unique solution existante [1] est basée sur l'identification d'une « zone magnétique » caractéristique créée par le tag et détectée par une antenne localisée par GPS. Le procédé de localisation se base sur l'existence d'une table connue *a priori* qui relie la géométrie de cette zone de détection à la profondeur du tag. Ce procédé nécessite de mesurer finement les dimensions de la zone de détection pour en déduire la profondeur du tag.

Dans cet article, on propose une méthode de localisation qui permet de s'affranchir de l'apprentissage d'une base de données. L'estimation repose sur un modèle de mesure simple ne prenant pas en compte la nature du sol [2]. Ce modèle relie la profondeur du tag à l'intensité du courant générée dans l'antenne du lecteur de surface nécessaire pour réveiller le tag et le détecter. L'antenne du tag est supposée horizontale. Des modèles plus complexes pourront par la suite intégrer une orientation différente du tag et la prise en compte de la nature du sol. Cette généralisation fait l'objet de travaux en cours.

Le papier est organisé comme suit. La section 2 présente le protocole expérimental de localisation d'un tag enfoui avec la méthode proposée et le modèle de mesure qui en découle. En section 3, l'expression de l'estimateur optimal de la profondeur du tag ainsi que la borne de Cramer-Rao associée sont établies. Les performances de cet estimateur sont illustrées en simula-

tions puis sur des données réelles.

## 2 Protocole de mesure et modèle

### 2.1 Configuration et principe

On considère un tag RFID (conforme à la norme ISO 18000-3 Mode 1) localisé à une profondeur  $z_{tag}$ . Les profondeurs des canalisations visées sont entre 50 et 150 cm. L'antenne du lecteur est essentiellement une boucle de courant circulaire de diamètre  $2a$  parcourue par un courant uniforme  $I$  (cf. figure 1). La valeur de  $I$  circulant dans l'antenne est mesurée par le lecteur. On suppose que l'antenne du tag est contenue dans un plan parallèle au sol. En pratique, cette antenne peut être légèrement cintrée sur la surface cylindrique d'une canalisation mais toujours disposée parallèlement au sol. On suppose en outre que les dimensions de l'antenne du tag sont faibles devant la profondeur et devant le diamètre de l'antenne du lecteur, de sorte que le champ magnétique généré par l'antenne du lecteur soit approximativement constant sur la surface de l'antenne du tag. On note par  $H_s$  le seuil d'activation du tag (exprimée en mA/m). Cela correspond à l'intensité moyenne du champ magnétique à la surface de l'antenne du tag nécessaire pour que le tag soit activé. Cette valeur est propre à la conception du tag (dimension de l'antenne, sensibilité de la puce RFID); elle est considérée comme inconnue car pouvant augmenter avec le vieillissement du tag. Enfin, par hypothèse, tout tag activé produit une réponse qui est systématiquement détectée par le lecteur (le détecteur à une sensibilité infinie). En réalité, la détection se déroule en 2 étapes. La première étape consiste à déterminer l'aplomb du tag : le lecteur émet à pleine puissance afin de détecter le tag sur une zone la plus étendue possible. Puis l'opérateur diminue progressivement la puissance jusqu'à ce que la zone de détection soit quasi-punctuelle. Le centre de la zone de détection détermine l'aplomb du tag avec une précision horizontal de 2 à 3 cm.

La deuxième étape se base sur la mesure du minimum de l'intensité requise pour activer le tag en élevant l'antenne du lecteur en  $N$  positions au-dessus du sol à l'aplomb du tag, avec  $N \geq 2$ . L'élévation par rapport au sol de ces  $N$  points est mesurée via un capteur de distance. Simultanément l'intensité minimale requise pour communiquer avec le tag (donc pour produire un champ  $H_s$  sur le tag) est mesuré dans l'antenne du lecteur. Pour toute position  $i \in \{1, \dots, N\}$ , on notera par:  $z_{th}^{(i)}$  la distance théorique antenne-sol,  $z_{mes}^{(i)}$  la distance mesurée antenne-sol,  $I_{th}^{(i)}$  l'intensité du courant théorique à  $z_{th}^{(i)}$ ,  $I_{mes}^{(i)}$  l'intensité du courant mesurée à  $z_{th}^{(i)}$ .

### 2.2 Modèles d'intensité et de mesure

Ici, la permittivité et la conductivité du sol sont supposés prendre des valeurs proches de leur valeur dans le vide. Cela implique en particulier que le sol ne contient pas d'objets métalliques susceptibles de produire des perturbations magnétiques

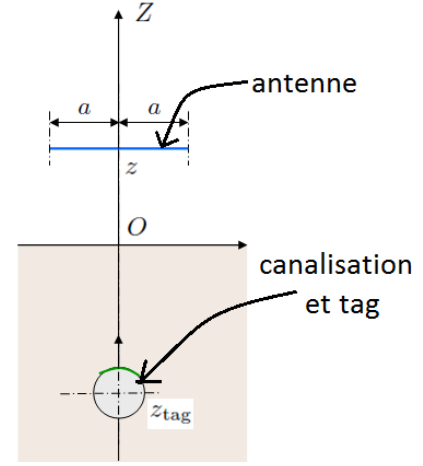


FIG. 1 – Geometrical configuration.

secondaires. Avec ces hypothèses, le modèle du champ créé par l'antenne est donné par l'approximation d'un champ magnétique quasi-statique dans le vide. Sur l'axe de la boucle à une distance  $z$  du centre de la boucle le champ  $H$  est axial et on a [2]:

$$H = \frac{I_{mes}^{(i)}}{2a} \left[ 1 + \frac{(z_{tag} + z_{mes}^{(i)})^2}{a^2} \right]^{-3/2} \quad (1)$$

Le tag est activé lorsque le courant dans la boucle vaut au moins :

$$I_{th}^{(i)} = I(z_{th}^{(i)} + z_{tag}, H_s) \quad (2)$$

où :

$$I(d, H_s) = 2aH_s \left[ 1 + \frac{d^2}{a^2} \right]^{3/2} \quad (3)$$

Pour donner quelques chiffres pratiques,  $a \simeq 16$  cm,  $I \simeq 1$  A et  $H_s \simeq 20$  mA/m. Le profil théorique du champ sur l'axe de la boucle et des mesures effectuées dans l'air en laboratoires sont représentés en figure 2. La divergence entre le modèle et les mesures à partir de  $z = 6a$  provient du fait que le signal électrique de la sonde de champ magnétique à cette distance devient comparable au bruit électronique de la chaîne de mesure.

Pour la configuration donnée  $i \in \{1, \dots, N\}$ , l'intensité et la distance antenne-sol est mesurée. On peut raisonnablement supposer que ces deux mesures sont perturbés par des bruits additifs gaussiens centrés. Le bruit sur  $I$  provient du lecteur. Le bruit sur  $z$  provient principalement de l'irrégularité du sol. Dès lors, le modèle pour une mesure est :

$$I_{mes}^{(i)} = I_{th}^{(i)} + b_I \quad (4)$$

$$z_{mes}^{(i)} = z_{th}^{(i)} + b_z \quad (5)$$

où  $b_I$  et  $b_z$  sont gaussiens centrés et d'écart-types notés  $\sigma_I$  et  $\sigma_z$ , respectivement. En pratique,  $\sigma_z = 1$  cm, et  $\sigma_I$  est de l'ordre de 10 mA pour la technologie de mesure utilisée. Les équations (4) et (5) s'écrivent sous la forme vectorielle comme suit :

$$\mathbf{M} = \mathbf{f}(\mathbf{X}) + \mathbf{B} \quad (6)$$

avec :

$$\mathbf{M} = \left[ \mathbf{M}^{(1)} \dots \mathbf{M}^{(N)} \right]^T \quad (7)$$

$$\mathbf{M}^{(i)} = \left[ I_{mes}^{(i)} z_{mes}^{(i)} \right], i \in \{1, \dots, N\} \quad (8)$$

$$\mathbf{X} = \left[ H_s z_{tag} z_{th}^{(1)} \dots z_{th}^{(N)} \right]^T \quad (9)$$

$$\mathbf{B} = \left[ \mathbf{B}^{(1)} \dots \mathbf{B}^{(N)} \right]^T \quad (10)$$

$$\mathbf{B}^{(i)} = \left[ b_I^{(i)} b_z^{(i)} \right], i \in \{1, \dots, N\} \quad (11)$$

$\mathbf{M}$  est le vecteur des mesures,  $\mathbf{X}$  est le vecteur des paramètres à estimer, et  $\mathbf{B}$  est le vecteur gaussien centré des bruits de mesure. La dépendance fonctionnelle  $\mathbf{f}$  se déduit des équations (4) et (5).

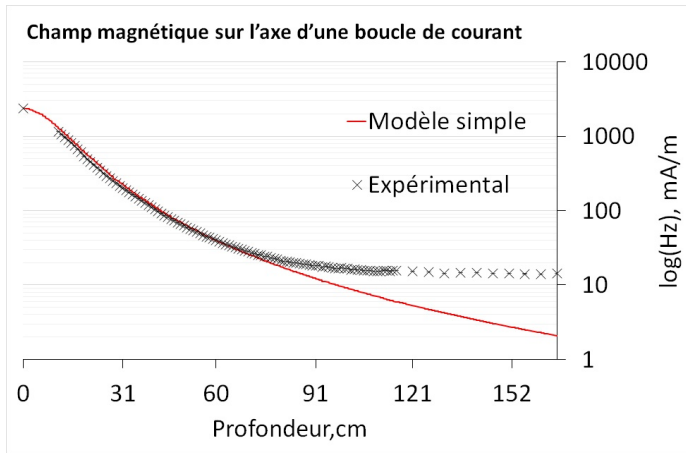


FIG. 2 – Comparaison entre le modèle simple et des mesures du champ magnétique dans l'air dans l'axe d'une antenne circulaire de rayon 16cm à l'aide d'une sonde de champ de sensibilité 48.5A/m/V.

### 3 Estimation optimale de $z_{tag}$

L'estimation de  $z_{tag}$  est ici réalisée par maximisation de la vraisemblance  $p_{\mathbf{M}|\mathbf{X}}$  associée au modèle (6). Cela revient à minimiser le critère suivant [3]:

$$\mathcal{C}(\mathbf{X}) = \frac{1}{2}(\mathbf{M} - \mathbf{f}(\mathbf{X}))^T \Gamma^{-1}(\mathbf{M} - \mathbf{f}(\mathbf{X})) \quad (12)$$

Cette optimisation est réalisée par un algorithme de gradient-conjugué [4] pour lequel l'initialisation doit être précise car la fonction  $\mathcal{C}$  peut présenter des minima locaux. Une méthode a été développée dans ce but. Cette dernière consiste à rechercher des points d'intersection entre les  $N$  courbes définies par (3) qui expriment le seuil d'activation en fonction de la profondeur du tag pour toutes les paires  $(I_{mes}^{(i)}, z_{mes}^{(i)})$  (cf. équation 1). Le point d'initialisation est la moyenne des points d'intersection de chaque pair de courbes. Après convergence, l'algorithme de gradient-conjugué fournit une estimation de la matrice Hessienne  $\mathcal{H}$  du critère  $\mathcal{C}$  (qui peut être explicitée à partir

de l'expression du gradient de  $\mathcal{C}$  fourni en annexe). Celle-ci est reliée à la matrice d'information de Fisher  $\mathcal{F}$  par la relation suivante [3]:  $\mathcal{F} = -\mathbb{E}[\mathcal{H}]$  où  $\mathbb{E}$  est l'espérance mathématique. Cette expression peut être explicitée à partir du gradient  $\mathcal{J}_{\mathbf{f}}$  de la fonctionnelle  $\mathbf{f}$  [3]:

$$\mathcal{F}(\mathbf{X}) = \mathcal{J}_{\mathbf{f}}(\mathbf{X})^T \Gamma^{-1} \mathcal{J}_{\mathbf{f}}(\mathbf{X}) \quad (13)$$

où  $\Gamma$  est la matrice de covariance du vecteur de bruit de mesure  $\mathbf{B}$ . Sous l'hypothèse de mesures toutes indépendantes deux à deux et d'après les notations précédentes, on a  $\Gamma = \text{diag}(\sigma_z^2, \sigma_I^2, \dots, \sigma_z^2, \sigma_I^2)$ .

Les performances (moyenne et écart-type) de l'optimisation du critère (12) sont illustrées en simulations via les figures 3 et 4. La configuration simulée considère une antenne de rayon  $a = 34$  cm et un tag enfoui avec un seuil d'activation fixé à  $H_s = 20$  mA/m. L'estimation est basée sur 6 points de mesure espacés de 10 cm entre 0 et 50 cm *i.e.*  $z_1 = 0$  cm,  $z_2 = 10$  cm, ...,  $z_6 = 50$  cm. La méthode est testée pour les profondeurs de tag espacées de 5 cm entre 0 cm et 1.5 m. Les écarts-type des bruits de mesures sont  $\sigma_I = 10$  mA et  $\sigma_z = 1$  cm. Pour chaque profondeur, la simulation des mesures est réalisée via l'équation (6) et l'estimation de  $z_{tag}$  et  $H_s$  est obtenue par minimisation de (12). Cette opération est répétée 1000 fois pour obtenir les performances (moyenne et écart-type) de l'algorithme ainsi que leur adéquation avec la borne de Cramer-Rao [3] associée au modèle (6) et obtenue par inversion de la matrice d'information de Fisher  $\mathcal{F}$ .

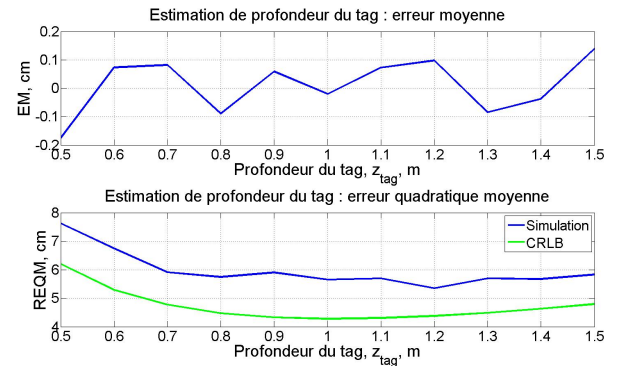


FIG. 3 – Résultats pour l'estimation de profondeur sur 1000 réalisations: moyenne de l'erreur de (haut), erreur quadratique moyenne (bas-bleu), borne de Cramer-Rao (bas-vert).

### 4 Expérimentations

La méthode proposée d'estimation de la profondeur d'un tag a été testée en configuration réelle. Dans ce contexte, la profondeur du tag est de 1.20 m. La photo 5 illustre la méthode de mesure avec une antenne carrée<sup>1</sup> et le type de sol. L'expérience

1. Les mesures suivantes ont bien été faite avec une antenne circulaire

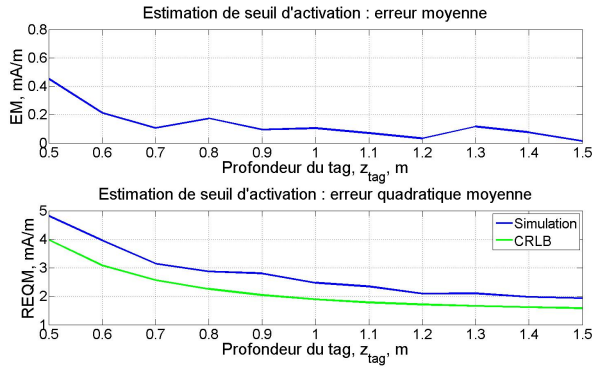


FIG. 4 – Résultats pour l'estimation du seuil d'activation sur 1000 réalisations : moyenne de l'erreur de (haut), erreur quadratique moyenne (bas-bleu), borne de Cramer-Rao (bas-vert).

est basée sur 5 tests, chacun consistant à mesurer l'intensité du courant en 5 points élevés. Dans le tableau 1 nous donnons comme exemple les intensités mesurées et la distance mesurée entre l'antenne et le sol pour le premier test. Le tableau 2 indique la profondeur estimée du tag et le seuil estimé d'activation du tag pour 5 tests. Ces résultats illustrent la robustesse de l'estimation avec sur des données réelles.

## 5 Conclusion

Ce papier a présenté une méthode d'estimation de la profondeur d'un tag RFID HF (13.56 MHz) enfoui à partir de la mesure du champ magnétique généré par l'antenne d'un lecteur et de sa hauteur au sol. L'algorithme d'estimation proposé se base sur un modèle de mesure air-air, qui ne prend en compte les propriétés diélectriques du sol. L'étude des performances de cet estimateur a été menée en simulation et confrontée à la borne de Cramer-Rao associée. La méthode a été appliquée sur des données réelles montrant sa fonctionnalité dans des cas pratiques.

Les expérimentations indiquent une précision de l'ordre de 10 cm. Ce résultat est satisfaisant pour les applications opérationnelles (localisation de canalisations enterrées par exemple). Toutefois, une étude est en cours pour prendre en compte la propriété diélectrique du sol. Pour ce modèle "air-sol" plus réaliste, l'équation (3) se complexifie [2] et l'étude portera en particulier sur les performances accessibles sur  $z_{tag}$  et leur comparaison celles obtenues dans le contexte "air-air" décrit dans ce papier.

TAB. 1 – Exemple des valeurs de mesures.

$I$ (A)	1.59	2.39	2.42	2.89	2.86
$z$ (cm)	2.64	19.31	19.97	33.31	30.64



FIG. 5 – Une photo de l'antenne utilisée et du sol.

TAB. 2 – Moyennes estimées de  $z_{tag}$  et  $H_s$ .

Numéro de série	1	2	3	4	5
$z_{tag}$ (cm)	125	108	130	122	120
$H_s$ (mA/m)	28	22	25	31	32

## 6 Annexe

On donne ici l'expression du gradient de  $\mathcal{C}$ :

$$\frac{\partial \mathcal{C}}{\partial H_s} = -\frac{1}{\sigma_I^2} \sum_{i=1}^N (I_{mes}^{(i)} - I(H_s, z_{th}^{(i)} + z_{tag})) \frac{\partial I(H_s, z_{th}^{(i)} + z_{tag})}{\partial H_s} \quad (14)$$

$$\frac{\partial \mathcal{C}}{\partial z_{tag}} = -\frac{1}{\sigma_I^2} \sum_{i=1}^N (I_{mes}^{(i)} - I(H_s, z_{th}^{(i)} + z_{tag})) \frac{\partial I(H_s, z_{th}^{(i)} + z_{tag})}{\partial z_{tag}} \quad (15)$$

$$\frac{\partial \mathcal{C}}{\partial z_{th}^{(j)}} = -\frac{1}{\sigma_I^2} \sum_{i=1}^N (I_{mes}^{(i)} - I(H_s, z_{th}^{(i)} + z_{tag})) \frac{\partial I(H_s, z_{th}^{(i)} + z_{tag})}{\partial z_{th}^{(j)}} \dots - \frac{1}{\sigma_z^2} (z_{mes}^{(j)} - z_{th}^{(j)}) \quad (16)$$

où  $j = 1, \dots, N$ .

## Références

- [1] B. Kumar, J. Sommerville, *A model for RFID-based 3D location of buried assets*, Automation in Construction, 2011.
- [2] K. Finkenzeller, R. Waddington, *RFID handbook: radio-frequency identification fundamentals and applications*, Wiley New York, 1999.
- [3] H.L. Van Trees, *Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part I*, Wiley-Interscience, 2001.
- [4] G.H. Golub, C.F. van Loan, *Matrix Computations*, The Johns Hopkins University Press 3rd edition, 1996.