

Comparaison de modèles de propagations afin d'estimer la profondeur de canalisations en polyéthylène enterrées

William Xerri¹³, Gineth Saracco¹, Alessandra Ribodetti², Laurent Zomero³, Philippe Picon³

¹ CNRS-UMR7330 CEREGE, AMU, CdF, IRD, Europole de l'Arbois, BP 80, 13545 Aix-en-Provence Cedex 4, France

² IRD-UR082 CNRS-UMR7329 GEOAZUR, Campus Azur Université et observatoire de la côte d'azur, 250 rue Albert Einstein CS 10269, 06905 Sophia Antipolis, France

³ MADE-SA, 167 Impasse de la Garrigue, 83210 La Farlède, France



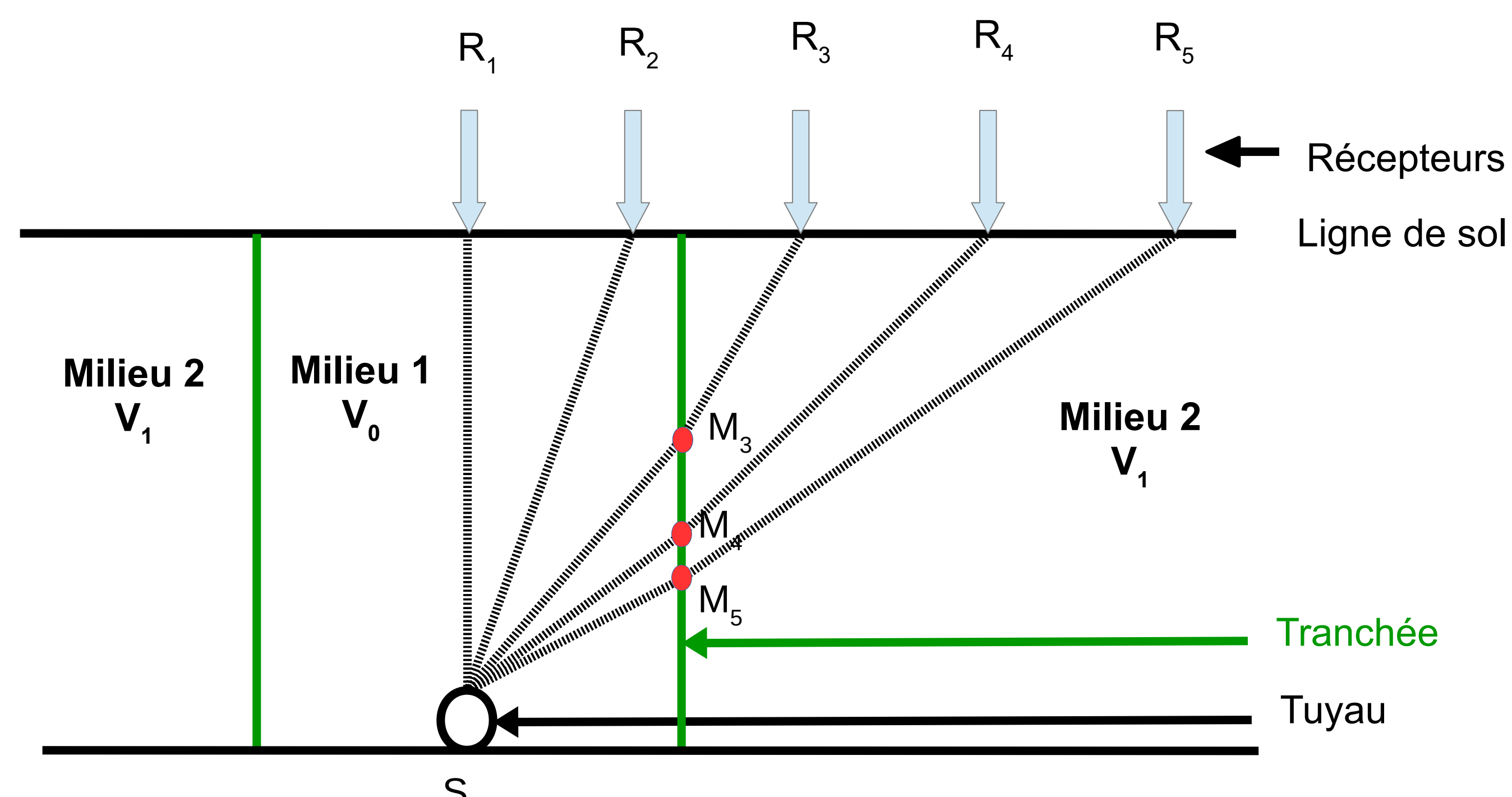
1. Introduction

Un des problèmes cruciaux en génie civil est la localisation de canalisations en polyéthylène enterrées. Pour ce type de matériaux les ondes électromagnétiques sont moins adaptées que les ondes acoustiques. Des méthodes déjà existantes permettent d'estimer le passage de l'aplomb du tuyau, en injectant une signature acoustique dans la conduite mais ne donnent aucune information sur la profondeur. Nos travaux ont pour but d'estimer la profondeur de ces canalisations par méthode acoustique et de manière non invasive et non destructive en envoyant un signal acoustique dans le conduit. Un des principaux problèmes est que nous n'avons, a priori, aucune connaissance du milieu de propagation. Il peut changer radicalement d'un lieu d'application à l'autre. L'enjeu est la modélisation de la propagation acoustique, à l'échelle du mètre, dans un sol hétérogène (incluant sable, tout-venant), à stratification verticale (tranchée). N'ayant aucune information sur le milieu de propagation, la première modélisation est de considérer un milieu faiblement hétérogène et donc d'y affecter une vitesse moyenne de propagation (voir Modèle 1).

A partir de méthodes de traitement d'antenne que nous avons adaptées à notre problème (algorithme MUSIC dit de "haute résolution"), nous obtenons une estimation des paramètres d'intérêts que sont la profondeur et la vitesse de propagation dans le milieu. Nous avons développé une chaîne d'émission et d'acquisition afin de pouvoir travailler sur des signaux réels. Des résultats satisfaisants sur la profondeur ont été obtenus sur des données réelles dont les signaux sont cohérents avec le modèle 1.

Le but est de faire évoluer la modélisation en prenant en compte la tranchée (stratification verticale) afin de couvrir un plus large nombre de situations. Nous présentons ici une modélisation des temps de propagation en considérant deux milieux de propagations et la loi de Snell-Descartes à l'interface (voir Modèle 2). Pour valider ce modèle à l'échelle de notre problématique nous comparons les résultats avec une modélisation de propagation du champ d'onde complet par différences finies. Nous comparons ensuite la cohérence de notre modèle par rapport à des données réelles.

2. Modèles



Modèle 1
1 seul milieu de propagation

Modèle 2 (NM2)
2 milieux de propagation

Paramètres d'intérêts

Position des récepteurs R_i

Position de la source S avec S_x l'aplomb du tuyau et S_z la profondeur du tuyau

Vitesse moyenne V_0

Paramètres supplémentaires du modèle 2

Vitesse moyenne V_1

Position des points d'interface M_i avec M_{ix} position de la tranchée en X et M_{iz} position du point d'interface en Z

Bleu : paramètres connus

Rouge : paramètres à estimer

3. Modélisation des temps de trajet à partir de NM2

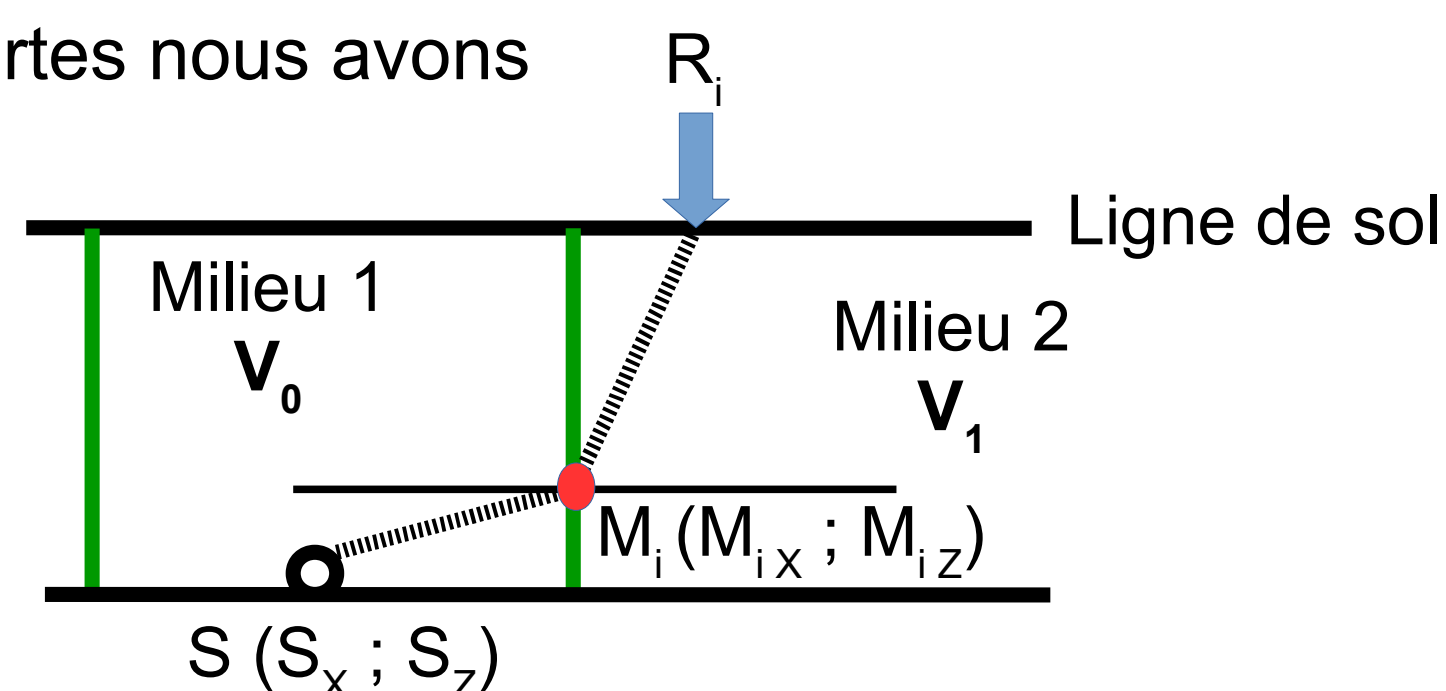
• Les temps de retards dépendent de M_{iz}

$$\tau_i = \frac{|SM_i|}{V_0} + \frac{|M_i R_i|}{V_1}$$

• Calcul analytique de M_{iz} en fonction des autres paramètres d'intérêts

D'après la loi de Snell-Descartes nous avons

$$\frac{S_z - M_{iz}}{|SM_i|} = \frac{M_{iz}}{|M_i R_i|} \frac{V_0}{V_1}$$



M_{iz} est fonction de (S, V_0 , V_1 , R_i , M_x) et est solution de l'équation d'ordre 4 suivante :

$$\begin{aligned} & M_{iz}^4 [V_1^2 - V_0^2] \\ & + M_{iz}^3 [-2R_{iz} V_1^2 - 2S_z V_1^2 + 2S_z V_0^2] \\ & + M_{iz}^2 [S_z^2 V_1^2 + R_{iz}^2 V_1^2 + V_1^2 (R_{ix} - M_x)^2 + 4R_{iz} S_z V_1^2 - S_z^2 V_0^2 - V_0^2 (M_x - S_x)^2] \\ & + M_{iz} [-2R_{iz} S_z^2 V_1^2 - 2S_z R_{iz}^2 V_1^2 - 2S_z V_1^2 (R_{ix} - M_x)^2] \\ & + [R_{iz}^2 S_z^2 V_1^2 + S_z^2 V_1^2 (R_{ix} - M_x)^2] = 0 \end{aligned}$$

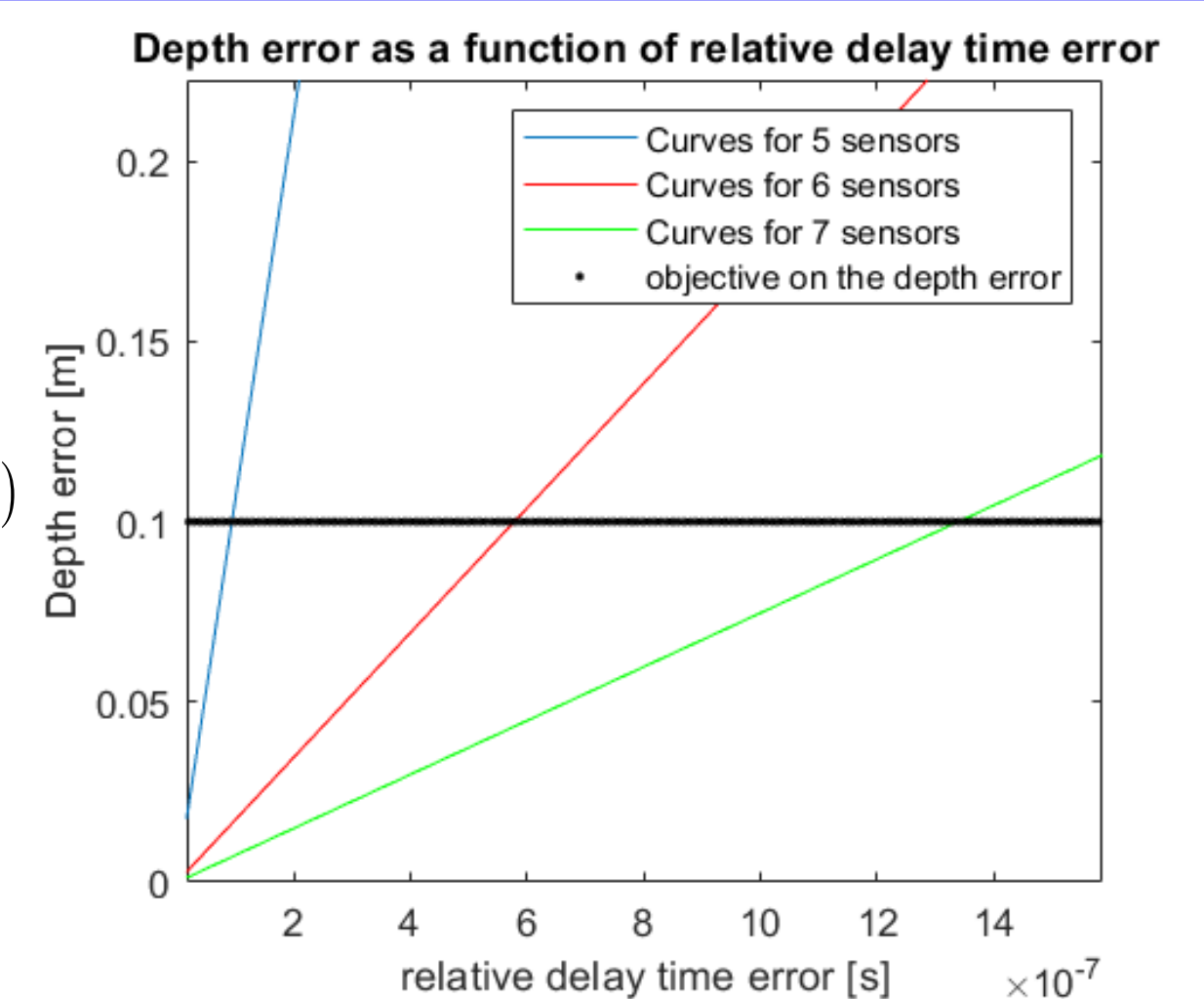
4. Calcul de la borne de Cramer-Rao (BCR) à partir de NM2

$$\text{Temps de retards relatifs } \tau_{ii} = \frac{|SM_i| - |SR_i|}{V_0} + \frac{|M_i R_i|}{V_1}$$

$$\text{Vecteur des paramètres à estimer } \theta = [S_x, S_z, V_0, V_1]^T$$

$$\text{Estimation de la matrice d'information de Fisher } F(\theta/\tau_{ii}) = \sum_{i=2}^N \frac{1}{\text{Var}(\tau_{ii})} \nabla_{\theta}(\tau_{ii}) \nabla_{\theta}^T(\tau_{ii})$$

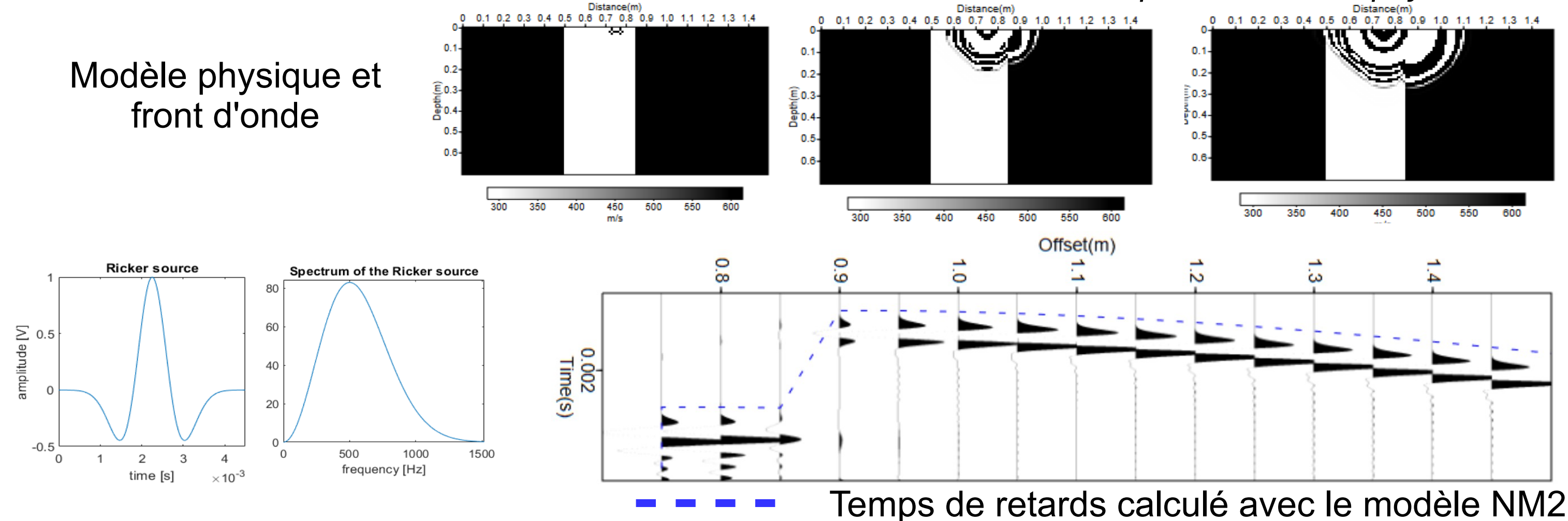
$$\text{BCR}(\theta) = F^{-1}(\theta/\tau_{ii})$$



5. Comparaison de NM2 avec la modélisation du champ d'ondes complet par différences finies

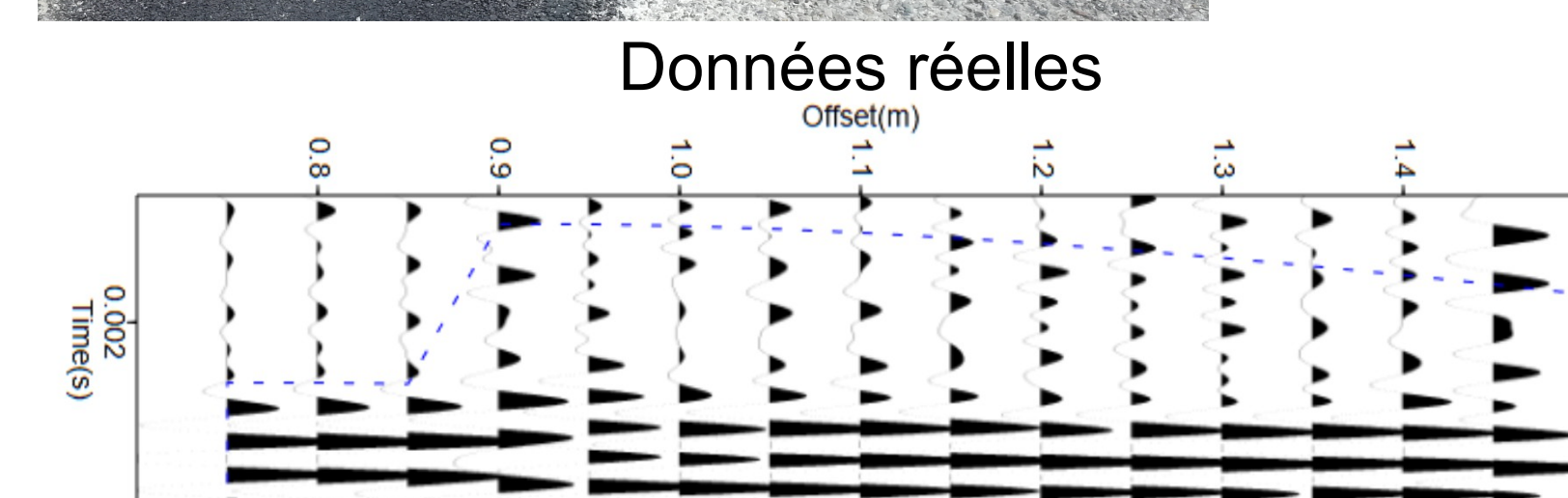
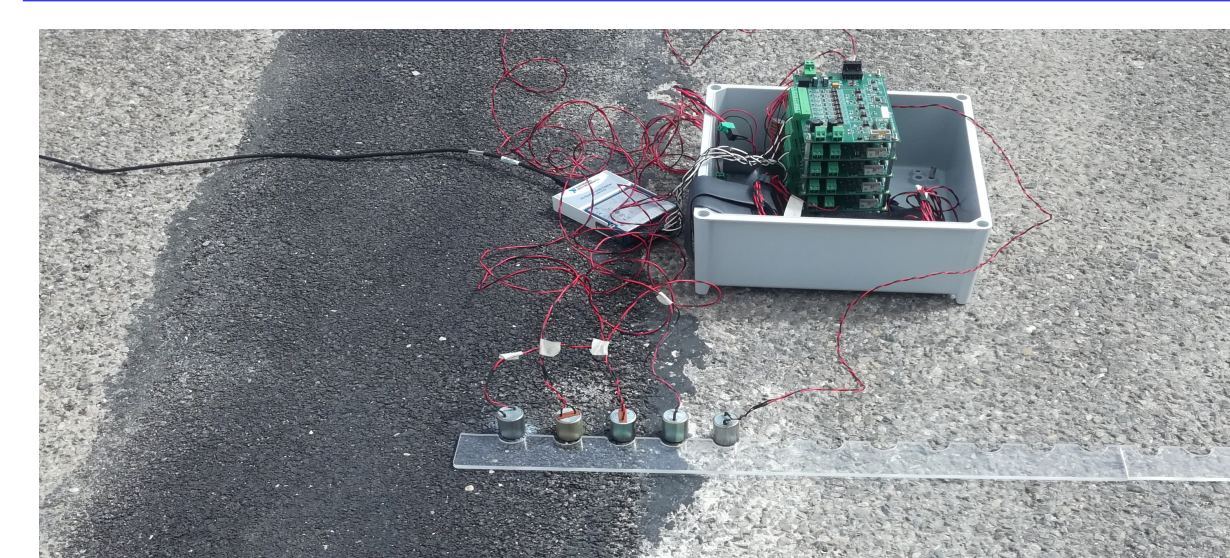
Paramètres de simulation : S (0,75 ; 0), $V_0 = 300$ m/s, $V_1 = 600$ m/s, tranchée ($x = 0,5$ m and $x = 0,85$ m), $R_i = (0,75 + (i-1) 0,05 ; 0,7)$

Ref : Operto & al., Geophysics, 2009



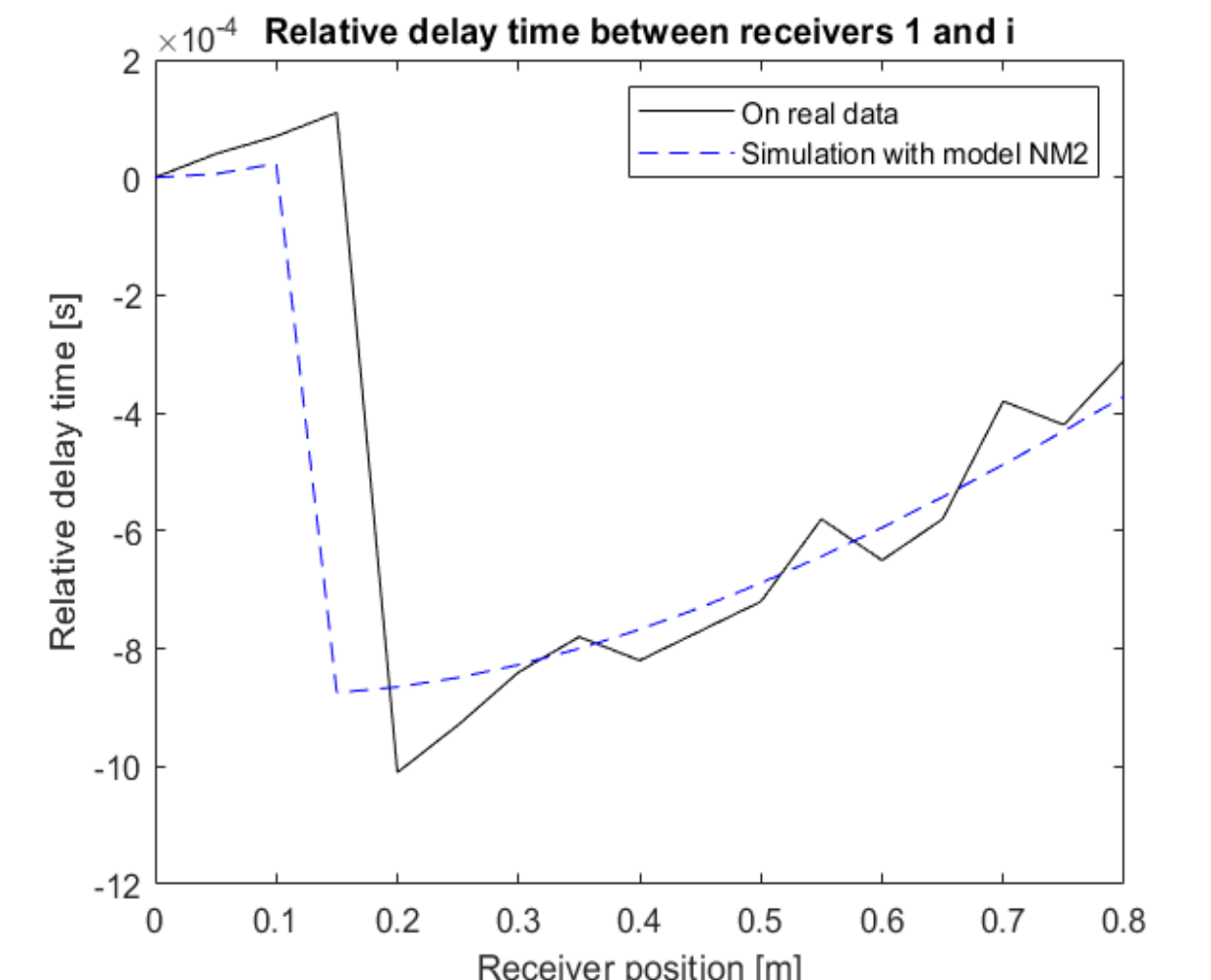
Les temps d'arrivée des signaux avec les deux modèles sont cohérents

6. Comparaison de NM2 par rapport à des données réelles



Impossible de tirer de conclusion juste en observant les données à l'oeil

Observation des intercorrélations entre les signaux reçus



Les temps de retards relatifs sur les signaux réels sont cohérents avec le modèle NM2

7. Conclusion et perspectives

Nous avons fait évoluer le modèle en considérant une stratification verticale (tranchée). Afin de valider notre modélisation des temps de propagation à l'échelle de notre problématique, nous avons d'abord comparé par simulation notre modélisation avec une modélisation du champ d'onde complet par différences finies. Les temps d'arrivée des signaux des deux modèles sont cohérents ce qui permet d'avoir une première validation du modèle. Dans un second temps, nous avons comparé notre modélisation avec les temps de retards relatifs issus de données réelles. Nous constatons que le modèle est cohérent avec la réalité de notre problématique.

Maintenant que nous avons validé notre modélisation des temps de propagation il faudra adapter l'algorithme MUSIC à notre nouveau modèle afin d'estimer la localisation de la canalisation. Puis, en fonction des retours des résultats du terrain nous pourrions continuer de faire évoluer le modèle en prenant en compte d'autres paramètres comme l'atténuation du milieu ou la couche de sable qui entoure le tuyau ou encore la couche de goudron qui recouvre le sol.

Remerciements

Ce projet est soutenu par un contrat CIFRE entre MADE-SA et CNRS-UMR7330, CEREGE, du programme français de l'ANRT (Agence National de la Recherche Technique). Il est également soutenu par le RICE (Research & Innovation Center of Energy), GRTgaz.

Références

Y. Liu, D. Habibi, D. Chai, X. Wang, H. Chen, Y. Gao, S. Li, "A Comprehensive Review of Acoustic Methods for Locating Underground Pipelines", *Applied sciences*, Vol.10, No. 3 (2020): art. No. 1031, DOI. 10.3390/app10031031

J.M. Muggleton, E. Rustighi, "Mapping the Uderworld : recent developments in vibro-acoustic techniques to locate buired infrastructure", *Geotechnique Letters*, Vol. 3, No. 3 (2013): pp. 137-141, DOI. 10.1680/geolett.13.00032

S. Operto, J. Virieux, A. Ribodetti & J. E. Anderson, "Finite-differ-ence frequency-domain modeling of viscoacoustic wave propagation in two-dimensional tilted transversely isotropic media", *Geophysics*, 74 (5) (2009), T75-T95, DOI: 10.1190/1.315724

W. Xerri, G. Saracco, G. Gassier, L. Zomero, P. Picon, "Preliminary Acoustic Study of 3D Localization of Buried Polyethylene Pipe", *Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 1 (2021) DOI.10.1115/QNDE2021-74945