



Projet National de recherche et développement

RAPPORT DE RECHERCHE / LIVRABLE

Méthodologie d'exploitation des mesures radar pour la caractérisation des interfaces de chaussées : approche expérimentale

Auteur(s) / Organisme(s) :

C. Le Bastard, C. Fauchard, D. Guilbert, B. Beaucamps et JN. Gaudin –
Cerema

Thème de rattachement :

Thème 2

DVDC/R/021

LC/18/DVDC/64

Octobre 2019

Site internet : www.dvdc.fr

Plateforme collaborative : www.omnispace.fr/dvdc

Président : Dominique JAUMARD

Directeurs : Christine LEROY et Simon POUGET

Gestion administrative et financière : IREX (www.irex.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr

Sommaire

Sommaire	2
1 Résumé	3
2 Introduction	4
2.1 Configuration monostatique	5
2.2 Configuration bistatique.....	5
2.3 Radar impulsionnel.....	5
2.4 Radar à sauts de fréquence	6
2.5 Le radar-chaussée.....	8
3 Méthodologie utilisée : algorithme de filtrage	9
3.1 Filtrage par soustraction de la moyenne (FSMO).....	11
3.2 Filtrage par soustraction de la médiane (FSME)	11
3.3 Filtrage par soustraction de la moyenne avec normalisation des amplitudes et des temps (FSMON)	12
3.4 Prédiction linéaire avant.....	13
3.5 Prédiction linéaire avant et arrière généralisée	14
3.6 Analyse des méthodes sur un milieu parfaitement connu	14
4 Résultats et discussions	19
4.1 Configuration de mesures	19
4.1 Signaux bruts	19
4.2 Analyse des données	22
5 Conclusion et perspectives	26
Références	27
Annexe 1	29
Annexe 2	Erreur ! Signet non défini.

1 Résumé

Résumé en français

Le but de ce travail est l'amélioration, l'utilisation et l'exploitation des mesures radar, notamment pour caractériser l'intégrité des interfaces de chaussées, et plus particulièrement analyser les potentiels désordres des interfaces de couche de chaussées.

Dans cette étude, on propose de réaliser une analyse fine du signal à partir de données issues du radar à sauts de fréquence très large bande. Différentes méthodologies sont testées sur des données provenant d'une expérimentation réalisée sur une route du département de l'Eure (administré par le conseil départemental de l'Eure, CD27).

Abstract

The goal of this work is to characterize the pavement interfaces, and more specifically to analyze the potential disorders of the interfaces pavement layers.

In this study, we propose to carry out a fine analysis coming from stepped frequency radar data. Different methodologies are tested on data coming from an experiment carried out on a roadway in the Eure department (administered by the departmental council of Eure, France).

2 Introduction

Le réseau routier français se compose principalement de routes nationales dont la plupart ont été achevées il y a plus de 30 ans. Les défauts de surface de la route sont causés principalement par des défauts du sous-sol (décollements, fissures) qui peuvent survenir bien avant qu'une dégradation visible se produise à la surface du revêtement. Par la suite, l'évaluation et le suivi des dommages de structure des chaussées deviennent des enjeux majeurs pour la gestion durable du réseau routier.

Le radar géophysique impulsionnel, appelé aussi GPR pour « Ground Penetrating Radar », est utilisé depuis une vingtaine d'années en génie civil pour réaliser des opérations d'auscultation dans le flux du trafic. Il utilise les propriétés des ondes électromagnétiques pour déterminer la géométrie et les propriétés diélectriques d'un milieu stratifié. Le GPR présente l'avantage d'être une technique grand rendement et sans contact. Il fournit une mesure en continu de l'épaisseur des couches de chaussée, mais permet aussi l'analyse des interfaces de chaussées, décollements, fissures significatifs entre couches de manière indirecte.

Néanmoins, l'utilisation du GPR est tributaire des compétences des utilisateurs pour interpréter les mesures d'une part, et d'autre part, d'une résolution temporelle limitée par la largeur de la bande de fréquence de l'impulsion. La résolution temporelle est définie comme la capacité à séparer deux échos distants d'un retard différentiel Δt dans une bande de fréquences B . La résolution peut ainsi être caractérisée par le produit $B\Delta t$. Elle correspond à un produit $B\Delta t=1$ avec des méthodes de traitement du signal conventionnelles. Ainsi, la résolution temporelle est améliorée lorsque la bande de fréquences augmente.

L'objectif de ces travaux est de détecter des potentiels désordres au niveau de l'interface entre les deux premières couches (couche de roulement et couche de base) de la structure de chaussée par l'utilisation conjointe d'un radar ultra large bande et d'une analyse fine du signal radar. Cette analyse fine sera réalisée par l'intermédiaire de méthodes de traitement du signal à base de filtrage permettant de supprimer le signal dit de « référence ». L'utilisation combinée des deux techniques précédentes permettraient d'améliorer la capacité du radar à analyser des désordres de plus petite taille.

Les différentes méthodologies utilisées seront succinctement présentées et mises en œuvre sur deux bases de données créées avec l'aide d'un radar à sauts de fréquence. Ces deux bases de données ont été acquises en dynamique lors d'une expérimentation qui a eu lieu sur une portion de route de 7 kilomètres du conseil départemental de l'Eure.

Le radar exploite les lois de propagation des ondes électromagnétiques pour déterminer la géométrie et les propriétés diélectriques d'un milieu stratifié. Les ondes électromagnétiques se réfléchissent partiellement à la rencontre d'un contraste diélectrique (interface, défaut ou toute autre inhomogénéité). Elles s'atténuent suivant les propriétés des milieux.

L'auscultation radar est généralement réalisée à l'aide de l'un des deux types de radar suivants :

- ▶ le radar impulsionnel, qui délivre un signal temporel, aisément interprétable, et qui est utilisé de manière opérationnelle sur les chantiers ;
- ▶ le radar à sauts de fréquence (où à impulsions synthétiques), qui délivre un signal fréquentiel ; il est utilisé surtout dans un contexte de recherche (en « laboratoire ») ; du fait des évolutions technologiques, l'utilisation de ce radar est en plein essor.

A ces deux techniques radar, on associe deux configurations de mesures possibles : le mode monostatique [1] et le mode bistatique (ou multistatique) [2].

2.1 Configuration monostatique

Dans une configuration de mesures monostatique, l'antenne d'émission sert également d'antenne de réception. Dans des applications « chaussées », les mesures sont généralement effectuées à incidence normale : le signal rétrodiffusé par le milieu est mesuré. L'inconvénient majeur de cette configuration est lié à l'existence d'un signal transitoire, qui apparaît en début d'enregistrement. Ce dernier représente le signal propagé sur toute la hauteur d'antenne. Son influence dépend fortement du type d'antenne utilisé. Pour s'affranchir de son influence, des procédures de calibrage sont proposées dans la littérature [3, 4].

2.2 Configuration bistatique

Pour cette configuration, les antennes d'émission et de réception sont déportées l'une de l'autre d'une certaine distance. Les mesures sont réalisées à incidence oblique. Selon la distance, le couplage entre les antennes d'émission et de réception peut induire des modifications du diagramme de rayonnement. Dans cette configuration, on observe en début d'enregistrement le signal de l'antenne émettrice ; on parle d'onde directe dans l'air. L'onde directe peut être aisément éliminée par fenêtrage temporel dès lors que les antennes sont suffisamment surélevées au-dessus de la surface à ausculter.

On parle également de configuration quasi-monostatique lorsque le radar dispose d'antennes d'émission et de réception distinctes, et très proche l'une de l'autre (par exemple, le système GSSI [5]). En surélevant le système antennaire d'une hauteur suffisante, l'onde directe se détache du premier écho réfléchi et peut être aisément filtrée. La configuration de mesures devient similaire à la configuration monostatique précédente; on parle par la suite de conditions quasi-monostatiques. Par comparaison avec le mode monostatique, le calibrage du système devient simplifié.

2.3 Radar impulsionnel

Le radar impulsionnel est composé d'un générateur d'impulsions, d'une (ou plusieurs) antenne(s) émettrice(s) et d'une (ou plusieurs) antenne(s) réceptrice(s). Ce radar permet d'envoyer des impulsions à intervalles réguliers, à une fréquence de répétition appelée "PRF" (Pulse Repetition Frequency). Après passage dans l'antenne, cette impulsion génère une onde électromagnétique qui se réfléchit au sein du milieu (Fig. 1). On peut noter que ce type de radar est déjà utilisé au Cerema pour faire des expertises routières. Sa vitesse d'acquisition est suffisante pour faire de la mesure sur route à des vitesses de l'ordre de 70 km/h avec un scan tous les 20 cm environ.

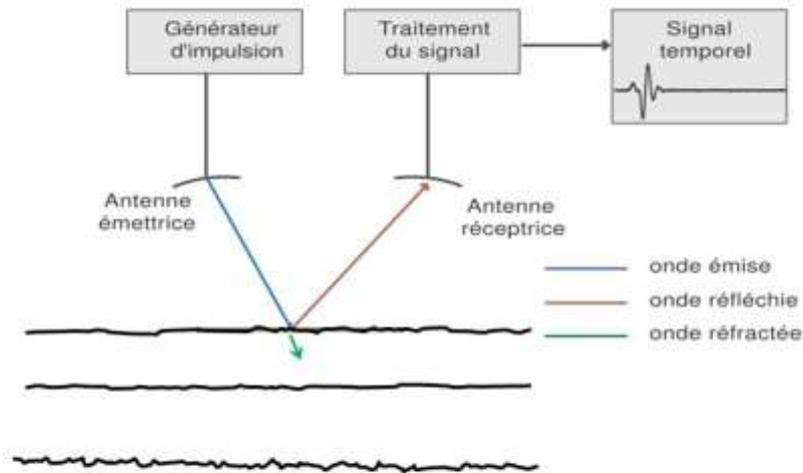


Figure 1 : Schéma synoptique d'un radar impulsionnel.

2.4 Radar à sauts de fréquence

Le radar à sauts de fréquence est constitué d'un analyseur de réseaux vectoriels (VNA), d'une (ou plusieurs) antenne(s) émettrice(s) large(s) bande(s) et d'une (ou plusieurs) antenne(s) réceptrice(s) large(s) bande(s). L'analyseur de réseaux vectoriels émet séquentiellement des ondes monofréquences de même amplitude sur une certaine largeur de bande de fréquences (Fig. 2). Le système obtenu permet de reconstruire une impulsion temporelle synthétique par transformée de Fourier inverse. La bande de fréquences utilisée pour ce type de radar est davantage limitée par les antennes utilisées. Généralement, on utilise pour ce radar des antennes larges bandes pouvant être comprises entre 0.1 GHz et 10 GHz. L'avantage de ce type de radar réside dans sa souplesse d'utilisation (choix de la bande de fréquences, du pas d'échantillonnage fréquentiel). Le paramétrage du VNA permet d'obtenir un très bon rapport signal sur bruit. Dans le domaine de la chaussée, l'hétérogénéité du matériau (ensemble de granulats mélangés par un liant hydraulique ou bitumineux) peut venir limiter la montée en fréquence et l'élargissement de la bande.

Les inconvénients principaux de ce type de radar restent son prix élevé (qui a tendance à diminuer avec le développement des technologies) et sa capacité à faire de la mesure en continu sur une route. En effet, l'analyseur de réseaux vectoriels émet séquentiellement des ondes monofréquences sur toute la bande de fréquences souhaitée. Cette procédure a un certain coût temporel lors de la mesure. En effet, plus le nombre d'ondes monofréquences émises augmentent, plus le temps de mesure (pour une bande de fréquences donnée) est important. A ce jour, les mesures réalisées avec un radar à sauts de fréquence peuvent être conduites à une vitesse très faible. Par exemple, le radar à sauts de fréquence du Cerema (cf. figures 3 et 4) peut être utilisé avec une vitesse du véhicule qui doit être inférieure à 7 km/h. Il est à noter que la zone de mesure peut varier de quelques décimètres pour une même bande de fréquences. A ce jour, des efforts scientifiques et technologiques sont mises en œuvre au Cerema et dans d'autres organismes pour lever ces verrous.

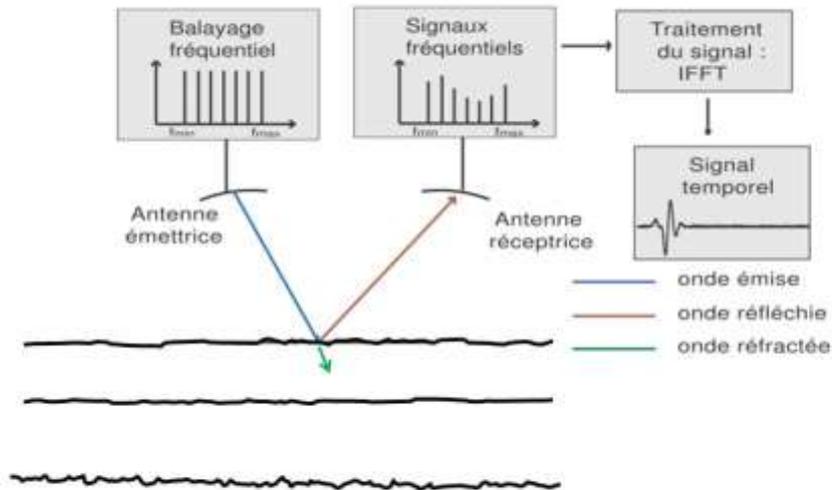


Figure 2 : Schéma synoptique d'un radar à sauts de fréquence.

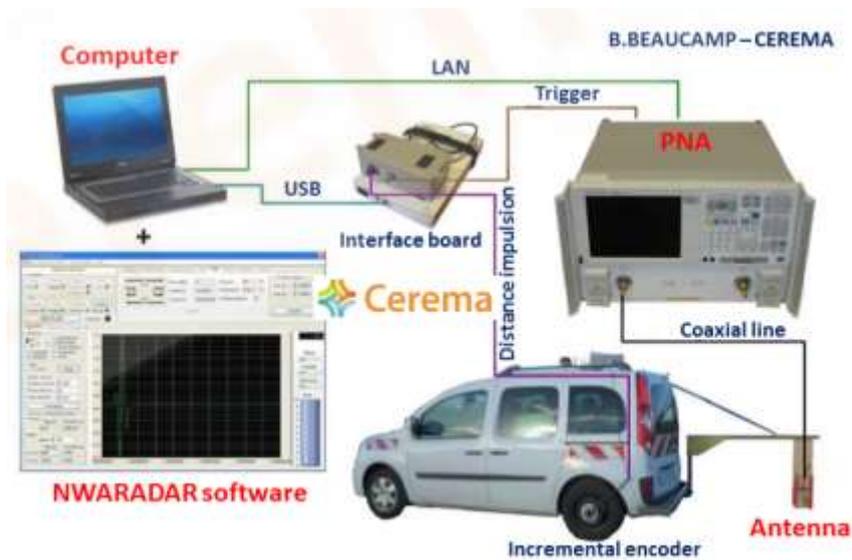


Figure 3. Radar à sauts de fréquence du Cerema (équipe ENDSUM, conception B. Beaucamp [17]).



Figure 4. Radar à sauts de fréquence avec une antenne large bande (Cerema/ENDSUM) [17]

2.5 Le radar-chaussée

Pour les applications chaussées, le radar généralement utilisé est le radar à impulsion. De plus, les mesures sont réalisées avec une antenne déportée du sol en quasi-monostatique.

Dans cette étude, le radar à sauts de fréquence avec une configuration monostatique (1 seule antenne) est utilisé. Aussi, les mesures seront réalisées avec une large bande de fréquences.

Lors du déplacement de l'antenne au-dessus de la surface à ausculter, des profils radar, ou profils verticaux (A-scan) comme le montre la figure 5-b sont enregistrés successivement. Chaque profil représente le signal réfléchi par le milieu, et comporte les différents échos liés aux contrastes diélectriques dans le milieu. L'ensemble de ces profils représente une coupe-temps ou radargramme (ou encore B-scan) comme le montre la figure 5-a. La matrice de signaux est souvent présentée comme une image en niveau de gris, dont l'interprétation visuelle donne des informations géométriques sur la structure auscultée.

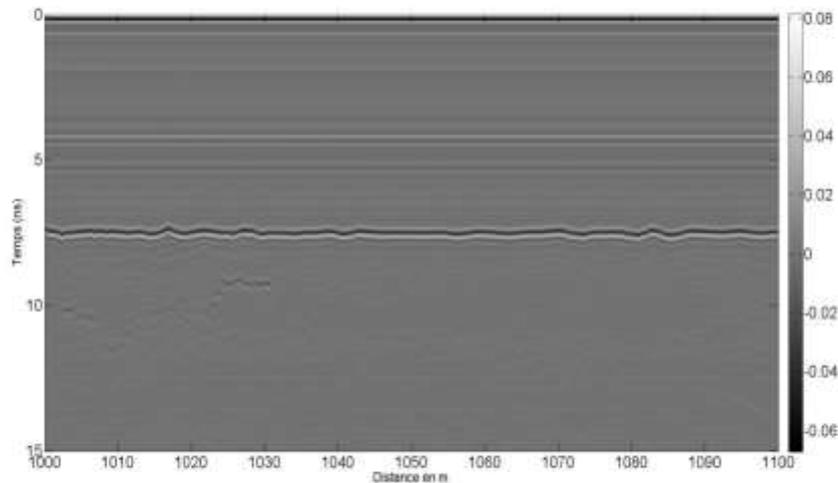


Figure 5-a. Radargramme obtenu avec un radar à sauts de fréquence ayant une antenne large bande ; expérimentation réalisée sur une route départementale de l'Eure.

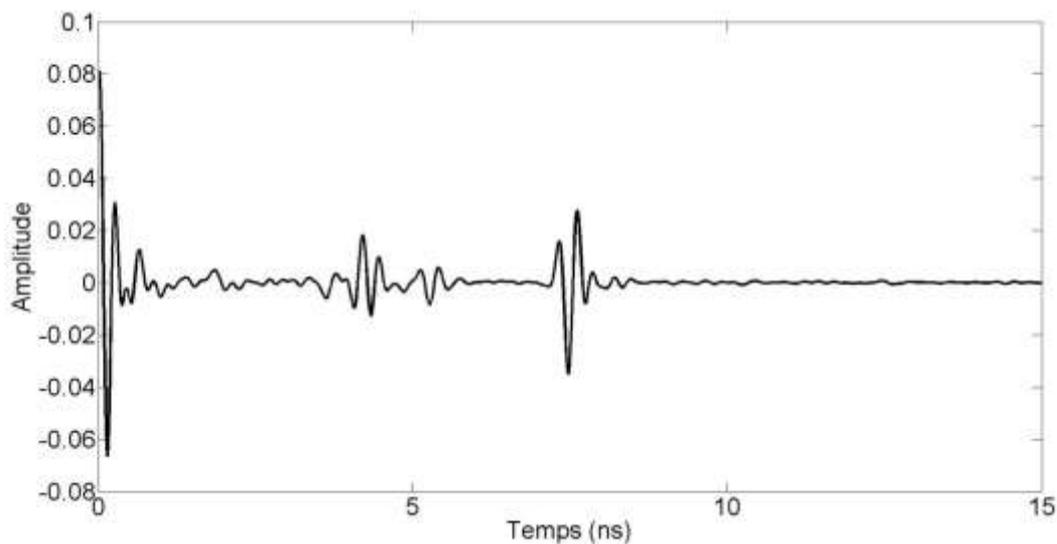


Figure 5-b. Exemple d'un profil temporel (1020^{ième} profil) issue du radargramme de la figure 5-a.

3 Méthodologie utilisée : algorithme de filtrage

Les radars utilisés généralement dans le cadre de prestation, c'est-à-dire les radars impulsionsnels, peuvent mesurer seulement des épaisseurs minimales de l'ordre de 4 à 5 cm. Ainsi, la mesure des épaisseurs fines, de type BBUM ou BBTM (qui ont des épaisseurs de l'ordre de 1 à 3 cm) ou la détection des décollements fins par exemple, ne sont pas réalisables directement avec ce type de radars. En effet, la capacité résolutive des radars n'est pas encore assez importante : la résolution des radars étant inversement proportionnelle à la bande de fréquences, donnée intrinsèque de l'outil.

Néanmoins, une procédure décrite dans le guide « Pathologies, diagnostic et réparation des chapes d'étanchéité d'ouvrages d'art » [7] a été testée dans [8] pour détecter des décollements par l'analyse d'une éventuelle variation forte de l'amplitude des échos avec un

radar impulsif. La variation d'amplitude peut indiquer la présence potentielle d'eau dans ces décollements. Cette procédure a été testée sur une chaussée dans la référence [8] avec l'aide d'un radar impulsif et montre des résultats intéressants. Une procédure semblable est également décrite dans [9]. Ce type de procédure reste quand même très délicat dans la situation où cette variation d'amplitude ne peut être constatée (aucune présence d'eau dans le décollement par exemple).

A ce jour, les radars « à ultra large bande » permettent déjà de détecter et de mesurer des épaisseurs de chaussée de l'ordre de 2 à 3 cm [6], sans traitement avancé. Une procédure proche de celle décrite dans la référence [8] sera testée dans le cadre de cette étude avec un radar à sauts de fréquence ultra large bande. L'étape de normalisation utilisée dans la référence [8] ne sera pas utilisée avec le radar à saut de fréquence.

La procédure décrite dans la référence [8], basée sur l'analyse des amplitudes des échos provenant des interfaces, est une méthode de détection de zones défectueuses et plus spécifiquement de détection de décollement [5]. Le décollement engendre des échos supplémentaires qui se chevauchent dans le domaine temporel et qui peut interférer de manière constructive. De plus, si ce décollement est composé d'air ou d'eau, le contraste diélectrique devient plus important. Ainsi, dans ce cas des échos ayant de plus fortes amplitudes peuvent être mesurés.

Pour améliorer l'analyse des amplitudes des échos reçus, plusieurs méthodes de filtrage seront utilisées dans cette étude sur les données obtenues avec le radar à sauts de fréquences. Le but de ces méthodes de filtrage est d'essayer de faire « mieux ressortir l'information » des décollements d'interface par rapport à une analyse du signal brut.

Ces méthodes de filtrage sont utilisées pour modéliser un radargramme (ou profil radar) de référence qui possède peu de variation spatiale (sans défaut). Dans un second temps, ce radargramme (ou profil radar) de référence est soustrait au radargramme mesuré (et analysé). Ainsi, le nouveau radargramme obtenu, radargramme filtré, permet de mettre en lumière les phénomènes ayant une variation spatiale (très) locale (épaisseur et amplitude). En effet, la localisation des défauts (ou des changements locaux) sur le nouveau radargramme sera marquée par une plus grande énergie (plus grande amplitude de signaux). Enfin, les méthodologies basées sur l'analyse des amplitudes sont ensuite réalisées pour localiser les défauts [7-9].

Plusieurs méthodes de filtrage seront testées avec deux bandes de fréquences (5,6 GHz et 13,6 GHz). Les méthodes de filtrage utilisées pour cette application seront le filtrage par soustraction de la moyenne, le filtrage par soustraction de la médiane [11, 14], le filtrage par soustraction normalisée en temps et amplitude [10], le filtrage par l'utilisation d'une méthode de prédiction linéaire avant [12,13] et le filtrage par l'utilisation d'une méthode de prédiction avant-arrière [15].

Des méthodologies comme le filtrage à base de décomposition en valeurs singulières, d'analyse en composante principale, d'analyse en composante indépendante et du filtre de Kalman [14] ne seront pas testées en raison de leur potentiel grande charge de calcul en fonction des radargrammes à analyser. Dans ce rapport, nous nous sommes focalisés sur des méthodes ayant un coût calculatoire « modeste ».

Dans le paragraphe suivant, le signal $r(t)$ représente l'échantillon temporel dans un profil radar. Le profil temporel (Ascan) est définie par un vecteur \mathbf{r} tel que $\mathbf{r} = [r(t_1), r(t_2), r(t_3), \dots, r(t_N)]^T$; l'exposant T représente l'opération de transposition. Le radargramme (Bscan) composé de L profils temporels peut être défini par une matrice \mathbf{R} telle que $\mathbf{R} = [r_1, r_2, r_3, \dots, r_L]$ avec r_i le $i^{\text{ème}}$ profil temporel et $i=1,2,\dots,L$.

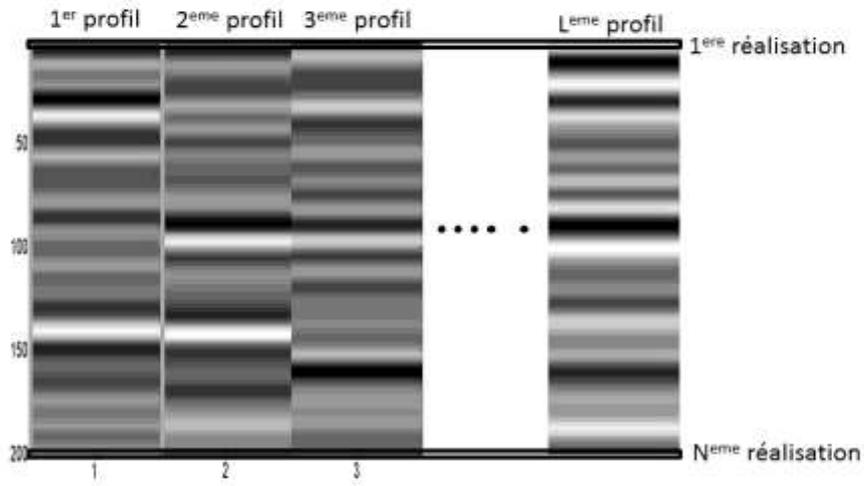


Figure 6. Représentation d'un radargramme (point de vue matricielle)

3.1 Filtrage par soustraction de la moyenne (FSMO)

Cette méthode est communément appelée « Background Removal » ou « Background substraction » dans la communauté radar [14]. L'objet de cette méthode est de soustraire la moyenne des profils radars mesurés. Plusieurs approches sont possibles :

- la moyenne sur tous les profils radar peut être utilisée,
- la moyenne sur les profils radar ayant été filtrée par fenêtre glissante.

Dans tous les cas, le nouveau profil radar temporel s'écrit sous la forme :

$$\mathbf{r}_i^{BC} = \mathbf{r}_i - \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \mathbf{r}_i \quad (\text{eq.1})$$

avec L le nombre de profil utilisé.

Ainsi, le nouveau radargramme \mathbf{R}^{BC} s'écrit comme suit :

$$\mathbf{R}^{BC} = [\mathbf{r}_1^{BC}, \mathbf{r}_2^{BC}, \mathbf{r}_3^{BC}, \dots, \mathbf{r}_L^{BC}] \quad (\text{eq.2})$$

avec \mathbf{r}_i^{BC} le $i^{\text{ème}}$ profil temporel et $i=1,2,\dots,L$.

3.2 Filtrage par soustraction de la médiane (FSME)

Cette méthode est une variante de la précédente. L'objet de cette méthode est de soustraire la médiane (et non plus la moyenne) des profils radars mesurés. Comme pour la version précédente, les deux approches (avec ou sans fenêtrage glissant) sont possibles.

3.3 Filtrage par soustraction de la moyenne avec normalisation des amplitudes et des temps (FSMON)

Cette méthode est très proche de celle de FSMO. Par rapport à FSMO, deux étapes sont ajoutées dans le traitement [10]. Ces deux étapes de traitements consistent à normaliser le pic ayant la plus grande amplitude et que ce même pic est le même temps de retard pour tous les profils radar. Ensuite, nous pouvons appliquer la procédure décrite dans FSMO.

Ainsi, nous obtenons un nouveau radargramme \mathbf{R}^{FSMON} tel que :

$$\mathbf{R}^{FSMON} = [\mathbf{r}_1^{FSMON}, \mathbf{r}_2^{FSMON}, \mathbf{r}_3^{FSMON}, \dots, \mathbf{r}_L^{FSMON}] \quad (\text{eq.3})$$

avec \mathbf{r}_i^{FSMON} le $i^{\text{ème}}$ profil temporel obtenu avec la procédure FSMO et $i=1,2,\dots,L$.

Dans cette situation, le nouveau profil radar temporel s'écrit sous la forme :

$$\mathbf{r}_i^{FSMON} = \mathbf{r}_i - \hat{\mathbf{b}}_i \quad (\text{eq.4})$$

Où $\hat{\mathbf{b}}_i$ peut s'écrire sous la forme :

$$\hat{\mathbf{b}}_i = a_n \mathbf{b}_{ref}(t - t_n) \quad (\text{eq.5})$$

avec $t_n = t_i - t'_i$ et $a_n = \frac{|\mathbf{r}_i(t_i)|}{|\mathbf{b}_{ref}(t'_i)|}$ où t_i est le temps de retard du premier pic (correspondant à la surface de la chaussée) pour le $i^{\text{ème}}$ profil et t'_i le temps de retard du premier pic (correspondant à la surface de la chaussée) pour le profil radar de référence.

Enfin, \mathbf{b}_{ref} peut être calculé comme la moyenne des L premiers profils radar tel que :

$$\mathbf{b}_{ref} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \mathbf{r}_i \quad (\text{eq. 6})$$

De plus, deux approches sont possibles pour le calculer de \mathbf{b}_{ref} : soit en utilisant tous les profils radar, soit en utilisant la procédure de fenêtrage glissant.

A noter qu'une version utilisant la médiane (au lieu de l'équation 6) peut également être proposée. Suite aux mesures réalisées, la figure 7 montre que la distribution des données à une profondeur donnée (le 100^{ème} profil horizontal) suit une loi normale. Ainsi, la moyenne et la médiane sont confondues pour ce 100^{ème} profil horizontal. Ce résultat peut également être généralisé avec les autres profils horizontaux (figure 8). Ainsi, dans la suite, seul le filtrage FSMON par l'utilisation de l'équation 6 sera utilisé (les résultats étant les mêmes).

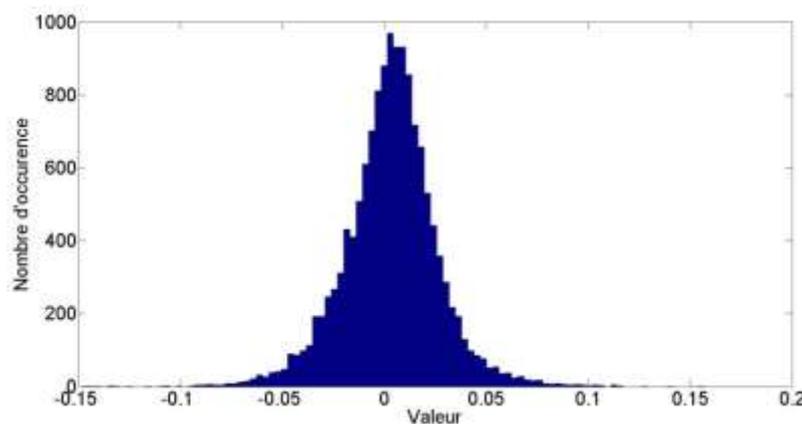


Figure 7. Distribution obtenue pour le 100^{ème} profil horizontal dans la zone d'analyse obtenue à partir des mesures réalisées avec l'antenne A3.

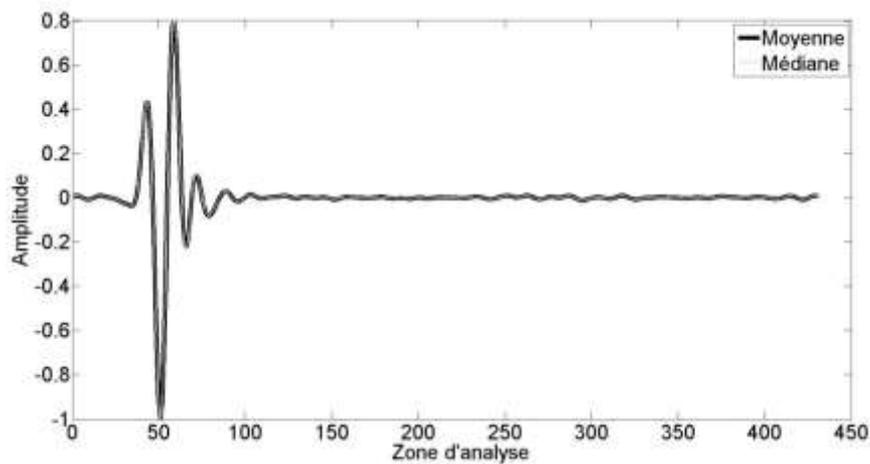


Figure 8. Résultats obtenus avec la moyenne et la médiane à partir des mesures réalisées avec l'antenne A3.

3.4 Prédiction linéaire avant

L'hypothèse réalisée dans cette section est que le signal de référence, c'est-à-dire le signal sans décollement d'interface peut être modélisé en utilisant la prédiction linéaire. Les méthodes de prédiction linéaire ont été proposées dans [12,13] pour détecter des mines antipersonnel. Il est proposé dans ce paragraphe de les utiliser avec un radar à sauts de fréquences pour détecter les décollements d'interface.

L'objectif de la méthode de la prédiction linéaire est de prédire le futur profil temporel $\mathbf{y} = [y(t_1), y(t_2), y(t_3), \dots, y(t_N)]^T$ à partir des précédentes observations (profil temporel) \mathbf{R} .

Le principe de la méthode de prédiction linéaire est d'estimer les échantillons inconnus avec une combinaison linéaire d'observation connue en minimisant l'erreur de prédiction quadratique moyenne tel que :

$$\mathbf{e} = \mathbf{z} - \mathbf{y} \quad (\text{eq.7})$$

$$\mathbf{R}\mathbf{w} = \mathbf{y} \quad (\text{eq.8})$$

avec $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^{N \times 1}$, $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{N \times L}$ et $\mathbf{w} \in \mathbb{R}^{L \times 1}$

Le point clé de cette méthode de prédiction linéaire est alors d'estimer le vecteur de pondération \mathbf{w} . Ceci est effectué par la méthode des moindres carrés comme suit :

$$\hat{\mathbf{w}} = (\mathbf{R}^T \mathbf{R})^{-1} \mathbf{R}^T \mathbf{z} \quad (\text{eq.10})$$

Les coefficients du filtre optimum permettent ensuite à partir de l'équation (8) d'estimer le profil radar suivant. Ensuite, l'erreur peut être déterminée à partir de l'équation 7. Le radargramme utilisé dans cette étude est le radargramme mesuré auquel est soustrait le radargramme de référence. Dans cette section, deux étapes de prétraitement sont utilisées en amont de la prédiction linéaire. Tout d'abord, une normalisation en amplitude et en temps de la plus grande impulsion est réalisée pour l'ensemble des profils radar.

Une extension de cette méthode avec une fenêtre glissante pour la matrice \mathbf{R} peut également être proposée.

3.5 Prédiction linéaire avant et arrière généralisée

Dans la procédure précédente, seuls les échantillons passés sont utilisés pour prédire l'échantillon futur. Dans ce paragraphe, nous utilisons également les échantillons futurs pour la prédiction [15]. Parmi les méthodes de prédiction linéaire avant-arrière, nous proposons d'étendre la méthode développée dans [16] pour la détection des décollements d'interface car cette dernière permet d'utiliser des coefficients (vecteur de pondération \mathbf{w}) non-symétriques. Ainsi, elle posséderait une meilleure précision et aurait la capacité de réaliser une meilleure modélisation du profil radar de référence que la méthode de prédiction linéaire avant et arrière qui utiliserait des coefficients symétriques. Par conséquent, l'objectif de la méthode de la prédiction est de prédire le profil temporel \mathbf{y}_i à partir des \mathbf{y}_{i-p} et \mathbf{y}_{i+p} tel que :

$$\mathbf{y}_i = a_{p-}\mathbf{y}_{i-p} + a_{p+}\mathbf{y}_{i+p} \quad (\text{eq.11})$$

avec $p \geq 1$, l'ordre du filtre prédicteur.

Le point clé de cette méthode, comme celle du paragraphe 4.4, est alors d'estimer le vecteur de pondération $\mathbf{w} = [a_{p-} \ a_{p+}]^T$.

Posons $\mathbf{Y}_p = [\mathbf{y}_{i-p} \ \mathbf{y}_{i+p}]^T$. Alors, nous pouvons écrire que :

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{Y}_p^T \mathbf{w} \quad (\text{eq.12})$$

L'équation 12 peut alors être résolue par la méthode des moindres carrés comme suit :

$$\hat{\mathbf{w}} = (\mathbf{Y}_p \mathbf{Y}_p^T)^{-1} \mathbf{Y}_p \mathbf{z} \quad (\text{eq.13})$$

Les coefficients du filtre optimum permettent ensuite d'estimer le profil radar de référence. Le nouveau profil radar analysé est alors construit comme étant la différence entre le profil radar de référence et celui mesuré.

3.6 Analyse des méthodes sur un milieu parfaitement connu

Avant d'utiliser les méthodes présentées sur des données provenant de la route départementale 133 du département de l'Eure, les méthodes sont évaluées dans ce paragraphe sur une chaussée parfaitement connue. Pour se faire, nous utilisons des données provenant de mesures réalisées avec le radar à saut de fréquence de l'IFSTTAR (figure 9-b) sur une structure de chaussée parfaitement connues (figure 10) du manège de fatigue (figure 9-a). Le radar à sauts de fréquence de l'IFSTTAR est composé d'un analyseur de réseaux vectoriels et de deux antennes ETSA A5. La bande de fréquences est de [0,8-10,8] GHz, soit une bande de fréquences de 10 GHz. La chaussée mesurée est constituée d'une zone composée de deux couches, d'une zone composée de trois couches dont un décollement d'interface ayant une épaisseur de l'ordre de 0,5 à 1 cm et d'une zone de transition. L'épaisseur de la couche de roulement est de l'ordre de 5 à 6 cm. Les données utilisées dans cette section ont été obtenues par Jean-Michel Simonin (IFSTTAR/LAMES), Xavier Dérobert (IFSTTAR/GEOEND) et Vincent Baltazart (IFSTTAR/ SII).



(a)



(b)

Figure 9. (a) Manège de fatigue de l'IFSTTAR ; (b) radar à sauts de fréquence de l'IFSTTAR.

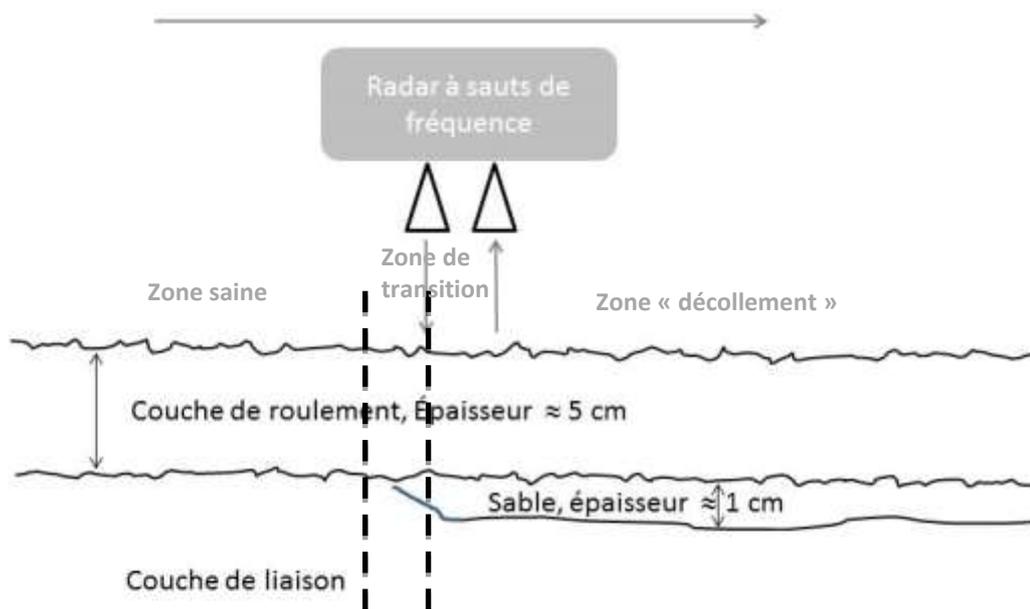


Figure 10. Structure de la chaussée étudiée du manège de fatigue.

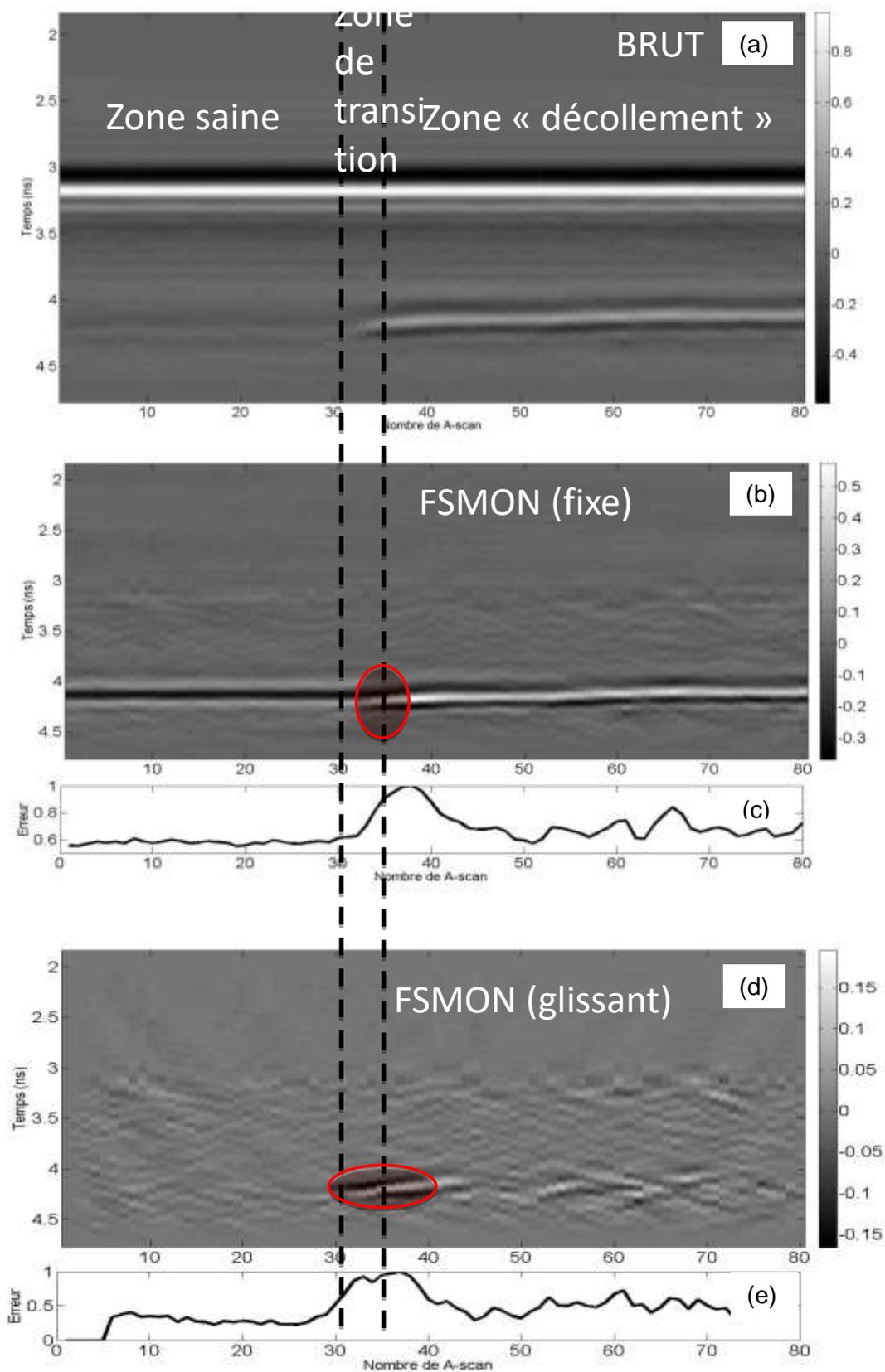


Figure 11. (a) Résultats bruts ; (b) Résultats obtenus avec la méthode FSMON (référence fixe, $L=80$) ; (c) Norme euclidienne de l'erreur normalisée du radargramme (b) ; (d) Résultats obtenus avec la méthode FSMON (fenêtrage glissant, $L=10$) ; (e) Norme euclidienne de l'erreur normalisée du radargramme (d).

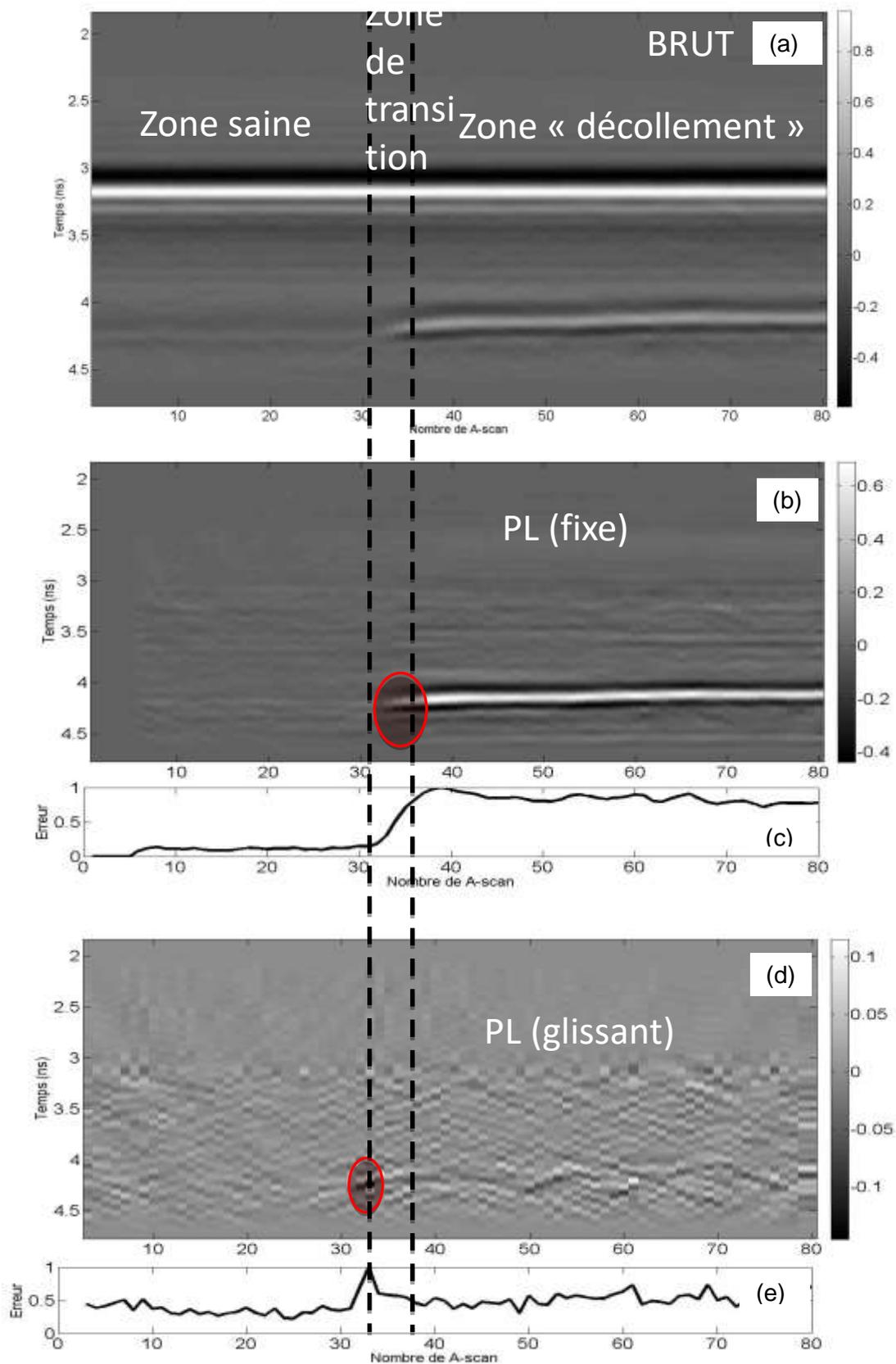


Figure 12. (a) Résultats bruts ; (b) Résultats obtenus avec la méthode PL (fixe, L=5) ; (c) Norme euclidienne de l'erreur normalisée du radargramme (b) ; (d) Résultats obtenus avec la méthode PL (fenêtrage glissant, L=3) ; (e) Norme euclidienne de l'erreur normalisée du radargramme (d).

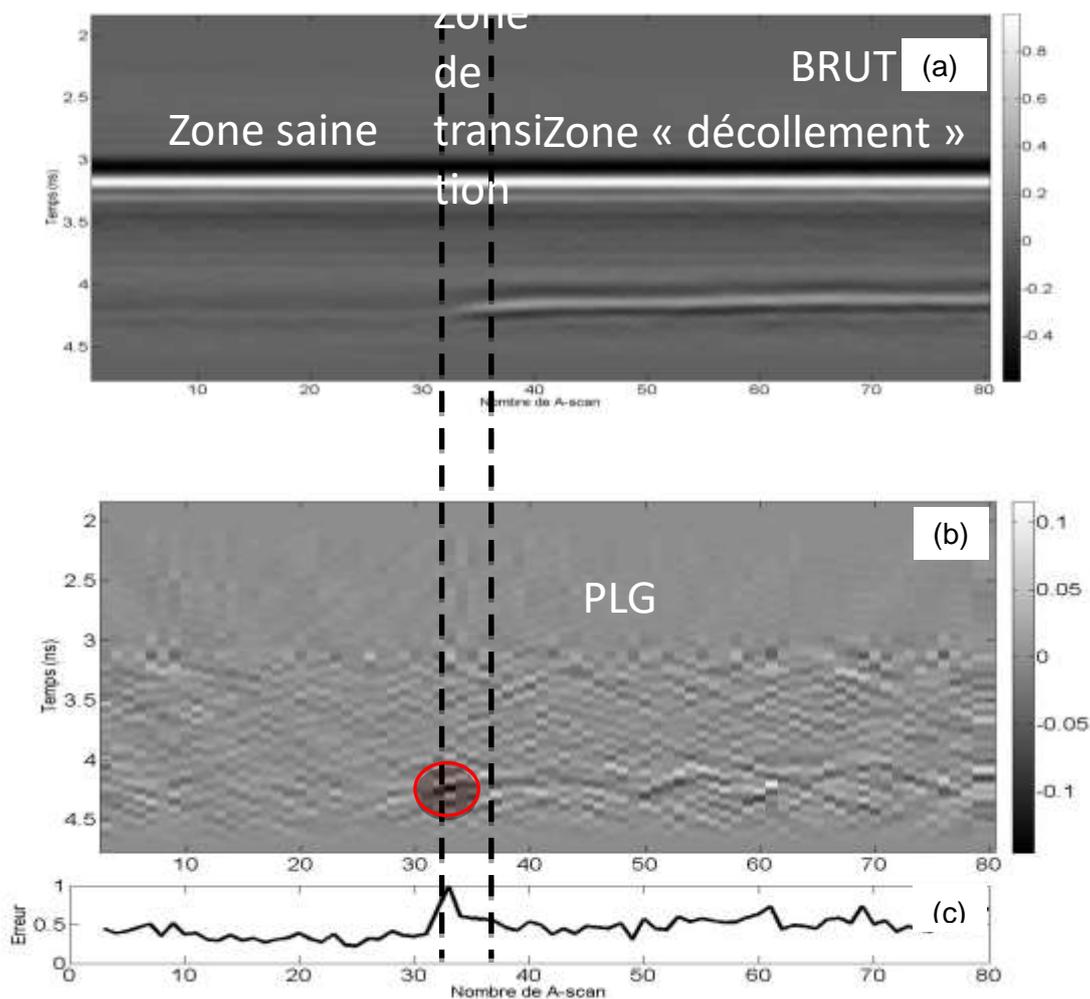


Figure 13. (a) Résultats bruts ; (b) Résultats obtenus avec la méthode PLG (L=10) ; (c) Norme euclidienne de l'erreur normalisée du radargramme (b).

Les figures 11-a, 12-a et 13-a présentent les données brutes obtenues (c'est-à-dire après une transformée de Fourier inverses). Les figures 11-b, 11-d, 12-b, 12-d et 13-b montrent les résultats obtenus, c'est-à-dire les radargrammes filtrés, avec différentes méthodes présentées dans la section précédentes. Seules les méthodes FSMON (avec une référence fixe et mobile), PL (avec une référence fixe et mobile), et PLG sont présentées. En effet, les méthodes FSMO et FSME montrent des résultats comparables à FSMON (car dans cette base de donnée, le temps de retard associé à la première interface ne varie pas). Les figures 11-c, 11-e, 12-c, 12-e et 13-c montrent la norme euclidienne de l'erreur normalisée définie comme $\frac{\|e\|_2}{\max(\|e\|_2)}$ avec e le vecteur « erreur » entre le A-scan mesuré et le A-scan prédit (ou référence).

Globalement, les résultats montrent que chacune des méthodes possède de bonne performance. En effet, chaque méthode est capable de détecter le décollement d'interface. Les méthodes utilisant une référence fixe permettent de détecter la **zone** de décollement (FSMON et PL) avec un net avantage pour la méthode PL. En effet, seule la norme euclidienne de l'erreur normalisée de la méthode PL reste importante sur la zone de décollement.

Comme attendu, les méthodes utilisant une référence mobile permettent de détecter le début de la zone de décollement comme le montre les figures 11-d, 12-d et 13-b. Ce résultat peut également être constaté sur les figures 11-e, 12-e et 13-c avec la norme euclidienne de l'erreur normalisée.

4 Résultats et discussions

4.1 Configuration de mesures

Les mesures ont été réalisées sur la route départementale 133 du département de l'Eure du PR 31 au PR 38 (sept kilomètres). Deux expérimentations ont été effectuées avec le radar à sauts de fréquence entre le PR 31 et 38 :

- La première expérimentation consiste à utiliser une antenne ETSA (Exponential Tapered Slot Antenna) de format A5 ;
- La deuxième expérimentation consiste à utiliser une antenne ETSA de format A3.

Le tableau 1 montre les configurations de mesure utilisées pour chacune des antennes.

	Antennes A3	Antennes A5
Bande de fréquences	0,4 GHz à 6 GHz	1,4 GHz à 15 GHz
Nombre de points	801	801
Pas de mesure	0,5 m	0,5 m
Zone de mesure	bande de roulement droite	bande de roulement droite

Tableau 1. Configuration de mesures

4.1 Signaux bruts

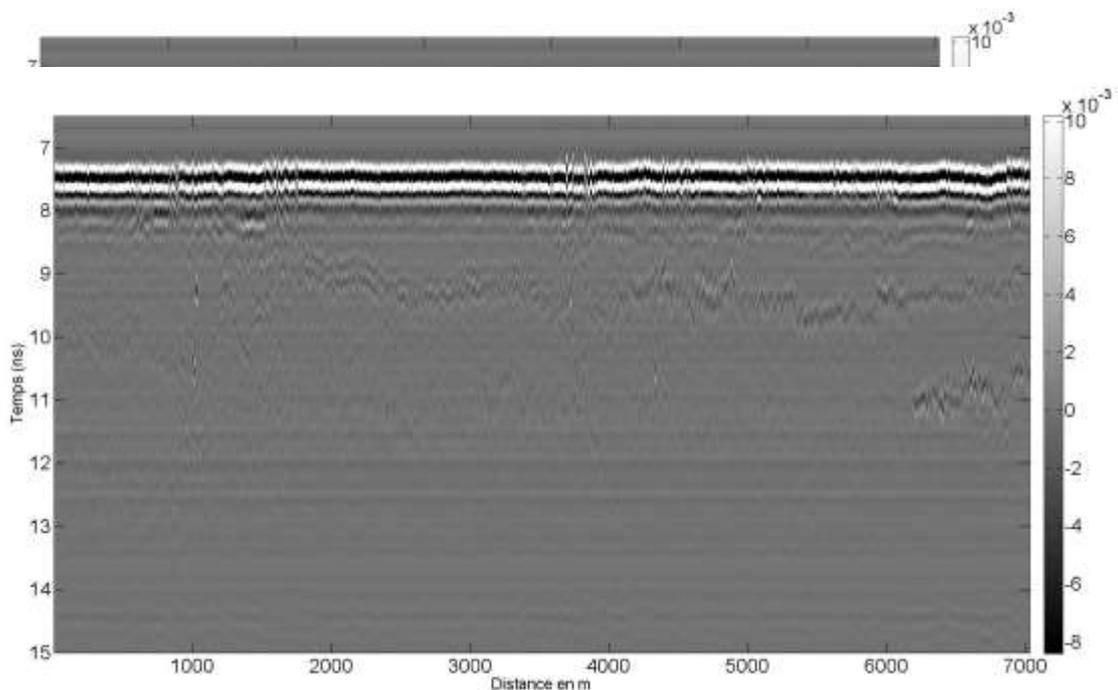


Figure 14. Radargramme brut obtenu avec le radar à saut de fréquences avec les antennes A3.

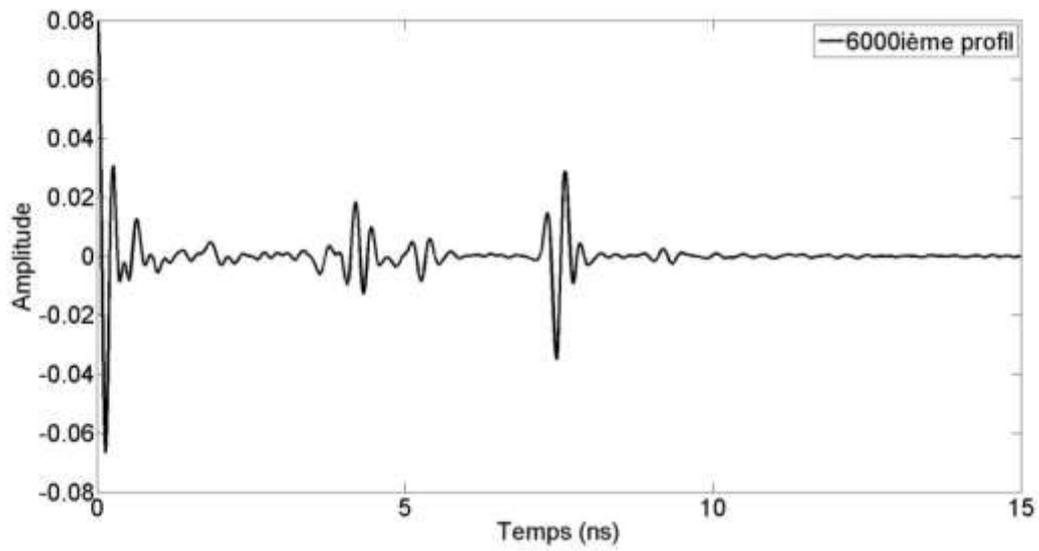


Figure 15. 6000^{ième} profil temporel mesuré du radargramme de la figure 6.

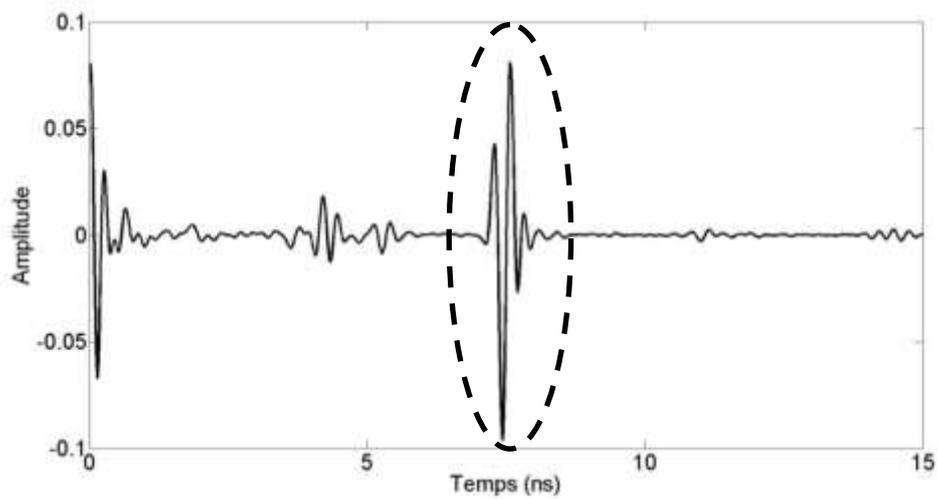


Figure 16. Mesure sur plaque métallique avec le radar à saut de fréquences avec les antennes A3 (7,44 ns).

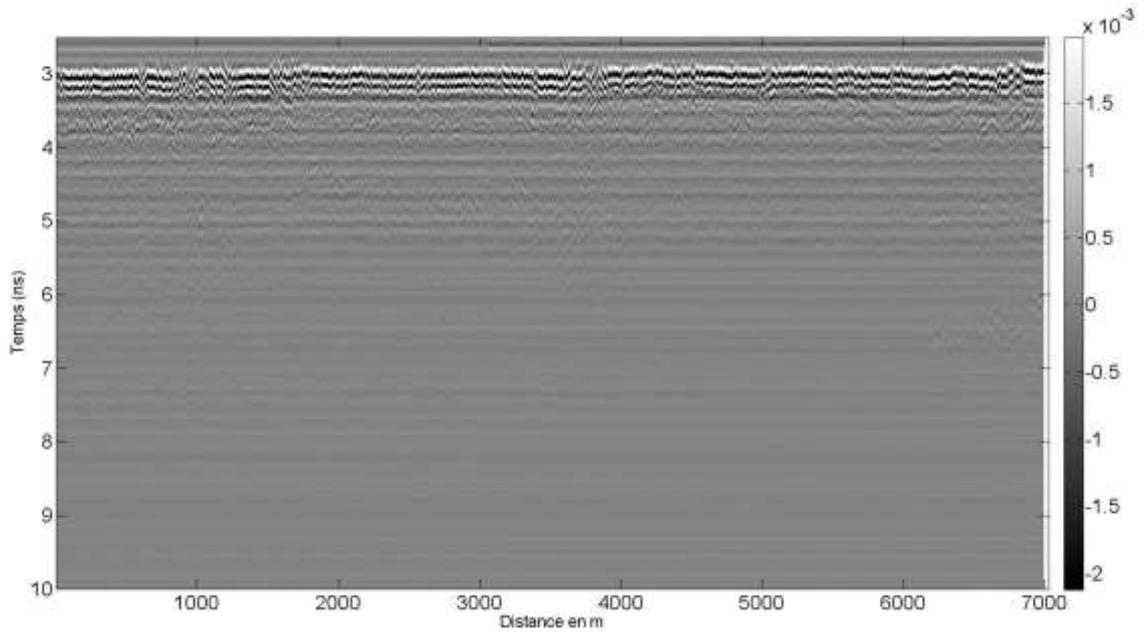


Figure 17. Radargramme obtenu avec le radar à sauts de fréquence avec les antennes A5.

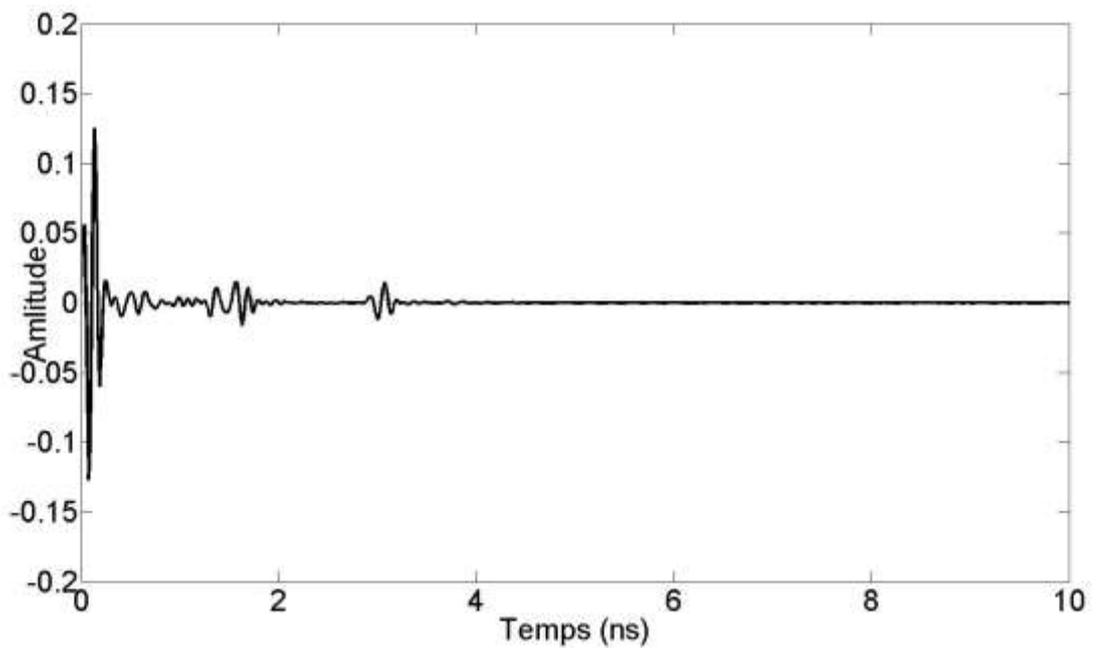


Figure 18. 6000^{ième} profil temporel mesuré du radargramme de la figure 9.

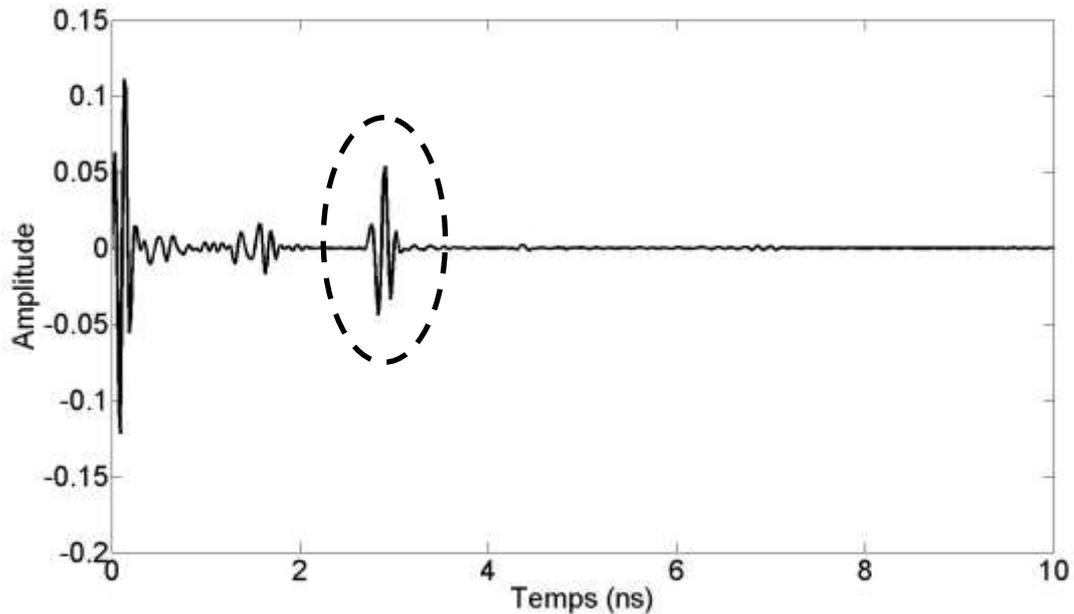


Figure 19. Mesure sur plaque métallique avec le radar à sauts de fréquence avec les antennes A5 (2,90 ns).

Ce paragraphe présente les signaux mesurés obtenus après la transformée de Fourier inverse des signaux bruts mesurés. Les figures 14 et 17 montrent les radargrammes temporels bruts, c'est-à-dire la transformée de Fourier inverse des signaux bruts mesurés, avec l'antenne A3 et A5 respectivement. Ces deux figures montrent que la résolution temporelle obtenue sur la figure 17 (antenne A5) est beaucoup plus importante. Nous pouvons également constater que la profondeur d'investigation est plus faible avec l'antenne de format A5.

Les figures 15 et 18 montrent le 6000^{ème} profil temporel obtenu avec l'antenne A3 et A5 respectivement. Enfin, les figures 16 et 19 montrent les impulsions radar (par la mesure du signal réfléchi sur un plan métallique) pour l'antenne A3 et A5 respectivement. Nous constatons également que le temps de propagation correspondant à l'interface air-chaussée se situe aux alentours de 7,5 ns pour l'antenne A3 et de 3 ns pour l'antenne A5 (zone à partir de laquelle nous commencerons à analyser les signaux).

4.2 Analyse des données

Dans ce paragraphe, les données provenant des deux antennes A3 et A5 sont analysées. De plus, les méthodes décrites dans la section 4 sont également utilisées pour réaliser cette analyse. Les différents résultats obtenus avec toutes les méthodes présentées dans la section 4 sont en annexe. Seules quelques figures considérées comme importantes sont indiquées dans cette section.

La figure 20 montre les radargrammes temporels bruts obtenus avec les deux antennes utilisées. La figure 21 montre les radargrammes bruts avec une coupe distance-distance. Dans ce cas, nous avons pris comme hypothèse une permittivité relative constante et égale à 5,5.

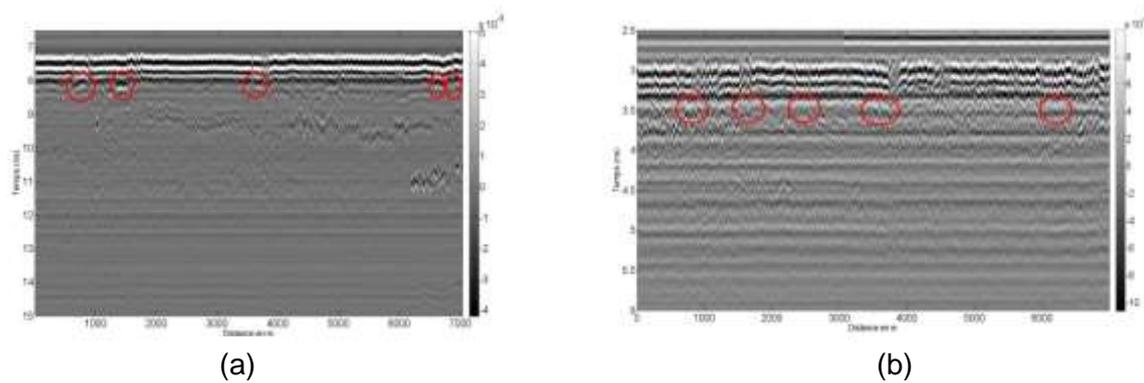


Figure 20. Radargramme brut obtenu avec le radar à sauts de fréquence avec les antennes A3 & A5.

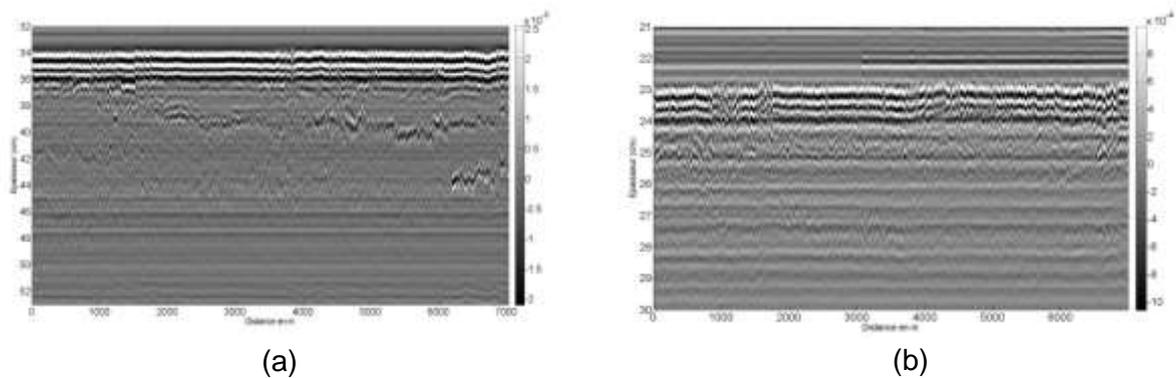


Figure 21. Coupe distance-distance de la figure 12.

A partir de ces deux figures, nous pouvons déjà, sans traitement, localiser différentes zones où il y a potentiellement un décollement d'interface (cercles rouges sur la figure 12). En effet, nous pouvons constater une variation forte de l'amplitude de l'interface au niveau de plusieurs zones sur les figures 20 et 21. Nous pouvons également constater que les données mesurées obtenues avec l'antenne A3 montrent de plus grande variation et permet ainsi une meilleure lisibilité des résultats par comparaison avec les données obtenues avec l'antenne A5. L'antenne A5 permet certes d'obtenir une plus grande résolution mais l'amplitude des échos dans la chaussée est plus faible. La largeur de la bande de fréquences est plus importante avec l'antenne A5, ainsi la dispersion des couches comme la rugosité des interfaces ont un impact sur le signal mesuré.

Les figures A2 à A21 (de l'annexe) montrent les résultats obtenus avec les différentes méthodes présentées dans la section 4. De plus, pour une même méthode, différents résultats sont obtenus en prenant en compte différentes valeurs pour certains paramètres.

Les résultats montrent que la méthode FSMO, en calculant la moyenne sur tous les profils radar, avec l'antenne A3 montre déjà de bons résultats. En effet, elle permet de mieux distinguer les zones potentielles de décollement. Le couplage d'information obtenu avec les deux antennes permet également d'améliorer la lisibilité et l'analyse de ces résultats.

De manière globale, la méthode FSMO avec un fenêtrage glissant donne de moins bons résultats que la méthode FSMO sans fenêtrage glissant. Néanmoins, les résultats de la méthode FSMO avec un fenêtrage glissant s'améliorent lorsque L, i.e. le nombre de profils radar pour calculer le profil radar de référence, augmente. Les méthodes FSME et FSMO montrent sensiblement les mêmes résultats. Il existe néanmoins une très légère différence entre les deux radargrammes obtenus avec ces deux méthodes. Comme avec la méthode FSMO avec un fenêtrage glissant, la méthode FSME avec un fenêtrage glissant montre de

meilleurs résultats lorsque le nombre de profils radar pour calculer le profil radar de référence augmente.

La méthode FSMON montre globalement de bons résultats (figure 22). Cette méthode, avec l'utilisation d'un fenêtrage glissant, montre de moins bons résultats (figure 23). Comme précédemment, plus L augmente, meilleurs sont les résultats.

La méthode de prédiction linéaire avant montre des résultats intéressants avec les données mesurées avec l'antenne A3 (figure 24). En revanche, les résultats obtenus avec l'antenne A5 sont plus mitigés. Pour différentes valeurs de L, on peut voir que cette méthode permet de montrer des variations importantes dans le radargramme. Les résultats de la prédiction linéaire avant avec un fenêtrage glissant ne sont pas satisfaisants. Il devient difficile de distinguer les zones de décollement car ceux-ci sont beaucoup moins saillants. Les variations ne sont pas assez mises en valeur. Enfin, la méthode de prédiction linéaire dite généralisée ne donne pas non plus de bons résultats. Après différents essais et de par son formalisme mathématique, il a été constaté que cette méthode semble plus performante pour des objets ponctuels (et non linéiques).

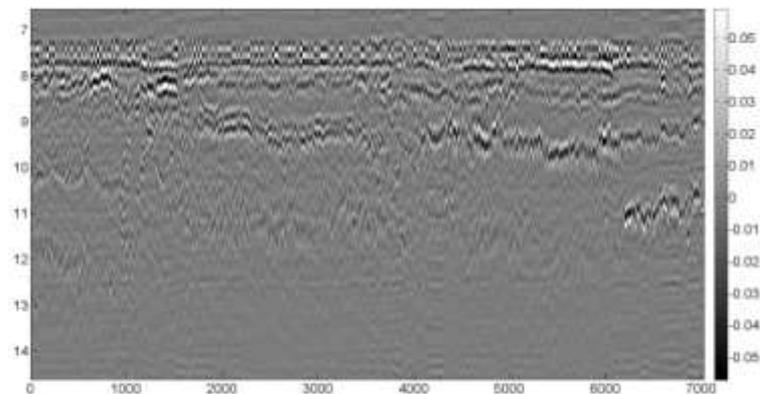


Figure 22. Radargramme brut obtenu avec FSMON (en calculant la moyenne sur tous les profils radar) avec l'antenne A3 (figure A10 de l'annexe)

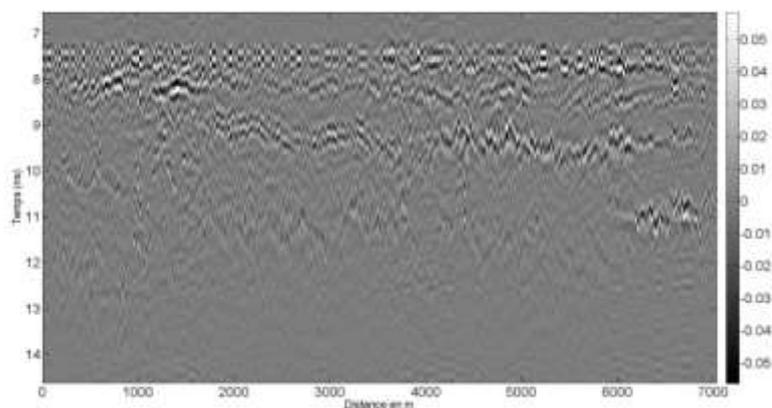


Figure 23. Radargramme brut obtenu avec FSMON (fenêtrage glissant, L=500) avec l'antenne A3, (figure A13 de l'annexe)

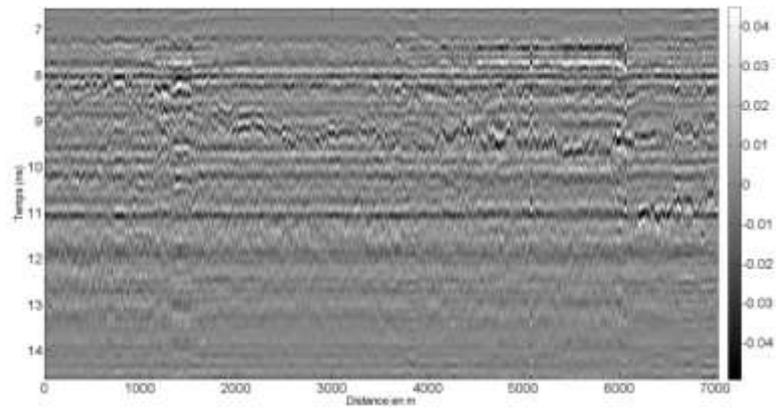


Figure 24. Radargramme brut obtenu avec PL (référence fixe, L=10) avec l'antenne A3 (figure A17 de l'annexe)

5 Conclusion et perspectives

L'objectif de cette étude est l'amélioration, l'utilisation et l'exploitation des mesures radar, notamment pour caractériser l'intégrité des interfaces de chaussées, et plus particulièrement analyser les potentiels désordres des interfaces de couches de chaussée.

Dans cette étude, nous avons proposé de réaliser une analyse fine du signal à partir de données issues du radar à sauts de fréquence à très large bande. Pour améliorer l'analyse, plusieurs méthodes de filtrage ont été utilisées. L'objectif de ces méthodes est d'essayer de faire « mieux ressortir l'information » des décollements d'interface par rapport à une analyse du signal brut. Les méthodes utilisées permettent de modéliser un radargramme (ou profil radar) de référence qui possède peu de variation spatiale (c'est-à-dire dans notre situation sans défaut). Dans un second temps, ce radargramme (ou profil radar) de référence est soustrait au radargramme mesuré. Le nouveau radargramme permet alors de mettre en lumière les phénomènes ayant une variation spatiale (très) locale (épaisseur et amplitude). Ces méthodes ont été testées sur des données obtenues avec l'aide d'un radar à sauts de fréquence à très large bande sur 7 kilomètres de route du département de l'Eure (CD27). Globalement, les radargrammes bruts obtenus avec le radar à sauts de fréquences avec les deux types d'antennes (A3 et A5) montrent différentes zones où il y a potentiellement un décollement d'interface. Nous constatons une variation forte de l'amplitude de l'interface au niveau de plusieurs zones. Différentes méthodes permettent d'améliorer cette analyse. En effet, nous avons constaté que la méthode FSMON ainsi que la méthode de prédiction linéaire avant montraient des résultats intéressants.

En perspective, d'autres méthodologies comme des méthodes d'intelligence artificielle pourront également être testées. Néanmoins, dans ce cas, pour compléter les bases de données de références, un grand nombre de carottage seront nécessaires.

Enfin, nous avons également constaté lors de ces mesures que l'amplitude du premier écho pouvait également être utilisée pour classer les différentes zones de chaussée comme le montre la figure 25.

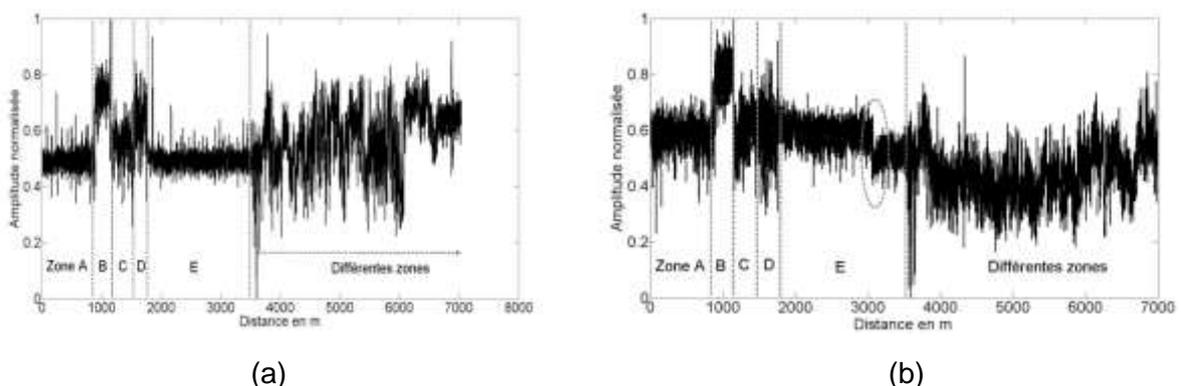


Figure 25. Amplitude du premier écho ; (a) avec les antennes A3 et (b) avec les antennes A5

Références

- [1] U. Spagnolini, "Permittivity Measurements of Multilayered Media with Monostatic Pulse Radar", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 35, No. 2, pp 454-463, March 1997.
- [2] F. Liu, « Modélisation et Expérimentations du Radar Impulsionnel et à Sauts de Fréquences pour l'Auscultation de Milieux Stratifiés du Génie Civil », Thèse de DOCTORAT, Université de Nantes, 2007.
- [3] S. Lambot, E.C. Slob, I. Van Den Bosh, B. Stockbroeckx and M. Vanclooster, "Modeling of Ground-Penetrating Radar for Accurate Characterization of Subsurface Electric Properties", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 42, No. 11, pp. 2555-2568, November 2004.
- [4] B. Guan, A. Ihamouten, X. Dérobert, D. Guilbert, S. Lambot and G. Villain, "Near-Field Full-Waveform Inversion of Ground-Penetrating Radar Data to Monitor the Water Front in Limestone," in *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 10, no. 10, pp. 4328-4336, Oct. 2017.
- [5] <https://www.mds-paris.com/utilityscan-4000/>
- [6] X. Dérobert, C. Fauchard, P. Côte, E. Le Brusq, E. Guillanton, J.Y. Dauvignac, C. Pichot, "Step-Frequency Radar Applied on Thin Road Layers", *J. Appl Geophys.*, vol. 47, pp. 317–325, 2001.
- [7] B. Thauvin, M. Thaveau, C. Aubagnac, H. Cannard, L. Sauger, J.P. Benneton, M. Fragnet, F. Pero, X. Dérobert, O. Carpentier, D. Defer, "Pathologies, diagnostic et réparation des chapes d'étanchéité d'ouvrages d'art", Guide technique, Ifsttar ed., 199 p., 2011.
- [8] C. Berengue, mémoire de rapport de stage d'ingénieur, CNAM, 2019.
- [9] Z. Dong, "Rapid Detection Methods for Asphalt Pavement Thicknesses and Defects by a Vehicle-Mounted Ground Penetrating Radar (GPR) System." *Sensors* 2016, no. 12 (2016): 2067, 18 pages, doi: 10.3390/s16122067.
- [10] T. Tesfamariam, D. Mali, "Application of Advanced Background Subtraction Techniques for the Detection of Buried Plastic Landmines", *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Volume 4, Issue 1, January 2014.
- [11] A.M. Mayordomo, A. Yarovoy, "Optimal Background Subtraction in GPR for Humanitarian Demining", 5th European Radar Conference, pp. 48-51, october 2008.
- [12] K. C. Ho, P. D. Gader, "A linear Prediction Land Mine detection Algorithm for Hand Held Ground Penetrating Radar", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, no. 6, 1374-1384.
- [13] A. B. Yoldemir and M. Sezgin, "A Least Square Approach to Buried Object Detection Using Ground Penetrating Radar", *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, no. 6, pp. 1337–1341, 2011.
- [14] A. M. Zoubir, I. J. Chant, C. L. Brown, B. Barkat, C. Abeynayake, "Signal Processing Techniques fir Landmine Detection Using Impulse Ground Penetrating Radar", *IEEE Sensors Journal*, vol. 2, no. 1, pp. 41-51, 2002.
- [15] J.-J. Hsue, A.E. Yagle, Similarities and differences between one-sided and two-sided linear prediction, *IEEE Trans. Signal Process.* 43 (1) (1995) 345–349
- [16] T. C. T. Chan, H. C. So, K. C. Ho, "Generalized two-sided linear prediction approach for land mine detection", *Signal processing*, vol. 88, pp. 1053-1060, 2008.

[17] C. Fauchard, B. Li, L. Laguerre, B. Héritier, N. Benjelloun, and M. Kadi, "Determination of the compaction of hot mix asphalt using high-frequency electromagnetic methods," *NDT & E International*, vol. 60, pp. 40–51, dec 2013.

Annexe 1

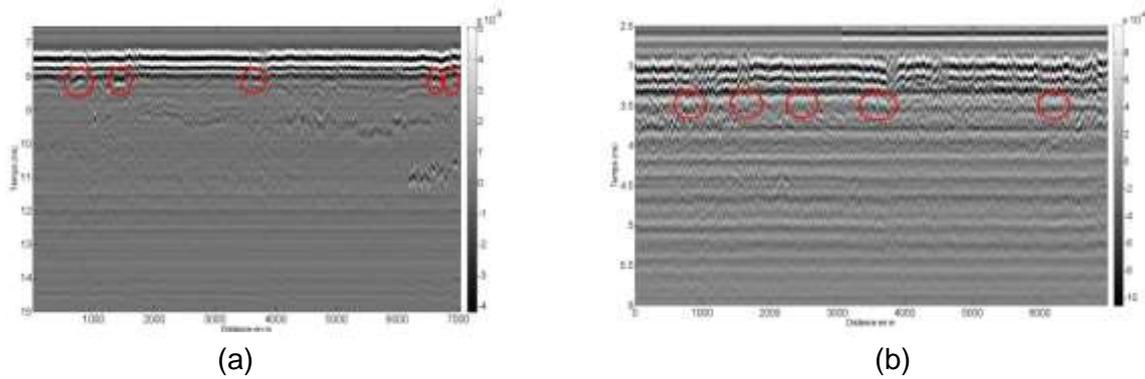


Figure A1. Radargramme brut obtenu avec le radar à sauts de fréquence avec les antennes A3 & A5.

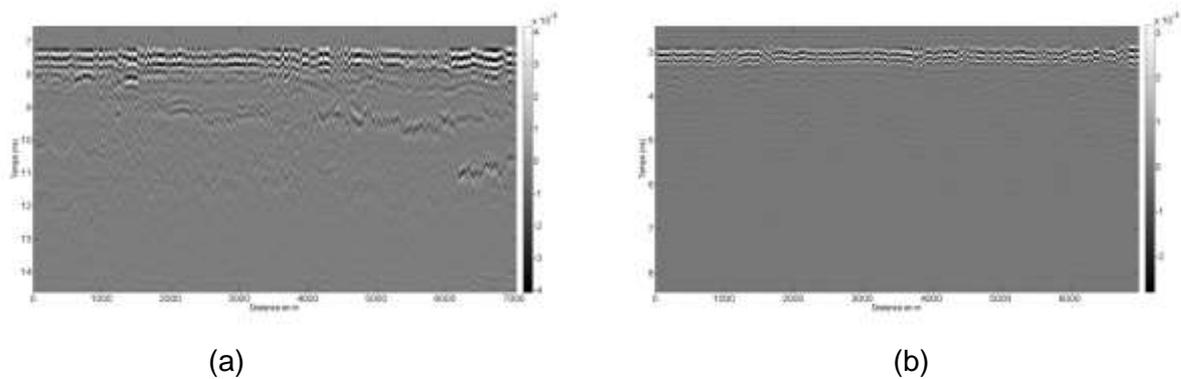


Figure A2. Radargramme brut obtenu avec FSMO (en calculant la moyenne sur tous les profils radar)

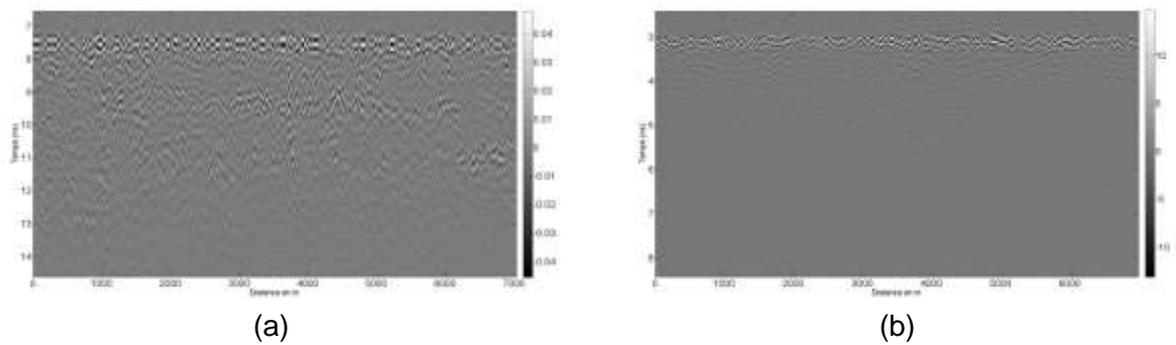


Figure A3. Radargramme brut obtenu avec FSMO (fenêtrage glissant, L=5)

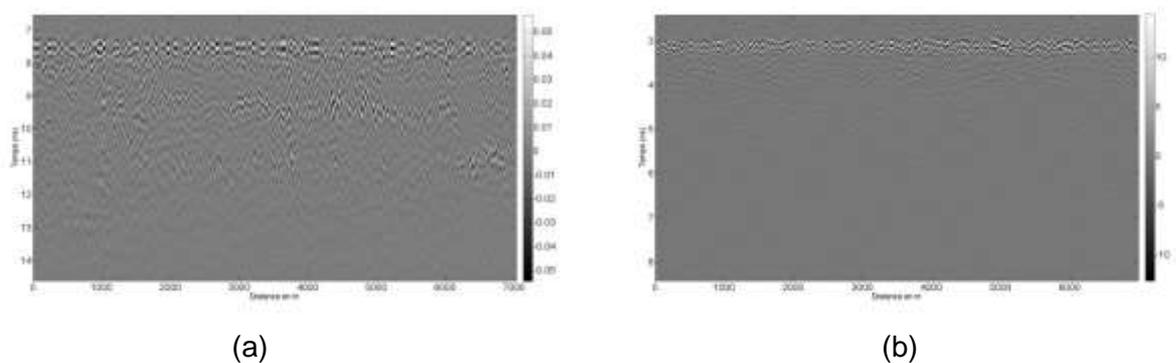


Figure A4. Radargramme brut obtenu avec FSMO (fenêtrage glissant, L=50)

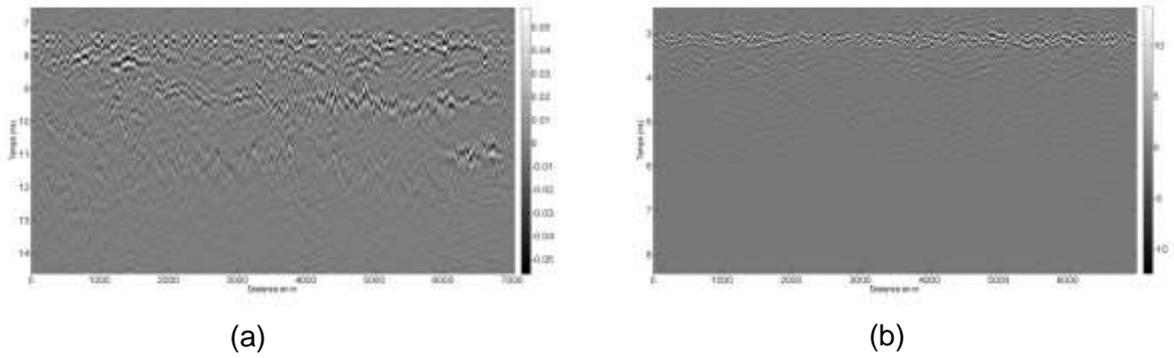


Figure A5. Radargramme brut obtenu avec FSMO (fenêtrage glissant, L=500)

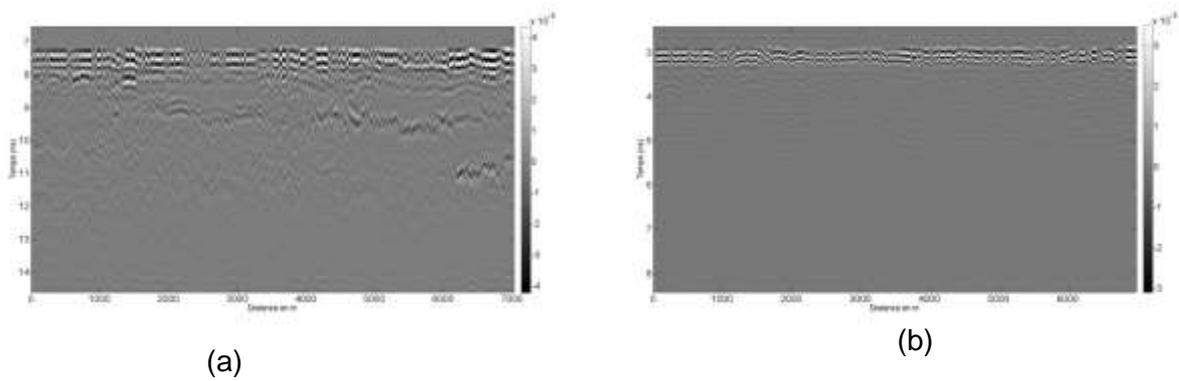


Figure A6. Radargramme brut obtenu avec FSME (en calculant la médiane avec tous les profils radar)

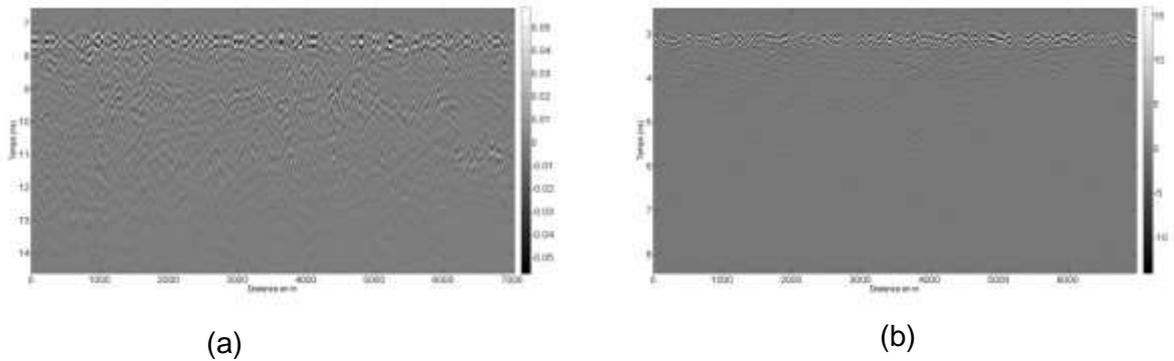


Figure A7. Radargramme brut obtenu avec FSME (fenêtrage glissant, L=5)

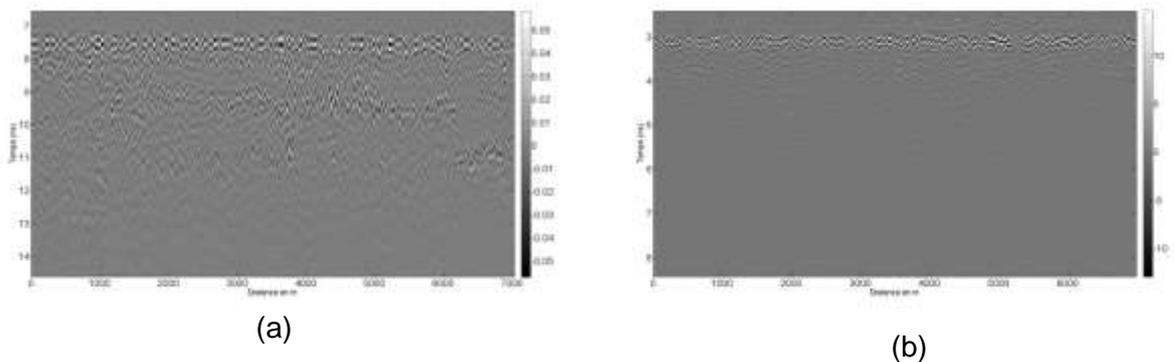
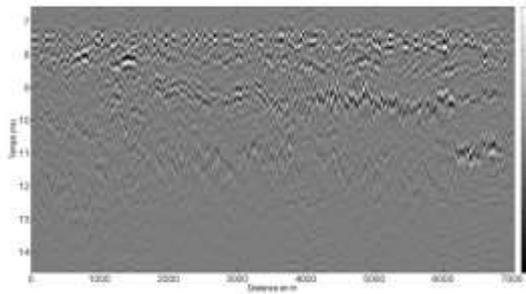
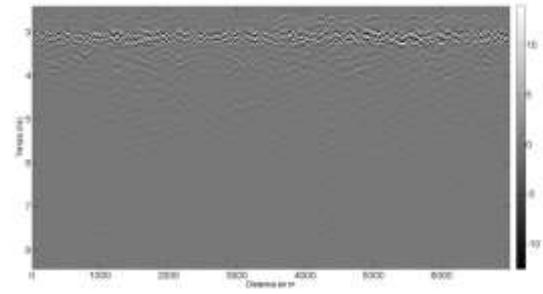


Figure A8. Radargramme brut obtenu avec FSME (fenêtrage glissant, L=50)

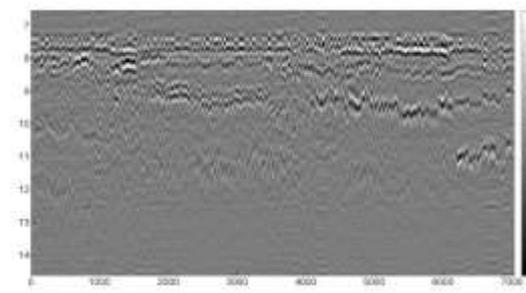


(a)

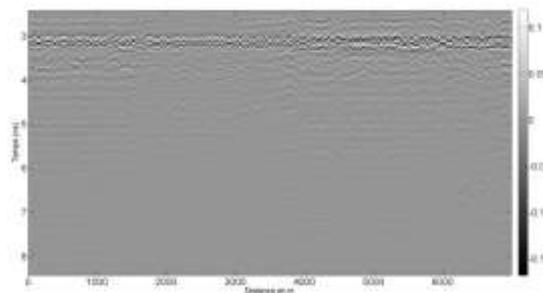


(b)

Figure A9. Radargramme brut obtenu avec FSME (fenêtrage glissant, L=500)

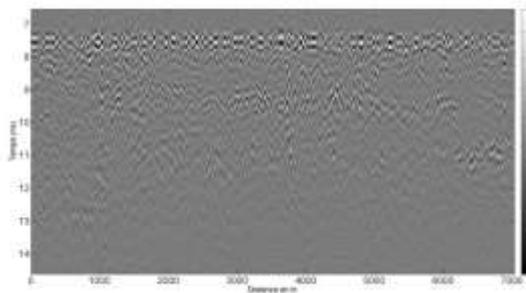


(a)

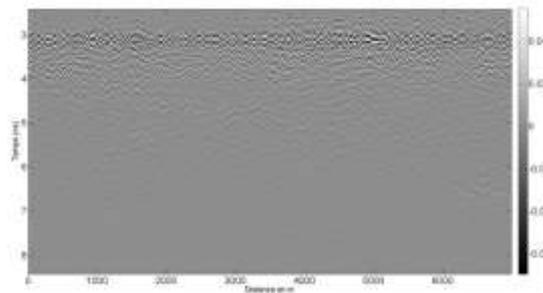


(b)

Figure A10. Radargramme brut obtenu avec FSMON (en calculant la moyenne sur tous les profils radar)

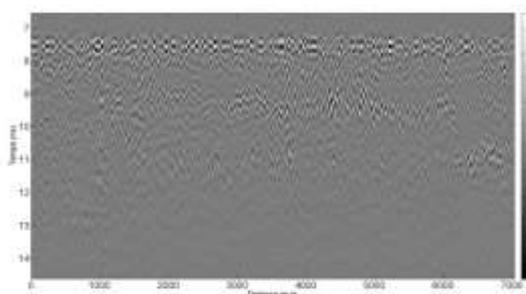


(a)

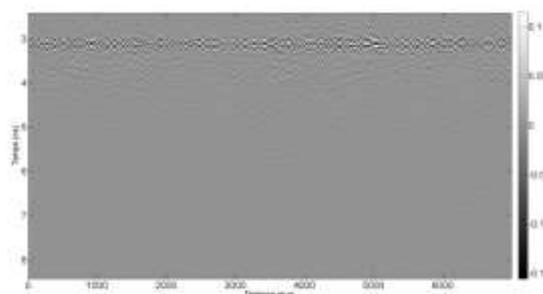


(b)

Figure A11. Radargramme brut obtenu avec FSMON (fenêtrage glissant, L=5)



(a)



(b)

Figure A12. Radargramme brut obtenu avec FSMON (fenêtrage glissant, L=50)

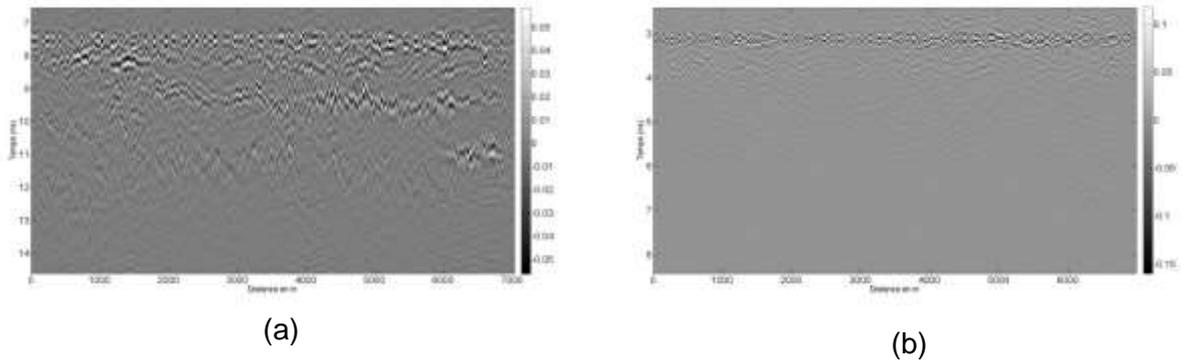


Figure A13. Radargramme brut obtenu avec FSMON (fenêtrage glissant, L=500)

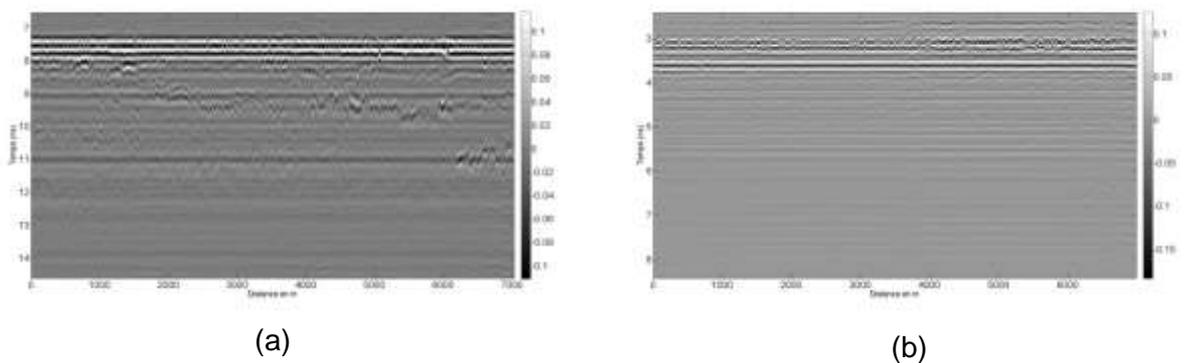


Figure A14. Radargramme brut obtenu avec PL (référence fixe, L=1)

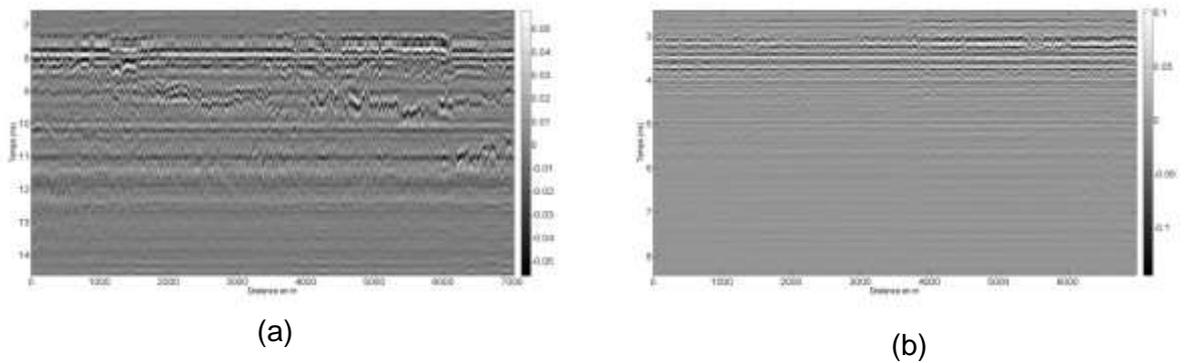


Figure A15. Radargramme brut obtenu avec PL (référence fixe, L=3)

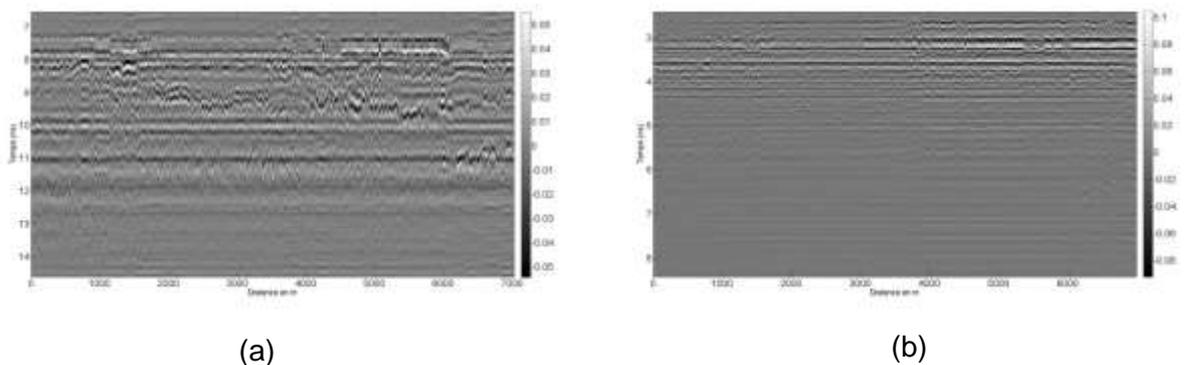
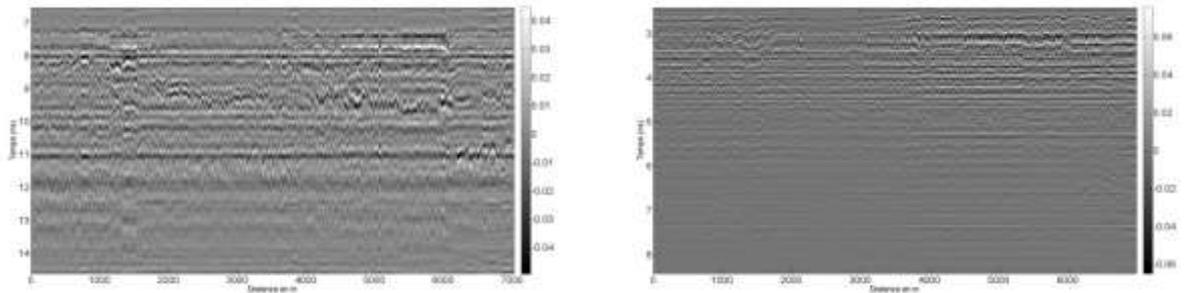


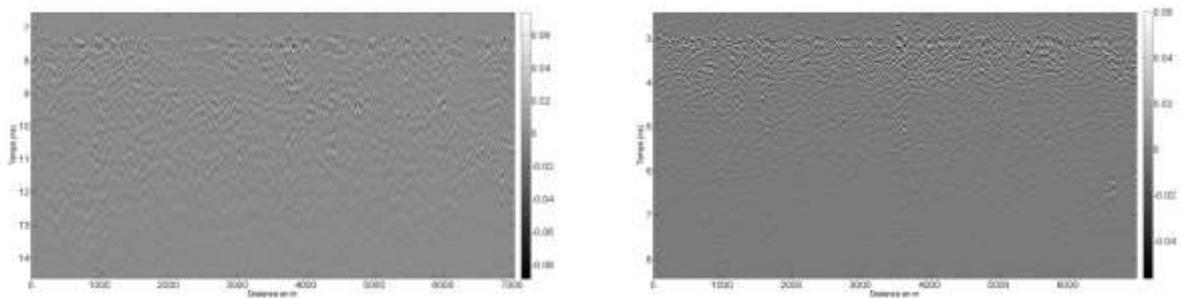
Figure A16. Radargramme brut obtenu avec PL (référence fixe, L=5)



(a)

(b)

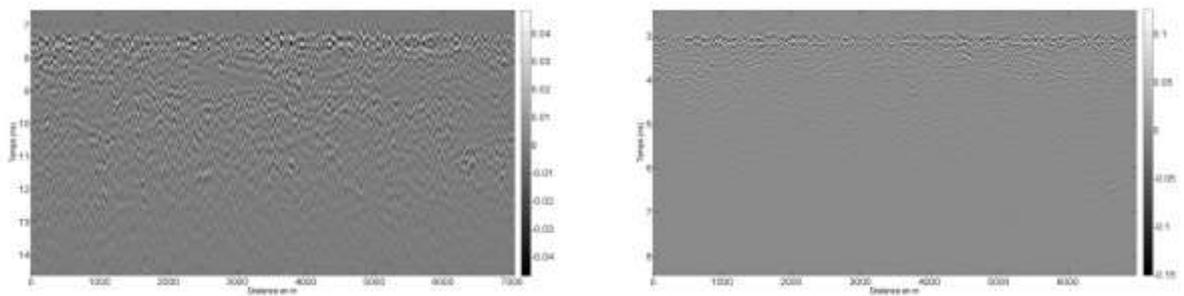
Figure A17. Radargramme brut obtenu avec PL (référence fixe, L=10)



(a)

(b)

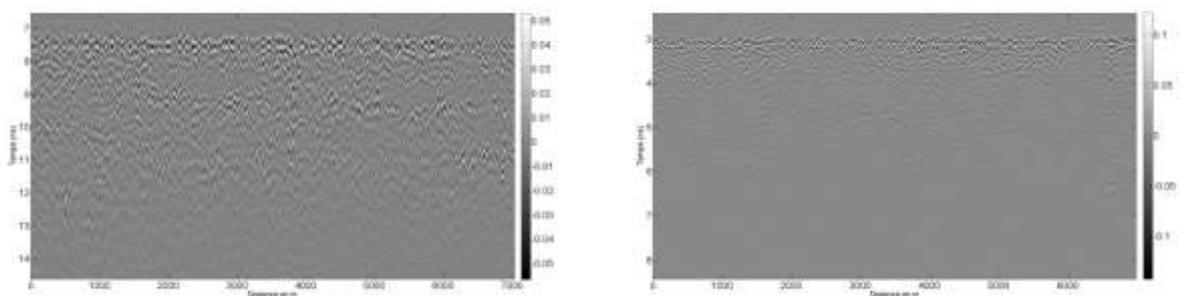
Figure A18. Radargramme brut obtenu avec PL (référence mobile, L=3)



(a)

(b)

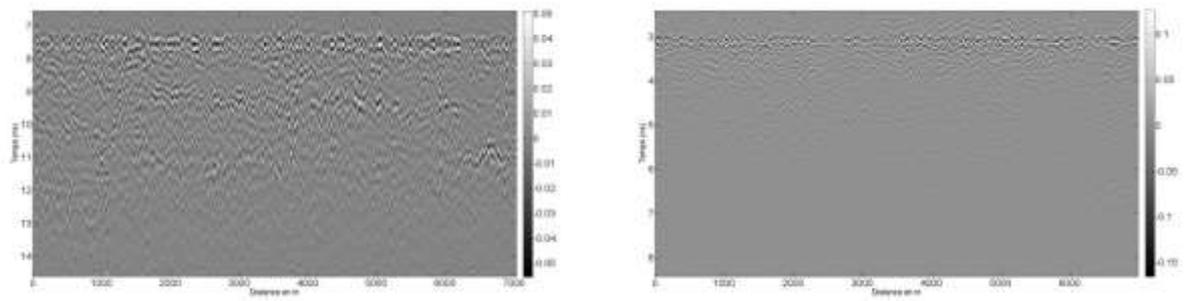
Figure A19. Radargramme brut obtenu avec PLG (référence mobile, L=1)



(a)

(b)

Figure A20. Radargramme brut obtenu avec PLG (référence mobile, L=3)



(a)

(b)

Figure A21. Radargramme brut obtenu avec PLG (référence mobile, L=5)

