

Devis de recherche
Évaluation de la précision du Géoradar pour mesurer l'épaisseur du revêtement bitumineux

Rapport final

Rapport présenté à :

Denis St-Laurent, ing. M.Sc.
Service des chaussées
Direction du laboratoire des chaussées
Téléphone : (418) 644-0890, poste 24061
Courriel : denis.st-laurent@mtq.gouv.qc.ca

Présenté par :

Jamal Eddine Rhazi, ing. Ph.D
Professeur associé
Université de Sherbrooke
Téléphone : (819) 821-8000, poste 68063
Courriel : Jamal.Eddine.Rhazi@USherbrooke.ca

Novembre 2016

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	1
2. MÉTHODOLOGIE	1
3. LES ESSAIS RÉALISÉS EN LABORATOIRE	2
3.1 Description des essais	2
3.2 Résultats des essais	3
3.2.1 Rapport signal sur bruit	3
3.2.2 Stabilité du signal à court terme	5
3.2.3 Stabilité de l'amplitude du signal à long terme	6
3.2.4 Linéarité de l'axe du temps	6
3.3 Conclusions	8
4. LES ESSAIS RÉALISÉS IN-SITU	8
4.1 Évaluation de la qualité des relevés	8
4.1.1 Bruit dans les relevés	8
4.1.2 Visibilité des interfaces	13
4.1.3 Comparaison avec le Géoradar GSSI	15
4.1.4 Comparaison avec le Géoradar IDS (antenne au sol)	25
4.1.5 Synthèse sur la qualité des relevés	25
4.2 Précision de la mesure des épaisseurs du revêtement	30
4.2.1 Techniques et logiciels de mesure du temps Δt	30
4.2.2 Résultats des mesures sur la route 257	32
4.2.3 Résultats des mesures sur la route 255	35
3. CONCLUSIONS	38
4. RECOMMANDATIONS	39
Annexe 1	
Annexe 2	

1. INTRODUCTION

Le service des chaussées du ministère des Transports du Québec (SC-MTQ) a notamment pour mission d'aider les directions territoriales à mieux connaître l'état du réseau routier sous leur juridiction. C'est dans ce cadre que ce service a fait l'acquisition en 2013 d'un équipement Géoradar manufacturé par la compagnie IDS et équipé d'une antenne Horn de 2 GHz pour mesurer l'épaisseur de l'enrobé bitumineux des chaussées ; un paramètre déterminant eu égard la performance et la durabilité du réseau routier.

La technique du Géoradar est utilisée depuis les années 1970 pour la mesure des épaisseurs de chaussées. C'est une technique nondestructive à grand rendement et elle fait l'objet de la norme ASTM D4748 - 10 *Standard Test Method for Determining the Thickness of Bound **Pavement** Layers Using Short-Pulse Radar*. Toutefois, les résultats des premières investigations réalisées par le service des chaussées tendent à révéler des limitations quant à la précision des mesures des épaisseurs alors que la littérature internationale mentionne une précision possible de l'ordre du centimètre.

En 2014, Un projet de recherche a été confié à l'Université de Sherbrooke afin de déterminer la performance du Géoradar acquis par le Service des chaussées et la précision des mesures. Ce rapport présente les résultats obtenus et propose des solutions visant à maximiser la précision de la mesure de l'épaisseur des revêtements bitumineux des chaussées.

2. METHODOLOGIE

Les activités réalisées dans le cadre de ce projet sont les suivantes :

- Évaluation en laboratoire des principales caractéristiques du Géoradar IDS
- Évaluation in-situ de la qualité des relevés
- Évaluation du logiciel utilisé par le MTQ pour le traitement des données (GRED HD)
- Précision de l'estimation de l'épaisseur du revêtement par rapport à l'épaisseur réelle obtenue par carottage.

3. LES ESSAIS RÉALISÉS EN LABORATOIRE

3.1 Description des essais

La norme ASTM D6087 – 08 “*Standard Test Method for Evaluating Asphalt-Covered Concrete Bridge Decks Using Ground Penetrating Radar*” propose des tests pour évaluer la performance des antennes Géoradar. Cette norme précise toutefois que les tests de performance doivent être effectués selon les directives du fabricant ; et que les tests de la norme ne sont proposés qu'à titre indicatif.

Malheureusement, il n'a pas été possible de se procurer la procédure utilisée par IDS pour la caractérisation de l'antenne HR2000; les fabricants préfèrent faire cette évaluation par eux-mêmes dans le cadre de contrats d'entretiens. L'évaluation de la performance de l'antenne a donc été effectuée selon les quatre tests décrits dans la norme ASTM D6087. Ces tests sont les suivants :

- (a) le test du rapport signal/bruit
- (b) le test de stabilité du signal à court terme
- (c) le test de la linéarité de l'axe des temps
- (d) le test de stabilité de l'amplitude du signal à long terme

L'antenne Géoradar a été connectée au système d'acquisition (K2FASTWAVE). Celui-ci était alimenté au moyen d'une batterie et relié à un ordinateur de contrôle pour l'affichage et la sauvegarde des données collectées. Pour réaliser les tests décrits ci-dessus, une plaque métallique de 97 cm×122 cm (épaisseur 1 mm environ) a été utilisée ainsi que des blocs en polystyrène de différentes épaisseurs pour varier la distance entre l'antenne et la plaque métallique lorsque cela était requis (Figure 1).



Figure 1 : Dispositif expérimental

3.2 Résultats des essais

3.2.1 Rapport signal sur bruit

Les signaux Géoradar, comme tous les signaux électriques, sont toujours affectés de fluctuations plus ou moins importantes. Ces fluctuations (Figure 2), dont les origines peuvent être diverses, sont appelées bruit électrique ou bruit de fond. Lorsque l'amplitude de ces bruits est importante, cela affecte la qualité des relevés collectés.

Figure 2 : Bruit dans un signal



Le rapport entre l'amplitude du signal collecté et l'amplitude du bruit permet de mesurer la qualité d'un canal de transmission. Ce nombre est d'autant plus grand que le bruit est négligeable.

La procédure permettant de déterminer le rapport signal/bruit consiste à :

- placer l'antenne à une certaine distance d'une plaque métallique
- mise en marche du Géoradar pendant 20 minutes
- procéder ensuite à la collecte de 100 signaux correspondant à la réflexion des ondes sur la plaque métallique.

L'évaluation du rapport signal/bruit s'effectue ensuite au moyen du rapport :

$$\text{Amp} / \text{An} \quad (1)$$

Avec :

- Amp : Amplitude maximale de l'écho provenant de la plaque métallique (Figure 3)
- An : Amplitude maximale entre la réflexion sur la plaque métallique et la région située à 50 % de la fenêtre temporelle après la réflexion sur la plaque. Pour une fenêtre temporelle de 20 ns, la région est située entre la réflexion sur la plaque métallique et 10 ns.

Dans la présente étude, le test a été effectué pour une distance entre la plaque métallique et l'antenne de 0.30 m. La mesure des amplitudes de réflexion a été effectuée au moyen du logiciel Radan manufacturé par la compagnie GSSI (Boston, É.-U). Le calcul de la

moyenne du rapport Amp/An a été effectuée pour 1000 signaux collectés. Selon la norme, ce rapport doit être supérieur à 20 ou 26.0 dB.

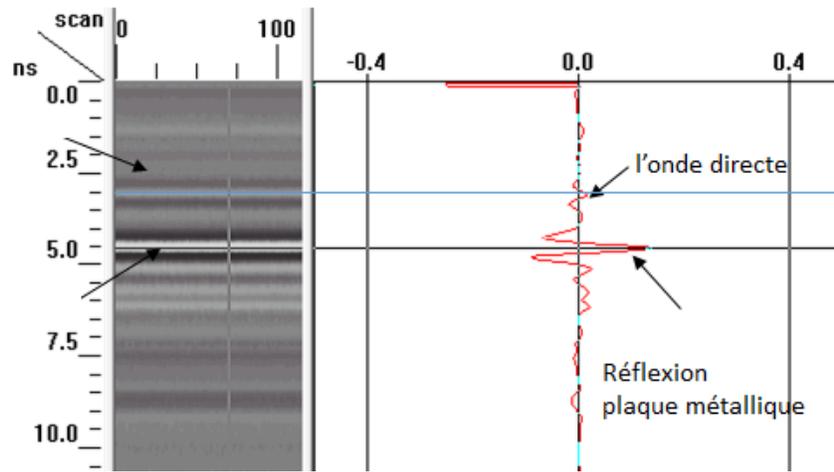


Figure 3 : Réflexion de l'onde sur la plaque métallique

La variation du rapport Amp/An est donnée sur la figure 4 ci-dessous. Ce rapport varie entre 10 et 17 et il est en moyenne de 13. Cette valeur est inférieure à la valeur minimale préconisée par la norme et qui est de 20.

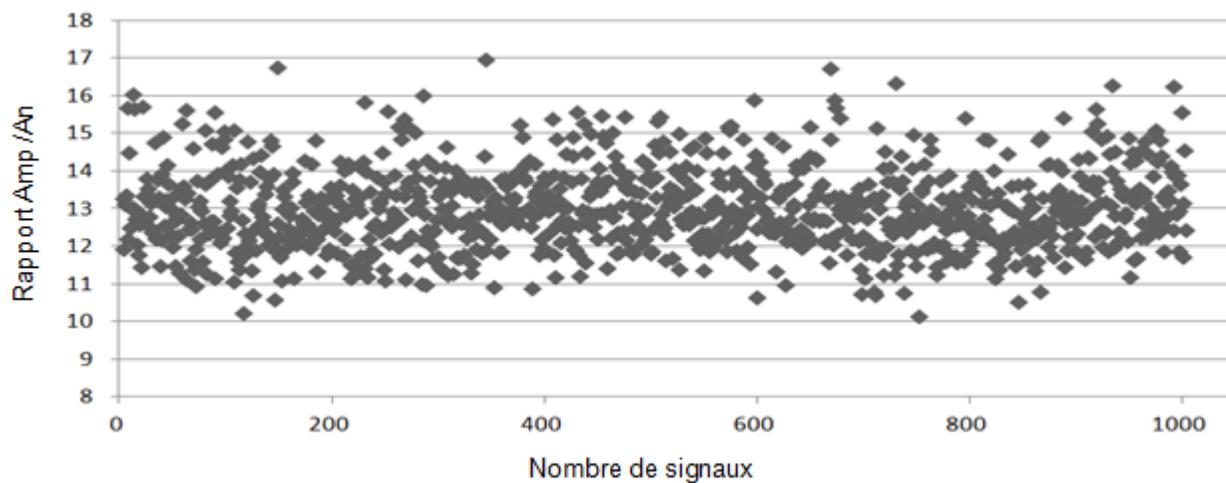


TABLEAU 4 : Résultat des tests du rapport signal/bruit

3.2.2 Stabilité du signal à court terme

L'évaluation de la stabilité du signal permet de détecter les changements importants de l'amplitude des échos pendant le fonctionnement du système radar. Le test a consisté à mettre l'antenne en fonction pendant 20 min, et à collecter ensuite en continu 1000 réflexions sur une plaque métallique distante de l'antenne de 0,30 m. Le rapport suivant a été déterminé :

$$(A_{\max} - A_{\min} / A_{\text{moy}}) \quad (2)$$

Avec :

- A_{\max} : Amplitude maximale de la réflexion sur la plaque pour les 1000 signaux.
- A_{\min} : Amplitude minimale de réflexion sur la plaque métallique pour les 1000 signaux.
- A_{moy} : Amplitude moyenne de la réflexion sur la plaque pour les 1000 signaux.

Selon la norme, ce rapport doit être inférieur à 0,01 (1%)

La figure 5 suivante donne la variation de l'amplitude des réflexions pour 1000 signaux. On constate que l'amplitude varie de façon significative. Les amplitudes maximales, minimales et moyennes mesurées sont respectivement de 7080, 5952 et 6569. Il en résulte que le rapport (2) est de l'ordre de 17%. Cette valeur est largement supérieure à la valeur maximale spécifiée par la norme (1%).

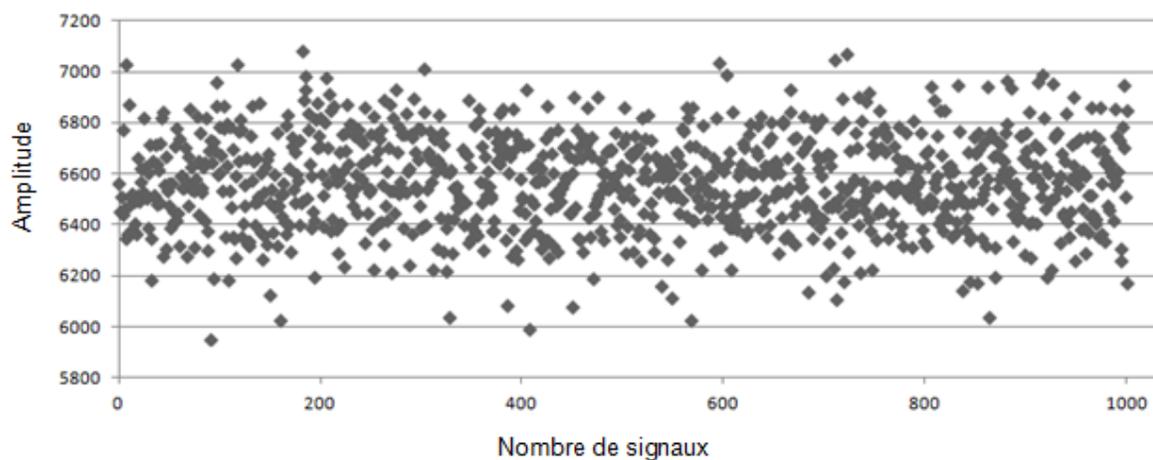


Figure 5 : Variation de l'amplitude de réflexion au bout de 20 min

3.2.3 Stabilité de l'amplitude du signal à long terme

Le test consiste à collecter en continu les réflexions sur une plaque métallique pendant 120 min. L'évaluation de la stabilité à long terme du système est donnée par la formule :

$$(A_{\max} - A_{20}) / A_{20} \quad (3)$$

Avec :

- A_{20} : Amplitude mesurée après 20 min d'acquisition
- A_{\max} : Amplitude maximale des signaux mesurée entre 20 et 120 min d'acquisition.

Selon la norme, ce rapport doit être inférieur à 3%.

Ce test a été effectué ici pour un espacement antenne-plaque métallique de 0.20 m, et pour une durée totale de 90 minutes. L'amplitude mesurée au bout de 20 min est de 2033, et l'amplitude maximale mesurée durant la période d'essai (90 min) est de 2583. Le rapport (3) est donc égal à 27%. Cette valeur est nettement supérieure à la valeur préconisée par la norme, soit 3%.

3.2.4 Linéarité de l'axe du temps

Le temps d'arrivée des réflexions des ondes radar sur les interfaces est relié linéairement à la profondeur de ces interfaces. Toutefois, l'échelle de temps du système Georadar peut devenir non linéaire à cause du vieillissement du système ou d'anomalies dans ces circuits électriques. Dans ce cas, la profondeur des interfaces détectées sera affectée par une erreur et par conséquent la mesure des épaisseurs le sera également.

L'évaluation de la linéarité de l'axe du temps s'effectue pour trois distances de l'antenne par rapport à la plaque métallique selon la formule :

$$\frac{C_1 - C_2}{\text{Moyenne } (C_1 + C_2)} < 0.02 \text{ (2\%)} \quad (4)$$

Avec :

$$C_1 = \frac{\text{Distance position 2} - \text{Distance position 1}}{\text{Temps position 2} - \text{Temps position 1}}$$

$$C_2 = \frac{\text{Distance position 3} - \text{Distance position 2}}{\text{Temps position 3} - \text{Temps position 2}}$$

Le calcul a été effectué en considérant 3 distances de l'antenne par rapport à la plaque métallique : 20 cm, 40 cm et 60 cm (Figure 6). Ces positions correspondent à des échos respectifs situés à $t_1 = 4.56$ ns, $t_2 = 5.84$ ns et $t_3 = 7.17$ ns (Figure 7). Dans ce cas, C_1 est égale à 15.62 cm/ns et $C_2 = 15.04$ cm/ns.

Le calcul du rapport (4) est donc égal à 0.019 ; soit 1.9 %. Cette valeur est légèrement inférieure à la valeur préconisée par la norme (2 %).

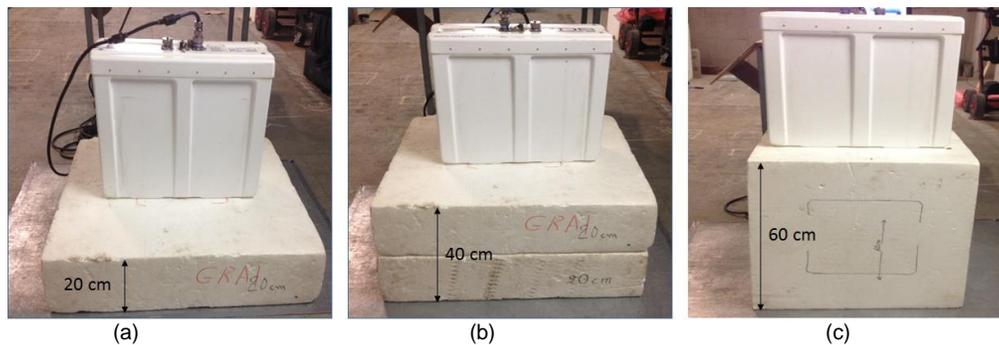


Figure 6 : Test de linéarité de l'axe du temps
(a) Antenne à 20 cm, (b) Antenne à 40 cm, (c) Antenne à 60 cm de la plaque

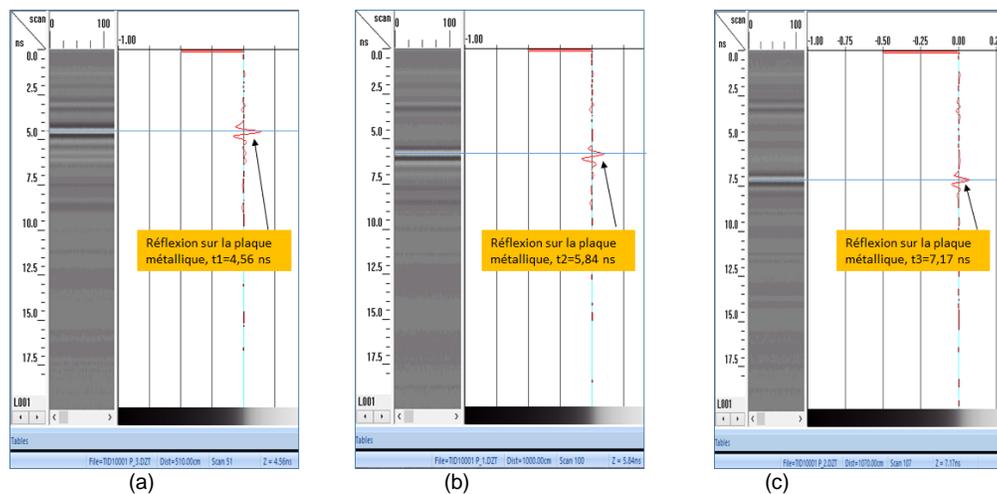


Figure 7 : Résultat du test de linéarité de l'axe du temps
(a) réflexion à 20 cm, (b) réflexion à 40 cm, (c) réflexion à 60 cm

3.3 Conclusions

Les résultats des essais présentés dans cette section du rapport ont concernés l'évaluation en laboratoire des performances de l'antenne HR200 de 2 GHz couplée à l'air selon la norme ASTM D 6087. Les valeurs mesurées pour le rapport signal/bruit, ainsi que pour la stabilité du signal à court et à long terme ne satisfont pas les critères préconisés par la norme. Le critère de la linéarité de l'axe du temps est toutefois satisfait. Ce critère est important à considérer lorsque le système Géoradar est utilisé pour mesurer l'épaisseur du revêtement bitumineux des chaussées.

4. LES ESSAIS RÉALISÉS IN-SITU

Les objectifs des essais réalisés in-situ étaient les suivants : (a) évaluer la qualité des relevés et, (b) évaluer la précision des mesures de l'épaisseur du revêtement bitumineux. Des relevés ont été collectés sur sept (7) tronçons de routes (Annexe 1) et analysés afin d'atteindre ces objectifs.

4.1 Évaluation de la qualité des relevés

L'évaluation de la qualité des relevés a concerné les deux aspects les plus importants : le bruit dans les relevés et la visibilité des interfaces ; en particulier l'interface entre le revêtement bitumineux et la fondation.

4.1.1 Bruit dans les relevés

Le bruit dans les relevés peut notamment être causé par le système Géoradar, par le réseau électrique de télécommunication ou par le milieu ausculté.

a) Bruits propre au système

La figure 8 représente un relevé Géoradar collecté avec le système IDS. L'axe horizontal indique le chaînage (en m), l'axe vertical situé sur la gauche représente le temps d'arrivée des réflexions (en ns), et l'axe vertical sur la droite représente

la profondeur (en m). La figure 8a indique deux bandes noires horizontales dans le relevé à environ 3 ns et 8 ns qui interfèrent avec les données. L'élimination de ce type de bruit s'effectue en appliquant un filtre passe bande aux relevés. La figure 8b a été obtenue en appliquant un filtre passe haut de 500 MHz et un filtre passe bas de 3000 MHz. Le résultat de ce filtrage se traduit par l'élimination des bandes noires horizontales et une amélioration de la visibilité des interfaces dans les relevés.

b) Bruit du à l'environnement

Le bruit généré par les antennes de télécommunication peut nuire à la qualité des relevés Géoradar. La figure 9a montre un relevé contaminé par ce type de bruit. La figure 9b indique que le moyennage des signaux (stacking) peut améliorer significativement la qualité des relevés. Dans le présent cas, le nombre de signaux moyenné est de 50.

c) Réverbérations dans les relevés

Les relevés effectués sur les chaussées avec des antennes suspendues dans l'air (à une certaine distance de la surface) peuvent comporter des réflexions qui s'apparentent à des interfaces entre les couches de la chaussée (Figure 10) mais qui, en réalité, sont tout simplement le résultat de réflexions multiples sur la surface du pavage ou sur des interfaces dans la chaussée. Il est donc important d'être en mesure de différencier les réflexions associées aux interfaces de celles résultantes des réverbérations.

Afin d'avoir plus d'informations sur cet aspect, des relevés Géoradar ont été effectuées à l'aide d'une antenne IDS (2 GHz) conçue pour fonctionner en contact avec le sol. Les relevés de cette antenne ont été comparés aux relevés de l'antenne du MTQ collectés sur la même chaussée. La figure 11 montre les deux relevés.

La figure 11a représente le relevé collecté avec l'antenne du MTQ. À première vue, ce relevé révèle 3 interfaces. Par contre, le relevé collecté avec l'antenne au sol (antenne IDS) ne comporte que deux interfaces.

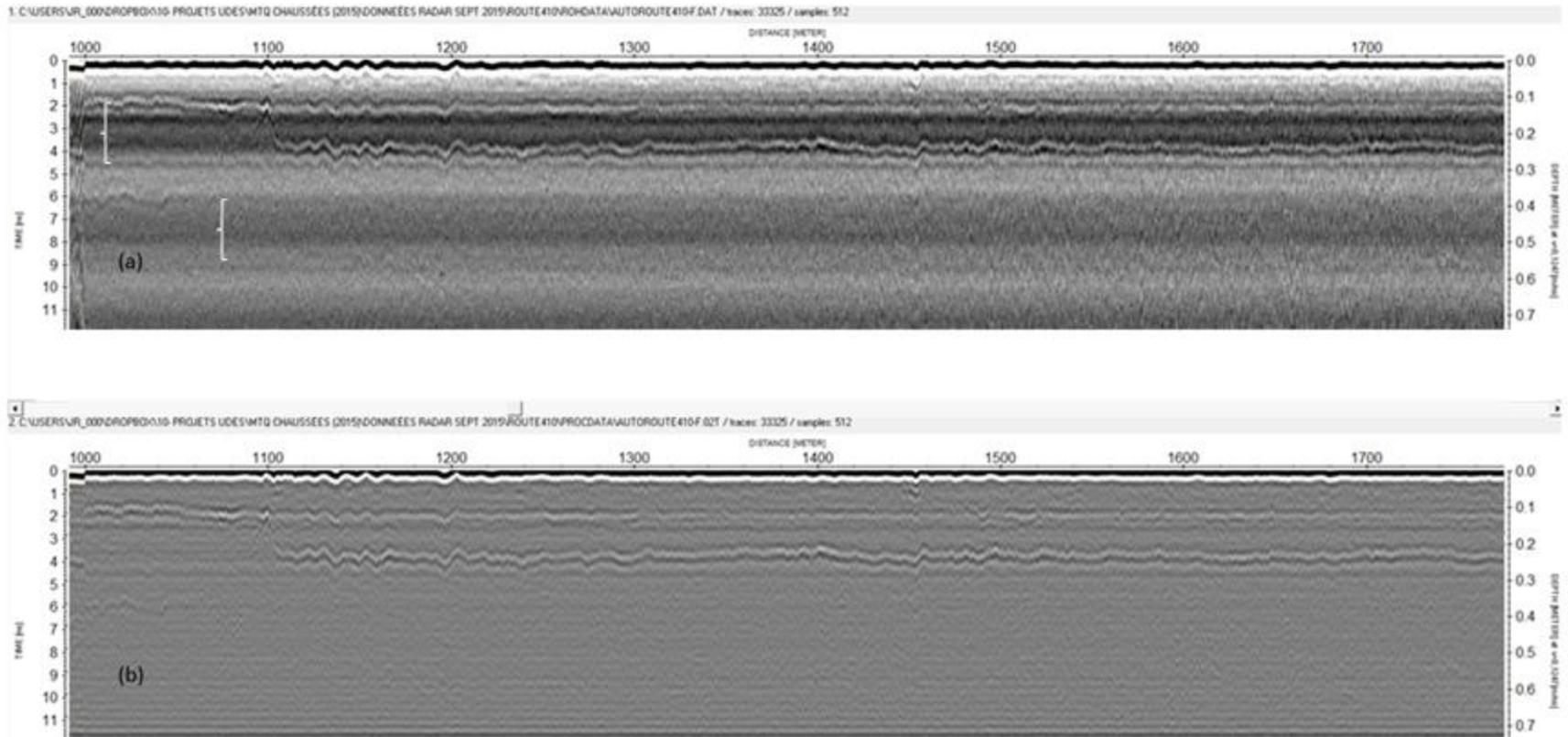


Figure 8 : (a) Relevés contaminé par le bruit propre au système et (b) effet du filtrage

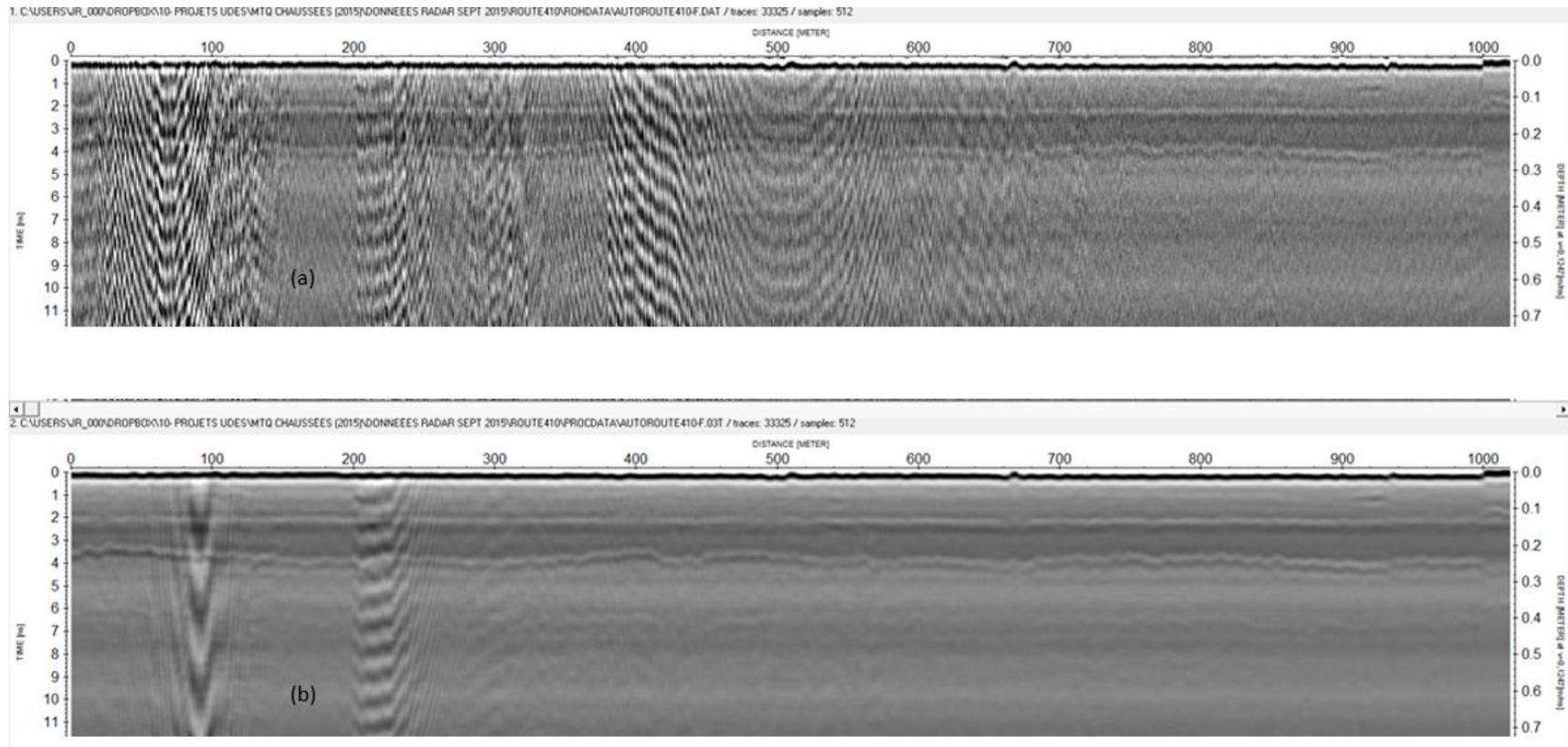


Figure 9 : (a) Relevé contaminé par les signaux de télécommunication et (b) effet du moyennage

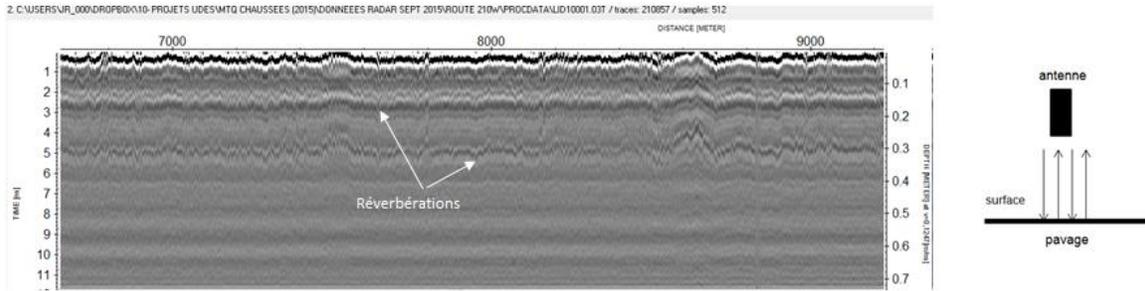


Figure 10 : Réverbérations dans les relevés

Il apparait donc que l'interface continue désignée sur la figure 11a par deux traits discontinus n'est que du bruit. Il est visible sur tous les relevés collectés avec cette antenne, et il est important de ne pas le prendre en considération lors de l'analyse des relevés.

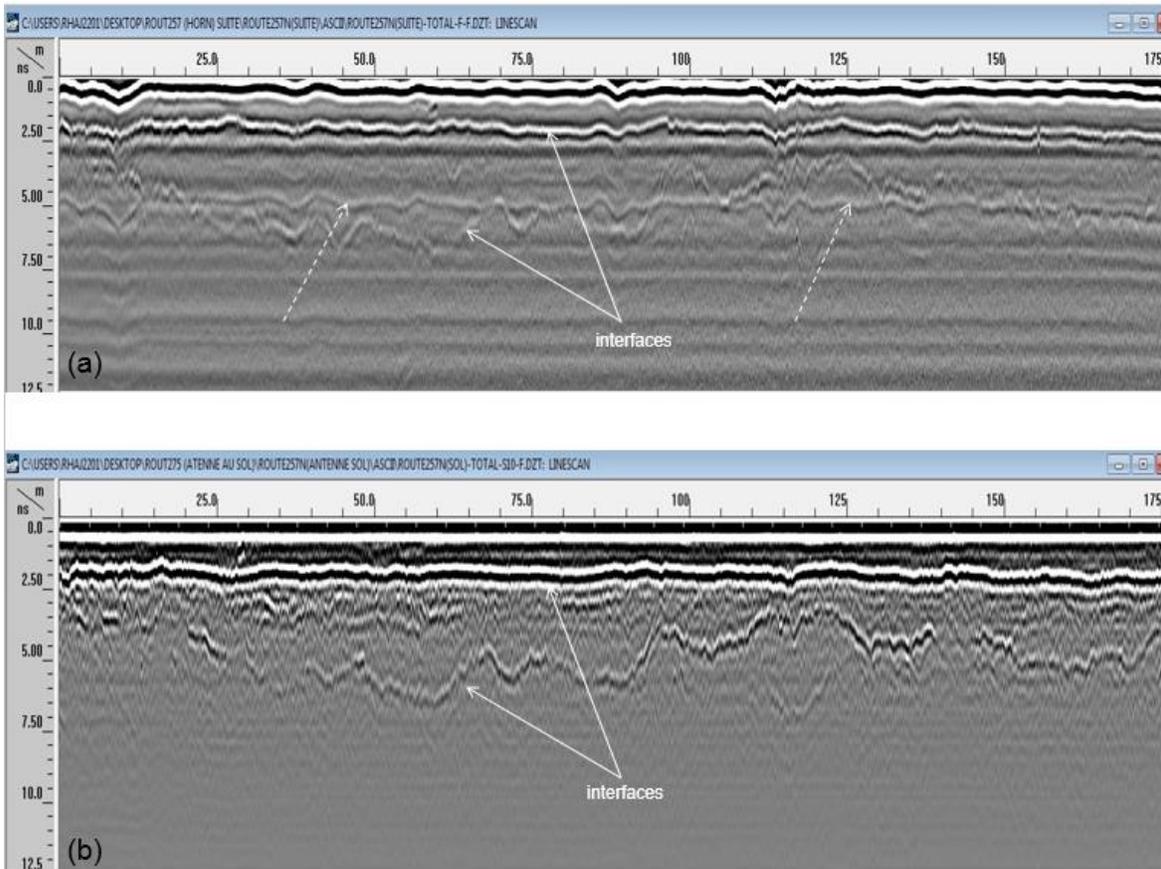


Figure 11 : Comparaison des relevés des 2 antennes
(a) antenne du MTQ, (b) antenne au sol IDS

Il est à préciser que les réverbérations présentes dans les relevés de l'antenne IDS du MTQ sont aussi observées dans les relevés d'antennes similaires, tel que les antennes GSSI qui fonctionnent à une certaine distance du sol. La figure 12 montre un exemple de relevé collecté par une antenne GSSI (relevés fournis par la compagnie Géophysique GPR) et indiquant la présence de réverbérations dans le relevé.

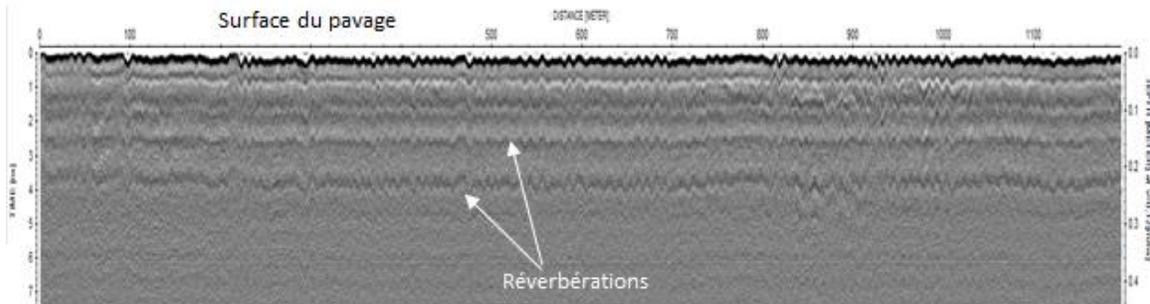


Figure 12 : Relevé avec réverbérations collectés avec une antenne GSSI

La suppression de ce type de bruit dans les relevés Géoradar est difficile. Ce bruit s'apparente à la réflexion sur une interface et tout traitement visant à l'éliminer ou à le réduire (ex. soustraction de la moyenne des signaux du relevé (background removal)) aura aussi des conséquences néfastes sur la visibilité de l'interface revêtement bitumineux-fondation.

4.1.2 Visibilité des interfaces

Les relevés Géoradar collectés sur les chaussées dans le cadre de ce projet révèlent que les interfaces entre les différentes couches du revêtement bitumineux et entre le revêtement bitumineux et la fondation ne sont pas toujours bien visibles et sont parfois totalement indétectables (annexe 2). La figure 13 illustre de telles situations.

La visibilité de l'interface revêtement bitumineux-fondation dépend du contraste diélectrique entre le revêtement bitumineux et la fondation. La visibilité de l'interface s'améliore lorsque ce contraste est grand. Cette visibilité dépend aussi des performances du système Géoradar utilisé pour collecter les données.

Afin de déterminer si les performances du système Géoradar IDS utilisé pour collecter les données sont à l'origine de la mauvaise visibilité de l'interface pavage-fondation, une

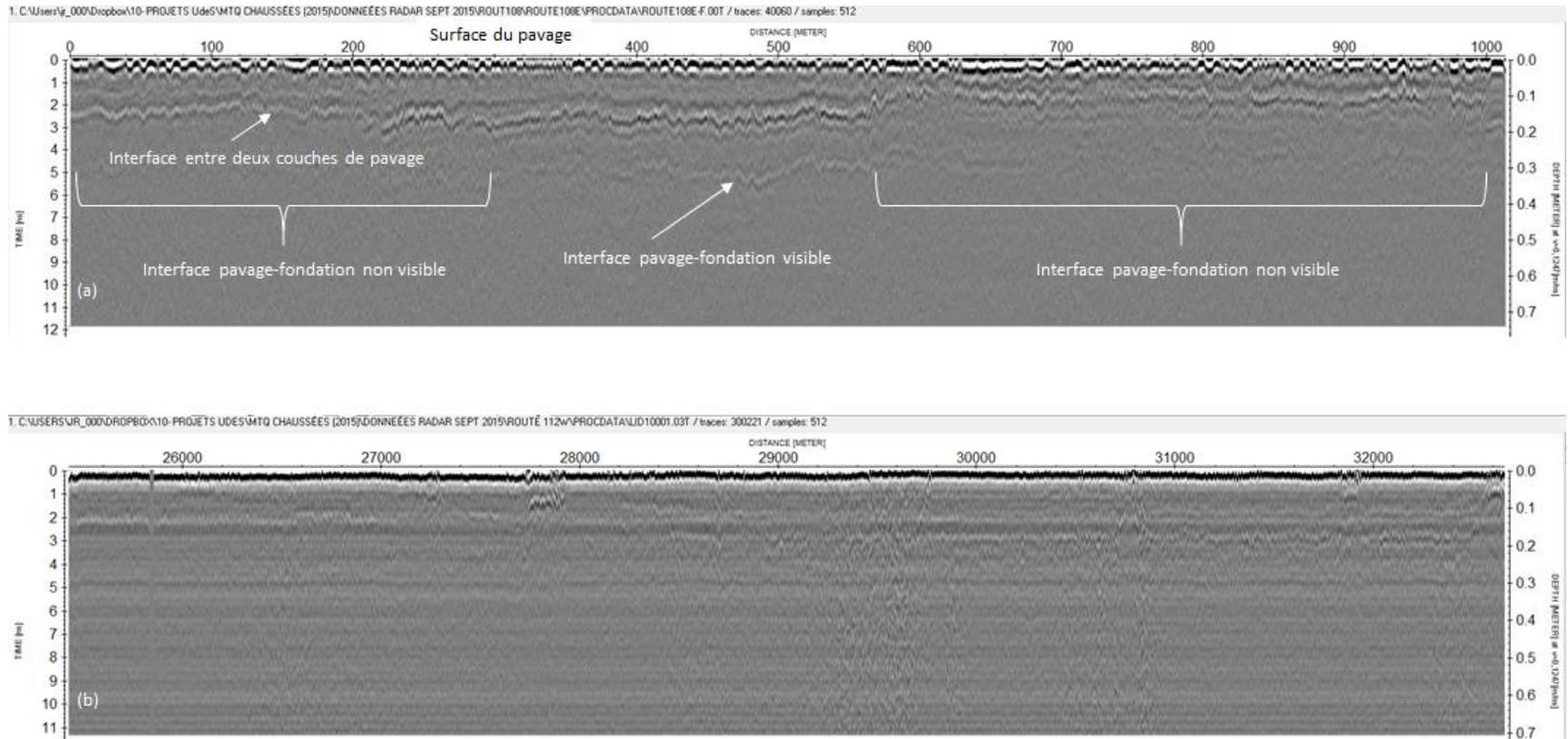


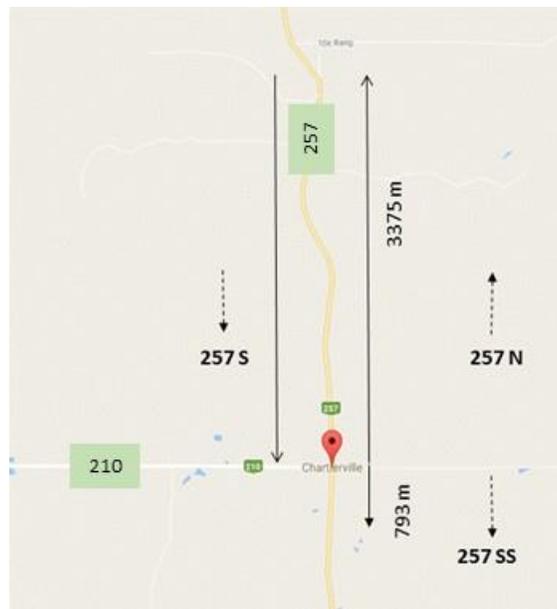
Figure 13 : (a) visibilité partielle de l'interface pavage-fondation (route 108) et, (b) absence de la visibilité de l'interface pavage-fondation (route 112 Ouest)

étude comparative a été réalisée entre les relevés collectés avec le Géoradar IDS équipé de l'antenne Horn de 2 GHz et :

- un Géoradar manufacturé par la compagnie Geophysical Survey Systems Inc (GSSI) et équipé d'une antenne Horn de 2 GHz
- un Géoradar IDS équipé d'une antenne de 2 GHz en contact avec le sol.

Les relevés Géoradar ont été collectés sur la route 257 en Estrie (figure 14). Un relevé de 3375 m a été collecté sur la voie en direction nord (257-N), un relevé de 3375 m sur la voie en direction sud (257-S), et un 3^{ème} relevé de 793 m sur la voie en direction sud-sud (257-SS).

Figure 14 : Localisation des relevés effectués



4.1.3 Comparaison avec le Géoradar GSSI (antenne Horn de 2 GHz)

Le système GSSI était équipé d'une antenne de 2 GHz fixée à une hauteur de 0.60 m du sol, alors que l'antenne IDS (2 GHz) était disposée à 23 cm du sol (figure 15). Les paramètres d'acquisition des deux systèmes étaient identiques et sont les suivants : (a) fenêtre temporelle (time window) : 15 ns, (b) nombre de points par signal : 512, (c) nombre de données par mètre linéaire : 10.

Figure 15 : Antennes des systèmes
IDS et GSSI



Les résultats concernant la route 247-N sont donnés aux figures 16a à 16c, ceux relatifs à la route 257-S sont sur les figures 17a à 17c, et ceux traitant de la route 257-SS sont sur la figure 18. Les relevés collectés sur la route 257-N et 257-S ont été divisés en 3 sections de manière à mieux apprécier les similitudes et les différences entre les relevés du système IDS et celui de GSSI.

L'échelle de la profondeur (sur la marge gauche des figures) a été établie en assumant une permittivité diélectrique du revêtement bitumineux constante et égale à 5.5 (la permittivité diélectrique de l'asphalte varie entre 3 et 6 environ).

a) Relevés sur la route 257-N

Les relevés sur la route 257-N indiquent une seule couche de pavage entre 0 m et 340 m, et 2 couches pour le reste de la route.

La figure 16a indique que les interfaces sont visibles sur les relevés IDS et GSSI, sauf aux chainages 400 m et 900 m (indicateur 1 et 1a). À ces endroits, l'interface entre les deux couches de pavage est mal définie dans les 2 relevés.

La figure 16b indique que l'interface entre les deux pavages à 1250 m (indicateur 2) est mal définie dans les 2 relevés. À 1800 m (indicateur 2a), elle est mieux définie dans le relevé IDS. Par contre, l'interface pavage-fondation à 1950 m est mieux définie dans le relevé GSSI (indicateur 2b).

Enfin, la figure 16c montre que l'interface entre les 2 pavages à 2900 m (indicateur 3) est mieux définie dans le relevé GSSI. Par contre, l'interface pavage-fondation à 3100 m (indicateur 3a) est mieux définie dans le relevé IDS.

b) Relevés sur la route 257-S

La figure 17a met en évidence 2 couches de pavage entre les chainages 50 m et 1000 m.

- L'interface entre les deux couches semble mal définie sur le relevé d'IDS au chainage 800 m (indicateur 1), et l'on constate que cette interface est aussi mal définie dans le relevé GSSI au même endroit.
- L'interface pavage-fondation est mal définie dans le relevé GSSI aux chainages 100 m et 200 m (indicateur 1a et 1b) mais elle est bien visible dans le relevé IDS (indicateurs 1a et 1b).

La figure 17b met aussi en évidence 2 couches de pavage entre les chainages 1000 m et 2000 m. Les relevés d'IDS et de GSSI sont équivalents dans cette portion de la chaussée, sauf au chainage 1450 m où l'interface pavage-fondation est mieux définie dans le relevé GSSI (indicateur 2).

Enfin, la figure 17c indique qu'à partir de 3000 m environ, seule une couche de pavage est visible sur les deux relevés. Ailleurs, les relevés sont aussi similaires. Par exemple, l'interface entre les deux couches de pavage est mal définie dans les 2 relevés au chainage 2325 m (indicateur 4), et l'interface pavage-fondation est invisible dans les deux relevés (chainage 2150 m, indicateur 3).

c) Relevés sur la route 257-SS

La figure 18 donne les relevés collectés avec les deux systèmes sur la route 257-SS. Le relevé sur la route 257-SS indique deux couches de pavage. L'interface entre les 2 couches est relativement visible sur les 2 relevés. Par contre, l'interface pavage-fondation est mal définie dans les 2 relevés, notamment entre 350 m et 600 m (indicateur 1).

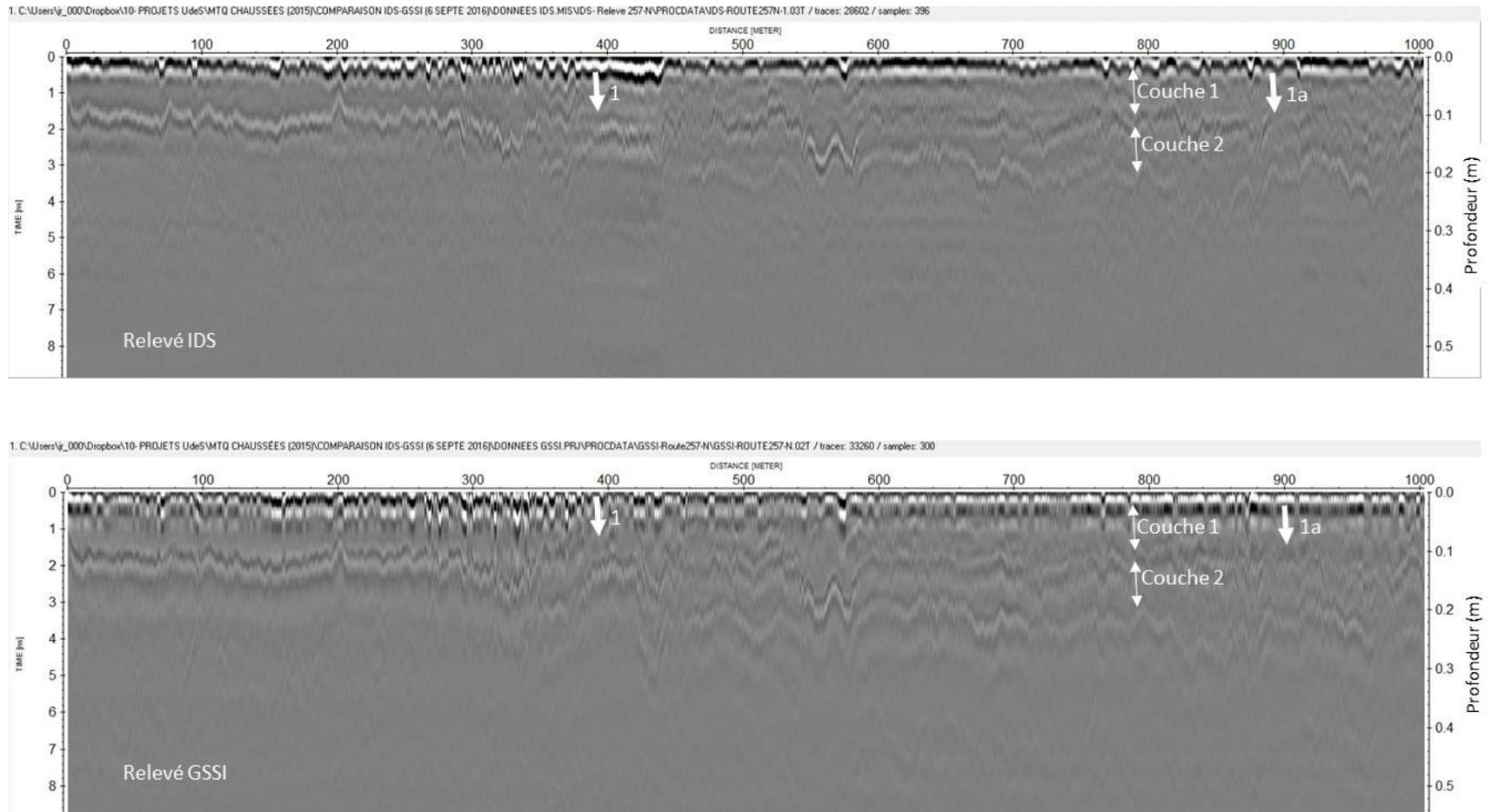


Figure 16a : Comparaison des relevés IDS et GSSI (route 257-N, chaînage : 0 m – 1000 m)

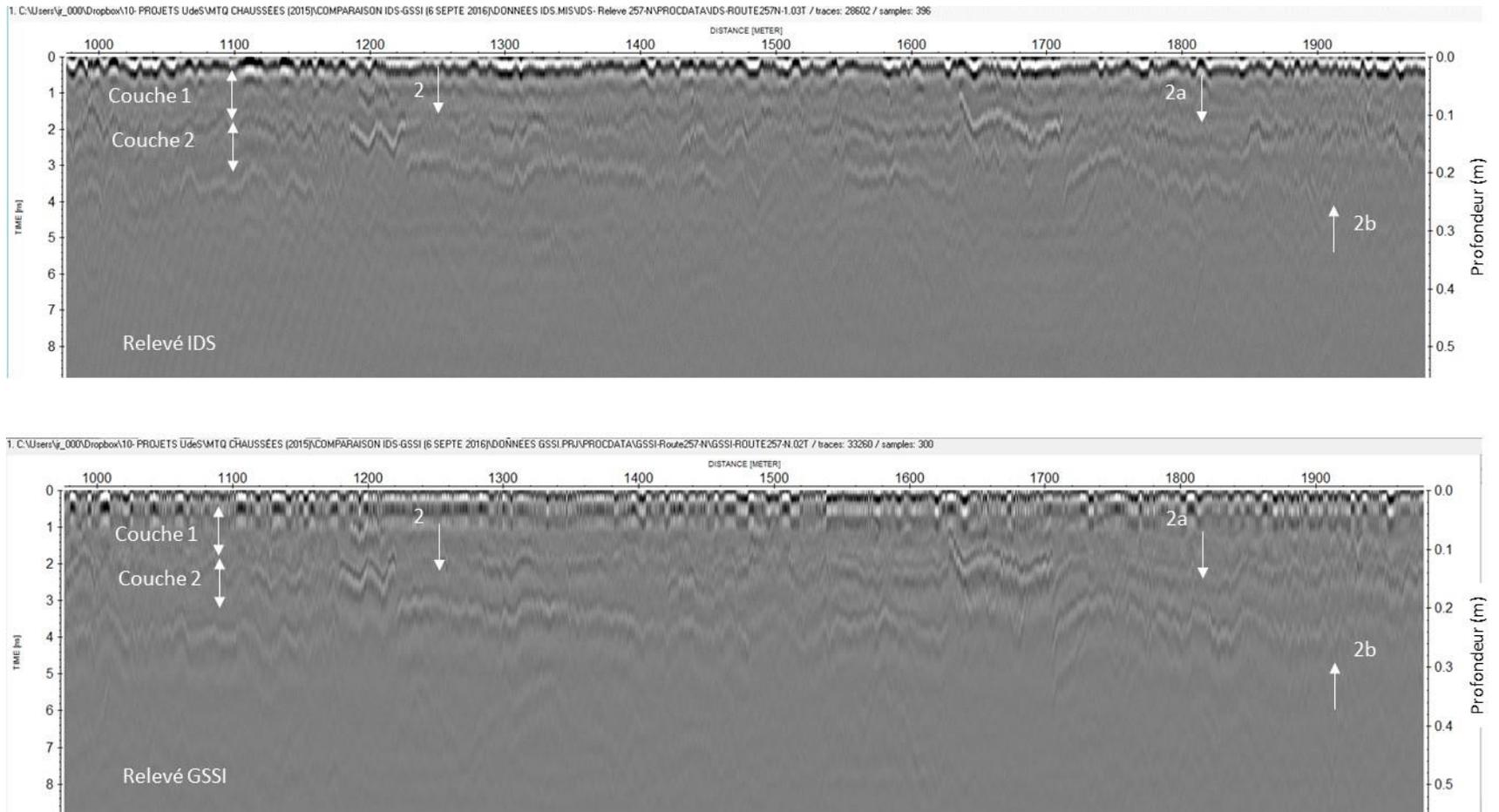


Figure 16b : Comparaison des relevés IDS et GSSI (route 257-N, chaînage : 980 m – 1980 m)

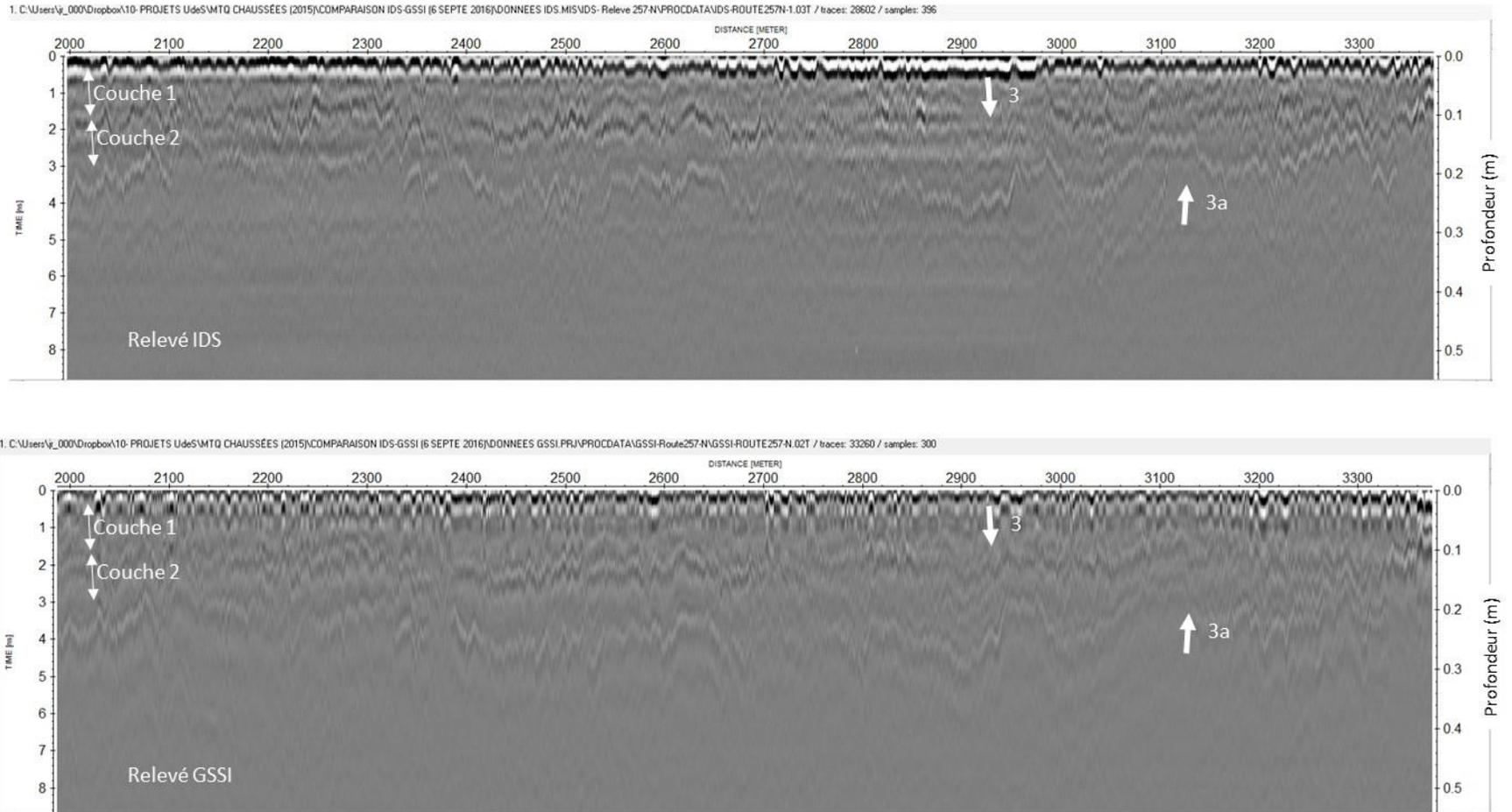


Figure 16c : Comparaison des relevés IDS et GSSI (route 257-N, chaînage : 1980 m – 3375 m)

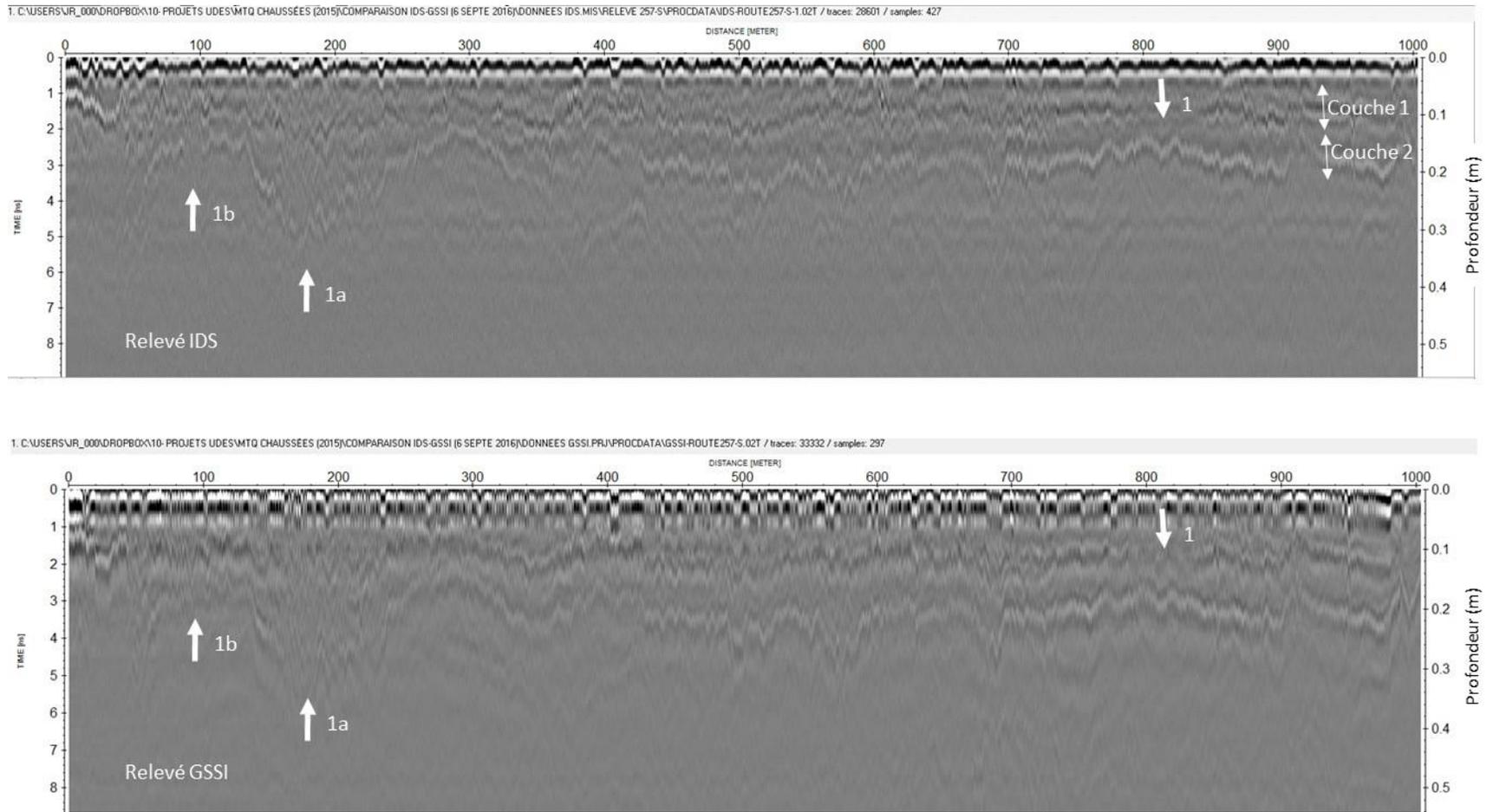


Figure 17a : Comparaison des relevés IDS et GSSI (route 257-S, chaînage : 0 m – 1000 m)

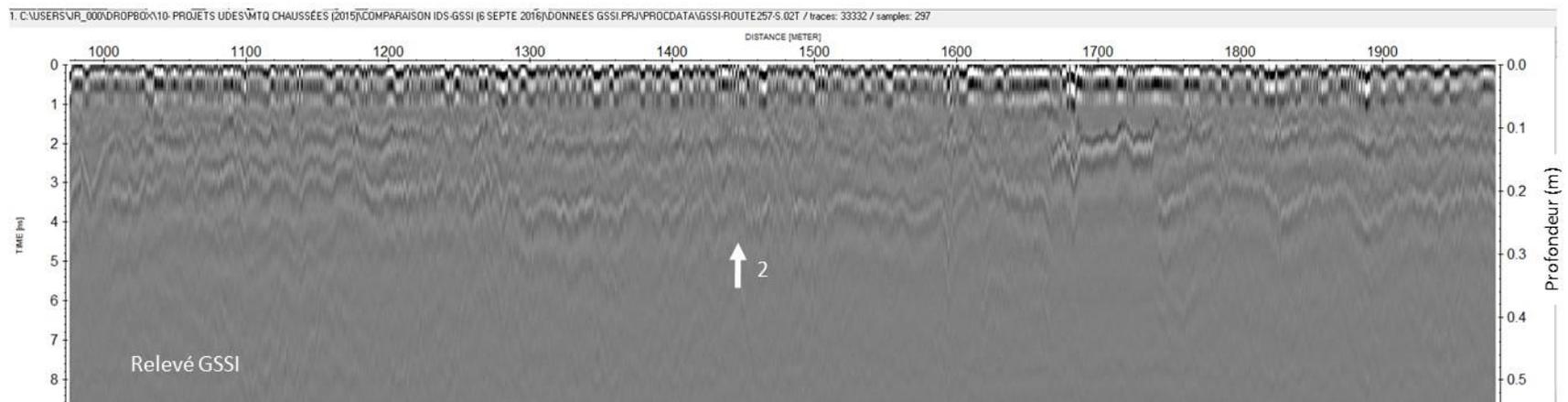
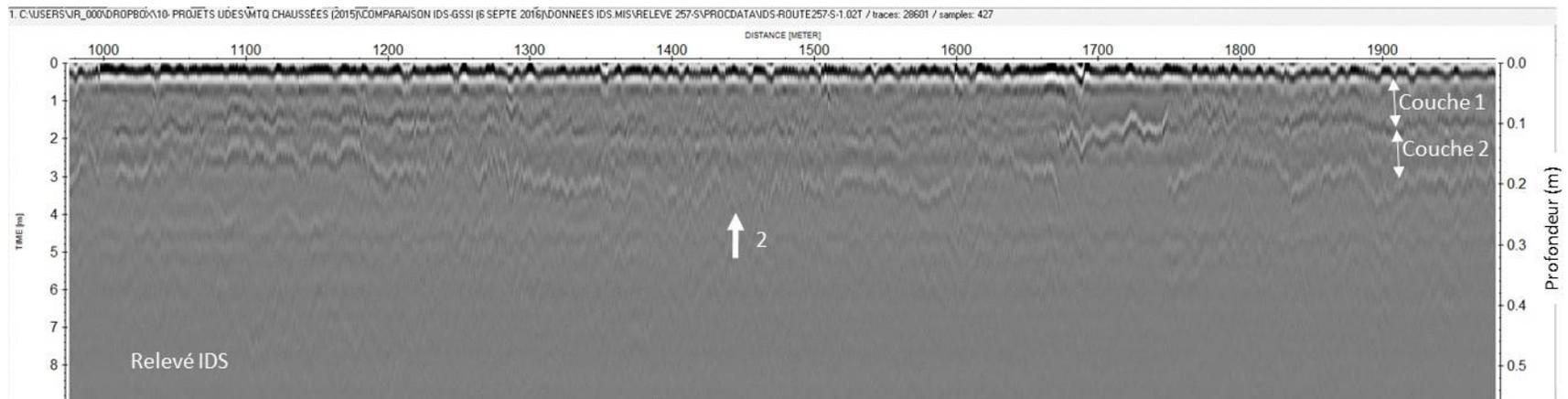


Figure 17b : Comparaison des relevés IDS et GSSI (route 257-S, chaînage : 980 m – 1980 m)

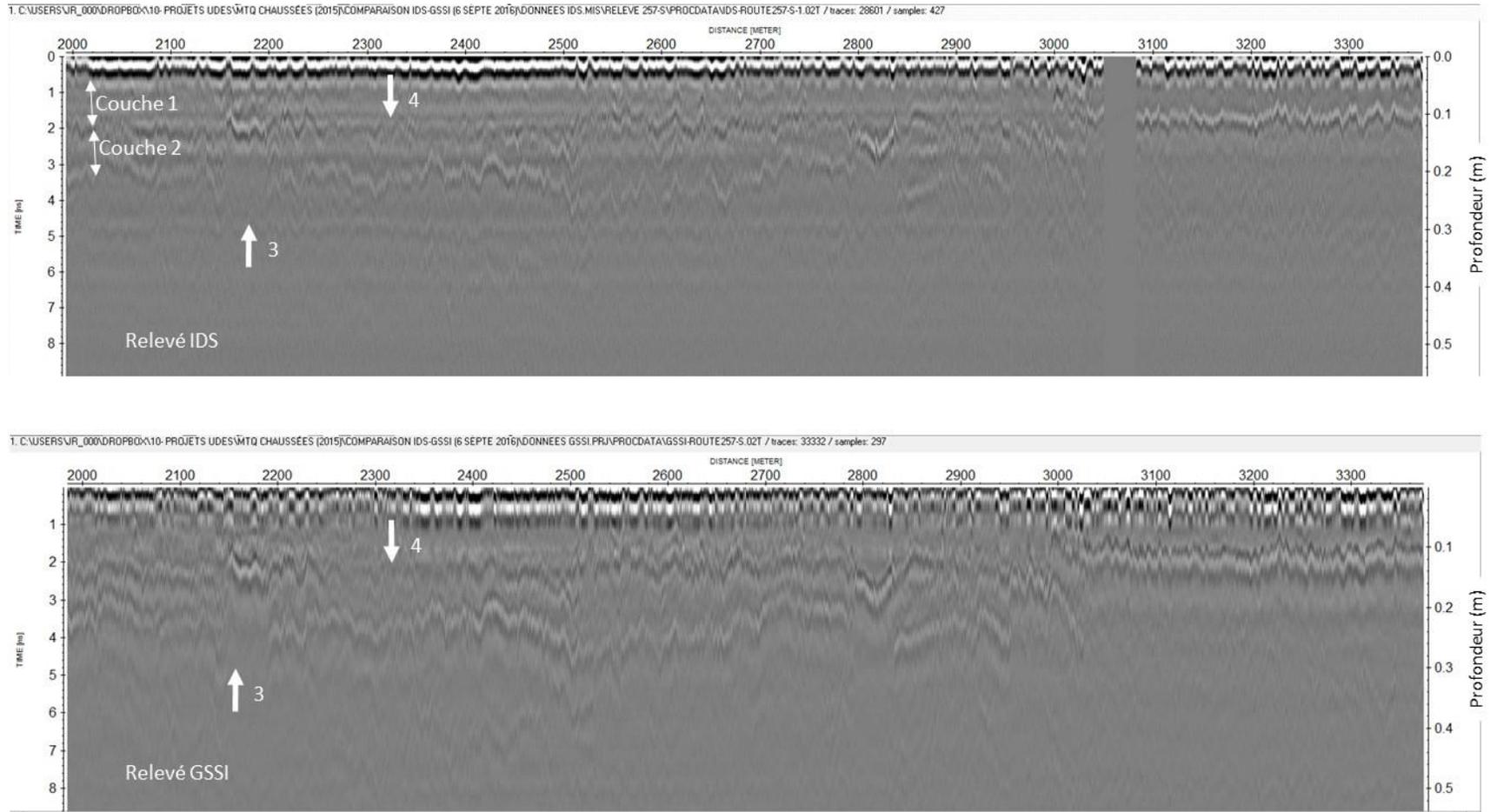


Figure 17c : Comparaison des relevés IDS et GSSI (route 257-S, chaînage : 2000 m – 3375 m)

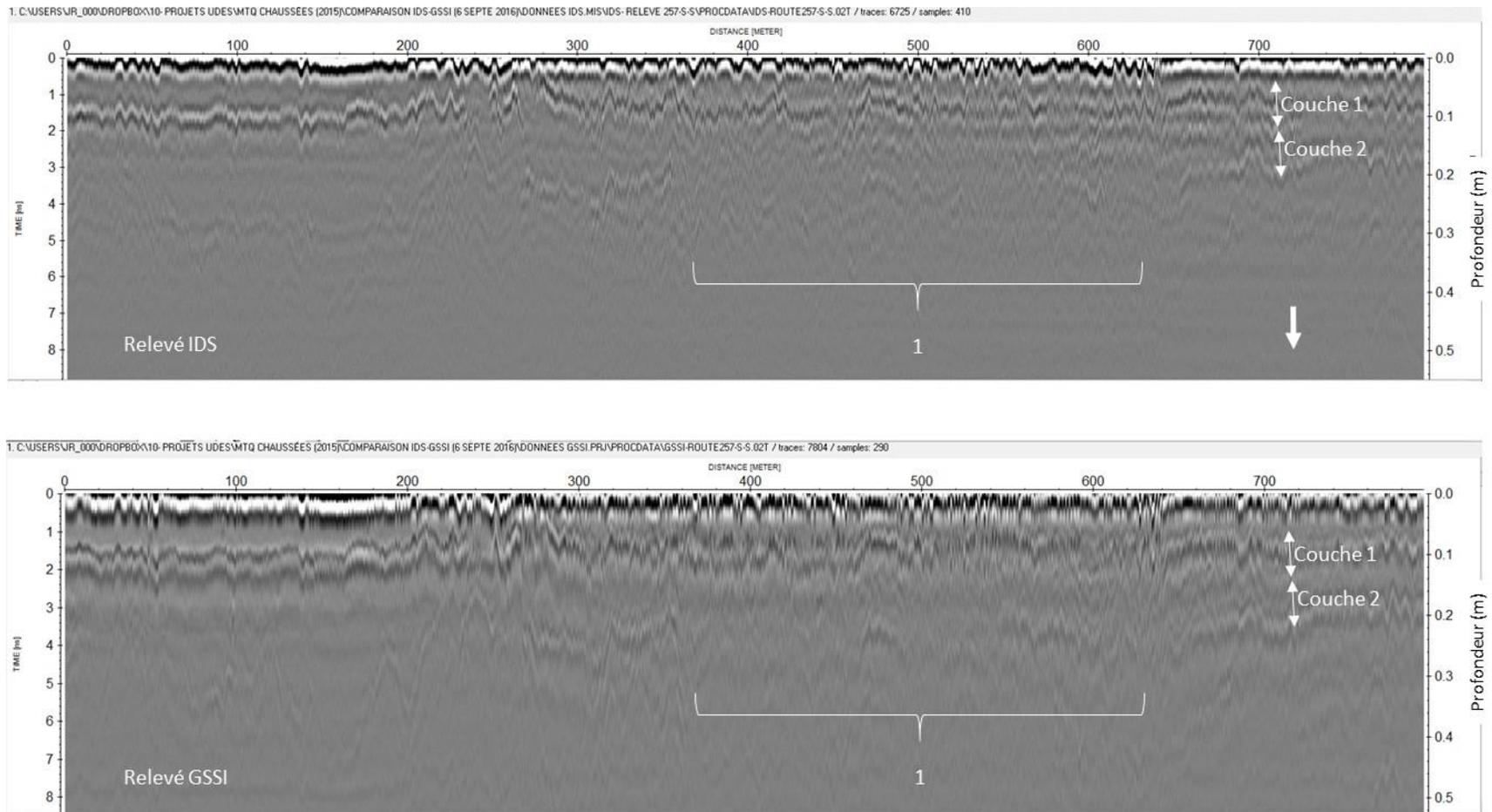


Figure 18 : Comparaison des relevés IDS et GSSI (route 257-SS, chaînage : 0 m – 793 m)

4.1.4 Comparaison avec le Géoradar IDS (antenne au sol de 2 GHz)

Les antennes Horn sont conçues pour fonctionner à une certaine distance de la surface du pavage (Figure 15), et elles offrent une bonne résolution pour les couches proches de la surface. Par contre, les antennes au sol nécessitent un contact avec le sol. Elles ont une moins bonne résolution pour les couches proches de la surface, mais permettent de sonder le sol sur de plus grandes profondeurs. L'épaisseur du revêtement bitumineux pouvant atteindre 20 cm à 30 cm, il nous a semblé pertinent de comparer la performance de ce type d'antenne à celle de l'antenne Horn.

Les figures 19a à 19c donnent les relevés collectés avec les deux antennes dans le cas de la route 257-N. Les résultats indiquent que la visibilité de l'interface entre les deux couches de pavage est meilleure avec l'antenne Horn (ex. figure 19a, chainage : 700 m à 900 m). Par ailleurs, la qualité de la visibilité de l'interface pavage-fondation est généralement comparable pour les 2 antennes.

4.1.5 Synthèse sur la qualité des relevés

Les relevés collectés avec le système IDS (antenne Horn de 2 GHz) et le système GSSI (antenne Horn de 2 GHz) sont comparables du point de vue de la qualité. La visibilité des interfaces (interface entre les couches de pavage, interface entre le pavage et la fondation) dans les relevés collectés avec le système GSSI n'est pas réellement meilleure par rapport au système IDS. Les relevés collectés avec l'antenne IDS Horn et l'antenne IDS couplée au sol sont également équivalents.

Il ressort de ce qui a été présenté ci-dessous que la performance des équipements ne peut pas expliquer totalement la mauvaise visibilité de l'interface entre le pavage et la fondation. Cette mauvaise visibilité est souvent causée par le faible contraste entre les propriétés diélectriques du pavage et de la fondation. Ce problème est rencontré essentiellement dans le cas des chaussées très anciennes.

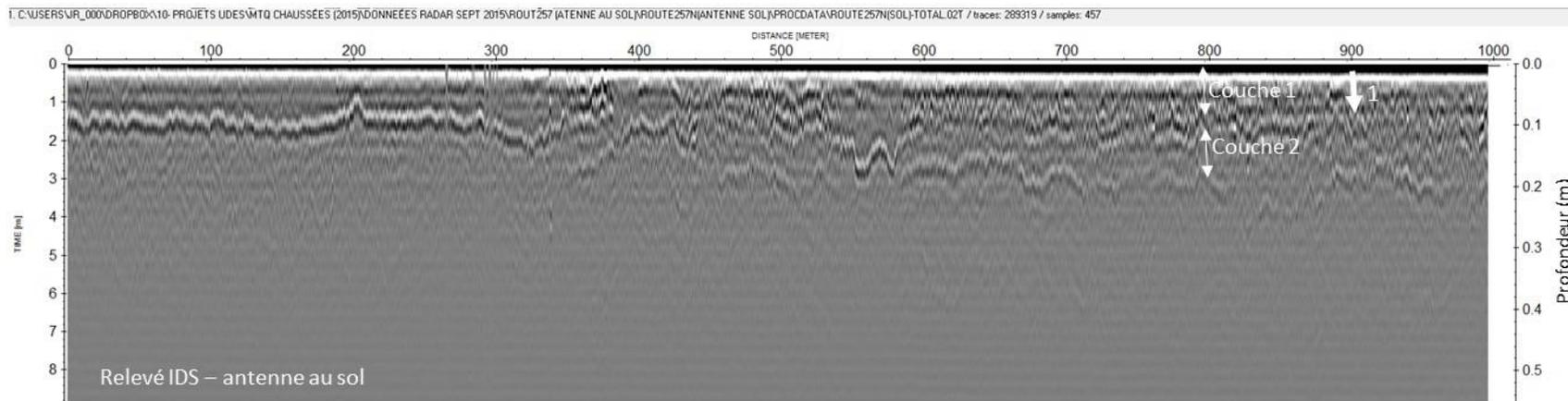
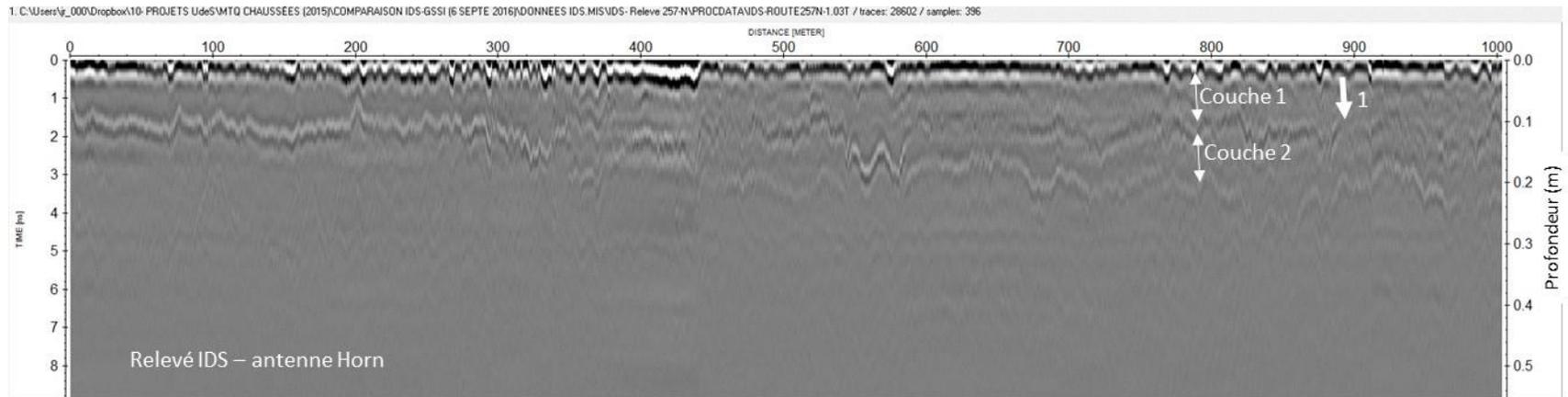


Figure 19a : Comparaison des relevés IDS (antennes Horn et couplé su sol) (route 257-N, chaînage : 0 m – 1000 m)

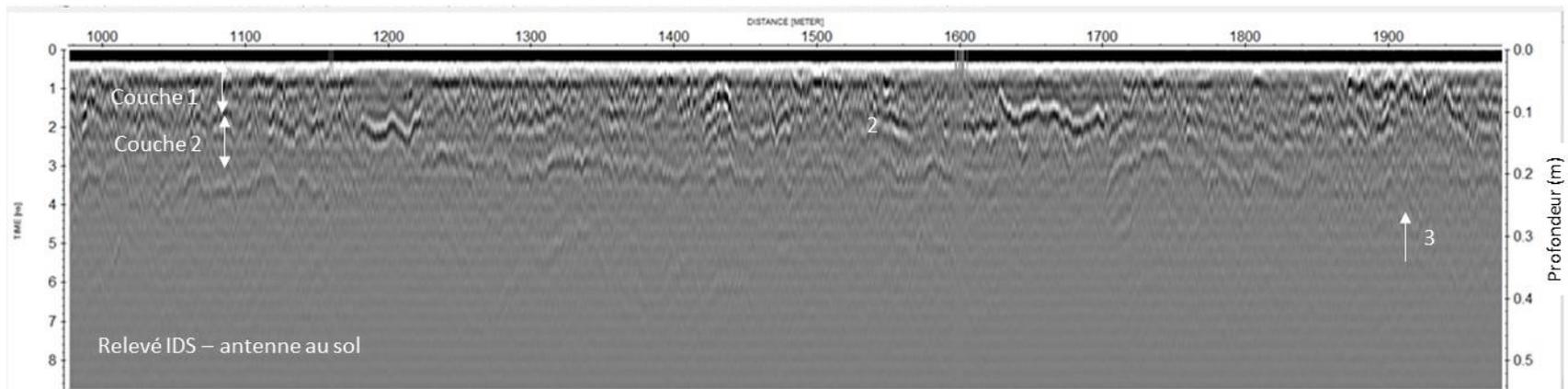
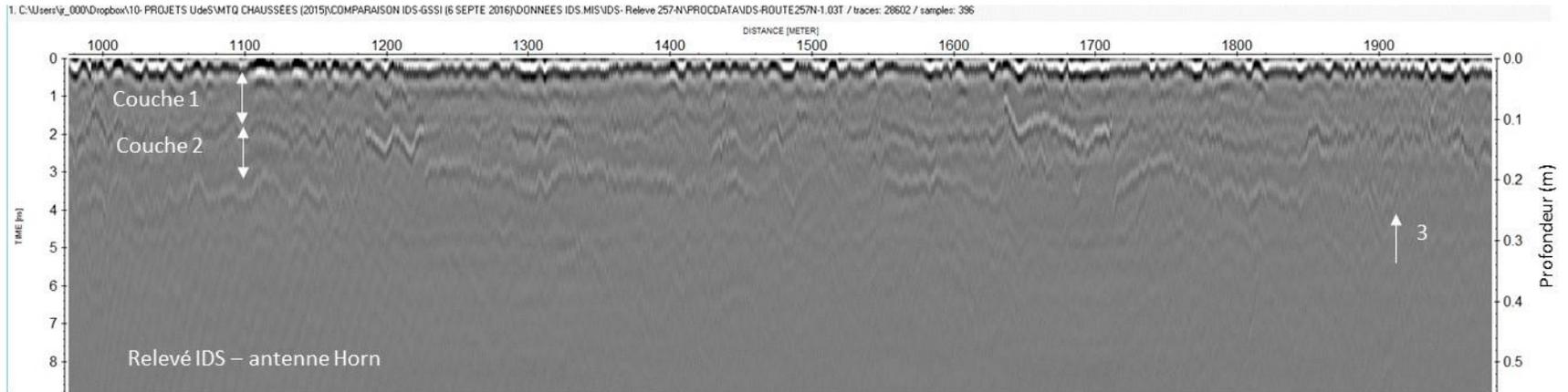


Figure 19b : Comparaison des relevés IDS (antennes Horn et couplé su sol) (route 257-N, chaînage : 980 m – 1980 m)

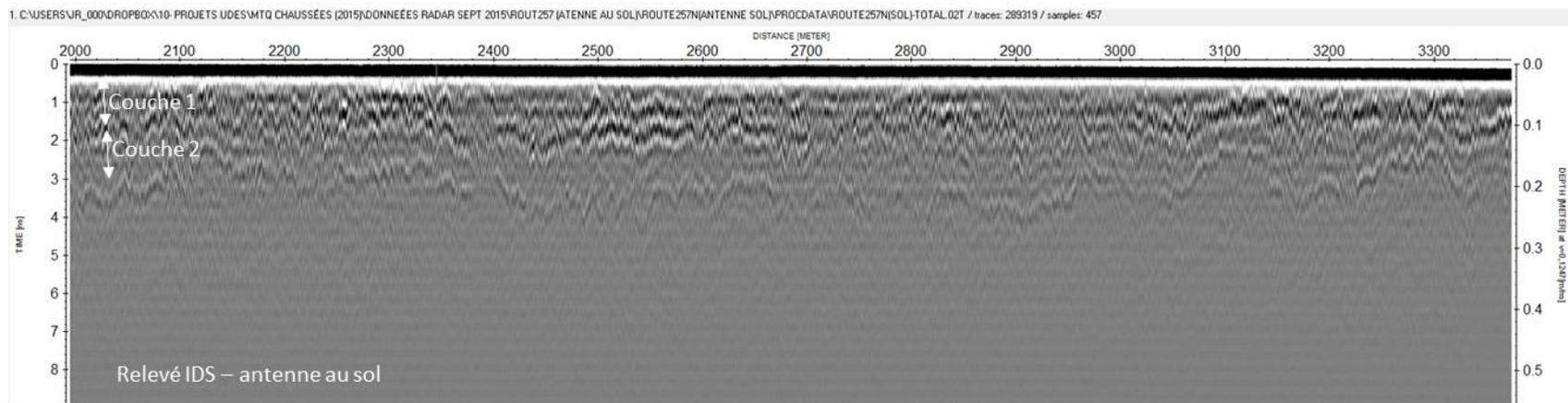
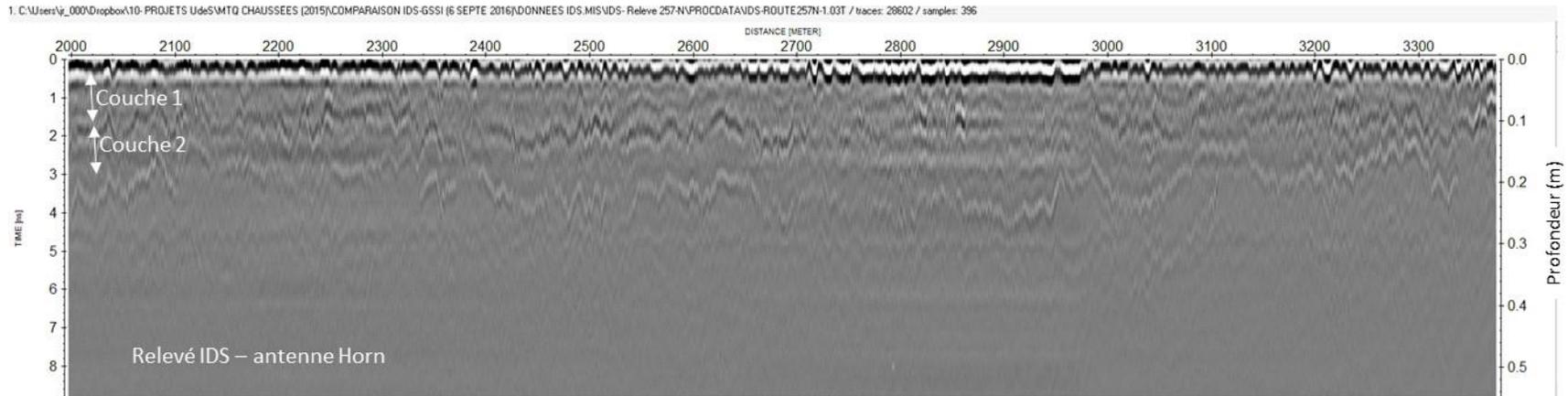


Figure 19c : Comparaison des relevés IDS (antennes Horn et couplé su sol) (route 257-N, chaînage : 2000 m – 3375 m)

En effet, au cours du temps, il se crée une continuité électrique à l'interface entre le revêtement bitumineux et la fondation. Les permittivités électriques des deux matériaux en place deviennent très similaires. Il en résulte que l'intensité de la réflexion des ondes à l'interface devient faible et donc difficilement visible sur les relevés.

Le problème de la visibilité de l'interface revêtement bitumineux-fondation n'est pas rencontré dans le cas des chaussées neuves ou assez récentes. La figure 20 ci-dessous donne l'exemple d'un relevé collecté sur la route 410 construite en 2013 en Estrie. La visibilité de l'interface revêtement bitumineux-fondation est clairement visible dans ce relevé.

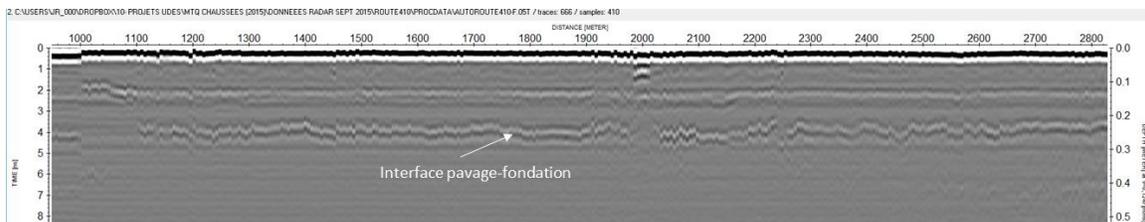


Figure 20 : Visibilité de l'interface revêtement bitumineux-fondation
Cas d'une chaussée neuve

L'annexe 2 donne les relevés collectés sur les sept (7) chaussées auscultées. La visibilité de l'interface revêtement bitumineux-fondation peut être décrite ainsi :

- Route 257 (Nord, Sud et Sud-Sud): Visibilité sur 90% du relevé
- Route 210 Ouest : Visibilité sur 30 % du relevé
- Route 108 Est et Ouest : Visibilité sur 4 % du relevé
- Route 147 Nord et Sud : Visibilité sur 1 % du relevé
- Route 410 Ouest : Visibilité sur 100% du relevé
- Route 255 Nord et Sud : Visibilité sur 30% du relevé
- Route 112 Ouest : Visibilité sur 1% du relevé

Il en ressort que la visibilité de l'interface revêtement bitumineux-fondation est faible sur la majorité des relevés collectés dans le cadre de ce projet.

4.2 Précision de la mesure des épaisseurs du revêtement bitumineux

Les relevés Géoradar indiquent le temps de propagation (Δt) aller-retour de l'onde électromagnétique entre la surface du revêtement bitumineux et l'interface entre ce revêtement et la fondation. L'échelle du temps (Δt) est ensuite transformée en échelle d'épaisseur (e) selon la relation suivante dans laquelle V est la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le revêtement. Cette vitesse V est fonction de la vitesse de propagation des ondes dans le vide ($C= 0,3 \text{ m/ns}$) et de la permittivité électrique relative ϵ_r (ou constante diélectrique relative) du revêtement bitumineux dont la valeur varie généralement entre 3 et 6 :

$$e = \frac{\Delta t \cdot V}{2} = \frac{\Delta t \cdot C}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

La vitesse de propagation dans le revêtement bitumineux (V) dépend principalement de la composition du revêtement, de sa porosité, de sa teneur en eau et de son état. Sa valeur doit être déterminée par calibration au moyen de carottages.

Dans le cadre de ce projet, l'évaluation de la précision de la mesure de l'épaisseur du revêtement bitumineux a été étudiée au moyen des relevés collectés sur la route 257 nord et Sud, ainsi que sur la route 255 nord et sud. Les relevés collectés sur ces chaussées sont assez bons du point de vue de la visibilité de l'interface revêtement bitumineux-fondation. De plus, des carottages ont été effectués sur ces chaussées (21 prélèvements de la route 257 et 23 prélèvements de la route 255) et l'on dispose des valeurs réelles de l'épaisseur du revêtement bitumineux.

4.2.1 Techniques et logiciels de mesure du temps de propagation Δt

Tel que indiqué ci-dessus, la mesure de l'épaisseur du revêtement bitumineux nécessite la connaissance du temps de propagation (Δt) aller-retour de l'onde électromagnétique entre la surface du revêtement bitumineux et l'interface entre ce revêtement et la fondation (Figure 21). Ceci est réalisé à l'aide de logiciels dédiés à ce type de traitement selon deux approches. La première (Figure 21a) consiste à mesurer le temps d'arrivée des réflexions sur la surface du pavage (t_1), sur l'interface revêtement-fondation (t_2) et de faire ensuite

la différence entre ces mesures ($\Delta t = t_2 - t_1$). La deuxième approche consiste à positionner l'arrivée des réflexions sur la surface du revêtement au temps $t_1 = 0$, et de mesurer ensuite le temps d'arrivée des réflexions sur l'interface revêtement-fondation (t_2). Le temps de propagation dans le revêtement (Δt) est alors égal à t_2 .

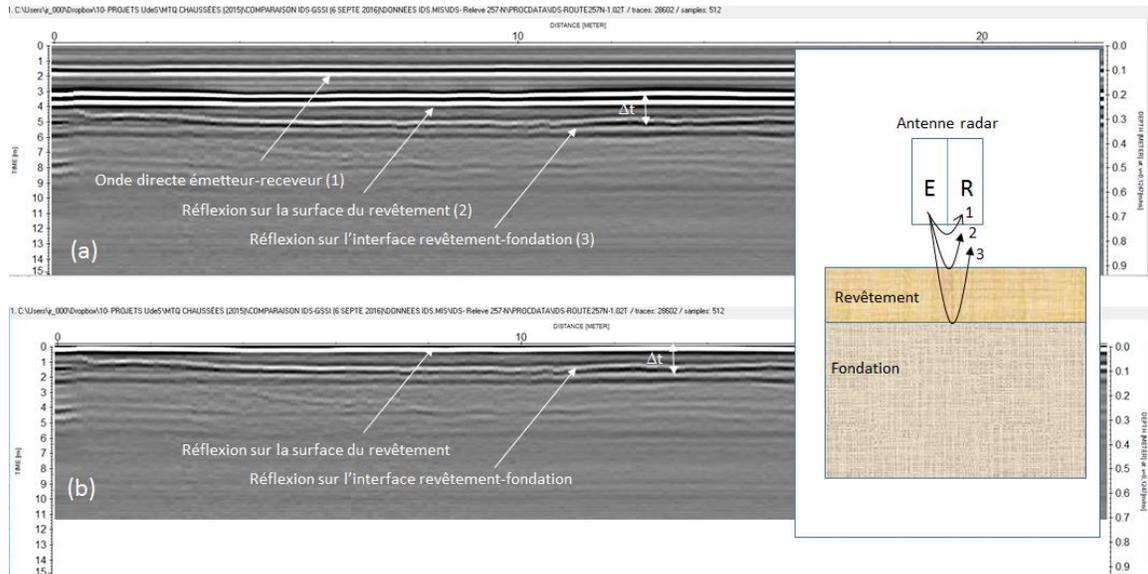


Figure 21 : Mesure de la durée de propagation dans le revêtement bitumineux (a) sur relevé brut avec onde directe et (b) sur relevé redressé (sans onde directe)

La mesure des temps de propagation sur les relevés peut être effectuée de manière manuelle ou de manière automatisée. Dans le 1^{er} cas, l'opérateur indique lui-même sur le relevé l'arrivée des réflexions au moyen du déplacement continu du curseur sur le relevé. Dans le 2^{ème} cas, l'opérateur indique à l'aide du curseur l'arrivée des réflexions, et le logiciel trace ensuite cette interface tout le long du relevé. Cette dernière possibilité donne de bons résultats uniquement dans le cas où les interfaces sont très bien visibles sur les relevés. Il est résulté que les mesures manuelles sont les plus utilisées.

Le MTQ utilise le logiciel *GRED* de traitement de données fourni par le fabricant de l'équipement Géoradar, soit la compagnie *IDSNA*. Ce logiciel n'offre pas beaucoup de possibilités d'analyse et de traitement des données. Pour pallier à ces limitations, Le MTQ a également acquis un logiciel de traitement commercialisé par *Sandmeir Geophysical Research*, soit le logiciel *ReflexW*. Un manuel simplifié d'utilisation de ce logiciel a été rédigé et une présentation orale concernant son utilisation a été effectuée dans le cadre de ce projet.

4.2.2 Résultats des mesures sur la route 257

Les résultats des mesures de l'épaisseur du revêtement bitumineux pour la route 257 sont indiqués sur la figure 22 ci-dessous. La figure 22a est relative à la direction Nord, et la figure 22b à la direction Sud. Dans les deux cas, le chainage 0 m est situé à l'intersection entre les routes 257 et 210 (Figure 14). La position des carottes est également indiquée sur la figure 22.

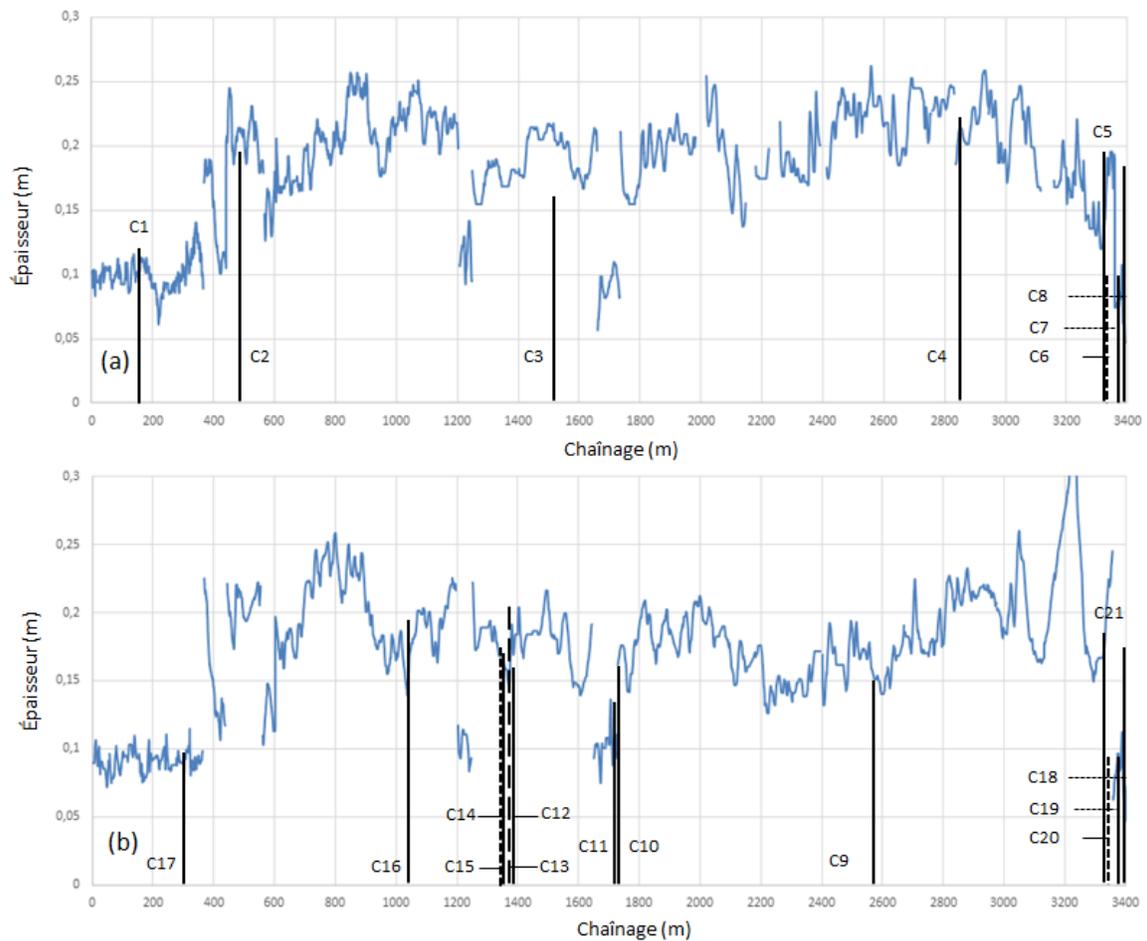


Figure 22 : Résultats des mesures de l'épaisseur du revêtement bitumineux Route 257 directions Nord (a) et Sud (b)

La détermination de la valeur de la vitesse de propagation dans le revêtement bitumineux a été effectuée en se basant uniquement sur les épaisseurs des carottes C1 et C2 car l'interface revêtement-fondation est bien visible sur les relevés aux endroits où ces carottes ont été prélevées de la chaussée. Dans le cas de la carotte C1 (épaisseur : 120

mm), la vitesse est de 0,1250 m/ns, et dans le cas de la carotte C2 (épaisseur : 195 mm), la vitesse est de 0,106 m/ns. La vitesse moyenne pour ces deux carottes est de 0,1155 m/ns. C'est cette vitesse qui a ensuite été utilisée pour estimer les épaisseurs indiquées au tableau 1 ci-dessous du revêtement bitumineux des deux chaussées (257 nord et sud). L'annexe 1 donne la position des carottes du tableau 1 dans les relevés.

TABLEAU 1 : ESTIMATION DES ÉPAISSEURS POUR LA ROUTE 257

Nro de la carotte	Chaînage (m)	Épaisseur réelle (m)	Épaisseur estimée IDS (m)	Épaisseur estimée GSSI (m)
257 direction NORD				
C1	160	0,12	0,11	0,108
C2	480	0,195	0,21	0,188
C3	1540	0,16	0,20	0,209
C4	2850	0,215	0,21	0,231
C5	3349	0,19	0,19	0,177
C6	3351	0,1	0,18	0,177
C7	3389	0,1	0,06	0,071
C8	3395	0,185	0,06	0,078
257 direction SUD				
C9	2590	0,15	0,14	0,177
C10	1770	0,16	0,15	0,201
C11	1700	0,135	0,10	0,128
C12	1395	0,16	0,18	0,199
C13	1389	0,21	0,17	0,201
C14	1351	0,17	0,16	0,18
C15	1349	0,175	0,16	0,171
C16	1040	0,195	0,15	0,212
C17	308	0,1	0,09	0,094
C18	3395	0,195	0,06	0,070
C19	3389	0,09	0,10	0,080
C20	3351	0,085	0,23	0,309
C21	3349	0,25	0,22	0,278
Remarque : le 0 m du chaînage (direction Nord et Sud) est à l'intersection entre les routes 257 et 210				

La figure 23 ci-dessous donne la corrélation entre les épaisseurs réelles et les épaisseurs estimées pour la route 257-Nord et Sud. Si l'on ne prend pas en considération les estimations qui s'écartent le plus des valeurs réelles (carottes C6, C8, C18 et C20), la moyenne des écarts individuels entre les épaisseurs réelles et estimées est de 12,4%.

Les écarts entre les estimations de l'épaisseur du revêtement bitumineux et les valeurs réelles de ces épaisseurs peuvent être attribués aux facteurs suivants :

- Les erreurs sur les chainages : le positionnement de l'emplacement des carottes sur les relevés est approximatif. Idéalement, pour chaque carottage, il faudrait indiquer sur le revêtement l'endroit exact choisi pour le carottage, effectuer ensuite un relevé passant exactement par cet endroit, et enfin effectuer le carottage.
- la précision de l'identification de l'interface revêtement-fondation
- la variation de la vitesse de propagation le long de la chaussée : les revêtements bitumineux des chaussées ne sont pas homogènes et leurs propriétés diélectriques varient dans le sens de la longueur et dans le sens de la profondeur (ex. cas où les chaussées subissent des surfaçages).

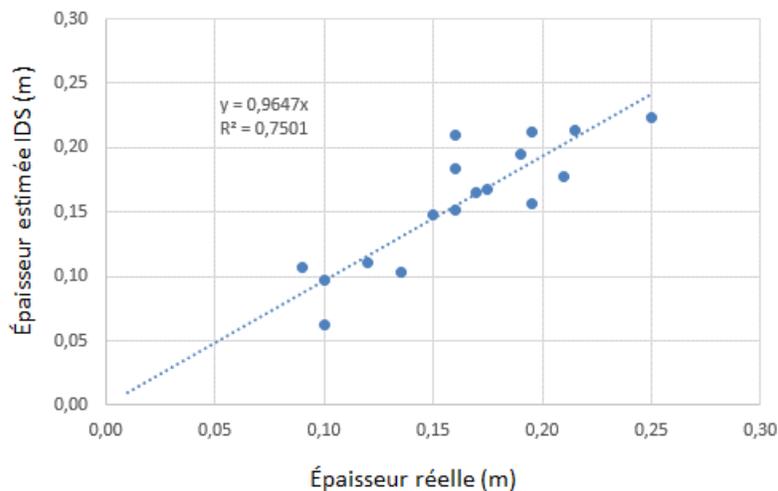


Figure 23 : Corrélation entre les épaisseurs estimées et les épaisseurs réelles (Système IDS)

La figure 24 ci-dessous donne la corrélation entre les épaisseurs réelles et les épaisseurs estimées pour la route 257-Nord et Sud dans le cas des relevés collectés avec le système GSSI. Si l'on ne prend pas en considération les estimations qui s'écartent le plus des valeurs réelles (carottes C6, C8, C18 et C20), la moyenne des écarts individuels entre les épaisseurs réelles et les épaisseurs estimées est également de 12,4%.

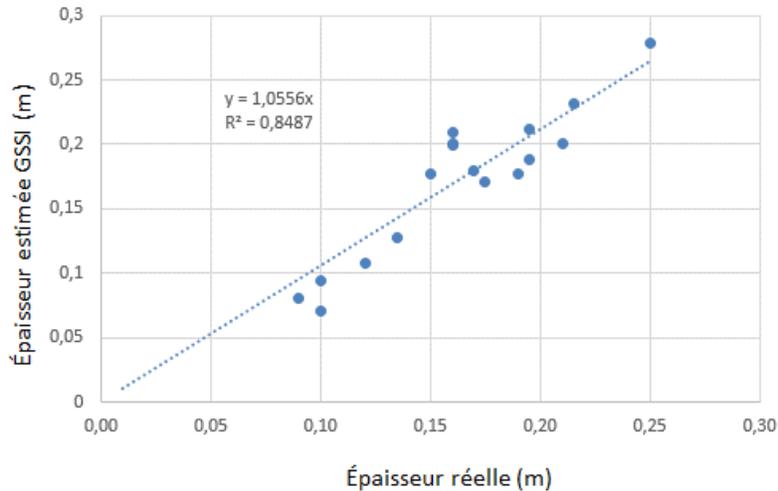


Figure 24 : Corrélation entre les épaisseurs estimées et les épaisseurs réelles (Système GSSI)

4.2.2 Résultats des mesures sur la route 255

Les résultats des mesures de l'épaisseur du revêtement bitumineux pour la route 255 sont indiqués sur la figure 25 ci-dessous. La figure 25a est relative à la direction Nord, et la figure 25b à la direction Sud. La position des carottes est également indiquée sur la figure 25.

La détermination de la valeur de la vitesse de propagation dans le revêtement bitumineux a été effectuée en se basant sur les épaisseurs des carottes C8, C9 et C21 car l'interface revêtement-fondation est bien visible sur les relevés aux endroits où ces carottes ont été prélevées de la chaussée. Dans le cas de la carotte C8 (épaisseur : 253 mm), la vitesse est de 0,1262 m/ns, dans le cas de la carotte C9 (épaisseur : 210 mm), la vitesse est de 0,1238 m/ns, et dans le cas de la carotte C21 (épaisseur : 220 mm), la vitesse est de 0,1242 m/ns. La vitesse moyenne pour ces trois carottes est de 0,1274 m/ns. C'est cette vitesse qui a ensuite été utilisée pour estimer les épaisseurs indiquées au tableau 2 ci-dessous du revêtement bitumineux des deux chaussées (255 nord et sud). L'annexe 2 donne la position des carottes du tableau 2 dans les relevés.

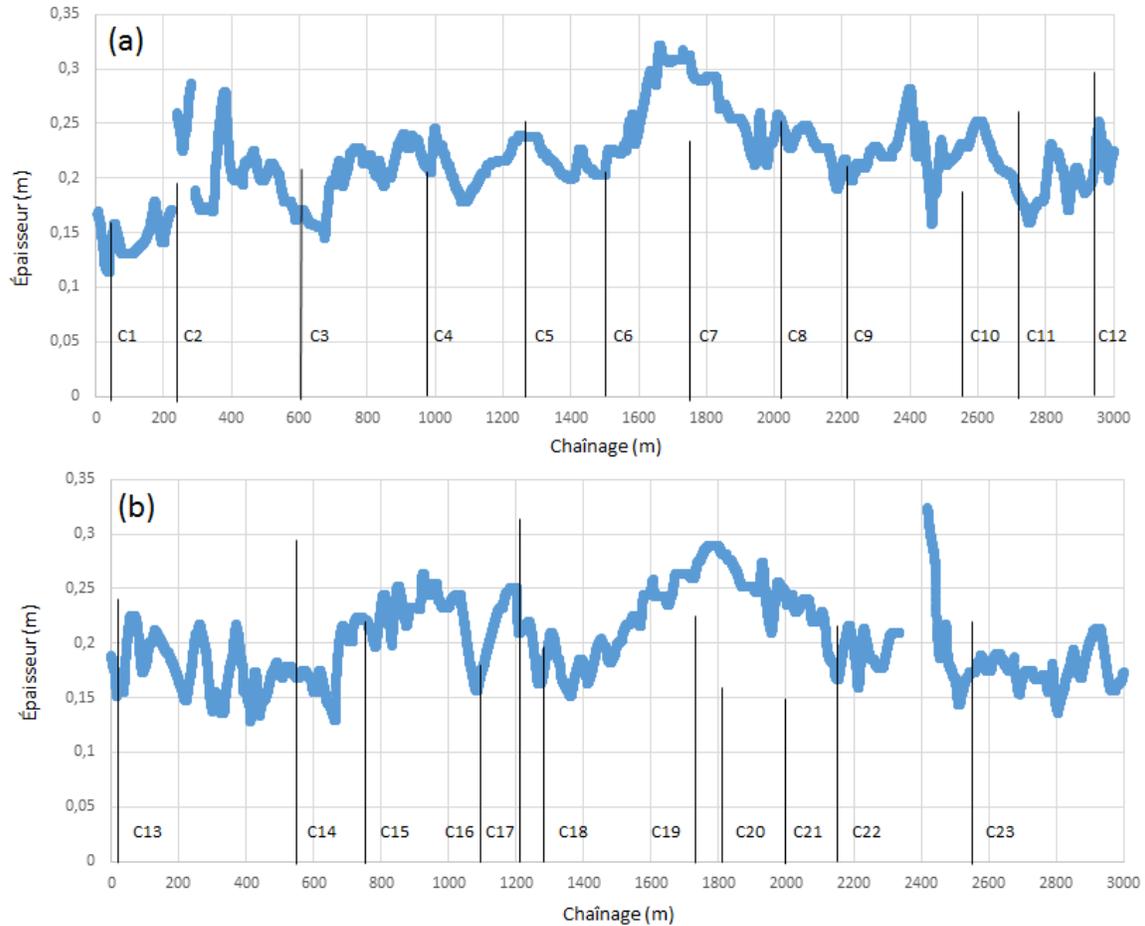


Figure 25 : Résultats des mesures de l'épaisseur du revêtement bitumineux Route 255 directions Nord (a) et Sud (b)

La figure 26 ci-dessous donne la corrélation entre les épaisseurs réelles et les épaisseurs estimées pour la route 255-Nord et Sud. La moyenne des écarts individuels entre les épaisseurs réelles et estimées est de 20 %. Si l'on ne considère que les données de la voie nord, cet écart est de 13%. Il est de 28% dans le cas de la voie sud.

Les écarts entre les estimations de l'épaisseur du revêtement bitumineux et les valeurs réelles de ces épaisseurs peuvent être attribués aux facteurs mentionnés plus haut. Ceci pourrait expliquer les grandes imprécisions observées par exemple dans le cas des carottes C11, C12, C14 et C17.

TABLEAU 2 : ESTIMATION DES ÉPAISSEURS POUR LA ROUTE 255

Numéro de la carotte	Chainage MTQ	Chainage Géoradar	Épaisseur Réelle (m)	Épaisseur estimée (m)
255 direction NORD				
C1	9+900	50	0,160	0,148
C2	10+100	250	0,195	0,239
C3	10+455	605	0,210	0,171
C4	10+825	975	0,205	0,210
C5	111+110	1260	0,250	0,237
C6	11+350	1500	0,205	0,203
C7	11+360	1780	0,235	0,289
C8	11+870	2020	0,253	0,252
C9	12+061	2211	0,210	0,211
C10	12+410	2560	0,185	0,230
C11	12+570	2720	0,260	0,183
C12	0+208	2950	0,295	0,238

255 direction SUD				
C13	12+400	2550	0,220	0,186
C14	12+000	2150	0,215	0,168
C15	11+850	2000	0,150	0,239
C16	11+660	1810	0,160	0,282
C17	11+580	1730	0,225	0,263
C18	11+130	1280	0,195	0,171
C19	11+065	1215	0,315	0,211
C20	10+950	1100	0,180	0,176
C21	10+600	750	0,220	0,221
C22	10+400	550	0,295	0,168
C23	9+870	20	0,240	0,170

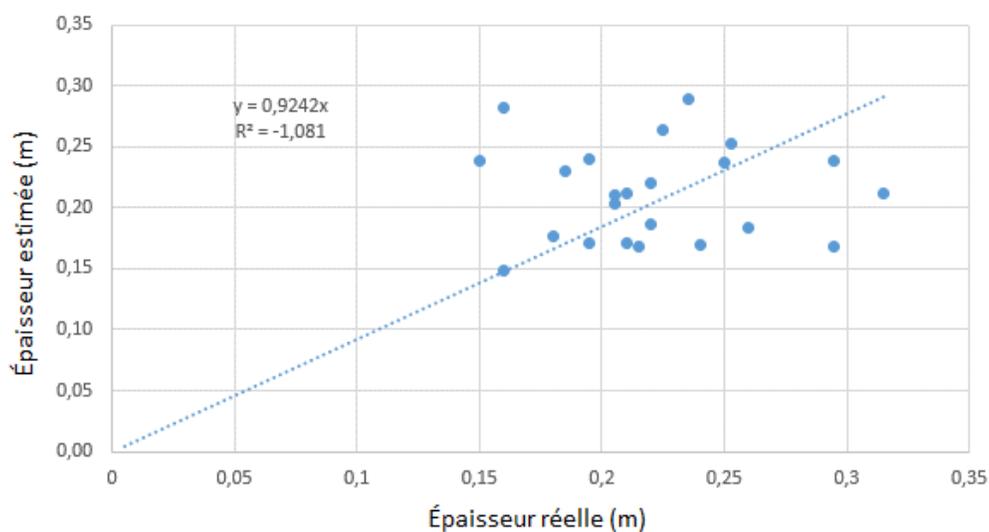


Figure 26 : Corrélation entre les épaisseurs estimées et les épaisseurs réelles

5. CONCLUSIONS

Les conclusions de cette étude sont les suivantes :

- Trois caractéristiques techniques du Georadar ne semblent pas satisfaire les critères spécifiés dans la norme ASTM ASTM D4748 - *10 Standard Test Method for Determining the Thickness of Bound Pavement Layers Using Short-Pulse Radar*. Il s'agit du rapport signal/bruit, ainsi que la stabilité du signal à court et à long terme. Ceci peut avoir une incidence sur la qualité des relevés.
- Les relevés collectés avec le Georadar IDS sont comparables du point de vue de la qualité à ceux collectés avec le Georadar GSSI.
- L'identification de l'interface entre le revêtement bitumineux et la fondation n'est pas toujours aisée, particulièrement dans le cas des chaussées très anciennes. Ce problème est causé par un faible contraste entre les propriétés diélectriques du revêtement et de la fondation.
- Le traitement automatique des données au moyen de logiciels spécialisés n'est fiable que lorsque la visibilité de l'interface revêtement-fondation est très bonne. Dans tous les cas, le jugement de l'opérateur demeure primordial.
- La précision de l'estimation de l'épaisseur du revêtement bitumineux dépend fortement de la connaissance de la valeur de la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le revêtement. Malheureusement, cette valeur varie d'un site à un autre et pour différentes raisons (ex. composition du revêtement, son âge, son état de dégradation, réparations). La moyenne des écarts individuels entre les épaisseurs réelles et estimées obtenues dans le cadre de ce projet est de l'ordre de 13%.
- Il est important de confirmer les épaisseurs à l'aide de carottages étant donné que certains écarts importants (plus de 50%) ont été aperçus en certains endroits.

6. RECOMMANDATIONS

Il ressort des conclusions de l'étude menée dans le cadre de ce projet que les aspects suivants doivent être considérés pour une meilleure exploitation de la technologie Géoradar en ce qui concerne l'estimation de l'épaisseur du revêtement bitumineux :

- Les relevés collectés sur une chaussée comportant une partie neuve et une partie ancienne doivent être dissociés et analysés séparément car les revêtements bitumineux de ces chaussées ont des propriétés différentes et donc des vitesses de propagation des ondes électromagnétiques différentes. Cette recommandation concerne aussi les chaussées anciennes comportant des parties réparées (resurfaçage).
- La mauvaise visibilité dans les relevés Géoradar de l'interface revêtement bitumineux-fondation limite de façon significative l'usage de la technique Georadar en ce qui concerne l'estimation des épaisseurs du revêtement bitumineux. Il est fortement recommandé d'identifier des solutions permettant de s'affranchir durablement de cet obstacle majeur à l'utilisation de cette technologie sur tout le réseau routier. Dans le cas des chaussées anciennes, la collecte des données avec un système doté de 2 antennes séparées devrait être étudiée, de même que l'utilisation d'une antenne au sol de fréquence moyenne (autour de 1 GHz). La possibilité d'installation d'un enduit (ou d'une membrane) à la surface de la fondation pourrait être envisagée pour résoudre ce problème de façon permanente. Cette enduit (ou membrane) devrait avoir des propriétés diélectriques nettement différentes de celle de la fondation. L'incorporation d'un produit dans la formulation du béton bitumineux pour augmenter le contraste diélectrique entre le revêtement et la fondation semble également constituer une alternative pertinente.

Il est à préciser que la technologie Géoradar offre d'autres applications intéressantes à considérer car elles sont reliées à l'évaluation de l'état des chaussées anciennes et au contrôle de la qualité des chaussées neuves, notamment pour :

- évaluer de la variation de la densité du revêtement bitumineux

- évaluer la présence de vides entre différentes couches du revêtement, et entre le revêtement et la fondation
- détecter la présence d'humidité entre le revêtement et la fondation
- évaluer l'espacement et le recouvrement des armatures, et détecter les vides dans le béton dans le cas des chaussées en béton de ciment

L'équipement Géoradar actuel du MTQ permet de réaliser ces applications.

Remerciements

Nous remercions messieurs Denis Saint-Laurent et Roger Lavallée du service des chaussées du MTQ pour leur collaboration au bon déroulement de ce projet de recherche.

Annexe 1

Position des carottages sur les relevés Géoradar de la route 257

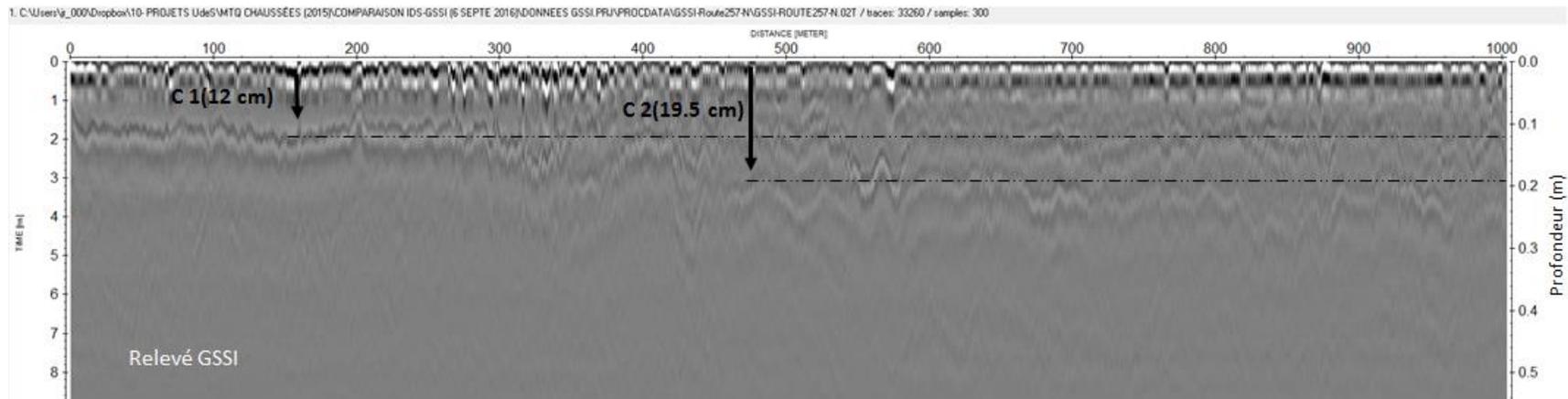
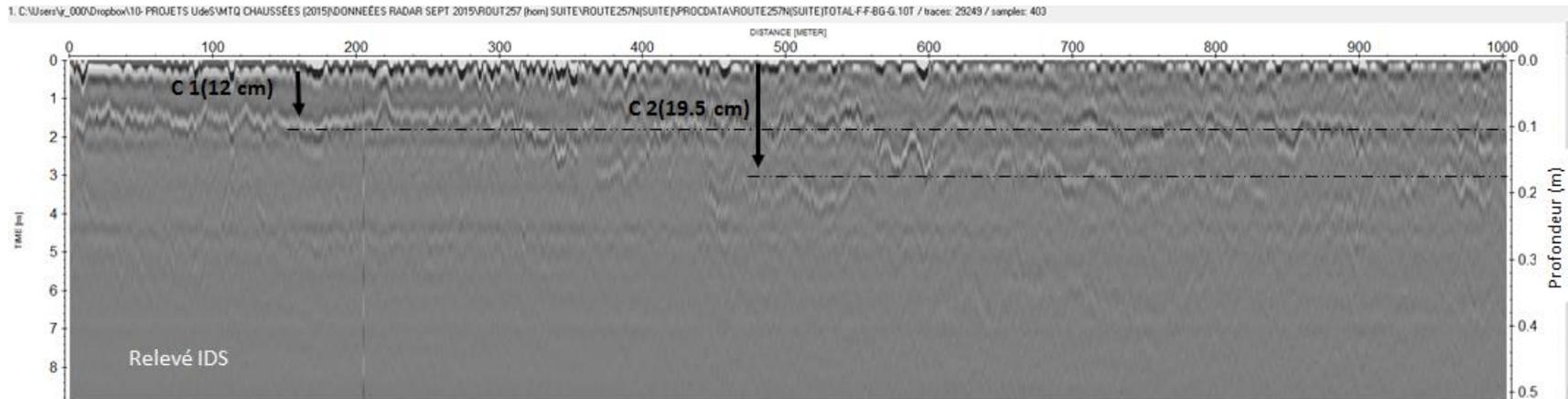


Figure A1-1 : Route 257 direction nord

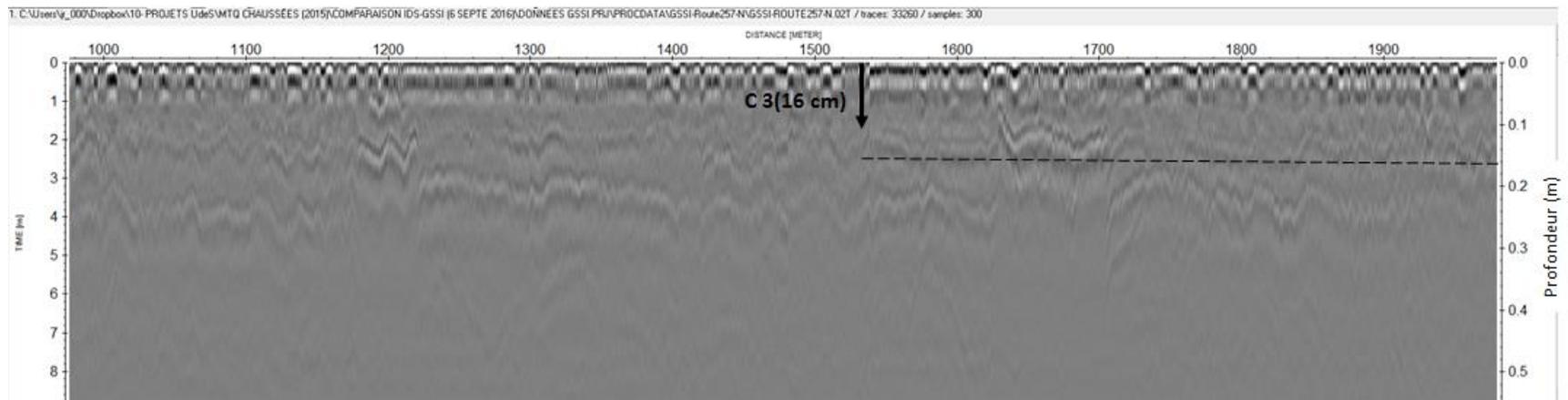
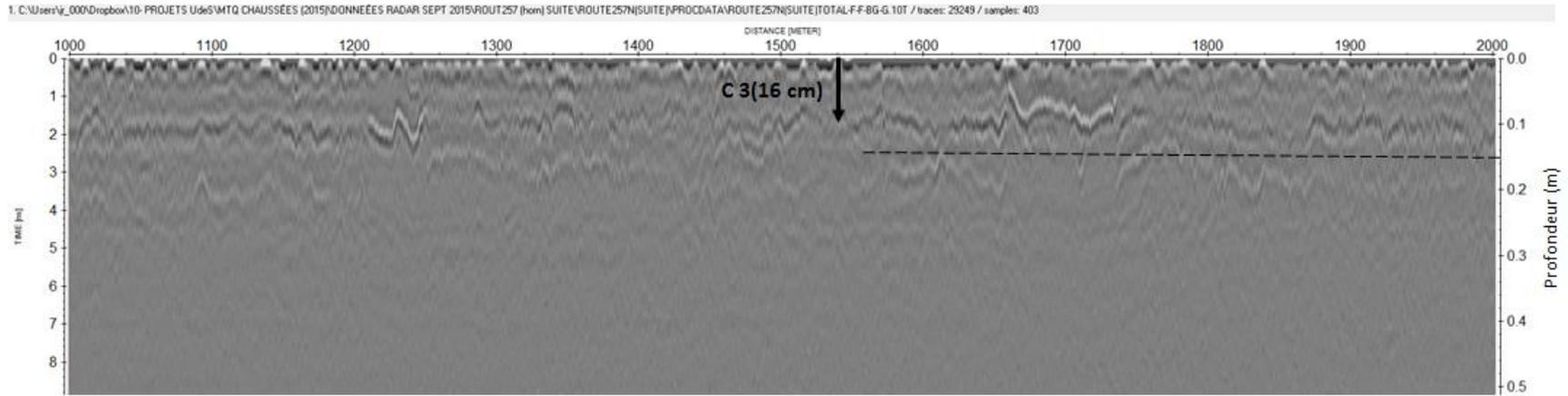


Figure A1-2 : Route 257 direction nord (suite 1)

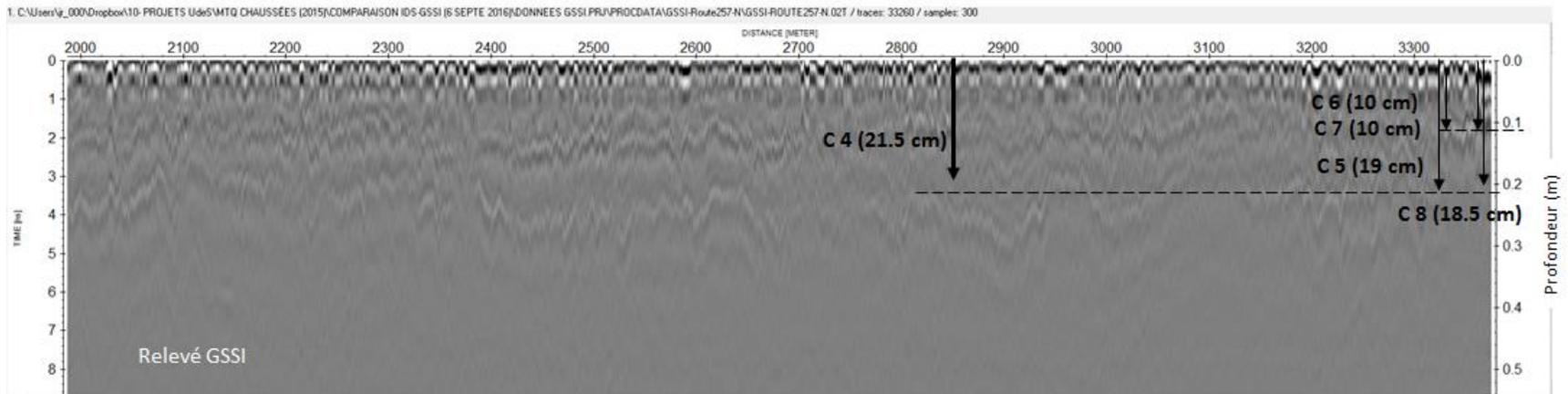
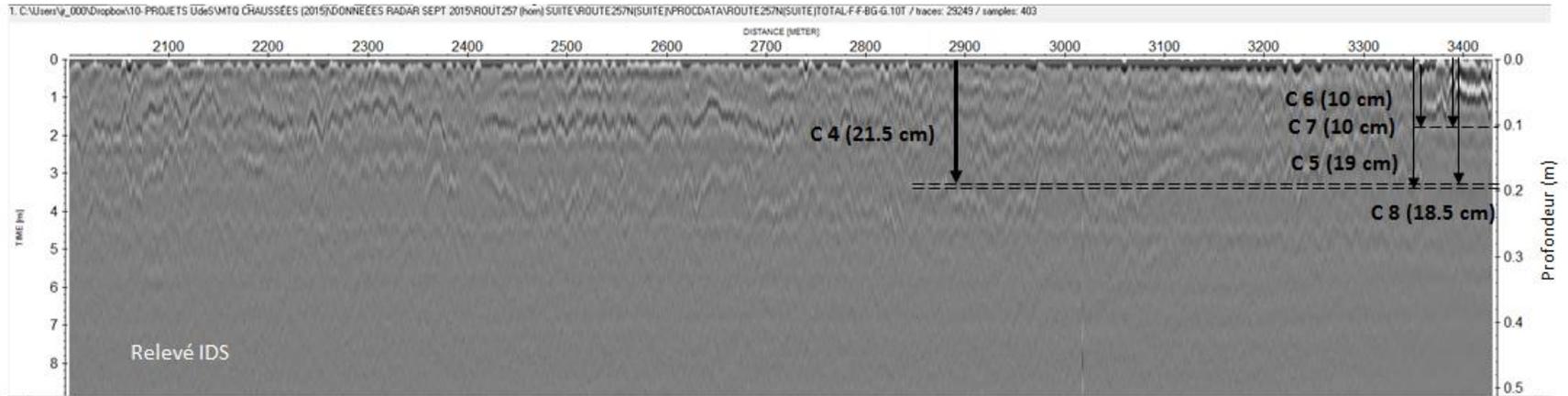


Figure A1-3 : Route 257 direction nord (suite 2)

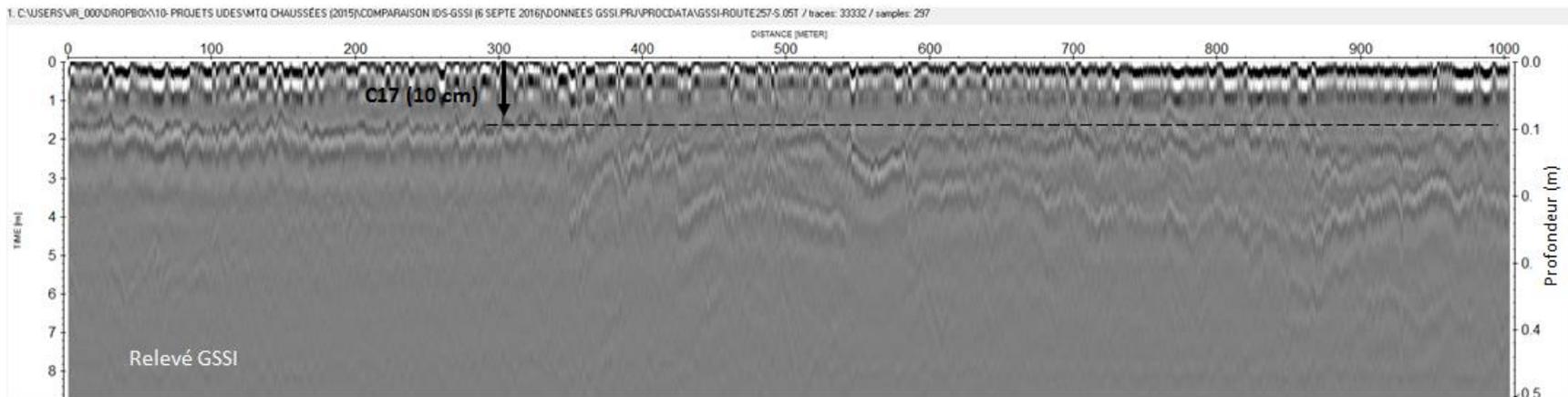
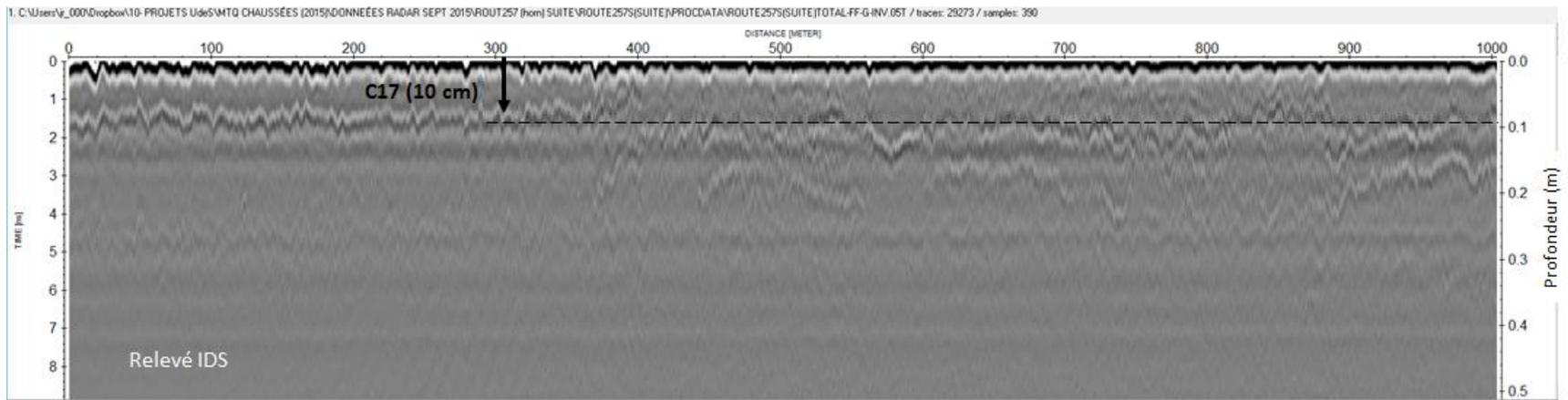


Figure A1-4 : Route 257 direction sud

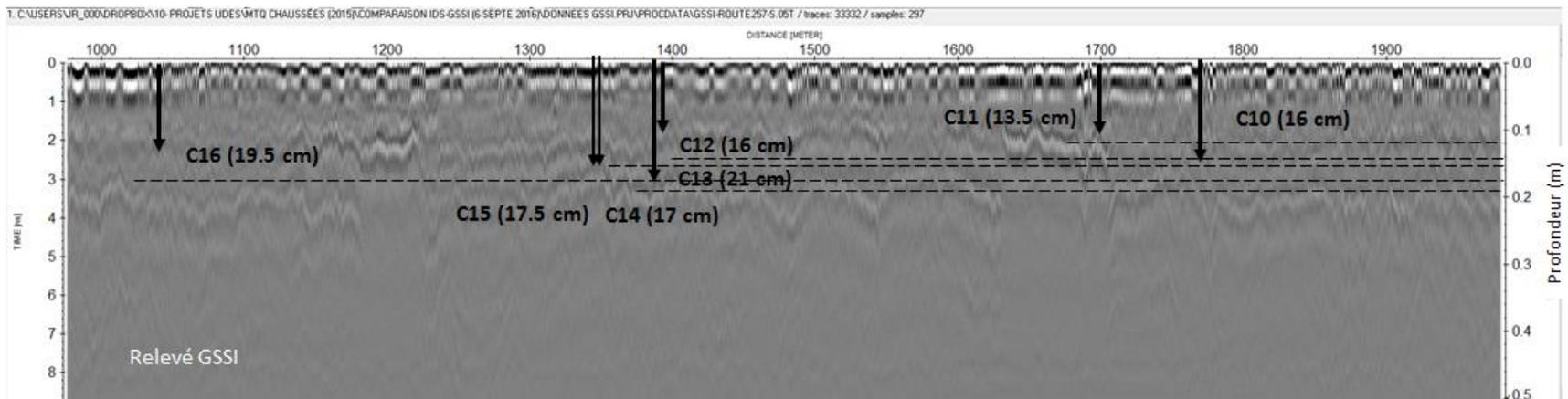
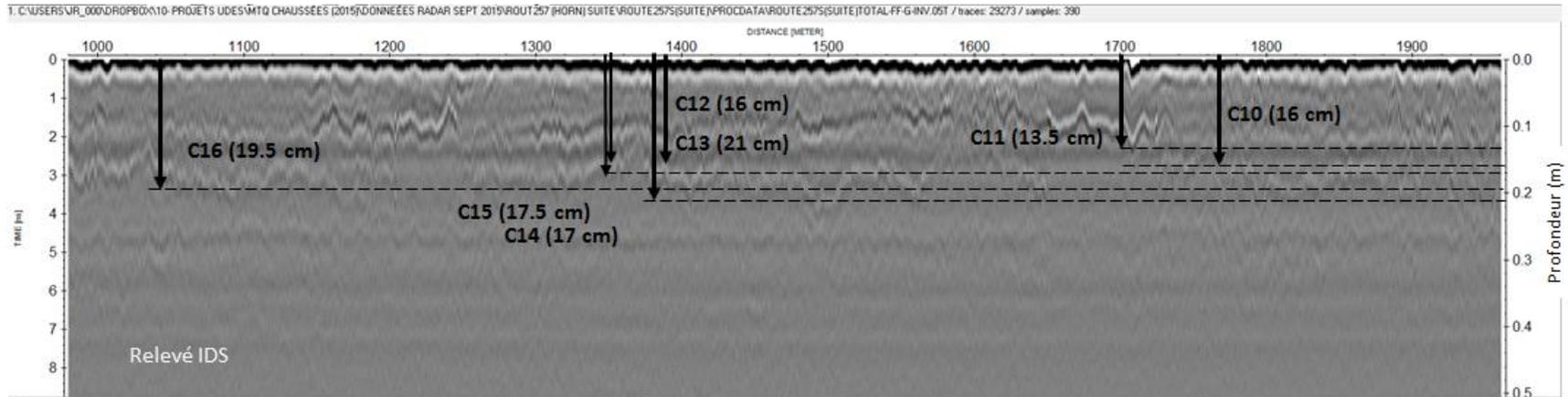


Figure A1-5 : Route 257 direction sud (suite 1)

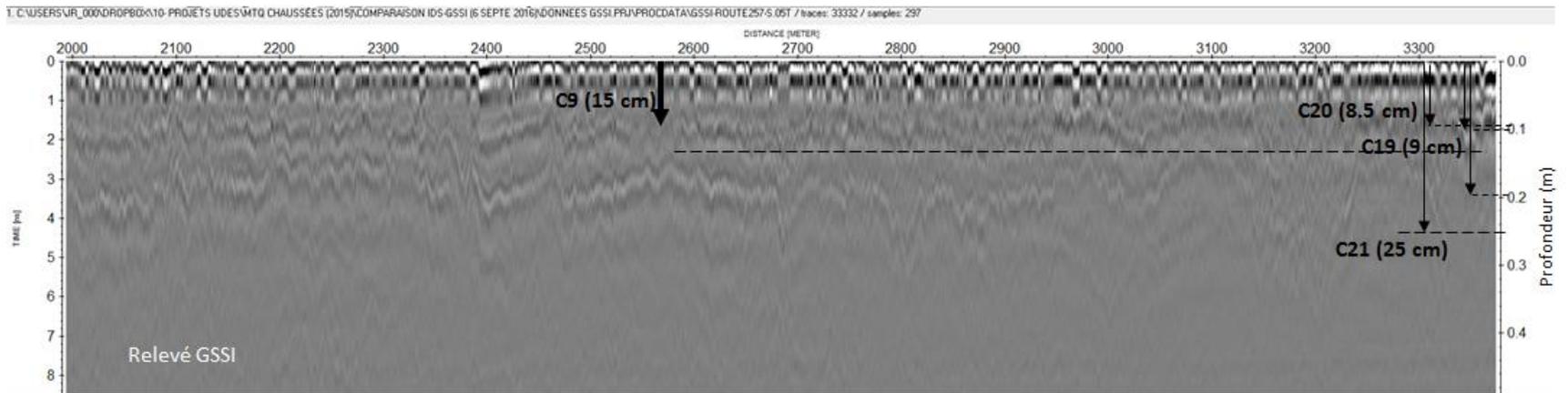
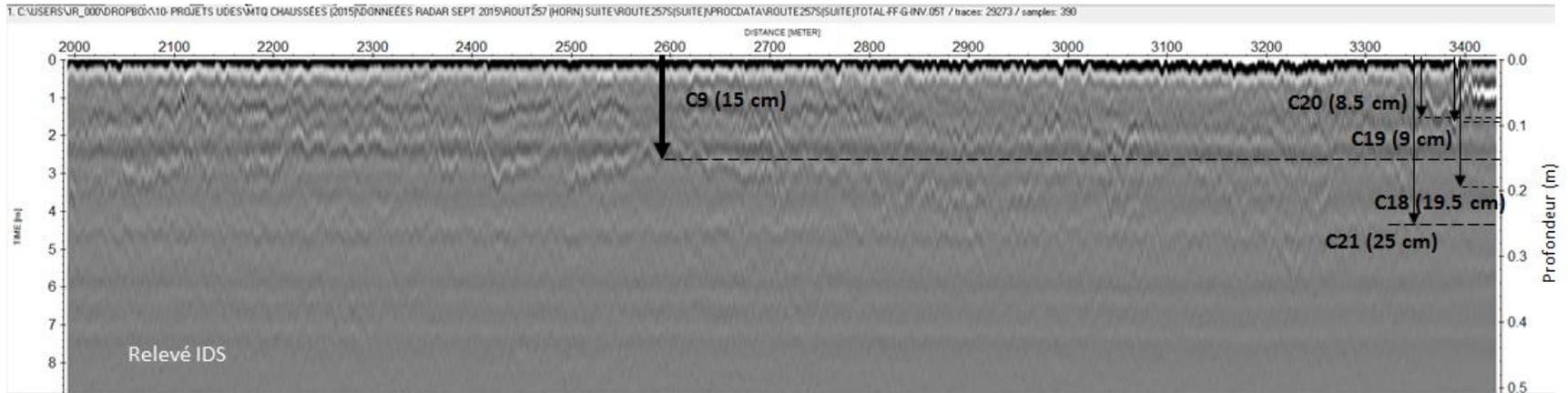


Figure A1-6 : Route 257 direction sud (suite 2)

Annexe 2

Position des carottages sur les relevés Géoradar de la route 255

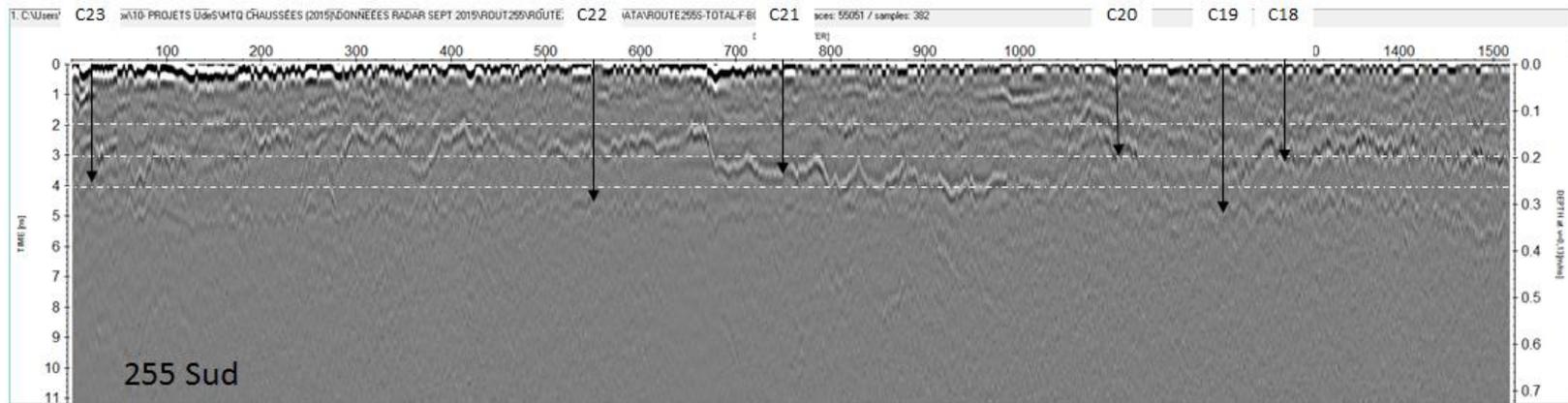
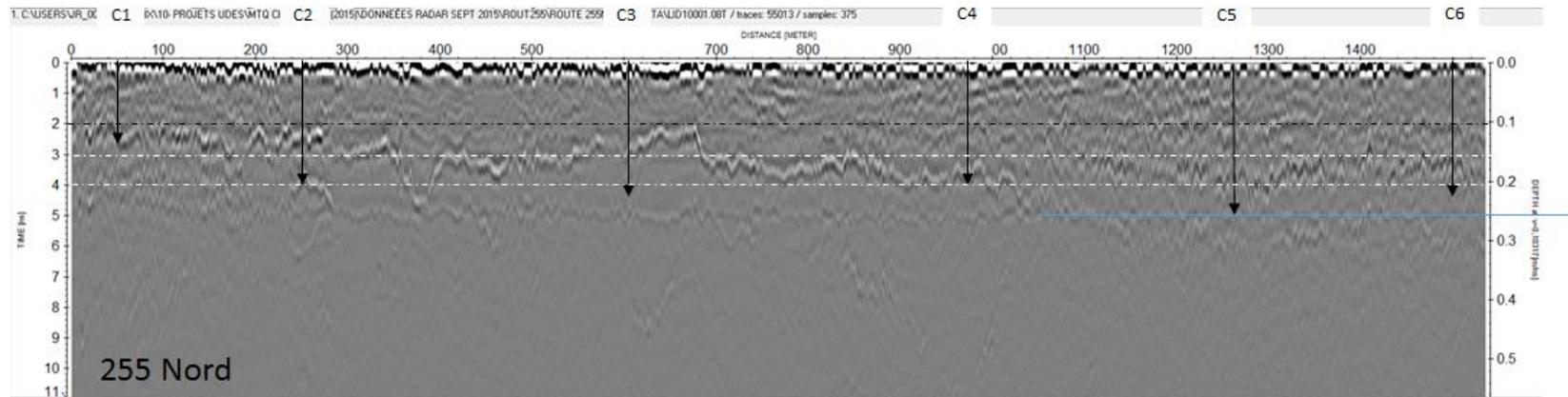


Figure A2-1 : Route 255 direction nord et sud (suite)

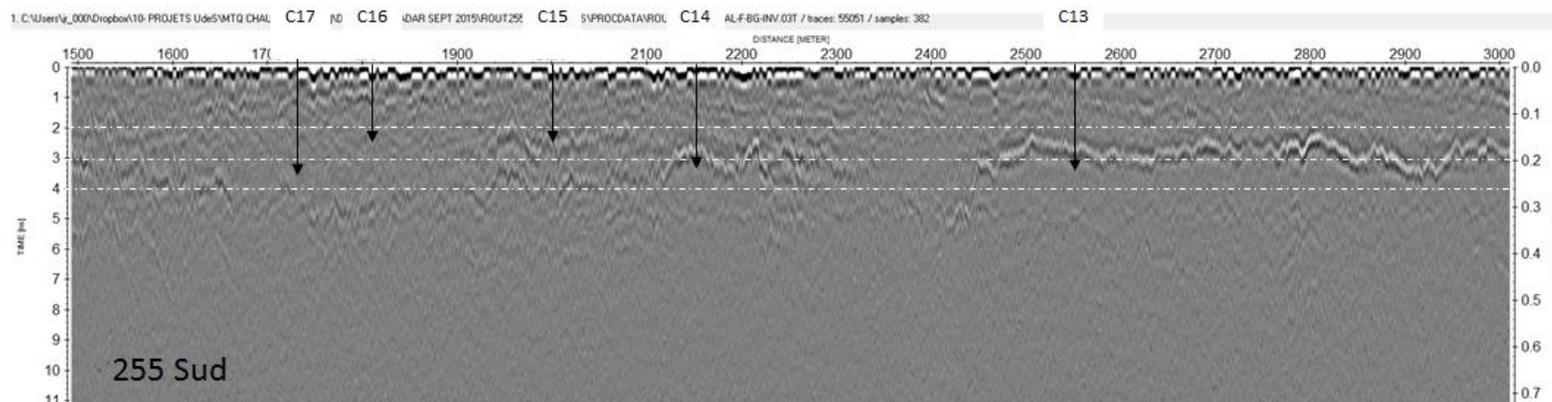
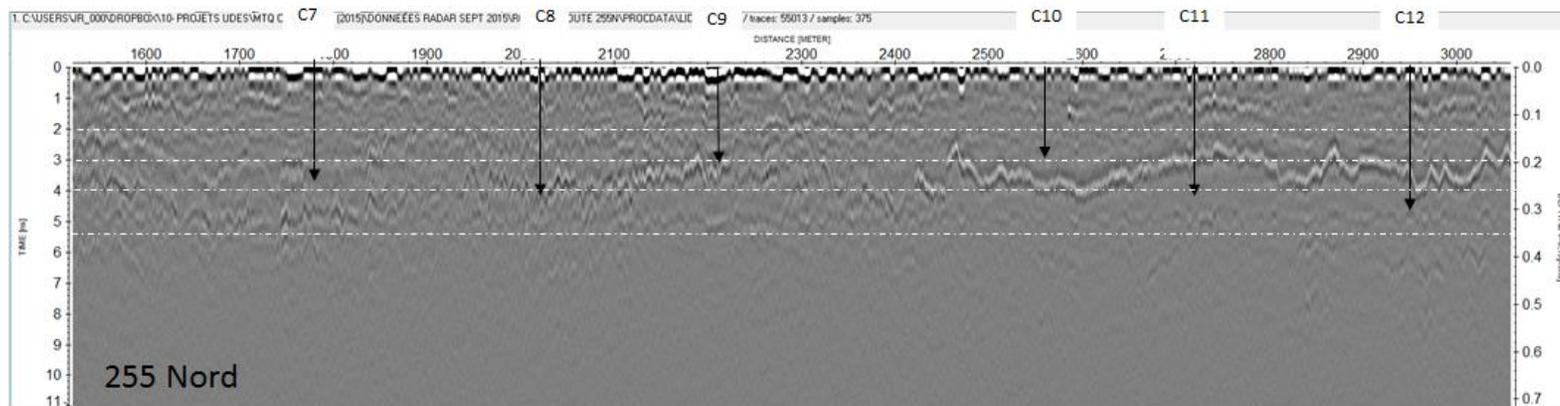


Figure A2-2 : Route 255 direction nord et sud (suite)

Annexe 3

Relevés Géoradar collectés sur les chaussées

Tableau A2-a – Liste des chaussées auscultées

Site	Municipalité	Carottage disponible	Localisation des relevés	Date des relevés
Route 257	Chartierville	22 oct 2015	0257-01-010, 4+025 à 4+818 0257-01-020, 0+000 à 3+375	3 septembre 2015 28 septembre 2015 6 septembre 2016
Route 210 dir ouest	Chartierville	n.d .	0210-01-100, 8+389 à 7+940	3 septembre 2015
Route 108	Cookshire	n.d .	0108-01-165, 0+640 à 5+300	3 septembre 2015
Route 147	Coaticook	8 déc 2015	0147-01-115, 0+000 à 4+010	4 septembre 2015
Route 410 dir ouest	Sherbrooke	n.d .	0410-01-025-000D près de la rue Bel-Horizon	4 septembre 2015
Route 255	Saint-Camille	7 déc 2015	0255-01-071, 2+650 à 9+850	8 septembre 2015
Route 112 dir ouest	Dudswell	n.d .	0112-04-011, 2+960 à 6+960	8 septembre 2015

TABLEAU A2-b : Historique des revêtements auscultés
(Résumé des informations du système de gestion des chaussées GCH-6011)

Site	Historique
Route 257	Enrobé datant de 1981 à 1987 et recouvert de couches successives entre 2004 et 2015
Route 210	Inconnu (route de juridiction municipale)
Route 108	Pavage de 1992 à 1993 recouvert de couches successives entre 2000 et 2007, sauf reconstruction en 2002 de 0+550 à 1+600. Recouvrement mince (25 mm) en 2011 de 2+833 à 3+383.
Route 147	0+000 à 3+600 : retraitement en place de 1997, recouvert de 2013 à 2015. 3+600 à 5+470 : enrobé datant de 1987 recouvert en 2006 et 2013.
Route 410	Reconstruction neuve entre 2010 et 2015
Route 255	Pavage de 1982-85 et 1997, recouvert en 2003-2004. Zones recouvertes en 2014-2015 : 5+260 à 5+367, 6+685 à 6+750, 6+925 à 8+220, 8+620 à 8+700, 9+330 à 9+850
Route 112	0+000 à 3+890: enrobé recyclé à froid en 2014 au-dessus d'un enrobé de 1986-89. 3+900 à 4+310: enrobé de 1989 recouvert en 2002 et 2011 4+310 à 6+900: enrobé de 1989 recouvert en 2002 et 2015 6+900 à 7+400 : retraitement en place de 2002 recouvert en 2015

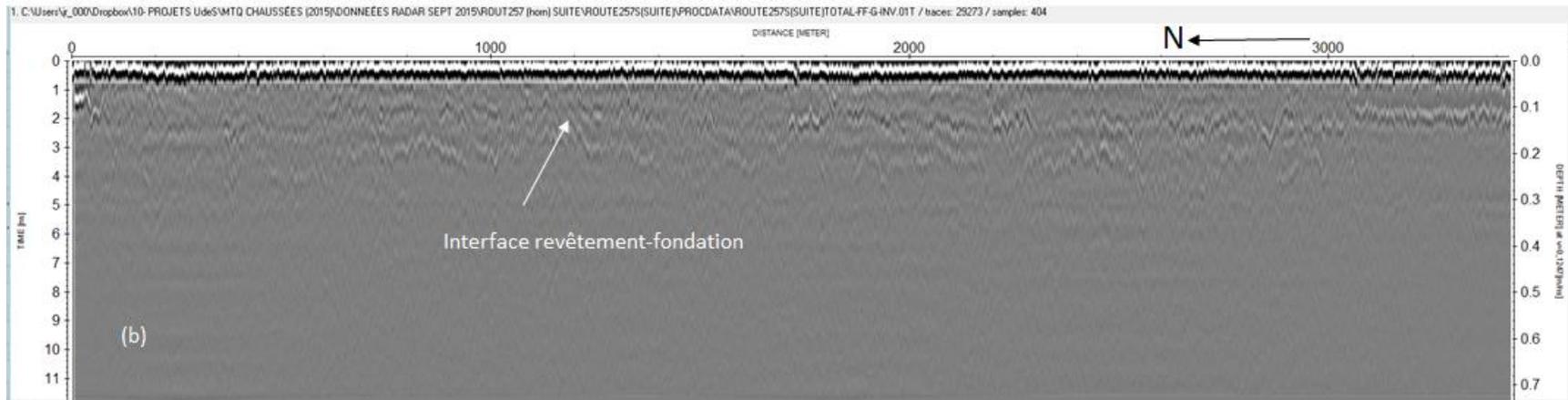
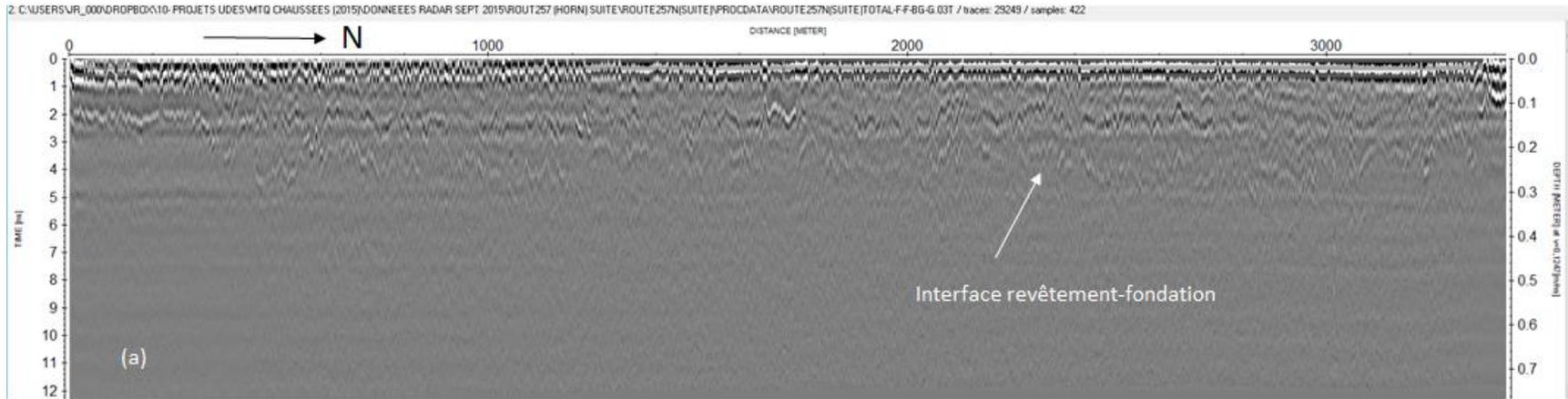


Figure A3-1 : Relevés collectés sur la route 257 Nord (a) et Sud (b)

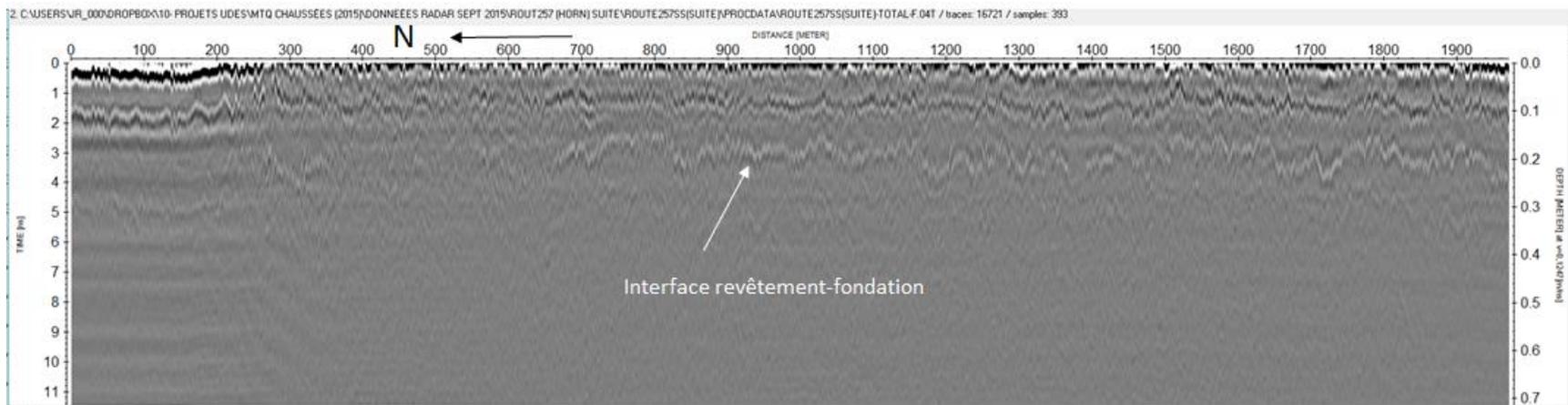


Figure A3-2 : Relevé collecté sur la route 257 Sud-Sud

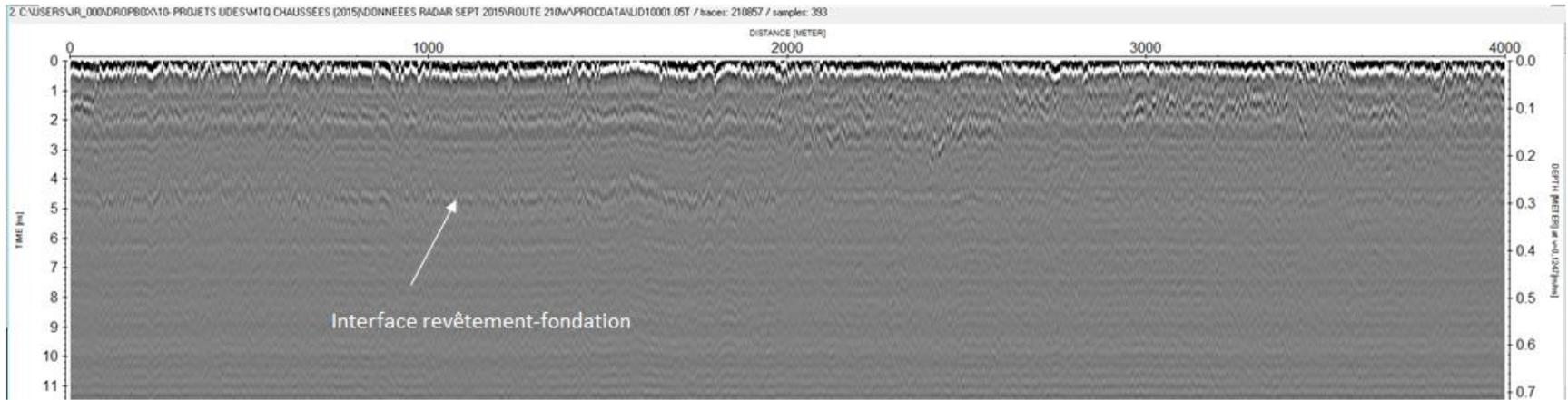


Figure A3-3 : Relevé collecté sur la route 210 Ouest

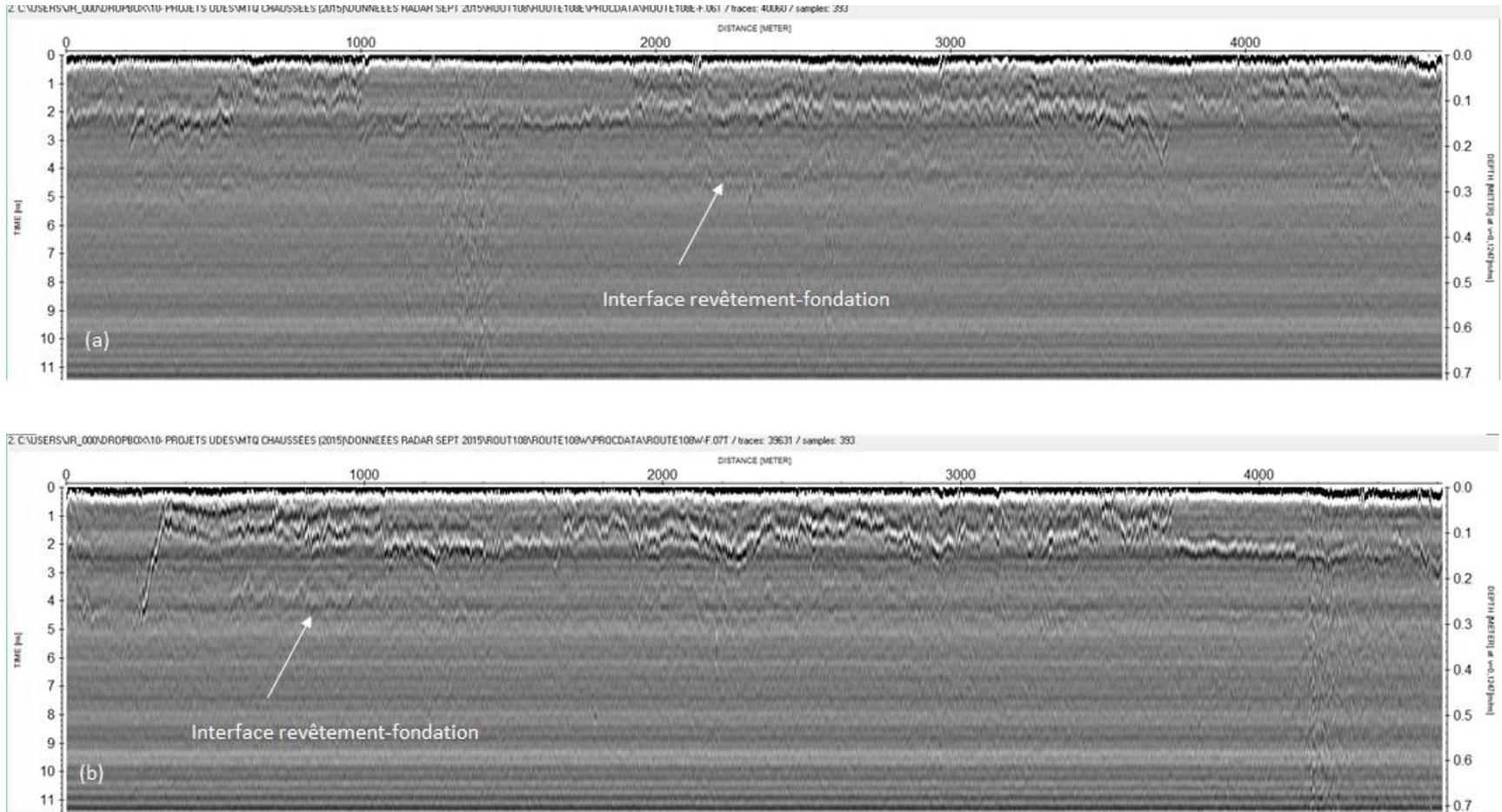


Figure A3-4 : Relevés collectés sur la route 108 Est (a) et Ouest (b)

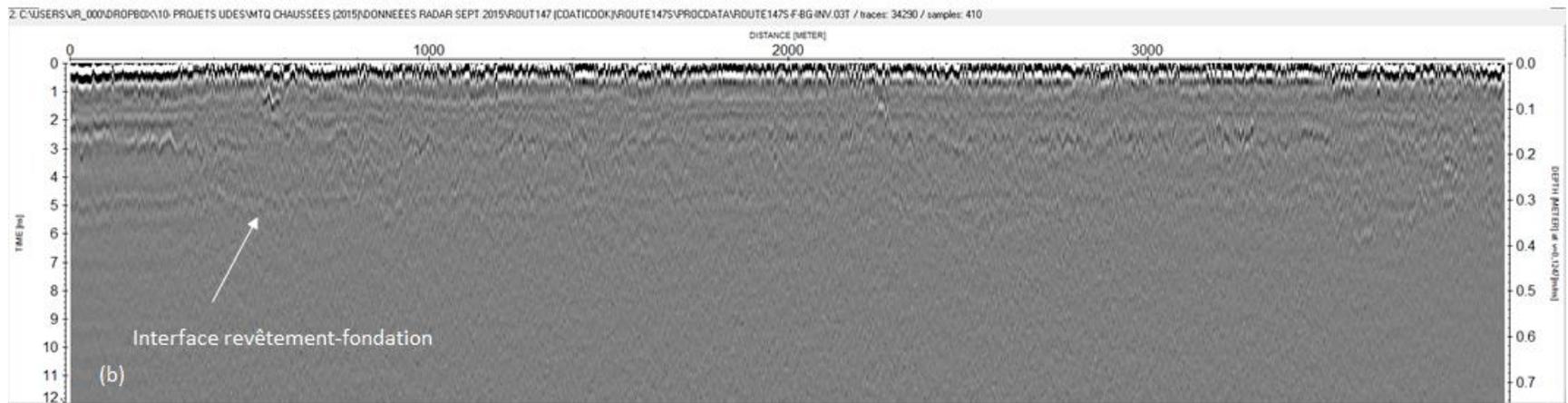
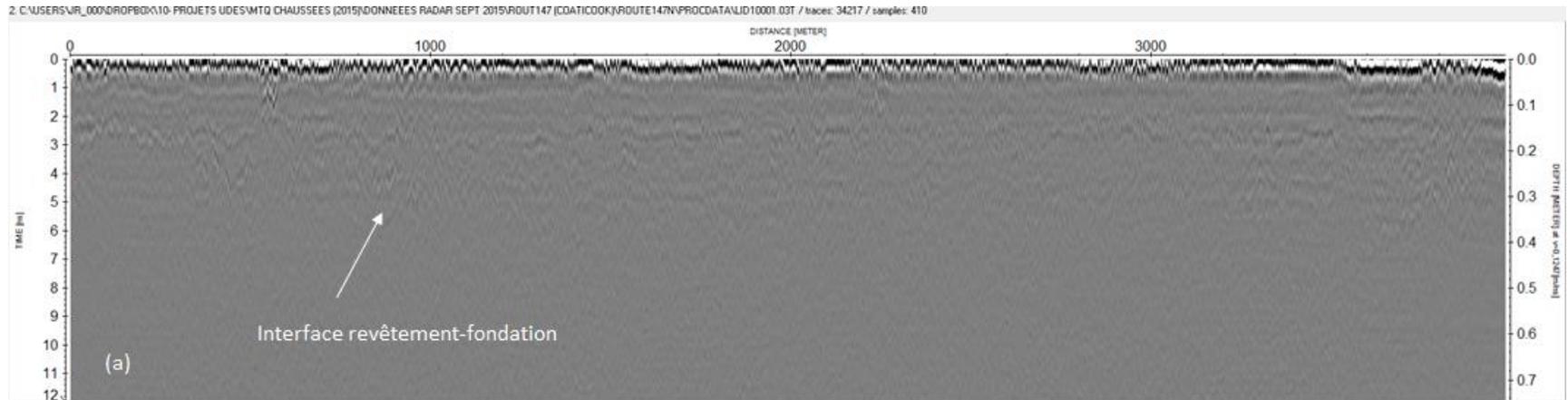


Figure A3-5 : Relevés collectés sur la route 147 Nord (a) et Sud (b)

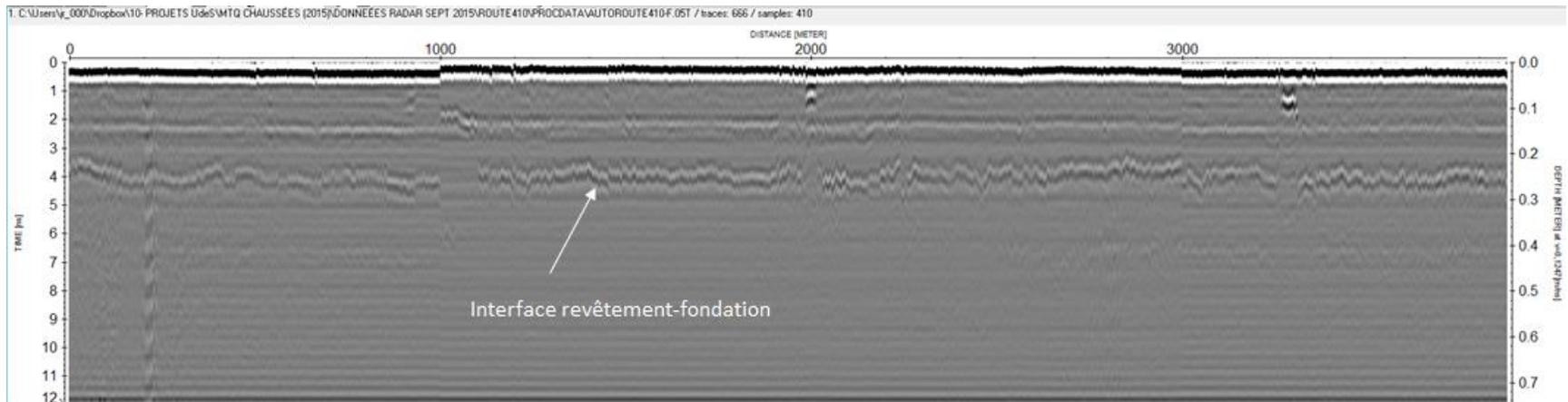


Figure A3-6 : Relevé collecté sur la route 410 Ouest



Figure A3-7 : Relevés collectés sur la route 255 Nord (a) et Sud (b)

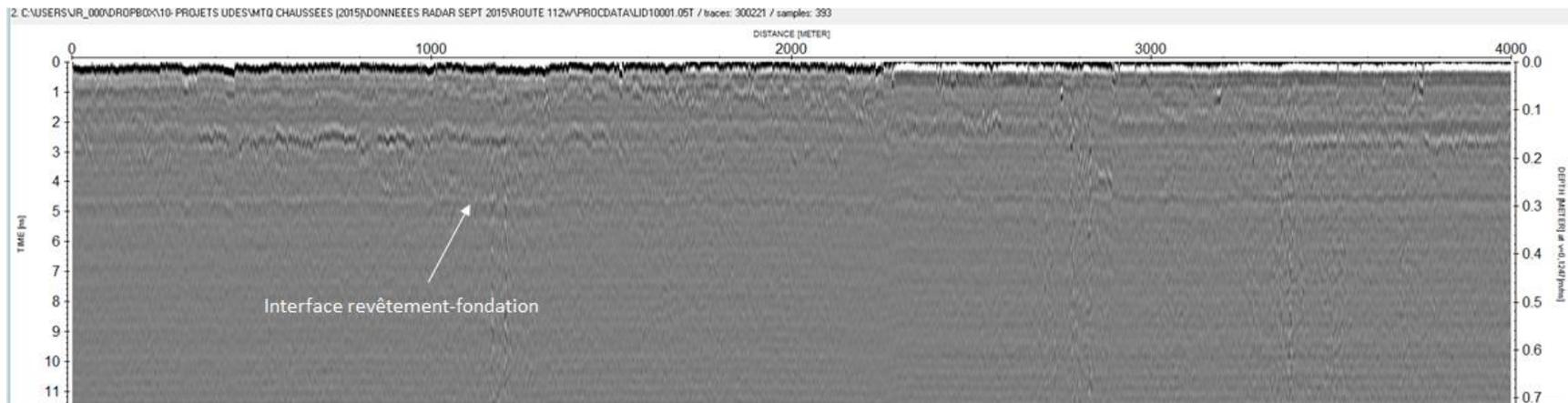


Figure A3-8 : Relevé collecté sur la route 112 Ouest