



FONDATION D'ENTREPRISE

FEREC

Caractérisation des interfaces de structures de chaussées par technique radar à sauts de fréquence

Fondation d'entreprise FEREC

Appel à projets 2018

Des innovations numériques pour la conception, la construction, l'évaluation et la maintenance des infrastructures



Auteurs :

X. Dérobert, V. Baltazart, J.M. Simonin, T. Devie, H.Y. Hui

(IFSTTAR)

A. Ihamouten, J.N. Gaudin, B.T. Tankeu

(CEREMA)

Sommaire

1 Résumé	4
2 Contexte et objectifs du projet	5
3 Description des travaux menés	7
3.1 Description du site test.....	7
3.2 Technique radar à sauts de fréquence.....	8
3.3 Technique radar impulsionnelle.....	10
3.4 Développement d'un banc de mesure RSF de terrain.....	10
3.5 Étude d'éléments de radar à sauts de fréquence.....	12
3.6 Programmation des mesures sur le manège de fatigue.....	15
3.7 Méthode de traitement des signaux RSF.....	16
4 Résultats expérimentaux	20
4.1 Dégradations superficielles.....	20
4.2 Traitement des données à 2,6 GHz.....	21
4.3 Campagne 2012 à 2,6 GHz.....	26
4.4 Traitement des données à 1,5 GHz.....	27
5 Utilisation de l'aide de la Ferec dans le projet	30
6 Impact	30
6.1 Apports et retombées pour la collectivité.....	30
6.2 Publications et autres éléments de communication auxquels le projet et ses résultats ont donné lieu.....	30
7 Perspectives ouvertes par le projet notamment en matière de recherche collaborative	31

1 Résumé

Le projet CINC-RSF porte sur la caractérisation des interfaces de chaussées par technique radar à sauts de fréquences (RSF) très haute résolution. Il est composé de deux axes de recherche, l'un dédié au développement de nouvelles méthodologies pour détecter les décollements entre la première et la deuxième couche traitée des chaussées et l'autre à l'estimation des épaisseurs des premières couches (notamment très minces) sans carottage.

Ces deux axes se déclinent de manière transversale en :

- un suivi expérimental sur le manège de fatigue de l'IFSTTAR, dans une portion de structure de chaussée présentant des défauts, sous trafic contrôlé,
- un traitement par analyse et traitement des signaux sur échantillons et l'inversion des signaux radar pour remonter aux épaisseurs et caractéristiques diélectriques des couches de chaussées,
- la mise au point d'outil très hautes fréquences (RSF), intégrant plusieurs antennes dans le but d'améliorer la fiabilité des traitements et inversions des données radar.

Concernant le premier axe de recherche, les études en laboratoire ont montré le potentiel d'une technologie bas coût permettant de développer un système radar à sauts de fréquence de performances équivalentes à celui utilisant du matériel de laboratoire, beaucoup plus onéreux, pour cette application de génie civil. En parallèle, la conception d'un banc porte-antennes radar de terrain a été engagée pour valider les développements en laboratoire sur des structures réelles.

Le deuxième axe de recherche, dédié à des traitements de signaux radar hautes résolutions adaptés à la problématique, a confirmé la possibilité de caractériser un décollement (épaisseur et permittivité) dont l'épaisseur serait de l'ordre du dixième de la longueur d'onde des impulsions.

Enfin, les actions engagées sur une période de 15 mois ont été fortement conditionnées par une expérimentation de grande envergure menée sur le manège de fatigue. Son objectif était de suivre la dégradation d'une structure de chaussée, présentant des défauts de collage artificiels, soumise à un trafic contrôlé, jusqu'à un état considéré comme nécessitant des réparations.

Ainsi, huit séries de mesures radar, incluant 3 systèmes différents (voire 4 à certaines étapes), ont été réalisées sur la période juin 2019 à janvier 2020, correspondant à 0, 10, 96, 120, 200, 250, 300 et 420 milliers de chargements de demi-essieux à 6,5 T. Une dernière série est prévue courant mars 2020 à 500 000 chargements avant destruction et autopsie de la structure de chaussée. Les résultats de mesures de matériels impulsionsnels du commerce (à 1,5 et ,6 GHz de fréquences centrales) sont présentés au chapitre 4 et montrent le potentiel de cette technique pour le suivi de décollements de couches traitées de chaussées.

2 Contexte et objectifs du projet

L'Ifsttar a engagé une action de recherche courant 2011-2013 sur le suivi de défauts de collage entre couches traitées de chaussées sous un trafic contrôlé, par l'intermédiaire du manège de fatigue du laboratoire MAST/LAMES. Cette action a été réalisée dans le cadre de la recherche pluri-annuelle Ifsttar-Cerema (ORSI) « Fissures », coordonnée par V. Baltazart (COSYS/S2I), et à l'initiative du laboratoire LAMES.

L'objectif était d'évaluer différentes techniques d'auscultation non destructives (ND) – dont deux techniques radar, deux techniques ultra-sonores et le déflectomètre – pour détecter et suivre l'évolution en termes d'extension et de dégradation de défauts de collage entre deux couches de roulement.

Pour cela, une section de 25 mètres, constituée de deux couches d'une grave bitume (GB) de 8 cm et d'un enrobé (BB) de 6 cm présentant des défauts artificiels a été construite sur un des anneaux du manège de fatigue de l'Ifsttar (équipement remarquable de l'Ifsttar – échelle 1). Un trafic dynamique, de charge de demi-essieu 6,5 T, a été établi sur une série de 300 000 chargements. Pour ce trafic, le dimensionnement prévu a priori devait permettre de voir remonter des fissures en surface et de suivre visuellement leur évolution.

Les mesures non destructives ont été réalisées aux états suivants : 0 chargements avant début trafic, 10 000 chargements pour connaître précisément la mise en place de la structure sous trafic, puis à 50 000, 100 000, 200 000 et enfin à 300 000 chargements.

A l'issue de ce programme de fatigue de chaussée, aucune dégradation superficielle n'a été constatée. De même, les mesures ND n'ont montré qu'une évolution faible de l'extension du défaut dans le sens transversal, et aucune évolution significative dans le sens longitudinal et dans la gravité des défauts d'interface entre les couches de GB et BB.

Les mesures radar ont confirmé leur potentiel, étant des techniques ND à grand rendement et sans contact, et de plus sensibles à l'état de dégradation des chaussées.

Le programme et le coût de fonctionnement du manège de fatigue n'ont pas permis de poursuivre plus avant cette étude, qui n'est que partiellement réalisée.

Cette problématique de détection et caractérisation de défaut de collage continue à être étudiée dans le cadre et à l'issue du programme de recherche interne IFSTTAR/CEREMA nommé ECODEM (Evaluation et contrôle non destructif de matériaux dispersifs du génie civil par techniques électromagnétiques – 2014-2017), à travers les thèses de B. Guan (soutenue en janv. 2018) et de S. Todkar (soutenance prévue en oct. 2019).

L'année 2019 a vu possibilité de poursuivre la dégradation de cette section, grâce à la participation des projets financés par FEREC et la Direction Générale des Infrastructures, des Transports et de la Mer (DGITM) de notre ministère de la Transition Ecologique et Solidaire ainsi qu'un complément interne, en ajoutant 300 000 chargements sur la période Juin – septembre (voire octobre) jusqu'à un état avancé de la dégradation de la structure de chaussée. En parallèle, des mesures radar impulsionsnelles et à sauts de fréquence sont prévus à des états de chargement intermédiaires.

Le programme de travail a été le suivant (équipes concernées listées en fin de texte) :

- Mesures ND, incluant les techniques radar impulsionnelles et à sauts de fréquences et des mesures complémentaires US et si possible par réflectométrie, à 0, 50 000, 100 000, 200 000 et 300 000 nouveaux chargements. Selon l'état de dégradation visible – ou constaté après traitement des signaux – 100 000 chargements complémentaires sont envisagés pour atteindre un niveau de dégradation nécessitant une réparation de la structure de chaussée.
- Traitement des données radar par différentes approches (traitements standards, par inversion forme d'onde, par techniques hautes résolution) pour les comparer.
- Mise au point d'une méthodologie optimale d'évaluation des interfaces par technique radar, associant technique de mesure et de traitement des données.

3 Description des travaux menés

3.1 Description du site test

Le site test est une section de 25 mètres de l'un des anneaux du manège de fatigue de l'Ifsttar, qui constituée de deux couches d'enrobés : une grave bitume (GB) de 8 cm et un enrobé (BB) de 6 cm présentant des défauts artificiels de collage à leur interface. Plus de 10 défauts ont été insérés dans la chaussée (Fig. 1).



Figure 1. Mise en place des défauts de collage entre couches d'enrobés sur le manège de fatigue de l'IFSTTAR

Ils varient par leur gravité : défaut léger (absence d'émulsion) ou grave (insertion d'une couche de sable fin, ou d'un géotextile). Ces « patches » diffèrent par leur taille et leur localisation par rapport à la zone de roulement prévue. Leur implantation et leur dénomination est présentée figure 2, et les dimensions de chaque défaut sont résumées dans le tableau 1.

Tableau 1. Configuration des défauts

Nom	Type	Dimensions (Longueur x largeur)
I-1	Sable	0.5m x 2m
I-2	Textile	0.5m x 2m
I-3	Abs. Couche accrochage	0.5m x 2m
I4 – I9	Textile	0.5m x 0.5m
I-10	Textile	3m x 1m
I-11	Sable	1.5m x 2m
I-12	Textile	1.5m x 2m
I-13	Abs. Couche accrochage	1.5m x 2m

Un trafic dynamique, de charge de demi-essieu 6,5 T (roues jumelées), est établi centré sur un rayon de 16 m (Fig. 3). Les positions latérales des roues jumelées sont au nombre de 11 espacées de 10,5 cm pour une emprise de 1,65 m. La fréquence de passage à ces différentes positions suit la courbe présentée en figure 3b pour simuler un trafic réel.

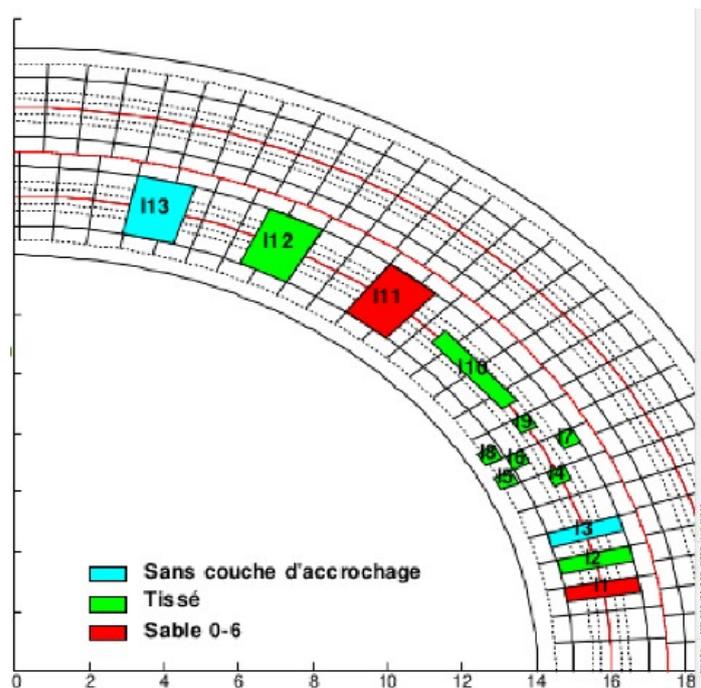


Figure 2. Implantation et dénomination des défauts

a)



b)

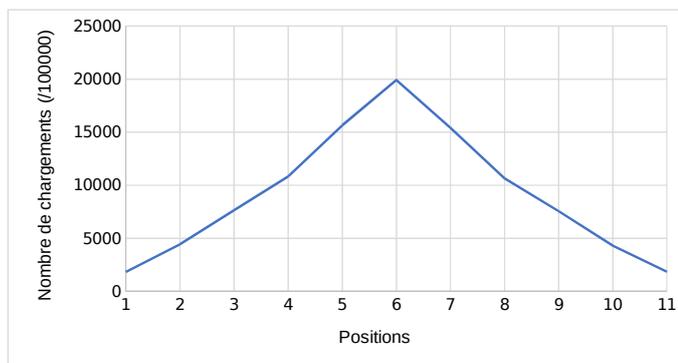


Figure 3. a) Roues jumelées, b) densité de trafic en fonction des positions latérales des roues pour 100 000 chargements

3.2 Technique radar à sauts de fréquence

Une des techniques pouvant se substituer aux techniques impulsionnelles propose un balayage en fréquence, par sauts de fréquence, avant de retourner dans le domaine temporel à l'aide d'une transformée mathématique de Fourier inverse.

Le système employé pour l'émission et la réception des ondes radar est du matériel de laboratoire appelé analyseur de réseau vectoriel. Il présente l'avantage d'offrir une large bande de fréquence d'utilisation, ainsi les auscultations profondes ou de sub-surface peuvent être réalisées suivant le choix de la bande de fréquence des antennes et des diverses applications. C'est pourquoi, le deuxième avantage de cette technique est de sortir

des bandes de fréquences utilisées par les systèmes impulsions du commerce, vers les très hautes fréquences pour l'auscultation des couches très mince de chaussées.

Une impulsion synthétique est reconstruite à partir d'un signal à sauts de fréquences, correspondant à un balayage en fréquences, qui est transmis à l'antenne d'émission. L'antenne de réception enregistre pour chacune des fréquences l'amplitude et la phase du champ électrique. Une transformée de Fourier inverse permet de reconstruire un signal temporel équivalent à celui obtenu par les radar impulsions. L'intérêt majeur de cette technique vient de la possibilité de contrôler une bande de fréquence ultra large autour de la fréquence centrale déterminée et d'obtenir une dynamique supérieure que celle d'un radar impulsions équivalent.

Pour cette campagne expérimentale, les faibles épaisseurs des défauts insérés dans la structure imposent de travailler à des fréquences bien supérieures au gigahertz. Pour une précision centimétrique des mesures, les antennes sont portées par un banc porte-antenne robotisé (Fig. 4). Les paramètres utilisés sont les suivants :

- Bande de fréquence [800 MHz – 10,8 GHz], soit une fréquence centrale autour de 5 GHz
- Nombre de points de mesures : 801 fréquences
- Puissance émise : -5dBm
- Filtre passe-bande (IF bandwidth) : 1 kHz
- Banc de mesure : auscultation sur 1,20 m de déplacement par pas de 1cm (figure 1).

Pour chaque niveau de chargements, les mesures RSF ont été réalisées sur les défauts principaux I11, I12 et I13, sur l'axe principal longitudinal du trafic et aux centres des défauts selon l'axe transversal.



Figure 4. Banc de mesure radar supportant deux antennes ultra-large bandes, reliées à un analyseur de réseau (chariot de droite); l'ensemble étant piloté par un micro-ordinateur

3.3 Technique radar impulsionnelle

Deux radar impulsionnels du commerce ont été utilisés comme référence. Ce sont des matériels de la marque GSSI, travaillant à des fréquences centrales de 1,5 et 2,6 GHz, des fréquences parmi les plus hautes disponibles commercialement (Fig. 5).

a)



b)



Figure 5. a) Matériel radar SIR4000 (GSSI) associé à une antenne 1,5 GHz, b) Matériel radar StructureScan (GSSI) travaillant à 2,6 GHz

Ces systèmes permettant des grands rendements tous les défauts (de I1 à I13) ont été auscultés selon des profils longitudinaux et transversaux pour chaque niveau de chargement. Les paramètres d'acquisition utilisés sont résumés dans le tableau ci-dessous (Tab. 2).

Tableau 2. Paramètres d'acquisition radar

Paramètres	GSSI SIR 4000	GSSI StructureScan
Fréquence centrale	1,5 GHz	2,6 GHz
Sample/scan	1024	256
Gain temporel	Cst	Cst
Signaux/m	100	125
Temps d'écoute	7ns	6 ns
Profondeur d'invest.	35cm	30cm

Le pré-traitement des données est le suivant. Il consiste en un traitement de correction de signaux continus et basses fréquences à éliminer (*dewow*), suivi d'un filtre passe-bande entre le cinquième et le double de la fréquence centrale, d'une correction du gain initial (s'il existe) et ajout d'un gain constant de 5 dB.

3.4 Développement d'un banc de mesure RSF de terrain

Le banc de mesures utilisé actuellement, conçu pour une utilisation en laboratoire, n'est pas adapté aux campagnes de mesure sur le terrain de par sa fragilité, sa complexité et ses dimensions. Les projets de mesures radar à saut de fréquence en extérieur devenant de plus en plus nombreux il a été décidé de concevoir un robot porte-antenne plus simple et plus robuste. Le but étant d'avoir un équipement mieux transportable et qui correspond plus aux

attentes d'un équipement de terrain. L'équipement actuel sera réservé à une utilisation en laboratoire plus classique.

Le banc porte-antenne de terrain comporte 2 axes motorisés (1 axe horizontal et 1 axe vertical) permettant d'effectuer des balayages latéraux à des hauteurs différentes (Fig. 6). Le principal enjeu du positionnement au-delà de la précision et sa délicatesse. En effet les oscillations entraînées par un déplacement trop brutal perturbent la mesure. La motorisation a été choisie (DC brushless avec encodeur) dans le but à ces contraintes.

L'écartement entre les antennes est un paramètre qui doit être réglable pour pouvoir réaliser plusieurs configurations de mesure. Une vis micrométrique permettra de le régler avec précision (Tab. 3).

Un capteur de distance laser permettra de mesurer cette distance avec une précision millimétrique. Il a été spécialement choisi pour sa tolérance aux sols rugueux et peu réfléchissants. Des tests seront menés pour envisager d'asservir la distance sol/antenne tout au long de la mesures (mesures sur des profils en pente ou inégaux).

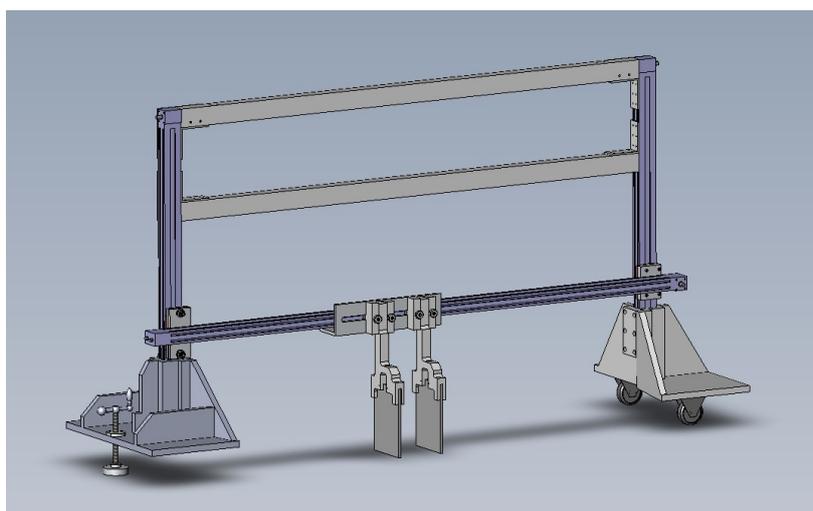


Figure 6. Schéma du banc EM porte-antennes radar de terrain

Tableau 3. Caractéristiques du banc de mesures RSF de terrain

Caractéristiques	Valeurs
Amplitude axe X (cm)	100
Amplitude axe Z (cm)	53
Hauteur max mesure (cm)	55
Hauteur min mesure (cm)	2
Ecartement entre antennes min (cm)	8
Ecartement entre antennes max (cm)	30
Précision axe X	<1 mm
Précision axe Z	
Précision écartement antennes	
Précision distance antenne/sol	
Encombrement max hauteur (cm)	<130
Encombrement max longueur (cm)	<250
Distance latérale min absorbant/antenne (cm)	20

Les antennes dirigent préférentiellement leur rayonnement vers le bas mais sont malgré tout sensibles à ce qui se situe autour et dessus d'elles en particulier les pièces métalliques. Les endroits critiques seront recouverts d'un matériau absorbant. Le PVC a été préféré à l'aluminium pour les pièces les plus exposées au rayonnement. Les pieds du banc ont été conçus de manière à limiter les réflexions directes.

Un logiciel de contrôle des déplacements du banc est en cours de développement en interne pour pouvoir parfaitement s'adapter à toutes sortes de mesures.

L'équipement est actuellement en phase d'assemblage. Les premiers tests auront lieu mi-février et l'équipement devrait être opérationnel début avril.

Le développement de l'équipement et déjà plusieurs perspectives sont envisagées. A l'avenir on peut imaginer une intégration dans le logiciel du contrôle de l'analyseur de réseau pour qu'il comporte toutes les fonctionnalités nécessaires à la mesure. Le matériel de mesure actuellement encombrant pourrait être remplacé par une nouvelle génération de réflectomètre vectoriel miniature. Des adaptations permettront d'embarquer d'autres types d'antennes.

3.5 Étude d'éléments de radar à sauts de fréquence

Cette action élémentaire, menée par le CEREMA (équipe ENDSUM), est commune aux deux projets FEREC CINC-RSF et Loca-3D (AAP 2018). Elle s'inscrit dans une étude de faisabilité d'un système de multiplexage d'antennes associé à un analyseur de réseau vectoriel, l'ensemble devant constituer un matériel bas coût destiné à améliorer le rendement et les performances d'un radar à sauts de fréquence classique. Ce projet s'articule en 2 type d'actions :

- La conception d'un radar à saut de fréquence multi-antenne : 1ère phase et 2ème phase. Celle-ci a couvert :
 - l'état de l'art des techniques de multiplexage (principes, avantages et inconvénients) et le choix d'un multiplexeur ;
 - les critères de choix d'un VNA (caractéristiques, performances, coûts) ;
 - les critères de choix d'antennes large bande adaptées ;
 - le développement d'un démonstrateur laboratoire ;
 - la caractérisation de la chaîne d'instrumentation et l'estimation des performances envisageables.
- L'initiation des réflexions sur les méthodes de traitement du signal associées.

Conception d'un radar à sauts de fréquence multi-antennes

Les différentes étapes de l'état de l'art ont conduit à identifier et sélectionner différents composants constituant la chaîne d'instrumentation à concevoir (analyseur de réseau, multiplexeur et antennes).

Concernant le multiplexeur, la technologie électronique a été choisie et Le modèle HMC252AQS24E de chez Analog-device fournit par Digikey a été retenu, c'est un kit d'évaluation (carte électronique brute). Ce type de "format" demandera, dans le cadre d'une industrialisation future, de passer sur un modèle intégré (boîtier blindé).

Concernant l'analyseur de réseau, l'état de l'art a été mené sur les différents modèles de d'analyseurs disponibles sur le marché et la sélection s'est orientée vers des analyseurs 1 port, bon marché et de dimensions réduites, présentant des performances élevées pour des applications singulières mais suffisantes pour les exigences souhaitées.

A l'issue de cette étape, le composant choisi est le réflectomètre R60 de la société américaine Copper Mountain technologies (Fig. 7), dont la bande passante [1 MHz – 6 GHz] dépasse largement la bande utile pour notre présente application de génie civil.

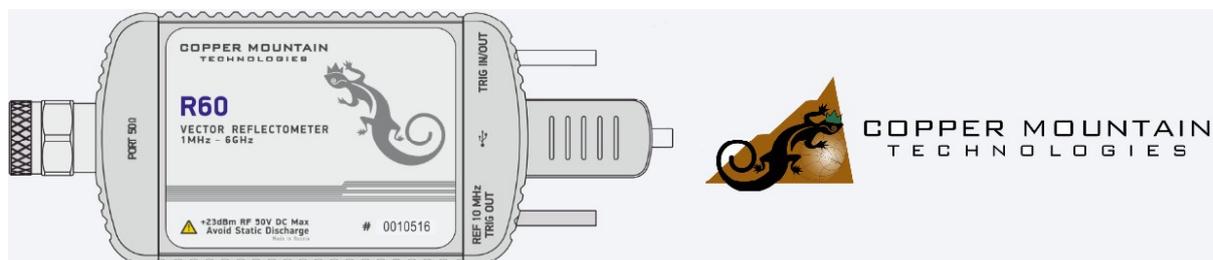


Figure 7. Réflectomètre vectoriel R60 Copper Mountain

Concernant les antennes, dans un premier temps et de manière très pragmatique, le choix s'est porté sur des antennes du type à fente à ouverture progressive, ou antenne Vivaldi ultra-large bandes (ULB). Elles ont été dimensionnées pour la bande [800 MHz – 3 GHz] large bande et réalisées avec le partenaire ESEO du CEREMA (projet Loca-3D). Dans un second temps l'état de l'art réalisé a orienté la sélection vers des antennes Vivaldi ULB Aeronia. Un travail de caractérisation et de calibration a été réalisé sur l'ensemble de ces antennes pour étudier leurs performances respectives (Fig. 8).

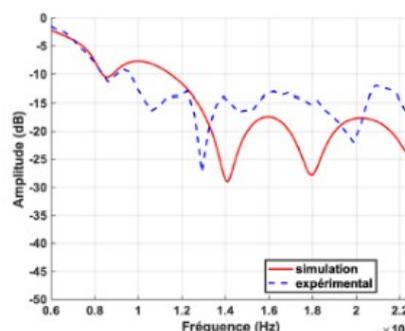
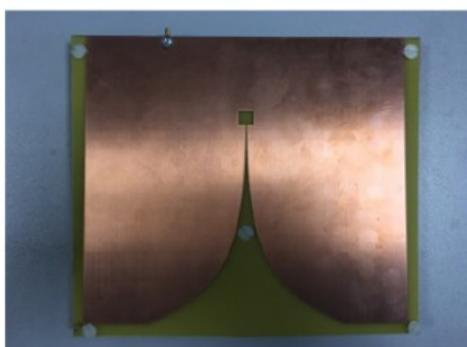


Figure 8. Photographie de l'antenne Vivaldi et présentation de son coefficient de réflexion simulé et mesuré

La conception et le développement d'un démonstrateur de laboratoire a consisté à intégrer ces différents composants autour d'une plateforme Arduino sur laquelle a été implémenté un développement, en langage Python, du logiciel de pilotage de la commande du multiplexeur (Fig. 9). Deux chaînes d'acquisition ont été développées afin de pouvoir évaluer les performances de l'architecture multiplexée vis-à-vis d'une architecture parallèle plus classique (Fig. 10).

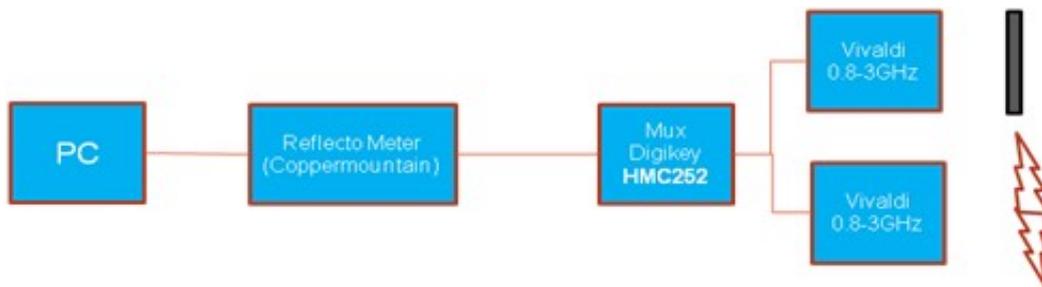


Figure 9. Architecture multiplexée de deux antennes

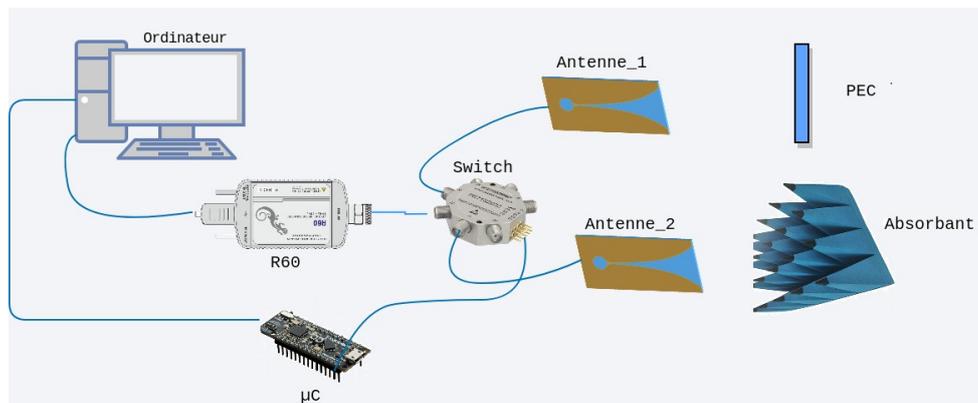


Figure 10. Montage en configuration mono-statique multiplexée

Un travail de caractérisation de chaque chaîne a été réalisé afin de contrôler l'état de stabilité et d'intégrité des signaux pour chaque chaîne d'acquisition, plus particulièrement celle intégrant le multiplexeur. Enfin, une évaluation des performances en termes de vitesse d'acquisition de chaque dispositif a été conduite.

Intégration du démonstrateur radar à sauts de fréquence multi-antennes

Ce démonstrateur (Fig. 11) pourra s'intégrer dans le banc de mesures EM de terrain, étudié en section §3.4 dans le cadre de ce projet.

a)



b)

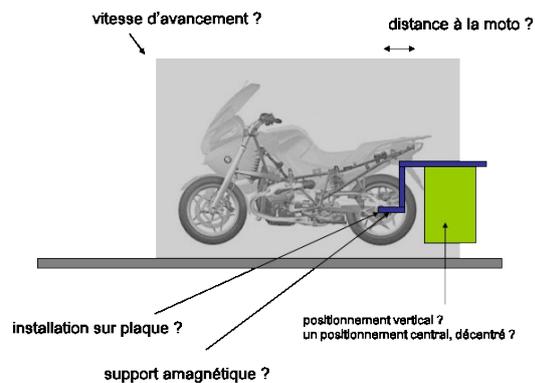


Figure 11. a) Démonstrateur de laboratoire en architecture multiplexée. b) Intégration à l'étude du démonstrateur RSF sur un véhicule deux roues motorisé

Il est également prévu d'envisager différentes expérimentations in situ de ce démonstrateur et ainsi répondre à différentes sollicitations (appel à défi « Démonstrateurs industriels ville durable » lancé par Rennes Métropole, projet FEREC CINC_RSFS,..) une collaboration a été initiée avec le CECP d'Angers autour d'un projet d'intégration du démonstrateur sur un véhicule deux roues motrices (Fig. 11). Celui-ci permettra de réaliser les premiers relevés souterrains dans une configuration radar à saut de fréquence multi-antennes.

3.6 Programmation des mesures sur le manège de fatigue

Le planning interne du manège de fatigue, sur la période 2018-2019, a vu une dérive sur la programmation initialement prévue pour le présent projet vers février-mars 2019. En effet, son démarrage était conditionné par la fin des projets en cours : le projet ANR SOLDUGRI, puis une expérimentation faisant suite au projet H2020 Bioreparation.

Finalement l'expérimentation CINC-RSF a été programmée à partir de mi-juin et a suivi le planning suivant :

- 12-14 juin : Mesures à 300 kchargements, avant le lancement de la nouvelle série, à 1,5 GHz, 2,6 GHz et par technique RSF,
- 25-26 juin : Mesures à 310 kchargements (à 1,5 GHz, 2,6 GHz),
- 04 juillet : Mesures à 396 kchargements (à 1,5 GHz, 2,6 GHz),
- 08-09 juillet : Mesures à 420 kchargements (à 1,5 GHz, 2,6 GHz et par technique RSF),
- 19 et 23 juillet : Mesures à 500 kchargements (à 1,5 GHz, 2,6 GHz et par technique RSF), le lendemain et cinq jours après une journée pluvieuse,
- 13-23 août : Mesures à 550 kchargements (à 1,5 GHz, 2,6 GHz et par technique RSF),
- 03 septembre : Mesures à 600 kchargements (à 1,5 GHz, 2,6 GHz et par technique RSF),

Il faut noter que la société MDS, distributeur des matériels GSSI et 3D-radar, est intervenu à notre demande à 396, 420 et 500 kchargements avec un système à réseaux d'antennes (3D-radar), matériel sophistiqué qui permet de reconstruire des cartographies d'anomalies enterrées. 20 profils radar, espacés de 7,5 cm, sont enregistrés en parallèle en travaillant dans une bande de fréquences de 200 MHz à 3 GHz. Ainsi, trois passages sur la zone test sont suffisants, avec un recouvrement partiel, pour reconstruire la structure de la chaussée.

A ce stade de chargement, les inspections visuelles (un léger orniérage dans la partie centrale de la zone) n'ont pas montré de dégradations importantes de la chaussées. Aussi, il a été prévu de poursuivre dans la deuxième quinzaine de septembre et courant octobre des chargements – et mesures radar – dans le but d'aboutir à un état de dégradation avancée de la structure.

Les chargements sont montés à 785 kchargements avant que l'un des bras du manège présente un incident technique (rupture mineure d'un élément de suspension d'un des bras) suite à des chocs répétés dus à une destruction locale de la couche de roulement de l'anneau, hors de notre zone test. Le temps de réparation du bras et du renforcement local de la chaussée, associé au temps climatique très pluvieux sur l'automne ont retardés la suite des chargements et mesures radar.

Pour accélérer le niveau de dégradation de la zone test, il a été décidé de poursuivre les chargements jusqu'à 720 000 passages pour simuler 35 kchargements pendant la période hivernale (à noter qu'en 2013 et 2019, les essais ont eu lieu principalement pendant des périodes d'été et en prévoyant de monter dans un second temps à 800 kchargements. L'objectif complémentaire est de disposer de deux séries de mesures pendant la période hivernale, correspondant également à deux états de dégradation avancé à fort.

- 23 janvier 2020: Mesures à 720 kchargements (à 1,5 GHz, 2,6 GHz),

Les températures basses du 23 janvier ($< 5\text{ °C}$) n'ont pas permis de mesures par technique RSF. Elles sont prévues début février. Pour les prévisions finales :

- Mars 2020 : Mesures à 800 kchargements (à 1,5 GHz, 2,6 GHz, par technique RSF et à l'aide du système à réseaux d'antennes de la société MDS),
- avril-mai 2020 : autopsie de la structure de chaussée par fenêtrage et/ou carottage.

3.7 Méthode de traitement des signaux RSF

Dans cette partie, nous présentons succinctement la méthodologie de traitement des signaux radar. Elle est illustrée sur de signaux SFR collectés sur le manège lors de la première campagne de mesures en 2012.

3.7.1 Contexte

Les notions de super et haute résolution ont été introduites dans la communauté traitement du signal dans les années 60 et 80, respectivement, pour améliorer les performances des méthodes d'analyse spectrale, dont l'objectif est d'identifier des raies spectrales dans un signal oscillant. Le formalisme mathématique s'étend à d'autres problématiques, et en particulier en ce qui nous concerne ici, à la mesure de temps de radar à partir d'un signal radar ultra large bande.

Nous avons commencé à appliquer des méthodes haute résolution (HR) à l'IFSTTAR à partir de 2003 pour mesurer des épaisseurs fines de couches de roulement de chaussée, de type BBTM et BBUM. Des méthodes spécifiques super et haute résolution ont été adaptées pour la mesure de temps de retard des signaux GPR ultra large bande dans le cadre de la thèse de C. Le Bastard (2004-2007). Lorsque le rapport signal à bruit des échos est suffisamment élevé, ces méthodes permettent d'améliorer le pouvoir de résolution temporelle du radar d'un facteur 10 à 20, et ainsi séparer deux échos successifs qui se recouvrent temporellement. On parlera de méthodes à fort pouvoir de résolution temporelle pour simplifier.

Depuis 2011, l'application de ces méthodes avancées de traitement du signal s'est étendue à la détection de défauts d'interface, i.e., décollement entre 2 couches d'un milieu stratifié. Ce type de défauts est susceptible de faire émerger des fissures remontantes (*reflexive cracks*) en surface de chaussée. Une détection précoce du défaut d'interface permettrait d'anticiper une dégradation plus importante. Au niveau opérationnel, on dispose d'une méthode qualitative (dites des rapports d'amplitude ou ART pour Amplitude Ratio Test) de détection de ce type de défaut d'interface, e.g., Simonin et al. (2012).

Le défaut d'interface est modélisé comme une couche supplémentaire très fine, susceptible de générer deux échos radar qui se recouvrent temporellement. Cependant, l'épaisseur du défaut d'interface à détecter est beaucoup plus faible (quelques millimètres) en comparaison de la mesure d'épaisseur de couches de roulement (qq cm). Pour cette nouvelle problématique, il faut combiner l'ultra large bande et des méthodes avancées de traitement du signal radar pour obtenir une résolution temporelle suffisante pour séparer les échos qui se recouvrent temporellement.

Le travail proposé dans le projet FEREC a pour objectif de tester la faisabilité de cette méthodologie de traitement, dans des conditions plus sévères d'épaisseurs et de rapport signal à bruit plus faible. Si cela fonctionne, on disposera d'une méthode pour estimer l'épaisseur du défaut, complémentaire de la méthode qualitative de référence ART, évoquée plus haut.

3.7.2 Traitement des signaux radar

Les méthodes à fort pouvoir de résolution temporelle sont basées sur un modèle simplifié de signal radar (appelé également Ascan). Moyennant des hypothèses d'ondes quasi-planes, chaque Ascan radar est supposé être la somme de copies retardés et atténués de l'impulsion radar émise.

On exprime le signal dans le domaine fréquentiel (donc directement les signaux issus du VNA pour le radar à sauts de fréquence), car cette formulation permet d'exploiter pleinement des propriétés mathématiques particulières.

Pour favoriser le fonctionnement de ces méthodes, on focalise le traitement sur le signal d'interface. On utilise pour ce faire un fenêtrage temporel (*time gating*), qui est centré sur le maximum de l'enveloppe de l'écho d'interface. Le fenêtrage temporel, implique de passer par deux transformées de Fourier successives comme indiqués dans le synoptique de la Fig. 12.

En outre, pour ces méthodes, on a besoin de connaître la forme de l'impulsion radar. Pour ce faire, on isole l'écho radar de surface dans le Ascan si cela est possible, ou bien, on réalise une mesure spécifique sur une plaque métallique.

La dernière étape de prétraitement, i.e., le moyennage en sous-bandes, permet de réduire la corrélation statistique entre les deux échos qui se succèdent. Autrement, la méthode perdrait de son pouvoir de résolution temporelle.

Deux méthodes HR ont été sélectionnées pour ces tests. MUSIC (*Multiple Signal Classification*) ou méthode du goniomètre est la plus connue et une des plus anciennes méthodes haute résolution. Elle nécessite une étape assez coûteuse en temps de calcul, de décomposition en éléments propres de la matrice de covariance des données radar. La méthode OPM (*Orthogonal Projector Method*), introduite au cours des années 90s, présente l'avantage d'une complexité calculatoire plus réduite, tout en en fournissant des performances équivalentes à fort rapport signal à bruit.



Figure 12. Synoptique du traitement des signaux (Ascan) radar

3.7.3 Illustrations

La Figure 13 présente un exemple de coupe-temps (ou profil ou *Bscan*) radar obtenu pendant la campagne de 2012 au-dessus d'un défaut artificiel du manège (ici, géotextile). Le premier écho est l'écho de surface, le second est celui de l'interface à surveiller. La zone avec décollement est facilement détectable par un renforcement de l'amplitude de l'écho d'interface, en comparaison de celui sur la zone saine.

Les algorithmes HR sont appliqués sur la partie gauche du Bscan uniquement.

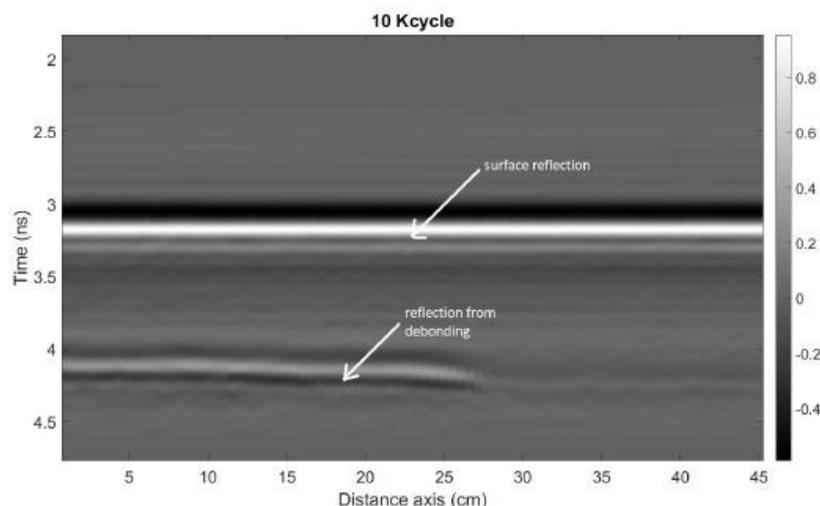


Figure 13. Exemple d'un Bscan radar obtenu avec le radar à sauts de fréquence au-dessus d'une zone de test, qui comprend une zone saine (à droite) et un décollement artificiel (à gauche, géotextile)

La Figure 14 illustre le résultat du traitement sur un Ascan. On distingue le signal radar brut avec les 2 signaux utiles, l'écho de surface et l'écho d'interface. Conformément au synoptique Fig. 12, le traitement HR est appliqué sur l'écho d'interface après fenêtrage temporel. Les pseudo-spectres obtenus par les 2 méthodes HR, MUSIC et OPM, indiquent clairement deux retards de propagation, correspondant aux échos sur les deux côtés du décollement artificiel.

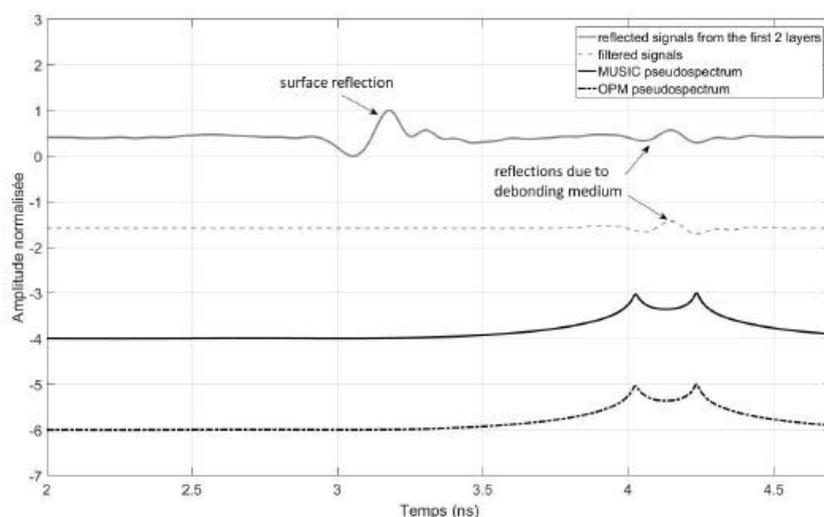


Figure 14. Illustration du synoptique du traitement sur un Ascan radar, avec de haut en bas: a) signal radar indiquant les 2 signaux utiles, l'écho de surface et l'écho d'interface; b) la sélection de l'écho d'interface par fenêtrage temporel; c) le pseudo-spectre de MUSIC; d) le pseudo-spectre de OPM; d'après B. Tankeu (2019)

Le traitement de la figure 14 est réitéré de manière indépendante sur chaque Ascan adjacent. Les pseudo-spectres obtenus sont rassemblés pour former le pseudo Bscan de la Figure 15 (haut). Bien que peu visible, les pseudo-spectres comportent néanmoins deux retards de propagation. Les valeurs de retard différentiel entre les deux échos (figures du

milieu) sont traduites en épaisseur de décollement (figures du dessous) en supposant une permittivité relative de 5 pour le matériau contenu dans le décollement (ici, du sable).

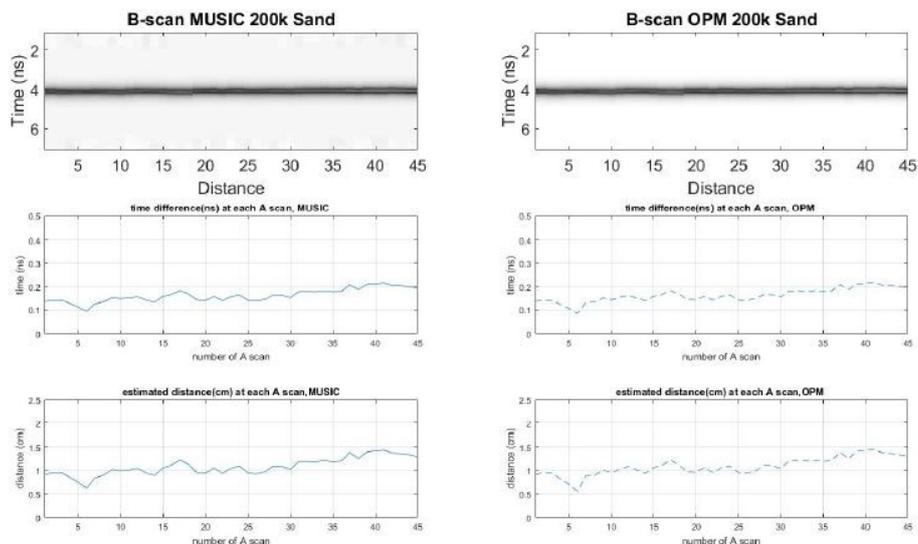


Figure 15. Illustration du traitement haute résolution sur tous les Ascans présentant un décollement d'interface; de haut en bas: a) Pseudo-spectres de MUSIC (à gauche) et OPM (à droite); b) Retard différentiel entre les deux pics détectés dans les pseudo-spectres respectifs; c) Première estimation de l'épaisseur du décollement (sable) en supposant une permittivité de 5; d'après B. Tankeu (2019)

4 Résultats expérimentaux

4.1 Dégradations superficielles

Les dégradations surfaciques, constatées au fur et à mesure des chargements à chaque étape de mesures radar, sont présentées pour les défauts principaux I11, I12 et I13.

La météorologie a été ensoleillée courant juin et juillet, sauf pendant une courte période pluvieuse les 23 juin (à 310 kchgts) et 18 juillet (à 500 kchgts).

Les premières fissures et début d'orniérage sont apparus à partir de 400 kchargements sur le défaut I13 (une fissure principale transversale), alors que l'on ne constatait rien de franc pour les défauts I11 et I12.

Les photos correspondant à la l'état 720 kchgts, réalisées courant janvier lors des expérimentations radar, montrent une évolution nette de la dégradation superficielle de la structure de chaussée (Figs 16 à 18).

310 kchgts



500 kchgts



720 kchgts



Figure 16. Evolution des dégradations superficielles du défaut I11 à 310, 500 et 720 kchgts

310 kchgts



500 kchgts



720 kchgts



Figure 17. Evolution des dégradations superficielles du défaut I12 à 310, 500 et 720 kchgts

310 kchgts



500 kchgts



720 kchgts



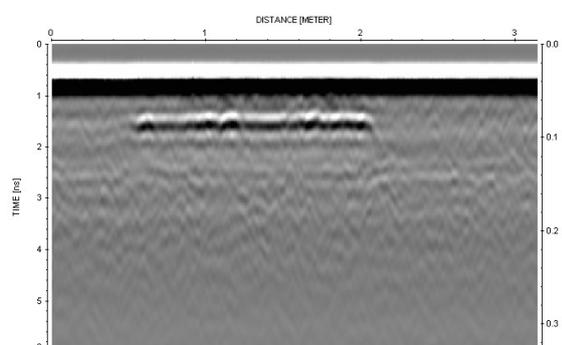
Figure 18. Evolution des dégradations superficielles du défaut I13 à 310, 500 et 720 kchgts

4.2 Traitement des données à 2,6 GHz

Au vu du nombre important de données à traiter, le travail a porté dans un premier temps sur les données radar impulsionnelles à 2,6 GHz, correspondant à une utilisation classique de la technique pour la problématique étudiée.

L'un des traitements classique, employé pour estimer les épaisseurs de couches de chaussées, est le pointé automatique des maximum des échos radar détectés aux interfaces qui permet également d'enregistrer les temps de propagation et les amplitudes de ces échos, pour chaque signal radar. La figure 19 présente un exemple de pointés, réalisés à l'aide du logiciel commercial ReflexW sur le défaut I11 après 550 kchargements. Pour pouvoir comparer les amplitudes des échos issus d'un défaut d'une série de mesures à une autre, les amplitudes sont normalisées par l'écho de surface (visible à $\sim 0,8$ ns sur la figure 19).

a)



b)

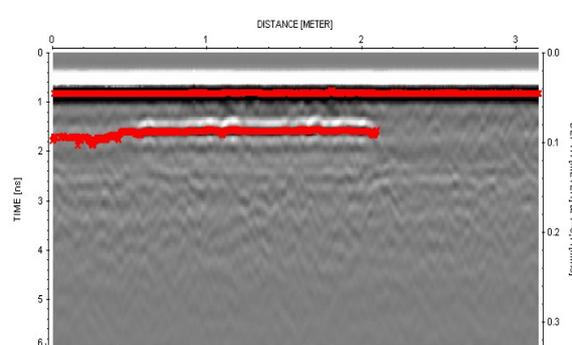


Figure 19. Profil radar 2,6 GHz sur le défaut I11. a) profil pré-traité, b) visualisation des pointés sur les deux premiers interfaces

La figure 20 regroupe l'évolution des amplitudes normalisées au niveau de l'interface GB/BB autour des défauts principaux I11, I12, I13 et I10 issus des profils longitudinaux.

La figure 20 montre l'évolution des amplitudes normalisées au niveau de l'interface GB/BB autour des défauts. On détecte parfaitement l'emprise des défauts de 1,5 m pour les défauts I11 à I13, en notant que les pointés n'ont pu être réalisés dans la partie centrale de I13 à cause de la présence de capteurs noyés dont les échos viennent bruyier ceux de l'interface GB/BB. La détection du défaut I10 est, quant à lui moins net car discontinu. Néanmoins, on peut le positionner entre les abscisses 0,5 et 3 m. De plus, sur le profil longitudinal de la figure 20d, on peut noter la présence du défaut I9 (de 50 cm de large) qui est apparu entre les séries 420 et 600 kchgts entre les abscisses 3,5 et 4 m.

Pour ce qui concerne l'évolution des amplitudes, que l'on pourrait relier à un niveau de décollement, dégradation et/ou intrusion d'eau, on peut noter les points suivants :

- pour le défaut I13 (absence de couche d'accrochage), seul le dernier état (720 kchgts) montre une évolution nette de dégradation - peut-être en lien avec l'apparition de nombreuses fissurations,
- pour le défaut I12 (géotextile), pas d'évolution visible du défaut tant en longueur qu'en amplitude,
- pour le défaut I11 (sable), les niveaux d'amplitude sont très variables mais ne montrent pas de tendance claire,
- pour le défaut I10 (géotextile), il apparaît de manière très discontinue et le dernier état (720 kchgts) apparaissant plus nettement. A noter que le défaut I9 (géotextile) reste la plupart du temps non détectable sous le niveau de seuil retenu (0,25),

Concernant les profils transversaux, centrés sur les défauts, on rappelle que la largeur des défauts principaux I11 à I13 est supérieure (2 m) à celle de l'emprise des roues (1,63 m). La figure 21 montre l'évolution des amplitudes normalisées au niveau de l'interface BB/GB autour des défauts avec l'emprise de la circulation des roues indiquée entre les pointillés verticaux rouges.

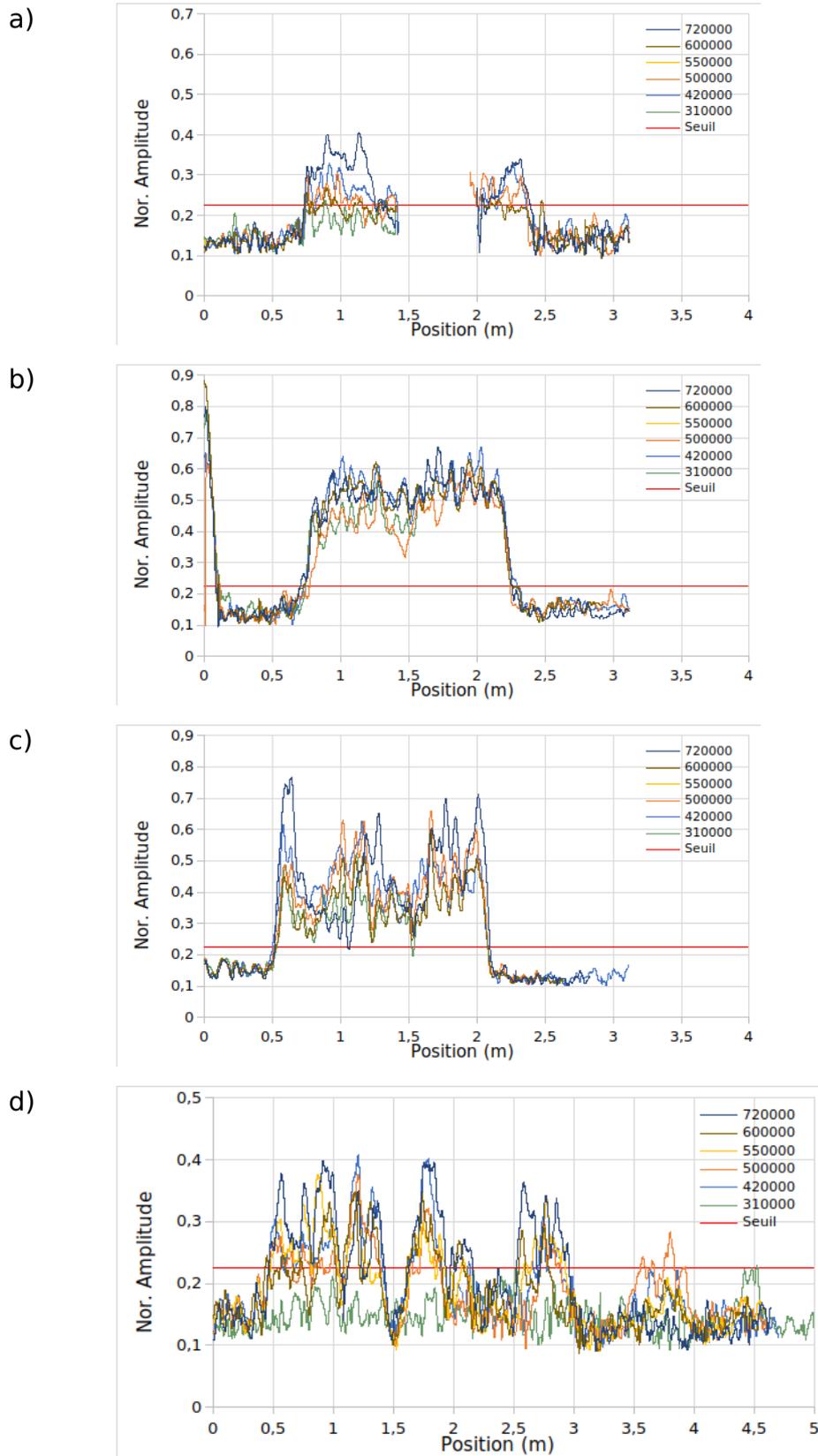


Figure 20. Amplitudes normalisées des profil radar 2,6 GHz longitudinaux sur le défauts: a) I13, b) I12, c) I11 et d) I10 et I9

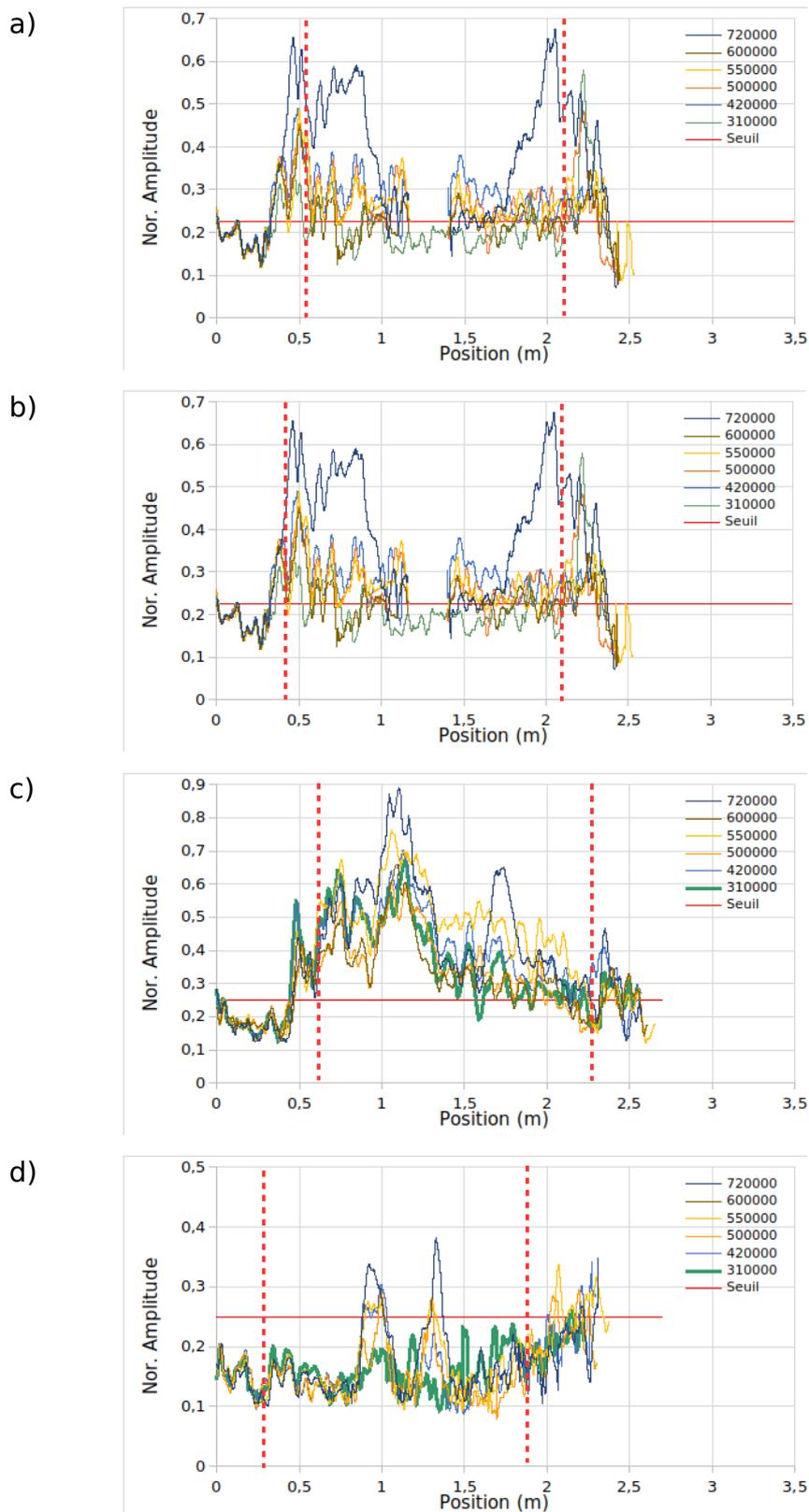


Figure 21. Amplitudes normalisées des profil radar 2,6 GHz transversaux sur le défauts: a) I13, b) I12, c) I11 et d) I10

On constate que l'extension latérale de défauts est quasi-nulle, et qu'au niveau des amplitudes seuls les défauts I13 et I11 montrent une évolution de dégradation.

Pour ce qui concerne l'évolution des amplitudes, on peut noter les points suivants :

- pour le défaut I13, on constate une nette évolution lors de la série à 720 kchgs, sauf dans la partie centrale près des capteurs noyés, où l'on peut supposer la présence de colle expliquant des contrastes moins forts et sans doute l'absence de décollement,
- pour le défaut I12, on ne voit aucune évolution,
- pour le défaut I11, l'évolution apparaît de manière irrégulière lors de la dernière série à 720 kchgs,
- enfin pour le défaut I10, il est surprenant de constater une évolution sur les bords du défaut en fonction du trafic et non dans sa partie centrale. De plus, on note une élévation de l'amplitude en se rapprochant de l'extérieur de la zone test (entre 1,5 et 2,3 m) qui pourrait correspondre à une diminution de l'épaisseur de BB.

Le tableau 4 centralise la position (début / fin), longueur et amplitude moyenne des défauts détectés par radar. Pour cela un niveau de seuil a été fixé en fonction des zones considérées comme saines à 0,225 ou 0,25.

Tableau 4. Localisation et longueur des défauts détectés à 2,6 GHz

Defect	Loads	310000	396000	420000	500000	550000	600000	720000
I13 longitudinal	Start position (m)	0,74	0,74	0,75	0,74	0,75	0,74	0,73
	End position (m)	2,24	2,39	2,39	2,38	2,43	2,40	2,41
	Defect length (m)	1,50	1,65	1,64	1,64	1,68	1,66	1,68
	Averaged Ampl.	0,19	0,24	0,26	0,24	0,24	0,21	0,29
I13 transversal	Start position (m)	0,36	0,34	0,32	0,33	0,33	0,33	0,33
	End position (m)	2,34	2,36	2,34	2,30	2,36	2,36	2,37
	Defect length (m)	1,98	2,02	2,02	1,97	2,03	2,03	2,04
	Averaged Ampl.	0,23	0,29	0,30	0,28	0,28	0,24	0,41
I12 longitudinal	Start position (m)	0,75	0,72	0,75	0,78	0,72	0,76	0,72
	End position (m)	2,24	2,25	2,26	2,24	2,27	2,24	2,25
	Defect length (m)	1,49	1,53	1,51	1,46	1,55	1,48	1,54
	Averaged Ampl.	0,44	0,52	0,53	0,46	0,53	0,51	0,51
I12 transversal	Start position (m)	0,50	0,46	0,47	0,47	0,34	0,45	0,46
	End position (m)	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30
	Defect length (m)	1,80	1,84	1,83	1,83	1,96	1,85	1,84
	Averaged Ampl.	0,41	0,49	0,47	0,43	0,50	0,45	0,43
I11 longitudinal	Start position (m)	0,54	0,52	0,51	0,53	0,53	0,55	0,52
	End position (m)	2,08	2,07	2,07	2,08	2,07	2,08	2,09
	Defect length (m)	1,53	1,55	1,56	1,55	1,54	1,53	1,58
	Averaged Ampl.	0,34	0,47	0,44	0,43	0,53	0,37	0,46
I11 transversal	Start position (m)	0,44	0,46	0,45	0,47	0,45	0,47	0,46
	End position (m)	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30
	Defect length (m)	1,86	1,84	1,85	1,83	1,85	1,83	1,84
	Averaged Ampl.	0,38	0,40	0,43	0,36	0,48	0,35	0,47
I10 longitudinal	Start position (m)	-	-	0,45	0,46	0,46	0,42	0,45
	End position (m)	-	-	2,94	2,90	2,94	2,82	2,97
	Defect length (m)	-	-	2,49	2,45	2,48	2,40	2,52
	Averaged Ampl.	-	-	0,23	0,21	0,23	0,22	0,26
I10 transversal	Start position (m)	0,93	0,86	0,86	0,87	0,85	-	0,87
	End position (m)	1,21	1,38	1,37	1,36	1,39	-	1,41
	Defect length (m)	0,28	0,52	0,51	0,49	0,54	-	0,54
	Averaged Ampl.	0,17	0,18	0,19	0,18	0,20	-	0,23

4.3 Campagne 2012 à 2,6 GHz

Les mesures radar réalisées pendant la première campagne courant 2012 à 2,6 GHz, bien qu'utilisant un autre matériel, ont été traitées de la même manière pour pouvoir les comparer.

La figure 22 rassemble les résultats à 10, 50, 101, 200 et 250 kchgts, ainsi que les résultats issus de 720 kchgts pour avoir un élément de comparaison.

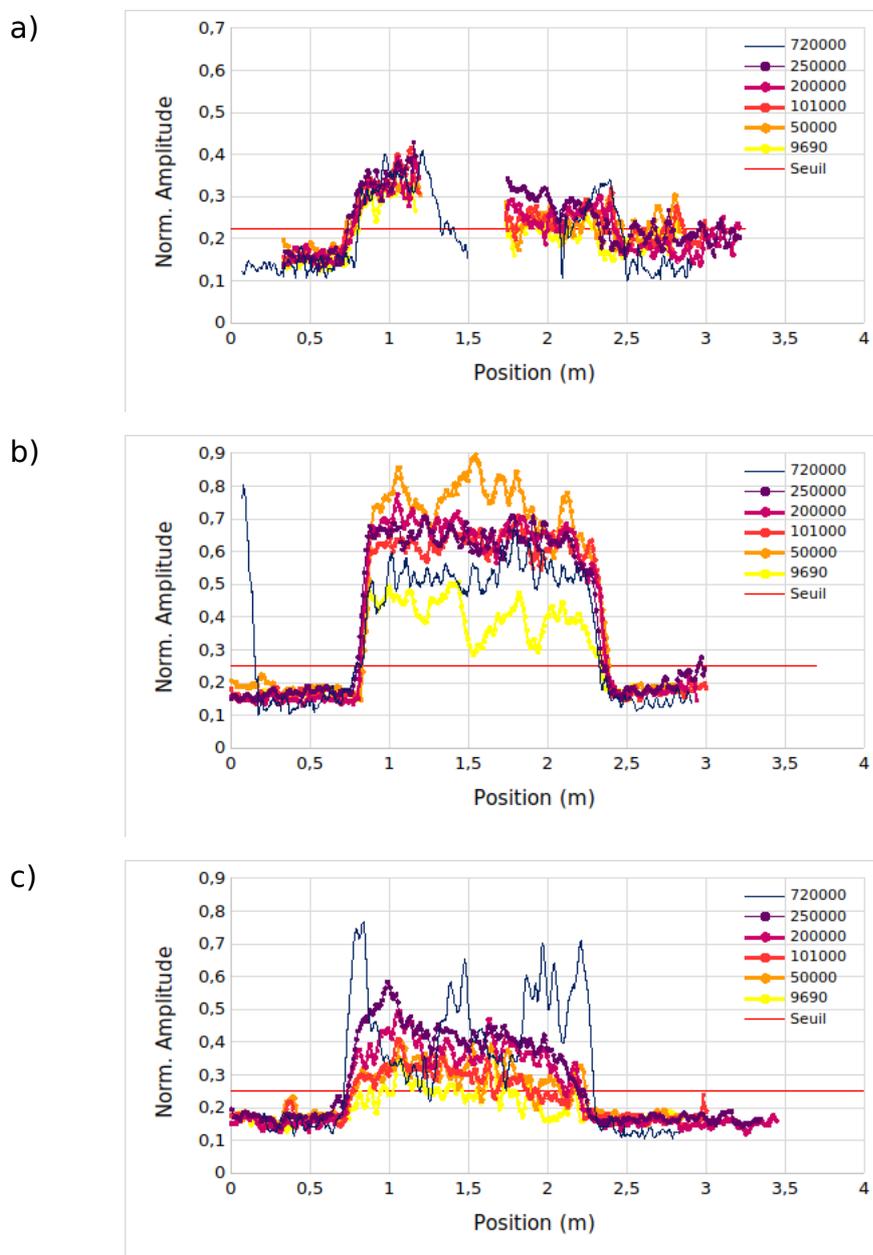


Figure 22. Amplitudes normalisées des profil radar 2,6 GHz longitudinaux, réalisés courant 2012 sur le défauts: a) I13, b) I12, et c) I11

Seuls, les défauts I12 et I11 montrent quelques évolutions d'amplitudes qui augmentent légèrement, sachant qu'aucune dégradation de surface n'a été détectée pendant cette campagne de mesure.

4.4 Traitement des données à 1,5 GHz

Les données radar impulsionnelles à 1,5 GHz, ont également été étudiées pour les défauts principaux I13 à I10 et les pointés des amplitudes normalisées, au niveau de l'interface BB/GB, sont présentées figures 23 et 24, avec l'emprise de la circulation des roues indiquée entre les pointillés verticaux rouges pour les profils transversaux.

On note que les variations d'amplitude, en fonction du trafic, sont plus faibles qu'à 2,6 GHz, mais que l'on retrouve les tendances détectées à la fréquence supérieure.

De même que pour les données à 2,6 GHz, le tableau 5 centralise la position (début / fin), longueur et amplitude moyenne des défauts détectés par radar. Pour cela un niveau de seuil a été fixé en fonction des zones considérées comme saines à 0,15.

Tableau 5. Localisation et longueur des défauts détectés à 1,5 GHz

Defect	Loads	310000	396000	420000	500000	550000	600000	720000
I13 longitudinal	Start position (m)	0,74	0,75	0,73	0,72	0,71	0,75	0,74
	End position (m)	2,27	2,39	2,39	2,37	2,37	2,39	2,39
	Defect length (m)	1,53	1,64	1,66	1,65	1,66	1,64	1,65
	Averaged Ampl.	0,19	0,22	0,23	0,22	0,21	0,21	0,24
I13 transversal	Start position (m)	0,31	0,31	0,29	0,27	0,32	0,29	0,30
	End position (m)	2,04	2,08	2,10	2,15	2,25	2,27	2,33
	Defect length (m)	1,73	1,77	1,81	1,88	1,93	1,98	2,03
	Averaged Ampl.	0,19	0,22	0,24	0,22	0,23	0,22	0,33
I12 longitudinal	Start position (m)	0,74	0,76	0,71	0,75	0,75	0,75	0,76
	End position (m)	2,26	2,32	2,33	2,27	2,37	2,35	2,38
	Defect length (m)	1,52	1,56	1,62	1,52	1,62	1,60	1,62
	Averaged Ampl.	0,33	0,41	0,42	0,34	0,40	0,41	0,40
I12 transversal	Start position (m)	0,47	0,47	0,48	0,43	0,33	0,45	0,47
	End position (m)	-	2,37	-	2,34	2,38	2,38	2,38
	Defect length (m)	-	1,90	-	1,91	2,05	1,93	1,91
	Averaged Ampl.	0,30	0,37	0,36	0,30	0,37	0,33	0,32
I11 longitudinal	Start position (m)	0,47	0,48	0,47	0,47	0,47	0,49	0,50
	End position (m)	2,10	2,13	2,12	2,10	2,08	2,12	2,15
	Defect length (m)	1,63	1,65	1,65	1,63	1,61	1,63	1,65
	Averaged Ampl.	0,33	0,42	0,41	0,37	0,49	0,34	0,39
I11 transversal	Start position (m)	0,57	0,58	0,57	0,58	0,56	0,51	0,59
	End position (m)	2,20	2,28	2,29	2,26	2,36	2,12	2,29
	Defect length (m)	1,63	1,70	1,72	1,68	1,80	1,61	1,70
	Averaged Ampl.	0,34	0,39	0,39	0,33	0,44	0,35	0,42
I10 longitudinal	Start position (m)	1,18	-	1,09	1,09	1,07	1,10	1,09
	End position (m)	3,62	-	3,63	3,55	3,60	3,63	3,62
	Defect length (m)	2,44	-	2,54	2,46	2,53	2,53	2,53
	Averaged Ampl.	-	-	0,20	0,18	0,19	0,18	0,22
I10 transversal	Start position (m)	0,82	0,82	0,83	0,83	0,84	0,85	0,85
	End position (m)	1,35	1,39	1,40	1,38	1,38	1,38	1,42
	Defect length (m)	0,53	0,57	0,57	0,55	0,54	0,53	0,57
	Averaged Ampl.	0,15	0,17	0,18	0,16	0,16	0,15	0,19

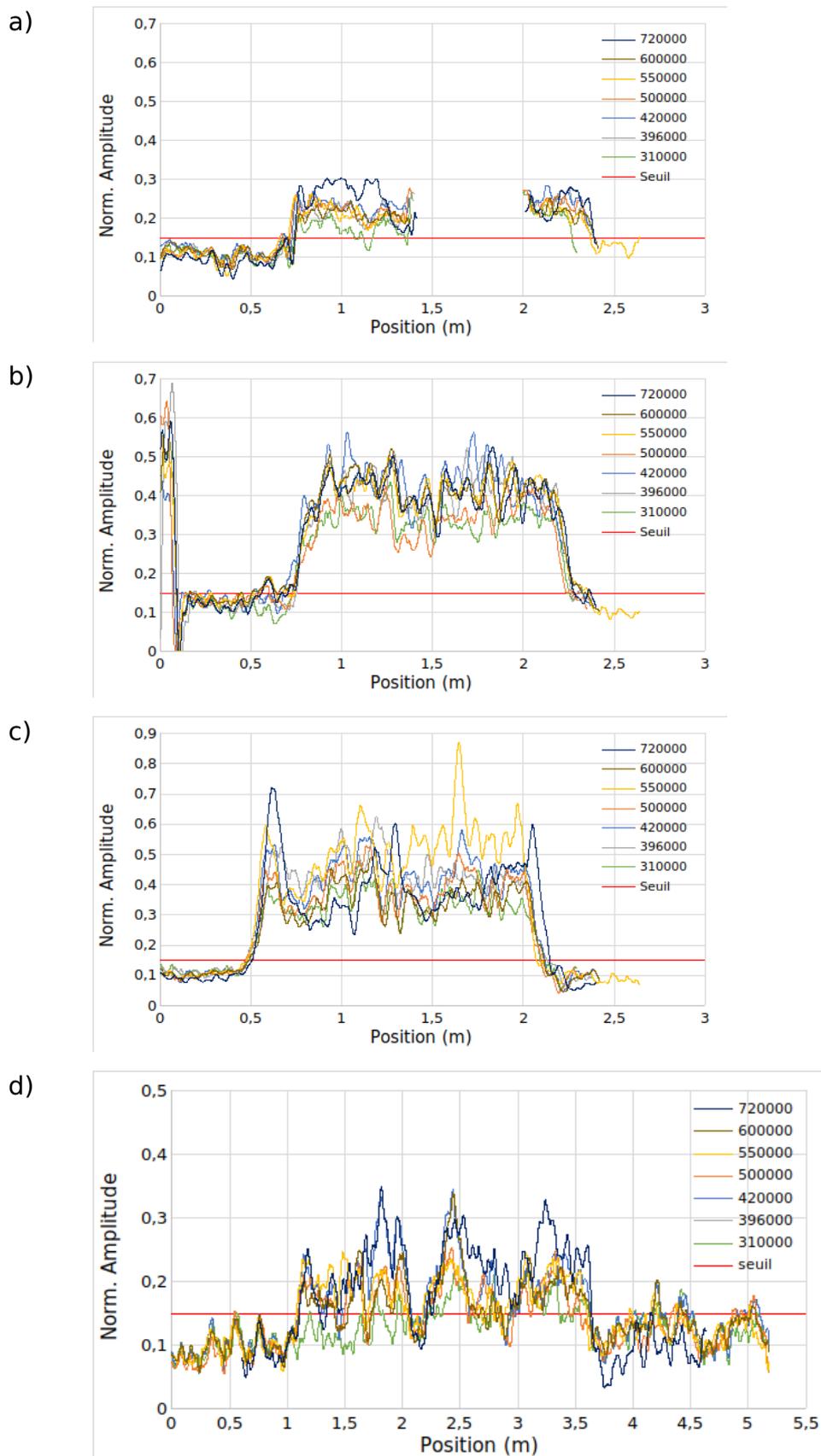


Figure 23. Amplitudes normalisées des profil radar 1,5 GHz longitudinaux sur le défauts: a) I13, b) I12, c) I11 et d) I10 et I9

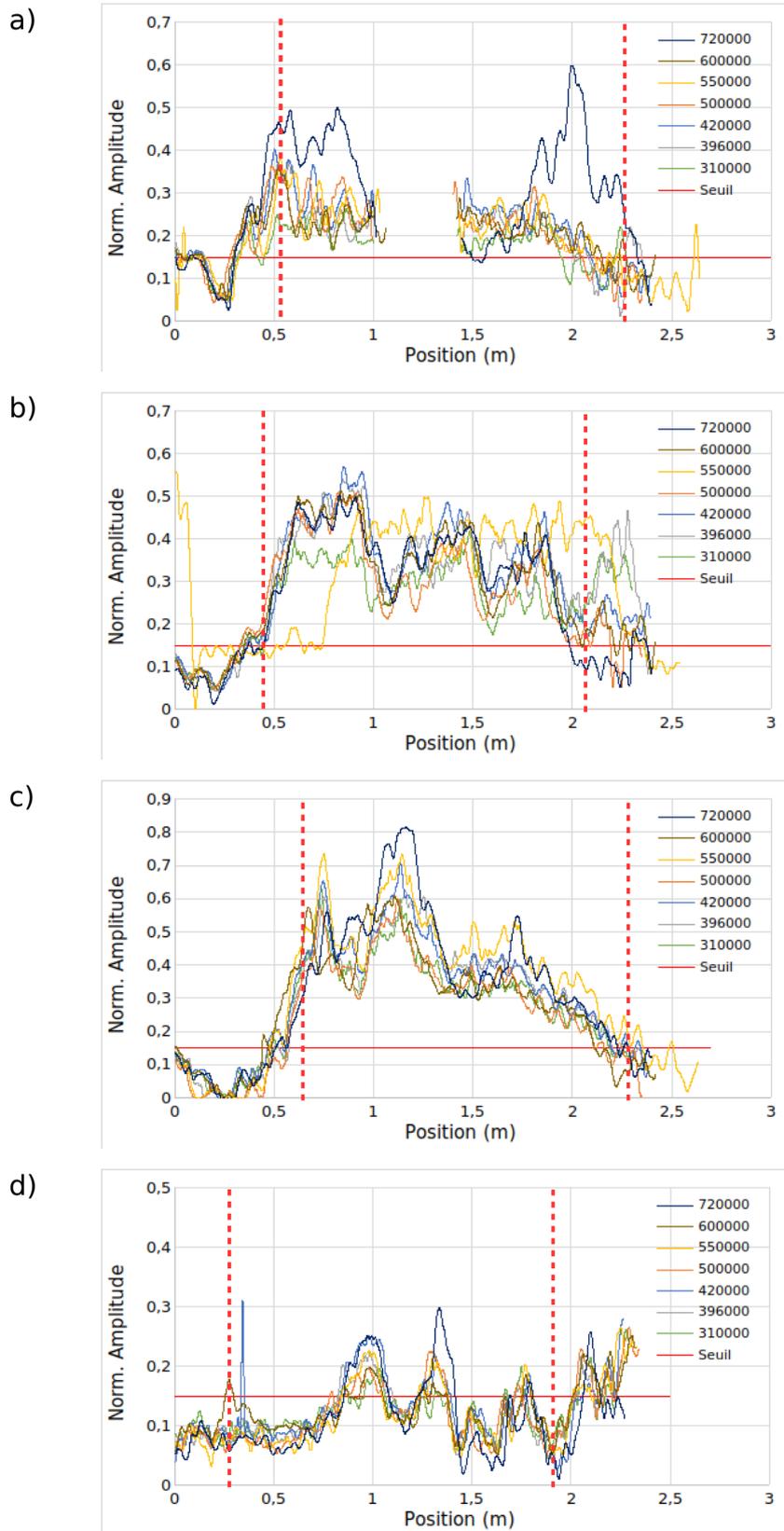


Figure 24. Amplitudes normalisées des profil radar 1,5 GHz transversaux sur le défauts: a) I13, b) I12, c) I11 et d) I10 et I9

5 Utilisation de l'aide de la Ferec dans le projet

L'aide de la fondation FEREC, appuyée par la DGITM, a permis de relancer cette recherche (non finalisée), le coût de fonctionnement du manège de fatigue de l'Ifsttar étant trop important pour les budgets internes des laboratoires de l'Ifsttar.

L'utilisation de ces financements peut se décomposer de la manière suivante (ordre de grandeur) :

- Fonctionnement du manège : 25 % FEREC + 40 % DGITM + 35 % financement interne,
- Conception d'un banc EM : 20 % FEREC,
- Petit matériel EM hautes fréquences : 25 % FEREC,
- Fonctionnement : 10 % FEREC
- Missions : 5 % FEREC
- Encadrement stages étudiants (3) : 15 % FEREC
 - Ho Yan HUI, « Simulation of GPR monitoring of a road section under controlled traffic », licence 3, univ. Polytechnique de Hong Kong, stage de 2 mois,
 - Pok Hin Gabbo CHING, « GPR monitoring of a road section under controlled traffic », licence 4, univ. Polytechnique de Hong Kong, stage de 2 mois,
 - Bachir TCHANA TANKEU, « Estimation of debonding thickness in road pavement with high resolution methods », M2R, université de Bourgogne, stage de 5 mois.

6 Impact

6.1 Apports et retombées pour la collectivité

Les résultats expérimentaux intéressent à profession dans le sens où ils devraient aider à prédire l'évolution d'une dégradation de décollement de couches traitées de chaussées à partir d'une inspection radar sur une chaussée en service – information qui n'est pas connue à ce jour par la profession.

De plus, il est prévu de mettre à disposition la base de données radar sur Internet, une fois les résultats valorisés par des publications et communications.

6.2 Publications et autres éléments de communication auxquels le projet et ses résultats ont donné lieu

Il est déjà prévu de diffuser les résultats principaux de cette recherche dans les congrès suivants où nous avons/allons soumettre des communications :

- Congrès APT 2020 : congrès international sur les essais accélérés sur chaussées, organisé par l'Ifsttar de Nantes du 21 au 23 septembre 2020. Trois communications issues de l'action CINC-RSF sont soumises (articles à soumettre pour fin oct 2019) :

1. S. Todkar, V. Baltazart, C. Le Bastard, X. Dérobert, A. Ihamouten, J-M. Simonin, Performance assessment of supervised machine learning methods on GPR data to detect interlayer debondings within pavement structures.
 2. V. Baltazart, S. S. Todkar, C. Le Bastard, X. Dérobert, J-M. Simonin, Thin-bed data model for the processing of GPR data over disbonded pavement structures.
 3. X. Dérobert, V. Baltazart, J-M. Simonin, O. Durand, S. S. Todkar, Radar database collected over artificial disbonded pavement structures during APT at the Ifsttar's fatigue carousel.
- Congrès GPR 2020 : congrès international dédié à la technique radar géophysique, organisée à Boulder (Colorado, US), du XX au XX juin. Une communication soumise :
 1. Norgeot C., Dérobert X., Simonin J-M., Doué S., Baltazart V., Hui H.Y.. (2020), "3D GPR monitoring of artificial debonded pavement structures during accelerated tests", GPR2020 conf. proc., Boulder (US), June.
 - Journée Technique Route 2021 : Journées annuellement co-organisées par l'Ifsttar et le Cerema à Nantes, début février, où les résultats de CINC-RSF seront également présentés une fois la synthèse des résultats et vérités terrain confrontés.

En parallèle, il est prévu de publier des résultats étendus de ces travaux (nous avons reçu une invitation gratuite à publier dans le journal scientifique Remote Sensing, special issue « Ground penetrating radar », en *openaccess*).

Enfin, les données seront diffusées, comme bases de données, en *openaccess* sur Internet en lien avec les publications et communications. Elles seront associées à des *data papers* et dont le premier (en cours de construction) est :

- Dérobert X., Baltazart V., Simonin J.-M., Norgeot C. (2019), "Radar database over large debonded areas", <https://doi.org/10.25578/N0RXSQ>, Ifsttar. (redac),

7 Perspectives ouvertes par le projet notamment en matière de recherche collaborative

Prématuré à ce stade de cette recherche.