

**AMÉLIORATION DE L'IDENTIFICATION DES CAVITÉS SOUS LES
ROUTES ET DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL DE DIAGNOSTIC
RAPIDE POUR L'USAGE DU MTMD**
Projet R770.2

Mourad Karray, Mohamed Ali Temani, Ahmed Mhenni et Samah Kaadan
Département de génie civil
Université de Sherbrooke

Réalisé pour le compte du ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec

Présenté à :

DIRECTION GÉNÉRALE DU LABORATOIRE DES CHAUSSÉES
DIRECTION DE LA GÉOTECHNIQUE ET DE LA GÉOLOGIE
MINISTÈRE DES TRANSPORTS ET DE LA MOBILITÉ DURABLE
(MTMD)
2700, rue Einstein, bloc F, 1^{er} étage
Québec (Québec) G1P 3W8

Octobre 2024

La présente étude a été réalisée à la demande du ministère des Transports et a été financée par le Ministère.

Les opinions exprimées dans le présent rapport n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement les positions du ministère des Transports.

Collaborateurs

Bruno Paquet-Bouchard, ing., Direction de la géotechnique et de la géologie
Ministère des Transports et de la Mobilité durable

Sommaire

Ce document constitue le rapport final de la deuxième phase du projet de recherche « AMÉLIORATION DE L'IDENTIFICATION DES CAVITÉS SOUS LES ROUTES ET DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL DE DIAGNOSTIC RAPIDE POUR L'USAGE DU MTMD », selon le contrat intervenu entre le Ministère des Transports et de la mobilité durable Québec (Projet R.770.2) et l'Université de Sherbrooke.

Ce rapport a été réalisé à l'Université de Sherbrooke par Mourad Karray, professeur au département de génie civil et de génie du bâtiment, Mohamed Ali Temani, étudiant à la maîtrise, Ahmed Mhenni, étudiant au doctorat et Samah Kaadan, étudiante à la maîtrise. Le responsable du projet au ministère des Transports du Québec est Monsieur Bruno Paquet-Bouchard, ingénieur au Service géotechnique et géologie.

Ce rapport final fait état des travaux et planifications effectués dans le cadre de cette deuxième phase ainsi que des conclusions finales :

1. Mise en contexte : retour sur les limitations de la première phase et la nécessité de d'un site expérimental.
2. Réalisation du site expérimental, Automne 2020, localisé sous la piste cyclable menant au bassin hydraulique de l'université de Sherbrooke : mise en place de deux ponceaux en tôle ondulée galvanisée (TTOG), de 1.2 m de diamètre, à deux profondeurs différentes, soit à environ 1.5 m et à 3.5 m, avec des possibilités de créer 10 cavités à différents emplacements le long des ponceaux et ayant trois orientations différentes, soit à 0°, 45° et 90° par rapport au plan radial vertical des ponceaux.
3. Les différentes phases d'investigation et essais de mise au point de la procédure expérimentale. Il y a eu dans un premier temps des séries de relevés avant la création de cavités afin d'établir l'état initial et pouvoir apprécier la variabilité provoquée uniquement par le sol et le ponceau. Dans une deuxième phase d'investigation plusieurs séries de relevés ont été réalisées après la création de deux (2) cavités (C1 et C2), de 40×40×40 cm³ situés à 0° et 90° par rapport au plan radial vertical du ponceau situé à 3.5 m de profondeur. Chaque cavité a été créée sur deux étapes, d'abord à 20×20×20 cm³ ensuite a été élargie à 40×40×40 cm³. Séries de relevés parallèles (le long des extrémités longitudinales et de l'axe du ponceau) et perpendiculaires, avant, après la création de la cavité C10, de 40×40×40 cm³ situés à 45° par rapport au plan radial vertical du ponceau enterré à 1.5 m de profondeur, et après la fermeture de cette cavité avec de la mousse expansive (Polyuréthane). L'ensemble de ses mesures ont été réalisées avec des cavités fraîchement créées et avec des espacements entre les lignes de 20 cm. Dans la troisième phase de nouvelles mesures ont été effectuées après une certaine période afin d'apprécier les changements dans l'état des cavités et des contraintes autour de celles-ci. Ces essais ont été réalisés avec des espacements de 10

cm entre les lignes et en utilisant des distances source/ capteur différentes et aussi un couplage entre les capteurs et la chaussée différent. Une nouvelle cavité (C9) orientée à 0 deg a également été ouverte dans le cas du ponceau de 1,5 m de profondeur.

4. Élaboration de modèles numériques calibrée à l'aide des données expérimentales. Les modèles numériques en 3D ont permis de mettre au point et d'ajuster la méthodologie finale d'analyse des données. Les analyses montrent que la création d'un vide sans tenir compte des changements des contraintes dans le sol permet d'identifier de manière assez précise la présence d'une cavité. Ceci est intéressant dans la mesure où les changements dans la distribution des contraintes permette de voir d'avantage la présence d'anomalies.

Synthèse des conclusions et recommandations

Dans l'ensemble, les objectifs du projet ont été atteints à 100%. En effet un site expérimental avec deux ponceaux enterrés à deux profondeurs différentes a été exécuté. Le site possède un potentiel de 10 cavités dont 4 se trouvent en dessous de la chaussée et 6 autres dans divers endroits le long du ponceau. L'ouverture ainsi que la fermeture par de la mousse des cavités en dessous de la chaussée et la réalisation de plusieurs essais avant et après la création de ces cavités a permis de développer une méthode de diagnostic robuste. Le processus de développement d'un outil de traitement des données rapide n'a pas été simple. En effet, un des principaux problèmes est d'assurer que tous les signaux sont de bonnes qualités (ceci dépend surtout de l'installation des capteurs et de l'énergie à la source) et que les capteurs sont positionnés exactement à l'endroit prévu. La présence de quelques signaux sur plus de 300 à 400 signaux peut amener des difficultés au niveau des analyses. Après plusieurs vérification et modification, une méthode basée sur la variation de la vitesse de groupe par rapport à la fréquence pour chaque capteur a permis de réduire de manière substantielle les effets de certains signaux de mauvaise qualité et d'avoir une méthode robuste qui permet de détecter avec précision la présence d'anomalie. Cette méthode a été testée sur de nombreux cas qui seront présentés dans ce rapport et s'avère très efficace. Cette méthode sera sans aucun doute plus efficace sur des ponceaux réels qui possèdent plus d'espace pour placer la source à une distance optimale. La méthode semble suffisamment précise pour mieux localiser les cavités, estimer leurs importances et distinguer entre un vide et une zone décompactée. Un certain nombre d'essais à l'échelle d'une route permettra de confirmer ces améliorations. Un logiciel a été créé pour le traitement des données et l'opération d'analyse d'une série d'essai peut prendre moins de 5 minutes afin de décider s'il y a ou non présence de cavité. Donc il est possible de conclure que nous disposons d'un outil de diagnostic très rapide qui peut être exécuté en moins de 1 heure après la réalisation des essais.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1 :	MISE EN CONTEXTE	1
CHAPITRE 2 :	SIMULATIONS NUMÉRIQUES ET MÉTHODOLOGIE POUR L'ANALYSE DES DONNÉES	5
2.1	GÉNÉRALITÉ.....	5
2.1	MODÉLISATIONS NUMÉRIQUES.....	5
2.1.1	<i>Choix du maillage</i>	8
2.1.2	<i>Modélisation de la source</i>	9
2.1.3	<i>Frontières du modèle et conditions aux limites</i>	9
2.2	MÉTHODE DE TRAITEMENT DES SIGNAUX.....	10
2.3	ANALYSES DES DONNÉES.....	12
2.4	CONSIDÉRATIONS PRATIQUES ET APPROCHE D'ANALYSE.....	19
CHAPITRE 3 :	RÉALISATION DU SITE EXPÉRIMENTALE	23
3.1	INSTALLATION DES PONCEAUX.....	23
3.2	ESSAIS RÉALISÉS.....	26
3.2.1	<i>Phase 1</i>	26
3.2.2	<i>Phase 2</i>	30
3.2.3	<i>Phase 3</i>	33
CHAPITRE 4 :	ANALYSE DES DONNÉES	38
4.1	ANALYSE DES DONNÉES DE LA PHASE 1 (CAVITÉ C6).....	39
4.2	RÉSULTATS DE LA PHASE 2.....	43
4.2.1	<i>Résultats du ponceau 1 avant la création de cavités</i>	44
4.2.2	<i>Résultats du ponceau 1 après la création de cavités</i>	49
4.2.3	<i>Résultats du ponceau 2</i>	58
4.3	RÉSULTATS DE LA PHASE 3.....	67
4.3.1	<i>Résultats du ponceau 1</i>	67
4.3.2	<i>Résultats du ponceau 2</i>	68
CHAPITRE 5	:CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	71
ANNEXE 1 :	PLAN CIVIL DU SITE EXPÉRIMENTAL	73
ANNEXE A2 :	RÉSULTATS DES ESSAIS EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 1 AVEC UNE SOURCE DU CÔTÉ AMONT ET AVANT LA CRÉATION DE CAVITÉS	78
ANNEXE A3 :	RÉSULTATS DES ESSAIS EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 1 AVEC UNE SOURCE DU CÔTÉ AVAL ET AVANT LA CRÉATION DE CAVITÉS	83

ANNEXE A4 :RÉSULTATS DES ESSAIS EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 1 AVEC UNE SOURCE DU CÔTÉ AMONT ET APRÈS LA CRÉATION DE LA CAVITÉ C1 À 20X20X20 CM	88
ANNEXE A5 : RÉSULTATS DES ESSAIS EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 1 AVEC UNE SOURCE DU CÔTÉ AVAL ET APRÈS LA CRÉATION DE LA CAVITÉ C1 À 20X20X20 CM	93
ANNEXE A6 : RÉSULTATS DES ESSAIS EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 1 AVEC UNE SOURCE DU CÔTÉ AMONT ET APRÈS LA CRÉATION DE LA CAVITÉ C1 À 40X40X40 CM	98
ANNEXE A7 :RÉSULTATS DES ESSAIS EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 1 AVEC UNE SOURCE DU CÔTÉ AVAL ET APRÈS LA CRÉATION DE LA CAVITÉ C1 À 40X40X40 CM	103
ANNEXE A8 : RÉSULTATS DES ESSAIS EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 1 AVEC UNE SOURCE DU CÔTÉ AMONT ET APRÈS LA CRÉATION DE LA CAVITÉ C1 À 40X40X40 CM ET DE LA CAVITÉ C2 DE 20X20X20 CM	108
ANNEXE A9 : RÉSULTATS DES ESSAIS EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 1 AVEC UNE SOURCE DU CÔTÉ AVAL ET APRÈS LA CRÉATION DE LA CAVITÉ C1 À 40X40X40 CM ET DE LA CAVITÉ C2 DE 20X20X20 CM	114
ANNEXE A10 :RÉSULTATS DES ESSAIS EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 1 AVEC UNE SOURCE DU CÔTÉ AVAL ET APRÈS LA CRÉATION DE LA CAVITÉ C1 À 40X40X40 CM ET DE LA CAVITÉ C2 DE 40X40X40 CM	119
ANNEXE A11 :RÉSULTATS DES ESSAIS EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 1 AVEC UNE SOURCE DU CÔTÉ AVAL ET APRÈS LA CRÉATION DE LA CAVITÉ C1 À 40X40X40 CM ET DE LA CAVITÉ C2 DE 40X40X40 CM	126
ANNEXE A12 :RÉSULTATS DES ESSAIS EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 2 AVEC UNE SOURCE DU CÔTÉ AMONT SANS CAVITÉ	131
ANNEXE A13 :RÉSULTATS DES ESSAIS EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 2 AVEC UNE SOURCE DU CÔTÉ AVAL APRÈS LA CRÉATION DE LA CAVITÉ C10 À 20X20X20 CM	136
ANNEXE A14 : RÉSULTATS DES ESSAIS EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 2 AVEC UNE SOURCE DU CÔTÉ AMONT APRÈS LA CRÉATION DE LA CAVITÉ C10 À 40X40X40 CM	141
ANNEXE A15 :RÉSULTATS DES ESSAIS EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 2 AVEC UNE SOURCE DU CÔTÉ AVAL APRÈS LA CRÉATION DE LA CAVITÉ C10 À 40X40X40 CM	146
ANNEXE A16 : RÉSULTATS DES ESSAIS EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 2 AVEC UNE SOURCE DU CÔTÉ AMONT APRÈS COLMATAGE DE LA CAVITÉ C10 DE 40X40X40 CM	151
ANNEXE A17 :RÉSULTATS DES ESSAIS EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 2 AVEC UNE SOURCE DU CÔTÉ AVAL APRÈS COLMATAGE DE LA CAVITÉ C10 DE 40X40X40 CM	156
RÉFÉRENCES	161

LISTE DES FIGURES :

FIGURE 1.1: CONFIGURATION ADOPTÉE POUR LA DÉTECTION D'ANOMALIE	3
FIGURE 2.1: CONFIGURATION NUMÉRIQUE DU MODÈLE HOMOGENE EN DEMI-ESPACE (H2) EN PRÉSENCE D'UNE CAVITÉ (KAADAN, 2023) – CAVITÉ ÉLARGIE POUR FIN DE PRÉSENTATION.....	7
FIGURE 2.2: CONFIGURATION NUMÉRIQUE DU MODÈLE ENTIÈREMENT HOMOGENE (N2 OU N3) EN PRÉSENCE DE D'UNE CAVITÉ (ÉLARGIE POUR FIN DE PRÉSENTATION)	7
FIGURE 2.3: A) REPRÉSENTATION TEMPORELLE ET B) FRÉQUENTIEL DE L'IMPULSION GAUSSIENNE CRÉÉE PAR L'ÉQUATION 4.2 AVEC $\sigma = 0.002$ ET $t_0 = 0.008$	10
FIGURE 2.4: INFLUENCE DU PARAMÈTRE SUR LA RÉOLUTION TEMPORELLE (A-B) ET TEMPS-FRÉQUENCE (C-D) DE LA FENÊTRE GAUSSIENNE DE LA GST UTILISÉE DANS L'ÉTUDE.....	11
FIGURE 2.5: TOMOGRAPHIES DE LA VITESSE DE PHASE A) SANS CAVITÉ B) AVEC CAVITÉ À 1,5 M, C) AVEC CAVITÉ À 3 M ET VITESSE DE GROUPE D) SANS CAVITÉ, E) AVEC CAVITÉ À 1,5 M, ET F) AVEC CAVITÉ À 3 M DE LA COMPOSANTE X CALCULÉE EN UTILISANT LA GST DES ENREGISTREMENTS PARALLÈLES DU MODÈLE ENTIÈREMENT HOMOGENE.....	14
FIGURE 2.6: TOMOGRAPHIES DE LA VITESSE DE PHASE A) SANS CAVITÉ B) AVEC CAVITÉ À 1,5 M, C) AVEC CAVITÉ À 3 M ET VITESSE DE GROUPE D) SANS CAVITÉ, E) AVEC CAVITÉ À 1,5 M, ET F) AVEC CAVITÉ À 3 M DE LA COMPOSANTE Z CALCULÉE EN UTILISANT LA GST DES ENREGISTREMENTS PARALLÈLES DU MODÈLE ENTIÈREMENT HOMOGENE.....	15
FIGURE 2.7: TOMOGRAPHIES DE LA VITESSE DE PHASE A) SANS CAVITÉ B) AVEC CAVITÉ À 1,5 M, C) AVEC CAVITÉ À 3 M ET VITESSE DE GROUPE D) SANS CAVITÉ, E) AVEC CAVITÉ À 1,5 M, ET F) AVEC CAVITÉ À 3 M DE LA COMPOSANTE Y CALCULÉE EN UTILISANT LA GST DES ENREGISTREMENTS PARALLÈLES DU MODÈLE ENTIÈREMENT HOMOGENE.....	16
FIGURE 2.8: COURBES DE DISPERSION DE LA COMPOSANTE Z CALCULÉE À L'AIDE DE LA GST À PARTIR DES ENREGISTREMENTS PARALLÈLES DU MODÈLE TOTALEMENT HOMOGENE EN TERMES A) DE VITESSE DE PHASE À 3 M ET B) DE VITESSE DE GROUPE À 2,2 M, 3 M ET 5,8 M.....	18
FIGURE 2.9: VARIATIONS DE LA VITESSE LE LONG DU RÉSEAU INSPECTÉ EN TERMES A) DE VITESSE DE PHASE À 94 HZ ET B) DE VITESSE DE DÉPLACEMENT À 94 HZ. LA LIGNE NOIRE EN POINTILLÉS CORRESPOND AUX LIMITES PROCHES ET LOINTAINES DE LA CAVITÉ.	18
FIGURE 2.10: INTERFACE DU LOGICIEL DE TRAITEMENT DES DONNÉES POUR LA DÉTECTION DES CAVITÉS.....	20
FIGURE 2.11: VARIATION DE LA VITESSE DE GROUPE LE LONG DE LA ZONE D'INVESTIGATION À UNE FRÉQUENCE 93 HZ A) SANS CAVITÉ ET B) AVEC CAVITÉ À 3 M DE DISTANCE.	22

FIGURE 3.1:A) ACQUISITION DES 48 M DE TTOG. B) PLACEMENT DU CORDON DE POLYMÈRE. C) VUE EXTÉRIEURE DES TRAPPES. D) EXÉCUTION DES OUVERTURES DE 20×20 CM. E) FERMETURE DES TRAPPES AVEC DES PLAQUES BOULONNÉES ...	25
FIGURE 3.2:POSITION DES CAVITÉS À 0°, 45° ET 90° PAR RAPPORT AU PLAN RADIAL VERTICAL.....	26
FIGURE 3.3:LES DIFFÉRENTES ÉTAPES L'EXÉCUTION DU PONCEAU 1.....	27
FIGURE 3.4:LES DIFFÉRENTES ÉTAPES DE L'EXÉCUTION DU PONCEAU 2.....	28
FIGURE 3.5:PREMIÈRE PHASE D'INVESTIGATION, HIVER 2021. A) RÉALISATION DES RELEVÉS PERPENDICULAIRES. B) RÉALISATION DES RELEVÉS PARALLÈLES. C) OUVERTURE DE LA TRAPPE C6. D) OUVERTURE DE LA CAVITÉ C6 JUSQU'À 20×20×30 CM ³	29
FIGURE 3.6:DEUXIÈME PHASE D'INVESTIGATION SUR LE PONCEAU 1. A) RELEVÉS PARALLÈLES. B) RELEVÉS PERPENDICULAIRES. C) VUE D'ENSEMBLE DE L'INTÉRIEUR DU PONCEAU 1. D) OUVERTURE DE LA CAVITÉ C1 JUSQU'À 40×40×40 CM ³ . E) OUVERTURE DE LA CAVITÉ C2 JUSQU'À 40×40×40 CM ³	32
FIGURE 3.7. DEUXIÈME PHASE D'INVESTIGATION SUR LE PONCEAU 2. A) RELEVÉS PARALLÈLES. B) RELEVÉS PERPENDICULAIRES. C) OUVERTURE DE LA CAVITÉ C10 JUSQU'À 40×40×40 CM ³ . D) CALFEUTRAGE DE LA CAVITÉ C1 AVEC DE LA MOUSSE EXPANSIVE.....	34
FIGURE 3.8. IMPLÉMENTATION DES RELEVÉS AVEC UN SYSTÈME DE LASERS. A) ALIGNEMENT DES RELEVÉS AVEC L'AXE DU PONCEAU. B) IMPLÉMENTATION DES REPÈRES EN SURFACE.	35
FIGURE A1. 1:PLAN CIVIL DU SITE EXPÉRIMENTAL (ÉCHELLE 1:250).	74
FIGURE A1. 2:PLAN CIVIL DU PONCEAU 1 (ÉCHELLE 1:250).	75
FIGURE A1. 3:PLAN CIVIL DU PONCEAU 2 (ÉCHELLE 1:250).	76
FIGURE A1. 4:COUPE-TYPE DE VOIRIE AU NIVEAU DU PONCEAU 1 (ÉCHELLE : AUCUNE).	77
FIGURE A1. 5:COUPE-TYPE DE VOIRIE AU NIVEAU DU PONCEAU 2 (ÉCHELLE : AUCUNE)	77
FIGURE A2. 1:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS AVANT LA CRÉATION DE CAVITÉ À UNE FRÉQUENCE DE 45 Hz (LIGNE 2 - AMONT).	79
FIGURE A2. 2:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS AVANT LA CRÉATION DE CAVITÉ À UNE FRÉQUENCE DE 50 Hz (LIGNE 2 – AMONT).	80

FIGURE A2. 3:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS AVANT LA CRÉATION DE CAVITÉ À UNE FRÉQUENCE DE 55 Hz (LIGNE 2 – AMONT).	81
FIGURE A2. 4:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS AVANT LA CRÉATION DE CAVITÉ À UNE FRÉQUENCE DE 60 Hz (LIGNE 2 – AMONT).	82
FIGURE A3. 1:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS AVANT LA CRÉATION DE CAVITÉ À UNE FRÉQUENCE DE 40 Hz (LIGNE 2 – AVAL).	84
FIGURE A3. 2:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS AVANT LA CRÉATION DE CAVITÉ À UNE FRÉQUENCE DE 45 Hz (LIGNE 2 – AVAL)	85
FIGURE A3. 3:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS AVANT LA CRÉATION DE CAVITÉ À UNE FRÉQUENCE DE 50 Hz (LIGNE 2 – AVAL)	86
FIGURE A3. 4:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS AVANT LA CRÉATION DE CAVITÉ À UNE FRÉQUENCE DE 55 Hz (LIGNE 2 – AVAL)	87
FIGURE A4. 1:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DE CAVITÉ C1 DE 20x20 CM À UNE FRÉQUENCE DE 45 Hz (LIGNE 4 – AMONT)	89
FIGURE A4. 2:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DE CAVITÉ C1 DE 20x20 CM À UNE FRÉQUENCE DE 50 Hz (LIGNE 4 – AMONT)	90
FIGURE A4. 3:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DE CAVITÉ C1 DE 20x20 CM À UNE FRÉQUENCE DE 55 Hz (LIGNE 4 – AMONT)	91
FIGURE A4. 4:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE	

COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DE CAVITÉ C1 DE 20x20 CM À UNE FRÉQUENCE DE 60 HZ (LIGNE 4 – AMONT)92

FIGURE A5. 1:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DE CAVITÉ C1 DE 20x20 CM À UNE FRÉQUENCE DE 40 HZ (LIGNE 4 – AVAL) 94

FIGURE A5. 2:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DE CAVITÉ C1 DE 20x20 CM À UNE FRÉQUENCE DE 45 HZ (LIGNE 4 – AVAL) 95

FIGURE A5. 3:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DE CAVITÉ C1 DE 20x20 CM À UNE FRÉQUENCE DE 40 HZ (LIGNE 4 – AVAL) 96

FIGURE A5. 4:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DE CAVITÉ C1 DE 20x20 CM À UNE FRÉQUENCE DE 55 HZ (LIGNE 4 – AVAL) 97

FIGURE A6. 1:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DE CAVITÉ C1 DE 40x40x40 CM À UNE FRÉQUENCE DE 35 HZ (LIGNE 6 – AMONT)..... 99

FIGURE A6. 2:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DE CAVITÉ C1 DE 40x40x40 CM À UNE FRÉQUENCE DE 40 HZ (LIGNE 6 – AMONT)..... 100

FIGURE A6. 3:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DE CAVITÉ C1 DE 40x40x40 CM À UNE FRÉQUENCE DE 45 HZ (LIGNE 6 – AMONT)..... 101

FIGURE A6. 4:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DE CAVITÉ C1 DE 40x40x40 CM À UNE FRÉQUENCE DE 50 HZ (LIGNE 6 – AMONT)..... 102

FIGURE A7. 1:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE

COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DE CAVITÉ C1 DE 40x40x40 CM À UNE FRÉQUENCE DE 40 Hz (LIGNE 6 – AVAL).....	104
FIGURE A7. 2:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DE CAVITÉ C1 DE 40x40x40 CM À UNE FRÉQUENCE DE 45 Hz (LIGNE 6 – AVAL).....	105
FIGURE A7. 3:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DE CAVITÉ C1 DE 40x40x40 CM À UNE FRÉQUENCE DE 50 Hz (LIGNE 6 – AVAL).....	106
FIGURE A7. 4:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DE CAVITÉ C1 DE 40x40x40 CM À UNE FRÉQUENCE DE 55 Hz (LIGNE 6 – AVAL).....	107
FIGURE A8. 1:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DES CAVITÉ C1 DE 40x40x40 CM ET C2 DE 20x20x20 CM À UNE FRÉQUENCE DE 45 Hz (LIGNE 8 – AMONT) ..	109
FIGURE A8. 2:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DES CAVITÉ C1 DE 40x40x40 CM ET C2 DE 20x20x20 CM À UNE FRÉQUENCE DE 50 Hz (LIGN8 – AMONT)	110
FIGURE A8. 3:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DES CAVITÉ C1 DE 40x40x40 CM ET C2 DE 20x20x20 CM À UNE FRÉQUENCE DE 50 Hz (LIGN8 – AMONT) – PLUS CONCENTRÉ AUTOUR DE LA CAVITÉ C2.....	111
FIGURE A8. 4:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DES CAVITÉ C1 DE 40x40x40 CM ET C2 DE 20x20x20 CM À UNE FRÉQUENCE DE 55 Hz (LIGNE 8 – AMONT) ..	112
FIGURE A8. 5:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DES CAVITÉ C1 DE 40x40x40 CM ET C2 DE 20x20x20 CM À UNE FRÉQUENCE DE 55 Hz (LIGN8 – AMONT) – PLUS CONCENTRÉ AUTOUR DE LA CAVITÉ C2.....	113
FIGURE A9. 1:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE	

COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DES CAVITÉ C1 DE 40x40x40 CM ET C2 DE 20x20x20 CM À UNE FRÉQUENCE DE 45 Hz (LIGNE 8-AVAL).....	115
FIGURE A9. 2:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DES CAVITÉ C1 DE 40x40x40 CM ET C2 DE 20x20x20 CM À UNE FRÉQUENCE DE 50 Hz (LIGNE 8-AVAL).....	116
FIGURE A9. 3:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DES CAVITÉ C1 DE 40x40x40 CM ET C2 DE 20x20x20 CM À UNE FRÉQUENCE DE 55 Hz (LIGNE 8 – AVAL) – PLUS CONCENTRÉ AUTOUR DE LA CAVITÉ C2.....	117
FIGURE A9. 4:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DES CAVITÉ C1 DE 40x40x40 CM ET C2 DE 20x20x20 CM À UNE FRÉQUENCE DE 60 Hz (LIGNE 8 – AVAL) – PLUS CONCENTRÉ AUTOUR DE LA CAVITÉ C2.....	118
FIGURE A10. 1:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DES CAVITÉ C1 DE 40x40x40 CM ET C2 DE 40x40x40 CM À UNE FRÉQUENCE DE 45 Hz (LIGNE 10 – AMONT)	120
FIGURE A10. 2:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DES CAVITÉ C1 DE 40x40x40 CM ET C2 DE 40x40x40 CM À UNE FRÉQUENCE DE 45 Hz (LIGNE 10 – AMONT) – PLUS CONCENTRÉ AUTOUR DE LA CAVITÉ C2	121
FIGURE A10. 3:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DES CAVITÉ C1 DE 40x40x40 CM ET C2 DE 40x40x40 CM À UNE FRÉQUENCE DE 45 Hz.....	122
FIGURE A10. 4:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DES CAVITÉ C1 DE 40x40x40 CM ET C2 DE 40x40x40 CM À UNE FRÉQUENCE DE 45 Hz (LIGNE 10 – AMONT) – PLUS CONCENTRÉ AUTOUR DE LA CAVITÉ C2	123
FIGURE A10. 5:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DES CAVITÉ C1 DE 40x40x40 CM ET C2 DE 40x40x40 CM À UNE FRÉQUENCE DE 45 Hz.....	124

FIGURE A10. 6:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DES CAVITÉ C1 DE 40x40x40 CM ET C2 DE 40x40x40 CM À UNE FRÉQUENCE DE 45 Hz (LIGNE 10 – AMONT) – PLUS CONCENTRÉ AUTOUR DE LA CAVITÉ C2	125
FIGURE A11. 1:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DES CAVITÉ C1 DE 40x40x40 CM ET C2 DE 40x40x40 CM À UNE FRÉQUENCE DE 45 Hz (LIGN10 – AVAL)	127
FIGURE A11. 2;DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DES CAVITÉ C1 DE 40x40x40 CM ET C2 DE 40x40x40 CM À UNE FRÉQUENCE DE 45 Hz (LIGNE10-AVAL).....	128
FIGURE A11. 3:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DES CAVITÉ C1 DE 40x40x40 CM ET C2 DE 40x40x40 CM À UNE FRÉQUENCE DE 55 Hz (LIGNE 10-AVAL).....	129
FIGURE A11. 4:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DES CAVITÉ C1 DE 40x40x40 CM ET C2 DE 40x40x40 CM À UNE FRÉQUENCE DE 60 Hz (LIGN10 – AVAL)	130
FIGURE 12. 1:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS AVANT LA CRÉATION DE CAVITÉS AUTOUR DU PONCEAU 2 À UNE FRÉQUENCE DE 50 Hz (LIGNE 12 – AMONT)	132
FIGURE 12. 2:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS AVANT LA CRÉATION DE CAVITÉS AUTOUR DU PONCEAU 2 À UNE FRÉQUENCE DE 55 Hz (LIGNE 12 – AMONT)	133
FIGURE 12. 3:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS AVANT LA CRÉATION DE CAVITÉS AUTOUR DU PONCEAU 2 À UNE FRÉQUENCE DE 60 Hz (LIGNE 12 – AMONT)	134
FIGURE 12. 4:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS AVANT LA CRÉATION DE CAVITÉS AUTOUR DU PONCEAU 2 À UNE FRÉQUENCE DE 65 Hz (LIGNE 12 – AMONT)	135

FIGURE A13. 1: DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DE LA CAVITÉ C10 À 20x20x20 CM AUTOUR DU PONCEAU 2 À UNE FRÉQUENCE DE 45 Hz (LIGNE 12- AVAL) 137

FIGURE A13. 2: DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DE LA CAVITÉ C10 À 20x20x20 CM AUTOUR DU PONCEAU 2 À UNE FRÉQUENCE DE 50 Hz (LIGNE 12-AVAL) 138

FIGURE A13. 3: DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DE LA CAVITÉ C10 À 20x20x20 CM AUTOUR DU PONCEAU 2 À UNE FRÉQUENCE DE 55 Hz (LIGNE 12 – AVAL) 139

FIGURE A13. 4: DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DE LA CAVITÉ C10 À 20x20x20 CM AUTOUR DU PONCEAU 2 À UNE FRÉQUENCE DE 60 Hz (LIGNE 12- AVAL) 140

FIGURE A14. 1: DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DE LA CAVITÉ C10 À 40x40x40 CM AUTOUR DU PONCEAU 2 À UNE FRÉQUENCE DE 50 Hz (LIGNE 14 – AVAL) 142

FIGURE A14. 2: DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DE LA CAVITÉ C10 À 40x40x40 CM AUTOUR DU PONCEAU 2 À UNE FRÉQUENCE DE 55 Hz (LIGNE 14 – AMONT) . 143

FIGURE A14. 3: DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DE LA CAVITÉ C10 À 40x40x40 CM AUTOUR DU PONCEAU 2 À UNE FRÉQUENCE DE 60 Hz (LIGNE 14 – AMONT) . 144

FIGURE A14. 4: DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DE LA CAVITÉ C10 À 40x40x40 CM AUTOUR DU PONCEAU 2 À UNE FRÉQUENCE DE 65 Hz (LIGNE 14 - AMONT) ... 145

FIGURE A15. 1: DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DE LA CAVITÉ C10 À 40x40x40 CM AUTOUR DU PONCEAU 2 À UNE FRÉQUENCE DE 45 Hz (LIGNE 14 – AVAL) 147

FIGURE A15. 2: DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE

COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DE LA CAVITÉ C10 À 40x40x40 CM AUTOUR DU PONCEAU 2 À UNE FRÉQUENCE DE 50 HZ (LIGNE 14 – AVAL)	148
FIGURE A15. 3: DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DE LA CAVITÉ C10 À 40x40x40 CM AUTOUR DU PONCEAU 2 À UNE FRÉQUENCE DE 55 HZ (LIGNE 14 - AVAL)	149
FIGURE A15. 4: DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LA CRÉATION DE LA CAVITÉ C10 À 40x40x40 CM AUTOUR DU PONCEAU 2 À UNE FRÉQUENCE DE 45 HZ (LIGNE 14 – AVAL)	150
FIGURE A16. 1: DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LE COLMATAGE DE LA CAVITÉ C10 DE 40x40x40 CM AUTOUR DU PONCEAU 2 À UNE FRÉQUENCE DE 50 HZ (LIGNE 16 – AMONT).....	152
FIGURE A16. 2: DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LE COLMATAGE DE LA CAVITÉ C10 DE 40x40x40 CM AUTOUR DU PONCEAU 2 À UNE FRÉQUENCE DE 55 HZ (LIGNE 16 – AMONT).....	153
FIGURE A16. 3: DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LE COLMATAGE DE LA CAVITÉ C10 DE 40x40x40 CM AUTOUR DU PONCEAU 2 À UNE FRÉQUENCE DE 60 HZ (LIGNE 16 – AMONT).....	154
FIGURE A16. 4: DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LE COLMATAGE DE LA CAVITÉ C10 DE 40x40x40 CM AUTOUR DU PONCEAU 2 À UNE FRÉQUENCE DE 65 HZ (LIGNE 16 – AMONT).....	155
FIGURE A17. 1: DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LE COLMATAGE DE LA CAVITÉ C10 DE 40x40x40 CM AUTOUR DU PONCEAU 2 À UNE FRÉQUENCE DE 45 HZ (LIGNE 16 – AVAL).....	157
FIGURE A17. 2: DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LE COLMATAGE DE LA CAVITÉ C10 DE	

40x40x40 CM AUTOUR DU PONCEAU 2 À UNE FRÉQUENCE DE 50 HZ (LIGNE 16 – AVAL).....	158
FIGURE A17. 3:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LE COLMATAGE DE LA CAVITÉ C10 DE 40x40x40 CM AUTOUR DU PONCEAU 2 À UNE FRÉQUENCE DE 60 HZ (LIGNE 16 – AVAL).....	159
FIGURE A17. 4:DISTRIBUTION DE LA VARIATION A) DE LA VITESSE DE GROUPE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE ET B) DE L'ÉNERGIE DES SIGNAUX, DANS L'ESPACE COUVERT PAR LES CAPTEURS APRÈS LE COLMATAGE DE LA CAVITÉ C10 DE 40x40x40 CM AUTOUR DU PONCEAU 2 À UNE FRÉQUENCE DE 65 HZ (LIGNE 16 – AVAL).....	160

Liste des Tableaux

TABLEAU 2-1: CARACTÉRISTIQUE DES MODÈLES UTILISÉS DANS LES SIMULATIONS NUMÉRIQUES	5
TABLEAU 3-1: CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DES DEUX (2) PONCEAUX.....	24
TABLEAU 3-2: LOCALISATION DES DIX (10) TRAPPES LE LONG DES DEUX (2) PONCEAUX.	24
TABLEAU 3-3: RELEVÉS PERPENDICULAIRES EFFECTUÉS LORS LA DEUXIÈME PHASE D'INVESTIGATION.....	36
TABLEAU 3-4: RELEVÉS PARALLÈLES EFFECTUÉS LORS LA DEUXIÈME PHASE D'INVESTIGATION.....	37

LISTE DES ACRONYMES :

MTMD	Ministère des Transports et de la mobilité durable.
TTOG	Tuyau de tôle ondulée galvanisée
3IT	Institut interdisciplinaire d'innovation technologique
MMASW	Multi-Modal-Analysis-of-Surface-Waves.
GST	Transformation de Stockwell Modifié.
2D	Deux Dimensions.
3D	Trois Dimensions
UdeS	Université de Sherbrooke.
PM	Point métrique par rapport à la source

AVANT-PROPOS

Ce document constitue le rapport final de la deuxième phase du projet de recherche « AMÉLIORATION DE L'IDENTIFICATION DES CAVITÉS SOUS LES ROUTES ET DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL DE DIAGNOSTIC RAPIDE POUR L'USAGE DU MTMD », selon le contrat intervenu entre le Ministère des Transports et de la mobilité durable Québec (Projet R.770.2) et l'Université de Sherbrooke.

Ce rapport a été réalisé à l'Université de Sherbrooke par Mourad Karray, professeur au département de génie civil et de génie du bâtiment, Mohamed Ali Temani, étudiant à la maîtrise, Ahmed Mhenni, étudiant au doctorat et Samah Kaadan, étudiante à la maîtrise. Le responsable du projet au ministère des Transports du Québec est Monsieur Bruno Paquet-Bouchard, ingénieur au Service géotechnique et géologie.

Ce rapport final fait état des travaux et planifications effectués dans le cadre de cette deuxième phase ainsi que des conclusions finales :

5. Mise en contexte : retour sur les limitations de la première phase et la nécessité de d'un site expérimental.
6. Réalisation du site expérimental, Automne 2020, localisé sous la piste cyclable menant au bassin hydraulique de l'université de Sherbrooke : mise en place de deux ponceaux en tôle ondulée galvanisée (TTOG), de 1.2 m de diamètre, à deux profondeurs différentes, soit à environ 1.5 m et à 3.5 m, avec des possibilités de créer 10 cavités à différents emplacements le long des ponceaux et ayant trois orientations différentes, soit à 0°, 45° et 90° par rapport au plan radial vertical des ponceaux.
7. Les différentes phases d'investigation et essais de mise au point de la procédure expérimentale. Il y a eu dans un premier temps des séries de relevés avant la création de cavités afin d'établir l'état initial et pouvoir apprécier la variabilité provoquée uniquement par le sol et le ponceau. Dans une deuxième phase d'investigation plusieurs séries de relevés ont été réalisées après la création de deux (2) cavités (C1 et C2), de 40×40×40 cm³ situés à 0° et 90° par rapport au plan radial vertical du ponceau situé à 3.5 m de profondeur. Chaque cavité a été créée sur deux étapes, d'abord à 20×20×20 cm³ ensuite a été élargie à 40×40×40 cm³. Séries de relevés parallèles (le long des extrémités longitudinales et de l'axe du ponceau) et perpendiculaires, avant, après la création de la cavité C10, de 40×40×40 cm³ situés à 45° par rapport au plan radial vertical du ponceau enterré à 1.5 m de profondeur, et après la fermeture de cette cavité avec de la mousse expansive (Polyuréthane). L'ensemble de ses mesures ont été réalisées avec des cavités fraîchement créées et avec des espacements entre les lignes de 20 cm. Dans la troisième phase de nouvelles mesures ont été effectuées après une certaine période afin d'apprécier les changements dans l'état des cavités et des contraintes autour de celles-ci. Ces essais ont été réalisés avec des espacements de 10 cm entre les lignes et en utilisant des distances source/ capteur différentes et aussi un

couplage entre les capteurs et la chaussée différent. Une nouvelle cavité (C9) orientée à 0 deg a également été ouverte dans le cas du ponceau de 1,5 m de profondeur.

8. Élaboration de modèles numériques calibrée à l'aide des données expérimentales. Les modèles numériques en 3D ont permis de mettre au point et d'ajuster la méthodologie finale d'analyse des données. Les analyses montrent que la création d'un vide sans tenir compte des changements des contraintes dans le sol permet d'identifier de manière assez précise la présence d'une cavité. Ceci est intéressant dans la mesure où les changements dans la distribution des contraintes permettent de voir d'avantage la présence d'anomalies.
9. Dans l'ensemble, les objectifs du projet ont été atteints à 100%. En effet un site expérimental avec deux ponceaux enterrés à deux profondeurs différentes a été exécuté. Le site possède un potentiel de 10 cavités dont 4 se trouvent en dessous de la chaussée et 6 autres dans divers endroits le long du ponceau. L'ouverture ainsi que la fermeture par de la mousse des cavités en dessous de la chaussée et la réalisation de plusieurs essais avant et après la création de ces cavités a permis de développer une méthode de diagnostic robuste. Le processus de développement d'un outil de traitement des données rapide n'a pas été simple. En effet, un des principaux problèmes est d'assurer que tous les signaux sont de bonnes qualités (ceci dépend surtout de l'installation des capteurs et de l'énergie à la source) et que les capteurs sont positionnés exactement à l'endroit prévu. La présence de quelques signaux sur plus de 300 à 400 signaux peut amener des difficultés au niveau des analyses. Après plusieurs vérifications et modifications, une méthode basée sur la variation de la vitesse de groupe par rapport à la fréquence pour chaque capteur a permis de réduire de manière substantielle les effets de certains signaux de mauvaise qualité et d'avoir une méthode robuste qui permet de détecter avec précision la présence d'anomalie. Cette méthode a été testée sur de nombreux cas qui seront présentés dans ce rapport et s'avère très efficace. Cette méthode sera sans aucun doute plus efficace sur des ponceaux réels qui possèdent plus d'espace pour placer la source à une distance optimale. La méthode semble suffisamment précise pour mieux localiser les cavités, estimer leurs importances et distinguer entre un vide et une zone décompactée. Un certain nombre d'essais à l'échelle d'une route permettra de confirmer ces améliorations. Un logiciel a été créé pour le traitement des données et l'opération d'analyse d'une série d'essai peut prendre moins de 5 minutes afin de décider s'il y a ou non présence de cavité. Donc il est possible de conclure que nous disposons d'un outil de diagnostic très rapide qui peut être exécuté en moins de 1 heure après la réalisation des essais.

CHAPITRE 1 : MISE EN CONTEXTE

Un des problèmes auxquels sont confrontés les routes est l'apparition subites de cavités ou d'anomalies. Ce phénomène susceptible d'apparaître généralement aux voisinages des ponceaux défectueux et/ou vieillissants peut être causé, soit par des écoulements sous-terrain, des changements physico-chimiques (sols organiques), perte des matériaux, et par des phénomènes d'érosion. Le problème des cavités ou anomalies sous les chaussées routières peut se traduire par le développement d'une cheminée jusqu'à la surface provoquant un affaissement d'une portion de la route. Pour se prévenir ce type de problématique et éviter les accidents dramatiques, le MTQ utilise la méthode MMASW (Multi-Modal-Analysis-of-Surface-Waves) dans le but de détecter la présence d'anomalies ou de cavités en dessous des revêtements routiers (pavé d'asphalte), et ce depuis plusieurs années. La réalisation d'essais MMASW sur une ligne permet d'obtenir une tomographie en 2D du milieu sous-jacent (en termes de vitesse de phase et/ou de vitesse des ondes de cisaillement). Ce genre de résultat permet, par exemple, la détection et la localisation des zones de faibles vitesses. La méthode MMASW est conçu pour caractériser les sols et son utilisation pour la détection d'anomalie s'avère long à cause des processus de calcul complexe reliés aux problèmes de séparation des modes des ondes de Rayleigh et du processus d'inversion. La détection des cavités ne nécessite pas l'ensemble des processus de la méthode de caractérisation MMASW. Ainsi la question que se pose est-ce qu'il est possible de trouver une manière qui permet d'éviter l'utilisation l'ensemble des processus

de calcul afin de détecter les cavités sans nécessairement avoir besoin de déterminer les propriétés mécaniques du sol etc.

Dans le but développer une méthode d'analyse qui permet de donner un diagnostic rapide sur l'état du sol avoisinant un ponceau (3D, comparativement à la 2D fournie par MMASW, un projet a été entrepris au Laboratoire de Géotechnique et Dynamique des Sols, à l'université de Sherbrooke (UdS).

À l'issue des études et constatations faites avec le modèle physique réduit et les modèles numériques, lors de la première phase du projet, les hypothèses formulées ont permis le développement une approche d'essai qui peut permettre de faire un diagnostic plus rapide et de mieux localiser les anomalies dans l'espace. La méthode proposée consiste à effectuer des relevés sur une surface plus grande entourant le ponceau. Pour se faire, les capteurs sont placés en ligne parallèle à la chaussée et avancés avec des espacements de 10 cm ou 20 cm le long de la route (fig. 1.1). Cette configuration perpendiculaire/ponceau peut s'avérer avantageuse par rapport à la configuration habituelle (MMASW) pour diverses raisons. Par exemple, elle permet de couvrir un plus grand volume de sol avec la même position de source ce qui peut s'avérer avantageux puisque la localisation de la source peut avoir un impact sur l'énergie des différentes ondes présente dans les signaux. Également, lorsqu'utilisée avec les algorithmes présentés dans la section suivante, cette configuration permet d'obtenir des tomographies en 2 et 3D du volume de sol investigué. C'est donc principalement pour ces deux raisons que cette configuration a été proposée et adaptée dans le cadre ce projet.

À noter que la réalisation de relevés avec la configuration perpendiculaire/ponceau peut s'avérer plus longue, mais permet de mieux localiser les anomalies autour du ponceau ou en dessous des chaussées le cas échéant. Lors de l'analyse des signaux, la première étape consiste à identifier (à l'aide de la représentation vitesse-fréquence) la plage de fréquences où un seul mode domine. Cette plage de fréquences dépend de la profondeur du ponceau et de l'état du sol. Une fois ces fréquences identifiées, la génération de tomographie des vitesses de groupe à ces fréquences permet d'apprécier l'état du sol en place. En cas d'obtention de tomographie présentant un accroissement des vitesses de groupe uniforme

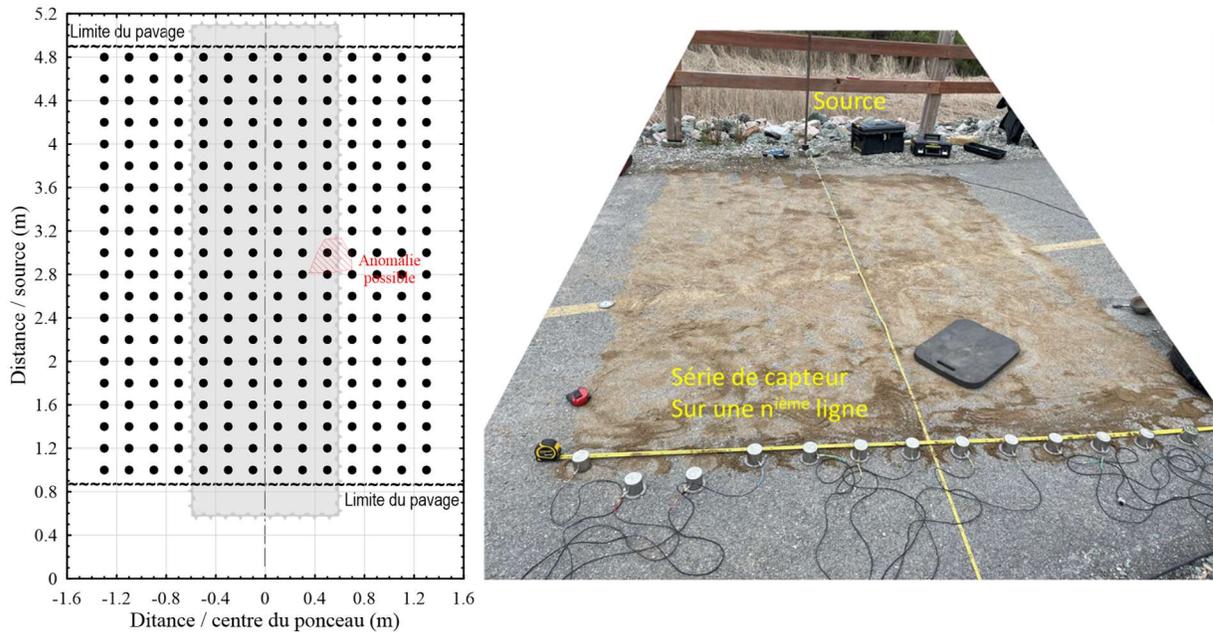


Figure 1.1: Configuration adoptée pour la détection d'anomalie

et homogène le long des relevés, le remblai est jugé sain, uniformément dense et ne présentant pas d'anomalies.

Dans le but de valider les hypothèses sur lesquelles l'outil de diagnostic a été bâti et d'étudier sa robustesse, un site expérimental à échelle réelle a été érigé à l'université de Sherbrooke. Avec les cinquantaines (50) de mètres de tuyaux de tôle ondulée galvanisée (TTOG), à 1.2 m de diamètre, deux (2) ponceaux ont été placés à deux profondeurs différentes sous une piste cyclable. Les deux (2) ponceaux ont été menés, au préalable, de dix (10) trappes, permettant de créer des cavités, à différents emplacements et positions sur le site, une fois les ponceaux mis en place.

Ce rapport comporte 5 chapitres. Le chapitre 2 présente les simulations 3D réalisées afin de raffiner et valider l'approche de traitement finale retenue pour la détection d'anomalies, Le chapitre 3 présente les étapes d'exécution du site expérimental ainsi que les tests réalisés. Le chapitre 4 présente l'ensemble des résultats des données recueillis sur le site expérimental. Une conclusion et les recommandations sont présentées au chapitre 5.

CHAPITRE 2 : SIMULATIONS NUMÉRIQUES ET MÉTHODOLOGIE POUR L'ANALYSE DES DONNÉES

2.1 Généralité

La modélisation numérique des ondes élastiques est une approche intéressante pour l'analyse de la propagation des ondes dans un milieu hétérogène et surtout en présence d'anomalies. En effet, les méthodes analytiques ne sont plus applicables dans ces conditions, et des techniques numériques sont nécessaires pour résoudre les problèmes de propagation d'ondes. Afin de mieux comprendre les limitations des approches d'analyses et leurs robustesse, l'utilisation des modèles numériques demeure un outil intéressant.

2.1 Modélisations numériques

Différentes simulations numériques ont été menées pour caractériser un talus routier en évaluant l'effet d'un vide local sur la propagation des ondes en surface à travers différentes configurations. L'interaction entre les trois composantes des ondes de surface (composantes X et Z des ondes de Rayleigh, et composante Y des ondes de Love) avec les contrastes locaux a été étudiée d'abord en l'absence, puis en présence d'une cavité. La profondeur de la cavité a également été variée entre 1,5 m et 3 m de profondeur (tableau

Tableau 2-1:Caractéristique des modèles utilisés dans les simulations numériques

Model	Cavité	Profondeur de la cavité	HA	HB	HC
N1	Non	0	15	0	0
N2	Oui	1,5	15	0	0
N3	Oui	3,0	15	0	0

2.1). Les modèles numériques établis ont été élaborés à l'aide du programme de différences finies basé sur l'analyse Lagrangienne Flac3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3

Dimensions) développé par ITASCA Consulting Group Inc. Dans les modèles présentés dans ce rapport, la vitesse des ondes de cisaillement de la couche de sol est de 200 m/s, sa masse volumique de 1800 kg/m^3 et son coefficient de Poisson de 0,33. D'autres configurations sont présentées dans le mémoire de maîtrise de Kaadan (2023). Les exemples présentés ici sont utilisés pour illustrer le fondement de l'approche de calcul finale retenue pour la détection d'anomalies.

Un modèle numérique suffisamment large permet de réduire les réflexions produites par les limites du ce dernier. De plus l'utilisation de frontières absorbantes permet de réduire un pourcentage important de l'énergie réfléchie. Les simulations ont été effectuées en 3D avec des modèles de 28 m de long, 20 m de large et 15 m de profondeur, comme le montrent les figures 2.1, 2.2. Les figures 2.1 et 2.2 représentent les configurations des modèles demi-espace homogène et demi-espace stratifié en présence d'une cavité. Les dimensions de du vide ont été agrandies pour plus de clarté dans les figures. Les signaux collectés ont été enregistrés sur une longueur de 6 m de long centré au milieu du modèle. L'espacement des accéléromètres et celui entre la source la plus proche et l'accéléromètre sont régis par le type de profil étudié. Comme les modèles simulés décrivent une route en remblai, l'espacement des accéléromètres a été fixé à 0,1 m. Un espacement de 2 m entre la source et le premier capteur a été sélectionné pour toutes les configurations du modèle. Les données ont été acquises le long d'une configuration similaire à la méthode retenue (Fig. 1.1) qui consiste à mesurer les accélérations de la surface sur une ligne parallèle à la route. Par conséquent, l'approche suivante a permis d'acquérir 42 prises de vue le long de la ligne des enregistrements numériques d'accélération dans un premier temps et sur 21 lignes espacées de 0,2 m avec 11 mesures par ligne.

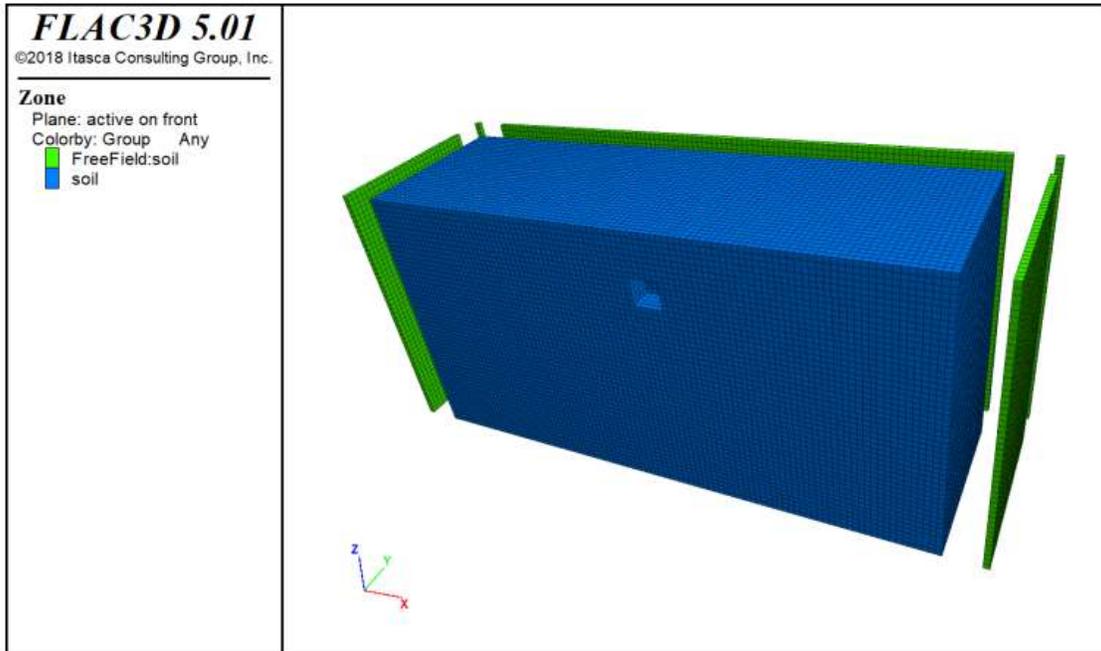


Figure 2.2: Configuration numérique du modèle entièrement homogène (N2 ou N3) en présence de d'une cavité (élargie pour fin de présentation)

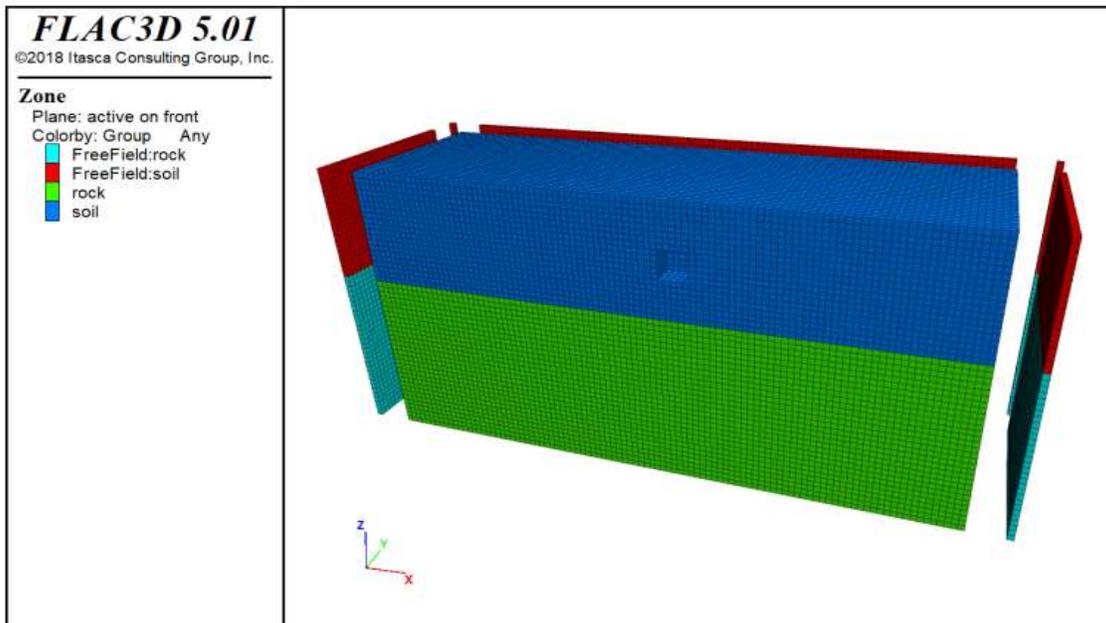


Figure 2.1: Configuration numérique du modèle homogène en demi-espace (H2) en présence d'une cavité (Kaaadan, 2023) – Cavité élargie pour fin de présentation

Les déformations engendrées lors de la propagation des ondes élastiques sont inférieures à 10^{-3} %, donc l'hypothèse que les matériaux composant la structure étudiée sont élastiques est valable. Ainsi, un comportement élastique a été adopté pour tous des matériaux constituant les modèles. Une analyse approfondie des données collectées est nécessaire pour fixer les paramètres élastiques de chaque matériau (vitesse des ondes de cisaillement normalisée, coefficient de Poisson et masse volumique totale) ainsi que leurs paramètres d'amortissement.

Un amortissement, dit de Rayleigh, est utilisé en analyse dynamique sous forme de deux éléments visqueux proportionnels à la masse et à la rigidité, tel qu'il est explicité à l'équation 4.1 :

$$C = \xi_{min}\omega_{min}M + \xi_{min}/\omega_{min}K \quad (2.1)$$

Où : M est la matrice de masse

K est la matrice de rigidité

ξ_{min} est le taux d'amortissement minimum défini à la fréquence ω_{min} .

Trois (3) aspects ont été respectés lors de l'élaboration des modèles : (a) le choix du maillage (b) la modélisation de la source (c) les frontières des modèles et les conditions aux limites.

2.1.1 Choix du maillage

La dimension des éléments constituant le modèle est un paramètre important dans la modélisation du problème de propagation des ondes élastiques. Kuhlemeyer et Lysmer (1973) indiquent que la dimension des éléments (Δl) doit être approximativement 1/8 fois plus petite que la longueur d'onde associée à la fréquence d'oscillation la plus élevée. Cependant, la taille et le nombre d'éléments utilisés ont un impact important sur le temps de calcul des méthodes numériques. Pour cela et pour les convenances du problème, une valeur de $\Delta l = 0,05$ m a été considéré lors de l'élaboration des modèles. Cette valeur ($\Delta l = 0,05$ m) est suffisante pour permettre de simuler des essais de propagation d'onde valides à des longueurs d'onde supérieures à 0.5 m.

2.1.2 Modélisation de la source

La source est modélisée par l'application d'une force d'une durée limitée. Cette force est modélisée par une fonction gaussienne d'une amplitude égale à 1000 N dont la formule est explicitée à l'équation 4.2 :

$$s(t) = A \cdot e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}} \text{ pour } t \leq t_{max} \quad (2.2)$$

Où: A = Amplitude

t_0 = localisation temporelle du centre de l'impact (s)

σ = Paramètre permettant de régler la taille de l'impact.

t_{max} = Durée de la simulation (s)

L'amplitude n'a pas d'importance dans notre cas puisque le problème de propagation d'onde est considéré comme linéaire. La durée de l'impact est cependant importante puisqu'elle va imposer la bande de fréquences induite dans le modèle. Cet aspect est contrôlé par le paramètre σ choisi de manière à reproduire l'impact réel obtenu durant les essais. La durée de l'impact réel est mesurable lors des relevés sur terrain avec le capteur proche de la source qui fait office de déclencheur. Un $\sigma = 0.002$ et $t_0 = 0.008$ correspond à un contenu fréquentiel de 0 à 150 Hz (fig. 2.3), ce qui correspond à la bande de fréquences mesurées sur terrain.

La fenêtre gaussienne à l'avantage de ne pas induire de hautes fréquences et donc des distractions numériques. Ceci viendrait réduire la quantité d'amortissement à imposer au modèle pour contrebalancer ces distorsions et ainsi réduire le cout et le temps de calcul : un aspect très important et préoccupant lors des simulations numériques 3D.

2.1.3 Frontières du modèle et conditions aux limites

Afin de modéliser le plus fidèlement possible le comportement dynamique réel du modèle physique, et de s'approcher le plus possible, des conditions de champ libre qui prônent sur le site expérimental, les dimensions latérales, la hauteur les modèles numériques doivent

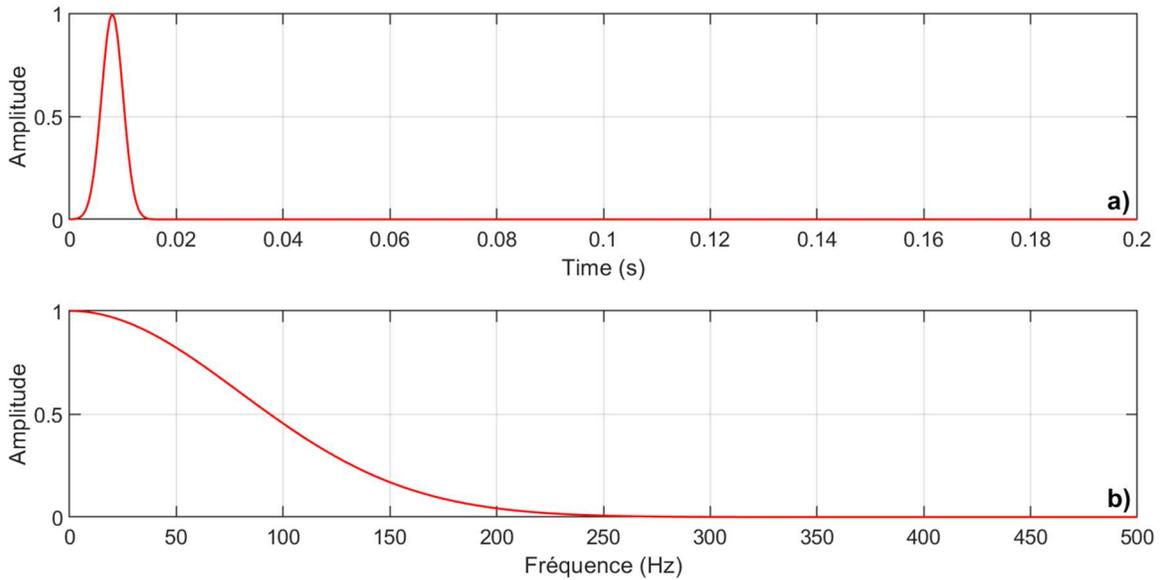


Figure 2.3:a) Représentation temporelle et b) fréquentiel de l'impulsion gaussienne créée par l'équation 4.2 avec $\sigma = 0.002$ et $t_0 = 0.008$.

être exagérées et ainsi éviter toute réflexion susceptible d'apparaître sur les frontières des modèles et d'induire des distorsions et des artéfacts numériques. Cette approche est pénalisante à mettre en œuvres et nécessite une puissance et un temps de calcul conséquents. Pour réduire les dimensions des modèles et ainsi le temps de calcul tout en s'approchant des conditions de champ libre, Flac3D propose deux sortes de frontières visqueuses qui agissent comme des amortisseurs visqueux pour dissiper l'énergie des éléments aux frontières au lieu d'injecter cette énergie de nouveau dans le modèle.

D'abord, les frontières dites 'absorbantes' ont été utilisées à la base des modèles. Alors que pour les frontières latérales, ce sont les frontières dites 'champ libre' qui ont été déployées. Les deux approchent, quoique similaires en termes d'effet induit, sont différentes par leurs schémas de résolution et formulations mathématiques, et directement intégrées dans le programme de calcul.

2.2 Méthode de traitement des signaux

Dans la phase 1 du projet, nous avons discuté largement des techniques de traitement des signaux. Pour l'analyse des signaux provenant des modèles numériques, l'approche

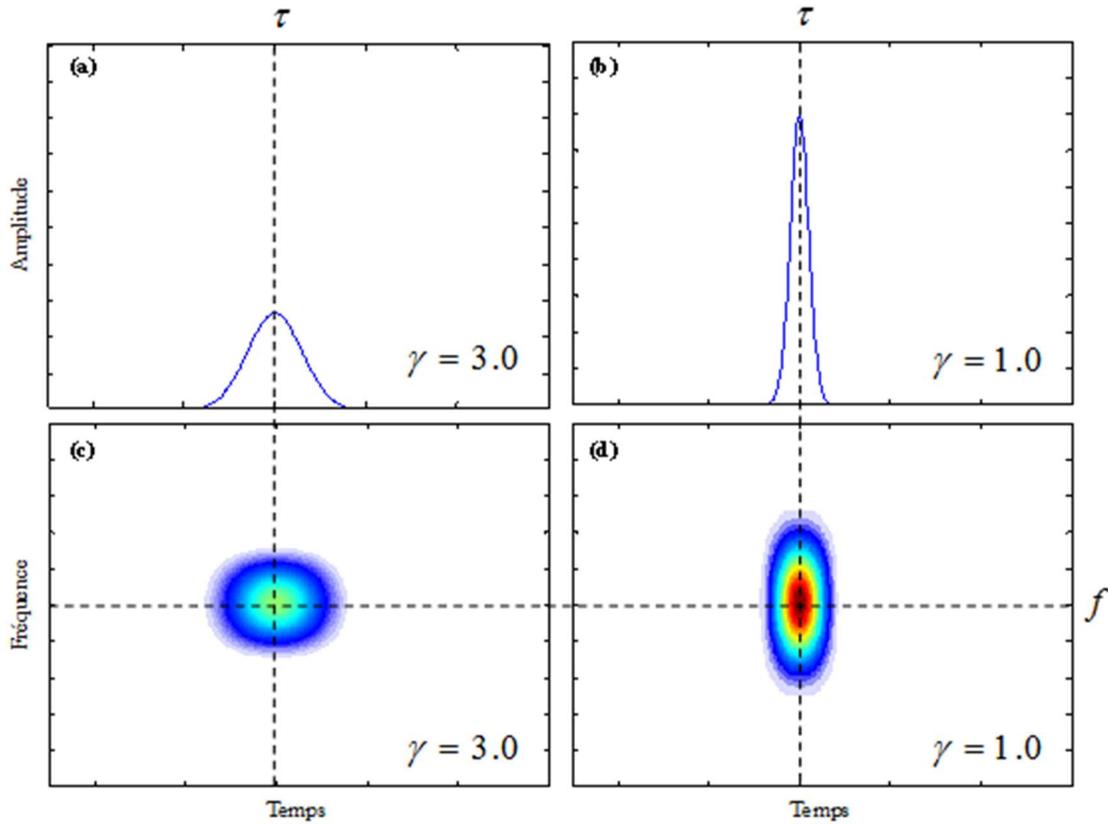


Figure 2.4: Influence du paramètre sur la résolution temporelle (a-b) et temps-fréquence (c-d) de la fenêtre gaussienne de la GST utilisée dans l'étude

adaptative basée sur une version modifiée de la ST est employée comme déjà exposé dans le rapport final de la phase 1. Cette approche est utilisée puisqu'elle permet le calcul rapide des vitesses de phase et de groupe tout en s'adaptant aux signaux analysés. Dans cette approche, la distribution temps-fréquence est obtenue en calculant une version modifiée de la ST, la GSTGST :

$$\text{GST}_x(t, f, \gamma) = \int_{\tau} x(\tau) \frac{|f|}{\gamma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2(t-\tau)^2}{2\gamma^2}} e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (2.2)$$

L'unique différence entre la GGST la ST est la présence du paramètre γ qui permet de faire varier la résolution TF de la ST comme le montre la figure 2.4.

$$\frac{|f|}{\gamma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-f^2(t-\tau)^2}{2\gamma^2}} e^{-j2\pi f\tau} \quad (2.3)$$

Comme le montre la Figure 2.4a-c, l'augmentation du paramètre γ permet réduire la taille de la fenêtre gaussienne dans le domaine fréquentiel tout en l'augmentant dans le domaine temporel.

La valeur de γ est déterminée à l'aide d'un processus d'optimisation permettant de minimiser l'étalement de l'énergie des différentes composantes d'un signal présentes dans le domaine TF :

$$\arg \max_{\gamma \in \square} \left(\frac{1}{\sum_1^N \sum_{f_{\min}}^{f_{\max}} |\text{ST}_x^h(t, f, \gamma)|} dt df \right) \quad (2.4)$$

Sujet à: $0.5 \leq \gamma \leq 2.0$

Où

$$\overline{\text{ST}_x^h(t, f, \gamma)} = \frac{\text{ST}_x^h(t, f, \gamma)}{\sqrt{\sum_1^N \sum_{f_{\min}}^{f_{\max}} |\text{ST}_x^h(t, f, \gamma)|^2 dt df}}$$

Et où N est le nombre d'échantillons temporel et $f_{\min} - f_{\max}$ définie l'intervalle fréquentiel dans lequel le processus d'optimisation est appliqué.

Finalement, puisque l'angle de phase calculé à l'aide de la GST est absolument référencé par rapport à $t = 0$ (Stockwell et coll., 1996), la vitesse de phase peut également être calculée à partir des représentations temps-fréquences obtenues à l'aide de la GST. Pour plus de détails qu'en la procédure d'analyse des signaux utilisés dans ce rapport, le lecteur est référé aux travaux de Tremblay (2017).

2.3 Analyses des données

En général, les changements des propriétés dans un milieu donné influencent les variations de vitesse des ondes élastiques qui se propage. Par conséquent, les données sismiques numériques des composantes verticale, horizontales et transversales ont été traitées selon l'algorithme GST, en termes de vitesse de groupe et de vitesse de phase. Dans cette étude,

la tomographie est utilisée pour tenir compte du contraste de rigidité local associé à la présence d'une cavité à faible profondeur. Néanmoins, la résolution de la tomographie est régie par plusieurs facteurs qui contribuent substantiellement à la fiabilité des résultats. Les schémas aux différences finies sont généralement mis en œuvre avec une discrétisation temporelle précise afin de fournir le plus grand nombre de points discrets nécessaires à l'obtention de solutions stables.

Les tomographies des ondes de surface sont calculées pour toutes les configurations du modèle numérique énumérées dans le tableau 2.1 et d'avantage (Kaadan, 2023). Les tomographies montrent la variation des vitesses de groupe et de phase à travers une gamme particulière de fréquences de chaque composante. Les figures 2.5, 2.6 et 2.7 représentent les tomographies de la vitesse de phase et de la vitesse de groupe des composantes X, Z, et Y, respectivement. Les limites proches et lointaines de la cavité sont délimitées par des lignes noires en pointillés. L'analyse des données le long de la ligne d'investigations avant et après la cavité nous a permis d'observer que les variations de vitesse de phase les plus importantes sont localisées dans des plages de fréquences relativement basses allant de 10 Hz à 100 Hz pour les composantes X et Y pour la distance source/capteur la plus faible (voir Fig. 2.5 et 2.7). La composante Z (mesurée in-situ) révèle une distribution non linéaire de l'énergie (voir Fig. 2.6). Cette variation s'explique par le décalage limité de la source : une réalité qui doit être prise en compte dans le contexte d'une route en remblai, en plus du décalage limité de la source.

Pour la composante X, la figure 2.5b montre que la cavité à 1,5 m génère une diminution de vitesse de 10 m/s dans la vitesse de phase entre les limites de la cavité de 100 Hz à 130 Hz associée à une augmentation significative d'environ 30 m/s juste après la limite éloignée. Cependant, la vitesse de phase de la composante X n'est pratiquement pas sensible à la cavité située à 3 m de profondeur (voir Fig. 2.5c). Les tomographies de la vitesse de groupe dans les Fig. 2.5d, 2.5e, 2.5f, 2.6d, 2.6e, et 4.6f montre presque la même variation d'énergie avant et après la cavité (voir Fig. 2.5c).

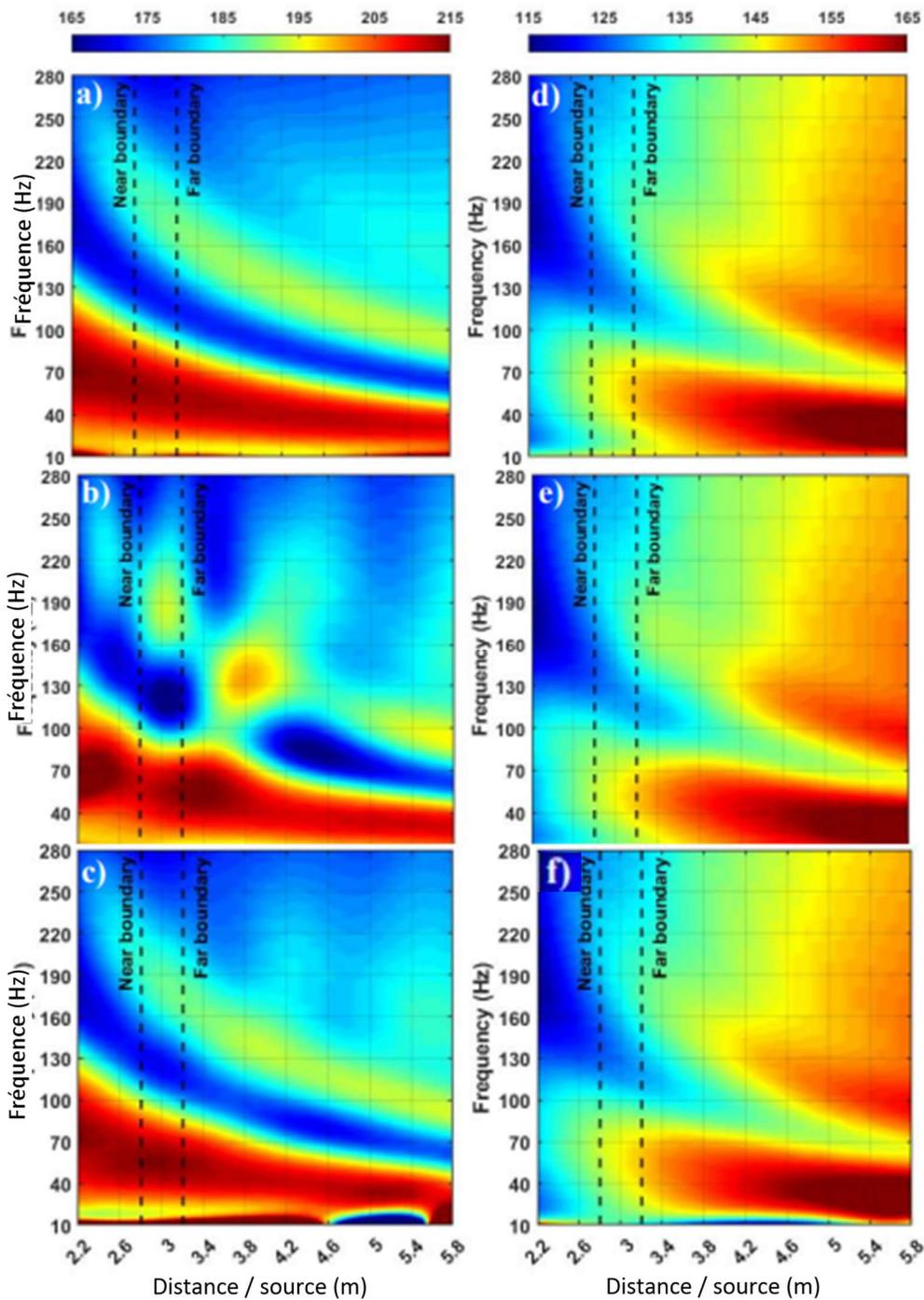


Figure 2.5: Tomographies de la vitesse de phase a) sans cavité b) avec cavité à 1,5 m, c) avec cavité à 3 m et vitesse de groupe d) sans cavité, e) avec cavité à 1,5 m, et f) avec cavité à 3 m de la composante X calculée en utilisant la GST des enregistrements parallèles du modèle entièrement homogène.

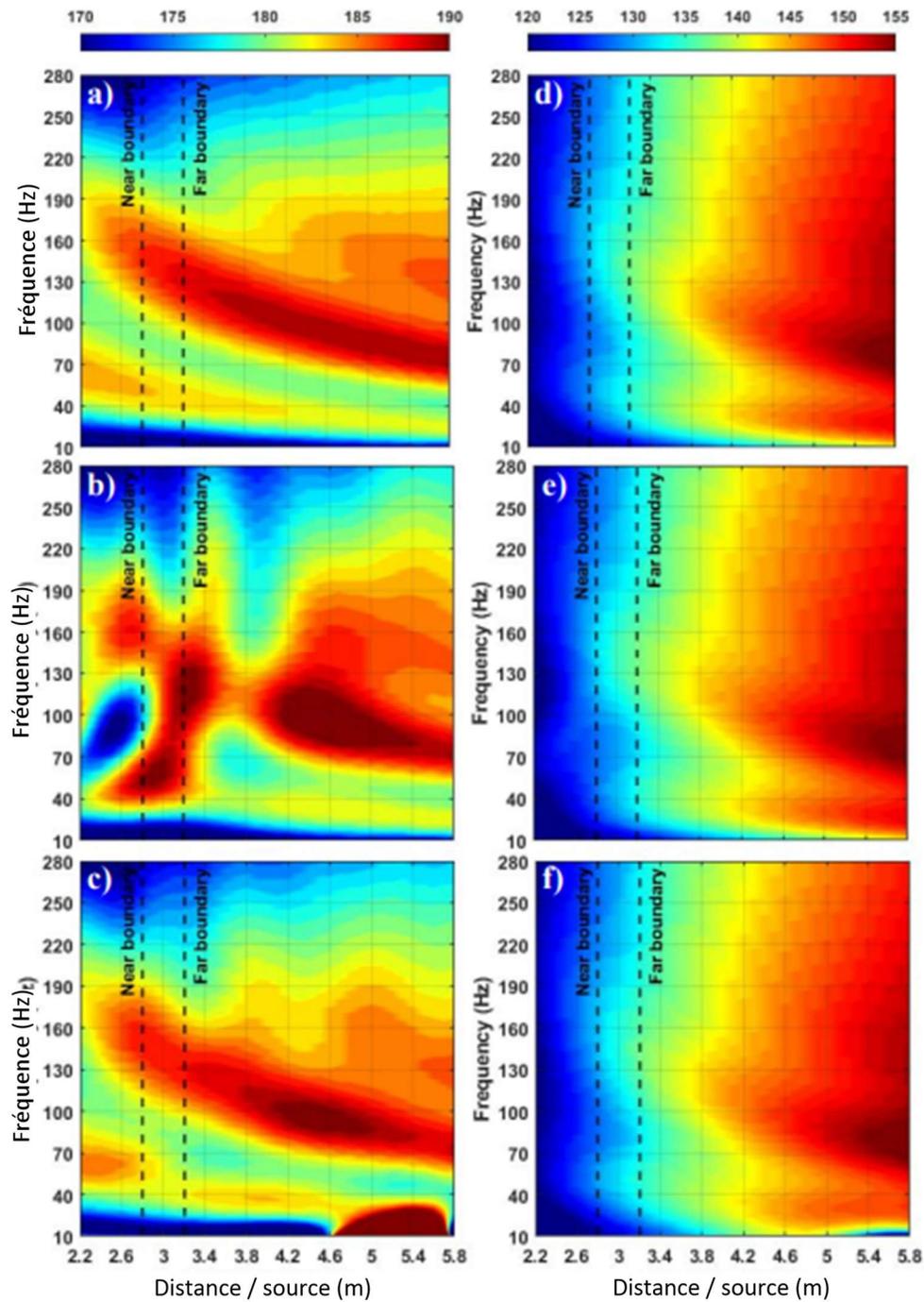


Figure 2.6: Tomographies de la vitesse de phase a) sans cavité b) avec cavité à 1,5 m, c) avec cavité à 3 m et vitesse de groupe d) sans cavité, e) avec cavité à 1,5 m, et f) avec cavité à 3 m de la composante Z calculée en utilisant la GST des enregistrements parallèles du modèle entièrement homogène.

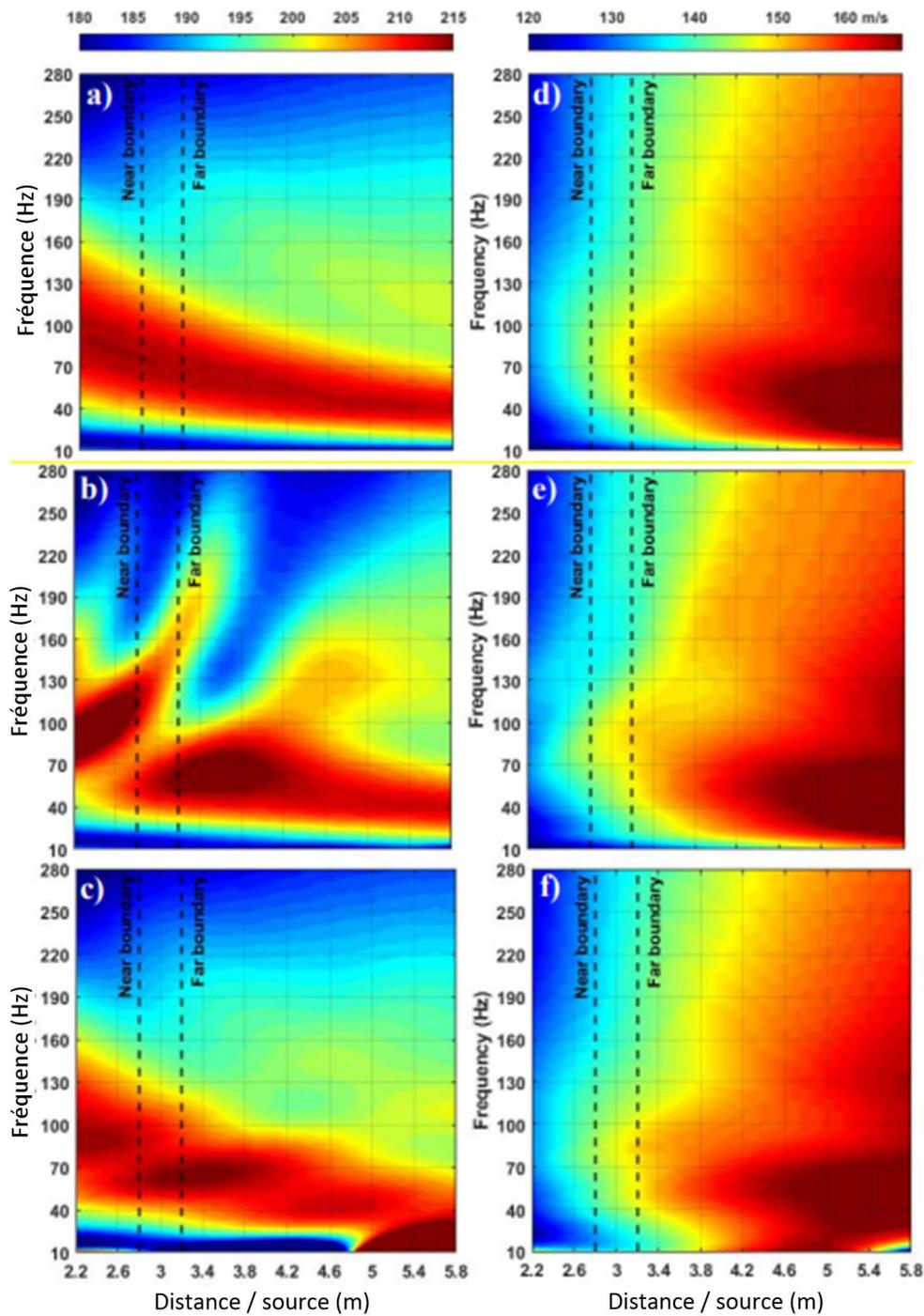


Figure 2.7: Tomographies de la vitesse de phase a) sans cavité b) avec cavité à 1,5 m, c) avec cavité à 3 m et vitesse de groupe d) sans cavité, e) avec cavité à 1,5 m, et f) avec cavité à 3 m de la composante Y calculée en utilisant la GST des enregistrements parallèles du modèle entièrement homogène.

Par conséquent, à première vue la vitesse de groupe des composantes X et Z ne permet pas détecter la cavité de manière claire. En outre, la tomographie de la vitesse de phase de la composante Z montre une altération substantielle autour des faces latérales de la cavité. Une chute de 20 m/s est observée avant la limite proche de la cavité située à 1,5 m (voir Fig. 2.6) de 70 Hz à 100 Hz. Une augmentation significative de la vitesse de phase est également détectée entre et après les limites latérales de la cavité, à partir de très basses fréquences jusqu'à 130 Hz. La figure 2.6c révèle une chute moins importante de la vitesse de phase sur le vide de 3 m de profondeur.

Pour mieux comprendre l'effet de la cavité sur la variation de la phase et de la vitesse de groupe, les courbes de dispersion des composantes de l'onde de surface ont été analysées. Les variations des vitesses de phase et de groupe en fonction de la fréquence ont été tracées pour trois espacements par rapport à la cavité: 2,2 m (avant la cavité), 3 m (au-dessus de la cavité) et 5,8 m (après la cavité). L'étude de l'interaction des composantes de l'onde de surface avec la cavité nous permet de mieux comprendre sa réponse, mais la localisation de ses limites est un aspect crucial qui permet de délimiter la zone d'anomalie. Par conséquent, la localisation de la cavité a été évaluée sur l'ensemble des mesures à une seule fréquence, à la fois dans les variations de phase et de vitesse de groupe.

La figure 2.8 présente un exemple de résultat des courbes de dispersion en termes de vitesse de phase et de groupe pour la composante verticale (utilisée en pratique). Cette figure montre en dehors de tout doute que la présence d'une anomalie (même sans tenir compte de la variation des états des contraintes) amène des variations des vitesses de groupe et de phase à une certaine distance de la cavité. La perturbation la plus importante est observée dans la projection de la cavité en surface. D'autres exemples sont également présentés dans le mémoire de maîtrise de Kaadan (2023). Ces résultats amènent un certain questionnement sur la capacité des ondes de surface à détecter la présence d'anomalie. La figure 2.9 montre la variation de la vitesse de groupe et de phase le long de la ligne d'investigation à une fréquence de 94 Hz. Cette figure montre que la variation de vitesse le long d'une ligne d'investigation et donc le long d'une surface d'investigation permet de localiser presque parfaitement la position d'une anomalie surtout à l'aide de la vitesse de groupe.

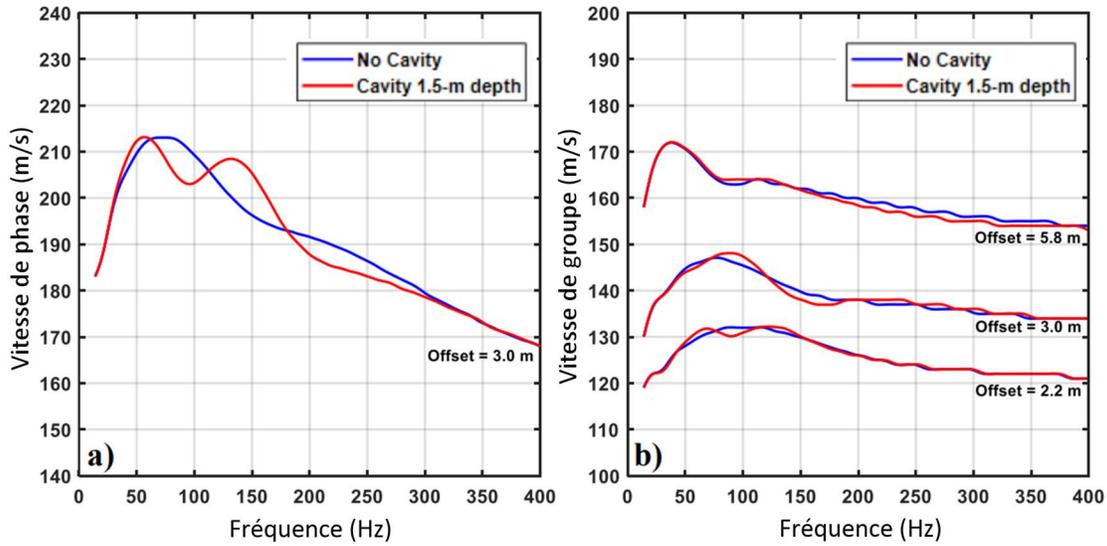


Figure 2.8: Courbes de dispersion de la composante Z calculée à l'aide de la GST à partir des enregistrements parallèles du modèle totalement homogène en termes a) de vitesse de phase à 3 m et b) de vitesse de groupe à 2,2 m, 3 m et 5,8 m.

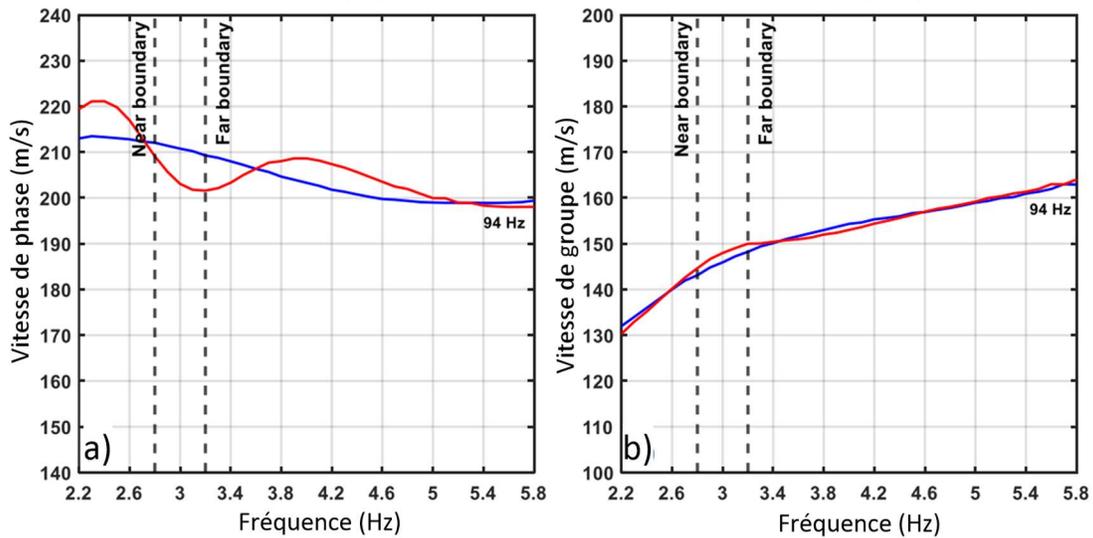


Figure 2.9: Variations de la vitesse le long du réseau inspecté en termes a) de vitesse de phase à 94 Hz et b) de vitesse de déplacement à 94 Hz. La ligne noire en pointillés correspond aux limites proches et lointaines de la cavité.

2.4 Considérations pratiques et approche d'analyse

Les simulations numériques montrent clairement que la présence d'une anomalie (sans variation de l'état des contraintes) produit des variations de la vitesse de groupe et de phase centrées autour de celle-ci. Ceci permet donc de conclure qu'il est possible de détecter des anomalies à l'aide des ondes élastiques. En pratique il existe d'autres problèmes qui n'existent pas dans les modélisations numériques. Le premier est la variabilité intrinsèque du milieu à investiguer qui peut être suffisamment variable pour venir masquer les effets de quelques mètres par seconde de variation produite par l'anomalie. Toutefois, dans la pratique une anomalie produit obligatoirement des variations des états des contraintes autour de celle-ci, ce qui peut venir aider sa détection. Les problèmes d'hétérogénéité peuvent être contournés par l'exécution d'un plus grand nombre de ligne autour du ponceau. Cependant, il existe aussi d'autres types de problème indépendant du milieu et qui peuvent être des fois difficiles à éliminer complètement. En effet, le placement et le couplage des capteurs avec la surface du pavage peut amener un certain nombre de difficulté. La source et son emplacement est un autre problème à ne pas négliger. Donc, afin de réussir à détecter les cavités, il est nécessaire de faire les essais avec le plus grand soin possible. Toutefois, pour minimiser les effets des erreurs qui peuvent être produites par certain signaux, l'idée est de produire de schéma de variation de la vitesse par rapport à une fréquence pour chaque signal individuellement. De cette façon, s'il y un mauvais signal, il ne viendra pas contaminer les autres signaux. Un signal d'un capteur situé sur une anomalie va montrer plus de variation d'un autre signal positionné loin de celle-ci. De cette manière, il est possible d'examiner la variation du changement de vitesse par rapport à la fréquence autour d'un certain nombre de fréquence.

Un logiciel de traitement des données a été développé afin d'automatiser les calculs. Ce logiciel présente les signaux enregistrés, la distribution de l'énergie de l'ensemble des signaux dans le domaine temps fréquence de sorte qu'il est possible de sélectionner facilement les quelques 4 ou 5 fréquences d'analyses. Ces fréquences doivent se situées dans l'intervalle où il n'y a pas d'interférence de mode de vibration. Plusieurs figures sont produites qui montre la variation de la vitesse dans l'espace couvert par les essais. Les figures 2.10 et 2.11 montre l'interface de calcul du logiciel de traitement en question.

Les signaux des simulations numériques présentées à la figure 2.5 à 2.9 ont été analysés à l'aide du logiciel développé. Les figures 11a et b montre une comparaison entre les vitesses

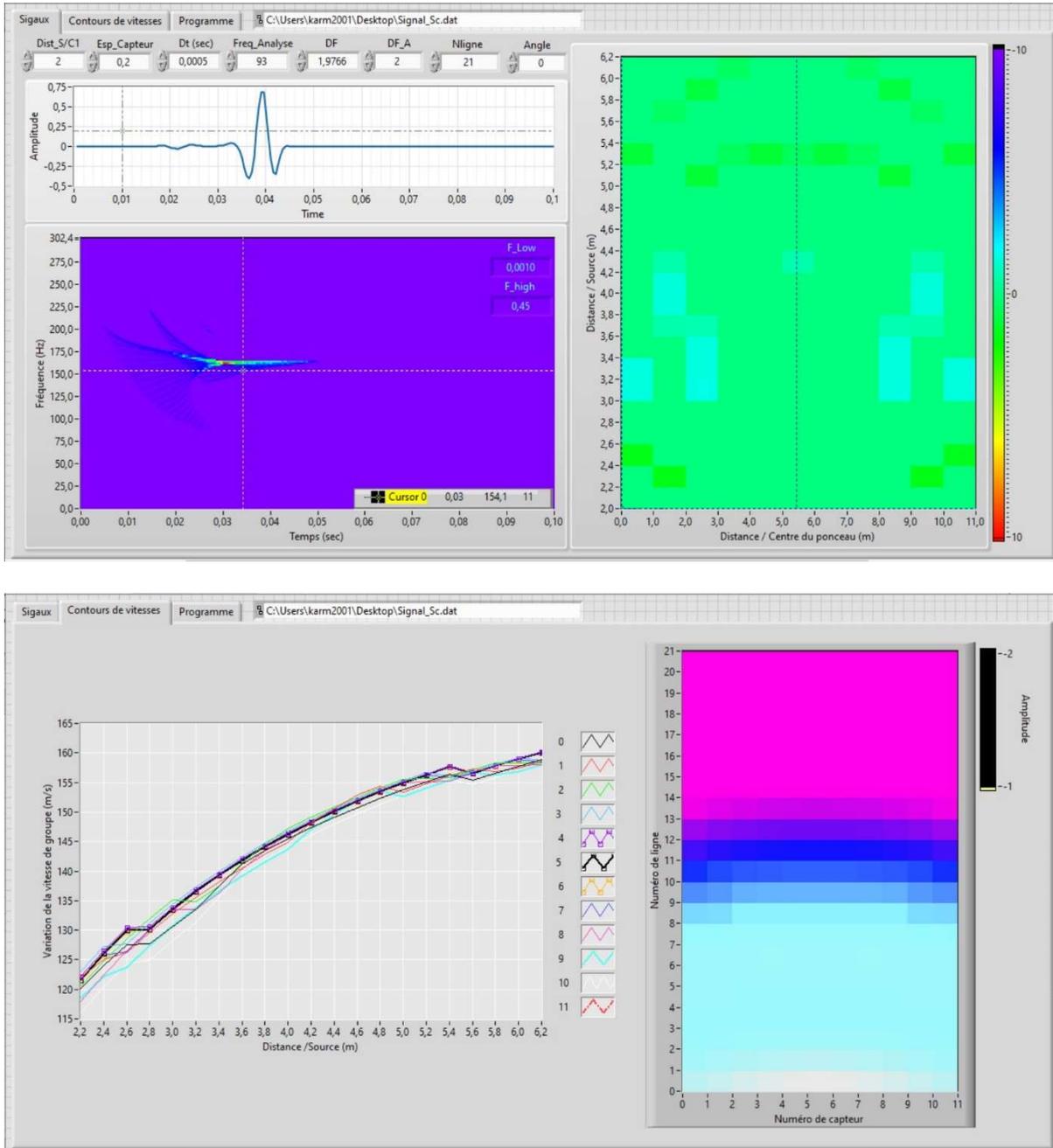


Figure 2.10: Interface du logiciel de traitement des données pour la détection des cavités

de groupe calculées sans anomalie et ceux avec anomalie situé à 3 m par rapport à la source. Cette comparaison montre clairement la présence d'une variation importante de vitesse autour d'une distance centrée à 3m, ne laissant aucun doute sur la présence de cavité.

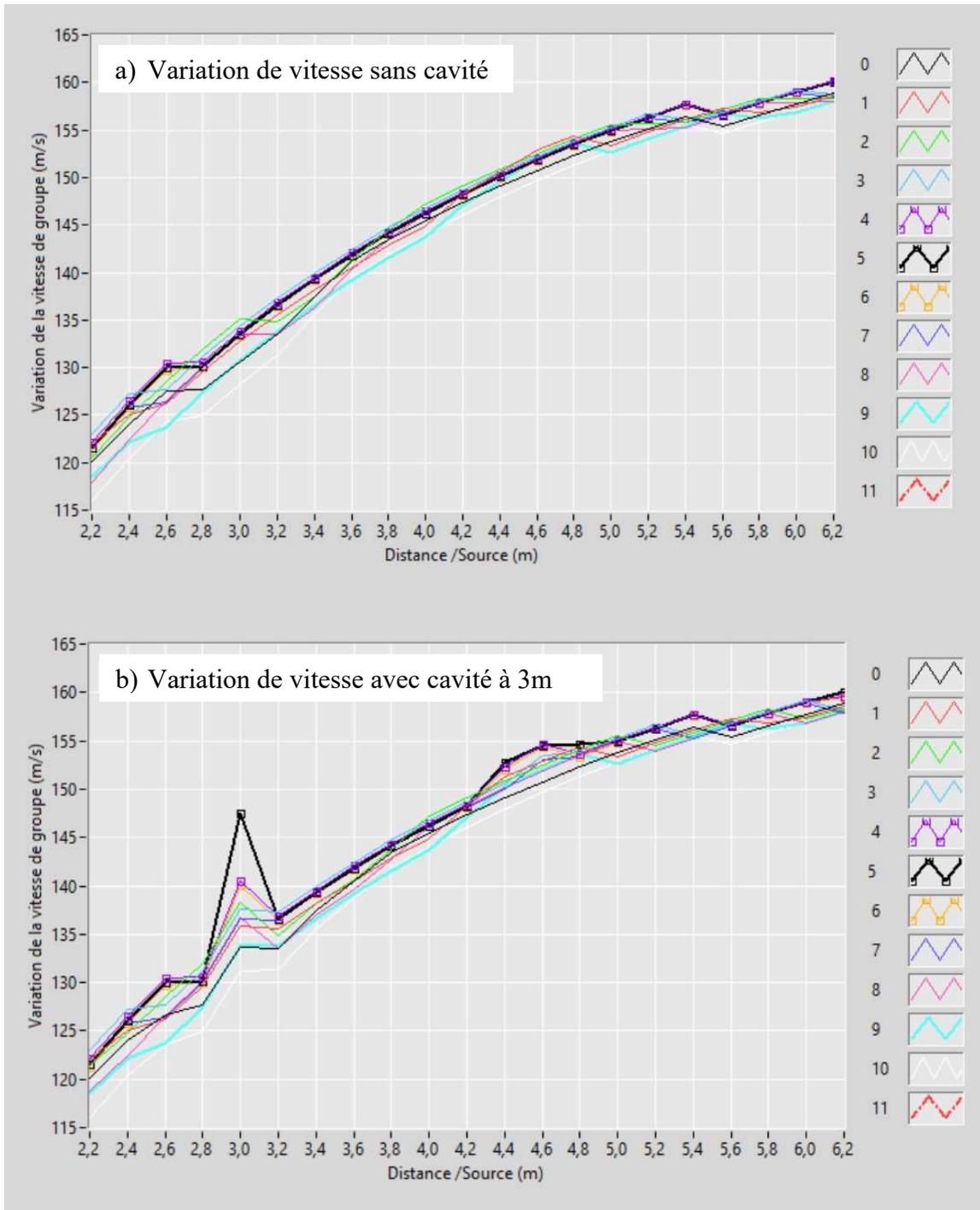


Figure 2.11: Variation de la vitesse de groupe le long de la zone d'investigation à une fréquence 93 Hz a) sans cavité et b) avec cavité à 3 m de distance.

CHAPITRE 3 : RÉALISATION DU SITE EXPÉRIMENTALE

3.1 Installation des ponceaux

Au mois d'aout 2020, un site expérimental a été réalisé à l'Université de Sherbrooke. Deux ponceaux ont été placés sous une piste cyclable d'environ 4 m de largeur qui relie le campus principal de l'université de Sherbrooke (UdS) à l'institut interdisciplinaire d'innovation technologique (3IT) en passant par le complexe de recherche multi échelle en hydrologie, hydraulique et environnement. Les ponceaux de 1,2 m de diamètre, en tôle ondulée galvanisée (TTOG), ont été placés à deux profondeurs différentes (tableau 3.1). Le premier ponceau, de 30.07 m de longueur, a été placé à 3.5 m de profondeur avec une inclinaison de 4% vers l'aval. Le deuxième ponceau, de 15.67 m de longueur, a été placé à 1.5 m de profondeur avec une inclinaison de 2% vers l'aval. Il est à noter que la profondeur d'enterrement correspond à l'épaisseur de sol par-dessus le ponceau. Dix (10) trappes ont été créées le long des deux ponceaux comme indiqué au tableau 3.2

Tableau 3-1:Caractéristiques physiques des deux (2) ponceaux.

Caractéristiques	Ponceau 1	Ponceau 2
Matériau	TTOG	TTOG
Diamètre (m)	1.2	1.2
Longueur (m)	30.07	15.67
Épaisseur de recouvrement (m)	3.5	1.5
Hauteur total du remblai	4.7	2.7
Pente d'inclinaison (%)	4	2
Nombre de trappes	7 (de C1 à C7)	3 (de C8 à C10)

Tableau 3-2:Localisation des dix (10) trappes le long des deux (2) ponceaux.

Numéro de la Cavité	Ponceau	Position (°)	Emplacement / extrémité aval du ponceau (m)
C1	1	90	8.09
C2		0	10.3
C3		45	12.04
C4		0	15.5
C5		90	20.07
C6		0	22.05
C7		-45	24.02
C8	2	-90	6.07
C9		0	7.52
C10		45	9.04

Les trappes consistent en des ouvertures dans les ponceaux de 20×20 cm² fermées par des morceaux de tôles (de même nature) plus larges que l'ouverture et boulonnées aux ponceaux. Les morceaux de tôles sont découpés et placés à l'intérieur du ponceau de façon à épouser la forme exacte du ponceau et les ondulations autour de l'ouverture (Fig. 3.1). Un cordon de polymère est placé entre le ponceau et le morceau de tôle pour éviter les fuites d'eau et de matériaux fins. Les dimensions des ouvertures, des tôles et des boulons, sont conçues et choisies de façon à ne pas compromettre l'intégrité structurelle des ponceaux et faciliter l'ouverture et la fermeture des cavités lors de la phase d'investigation. Trois positions de cavité sont privilégiées, soit à 0°, 45° et 90° par rapport au plan radial vertical des ponceaux (Fig. 3.2 et Tableau 3.2). Sur les figures 3.3 et 3.4 sont illustrées les différentes étapes de l'exécution des ponceaux 1 et 2.

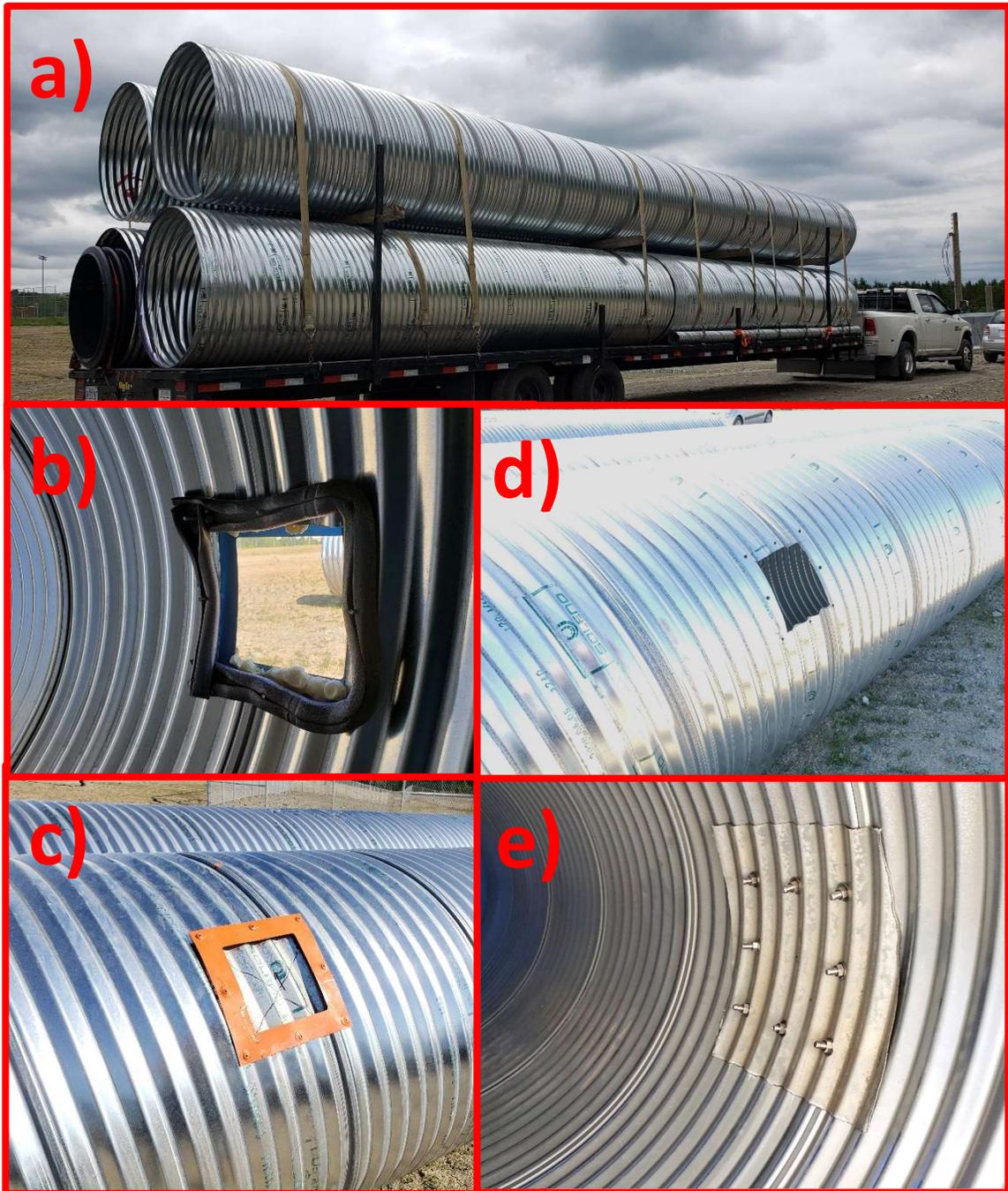


Figure 3.1:a) Acquisition des 48 m de TTOG. b) Placement du cordon de polymère. c) Vue extérieure des trappes. d) Exécution des ouvertures de 20×20 cm. e) Fermeture des trappes avec des plaques boulonnées

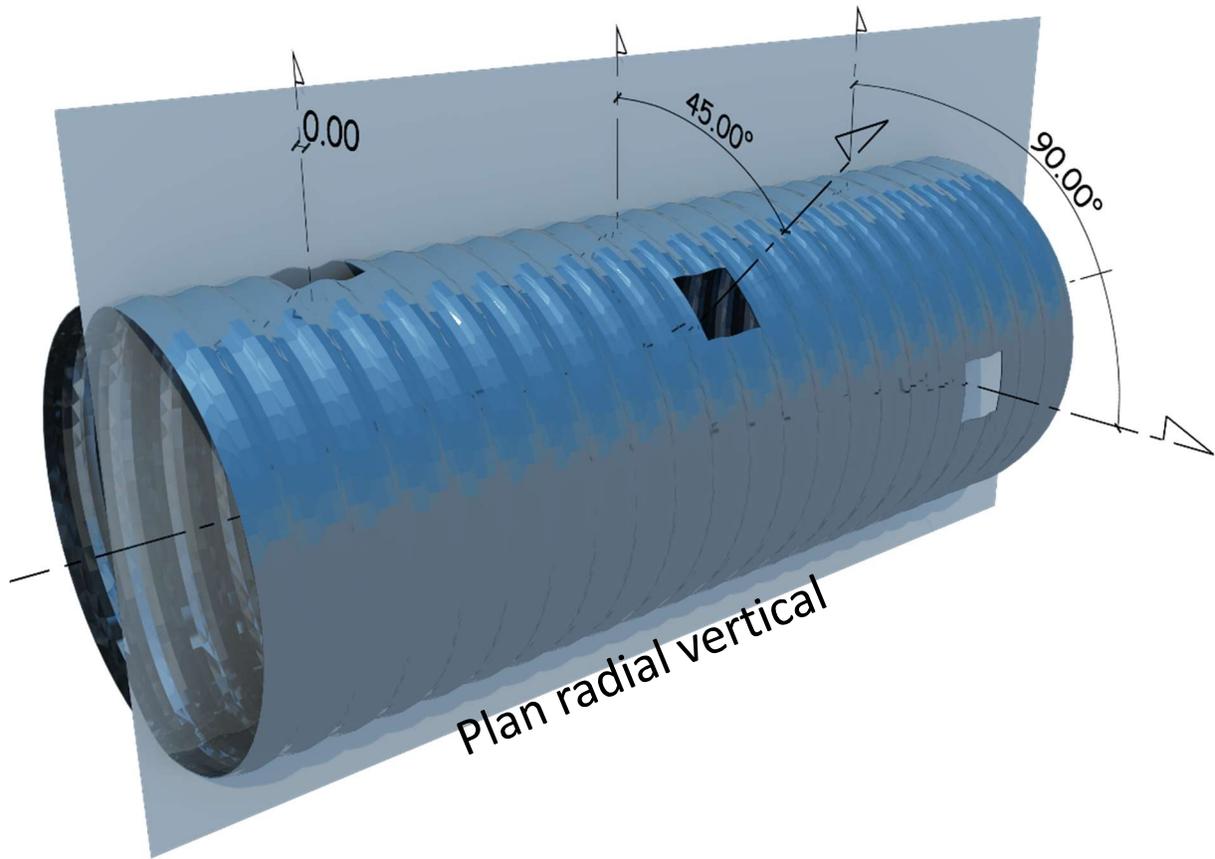


Figure 3.2: Position des cavités à 0°, 45° et 90° par rapport au plan radial vertical.

3.2 Essais réalisés

3.2.1 Phase 1

Une première phase d'investigation, dont les étapes sont illustrées à la figure 3.5 et dont le but est de valider la procédure expérimentale, a été entreprise à l'hiver 2021. Deux séries de relevés perpendiculaires et parallèles ont été effectuées avant et après la création d'une cavité de $20 \times 20 \times 30 \text{ cm}^3$. Il s'agit de la cavité C6 positionnée à 0° sur le plan vertical radial situé à 22,05 m de l'extrémité aval du ponceau 1. Les relevés perpendiculaires sont constitués d'une série de huit (8) lignes (de P1 à P8) espacées de 0,4 m. Les huit (8) lignes sont perpendiculaires à l'axe du ponceau. Chaque ligne est constituée de quatorze (14) capteurs (de C1 à C14) espacés de 0,2 m. Les relevés parallèles sont constitués d'une série de trois (3) lignes parallèles à l'axe du ponceau (de L1 à L3).



Figure 3.3: Les différentes étapes l'exécution du ponceau 1.



Figure 3.4: Les différentes étapes de l'exécution du ponceau 2.

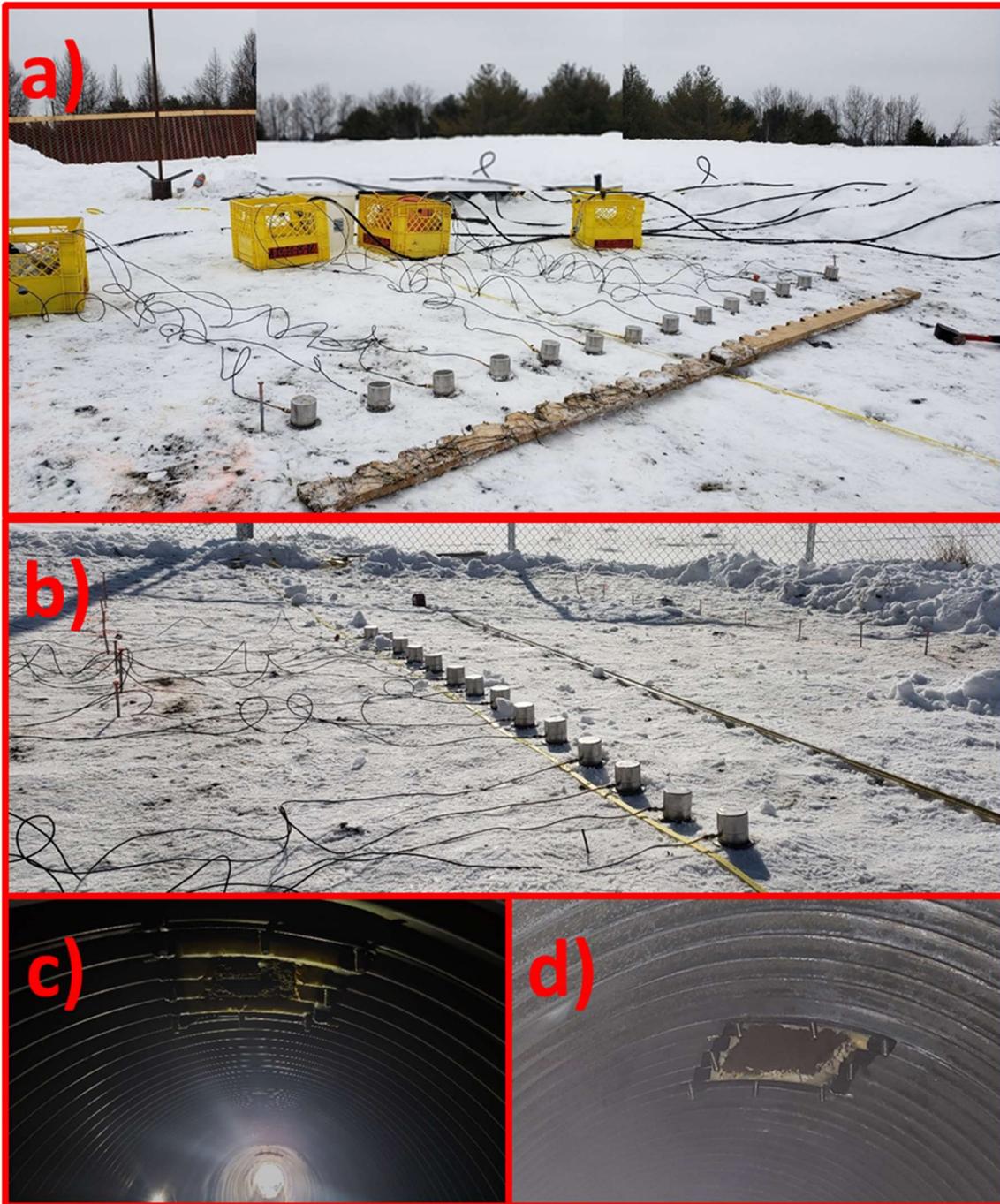


Figure 3.5: Première phase d'investigation, Hiver 2021. a) Réalisation des relevés perpendiculaires. b) Réalisation des relevés parallèles. c) Ouverture de la trappe C6. d) Ouverture de la cavité C6 jusqu'à $20 \times 20 \times 30$ cm³.

La ligne L1 est située sur l'axe du ponceau. Les lignes L2 et L3 sont situées sur les extrémités gauche et droite du ponceau, donc espacées de 0.6 m par rapport à L1 chacune. Chaque ligne est constituée de vingt-huit (28) capteurs (de S1 à S28) espacés de 0.2 m. Les mêmes lignes ont été relevées une deuxième fois après la création de la cavité (de P'1 à P'8 pour les lignes perpendiculaires, et de L'1 à L'3 pour les lignes parallèles). La cavité est située à 3.5 m sous le capteur S16 de la ligne L'1 pour les relevés parallèles et sous le capteur C7 de la ligne P'5.

3.2.2 Phase 2

Une deuxième phase d'investigation, plus exhaustive, a été entreprise à partir de l'Été 2021. Dans le but de valider l'approche proposée et tester sa robustesse, cinq (5) aspects principaux seront étudiés à travers l'analyse des données collectées :

1. L'effet d'une cavité en comparant entre les relevés avant et après une ouverture progressive d'une cavité.
2. L'effet de la position en comparant entre les cavités à 0°, 45° et 90°. La comparaison entre les relevés après l'ouverture d'une cavité et après la fermeture par injection de la mousse expansive (polyuréthane).
3. L'effet de la profondeur en comparant entre les deux ponceaux (ponceau un (1) à 1.5 m de profondeur et ponceau deux (2) à 3.5 m de profondeur). Cette comparaison permettra de valider l'outil d'analyse pour les ponceaux à faible profondeur qui exhibe une réponse ambiguë à analyser due à l'effet de guide d'onde qui domine cette réponse.
4. La détermination de la zone en surface affectée par la présence d'une cavité pour optimiser la surface à couvrir (relevés perpendiculaires) et du nombre de lignes optimal à réaliser (relevés parallèles) pour confirmer l'état remblai autour du ponceau.
5. L'ensemble des essais ont été effectués dans un intervalle de temps relativement court entre le moment de la création des cavités et les essais d'investigation

Les relevés sur le ponceau 1 (fig. 2.6) se sont déroulés en 5 étapes :

1. Relevé initial, aucune cavité n'a été créée.
2. Ouverture de la cavité C1 jusqu'à de $20 \times 20 \times 30 \text{ cm}^3$.
3. Élargissement de la cavité C1 jusqu'à de $40 \times 40 \times 40 \text{ cm}^3$.
4. Ouverture de la cavité C2 jusqu'à de $20 \times 20 \times 30 \text{ cm}^3$.
5. Élargissement de la cavité C2 jusqu'à de $40 \times 40 \times 40 \text{ cm}^3$.

À chaque étape, des relevés parallèles et perpendiculaires ont été relevés, une première fois avec une source à l'amont et une deuxième fois avec une source à l'aval pour un total de dix (10) séries de relevés pour le ponceau 1, résumés aux tableaux 3.3 et 3.4 :

1. Les tests 1, 3, 5, 7 et 9 constituent l'ensemble des relevés parallèles effectués sur le ponceau 1. Chaque série est composée de trois lignes : une ligne sur l'axe du ponceau et les deux autres sur les deux extrémités gauche et droite du ponceau. Exclusivement pour les tests 1 et 5, une quatrième ligne, décalée de 80 cm de l'axe vers la gauche, donc de 20 cm de l'extrémité gauche, a été relevée. Chaque ligne est relevée avec 42 capteurs espacés de 10 cm, pour une envergure totale de 4.1 m. Un décalage initial par rapport à la source de 1.7 m du côté amont et de 1 m du côté aval a été considéré.
2. Les tests 2, 4, 6, 8 et 10 constituent l'ensemble des relevés perpendiculaires effectués sur le ponceau 1. Chaque test comporte 20 lignes perpendiculaires espacées de 20 cm. Chaque ligne est relevée avec 14 capteurs espacés de 20 cm. Un décalage initial par rapport à la source de 2 m du côté amont et de 1 m du côté aval a été considéré.

Les relevés sur le ponceau 2 (Fig. 3.7) se sont déroulés en 3 étapes :

1. Relevé initial, aucune cavité n'a été créée.
2. Ouverture de la cavité C10 jusqu'à $40 \times 40 \times 40 \text{ cm}^3$.
3. Colmatage de la cavité C10 avec de la mousse expansive (Polyuréthane).

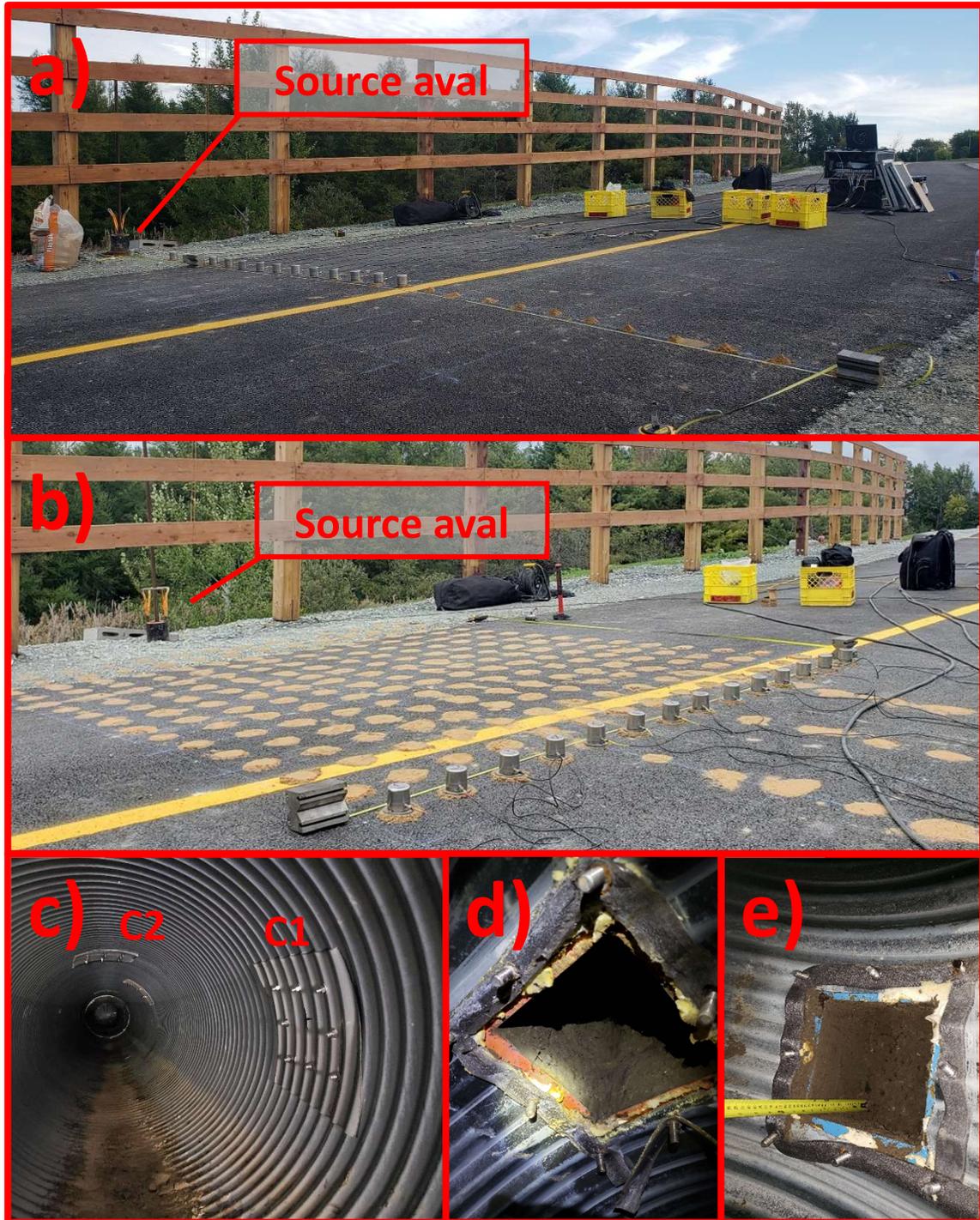


Figure 3.6:Devisième phase d'investigation sur le ponceau 1. a) Relevés parallèles. b) Relevés perpendiculaires. c) Vue d'ensemble de l'intérieur du ponceau 1. d) Ouverture de la cavité C1 jusqu'à 40×40×40 cm³. e) Ouverture de la cavité C2 jusqu'à 40×40×40 cm³.

À chaque étape, des relevés parallèles et perpendiculaires ont été effectués, une première fois avec une source à l'amont et une deuxième fois avec une source à l'aval pour un total de six (6) séries de relevés pour le ponceau 2, résumés aux tableaux 3.3 et 3.4 :

1. Les tests 11, 13 et 15 constituent l'ensemble des relevés parallèles effectués sur le ponceau 2. Chaque série est composée de quatre lignes : une ligne sur l'axe du ponceau, deux autres sur les deux extrémités gauche et droite du ponceau et une dernière ligne, décalée de 30 cm de l'axe vers la gauche. Chaque ligne est relevée avec 34 capteurs espacés de 10 cm, pour une envergure totale de 3.2 m. Le décalage initial par rapport à la source est de 1.1 m du côté amont et de 1.4 m du côté aval.
2. Les tests 12, 14 et 16 constituent l'ensemble des relevés perpendiculaires effectués sur le ponceau 2. Chaque test comporte 17 lignes perpendiculaires espacées de 20 cm. Chaque ligne est relevée avec 14 capteurs espacés de 20 cm aussi. Le décalage initial par rapport à la source est de 1.1 m du côté amont et de 1.5 m du côté aval.

Pour pouvoir se repérer sur le site, aligner les relevés avec les axes des ponceaux, répéter les relevés exactement au même emplacement et comparer ainsi entre les résultats obtenus lors des différentes configurations, un marquage permanent a été implémenté avec un système de lasers (fig. 2.8). Le marquage qui couvre la totalité de la surface investiguée pour le ponceau 1 et 2, a permis une rapidité et une précision lors des premières investigations et servira aussi comme repère lors des étapes futures du projet.

3.2.3 Phase 3

À la lumière de l'ensemble des constatations et après avoir finaliser le développement de l'approche d'analyse pour la détection des cavités, quelques essais ont été réalisés des deux côtés (amont et aval) sur les deux ponceaux afin de tester la robustesse de la méthode. Les essais ont tous été effectués avec des espacements entre les lignes de 0,1 m et des espacements entre les capteurs de 0,2 m. Les essais réalisés dans la dernière phase ont également été effectués afin d'examiner l'évolution des cavités dans le temps.

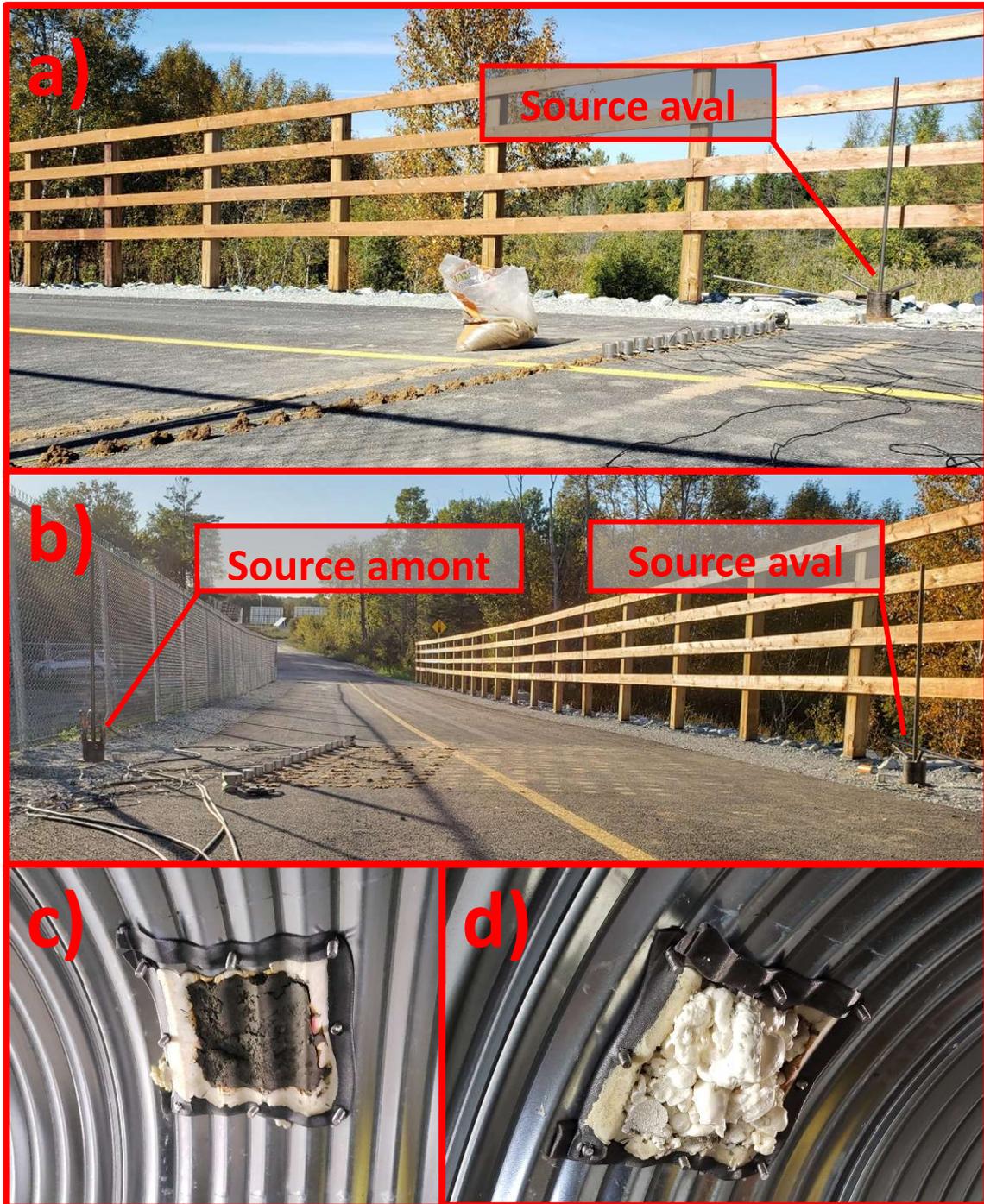


Figure 3.7. Deuxième phase d'investigation sur le ponceau 2. a) Relevés parallèles. b) Relevés perpendiculaires. c) Ouverture de la cavité C10 jusqu'à $40 \times 40 \times 40 \text{ cm}^3$. d) Calfeutrage de la cavité C1 avec de la mousse expansive.

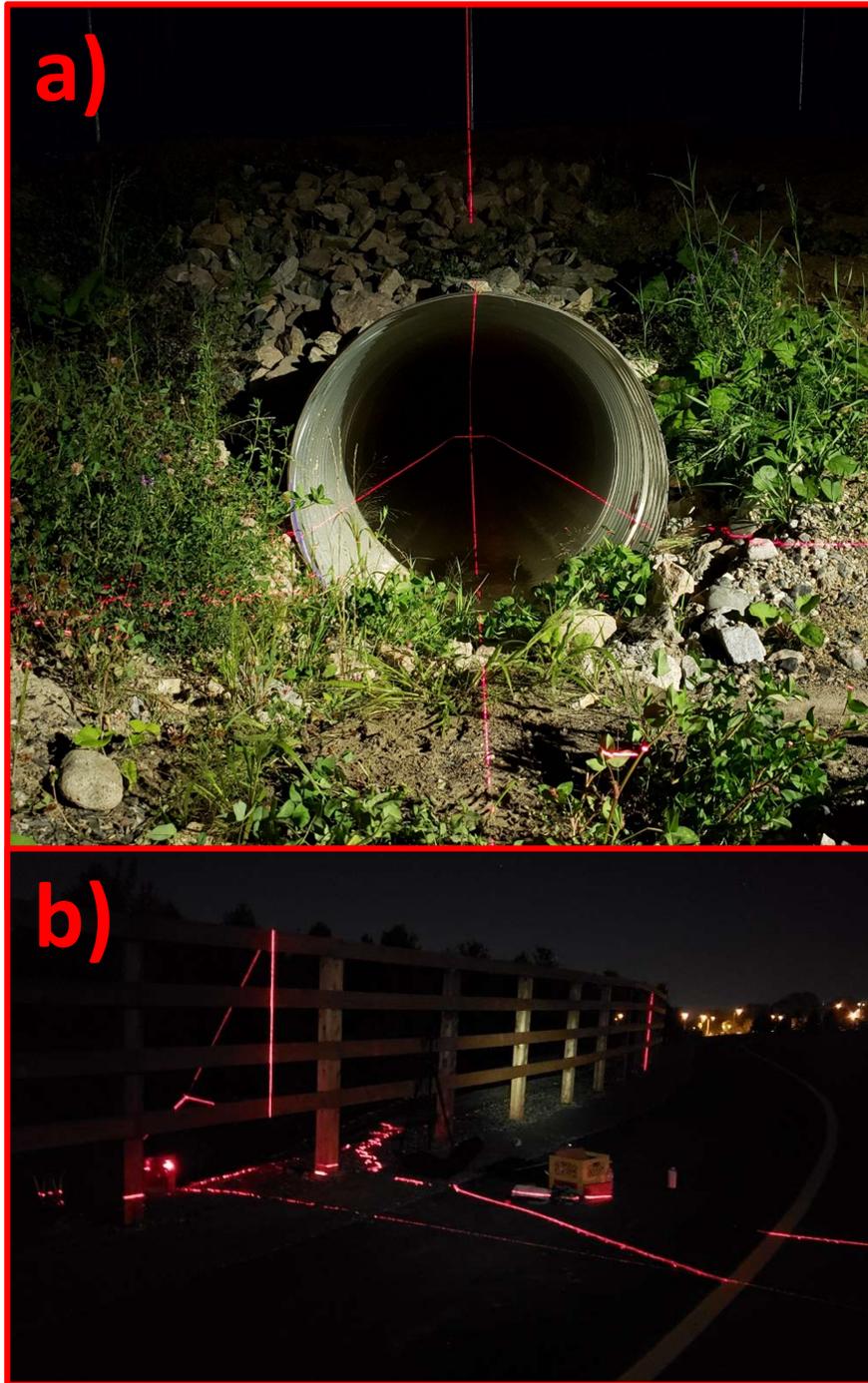


Figure 3.8. Implémentation des relevés avec un système de lasers. a) Alignement des relevés avec l'axe du ponceau. b) Implémentation des repères en surface.

Tableau 3-3: Relevés perpendiculaires effectués lors la deuxième phase d'investigation.

Configuration perpendiculaire	Test	Site	distance intercepteur (m)	distance interligne (m)	Nbre de ligne perpendiculaire	Décalage par rapport à la source à l'amont (m)	Décalage par rapport à la source à l'aval (m)	Remarque :
	Test 2	Ponceau 1	0.2	0.2	20	2	1	Aucune cavité.
	Test 4	Ponceau 1	0.2	0.2	20	2	1	C1 (20×20×20 cm) sur PM-5 (source à l'amont, L16). C1 (20×20×20 cm) sur PM-1.8 (source à l'aval, L5).
	Test 6	Ponceau 1	0.2	0.2	20	2	1	C1 (40×40×40 cm) sur PM-5 (source à l'amont, L16). C1 (40×40×40 cm) sur PM-1.8 (source à l'aval, L5).
	Test 8	Ponceau 1	0.2	0.2	20	2	1	C1 (40×40×40 cm) sur PM-5 (source à l'amont, L16). C1 (40×40×40 cm) sur PM-1.8 (source à l'aval, L5). C2 (20×20×20 cm) sur PM-3 (source à l'amont, L6). C2 (20×20×20 cm) sur PM-3.8 (source à l'aval, L15).
	Test 10	Ponceau 1	0.2	0.2	20	2	1	C1 (40×40×40 cm) sur PM-5 (source à l'amont, L16). C1 (40×40×40 cm) sur PM-1.8 (source à l'aval, L5). C2 (40×40×40 cm) sur PM-3 (source à l'amont, L6). C2 (40×40×40 cm) sur PM-3.8 (source à l'aval, L15).
	Test 12	Ponceau 2	0.2	0.2	17	1.1	1.5	Aucune cavité.
	Test 14	Ponceau 2	0.2	0.2	17	1.1	1.5	C10 (40×40×40 cm) sur PM-2.5 (source à l'amont, L8). C10 (40×40×40 cm) sur PM-3.3 (source à l'aval, L10).
	Test 16	Ponceau 2	0.2	0.2	17	1.1	1.5	C10 sur PM-2.5 (source à l'amont, L8) colmatée. C10 sur PM-3.3 (source à l'aval, L10) colmatée.

Tableau 3-4:Relevés parallèles effectués lors la deuxième phase d’investigation.

	Test	Site	distance intercapteur (m)	Nombre de capteurs	Nbre de ligne parallèle	distance interligne du haut en bas (m)	Décalage par rapport à la source à l'amont (m)	Décalage par rapport à la source à l'aval (m)	Remarque :
Configuration parallèle	Test 1	Ponceau 1	0.2	25	4	0.6 / 0.6 / 0.2	1	1	Aucune cavité.
	Test 3	Ponceau 1	0.2	25	3	0.6 / 0.6	1	1	C1 (20×20×20 cm) à PM-5 de L1 et L4, source à l'amont. C1 (20×20×20 cm) à PM-1.8 de L1 et L4, source à l'aval.
	Test 5	Ponceau 1	0.1	42	4	0.6 / 0.6 / 0.2	1.7	1	C1 (40×40×40 cm) à PM-5 de L1 et L4, source à l'amont. C1 (40×40×40 cm) à PM-1.8 de L1 et L4, source à l'aval.
	Test 7	Ponceau 1	0.1	42	3	0.6 / 0.6	1.7	1	C1 (40×40×40 cm) à PM-5 de L1 et L4, source à l'amont. C1 (40×40×40 cm) à PM-1.8 de L1 et L4, source à l'aval. C2 (20×20×20 cm) sur PM-3 de L3, source à l'amont. C2 (20×20×20 cm) sur PM-3.8 de L3, source à l'aval.
	Test 9	Ponceau 1	0.1	42	3	0.6 / 0.6	1.7	1	C1 (40×40×40 cm) sur PM-5 de L1 et L4, source à l'amont. C1 (40×40×40 cm) sur PM-1.8 de L1 et L4, source à l'aval. C2 (20×20×20 cm) sur PM-3 de L3, source à l'amont. C2 (20×20×20 cm) sur PM-3.8 de L3, source à l'aval.
	Test 11	Ponceau 2	0.1	34	4	0.6 / 0.3 / 0.3	1.1	1.4	Aucune cavité.
	Test 13	Ponceau 2	0.1	34	4	0.6 / 0.3 / 0.3	1.1	1.4	C10 (40×40×40 cm) sur PM-2.5 de L3, source à l'amont. C10 (40×40×40 cm) sur PM-3.3 de L3, source à l'aval.
	Test 15	Ponceau 2	0.1	34	4	0.6 / 0.3 / 0.3	1.1	1.4	C10 colmatée avec de la mousse expansive à PM-2.5 de L3, source à l'amont. C10 colmatée avec de la mousse expansive à PM-3.3 de L3, source à l'aval.

CHAPITRE 4 : ANALYSE DES DONNÉES

Lors de l'analyse des signaux, la première étape consiste à identifier (représentation vitesse-fréquence (GST)) la plage de fréquences où un seul mode domine. Cette plage dépend de la profondeur du ponceau (incluant la hauteur du ponceau) et de l'état du sol tel qu'il a été démontré avec les modèles analytiques et numériques et les 5 études de cas menées lors de la première phase du projet (Aucun nouveau cas d'étude sur des routes ou autoroutes n'a été considéré dans cette étude). Une fois cette plage de fréquences identifiée, la génération de tomographie de vitesses de groupe à ces fréquences permet d'apprécier l'état du sol en place. En cas d'obtention de tomographie présentant un accroissement des vitesses de groupe uniforme le long des relevés, le remblai est jugé sain, uniformément dense et ne présentant pas d'anomalie (Fig. 2.11a). Dans le cas contraire, une tomographie avec des sauts de vitesse et des irrégularités, serait une indication d'un remblai non uniforme présentant des anomalies et des contrastes de densité (Fig. 2.11b).

La vitesse de groupe est considérée comme premier critère d'évaluation afin de détecter la présence ou l'absence d'anomalie puisque ce paramètre est plus facile à obtenir à faible coût de calcul avec la GST et ne requière pas une grande expertise en traitement de signal, contrairement à la vitesse de phase. Calculer la vitesse de groupe individuellement pour chaque capteur en considérant la distance source-capteur permet de diagnostiquer le sol en dessous d'une chaussée. Toutefois, on a démontré grâce aux simulations numériques que l'évaluation de la variation de la vitesse de groupe par rapport à la fréquence autour d'une fréquence donnée permet une meilleure identification des anomalies et aussi d'avoir une certaine appréciation de la variabilité des sols. Cette manière permet même d'avoir une certaine appréciation sur la qualité des essais.

4.1 Analyse des données de la phase 1 (cavité C6)

L'analyse temps fréquences des signaux enregistrés avant et après la création d'une cavité permet de localiser l'intervalle de fréquences qui correspond à la présence d'un seul mode de propagation d'onde. L'utilisation de fréquences plus élevées, à cause d'un manque d'énergie en profondeur, peut amener des schémas plus complexes à cause de la présence d'un certain nombre de modes de propagation et également différents types d'ondes. Donc, pour comprendre le processus, une distribution de l'énergie de l'ensemble des signaux est présentée par le logiciel de calcul et permet ainsi à l'opérateur de choisir la ou les quelques fréquences qu'il doit utiliser pour établir des contours de variation de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence dans l'espace couvert par les capteurs.

La figure 4.1a montre la distribution de l'énergie des signaux enregistré par-dessus le ponceau 1 autour de la trappe C6 avant la création d'une cavité. Cette trappe est située à l'extrémité amont du ponceau 1 le plus profond là où le terrain est accidenté et le sol est composé d'un remblai hétérogène. De plus, les essais ont été réalisés durant l'hiver au mois de janvier et il n'existe pas de pavage à cet endroit. Les conditions de cet essai sont probablement les plus défavorable qu'il est possible d'avoir. La figure 4.1 montre la présence d'énergie à des fréquences variant entre 35 Hz et 200 Hz avec des délais de propagation d'ondes variant entre 0,005 sec et 0,06 sec. Cette figure inclus l'ensemble des 112 signaux collectés durant l'essai et il est possible de voir la présence d'au moins 4 modes

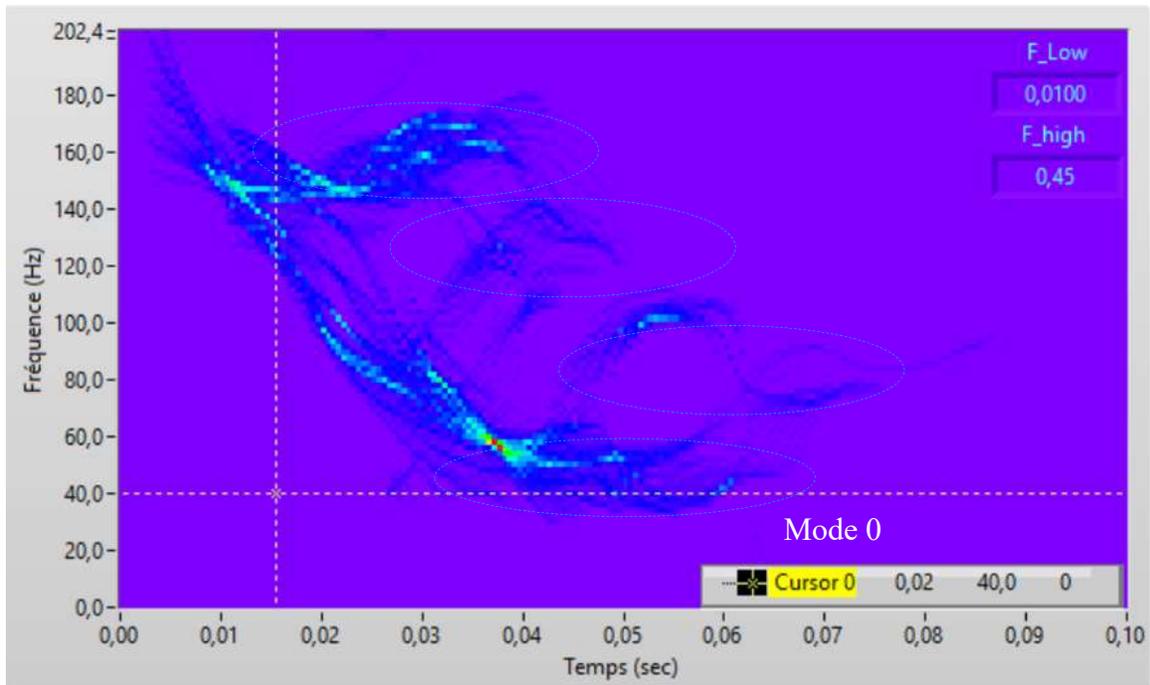


Figure 4.1 Distribution des énergies d’ondes des signaux collectés sur le ponceau 1 au-dessus de la trappe C6 durant l’hiver

de vibration d’onde de Rayleigh. Pour simplifier, l’utilisateur doit regarder uniquement les énergies aux fréquences les plus faibles (Mode 0), là où les temps de propagation sont les plus élevés (vitesses les plus faibles). Cette figure montre que les vitesses de groupe les plus faibles sont généralement supérieures à 100 m/s ($d_{\text{milieu}}=5\text{m} / 0.05\text{sec}$). Ceci nous permet de dire que les énergies d’ondes sont capables d’atteindre la profondeur de la trappe et donc de la cavité plus tard. Dans le cas actuel les fréquences auxquelles il est possible d’établir un schéma de distribution de vitesse de groupe ou d’énergie à un seul mode de vibration sont situées entre 35 et 60 Hz.

La figure 4.2 présente les distributions de la vitesse de groupe par rapport à la fréquence (Fig. 4.2a) et de l’amplitude des signaux (Fig. 4.2b) dans l’espace couvert par les capteurs pour une fréquence de 35 Hz. Cette figure montre une distribution relativement variable des deux composantes et surtout non symétrique par rapport à l’axe du ponceau. Si on essaye d’analyser la distribution de la vitesse de groupe dans l’espace couvert par les essais, il est possible de dire qu’il y a une variation importante dans les propriétés du sol où une variation géométrique à la surface du terrain entre les distance/source 3 et 3,4 m du côté

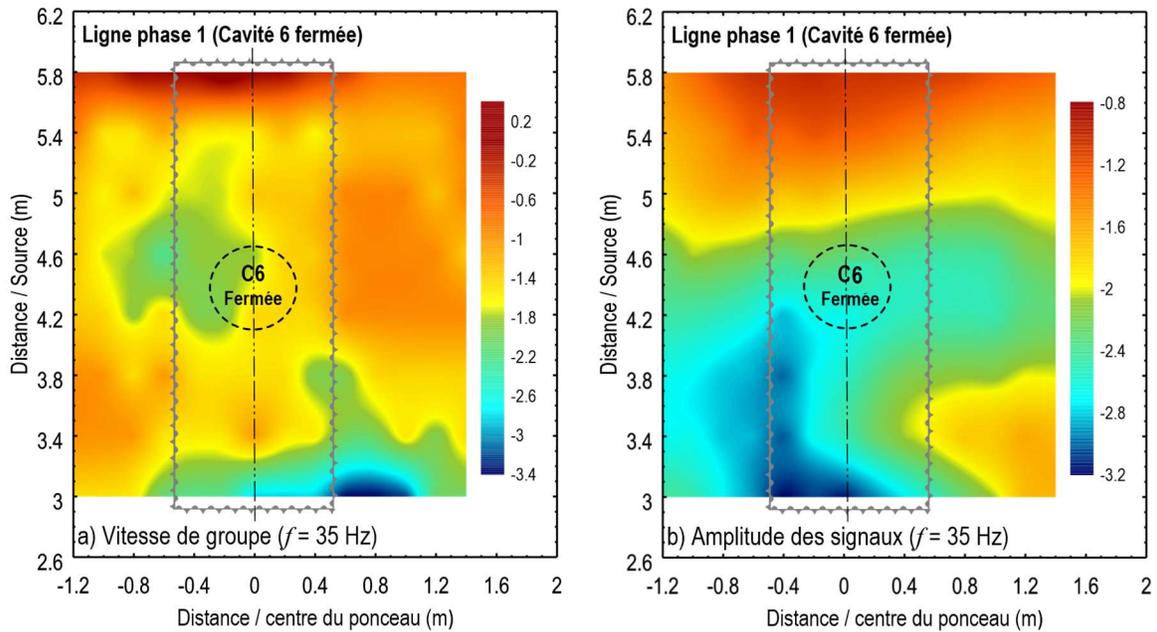


Figure 4.2 Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs à une fréquence de 35 Hz.

droit du ponceau (autour de l'écart 0,8 par rapport à l'axe du ponceau) et entre les distance/source de 4,2 à 4,8 m du côté gauche du ponceau (autour de l'écart -0,6 par rapport à l'axe du ponceau).

Dans la phase 1, une cavité a été créée de 20x20 cm au niveau de la trappe C6. Des essais ont été réalisés à la suite de la création de cette cavité dans les mêmes conditions que celles réalisés avant sa création. La Figure 4.3 présente la distribution de l'énergie des signaux enregistré par-dessus le ponceau 1 après la création de la cavité C6. Cette figure montre approximativement la même distribution d'énergie observée avant la création de la cavité à des fréquences variant entre 35 Hz et 200 Hz avec des délais de propagation d'ondes variant entre 0,005 sec et 0,06 sec. Cette figure inclus aussi l'ensemble des 112 signaux collectés durant les essais et il est possible de voir la présence d'un mode fondamental plus dominant que celui présenté à la figure 4.1, mais on est encore capable de voir la présence d'énergie d'au moins 4 modes de propagation d'ondes. Cette variation de l'énergie d'un cas à l'autre n'est pas obligatoirement associée à la création de la cavité. Cette variation peut être reliée essentiellement à la variation dans l'énergie donnée durant les essais et qui peut varier d'une série d'essai à l'autre pour différentes raisons (position de la source,

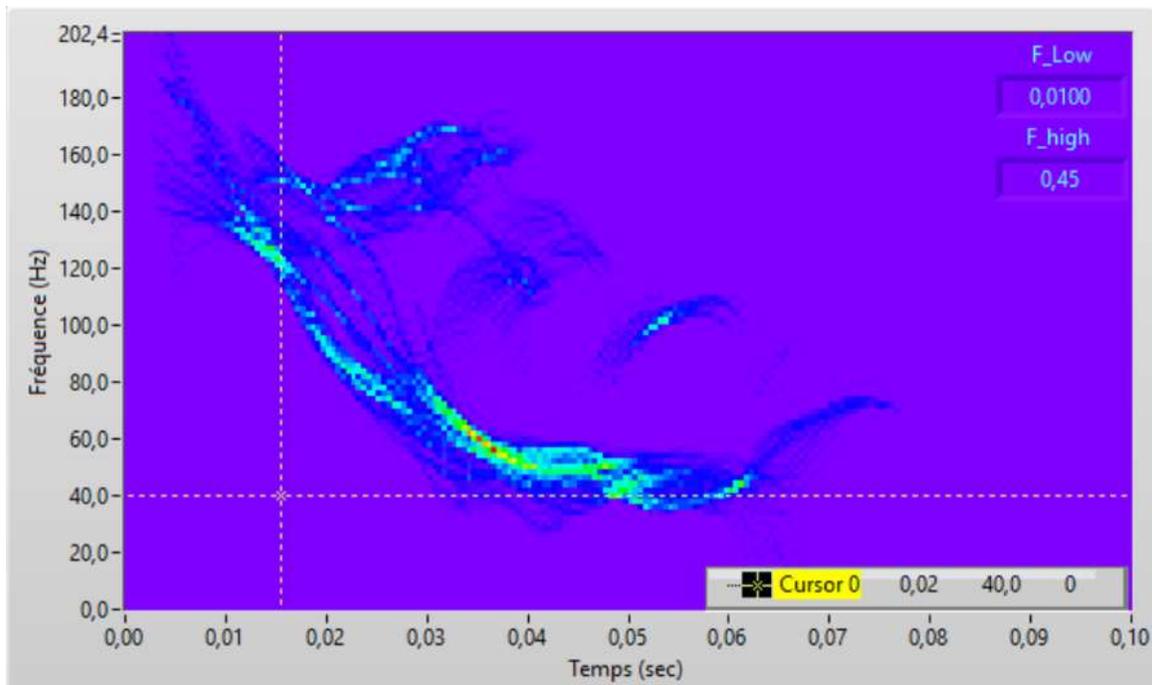


Figure 4.3 Distribution des énergies d’ondes des signaux collectés sur le ponceau 1 après la création d’une cavité au niveau de la trappe C6.

qualité de l’impact, géométrie proche de la source). Cela dit, les vitesses de propagation d’ondes semblent être du même ordre de grandeur. Afin d’apprécier la différence entre les deux situations (avec et sans cavité) et ce même si la cavité est relativement petite par rapport à la profondeur de celle-ci ($0,2\text{m}/3,5 = 5,7\%$), des contours de variation de vitesse de groupe par rapport à la fréquence et d’amplitude ont été établis pour la même fréquence de 35 Hz. Ces contours sont présentés à la figure 4.4 et montrent que la distribution de l’amplitude des signaux est pratiquement identique que celle déterminée avant la création de la cavité. Cette comparaison est d’une importance capitale puisqu’elle permet de conclure que les conditions d’essais (incluant le placement des capteurs, la variation de l’emplacement de la source, etc.) sont assez semblables et que la qualité des essais n’est pas responsable de la variabilité des énergies. Elle permet aussi de constater comme déjà observé dans la phase 1 du projet que l’énergie n’est pas un bon indicateur de la présence d’anomalies. Il est surtout important pour juger de la qualité des essais et de l’hétérogénéité du milieu. Cependant, l’observation de la distribution de la variation de la vitesse de groupe montre et de manière très claire l’apparition d’une nouvelle variation (couleur bleu vert) au centre du ponceau à environ une distance par rapport à source variant entre 3,9 et 4,5 m,

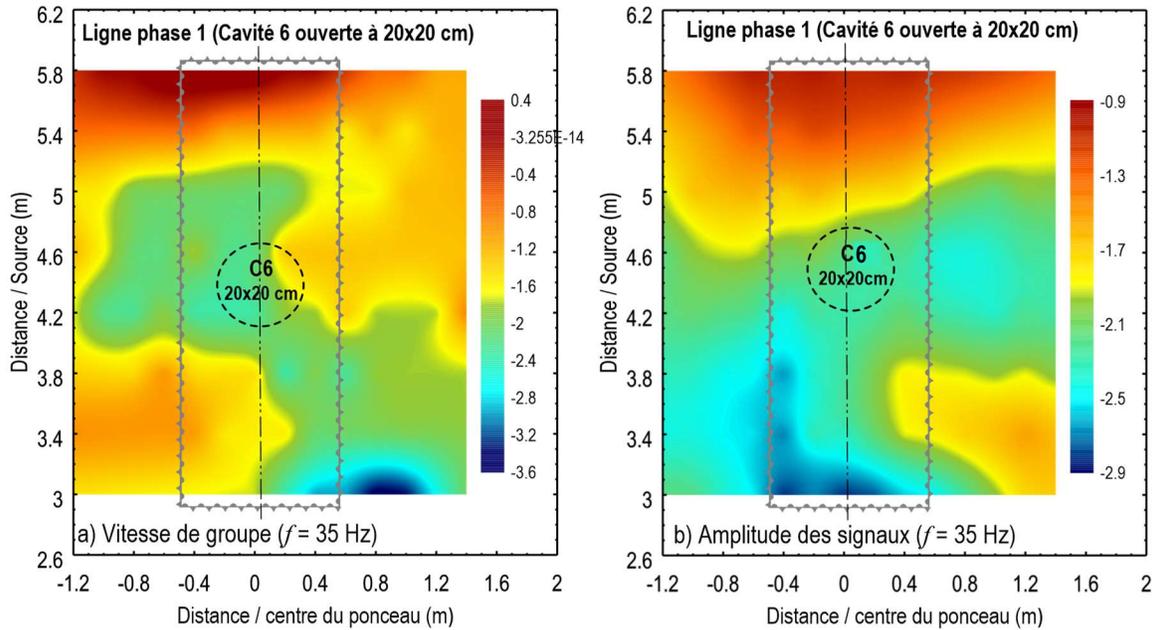


Figure 4.4 Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de la cavité à une fréquence de 35 Hz.

soit l'endroit exact au-dessus de la petite cavité. Afin de mieux apprécier la différence, les lignes de contours avant la création de la cavité et variant entre 0,4 et -1,5 et entre -1,6 et -3,4 sont présentées en couleurs rouge et vert respectivement par-dessus les contours de vitesse après la création de la cavité. Cette figure montre que le seul endroit où il existe une différence entre les distributions des énergies se trouve exactement au-dessus de l'endroit où la cavité a été créée.

Les essais de la phase 1 montrent que les essais effectués au-dessus d'un ponceau durant l'hiver sur un terrain accidenté et sur un remblai hétérogène, permettent malgré tout de détecter la présence d'une cavité. Il est évident que si on n'a pas un schéma de référence qui permet de voir l'évolution de l'énergie entre un état et un autre, il aurait été difficile de conclure à la présence ou non d'une cavité. Cependant, le but de cet exercice est de vérifier l'efficacité de la technique de traitement à identifier ou non la présence de cavité. La comparaison présentée ne laisse aucun doute que la technique est très efficace et ce malgré les conditions très complexe dans laquelle elle a été confrontée.

4.2 Résultats de la phase 2

Un grand nombre d'essais a été effectué durant la phase 2 de cette étude. L'ensemble des

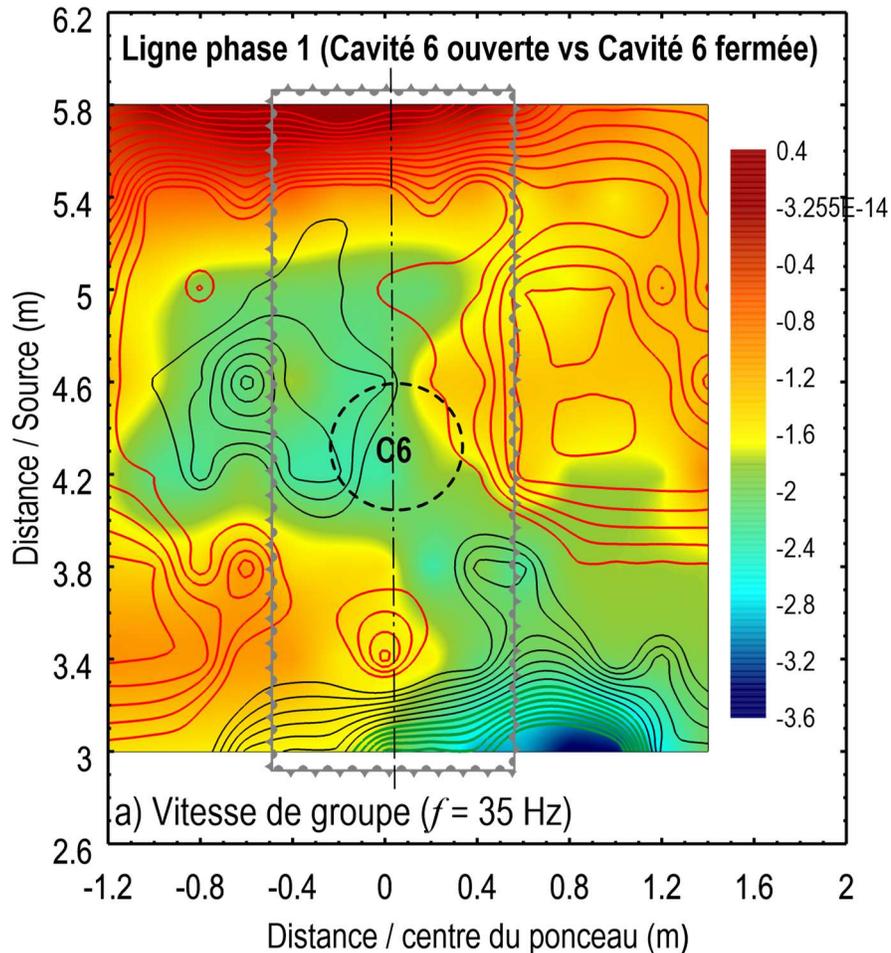


Figure 4.5 Comparaison des distributions des vitesses de groupe avant et après création d'une petite cavité de 20x20 cm

essais ont été effectués sur les portions pavée de la piste situées au-dessus des ponceaux. Tous les essais ont été réalisés en utilisant la même configuration, soit des espacements entre les capteurs de 0,2 m et des espacements entre les lignes de 0,2 m également. Les sources d'énergie ont toujours été placées sur le sol à côté du pavage et les capteurs sur le pavage. Les détails de l'ensemble des essais sont résumés dans le tableau 3.4.

4.2.1 Résultats du ponceau 1 avant la création de cavités

Comme dans le cas de la phase 1, des essais ont été effectués avant la création des cavités. Deux séries d'essais ont été réalisées, une première série en plaçant la source du côté amont de la piste et une deuxième série avec une source placée du côté aval. La distribution de l'énergie dans le plan temps-fréquence dans le cas des essais effectués avec une source du

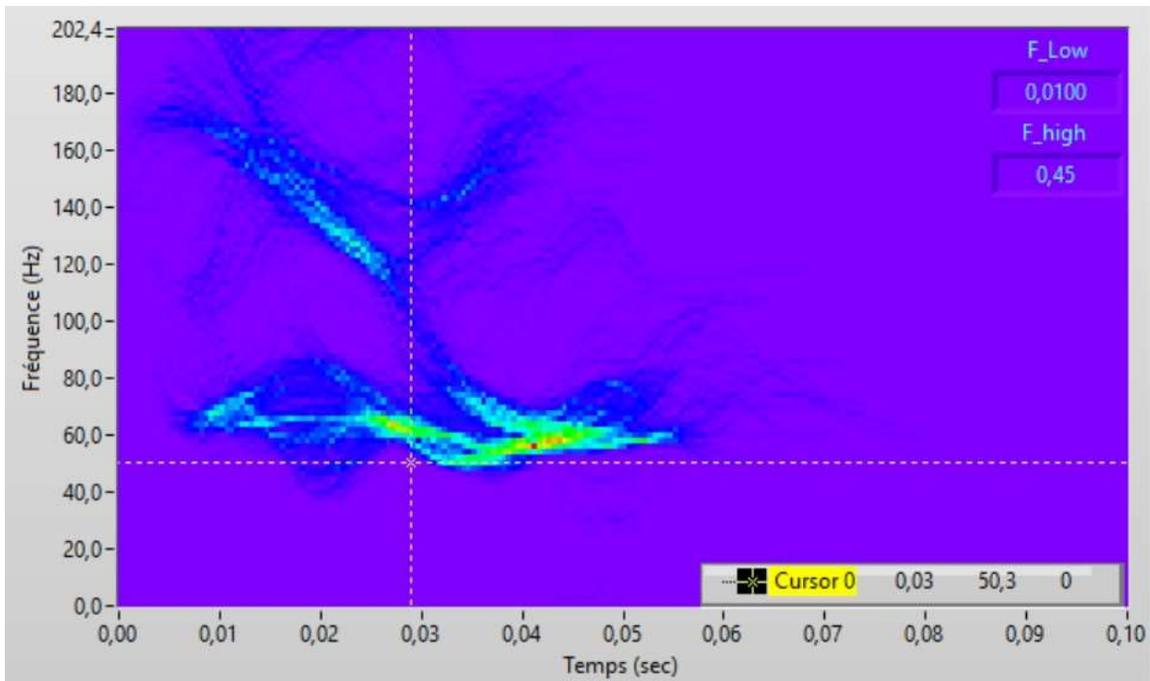


Figure 4.6 Distribution des énergies d’ondes des signaux collectés sur le ponceau 1 avant la création de cavités au niveau des trappes C1 et C2 avec une source du côté Amont. côté amont est présentée à la figure 4.6. Cette figure montre la présence d’énergie à des fréquences variant entre 45 Hz et 200 Hz avec des délais de propagation d’ondes variant entre 0,005 sec et 0,056 sec. Cette figure inclus l’ensemble des 280 signaux collectés durant les essais et il est possible de voir la présence de deux modes de propagation d’onde. La présence de pavage et de fondation routière amène des vitesses de phase plus élevées mais aussi un confinement des énergies d’ondes entre le pavage (plus rigide) et le ponceau (plus rigide aussi). En effet, les figure 4.7b et 4.8b montrent que les énergies calculées des signaux enregistrés au-dessus du pavage, pour des fréquences de 45 Hz et 50 Hz respectivement, sont beaucoup plus uniforme et symétrique par rapport au centre du ponceau lorsqu’on les compare avec les énergies obtenues dans la phase 1. Les distributions des vitesses de groupe en fonction de la fréquence ainsi que celles des amplitudes des signaux pour des fréquences de 55 Hz et 60 Hz sont également montrées aux Figures A2.3 à A2.4 de l’annexe 2. Les distributions des amplitudes des signaux semblent montrées que les essais ont été légèrement décalé par rapport au centre du ponceau d’environ 0,2 à 0,4 m. Cette constatation est intéressante puisqu’il est souvent difficile de savoir où les essais

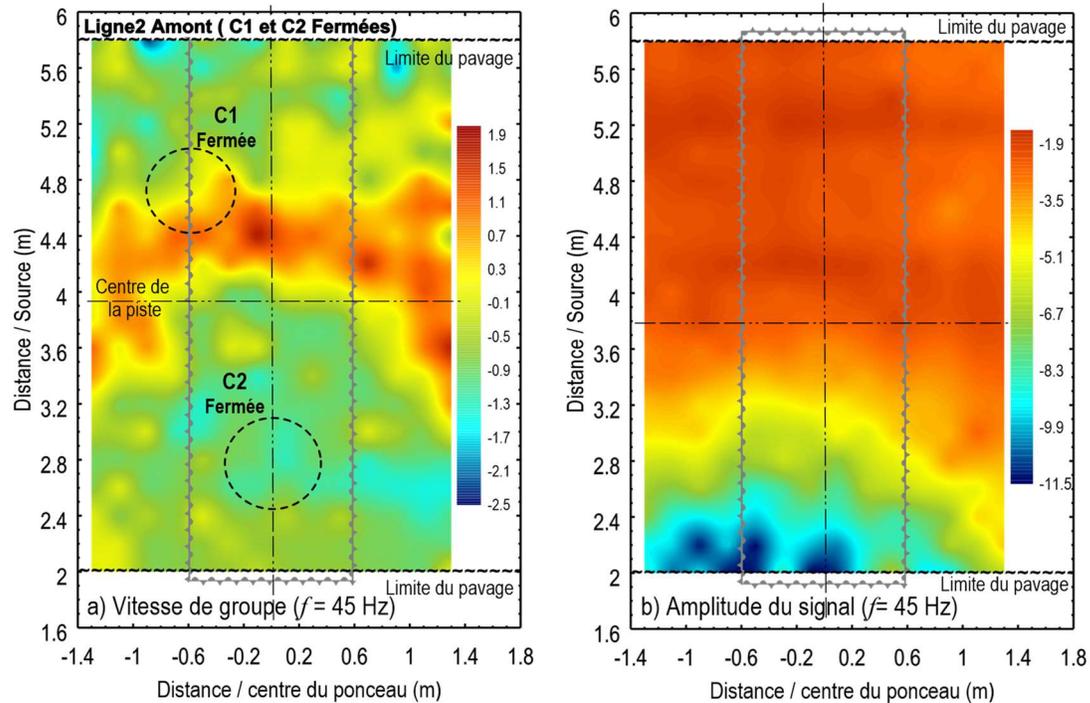


Figure 4.7 Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs avant la création de cavité à une fréquence de 45 Hz (côté amont)

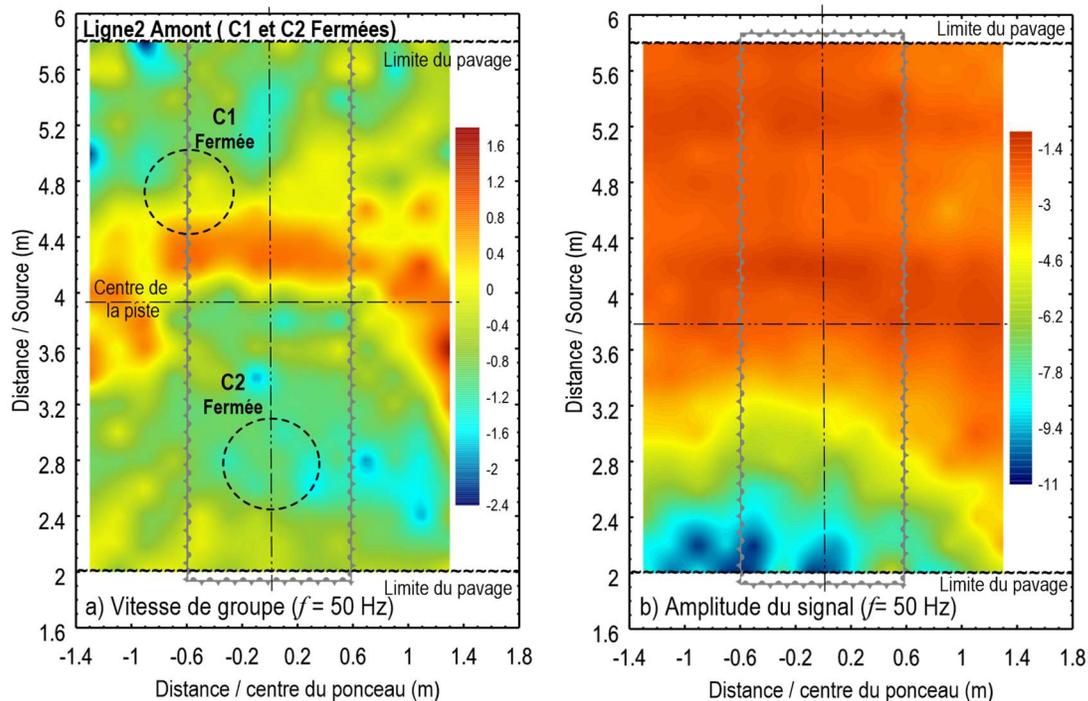


Figure 4.8 Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs avant la création de cavité à une fréquence de 50 Hz (côté amont).

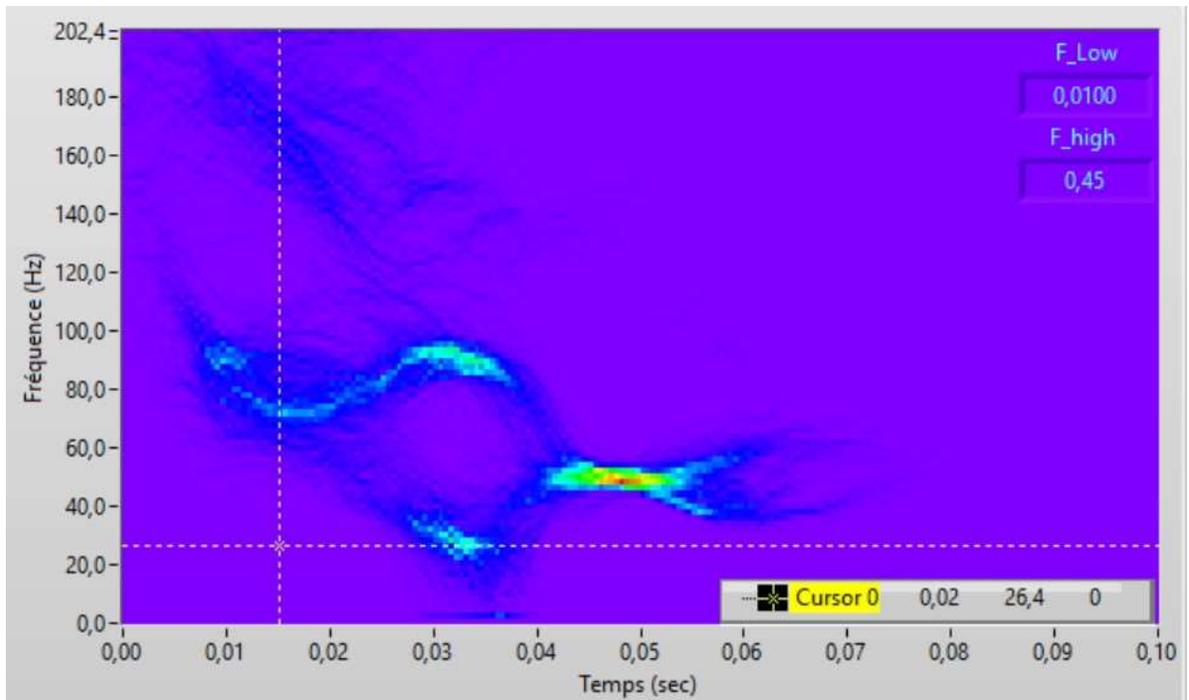


Figure 4.9 Distribution des énergies d’ondes des signaux collectés sur le ponton 1 avant la création de cavités au niveau des trappes C1 et C2 avec une source du côté aval.

sont exactement situés par rapport à l’axe du ponton. Il n’est pas impossible de se trouver avec un décalage ou un désalignement par rapport au centre du ponton. Le critère de distribution de l’énergie permet donc un grand avantage pour la localisation de l’endroit précis des essais. Au niveau de la variation des vitesses de groupe l’ensemble des résultats semblent indiqués des faibles variations de la vitesse (variant entre -2 m/s à 2 m/s) et surtout une progression symétrique et cohérente des contours de vitesses. Ces résultats ne semblent pas montrer la présence d’une anomalie particulière.

La figure 4.9 présente la distribution des énergies d’ondes des 280 signaux collectés au-dessus du ponton 1 avant la création de cavités et avec une source placée du côté aval. Le patron d’énergie semble différent de celui observé lorsque la source était placée du côté Amont. Ceci peut être essentiellement relié à la distance source capteur et à la rigidité de l’endroit où l’impact est créé. Cela dit, il est possible d’observer la présence de seulement deux modes de propagation d’ondes avec des fréquences généralement plus faible variant entre 20 Hz et 160 Hz. Les distributions de la variation de la vitesse de groupe par rapport

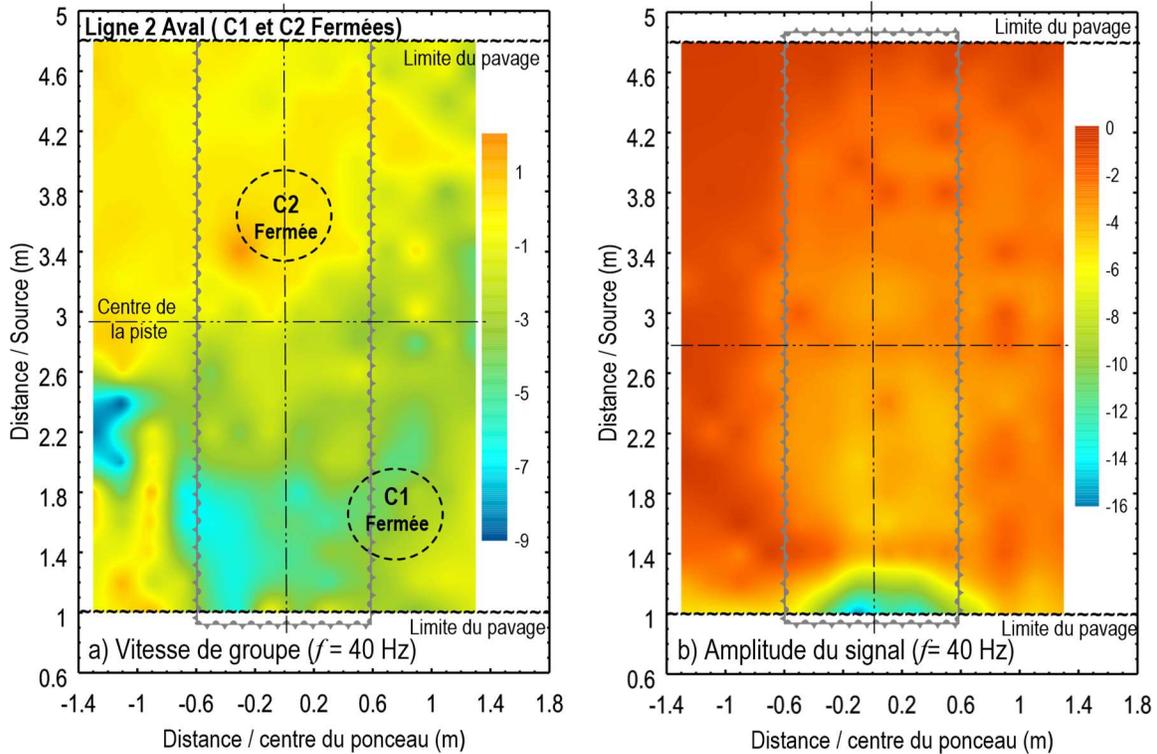


Figure 4.10 Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs avant la création de cavité à une fréquence de 40 Hz (côté aval).

à la fréquence et de l'amplitude des signaux pour une fréquence de 40 Hz sont présentées aux figures 2.10 a et b respectivement. La figure 4.10b montre une distribution de l'amplitude des signaux parfaitement symétrique et aussi parfaitement centrée autour de l'axe du ponceau. Ce résultat est intéressant et démontre effectivement qu'il y'avait un décalage dans les essais effectués avec la source du côté aval. La figure 4.10a montre aussi que la variation de la vitesse est généralement uniformément distribuée et symétrique par rapport au centre du ponceau avec la présence d'une plus grande variation à l'extrémité gauche de la surface couverte par les capteurs. Cette zone se trouve à l'extérieur de la zone du ponceau et elle a aussi été observée du côté droit dans les essais effectués du côté amont. Il peut donc s'agir d'un changement dans les propriétés géotechniques des sols en place. D'autres résultats sont présentés pour des fréquences de 45 Hz, 50 Hz et 55 Hz aux figures A3.2, A3.3 et A3.4 de l'annexe 3. Ces figures montrent que lorsque des fréquences plus élevées sont utilisées, des énergies correspondant à des ondes réfléchies sont observées rendant des fois l'interprétation plus complexe. Autant les essais du côté Amont que du

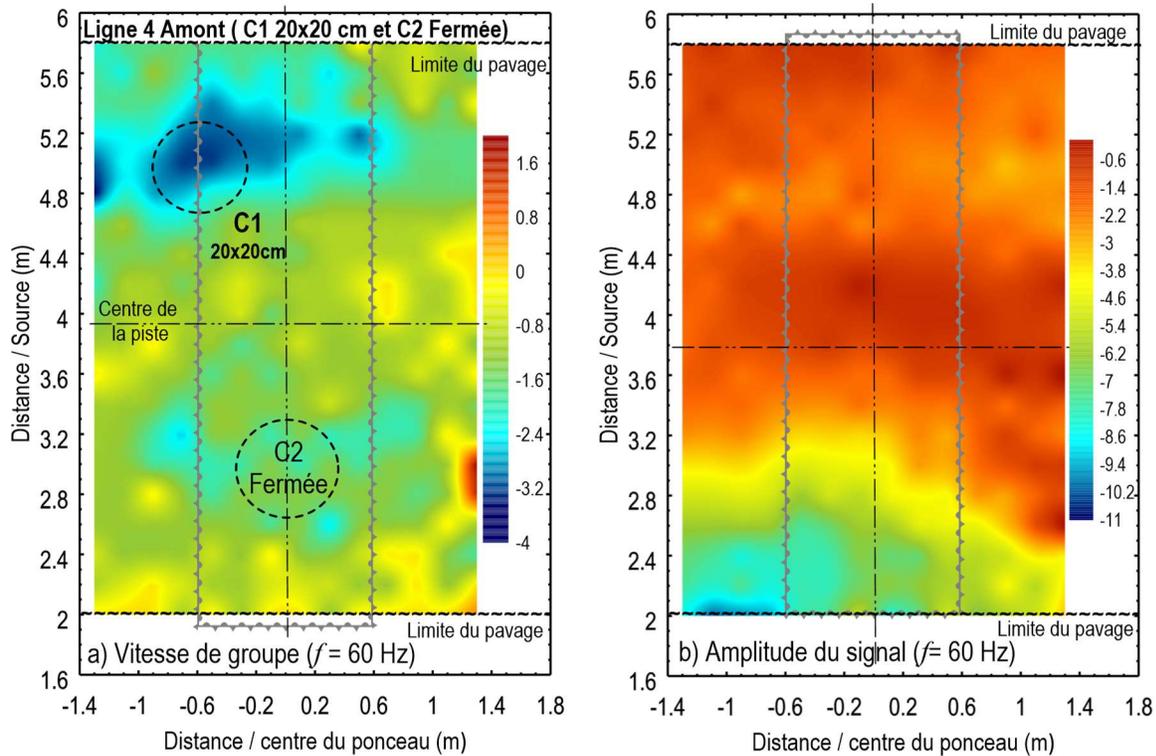


Figure 4.11 Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création d'une cavité de 20x20x20 cm au niveau de la trappe 1 à une fréquence de 60 Hz (côté amont)

côté aval réalisés avant la création de cavités montre l'absence de variation importante de vitesse de groupe et donc d'anomalies.

4.2.2 Résultats du ponceau 1 après la création de cavités

4.2.2.1 Création de la cavité C1 à 90 deg

Dans le cas du ponceau 1, une première cavité au niveau de la trappe numéro 1 situé à 8,09 par rapport à l'extrémité du ponceau du côté aval (donc plus éloignée du côté amont) et environ 0,8 par rapport à l'extrémité de pavage du côté aval a été créée. La cavité est d'une dimension de 20x20 cm et d'environ 20 cm de profondeur. Les mêmes fréquences d'analyse sélectionnées dans le cas sans cavités ont été utilisées. Les résultats des analyses sont présentés aux figures A4.1 à A4.4 de l'annexe 4 pour des fréquences de 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz et 60 Hz. Les résultats obtenus à 60 Hz sont montrés également à la figure 4.11 et il est possible de constater une distribution de l'énergie des signaux uniforme et généralement

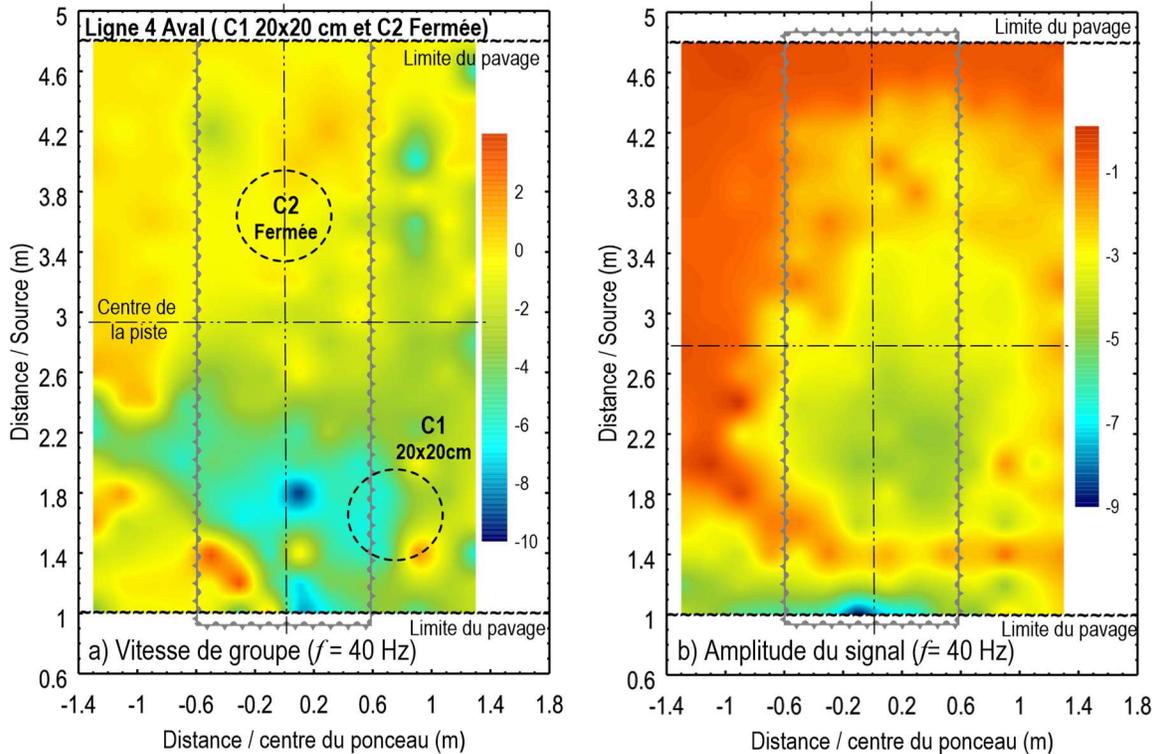


Figure 4.12 Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création d'une cavité de 20x20x20 cm au niveau de la trappe 1 à une fréquence de 60 Hz (côté aval)

symétrique par rapport à l'axe du ponceau. On peut aussi noter que la distribution est semblable à celle observée avant la création de la cavité. La figure 4.11a qui montre la distribution de la variation de la vitesse de groupe par rapport à la fréquence montre la présence d'une variation notable et facile à distinguer exactement au niveau de la cavité qui se trouve sur le côté gauche du ponceau à une orientation de 90 deg. Cette variation est aussi observée dans les autres fréquences, mais il est beaucoup plus évidente à une fréquence de 60 Hz.

Les résultats des essais effectués avec une source placée du côté aval à environ 1,8 m de la cavité sont montrés aux figures A5.1 à A5.4 à l'annexe 5. Contrairement aux autres résultats qui montrent généralement une distribution symétrique des amplitudes des signaux, les résultats des essais du côté aval montrent une perturbation des énergies dans la région de la cavité. Ceci est probablement relié à la proximité de la source (Figure 4.12b). De la même façon, la variation de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence ne permet

pas de voir comme dans le cas de la source amont une variation très localisée autour de la cavité. Elle permet toutefois de voir que la distribution est perturbée au niveau de la ligne où se trouve la cavité (Figure 4.12a). Il apparaît clair que l'emplacement de la source peut jouer un rôle important dans le cas actuel. En effet, la cavité en question se trouve à environ 4 m de profondeur puisqu'elle est située sur le côté du ponceau. Donc si la source est placée à une distance pas suffisante pour le développement des grandes longueurs d'ondes, l'effet de la cavité ne se fera pas sentir de manière suffisante pour être clairement identifiée. Cet aspect est plus facile à contrôler dans le cas des routes puisqu'il y a généralement assez de place pour éloigner la source à une distance suffisante pour générer les longueurs d'ondes désirées.

La cavité C1 a ensuite été agrandie à une dimension de l'ordre de 40x40x40 cm. Les mêmes essais avec les mêmes distances source/capteur ont été effectués. Les résultats des essais effectués avec une source du côté amont sont présentés aux figures A6.1 à A6.4 de l'annexe 6 pour les fréquences de 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz et 50 Hz respectivement. Les résultats pour une fréquence de 45 Hz sont également présentés à la figure 4.13. Autant cette figure que celles de l'annexe 6 montrent un aspect différent de ce qui a été observé lorsque la cavité était plus petite. En effet, l'agrandissement de la cavité semble non seulement permettre un plus grand contraste de variation de la vitesse de groupe au niveau de celle-ci, mais aussi sur un volume de sol qui semble prendre la forme d'une arche autour de la zone de la cavité. Dire donc que la création d'une cavité ne vient pas juste provoquer une variation dans les propriétés des sols, mais sans aucun doute une variation de l'état des contraintes autour de la zone en question. Ceci permet ainsi d'avoir un plus grand contraste de variation mais peut rendre quelquefois la localisation exacte de la cavité un peu plus difficile. Cela dit, les résultats montrent sans aucun doute la présence d'une importante anomalie dans la zone de la trappe No 1 et qui semble être d'avantage localisée du côté gauche du ponceau.

Les résultats des essais réalisés du côté aval sont présentés aux figure 7.1 à 7.4 de l'annexe 7 pour des fréquences de 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz et 55 Hz respectivement. Les résultats pour une fréquence de 45 Hz sont également montrés à la figure 4.14. Ces résultats montrent de manière assez convaincante la présence d'une anomalie du côté droit du ponceau à environ

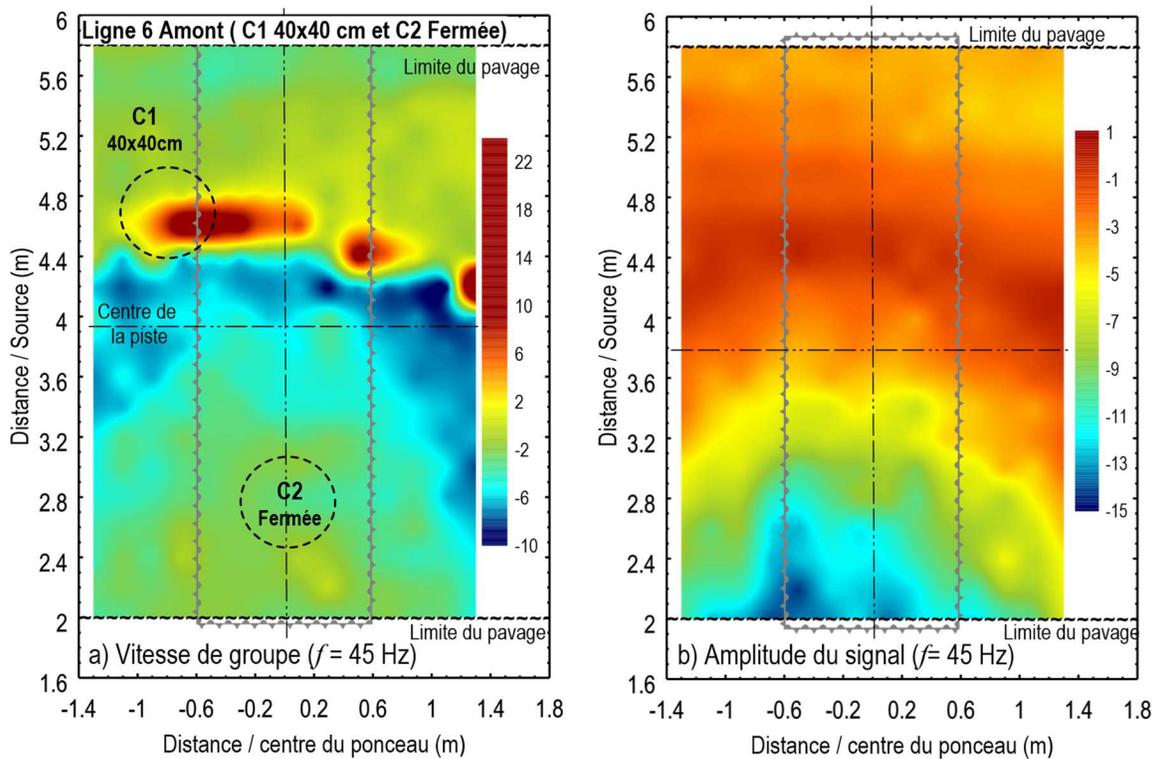


Figure 4.13 Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création d'une cavité de 40x40x40 cm au niveau de la trappe 1 à une fréquence de 45 Hz (source amont).

0,6 m de l'extrémité du pavage, soit à l'endroit de la cavité créée. Donc même si cette cavité n'était pas assez claire lorsqu'elle était plus petite, elle est assez facilement identifiable à une dimension plus grande d'environ 10% (0,4/4) la profondeur du pontceau. L'exercice réalisé jusqu'ici montre qu'il est possible d'identifier les anomalies même assez petites (5% de la profondeur) et qu'il est recommandable de faire les essais en utilisant deux sources (une source du côté amont et une du côté aval) ce qui va permettre d'avoir une confirmation de la présence d'anomalie. Les essais peuvent se faire simultanément de sorte que le temps des essais ne sera pas doublé.

4.2.2.2 Création de la cavité C2 à 0 deg

L'identification de la cavité C1 située sur le côté du pontceau 1 qui se trouve à une profondeur de 3,5 m démontre l'efficacité de la méthode proposée. Un degré de difficulté a été rajouté par la création d'une nouvelle cavité au niveau de la trappe No2 qui se trouve

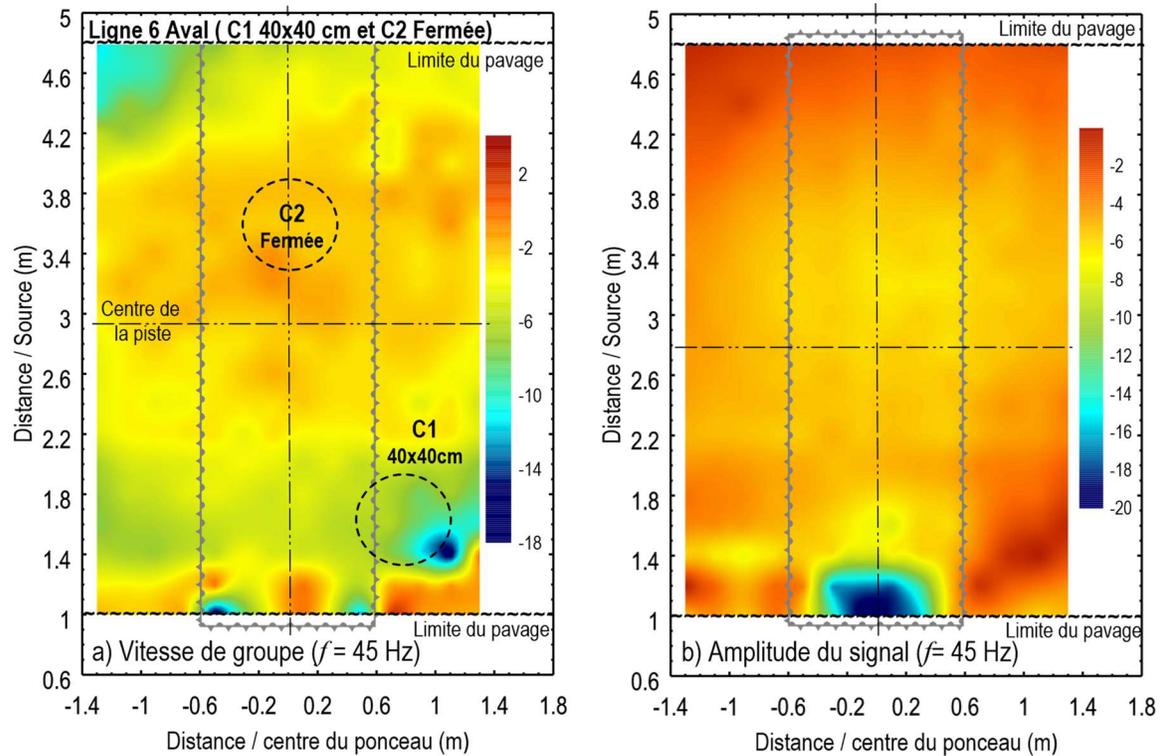


Figure 4.14 Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création d'une cavité de 40x40x40 cm au niveau de la trappe 1 à une fréquence de 45 Hz (source aval).

environ 2,21 m plus loin par rapport à la cavité C1. Cette trappe est située sur le dessus (toit) du ponceau et une première cavité de 20x20x20 cm a été créée. Des essais similaires aux précédents ont été réalisés avec une fois la source du côté aval et une fois du côté amont. Les résultats des essais effectués avec une source du côté amont sont présentés aux figures A8.1 à A8.5 de l'annexe 8 pour des fréquences de 45 Hz, 50 Hz et 55 Hz. La figure 4.15 présente les résultats pour une fréquence de 55 Hz. Ces résultats confirment la présence d'une grande cavité sur le côté gauche du ponceau et par le fait même la répétitivité des résultats des essais. Cependant, la nouvelle petite cavité ne semble pas être visible. Afin de vérifier s'il s'agit effectivement d'une limitation de la méthode, les contours ont été repris à la figure 4.16 pour une échelle plus réduite autour de la zone de la cavité C2. Cette figure montre une perturbation dans la distribution de la variation de la vitesse de groupe, mais pas suffisamment pour conclure à la présence d'une cavité. Cette limitation est comme expliqué précédemment et surtout reliée à l'impossibilité de placer

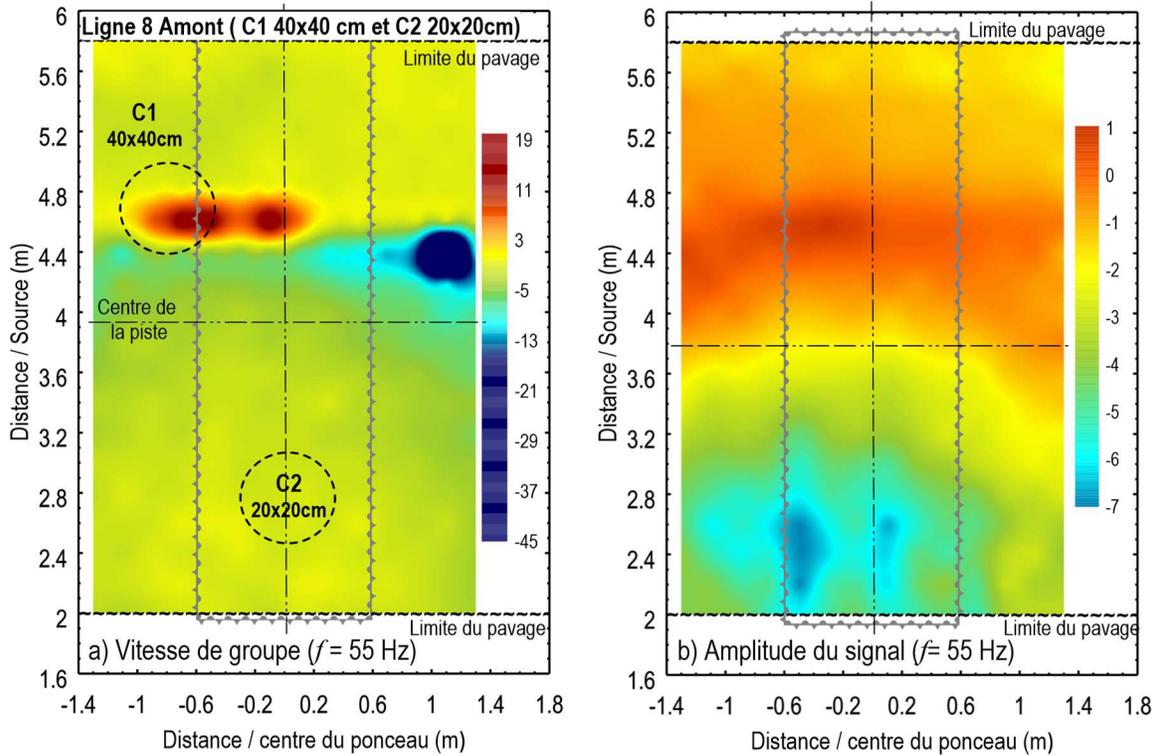


Figure 4.15 Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de la cavité de la C1 de 40x40x40 cm et de la cavité C2 de 20x20x20 à une fréquence de 55 Hz (source amont)

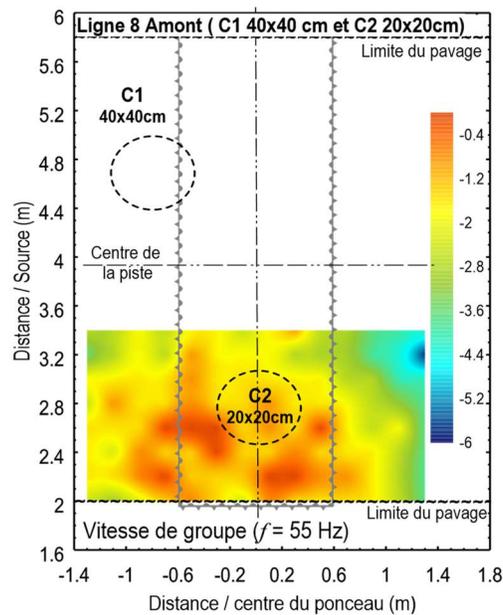


Figure 4.16 Distribution de la vitesse de groupe à une échelle plus concentrée autour de la cavité C2

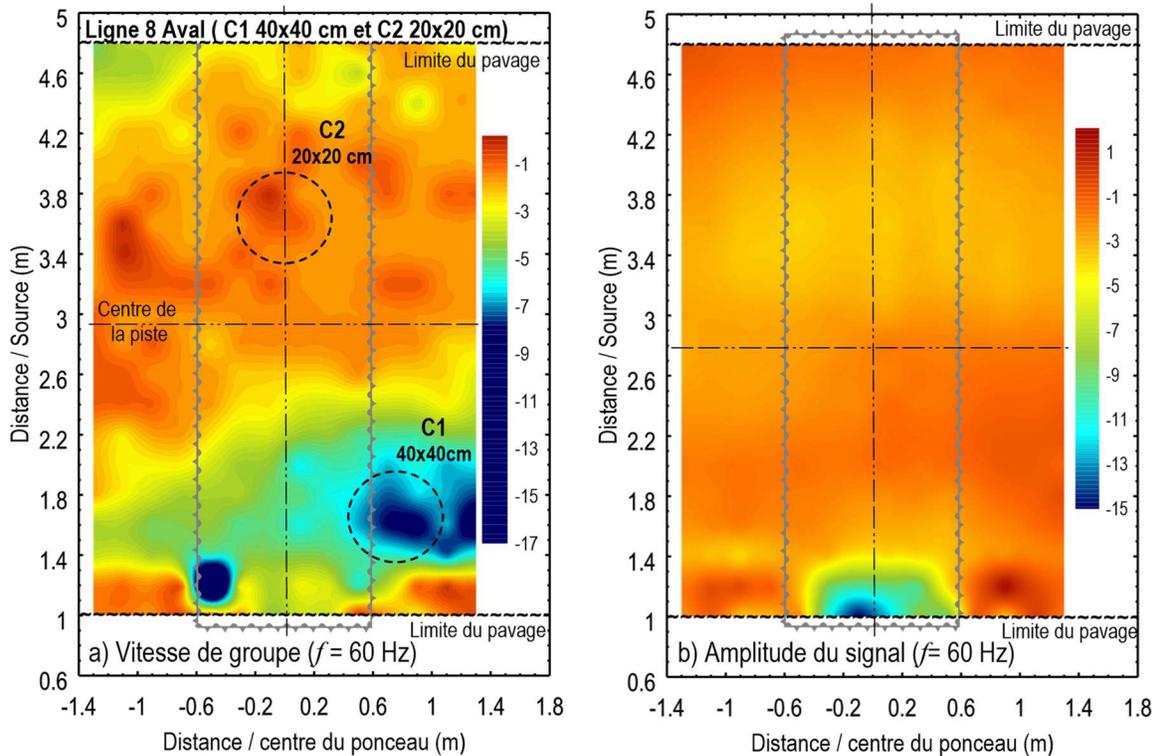


Figure 4.17 Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de la cavité C1 de 40x40x40 cm et de la cavité C2 de 20x20x20 cm à une fréquence de 60 Hz (source aval).

la source à une distance plus optimale.

Les résultats des essais effectués avec une source du côté aval sont présentés aux figures A9.1 à A9.4 de l'annexe 9 pour des fréquences de 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz et 60 Hz. La figure 4.17 présente les résultats pour une fréquence de 60 Hz. Ces résultats confirment encore une fois et de manière très claire la présence d'une grande cavité sur le côté droit du ponton et par le fait même la répétitivité des résultats des essais. La nouvelle petite cavité semble produire une concentration autour de celle-ci. La variation de la vitesse de groupe, reste peu suffisante pour conclure sans aucun doute de la présence d'une cavité. Cette limitation est surtout reliée à l'impossibilité de placer la source à une distance optimale. Il faut toutefois mentionner que les essais sont effectués rapidement après la création de la cavité de sorte que les contraintes n'ont pas eu encore le temps de changer suffisamment pour mieux identifier cette cavité.

La deuxième cavité a ensuite été élargie à une dimension de 40x40x40 cm et de nouvelles

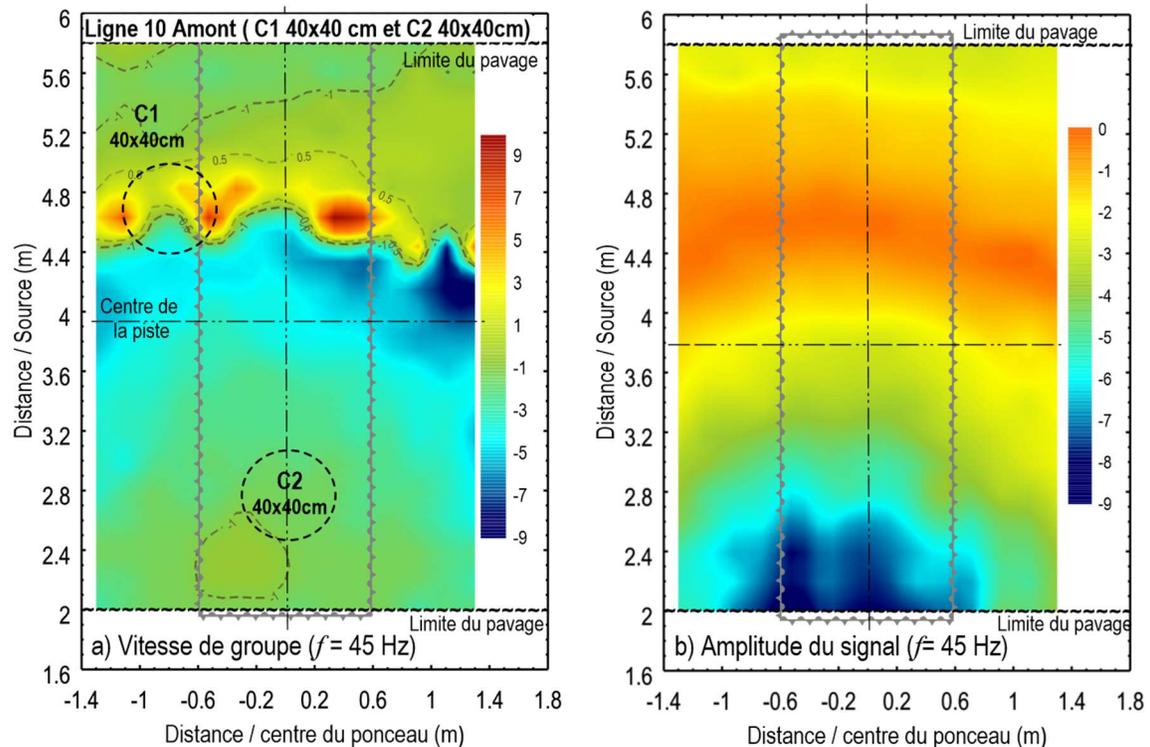


Figure 4.18 Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de la cavité de la C1 de 40x40x40 cm et de la cavité C2 de 40x40x40 à une fréquence de 55 Hz (source amont)

séries d'essais ont été effectués avec une source du côté amont et une du côté aval en utilisant les mêmes configurations des essais précédents. Les résultats des essais effectués avec une source du côté amont sont présentés aux figures 10.1 à 10.6 de l'annexe 10 pour des fréquences de 45 Hz, 50 Hz et 55 Hz. La figure 4.18 permet de la même manière que dans les précédents de voir la présence d'une grande perturbation au niveau de la cavité C1. La cavité C2 semble encore plus difficile à identifier. Toutefois, l'observation des contours sur une échelle plus appropriée à la figure 4.19, permet de constater la présence d'une importante variation à une distance de l'ordre de 2,4 m par rapport à la position de la source et décalé d'environ 0,3 m par rapport au centre du ponceau. Même si la trappe C2 devait être localisée à l'endroit montrée sur la figure, il n'est pas impossible que la cavité créée aurait été creusée un peu dans la direction sud-est par rapport au centre de la trappe. La location exacte d'une cavité de 40x40x40 cm à une profondeur de 3 m (13%) à partir du dessus du pavage n'est pas une opération facile. Le ponceau aurait pu également subir certaine déformation depuis son installation.

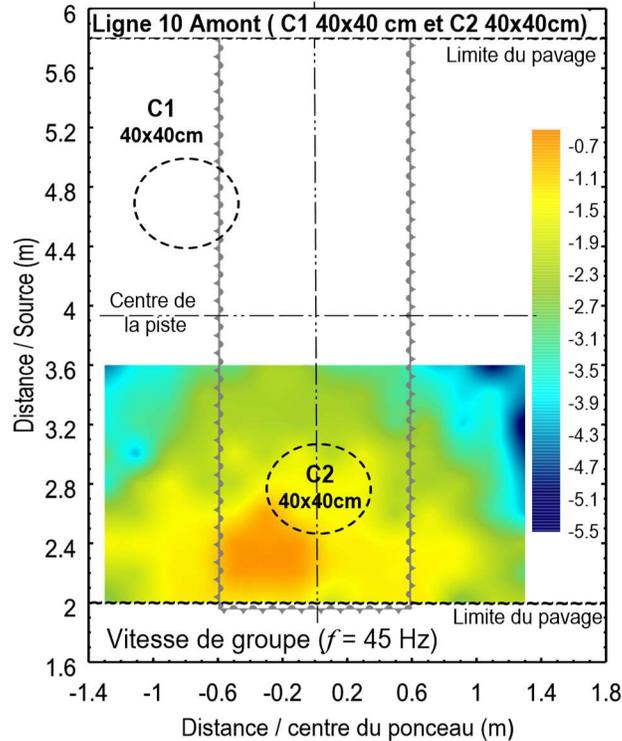


Figure 4.19 Distribution de la vitesse de groupe à une échelle plus concentrée autour de la cavité C2

Des essais ont également été réalisés après l’agrandissement de la cavité en plaçant la source du côté aval. Les résultats des essais sont présentés aux figure 11.1 à 11.4 de l’annexe 11 pour des fréquences de 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz et 60 Hz respectivement. La figure 4.20 montre les résultats obtenus pour une fréquence de 60 Hz. La figure 4.20b montre avec une grande précision l’évolution du front d’onde centré presque parfaitement par rapport à l’axe du ponceau. La figure 4.20a montre la présence d’une importante variation au niveau de la cavité C1 ne laissant aucun doute sur sa présence. Cette figure démontre aussi que le champ de perturbation s’élargie sur la zone qui entoure la cavité démontrant qu’il y a une évolution de l’état des contraintes avec le temps. Pour la deuxième cavité C2, qui ne semble pas avoir produit encore suffisamment de changement au niveau de la distribution des contraintes, il est possible de voir une variation de l’énergie (rouge plus foncé) décalée vers le nord-est du centre de la trappe. Cette orientation observée par les contours de vitesse correspond exactement à ce qui a été observée lorsque la source été placée du côté amont (cavité orientée vers le sud-est)

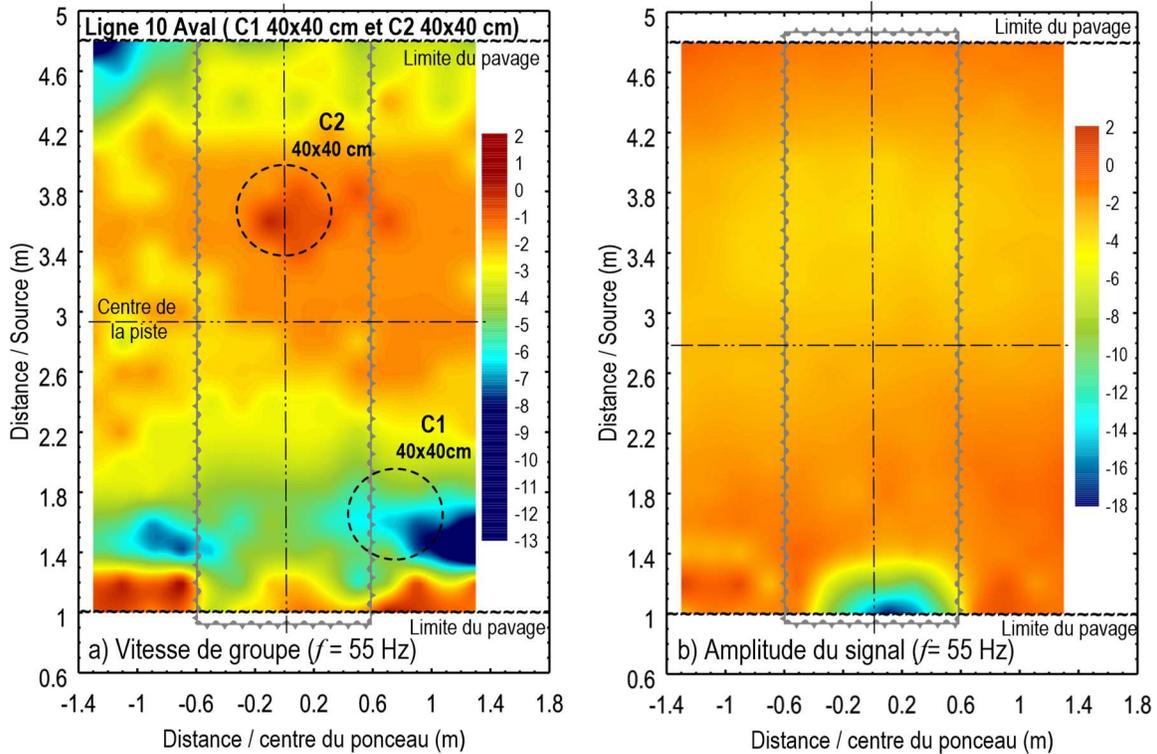


Figure 4.20 Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de la cavité C1 de 40x40x40 cm et de la cavité C2 de 40x40x40 cm à une fréquence de 60 Hz (source aval)

4.2.3 Résultats du ponteau 2

4.2.3.1 Résultats du ponteau 2 avant la création de cavités

Comme dans le cas du ponteau 1, des essais ont été effectués avant la création des cavités. Une série d'essais a été réalisé, en plaçant la source du côté amont de la piste. La distribution de l'énergie dans le plan temps-fréquence pour le premier essai avec une source du côté amont est présentée à la figure 4.21. Cette figure présente une capture d'écran du logiciel développé dans le cadre de cette étude pour interpréter les signaux. La figure du bas à gauche montre la présence d'énergie à des fréquences variant entre 40 Hz et 200 Hz avec des délais de propagation d'ondes variant entre 0,005 sec et 0,07 sec. Cette figure inclus l'ensemble des 280 signaux collectés durant les essais et il est possible de voir la présence de deux modes de propagation d'onde avec une domination du mode.

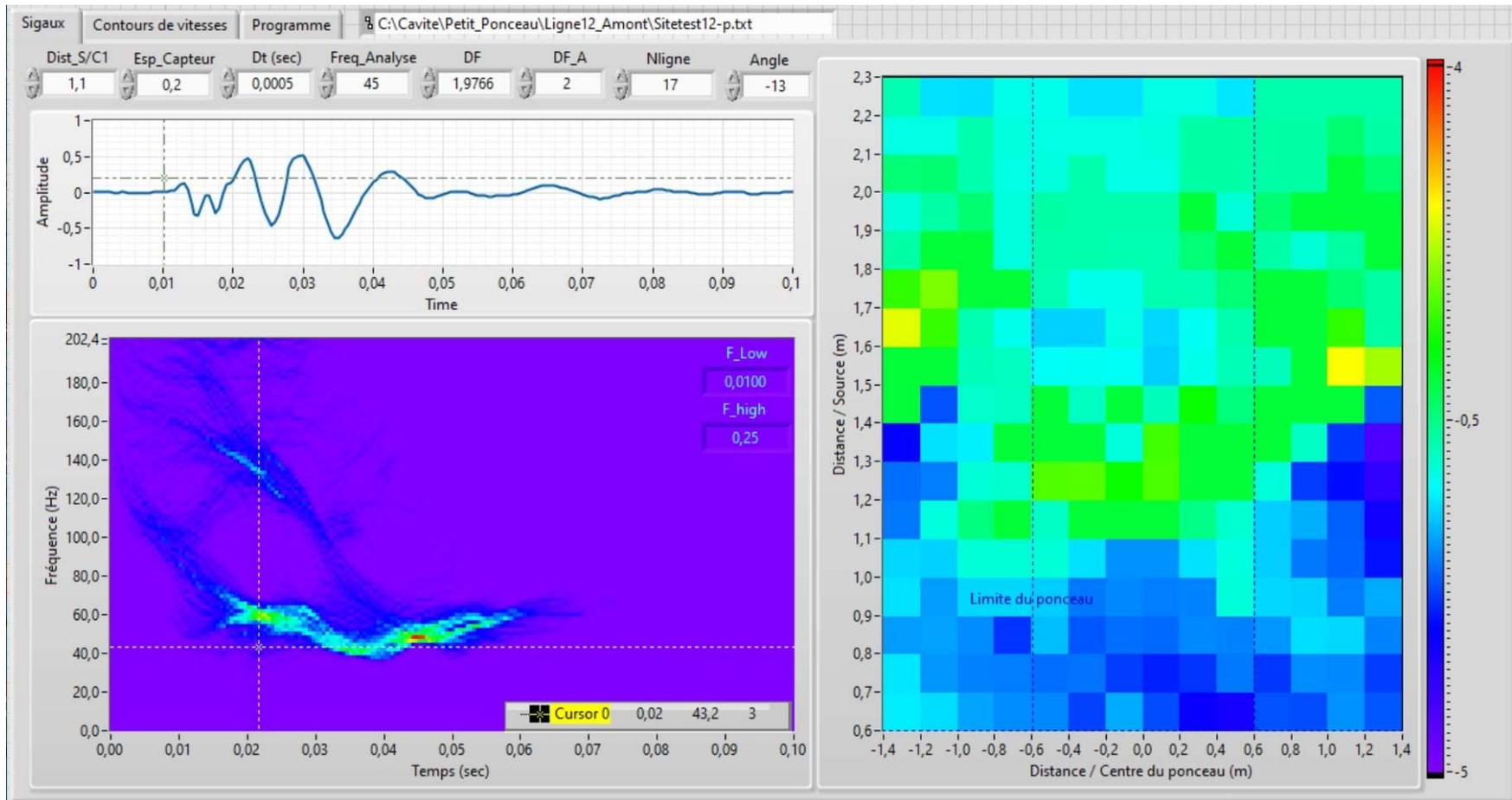


Figure 4.21 Capture d'écran du logiciel développé dans le cadre de cette étude pour le traitement des signaux. Traitement des signaux collectés au-dessus du ponceau 2 avant la création de cavités.

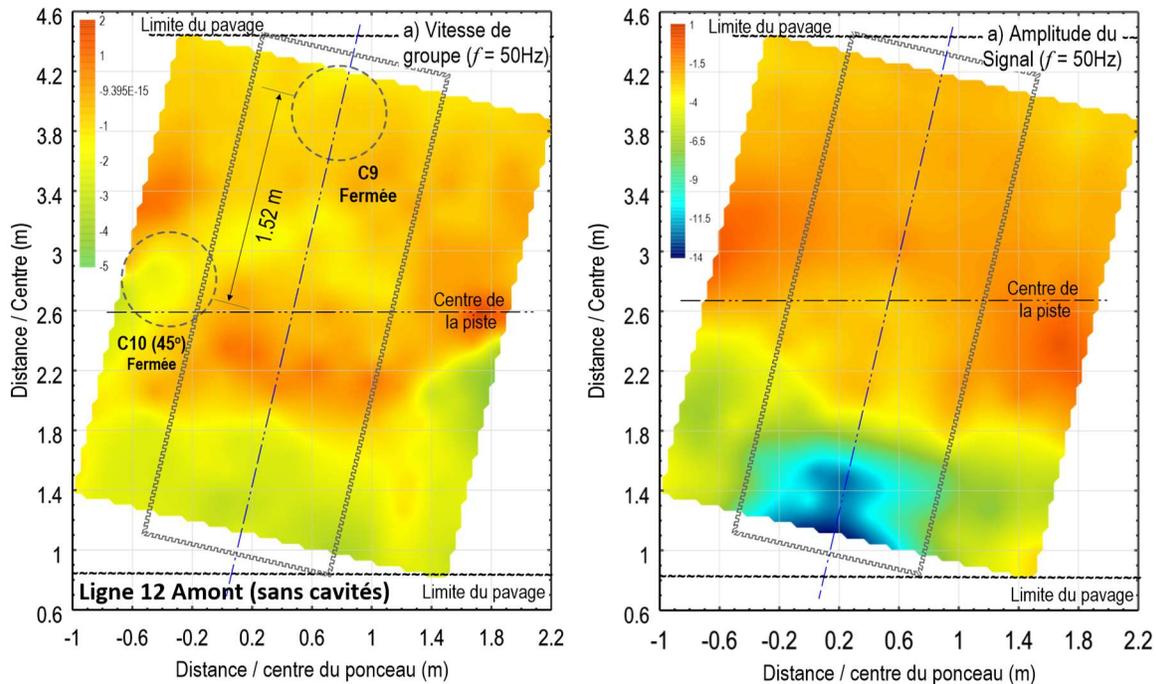


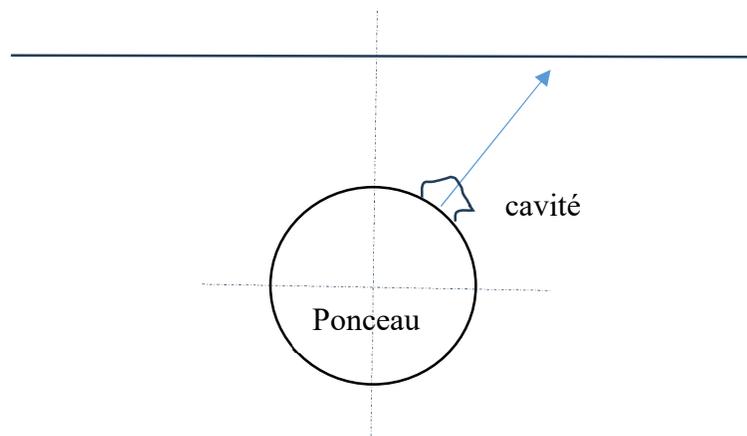
Figure 4.22 Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs avant la création de cavités à une fréquence de 50 Hz (source amont – ponceau2)

fondamental entre 40 Hz et 70 Hz. Les distributions des vitesses de groupe en fonction de la fréquence ainsi que celles des amplitudes des signaux pour des fréquences de 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz et 65 Hz sont également montrées aux Figures A12.1 à A12.4 de l'annexe 12. La figure 4.22 montre les résultats pour une fréquence de 50 Hz. La figure 4.22b montre que les énergies calculées des signaux enregistrés au-dessus du pavage sont uniforme et symétrique par rapport au centre du ponceau incliné d'environ 13 deg. Il est aussi possible de voir l'évolution du front d'onde. Pour la variation des vitesses de groupe l'ensemble des résultats semblent indiqués des faibles variations de la vitesse comme dans le cas du ponceau 1 et surtout une progression symétrique et cohérente des contours de vitesses. Ces résultats ne semblent pas montrer la présence d'aucune anomalie particulière sauf probablement une légère perturbation autour de la trappe C10.

4.2.3.2 Création de la cavité C10 à 45 deg

Dans le cas du ponceau 2, une première cavité au niveau de la trappe numéro 10 situé à

9,08 m par rapport à l'extrémité aval. La cavité est d'une dimension de 20x20 cm et d'environ 20 cm de profondeur. Seule une série d'essais avec une source du côté aval a été réalisé pour cette première cavité. La distribution de l'énergie dans le plan temps-fréquence avec une source du côté aval est présentée à la figure 4.23. Cette figure présente une capture d'écran du logiciel développé dans le cadre de cette étude pour interpréter les signaux. La figure du bas à gauche montre la présence d'énergie à des fréquences variant entre 40 Hz et 200 Hz avec des délais de propagation d'ondes variant entre 0,003 sec et 0,06 sec. Cette figure inclus l'ensemble des 280 signaux collectés durant les essais et il est possible de voir la présence de deux modes de propagation d'onde avec une domination du mode fondamental pour des fréquences variant entre 40 Hz et 80 Hz. Les mêmes fréquences d'analyse sélectionnées dans le cas sans cavités ont été utilisée. Les résultats des analyses sont présentés aux figures A13.1 à A13.4 de l'annexe 13 pour des fréquences de 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz et 60 Hz. Les résultats obtenus à 55 Hz sont montrés également à la figure 4.24 et il est possible de constater une distribution de l'énergie des signaux uniforme et généralement centrée autour de l'axe du ponceau incliné (Fig. 4.24b). La figure 4.24a montre que la distribution de la variation de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence est généralement uniforme et centrée autour de l'axe du ponceau, sauf pour la zone localisée à droite du ponceau exactement au niveau de la cavité C10. Curieusement la perturbation est observée à l'extérieur de la zone du ponceau, à une distance qui semble correspondre à la projection de la cavité (orientée à 45 deg) par rapport à son axe neutre sur la surface du pavage comme montré sur le croquis suivant :



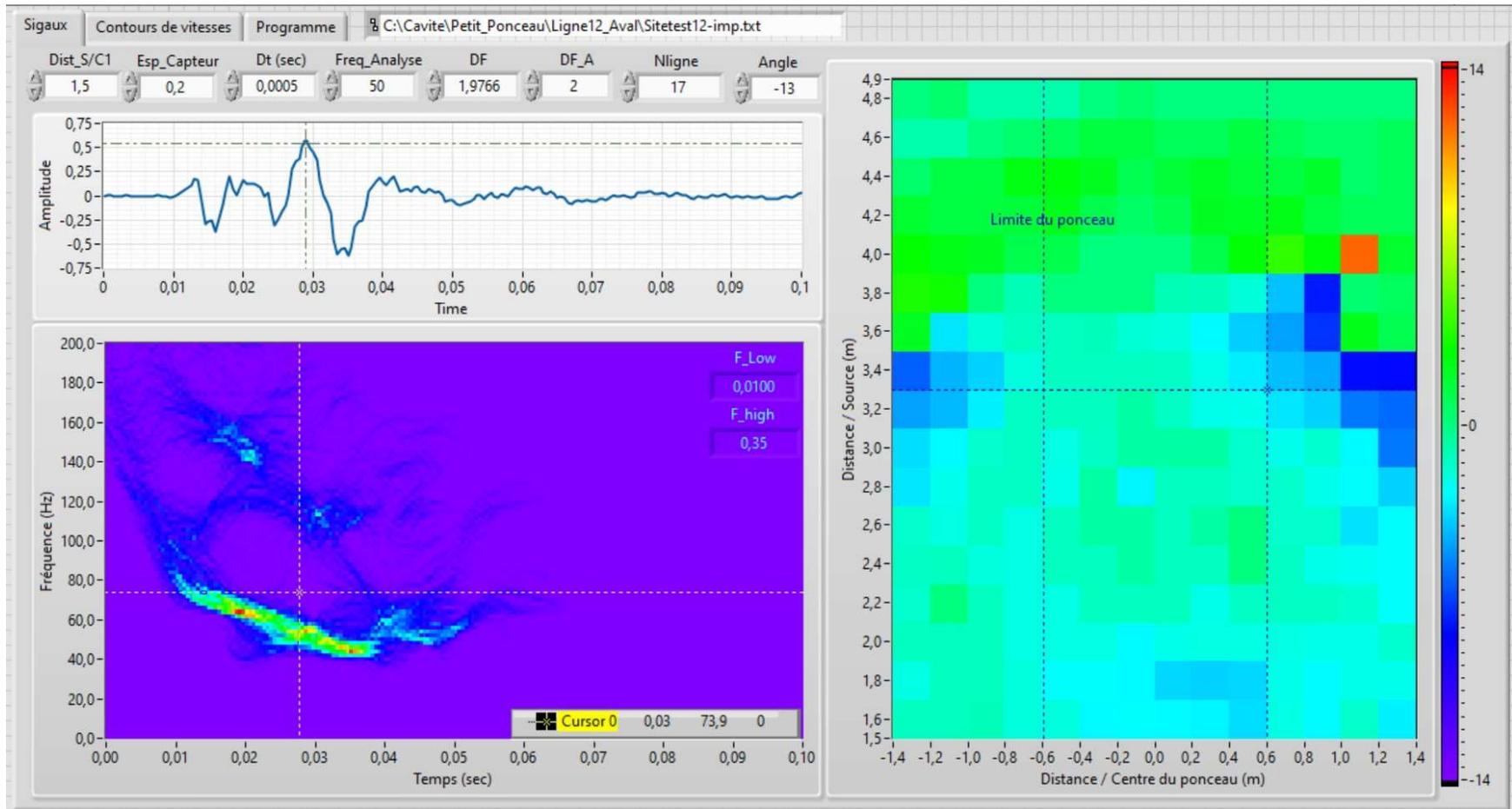


Figure 4.23 Capture d'écran du logiciel développé dans le cadre de cette étude pour le traitement des signaux. Traitement des signaux collectés au-dessus du ponceau 2 après d'une cavité C10 de 20x20x20 cm (source aval)

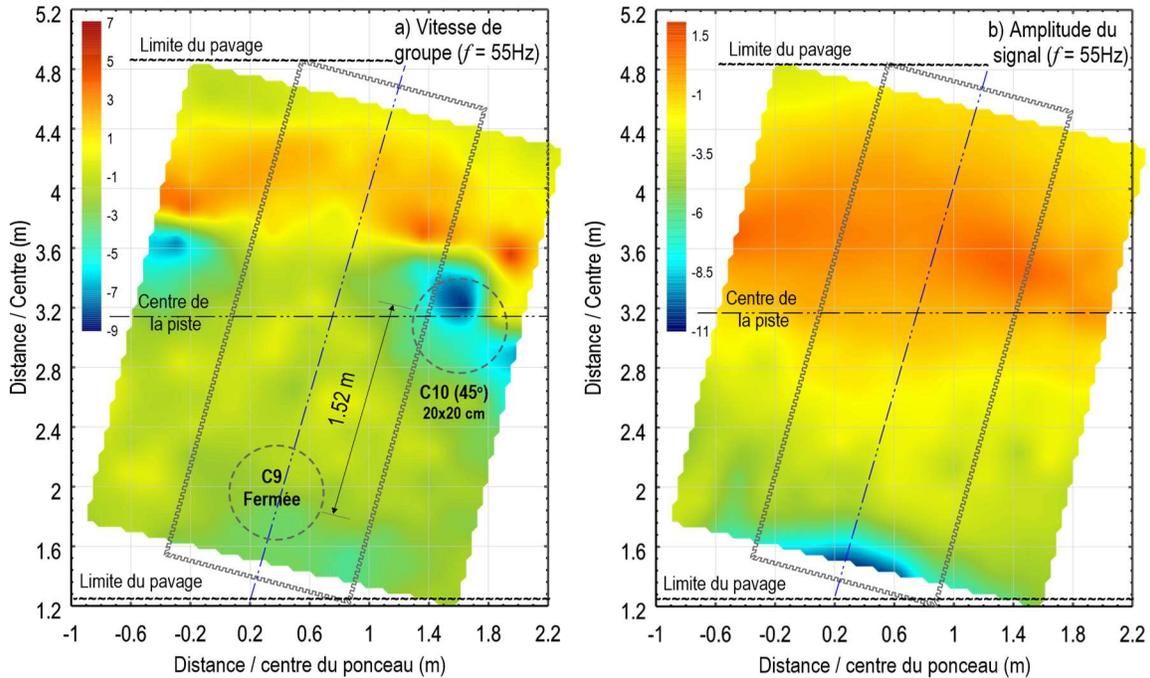


Figure 4.24 Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de la cavité C10 à 20x20x20 cm à une fréquence de 55 Hz (source aval – ponceau2)

La cavité C10 a ensuite été agrandie à une dimension de l'ordre de l'ordre de 40x40x40 cm. Deux séries d'essais avec les mêmes distances source/capteur, du côté amont et aval, ont été effectués. Les résultats des essais effectués avec une source du côté amont sont présentés aux figures A14.1 à A14.4 de l'annexe 14 pour les fréquences de 50 Hz, 55 Hz, 60 Hz et 65 Hz respectivement. Les résultats pour une fréquence de 50 Hz sont également présentés à la figure 4.25. Comme les résultats précédents, cette figure montre encore une fois que l'énergie des signaux est centrée autour de l'axe incliné du ponceau et la variation de vitesse montre la présence d'une perturbation facilement perceptible au niveau de la projection de la cavité sur la surface du pavage.

Les résultats des essais réalisés du côté aval sont présentés aux figure 15.1 à 15.4 de l'annexe 15 pour des fréquences de 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz et 60 Hz respectivement. Les résultats pour une fréquence de 45 Hz sont également montrés à la figure 4.26. Comme dans le cas du ponceau 1, l'agrandissement de la cavité semble non seulement permettre un plus grand contraste de variation de la vitesse de groupe au niveau de celle-ci, mais aussi

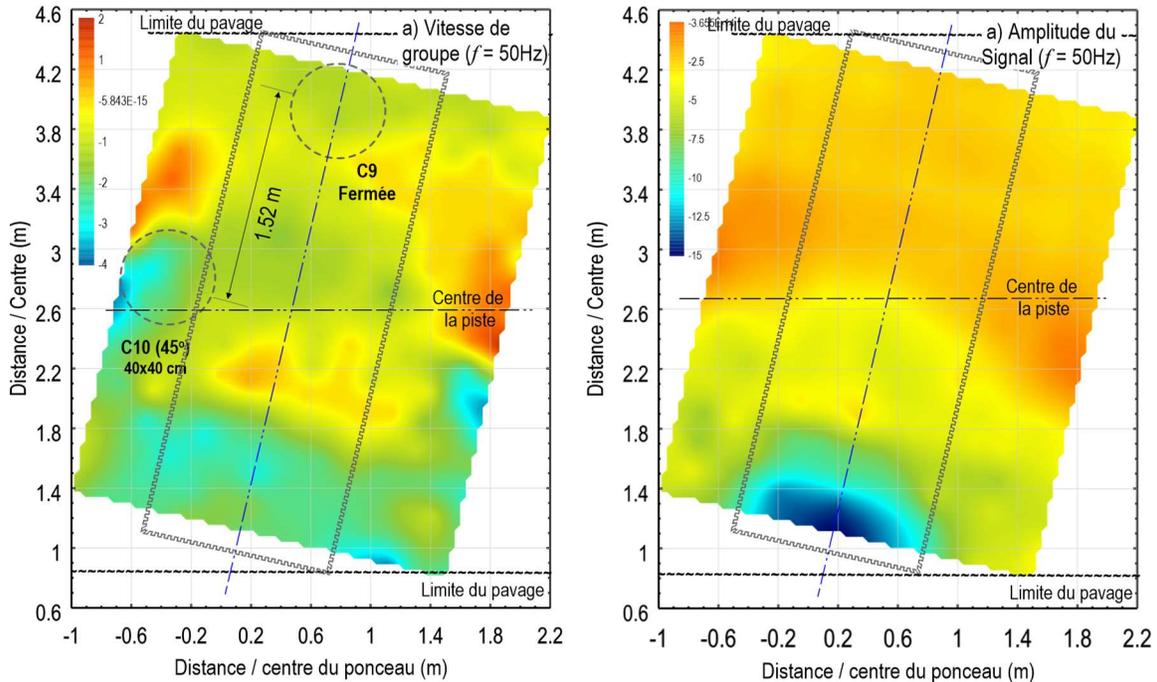


Figure 4.25 Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création d'une cavité de 40x40x40 cm au niveau de la trappe C10 à une fréquence de 50 Hz (source amont).

sur un plus grand volume de sol autour de la zone de la cavité. En effet la figure 4.26a montre un contraste de variation différent de celui observé lorsque la cavité était plus petite. Donc la cavité de 40x40x40 cm qui représente environ 25% par rapport à sa profondeur (0,4/1,6m), est assez facilement identifiable dans tous les cas.

4.2.3.2 Colmatage de la cavité C10 à 45 deg

Dans le cas du ponceau 2, un autre type d'essai a été réalisé par le colmatage de la cavité initialement créée à l'aide d'une mousse expansive rigide. Des essais avec les mêmes configurations ont ensuite été réalisés avec des sources du côté amont et aval. Les résultats des analyses des essais effectués avec une source du côté amont sont présentés aux figures A16.1 à A16.4 de l'annexe 16 pour des fréquences de 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz et 60 Hz. Les résultats obtenus à 50 Hz sont montrés également à la figure 4.27 et il est possible de constater une distribution de l'énergie des signaux uniforme et généralement centrée autour de l'axe du ponceau incliné (Fig. 4.27b). La figure 4.27a montre que la distribution de la

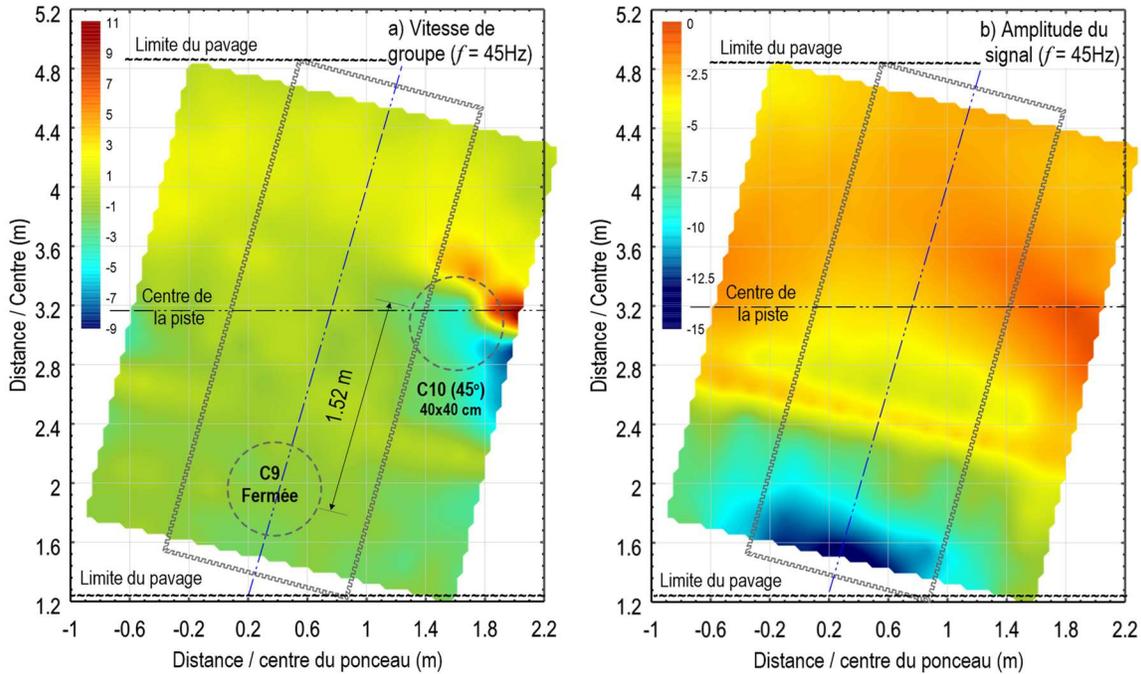


Figure 4.26 Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création d'une cavité de 40x40x40 cm au niveau de la trappe C10 à une fréquence de 45 Hz (source aval)

variation de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence a évolué entre le moment où la cavité a été créée et celui où elle a été colmatée. En effet, la distribution de la variation semble généralement plus uniforme et centrée autour de l'axe du ponceau, avec la présence d'une bande en forme d'arche dans la zone de la cavité. Il paraît assez évident qu'il y a eu deux effets dans le cas présent : 1) une propagation d'onde différente à cause de la fermeture de la cavité avec de la mousse expansive et 2) une évolution de l'état des contraintes avec le temps.

Les résultats des analyses des essais effectués avec une source du côté aval sont présentés aux figures A17.1 à A17.4 de l'annexe 17 pour des fréquences de 45 Hz, 50 Hz, 55 Hz et 60 Hz. Les résultats obtenus à 45 Hz sont montrés également à la figure 4.28 et il est également possible de constater une distribution de l'énergie des signaux uniforme et généralement centrée autour de l'axe du ponceau incliné (Fig. 4.28b). La figure 4.28a montre que la distribution de la vitesse de groupe ne présente pas le même signe que celui observée lorsque la cavité était ouverte. On observe également une distribution en forme d'arche autour de la zone de la cavité colmatée.

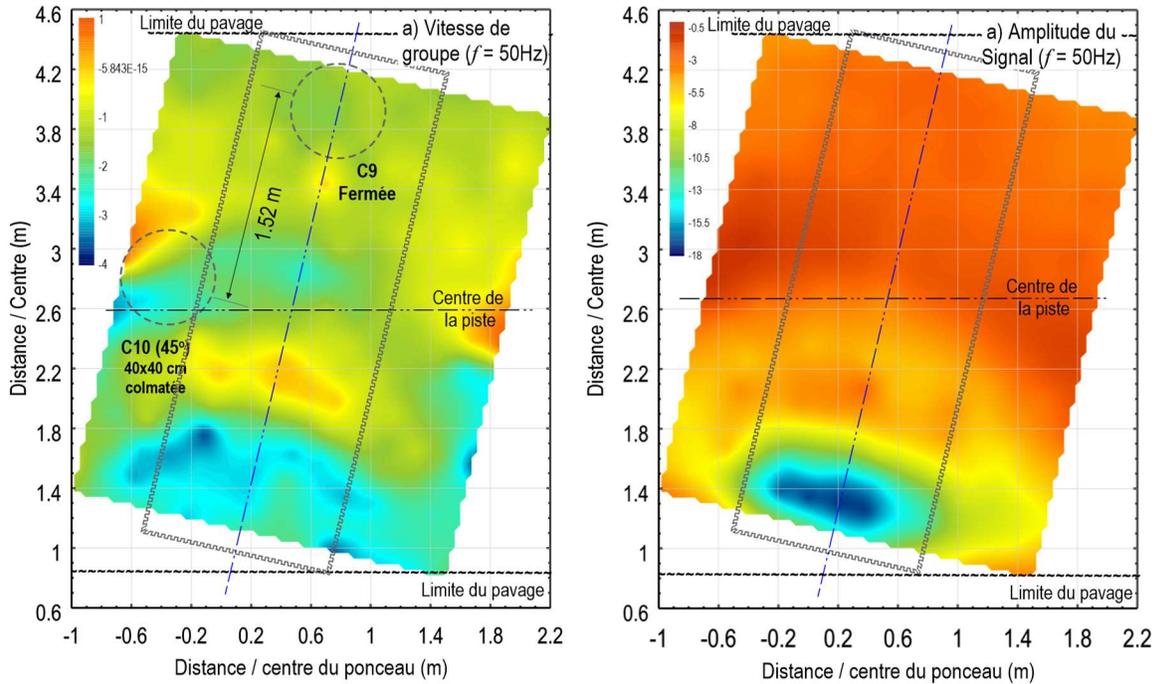


Figure 4.27 Distribution a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après le colmatage de la cavité C10 à une fréquence de 50 Hz (source amont)

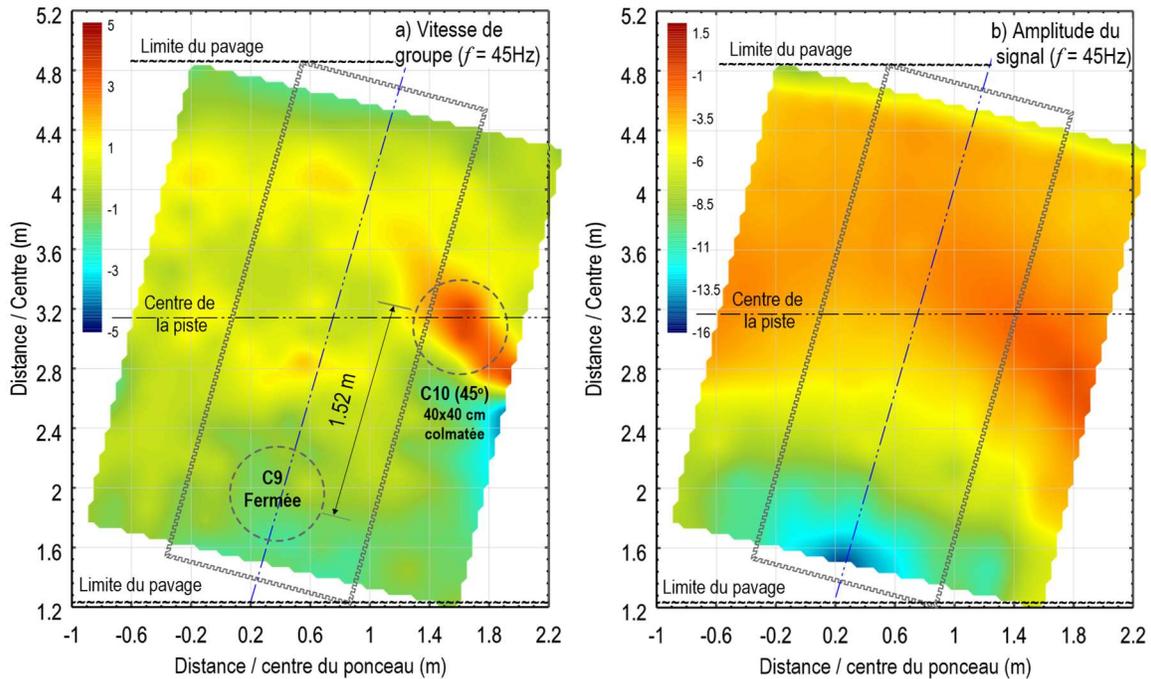


Figure 4.28 Distribution a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après le colmatage de la cavité C10 à une fréquence de 45 Hz (source aval)

Tous les essais réalisés dans cette phase permettent de détecter la ou les cavités avec des degrés de précision variant de satisfaisant à excellent. Ceci démontre donc l'efficacité de la technique développée. Il est important de noter que les conditions des essais dans le cas du site expérimentale ne sont pas les plus optimales et il est possible d'améliorer les conditions d'essais dans le cas des ponceaux routier. La limitation la plus importante qu'on avait dans le cas du site expérimental est la distance très restreinte pour placer la source d'énergie.

4.3 Résultats de la phase 3

La phase 2 a permis d'avoir un grand nombre de signaux et différentes configurations afin de permettre le développement de la méthode présentée dans le présent rapport. Dans la phase 3 nous avons voulu surtout vérifier après une certaine période (plus de 1 année) l'évolution des cavités créées et tester la répétitivité et la précision en utilisant des espacements plus petits de 0,1 m entre les lignes.

4.3.1 Résultats du ponceau 1

Des essais ont été effectués sur le ponceau 1 avec un espacement entre les capteurs de 0,2 m et un espacement entre les lignes de 0,1 m. La source était placée dans ce cas du côté aval à 0,8 m de la première ligne. Les résultats des essais sont montrés à la figure 4.29. La figure 4.29b montre une distribution des énergies clairement moins uniforme qu'elle été un an plus tôt. On peut aussi voir la présence d'une variation de l'énergie au niveau de la cavité C1 laissée ouverte. Sur la figure 4.29a on observe clairement des distributions de vitesses variables dans les régions des cavités. Il parait ainsi évident qu'une cavité même produite dans un sol assez dense (till plastique) produit une distribution des contraintes qui évolue en fonction du temps et en fonction des activités et des saisons. Cela dit, même si les cavités ont évolué dans le temps, l'exercice démontre encore une fois l'efficacité de la technique développée et sa répétitive. Un autre élément parait aussi de cet exercice est que l'utilisation d'un espacement plus petit n'est pas vraiment un avantage. En effet, ce dernier ne permet pas plus de précision en plus de demander un effort double dans la réalisation des essais.

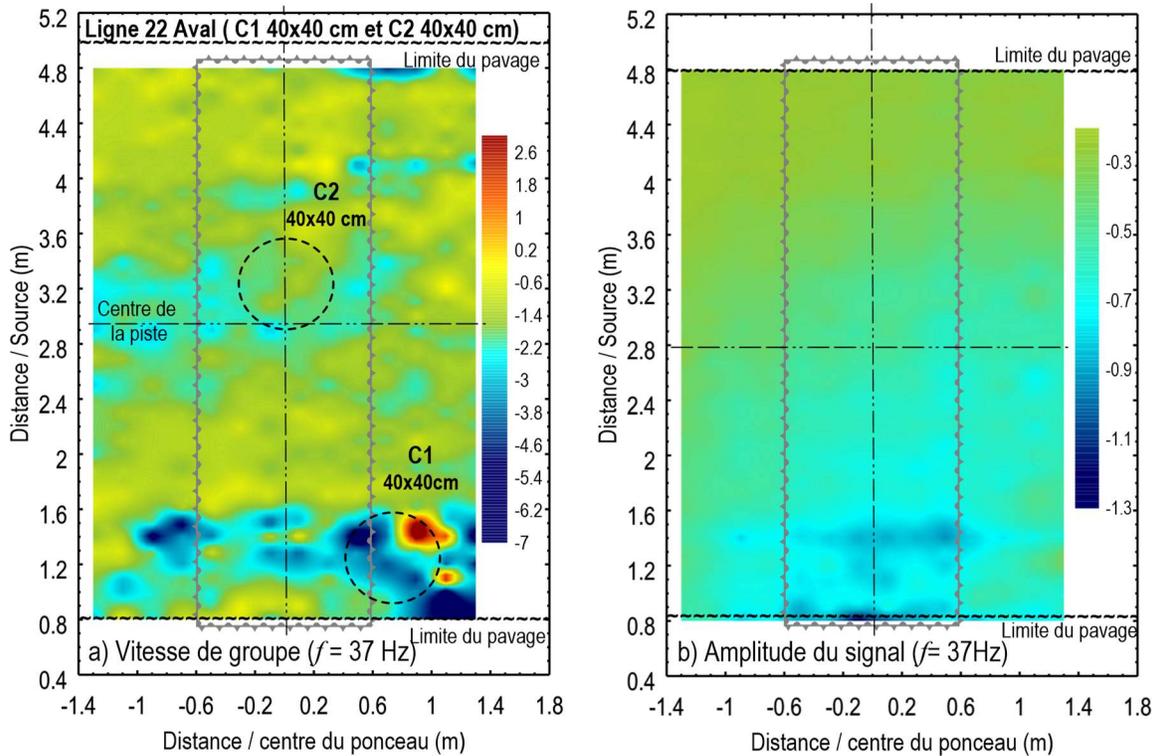


Figure 4.29 Distribution a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après 1 an de leurs ouvertures C1 et C2 sur le ponceau 1 - fréquence d'analyse de 37 Hz (source aval)

4.3.2 Résultats du ponceau 2

Des essais ont été effectués sur le ponceau 2, après la réouverture de la cavité C10, avec un espacement entre les capteurs de 0,2 m et un espacement entre les lignes de 0,1 m. La source était placée dans ce cas du côté aval à 0,6 m de la première ligne. Les résultats des essais sont montrés à la figure 4.30. La figure 4.30b montre une distribution des énergies plus uniforme que dans le cas du ponceau 1 où les cavités auraient été laissées ouvertes. On peut aussi voir la présence d'une variation de l'énergie centrée autour de l'axe du ponceau. Sur la figure 4.30a on observe clairement des distributions des vitesses variables dans la région de la cavité C10 réouverte. Il paraît aussi que le fait de fermer et de rouvrir la cavité produit des distributions assez semblables entre la première fois et la deuxième série d'essais effectuée plus d'une année après. Cet exemple démontre encore une fois l'efficacité de la technique développée et sa répétitive. Dans cet exemple, il apparaît aussi que l'utilisation d'un espacement plus petit n'est pas vraiment un avantage.

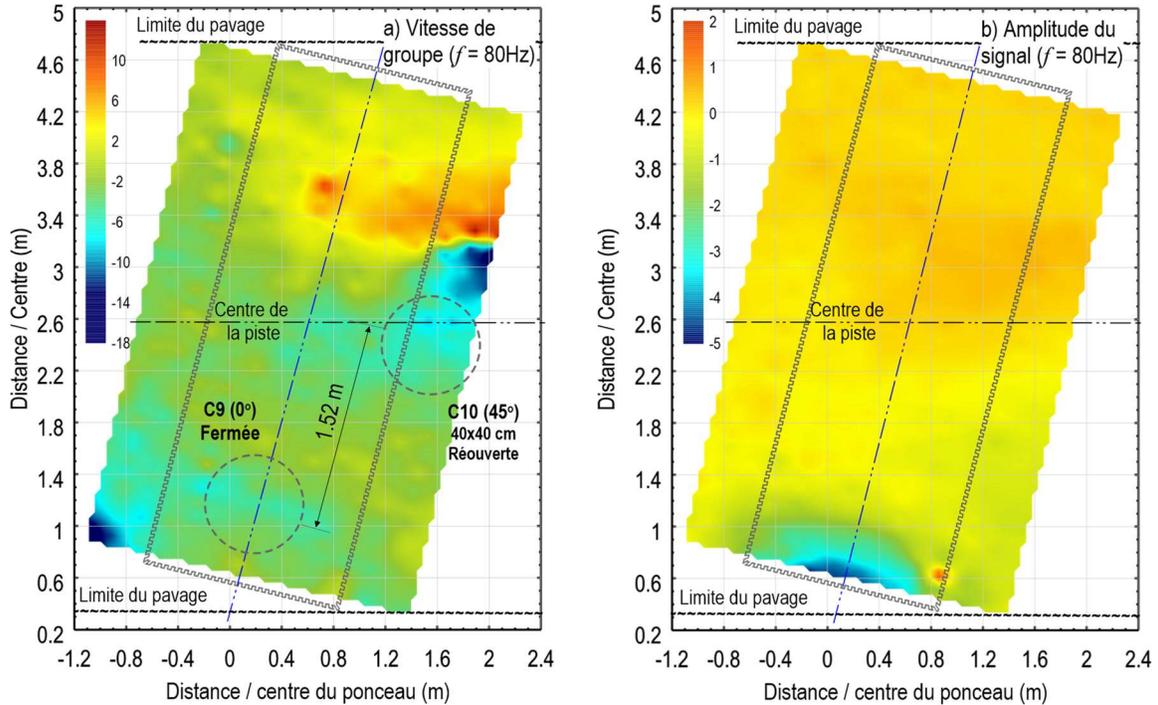


Figure 4.30 Distribution a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après 1 an du colmatage de cavité C10 sur le ponceau 2 - fréquence d'analyse de 80 Hz (source aval)

Une deuxième cavité a ensuite été ouverte, soit la cavité C9 situé à 1,52 m du côté aval par rapport à la cavité C10. La cavité créée est orientée à 0 deg au centre du ponceau et sa grandeur est de 20x20x20 cm. Des essais ont été effectués avec des espacements entre les capteurs de 0,2 m et de 0,1 entre les lignes et avec une source placée à 1,2 m de la première ligne du côté aval. Les résultats de ces essais sont montrés à la figure 4.31. Les résultats des contours d'énergies des signaux montrent encore une fois une énergie symétrique autour du ponceau (Fig. 4.31b). Les contours de variation de vitesse par rapport à la fréquence montrent clairement des perturbations importantes autours des cavités. Ces résultats démontrent encore une fois la fiabilité de la méthode de diagnostic proposée.

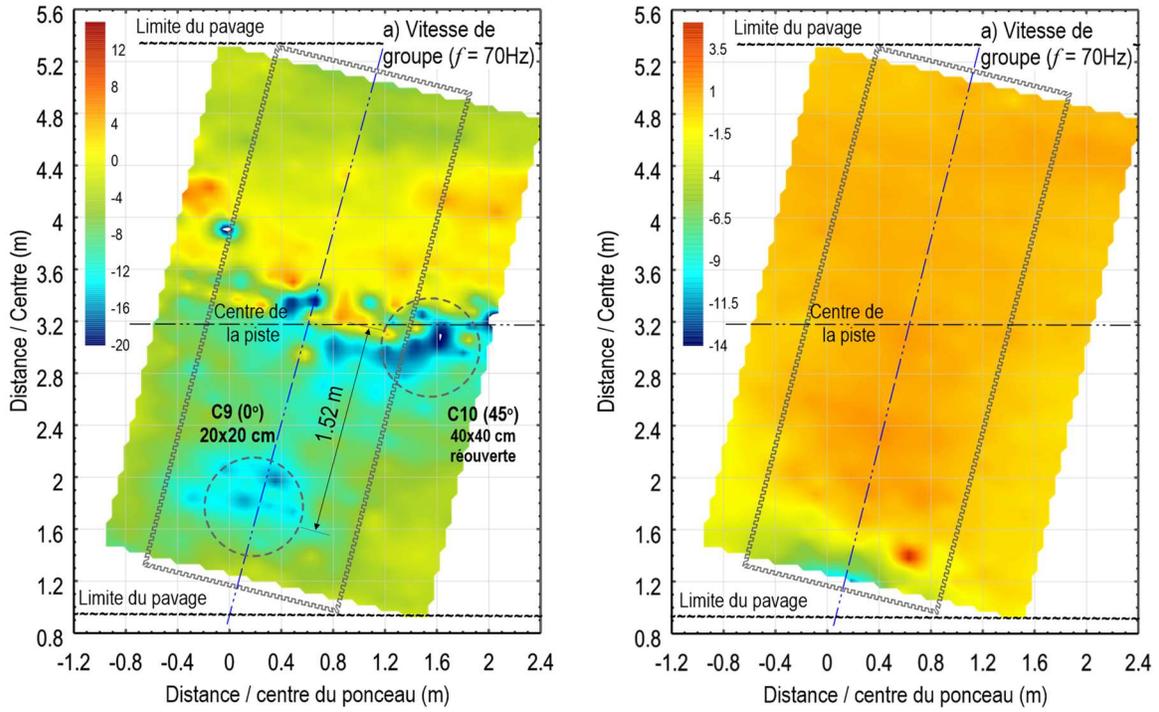


Figure 4.31 Distribution a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la réouverture de la cavité C10 et la création d'une nouvelle cavité C9 sur le ponceau 2 - fréquence d'analyse de 70 Hz (source aval)

CHAPITRE 5 :CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce rapport fait état du développement réalisé lors de la deuxième phase du projet sur l'amélioration de l'identification des cavités sous les routes et développement d'un outil de diagnostic rapide pour l'usage du MTQ. À la suite du l'établissement d'un protocole expérimental lors de la première phase du projet, un site expérimental à échelle réelle a été construit sur le site de l'Université de Sherbrooke pour finaliser le développement d'un outil de diagnostic fiable.

Les analyses effectuées à la suite de simulations numériques 3D ont permis d'améliorer la compréhension sur l'effet d'une anomalie sur la variation de l'énergie et de la vitesse de groupe. Ensuite 3 phases avec des relevés effectués sur les deux ponceaux, avant et après la création de cavités, ont clairement démontré la capacité de détecter des anomalies grâce à la distribution de la variation de la vitesse de groupe. Les expériences ainsi que les analyses permettent de voir aussi que l'énergie des signaux est un outil très intéressant pour vérifier la location des essais par rapport au ponceau. L'étude a permis de valider sur un grand nombre d'exemples que la variation de la vitesse de groupe subit une importante variation par rapport à la fréquence en présence de cavité. L'étude montre aussi que les sont détectables à une dimension qui correspond environ 5% de la profondeur de celle-ci. Autrement dit une cavité située à 5 m de profondeur serait détectable lorsque son diamètre moyen serait de plus de 25 cm. L'étude montre aussi que la présence d'une cavité de 10%

de la profondeur induit une variation de l'état des contraintes dans une zone plus large autour de celui-ci.

Un logiciel complètement automatisé a été développé pour le traitement des données. L'analyse des données recueillis peut se faire dans un délai très court généralement inférieur à 15 minutes. Le logiciel est assez facile à utiliser, il s'agit juste de rentrer les signaux dans l'ordre dans un fichier et d'indiquer la fréquence d'échantillonnage et le nombre de point. L'utilisateur peut choisir facilement sa fréquence d'interprétation. Il peut aussi faire l'analyse pour plusieurs fréquences ce qui lui permet de mieux identifier l'état du remblai au-dessus du ponceau. Un des aspects qu'il serait possible d'améliorer est la prise des données avec un plus grand nombre de capteurs. Ceci peut se traduire par une plus grande rapidité à effectuer des essais en utilisant deux sources. Ce qui permet aussi de faciliter le traitement puisque le rassemblement des signaux pour l'interprétation sera plus efficace. Actuellement la présentation des résultats de fait en deux dimensions sur la longueur et la largeur du ponceau. Ceci permet de localiser la cavité ou l'anomalie dans l'espace.

Un des aspects qu'il est possible d'améliorer par rapport aux conditions des essais sur le site expérimental et d'avoir plus d'espacement pour mieux positionner la source d'énergie. Cet aspect peut être examiner davantage sur des ponceaux routiers réels. La méthode nécessite encore un certain nombre d'application sur des cas réels afin de pouvoir faire les ajustements nécessaires et l'optimiser de sorte qu'il ne serait plus nécessaire de faire des forages.

ANNEXE 1 : PLAN CIVIL DU SITE EXPÉRIMENTAL

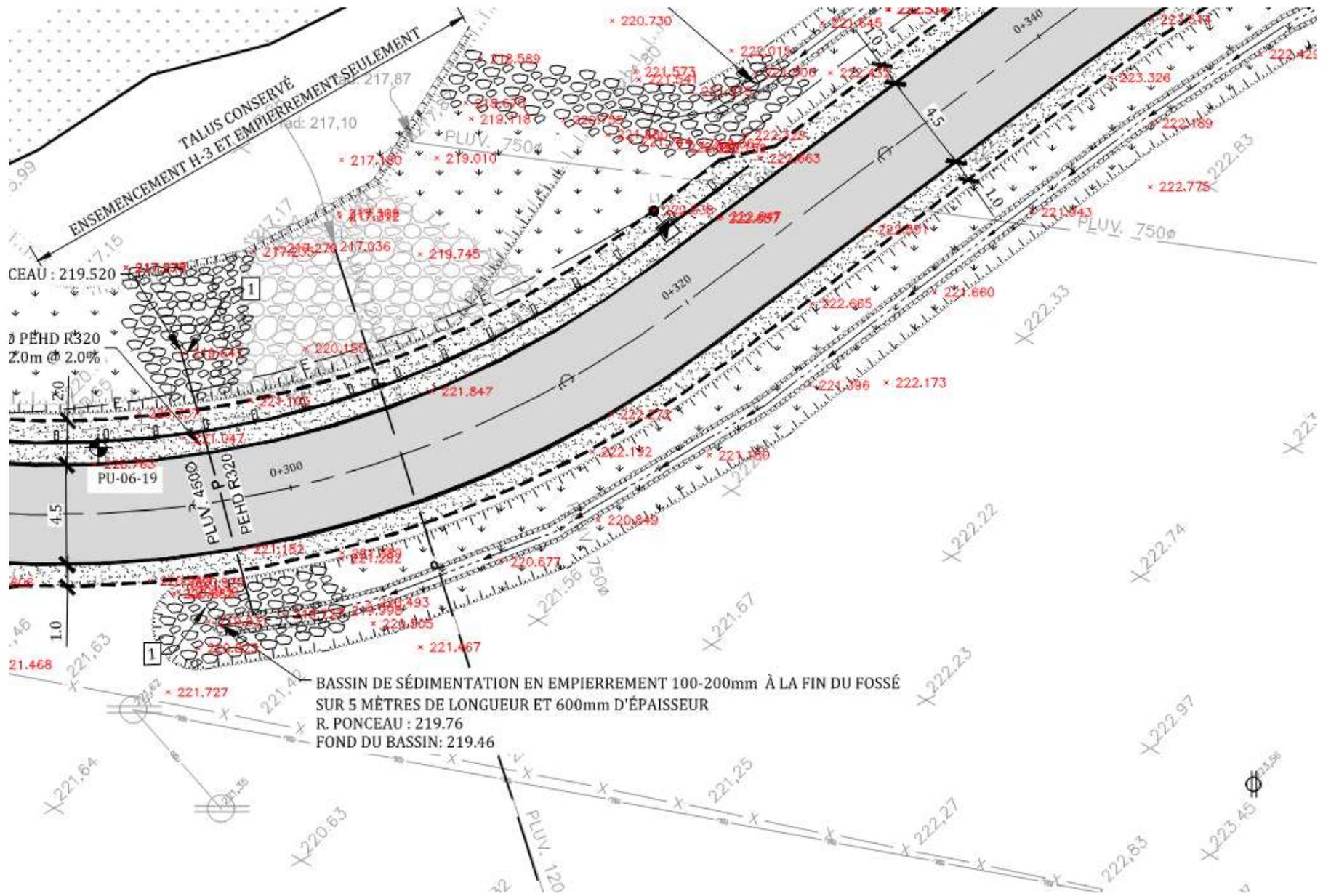


Figure A1. 2: Plan civil du ponceau 1 (Échelle 1:250).

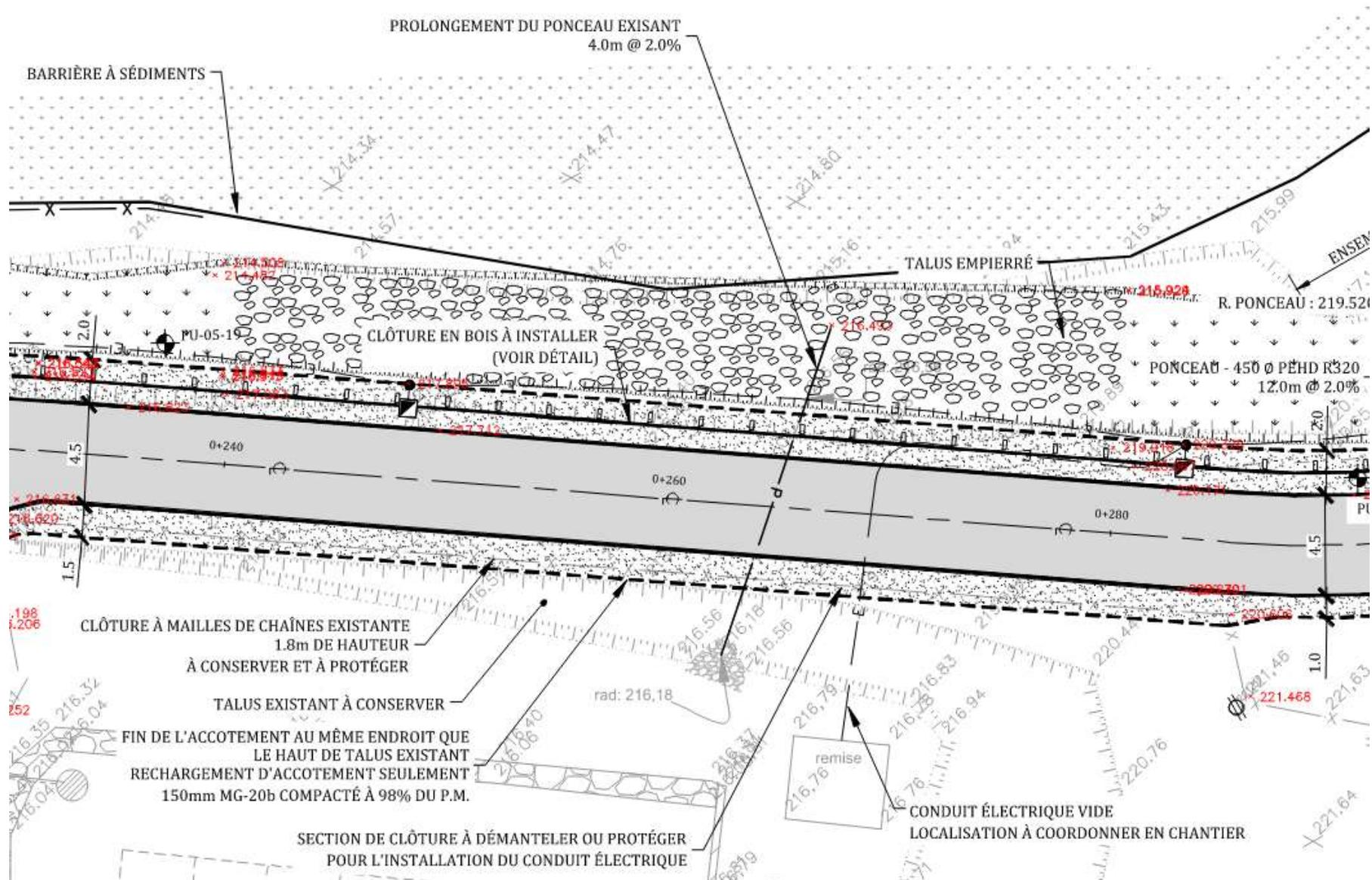


Figure A1. 3: Plan civil du ponceau 2 (Échelle 1:250).

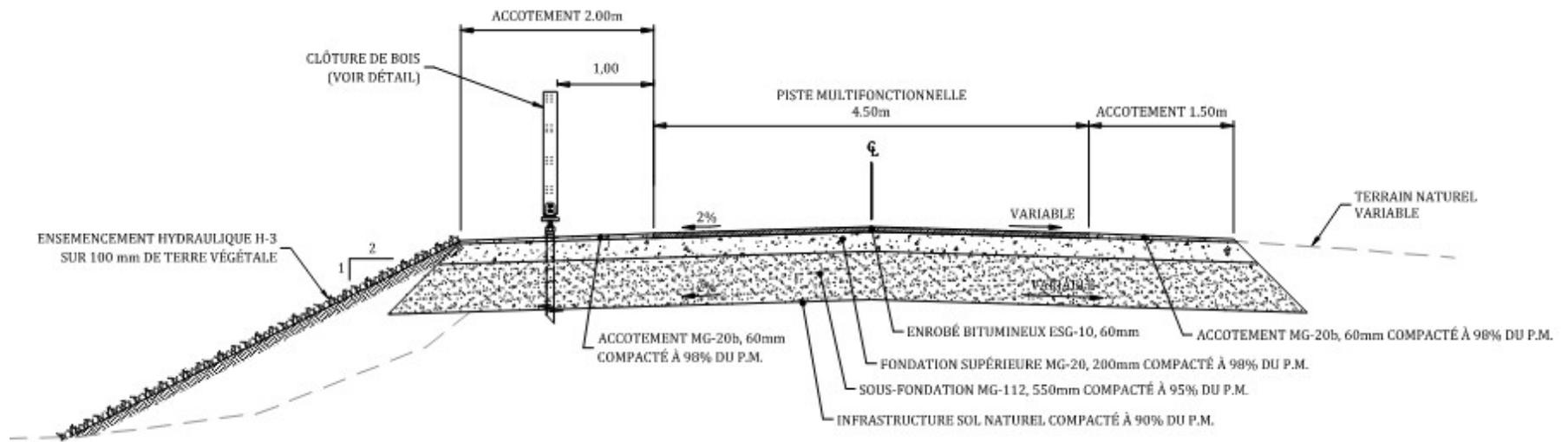


Figure A1. 4: Coupe-type de voirie au niveau du ponceau 1 (Échelle : aucune).

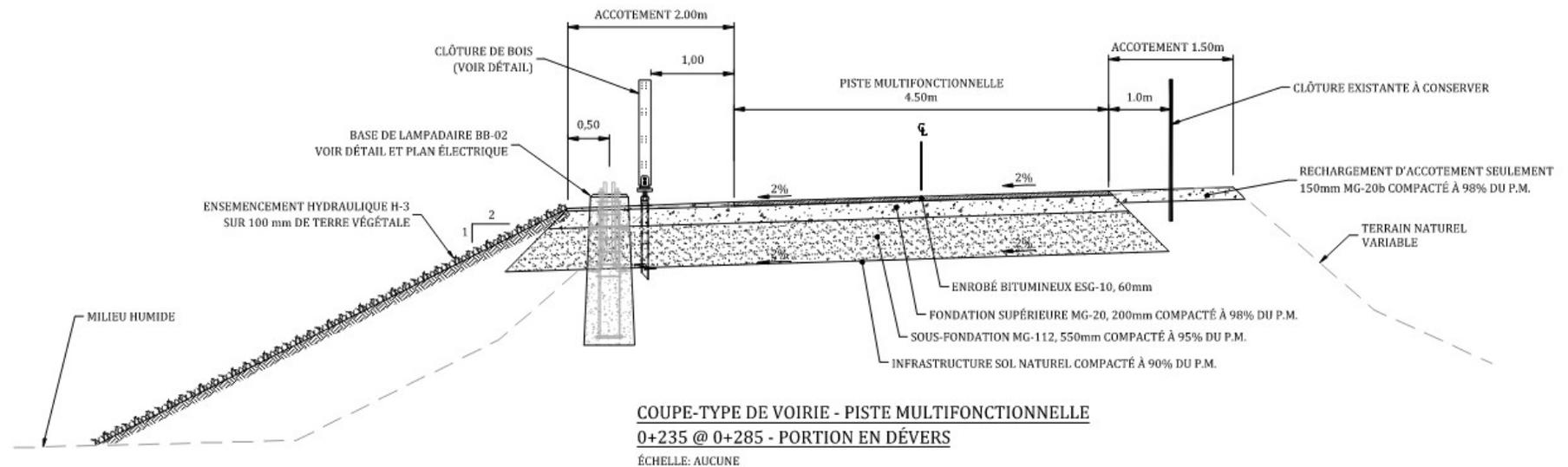


Figure A1. 5: Coupe-type de voirie au niveau du ponceau 2 (Échelle : aucune)

ANNEXE A2 : RÉSULTATS DES ESSAIS
EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 1 AVEC UNE
SOURCE DU CÔTÉ AMONT ET AVANT LA
CRÉATION DE CAVITÉS

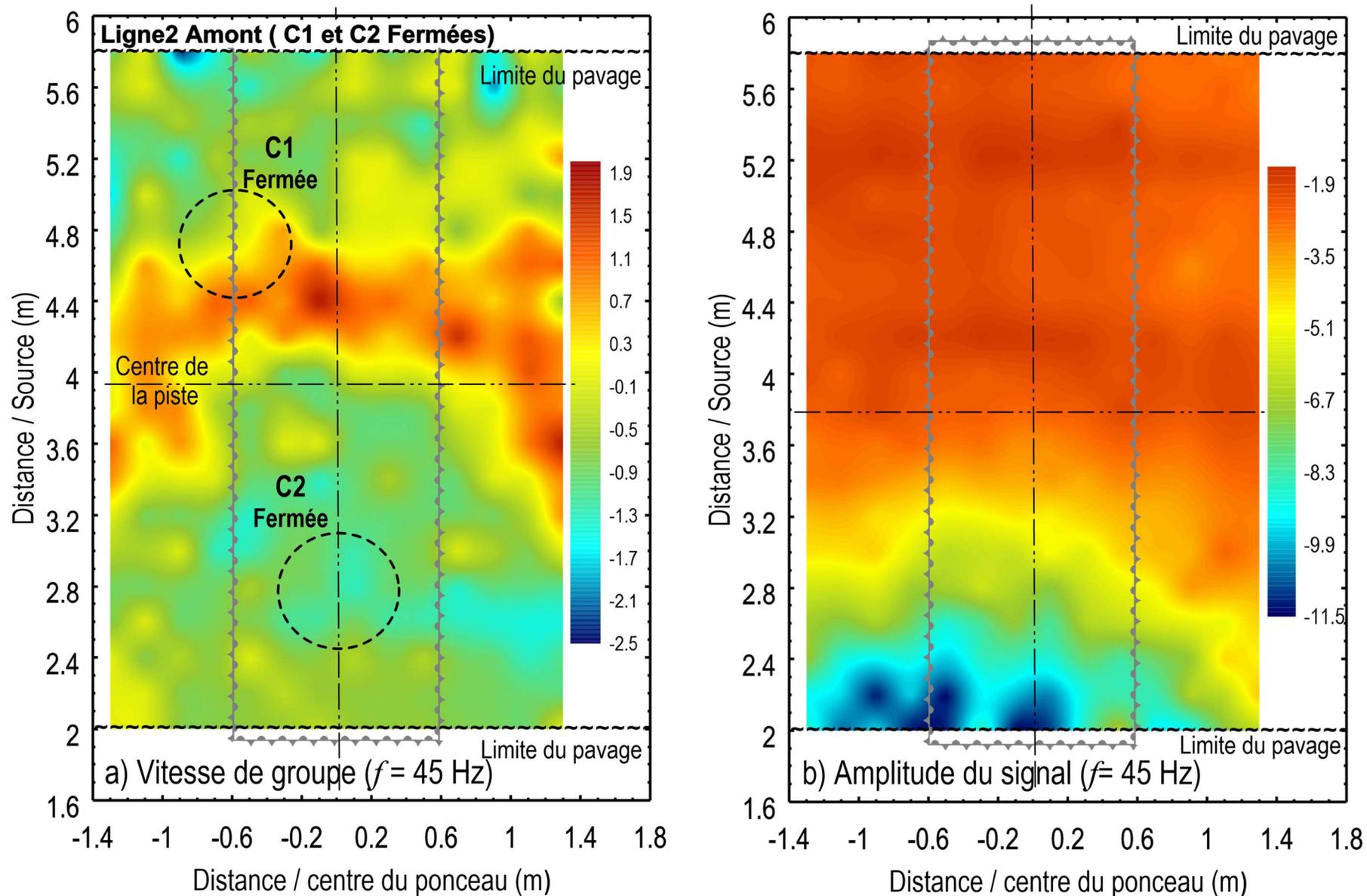


Figure A2. 1: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs avant la création de cavité à une fréquence de 45 Hz (Ligne 2 - Amont).

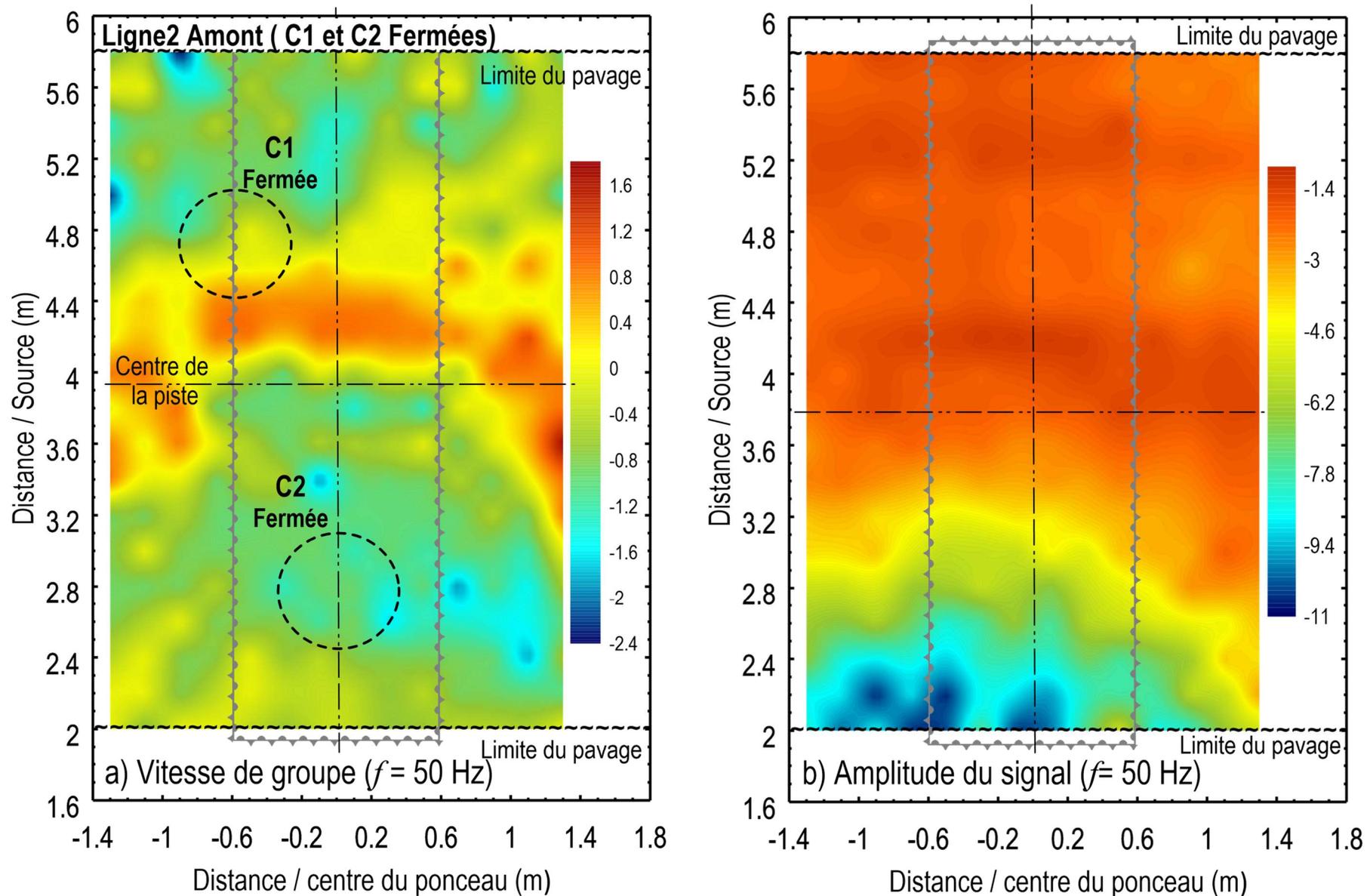


Figure A2. 2: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs avant la création de cavité à une fréquence de 50 Hz (Ligne 2 – Amont).

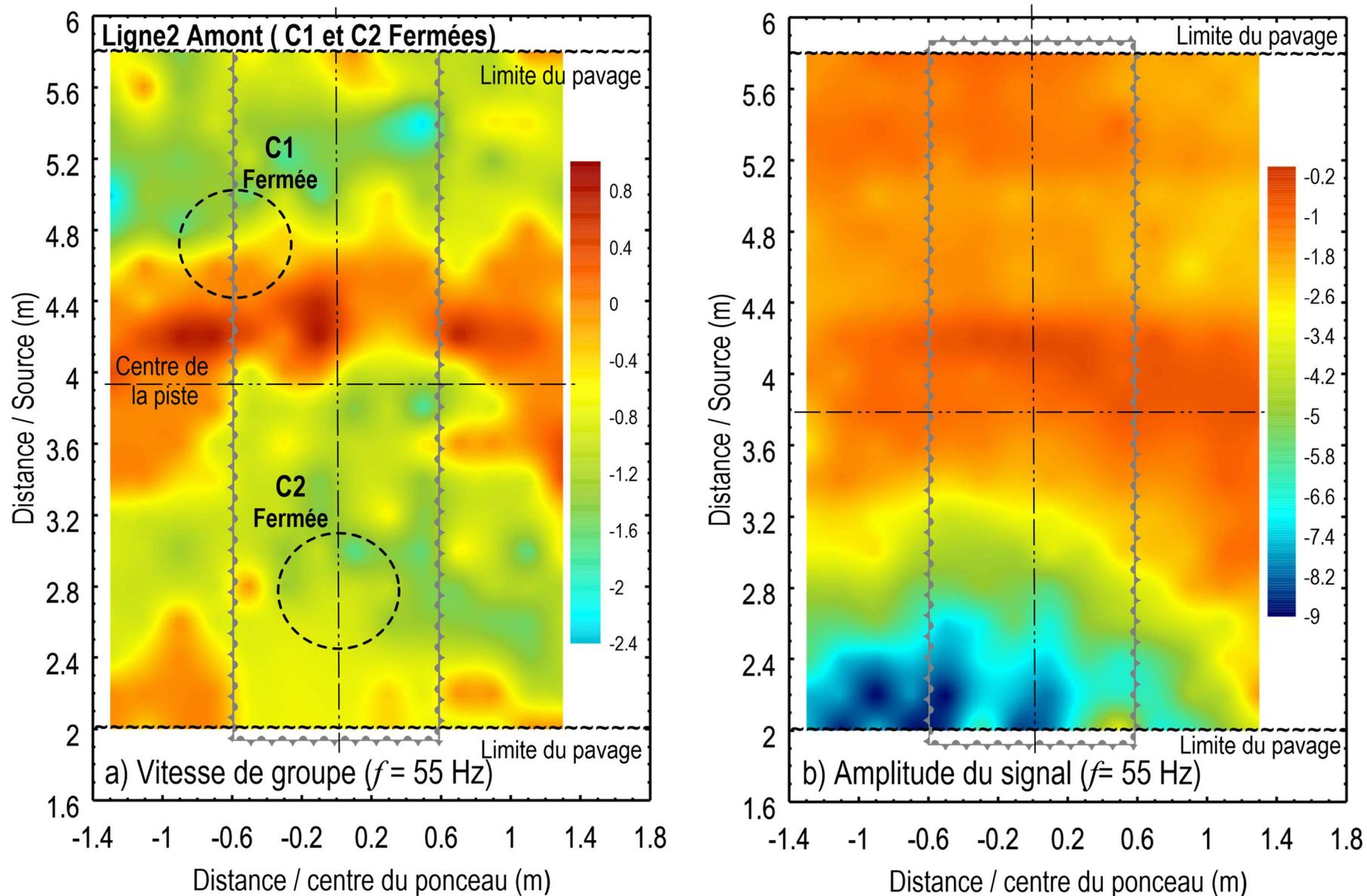


Figure A2. 3: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs avant la création de cavité à une fréquence de 55 Hz (Ligne 2 – Amont).

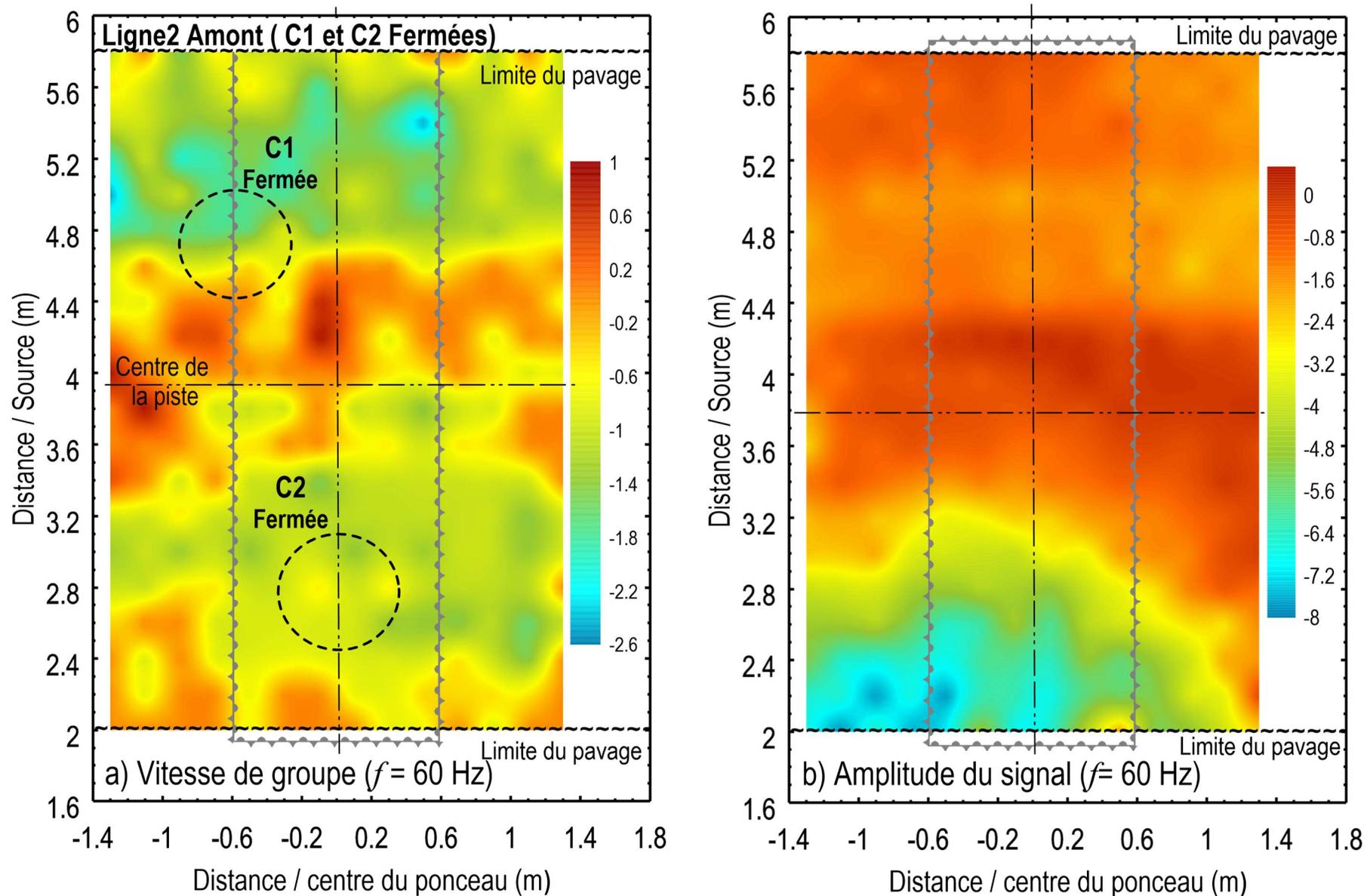


Figure A2. 4: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs avant la création de cavité à une fréquence de 60 Hz (Ligne 2 – Amont).

ANNEXE A3 : RÉSULTATS DES ESSAIS
EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 1 AVEC UNE
SOURCE DU CÔTÉ AVAL ET AVANT LA
CRÉATION DE CAVITÉS

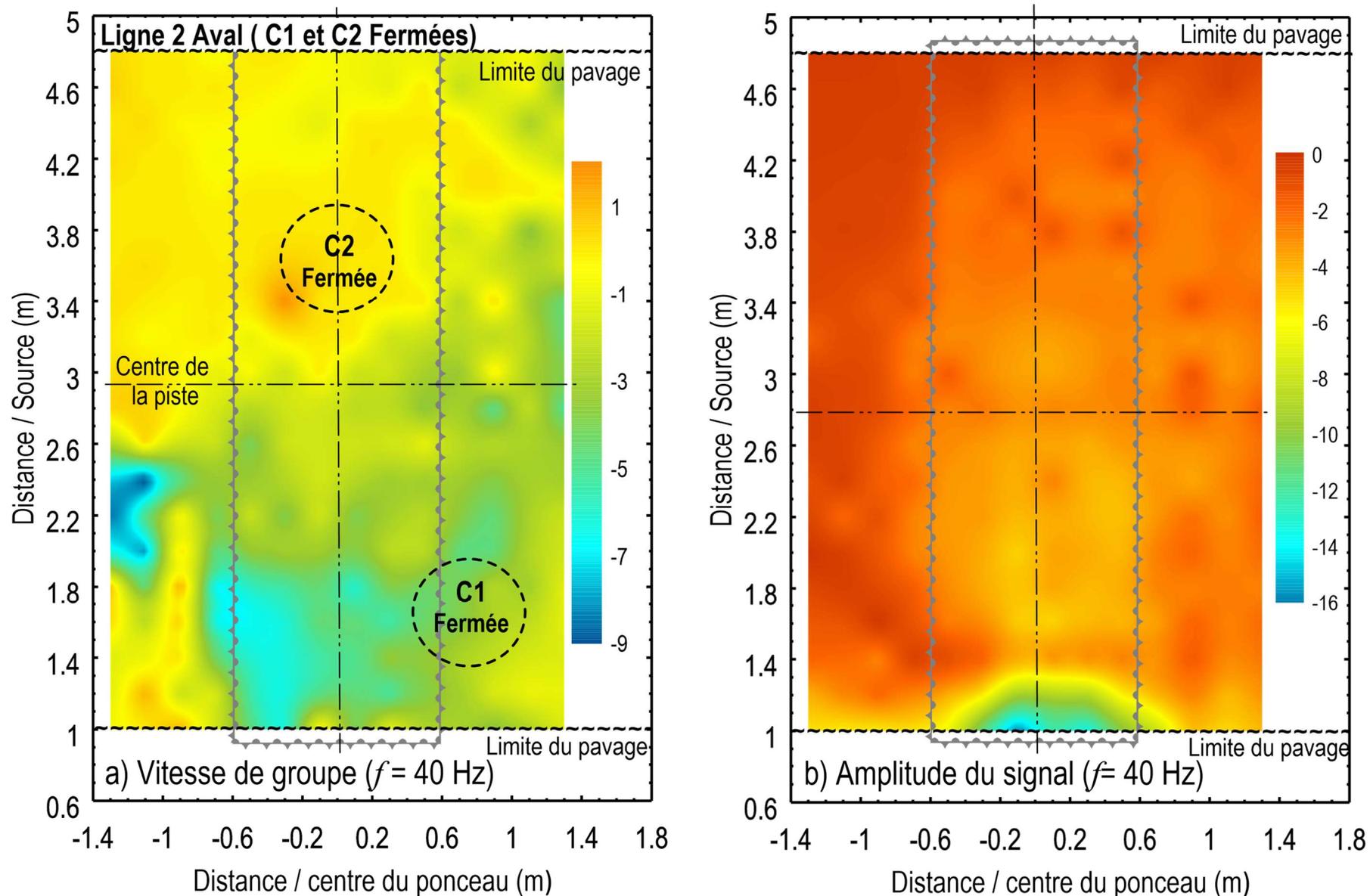


Figure A3. 1: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs avant la création de cavité à une fréquence de 40 Hz (Ligne 2 – Aval).

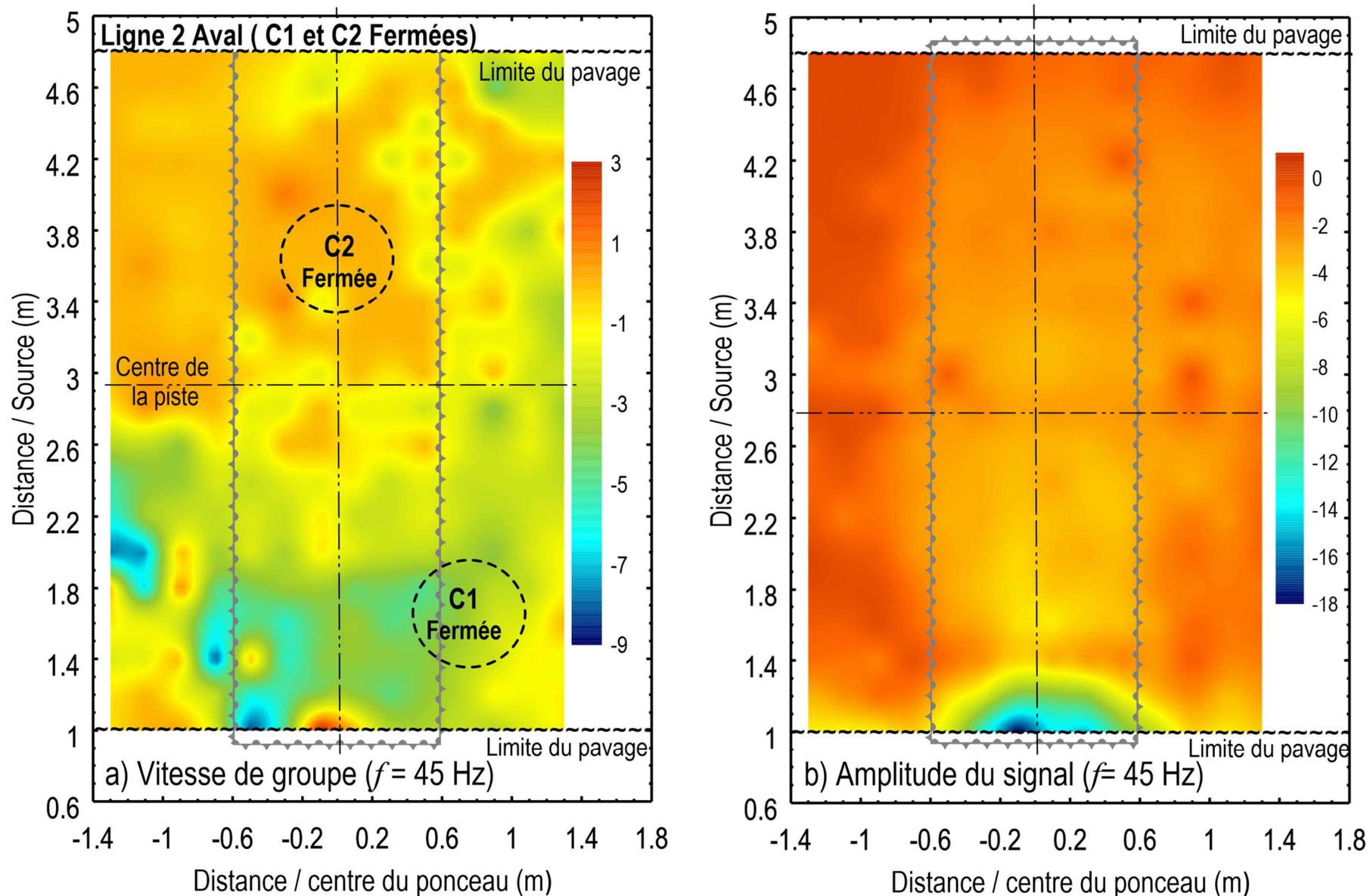


Figure A3. 2: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs avant la création de cavité à une fréquence de 45 Hz (Ligne 2 – Aval)

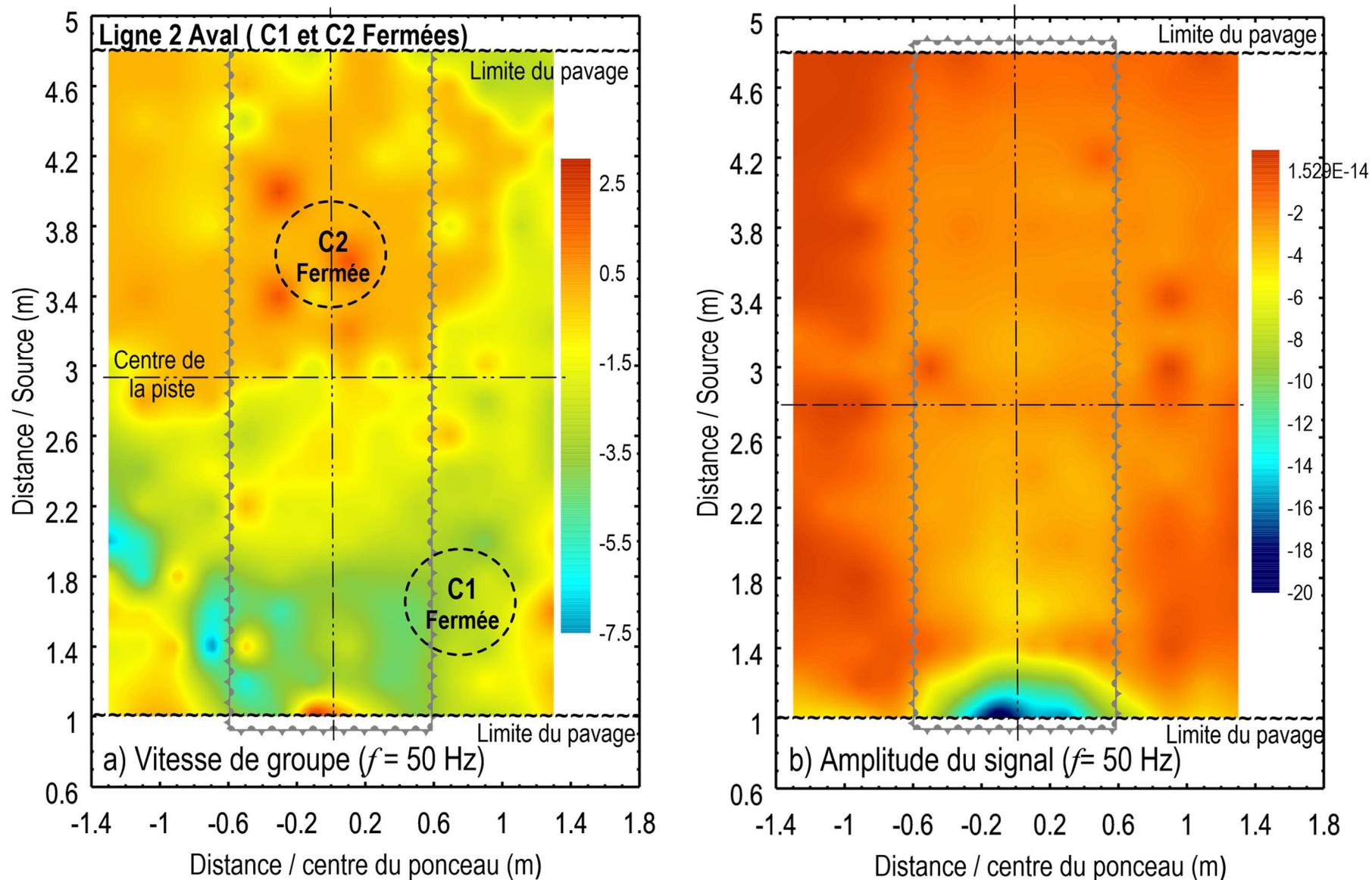


Figure A3. 3: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs avant la création de cavité à une fréquence de 50 Hz (Ligne 2 – Aval)

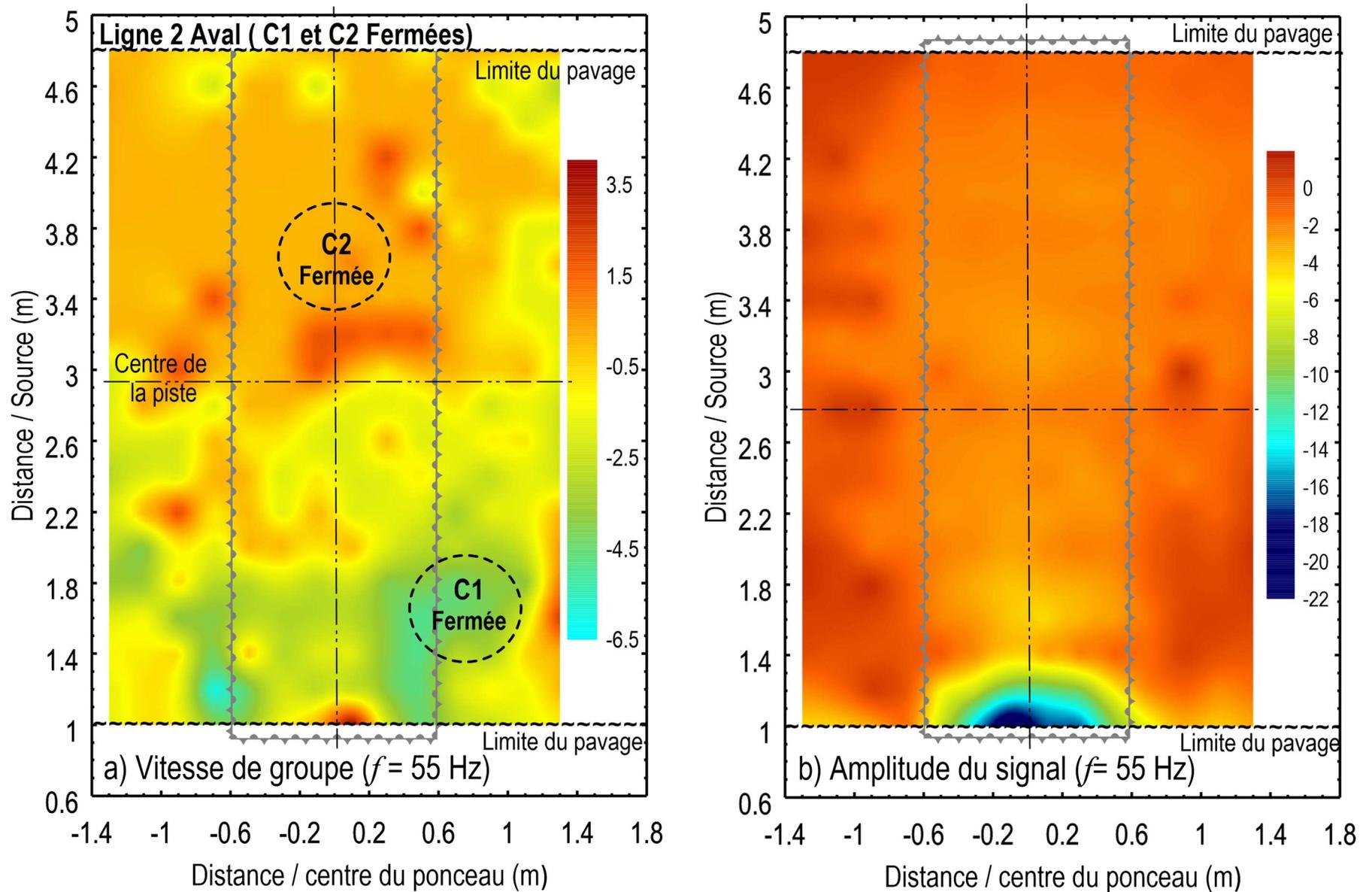


Figure A3. 4: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs avant la création de cavité à une fréquence de 55 Hz (Ligne 2 – Aval)

**ANNEXE A4 :RÉSULTATS DES ESSAIS
EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 1 AVEC UNE
SOURCE DU CÔTÉ AMONT ET APRÈS LA
CRÉATION DE LA CAVITÉ C1 À 20X20X20
CM**

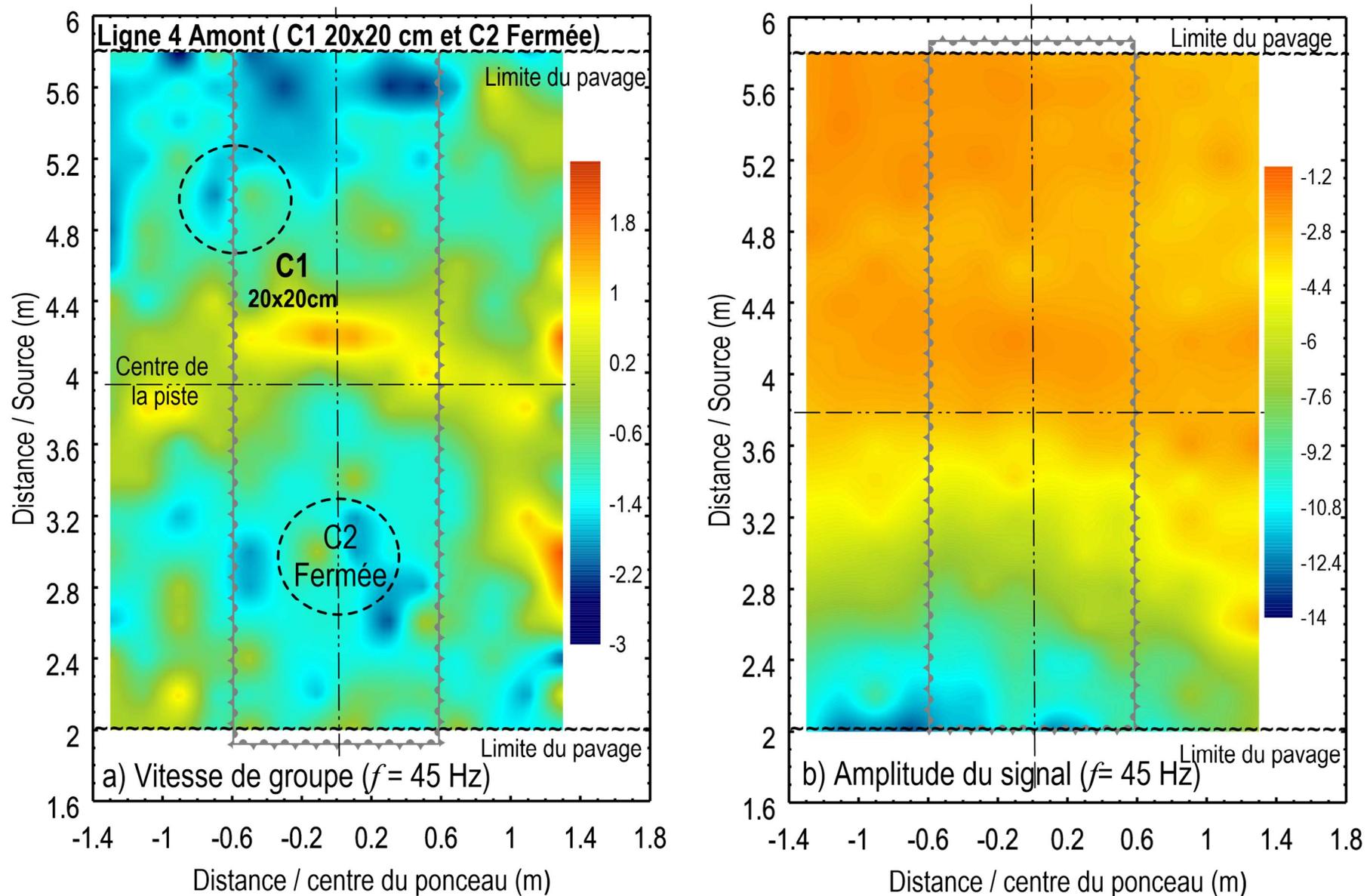


Figure A4. 1: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de cavité C1 de 20x20 cm à une fréquence de 45 Hz (Ligne 4 – Amont)

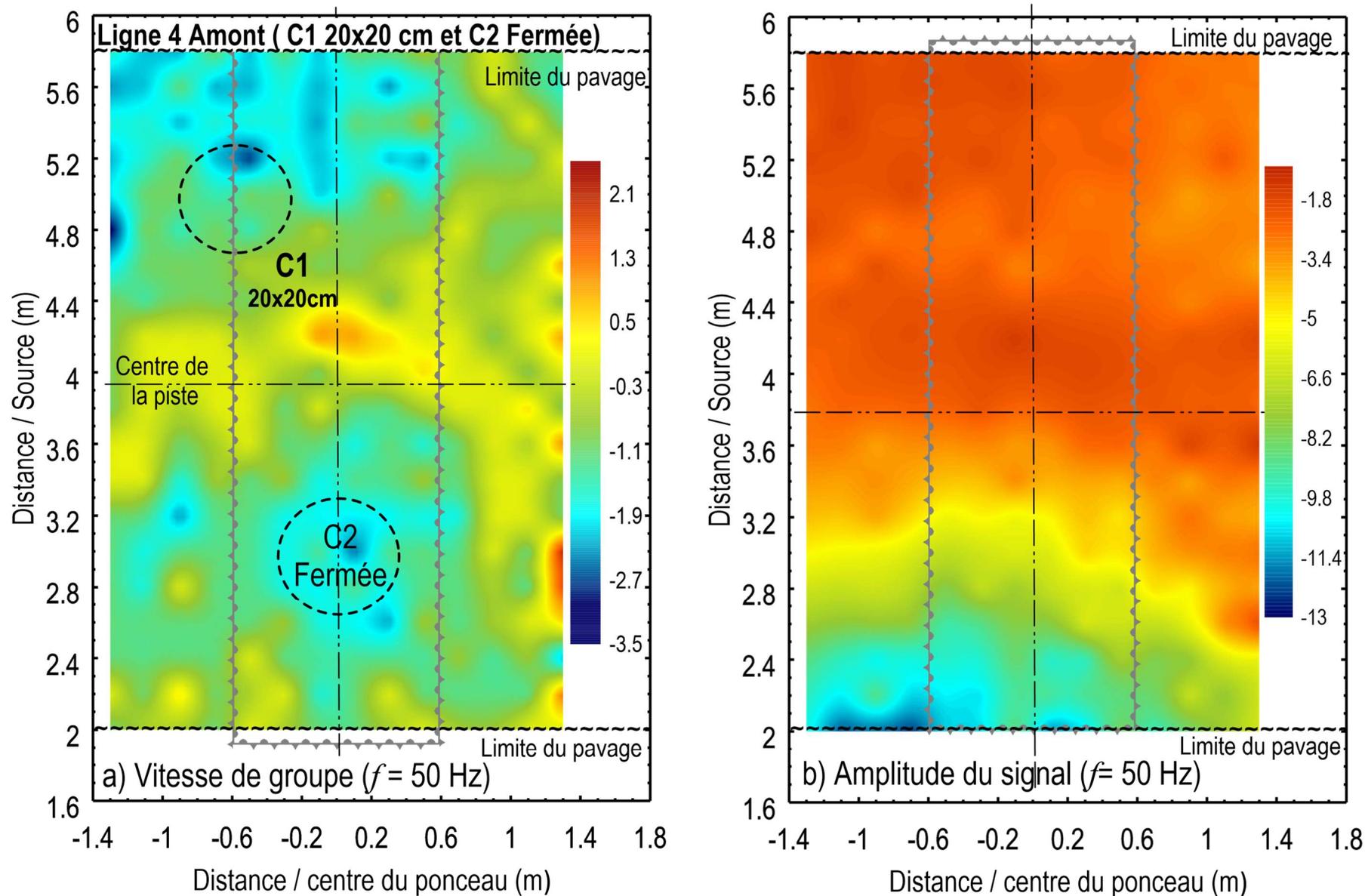


Figure A4. 2: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de cavité C1 de 20x20 cm à une fréquence de 50 Hz (Ligne 4 – Amont)

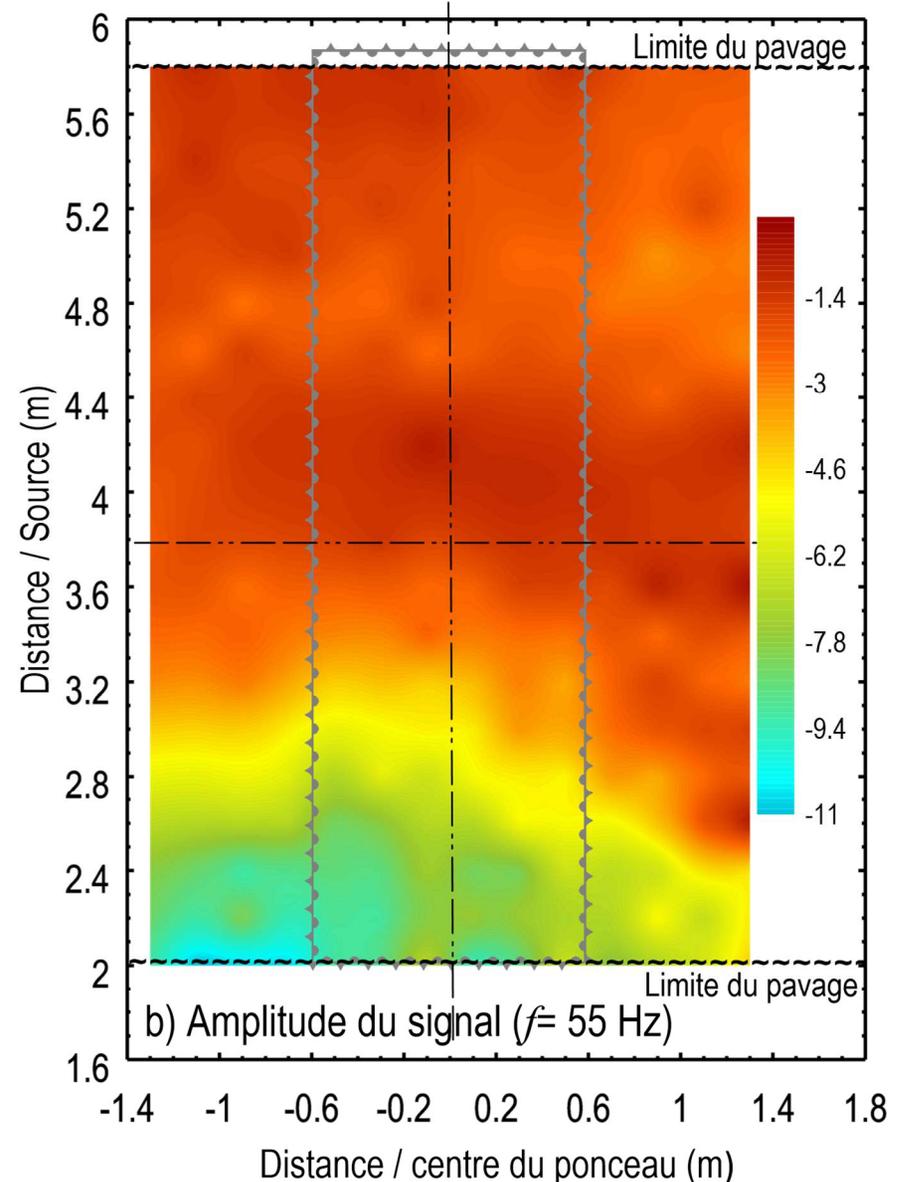
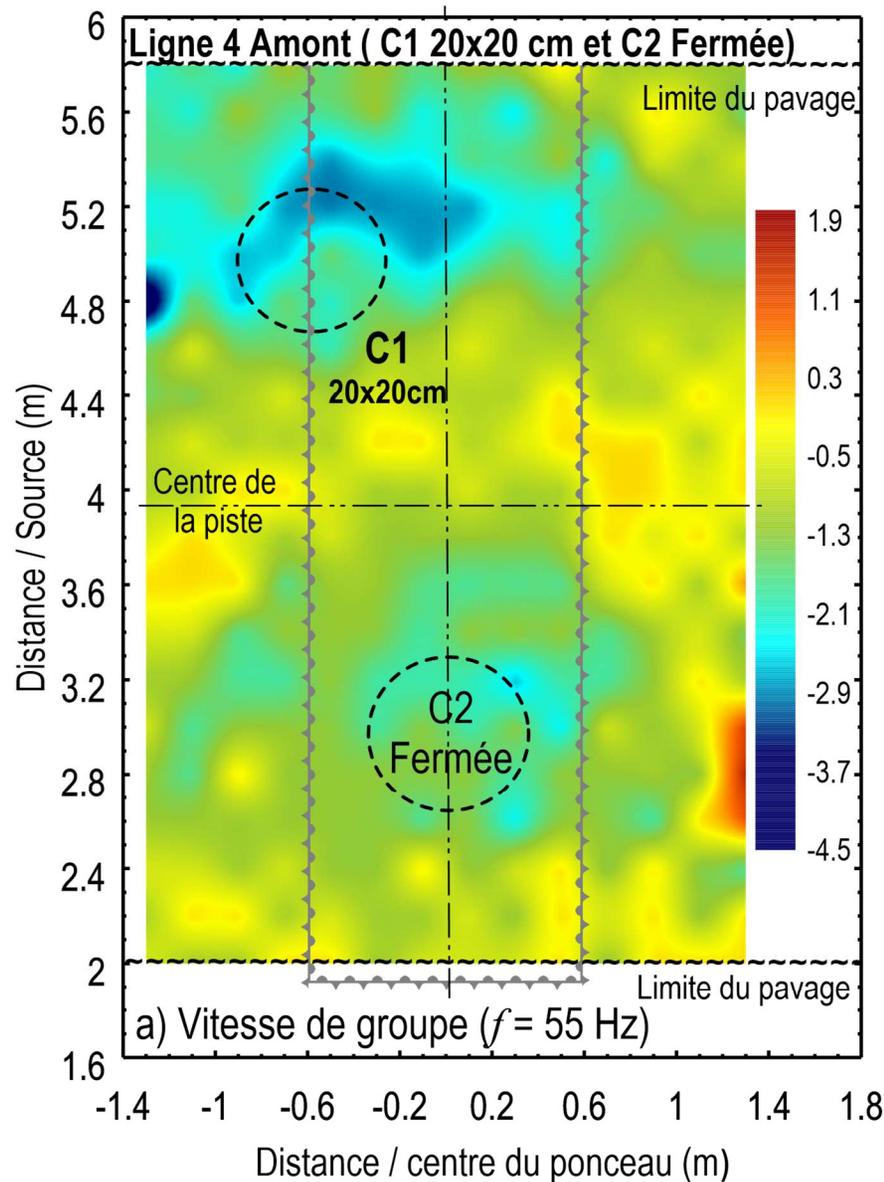


Figure A4. 3: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de cavité C1 de 20x20 cm à une fréquence de 55 Hz (Ligne 4 – Amont)

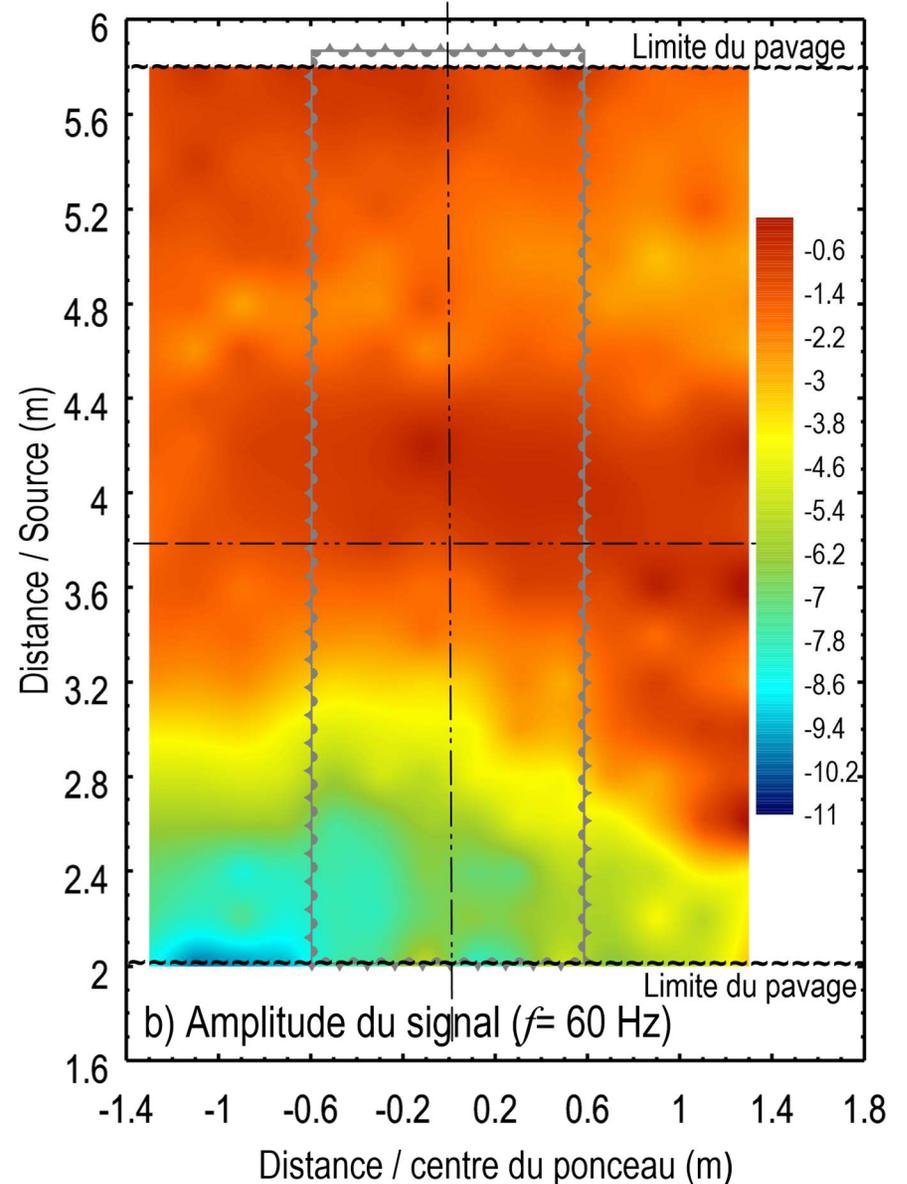
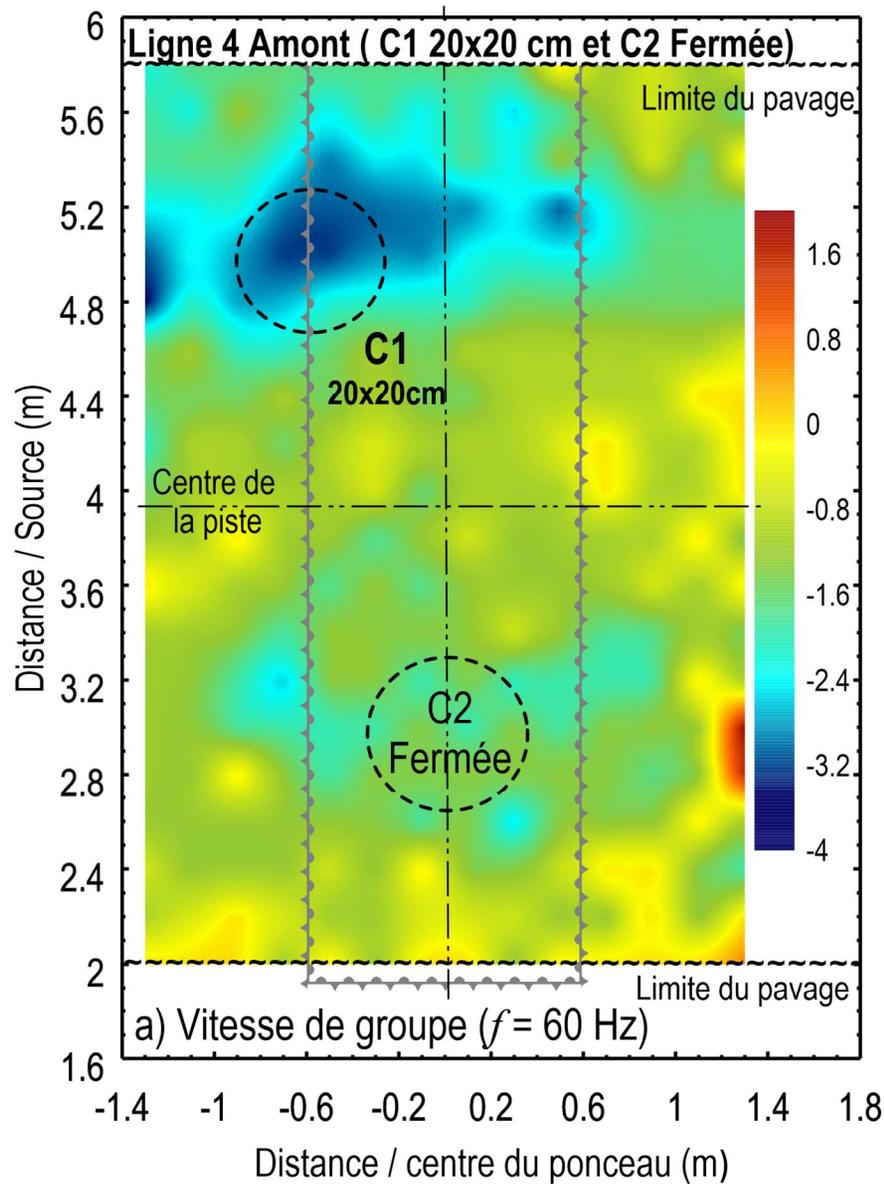


Figure A4. 4: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de cavité C1 de 20x20 cm à une fréquence de 60 Hz (Ligne 4 – Amont)

ANNEXE A5 : RÉSULTATS DES ESSAIS
EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 1 AVEC UNE
SOURCE DU CÔTÉ AVAL ET APRÈS LA
CRÉATION DE LA CAVITÉ C1 À 20X20X20
CM

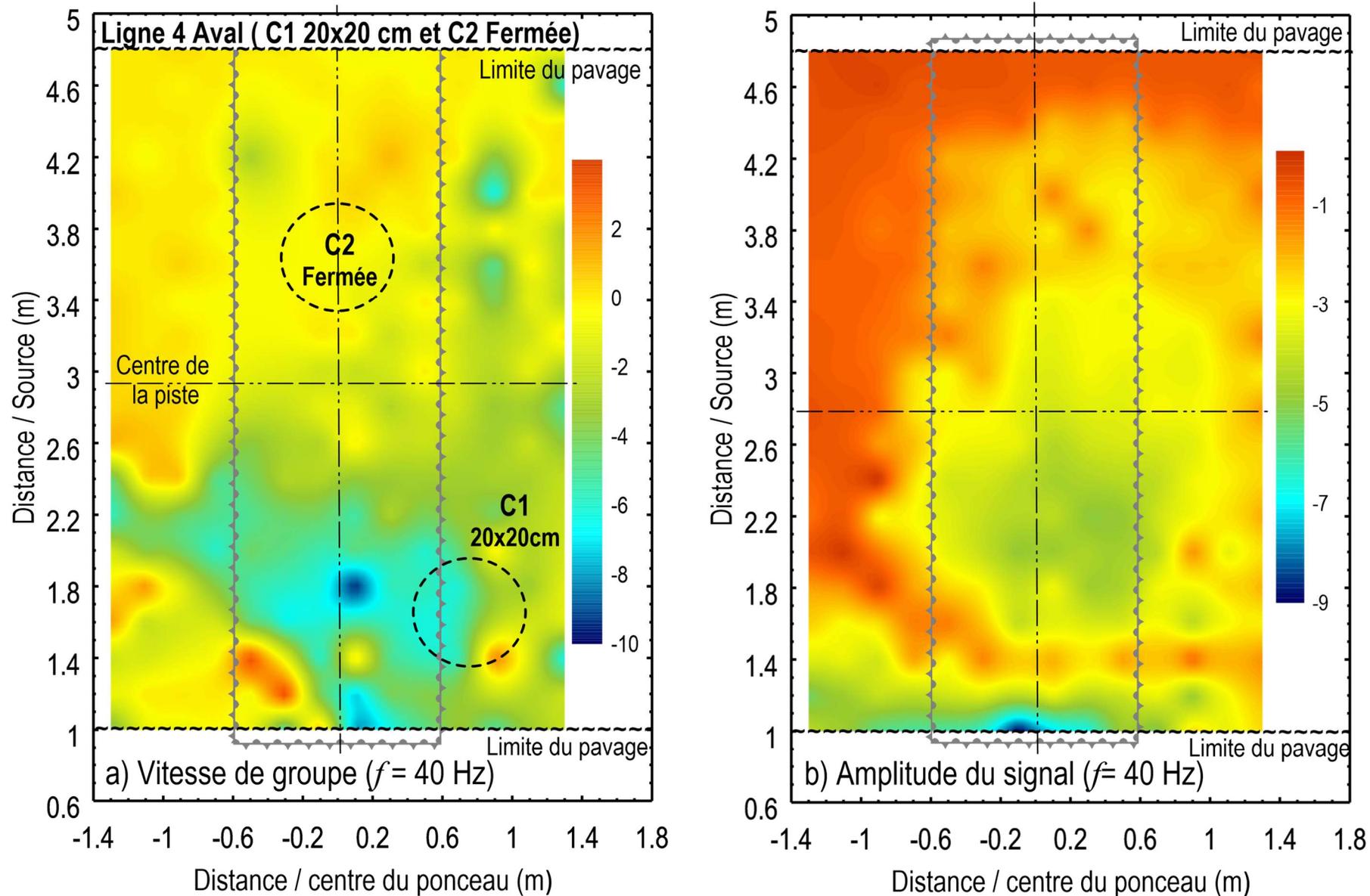


Figure A5. 1: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de cavité C1 de 20x20 cm à une fréquence de 40 Hz (Ligne 4 – Aval)

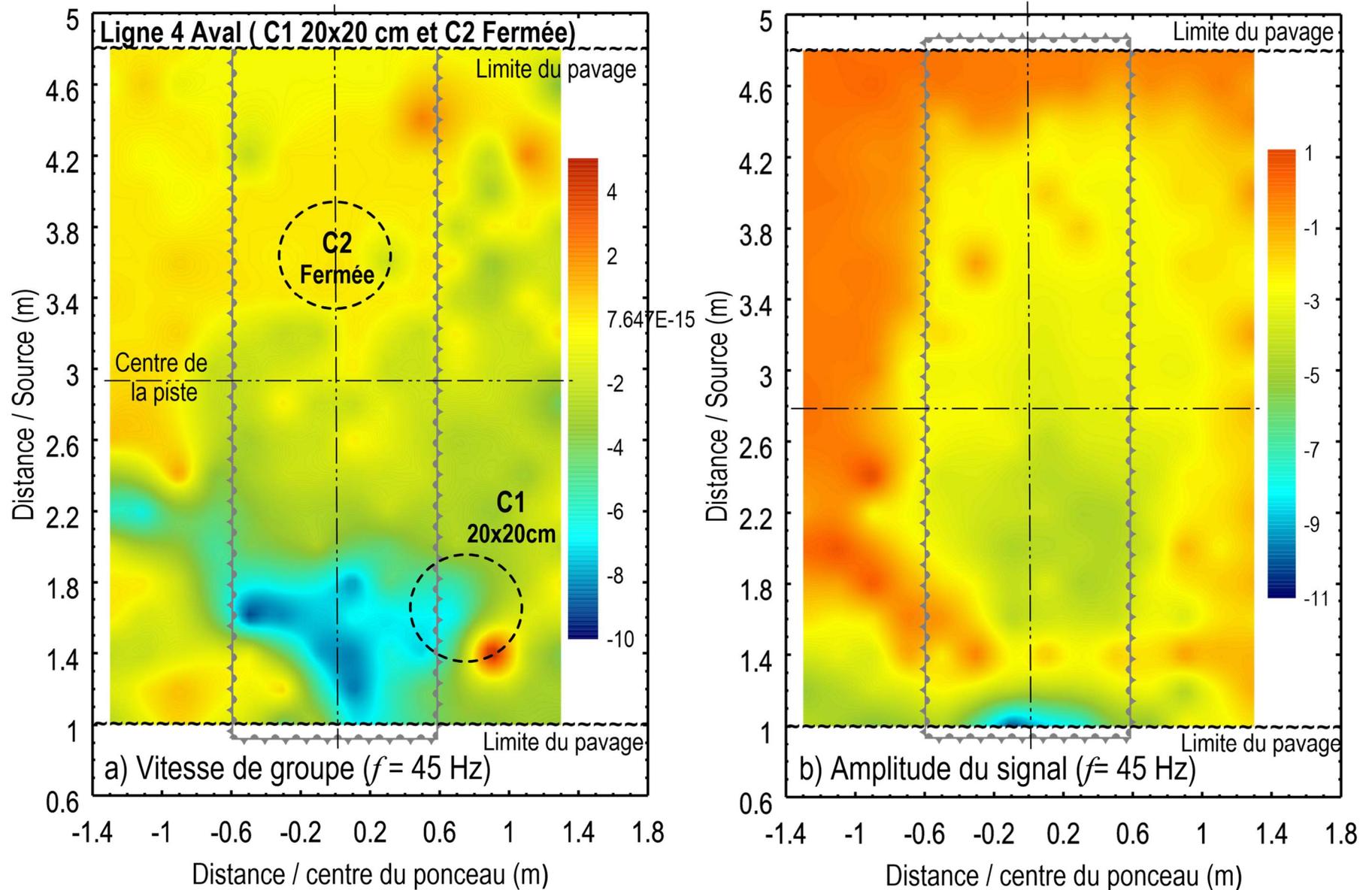


Figure A5. 2: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de cavité C1 de 20x20 cm à une fréquence de 45 Hz (Ligne 4 – Aval)

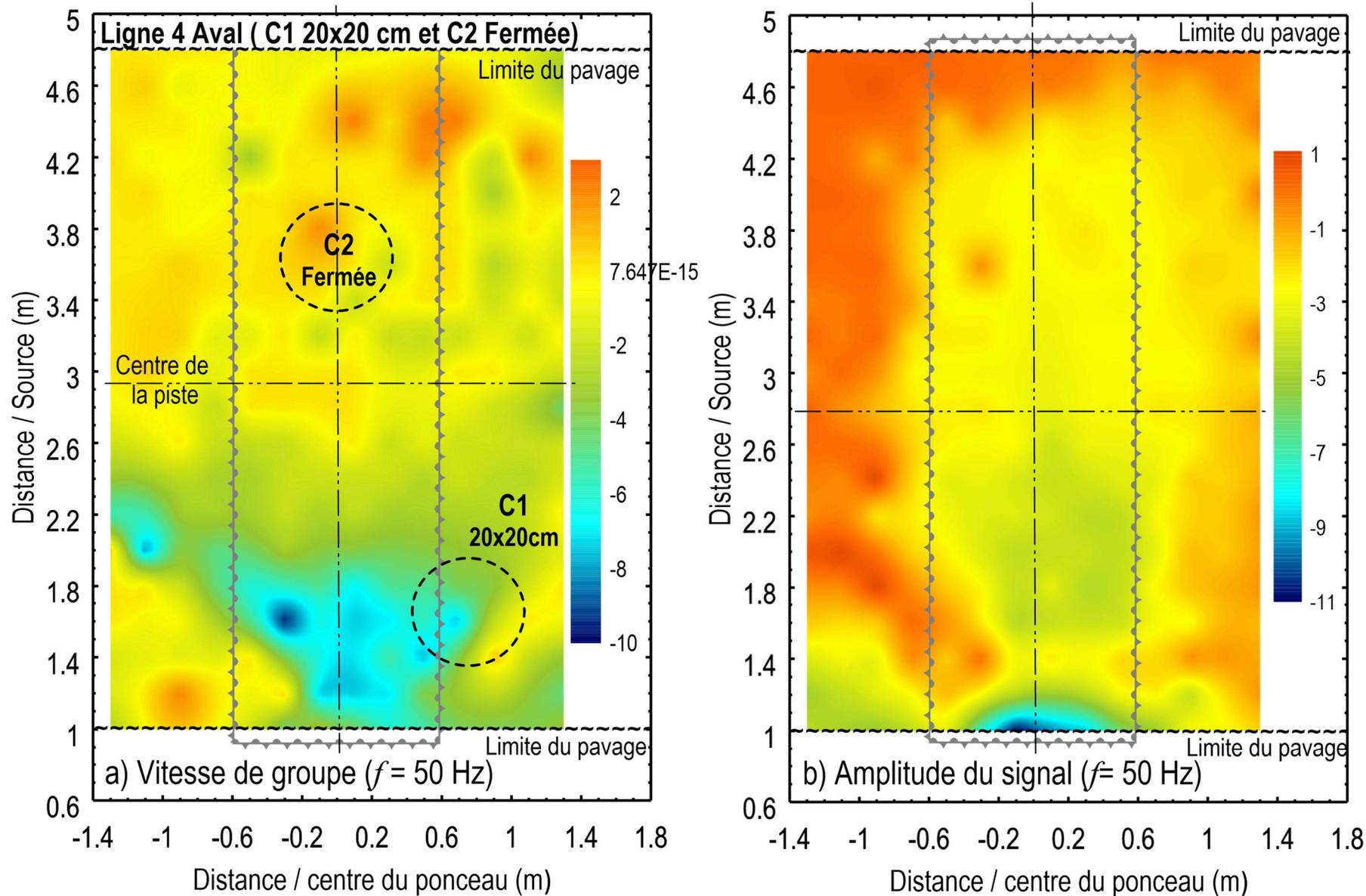


Figure A5. 3: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de cavité C1 de 20x20 cm à une fréquence de 40 Hz (Ligne 4 – Aval)

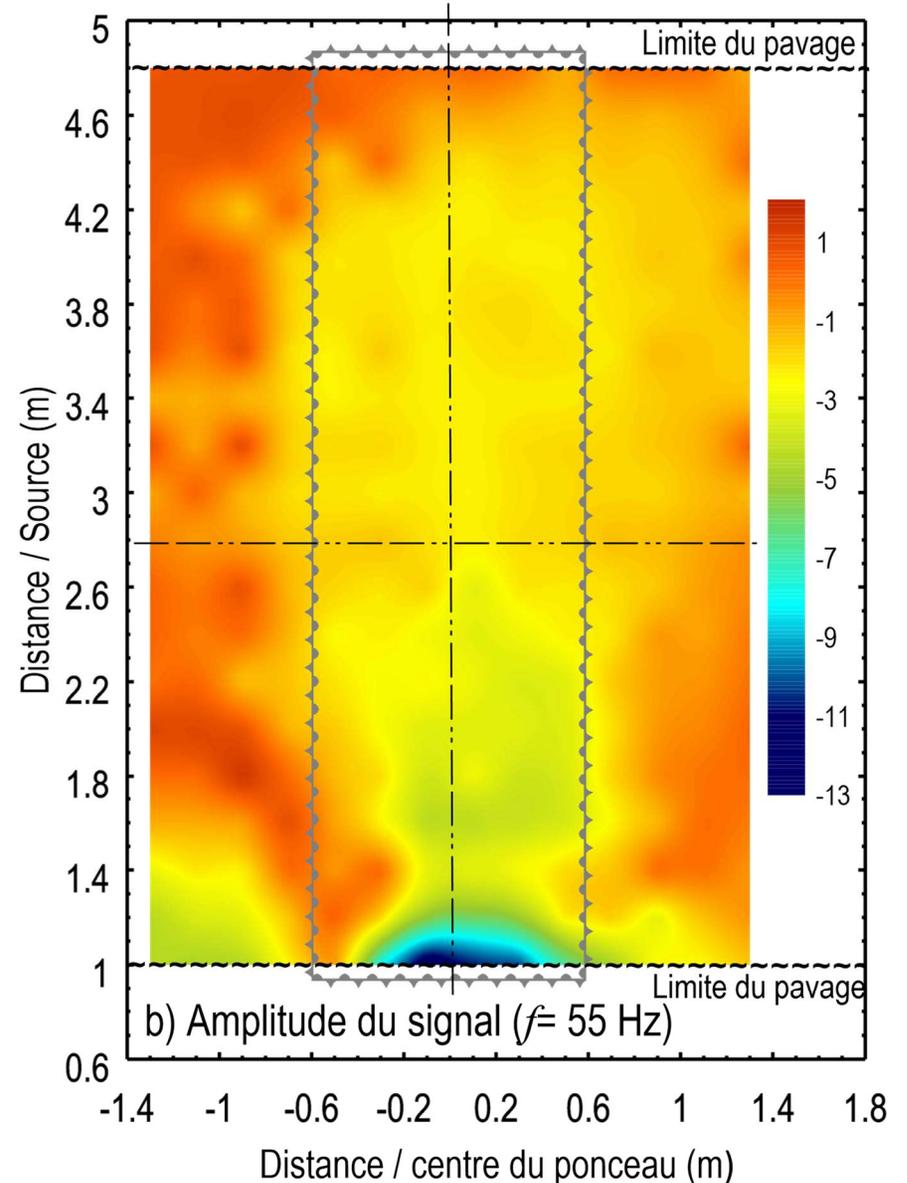
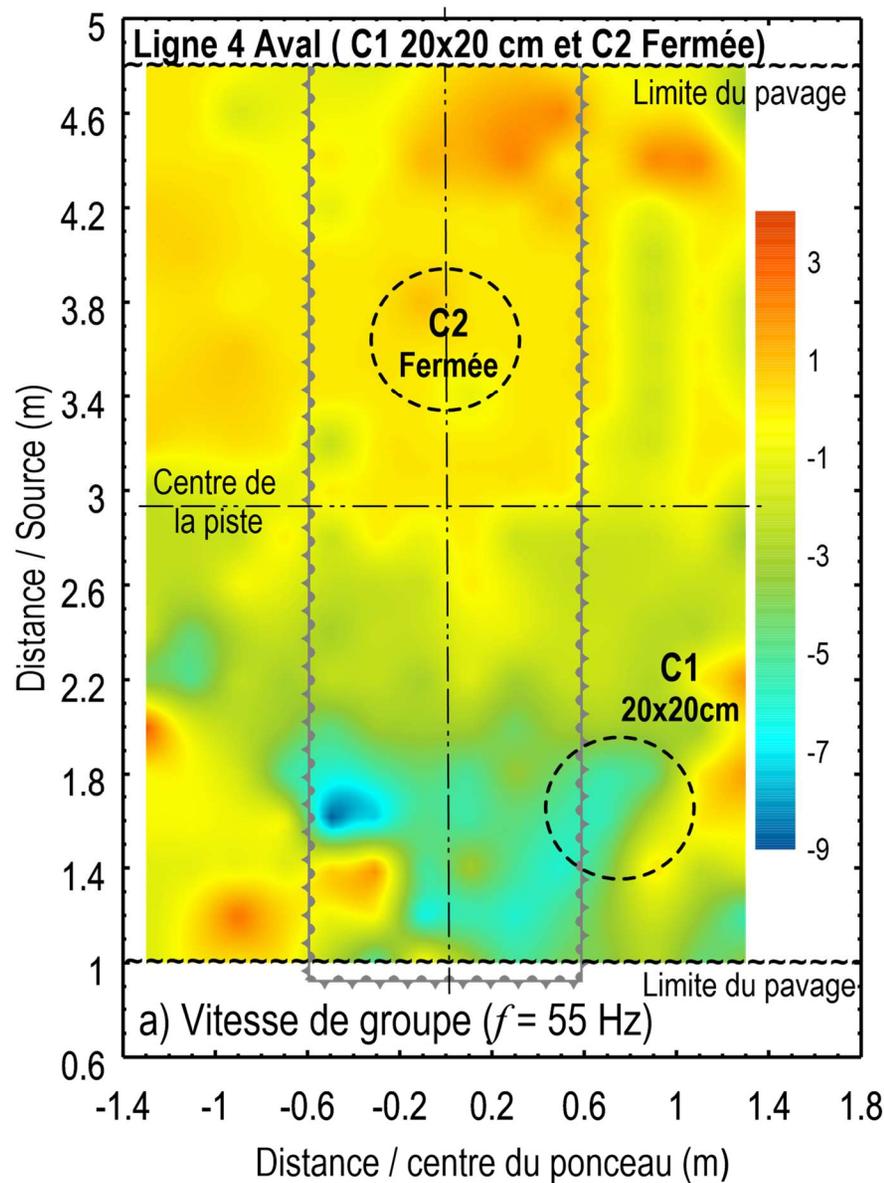


Figure A5. 4: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de cavité C1 de 20x20 cm à une fréquence de 55 Hz (Ligne 4 – Aval)

ANNEXE A6 : RÉSULTATS DES ESSAIS
EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 1 AVEC UNE
SOURCE DU CÔTÉ AMONT ET APRÈS LA
CRÉATION DE LA CAVITÉ C1 À 40X40X40
CM

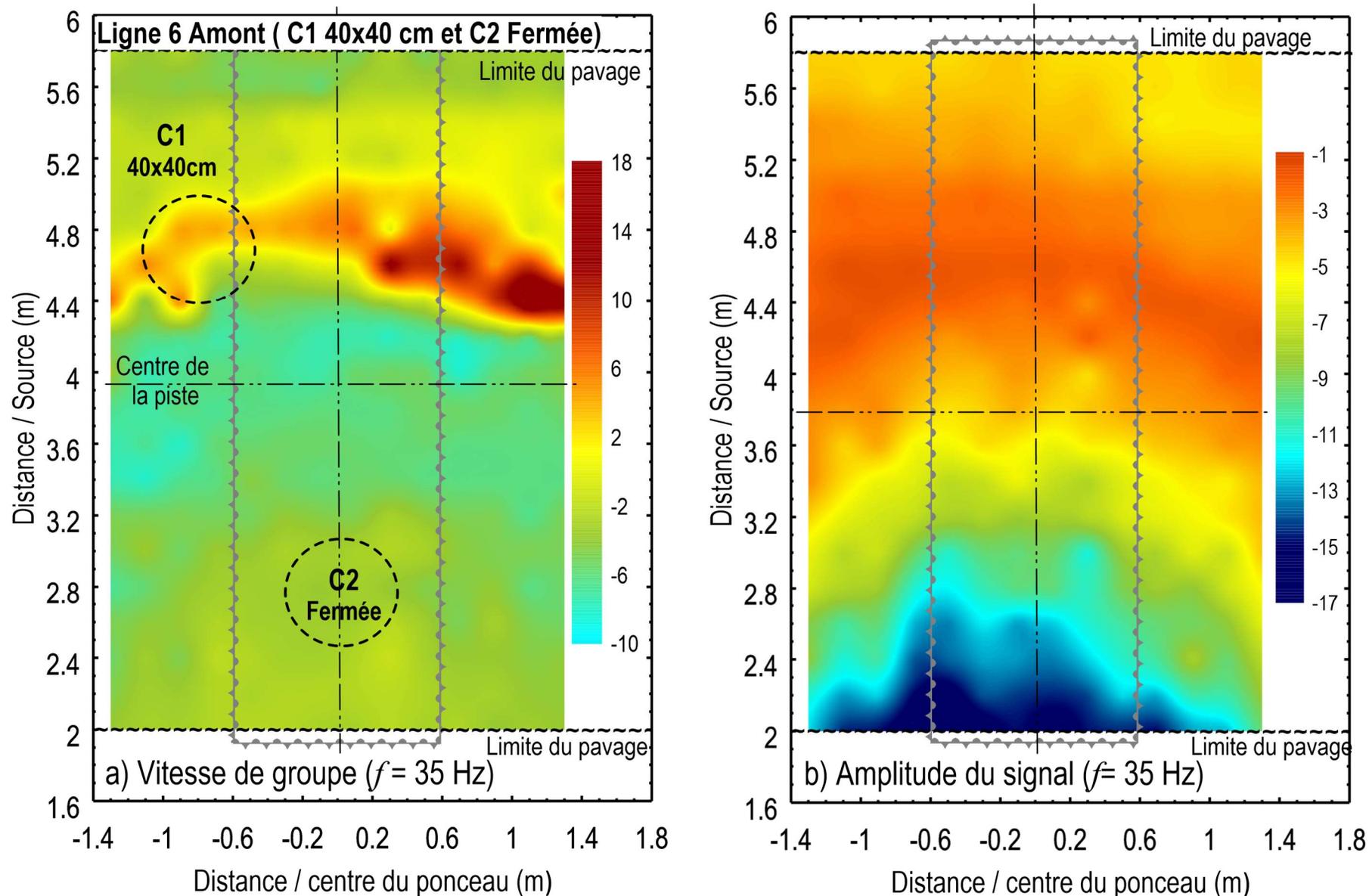


Figure A6. 1: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de cavité C1 de 40x40x40 cm à une fréquence de 35 Hz (Ligne 6 – Amont)

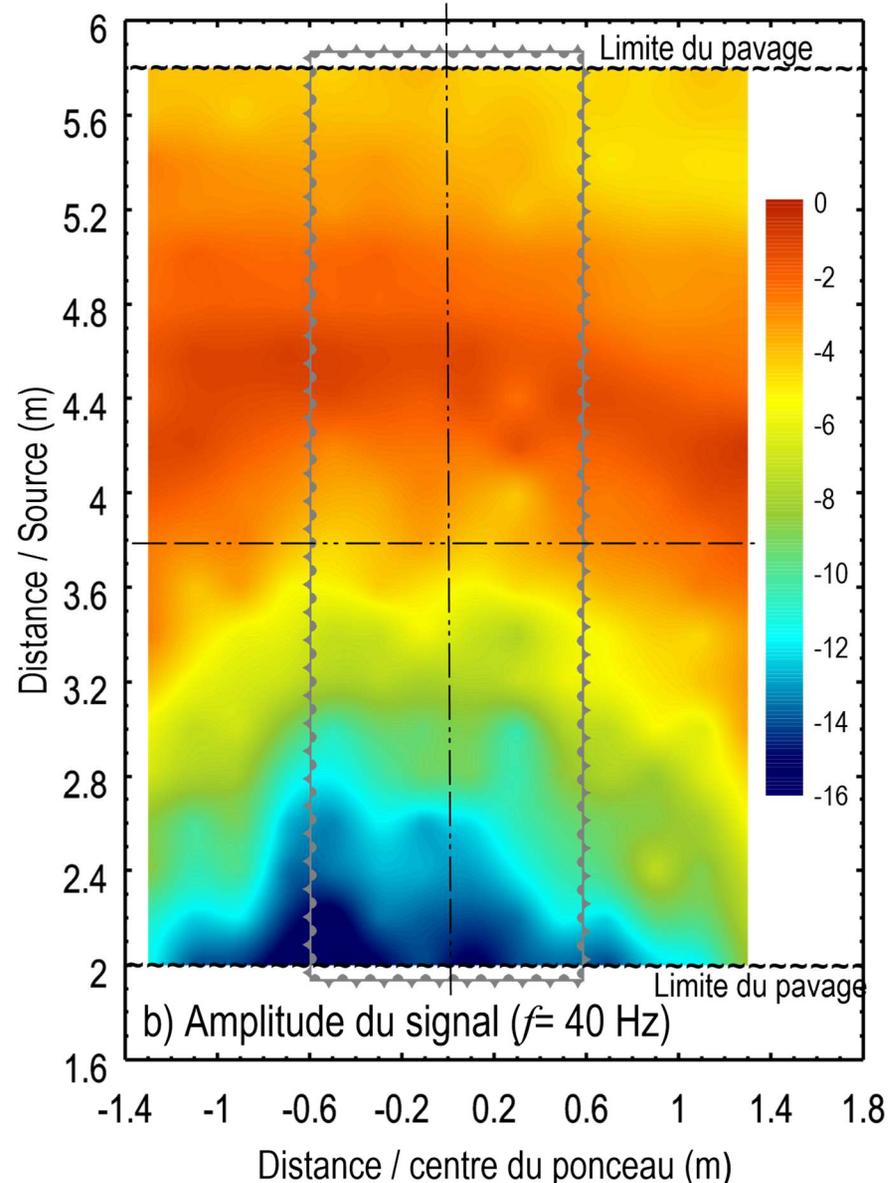
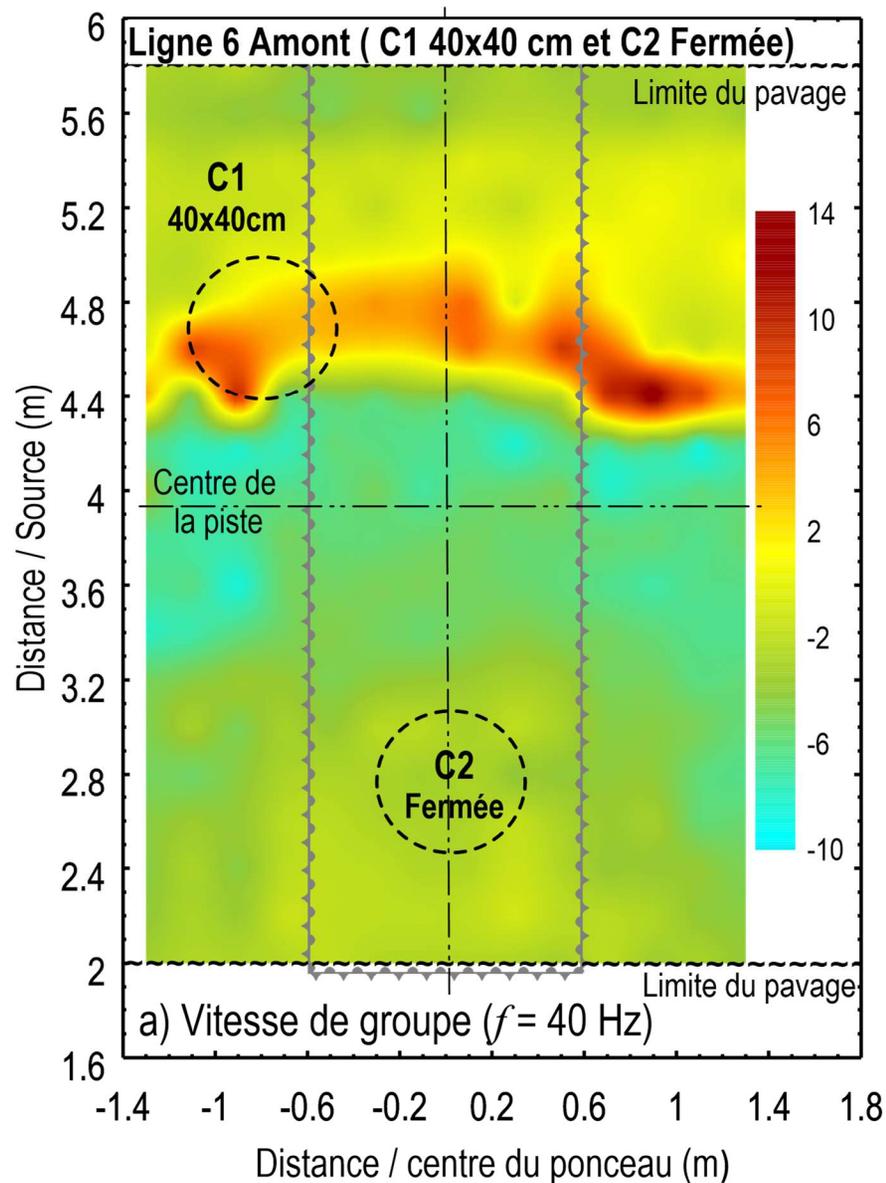


Figure A6. 2: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de cavité C1 de 40x40x40 cm à une fréquence de 40 Hz (Ligne 6 – Amont)

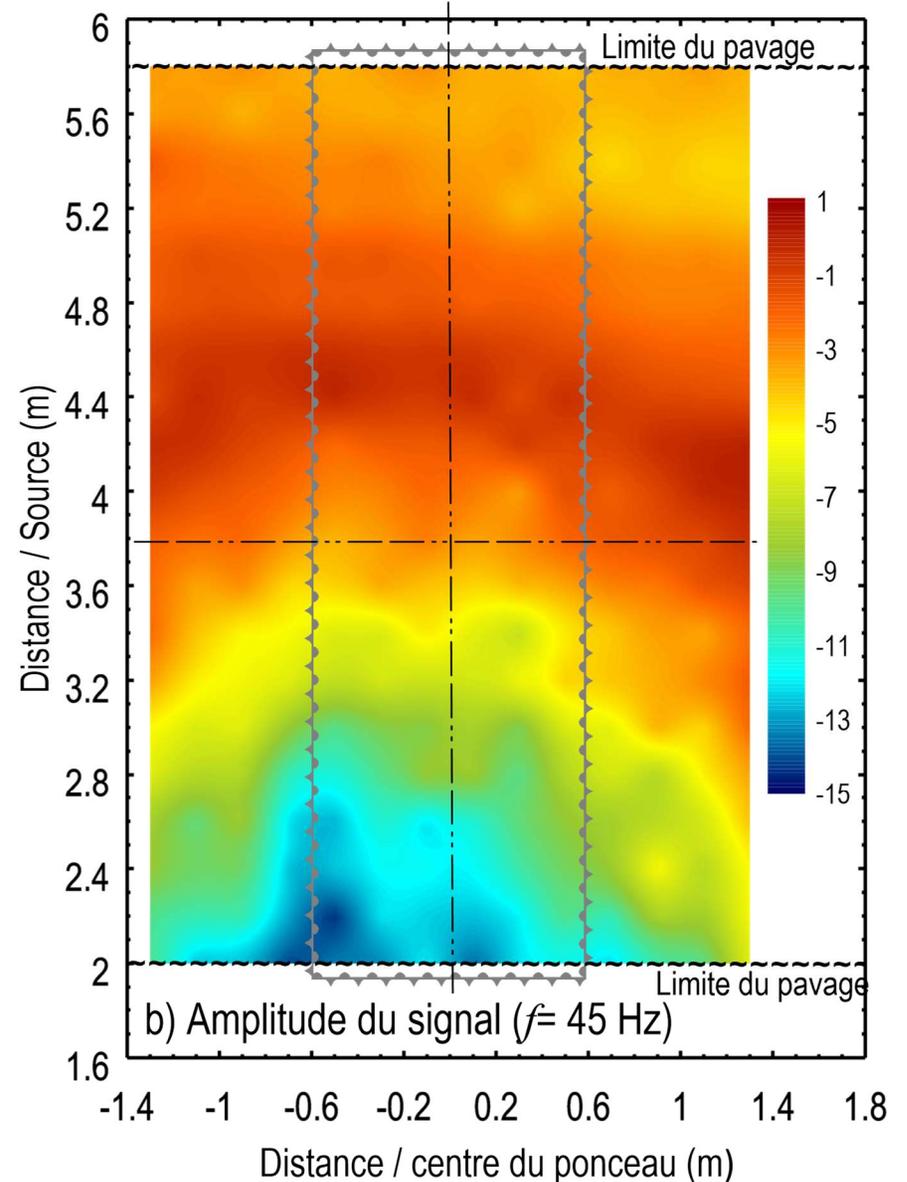
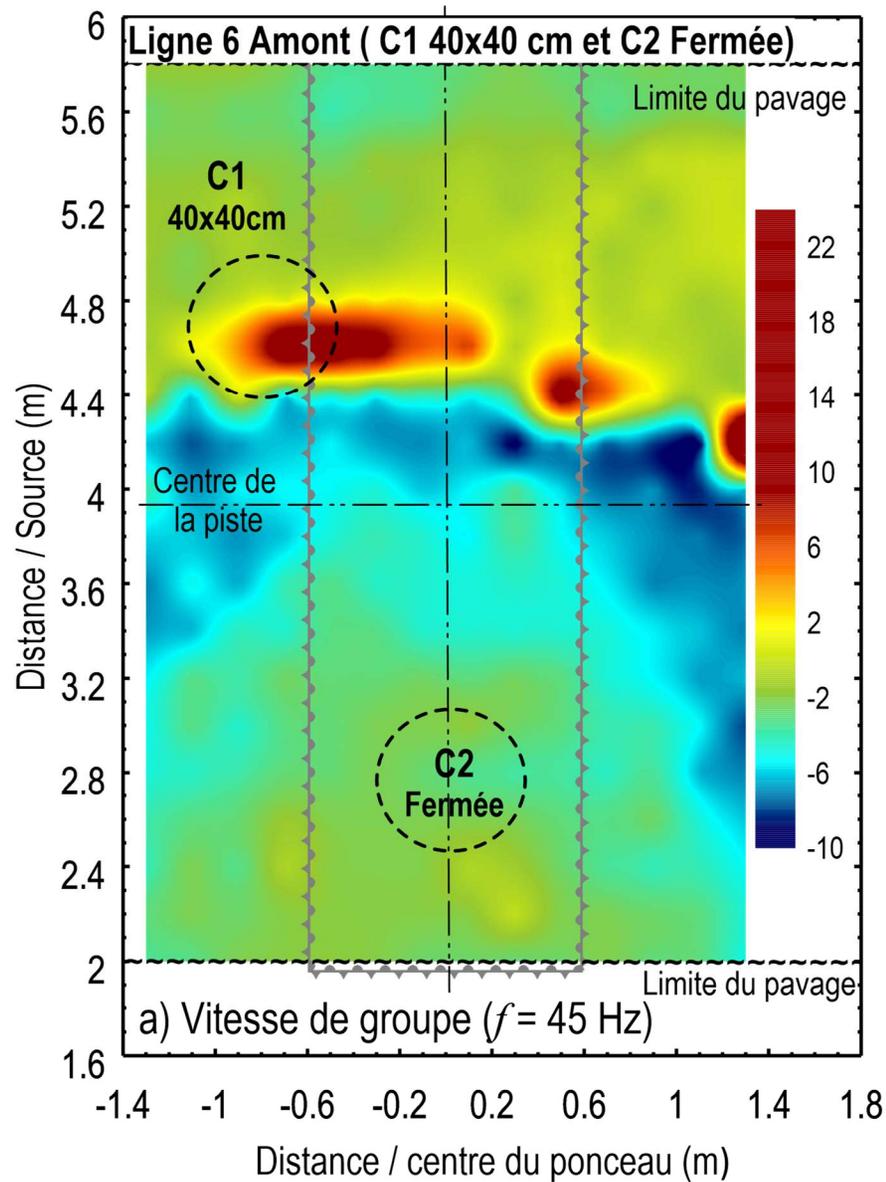


Figure A6. 3: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de cavité C1 de 40x40x40 cm à une fréquence de 45 Hz (Ligne 6 – Amont)

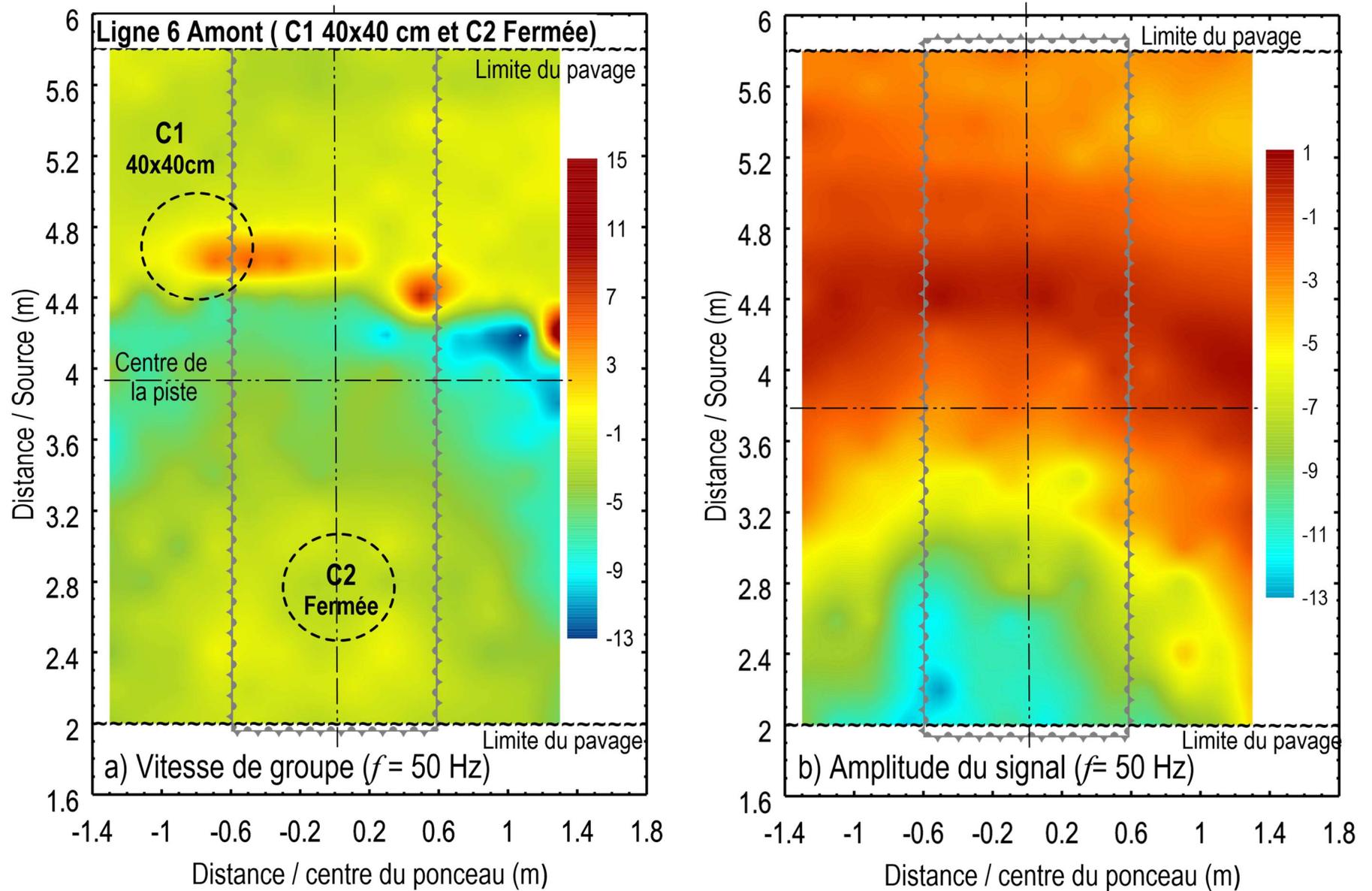


Figure A6. 4: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de cavité C1 de 40x40x40 cm à une fréquence de 50 Hz (Ligne 6 – Amont)

ANNEXE A7 :RÉSULTATS DES ESSAIS
EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 1 AVEC UNE
SOURCE DU CÔTÉ AVAL ET APRÈS LA
CRÉATION DE LA CAVITÉ C1 À 40X40X40
CM

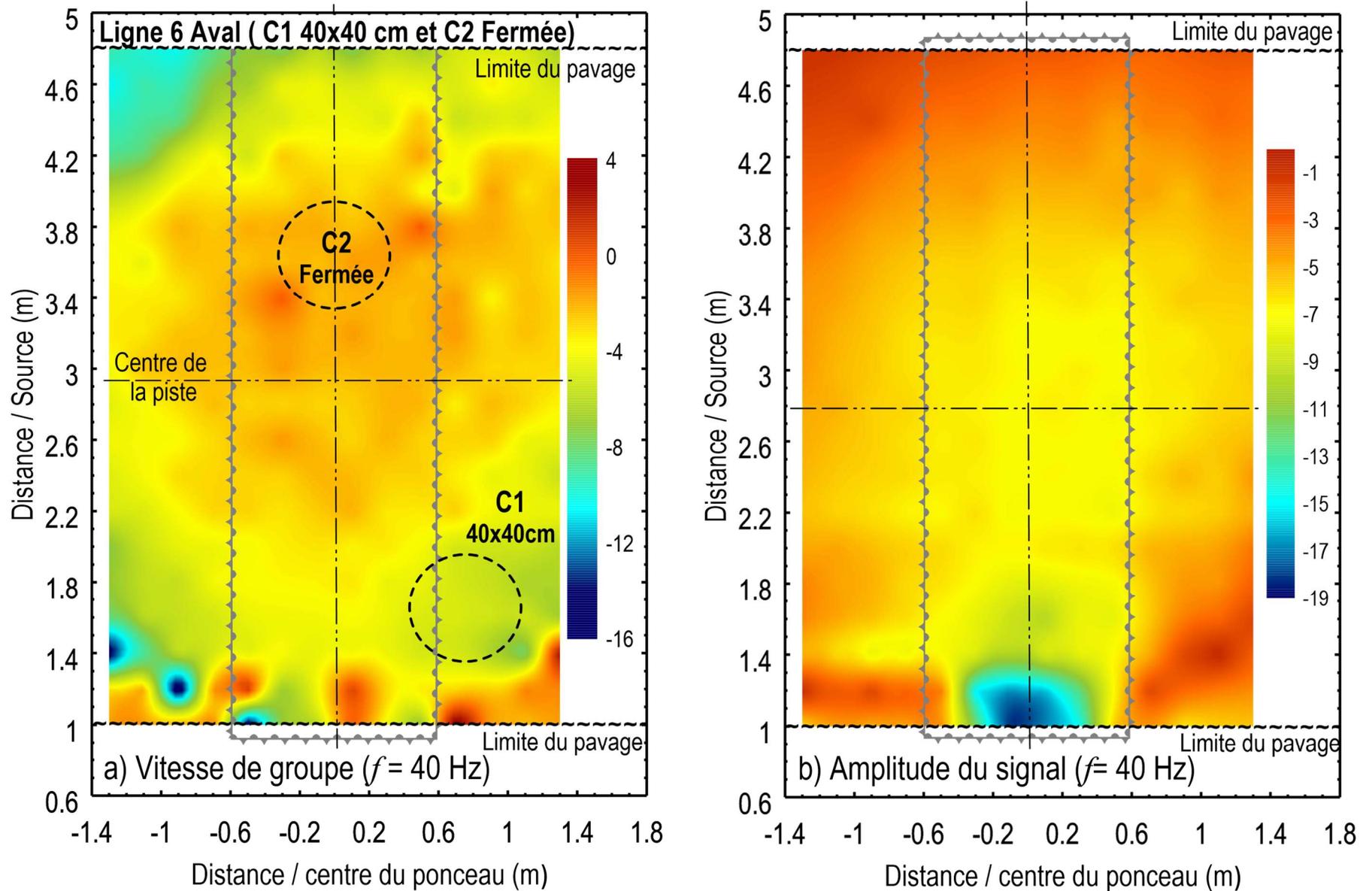


Figure A7. 1: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de cavité C1 de 40x40x40 cm à une fréquence de 40 Hz (Ligne 6 – Aval)

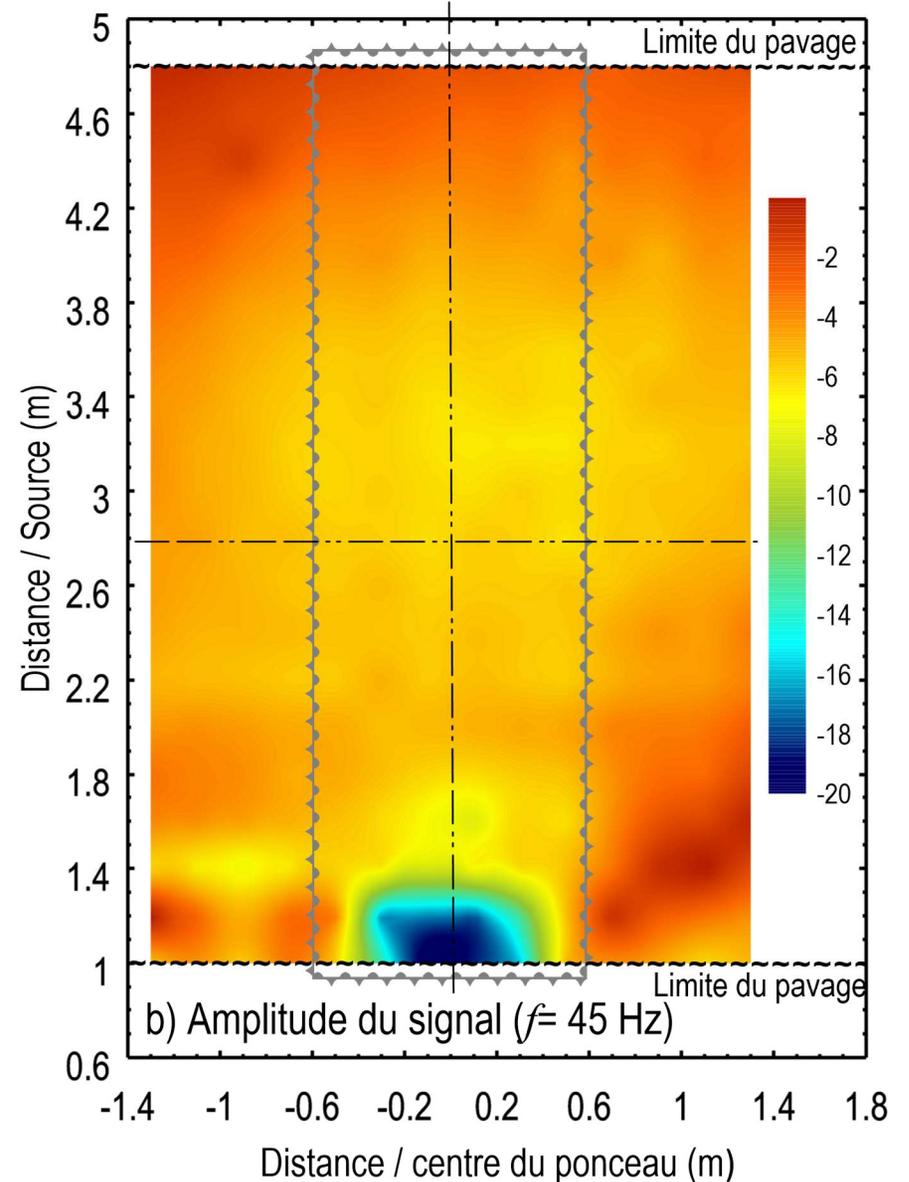
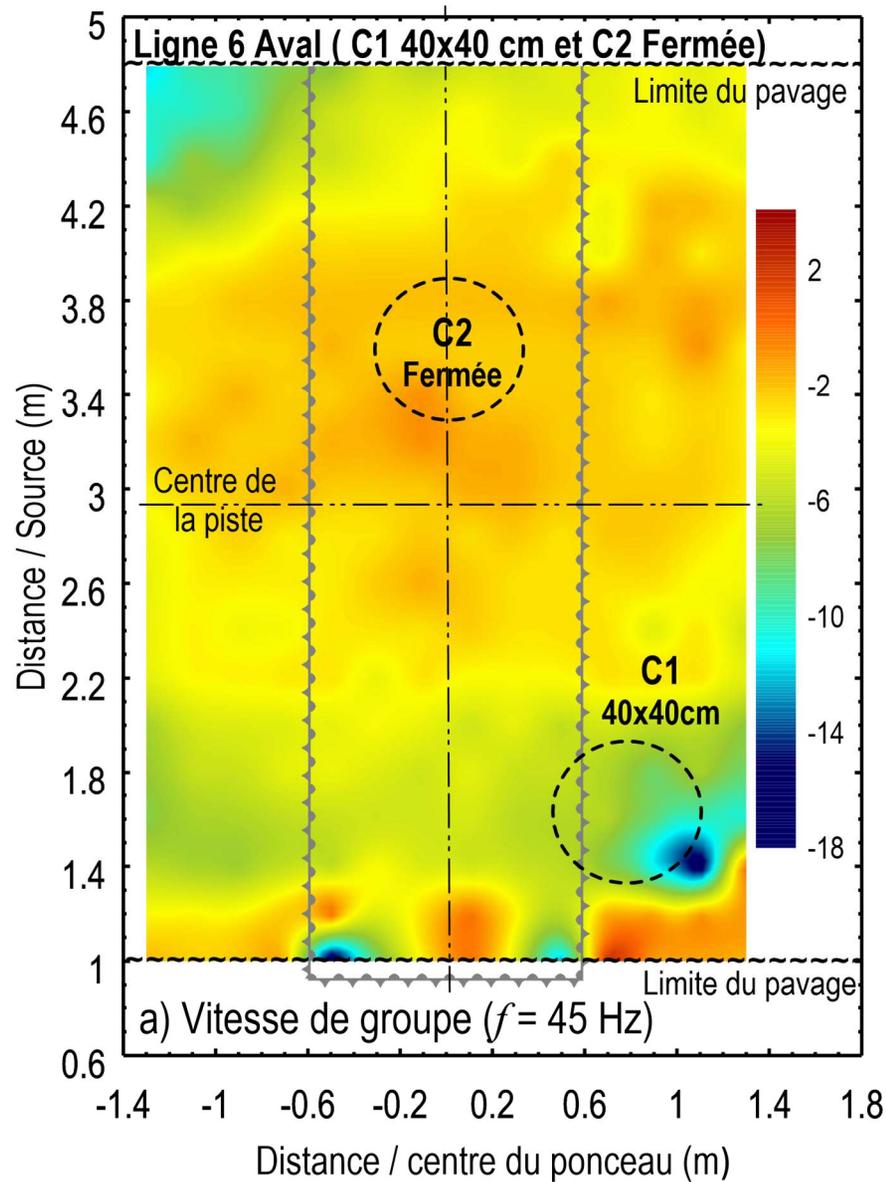


Figure A7. 2: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de cavité C1 de 40x40x40 cm à une fréquence de 45 Hz (Ligne 6 – Aval)

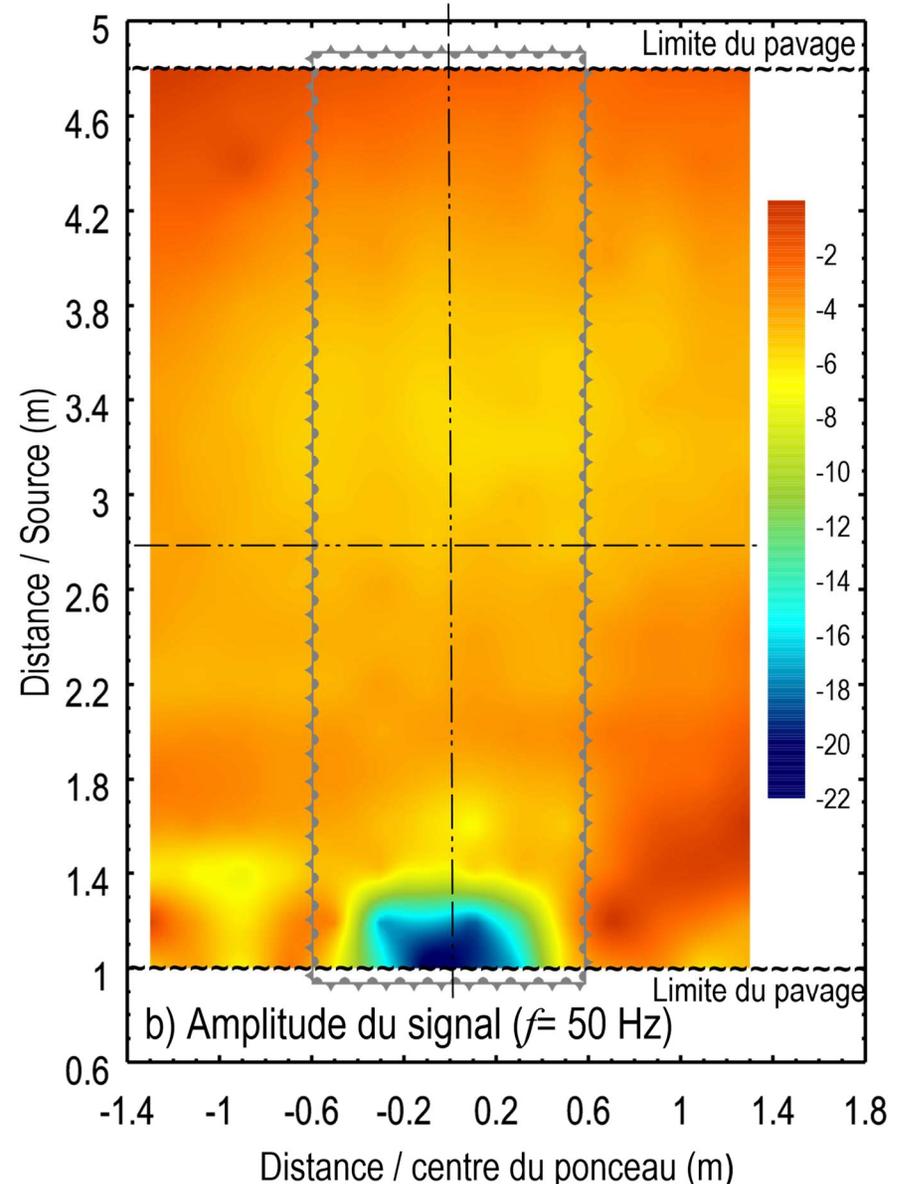
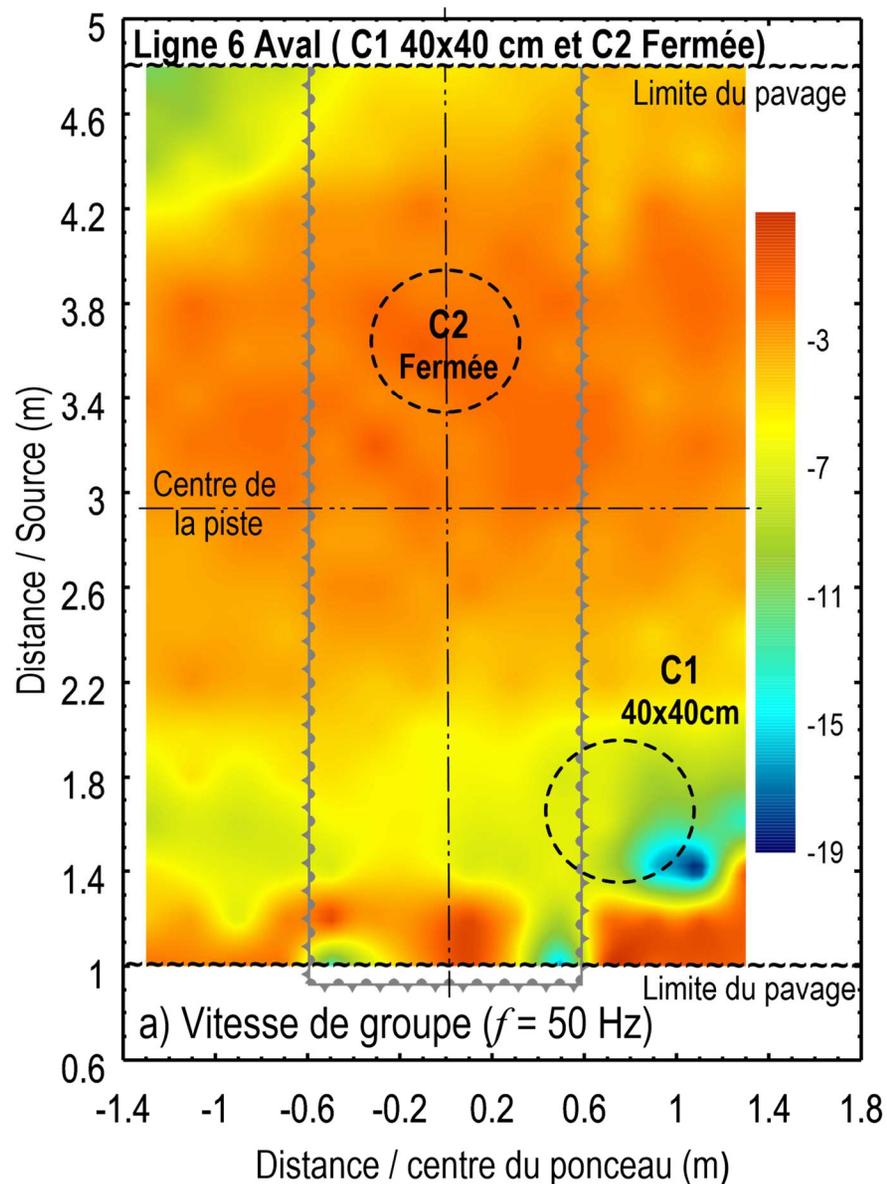


Figure A7. 3: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de cavité C1 de 40x40x40 cm à une fréquence de 50 Hz (Ligne 6 – Aval)

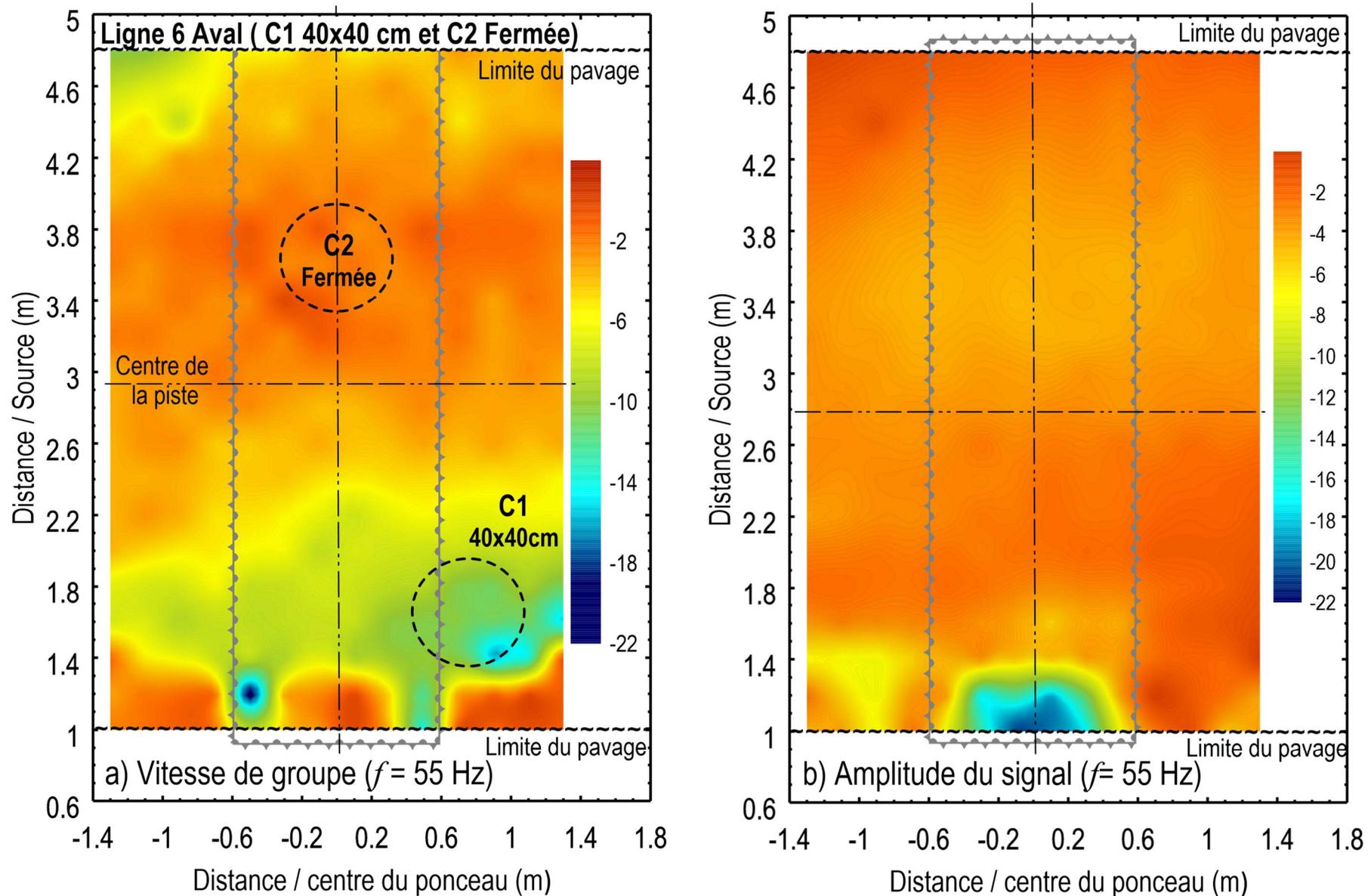


Figure A7. 4: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de cavité C1 de 40x40x40 cm à une fréquence de 55 Hz (Ligne 6 – Aval)

**ANNEXE A8 : RÉSULTATS DES ESSAIS
EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 1 AVEC UNE
SOURCE DU CÔTÉ AMONT ET APRÈS LA
CRÉATION DE LA CAVITÉ C1 À 40X40X40
CM ET DE LA CAVITÉ C2 DE 20X20X20 CM**

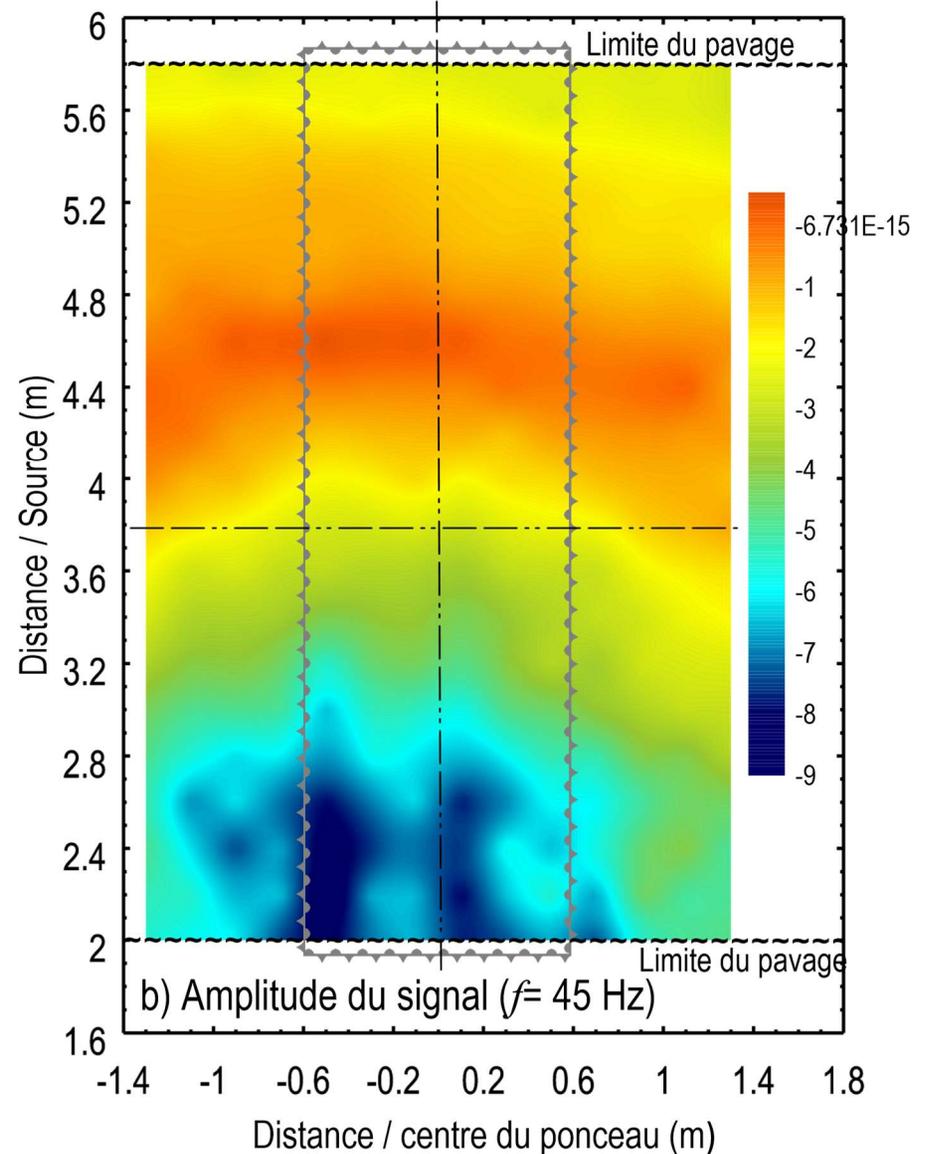
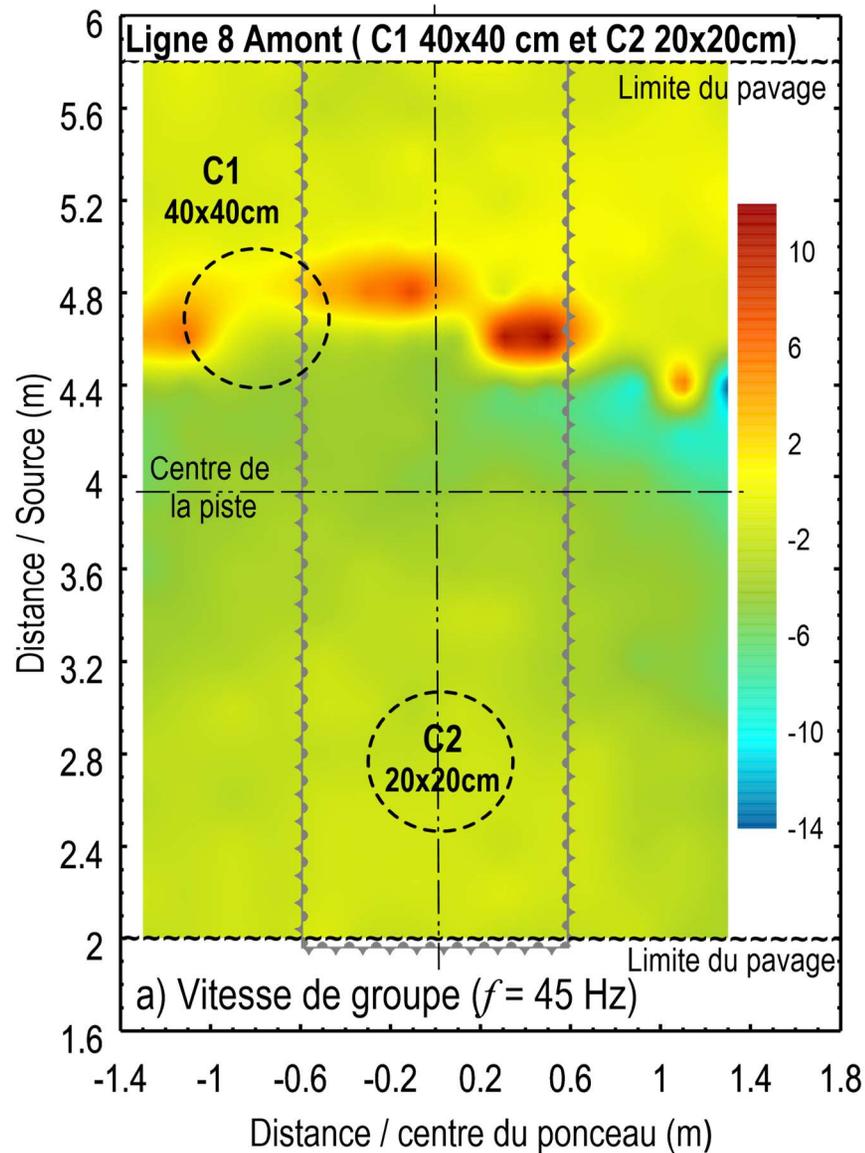


Figure A8. 1: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création des cavités C1 de 40x40x40 cm et C2 de 20x20x20 cm à une fréquence de 45 Hz (Ligne 8 – Amont)

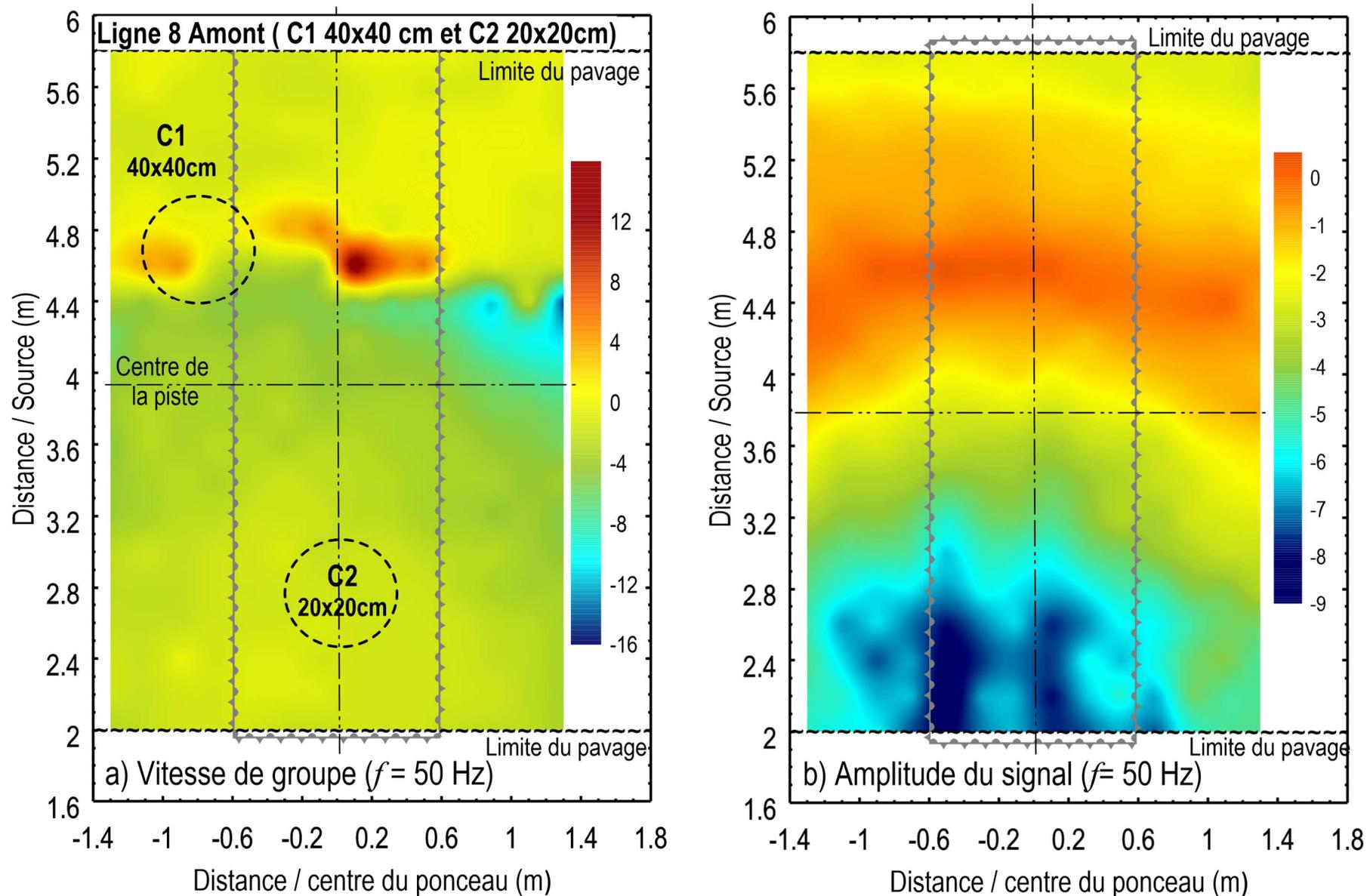


Figure A8. 2: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création des cavité C1 de 40x40x40 cm et C2 de 20x20x20 cm à une fréquence de 50 Hz (Lign8 – Amont)

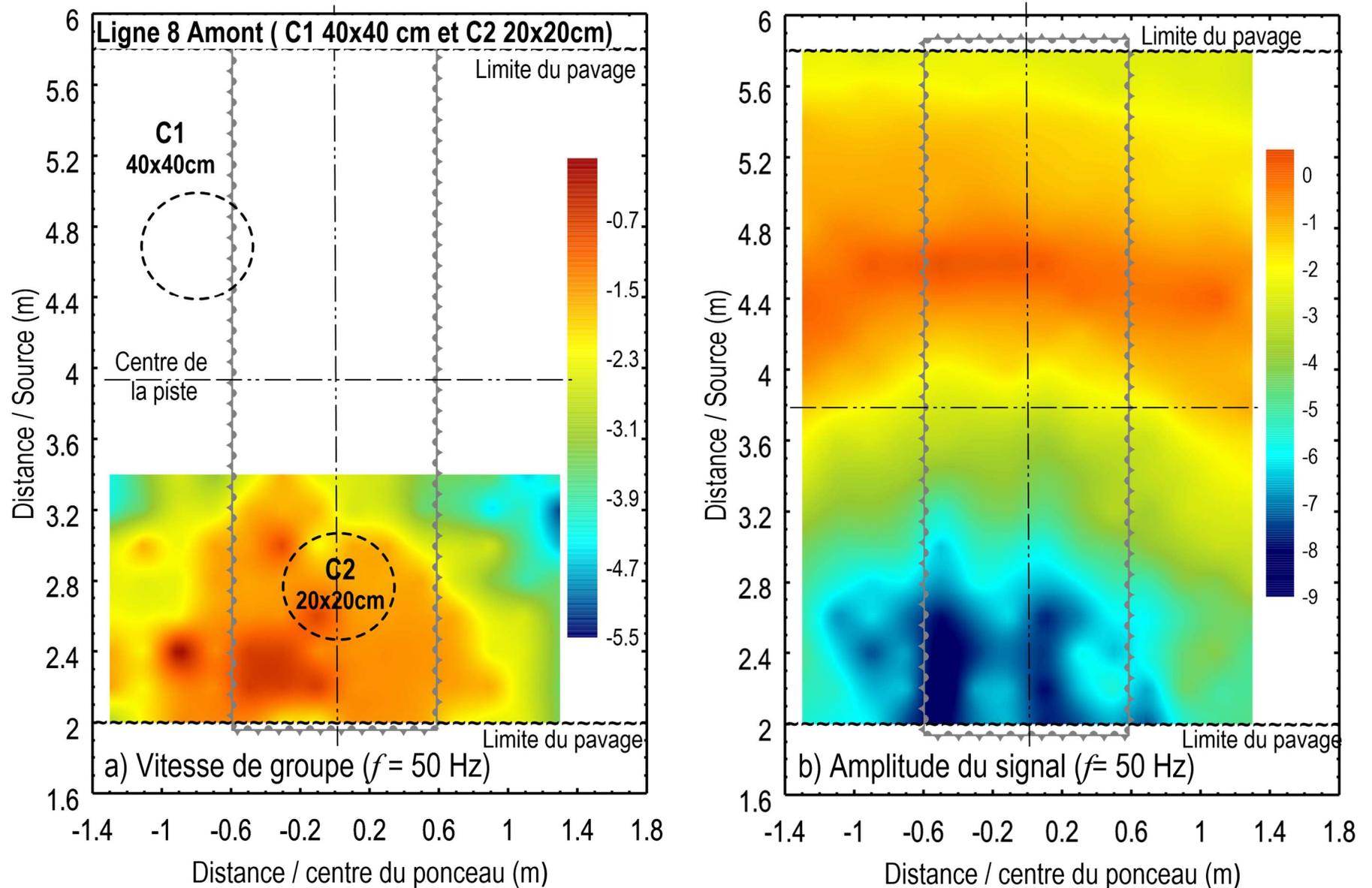


Figure A8. 3: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création des cavité C1 de 40x40x40 cm et C2 de 20x20x20 cm à une fréquence de 50 Hz (Lign8 – Amont) – plus concentré autour de la cavité C2.

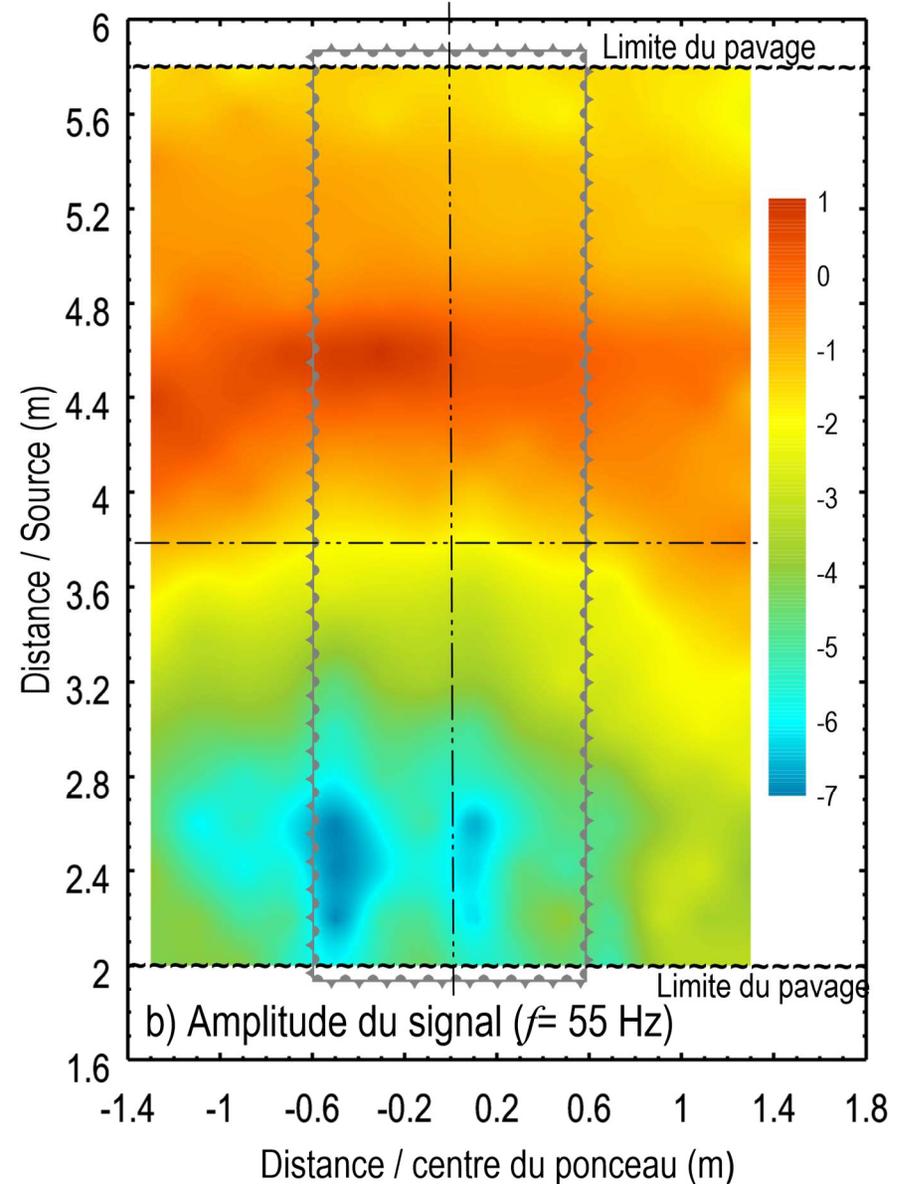
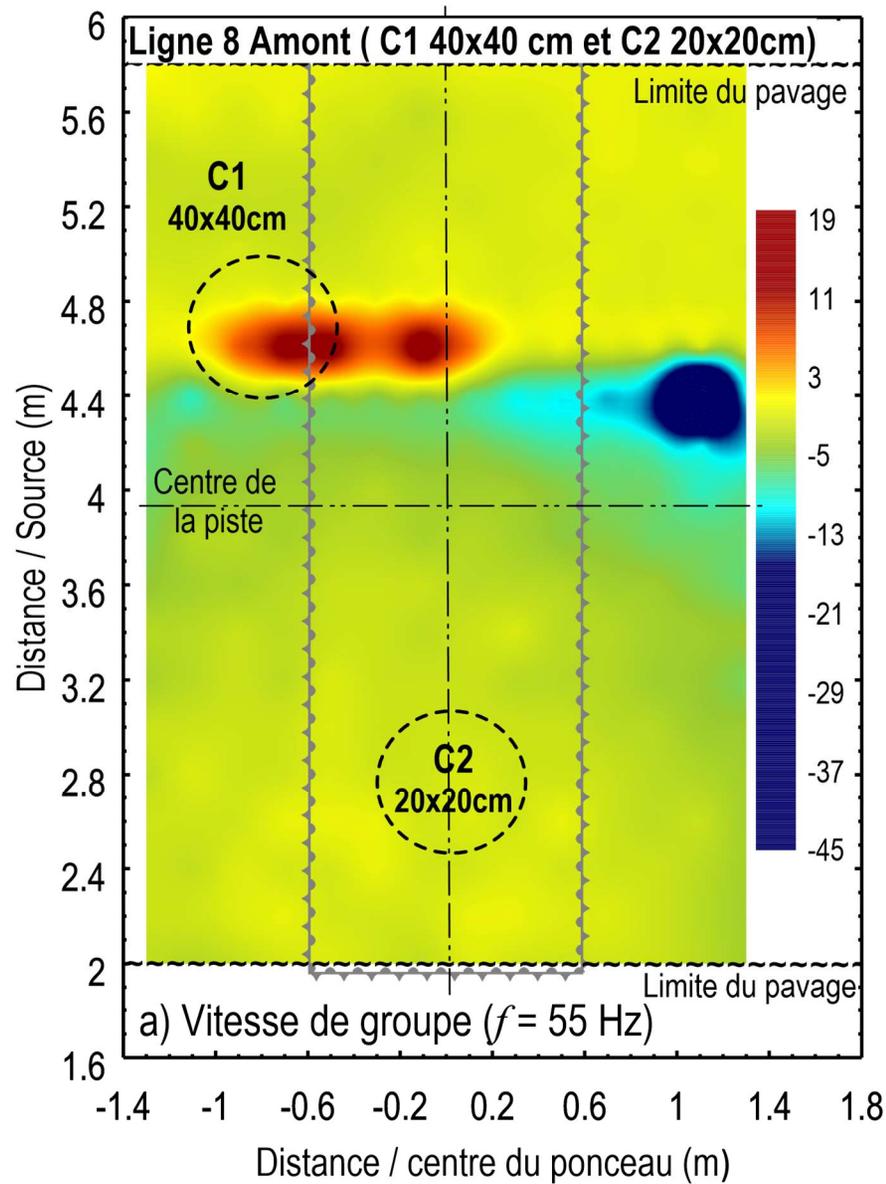


Figure A8. 4: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création des cavités C1 de 40x40x40 cm et C2 de 20x20x20 cm à une fréquence de 55 Hz (Ligne 8 – Amont)

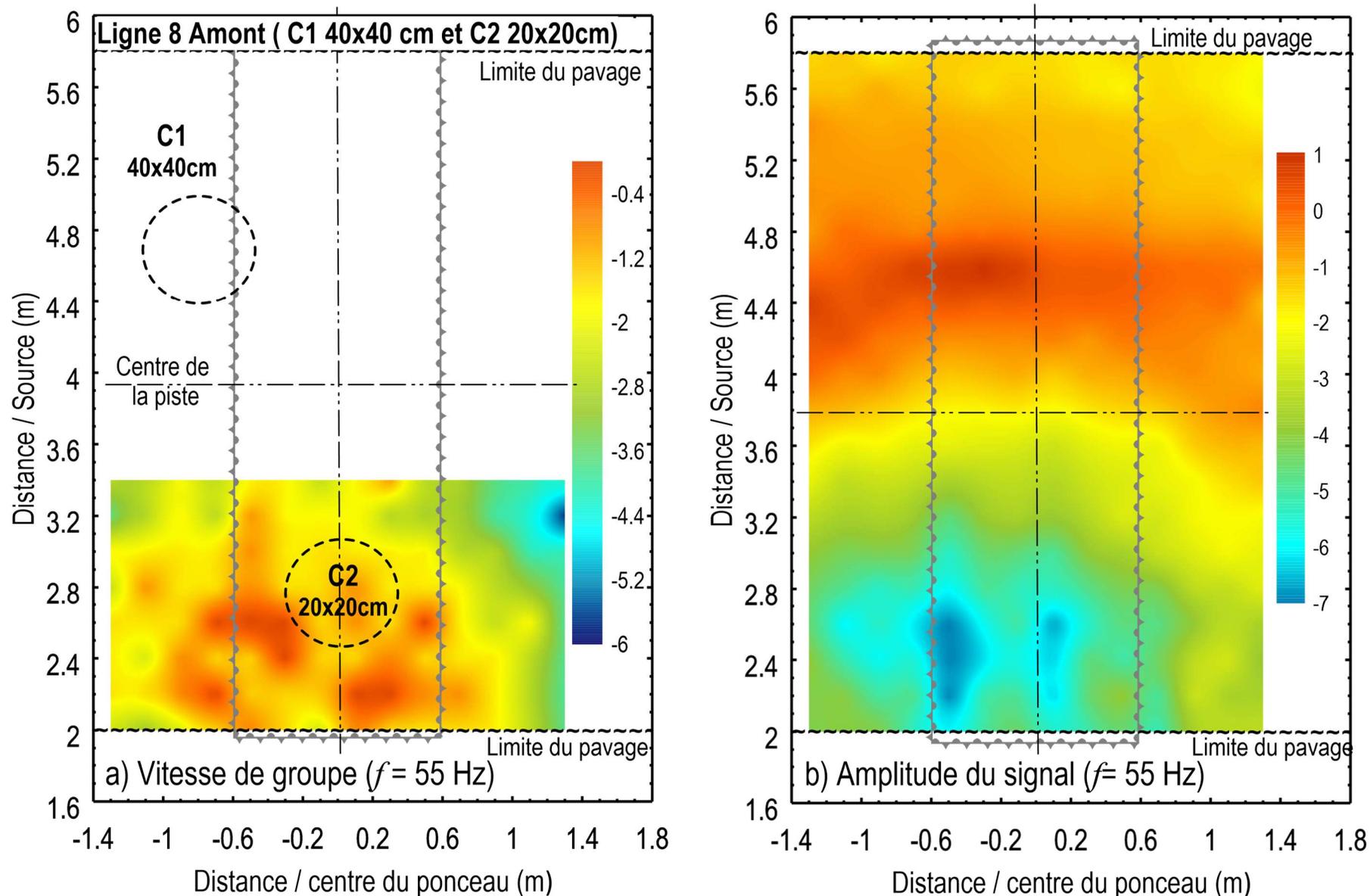


Figure A8. 5: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création des cavités C1 de 40x40x40 cm et C2 de 20x20x20 cm à une fréquence de 55 Hz (Ligne 8 – Amont) – plus concentré autour de la cavité C2

**ANNEXE A9 : RÉSULTATS DES ESSAIS
EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 1 AVEC UNE
SOURCE DU CÔTÉ AVAL ET APRÈS LA
CRÉATION DE LA CAVITÉ C1 À 40X40X40
CM ET DE LA CAVITÉ C2 DE 20X20X20 CM**

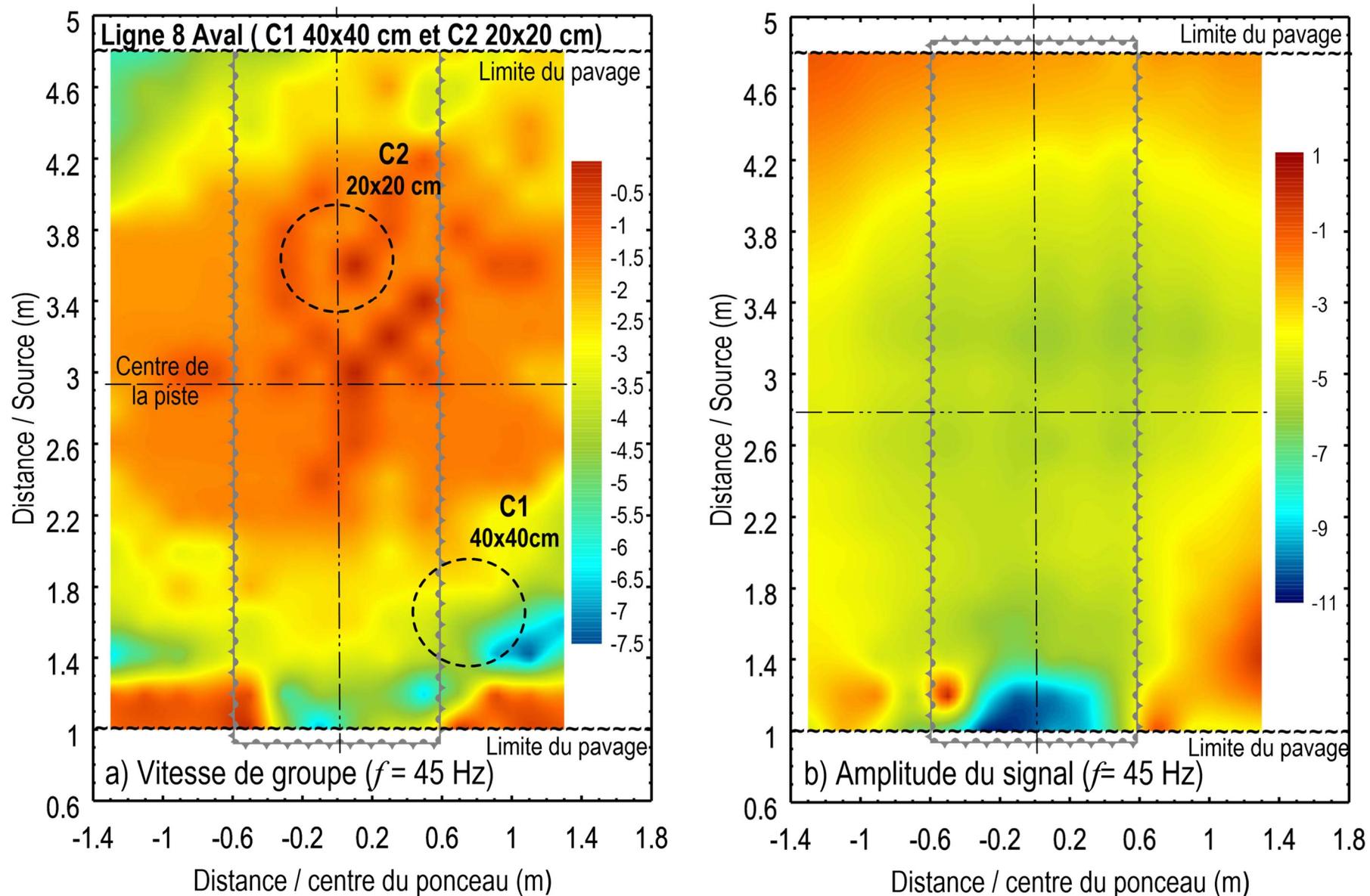


Figure A9. 1: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création des cavité C1 de 40x40x40 cm et C2 de 20x20x20 cm à une fréquence de 45 Hz (Ligne 8-Aval)

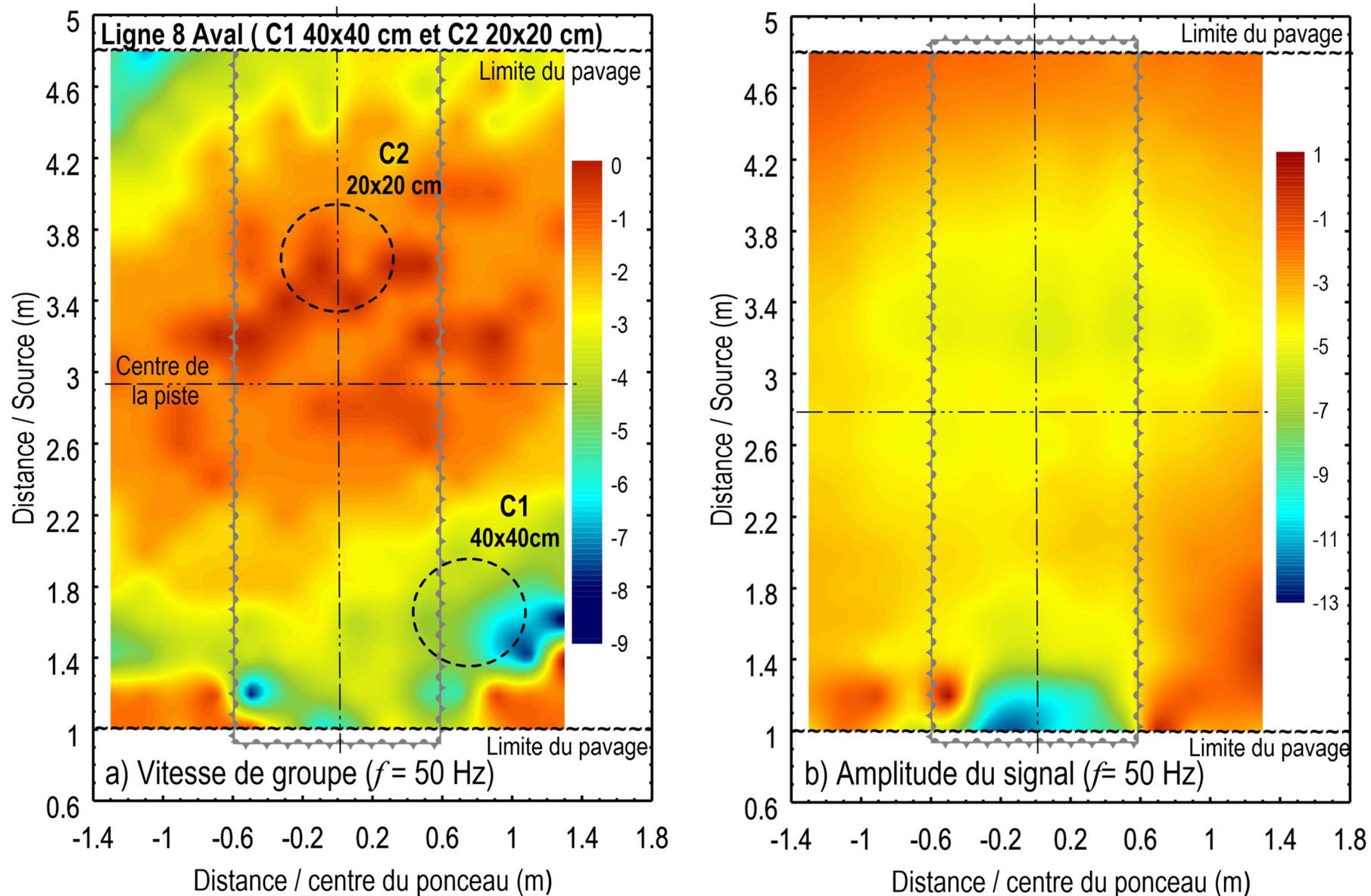


Figure A9. 2: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création des cavité C1 de 40x40x40 cm et C2 de 20x20x20 cm à une fréquence de 50 Hz (Ligne 8-Aval)

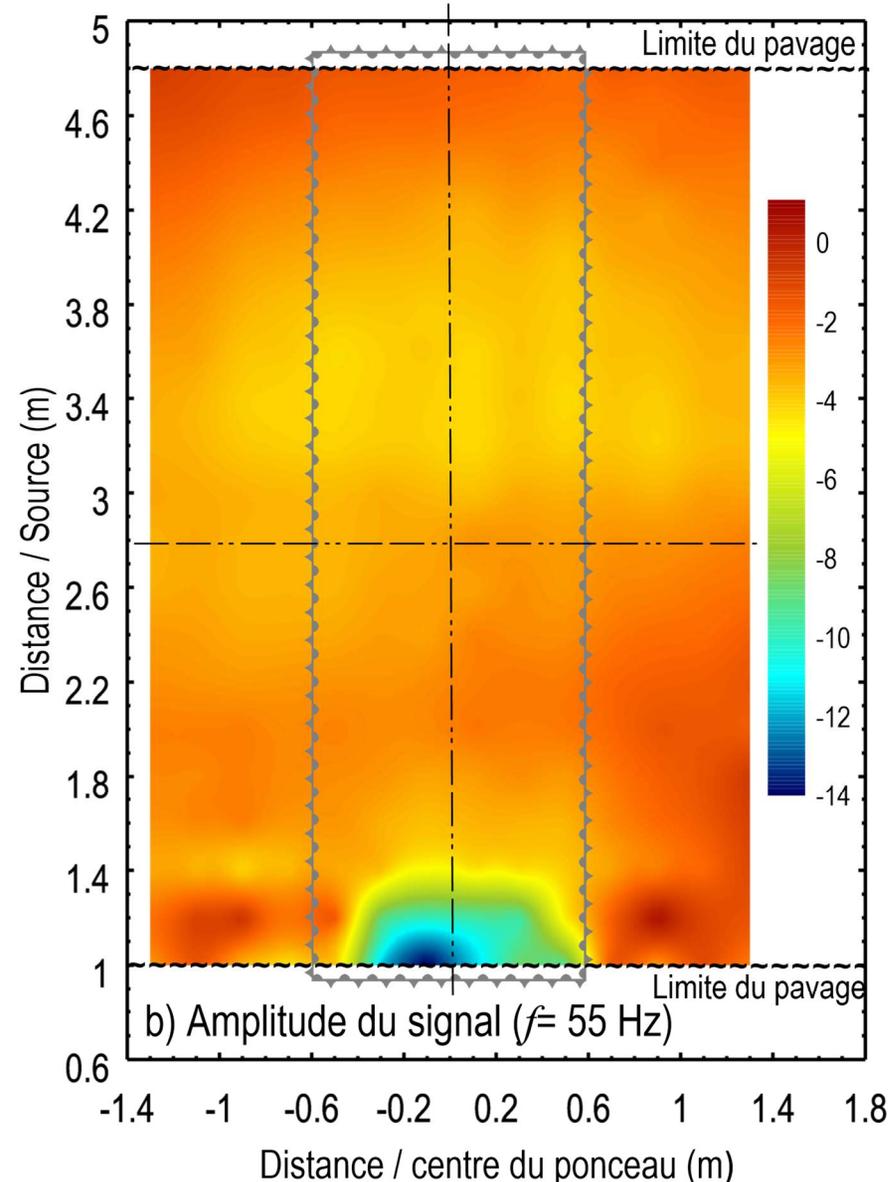
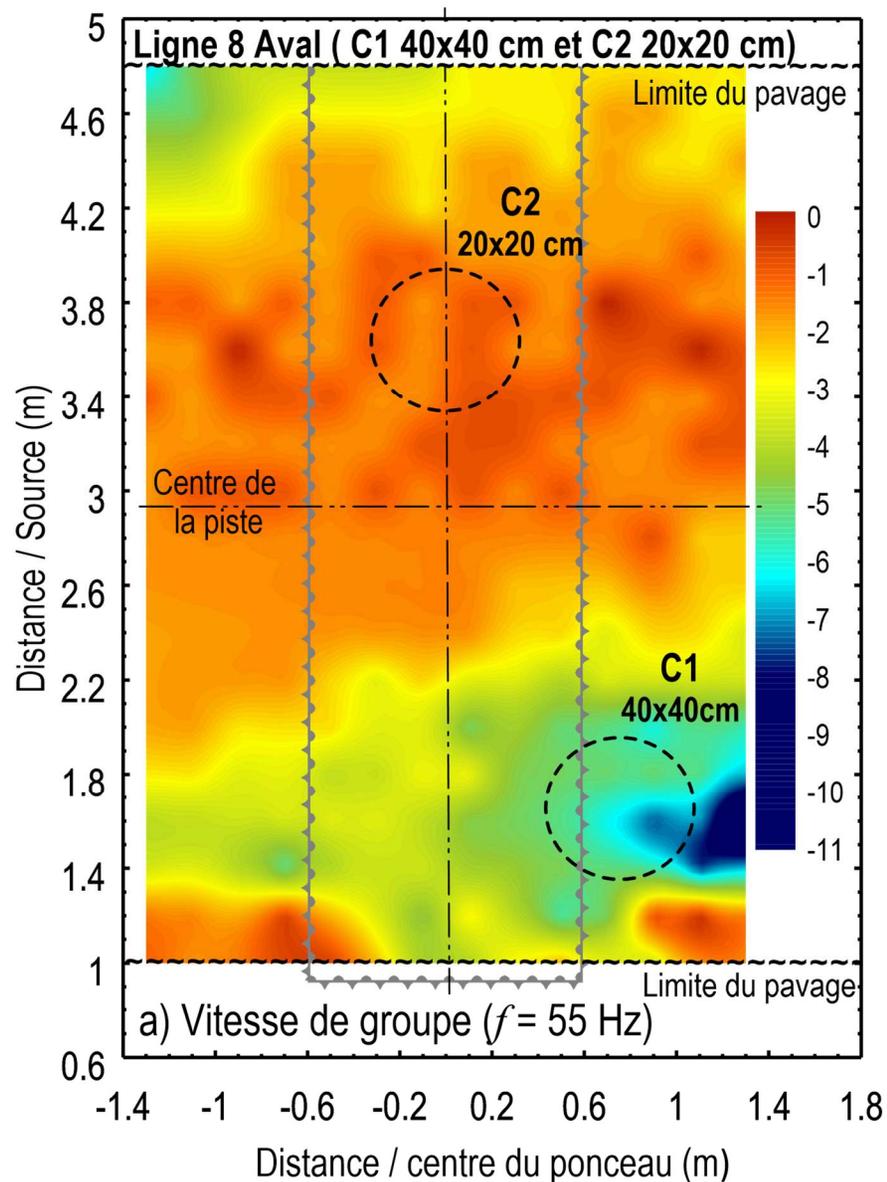


Figure A9. 3: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création des cavité C1 de 40x40x40 cm et C2 de 20x20x20 cm à une fréquence de 55 Hz (Ligne 8 – Aval) – plus concentré autour de la cavité C2

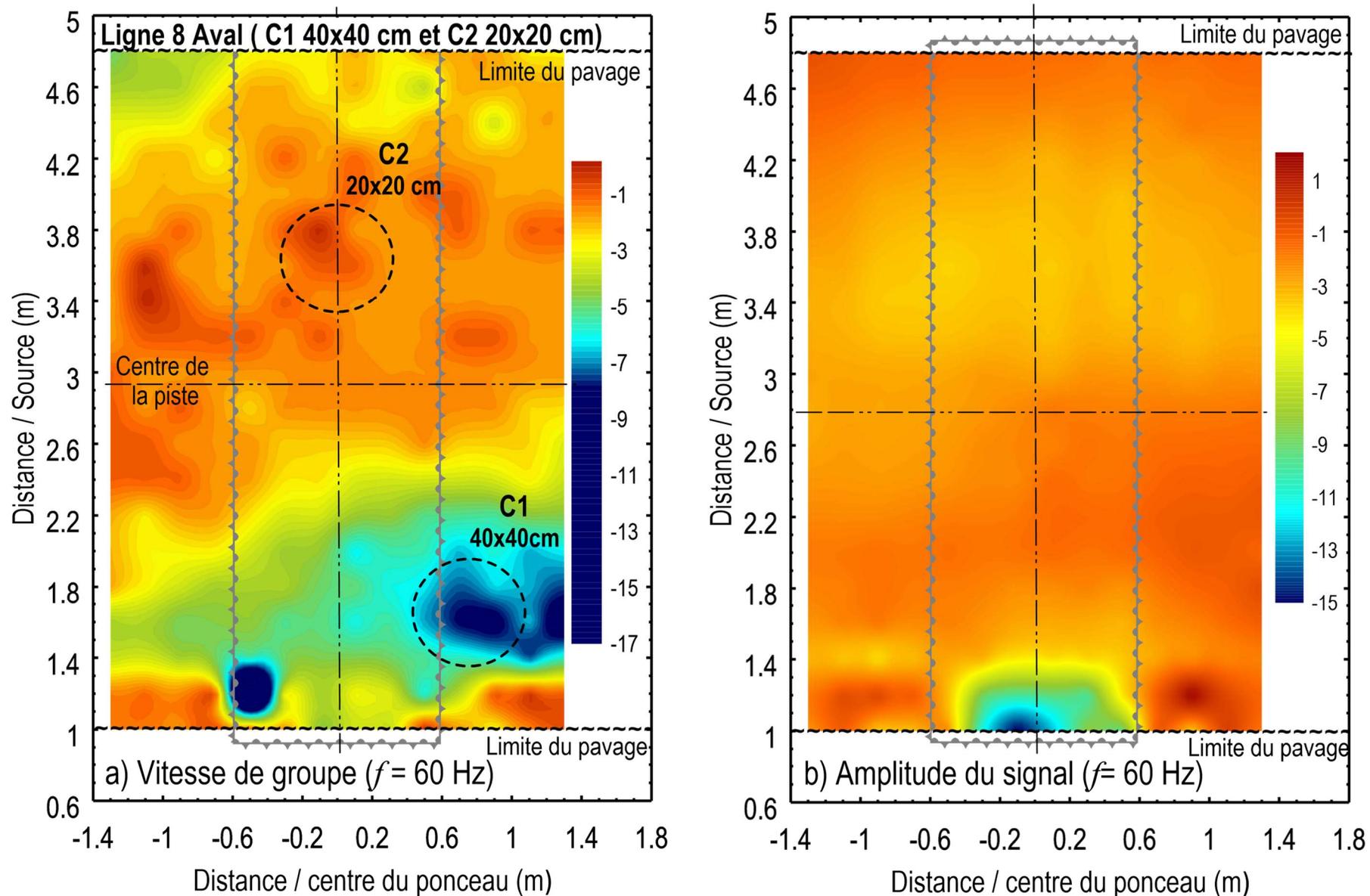


Figure A9. 4: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création des cavité C1 de 40x40x40 cm et C2 de 20x20x20 cm à une fréquence de 60 Hz (Ligne 8 – Aval) – plus concentré autour de la cavité C2

ANNEXE A10 :RÉSULTATS DES ESSAIS
EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 1 AVEC UNE
SOURCE DU CÔTÉ AVAL ET APRÈS LA
CRÉATION DE LA CAVITÉ C1 À 40X40X40
CM ET DE LA CAVITÉ C2 DE 40X40X40 CM

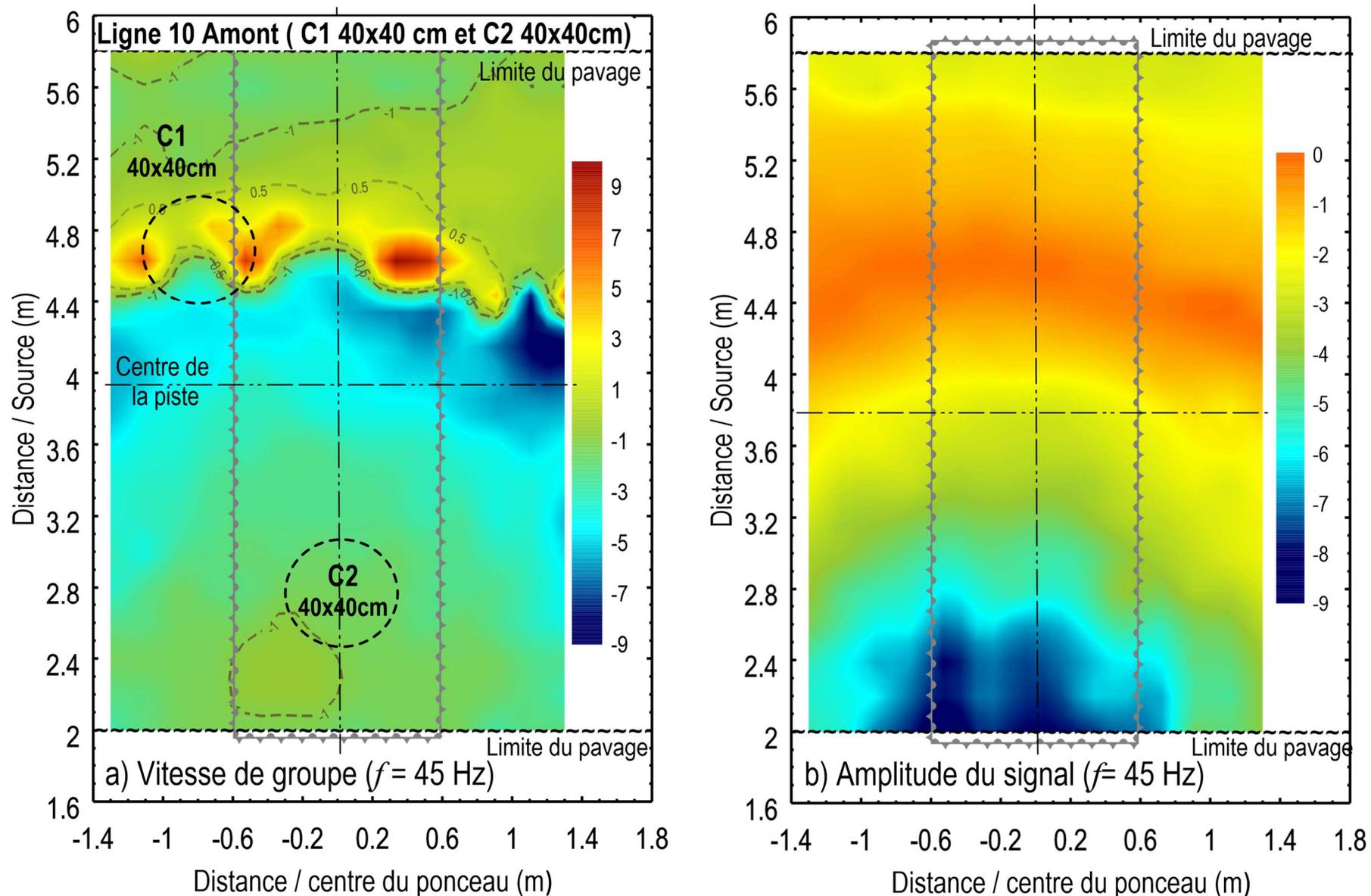


Figure A10. 1: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création des cavité C1 de 40x40x40 cm et C2 de 40x40x40 cm à une fréquence de 45 Hz (Ligne 10 – Amont)

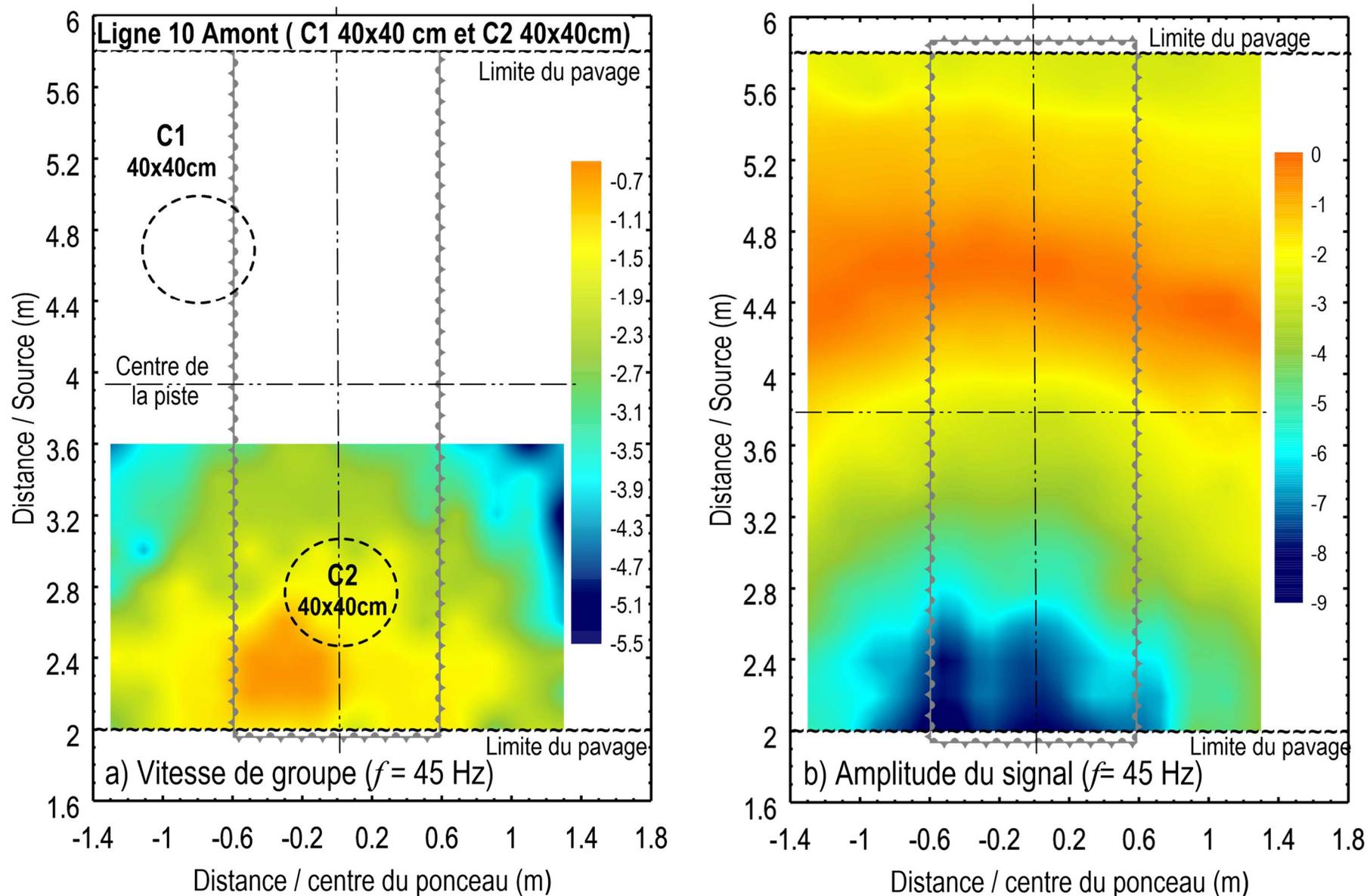


Figure A10. 2: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création des cavités C1 de 40x40x40 cm et C2 de 40x40x40 cm à une fréquence de 45 Hz (Ligne 10 – Amont) – plus concentré autour de la cavité C2

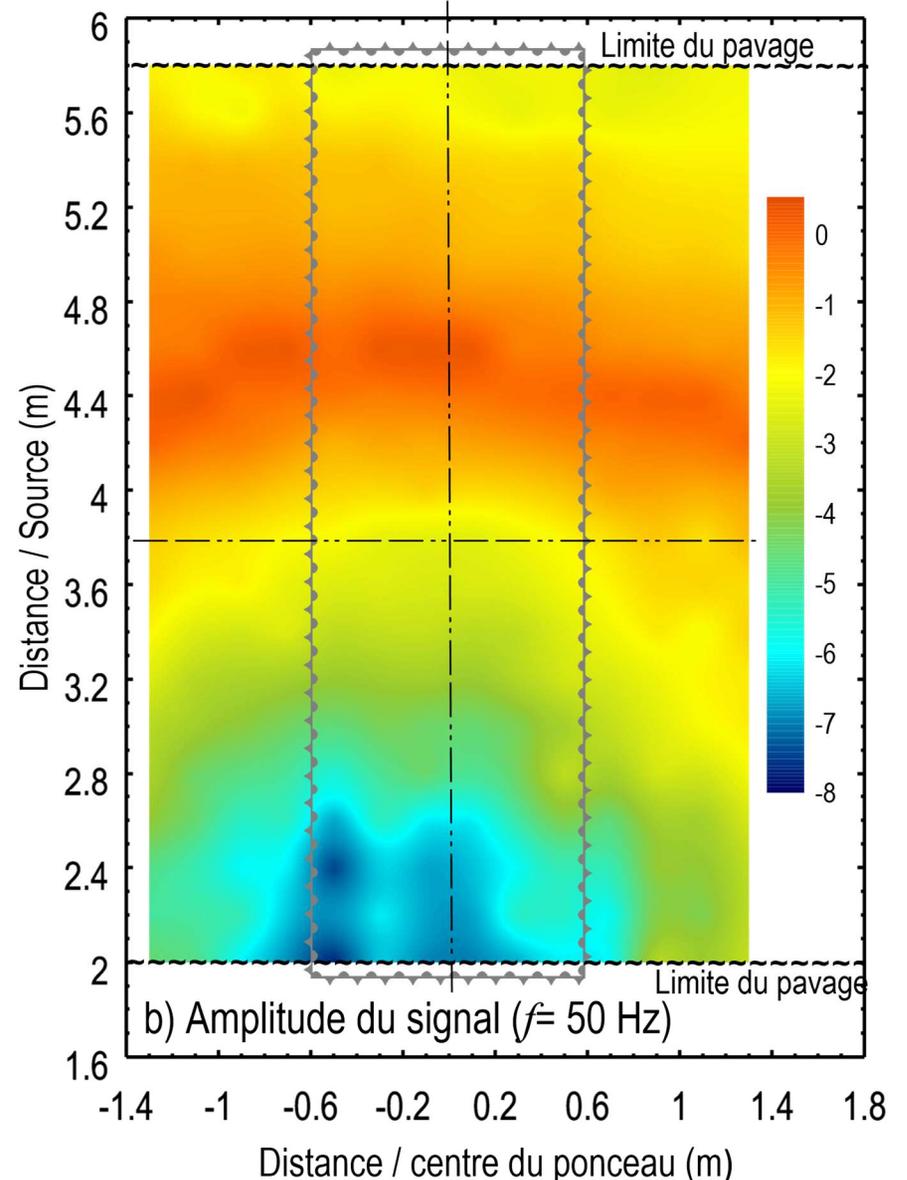
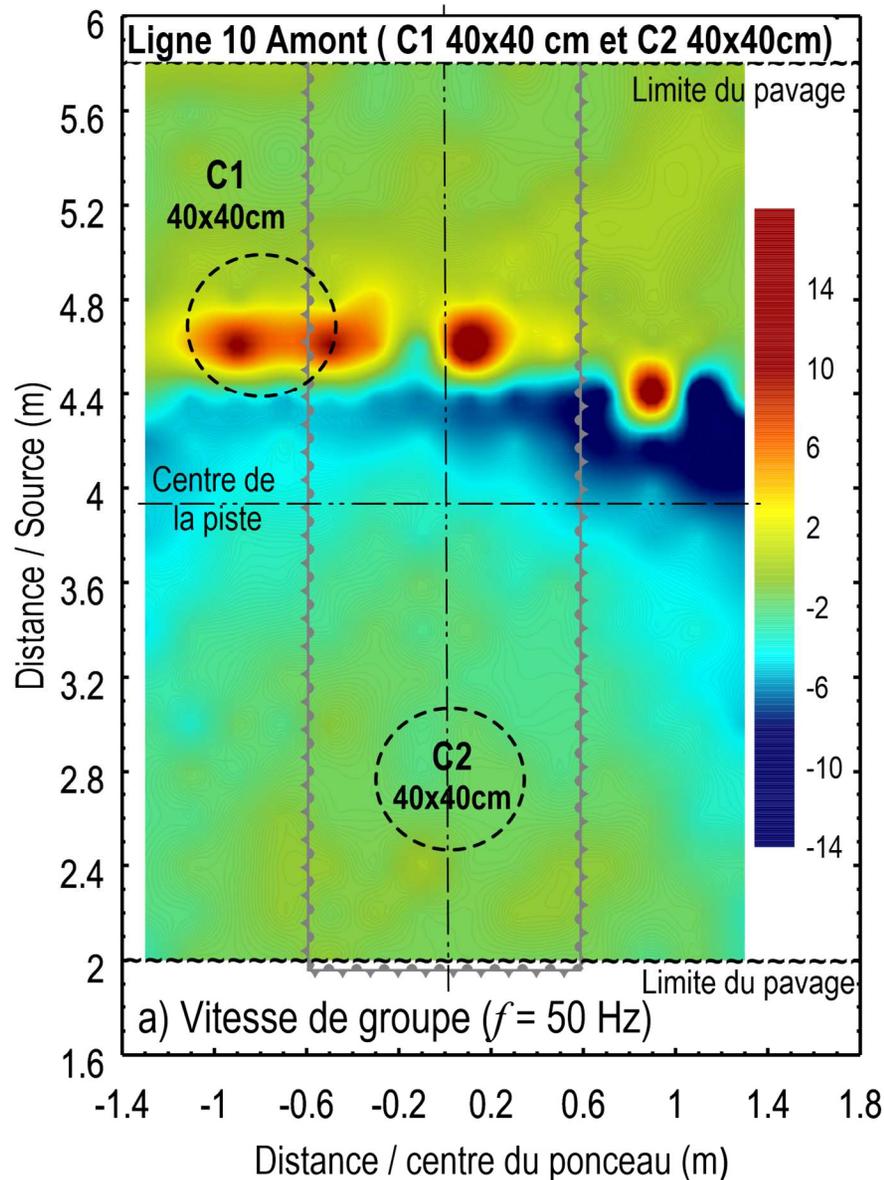


Figure A10. 3: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création des cavités C1 de 40x40x40 cm et C2 de 40x40x40 cm à une fréquence de 45 Hz

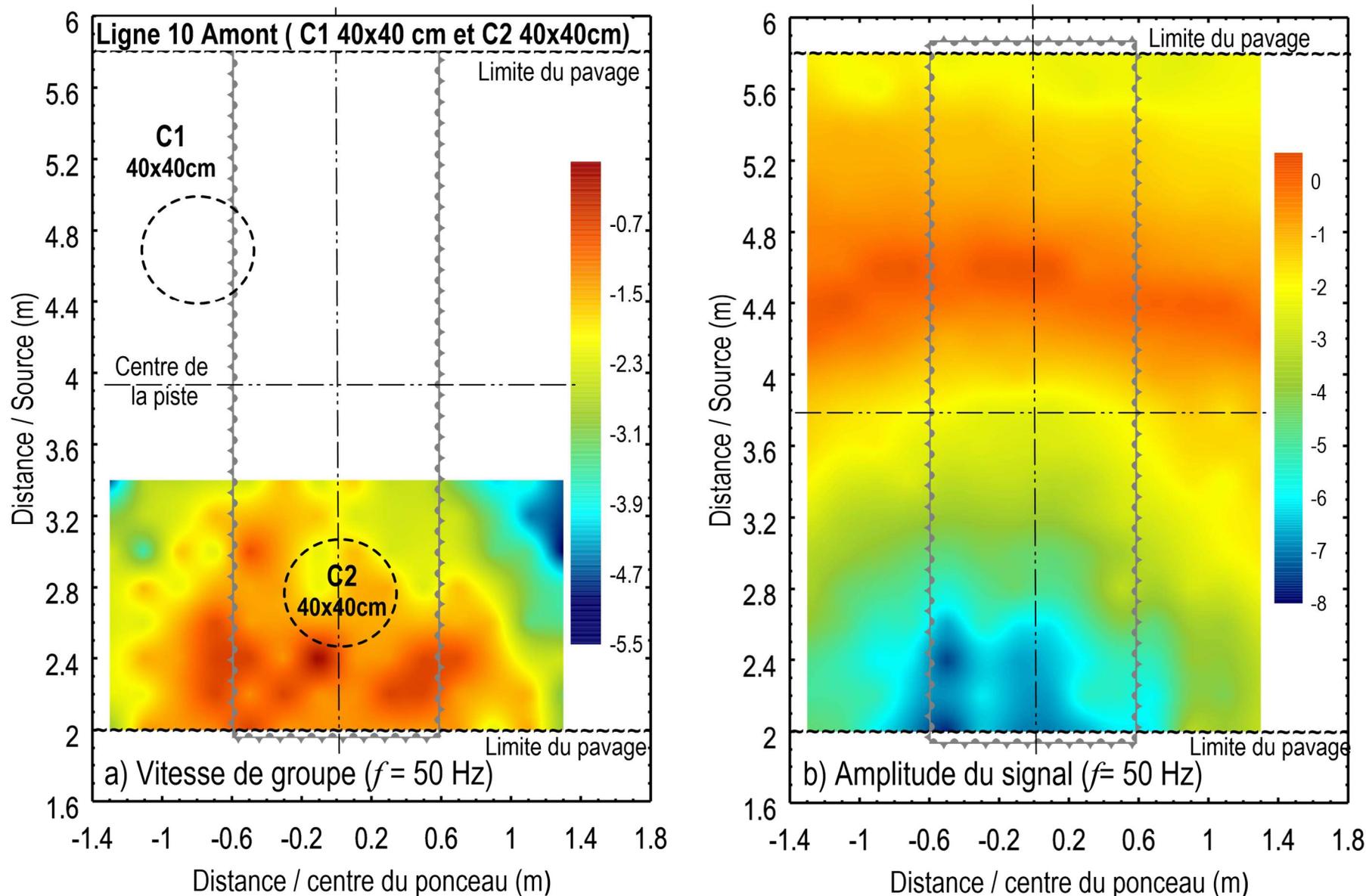


Figure A10. 4: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création des cavité C1 de 40x40x40 cm et C2 de 40x40x40 cm à une fréquence de 45 Hz (Ligne 10 – Amont) – plus concentré autour de la cavité C2

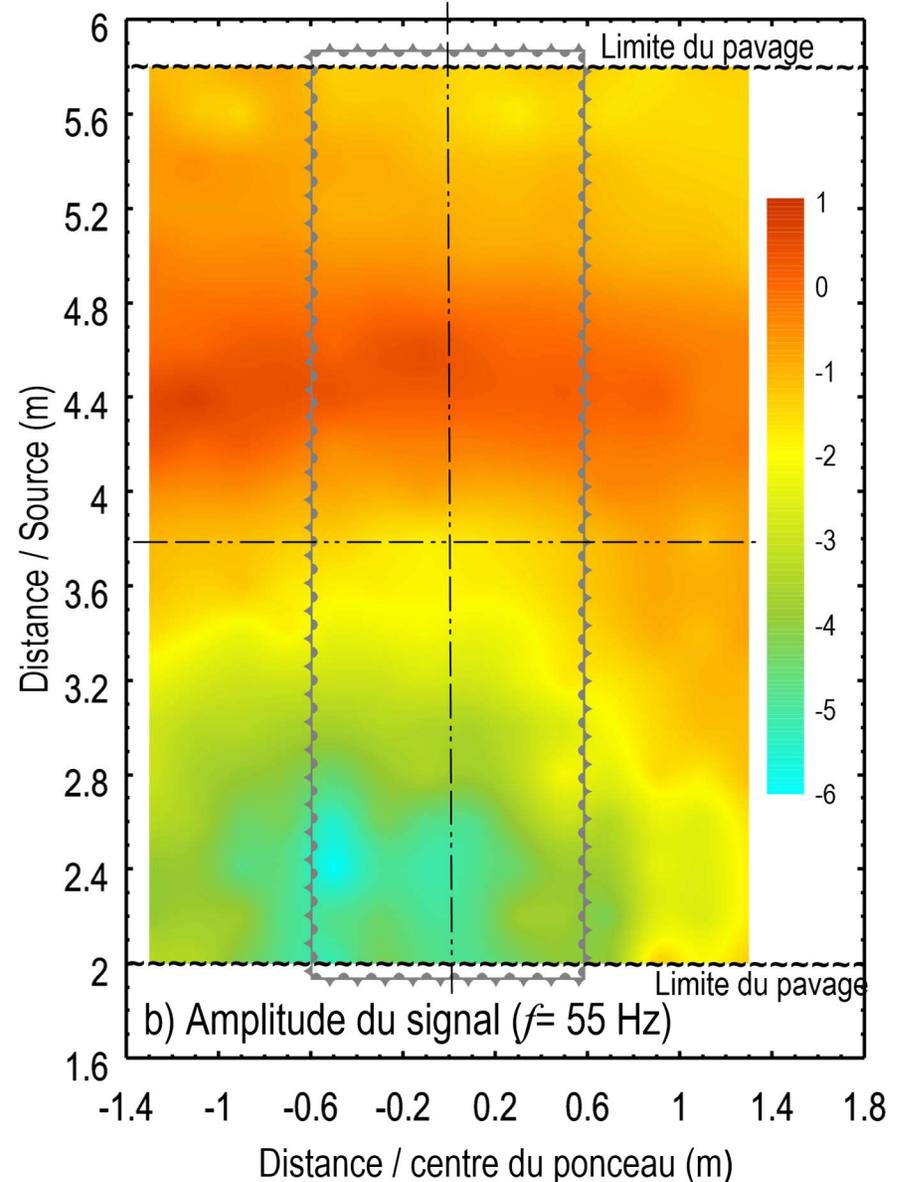
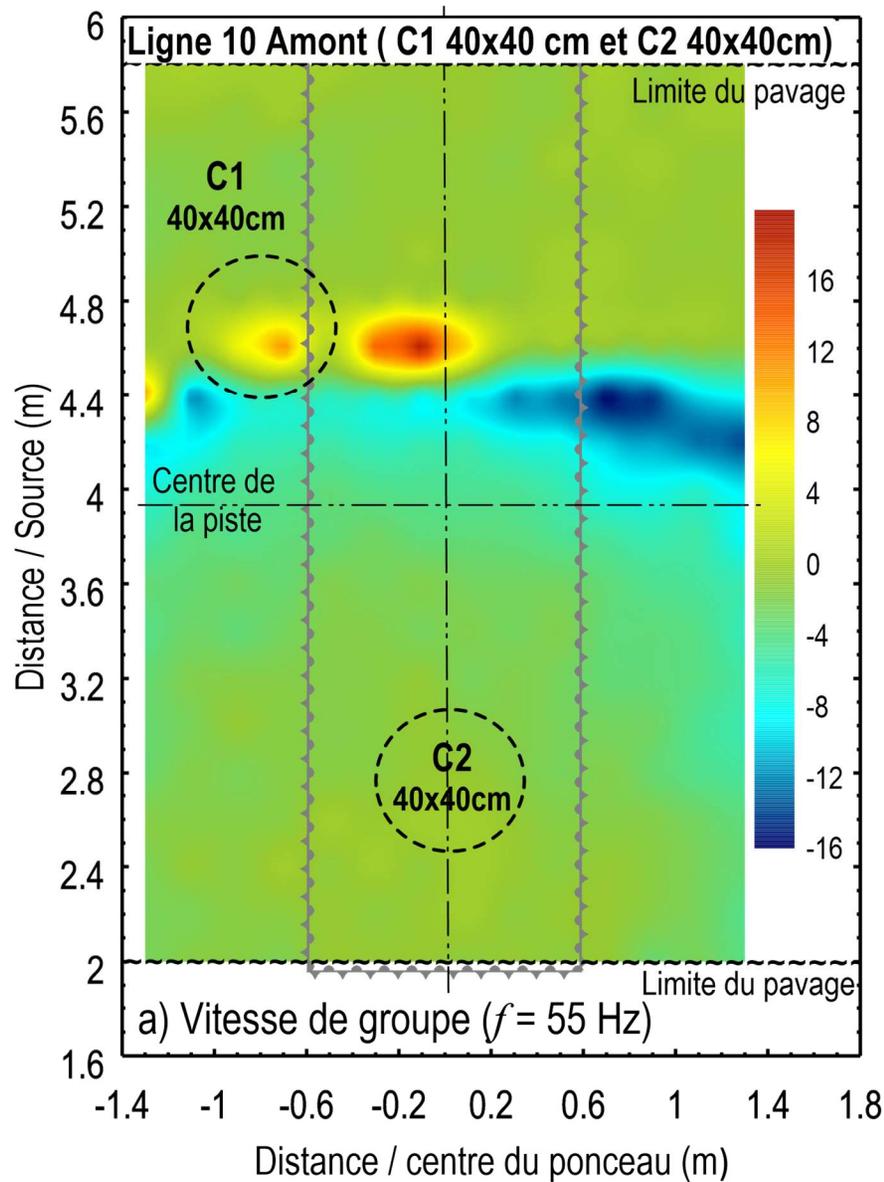


Figure A10. 5: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création des cavité C1 de 40x40x40 cm et C2 de 40x40x40 cm à une fréquence de 45 Hz

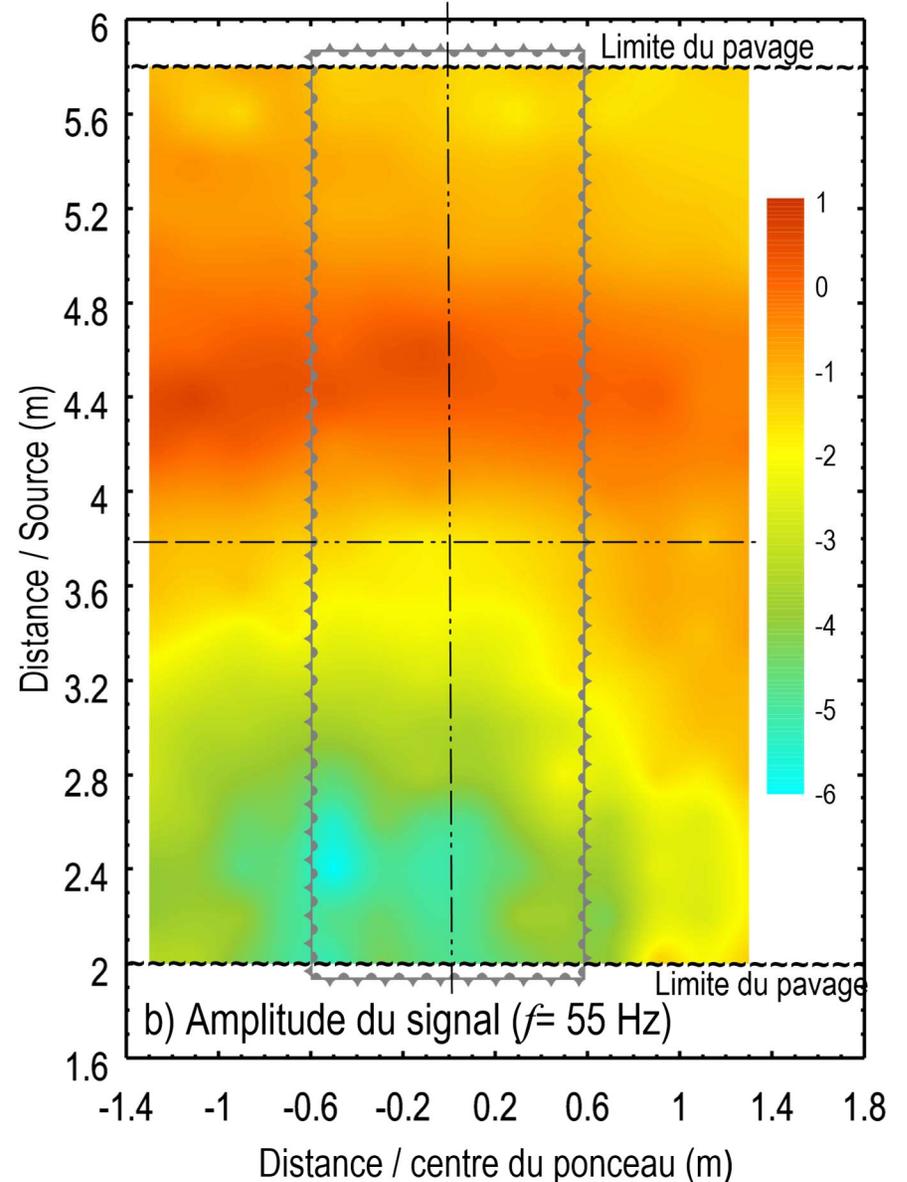
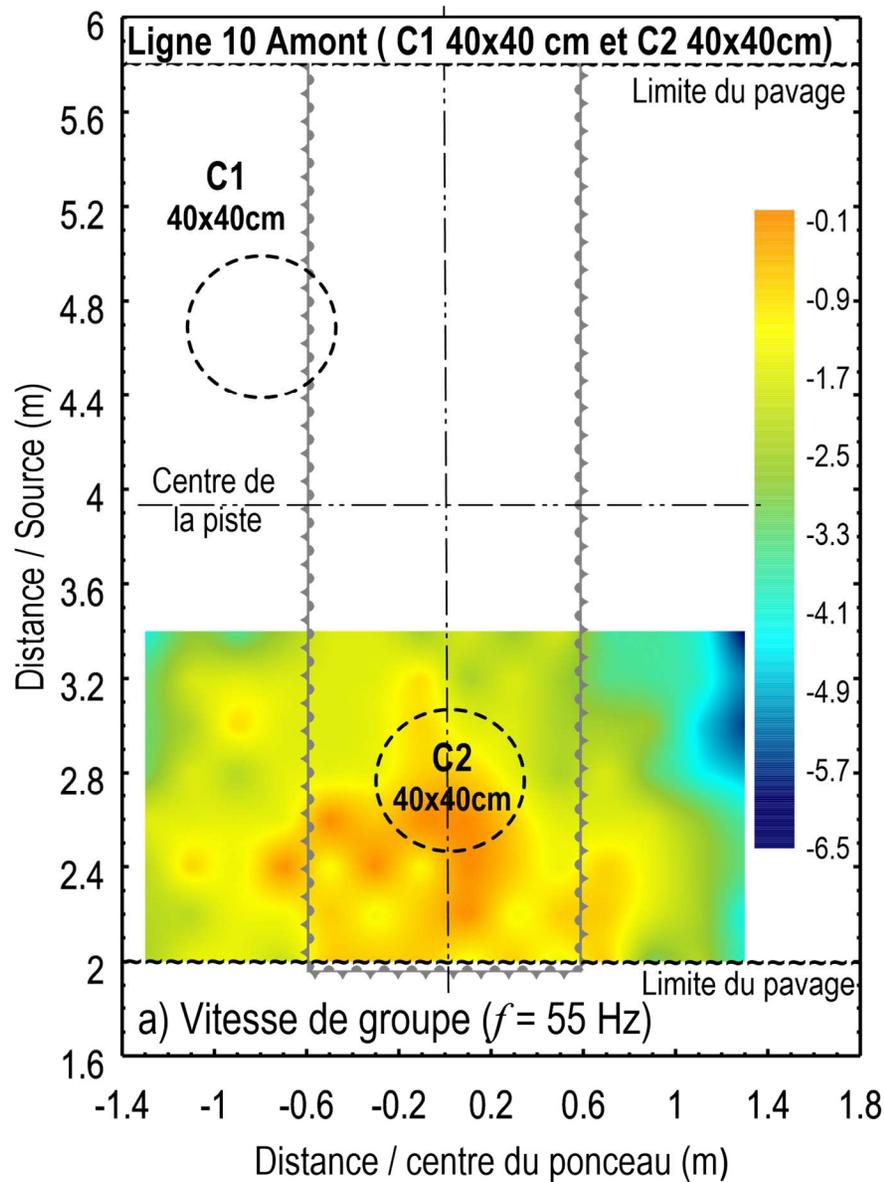


Figure A10. 6: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création des cavités C1 de 40x40x40 cm et C2 de 40x40x40 cm à une fréquence de 45 Hz (Ligne 10 – Amont) – plus concentré autour de la cavité C2

**ANNEXE A11 :RÉSULTATS DES ESSAIS
EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 1 AVEC UNE
SOURCE DU CÔTÉ AVAL ET APRÈS LA
CRÉATION DE LA CAVITÉ C1 À 40X40X40
CM ET DE LA CAVITÉ C2 DE 40X40X40 CM**

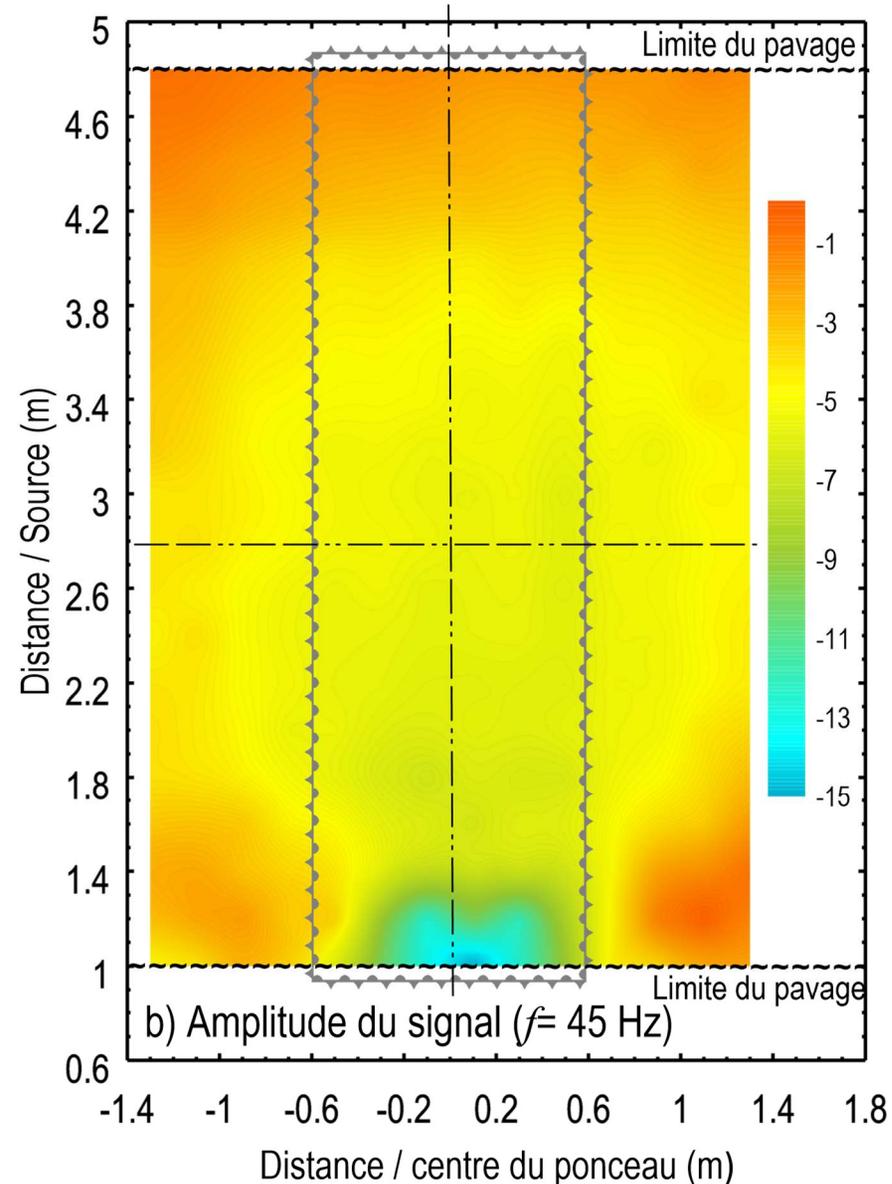
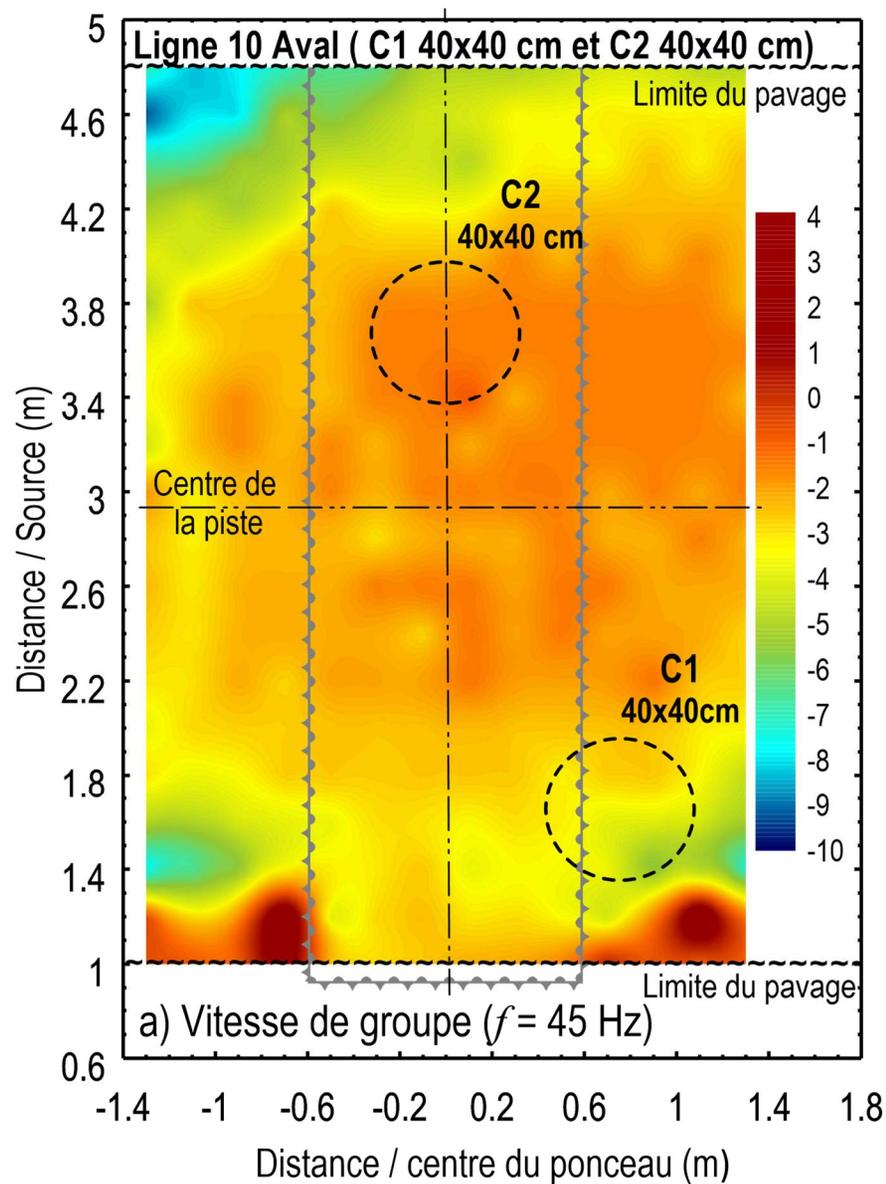


Figure A11. 1: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création des cavité C1 de 40x40x40 cm et C2 de 40x40x40 cm à une fréquence de 45 Hz (Lign10 – Aval)

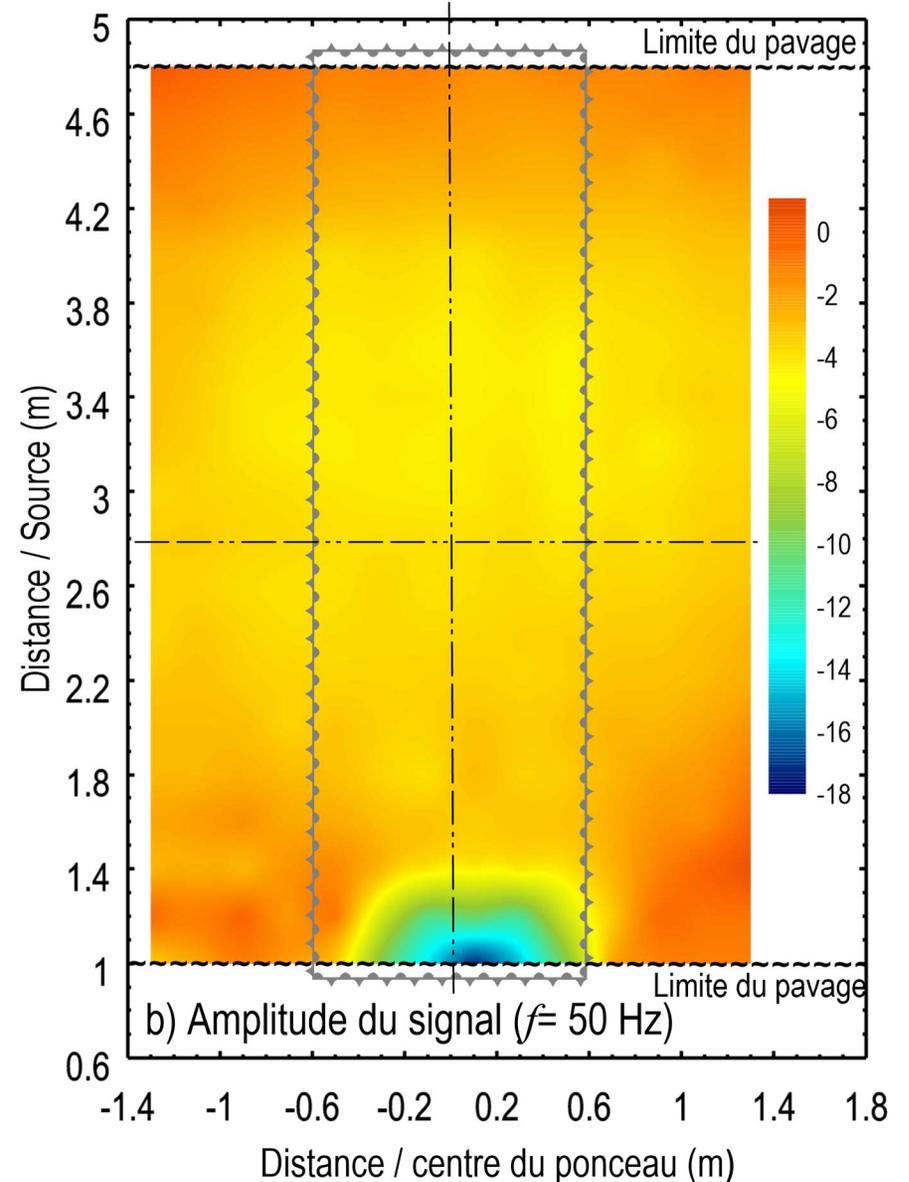
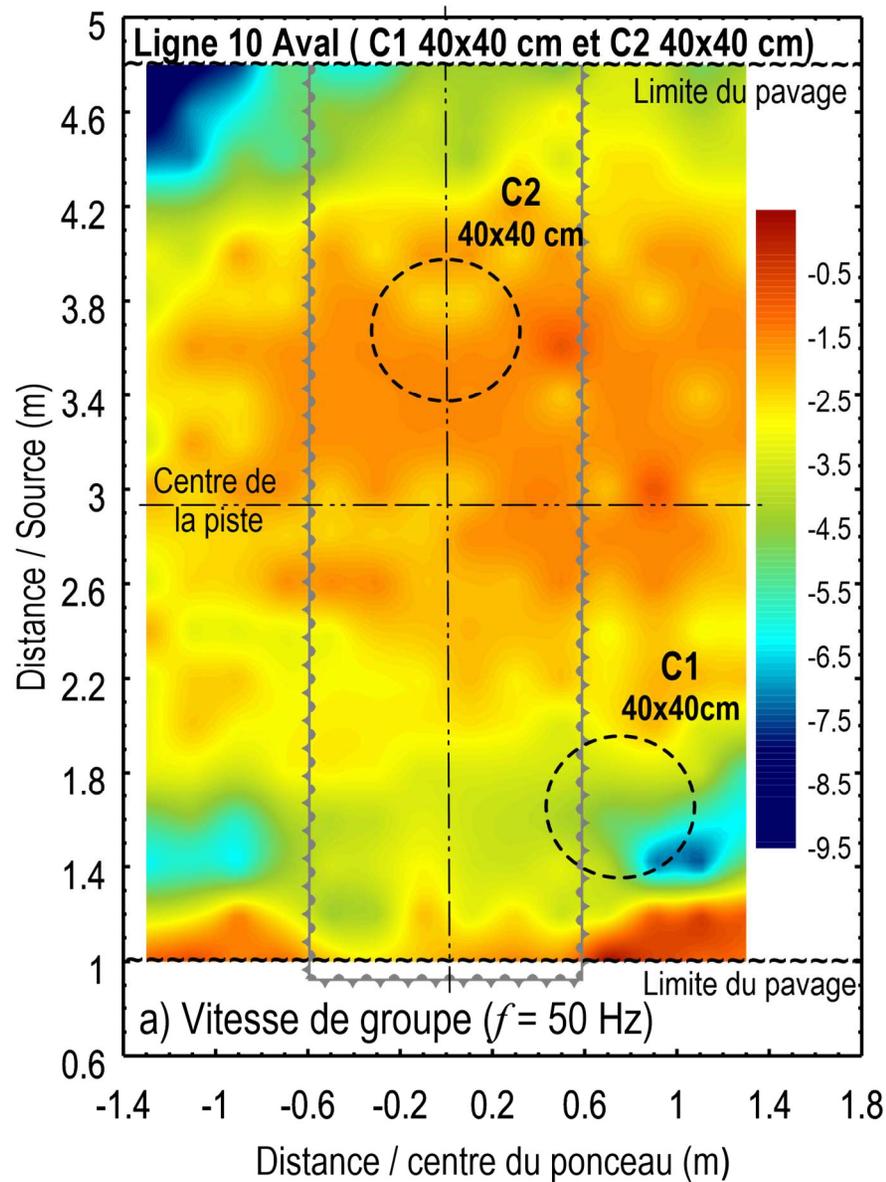


Figure A11. 2; Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création des cavité C1 de 40x40x40 cm et C2 de 40x40x40 cm à une fréquence de 45 Hz (Ligne10-Aval)

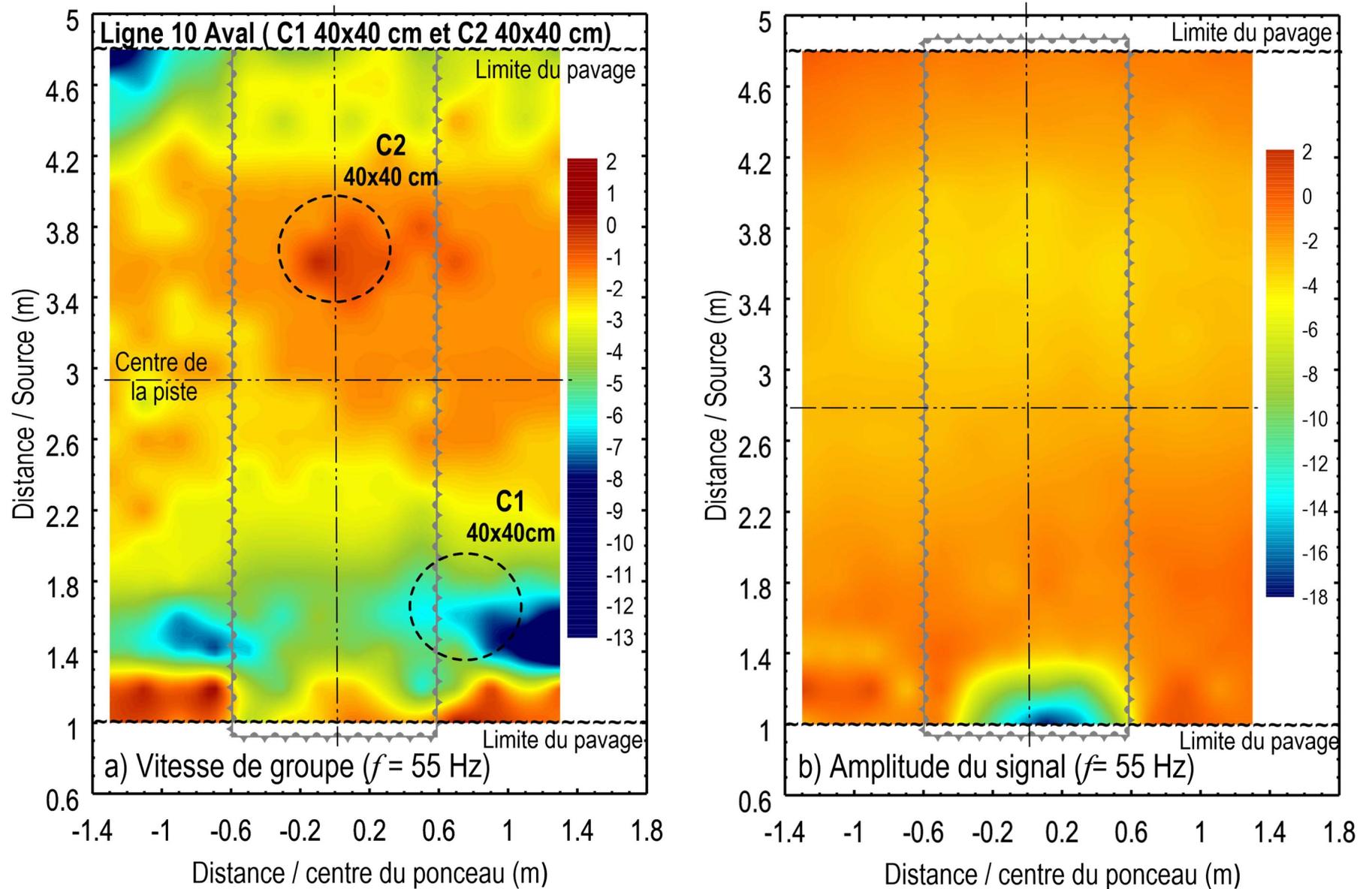


Figure A11. 3: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création des cavité C1 de 40x40x40 cm et C2 de 40x40x40 cm à une fréquence de 55 Hz (Ligne 10-Aval)

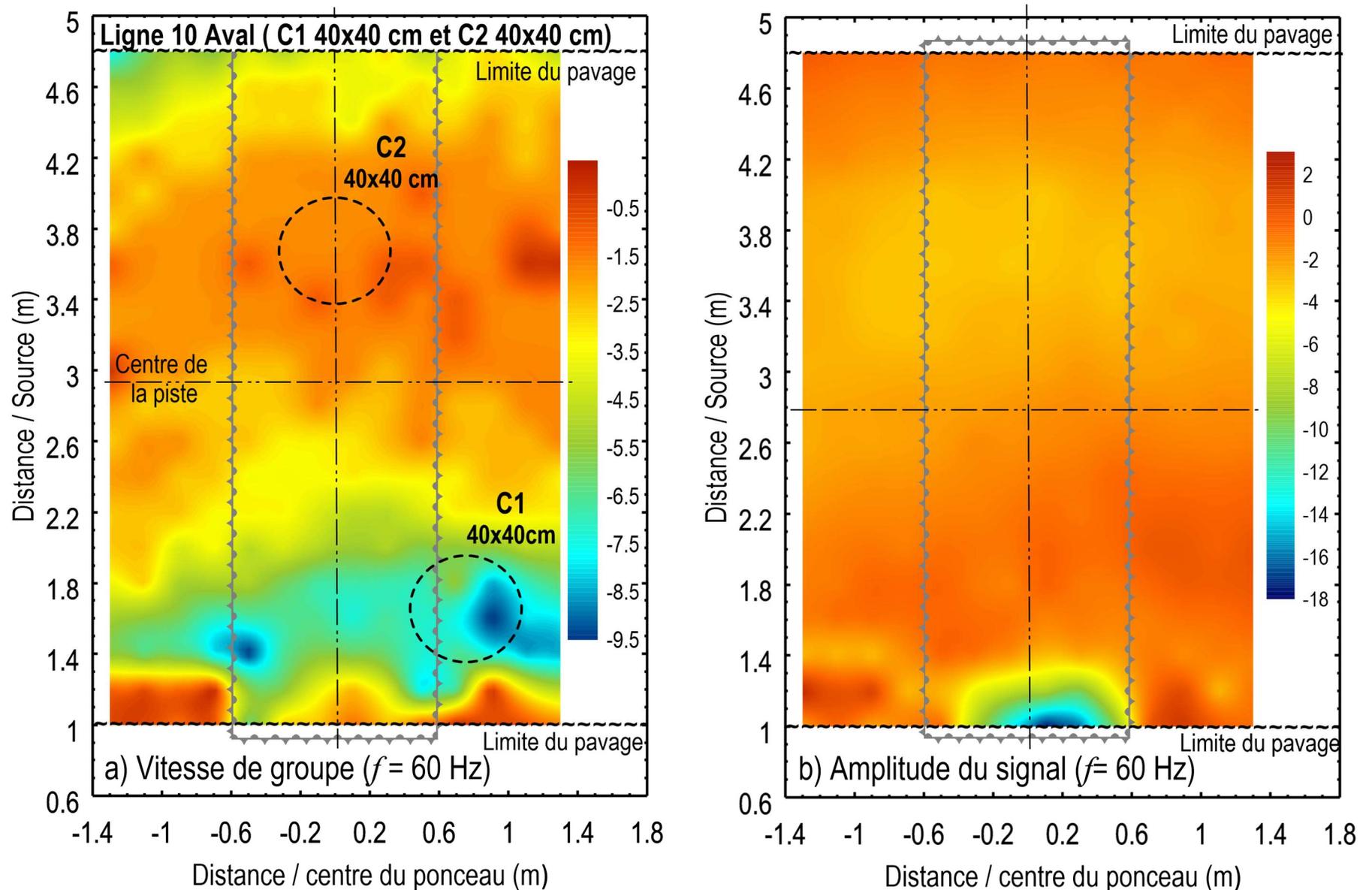


Figure A11. 4: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création des cavité C1 de 40x40x40 cm et C2 de 40x40x40 cm à une fréquence de 60 Hz (Lign10 – Aval)

**ANNEXE A12 :RÉSULTATS DES ESSAIS
EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 2 AVEC UNE
SOURCE DU CÔTÉ AMONT SANS CAVITÉ**

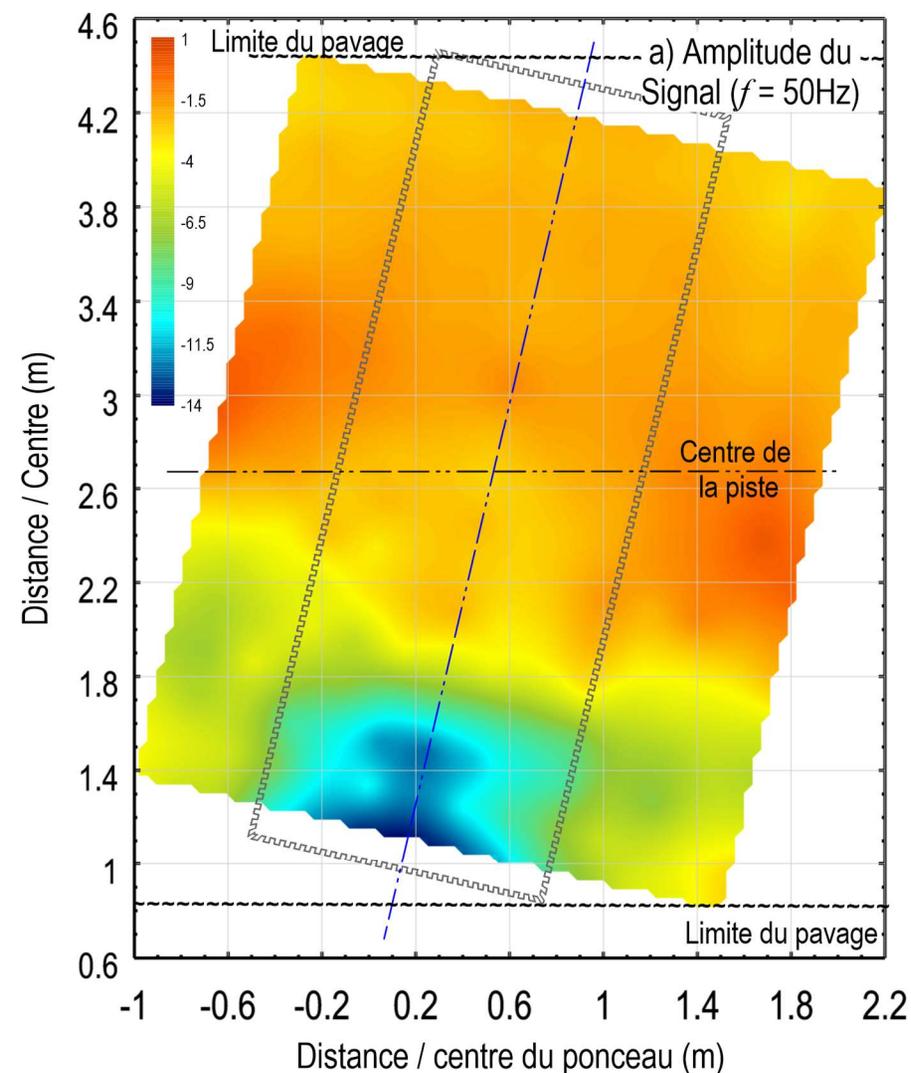
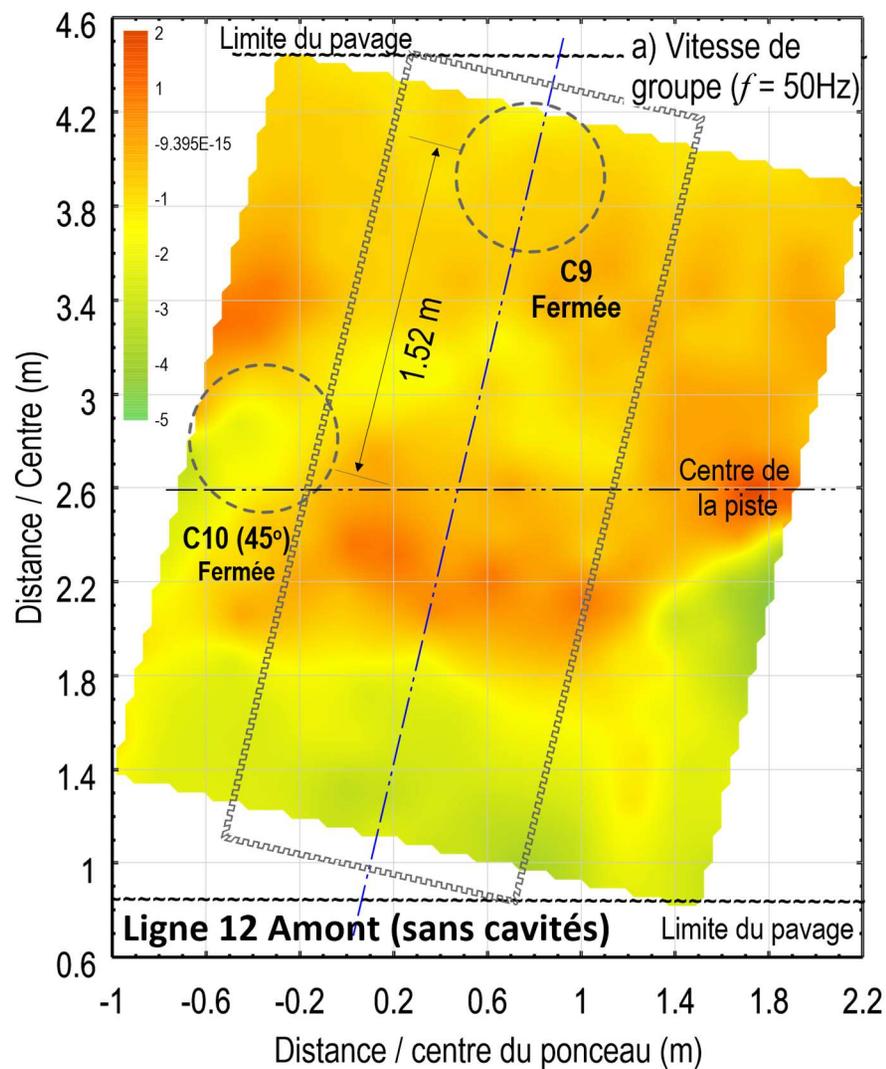


Figure 12. 1: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs avant la création de cavités autour du ponceau 2 à une fréquence de 50 Hz (Ligne 12 – Amont)

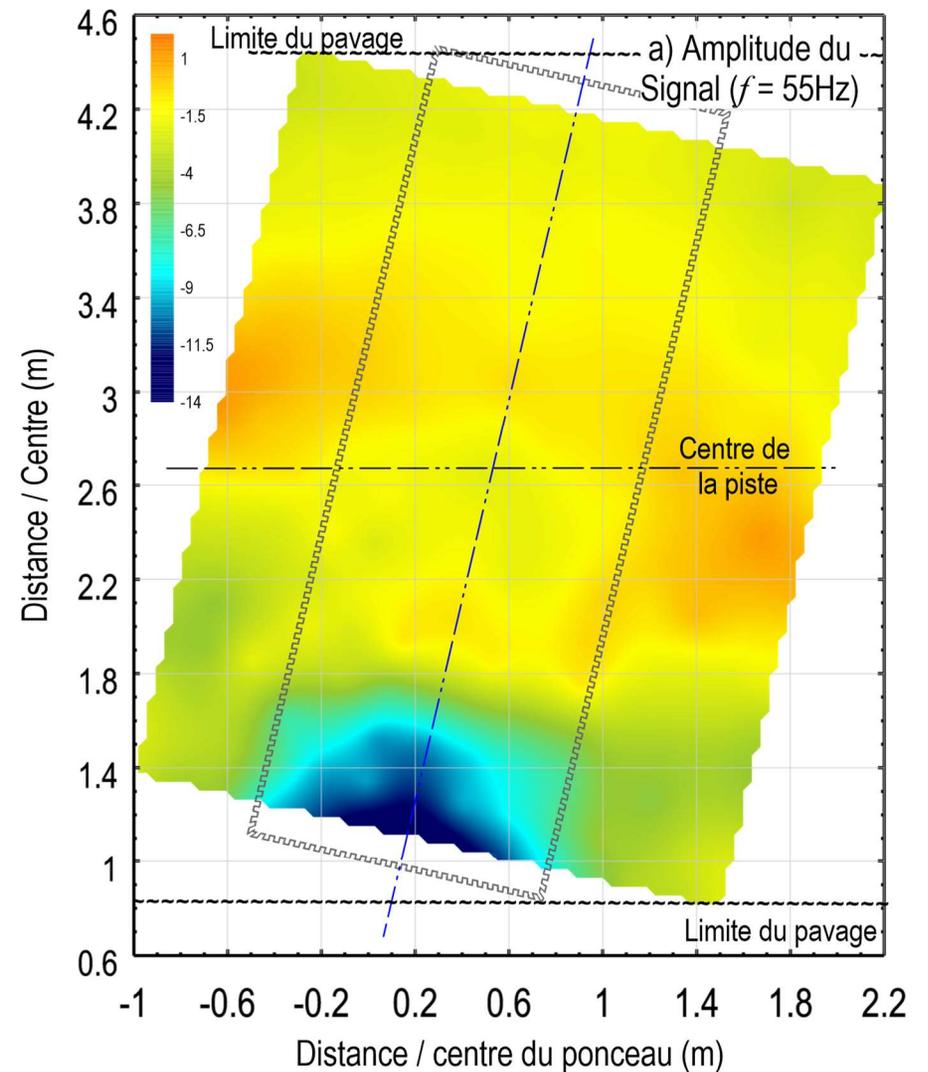
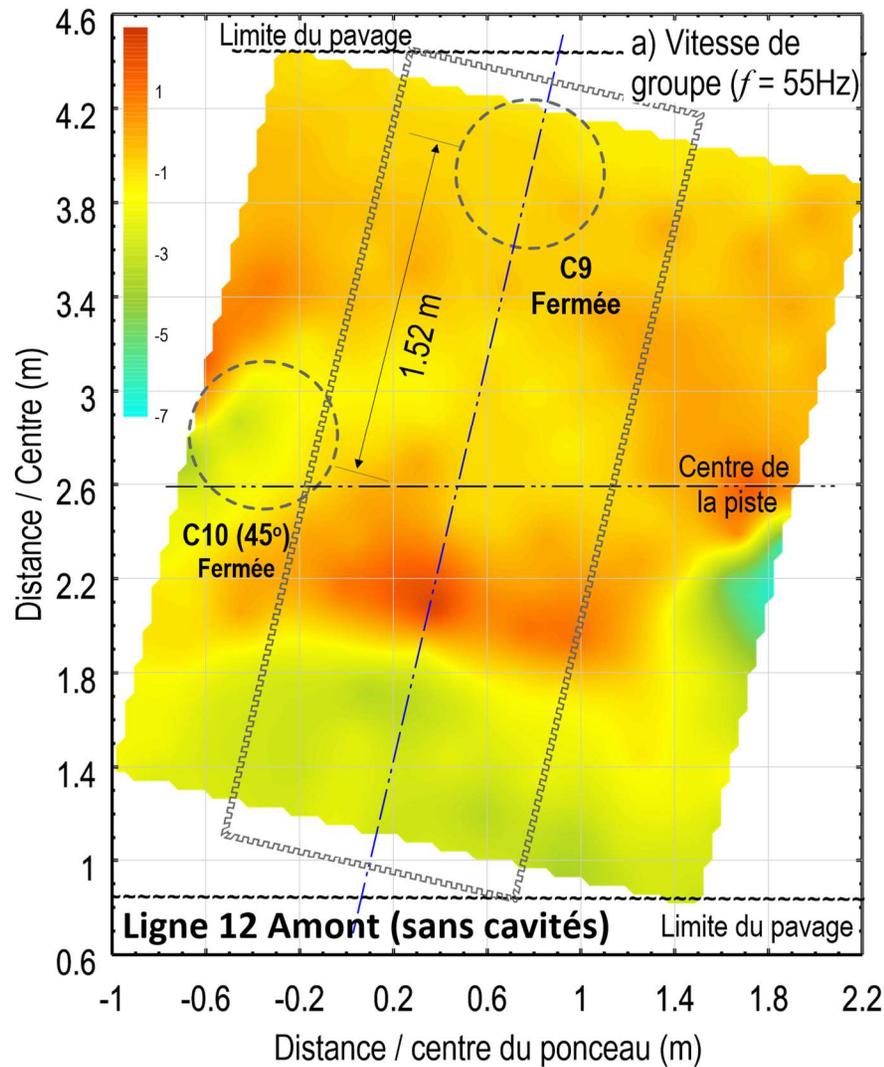


Figure 12. 2: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs avant la création de cavités autour du ponceau 2 à une fréquence de 55 Hz (Ligne 12 – Amont)

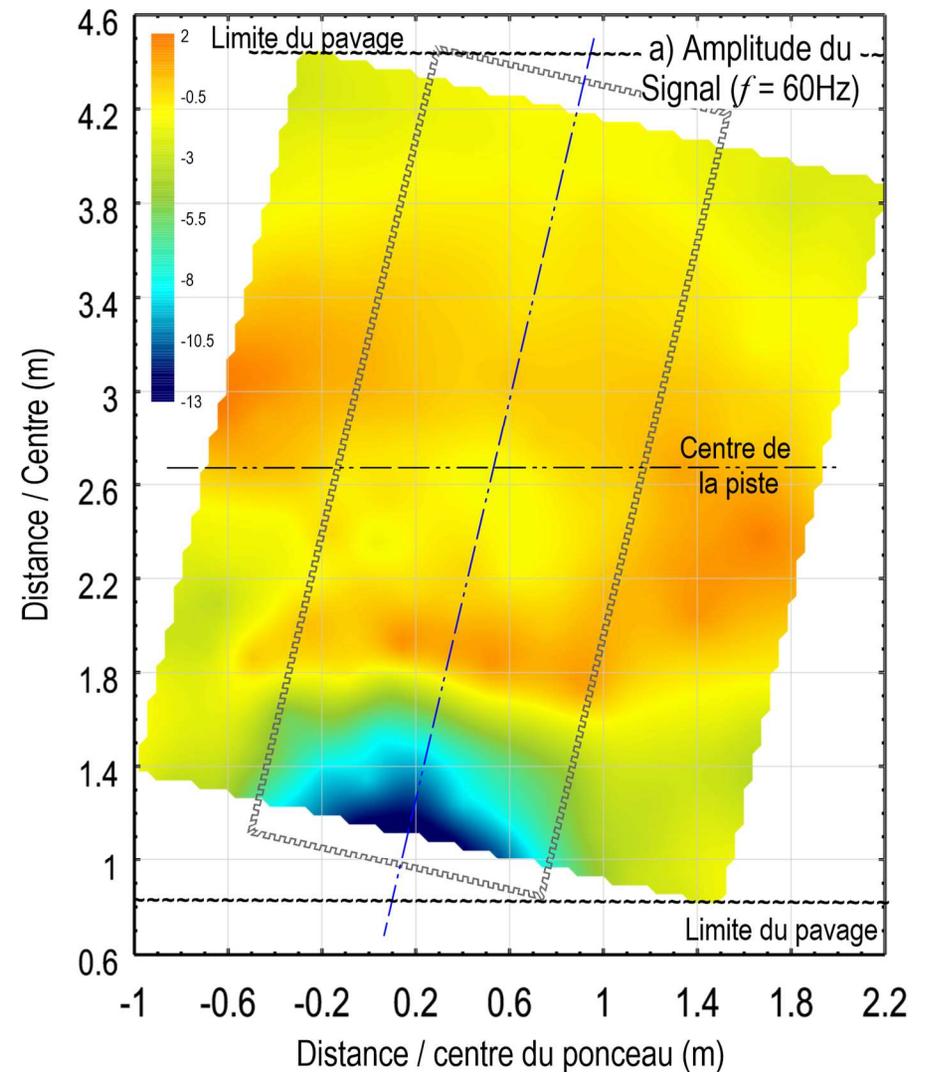
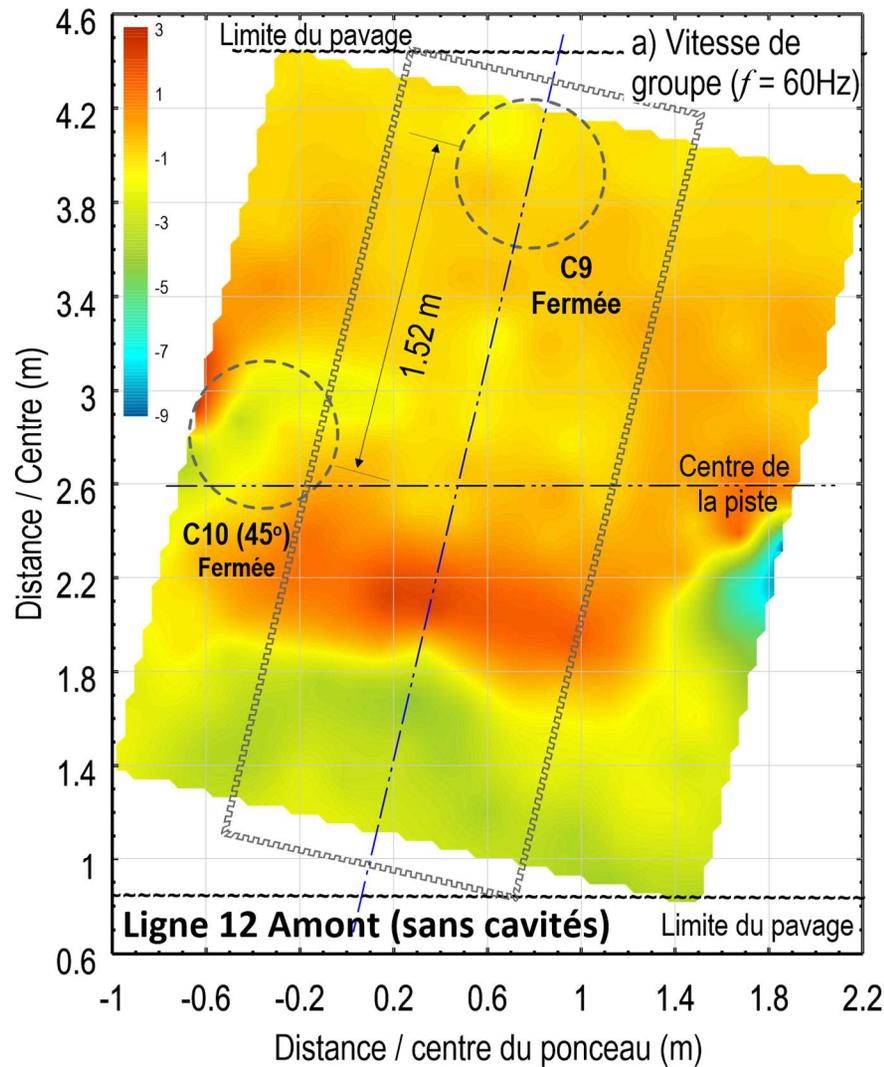


Figure 12. 3: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs avant la création de cavités autour du ponceau 2 à une fréquence de 60 Hz (Ligne 12 – Amont)

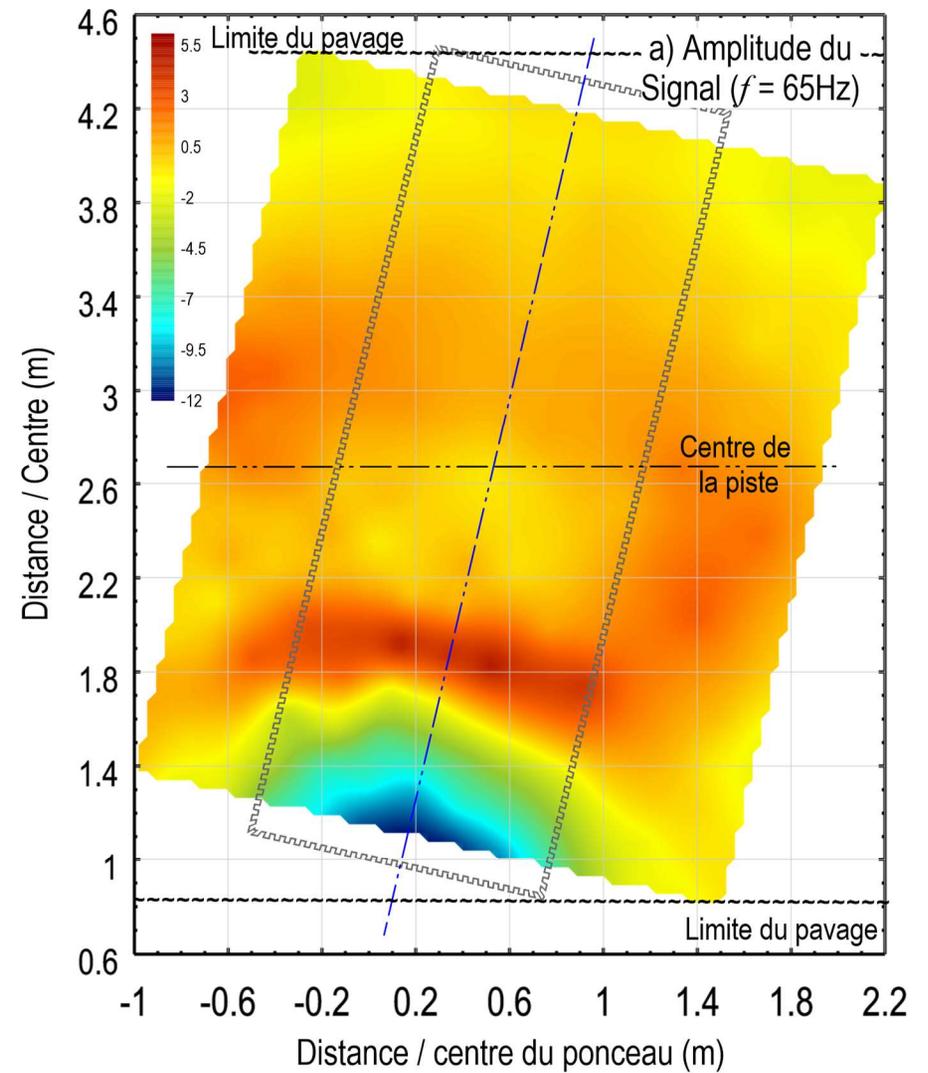
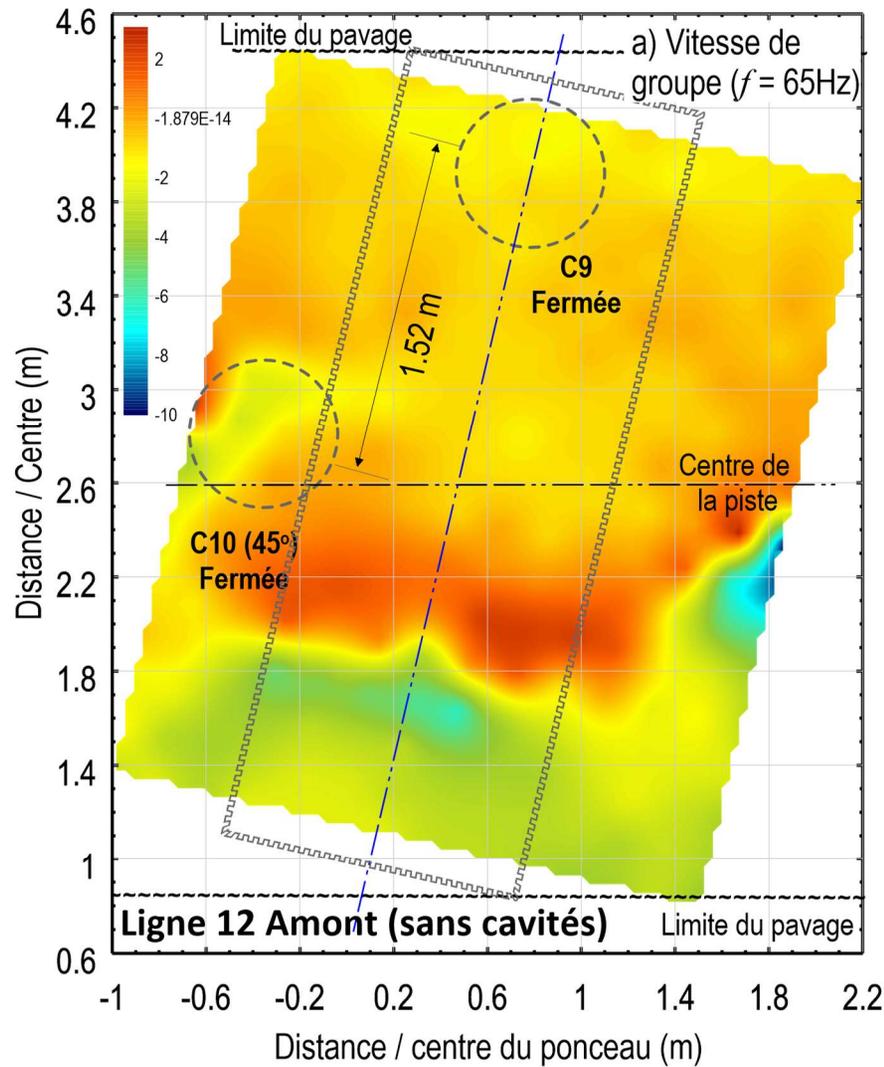


Figure 12. 4: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs avant la création de cavités autour du ponceau 2 à une fréquence de 65 Hz (Ligne 12 – Amont)

ANNEXE A13 :RÉSULTATS DES ESSAIS
EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 2 AVEC UNE
SOURCE DU CÔTÉ AVAL APRÈS LA
CRÉATION DE LA CAVITÉ C10 À 20X20X20
CM

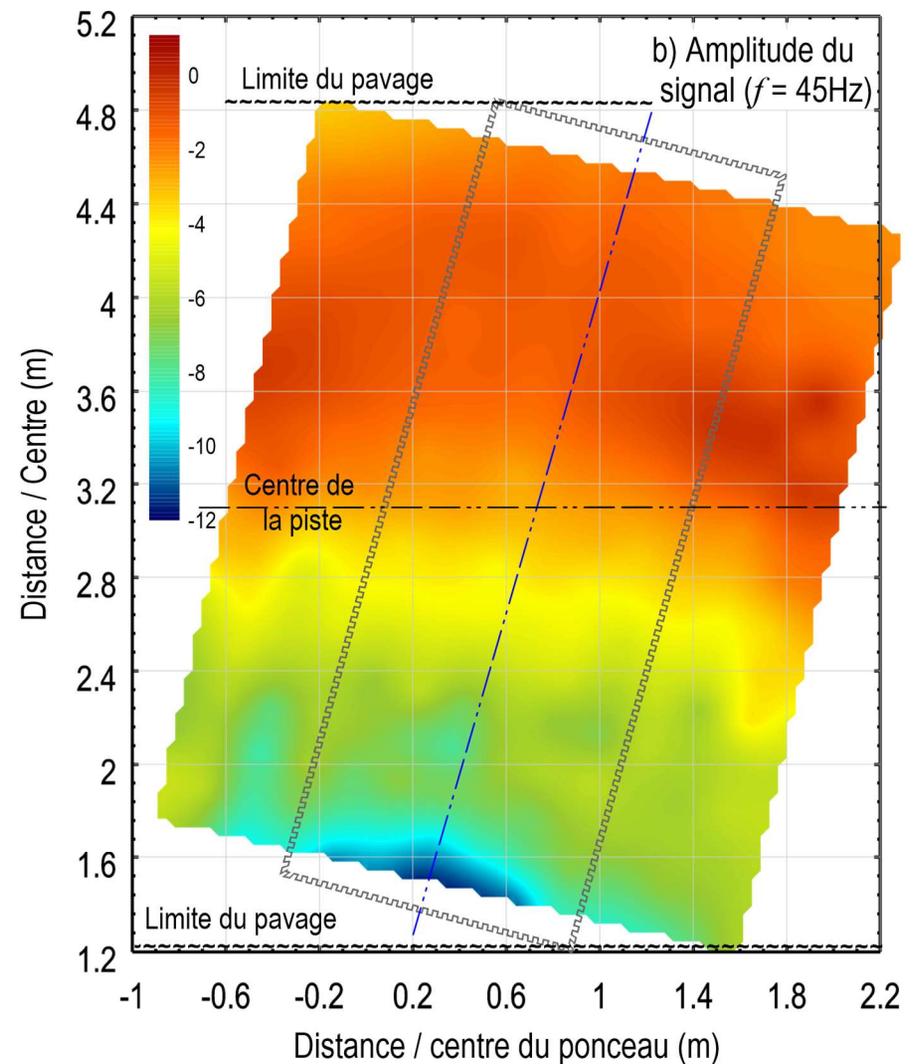
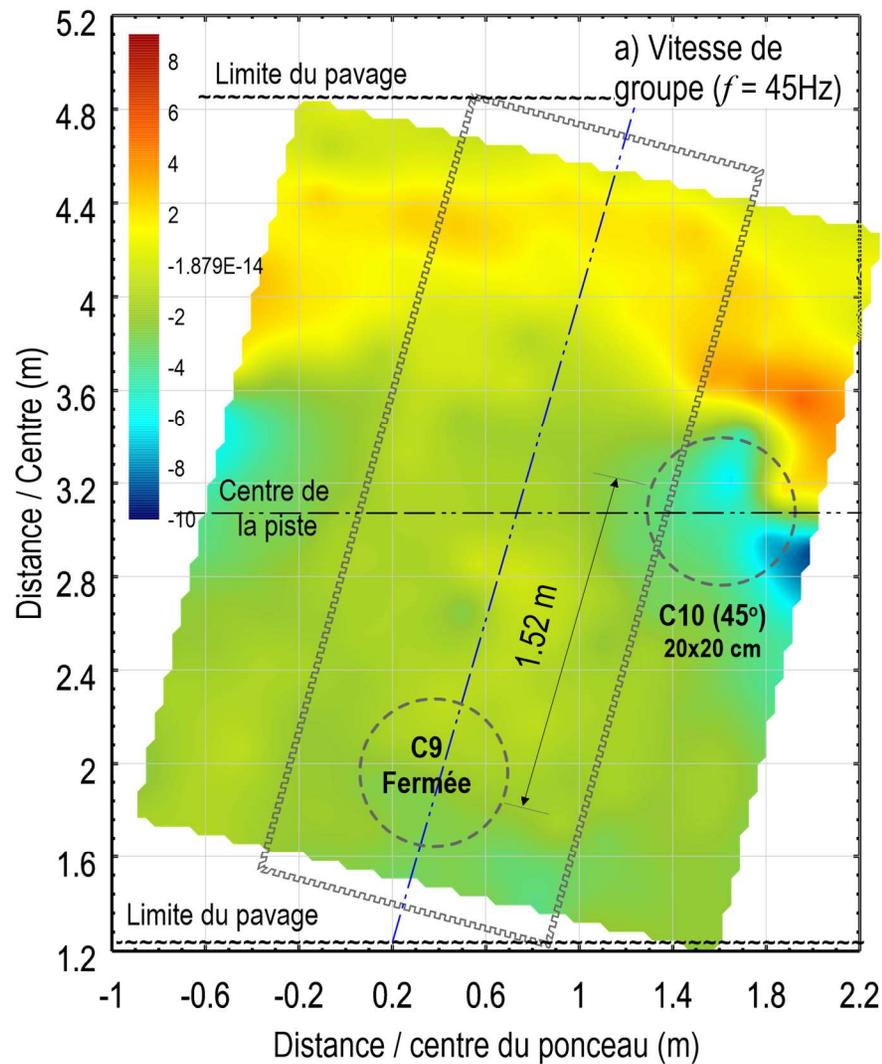


Figure A13. 1: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de la cavité C10 à 20x20x20 cm autour du ponceau 2 à une fréquence de 45 Hz (Ligne 12- Aval)

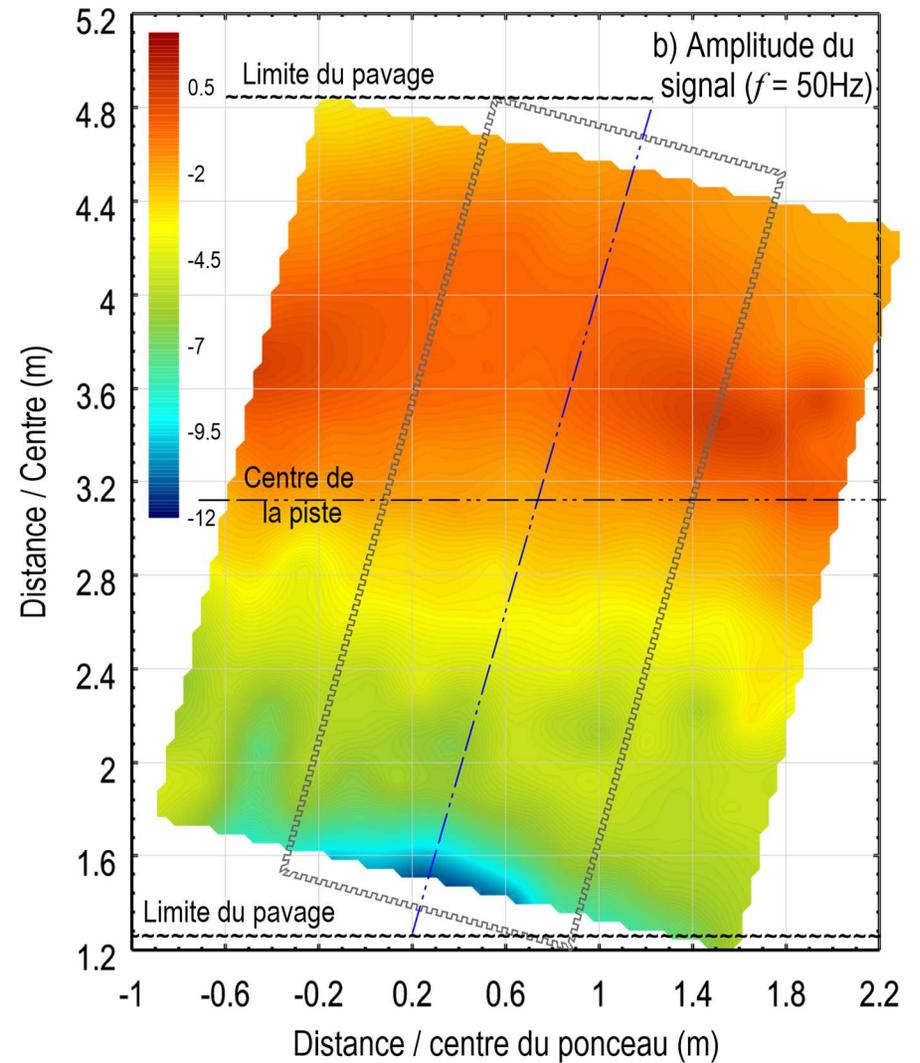
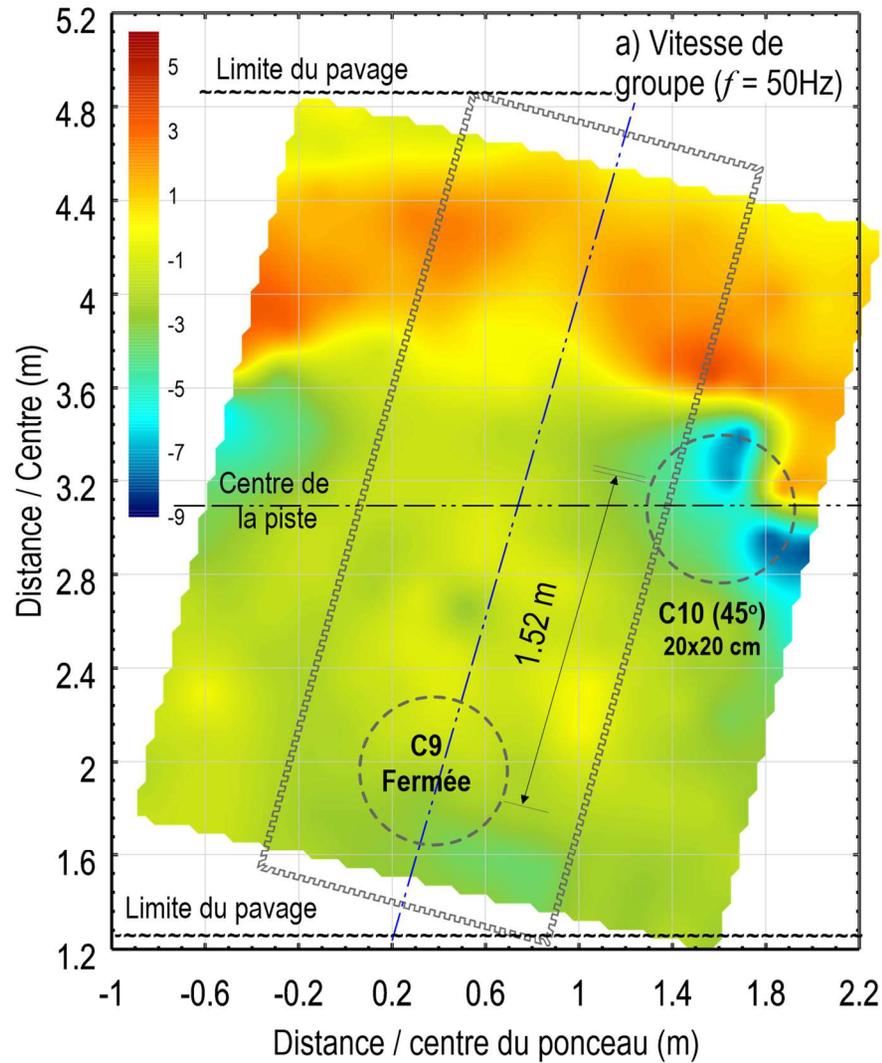


Figure A13. 2: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de la cavité C10 à 20x20x20 cm autour du ponceau 2 à une fréquence de 50 Hz (Ligne 12-Aval)

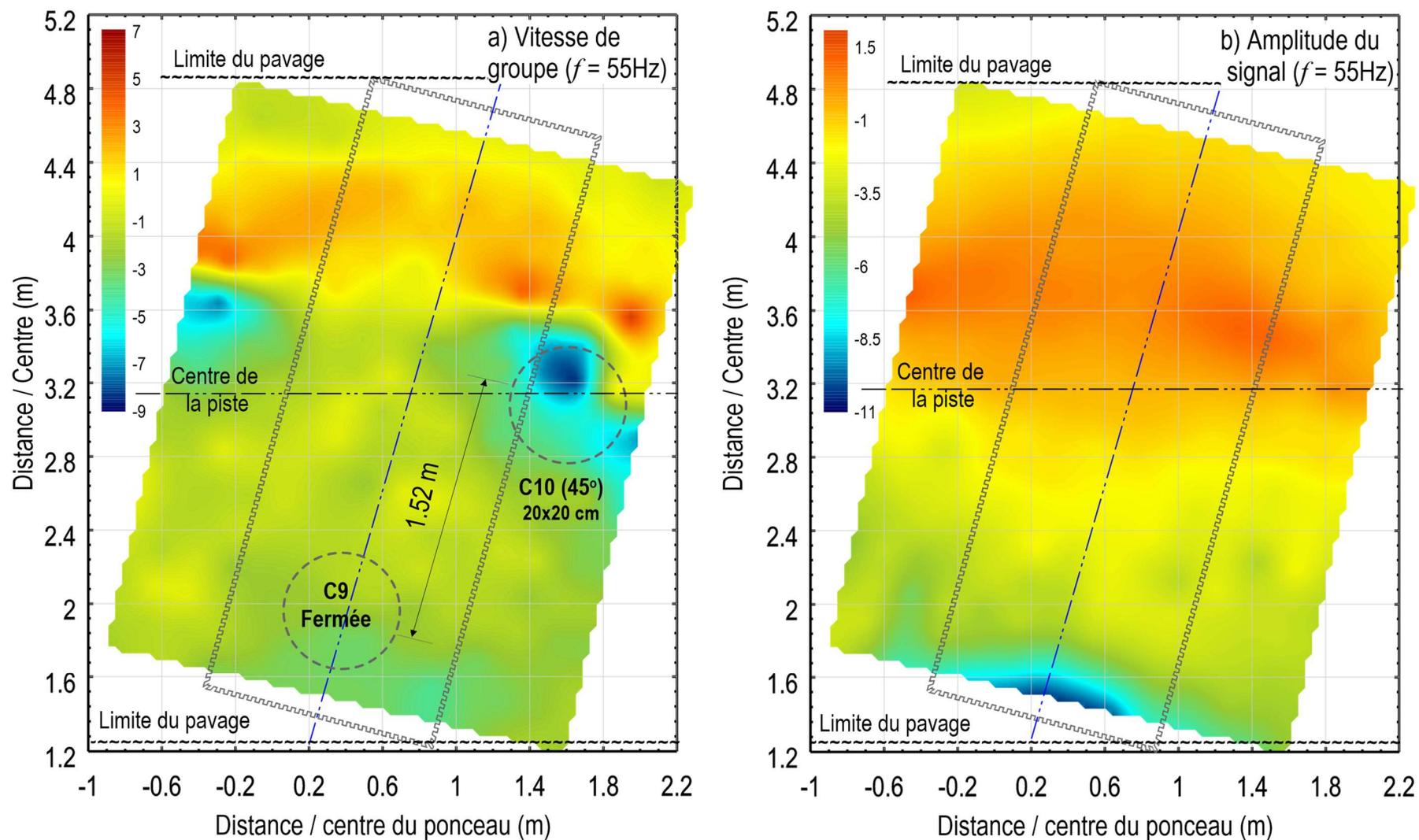


Figure A13. 3: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de la cavité C10 à 20x20x20 cm autour du ponceau 2 à une fréquence de 55 Hz (Ligne 12 – Aval)

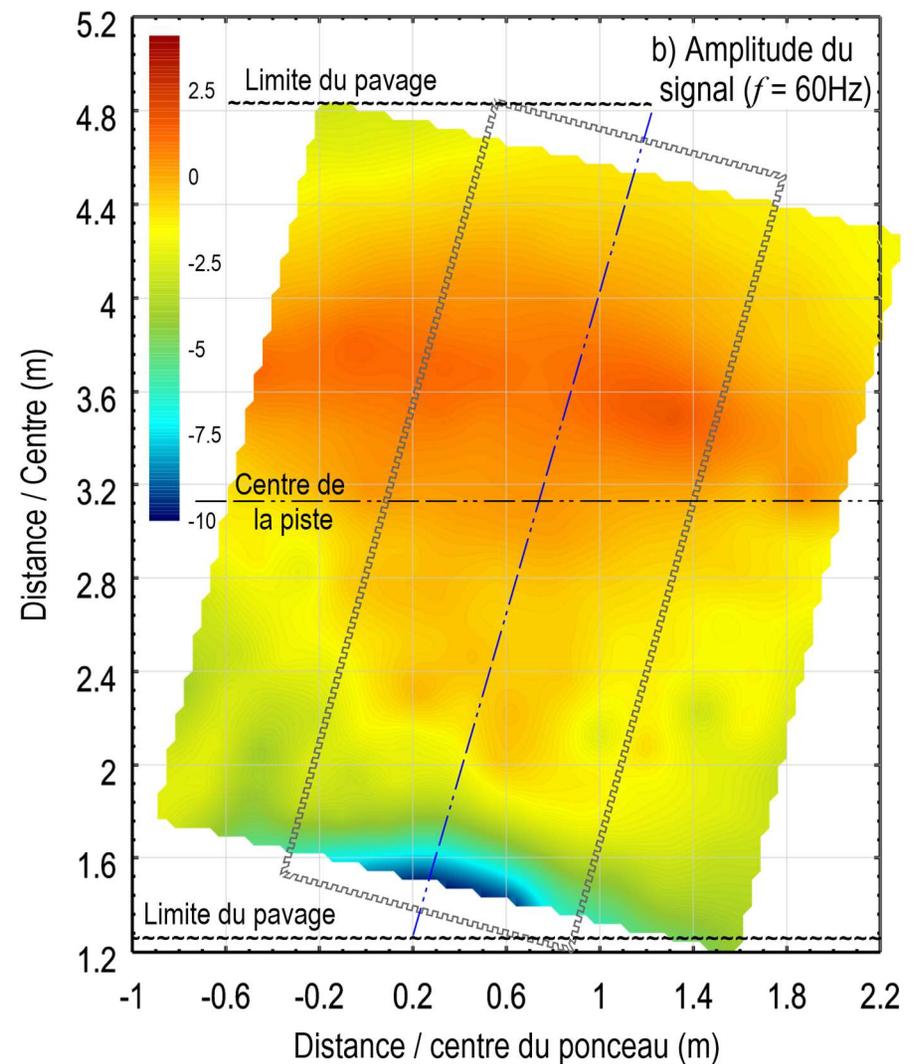
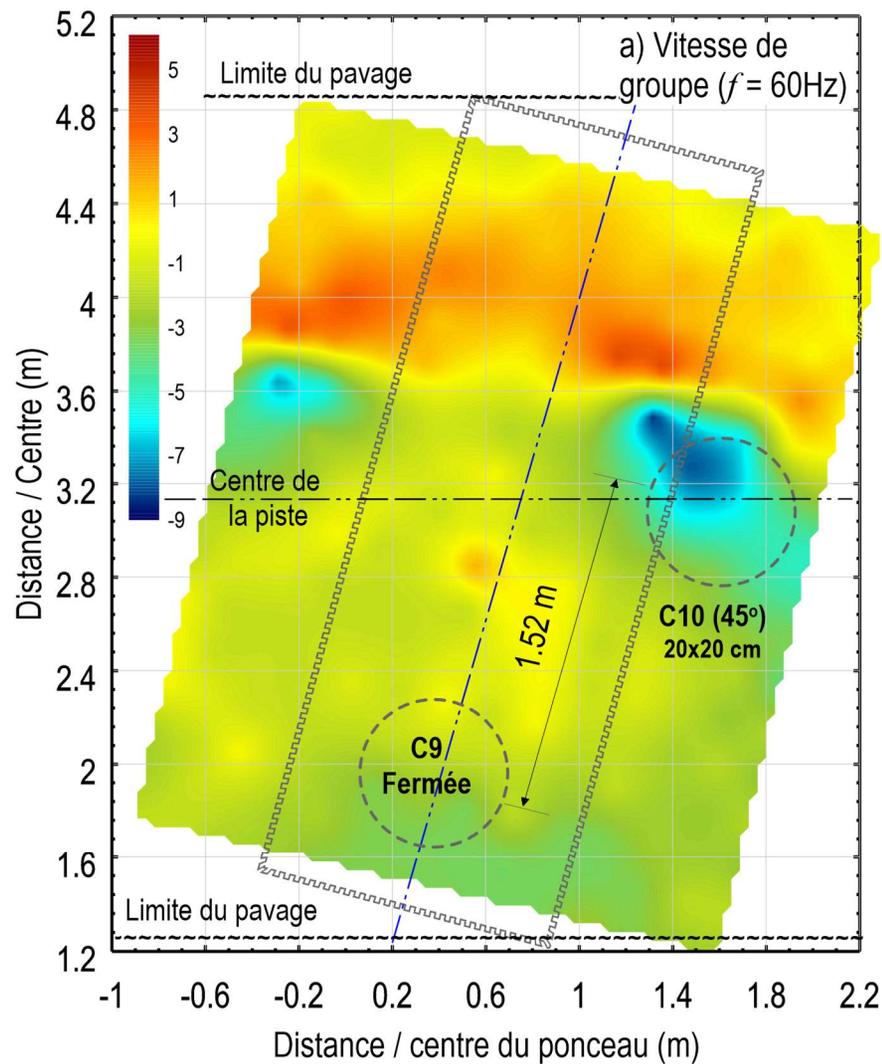
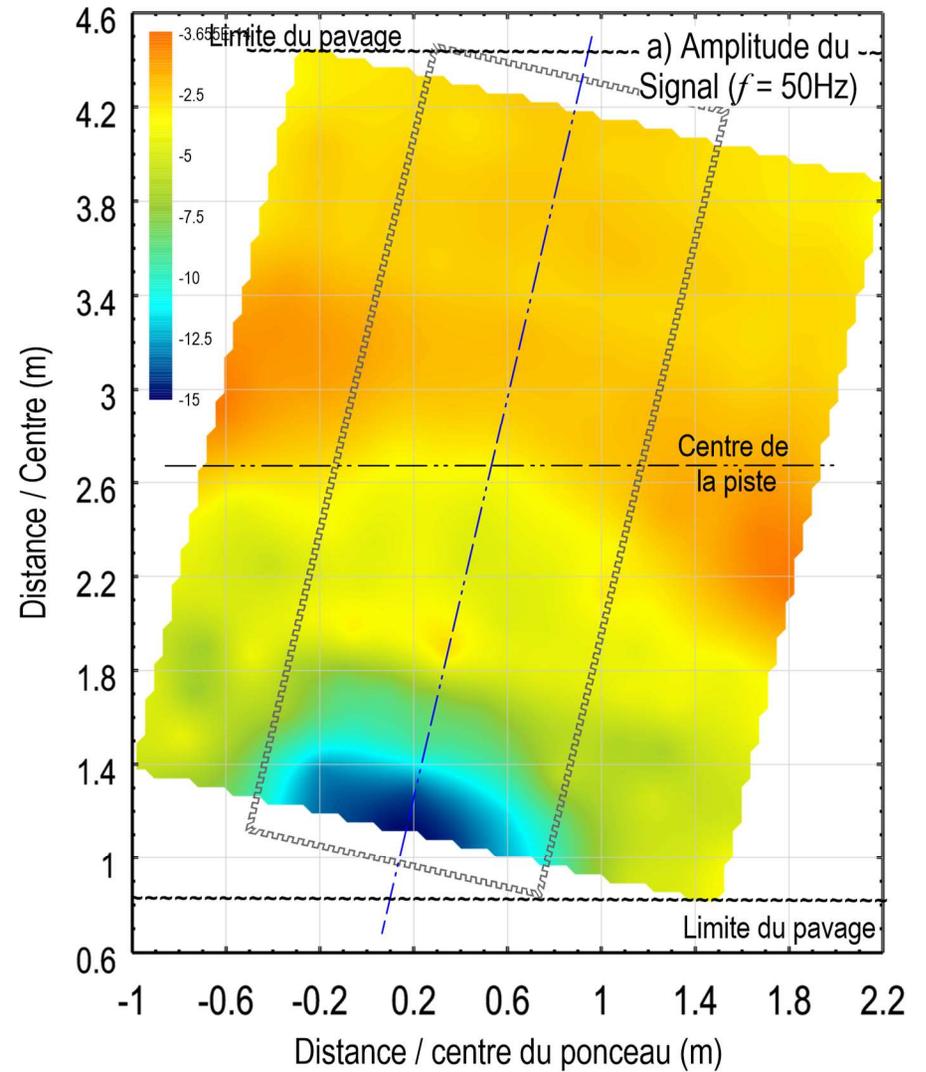
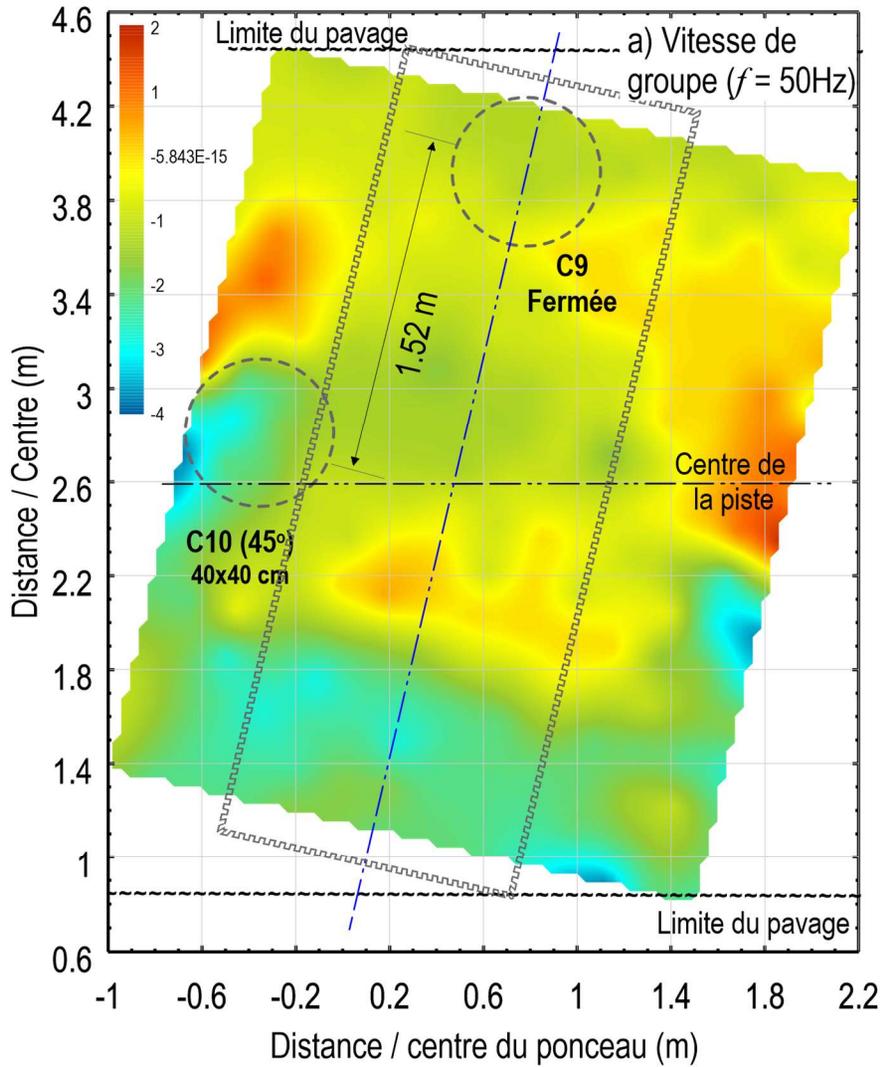
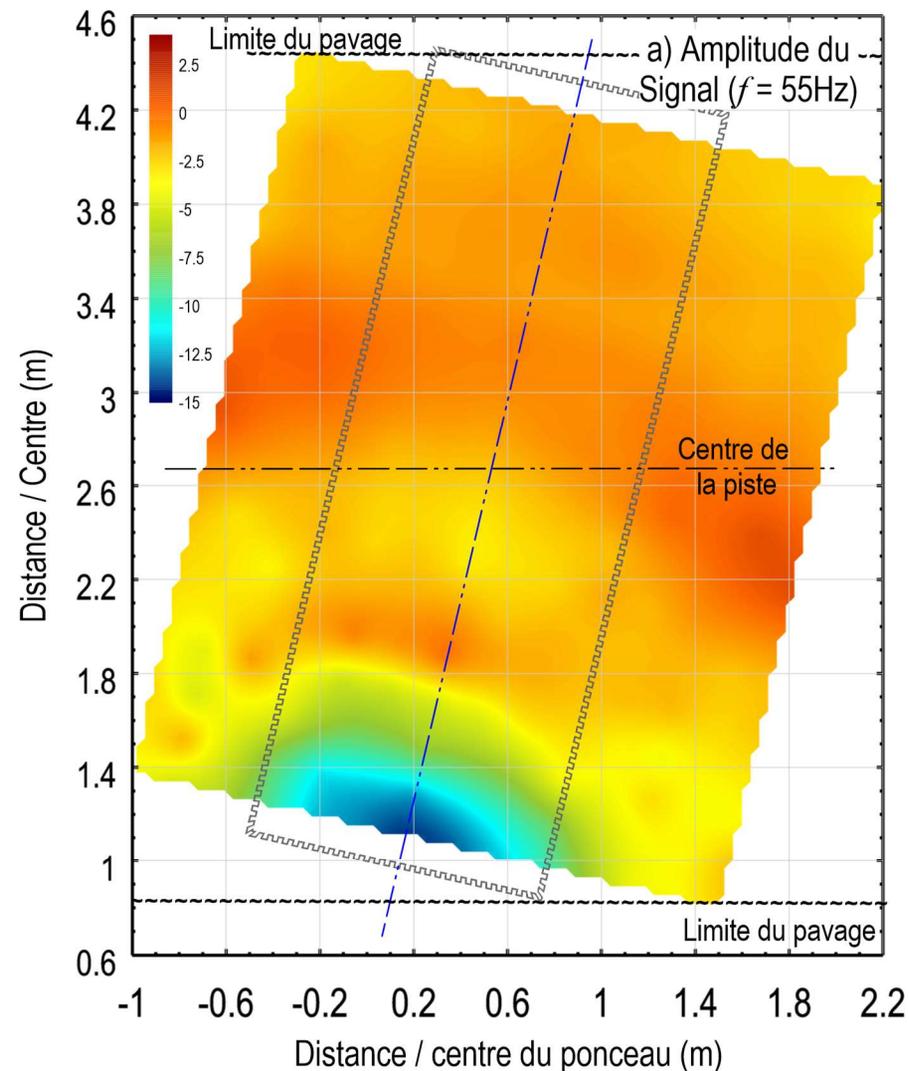
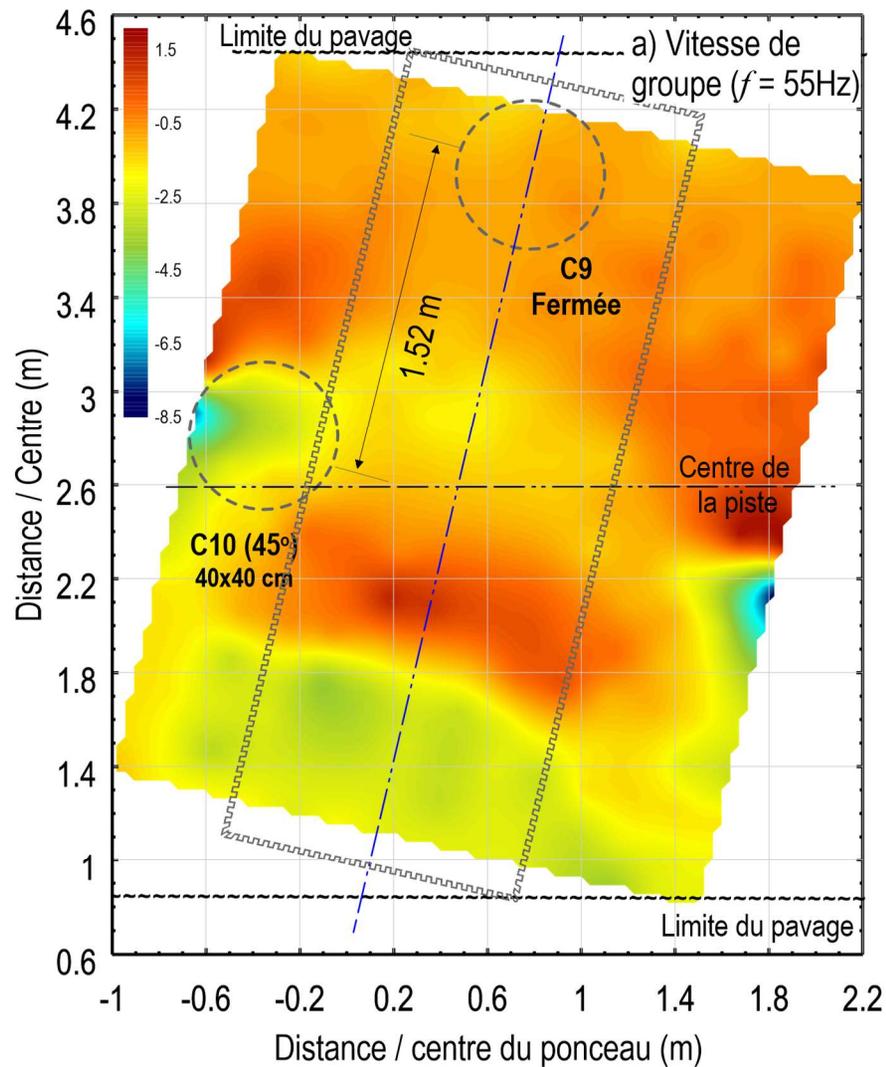


Figure A13. 4: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de la cavité C10 à 20x20x20 cm autour du ponceau 2 à une fréquence de 60 Hz (ligne 12- Aval)

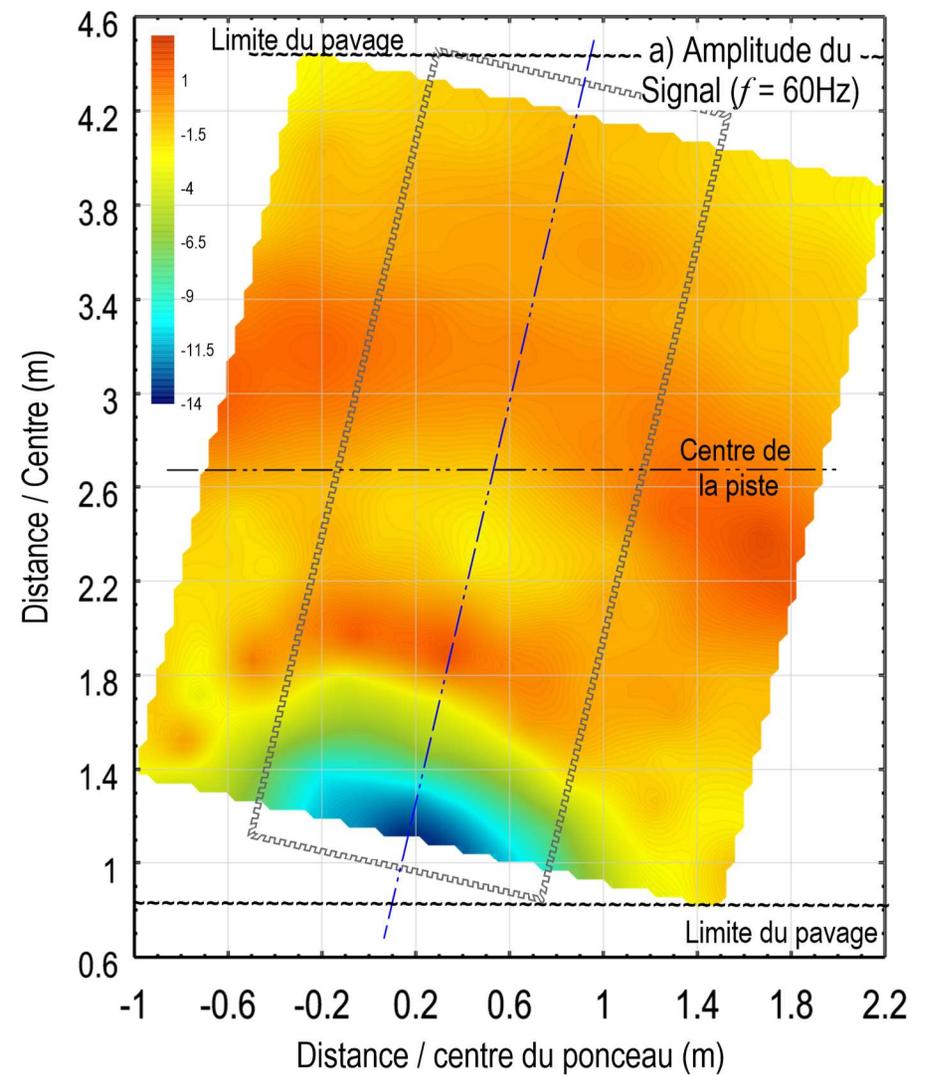
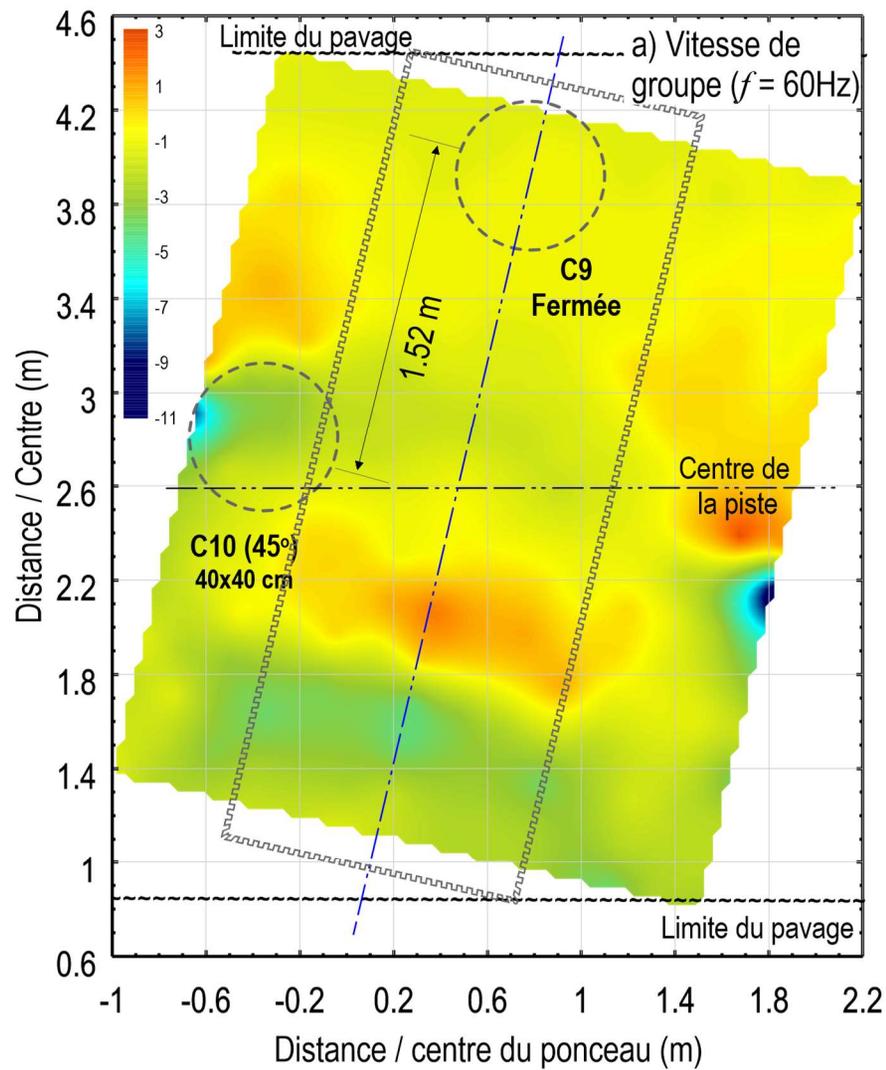
ANNEXE A14 : RÉSULTATS DES ESSAIS
EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 2 AVEC UNE
SOURCE DU CÔTÉ AMONT APRÈS LA
CRÉATION DE LA CAVITÉ C10 À 40X40X40
CM



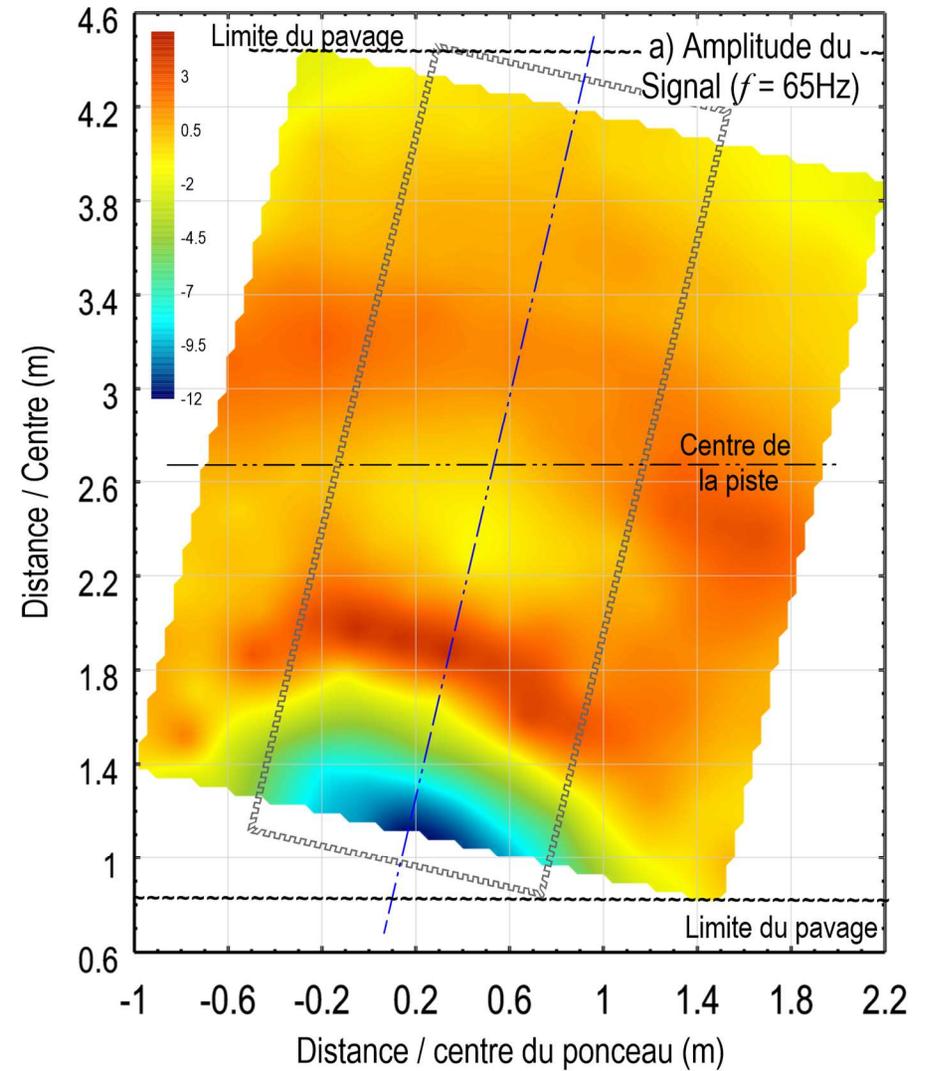
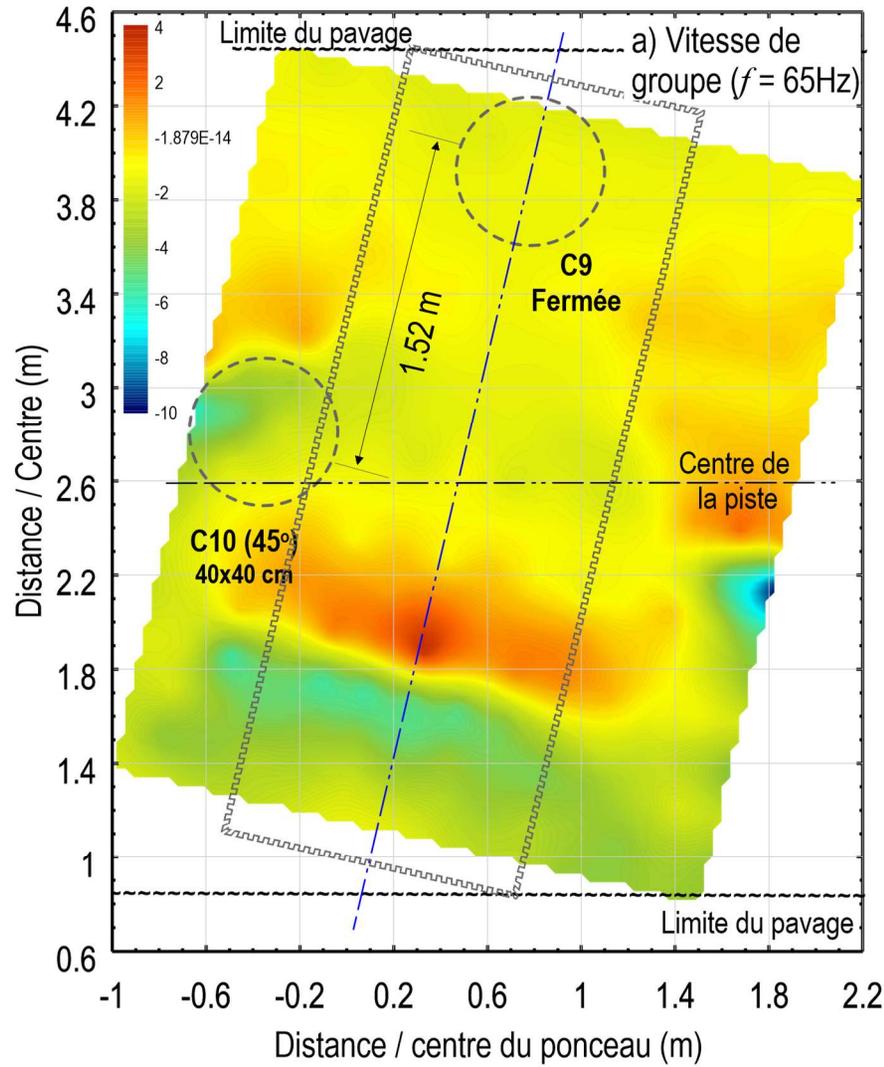
FigureA14. 1: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de la cavité C10 à 40x40x40 cm autour du ponceau 2 à une fréquence de 50 Hz (Ligne 14 – Aval)



FigureA14. 2: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de la cavité C10 à 40x40x40 cm autour du ponceau 2 à une fréquence de 55 Hz (Ligne 14 – Amont)



FigureA14. 3: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de la cavité C10 à 40x40x40 cm autour du ponceau 2 à une fréquence de 60 Hz (Ligne 14 – Amont)



FigureA14. 4: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de la cavité C10 à 40x40x40 cm autour du ponceau 2 à une fréquence de 65 Hz (Ligne14 - Amont)

ANNEXE A15 :RÉSULTATS DES ESSAIS
EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 2 AVEC UNE
SOURCE DU CÔTÉ AVAL APRÈS LA
CRÉATION DE LA CAVITÉ C10 À 40X40X40
CM

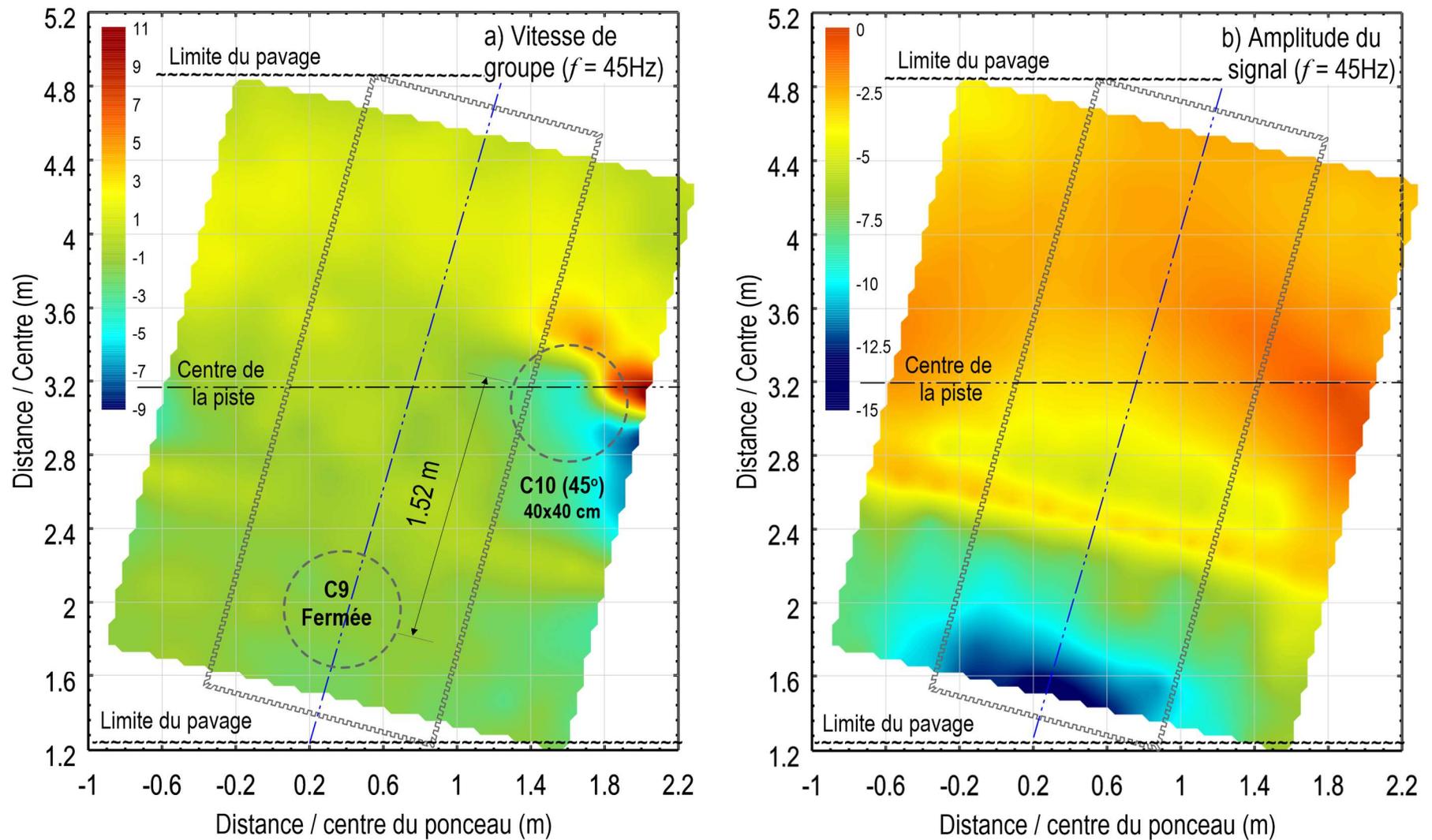


Figure A15. 1: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de la cavité C10 à 40x40x40 cm autour du ponceau 2 à une fréquence de 45 Hz (Ligne 14 – Aval)

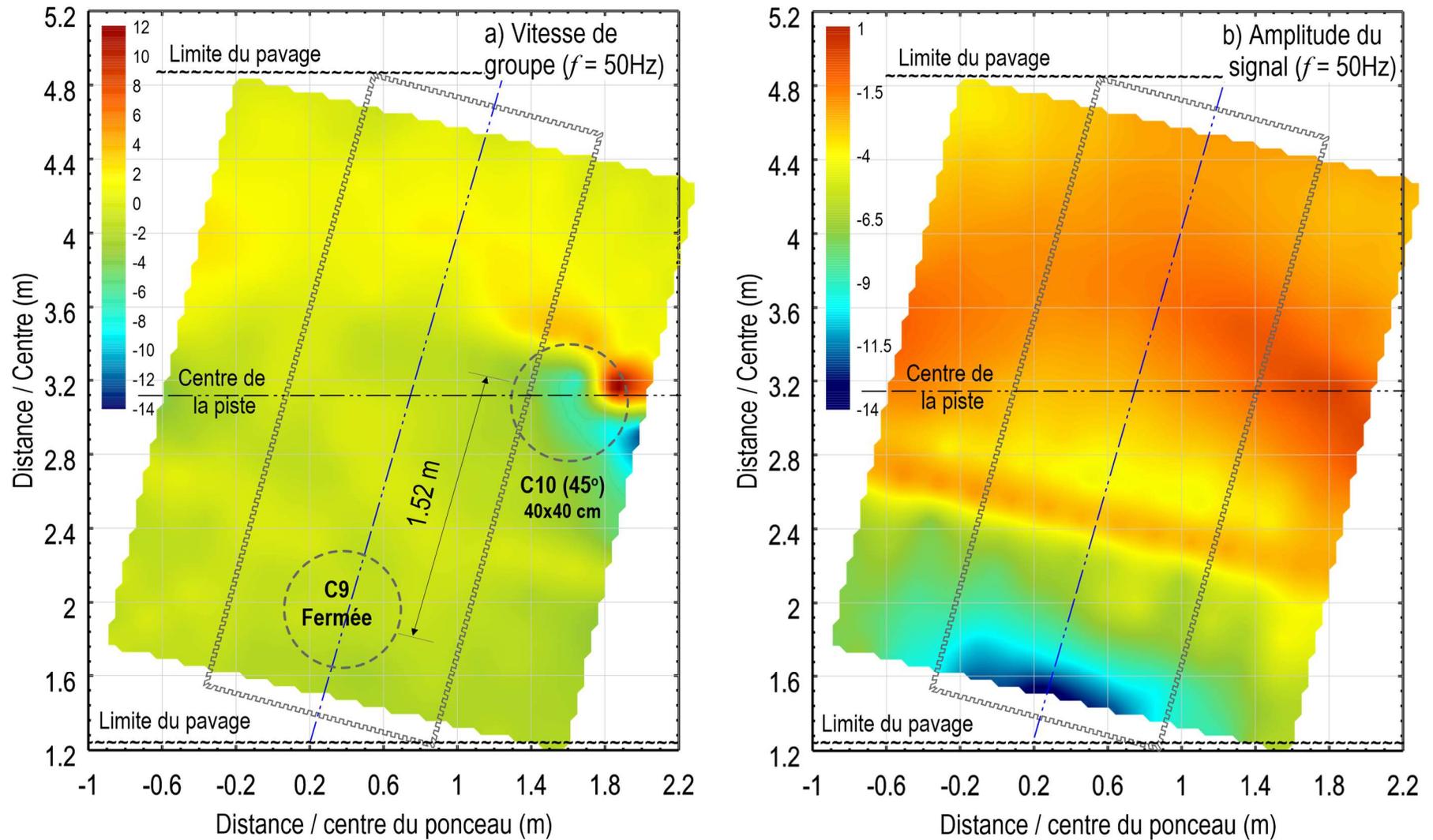


Figure A15. 2: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de la cavité C10 à 40x40x40 cm autour du ponceau 2 à une fréquence de 50 Hz (Ligne 14 – Aval)

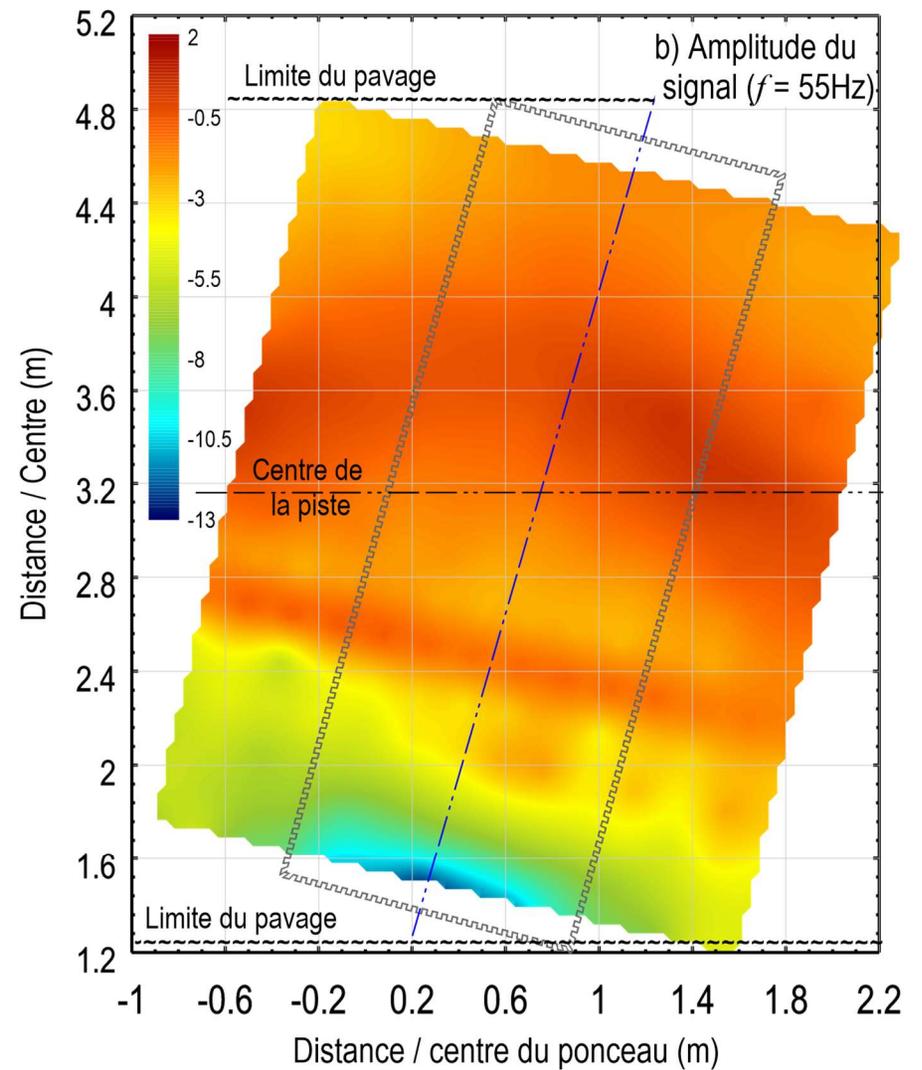
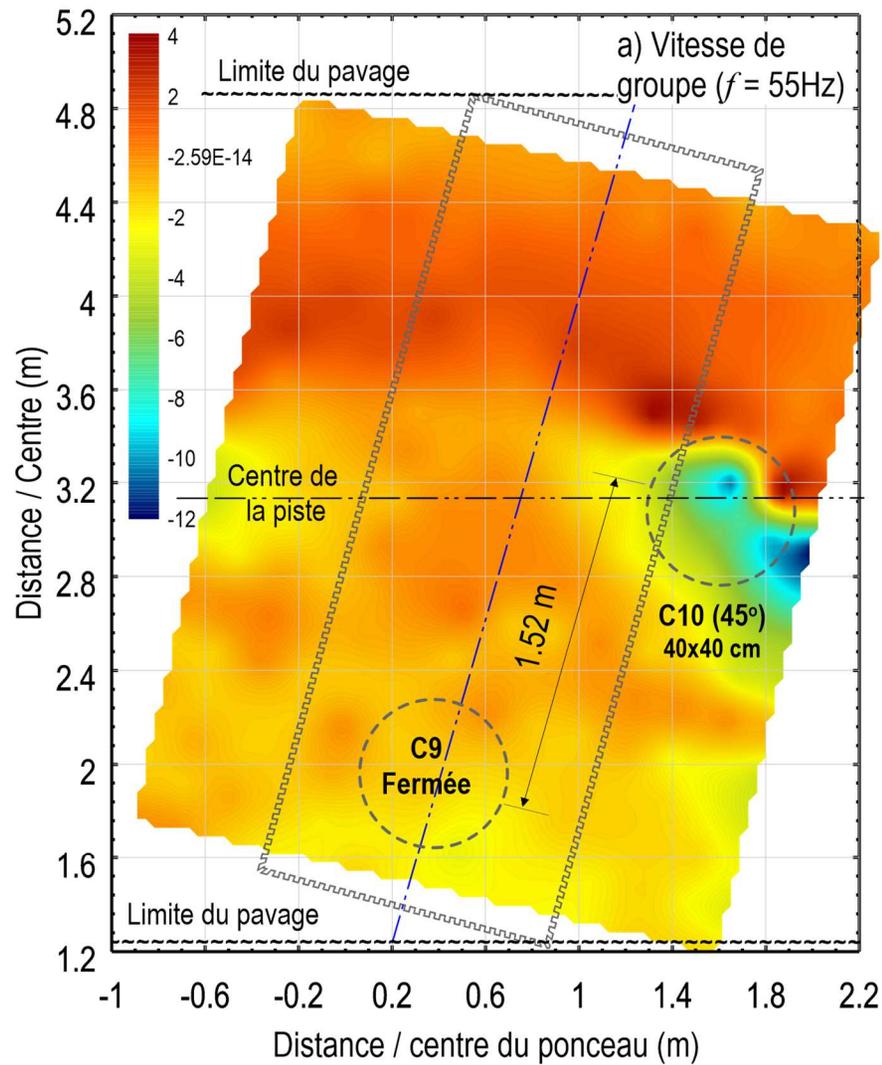


Figure A15. 3: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de la cavité C10 à 40x40x40 cm autour du ponceau 2 à une fréquence de 55 Hz (Ligne 14 - Aval)

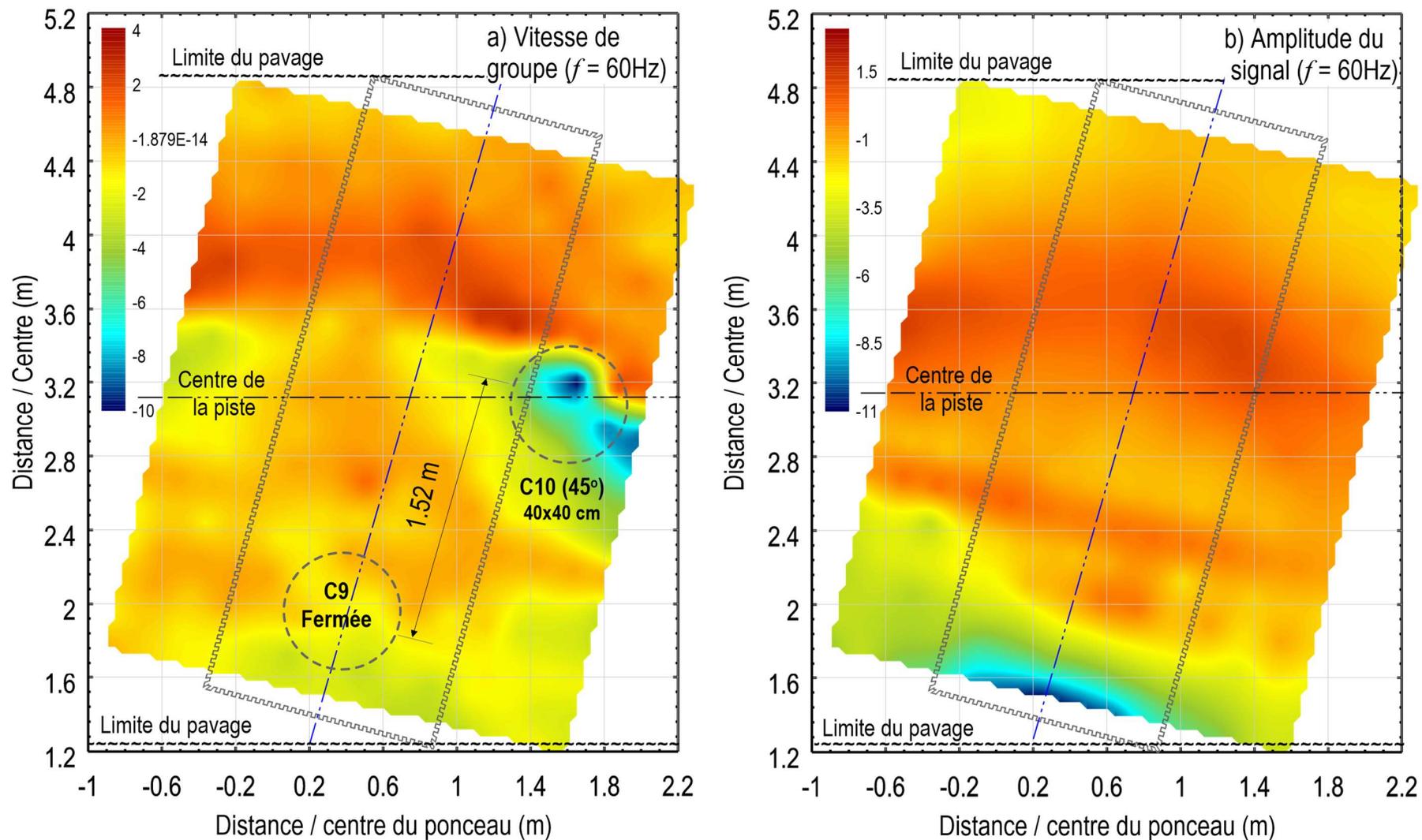
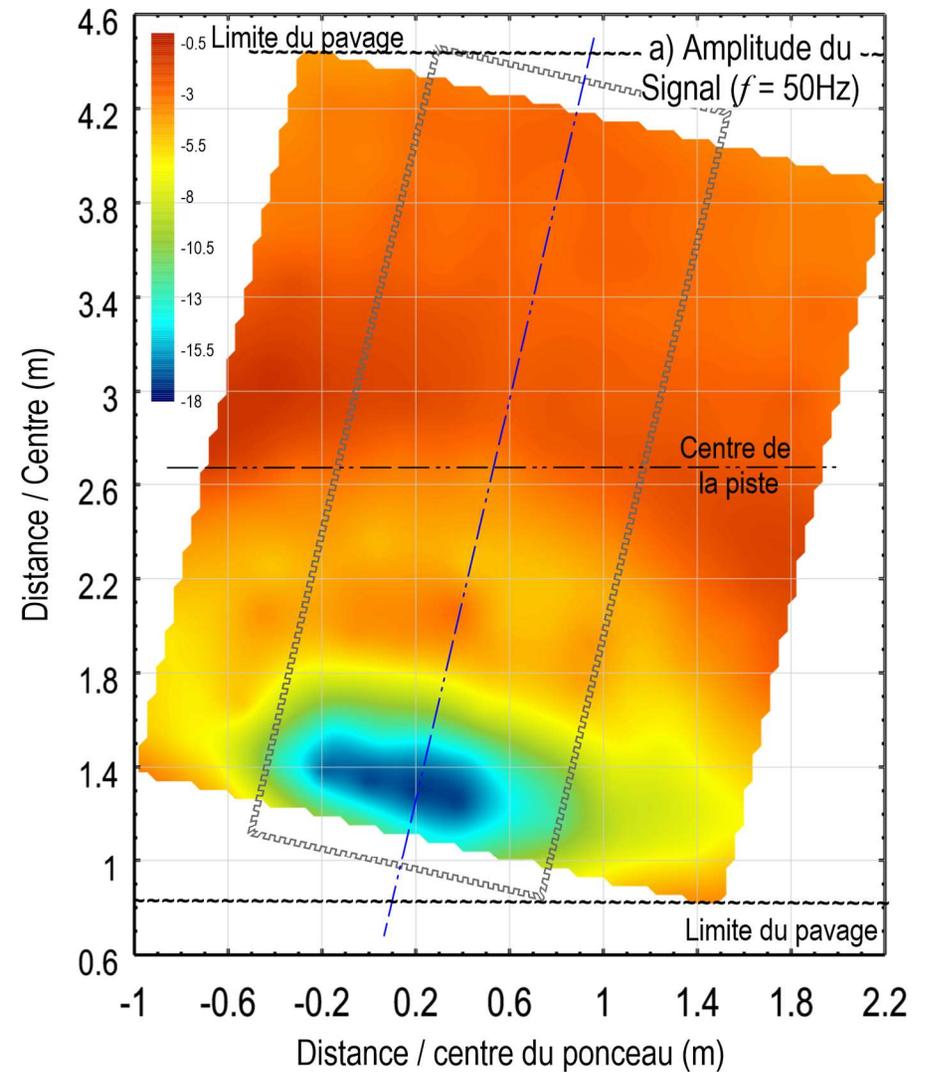
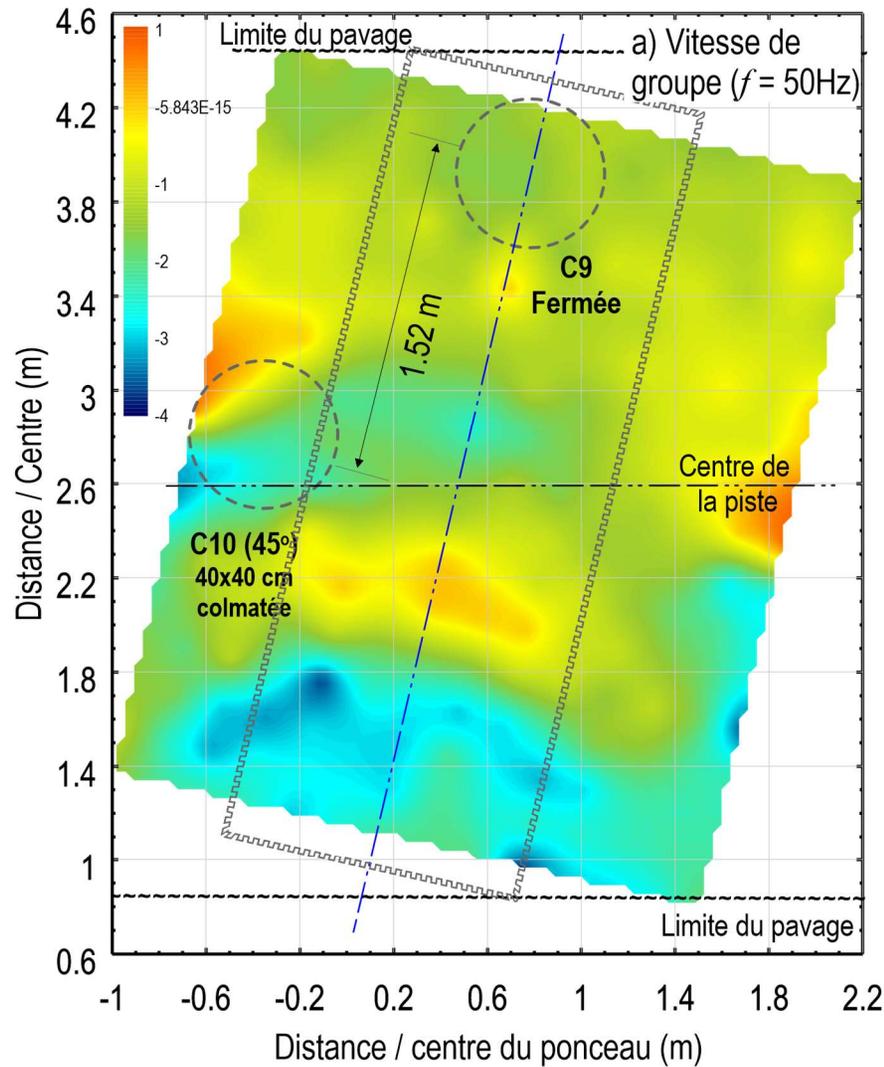
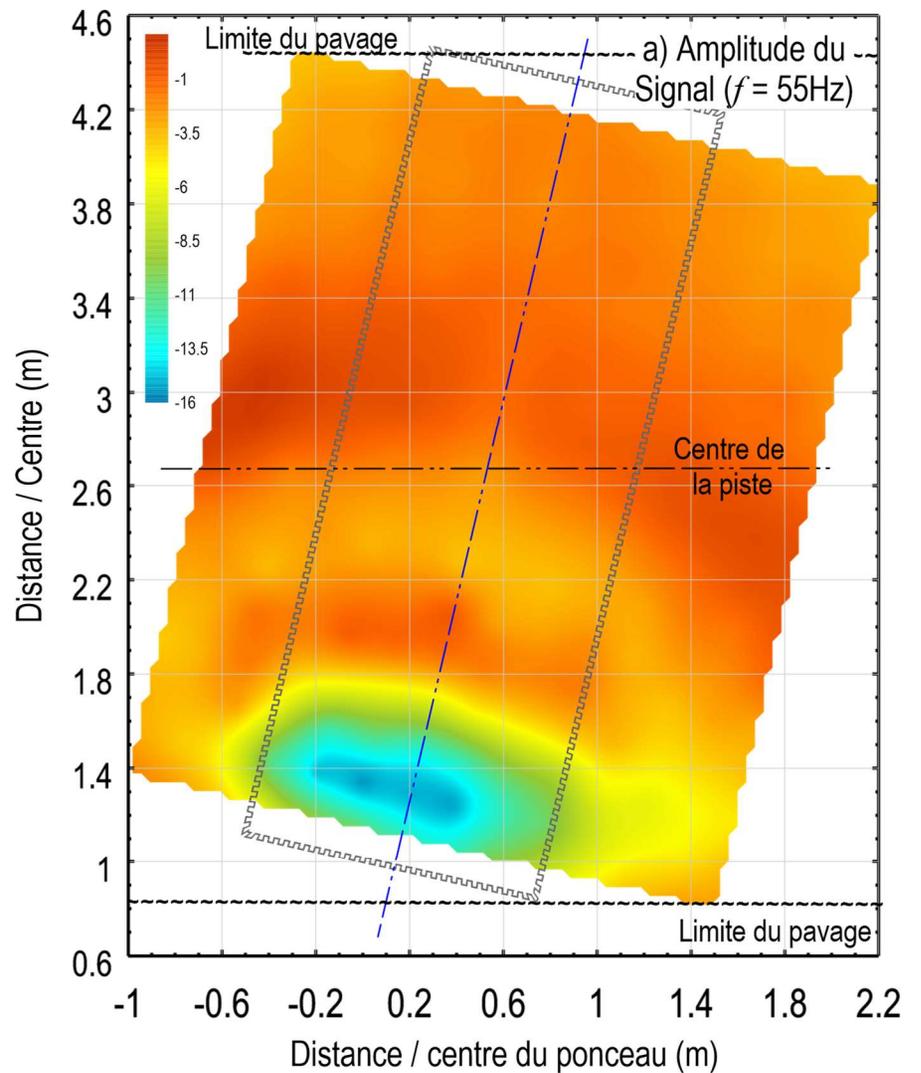
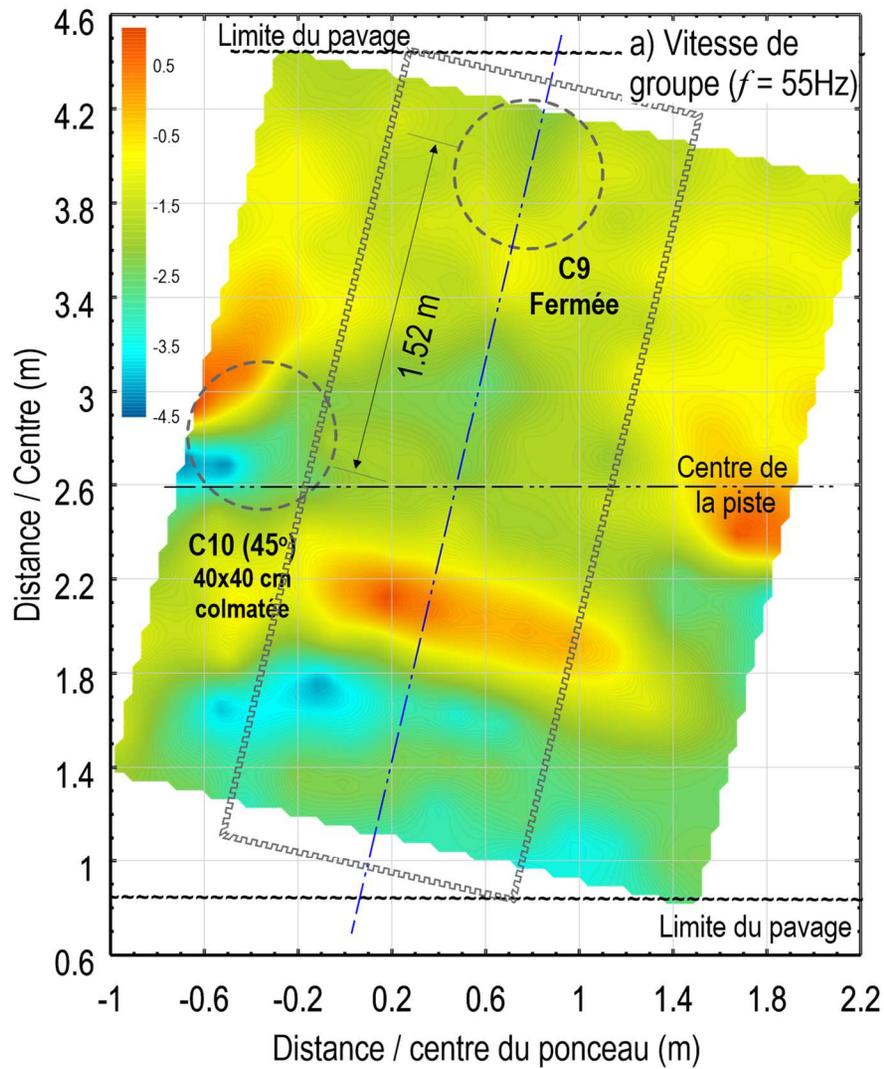


Figure A15. 4: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après la création de la cavité C10 à 40x40x40 cm autour du ponceau 2 à une fréquence de 45 Hz (Ligne 14 – Aval)

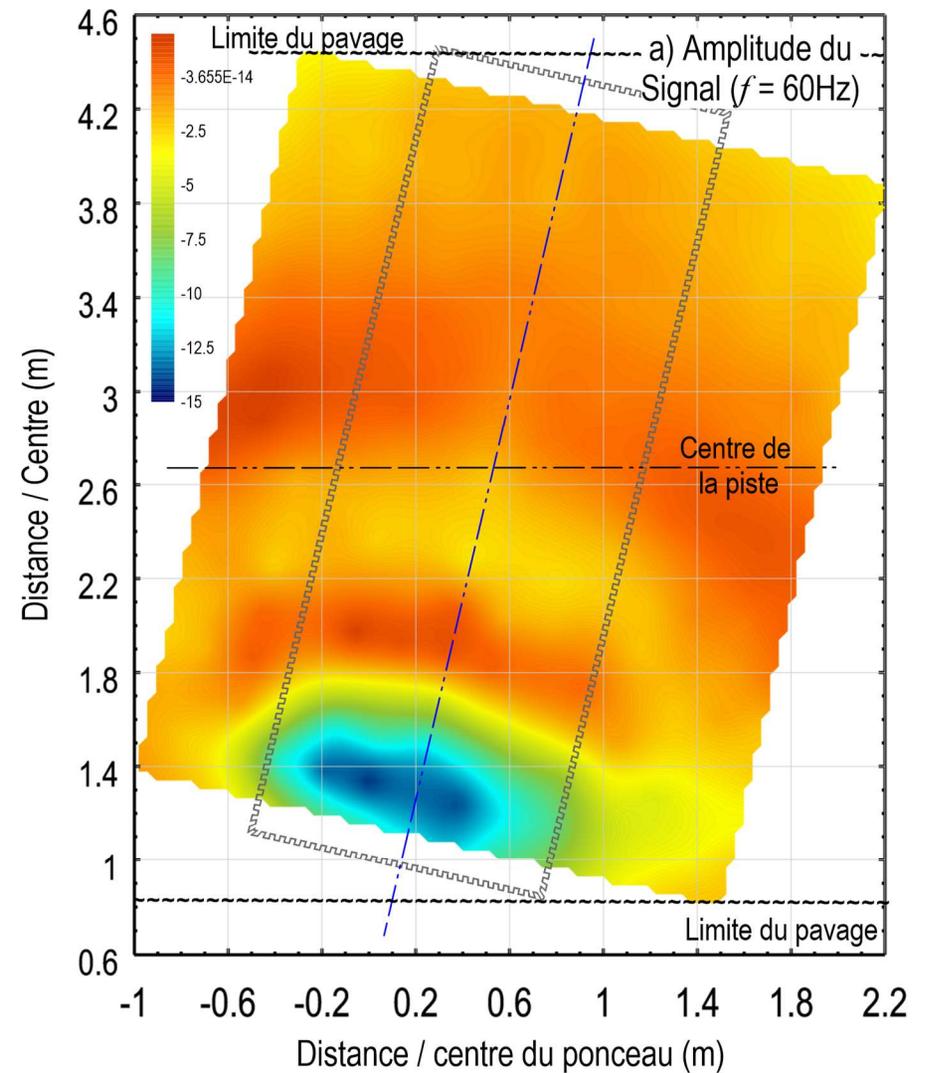
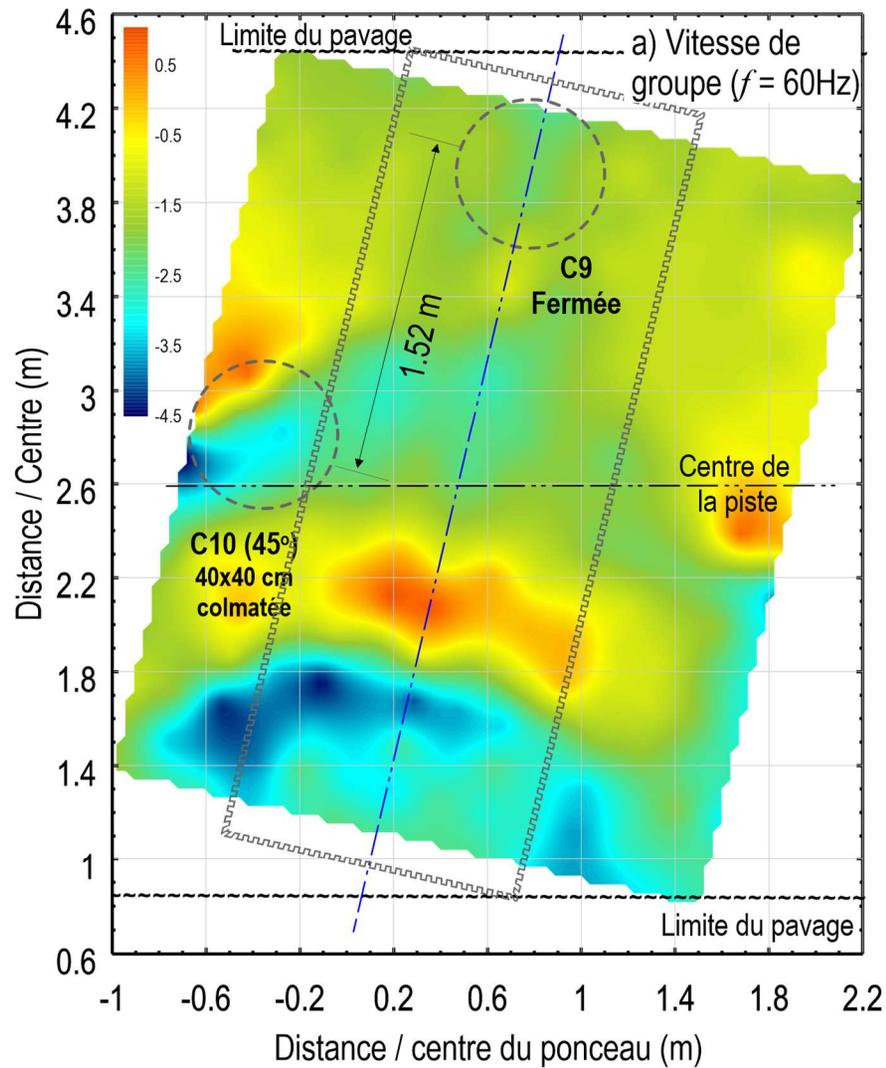
ANNEXE A16 : RÉSULTATS DES ESSAIS
EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 2 AVEC UNE
SOURCE DU CÔTÉ AMONT APRÈS
COLMATAGE DE LA CAVITÉ C10 DE
40X40X40 CM



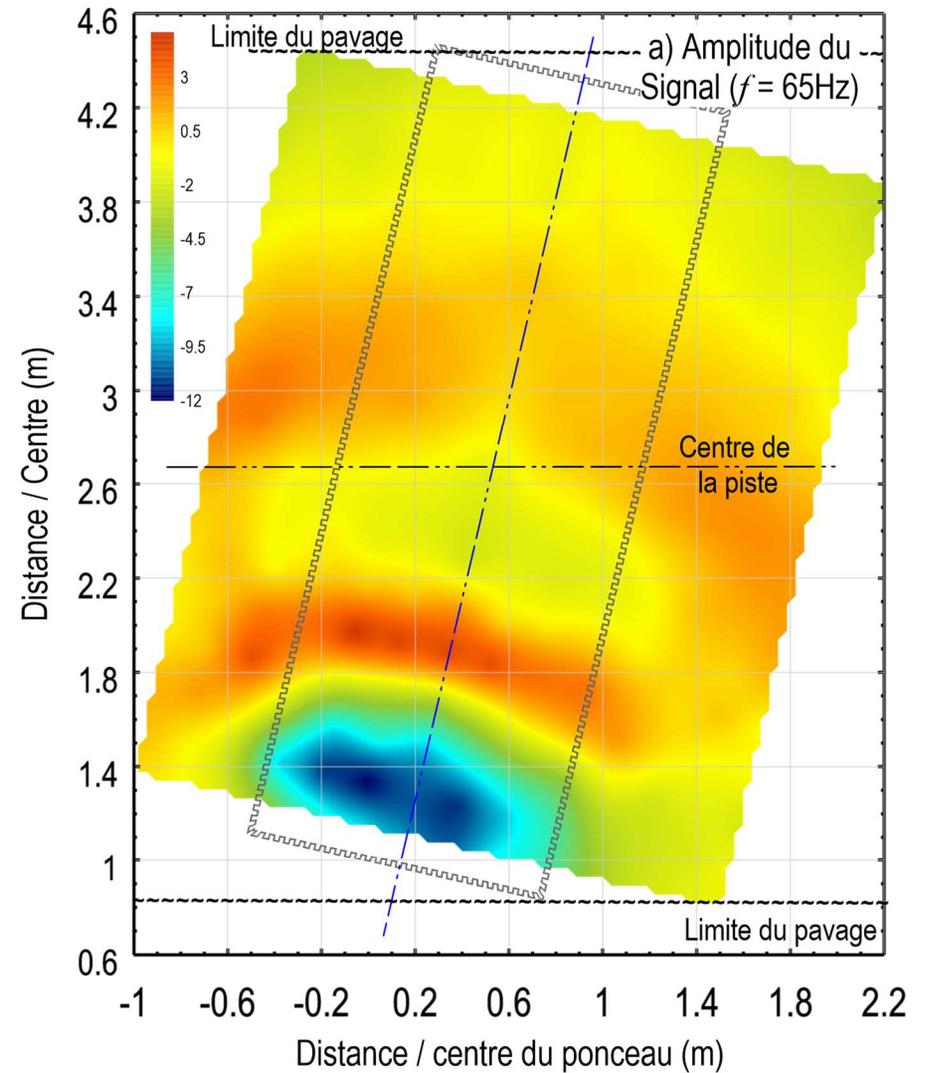
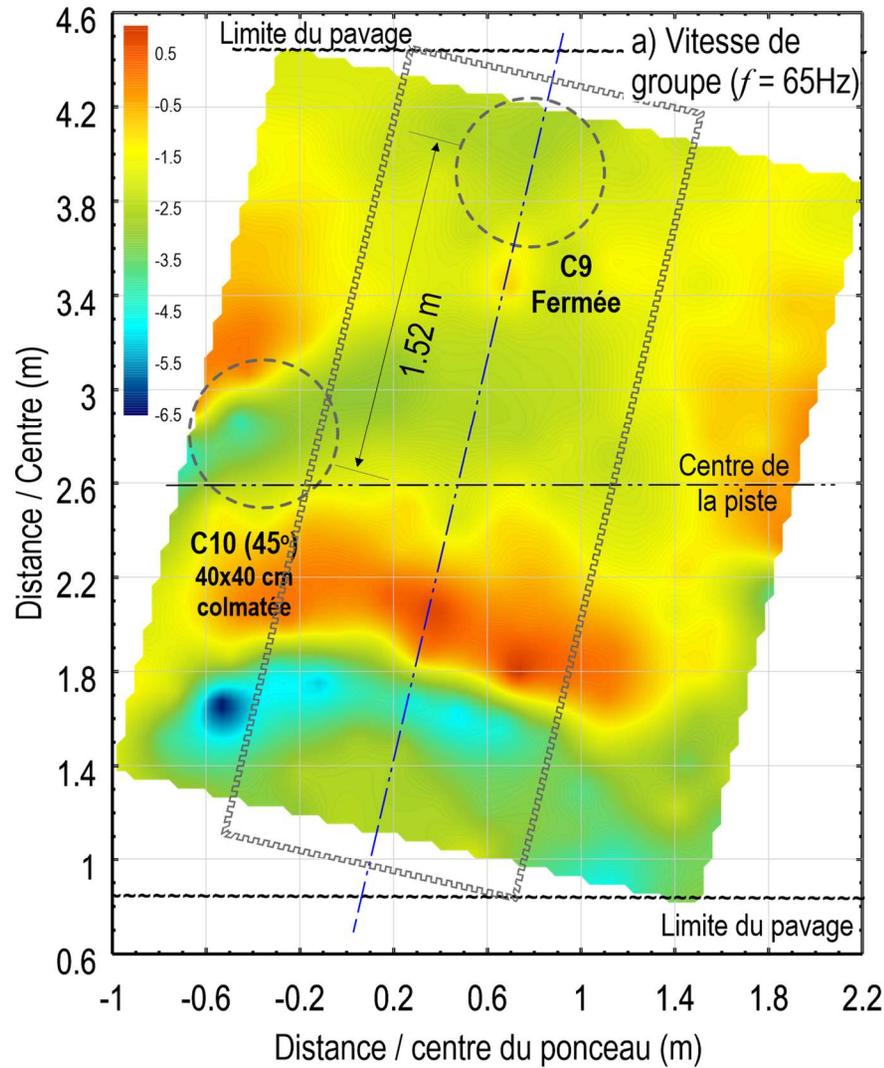
FigureA16. 1: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après le colmatage de la cavité C10 de 40x40x40 cm autour du ponceau 2 à une fréquence de 50 Hz (Ligne 16 – Amont)



FigureA16. 2: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après le colmatage de la cavité C10 de 40x40x40 cm autour du ponceau 2 à une fréquence de 55 Hz (Ligne 16 – Amont)



FigureA16. 3: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après le colmatage de la cavité C10 de 40x40x40 cm autour du ponceau 2 à une fréquence de 60 Hz (Ligne 16 – Amont)



FigureA16. 4: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après le colmatage de la cavité C10 de 40x40x40 cm autour du ponceau 2 à une fréquence de 65 Hz (Ligne 16 – Amont)

ANNEXE A17 :RÉSULTATS DES ESSAIS
EFFECTUÉS SUR LE PONCEAU 2 AVEC UNE
SOURCE DU CÔTÉ AVAL APRÈS
COLMATAGE DE LA CAVITÉ C10 DE
40X40X40 CM

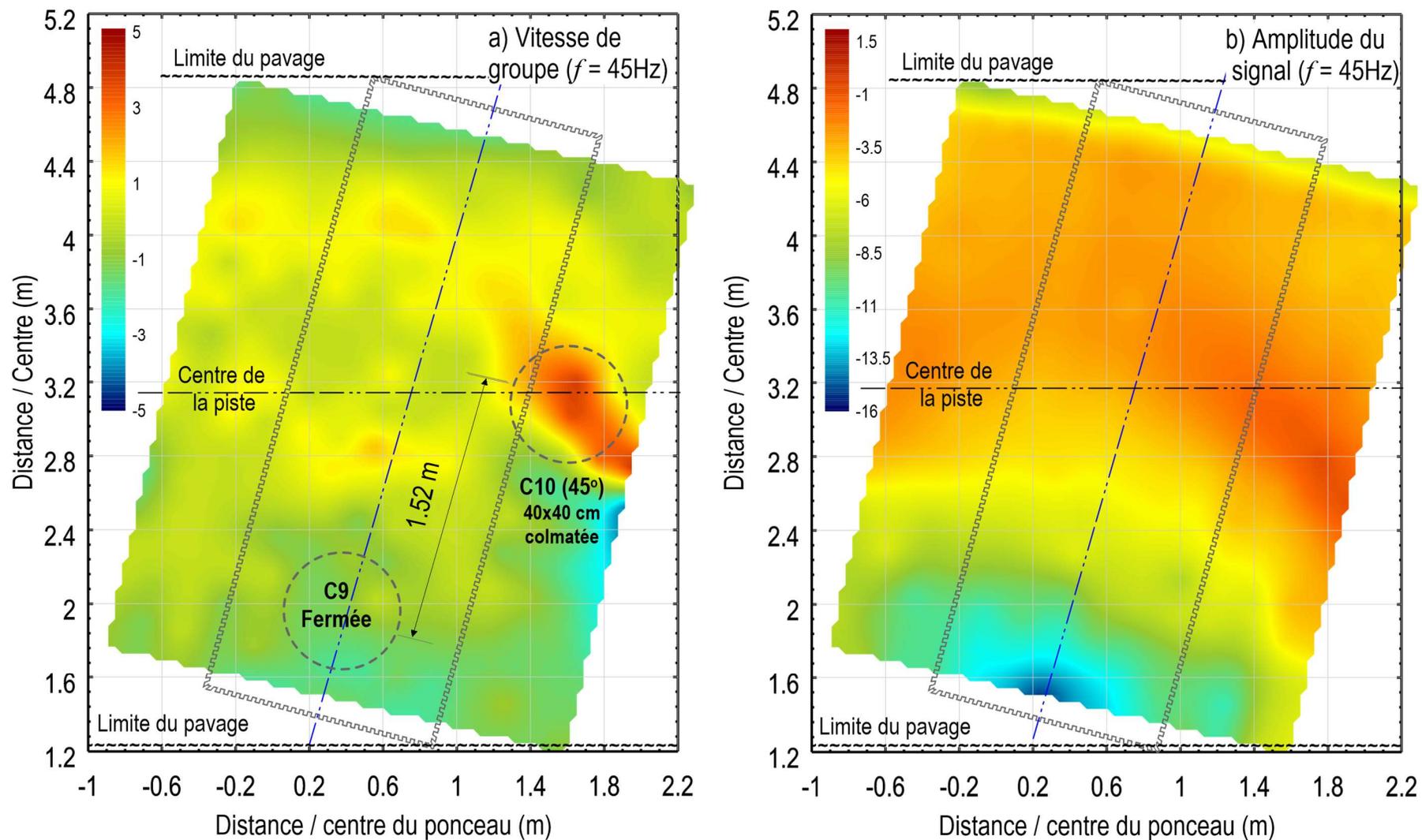


Figure A17. 1: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après le colmatage de la cavité C10 de 40x40x40 cm autour du ponceau 2 à une fréquence de 45 Hz (Ligne 16 – Aval)

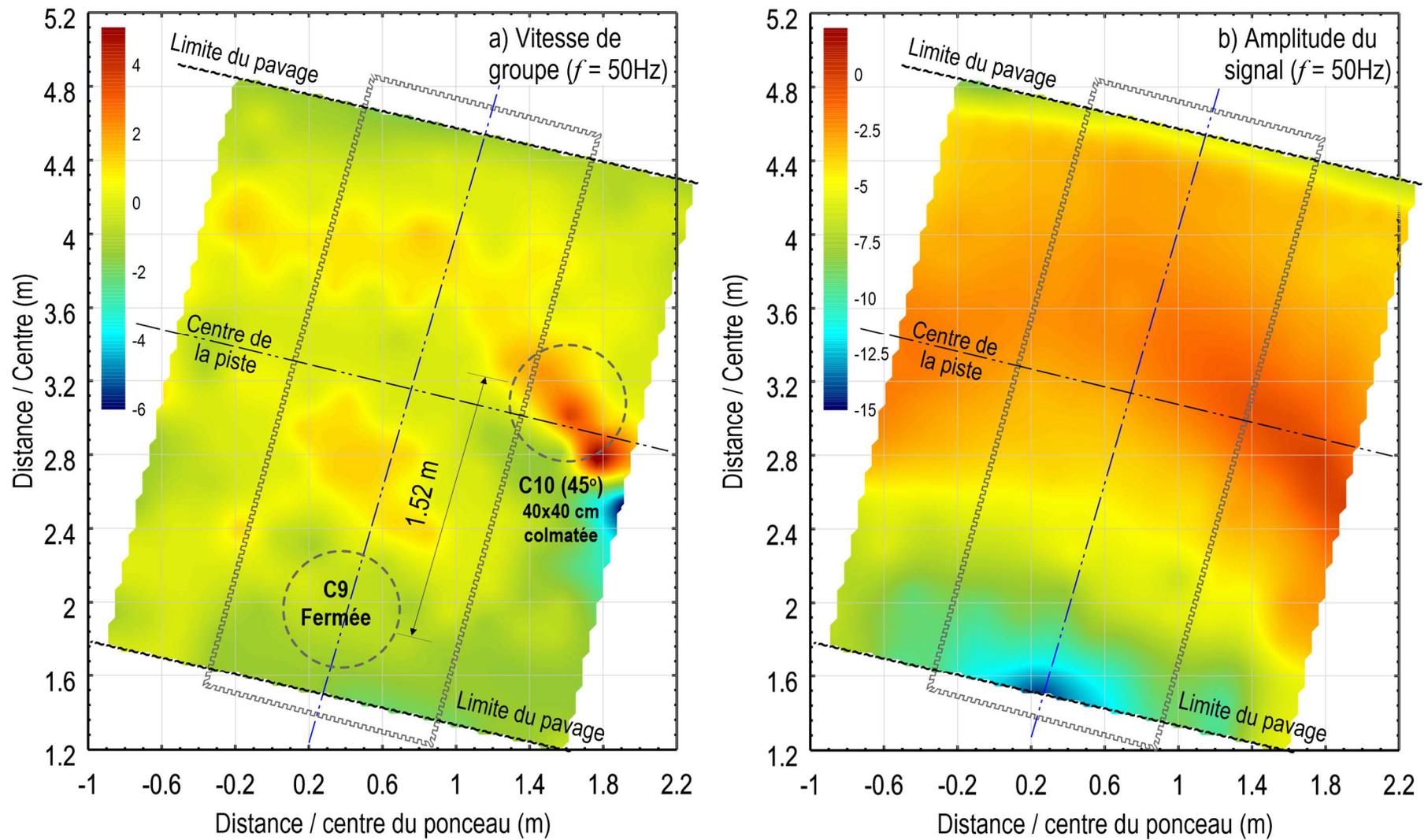


Figure A17. 2: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après le colmatage de la cavité C10 de 40x40x40 cm autour du ponceau 2 à une fréquence de 50 Hz (Ligne 16 – Aval)

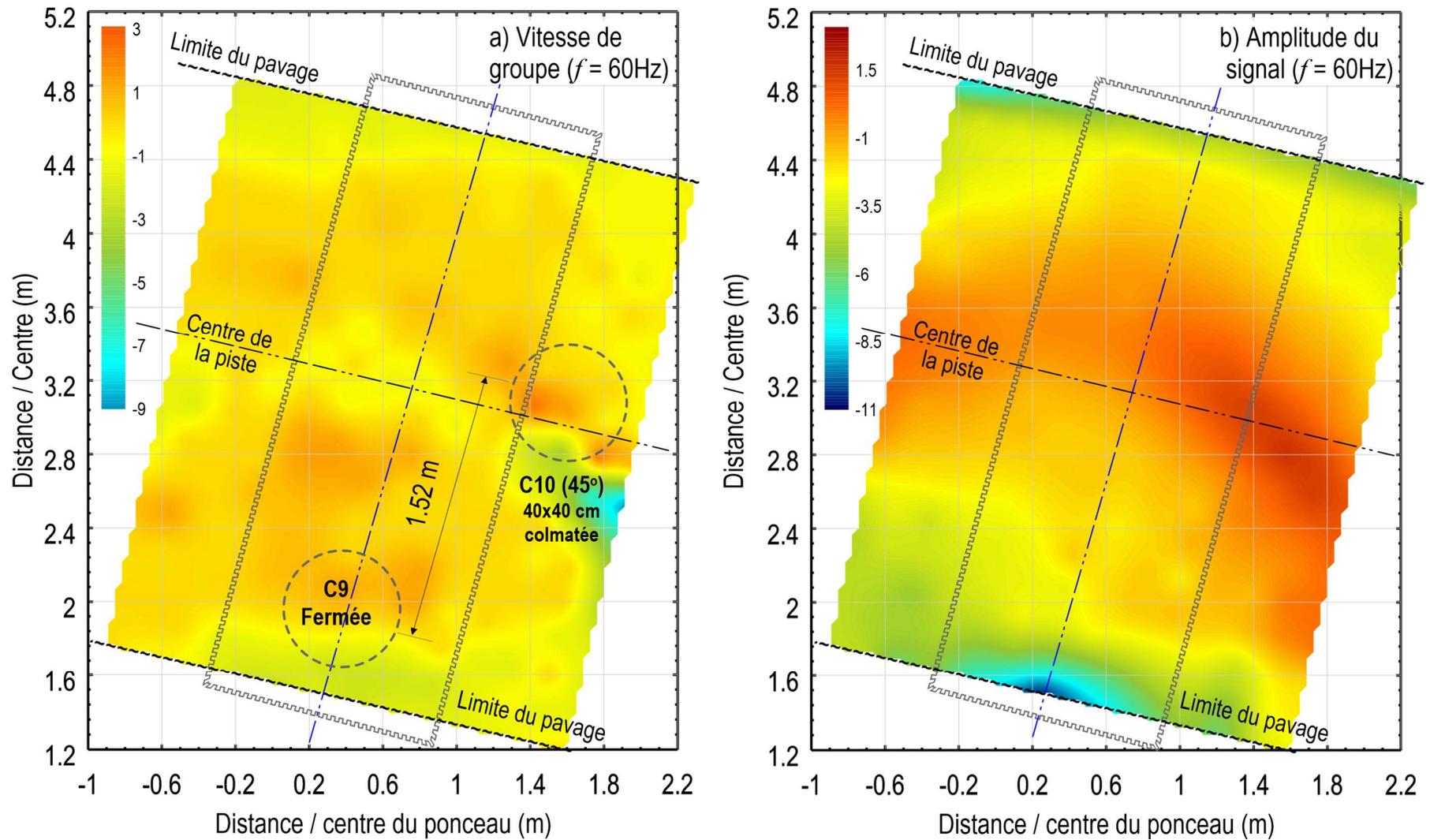


Figure A17. 3: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après le colmatage de la cavité C10 de 40x40x40 cm autour du ponceau 2 à une fréquence de 60 Hz (Ligne 16 – Aval)

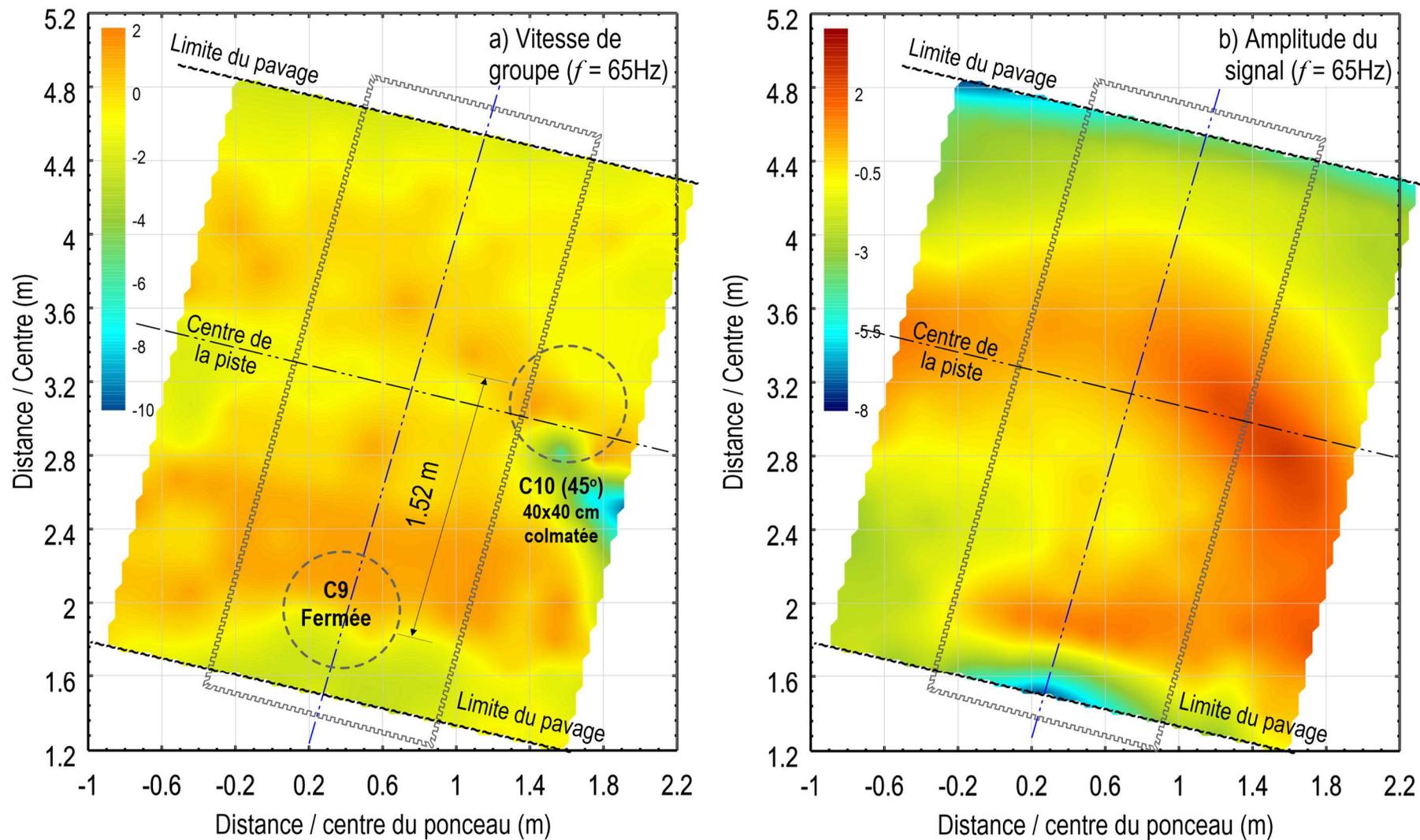


Figure A17. 4: Distribution de la variation a) de la vitesse de groupe en fonction de la fréquence et b) de l'énergie des signaux, dans l'espace couvert par les capteurs après le colmatage de la cavité C10 de 40x40x40 cm autour du ponceau 2 à une fréquence de 65 Hz (Ligne 16 – Aval)

RÉFÉRENCES

Mhenni, A., Tremblay, S. P., Karray, M. (2018) Amélioration de l'identification des cavités sous les routes et développement d'un outil de diagnostic rapide pour l'usage du MTMDET, *Rapport présenté au Ministère des Transports du Québec, Geo-12-18, 197 p.*

Kuhlemeyer, R.L. and Lysmer. J. (1973) Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems. *Journal of the Soil Dynamics Division, 99, 421-427.*

Itasca. (2012). FLAC3D: Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimension user's guide. *Itasca consulting group Inc., Minneapolis, Minnesota, 2012.*