

Les ondes soniques pour caractériser les roches fracturées dans un forage

Master en hydrogéologie et géothermie
Projet de travail de MSc

El Djamai Arar

Superviseur : Prof. Benoît Valley

20 août 2025

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde et sincère gratitude à toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire de master. Leur aide, leurs conseils et leurs encouragements ont été pour moi une source précieuse de motivation et de persévérance tout au long de ce travail.

Je souhaite tout d'abord adresser mes remerciements les plus sincères à mon encadrant, le Professeur Benoît VALLEY, pour son suivi attentif, ses conseils avisés, sa disponibilité et la confiance qu'il m'a accordée. Son expertise et son exigence scientifique ont été pour moi une source d'apprentissage et d'inspiration inestimable.

J'exprime également ma profonde reconnaissance à M. Laurent MARGUET pour son accompagnement constant dans la réalisation du modèle expérimental, ainsi que pour les efforts qu'il a déployés afin d'assurer la réussite du modèle et des tests sur site. Ses compétences techniques, mises en œuvre à chaque étape, ont été déterminantes pour la réussite de ce travail.

Mes remerciements vont aussi au Centre d'hydrogéologie et de géothermie de l'Université de Neuchâtel, à la Faculté des sciences ainsi qu'à l'Université de Neuchâtel dans son ensemble, pour leur accueil chaleureux, leur soutien logistique et les moyens mis à ma disposition. J'adresse également ma gratitude à l'ensemble des Professeurs qui m'ont formé, partagé leur savoir et transmis leur passion, contribuant ainsi à enrichir mon parcours académique.

Enfin, je dédie ce mémoire tout particulièrement à M. Norddine BOUZOURANE, que je remercie pour son aide précieuse, ainsi qu'à ma famille pour son soutien inconditionnel. Mes pensées vont particulièrement à l'âme de mon père, qui nous a quittés durant la préparation de ce master. Son souvenir reste une source de force et de motivation. À ma mère, pour son amour, sa patience et ses encouragements constants, ainsi qu'à tous mes collègues de SONATRACH Exploration qui ont travaillé avec moi, et à tous mes proches, pour leur soutien moral et leur présence bienveillante. Je dis un immense merci.

Abstract

En géophysique et en hydrogéologie, la caractérisation des réservoirs rocheux fracturés, tels que les karsts, représente un enjeu crucial pour l'évaluation et la gestion durable des ressources en eau souterraines. Le forage constitue un moyen privilégié d'accès à ces réservoirs, permettant l'analyse de leurs propriétés internes et des structures de fracturation qui les contrôlent. Ce mémoire s'intéresse à l'application des ondes soniques comme outil d'exploration et de diagnostic des structures fracturées au sein des formations rocheuses traversées par le forage. Après un rappel des principes physiques de base de la propagation des ondes acoustiques dans les milieux fracturés, les différents types d'ondes sont décrits (longitudinales P , transversales S , de Stoneley St), ainsi que les paramètres caractéristiques associés (temps de trajet, amplitude, fréquence, impédance, etc.), afin de mieux appréhender la masse importante de données qu'on peut collectées. Ces données permettent ensuite calculer la vitesse de propagation de chaque type d'onde et leur atténuation et de déduire aussi certains paramètres élastiques essentiels tels que le module de Young, le module de cisaillement, ou le coefficient de Poisson. L'étude présente aussi l'interaction avec les propriétés physiques de la roche (lithologie, porosité, pression, température) influencent la propagation des ondes. Le phénomène d'atténuation des ondes est également étudié sous ses différentes formes (absorption, diffraction dans les fractures). La méthodologie comprend une analyse détaillée du processus d'acquisition des données soniques utilisés en forage et les outils soniques, notamment les dispositifs monopolaires et dipolaires. Les différentes méthodes de calcul de l'atténuation des ondes sonique sont également abordées, notamment l'explication des équations exprimant l'atténuation en Neper par mètre ou en Décibel. Dans le cadre de cette étude, une approche simplifiée, basée sur les rapports d'amplitude et utilisant un facteur d'atténuation sans unité, a été retenue dans les conditions expérimentales. Une explication détaillée centrée sur l'analyse fréquentielle, réalisée à l'aide de la transformation de Fourier, permet d'approfondir l'interprétation des signaux acoustiques, notamment pour détecter les changements lithologiques, la présence de discontinuités, leur nature, ainsi que celle des fluides. Par ailleurs, la méthode d'analyse de la semblance, fondée sur la corrélation des signaux enregistrés entre un émetteur et plusieurs récepteurs (configuration multipoint), permet d'estimer les vitesses des ondes P , S et St , et joue un rôle crucial dans l'interprétation géophysique et géomécanique. Une série d'expériences en laboratoire a été réalisée sur un modèle de forage analogue afin de simuler différentes conditions et types de fractures (ouvertes, fermées, lisses, rugueuses), et de comparer leurs effets respectifs. Les résultats obtenus sont ensuite confrontés à des données issues de trois forages réalisés sur le site de Concise (*RSBV1*, *RSBV2*, *RSBV3*). L'interprétation conjointe des données soniques, en laboratoire comme en conditions réelles, offre ainsi une lecture fine et efficace du comportement mécanique des roches fracturées. Au final, ce travail met en évidence la pertinence des méthodes acoustiques pour localiser et caractériser les fractures dans les réservoirs rocheux, aussi bien en laboratoire que sur le terrain. Il propose également des perspectives intéressantes pour de futures applications en géosciences, en s'appuyant sur l'analyse de la vitesse et de la fréquence des ondes sonores comme indicateurs des changements lithologiques et du comportement mécanique des milieux traversés. Par ailleurs, l'atténuation de l'amplitude des ondes soniques se révèle être un outil particulièrement précis pour détecter la présence de fractures ouvertes ou fermées, ainsi que pour identifier les niveaux fracturés présentant un intérêt en tant que réservoirs.

Table des matières

Liste des figures	9
Liste des tableaux	13
1 Introduction	15
2 Les principes physiques de base de la propagation des ondes soniques dans les fractures rocheuses	17
2.1 Différents types d'ondes acoustiques dans un trou de forage	17
2.1.1 Les ondes longitudinales (P)	17
2.1.2 Les ondes transversales (S)	18
2.1.3 Les ondes d'interfaces dispersives (onde de Stoneley et pseudo-Rayleigh)	18
2.2 Principaux paramètres des ondes acoustiques	20
2.2.1 Le temps de trajet	20
2.2.2 L'amplitude d'un signal acoustique	20
2.2.3 Puissance d'un signal acoustique	20
2.2.4 Période T d'un signal	20
2.2.5 La fréquence F	21
2.2.6 La longueur d'onde	21
2.2.7 Le nombre d'onde K	21
2.2.8 La vitesse de l'onde V	21
2.2.9 La lenteur	22
2.2.10 Impédance acoustique	23
2.2.11 Coefficient de réflexion et de transmission	23
2.3 Détermination des paramètres d'élasticité à partir des ondes soniques	24
2.4 Influence de paramètres physiques sur la propagation des ondes soniques dans les roches	25
2.4.1 L'effet de la lithologie sur la propagation des ondes soniques	25
2.5 L'atténuation des ondes soniques	27
2.5.1 L'atténuation par absorption	27
2.5.2 L'atténuation dans une fracture	29
3 Méthodologie	37
3.1 Processus d'acquisition des ondes soniques dans un trou de forage	37
3.1.1 Le Principe de diagraphie acoustique dans un forage	37
3.1.2 Les outils soniques	39
3.2 Calcul de l'atténuation	42
3.2.1 Facteur d'atténuation	43
3.2.2 Atténuation apparente en dB/m	43
3.2.3 Atténuation apparente en Np/m	43
3.3 Analyse fréquentielle d'un signal acoustique (transformée de Fourier)	44
3.3.1 Transformée de Fourier continue (TFC)	44
3.3.2 Transformée de Fourier Discrète (TFD)	44
3.3.3 Spectrogramme	45
3.4 Analyse de semblance	47
4 Modèle expérimental d'un forage analogue au laboratoire	51
4.1 Présentation de l'outil sonique (QL 40-FWS M) utilisé pour les mesures acoustiques sur le modèle	53
4.2 Les différents cas et conditions expérimentales simulés	54
4.2.1 Un modèle intact, sans fracture	54

4.2.2	Fractures ouvertes dans des modèles de 10 cm et 15 cm de diamètre	55
4.2.3	Fractures fermées dans le modèle de 15 cm de diamètre	56
4.3	Résultat	57
4.3.1	Estimation de la vitesse de propagation des ondes sonique et l'atténuation des amplitudes entre $RX1$ et $RX2$	58
4.3.2	Analyse fréquentielle de premiers pics des ondes soniques	70
4.4	Discutions des expériences	77
4.5	Conclusion	78
5	Analyse des données soniques acquises sur un forage réel	81
5.1	Traitement des données des trois forage à Concise ($RSBV1$, $RSBV2$, $RSBV3$)	81
5.1.1	Cadre géologique	81
5.1.2	Estimation de la vitesse de propagation des ondes P , S et St	83
5.1.3	Analyse des paramètres élastiques	85
5.1.4	Analyse fréquentielle	88
5.1.5	Analyse de l'atténuation des premiers pics des ondes soniques P pour la détection des fractures	93
5.1.6	Conclusion	100
6	Conclusion générale	101
7	Bibliographie	103

Liste des figures

1	Schéma montrant les plages maximales et minimales par rapport à la résolution pour diverses méthodes acoustiques (Chabot et al, 2001).	16
2	Direction de propagation des ondes longitudinales P (D. Chapellier, 2023; Djeddi Mabrouk, 2017). 17	
3	Direction de propagation des ondes transversales S (D. Chapellier, 2023; Djeddi Mabrouk, 2017). 18	
4	Direction de propagation des ondes de surfaces Rayleigh ou pseudo-Rayleigh PR (D. Chapellier, 2023).	19
5	L'onde de Stoneley, voyageant à l'interface entre le forage et la formation. L'onde de Stoneley est dispersive et le mouvement de ses particules est symétrique par rapport à l'axe du forage. Aux basses fréquences, l'onde de Stoneley est sensible à la perméabilité de la formation. Les ondes traversant des fractures et des formations perméables perdent du liquide et la dissipation visqueuse provoque une atténuation de l'amplitude de ces ondes et une augmentation de leur lenteur. Dans les fractures ouvertes, les ondes de Stoneley sont à la fois réfléchies et atténuées. Les flèches rouges au centre du forage symbolisent l'amplitude des ondes de Stoneley (Haldorsen et al, 2006a).	19
6	Courbe théorique de la variation du rapport V_p/V_s en fonction du coefficient de Poisson et domaines de valeurs pour différents types de roches (Dieb. H, 2008).	22
7	Les figures montrent les vitesses des ondes: P (figure a) et S (figure b) mesurées dans des échantillons fracturés saturés d'eau. Les vitesses les plus élevées des ondes P et S ont été enregistrées dans la direction parallèle aux fractures, tandis que les vitesses les plus faibles ont été mesurées dans la direction perpendiculaire (Yuangui Zhang et al, 2023)	26
8	A : Variation de la vitesse du son dans l'eau en fonction de sa salinité, de la température et de la pression. B : Influence de ΔP sur la vitesse du son (Serra, 1984a).	26
9	Atténuation de l'onde acoustique avec la distance parcourue (Serra, 1984a).	28
10	Influence de la pression différentielle sur l'atténuation (Serra, 1984a).	29
11	Schéma de propagation de l'onde P à travers une interface à couche mince, plusieurs réflexions sont générées aux limites de fracture (Smith, 2021).	30
12	Transmission à travers une fracture en fonction de la fréquence (Pyrak-Nolte and Nolte, 1992).	32
13	Atténuation (dB/ft) (par réflexion, diffraction et absorption) à travers d'une fracture, en fonction de l'angle de pendage de la fracture pour des ondes à trajet vertical dans un forage d'après (Morris et al, 1964; Serra, 1984a).	34
14	Trajets de rayons indiquant la propagation de l'onde P à travers des fractures à des angles de a) 0° et b) 20° . Les rayons ont été tirés à partir des bords et du centre du bord source en utilisant la loi de Snell. (Smith, 2021).	34
15	Trajets de rayons indiquant la propagation de l'onde P à travers des fractures à des angles de a) 45° et b) 90° . Les rayons ont été tirés à partir des bords et du centre du bord source en utilisant la loi de Snell. (Smith, 2021).	35
16	Interprétation du coefficient de transmission pour les modèles avec différents angles de fracture, soulignant l'importance du rapport c/λ . (λ) est la longueur d'onde, (C) est la longueur de fracture (Smith, 2021)	35
17	Exemple des résultats fréquentiels et l'atténuation de l'onde sonique P avec différents matériaux de remplissage des fractures (Smith, 2021)	36

18	Réflexion et réfraction du front d'onde sonique aux interfaces, et loi de Snell. θ_1 est l'angle d'incidence et celui des ondes P réfléchies ; θ_2 est l'angle des ondes P réfractées ; θ_s est l'angle des ondes S réfractées. V_m est la vitesse de propagation des ondes soniques dans la boue, V_p est la vitesse de l'onde P dans la formation, et V_s celle de l'onde S dans la formation. Lorsque l'angle de réfraction est égal à 90° , une onde de tête se produit. La loi de Snell régit la relation entre les angles d'incidence et de réfraction des ondes de corps (cisaillement et compression) (Haldorsen et al, 2006a).	37
19	Schéma représente l'enregistrement d'un outil acoustique avec une source (émetteur) et un ensemble de récepteurs, et un chemin des rayons de propagation des ondes représentés par les lignes coupées. La forme d'onde reçue typique montre les ondes P , S , pseudo-Rayleigh (PR) et Stoneley (ST) (Wang et al, 2020).	38
20	Formes d'onde typiques d'un émetteur monopolaire dans une formation rapide, montrant des ondes de compression, de cisaillement et de Stoneley. Les lignes pointillées roses représentent les heures d'arrivée. Un réseau de récepteurs d'outil de diagraphe sonique est illustré à gauche (Haldorsen et al, 2006a).	38
21	Outil monopole avec un émetteur des ondes longitudinales P et des récepteurs répartis à une certaine distance (Wang et al, 2020)	40
22	Une source monopole qui émis des ondes types longitudinales P et déférentes ondes enregistrées dans les formation lentes et rapides (Schlumberger Wireline & Testing., 1998)	40
23	Outil Dipôle avec deux émetteurs des ondes de réflexions et des récepteurs répartis azimutalement (Haldorsen et al, 2006a).	41
24	Une source dipolaire qui émis des ondes de refixions pour générer des ondes de surface type Stoneley dans une formation lente (Schlumberger Wireline & Testing., 1998).	42
25	La figure montre le signal initial en fonction du temps ainsi que son spectre de fréquence, obtenu par application de la transformée de Fourier.	45
26	Spectrogramme d'une onde complète au premier récepteur et au deuxième récepteur, avec le calcul des fréquences dominante et médiane	45
27	fréquence dominante d'un spectre correspond à la composante fréquentielle prédominante dans le signal (détermination de la fréquence dominante par projection du maximum spectral sur l'axe des fréquences pour lire la fréquence dominante).	46
28	fréquence médiane correspond a la moitié de l'aire totale sous le spectre. L'aire représente la moitié de l'énergie spectrale totale.	47
29	Espace de travail pour l'analyse de semblance, composé de plusieurs diagrammes l'interprétation : 1- forme d'onde complète des 3 récepteurs avec la profondeur. 2- Diagramme de cohérence temps-lenteur. 3- Analyse e vitesse montre les maximas de cohérence sur l'axe de lenteur. 4- La barre de filtre montrant un spectre de fréquence dérivé des traces sonores. 5- Les paramètres de l'espace de travail. 6- La barre d'outils de l'espace de travail avec des icônes de fonctionnalités.7- Le graphique Lenteur-Fréquence-Cohérence.	49
30	Les vitesses des ondes P , S et Stoneley ont été estimées à partir des données soniques du forage à l'aide de l'analyse de semblance, puis représentées sous forme de logs.	49
31	Le matériel nécessaire pour le modèle expérimental d'un forage analogue.	51
32	Model expérimental intact.	52
33	Cinq vues illustrant la réalisation du modèle expérimental	52
34	Dimensionnement d'outil sonique QL 40-FWS M. La première image montre le dispositif sans bouchons, et la deuxième avec les bouchons de protection (Advanced Logic Technology, 2020).	54
35	Outil sonique QL 40-FWS M	54
36	D . Une fracture ouverte lisse, dans un modèle 15 cm de diamètre). E . Une fracture ouverte rugueuse dans le deux modèle de 10 cm de diamètre. F . Plusieurs fractures ouvertes lisses, dans le modèle de 15 cm de diamètre	56

37	G. Une fracture fermée lisse, dans le modèle de 15 cm de diamètre. H. Deux fractures fermées lisses superposées, dans le modèle de 15 cm de diamètre.	57
38	La forme d onde sonique au premier récepteur et au deuxième récepteur (modèle rempli d'eau sans tube.	58
39	A: Forme d onde sonique moyennée <i>RX1 RX2</i> ($D = 10$ cm, rempli d'eau). B: Forme d onde sonique moyennée <i>RX1RX2</i> ($D = 10$ cm, rempli de boue $d = 1.035$ g/ml)	59
40	A: Forme d onde sonique moyennée <i>RX1RX2</i> ($D = 15$ cm, rempli d'eau).B: Forme d onde sonique moyennée. <i>RX1RX2</i> ($D = 15$ cm, rempli de boue $d = 1.035$ g/ml).	59
41	A: Forme d onde sonique moyennée <i>RX1RX2</i> ($D = 15$ cm, modèle intact). B: Forme d onde sonique moyennée. <i>RX1RX2</i> ($D = 15$ cm, modèle avec une fracture lisse ouverte).	60
42	A: Forme d onde sonique moyennée <i>RX1RX2</i> ($D = 10$ cm, modèle avec une fracture rugueuse ouverte). B: Forme d onde sonique moyennée. <i>RX1RX2</i> ($D = 15$ cm, modèle avec une fracture lisse ouverte.	60
43	Forme d onde sonique moyennée <i>RX1RX2</i> ($D = 15$ cm, modèle de 3 fractures lisses ouvertes).	61
44	A: Forme d onde sonique moyennée <i>RX1RX2</i> ($D = 15$ cm, 1 fracture fermée, 15 cm sous <i>RX2</i>). B: Forme d onde sonique moyennée. <i>RX1RX2</i> ($D = 15$ cm, 1 fracture fermée, 10 cm sous <i>RX2</i>).	61
45	Forme d'onde sonique moyennée <i>RX1RX2</i> ($D = 15$ cm, modèle de 2 fractures fermées).	62
46	A: premier arrivée des ondes sonique.B: premier pic des ondes sonique (mesurer dans l'eau).	63
47	A: premier arrivée des ondes sonique.B: premier pic des ondes sonique ($d = 10$ cm, rempli d'eau).	63
48	A: premier arrivée des ondes sonique. B: premier pic des ondes sonique ($D = 10$ cm, rempli de boue $d = 1.035$ g/ml)).	64
49	A: premier arrivée des ondes sonique. B: premier pic des ondes sonique ($D = 15$ cm, rempli d'eau).	64
50	A: premier arrivée des ondes sonique. B: premier pic des ondes sonique ($D = 15$ cm, rempli de boue $d = 1.035$ g/ml).	65
51	A: premier arrivée des ondes sonique.B: premier pic des ondes sonique ($D = 15$ cm, avec une fracture lisse ouverte.	65
52	A: premier arrivée des ondes sonique.B: premier pic des ondes sonique ($D = 10$ cm, avec une fracture rugueuse ouverte.	66
53	A: premier arrivée des ondes sonique.B: premier pic des ondes sonique ($D = 15$ cm, avec 3 fractures lisses ouverte.	66
54	A: premier arrivée des ondes sonique(1 fracture fermée, 5cm sous <i>RX2</i>) B: premier pic des ondes sonique ($D = 15$ cm, 1 fracture fermée, 5 cm sous <i>RX2</i>).	67
55	A: premier arrivée des ondes sonique(1 fracture fermée, 10 cm sous <i>RX2</i>) B: premier pic des ondes sonique ($D = 15$ cm, 1 fracture fermée, 10 cm sous <i>RX2</i>).	67
56	Logging d'une fracture fermée (enregistrement en fonction de profondeur (chaque 1 cm)).	68
57	A: premier arrivée des ondes sonique(2 fracture fermée). B: premier pic des ondes sonique ($D = 15$ cm, 2 fracture fermée.	69
58	Logging de 2 fractures fermées (enregistrement en fonction de profondeur (chaque 1 cm)).	69
59	Spectre de fréquence de premier pic (mesure dans l'eau).	70
60	A: Spectres de fréquences ($D = 10$ cm rempli d'eau).B: Spectres de fréquences ($D = 10$ cm, rempli de boue $d = 1.035$ g/ml).	71
61	A: Spectres de fréquences ($D = 15$ cm rempli d'eau). B: Spectres de fréquences ($D = 15$ cm, rempli de boue $d = 1.035$ g/ml)	72
62	Spectre de fréquence de premier pic (modèle une fracture lisse ouverte).	73
63	Spectre de fréquence de premier pic ($D = 10$ cm,modèle une fracture rugueuse ouverte)	73
64	Spectre de fréquence de premier pic ($D = 15$ cm,modèle de 3 fractures lisses ouvertes).	74
65	A: Spectres de fréquences, $D = 15$ cm (1 fracture fermée, 5 cm dessus <i>RX2</i>). B: Spectres de fréquences, $D = 15$ cm, (1 fracture fermée, 10 cm sous <i>RX2</i>).	75

66	A: Spectrogramme des ondes sonique dans .B: Fréquence dominante et médiane (($D = 10$ cm, rempli de boue $d = 1.035$ g/ml)	76
67	A: Spectrogramme des ondes sonique dans .B: Fréquence dominante et médiane (($D = 10$ cm, modèle avec une fracture rugueuse ouverte).	76
68	Comparaison globale des vitesses V_p des cas expérimentaux).	79
69	Comparaison globale de l'atténuation (ratios $RX2/RX1$) des cas expérimentaux).	79
70	Quatre vues illustrant l'acquisition des données soniques sur les trois forages $RSBV1$, $RSBV2$ et $RSBV3$	81
71	La colonne stratigraphique des forage $RSBV1$, $RSBV2$, $RSBV3$	82
72	$RSBV1$: Vitesse P , $P_{semblance}$, $S_{semblance}$, $St_{semblance}$	84
73	A: $RSBV2$: Vitesse P , $P_{semblance}$, $S_{semblance}$, $St_{semblance}$.B: $RSBV3$: Vitesse P , $P_{semblance}$, $S_{semblance}$, $St_{semblance}$	85
74	$RSBV1$: Logs de vitesse P , S , modules d'élasticités.	87
75	A: $RSBV2$: Logs de vitesse P , S , modules d'élasticités. B: $RSBV3$: Logs de vitesse P , S , modules d'élasticités.	88
76	Spectrogrammes des fréquences dominante et médiane en fonction de la profondeur. Forage $RSBV1$	90
77	A: Spectrogrammes des fréquences dominante et médiane en fonction de la profondeur. Forage $RSBV2$. B: Spectrogrammes des fréquences dominante et médiane en fonction de la profondeur. Forage $RSBV3$	90
78	$RSBV1$: Logs de vitesse P et atténuation es amplitude avec la carte des fréquence dominante moyenne.	91
79	$RSBV1$: Log de fréquence dominante moyenne.	92
80	A: $RSBV2$: Log de fréquence dominante moyenne. B: $RSBV3$: Log de fréquence dominante moyenne.	92
81	$RSBV1$: Log du facteur d'atténuation des amplitudes des premiers pics et l'imagerie.	94
82	$RSBV1$: Log du facteur d'atténuation des amplitudes des premiers pics et l'imagerie	95
83	Log du facteur d'atténuation des amplitudes des premiers pics et la lithologie du forage ($RSBV1$).	96
84	A: Log du facteur d'atténuation des amplitudes des premiers pics ($RSBV2$). B: Log du facteur d'atténuation des amplitudes des premiers pics ($RSBV3$).	97
85	$RSBV1$: Log du facteur d'atténuation des amplitudes des premiers pics et la vitesse des ondes P	97
86	$RSBV1$: Figure illustrant l'atténuation des amplitudes en réponse à une fracture de type sinusoïdal, tandis que la vitesse des ondes P ne montre pas de variation significative à ce niveau.	98
87	$RSBV1$: Figure illustrant l'atténuation des amplitudes en réponse à une fracture rempli d'argile, tandis que la vitesse des ondes P ne montre pas de variation significative à ce niveau.	98
88	$RSBV2$: La figure illustre une fracture fermée, mise en évidence par un facteur d'atténuation modérée des ondes (~ 0.41) et une vitesse des ondes P relativement élevée (~ 5500 m/s), suggérant un bon contact entre les parois de la fracture.	99
89	$RSBV2$: figure illustre une fracture ouverte sub-verticale, associée à une forte atténuation du signal (valeur du facteur d'atténuation d'environ 0.20), tandis que la vitesse des ondes P reste relativement élevée, comprise entre 4400 et 4900 m/s).	99
90	$RSBV3$: Fracture fermée remplie d'argile : facteur d'atténuation modéré (0.41) et vitesse des ondes P élevée (4500 m/s).	100

Liste des tableaux

1	Valeurs des vitesses V_p et V_s et de la densité de différentes formations géologiques (Dieb. H, 2008).	23
2	Ordres de grandeur typiques des paramètres élastiques pour différentes roches (Bijay et al, 2019; BOURBIÉ, et al, 1986; Djeddi Mabrouk, 2017; Fjær et al, 2008)	25
3	Vitesse de l'onde P et rigidité dynamique de la fracture pour différents modèles d'ouverture (lisse, 90° par rapport à la propagation de l'onde) et différentes rugosités (ouvertures de 0.88 mm, 90° par rapport à la propagation de l'onde) Smith (2021).	33
4	Vitesse d'onde P en fonction de la rigidité dynamique de la rupture dans différents matériaux de remplissage (Smith, 2021)	36
5	Résumé des principaux modes d'ondes dans le forage ($VP > VS > Vf$) (Chabot, 2003 ; Rajabi et al., 2010) (Nourhan Tartoussi, 2023).	39
6	Quelques caractéristiques des outils acoustiques (Mari, 2020).	42
7	Résumé des différents cas étudiés.	57
8	Comparaison des milieux homogènes – eau, boue, béton	78
9	Effets des fractures simples et multiples sur la propagation	78
10	Étude de l'effet de la position et du nombre de fractures fermées	78
11	Donné des forages étudiés	82

1 Introduction

La caractérisation des réservoirs rocheux fracturés représente une étape clé dans le cadre d'exploration par forages, qu'ils soient réalisés pour des objectifs hydrogéologiques, géothermiques ou pétroliers, il est indispensable de pouvoir s'appuyer sur des outils à la fois performants, rapides et capables de fournir des données à haute résolution. Ces technologies doivent permettre de prendre des décisions rapidement, dans des délais courts, afin de limiter les coûts. Les méthodes traditionnelles ne suffisent plus à appréhender la complexité des milieux fracturés, d'où l'importance croissante des techniques acoustiques avancées dans l'analyse in-situ.

La diaggraphie acoustique s'impose comme l'une des méthodes les plus performantes, cette méthode repose sur l'analyse des ondes acoustiques générées dans le forage et capables de fournir des informations précieuses sur la porosité, la nature de la roche, les discontinuités et sur les fractures et leur contenu fluide (eau ou gaz), dans les formations traversées par le forage. Ces informations sont des indicateurs essentiels pour l'évaluation des aquifères et la nature du milieu souterrain.

Les fractures présentes dans les formations géologiques jouent un rôle essentiel dans la capacité de stockage des fluides dans les réservoirs. Elles ont un impact direct sur leurs propriétés mécaniques et hydrogéologiques. En raison de cette importance que la caractérisation des fractures suscite un intérêt croissant, notamment par le biais des méthodes acoustiques.

De nombreuses études ont montré que l'espacement des fractures, leur géométrie et leur remplissage (eau, gaz ou minéraux), influencent significativement le comportement des ondes acoustiques, notamment à travers l'atténuation de leur amplitude, la diminution de leur vitesse de propagation, et les variations de fréquence observées.

Plusieurs études (par exemple: Philip Siu and Yu Cheung, 1984; Saito et al, 2004) ont montré l'importance de ces effets dans l'interprétation des logs acoustiques.

Les méthodes d'acquisition de données acoustiques couvrent aujourd'hui un large éventail d'échelles (Fig. 1), allant du millimètre jusqu'à plusieurs centaines de mètres, offrant une vision multi-échelle adaptée à différents objectifs d'étude et d'ingénierie du sous-sol.

Dans ce contexte, le but principal de cette étude est de développer et d'évaluer des méthodes de caractérisation acoustique capables de détecter et de quantifier les fractures dans les réservoirs rocheux en offrant une très bonne résolution dans l'espace et dans le temps. Cette démarche vise à améliorer la qualité des diagnostics tout en réduisant la durée d'une étude d'un réservoir fracturé. En comprenant mieux l'impact des fractures sur la dynamique des fluides et les propriétés mécaniques permettra d'optimiser la gestion des ressources et d'anticiper les risques liés à l'exploitation.

L'étude vise notamment à répondre aux questions suivantes :

1. Quel est le paramètre acoustique le plus efficace pour la détection des fractures dans les formations géologiques : la vitesse des ondes (P et S) ou l'atténuation de leur énergie ?
2. Dans quelle mesure les variations d'atténuation des ondes acoustiques permettent-elles d'identifier de manière fiable les zones de fractures remplies d'eau ou d'autres fluides ?
3. La diminution de la vitesse des ondes P et S est-elle systématiquement corrélée à la présence de fractures dans les formations traversées ?
4. L'analyse fréquentielle des ondes soniques apporte-t-elle un avantage pour la détection des fractures et la caractérisation des fluides contenus ?
5. La diaggraphie acoustique permet-elle de détecter des fractures fines ($< 1mm$) ou subverticales, généralement non identifiables par d'autres méthodes classiques de diaggraphie ?

Pour répondre à ces questions, l'étude s'organise en plusieurs étapes complémentaires :

- Tests en laboratoire : réalisation d'expériences acoustiques à l'aide d'un outil sonore BHC sur des échantillons de tubes en béton non armé, de différents diamètres, artificiellement fracturés afin de simuler un puits réel. Ces essais permettent d'observer le comportement des ondes soniques au sein des fractures et de traiter les données pour obtenir des résultats de référence fiables.
- Tests in-situ : réalisation des mesures avec un outil sonore sur trois forages réels situés sur des sites d'intérêt, avec acquisition et traitement des données collectées dans ces ouvrages existants. Ces résultats sont ensuite comparés aux références obtenues lors des essais en laboratoire sur des forages analogues.

Cette démarche permet ainsi de répondre aux questions posées et d'obtenir une vision globale et cohérente du comportement des ondes soniques dans les formations fracturées.

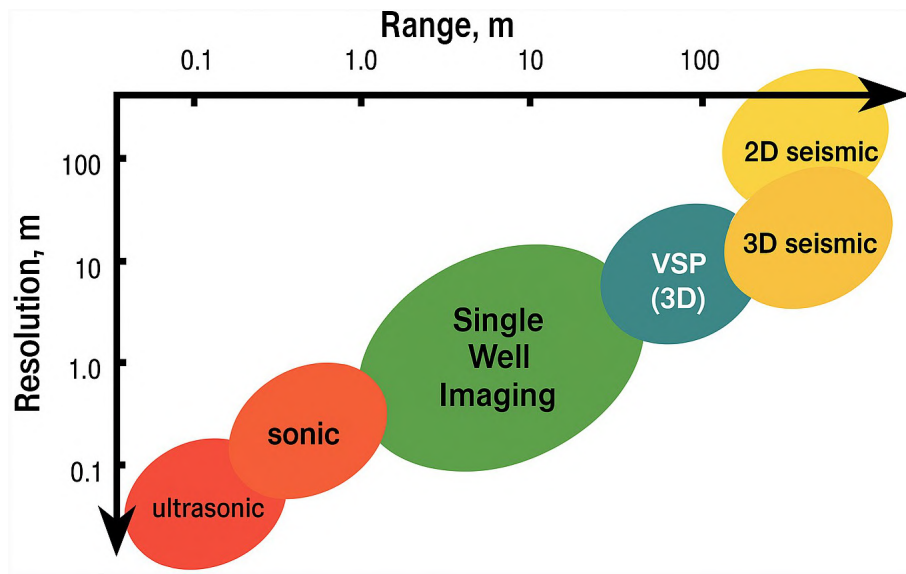


Figure 1: Schéma montrant les plages maximales et minimales par rapport à la résolution pour diverses méthodes acoustiques (Chabot et al, 2001).

2 Les principes physiques de base de la propagation des ondes soniques dans les fractures rocheuses

2.1 Différents types d'ondes acoustiques dans un trou de forage

Les signaux acoustiques (sonores) sont des trains d'ondes élastiques (mécaniques) résultant de l'émission d'énergie acoustique sous forme de vibration (Dupuy, B., 2011). Ils sont caractérisés par des variations de position et de pression des molécules, qui sont des fonctions de l'espace et du temps. Leur propagation nécessite un milieu matériel (solide, liquide ou gazeux) et leur vitesse de propagation dépend des propriétés physiques du milieu dans lequel elles se propagent notamment de sa densité, de son module d'élasticité, mais aussi de sa nature : par exemple, les ondes acoustiques se propagent différemment dans un fluide que dans un solide. Les ondes acoustiques ne se propagent pas dans le vide (Serra, 1984a).

Il existe plusieurs types d'ondes acoustiques, en fonction de l'excitation appliquée au milieu de propagation dans les trous de forage (Dupuy, B., 2011).

2.1.1 Les ondes longitudinales (P)

Les ondes longitudinales P appelées aussi ondes de compression, ces ondes se propagent dans la même direction que la propagation (Fig. 2). Elles ont une vitesse grande que les autres ondes, elle arrive donc en premier (Djeddi Mabrouk, 2017). Les ondes de compression sont les seules à se propager dans les liquides (Serra, 1984a).

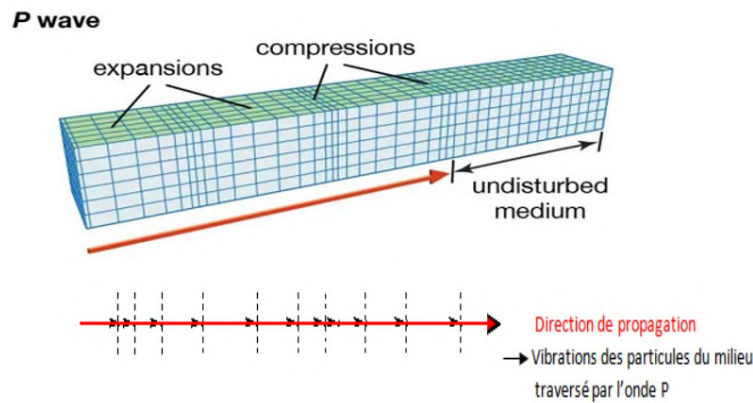


Figure 2: Direction de propagation des ondes longitudinales P (D. Chapellier, 2023; Djeddi Mabrouk, 2017).

La vitesse de telles ondes peut s'exprimer en fonction des différents paramètres d'élasticité (D. Chapellier, 2023):

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \quad (1)$$

Nous constatons la cohérence des unités:

$$\sqrt{\frac{Pa}{kg \cdot m^{-3}}} = \sqrt{\frac{kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}}{kg \cdot m^{-3}}} = \sqrt{m^2 \cdot s^{-2}} = \frac{m}{s}$$

Les paramètres de l'équation sont:

- K : module d'incompressibilité, en pascals [Pa]
- μ : module de cisaillement (ou de torsion), en pascals [Pa]

- ρ : masse volumique, en kilogrammes par mètre cube [kg/m^3]
- E : module de Young, en pascals [Pa]
- σ : coefficient de Poisson, [sans dimension]

2.1.2 Les ondes transversales (S)

Les ondes transversales (S) appelée aussi les ondes secondaires, les ondes S se propagent dans une direction perpendiculaire à la vibration du milieu (Fig. 3, Djeddi Mabrouk, 2017). Elle se propage pas dans les liquides ou milieu gazeux, et ont une vitesse inférieur à celle des ondes longitudinales (Serra, 1984a).

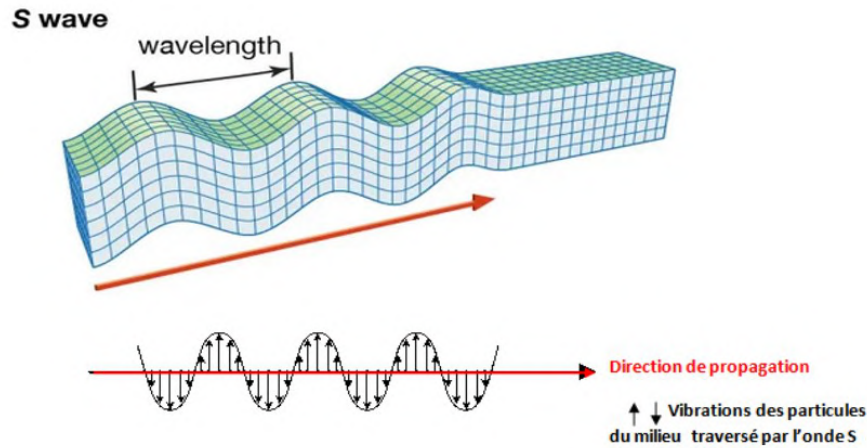


Figure 3: Direction de propagation des ondes transversales S (D. Chapellier, 2023; Djeddi Mabrouk, 2017).

La vitesse des ondes secondaires s'exprime en fonction elle aussi des paramètres d'élasticité (D. Chapellier, 2023). Il n'existe pas de module de cisaillement dans les liquides.

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}} = \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \quad (2)$$

Nous constatons la cohérences des unités:

$$\sqrt{\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}} = \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

où :

- μ : est le module de cisaillement (ou de rigidité), exprimé en pascals [$\text{Pa} = \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$],
- ρ : est la masse volumique du milieu, exprimée en [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

La vitesse des ondes S est donc bien exprimée en mètres par seconde (m/s).

2.1.3 Les ondes d'interfaces dispersives (onde de Stoneley et pseudo-Rayleigh)

Les deux modes guidés dispersifs présents dans les forages sont les ondes de pseudo-Rayleigh et les ondes de Stoneley (Zhou et al, 2022).

Les ondes de pseudo-Rayleigh pR

Les ondes pR sont des ondes de surface solides. Il s'agit d'une combinaison de vibrations longitudinales et transversales donnant lieu à un mouvement elliptique rétrograde (figure 4) (Boyer, Sylvain, and Jean-Luc Mari., 1994). Elles se propagent avec une vitesse légèrement inférieure à celle des ondes transversales. et ne sont pas transmises par les fluides (Cornet, 1988). Elles ne sont pas transmises par les fluides (Wicquart and Mari, 1992a).

Rayleigh wave

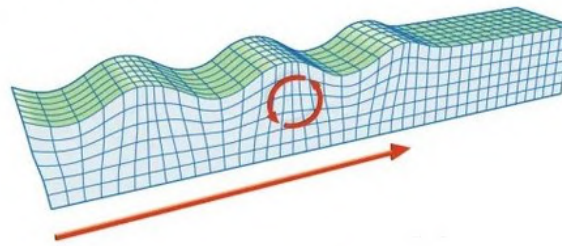


Figure 4: Direction de propagation des ondes de surfaces Rayleigh ou pseudo-Rayleigh PR (D. Chapellier, 2023).

Les ondes Stoneley St

Les ondes de Stoneley sont un type d'onde de surface. Elles sont également connues sous le nom d'ondes de Scholte ou de Scholte-Stoneley (Haldorsen et al, 2006a). Elles se déplacent à basse fréquence et à l'interface puits/formation (Fig. 5, Wang et al, 2020). L'onde de Stoneley apparaît dans presque tous les enregistrements soniques. Leur vitesse est plus lente que celle des ondes de cisaillement et de boue, et elle sont légèrement dispersive (Haldorsen et al, 2006a). Leur atténuation est sensible aux fractures et à la perméabilité des formations (Wang et al, 2020). Les ondes de Stoneley traversant des fractures et des formations perméables perdent du liquide et la dissipation visqueuse provoque une atténuation de l'amplitude de ces ondes et une augmentation de leur lenteur.

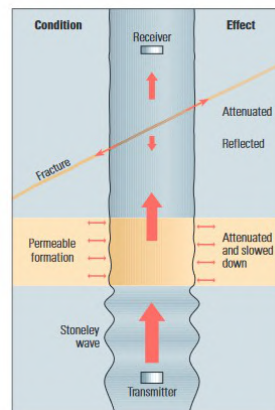


Figure 5: L'onde de Stoneley, voyageant à l'interface entre le forage et la formation. L'onde de Stoneley est dispersive et le mouvement de ses particules est symétrique par rapport à l'axe du forage. Aux basses fréquences, l'onde de Stoneley est sensible à la perméabilité de la formation. Les ondes traversant des fractures et des formations perméables perdent du liquide et la dissipation visqueuse provoque une atténuation de l'amplitude de ces ondes et une augmentation de leur lenteur. Dans les fractures ouvertes, les ondes de Stoneley sont à la fois réfléchies et atténuées. Les flèches rouges au centre du forage symbolisent l'amplitude des ondes de Stoneley (Haldorsen et al, 2006a).

2.2 Principaux paramètres des ondes acoustiques

La diagraphie acoustique dans un trou de forage enregistre les paramètres associés à l'envoi d'ondes dans la formation à l'aide d'un outil sonique (Serra, 1984a). Ces paramètres comprennent :

2.2.1 Le temps de trajet

Le temps pour traverser une certaine épaisseur de formation géologique par une onde acoustique. Utile pour déterminer la vitesse des ondes acoustiques ou leur lenteur dans le milieu (Cornet, 1988).

2.2.2 L'amplitude d'un signal acoustique

L'amplitude d'un signal acoustique est proportionnelle à la \sqrt{E} (racine carrée de l'énergie E d'un signal) (Haldorsen et al, 2006a).

L'amplitude est utilisée pour l'étude de l'atténuation des ondes dans le milieu de propagation (Cornet, 1988).

2.2.3 Puissance d'un signal acoustique

La puissance d'un signal acoustique correspond à l'énergie transportée par une onde sonore par unité de temps. Elle est généralement exprimée en watts (W) et donne une mesure de l'intensité du signal, c'est-à-dire de sa capacité à se propager dans un milieu et à produire des effets (comme des déformations dans la roche ou une détection par un capteur). La puissance acoustique P peut être définie par la formule: (Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppins, James V. Sanders, 2000)

$$P = \frac{E}{t} \quad (3)$$

où :

- E : l'énergie acoustique transmise.
- t : le temps.

Dans un contexte de propagation d'onde dans un milieu (comme une formation rocheuse), une autre formule utilisée est :

$$P = I \cdot A \quad (4)$$

où :

- I : l'intensité acoustique (en W/m^2).
- A : la surface à travers laquelle l'onde se propage (en m^2)

(Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppins, James V. Sanders, 2000).

2.2.4 Période T d'un signal

La période d'un signal correspond à la durée d'un cycle (durée d'une oscillation). Généralement en seconde ou microseconde (Cornet, 1988).

2.2.5 La fréquence F

La fréquence correspond au nombre d'oscillations par unité de temps. Son unité est le Hertz (Cornet, 1988) :

$$F = \frac{1}{T} = \frac{\text{un cycle}}{\text{seconde}}. \quad (5)$$

où :

- F : fréquence (en hertz, Hz).
- T : période du signal (en secondes).

2.2.6 La longueur d'onde

C'est La distance parcourue par l'onde acoustique pendant la durée d'une période T (Serra, 1984a). La longueur d'onde est reliée à la fréquence de l'onde:

$$\lambda = \frac{V}{F} = V \cdot T \quad (6)$$

où :

- λ : longueur d'onde (en mètres),
- V : vitesse de propagation de l'onde (en m/s),
- F : fréquence (en Hz),
- T : période (en s).

2.2.7 Le nombre d'onde K

C'est le nombre d'oscillations de l'onde sur une distance d'un mètre. Son expression est (Cornet, 1988):

$$K = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (7)$$

où :

- K : nombre d'onde (en rad/m),
- λ : longueur d'onde (en mètres),
- 2π : correspond à une oscillation complète (360°).

2.2.8 La vitesse de l'onde V

La vitesse de propagation des ondes acoustiques V est un paramètre fondamental dans les méthodes d'interprétation acoustique en géophysique de puits. Elle est déterminée en mesurant les temps d'arrivée des ondes aux différents récepteurs de l'outil sonore, pour une distance connue correspondant à une certaine épaisseur de formation rocheuse (Cornet, 1988; Serra, 1984a).

La relation de base utilisée pour calculer la vitesse est donnée par :

$$V = \frac{d}{\Delta t} \tag{8}$$

où :

- V : vitesse de l'onde acoustique (en mètres par seconde, m/s),
- d : distance parcourue par l'onde entre deux récepteurs, en mètres,
- Δt : temps de transit ou temps de parcours de l'onde (en secondes).

2.2.9 La lenteur

C'est la différence de temps entre les ondes soniques arrivées divisée par la distance parcourue (l'inverse de la vitesse $\frac{1}{V}$) (Haldorsen et al, 2006a). Elle est obtenue à chaque niveau par le pointé des temps des premières arrivées des ondes réfractées, ces ondes réfractées sont celles qui pénètrent et se propagent à l'intérieur du matériau (formation) et ce sont elles qui permettent d'estimer la vitesse interne du matériau (et donc la lenteur), contrairement aux ondes réfléchies ou directes qui ont un trajet différent. (Cornet, 1988).

Ces paramètres, ainsi que les données relatives à la vitesse des ondes et à la densité, peuvent être utilisés pour calculer les paramètres mécaniques des formations (Dieb. H, 2008). Comme le coefficient de Poisson, module de Young et le module de compressibilité (bulk modulus). Ainsi que le module de cisaillement (shear modulus) et des paramètres pétrophysiques. On peut déduire aussi les informations sur la porosité de la roche et les fluides qu'elle contient (Wang et al, 2020). Une relation importante entre les vitesses V_P et V_S est le coefficient de Poisson, qui donne un attribut supplémentaire aux paramètres physiques des roches (Fig. 6).

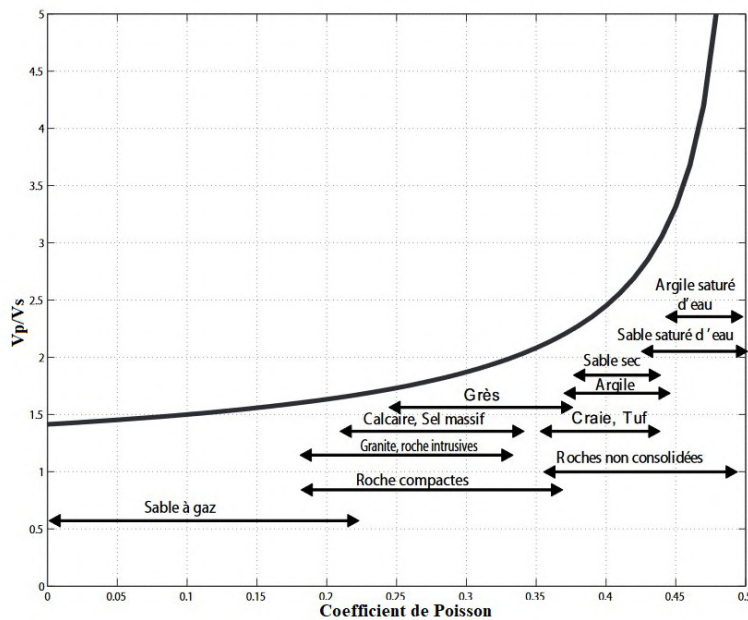


Figure 6 : Courbe théorique de la variation du rapport V_P/V_S en fonction du coefficient de Poisson et domaines de valeurs pour différents types de roches (Dieb. H, 2008).

Table 1: Valeurs des vitesses V_p et V_s et de la densité de différentes formations géologiques (Dieb. H, 2008).

Type de roche	V_p (m/s)	V_s (m/s)	ρ (g/cm ³)
Éboulis, terre végétale	300–700	100–300	1.7–2.4
Sables secs	400–1200	100–500	1.5–1.7
Sables humides	1500–4000	400–1200	1.9–2.1
Argiles	1100–2500	200–800	2.0–2.4
Marnes	2000–3000	750–1500	2.1–2.6
Grès	3000–4500	1200–2800	2.1–2.4
Calcaires	3500–6000	2000–3300	2.4–2.7
Craie	2300–2600	1100–1300	1.8–2.3
Sel	4500–5500	2500–3100	2.1–2.3
Anhydrites	4000–5500	2200–3100	2.9–3.0
Granite	4500–6000	2500–3300	2.5–2.7
Eau	1450–1500	–	1.0
Glace	3400–3800	1700–1900	0.9
Huile	1200–1250	–	0.6–0.9

2.2.10 Impédance acoustique

Plusieurs domaines de la physique utilisent largement la notion d'impédance, car elle permet de quantifier les propriétés de nombreux systèmes. En acoustique elle s'exprime par le rapport entre la pression et la vitesse particulaire (Boyer, Sylvain, and Jean-Luc Mari., 1994). Cette grandeur peut être un nombre complexe. Elle représente la résistance à la propagation d'une onde acoustique. Sa relation est la suivante :

$$Z = \frac{F}{v} = \frac{\text{Force}}{\text{Vitesse particulaire}} \quad (9)$$

Dans un fluide elle devient:

$$Z = \frac{P}{v} = \frac{\text{Pression acoustique}}{\text{Vitesse particulaire}} \quad (10)$$

L'impédance d'une onde plane se propageant dans un milieu de densité ρ avec une vitesse (D. Chapellier, 2023).

V_p ou V_s est constante et son expression est : $Z = \rho \cdot V$

ρ : la densité du milieu.

V : la vitesse de propagation.

Chaque milieu possède sa propre impédance acoustique. C'est l'équivalent d'une résistance en électricité (Djeddi Mabrouk, 2017). C'est une grandeur intrinsèque du milieu que l'on utilise pour la détermination de la réflexion et la transmission de l'énergie acoustique à l'interface entre deux milieux possédant des impédances acoustiques distinctes (Dieb. H, 2008).

2.2.11 Coefficient de réflexion et de transmission

Les coefficients de réflexion R et de transmission T , en incidence normale (très faibles angles d'incidences). Sont les taux de l'énergie acoustique transmise et réfléchi par la surface de discontinuité, entre les deux milieux d'impédance acoustique Z_1 et Z_2 respectivement.

Ils sont décrits par les expressions suivantes (Boyer, Sylvain, and Jean-Luc Mari., 1994; Sheriff and Geldart, 2006).

$$R = \frac{A_r}{A_I} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \text{ et } T = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (11)$$

A_r : Amplitude de l'onde réfléchie

A_I : Amplitude de l'onde incidente

Pour $Z_2 = Z_1$ il n'y a pas de changement de milieu. Si $R = 0$ et $T = 1$, alors l'onde est bien transmise dans son intégralité (Sheriff and Geldart, 2006):

2.3 Détermination des paramètres d'élasticité à partir des ondes soniques

A partir la propagation des ondes acoustiques dans un milieu rocheux on peut estimer des paramètres élastiques fondamentaux qui caractérisent le comportement mécanique des formations géologiques (Serra, 1984b). Pour comprendre la résistance, la déformabilité et la stabilité des roches, ces paramètres sont essentiels, en particulier dans les domaines de la géomécanique, de la géotechnique, de l'hydrogéologie ou de l'exploration pétrolière et gazière (Sheriff and Geldart, 2006). Dans un forage, les ondes enregistrées sont principalement les P et S et leur vitesses V_p , V_s . Ces vitesses dépendent des propriétés physiques du milieu (densité, rigidité, cohésion, etc.) et servent de base au calcul des paramètres élastiques (Serra, 1984b). À partir de V_p , V_s et de la densité ρ de la roche (mesurée ou estimée), on peut calculer (Tab. 2, Djeddi Mabrouk, 2017; Serra, 1984b)

Module de Young E

Mesure la rigidité d'un matériau en réponse à une déformation longitudinale. Indique la capacité d'une roche à se déformer de manière élastique (Mari and Vergniault, 2020).

$$E = \rho \cdot V_p^2 \cdot \left(\frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right) \quad (12)$$

Module de cisaillement G

Représente la résistance à la déformation par cisaillement. Utile pour évaluer les ruptures le long des fractures ou failles (Mari and Vergniault, 2020).

$$G = \rho \cdot V_s^2 \quad (13)$$

Module de compressibilité (bulk modulus) K

Mesure la résistance à la compression volumique. Intervient dans le calcul de la réponse mécanique du réservoir sous contrainte de fluide (Mari and Vergniault, 2020).

$$K = \rho \cdot \left(V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2 \right) \quad (14)$$

Coefficient de Poisson ν Indique la relation entre la déformation latérale et longitudinale. Renseigne sur la ductilité ou la fragilité du matériau (Mari and Vergnault, 2020).

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (15)$$

Applications de ces paramètres permet de :

- Évaluer la résistance des formations rocheuses à la déformation.
- Modéliser la réponse mécanique du sous-sol à un forage ou à une injection.
- Identifier les zones fracturées ou altérées.
- Prédire les risques de rupture ou d'effondrement autour du puits.
- Optimiser la stimulation de réservoirs (fracturation hydraulique, géothermie)

(Sheriff and Geldart, 2006; Telford et al, 1990).

Table 2: Ordres de grandeur typiques des paramètres élastiques pour différentes roches (Bijay et al, 2019; BOURBIÉ, et al, 1986; Djeddi Mabrouk, 2017; Fjær et al, 2008)

Roche	Module de Young (E) [GPa]	Module de cisaillement (G) [GPa]	Module de compressibilité (K) [GPa]	Coeff. de Poisson (ν)
Argile	1 – 10	0.5 – 4	2 – 8	0.30 – 0.45
Grès	10 – 30	5 – 15	8 – 25	0.20 – 0.30
Calcaire	20 – 60	10 – 30	25 – 50	0.25 – 0.35
Granite	50 – 80	25 – 40	40 – 65	0.15 – 0.25
Basalte	50 – 100	25 – 50	45 – 80	0.18 – 0.30
Schiste	10 – 50	5 – 25	10 – 40	0.20 – 0.35
Dolomie	30 – 70	15 – 35	20 – 50	0.25 – 0.35
Marne	5 – 25	2 – 12	5 – 20	0.25 – 0.40
Tuf volcanique	5 – 20	2 – 10	6 – 15	0.25 – 0.35

2.4 Influence de paramètres physiques sur la propagation des ondes soniques dans les roches

2.4.1 L'effet de la lithologie sur la propagation des ondes soniques

La vitesse du son dépend de la nature du milieu et de propriétés physiques et mécaniques de la roche (Wang et al, 2020). Sur la base de ces paramètres, nous pouvons regrouper les formations rapides, compactes à faible porosité, qui favorisent le déplacement du son à grande vitesse et les formations lentes à forte porosité, remplies de fluides ou de gaz (Serra, 1984a). Les facteurs qui influencent la propagation des ondes soniques dans un trou de forage sont :

La matrice et la nature du minéral

Ces minéraux interviennent à travers leurs densités et leurs paramètres d'élasticité. Dans le cas de la matrice complexe, chaque minéral intervient en fonction de son pourcentage volumique dans l'intervalle défini par

l'écartement entre ses propres vitesses, mais aussi en fonction de sa répartition dans la roche, soit en laminations, soit en dispersion (Serra, 1984a).

La porosité

La porosité de la formation et les fluides qui remplissent ces pores. Plus la porosité primaire au secondaire augmente, plus la vitesse diminue (Fig. 7). Dans le cas d'eau dans les pores, la vitesse de propagation des ondes dépend de la salinité de l'eau : plus l'eau est salée, plus la vitesse des ondes est élevée (Fig. 8, Serra, 1984b; Yuangu Zhang et al, 2023)

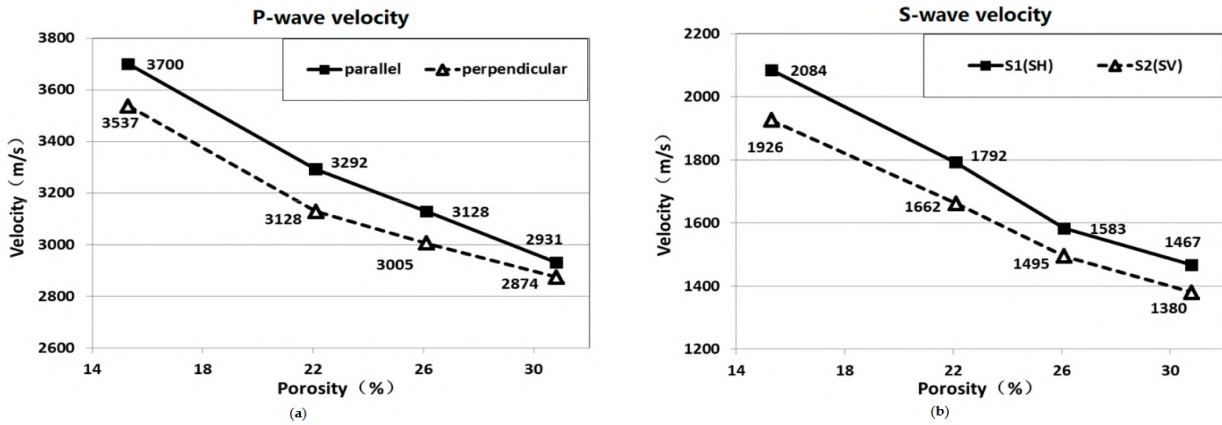


Figure 7: Les figures montrent les vitesses des ondes: P (figure a) et S (figure b) mesurées dans des échantillons fracturés saturés d'eau. Les vitesses les plus élevées des ondes P et S ont été enregistrées dans la direction parallèle aux fractures, tandis que les vitesses les plus faibles ont été mesurées dans la direction perpendiculaire (Yuangu Zhang et al, 2023)

La température et la pression

Ces facteurs influencent la vitesse du son dans l'eau. L'abaques sur la figure 8A, (Serra, 1984b) montre qu'au-delà de 150°f, les variations de vitesse sont dues à une augmentation de la température pour une même salinité de l'eau. La vitesse augmente avec la salinité, sous l'effet de la densité qui augmente également, mais ces facteurs influencent aussi d'autres fluides comme le pétrole et le gaz, ainsi que la matrice.

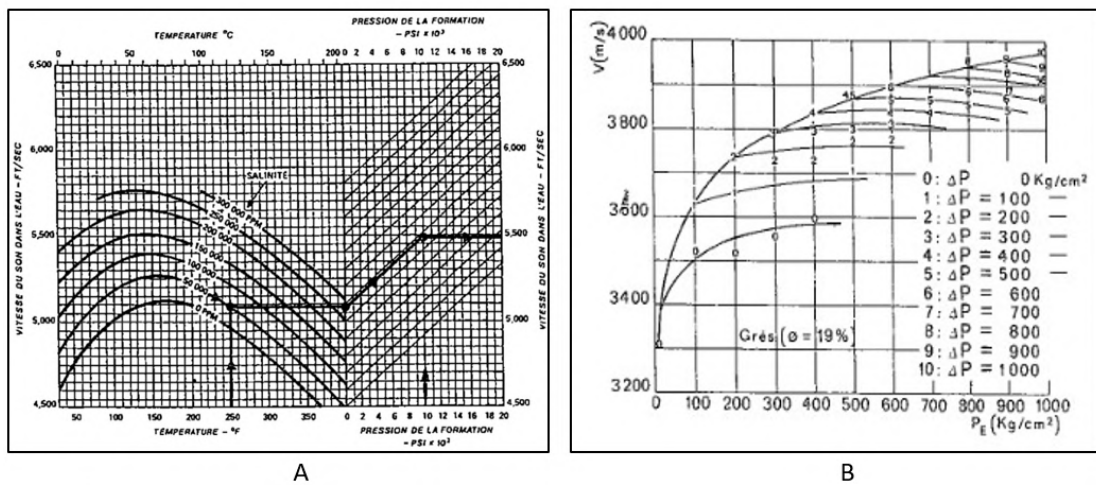


Figure 8: A : Variation de la vitesse du son dans l'eau en fonction de sa salinité, de la température et de la pression. B : Influence de ΔP sur la vitesse du son (Serra, 1984a).

La vitesse des ondes soniques continue d'augmenter avec la pression, où la différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur (Fig. 8B, Serra, 1984b).

La vitesse des ondes soniques est directement influencée par la texture et l'arrangement des grains, ainsi que par la répartition de la porosité. Pour les pores larges vacuolaires, les ondes soniques suivent le trajet le plus court autour des pores et pas à travers, et aussi dû à l'influence du pendage des couches géologiques et la discontinuité des couches. Mais dans certains cas comme les pores isolés dans la matrice comme le cas de vacuoles, le chemin des ondes va l'éviter, c'est pourquoi on ne voit pas la porosité secondaire de type vacuolaire dans les mesures soniques. En revanche, si les grains sont en suspension dans le fluide, ce que l'on mesure, c'est la vitesse de propagation dans le fluide (Serra, 1984a).

2.5 L'atténuation des ondes soniques

Avant d'aborder le concept d'atténuation, il convient de présenter l'unité utilisée pour la mesurer, à savoir le décibel par pied (dB/ft). Un décibel (dB) est une unité logarithmique utilisée pour exprimer un rapport, généralement entre deux puissances ou intensités. En acoustique, il permet de quantifier la perte ou la réduction d'amplitude d'un signal sonore (comme une onde acoustique) lors de sa propagation. Le dB/ft exprime la perte d'amplitude d'un signal acoustique au cours de sa propagation dans un milieu, par unité de distance parcourue généralement en pied (Fjær et al, 2008). L'atténuation décrit le phénomène de diminution de l'amplitude des ondes acoustiques et la perte sélective des hautes fréquences du signal acoustique en fonction de la distance ou du temps (Fig. 9), (Smith, 2021). Les fractures et les fissures créent une anisotropie et des variations de la vitesse de propagation en fonction de l'azimut. Les ondes de compression et les ondes de cisaillements se propageant moins vite perpendiculaire au réseaux des fissures (Nourhan Tartoussi, 2023). Deux phénomènes sont à l'origine de l'atténuation:

2.5.1 L'atténuation par absorption

Dans un trou de forage et lorsque l'on parle d'atténuation dans la boue, on fait référence à la perte d'énergie due à la friction solide-fluide et à la dispersion des particules solides dans la boue. Dans un liquide pur l'atténuation suit une loi exponentielle.

$$\delta m = e^{m \cdot x} \quad (16)$$

δm : c'est le taux d'atténuation total mesuré après un trajet x (l'amortissement cumulé). En général (exprimé en népers ou en dB), et représente combien l'onde a perdu en amplitude après propagation (Fig. 9).

m : le facteur de l'atténuation dans le liquide, il est proportionnel au carré de la fréquence.

x : la distance sur laquelle est mesurée l'atténuation. Par exemple dans l'eau douce l'atténuation d'une fréquence de 20 kHz est de l'ordre de $3 \cdot 10^{-5}$ db/ft au condition standard de pression et température (Serra, 1984a).

Le facteur d'atténuation est plus élevé dans l'eau salée et l'huile, dans le cas de la boue chargée en particules solides on doit ajouter l'effet de dispersion (l'atténuation totale est environ de 0.03 db/ft pour la fréquence de 20 kHz) La présence de boues gazées rend les mesures acoustiques impossibles en raison de l'importante dispersion. À l'interface entre la boue de forage et la formation rocheuse, les ondes acoustiques incidentes subissent des phénomènes de réflexion et de transmission. Lorsqu'une onde arrive avec un angle d'incidence proche de l'angle critique, une partie de son énergie est transmise dans la formation, tandis qu'une autre est réfléchi. La transmission de l'énergie dans la roche peut provoquer une atténuation du signal mesuré, car une partie de l'amplitude se perd dans le processus. Ce phénomène est fortement influencé par le rapport d'impédance acoustique entre les deux milieux (Z). La boue de forage a une impédance relativement stable, car sa densité et sa vitesse acoustique ne varient que très peu. En revanche, l'impédance de la roche peut varier considérablement en fonction de sa lithologie, de sa porosité, ou encore de sa saturation en fluides. Le coefficient de transmission T , qui détermine la part de l'énergie transmise à travers l'interface, dépend du rapport entre les impédances des deux milieux

On peut distinguer plusieurs processus d'atténuation et de perte d'énergie dans les roches. Dans le cas des roches non fissurées l'atténuation des ondes P et S est une fonction exponentielle (Serra, 1984a).

$$\delta_F = e^{-a \cdot l} \quad (17)$$

δ_F représente la perte d'énergie totale due à l'atténuation par friction et le facteur total d'atténuation (a) lié aux différents types de friction: solide-solide (a'), fluide-solide (a''), fluide-fluide (a''') avec $a = a' + a'' + a'''$.

l : La distance effective l parcourue par l'onde dans la formation n'est pas simplement la distance entre deux récepteurs. Elle dépend de la géométrie du trou de forage et de l'angle d'incidence de l'onde :

$$l = L - (d_h - d_{outil}) \tan i_c \quad (18)$$

Où :

L : espacement entre les deux récepteurs de l'outil sonique.

d_h : diamètre du trou de forage.

d_{outil} : diamètre de l'outil sonique.

i_c : angle d'incidence critique (là où une onde réfractée est générée).

Donc chacun de ces facteurs est lié à un paramètre des propriétés de la roche.

Les facteurs a' et a'' sont nuls dans les roches non poreuses, le facteur a''' est nul aussi dans le cas de la roche saturée $a''' = 0$. Les facteurs a' et a'' diminuent quand la pression différentielle ΔP augmente (Serra, 1984a).

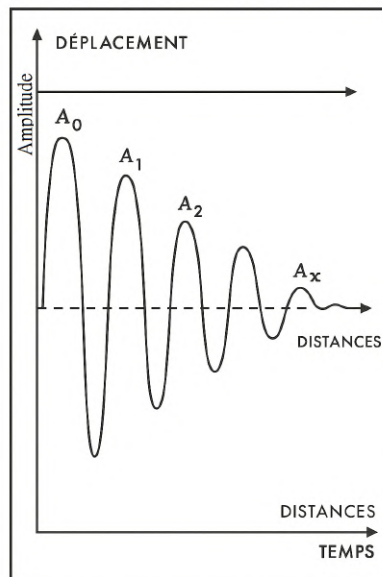


Figure 9: Atténuation de l'onde acoustique avec la distance parcourue (Serra, 1984a).

La figure 10 (Serra, 1984a) montre la relation entre les pertes d'énergie dues aux frictions solide-solide a' , pour une roche sèche et pour une roche saturée en eau. L'espace entre les deux courbes est l'atténuation due aux frictions fluides-solides a'' .

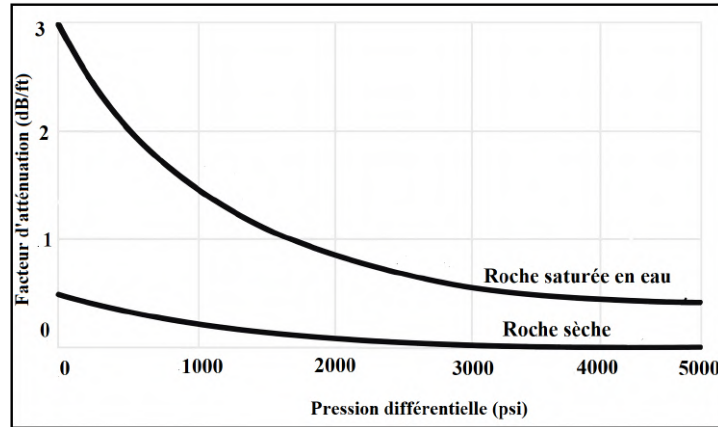


Figure 10: Influence de la pression différentielle sur l'atténuation (Serra, 1984a).

L'influence de la viscosité du fluide est très importante, surtout dans le cas de la roche qui renferme des hydrocarbures, l'atténuation des ondes longitudinales P dans le cas du gaz est plus remarquable que dans le cas d'huile (facteur a''' non nul). Finalement, on peut résumer et décrire les différents paramètres qui affectent l'atténuation f : Fréquence du signal, v : Vitesse du son, ϕ : Porosité, κ : Perméabilité, μ : Viscosité du fluide. ΔP : Différence entre la pression externe et interne, ρ : Densité, S : Surface spécifique des pores (Serra, 1984a).

2.5.2 L'atténuation dans une fracture

1- Atténuation exponentielle α (perte progressive due à l'atténuation dans la fracture)

Dans une fracture, l'atténuation exponentielle α dépend de l'épaisseur effective de la fracture x (en mètres), des amplitudes mesurées avant et après la fracture. Cette relation suit la loi exponentielle (Aki and Richards, 2009; Sheriff and Geldart, 2006).

$$A(x) = A_0 \cdot e^{-\alpha d} \rightarrow \alpha = -\frac{1}{d} \ln \left(\frac{A(x)}{A_0} \right) \rightarrow \alpha = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{A_0}{A(x)} \right) \quad (19)$$

où :

A_0 : amplitude avant la fracture

$A(x)$: amplitude après la fracture

d : épaisseur effective de la fracture (en mètres)

α : coefficient d'atténuation exponentielle dans la fracture (en Np/m) Donc on peut calculer α

Remarque

Np : neper, une unité logarithmique utilisée pour mesurer l'atténuation ou le gain d'un signal.

m : on mesure la perte par unité de distance (par mètre).

1 Np/m = une atténuation naturelle de facteur e^{-1} (= 0.37) sur un mètre.

Pour convertir en décibels: 1 Np = 8.686 dB.

$$\alpha_{dB/m} = \alpha_{Np/m} \times 8,686$$

2- L'atténuation géométrique dans les fractures rocheuses (perte instantanée due à la transmission à l'interface)

Les fractures sont des discontinuités mécaniques qui séparent une masse rocheuse en deux ou plusieurs parties (Smith, 2021).

Lorsqu'une onde se propage à travers une fracture, l'énergie est divisée entre les ondes transmises et les ondes réfléchies. Le rapport d'amplitude entre les ondes incidentes et les ondes sortantes peut être quantifié par les coefficients de réflexion et de transmission. La propagation de l'onde P à travers une couche mince répond à la loi de Snell (Smith, 2021) (Figure 11).

$$\frac{V_{\text{rock}}}{\sin \alpha_1} = \frac{V_{\text{fracture}}}{\sin \alpha_2} \quad (20)$$

- V_{rock} : vitesse des ondes P dans la matrice rocheuse ;
- V_{fracture} : vitesse des ondes P dans la fracture ;
- α_1 et α_2 : angles d'incidence respectifs (voir Figure 10).

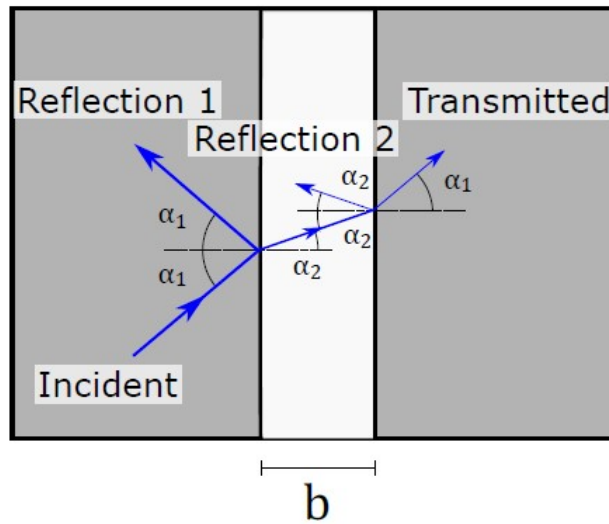


Figure 11: Schéma de propagation de l'onde P à travers une interface à couche mince, plusieurs réflexions sont générées aux limites de fracture (Smith, 2021).

Les ondes P entrent et sortent de la fracture sous le même angle, mais le trajet des rayons est décalé. Les fractures se comporte comme des filtres Low-pass avec une fréquence de coupure f_c (Pyrak-Nolte and Morris, 2000).

$$f_c = \frac{2K}{Z} \quad (21)$$

f_c : représente la fréquence de coupure (cut-off frequency), le c est un indice descriptif pour préciser qu'il s'agit de la fréquence de coupure (cut-off).

K : c 'est la rigidité spécifique de la fracture. C 'est une propriété qui décrit la résistance d'une fracture à se fermer et à se déformer sous l'effet d'une contrainte croissante.

Mathématiquement, elle est définie comme le rapport entre la variation incrémentale de la contrainte et la variation incrémentale de l'ouverture de la fracture Δb

$$K = \frac{\Delta\sigma}{\Delta b} \quad (22)$$

Z : est l'impédance acoustique de la matrice rocheuse (densité et vitesse).

Le coefficient de transmission pour une onde P de fréquence centrale f traversant une fracture donnée par l'équation (Smith, 2021):

$$|T(f)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\frac{f}{f_c})^2}} \quad (23)$$

Les fractures avec des rigidités spécifiques plus élevées, ont des fréquences de coupure plus élevées et donc des coefficients de transmission plus élevés ($\frac{f}{f_c}$ plus petite).

Par contre les fractures les moins rigides ont des fréquences de coupure plus basses et donc des coefficients de transmission plus faible. ($\frac{f}{f_c}$ plus élevée) (Möllhoff et al, 2010)

Dans les conditions expérimentales en laboratoire, le coefficient de transmission des ondes incidentes sur une fracture, est défini comme suit :

$$T_{\text{exp}} = \frac{A_{\text{fractured}}}{A_{\text{intact}}} \quad (24)$$

Où:

$A_{\text{fractured}}$ et A_{intact} sont les amplitudes des ondes enregistrées au niveau du récepteur pour un échantillon fracturé et intact, respectivement (Zhou et al, 2022)

La relation entre T et f_c

T mesure la transmission effective. f_c détermine à quelle fréquence cette transmission commence à être atténuée (Korneev, 2010). La fracture agit comme un filtre passe-bas, et $T(f)$ est une fonction décroissante de la fréquence f , influencée par f_c (Pyrak-Nolte et al, 1990).

- Quand la fréquence $f < f_c \rightarrow$ la transmission est forte $\rightarrow T \approx 1$
- Quand $f > f_c \rightarrow$ l'amplitude est fortement atténuée $\rightarrow T < 1$, et peut tendre vers 0.

Donc f_c contrôle à partir de quelle fréquence T commence à diminuer fortement (Korneev, 2010; Pyrak-Nolte et al, 1990).

L'expression analytique $|T(f)|$ permet de modéliser la variation du coefficient de transmission en fonction de la fréquence, par contre l'expression expérimentale T_{exp} donne une valeur mesurée, souvent à une fréquence dominante ou centrale (Fig. 12, Korneev, 2010; Pyrak-Nolte et al, 1990)

Donc :

$$T_{\text{exp}} \approx |T(f_{\text{centrale}})| \quad (25)$$

Lorsque la mesure est faite à la fréquence centrale f_{centrale} de l'onde incidente (Korneev, 2010; Pyrak-Nolte et al, 1990).

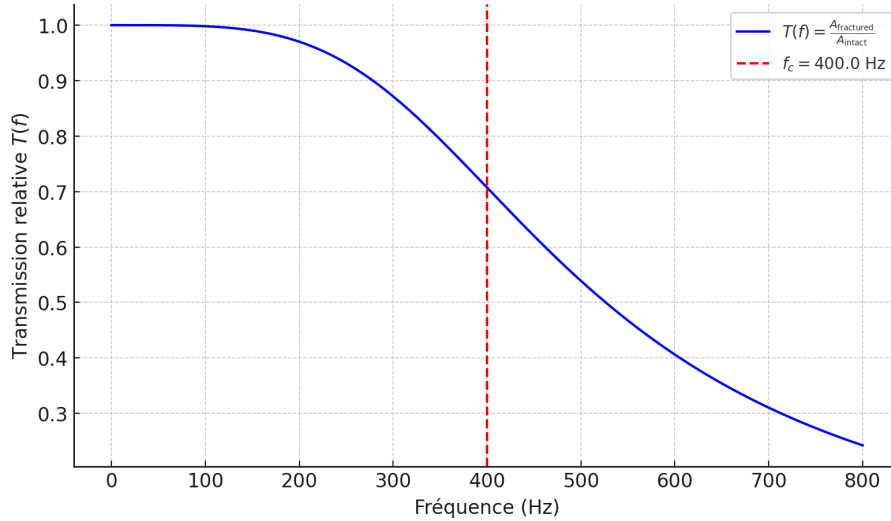


Figure 12: Transmission à travers une fracture en fonction de la fréquence (Pyrak-Nolte and Nolte, 1992).

3- Estimation de l'atténuation apparente globale

En réalité, le coefficient d'atténuation exponentielle α ne représente pas à lui seul l'ensemble de l'atténuation du signal acoustique. Une part de la perte d'amplitude peut également être due à la transmission du signal à travers la fracture. Il est donc essentiel de prendre en compte le coefficient de transmission T , lorsque celui-ci est connu ou peut être estimé (Aki and Richards, 2009; Mavko et al, 2009).

$$A(x) = A_0 \cdot e^{-\alpha d} \rightarrow \alpha = -\frac{1}{d} \ln \left(\frac{A(x)}{A_0} \right)$$

Si l'on tient compte du coefficient de transmission T (lié à la perte d'énergie lors du passage de l'onde à travers la fracture), alors la formule devient :

$$A(x) = A_0 \cdot T \cdot e^{-\alpha d} \rightarrow \frac{A(x)}{A_0 \cdot T} = e^{-\alpha d} \rightarrow \alpha = -\frac{1}{d} \ln \left(\frac{A(x)}{A_0 \cdot T} \right)$$

Dans le contexte du forage, l'épaisseur réelle d des fractures est rarement connue avec précision. Il est donc difficile de distinguer l'atténuation due à la transmission T de celle due à l'absorption exponentielle α . On calcule alors une atténuation apparente, notée α_{app}

$$\alpha_{app} = -\ln \left(\frac{A(x)}{A_0} \right) \quad (26)$$

Exprimé en Np/m

Cette atténuation apparente mesuré expérimentalement à partir la perte globale d'amplitude entre les récepteurs avant et après la fracture (Marie-Aude M.A. Ploix, 2016).

Cette quantité est sans unité, car elle représente une fraction ou un pourcentage de l'amplitude transmise par rapport à l'amplitude incidente (Carcione, 2007; Pyrak-Nolte and Nolte, 1992). Cela peut être appelé un facteur d'atténuation

$$\text{Facteur d'atténuation} = \frac{A(x)}{A_0} \quad (27)$$

On mesure juste cette perte globale.

Bien que cette approche ne permette pas de distinguer séparément les effets de l'atténuation exponentielle et de la transmission, elle permet néanmoins d'identifier la présence d'une fracture et d'estimer si elle est fortement atténuante ou faiblement transmissif.

D'autres paramètres peuvent être utilisés pour caractériser les fractures. Il s'agit notamment :

- **L'ouverture de fracture:**

L'augmentation de l'ouverture de la fracture a entraîné une diminution linéaire de la vitesse de l'onde P . En revanche, l'augmentation de la rugosité n'a montré aucun effet significatif sur la vitesse des ondes P mais une diminution légère sur la rigidité. La rigidité diminuée avec l'augmentation de l'ouverture de la fracture (Tab. 3, Fig. 16, Smith, 2021; Yang et al, 2021).

Table 3: Vitesse de l'onde P et rigidité dynamique de la fracture pour différents modèles d'ouverture (lisse, 90° par rapport à la propagation de l'onde) et différentes rugosités (ouvertures de 0.88 mm, 90° par rapport à la propagation de l'onde) Smith (2021).

Aperture (mm)	P-wave velocity (m/s)	Dynamic fracture stiffness (MPa/mm)
0.22	3980	10800
0.44	3920	6900
0.66	3860	5400
0.88	3800	4800
1.10	3750	4600
Roughness, JRC		
0	3800	4800
9	3800	4200
18	3800	4200

- **Rugosité d'une fracture:**

Le coefficient de rugosité des joints (JRC), défini par (Barton and Choubey, 1977; Tse and Cruden, 1979). A été déterminé à partir d'essais de cisaillement sur des échantillons naturellement fracturés. Variant de 0 pour une surface plane et lisse à 20 pour une surface très rugueuse, avec une incertitude de 1%. La rugosité des limites de fracture a un effet mineur sur les premières arrivées des ondes soniques (Tab. 3). Cela pourrait s'expliquer par la diffusion de l'onde au niveau des limites de fracture les plus rugueuses qui ont les surfaces de contact plus élevées (Zhang et al, 2023). La distribution des points de contact le long d'une fracture influe également sur sa rigidité (Pyrak-Nolte and Morris, 2000).

- **Angle de fracture:**

Les premiers résultats expérimentaux (Morris et al, 1964) ont montré que les ondes longitudinales P ne sont que légèrement atténuées lorsqu'elles traversent une fracture horizontale ou verticale par rapport la direction de propagation des ondes soniques. Par contre, elles sont fortement atténuées lorsque l'angle du plan de fracture est compris entre 35° et 85° (Serra, 1984a).

Les ondes transversales S sont fortement atténuées lors du franchissement d'une fracture peu inclinée et l'atténuation diminue avec l'augmentation du pendage (Fig. 13, Serra, 1984b).

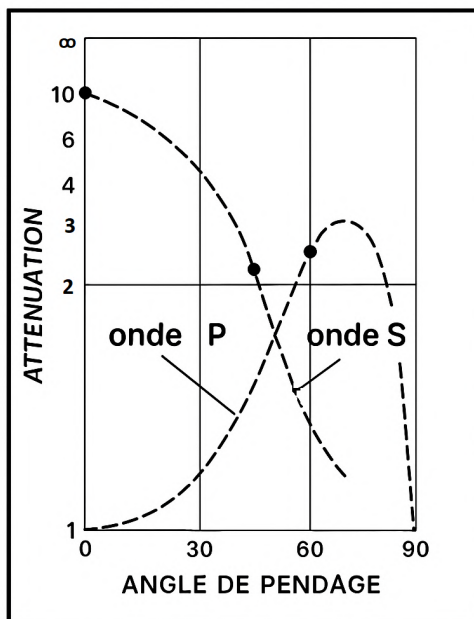


Figure 13: Atténuation (dB/ft) (par réflexion, diffraction et absorption) à travers d’une fracture, en fonction de l’angle de pendage de la fracture pour des ondes à trajet vertical dans un forage d’après (Morris et al, 1964; Serra, 1984a).

D’après les résultats expérimentaux récentes, la plus grande amplitude d’arrivée d’onde P a été enregistrée lorsque la fracture était parallèle à la propagation des ondes (angle de fracture = 0°). Entre 0° et 20° les amplitudes d’arrivée diminuent. Au-dessus 20° les amplitudes d’arrivée augmentent à nouveau. En outre, une avance légère des premières arrivées des ondes P a été observée lorsque l’angle de fracture dépassait >45° (Fig. 14, Smith, 2021).

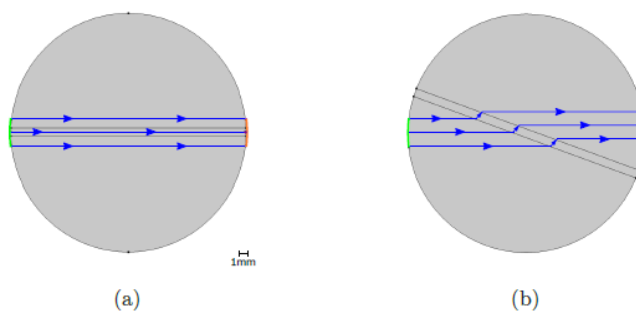


Figure 14: Trajets de rayons indiquant la propagation de l’onde P à travers des fractures à des angles de a) 0° et b) 20°. Les rayons ont été tirés à partir des bords et du centre du bord source en utilisant la loi de Snell. (Smith, 2021).

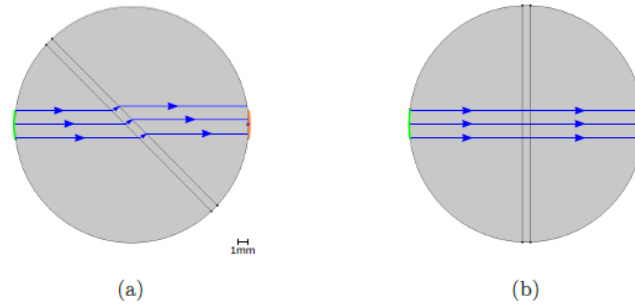


Figure 15: Trajets de rayons indiquant la propagation de l'onde P à travers des fractures à des angles de a) 45° et b) 90°. Les rayons ont été tirés à partir des bords et du centre du bord source en utilisant la loi de Snell. (Smith, 2021).

Le rapport entre la longueur de fracture (C) et la longueur d'onde (λ) est essentiel pour comprendre comment la fracture affecte la propagation des ondes. (C) c'est la longueur d'une fracture ou son rayon dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde sonore et λ c'est la longueur d'onde de l'onde sonore, c'est-à-dire la distance parcourue par l'onde pendant une période (6). Lorsque $C < \lambda$, le milieu apparaît homogène. Alors que lorsque $C > \lambda$ la fracture commence à agir comme un front de diffusion (Falcon-Suarez et al, 2020). Le coefficient de transmission diminue quand C s'approche de λ (figure n°17) et plus d'énergie est réfléchi par la fracture. Au-dessus de 20°, C est plus grand que λ et l'onde peut ne pas être sensible à l'augmentation de la longueur de la fracture en raison du champ de vision limité (Acosta-Colon et al, 2009).

Quand l'angle de fracture augmente, les rayons passent moins de temps dans la zone de fracture et sont moins réfléchis vers le récepteur. Cela pourrait expliquer l'augmentation progressive du coefficient de transmission entre les angles de fracture de 20° et de 90°, ainsi que la raison pour laquelle les ondes P dans les modèles à angle de fracture élevé arrivent légèrement plus tôt (Fig. 15, Fig. 16, Smith, 2021).

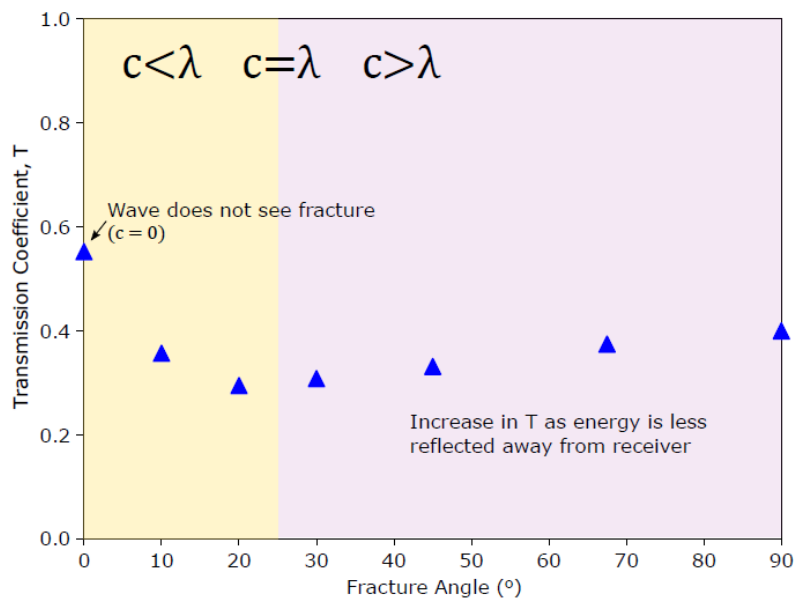


Figure 16: Interprétation du coefficient de transmission pour les modèles avec différents angles de fracture, soulignant l'importance du rapport c/λ . (λ) est la longueur d'onde, (C) est la longueur de fracture (Smith, 2021).

• Matériau de remplissage d'une fracture :

C'est un facteur qui affecte les propriétés mécaniques, hydrauliques et géophysiques de la roche (Pyrak-Nolte and Morris, 2000). Ces matériaux peuvent être remplis par des matériaux détachés des parois de la fracture

par érosion mécanique, ou par des ciments formés par la minéralisation (minéraux précipitent dans un fluide qui s'écoule le long de la fracture) (Laubach et al, 2019). Le remplissage peut être complet, il former des veines, ou partiellement et il créer des zones des ponts minéraux et des canaux ouverts (Philipp and Acocella, 2013).

Les fluides et les gaz sont également considérés comme des matériaux de remplissage. La vitesse de propagation des ondes soniques augmente ou diminuent selon la densité du matériau de remplissage de la fracture (Smith, 2021).

La chute la plus importante de la vitesse de l'onde P observées lorsque la fracture remplie de liquide (Tab. 4)). Les fractures remplies de minéraux solides et denses provoquent l'arrivée de l'onde P plus tôt que dans le modèle intact et avec une plus grande rigidité (Fig. 17, Smith, 2021).

Table 4: Vitesse d'onde *P* en fonction de la rigidité dynamique de la rupture dans différents matériaux de remplissage (Smith, 2021)

Infill material	P-wave velocity (<i>m/s</i>)	Dynamic fracture stiffness (<i>MPa/mm</i>)
100% Brine	3800	4800
100% Liquid CO ₂	3200	1600
100% Solid Calcite	4100	44000
100% Solid Pyrite	4100	21000
50% Brine, 50% Calcite (Lining)	3900	7000
50% Brine, 50% Calcite (Wide Bridges)	4100	8500
50% Brine, 50% Calcite (Narrow Bridges)	4100	11000

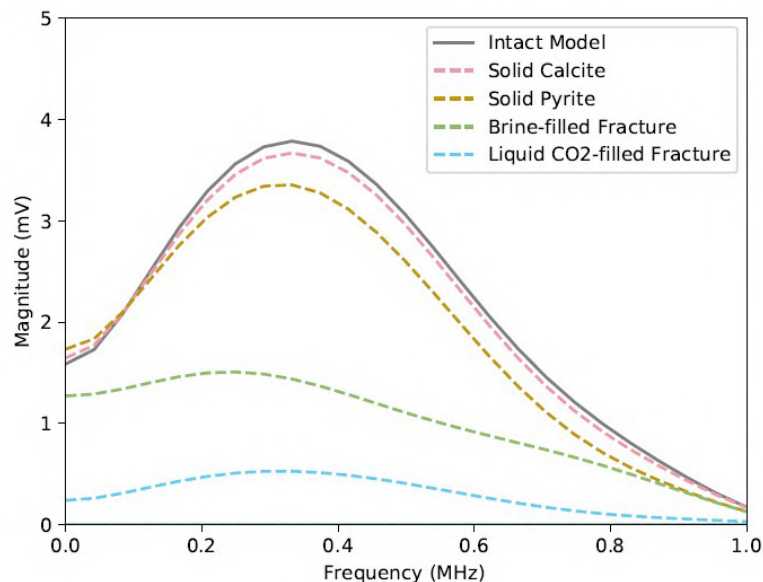


Figure 17: Exemple des résultats fréquentiels et l'atténuation de l'onde sonique *P* avec différents matériaux de remplissage des fractures (Smith, 2021)

3 Méthodologie

3.1 Processus d'acquisition des ondes soniques dans un trou de forage

3.1.1 Le Principe de diagraphie acoustique dans un forage

Les principes de la diagraphie acoustique des trous sont basés sur la théorie de la propagation des ondes dans un milieu élastique (Przebindowska et al, 2016). On émet un train d'ondes longitudinales P par un ou plusieurs émetteurs (T) en face les parois du forage et on reçoit ces ondes avec un réseau de récepteurs à une certaine distance de l'émetteur (figure n°19). Cette émission de très courte durée de moins de 1 ms est répétée plusieurs fois par seconde (10 à 60 fois selon le type d'outil) (Wang et al, 2020). Ces ondes émises se propagent, suivant des front d'ondes sphériques, traversant la boue de forage et arrivant à la paroi du trou après certain temps, et sous des angles d'incidence croissants (figure n°18) (Haldorsen et al, 2006a). Ces ondes sont réfractées le long de la paroi du forage selon plusieurs conditions et cas (Haldorsen et al, 2006a). 1- l'angle d'incidence est inférieur ou égal à l'angle d'incidence critique de l'angle P , dans ce cas chaque ondes longitudinales P donne naissance à deux ondes P une réfléchiée et l'autre réfractée, et une seule ondes transversales S réfractée (Il n'y a pas d'onde S réfléchiée parce que ne se propage pas dans les liquides) (Serra, 1984a). 2- l'angle de l'incidence est supérieur à l'angle d'incidence critique, dans ce cas l'angle longitudinale P incidente donne naissance à une seule onde P réfléchiée.

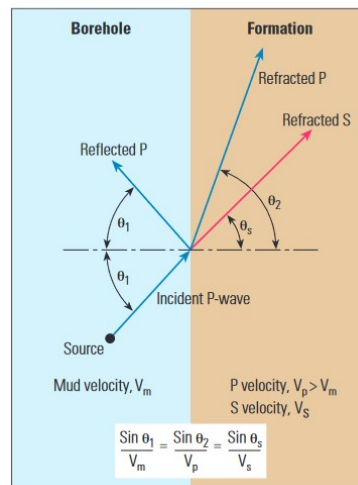


Figure 18: Réflexion et réfraction du front d'onde sonore aux interfaces, et loi de Snell. θ_1 est l'angle d'incidence et celui des ondes P réfléchies ; θ_2 est l'angle des ondes P réfractées ; θ_3 est l'angle des ondes S réfractées. V_m est la vitesse de propagation des ondes soniques dans la boue, V_p est la vitesse de l'onde P dans la formation, et V_s celle de l'onde S dans la formation. Lorsque l'angle de réfraction est égal à 90° , une onde de tête se produit. La loi de Snell régit la relation entre les angles d'incidence et de réfraction des ondes de corps (cisaillement et compression) (Haldorsen et al, 2006a).

Les ondes reçues par les récepteurs sont : Les ondes longitudinales P et transversales S , les ondes de surface pseudo-Rayleigh (PR) et Stoneley (ST) (figure 20) (Serra, 1984a). On mesure le temps parcouru Δt s'écoulant entre l'arrivée de l'onde entre les récepteurs et qui nous permet de mesurer les vitesses de différentes d'ondes du son (Wicquart and Mari, 1992a). La conception de l'outil de diagraphie sonore contient une source située à une certaine distance de deux récepteurs. La distance entre la source et le récepteur le plus proche est souvent $d_1=1$ à $2m$. La distance entre les récepteurs proches et lointains est $d_2=0,4m$. Les paramètres acoustiques du milieu sondé sont généralement déterminés sur la base de l'intervalle spatial de d_2 . Avec la manière la plus simple on peut mesurer la vitesse du son : le rapport de la base d_2 à l'intervalle du temps de propagation de l'onde $t_2 - t_1$:

$$V = \frac{d_2}{(t_2 - t_1)}$$

La vitesse des ondes P dans la formation généralement supérieure à celle de la boue (Al, 2017; Mari, 2020).

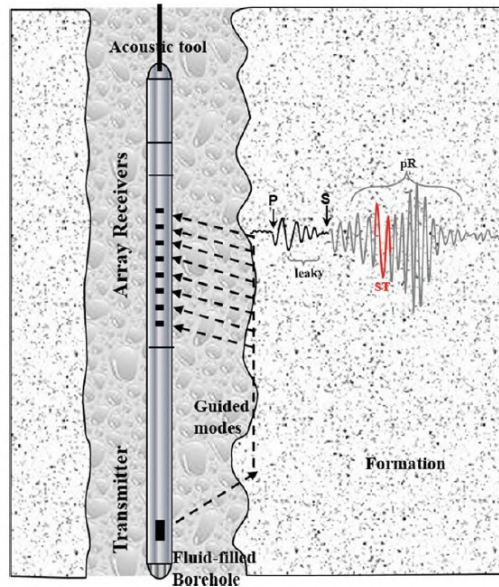


Figure 19: Schéma représente l’enregistrement d’un outil acoustique avec une source (émetteur) et un ensemble de récepteurs, et un chemin des rayons de propagation des ondes représentés par les lignes coupées. La forme d’onde reçue typique montre les ondes *P*, *S*, pseudo-Rayleigh (*pR*) et Stoneley (*ST*) (Wang et al, 2020).

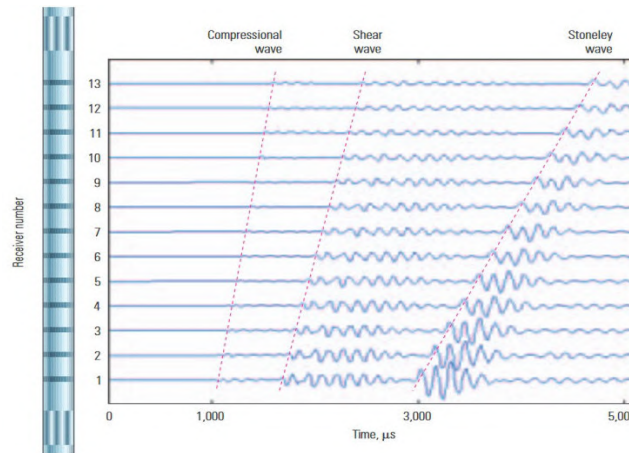


Figure 20: Formes d’onde typiques d’un émetteur monopolaire dans une formation rapide, montrant des ondes de compression, de cisaillement et de Stoneley. Les lignes pointillées roses représentent les heures d’arrivée. Un réseau de récepteurs d’outil de diagraphie sonore est illustré à gauche (Haldorsen et al, 2006a).

Chaque mode d’onde est caractérisé par un comportement spécifique. Le Tableau 5 Présente un résumé des différentes propriétés de chaque type d’onde (Nourhan Tartoussi, 2023).

Table 5: Résumé des principaux modes d'ondes dans le forage ($VP > VS > Vf$) (Chabot, 2003 ; Rajabi et al., 2010) (Nourhan Tartoussi, 2023).

	P	S	Rayleigh	Fluide	Stoneley
Type	Onde de volume	Onde de volume	Guidé par le puits de forage	Onde de volume	Guidé par le puits de forage
Force	Faible amplitude	Amplitude modérée	Amplitude élevée	Faible amplitude	Amplitude élevée
Amplitude	Répartition géométrique et facteur de qualité de la roche Q	Répartition géométrique et facteur de qualité de la roche Q et une vitesse de cisaillement supérieure à la vitesse de compression du fluide	Décroit de façon exponentielle avec la distance tout en s'éloignant de la paroi du trou de forage et oscillatoire dans le fluide		Décroit de façon exponentielle avec la distance tout en s'éloignant de la paroi du trou de forage. Diminue lentement avec la distance axiale
Vitesse (phase et groupe)	Vitesse indépendante de la fréquence	Vitesse indépendante de la fréquence	Vitesse dépendante de la fréquence	Vitesse indépendante de la fréquence	Vitesse légèrement dépendante de la fréquence
Vitesse	$V_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$	$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$	Approche la vitesse S à faible f	V_{fluide}	$V_{\text{st}} \approx 0.8 - 0.9V_f$

λ, μ : coefficients de Lamé ; ρ : densité.

3.1.2 Les outils soniques

Le fluide dans un forage dans un milieu solide forme un guide d'ondes (Haldorsen et al, 2006a). La source génère une onde qui se propage à l'intérieur du fluide et dans la formation solide autour du forage (Wang et al, 2020). Différents modes sont générés et les types de modes dépendent des propriétés du fluide du forage, de la formation environnante, du type de source et de la fréquence de la source (Wang et al, 2020). Les outils utilisés dans les différents types de forages sont les monopoles, les dipôles et les quadripôles.

• Les outils monopoles

L'outil le plus utilisé en hydrogéologie, ainsi que dans l'exploration pétrolière est le monopôle. Les sources monopolaires sont radialement symétriques et peuvent être utilisées pour mesurer la vitesse des ondes P et S dans les formations (Mari, 2020). La source monopolaire émet de l'énergie de manière égale dans toutes les directions à partir de son centre (Haldorsen et al, 2006a). Avec un espacement (TR) élevé, l'atténuation sur une grande distance de propagation réduit le rapport signal/bruit. Par contre des intervalles courts augmentent la résolution spatiale le long du trou de forage mais peuvent réduire la précision lorsque la longueur du réseau diminue. Dans un outil acoustique typique, l'espacement TR est d'environ 3 à 4m et l'intervalle est de 0.15 m. La plage de fréquences entre 10 et 30 kHz (Fig. 21, Mari, 2020). Dans un forage vertical, les outils monopoles permettent d'enregistrer cinq modes de propagation : – l'onde de compression réfractée P . – l'onde de cisaillement réfractée S (si $VS > VP$ fluide). – l'onde de fluide. – les ondes de pseudo-Rayleigh et les ondes de Stoneley (deux modes guidés dispersifs, Fig. 22).

La fréquence source est passée de la plage de fréquences de 10 à 30 kHz à une plage de fréquences inférieure (1 à 10 kHz). Cela a été rendu possible grâce à la nécessité d'ondes à basse fréquence pour mesurer la vitesse des ondes S dans les formations lentes (faible vitesse). D'autres développements ont été réalisés pour augmenter le nombre de sources et de récepteurs sur un même outil et qui a pris le nom de dipôles.

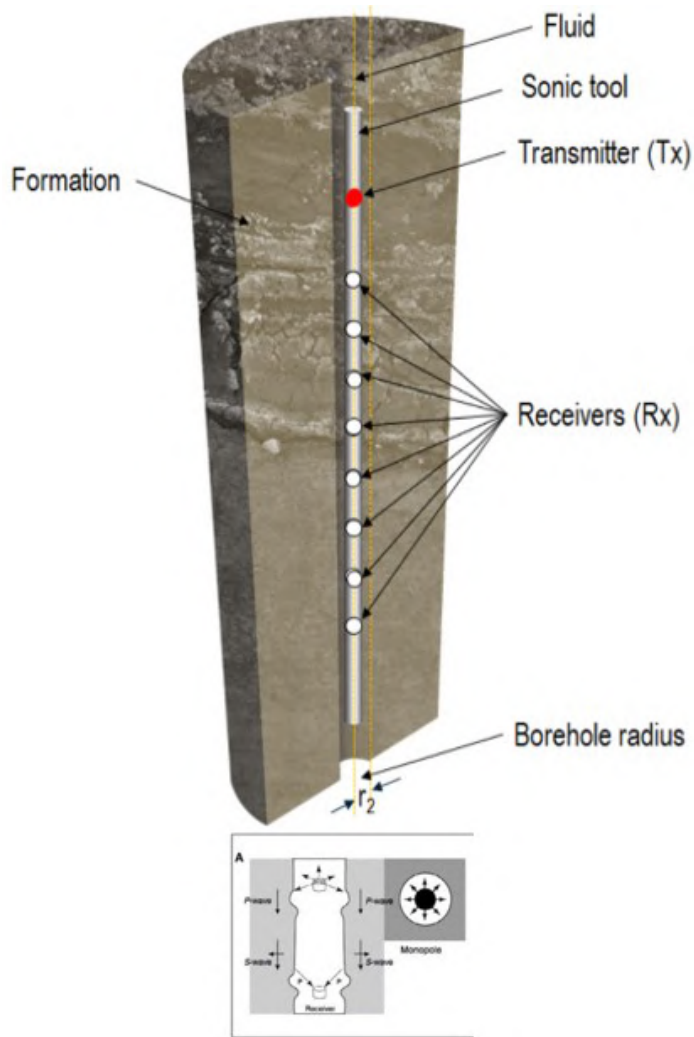


Figure 21: Outil monopole avec un émetteur des ondes longitudinales P et des récepteurs répartis à une certaine distance (Wang et al, 2020)

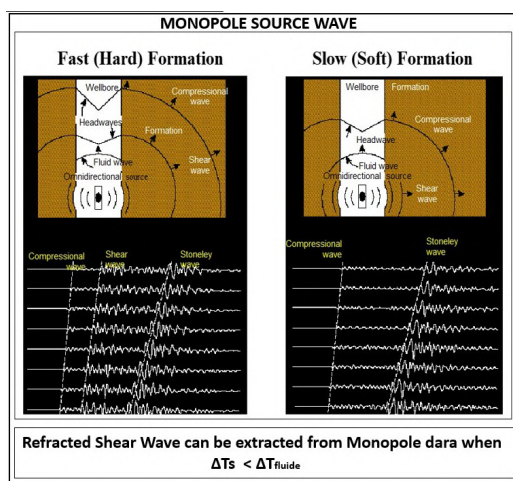


Figure 22: Une source monopole qui émis des ondes types longitudinales P et différentes ondes enregistrées dans les formation lentes et rapides (Schlumberger Wireline & Testing, 1998)

• Les outils dipolaires

Les sources dipolaires peuvent être utilisées pour générer des mouvements de cisaillement et des ondes de flexion, ce qui permettra de mesurer les vitesses des ondes S dans les formations rapides et lentes et de générer des ondes d'interface de Stoneley (Wang et al, 2020). L'outil dispose de deux émetteurs dipolaires, pour générer des modes de flexion, présentant des caractéristiques de propagation dans la formation, permettant de mesurer la vitesse S de la formation (Wicquart and Mari, 1992b). Un émetteur dipolaire émet de l'énergie dans une direction privilégiée (Haldorsen et al, 2006b). Ces outils sont destinés et adaptés avec le dimensionnement des puits pétrolier et la géothermie profond (environ 10 m de long et 10 cm de diamètre) (Fig. 23, Haldorsen et al, 2006b). Ils existent des adaptations et des développements des modèles de sondes destinés au géotechnique, avec des géophones hydrophones comme récepteur et l'espacement entre les sources et les récepteurs est de 2 à 3 m, et la plage des fréquences couvre le domaine de 100 à 1000 Hz (Mari, 2020). Ces outils génèrent des ondes de compression polarisées perpendiculairement à l'axe du forage, qui créent des modes de flexure à la paroi du puits et qui donnent naissance à des pseudo-ondes de cisaillement dans la formation. Ces pseudo-ondes se propagent parallèlement à l'axe du puits (Fig. 24, Mari, 2020; Wang et al, 2020).

Le pointé des premières arrivées des différentes ondes composant un enregistrement acoustique en champ total permet d'accéder aux logs acoustiques classiques (vitesse, fréquence, atténuation) ainsi qu'aux logs de dispersion de mesure qui leur sont associés (Wang et al, 2020).

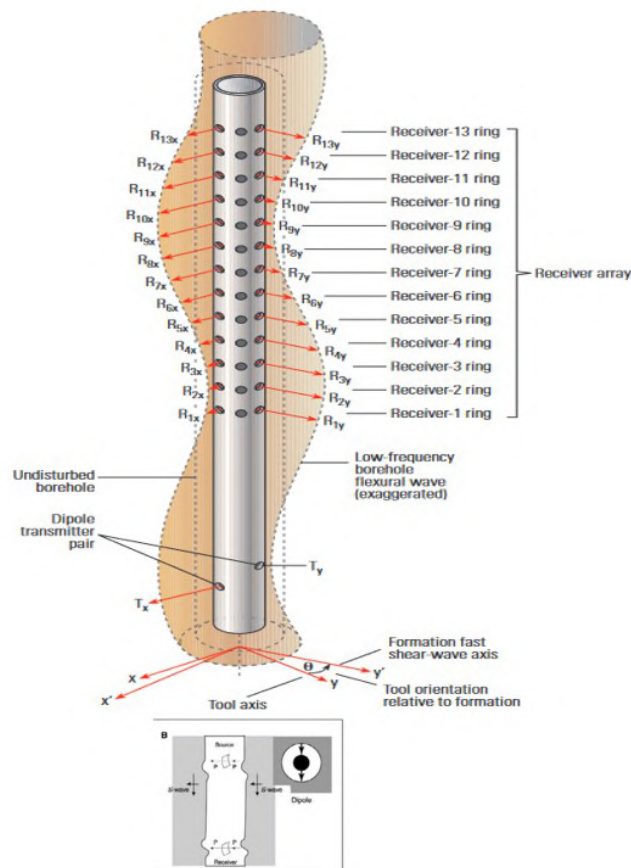


Figure 23: Outil Dipôle avec deux émetteurs des ondes de réflexions et des récepteurs répartis azimutalement (Haldorsen et al, 2006a).

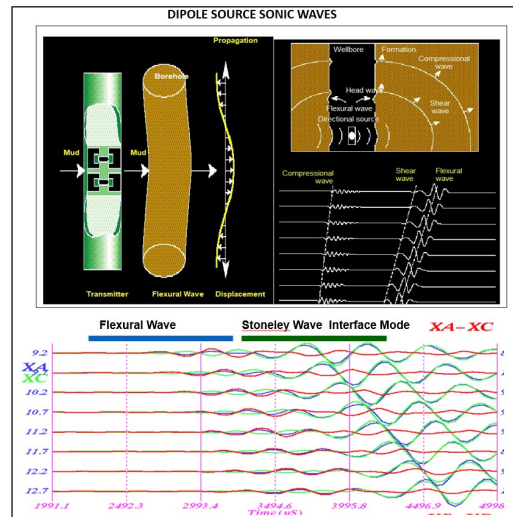


Figure 24: Une source dipolaire qui émet des ondes de réflexions pour générer des ondes de surface type Stoneley dans une formation lente (Schlumberger Wireline & Testing, 1998).

Table 6: Quelques caractéristiques des outils acoustiques (Mari, 2020).

Type d'outil	Type monopôle	Type dipôle
Type de fonctionnement	Fréquence d'émission 10–40 kHz	Fréquence d'émission 1–3 kHz
Type d'émetteur et de récepteur	Magnétostrictif	Piézo-électrique
Nombre d'émetteurs et de récepteurs	Classique avec 1 ou 2 émetteurs et deux récepteurs	Antenne réceptrice avec de 4 à 8 récepteurs
Écartement entre récepteurs	De 10 à 50 centimètres	De 10 à 50 centimètres
Déport de la source par rapport au premier récepteur	De 1 à 5 mètres	De 1 à 5 mètres
Caractéristiques mécaniques	Ossature rigide ouvragée	Ossature souple
Pas d'échantillonnage en temps	5 ou 10 μ s pour un outil monopôle	20 μ s pour un outil dipôle
Durée d'écoute	2 ou 5 ms pour l'analyse des modes réfractés	10 ms ou plus pour l'analyse des modes réfléchis

3.2 Calcul de l'atténuation

Avec l'atténuation acoustique on peut quantifier la perte d'énergie subie par une onde au cours de sa propagation dans un milieu géologique (Serra, 1984c). Elle peut être évaluée à partir des amplitudes ou des puissances du signal mesuré par les récepteurs dans un outil de diagraphe acoustique. L'atténuation est généralement exprimée en décibels (dB) ou par un ratio des amplitudes (Sheriff and Geldart, 2006).

3.2.1 Facteur d'atténuation

Comme démontré dans le chapitre précédent, le facteur d'atténuation, peut être estimée à partir du rapport des amplitudes entre les deux récepteurs. Cette méthode simple permet de comparer directement les signaux reçus :

$$\text{Facteur d'atténuation} = \frac{A_{RX2}}{A_{RX1}} \quad (28)$$

Ce ratio est généralement compris entre 0 et 1, traduisant une perte d'amplitude du signal liée à l'atténuation acoustique lors de la propagation entre les deux récepteurs.

- Un ratio proche de 0 indique une **forte atténuation**, c'est-à-dire que le signal a perdu une grande partie de son énergie durant la propagation.
- Un ratio proche de 1 suggère au contraire une **faible atténuation**, donc une perte d'énergie minimale entre les deux points de mesure.

Cette approche permet une première estimation fiable de l'atténuation acoustique, sans nécessiter de traitements complexes, ce qui la rend particulièrement adaptée aux analyses de terrain ou aux phases exploratoires d'un projet.

3.2.2 Atténuation apparente en dB/m

Le bel est défini comme étant le logarithme (en base 10) du rapport de deux puissances et le décibel est alors dix fois ce logarithme. Est une unité logarithmique sans dimensions très utilisée en physique au sens large, plus particulièrement en électronique et en acoustique (Adrien Pelat, 2019). Si l'on souhaite estimer l'atténuation apparente entre les deux récepteurs en décibels, on peut appliquer la relation logarithmique. Celle-ci peut être formulée de deux manières, selon que l'on travaille à partir de l'amplitude ou de la puissance du signal (Marie-Aude M.A. Ploix, 2016; Sheriff and Geldart, 2006)

À partir de l'amplitude :

$$\text{Atténuation (dB)} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{A_{RX1}}{A_{RX2}} \right) \quad (29)$$

Où :

- A_{RX1} et A_{RX2} sont les amplitudes mesurées respectivement au premier et au second récepteur.

À partir de la puissance:

$$\text{Atténuation (dB)} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{RX1}}{P_{RX2}} \right) \quad \text{avec} \quad P = (A_{RX})^2 = (\text{Amplitude})^2 \quad (30)$$

Où :

- P_{RX1} et P_{RX2} sont les puissances de signal mesurées respectivement au premier et au second récepteur.

Cette méthode repose sur le fait que la puissance d'un signal est proportionnelle au carré de son amplitude. Plus l'atténuation est élevée, plus cela indique une perte d'énergie rapide du signal, souvent causée par des fractures, de la porosité ou des variations lithologiques (Marie-Aude M.A. Ploix, 2016; Sheriff and Geldart, 2006).

3.2.3 Atténuation apparente en Np/m

Si l'on souhaite estimer l'atténuation apparente entre les deux récepteurs en Np/m, on peut appliquer l'équation suivante (Aki and Richards, 2009; Carcione, 2007; Sheriff and Geldart, 2006).

$$\alpha_{app} = -\ln\left(\frac{A(x)}{A_0}\right) \rightarrow \alpha_{app} = \ln\left(\frac{A_0}{A(x)}\right)$$

3.3 Analyse fréquentielle d'un signal acoustique (transformée de Fourier)

Transformer un signal temporel en domaine fréquentiel consiste à utiliser la transformée de Fourier, pour obtenir les composantes fréquentielles du signal (Fig. 25) (Oppenheim and Schaffer, 2010) .

3.3.1 Transformée de Fourier continue (TFC)

L'équation de la Transformée de Fourier continue pour un signal analogique $x(t)$ est donnée par (Smith, 1999):

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt$$

- $X(f)$: représente la transformée de Fourier du signal $x(t)$ dans le domaine fréquentiel.
- f : fréquence (en hertz).
- j : l'unité imaginaire, où $j^2 = -1$.
- t : le temps (en secondes).
- $e^{-j2\pi ft}$: base complexe qui décompose le signal en composantes sinusoïdales.

3.3.2 Transformée de Fourier Discrète (TFD)

Dans le cas où le signal est échantillonné (c'est-à-dire discret) (Oppenheim and Schaffer, 2010; Proakis and Manolakis, 2007)

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}$$

- $X[k]$: est la *TFD* du signal échantillonné $x[n]$.
- N : nombre total d'échantillons du signal.
- n : indice d'échantillonnage.
- k : indice de fréquence.

La *FFT* (Fast Fourier Transform) est un algorithme rapide pour calculer la *TFD* (Proakis and Manolakis, 2007; Smith, 1999).

. Amplitude spectrale à partir de *FFT*

$$A[k] = \frac{2}{N} \cdot \text{abs}(X[k])$$

. Fréquence associée à partir de la *FFT*

$$f_k = \frac{k \cdot f_s}{N}$$

- f_k : fréquence correspondant à l'indice k .
- f_s : fréquence d'échantillonnage du signal (échantillons/seconde).
- N : nombre total d'échantillons.
- k : indice du coefficient *FFT* (de 0 à $N - 1$).

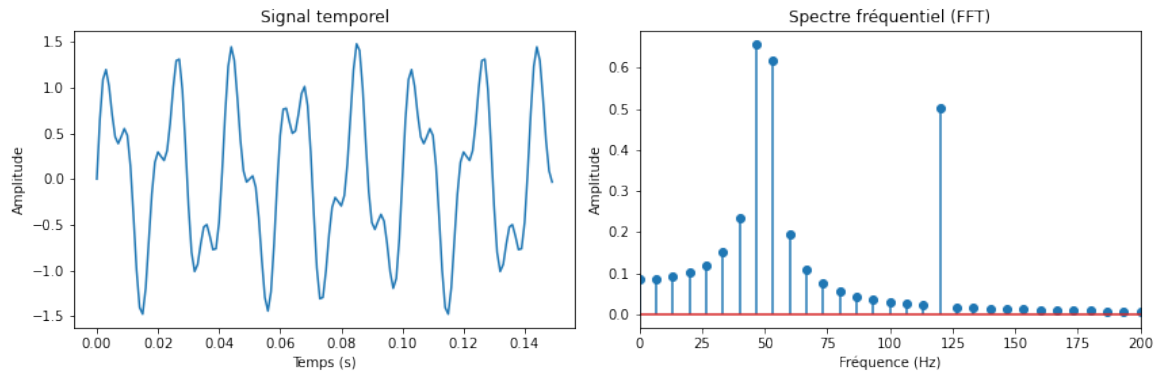


Figure 25: La figure montre le signal initial en fonction du temps ainsi que son spectre de fréquence, obtenu par application de la transformée de Fourier.

3.3.3 Spectrogramme

Un spectrogramme est une représentation en trois dimensions, qui montre l'évolution des fréquences au cours du temps. Il combine l'information temporelle et fréquentielle, en affichant l'amplitude des différentes fréquences en fonction du temps (Boashash, 2016; Cohen, 1995; Mallat, 2009).

On calcule un spectrogramme on applique la *FFT* sur des segments successifs du signal (*STFT*, Short-Time Fourier Transform). Chaque fenêtre est d'une longueur fixe et doit être égale ou grand d'un cycle (durée d'une oscillation). Pour chaque segment on applique la *STFT* pour obtenir la distribution fréquentielle du signal dans cette fenêtre temporelle (Boashash, 2016; Cohen, 1995; Mallat, 2009).

Les amplitudes des fréquences dans chaque fenêtre sont récupérées. Cela nous donne l'amplitude des fréquences dans une fenêtre temporelle. Plus la fenêtre grande plus on donne une précision au fréquence, plus la fenêtre petite on donne une précision au temps (Fig. 26, Boashash, 2016; Cohen, 1995; Mallat, 2009).

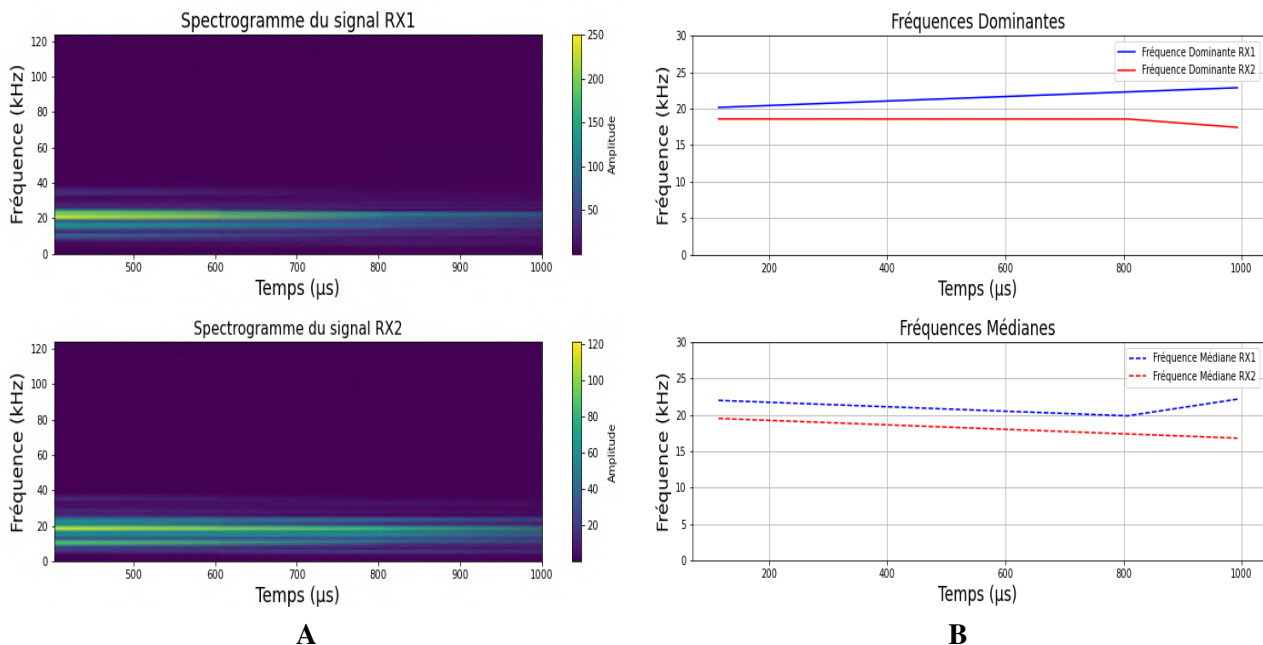


Figure 26: Spectrogramme d'une onde complète au premier récepteur et au deuxième récepteur, avec le calcul des fréquences dominante et médiane

. Transformée de Fourier à court terme (STFT)

$$X(t, f) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot w[n-t] \cdot e^{-j\frac{2\pi fn}{N}}$$

- $x[n]$: signal original.
- $w[n-t]$: fenêtre centrée autour de t .
- $X(t, f)$: composante fréquentielle à l'instant t .
- N : nombre total de points du signal.

. Calcul de la fréquence dominante dans un spectrogramme

Chaque colonne du spectrogramme (pour un temps donné) représente un spectre local, c'est-à-dire l'amplitude des fréquences dans cette fenêtre temporelle. On identifie la fréquence dominante comme celle où l'amplitude du spectre atteint son maximum (Fig. 27, Boashash, 2016; Oppenheim and Schafer, 2010; Proakis and Manolakis, 2007).

$$f_{\text{dom}}(t_i) = \arg \max_{f_k} |X(t_i, f_k)|$$

- $f_{\text{dom}}(t_i)$: fréquence dominante à l'instant t_i .
- $X(t_i, f_k)$: coefficient de la STFT (Short-Time Fourier Transform) à l'instant t_i et à la fréquence f_k .
- $|X(t_i, f_k)|$: amplitude spectrale à l'instant t_i pour la fréquence f_k .
- $\arg \max$: opérateur qui renvoie l'indice (ici la fréquence f_k) pour lequel la fonction $|X(t_i, f_k)|$ atteint son maximum.

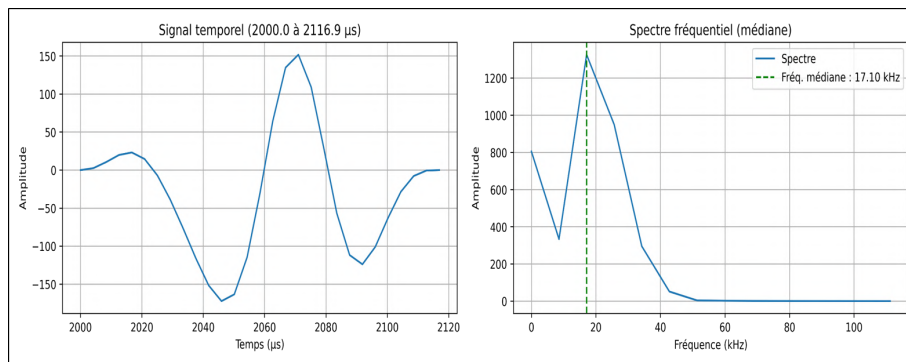


Figure 27: fréquence dominante d'un spectre correspond à la composante fréquentielle prédominante dans le signal (détermination de la fréquence dominante par projection du maximum spectral sur l'axe des fréquences pour lire la fréquence dominante).

. Détermination de la fréquence dominante moyenne

Calculée sur l'ensemble du signal (c'est-à-dire en tenant compte de toutes les fenêtres temporelles), correspond à la moyenne des fréquences dominantes extraites dans chaque fenêtre.

Elle représente la fréquence à laquelle l'énergie du signal est globalement la plus concentrée au cours du temps. (Cohen, 1995; Mallat, 2009)

$$f_{\text{dom.moy}}(z) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M f_{\text{dom}}(t_i)$$

où M est le nombre de fenêtres temporelles.

. Calcul de la fréquence médiane dans un spectrogramme

La fréquence médiane est la fréquence qui divise le spectre en deux parties égales en énergie. Autrement dit, 50% de l'énergie spectrale totale se trouve en dessous de cette fréquence, et 50% au-dessus. Elle est définie mathématiquement par (Fig. 28, Boashash, 2016; Oppenheim and Schaffer, 2010; Proakis and Manolakis, 2007).

$$\int_0^{f_m} |X(f)|^2 df = \frac{1}{2} \int_0^{f_{\text{max}}} |X(f)|^2 df$$

où :

- f_m : fréquence médiane,
- $X(f)$: transformée de Fourier du signal,
- $|X(f)|^2$: densité spectrale d'énergie,
- f_{max} : fréquence maximale du spectre.

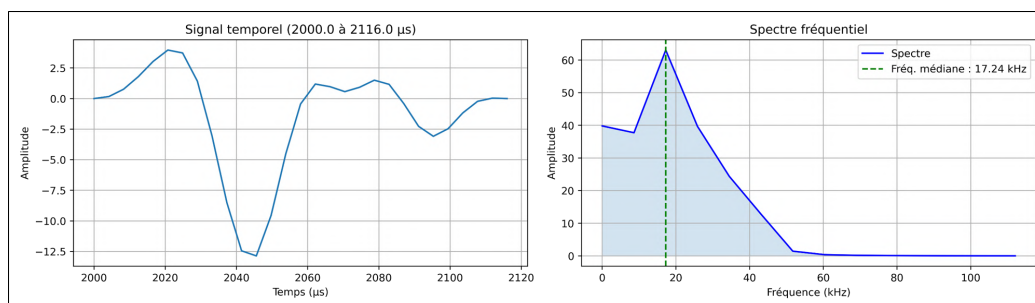


Figure 28: fréquence médiane correspond à la moitié de l'aire totale sous le spectre. L'aire représente la moitié de l'énergie spectrale totale.

* La fréquence dominante peut parfois être erronée en présence de bruit, car elle ne reflète que la composante de plus forte amplitude, même si celle-ci est due à une perturbation. En revanche, la fréquence médiane, fondée sur la répartition globale de l'énergie spectrale, est souvent plus robuste face aux fluctuations bruitées du signal, mais pas dans tout les cas.

3.4 Analyse de semblance

L'analyse de semblance est une méthode numérique de traitement du signal utilisée pour but d'identifier les arrivées cohérentes (ou la similarité) d'ondes soniques dans les enregistrements d'une diagraphie sonique (Fig. 29, Advanced Logic Technology, 2020). Il est possible avec cette méthode d'estimer les vitesses des ondes P et S et St et calculer aussi les paramètres géomécanique dans la formation traversée. Dans ce travail, le logiciel utilisé

c'est *WellCad*. On présente ici la méthode de traitement des données par *WellCad* pour l'analyse de semblance. A l'aide du *FWS* module Processing du logiciel *WellCAD*. Les étapes d'analyse suivies sont les suivantes :

1. Importer les données soniques multipaires (au format *LAS* ou *DAT*) dans *WellCAD*. Chaque trace correspond à un enregistrement effectué entre différents émetteurs et récepteurs soniques.
2. Définir une fenêtre temporelle, ainsi qu'un pas d'analyse et une gamme de vitesses. Ces paramètres influencent la précision et la résolution du calcul de semblance.
3. Le logiciel calcule la cohérence (semblance) entre les traces enregistrées. Une carte 2D est générée, où les crêtes de semblance correspondent aux arrivées cohérentes des ondes.
4. Les crêtes correspondant aux ondes *P* et *S* et *St* ont été identifiées. Les vitesses correspondantes ont été extraites et intégrées dans le log final pour l'interprétation géologique.

Principe de fonctionnement (Advanced Logic Technology, 2020)

1. Lorsqu'une onde est émise depuis une source sonique, elle est captée à différents moments par plusieurs récepteurs espacés verticalement dans le puits.]
2. L'analyse de semblance consiste à glisser une fenêtre temporelle sur les signaux enregistrés et à comparer la forme de l'onde reçue par chaque récepteur.
3. Si les signaux se ressemblent fortement à un certain instant pour un ensemble de récepteurs, cela signifie qu'il y a une arrivée cohérente d'une onde, ce qui indique :
 - Une onde *P* (compression).
 - Ou une onde *S* (cisaillement).
 - Ou une onde *St* (stoneley)
4. Le logiciel attribue un indice de semblance (de 0 à 1), qui mesure le degré de cohérence :
 - 1 = signaux parfaitement semblables (haute cohérence).
 - 0 = signaux sans lien apparent (incohérents).
5. On obtient alors une carte de semblance (semblance map) où les crêtes correspondent aux arrivées cohérentes, c'est à partir de ces crêtes qu'on extrait les vitesses d'ondes. Dans *WellCAD*, l'analyse de semblance est affichée en couleurs :
 - Les zones sombres ou colorées avec une forte intensité indiquent une forte cohérence (arrivées nettes des ondes).
 - L'axe horizontal représente la vitesse (slowness) ou le temps de transit. • L'axe vertical est la profondeur. Cette méthode est sensible au bruit et à la qualité de l'enregistrement, mais c'est un outil efficace pour l'estimation des vitesses des ondes soniques et la caractérisation des formations traversées. Elle permet d'affiner l'interprétation géophysique et de mieux contraindre les modèles géomécaniques ou stratigraphiques du sous-sol.

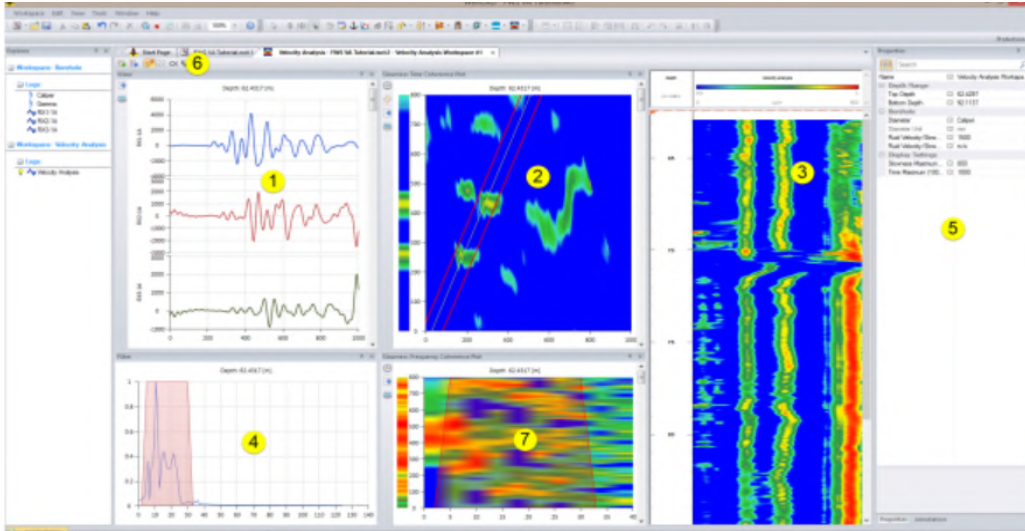


Figure 29: Espace de travail pour l'analyse de semblance, composé de plusieurs diagrammes l'interprétation : 1- forme d'onde complète des 3 récepteurs avec la profondeur. 2- Diagramme de cohérence temps-lenteur. 3- Analyse e vitesse montre les maxima de cohérence sur l'axe de lenteur. 4- La barre de filtre montrant un spectre de fréquence dérivé des traces sonores. 5- Les paramètres de l'espace de travail. 6- La barre d'outils de l'espace de travail avec des icônes de fonctionnalités.7- Le graphique Lenteur-Fréquence-Cohérence.

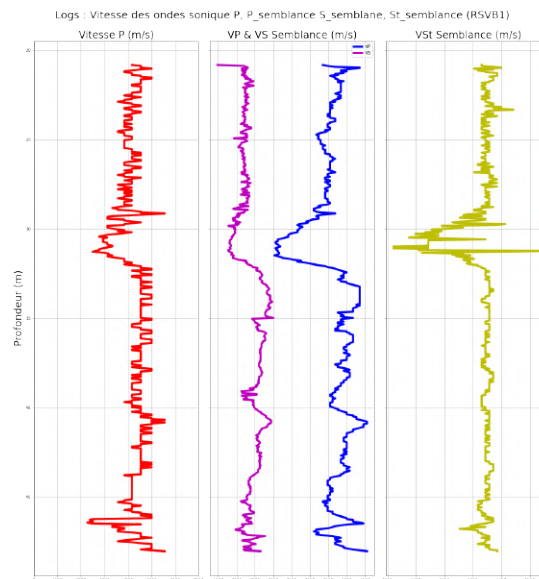


Figure 30: Les vitesses des ondes P , S et Stoneley ont été estimées à partir des données soniques du forage à l'aide de l'analyse de semblance, puis représentées sous forme de logs.

4 Modèle expérimental d'un forage analogue au laboratoire

Dans le cadre de cette étude, un modèle expérimental a été mis en place afin de simuler les conditions physiques rencontrées dans un forage réel (Fig. 32, 33). Ce modèle, constitué de béton non armé, a pour objectif de servir de support à l'analyse du comportement des ondes acoustiques dans un milieu contrôlé. L'expérimentation porte sur plusieurs aspects essentiels de la propagation des ondes soniques, à savoir :

- La mesure des vitesses de propagation des différentes ondes (ondes P , ondes S et ondes St).
- L'atténuation de leur amplitude et la perte d'énergie au cours de leur propagation dans le matériau.
- La variation de la fréquence du premier pic, ainsi que l'évolution fréquentielle en fonction du temps et de la profondeur dans le forage.

L'instrumentation utilisée pour cette campagne de mesures repose sur l'outil sonique *BHC* de *Chyn*, conçu pour enregistrer avec précision les signaux acoustiques dans un environnement de type forage. L'objectif principal de cette démarche expérimentale est d'étudier et d'analyser l'influence de divers facteurs tels que le diamètre du forage, les différentes densités de fluide, ainsi que la présence de discontinuités sur la vitesse de propagation, l'atténuation et la variation de fréquence des ondes acoustiques dans un milieu simulé. Ces résultats fourniront un cadre de référence précieux pour l'interprétation des données acoustiques issues de forages réels, notamment dans des contextes géologiques complexes en présence de fluides. La simulation prend en compte les conditions expérimentales suivantes :

1. Un modèle intact (sans fracture).
2. La présence d'une fracture, lisse ou rugueuse.
3. Une fracture ouverte ou fermée.
4. La présence de plusieurs fractures superposées.

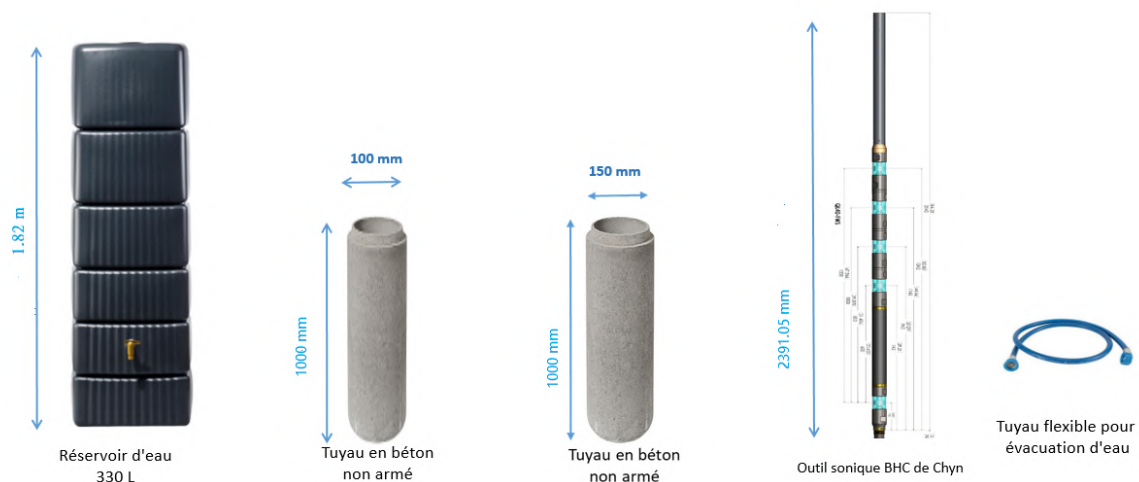


Figure 31: Le matériel nécessaire pour le modèle expérimental d'un forage analogue.

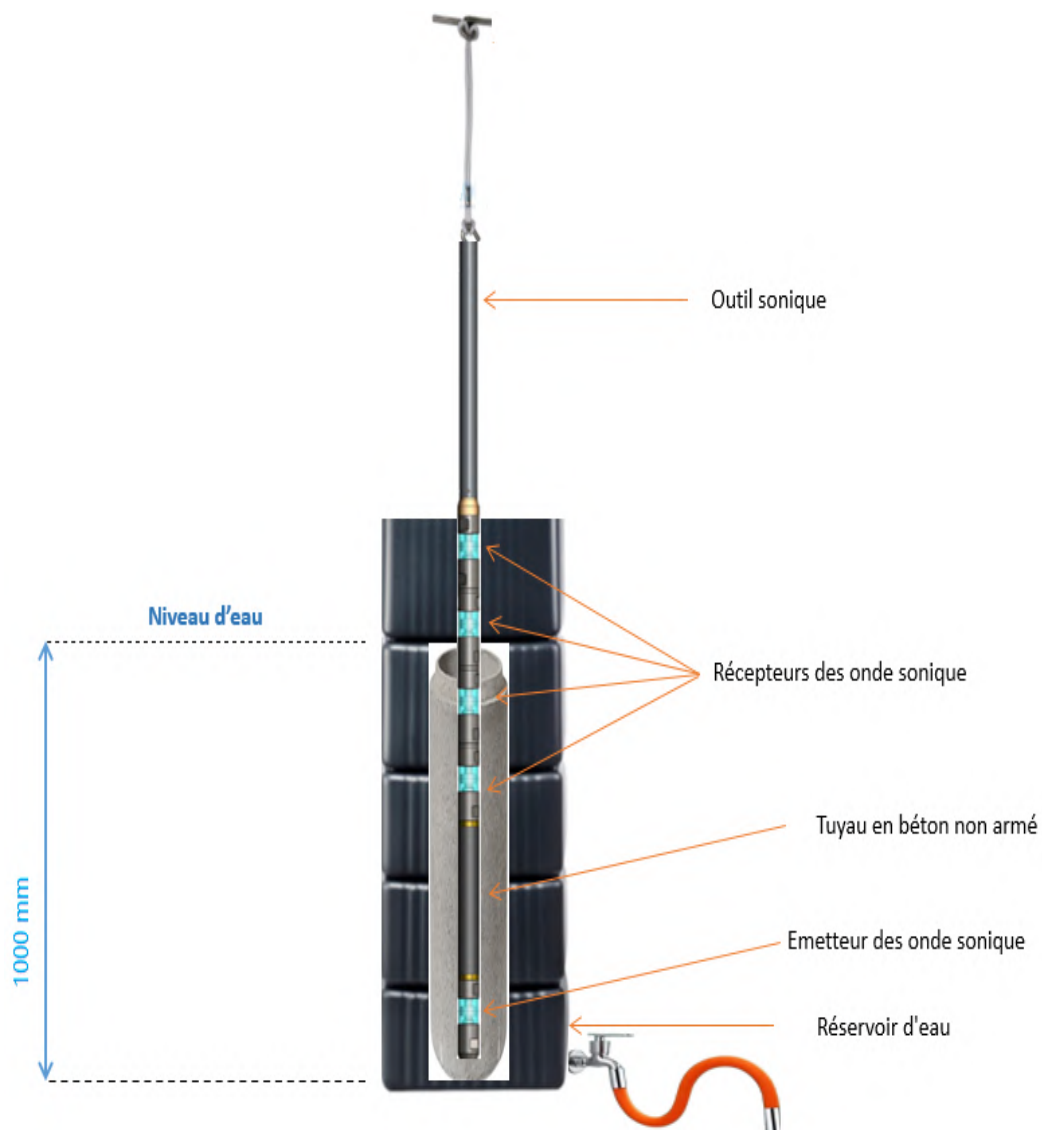


Figure 32: Model expérimental intact.



Figure 33: Cinq vues illustrant la réalisation du modèle expérimental

4.1 Présentation de l'outil sonique (QL 40-FWS M) utilisé pour les mesures acoustiques sur le modèle

L'outil sonique QL 40-FWS M (Broad Band Full Waveform Sonic), est un outil de mesure acoustique avancé, utilisé dans le domaine des forages en hydrogéologie et géotechnique. Il est adapté autant aux forages non tubés (open hole) qu'aux forages tubés (cased hole), notamment pour la détection de fractures ou l'évaluation de la qualité de cimentation de tubage d'un forage (Advanced Logic Technology, 2020).

Caractéristiques techniques

- Structure : sonde de 50 mm de diamètre sur environ 2.14 m de long (1 émetteur, 4 récepteurs espacés de 0.20 m).
- Capteurs : transducteurs piézoélectriques en céramique, fréquence résonnante = 6 – 15 kHz.
- Échantillonnage : modes normal (4 μ s , durées jusqu'à 4 ms) et étendu (20 μ s jusqu'à 16 ms).
- Dynamique : résolution 16 bits, pression maxi bar, température maxi 70 °C, poids environ 18 kg (Advanced Logic Technology, 2020).

Acquisition

- L'émetteur génère une impulsion, les 4 récepteurs capturent les signaux propagés à distance fixe, puis le système logger enregistre tout en temps réel.
- Le traitement en temps réel se fait via *Logger Suite* ou *WellCAD*, avec filtrage et extraction automatique des temps d'arrivée (*P* wave).
- Enregistrement de la forme d'onde complète (full waveform) avec traitement en temps réel pour distinguer la propagation des différents ondes soniques (ondes *P*, *S*, Stoneley, tube waves, etc avec différents modes d'enregistrement : Wide Band, Chevron, Tube et *CBL* pour l'analyse de la qualité de cimentation (Advanced Logic Technology, 2020).

Applications

- Forages tubés : évaluation de la cimentation (*CBL*).
- Forages non tubés : estimation de la vitesse des différentes ondes sonique *P*, *S* et *St* . . . etc. Estimation de la porosité, perméabilité, identification lithologique, contraintes mécaniques (modules de Young, Poisson, cisaillement. . .) et détection de la fracturation.

Le QL 40-FWS M constitue un outil complet et performant, combinant robustesse, flexibilité, et capacités avancées de traitement (Fig. 34, 35). Il fournit des informations clés sur les propriétés géomécaniques et la présence de fractures dans le sous sol, avec une qualité d'analyse indispensable aux applications hydrogéologiques (Advanced Logic Technology, 2020).

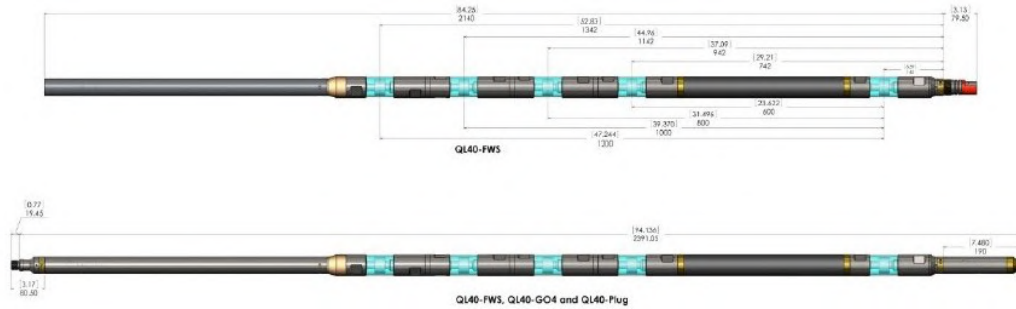


Figure 34: Dimensionnement d'outil sonique QL 40-FWS M. La première image montre le dispositif sans bouchons, et la deuxième avec les bouchons de protection (Advanced Logic Technology, 2020).



Figure 35: Outil sonique QL 40-FWS M

4.2 Les différents cas et conditions expérimentales simulés

Le modèle expérimental est constitué de deux tubes en béton non armé, de 10 cm et 15 cm de diamètre intérieur respectivement, et de 1 m de long chacun, représentant des puits analogues. Ces tubes ont été installés verticalement dans un réservoir en plastique découpé à une hauteur de 1.5 m. Le réservoir a été rempli soit d'eau, soit de boue, afin de simuler la présence de fluide dans le trou de forage. Un outil sonique de type (Broad Band Full Waveform Sonic) a été introduit verticalement dans les puits pour réaliser les mesures. Les enregistrements acoustiques ont été effectués à différentes profondeurs et dans diverses configurations, dans le but d'évaluer l'effet des discontinuités internes du modèle sur la propagation des ondes sonores. Les conditions expérimentales simulées couvrent plusieurs cas représentatifs des environnements rencontrés en forage réel, à savoir (Tab. 7) :

4.2.1 Un modèle intact, sans fracture

Ce cas de référence vise à déterminer les vitesses de propagation des différentes ondes acoustiques principalement l'onde P dans un milieu homogène et sans discontinuité (Fig. 32). L'expérience est réalisée dans deux milieux de remplissage :

- De l'eau claire.
- Et une boue de densité $\rho = 1.035$ g/ml, afin de simuler des conditions de forage plus réalistes.

Les cas simulés dans cette étude sont les suivants

- **A. Mesure des ondes Sonique dans l'eau.**
- **B. Modèle intact rempli d'eau puis de la boue $d = 1.035 \text{ g/ml}$ dans un modèle $D = 10 \text{ cm}$.**
- **C. Modèle intact rempli d'eau de la boue $d = 1.035 \text{ g/ml}$ dans un modèle $D = 15 \text{ cm}$.**

L'objectif est d'évaluer :

1. La vitesse de propagation d'onde P puis S et St dans l'eau seule, puis dans le tube de 10 cm et dans le tube de 15 cm rempli d'abord avec de l'eau puis de la boue.
2. Leur atténuation intrinsèque (perte d'énergie dans le milieu).
3. Et les variations fréquentielles au cours du temps.

L'analyse repose sur l'étude de la forme d'onde complète, en mettant l'accent sur :

- La première arrivée (temps d'arrivée des ondes).
- Le contenu fréquentiel de premier arrivée et du signal.
- Et l'amplitude du premier pic, correspondant généralement à l'onde P .

Ces résultats permettent de constituer une base de référence pour comparer les cas fracturés et mieux identifier l'effet des discontinuités dans les milieux plus complexes.

4.2.2 Fractures ouvertes dans des modèles de 10 cm et 15 cm de diamètre

Dans cette configuration expérimentale, des fractures ouvertes ont été reproduites artificiellement dans des modèles de 10 cm et 15 cm de diamètre. Afin de simuler un espacement réaliste entre les faces des fractures, des supports en plastique de 2 mm d'épaisseur ont été insérés, empêchant tout contact entre les surfaces (Fig. 36). Le modèle a ensuite été rempli d'eau, simulant des conditions de forage en milieu saturé. Trois cas distincts ont été étudiés

- **D. Une fracture ouverte lisse, dans un modèle $D = 15 \text{ cm}$.**
- **E. Une fracture ouverte rugueuse dans le deux modèle $D = 10 \text{ cm}$.**
- **F. Plusieurs fractures ouvertes lisses, dans le modèle $D = 15 \text{ cm}$.**

L'objectif de ces simulations est d'analyser l'influence des fractures, selon leur état de surface (lisse ou rugueux) et leur nombre, sur le comportement des ondes soniques P . L'analyse repose sur les éléments suivants :

- L'étude des temps d'arrivée des premières ondes (sur les capteurs $RX1$ et $RX2$).
- La fréquence dominante à la réception (sur les capteurs $RX1$ et $RX2$).
- L'atténuation de l'amplitude du premier pic associé à l'onde P .
- Et la variation de la fréquence au cours du temps.

Ces résultats permettront de mieux comprendre l'impact des discontinuités ouvertes sur la propagation acoustique, et de disposer de références utiles pour l'interprétation des données en forage réel.

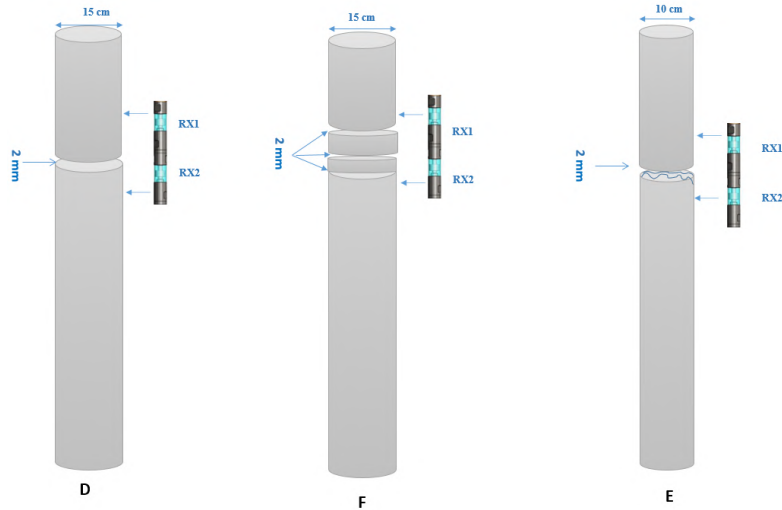


Figure 36: *D.* Une fracture ouverte lisse, dans un modèle 15 cm de diamètre). *E.* Une fracture ouverte rugueuse dans le deux modèle de 10 cm de diamètre. *F.* Plusieurs fractures ouvertes lisses, dans le modèle de 15 cm de diamètre

4.2.3 Fractures fermées dans le modèle de 15 cm de diamètre

Dans cette configuration expérimentale, des fractures lisses fermées ont été reproduites artificiellement dans le modèle de 15 cm de diamètre (Fig. 37). Afin de simuler des fractures lisses sans espacement réaliste. Le modèle a ensuite été rempli d'eau, simulant des conditions de forage en milieu saturé. Deux cas distincts ont été étudiés :

- ***G.* Une fracture fermée lisse, dans le modèle $D = 15$ cm.**
- ***H.* Deux fractures fermées lisses superposées, dans le modèle $D = 15$ cm.**

Des mesures acoustiques ont été réalisées sur les deux configurations. Pour chaque cas, les amplitudes ont été enregistrées avant la fracture (au niveau du récepteur *RX1* et à différentes distances après la fracture (au niveau du récepteur *RX2*, placé à 5 cm puis 10 cm de celle-ci). L'objectif est d'évaluer l'effet de la position relative de la fracture entre les deux récepteurs sur l'atténuation apparente du signal. L'objectif de ces simulations est d'analyser l'influence des fractures fermées sans espacements, selon leur état de surface lisse et leur nombre (un ou deux), sur le comportement des ondes soniques . L'analyse repose sur les éléments suivants :

- L'étude des temps d'arrivée des premières ondes (sur les capteurs *RX1* et *RX2*).
- La fréquence dominante à la réception (sur les capteurs *RX1* et *RX2*).
- L'atténuation de l'amplitude du premier pic associé à l'onde *P*.
- Et la variation de la fréquence au cours du temps.

Ces résultats permettront de mieux comprendre l'impact des discontinuités fermées sur la propagation acoustique, et de disposer de références utiles pour l'interprétation des données en forage réel.

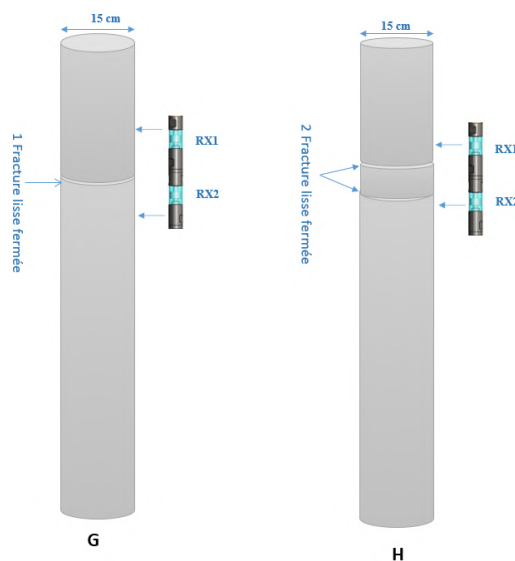


Figure 37: G. Une fracture fermée lisse, dans le modèle de 15 cm de diamètre. H. Deux fractures fermées lisses superposées, dans le modèle de 15 cm de diamètre.

Table 7: Résumé des différents cas étudiés.

Cas	Description
A	Mesure des ondes soniques dans l'eau.
B	Modèle intact rempli d'eau puis de la boue ($d = 1.035 \text{ g/ml}$) dans un modèle $D = 10 \text{ cm}$.
C	Modèle intact rempli d'eau et de la boue ($d = 1.035 \text{ g/ml}$) dans un modèle $D = 15 \text{ cm}$.
D	Une fracture ouverte lisse, dans un modèle $D = 15 \text{ cm}$.
E	Une fracture ouverte rugueuse, dans le modèle $D = 10 \text{ cm}$.
F	Plusieurs fractures ouvertes lisses, dans le modèle $D = 15 \text{ cm}$.
G	Une fracture fermée lisse, dans le modèle $D = 15 \text{ cm}$.
H	Deux fractures fermées lisses superposées, dans le modèle $D = 15 \text{ cm}$.

4.3 Résultat

Les données soniques *FWS* enregistrées dans les différentes configurations simulées ont été traitées à l'aide du logiciel *WellCAD*. Ce traitement a permis d'extraire séparément les signaux de chaque récepteur, en vue d'une analyse détaillée. Une analyse de semblance a également été réalisée afin de comparer les vitesses des ondes *P* obtenues via *WellCAD* avec celles calculées par traitement Python. Cette comparaison a été étendue aux vitesses des ondes *S* et *St* pour une évaluation complète des résultats. Il existe plusieurs types d'enregistrements ou formats de visualisation *FWS*, chacun adapté à un objectif d'analyse spécifique. Dans cette étude, le format (Wide Band) a été utilisé car il offre un affichage continu du signal enregistré sur l'ensemble des récepteurs. Ce type de visualisation est particulièrement adapté à l'analyse de semblance, en fournissant une représentation complète de l'énergie du signal dans le temps et sur les 4 récepteur. Il est également bien adapté au traitement fréquentiel, notamment pour l'application de la transformation de Fourier, permettant d'étudier l'évolution du contenu fréquentiel du signal en fonction du temps. Nous présentons ici les résultats de notre traitement des données soniques, comprenant l'identification des premières arrivées des ondes *P* dans l'eau ainsi que dans les différentes configurations simulées. Ce traitement inclut les analyse de vitesse des ondes soniques et également les résultats des analyses de semblance de chaque type d'onde, ainsi qu'une analyse fréquentielle visant à examiner

l'évolution spectrale du signal.

4.3.1 Estimation de la vitesse de propagation des ondes sonique et l'atténuation des amplitudes entre $RX1$ et $RX2$

Avant d'aborder la question de la vitesse de propagation des ondes soniques, il est essentiel de présenter une vision d'ensemble de la forme d'onde sonique enregistrée par les deux récepteurs $RX1$ et $RX2$ dans les différentes configurations expérimentales. Ces cas (de A à H) représentent divers milieux de propagation, diamètres de modèle, et la présence ou non de fractures.

Description de la forme d'onde sonique enregistrée par $RX1$ et $RX2$ selon les cas expérimentaux (A à H)

- La figure. 38, correspondant à la mesure des ondes soniques dans l'eau, montre que $RX1$ et $RX2$ enregistrent une forme d'onde relativement nette. L'onde de compression P apparaît atténuée, avec un temps d'arrivée tardif. Le signal n'est pas parfaitement symétrique, et l'amplitude enregistrée par $RX2$ est plus atténuée que celle de $RX1$. Les réflexions secondaires ainsi que le bruit de fond sont moins visibles.

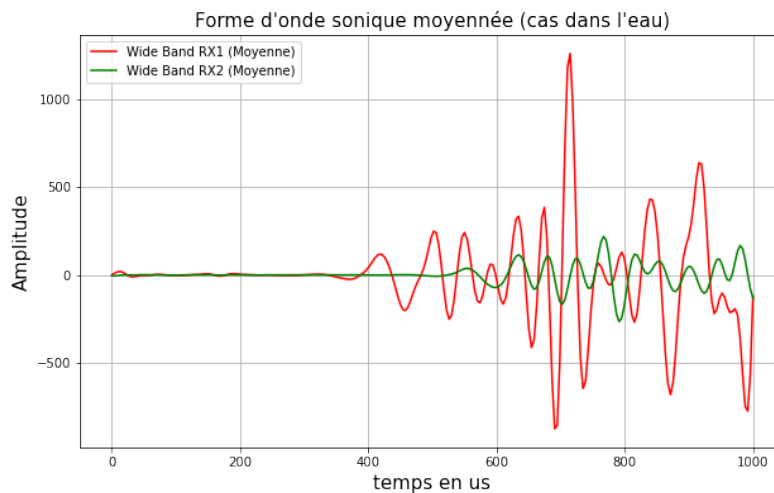


Figure 38: La forme d'onde sonique au premier récepteur et au deuxième récepteur (modèle rempli d'eau sans tube).

- La figure. 39, correspondant au modèle intact rempli d'eau puis de boue (diamètre 10 cm, densité 1.035 g/ml), par rapport à l'eau pure, le signal est moins atténué. $RX2$ enregistre une forme d'onde étalée que $RX1$. L'onde P reste bien visible. Le front d'onde est bien défini temporellement, sans signaux parasites, bien que rapide et l'amplitude enregistrée est plus élevée. Cette observation peut s'expliquer par un meilleur transfert de l'énergie acoustique entre le milieu et les capteurs, grâce à une transmission plus efficace ou à une meilleure correspondance d'impédance entre la boue et le tube en béton.

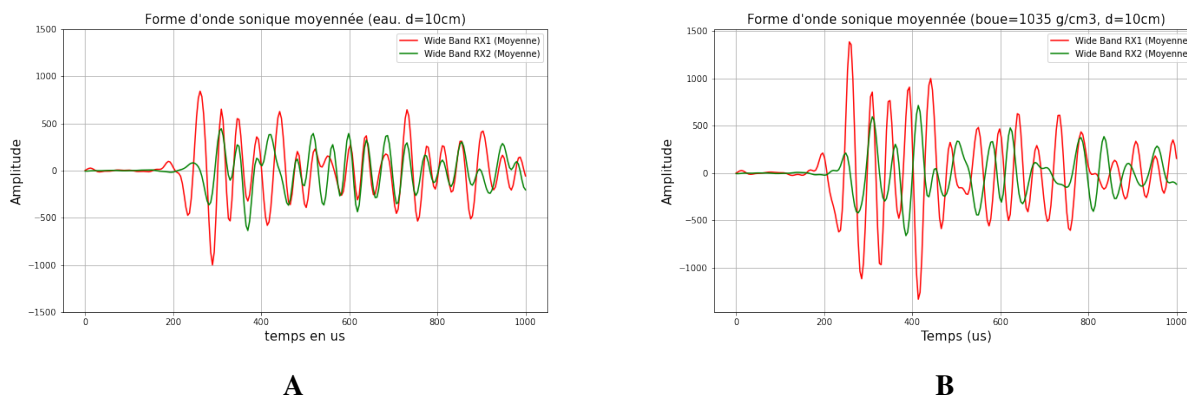


Figure 39: A: Forme d onde sonore moyennée $RX1$ $RX2$ ($D = 10$ cm, rempli d'eau). B: Forme d onde sonore moyennée $RX1$ $RX2$ ($D = 10$ cm, rempli de boue $d = 1.035$ g/ml)

- La figure. 40, correspondant au modèle intact rempli d'eau et de boue (diamètre $D = 15$ cm), montre une tendance légèrement différente de celle observée précédemment, avec une atténuation un peu plus marquée, probablement en raison de la différence de diamètre de forage. La forme d'onde enregistrée sur $RX2$ est légèrement plus étalée et moins bien définie dans le temps, avec un bruit de fond plus visible en début d'enregistrement. De plus, les amplitudes enregistrées dans l'eau sont légèrement plus élevées que dans la boue, contrairement au cas précédent. Cela pourrait s'expliquer par une répartition différente de l'énergie acoustique, induite par le diamètre plus important du forage, qui modifie les conditions de propagation et réduit l'efficacité du couplage avec la boue, ou encore par le gain appliqué automatiquement par l'outil afin de rendre le signal lisible en surface et entraîner des variations d'amplitude entre les mesures.

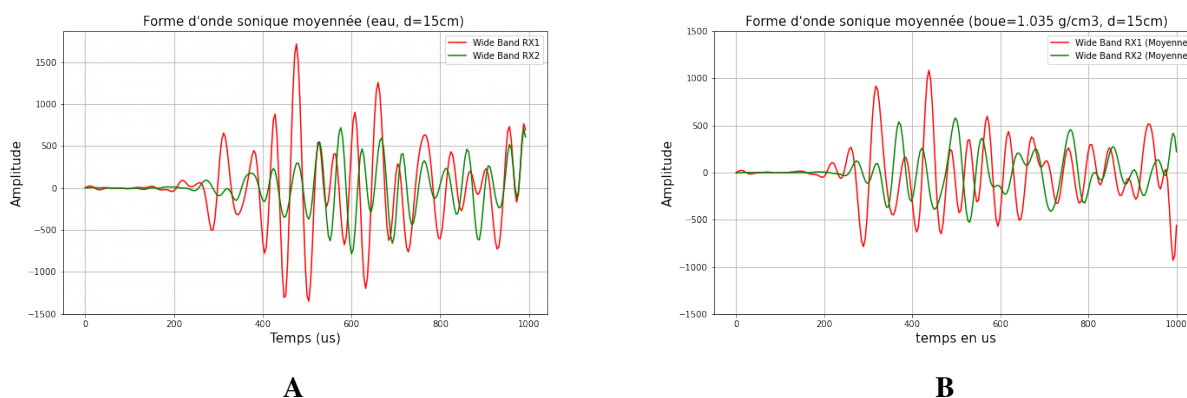


Figure 40: A: Forme d onde sonore moyennée $RX1$ $RX2$ ($D = 15$ cm, rempli d'eau). B: Forme d onde sonore moyennée. $RX1$ $RX2$ ($D = 15$ cm, rempli de boue $d = 1.035$ g/ml).

- La figure. 41B, correspondant au modèle contenant une fracture ouverte lisse (diamètre $D = 15$ cm), montre que $RX1$ détecte une onde de compression claire. Sur $RX2$, l'onde P apparaît plus faible, atténuée, avec un temps d'arrivée tardif. $RX2$ présente une réduction notable d'amplitude due à la fracture. La structure temporelle de la forme d'onde est perturbée, ce qui indique une altération de la propagation à travers la fracture. Cependant, après la première arrivée sur $RX2$, le signal devient plus régulier et montre une bonne cohérence avec celui enregistré par $RX1$. L'augmentation observée des amplitudes dans le cas d'une fracture, par rapport au modèle intact, pourrait s'expliquer par un gain automatique appliqué par l'outil. En effet, lorsque le signal est affaibli par la présence d'une fracture et risque de ne pas être détecté par le logiciel, l'outil applique un gain afin de le rendre lisible. Toutefois, l'atténuation relative de l'amplitude est bien conservée.

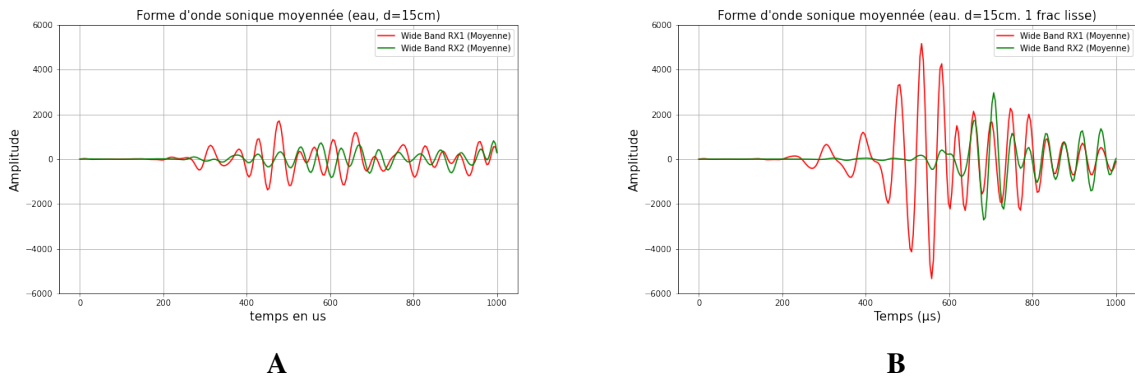


Figure 41: A: Forme d onde sonore moyennée $RX1RX2$ ($D = 15$ cm, modèle intact). B: Forme d onde sonore moyennée. $RX1RX2$ ($D = 15$ cm, modèle avec une fracture lisse ouverte).

- La figure. 42A, correspondant au modèle avec une fracture ouverte rugueuse (diamètre $D = 10$ cm, rempli d'eau), montre qu'un front d'onde clair reste observable sur $RX1$. Sur $RX2$, le comportement est similaire à celui du cas précédent : l'onde P est faible, atténuée avec une forte réduction d'amplitude, et son temps d'arrivée est retardé, attribuée à la présence de la fracture rugueuse, ainsi qu'une forme d'onde moins régulière et plus perturbée que dans le cas de la fracture lisse. Dans ce cas, l'effet de la rugosité reste globalement comparable à celui d'une fracture lisse, mais avec un niveau de bruit plus élevé. Cependant, l'amplitude mesurée dans le cas de la fracture lisse est environ deux fois plus élevée que celle observée avec la fracture rugueuse. Cette différence peut s'expliquer par un meilleur couplage acoustique dans le cas de la fracture lisse, par une répartition différente de l'énergie entre l'outil et la paroi du forage, et aussi probablement par un gain automatique appliqué par l'outil pour rendre le signal lisible, bien que les surfaces régulières facilitent la transmission de l'onde P . À l'inverse, la rugosité introduit des irrégularités à l'interface, provoquant une diffusion de l'énergie, des réflexions locales et une perte d'efficacité de la transmission vers $RX2$.

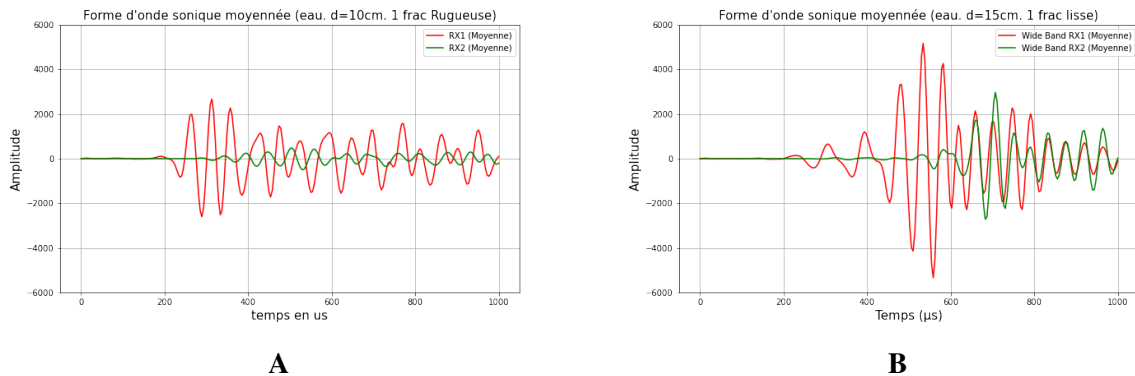


Figure 42: A: Forme d onde sonore moyennée $RX1RX2$ ($D = 10$ cm, modèle avec une fracture rugueuse ouverte). B: Forme d onde sonore moyennée. $RX1RX2$ ($D = 15$ cm, modèle avec une fracture lisse ouverte).

- La figure. 43, correspondant au modèle à trois fractures ouvertes lisses ($D = 15$ cm), $RX2$, montre une atténuation très marquée. La forme d'onde devient faible, signe d'une forte dissipation de l'énergie lors du passage à travers les fractures.

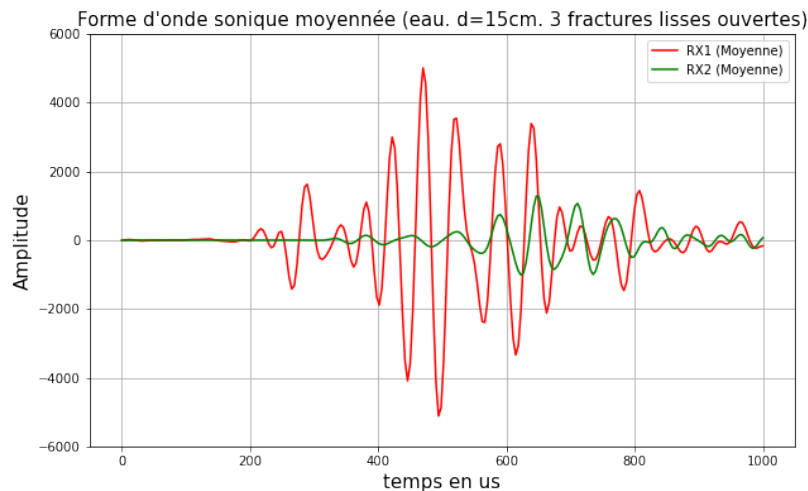
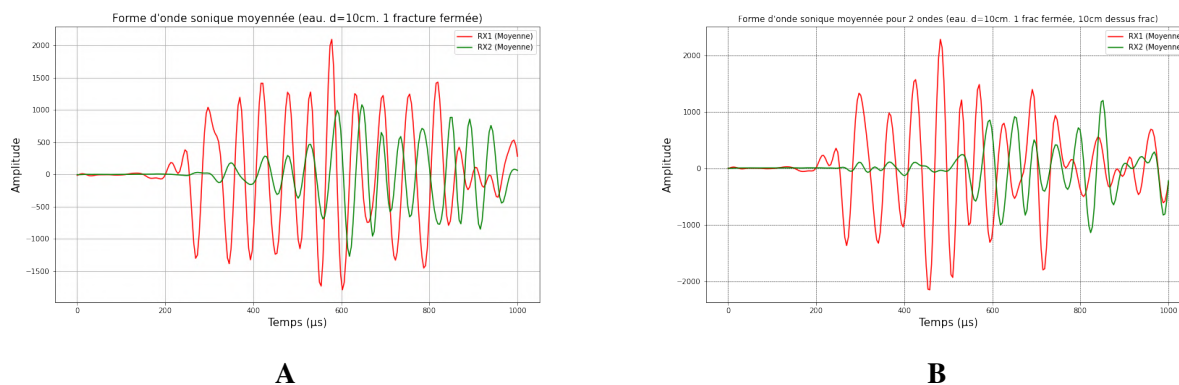


Figure 43: Forme d'onde sonore moyennée $RX1RX2$ ($D = 15$ cm, modèle de 3 fractures lisses ouvertes).

- La figure. 44, correspondant au modèle avec une fracture fermée lisse ($D = 15$ cm), positionnée à différentes distances par rapport à $RX2$, l'impact est moins marqué que dans les cas de fractures ouvertes. Le modèle de 15 cm avec une fracture 5 cm sous $RX2$ est moins atténué que celui avec une fracture 10 cm sous $RX2$. Plus la fracture est loin de $RX2$ et proche de $RX1$, plus l'atténuation et le retard de l'onde P sont importants. L'atténuation est modérée, avec un léger ralentissement du signal, et une déformation limitée de la forme d'onde.



A

B

Figure 44: A: Forme d'onde sonore moyennée $RX1RX2$ ($D = 15$ cm, 1 fracture fermée, 15 cm sous $RX2$). B: Forme d'onde sonore moyennée. $RX1RX2$ ($D = 15$ cm, 1 fracture fermée, 10 cm sous $RX2$).

- La figure. 45, correspondant au modèle comportant deux fractures fermées lisses superposées (diamètre 15 cm), met en évidence un retard d'arrivée limité de l'onde P , accompagné d'une déformation marquée de la forme d'onde sur $RX2$, due à la présence des deux fractures. Ce dernier présente une atténuation importante de l'amplitude.

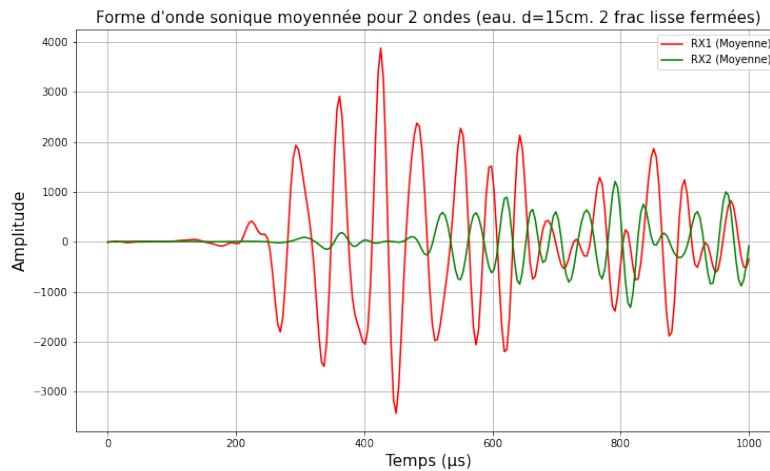


Figure 45: Forme d'onde sonore moyennée $RX1RX2$ ($D = 15$ cm, modèle de 2 fractures fermées).

Cette analyse générale des formes d'ondes soniques met en évidence l'influence progressive des paramètres géométriques et structuraux du modèle sur la qualité du signal enregistré. Elle constitue une étape clé pour appréhender de manière plus approfondie les analyses suivantes, notamment celles liées à la vitesse de propagation et à l'atténuation des ondes soniques dans les différents milieux étudiés.

Arrivée des ondes soniques et analyse de la vitesse de propagation ainsi que de l'atténuation d'amplitude selon les cas expérimentaux (A à H)

L'analyse de la vitesse de propagation et de l'atténuation d'amplitude des ondes soniques enregistrées par les récepteurs $RX1$ et $RX2$, dans les différentes configurations expérimentales (de A à H), permet de mieux appréhender l'influence des conditions physiques et structurales du milieu sur le comportement des ondes acoustiques. Ces mesures mettent en évidence les effets combinés du type de matériau (eau, boue), du diamètre du forage et de la présence ou non de fractures (ouvertes, fermées, rugueuses ou lisses). Les résultats obtenus se présentent comme suit:

- Dans le cas A (milieu homogène en eau), le temps d'arrivée des ondes P est relativement lent, avec une valeur mesurée de $340 \mu\text{s}$ à $RX1$ et de $482 \mu\text{s}$ à $RX2$ (Fig. 46). Ce délai est cohérent avec la faible vitesse de propagation dans un fluide homogène tel que l'eau. L'écart modéré entre les deux récepteurs indique une propagation stable, sans perturbation majeure. Par ailleurs, la vitesse de propagation observée dans ce cas est relativement faible (1408 m/s), correspond au tableau de référence des vitesses (Table. 1). Le facteur d'atténuation d'amplitude mesuré entre le premier pic de $RX1$ et de $RX2$ (Fig. 46B) est, en revanche, important (0.30), indiquant une perte notable d'énergie lors de la propagation de l'onde. Cela reflète une transmission avec une forte dissipation de l'énergie acoustique dans un milieu fluide peu contraint

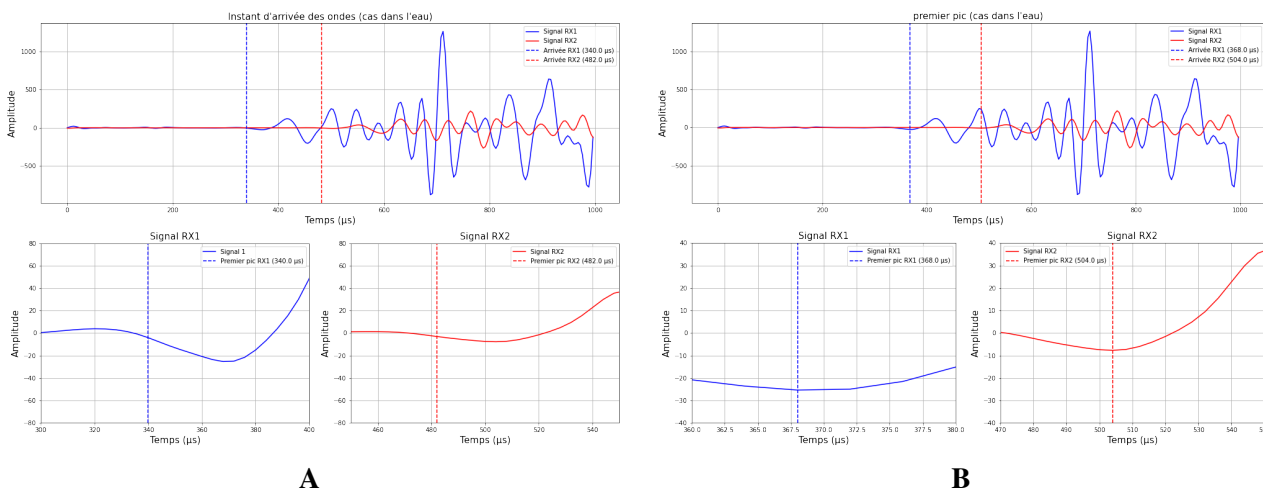


Figure 46: A: premier arrivée des ondes sonore. B: premier pic des ondes sonore (mesurer dans l'eau).

- Dans le cas B (modèle rempli d'eau puis de boue - diamètre 10 cm), la première arrivée de l'onde P dans le cas de l'eau est enregistrée à RX1 à (110 µs) et à RX2 à (164 µs) (Fig. 47), et dans le cas de la boue est enregistrée à RX1 à (114 µs) et à RX2 à (164 µs) (Fig. 48), dans l'eau traduisant un léger allongement du temps de propagation par rapport au cas A. La vitesse moyenne de propagation atteignant (3703.70 m/s) dans l'eau et (3846.15 m/s) dans la boue avec une légère augmentation de vitesse par rapport à l'eau, en lien direct avec la densité plus élevée du milieu et la viscosité accrue de la boue. Le facteur d'atténuation d'amplitude entre RX1 et RX2 est presque nulle (1) dans l'eau et (0.9) dans le cas de la boue, ce qui reflète une perte d'énergie acoustique très faible.

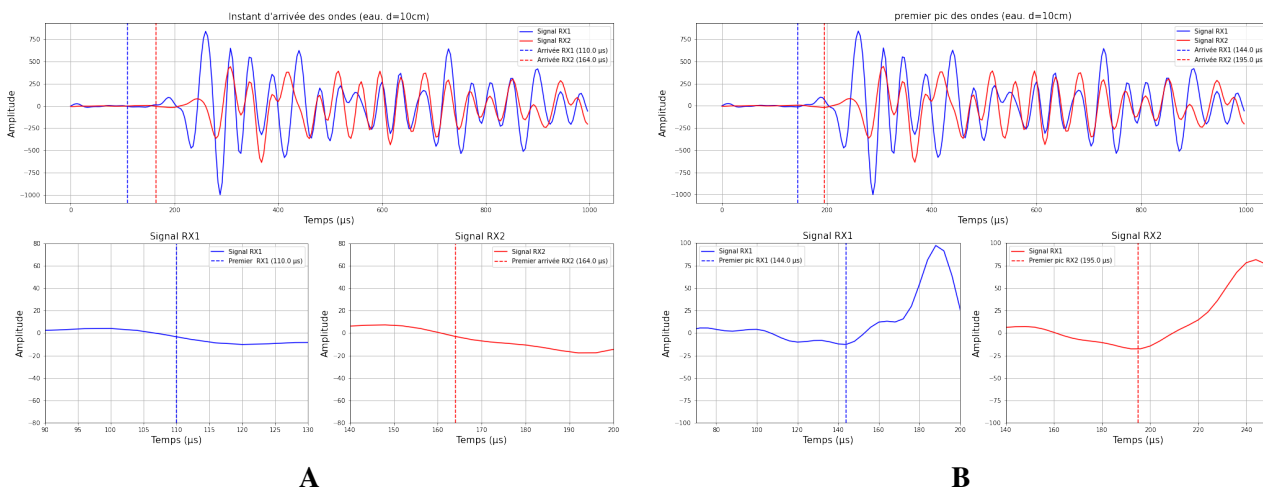


Figure 47: A: premier arrivée des ondes sonore. B: premier pic des ondes sonore (d = 10 cm, rempli d'eau).

4 Modèle expérimental d'un forage analogue au laboratoire

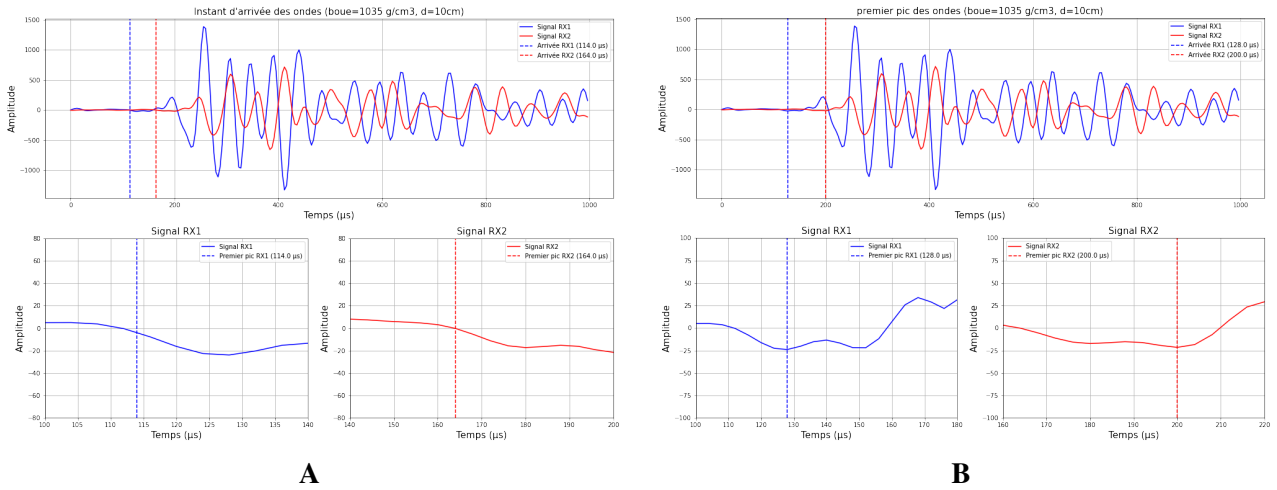


Figure 48: A: premier arrivée des ondes sonique. B: premier pic des ondes sonique ($D = 10$ cm, rempli de boue $d = 1.035$ g/ml)).

- Dans le cas *C* (modèle rempli d'eau et de boue – diamètre 15 cm), la vitesse de propagation est comparable à celle observée dans le cas *B*, atteignant environ (3773.58 m/s) dans l'eau et (3846.15 m/s) dans la boue. Toutefois, le facteur d'atténuation d'amplitude mesurée sur les premiers pics est faible de l'ordre de (0.90) dans l'eau mais plus importante dans le cas de la boue (0.47), en raison d'une plus grande distance de parcours et d'un effet de volume plus significatif. Le diamètre accru du modèle augmente la surface d'interaction entre l'onde et le milieu en plus l'effet de la densité de la boue. Le temps d'arrivée de l'onde *P* est observé à (117 µs) sur RX1 et à (170 µs) sur RX2 dans le cas de l'eau (Fig. 49) et à (147 µs) sur RX1 et à (184 µs) sur RX2 dans le cas de la boue (Fig. 50). Cette légère augmentation reste cohérente avec l'épaisseur du modèle et les propriétés du fluide, traduisant un ralentissement modéré de la propagation.

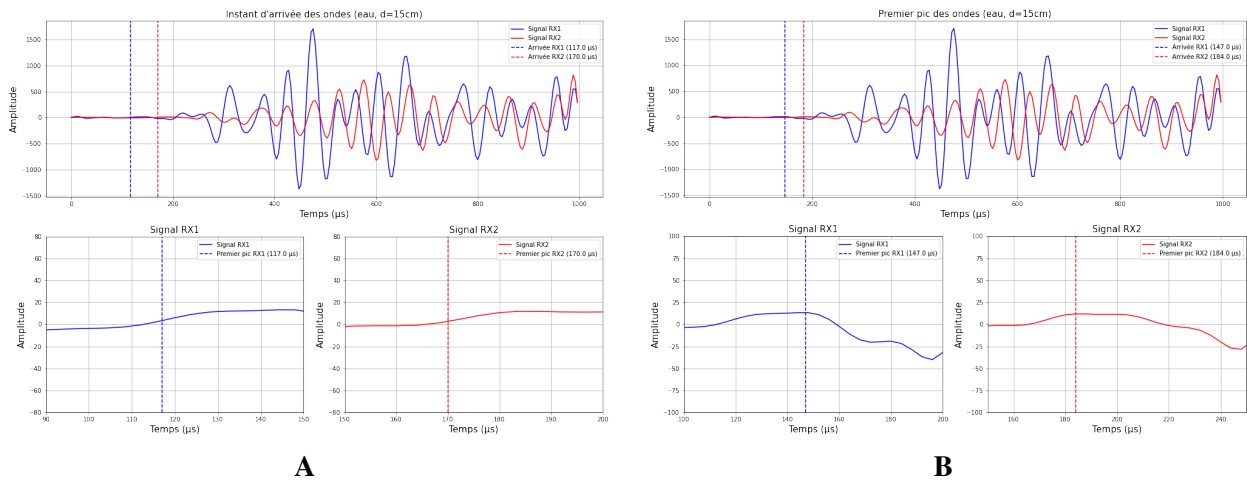


Figure 49: A: premier arrivée des ondes sonique. B: premier pic des ondes sonique ($D = 15$ cm, rempli d'eau).

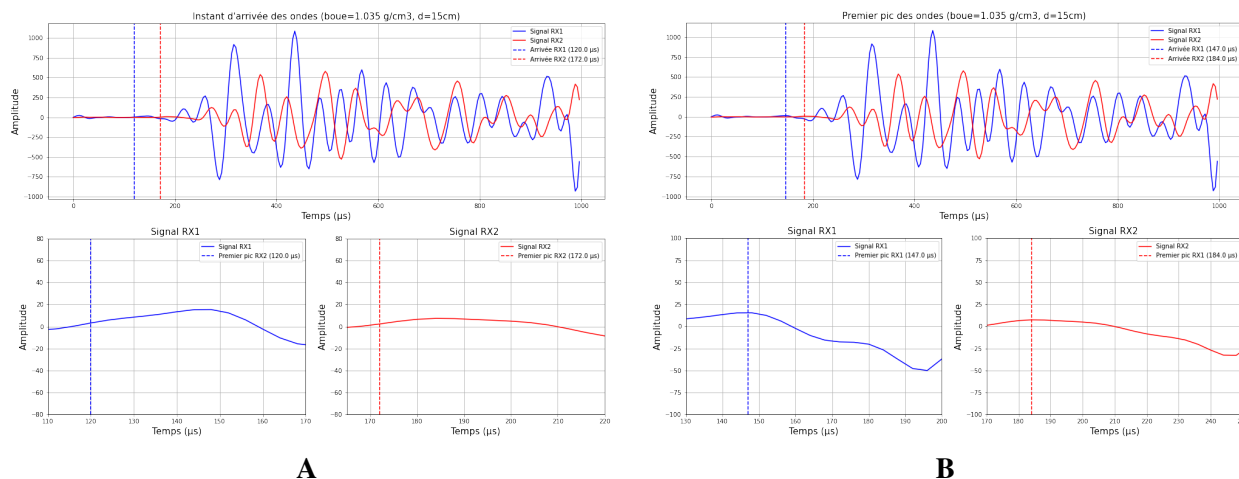


Figure 50: A: premier arrivée des ondes sonique. B: premier pic des ondes sonique ($D = 15$ cm, rempli de boue $d = 1.035$ g/ml).

- Dans le cas D (fracture ouverte lisse - diamètre 15 cm), la vitesse apparente de propagation entre $RX1$ et $RX2$ est fortement réduite, comme en témoigne le temps de parcours sensiblement allongé. La première arrivée de l'onde P est enregistrée à (202 μs) sur $RX1$ et à (304 μs) sur $RX2$ (Fig. 51), avec un décalage marqué par rapport aux cas précédents. Ce retard reflète l'effet de la discontinuité introduite par la fracture lisse ouverte remplie d'eau, qui agit comme une barrière partielle à la propagation des ondes avec une vitesse de propagation de (1941.75 μs) plus lente que les cas précédentes. Le facteur d'atténuation d'amplitude, mesurée sur les premiers pics, est importante (0.30), traduisant une perte significative d'énergie. Cette perte résulte principalement de la diffraction et de la diffusion des ondes à travers l'interface ouverte, qui perturbe la cohérence du front d'onde.

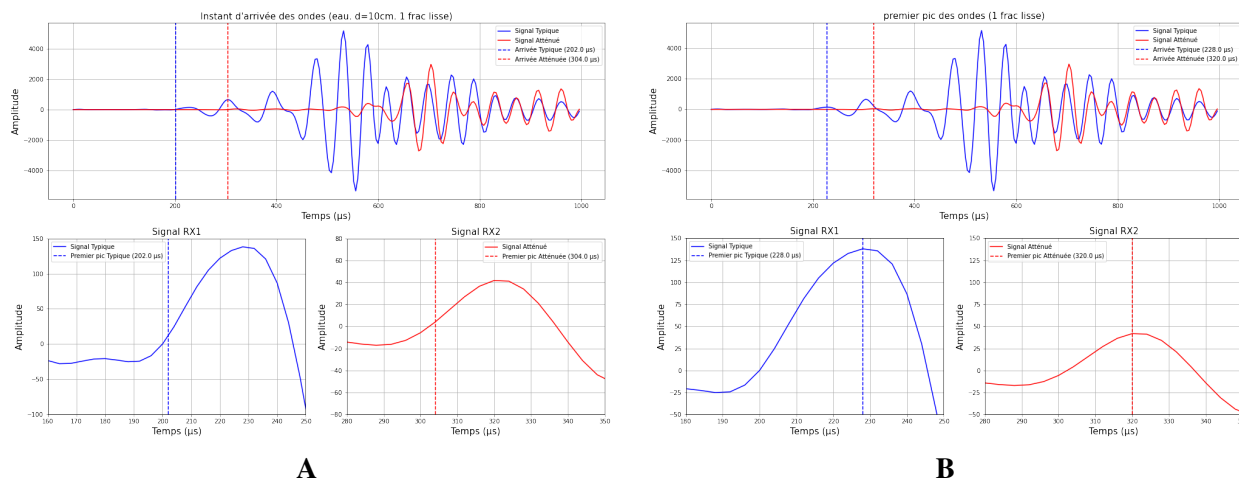


Figure 51: A: premier arrivée des ondes sonique. B: premier pic des ondes sonique ($D = 15$ cm, avec une fracture lisse ouverte).

- Dans le cas E (fracture ouverte rugueuse – diamètre 10 cm), la première arrivée de l'onde P est observée à environ (166 μs) sur $RX1$ et à (271 μs) sur $RX2$ (Fig. 52), avec un décalage temporel similaire à celui mesuré dans le cas D . La vitesse de propagation entre les deux récepteurs reste donc comparable (1904.76 m/s), indiquant que la nature de la fracture (lisse ou rugueuse) n'affecte pas significativement le temps de parcours. En revanche, le facteur d'atténuation d'amplitude mesurée sur le premier pic reste également similaire de celle du cas D (0.30), bien qu'elle puisse être légèrement plus prononcée en raison de la rugosité de l'interface. Cette rugosité favorise la diffusion et les réflexions multiples, contribuant à une perte énergétique accrue. Ainsi, bien que les vitesses et temps d'arrivée soient similaires, la qualité du signal enregistré à $RX2$ est souvent plus dégradée, avec une forme d'onde moins cohérente.

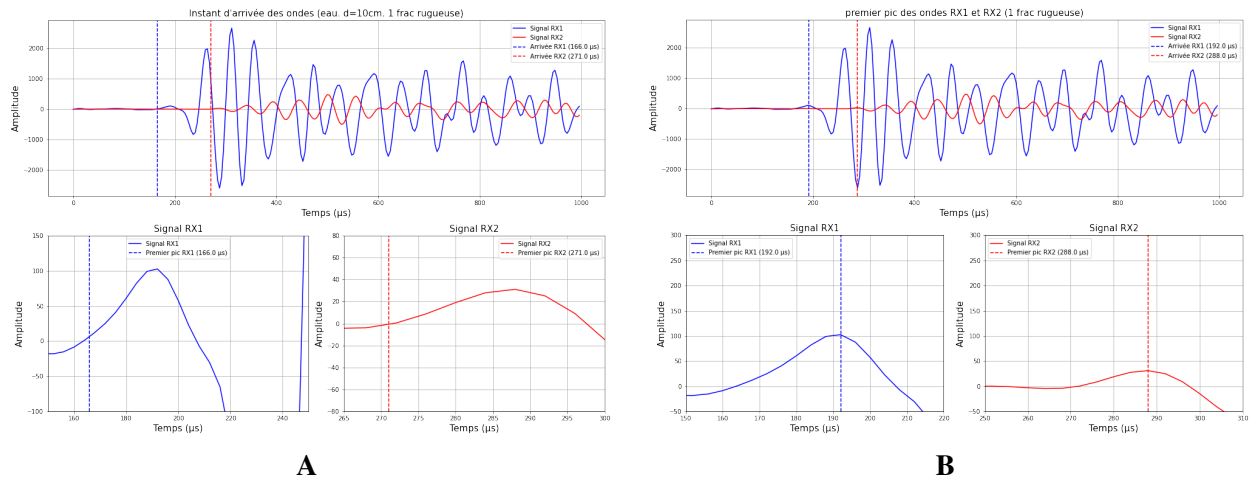


Figure 52: A: premier arrivée des ondes sonore. B: premier pic des ondes sonore ($D = 10$ cm, avec une fracture rugueuse ouverte).

- Dans le cas F (plusieurs fractures ouvertes lisses - diamètre 15 cm), la première arrivée de l'onde P est enregistrée à environ ($202 \mu s$) sur $RX1$, tandis que sur $RX2$ (Fig. 53), l'onde est fortement retardée, apparaissant vers ($316 \mu s$). Ce décalage marque une nette diminution de la vitesse de propagation, estimée à (1754.39 m/s) entre les deux récepteurs, valeur significativement inférieure à celles mesurées dans les cas précédents. Le facteur d'atténuation d'amplitude est également très importante. La réduction d'amplitude entre $RX1$ et $RX2$ atteint environ (0.14) sur les premiers pics de l'onde sonore. Ce comportement traduit une perte d'énergie importante cumulative par réflexion et diffusion dans les discontinuités successives, rendant la transmission acoustique très inefficace.

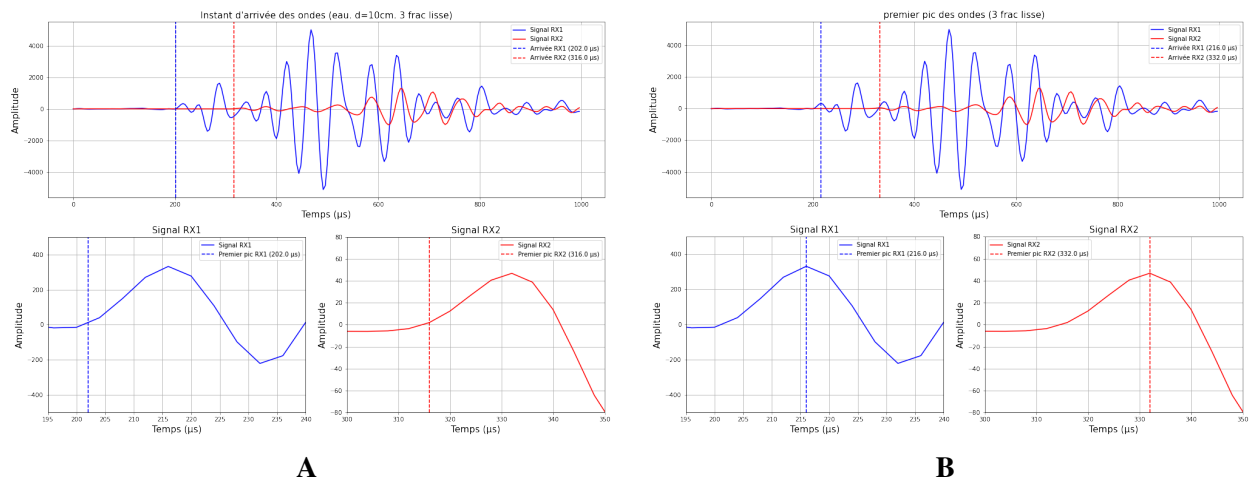


Figure 53: A: premier arrivée des ondes sonore. B: premier pic des ondes sonore ($D = 15$ cm, avec 3 fractures lisses ouverte).

- Dans le cas *G* (fracture fermée lisse – diamètre 15 cm), la première arrivée des ondes *P* varie selon la position de la fracture par rapport aux récepteurs. Lorsque la fracture est située à 5 cm sous *RX2*, l'onde *P* arrive à environ (110 μ s) sur *RX1* et (173 μ s) sur *RX2* (Fig. 54), traduisant une vitesse de propagation estimée à (3448 m/s). Dans ce cas, le facteur d'atténuation d'amplitude reste modérée, avec une perte d'environ (0.34) sur le premier pic. Lorsque la fracture est positionnée plus près de *RX1* (par exemple à 10 cm de *RX2*), le temps d'arrivée de l'onde *P* à *RX2* est plus long, atteignant (170 μ s) et à (110 μ s) à *RX1* (Fig. 55), et la vitesse de propagation diminue légèrement (3333 m/s). Le facteur d'atténuation d'amplitude est la même (0.35). Dans l'ensemble, la fracture fermée agit comme une barrière partielle : elle ralentit la propagation et atténue le signal, mais de façon moins sévère que les fractures ouvertes. L'énergie est principalement dissipée par compression et déformation locale plutôt que par réflexion ou diffusion majeure.

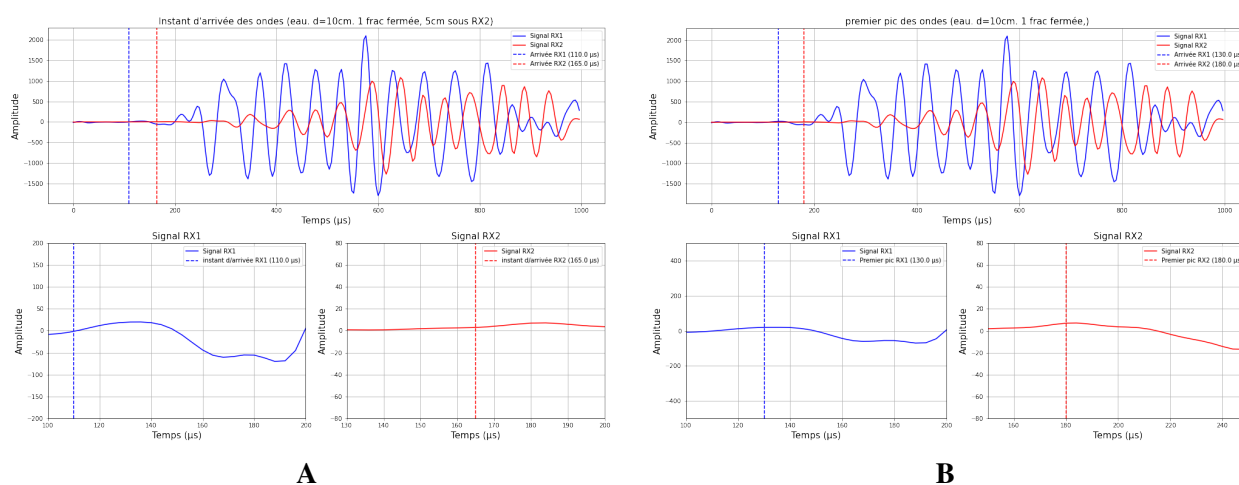


Figure 54: A: premier arrivée des ondes sonique(1 fracture fermée, 5cm sous *RX2*) B: premier pic des ondes sonique ($D = 15$ cm, 1 fracture fermée, 5 cm sous *RX2*).

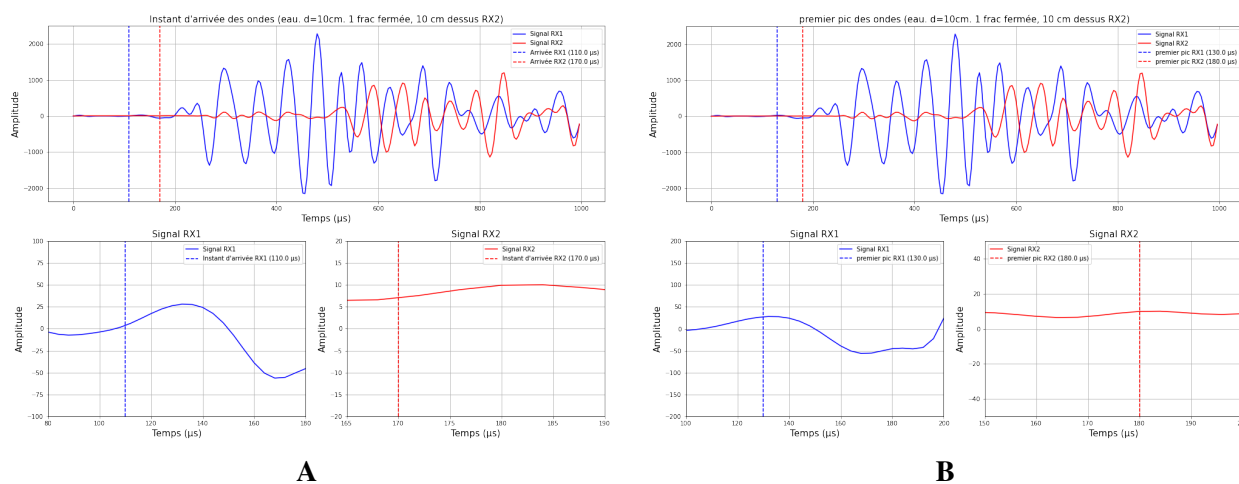


Figure 55: A: premier arrivée des ondes sonique(1 fracture fermée, 10 cm sous *RX2*) B: premier pic des ondes sonique ($D = 15$ cm, 1 fracture fermée, 10 cm sous *RX2*).

Acquisition des ondes soniques en fonction de la profondeur (1 fracture fermée)

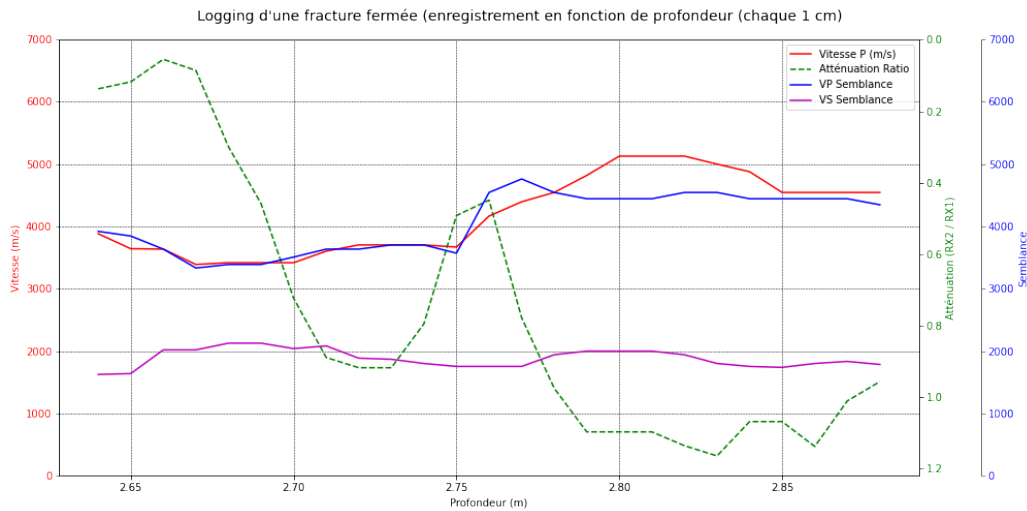


Figure 56: Logging d'une fracture fermée (enregistrement en fonction de profondeur (chaque 1 cm)).

Dans cette expérience, un enregistrement a été réalisé dans un modèle de 15 cm de diamètre contenant une fracture lisse et fermée. L'acquisition a été effectuée tous les 1 cm de profondeur. La figure. 56 présente les résultats obtenus : en rouge, la vitesse des ondes P calculée à partir du temps de première arrivée, et en bleu, la vitesse estimée par l'analyse de semblance. Ces deux courbes montrent une cohérence entre les deux méthodes d'estimation. On observe que la vitesse des ondes P reste stable jusqu'à environ 2.77 m, avant d'entamer la fracture. À partir de ce point, une chute progressive de la vitesse est enregistrée, traduisant l'effet perturbateur de la fracture sur la propagation des ondes. Un comportement similaire est visible pour les ondes de cisaillement S , représentées en violet, et également estimées par l'analyse de semblance. L'évolution de l'atténuation (rapport $RX2/RX1$), représentée en vert en fonction de la profondeur, montre une valeur quasiment nulle avant la fracture. Au passage de celle-ci, une augmentation progressive est clairement observable, en corrélation avec la diminution de la vitesse des ondes P calculée à partir du temps de première arrivée. Par la suite, l'atténuation diminue temporairement avant de reprendre sa progression jusqu'à atteindre un maximum. Ce comportement peut s'expliquer par des interférences ou des réflexions internes, qui réduisent localement les pertes d'énergie. Cette zone, appelée "transition" ou "récupération", correspond à un changement temporaire des conditions de propagation de l'onde P , avant que l'atténuation n'augmente de nouveau. Ce phénomène n'est toutefois pas accompagné d'un changement de vitesse, car la vitesse des ondes P dépend principalement des propriétés mécaniques globales du milieu, qui restent inchangées. En revanche, l'atténuation est plus sensible aux effets locaux tels que les microstructures, la porosité ou les réflexions internes, ce qui explique pourquoi seule l'atténuation varie dans cette zone. Cette expérience met en évidence l'impact significatif d'une fracture, même fermée, sur la vitesse de propagation des ondes P et S ainsi que sur l'atténuation des amplitudes.

- Dans le cas H (deux fractures fermées lisses superposées - diamètre 15 cm), la première arrivée de l'onde P est observée à environ ($93 \mu\text{s}$) sur $RX1$ et à ($180 \mu\text{s}$) sur $RX2$ (Fig. 57). La vitesse de propagation estimée entre les deux récepteurs est d'environ (2298.85 m/s), soit inférieure à celle mesurée dans le cas d'une seule fracture fermée. L'amplitude du premier pic est atténuée, avec un facteur d'atténuation de l'ordre de (0.2) entre $RX1$ et $RX2$. Cette atténuation reflète l'effet cumulatif des deux interfaces de fracture, qui dispersent partiellement l'énergie acoustique.

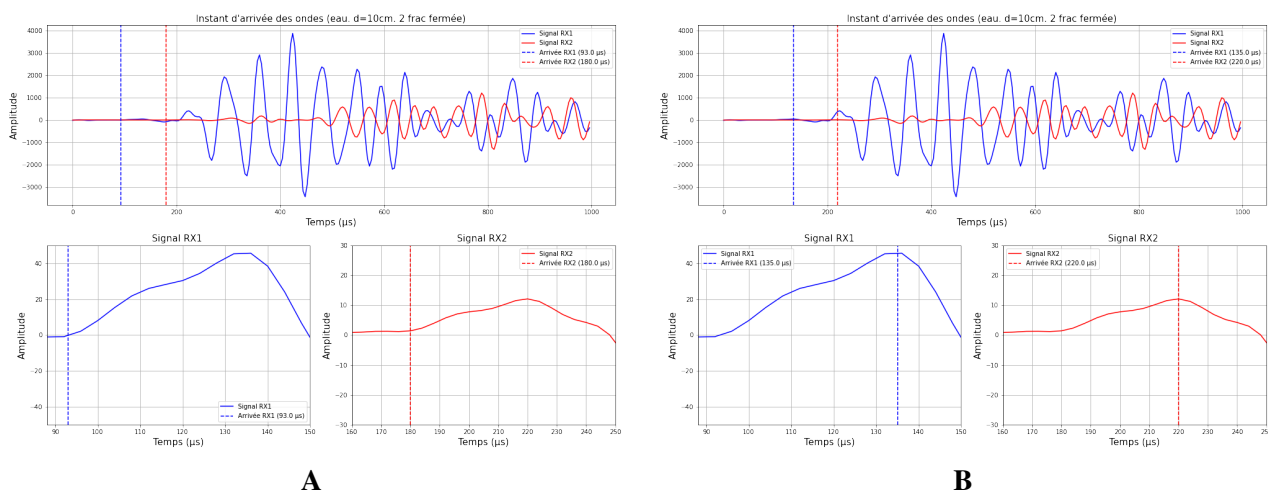


Figure 57: A: premier arrivée des ondes sonique(2 fracture fermée). B: premier pic des ondes sonique ($D = 15$ cm, 2 fracture fermée).

Acquisition des ondes soniques en fonction de la profondeur (2 fractures fermées)

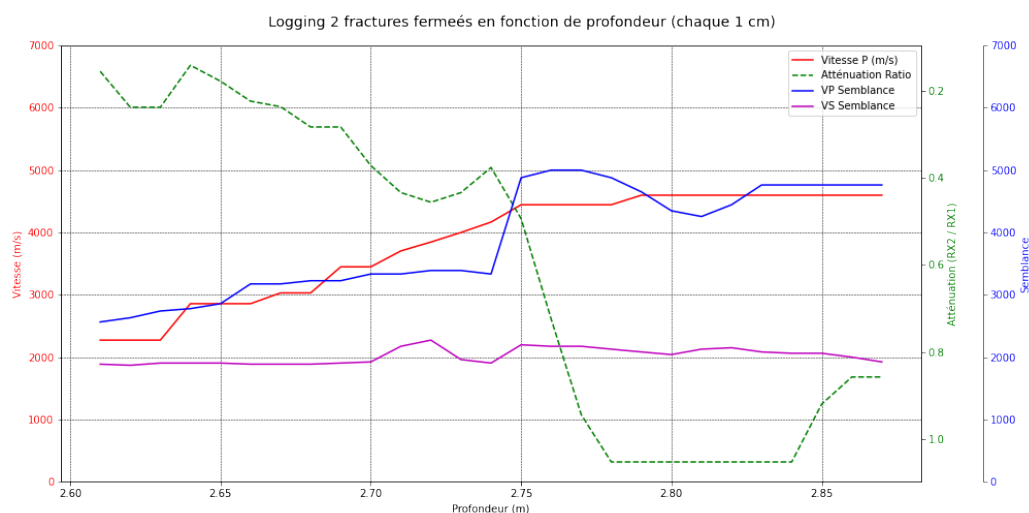


Figure 58: Logging de 2 fractures fermées (enregistrement en fonction de profondeur (chaque 1 cm)).

Dans une seconde expérience, un enregistrement a été réalisé dans un modèle identique de 15 cm de diamètre, cette fois comportant deux fractures lisses fermées. L'acquisition a également été effectuée tous les 1 cm de profondeur. La figure. 58 illustre les résultats : les vitesses des ondes P , obtenues à la fois par la méthode de première arrivée (en rouge) et par l'analyse de semblance (en bleu), montrent à nouveau une bonne concordance, attestant de la fiabilité des deux approches. La première fracture se situe à une profondeur d'environ 2,75 m. Avant cette profondeur, la vitesse des ondes P demeure stable. À partir de l'entrée dans la zone fracturée, une baisse successive nette de la vitesse est observée. Ce comportement traduit l'effet cumulatif des deux discontinuités sur la propagation des ondes. De manière analogue, les ondes de cisaillement S , représentées en violet et calculées par analyse de semblance, subissent également une diminution de vitesse aux mêmes profondeurs, bien que de moindre amplitude. L'évolution du facteur d'atténuation des amplitudes, représentée en vert (rapport $RX2/RX1$), montre cette fois une hausse plus marquée par rapport à l'expérience précédente. Le facteur d'atténuation reste faible avant 2.75 m, puis augmente de manière successive après les 2 fractures, soulignant l'effet dissipatif des interfaces, même fermées. on remarque aussi le même phénomène de diminution temporairement légère de l'atténuation avant de reprendre sa progression jusqu'à atteindre un maximum, explique l'interférence ou des réflexions internes, qui réduisent localement les pertes d'énergie. Cette zone, appelée transition ou récupération,

correspond à un changement temporaire des conditions de propagation de l'onde P , avant que l'atténuation n'augmente de nouveau. Cette expérience met ainsi en évidence l'impact renforcé de la superposition de deux fractures fermées sur la propagation des ondes, traduisant à la fois une diminution plus importante des vitesses P , et une atténuation accrue. Elle confirme également la sensibilité du signal aux hétérogénéités, même subtiles, du milieu traversé, et renforce la pertinence de l'analyse de semblance comme méthode complémentaire au calcul basé sur la première arrivée.

4.3.2 Analyse fréquentielle de premiers pics des ondes soniques

L'analyse de la fréquence dominante des ondes soniques enregistrées à $RX1$ et $RX2$, calculée à partir de la transformée de Fourier appliquée sur une fenêtre de $120 \mu s$ autour du premier pic, permet d'évaluer l'atténuation fréquentielle au cours de la propagation. Cette atténuation, souvent liée aux caractéristiques physiques et structurelles du milieu traversé, peut révéler des pertes d'énergie spécifiques aux hautes fréquences, notamment en présence de fractures, de changements de densité ou d'irrégularités géométriques. En comparant les fréquences mesurées à $RX1$ et $RX2$ pour chaque configuration expérimentale (cas A à H), on peut mieux comprendre l'impact des différents milieux et structures sur le contenu spectral du signal sonore.

- **Cas A - Milieu homogène en eau**

La fréquence dominante mesurée à $RX1$ est de 23.50 KHz , tandis qu'elle chute significativement à $17,23 \text{ KHz}$ à $RX2$ (Fig. 59). Cette différence notable traduit une atténuation spectrale marquée, même dans un milieu homogène et fluide. Bien qu'aucun obstacle n'entrave directement la propagation, la dissipation énergétique dans l'eau, combinée à une éventuelle absorption intrinsèque sur la distance, contribue à la perte des composantes hautes fréquences. Ce cas montre que même dans un environnement sans discontinuité, la fréquence peut subir une atténuation importante en fonction de la distance de propagation et des caractéristiques acoustiques du fluide.

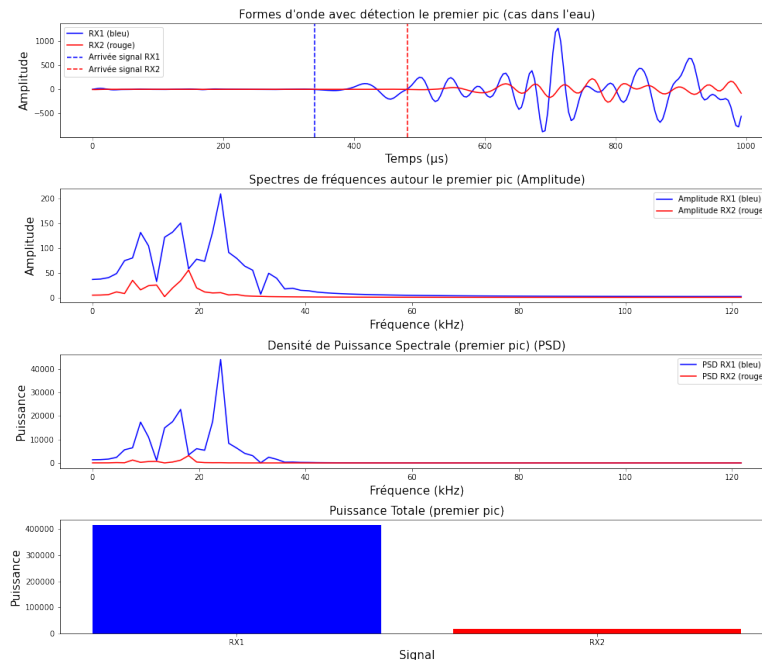


Figure 59: Spectre de fréquence de premier pic (mesure dans l'eau).

- **Cas B - Modèle intact avec eau puis boue ($D = 10\text{ cm}$)**

Dans ce modèle, le comportement fréquentiel de l'onde sonore est analysé en deux phases successives : d'abord dans l'eau (Fig. 60A), puis dans la boue (Fig. 60B), au sein du même dispositif de 10 cm de diamètre. Dans la phase remplie d'eau, la fréquence dominante est de 23 KHz à la fois à $RX1$ et à $RX2$, ce qui indique une propagation sans atténuation notable du contenu spectral, malgré la distance entre les récepteurs. Ce résultat reflète la stabilité et l'homogénéité du milieu liquide, où l'énergie fréquentielle est largement préservée. En revanche, lors du remplissage par la boue, la fréquence dominante chute à 20 KHz à $RX1$ et 18.5 KHz à $RX2$, révélant une atténuation progressive des hautes fréquences. Cette réduction est attribuée aux propriétés viscoélastiques et absorbantes de la boue, qui agit comme un filtre atténuant les composantes fréquentielles les plus élevées. Cette différence entre les deux phases met clairement en évidence l'impact du changement de milieu sur le spectre des ondes soniques, et en particulier le rôle de la boue dans la dissipation de l'énergie fréquentielle, même à courte distance.

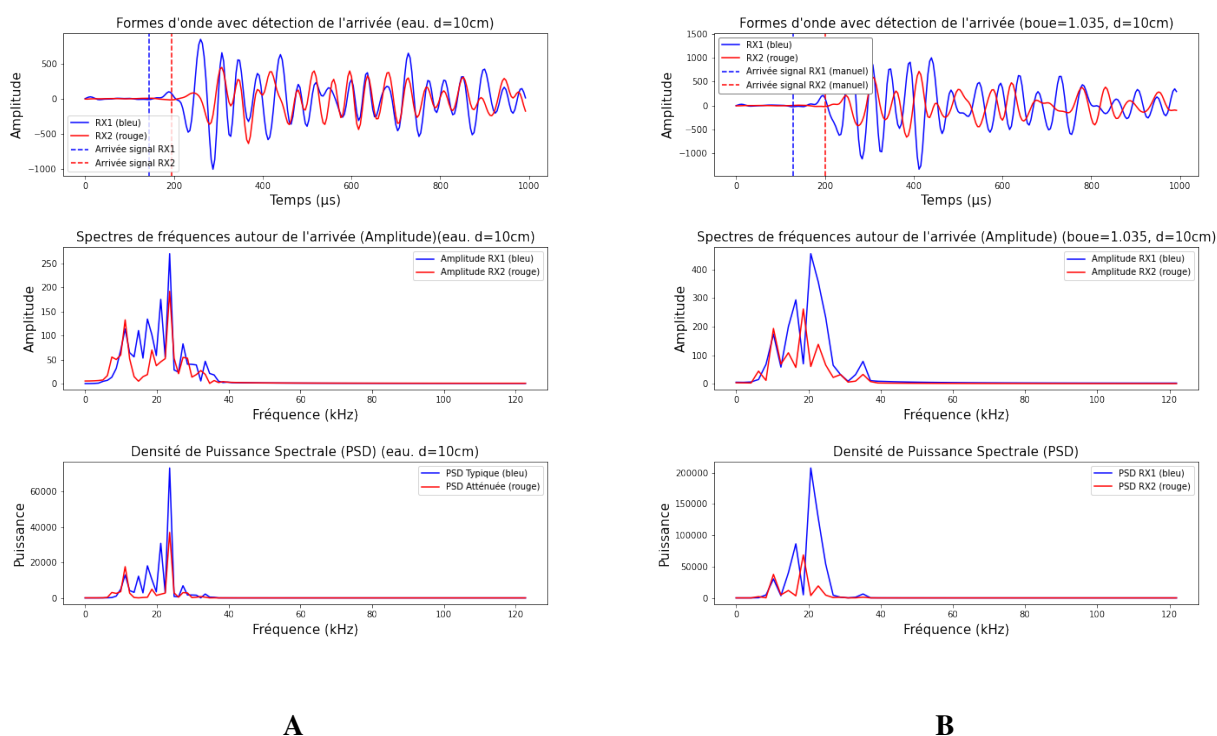


Figure 60: A: Spectres de fréquences ($D = 10\text{ cm}$ rempli d'eau).B: Spectres de fréquences ($D = 10\text{ cm}$, rempli de boue $d = 1.035\text{ g/ml}$).

- **Cas C - Modèle intact avec eau puis boue ($D = 15\text{ cm}$)**

Dans ce modèle de 15 cm de diamètre, le milieu est d'abord rempli d'eau, puis remplacé par de la boue. Dans la configuration remplie d'eau, la fréquence dominante reste élevée, avec 22.73 KHz à $RX1$ et 20.66 KHz à $RX2$ (Fig. 61A), ce qui reflète une atténuation modérée des hautes fréquences due principalement à la distance de propagation. En revanche, lorsque le modèle est rempli de boue, la fréquence chute de manière plus significative, avec 16.53 KHz à $RX1$ et 14.46 KHz à $RX2$ (Fig. 61B). Cette forte diminution du contenu fréquentiel montre une absorption accrue des hautes fréquences par le matériau boueux, accentuée par la plus grande distance entre les capteurs. Le spectre est notablement appauvri à $RX2$, ce qui met en évidence l'effet conjugué de la nature du matériau et de la géométrie du modèle sur l'atténuation fréquentielle.

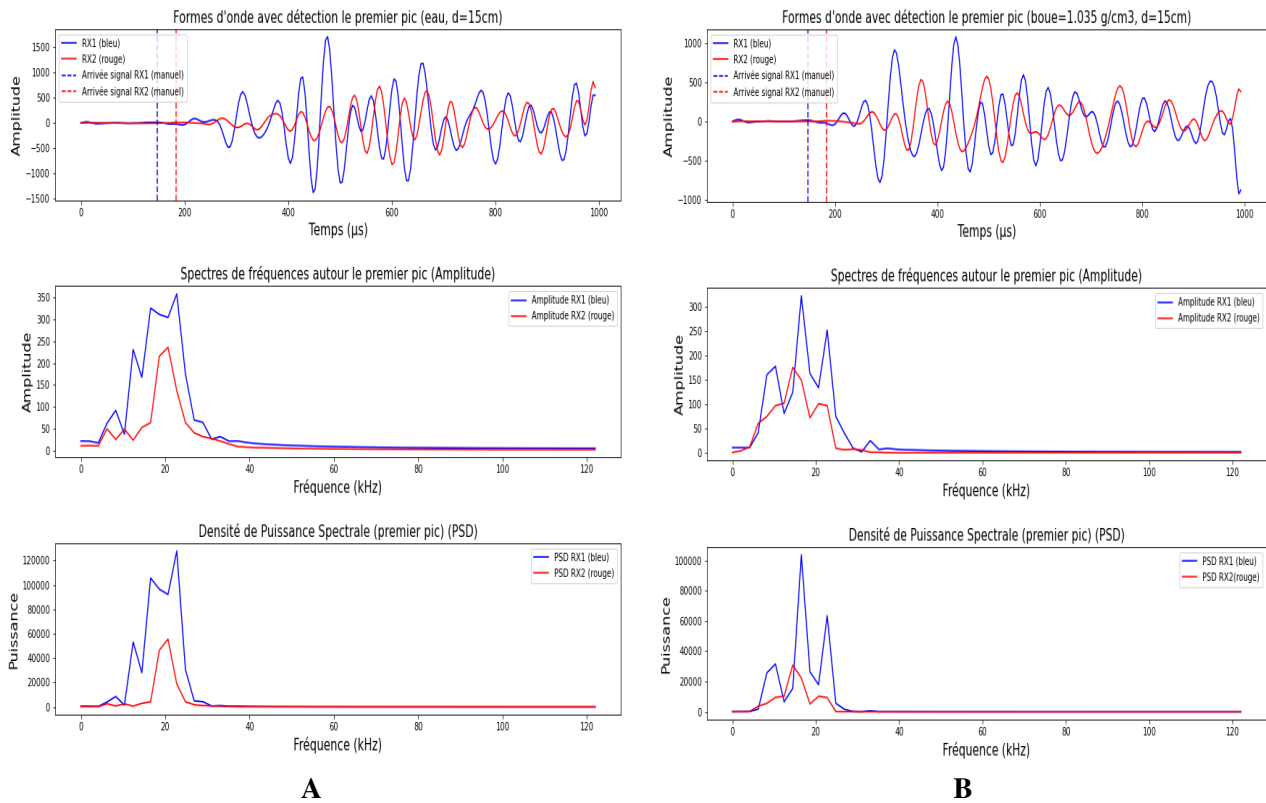


Figure 61: A: Spectres de fréquences ($D = 15$ cm rempli d'eau). B: Spectres de fréquences ($D = 15$ cm, rempli de boue $d = 1.035$ g/ml)

• **Cas D – Fracture ouverte lisse ($D = 15$ cm)**

Dans ce cas, la fracture introduit une discontinuité nette dans le modèle, agissant comme une barrière partielle à la transmission du signal. La fréquence dominante mesurée à RX1 est de 19.28 KHz, mais elle chute fortement à 13.77 KHz à RX2 (Fig. 62). Cette diminution marquée illustre une atténuation significative des hautes fréquences, typique d'un milieu perturbé où l'onde interagit avec une interface lisse, mais non soudée. La fracture provoque une dispersion et une réflexion partielle du signal, ce qui appauvrit le spectre à la réception. Ainsi, la baisse de fréquence constitue un indicateur clair de la perturbation spectrale induite par la présence d'une fracture ouverte remplie d'eau, même si sa surface est lisse.

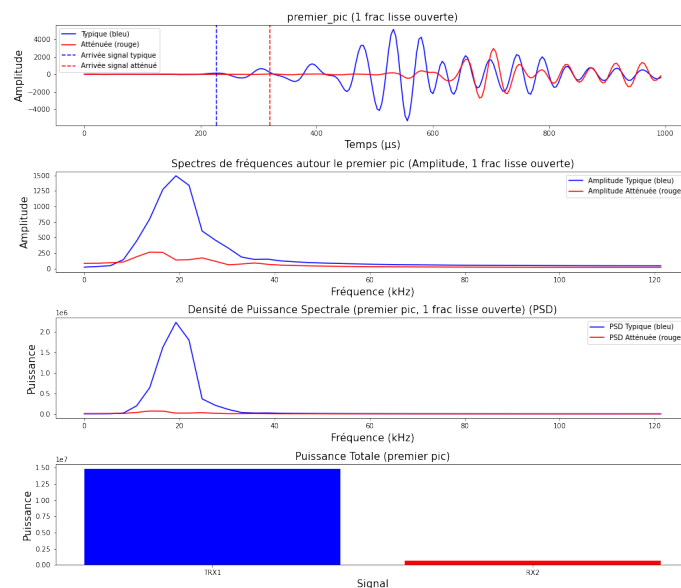


Figure 62: Spectre de fréquence de premier pic (modèle une fracture lisse ouverte).

- **Cas E – Fracture ouverte rugueuse ($D = 10$ cm)**

Dans ce cas, la présence d'une fracture rugueuse intensifie les effets de diffusion multiple et de dispersion des hautes fréquences. La fréquence dominante mesurée à $RX1$ est de 18.6 KHz, et elle chute à 16.53 KHz à $RX2$ (Fig. 63). Cette diminution reste proche de celle observée dans le cas D , où la fracture était lisse, ce qui indique que la nature ouverte de la discontinuité joue un rôle prépondérant dans la perte fréquentielle. La rugosité accentue légèrement cette atténuation, mais la différence reste modérée. On en conclut que l'impact de la rugosité sur l'atténuation spectrale, bien réel, reste toutefois comparable à celui d'une fracture ouverte lisse, surtout à cette échelle et sur la durée analysée (120 μs).

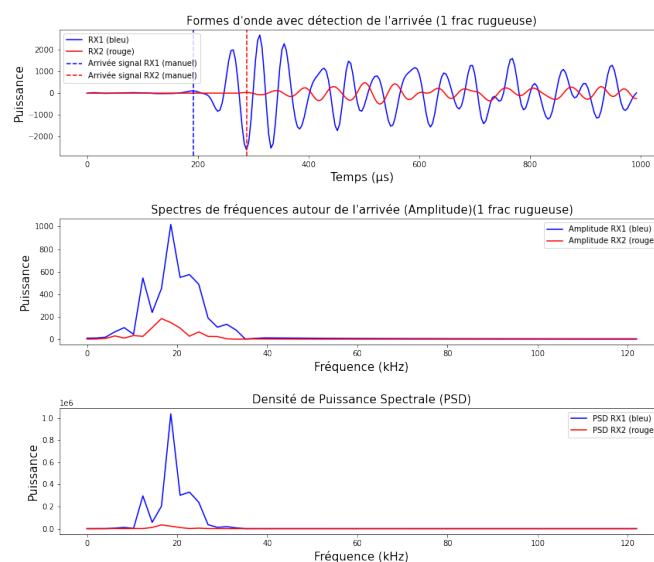


Figure 63: Spectre de fréquence de premier pic ($D = 10$ cm, modèle une fracture rugueuse ouverte)

- **Cas F - 3 fractures ouvertes lisses ($D = 15$ cm)**

Dans ce cas, la présence de trois fractures ouvertes lisses superposées entraîne une atténuation fréquentielle marquée. La fréquence dominante à $RX1$ est de 22.04 KHz, mais elle chute de façon significative à 16.53 KHz à $RX2$ (Fig. 64). Cette diminution traduit l'effet cumulatif des interfaces de fracture, qui agissent comme des filtres successifs, perturbant la propagation de l'onde et absorbant une large part des composantes hautes fréquences. Le milieu devient ainsi hautement dispersif, avec une transmission fortement dégradée au-delà de certaines fréquences. Ce comportement confirme que l'empilement de discontinuités accentue les pertes énergétiques spectrales.

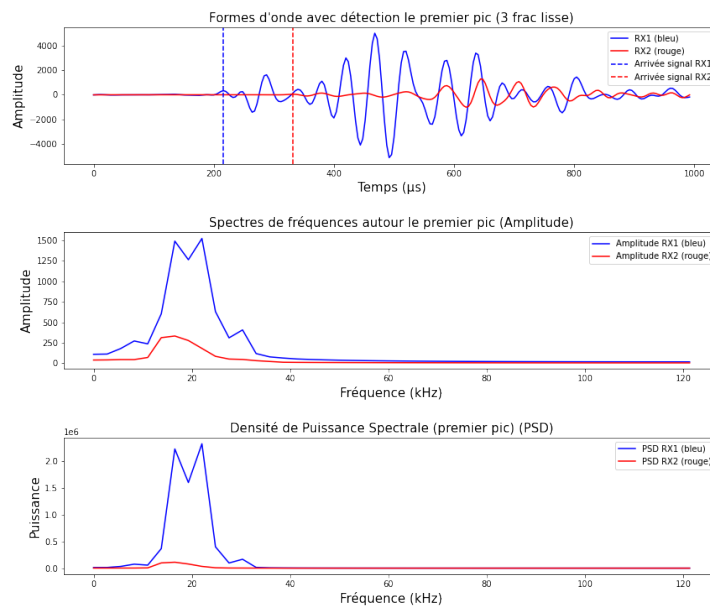


Figure 64: Spectre de fréquence de premier pic ($D = 15$ cm, modèle de 3 fractures lisses ouvertes).

- **Cas G - Fracture fermée lisse ($D = 15$ cm, à différentes positions)**

Dans ce scénario, l'effet de la fracture fermée sur la fréquence des ondes soniques dépend fortement de sa position le long du trajet de propagation.

- Lorsque la fracture est située à 5 cm en amont de $RX2$, la fréquence mesurée est de 18,6 KHz à $RX1$ et 16.53 KHz à $RX2$ (Fig. 65A). Dans ce cas, l'onde parcourt d'abord 15 cm après $RX1$ dans un milieu homogène avant de croiser la fracture juste avant d'atteindre $RX2$. L'atténuation fréquentielle est modérée, car la fracture agit comme un filtre localisé, n'affectant que la fin du signal. L'essentiel de l'énergie haute fréquence a eu le temps de se propager sans perturbation significative.
- Lorsque la fracture est située à 10 cm en amont de $RX2$, donc à 5 cm seulement après $RX1$, la fréquence tombe de 16,53 KHz à $RX1$ à 13.77 KHz à $RX2$ (Fig. 65B). Ici, la fracture intervient précocement dans la propagation, perturbant l'onde très tôt et pendant une plus longue distance restante. Cela provoque une atténuation plus marquée des hautes fréquences, car l'énergie est davantage dissipée au cours du trajet restant après la fracture.

Ces résultats montrent que la position de la fracture lorsqu'elle est localisée près du capteur *RX2*, son impact reste un peu limité. Cela confirme que la position des discontinuités dans le milieu joue un rôle crucial dans la transmission fréquentielle des ondes soniques, même lorsque ces discontinuités sont fermées.

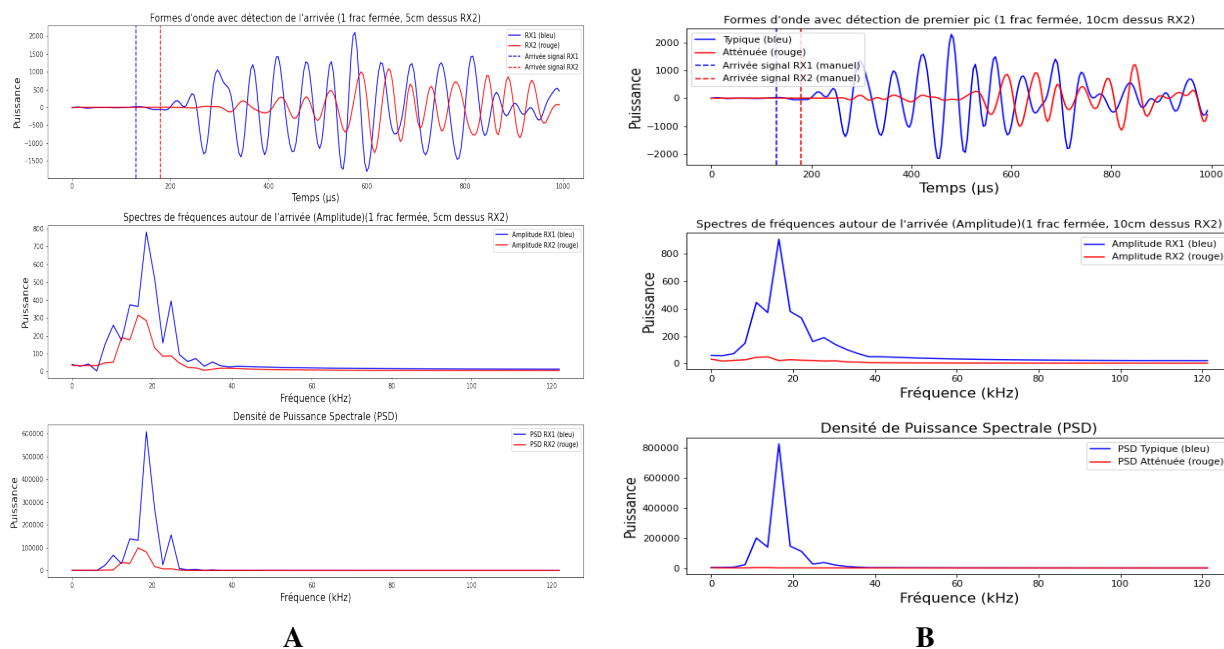


Figure 65: A: Spectres de fréquences, $D = 15$ cm (1 fracture fermée, 5 cm dessus *RX2*). B: Spectres de fréquences, $D = 15$ cm, (1 fracture fermée, 10 cm sous *RX2*).

Détermination de la fréquence dominante moyenne pour chaque profondeur

Pour chaque enregistrement d'onde complète (*FWS*) à une profondeur donnée, la fréquence dominante moyenne a été calculée en utilisant la Transformée de Fourier à court terme (*STFT*) avec un fenêtrage temporel de 120 µs. Cette méthode permet de décomposer le signal en une série de fenêtres temporelles et d'identifier, dans chacune, la fréquence dominante correspondant au maximum d'amplitude spectrale. La fréquence dominante moyenne est ensuite obtenue en moyennant les fréquences dominantes de toutes les fenêtres analysées à cette profondeur. Ce traitement fournit ainsi une seule valeur représentative de fréquence dominante par récepteur et par profondeur, ce qui permet de construire un log fréquentiel en fonction de la profondeur. Cette approche apporte une information complémentaire à celle des vitesses et des amplitudes, notamment pour la caractérisation des zones hétérogènes ou fracturées.

La figure 66 présente un spectrogramme accompagné de deux courbes représentant l'évolution temporelle des fréquences dominante et médiane du signal sonique, pour un modèle de forage analogue de diamètre $D = 10$ cm, rempli de boue ($\rho = 1.035$ g/ml). Dans ce cas, la fréquence dominante moyenne calculée est de 21.39 KHz pour le récepteur *RX1* et de 17.05 KHz pour *RX2*, mettant en évidence une atténuation significative des hautes fréquences au passage du signal entre les deux récepteurs. Cette différence traduit une perte d'énergie liée aux propriétés du milieu (boue) et à l'effet de diffusion ou d'absorption fréquentielle.

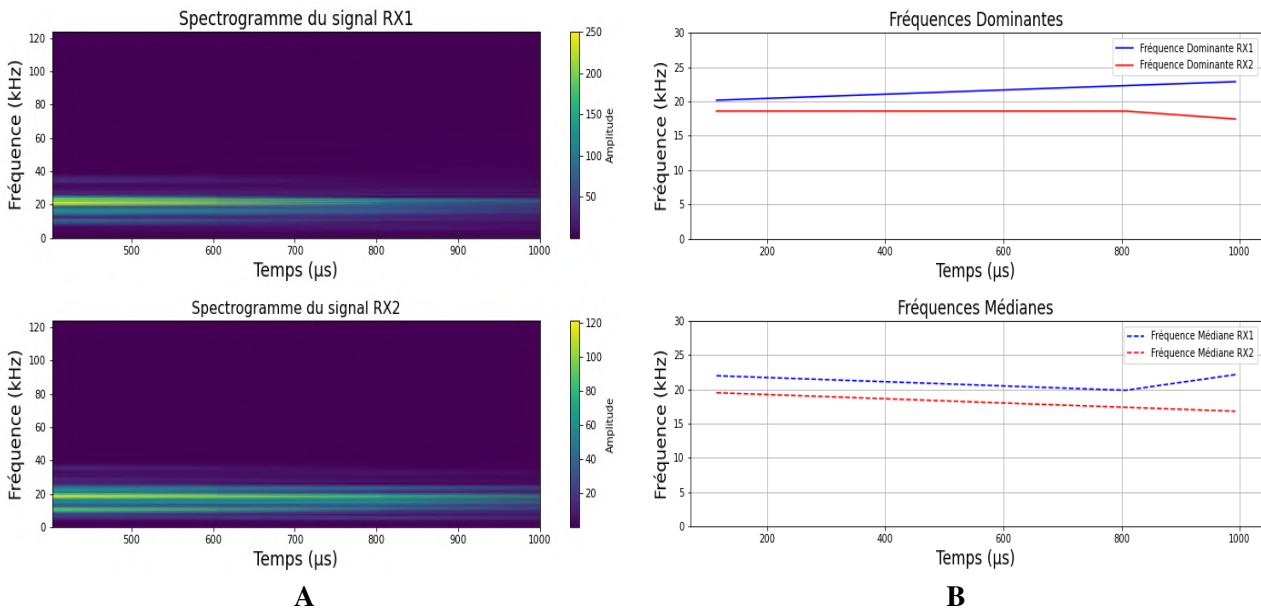


Figure 66: A: Spectrogramme des ondes sonique dans .B: Fréquence dominante et médiane ($D = 10$ cm, rempli de boue $d = 1.035$ g/ml)

La figure 67 c'est un deuxième exemple présente un spectrogramme accompagné de deux courbes représentant l'évolution temporelle des fréquences dominante et médiane du signal sonique, pour un modèle de forage analogue de diamètre $D = 10$ cm, rempli d'eau avec une fracture rugueuse. Dans ce cas, la fréquence dominante moyenne calculée est de 20.17 KHz pour le récepteur $RX1$ et de 16.86 KHz pour $RX2$, mettant en évidence une atténuation significative des hautes fréquences au passage du signal entre les deux récepteurs. Cette différence traduit une perte d'énergie liée aux propriétés du milieu (boue) et à l'effet de diffusion ou d'absorption fréquentielle.

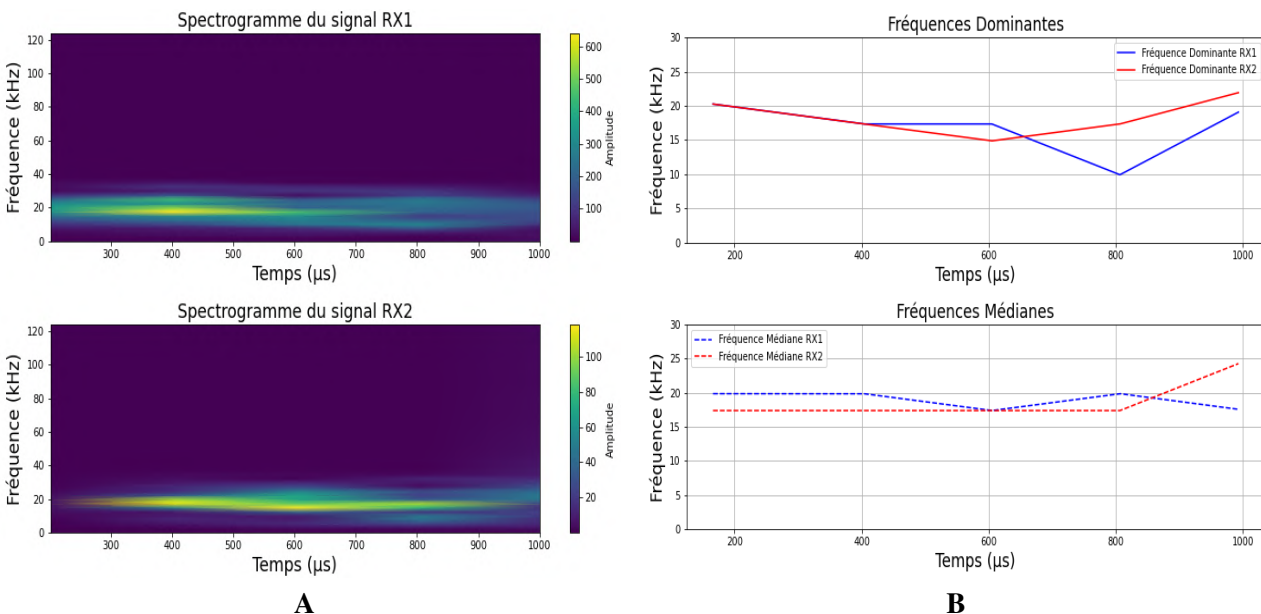


Figure 67: A: Spectrogramme des ondes sonique dans .B: Fréquence dominante et médiane ($D = 10$ cm, modèle avec une fracture rugueuse ouverte).

4.4 Discussions des expériences

L'analyse comparative des huit cas expérimentaux (*A* à *H*) met en évidence l'impact déterminant des propriétés du milieu qu'il soit homogène, boueux, fracturé, rugueux ou composé de structures superposées sur la propagation des ondes de compression. Trois paramètres clés ont été étudiés conjointement :

La vitesse de propagation, l'atténuation de l'amplitude, et l'évolution du contenu fréquentiel entre les capteurs *RX1* et *RX2*. L'approche croisée de ces données permet de mieux cerner les phénomènes physiques en jeu, notamment ceux liés à la dissipation de l'énergie, à la diffraction des ondes et à leur filtrage spectral dans des environnements complexes ou hétérogènes.

Dans le cas *A*, représentant un milieu fluide homogène (eau), on observe une vitesse lente, une amplitude stable et une variation de la fréquence dominante (23.50 KHz à *RX1* contre 17.23 KHz à *RX2*). Cette perte reste modérée. En comparaison, les cas *B* et *C* introduisent la boue, un fluide plus visqueux. La vitesse augmente légèrement, l'atténuation d'amplitude augmente modérément, et l'on observe une perte progressive dans les hautes fréquences (de 20 KHz à *RX1* à 18.5 KHz à *RX2* dans la boue du cas *B* ; et de 16.53 KHz à 14.46 KHz dans la boue du cas *C*). L'effet de volume (diamètre 15 cm au lieu de 10 cm) renforce l'absorption intrinsèque du milieu, illustrant la diffusion accrue dans un matériau visqueux sur de plus longues distances. Les cas *D*, *E* et *F*, intégrant respectivement une fracture ouverte lisse, rugueuse, puis plusieurs fractures lisses, montrent une chute marquée de la vitesse, un fort affaiblissement d'amplitude et une atténuation nette des hautes fréquences. Dans le cas *D*, la fréquence passe de 19,28 à 13,77 KHz, tandis que dans le cas *E* (rugosité), la différence reste similaire passe de 18.6 KHz à 16.53 KHz, confirmant un comportement spectral proche. En revanche, dans le cas *F*, avec des fractures multiples, l'effet est cumulatif et amplifié (22.04 KHz à 16.53 KHz), traduisant une filtration spectrale sévère et une dispersion élevée de l'énergie.

Les cas *G* et *H*, introduisant des fractures fermées, révèlent un comportement intermédiaire. La vitesse de propagation est ralentie de manière modérée, l'amplitude est moyennement atténuée, et la variation fréquentielle dépend fortement de la position des fractures. Quand la fracture fermée est proche de *RX2* (cas *G*), la fréquence est à peine affectée (18,6 KHz à 16.53 KHz). À l'inverse, lorsqu'elle est positionnée proche de *RX1*, la baisse devient significative (16.53 KHz à 13.77 KHz). Le cas *H*, avec deux fractures fermées superposées, montre un effet cumulatif mesuré, avec une perte de fréquence réelle (18.6 KHz à 15.5 KHz) et une atténuation d'amplitude importante (0.2), indiquant que même des fractures sans ouverture directe peuvent perturber le spectre des ondes *P*, à travers des réflexions internes ou des ralentissements locaux.

Les deux expériences d'acquisition sonique en fonction de la profondeur permettent de comparer l'effet d'une fracture unique fermée et de deux fractures superposées sur la propagation des ondes dans un milieu cylindrique homogène. Dans le premier cas, une seule fracture lisse et fermée, située à environ 2,77 m de profondeur, provoque une chute nette de la vitesse des ondes *P* et *S*, ainsi qu'une élévation brutale de l'atténuation (rapport *RX2/RX1*), indiquant une perte d'énergie localisée liée à la discontinuité. Dans le second cas, l'introduction de deux fractures fermées, accentue ces effets : les vitesses des ondes *P* et *S* montrent deux baisses successives, tandis que l'atténuation devient plus marquée et persistante. Ces observations démontrent clairement le rôle cumulatif des fractures sur la dispersion des ondes, même en l'absence d'ouverture visible. Elles confirment que les fractures fermées, bien que discrètes sur le plan mécanique, engendrent des variations mesurables du champ d'ondes, affectant à la fois la vitesse de propagation et l'amplitude. Les résultats valident par ailleurs la robustesse de l'analyse de semblance, dont les estimations de vitesse concordent étroitement avec celles obtenues par les temps de première arrivée. Ces deux approches complémentaires permettent ainsi de caractériser avec précision les effets des hétérogénéités internes sur les ondes sonores.

4.5 Conclusion

Cette étude expérimentale approfondie, conduite à travers huit configurations représentatives (cas A à H), a permis de caractériser avec rigueur l'influence des propriétés physiques et structurales des milieux sur la propagation des ondes de compression (ondes P). En combinant l'analyse de trois indicateurs fondamentaux. La vitesse de propagation, l'atténuation d'amplitude et l'évolution fréquentielle entre les capteurs $RX1$ et $RX2$. Nous avons mis en évidence des signatures acoustiques distinctes associées à la nature du milieu traversé : homogène, saturé de boue, fracturé (ouvert/fermé), rugueux ou présentant plusieurs discontinuités. Les résultats montrent que : La vitesse des ondes P diminue significativement en présence de fractures, en particulier lorsque celles-ci sont ouvertes ou multiples et aussi dépend de la nature du milieu de propagation. La réduction atteint jusqu'à 50% par rapport au cas de référence en milieu homogène saturé d'eau. L'atténuation d'amplitude, quantifiée par le facteur d'atténuation $RX2/RX1$, s'avère être un indicateur sensible de la présence et du type de discontinuités. Les fractures ouvertes ou multiple provoquent une forte dissipation de l'énergie, avec des rapports inférieurs à 0.35, tandis que les fractures fermées induisent une atténuation modérée (rapports entre 0.5 et 0.35). L'analyse fréquentielle, basée sur la transformée de Fourier appliquée au premier pic du signal, révèle une atténuation sélective des hautes fréquences en fonction du type de milieu. Les fractures ouvertes, notamment lorsqu'elles sont multiples ou rugueuses, provoquent un appauvrissement marqué du spectre, traduisant des effets de diffusion et de filtrage. En croisant ces trois critères, il a été possible de construire une grille de lecture robuste pour interpréter les réponses acoustiques en milieux complexes. Trois tableaux de résultats ont ainsi été élaborés (Tab. 8, 9, 10), aident à classer les types de fractures selon leur effet sur la vitesse et l'amplitude des ondes soniques. Cette classification repose notamment sur le facteur d'atténuation $RX2/RX1$, avec les seuils suivants :

- **Fractures ouvertes** : $RX2/RX1$ inférieur 0.35.
- **Fractures fermées** : $RX2/RX1$ entre 0.5 et 0.35.
- **Multiples fractures ouvertes ou fermées** : $RX2/RX1$ inférieur à 0.35, accompagné d'une chute marquée de la vitesse > 40 %.

Ces résultats expérimentaux fournissent ainsi une base de comparaison fiable pour le diagnostic de milieux fracturés dans des contextes réels (Fig. 68, 69), notamment dans les forages. Ils ouvrent également la voie à des approches pour estimer les propriétés internes d'un milieu à partir de mesures soniques.

Table 8: Comparaison des milieux homogènes – eau, boue, béton

	Cas A Propagation en eau	Cas B1 Tube béton 10 cm eau	Cas B2 Tube béton 10 cm boue	Cas C1 Tube béton 15 cm eau	Cas C2 Tube béton 15 cm boue
Atténuation (dB)	20,660	5,680	1,800	1,740	12,800
Ratio $RX2/RX1$	0,304	1	0,900	0,905	0,479
Vp (m/s)	1408,45	3703,70	3846,15	3773,58	3846,15

Table 9: Effets des fractures simples et multiples sur la propagation

	Cas D Fracture lisse (15 cm)	Cas E Fracture rugueuse (10 cm)	Cas F 3 fractures lisses (15 cm)
Atténuation (dB)	20,760	20,740	34,020
Ratio $RX2/RX1$	0,303	0,303	0,141
Vp (m/s)	1941,75	1904,76	1754,39

Table 10: Étude de l'effet de la position et du nombre de fractures fermées

	Cas G1 Sans fracture	Cas G2 Frac 5 cm sous RX2	Cas G3 Frac 10 cm sous RX2	Cas H1 Sans fracture	Cas H2 2 frac entre RX1 et RX2
Atténuation (dB)	9,840	9,14	17,600	11,800	11,530
Ratio $RX2/RX1$	0,567	0,349	0,350	0,507	0,206
Vp (m/s)	3773	3636,36	3846,15	4166,67	3333

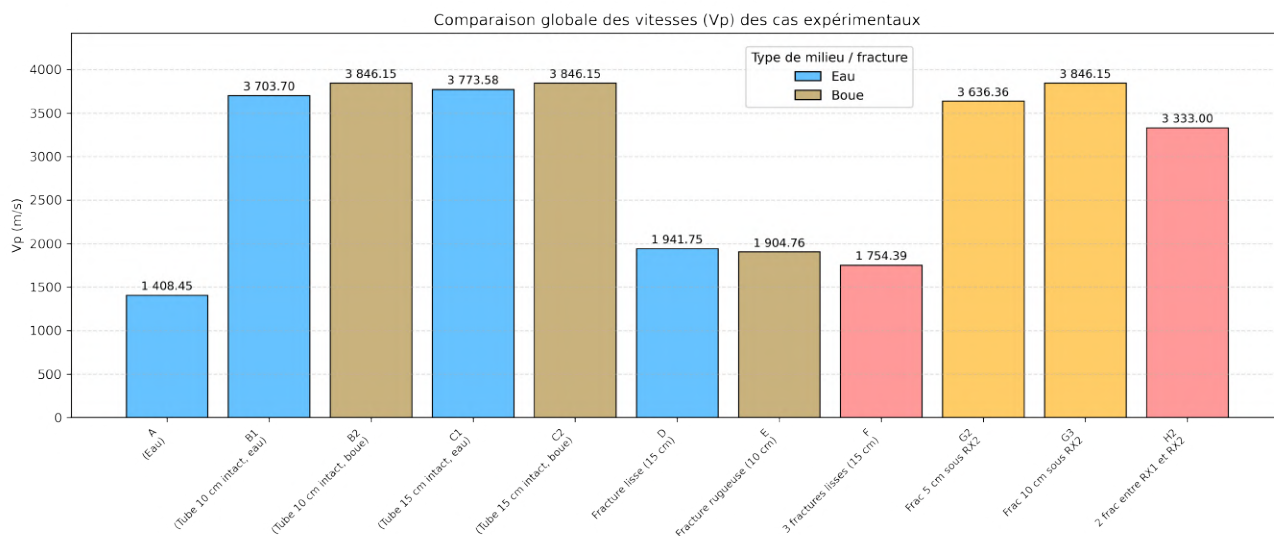


Figure 68: Comparaison globale des vitesses V_p des cas expérimentaux).

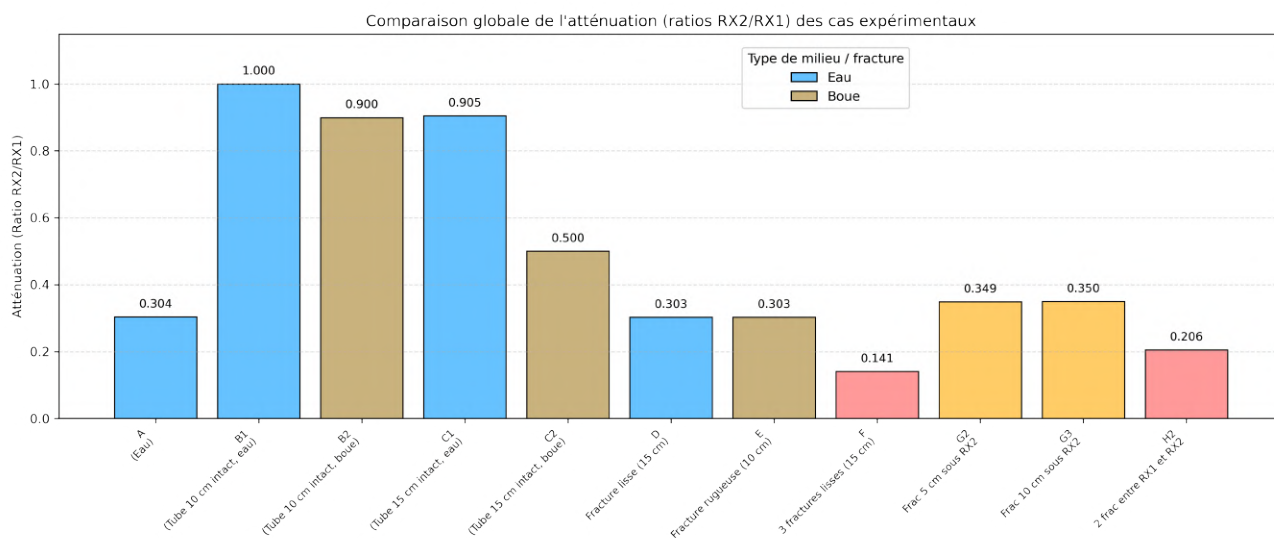


Figure 69: Comparaison globale de l'atténuation (ratios $RX2/RX1$) des cas expérimentaux).

5 Analyse des données soniques acquises sur un forage réel

Ce chapitre s'inscrit dans la continuité des travaux réalisés en laboratoire, et vise à transposer les méthodes développées dans un contexte réel de terrain (Fig. 70). Pour ce faire, des enregistrements soniques ont été effectués sur trois forages existants situés dans la commune de Concise, dans le canton de Neuchâtel. Ces forages se trouvent dans une zone géologiquement complexe, caractérisée par la présence d'un réservoir karstique. Ce type de réservoir est connu pour sa forte hétérogénéité, liée à un réseau de fractures plus ou moins ouvertes permettant la circulation de l'eau souterraine. L'objectif principal de cette campagne de mesures est de tester et valider la capacité de notre outil sonique (Boad Band Full Waveform Sonic) à détecter et à caractériser les fractures dans des conditions naturelles, à partir des variations des vitesses des ondes acoustiques (ondes P et ondes S). Les données recueillies sur le terrain sont ensuite traitées et interprétées dans le but d'identifier la présence de discontinuités, de localiser les fractures, et surtout de déterminer leur état d'ouverture ou de fermeture. Ces mesures sont essentielles pour confirmer les observations faites en laboratoire dans des milieux contrôlés, et pour évaluer la robustesse de notre approche lorsqu'elle est confrontée à la variabilité naturelle du sous-sol. L'enjeu est de mettre au point une méthode fiable, fondée exclusivement sur les données soniques, permettant de caractériser les fractures dans les milieux karstiques, sans recourir à des investigations invasives ou coûteuses. À terme, cette démarche vise à fournir un outil d'aide à la décision pour les opérations d'exploration et de gestion des ressources en eau souterraine. Mieux comprendre la distribution et l'état des fractures dans les milieux karstiques permet d'optimiser le positionnement des forages, de mieux estimer les débits exploitables et de réduire les incertitudes géologiques.

5.1 Traitement des données des trois forage à Concise (*RSBV1*, *RSBV2*, *RSBV3*)



Figure 70: Quatre vues illustrant l'acquisition des données soniques sur les trois forages *RSBV1*, *RSBV2* et *RSBV3*.

5.1.1 Cadre géologique

Notre puits d'étude est situé au pied du jura, la formation dominante c'est des Calcaires de Crétacé avec orientation moyenne de 135/15. Le site à environ 1.6 km au nord-est de la faille de la lance est un décrochement d'une longueur de plus de 10 km avec un rejet horizontal d'environ 3 km cette faille La série stratigraphique de notre site se forme principalement par l'alternance des calcaire kastifié *Hauterivien* supérieur et du *Barremien* de qui présente notre aquifère étudié et les Marnes bleu d'*Hauterive* qui forme un aquitard sous les Calcaires (Fig. 71).

5.1.2 Estimation de la vitesse de propagation des ondes P , S et St

Les vitesses de propagation des ondes soniques ont été déterminées à partir de deux approches complémentaires (Fig. 72):

- Le picking des premiers arrivées, réalisé à partir des signaux enregistrés à chaque profondeur.
- L'analyse de la semblance, appliquée aux ondes P , S et St pour affiner l'interprétation. Ces trois forages, espacés de 3 à 4 mètres seulement, traversent une lithologie similaire avec un décalage stratigraphique de 2 m vers le haut pour *RSBV3* par rapport aux autres forages. L'analyse croisée de leurs données permet de mieux caractériser les formations géologiques, la nature des couches traversées, et l'état d'ouverture ou de fermeture des fractures présentes. **Forage *RSBV1*** Les vitesses soniques sont mesurées à partir de 21 m, car l'outil ne peut pas fonctionner correctement dans l'air libre au-dessus du niveau de l'eau.
- De 21 à 25 m, les vitesses des ondes P (par picking) sont de l'ordre de 4000 m/s, caractéristiques des calcaires. Avec des pics ponctuels de baisse de vitesse (vers 2000 à 3000 m/s) signalent la présence des niveaux marneux et de fractures ouvertes et fermées.
- À partir de 25 m jusqu'à 29 m, la vitesse P reste relativement stable, avec quelques anomalies interprétées comme des fractures fermées ou partiellement colmatées.
- Vers 29 m, un changement notable se produit : la vitesse P diminue progressivement jusqu'à 3000 m/s, traduisant un passage vers des couches marneuses plus tendres, avec plusieurs pics marqués, correspondant à l'alternance des fractures ouvertes et fermées.
- Autour de 30 m à 32 m, une anomalie simultanée sur les vitesses P , S et surtout les ondes St , qui se propagent le long des parois du forage, sont particulièrement sensibles à la présence d'eau et aux circulations souterraines. Elles présentent à ce niveau une forte atténuation ainsi qu'un pic marqué, indiquant une interaction probable avec un flux d'eau.
- De 32 à 44 m, les vitesses P et S indiquent des calcaires massifs, entrecoupés de pics prononcés, traduisant des alternances de fractures ouvertes et fermées. Vers 39 m, une chute importante des vitesses (entre 2800 et 3400 m/s) est visible sur les trois types d'ondes (P , S , St), interprétée comme un niveau marneux fracturé.
- Enfin, entre 44 et 50 mètres, la vitesse des ondes P reste relativement moyenne, oscillant autour de 3000 à 3500 m/s, ce qui reflète probablement un retour vers des lithologies Marnes. Néanmoins, la présence de fluctuations ponctuelles dans les courbes S et St continue d'indiquer des hétérogénéités locales, probablement liées à des fractures ou à des alternances lithologiques fines.

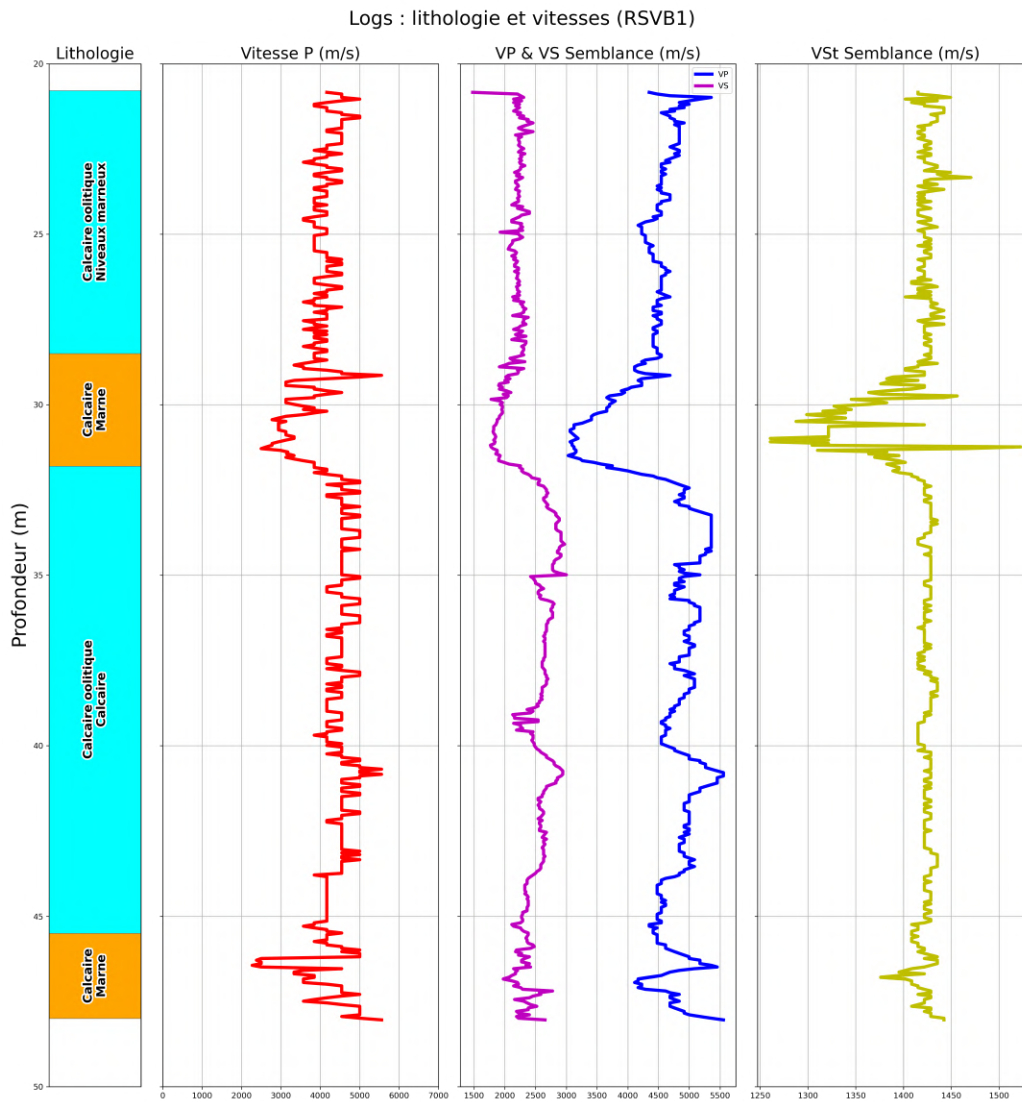


Figure 72: RSBV1: Vitesse P , $P_{semblance}$, $S_{semblance}$, $St_{semblance}$.

Forages RSBV2 et RSBV3

L'interprétation des vitesses issues de ces deux forages voisins montre une cohérence avec le forage RSBV1, confirmant la répétition des mêmes structures géologiques à quelques mètres de distance (Fig. 73):

- Les vitesses P sont comparables à celles observées dans RSBV1, avec des hauts plateaux vers 4000 m/s dans les calcaires, et des chutes vers 3000 m/s voire moins dans les niveaux marneux.
- Les logs de semblance pour les ondes P et S révèlent, comme dans RSBV1, une diminution de vitesse dans les couches plus tendres et fracturées, en particulier vers 29 m jusqu'à 33 m, et entre 46 et 50 m pour RSBV2 et entre 27 m jusqu'à 31 m, et entre 45.5 et 50 m pour RSBV3 avec un décalage stratigraphique de 2 m vers le haut pour RSBV3 par rapport aux autres forages.
- Les logs des ondes St montrent une grande sensibilité aux zones fissurées et humides : on note plusieurs pics vers 22 m et 31 m à 32 m pour RSBV2 (28 m à 30 m et entre 46 m et à 49 m pour RSBV3), parfaitement synchrones entre les trois forages, ce qui confirme l'existence de fractures hydrauliquement actives.

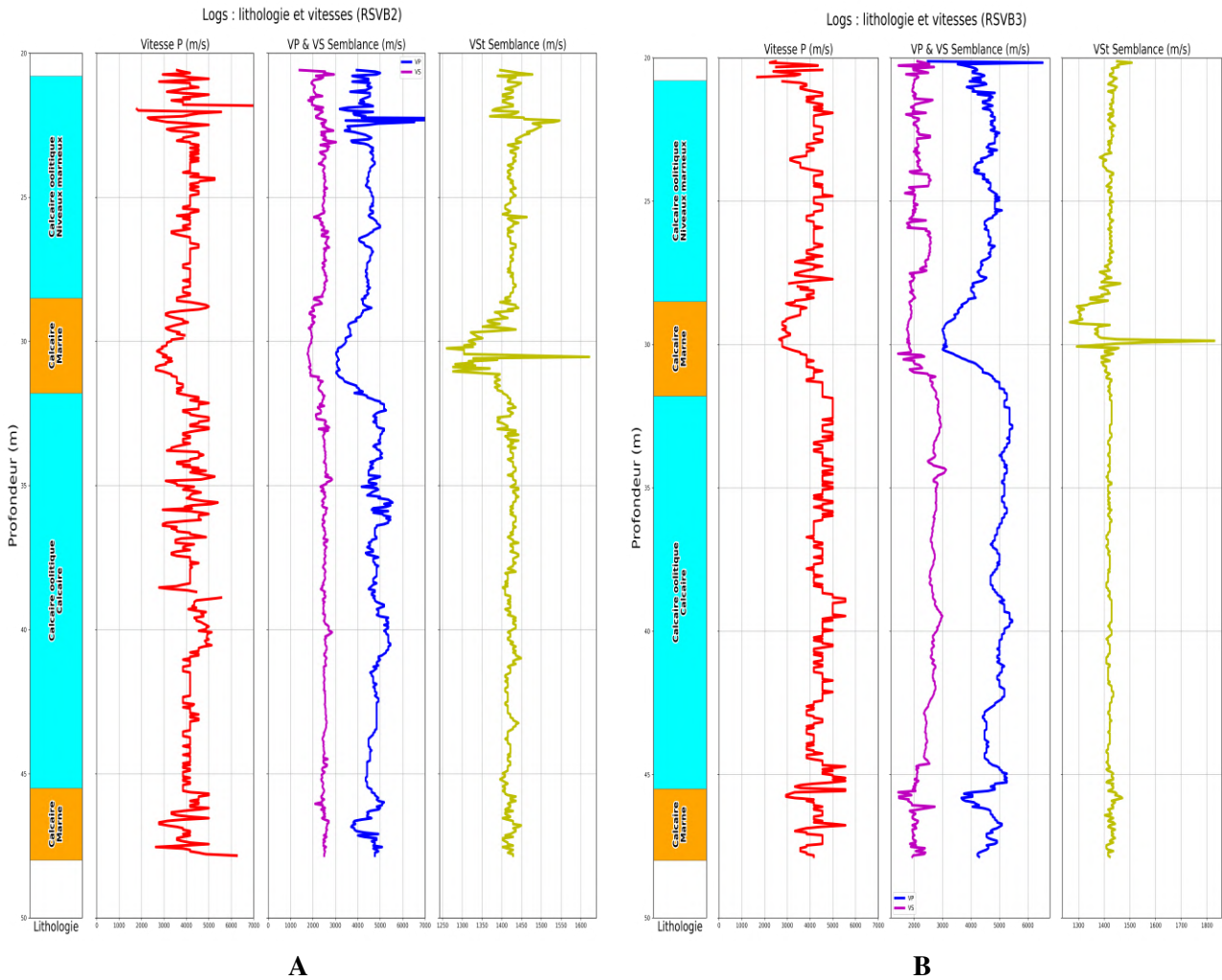


Figure 73: A: *RSBV2*: Vitesse P , $P_{semblance}$, $S_{semblance}$, $St_{semblance}$. B: *RSBV3*: Vitesse P , $P_{semblance}$, $S_{semblance}$, $St_{semblance}$.

Les logs obtenus par la méthode de semblance pour les ondes P , S et St confirment globalement les tendances observées par la méthode de picking. Les logs P , S et, surtout, St réagissent de manière plus sensible à la lithologie et à la présence de flux eau, ce qui permet de détection des fractures ouvertes ou des zones d'altération. Ces observations seront confirmées dans les sections suivantes.

5.1.3 Analyse des paramètres élastiques

Forage *RSBV1*

L'étude des paramètres élastiques obtenus à partir des vitesses des ondes soniques dans le forage *RSBV1* permet de mieux comprendre la nature des roches traversées, leur état mécanique, ainsi que la présence éventuelle de fractures ou de zones saturées en eau. Ces paramètres incluent notamment le rapport Vp/Vs , le module de Young (E), le module de cisaillement (G), et le module d'incompressibilité (K), tous calculés à partir des vitesses des ondes P et S mesurées par semblance et par picking (Fig. 74).

Le rapport entre les vitesses des ondes (Vp/Vs) est un indicateur fiable de la composition des roches. En général des valeurs proches de 1.8 à 1.9 sont typiques des roches calcaires compactes. Des valeurs supérieures à 2 peuvent traduire la présence de marnes, d'altération, ou de fractures ouvertes avec potentiellement de l'eau. Dans le forage *RSBV1* on observe les résultats suivants (Fig. 74) :

Entre 20 m et 24 m, les valeurs de Vp/Vs sont stables autour de 1.8, ce qui est cohérent avec un calcaire sain et des niveaux de Marne et fractures. À 29 m, une augmentation du rapport (au-delà de 2.0), accompagnée d'une

baisse de la vitesse des ondes S, suggère un changement de faciès vers des marnes et la présence d'une fracture fermée. Vers 34 m, une anomalie importante sur les vitesses P , S et surtout St (très sensibles aux fluides), couplée à un pic du rapport V_p/V_s , indique très probablement une fracture ouverte avec écoulement d'eau.

Le module d'Young, qui reflète la rigidité en traction des roches, montre une variation progressive avec des valeurs plus élevées entre 24 m et 34 m, indiquant des formations plus consolidées, vraisemblablement des calcaires compacts. À l'inverse, des baisses significatives du module E sont observées autour de 29 m et vers 41 m, zones connues pour leur lithologie marneuse et la présence de fractures ouvertes, ce qui suggère une diminution locale de la rigidité due à l'altération et à la fissuration des roches. Entre 44 m et 50 m, cette portion finale du forage, le module d'Young diminue progressivement, indiquant une moindre rigidité de la roche. Cela pourrait traduire une augmentation de la fraction marneuse ou de roches moins consolidées.

Le module de cisaillement G , indicateur de la résistance aux déformations latérales, suit une tendance similaire à celle du module E . Les valeurs les plus élevées (> 10 GPa) sont cohérentes avec des zones calcaires. Par contre, des chutes notables vers 29 m et 33 m et à 39 m correspondent à des niveaux déjà identifiés par les ondes St comme fracturés et possiblement saturés en eau. Ces baisses confirment une perte de cohésion mécanique dans ces couches. Au-delà de 44 m le module G suit la même tendance baissière. Les valeurs deviennent plus faibles, traduisant une plus grande déformabilité latérale. Cela peut être dû à des zones marneuses inter-stratifiées dans des calcaires et à des fractures fermées et remplies.

Le module K renseigne sur la capacité de la roche à résister à la compression sans changer de volume. Il reste généralement élevé dans les calcaires, mais des creux marqués entre 29 m et 33 m confirment une plus grande compressibilité des formations à ces profondeurs. Ce comportement est typique des marneux ou des zones fracturées, qui absorbent plus facilement les contraintes en raison de la présence d'eau de porosité secondaire accrue. Le module K indique une plus grande compressibilité des formations entre 44 m et 50 m. Cela renforce l'hypothèse de roches moins cimentées (plus compressibles) et une porosité accrue, ou même saturation partielle en eau.

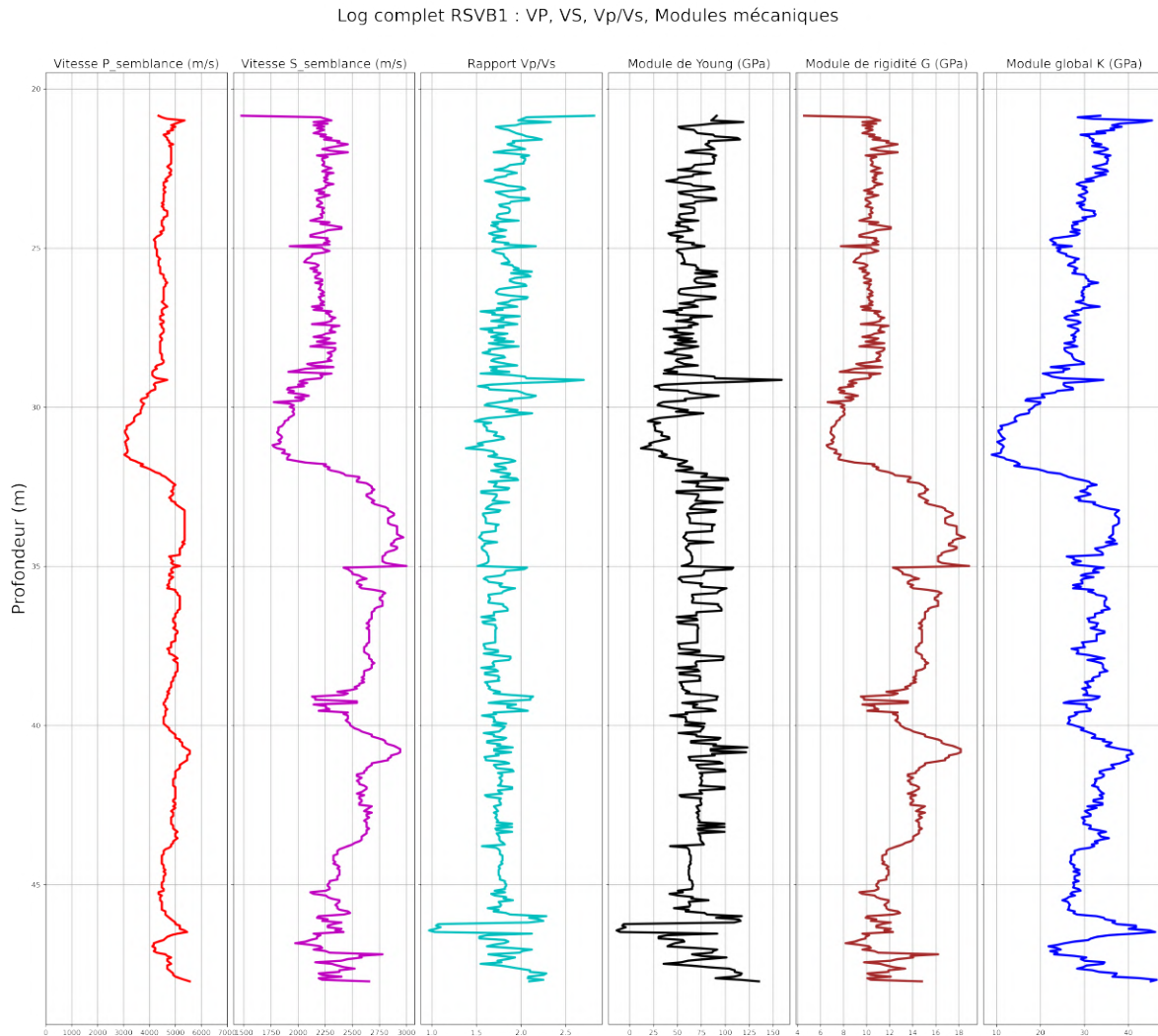


Figure 74: *RSBV1*: Logs de vitesse P , S , modules d'élasticités.

Forages *RSBV2* et *RSBV3*

Les forages *RSBV2* et *RSBV3* (Fig. 75 A et B), met en évidence une stratification mécanique comparable à celle observée dans *RSBV1*, avec un décalage de 2 m vers le haut pour le forage *RSBV3*, traduisant une nature géologique globalement similaire. L'analyse de l'évolution des modules de Young E , de cisaillement G et global K apporte des informations précieuses sur les matériaux traversés : leur cohésion, leur rigidité, ainsi que l'impact éventuel de fractures, d'altérations ou d'hétérogénéités lithologiques. Entre 20 m et 29 m (20 m à 27 m pour *RSBV3*), les modules sont en moyenne modérés, avec des valeurs de E souvent comprises entre 80 et 120 GPa, et des fluctuations sensibles de G et K .

Cela traduit probablement la présence d'un milieu lithologique hétérogène, fait d'alternances de marnes et de calcaires et bien de niveaux altérés. Quelques pics vers 22, 26 et 28 m (22, 25 et 27 m pour *RSBV3*) pourraient correspondre à des niveaux légèrement plus durs probablement des calcaires durs, mais la variabilité mécanique indique une structure faiblement consolidée, potentiellement fracturée (karstifiée).

À partir de 29 m (27 m pour *RSBV3*), les trois modules (E , G et K) présentent une baisse progressive ou des variations irrégulières, marquant un affaiblissement mécanique des formations traversées. Cette tendance suggère un passage à des roches moins compactes, probablement marneuses ou altérées, avec une structure interne plus

hétérogène. La perte de cohérence entre les modules indique que le milieu devient moins rigide, affecté par la présence de fractures fermées, de cavités partiellement colmatées, ou encore de zones de transition lithologique.

Au-delà de 33 m, cette section intermédiaire, les paramètres élastiques montrent des fluctuations notables. Le module de cisaillement G présente plusieurs creux marqués, traduisant une diminution locale de la rigidité latérale. Le module global K montre également des baisses ponctuelles.

Le module d'Young E subit une rupture visible autour de 40 à 41 m (38 à 39 m pour *RSBV3*), signalant une altération mécanique nette. Ces instabilités suggèrent la présence de discontinuités structurales comme des fractures fermées, des zones plus plastiques ou des intercalations marneuses dans une matrice calcaire.

Au-delà de 46 m pour *RSBV2* et *RSBV3*): Dans cette dernière tranche, les trois modules E , G et K enregistrent une baisse progressive, avec des valeurs parmi les plus faibles. Cette tendance suggère un affaiblissement généralisé du comportement mécanique des roches à ces profondeurs. Plusieurs causes possibles peuvent être envisagées : une augmentation de la teneur en marnes ou en argiles avec la présence de fractures ouvertes et remplies, et un milieu plus poreux et moins cimenté.

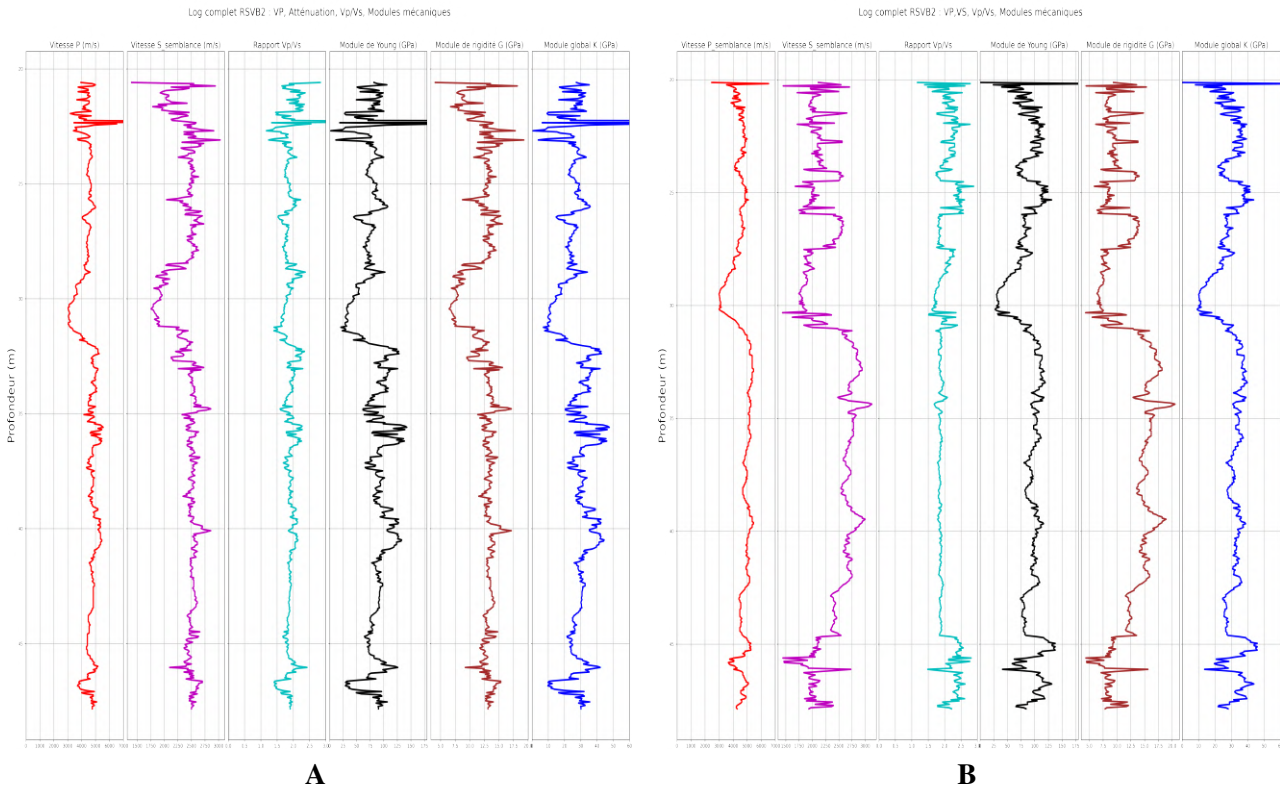


Figure 75: A: *RSBV2*: Logs de vitesse P , S , modules d'élasticités. B: *RSBV3*: Logs de vitesse P , S , modules d'élasticités.

5.1.4 Analyse fréquentielle

Forages *RSBV1*, *RSBV2*, *RSBV3*

Les figure. 76 et 77 ci-dessus présentent les cartes de fréquences dominantes (à gauche) et médianes (à droite) extraites à partir des signaux acoustiques de chaque onde sonique FWS enregistrés dans les trois forages (*RSBV1*, *RSBV2* et *RSBV3*) en fonction de la profondeur chaque 5 cm. Cette analyse a été réalisée à l'aide de la transformée de Fourier à court terme ($STFT$), avec une fenêtre glissante de 120 μs , ce qui permet une bonne résolution temporelle tout en capturant la structure fréquentielle locale des ondes acoustiques. Bien que légèrement espacés de quelques mètres, et un décalage de 2 m vers le haut pour le forage *RSBV3*, les trois forages montrent une signature fréquentielle très similaire, témoignant d'un milieu géologique comparable dans

l'ensemble de la zone :

De 20 à 28 m (26 m pour *RSBV3*), les fréquences dominantes et médianes sont relativement élevées dans les trois forages, traduisant des matériaux denses et bien consolidés, probablement des calcaires compacts.

Entre 28 m et 32 m (28 m et 30 m pour *RSBV3*), une zone de baisse des fréquences est observée dans les trois profils. Cette réponse est typique de niveaux marneux, zones poreuses et fractures ouvertes, qui provoquent une forte atténuation des hautes fréquences.

De 32 m à 44 m (30 m à 42 m pour *RSBV3*), les fréquences redeviennent plus hétérogènes. Cette alternance reflète un environnement plus contrasté, où l'on retrouve des passages plus rigides (calcaires) intercalés avec des niveaux plus mous et fracturés.

Entre 44 m et 50 m (42 m et 50 m), les fréquences baissent de manière marquée dans les trois forages, confirmant un affaiblissement mécanique, possiblement en lien avec des marnes profondes, des altérations et une augmentation de la fracturation.

La fréquence dominante représente le pic énergétique du signal. Elle met en évidence les couches les plus résonnantes ou les plus cohérentes du point de vue acoustique. La fréquence médiane est plus robuste, moins influencée par des pics ponctuels, et offre une lecture globale de la distribution de l'énergie fréquentielle mais. Dans notre cas, la fréquence dominante est celle qui se rapproche le plus de la réalité physique du signal.

Dans les trois forages, les zones à basse fréquence apparaissent de façon similaire dans les deux types de cartes, ce qui renforce la fiabilité de l'interprétation géologique et géomécanique.

Pourquoi l'atténuation fréquentielle apparaît-elle plus prononcée dans l'intervalle temporel correspondant aux ondes *S* et les ondes de surface, tandis qu'elle demeure relativement faible pour les ondes *P* ?

Dans la zone des ondes *P* (premières arrivées), la fréquence dominante reste globalement élevée, reflétant une faible atténuation dans les calcaires oolithiques compacts observés en surface. Une légère diminution est toutefois perceptible lors de la traversée de niveaux marneux ou de fractures partiellement saturées, en lien avec un amortissement visqueux de l'énergie. Pour les ondes *S*, une chute marquée de la fréquence est observée aux alentours de 28 à 30 m de profondeur. Cette variation coïncide avec un horizon fortement fracturé et vraisemblablement saturé en eau. Dans ce contexte, l'eau contenue dans les fractures absorbe préférentiellement les hautes fréquences des ondes de cisaillement, entraînant un filtrage vers les basses fréquences. Les ondes de surface se caractérisent, par des fréquences dominantes généralement plus faibles. Leur propagation dans les couches superficielles, souvent altérées, fracturées et saturées, favorise la dissipation rapide des composantes hautes fréquences par effets de friction fluide-paroi et de diffusion dans les hétérogénéités. Ainsi, l'analyse met clairement en évidence l'influence des fractures et de la saturation en eau sur l'atténuation fréquentielle, avec un impact plus prononcé sur les ondes *S* et de surface et moins marquée sur les ondes *P*.

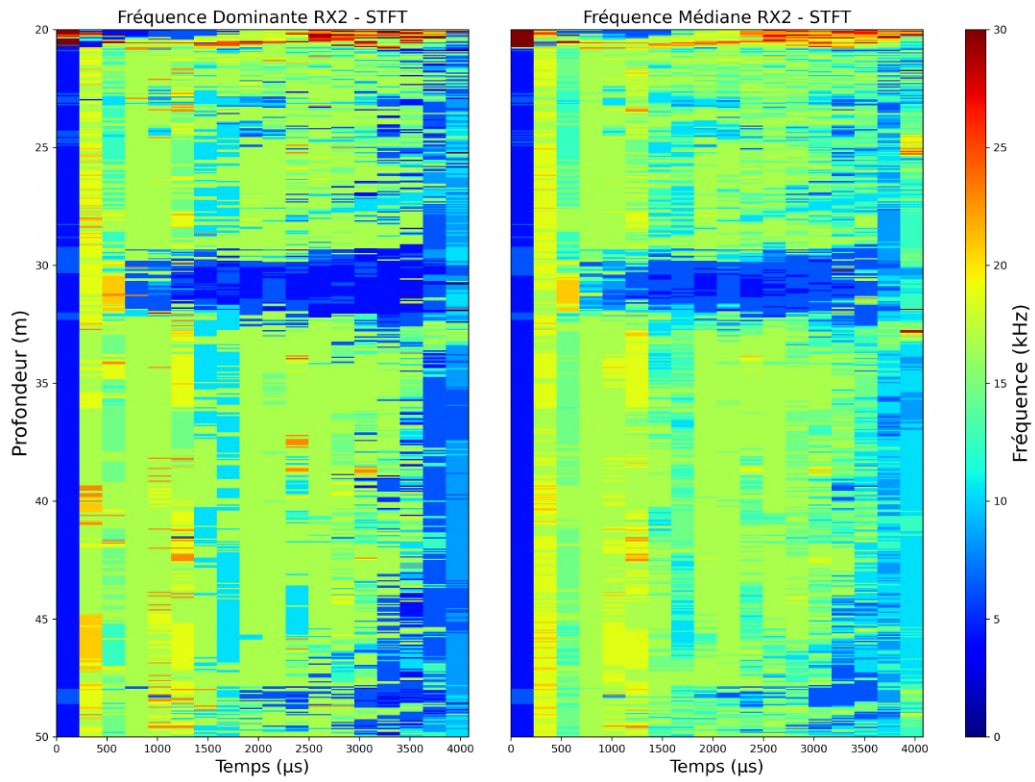


Figure 76: Spectrogrammes des fréquences dominante et médiane en fonction de la profondeur. Forage *RSBV1*.

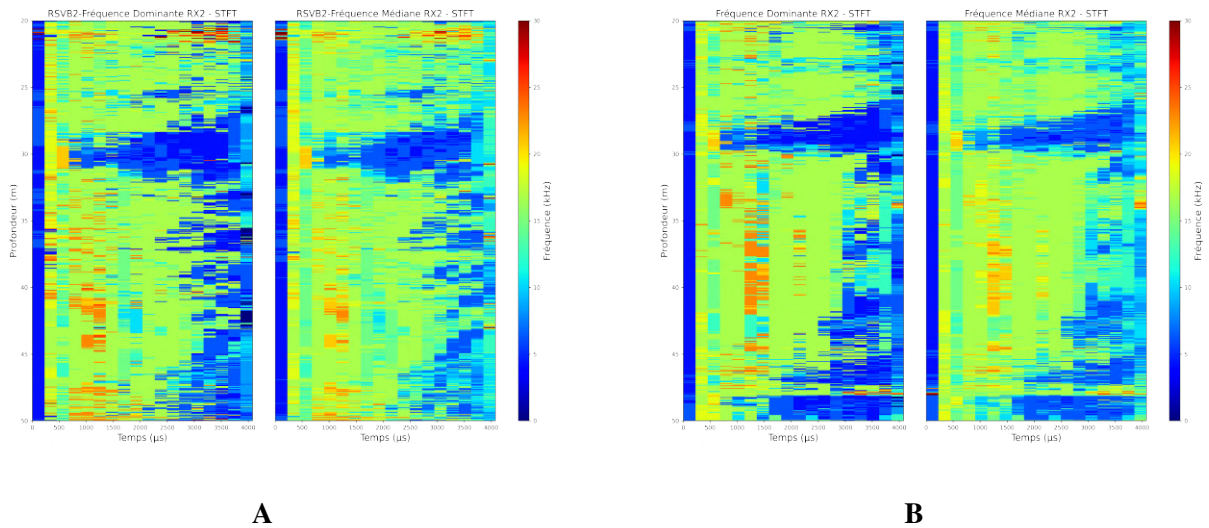


Figure 77: A: Spectrogrammes des fréquences dominante et médiane en fonction de la profondeur. Forage *RSBV2*. B: Spectrogrammes des fréquences dominante et médiane en fonction de la profondeur. Forage *RSBV3*.

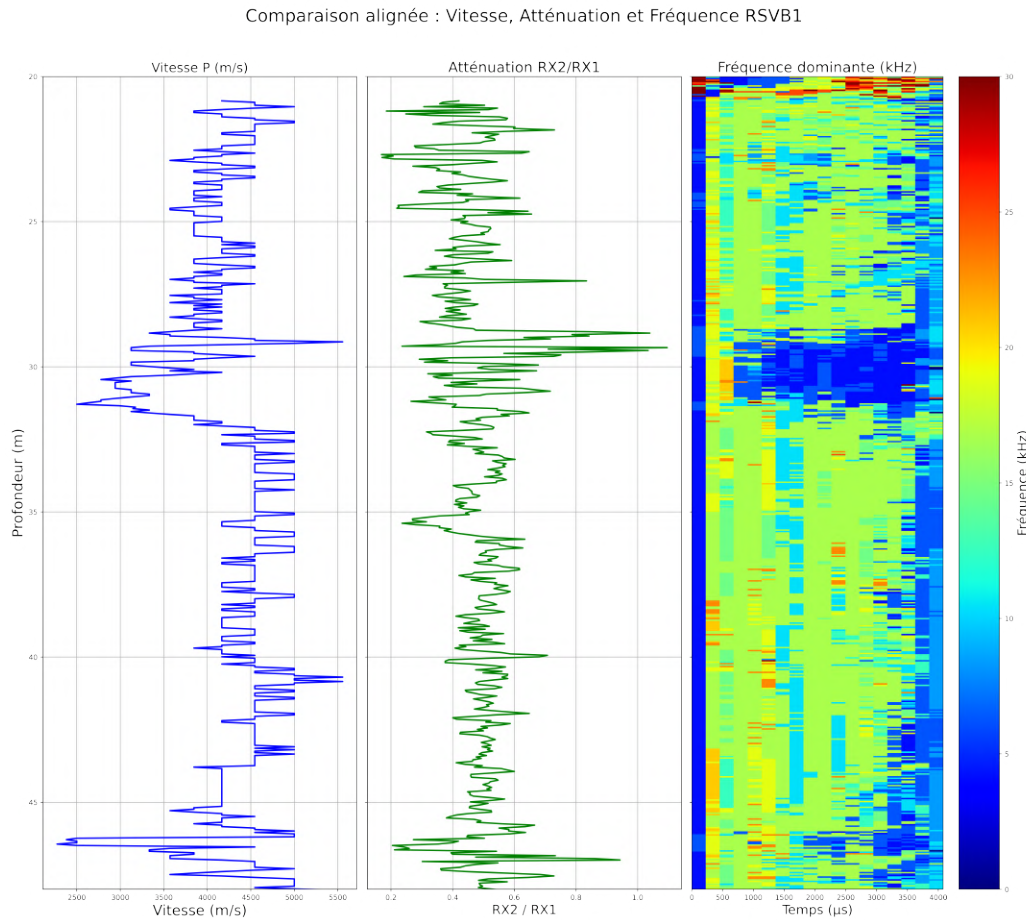


Figure 78: *RSBV1*: Logs de vitesse P et atténuation es amplitude avec la carte des fréquence dominante moyenne.

Dans le cadre de l'analyse fréquentielle complémentaire menée sur les trois forages *RSBV1*, *RSBV2* et *RSBV3*, nous avons réalisé des logs de la fréquence dominante moyenne en fonction de la profondeur, en les associant aux logs de vitesse des ondes P et à l'atténuation du signal acoustique (rapport $RX2/RX1$) (Fig. 79, 80). Cette démarche permet d'extraire des signatures acoustiques caractéristiques des variations lithologiques et des zones fracturées. Les trois forages présentent une évolution cohérente de la fréquence dominante moyenne avec la profondeur, le forage *RSBV3* est décalé 2 m vers le haut par rapport les autres forages : Entre 20 et 28 m sur *RSBV3* (30 m sur *RSBV2* et 27 m sur *RSBV3*) : les fréquences sont relativement élevées et stables, ce qui correspond à des couches plus homogènes, probablement des calcaires peu altérés avec des pics correspondant à des niveaux marneux ainsi qu'à des fractures ouvertes et fermées. Autour de 28 à 32 m, 30 à 32 m et 27 à 30 m pour les forages *RSBV1*, *RSBV2* et *RSBV3*, respectivement: on observe une chute marquée de la fréquence dominante moyenne, souvent accompagnée de fluctuations de la vitesse P . Cette anomalie fréquentielle est interprétée comme un indice de fractures ouvertes et de niveaux marneux, plus atténuants et hétérogènes. Au-delà de ces niveaux: les fréquences restent modérées, traduisant une variabilité lithologique (alternance de calcaires et de niveaux marneux) et des zones localement fracturées. La fréquence dominante reste sensible aux zones moins cohésives et aux variations mécaniques. Au-delà de 44 m jusqu'à 50 m sur *RSBV1* et 46 m jusqu'à 50 m sur *RSBV2* et *RSBV3*: la fréquence dominante tend à chuter, ce qui pourrait refléter un retour vers des formations plus hétérogènes et moins compactes, (effet possible de porosité résiduelle et de fractures profondes).

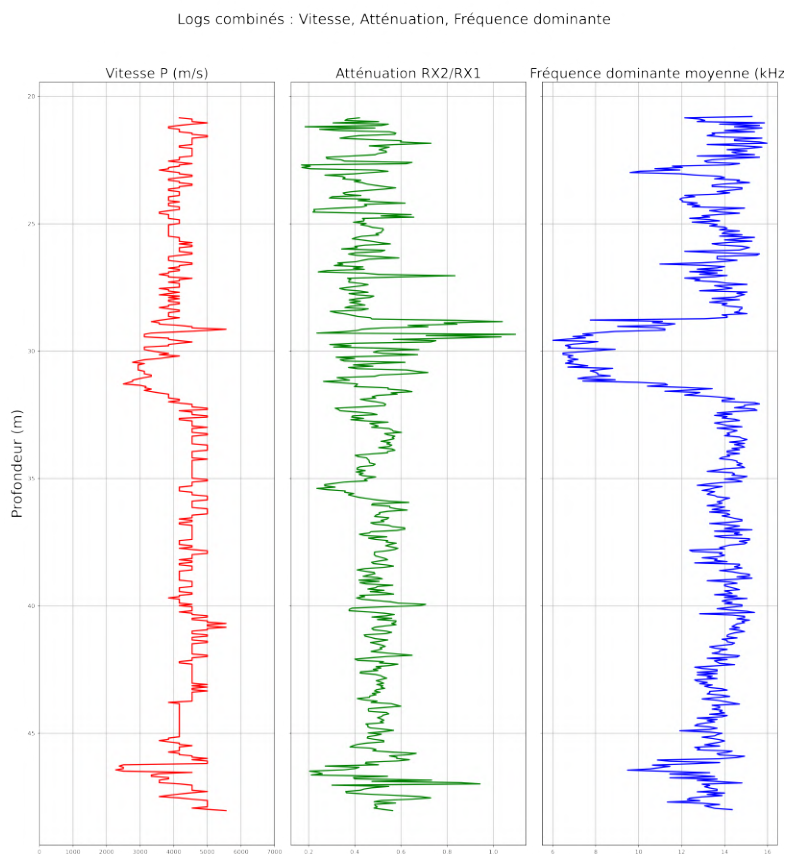


Figure 79: RSBV1 : Log de fréquence dominante moyenne.

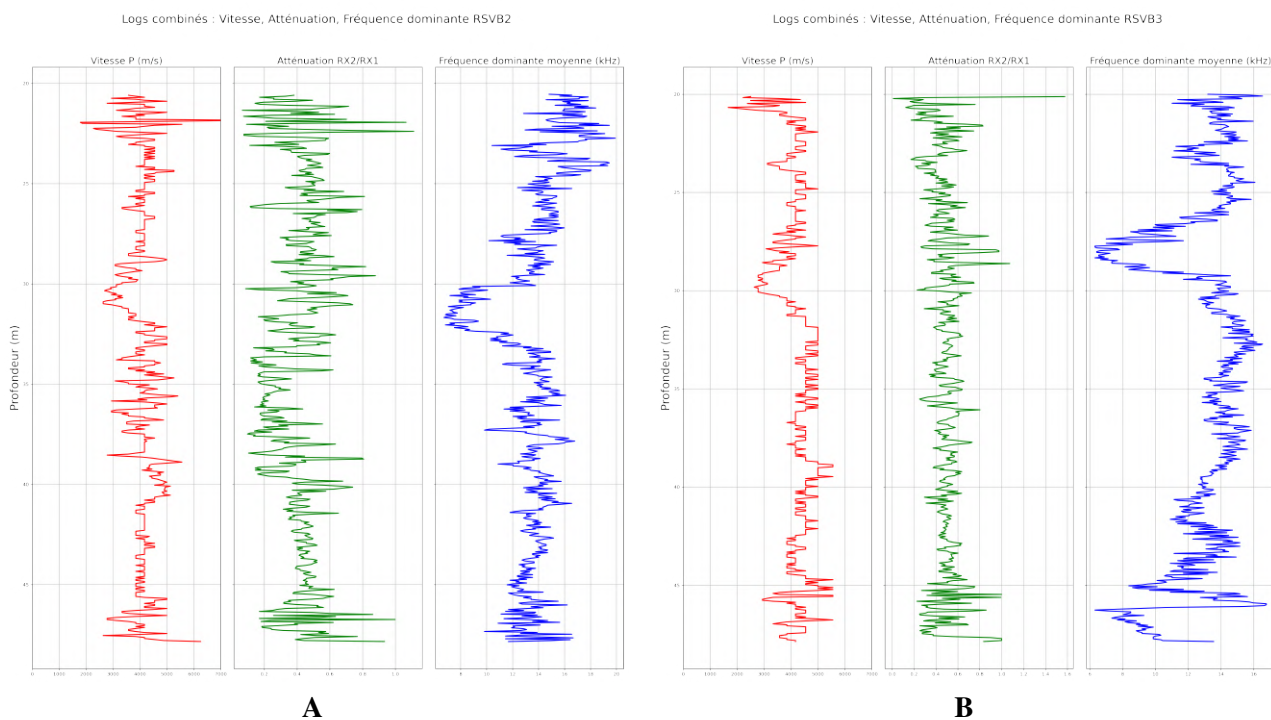


Figure 80: A: RSBV2 : Log de fréquence dominante moyenne. B: RSBV3 : Log de fréquence dominante moyenne.

Les logs de fréquence dominante moyenne dans les trois forages montrent des tendances très cohérentes, reflétant une stratigraphie géologique similaire avec un décalage Stratigraphique de 2 m vers le haut pour *RSBV3* par rapport aux autres forages. Ils renforcent ainsi l'interprétation des logs classiques et apportent un outil complémentaire performant pour la caractérisation géomécanique des formations.

5.1.5 Analyse de l'atténuation des premiers pics des ondes soniques *P* pour la détection des fractures

Dans le cadre de cette étude, une approche basée sur l'atténuation des premiers pics des ondes soniques *P* a été mise en place afin d'identifier automatiquement les fractures, une méthode permettant d'identifier automatiquement les fractures à partir de l'atténuation des premiers pics des ondes soniques *P*. Cette méthode repose sur le calcul d'un facteur d'atténuation (rapport $RX2/RX1$), estimé à chaque profondeur. Ce facteur, variant entre 0 (atténuation maximale) et 1 (absence d'atténuation), a permis de générer un log d'atténuation en fonction de la profondeur. Ce log révèle des anomalies localisées, interprétées comme des discontinuités mécaniques, notamment des fractures. L'analyse de l'intensité et de la forme de ces anomalies a conduit à une classification simple :

- Fractures ouvertes : $RX2/RX1$ inférieur 0.35.
- Fractures fermées : $RX2/RX1$ entre 0.5 et 0.35.
- Multiples fractures ouvertes ou fermées : $RX2/RX1$ inférieur à 0.35, accompagné d'une chute marquée de la vitesse > 40%

Vérification et validation de l'approche

Pour évaluer la pertinence de cette méthode, les logs du facteur d'atténuation ont été comparés à l'imagerie optique du forage *RSBV1*, *RSBV2*, *RSBV3* (Fig. 81), considérée comme référence pour l'identification des fractures. Cette confrontation a montré une bonne concordance entre les pics d'atténuation et les fractures observées. La figure. 81 illustre cette validation : À gauche : imagerie du forage avec fractures identifiées. À droite : log du facteur d'atténuation obtenu.

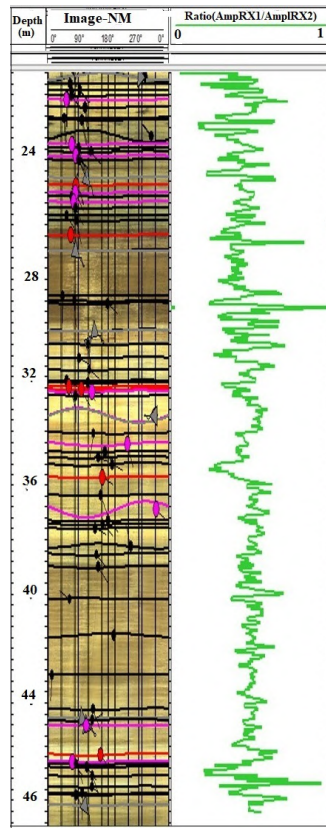


Figure 81: *RSBV1*: Log du facteur d'atténuation des amplitudes des premiers pics et l'imagerie.

L'alignement cohérent entre ces deux sources confirme la robustesse de la méthode. Elle s'avère ainsi être un outil complémentaire fiable pour la caractérisation des discontinuités, particulièrement utile en l'absence d'imagerie directe.

Détection des fractures à partir des pics du facteur d'atténuation des ondes soniques P

L'analyse de l'atténuation des premiers pics des ondes soniques P s'est révélée être une approche efficace pour la détection automatique des fractures dans les forages. L'idée repose sur le fait que la propagation des ondes dans un milieu fracturé entraîne une perte d'énergie notable, se traduisant par une diminution de l'amplitude des signaux enregistrés, notamment entre les récepteurs $RX1$ et $RX2$.

Dans ce contexte, nous avons mis en œuvre une méthode simple et robuste consistant à :

- Calculer un facteur d'atténuation ($RX2/RX1$) à chaque profondeur.
- Tracer un log du facteur d'atténuation en fonction de la profondeur.
- Identifier les pics d'atténuation, qui signalent des zones de dissipation d'énergie (Fig. 82).
- Classifier automatiquement ces anomalies selon des seuils prédéfinis pour distinguer :
 1. Les fractures ouvertes (forte atténuation, typiquement $RX2/RX1 < 0.35$).
 2. Les fractures fermées ou colmatées (atténuation modérée, $0.35 < RX2/RX1 < 0.5$).
 3. Les zones multiples ou complexes (forte atténuation combinée à une baisse de vitesse).

Cette méthode, appliquée sur les trois forages (*RSBV1*, *RSBV2*, *RSBV3*), permet de repérer avec une bonne résolution verticale les discontinuités acoustiques majeures. L'efficacité du processus a été validée par comparaison

avec l'imagerie optique des forages, qui montre une bonne concordance avec les anomalies détectées.

Elle constitue ainsi un outil opérationnel pour le repérage des fractures ouvertes et fermées en contexte karstique, notamment dans les zones où les flux d'eau sont critiques à identifier.

Les figures ci-dessus (Fig. 83, 84) présente le log du facteur d'atténuation des amplitudes des ondes P , calculé à partir du rapport $RX2/RX1$, en fonction de la profondeur. Ce log met en évidence les zones de forte dissipation d'énergie acoustique, souvent associées à la présence de fractures ou de contrastes lithologiques.

Trois types de fractures ont été identifiés selon le facteur d'atténuation et d'autres critères :

1. Fractures fermées : indiquées par des cercles bleus, elles présentent une atténuation modérée ($RX2/RX1$ entre 0.35 et 0.50), probablement liées à des fissures colmatées ou partiellement refermées.
2. Fractures ouvertes : repérées en rouge, elles sont associées à une forte atténuation ($RX2/RX1 < 0.35$), caractéristique de milieux fracturés ouverts, favorables aux circulations de fluide.
3. Fractures multiples: représentées en violet, elles correspondent à des anomalies complexes identifiées manuellement, traduisant la présence de plusieurs fractures superposées ou étroitement espacées entre les récepteurs $RX1$ et $RX2$.

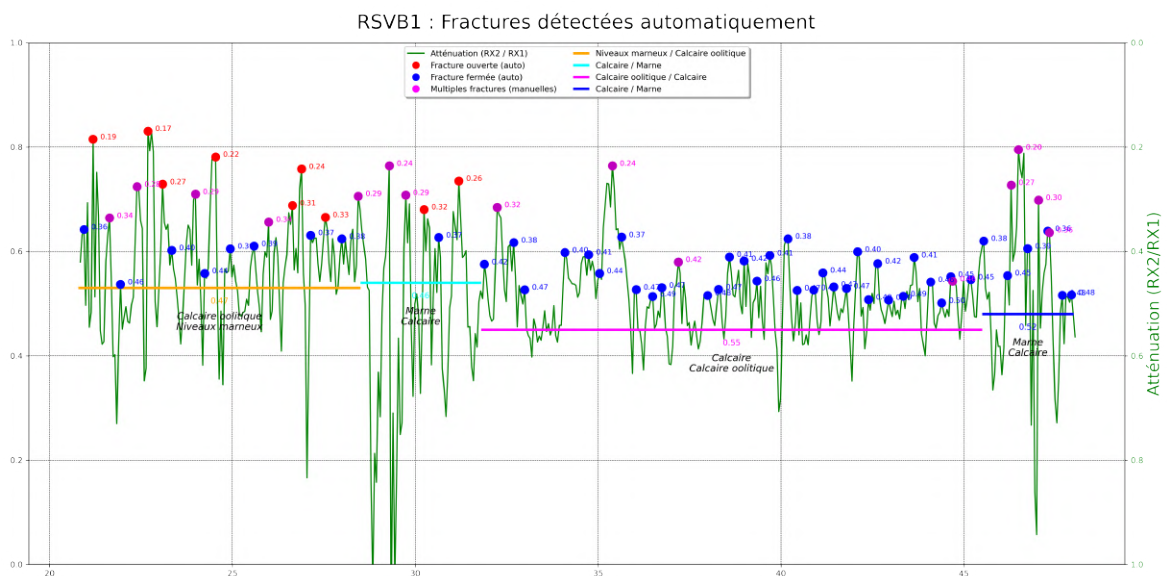


Figure 82: RSBV1: Log du facteur d'atténuation des amplitudes des premiers pics et l'imagerie .

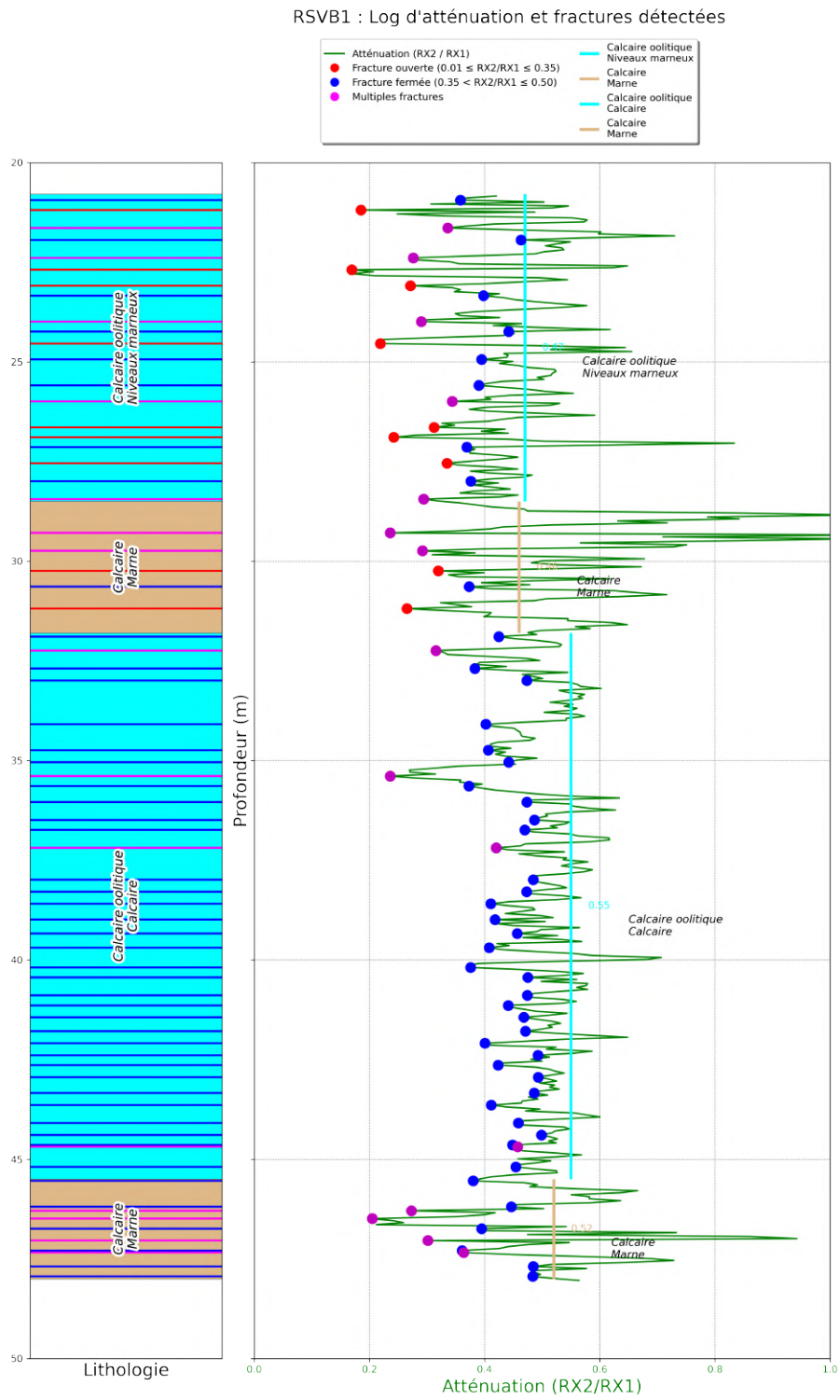


Figure 83: Log du facteur d'atténuation des amplitudes des premiers pics et la lithologie du forage (RSBV1).

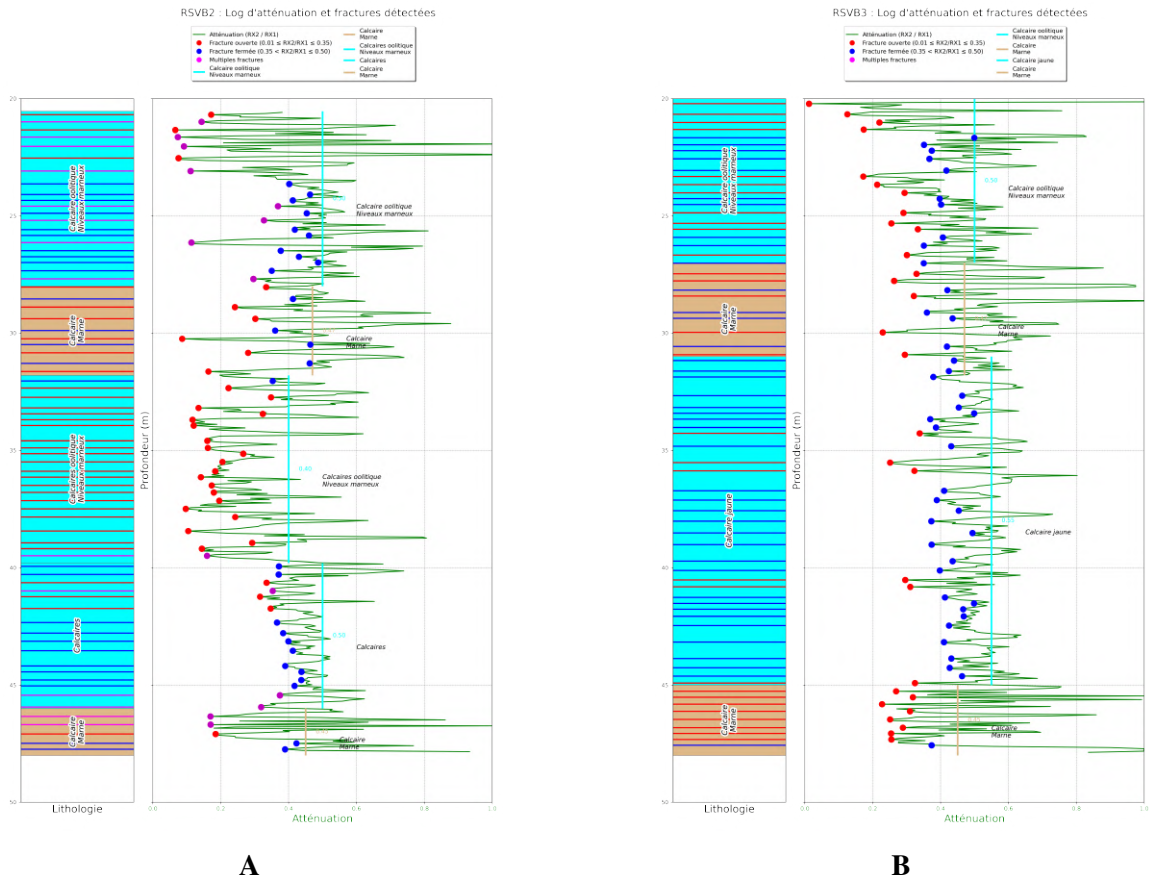


Figure 84: A: Log du facteur d'atténuation des amplitudes des premiers pics (*RSBV2*). B: Log du facteur d'atténuation des amplitudes des premiers pics (*RSBV3*).

Corrélation entre les pics d'atténuation et les variations de vitesse des ondes *P* : existe-t-il une correspondance significative et quel indicateur est le plus précis pour la détection des fractures ?

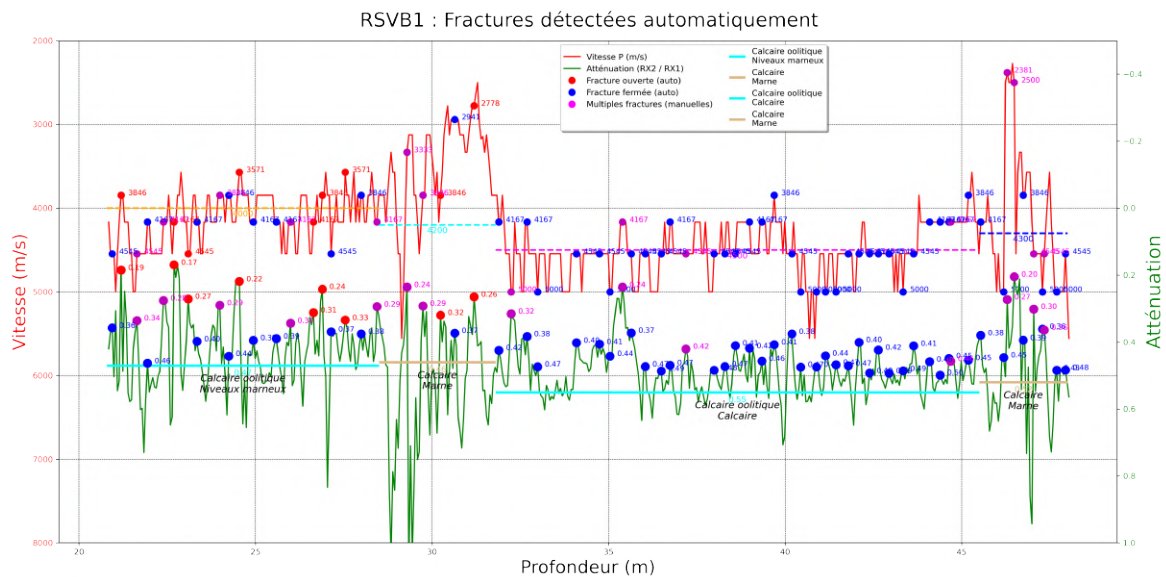


Figure 85: *RSBV1*: Log du facteur d'atténuation des amplitudes des premiers pics et la vitesse des ondes *P*.

La figure. 85 ci-dessus superpose le log de vitesse des ondes P (en rouge) et le log du facteur d'atténuation des premiers pics, accompagnés des fractures détectées automatiquement et manuellement. Cette représentation conjointe permet une lecture comparative riche d'enseignements sur la nature des formations traversées et la présence de discontinuités. En comparant les pics d'atténuation aux pics de variation de la vitesse des ondes P , on constate une corrélation générale dans plusieurs zones clés du forage. Les zones fracturées sont souvent marquées à la fois par une baisse de vitesse et une atténuation importante. Cependant, cette corrélation n'est pas systématique. Dans certains cas, on observe un léger décalage entre les pics d'atténuation et les variations de la vitesse, ce qui peut être dû à des effets de résolution ou de sensibilité des deux mesures. Plus significativement, plusieurs pics d'atténuation marqués n'ont pas de réponse claire sur le log de vitesse P . Cela suggère que la vitesse P ne réagit pas systématiquement à certaines fractures, en particulier si elles sont peu ouvertes ou sub-verticales. Cela confirme que l'atténuation est un indicateur plus sensible à la présence de discontinuités mécaniques fines ou à de faibles ouvertures, là où la vitesse P peut rester stable. Cette distinction souligne la complémentarité des deux approches mais également l'intérêt d'utiliser l'atténuation comme critère prioritaire dans la détection automatique de fractures.

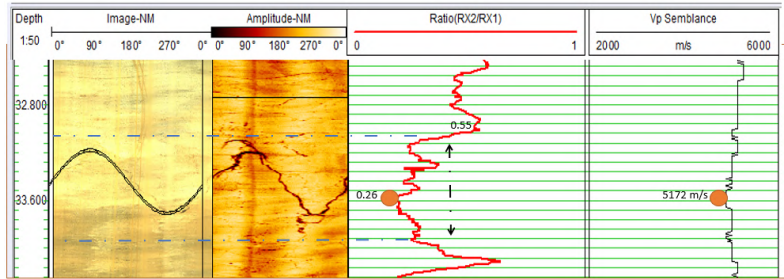


Figure 86: RSBV1: Figure illustrant l'atténuation des amplitudes en réponse à une fracture de type sinusoïdal, tandis que la vitesse des ondes P ne montre pas de variation significative à ce niveau.

La figure. 86 montre une fracture sinueuse, une atténuation marquée des ondes est observée, tandis que la vitesse des ondes P reste relativement élevée. Cela pourrait s'expliquer par l'inclinaison importante de la fracture (supérieure à 45°), rendant la vitesse moins sensible à sa présence. Ce contraste met en évidence que, dans certains cas, les variations de vitesse ne suffisent pas à détecter une fracture, alors que l'atténuation révèle clairement son influence. Ce phénomène souligne l'importance de croiser l'analyse des vitesses et de l'atténuation des ondes sismiques pour une caractérisation plus fiable des structures fracturées, en particulier lorsqu'elles sont inclinées ou partiellement refermées.

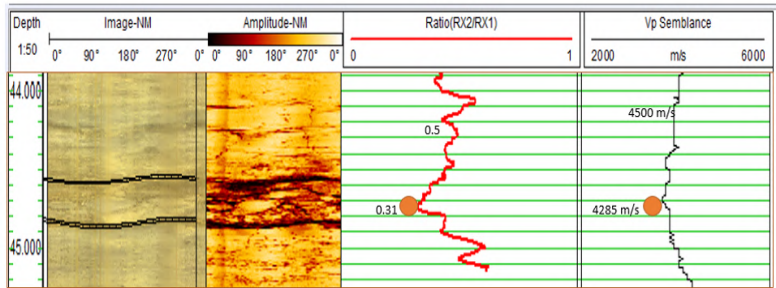


Figure 87: RSBV1: Figure illustrant l'atténuation des amplitudes en réponse à une fracture rempli d'argile, tandis que la vitesse des ondes P ne montre pas de variation significative à ce niveau.

La figure. 87 illustre une atténuation significative des ondes P en présence d'une fracture, accompagnée d'une légère diminution de leur vitesse. Toutefois, cette baisse reste modérée, probablement en raison du remplissage de la fracture par de l'argile, maintenant un contact mécanique partiel entre les parois.

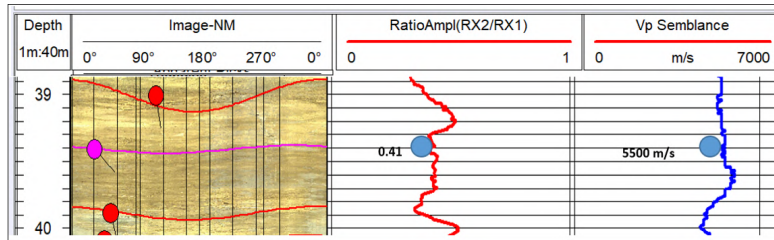


Figure 88: *RSBV2*: La figure illustre une fracture fermée, mise en évidence par un facteur d'atténuation modérée des ondes (~ 0.41) et une vitesse des ondes P relativement élevée (~ 5500 m/s), suggérant un bon contact entre les parois de la fracture.

Sur cette figure. 88, une fracture fermée est observée à une profondeur d'environ 39.5 m. Cette fracture ne génère pas d'atténuation significative du signal acoustique, comme en témoigne le rapport d'amplitude $RX2/RX1$, qui reste relativement élevé (environ 0.41). Par ailleurs, la vitesse de propagation des ondes P atteint à cet endroit environ 5500 m/s. L'ensemble de ces indicateurs suggère que la fracture est fermée et probablement remplie, avec un bon contact mécanique entre ses parois

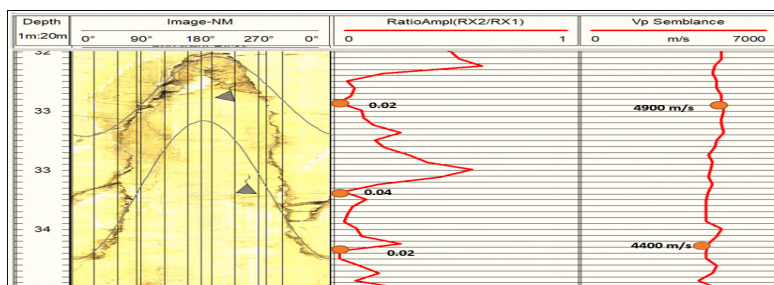


Figure 89: *RSBV2*: figure illustre une fracture ouverte sub-v verticale, associée à une forte atténuation du signal (valeur du facteur d'atténuation d'environ 0.20), tandis que la vitesse des ondes P reste relativement élevée, comprise entre 4200 et 4900 m/s).

La figure. 89 met en évidence une fracture ouverte sub-v verticale (pendage $> 45^\circ$), clairement identifiable entre environ 32.5 m et 34.5 m de profondeur. Cette fracture provoque une forte atténuation du signal acoustique, avec un facteur d'atténuation $RX2/RX1$ très faible, avoisinant 0.02 (valeur typique d'une fracture ouverte non remplie). Cependant, les vitesses acoustiques mesurées restent relativement élevées, comprises entre 4200 et 4900 m/s. Cette apparente contradiction peut s'expliquer par l'orientation sub-v verticale de la fracture : ce type de géométrie influe moins sur la mesure de la vitesse dans la direction de propagation du signal. En effet, dans le cas de fractures à fort pendage, le front d'onde traverse plus rapidement la zone fracturée, limitant ainsi l'effet de ralentissement généralement observé sur les vitesses apparentes.

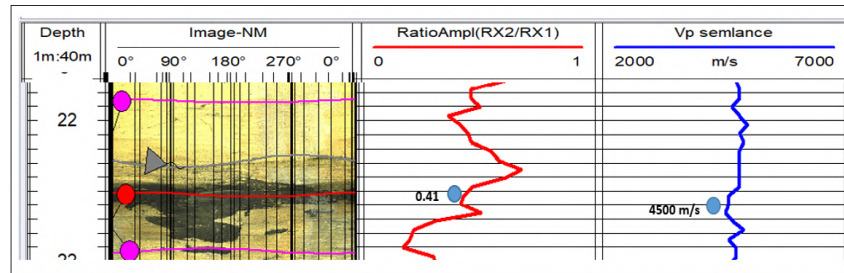


Figure 90: RSBV3: Fracture fermée remplie d'argile : facteur d'atténuation modéré (0.41) et vitesse des ondes P élevée (4500 m/s).

Sur la figure. 90, une fracture remplie est observée à une profondeur d'environ 22.5 m. Cette fracture ne génère pas une forte atténuation du signal acoustique, comme en témoigne le rapport d'amplitude $RX2/RX1$ relativement élevé, autour de 0.41. Par ailleurs, la vitesse de propagation des ondes P (Vp) reste élevée, avoisinant 4500 m/s. L'ensemble de ces éléments indique que la fracture est probablement remplie par des matériaux (comme de l'argile) et que le contact mécanique entre les parois reste bon, ce qui limite l'impact sur la propagation des ondes. L'analyse de l'ensemble des figures montre que l'atténuation des amplitudes des ondes soniques, dans de nombreux cas, plus sensible que la vitesse des ondes P pour la détection de certains types de fractures. En particulier, les fractures ouvertes, sub-verticales ou partiellement remplies, provoquent une forte atténuation du signal sans pour autant induire une baisse significative de la vitesse. Cette sensibilité accrue de l'atténuation permet de détecter des discontinuités qui passent parfois inaperçues sur les logs de vitesse, notamment lorsque l'orientation ou le remplissage de la fracture limite son influence sur la propagation. Ces observations soulignent l'importance de combiner les analyses d'atténuation et de vitesse pour une caractérisation plus fiable et complète des fractures dans les milieux géologiques hétérogènes.

5.1.6 Conclusion

L'analyse des vitesses d'ondes P , obtenues par méthode de picking et par semblance, ainsi que des vitesses des ondes S et St , a permis de mettre en évidence des variations significatives liées à la lithologie et à la structure des formations traversées par les forages RSBV1, RSBV2 et RSBV3 et le flux d'eau dans certain cas. Ces logs de vitesse se sont révélés particulièrement efficaces pour identifier les grands contrastes lithologiques et les zones de fractures en générales, notamment la distinction entre niveaux marneux, calcaires compacts, et zones altérées. La comparaison entre les différentes vitesses (notamment P semblance vs P picking) renforce la robustesse de l'interprétation et permet de mieux cerner l'hétérogénéité verticale des formations. L'intégration des fréquences dominantes et moyennes, issues de la transformée de Fourier à court terme ($STFT$), a apporté un éclairage complémentaire, en soulignant les zones de perte d'énergie ou de diffusion accrue, souvent corrélées à des structures discontinues ou à des variations lithologiques fines. L'exploitation des paramètres élastiques (modules de Young E , de cisaillement G , et module global K), dérivés des vitesses d'ondes, a permis de quantifier la rigidité des formations et de mettre en évidence les zones affaiblies mécaniquement, renforçant ainsi la caractérisation géomécanique des forages. Toutefois, c'est l'analyse de l'atténuation des amplitudes des ondes soniques P et les ondes soniques en générale qui s'est avérée la plus précise et la plus sensible pour la détection des fractures, notamment ouvertes, fermée ou multiples. Contrairement à la vitesse, qui peut rester élevée malgré la présence de discontinuités (notamment si celles-ci sont inclinées ou partiellement remplies), l'atténuation réagit fortement aux moindres pertes d'énergie dans la propagation, offrant ainsi une méthode de détection très fine des fractures. En somme, la combinaison des vitesses, des fréquences, des paramètres élastiques et de l'atténuation offre une lecture multidimensionnelle des forages, où chaque paramètre joue un rôle complémentaire. La vitesse est un excellent indicateur de lithologie, la fréquence enrichit la compréhension énergétique, les modules élastiques traduisent la réponse mécanique du milieu, et l'atténuation s'impose comme l'outil privilégié pour l'identification des fractures.

6 Conclusion générale

Cette étude a combiné des expériences en laboratoire et des analyses sur trois forages réels (*RSBV1*, *RSBV2*, *RSBV3*) afin d'évaluer la réponse des ondes acoustiques face aux fractures et aux contrastes lithologiques. Les vitesses des ondes (P , S , St) ont montré leur efficacité pour identifier les grandes variations lithologiques, notamment entre niveaux marneux et calcaires. L'analyse de semblance a renforcé la fiabilité de ces mesures par rapport au simple picking. L'analyse fréquentielle (via la *STFT*) a permis d'identifier les zones de diffusion ou de perte d'énergie, souvent liées à des discontinuités. Les paramètres élastiques (modules E , G , K), calculés à partir des vitesses, ont permis d'évaluer la cohésion et la rigidité des formations traversées. Cependant, c'est l'atténuation des amplitudes, mesurée à partir du facteur d'atténuation $RX2/RX1$, qui s'est révélée la méthode la plus sensible et précise pour la détection des fractures, même sub-verticales ou remplies. Certaines fractures ont été détectées uniquement via l'atténuation, sans variation notable de vitesse. Ainsi, la combinaison des vitesses, de l'atténuation, des fréquences et des paramètres mécaniques offre une lecture fine et complémentaire des structures souterraines, où l'atténuation reste l'outil le plus fiable pour détecter et caractériser les fractures dans les milieux géologiques complexes.

Les résultats obtenus à travers les expérimentations en laboratoire et l'analyse des données issues des forages réels permettent désormais de répondre de manière structurée aux principales questions posées dans le cadre de cette étude:

1. Quel est le paramètre acoustique le plus efficace pour la détection des fractures dans les formations géologiques : la vitesse des ondes (P et S et St) ou l'atténuation de leur énergie ?

L'atténuation de l'énergie (facteur d'atténuation $RX2/RX1$) s'est révélée le paramètre le plus sensible et le plus précis pour détecter les fractures, notamment les fractures fermées, sub-verticales ou remplies. Contrairement à la vitesse, qui peut rester relativement élevée en présence de fractures partiellement fermées ou inclinées, l'atténuation réagit de manière immédiate à toute perte d'énergie, même minimale. La vitesse reste néanmoins un bon indicateur pour identifier les grandes discontinuités ou les contrastes lithologiques majeurs.

2. Dans quelle mesure les variations d'atténuation des ondes acoustiques permettent-elles d'identifier de manière fiable les zones de fractures remplies d'eau ou d'autres fluides ?

Les variations d'atténuation permettent d'identifier de manière fiable les fractures remplies de fluides, notamment grâce à la sensibilité accrue et la combinaison avec la vitesse des ondes St et les variations de la fréquence aussi. Les fractures ouvertes saturées génèrent une atténuation très marquée, avec un facteur d'atténuation $RX2/RX1$ souvent inférieurs à 0.3. Ce comportement a été observé dans plusieurs cas réels (par exemple autour de 34 m dans *RSBV1*), où la présence d'un écoulement a été confirmée par des tests hydrauliques ultérieurs.

3. La diminution de la vitesse des ondes P et S est-elle systématiquement corrélée à la présence de fractures dans les formations traversées ?

Non, pas systématiquement. La vitesse peut diminuer en présence de fractures, notamment ouvertes ou multiples, mais elle reste parfois relativement élevée si la fracture est fermée, inclinée, ou partiellement remplie. Cela a été démontré dans cette étude, certaines fractures bien identifiées par atténuation n'étaient pas accompagnées de baisses nettes de vitesse. Ainsi, la vitesse seule peut sous-estimer certaines discontinuités.

4. L'analyse fréquentielle des ondes soniques apporte-t-elle un avantage pour la détection des fractures et la caractérisation des fluides contenus ?

Oui, l'analyse fréquentielle, notamment des fréquences dominantes et moyennes obtenues par *STFT*, permet d'identifier les pertes d'énergie haute fréquence associées aux fractures ouvertes remplies d'eau, aux zones altérées ou aux passages marneux. Elle est particulièrement utile en complément de la vitesse et de l'atténuation, et peut révéler des zones perturbées qui échappent à une simple analyse de vitesse.

5. La diaggraphie acoustique permet-elle de détecter des fractures fines (< 1 mm) ou sub-verticales, généralement non identifiables par d'autres méthodes classiques de diaggraphie ?

Oui, la diaggraphie acoustique, notamment via l'atténuation d'amplitude des ondes soniques, permet de détecter des fractures fines ou sub-verticales, grâce à sa très haute sensibilité à la moindre perte d'amplitude. Même des fractures non visibles sur les logs classiques peuvent être mises en évidence par des variations localisées du facteur d'atténuation $RX2/RX1$. Cela a été vérifié dans plusieurs cas d'étude, où des fractures fines ou inclinées ont été identifiées uniquement par atténuation d'amplitudes des ondes soniques, alors que la vitesse restait constante.

Les résultats obtenus dans cette étude apportent des éléments clés pour la compréhension des milieux fracturés, et pourront servir de point de départ pour des recherches plus approfondies. Ils laissent également entrevoir des perspectives intéressantes pour une extension des investigations en direction horizontale, notamment dans le cadre de projets d'exploration ciblée ou de suivi de réservoirs.

7 Bibliographie

- Acosta-Colon A, Pyrak-Nolte LJ, Nolte DD (2009) Laboratory-scale study of field of view and the seismic interpretation of fracture specific stiffness. *Geophysical Prospecting* 57(2):209–224, DOI 10.1111/j.1365-2478.2008.00771.x, URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2478.2008.00771.x>
- Adrien Pelat (2019) Champs Acoustiques Élémentaires Éléments de cours & brevets. ENSIM, École Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans Spécialité VAC, Vibrations-Acoustique-Capteurs Université du Maine, Le Mans, France Année
- Advanced Logic Technology (2020) QL 40-FWS M Broad Band full Waveform Sonic. URL www.alt.lu
- Aki K, Richards PG (2009) Quantitative seismology, 2nd edn. University Science Books, Mill Valley, California New York
- Al SH (2017) Acoustic Logging Methods in Fractured and Porous Formations. *Oil Gas Res* 03(02), DOI 10.4172/2472-0518.1000139, URL <https://www.omicsonline.org/open-access/acoustic-logging-methods-in-fractured-and-porous-formations.php?aid=91858>
- Barton N, Choubey V (1977) The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics Felsmechanik Mcanique des Roches* 10(1-2):1–54, DOI 10.1007/BF01261801, URL <http://link.springer.com/10.1007/BF01261801>
- Bijay KC, Foroutan M, Ghazanfari E (2019) Analysis and Comparison of Measured Static and Dynamic Moduli of a Dolostone Specimen. In: *Geo-Congress 2019, American Society of Civil Engineers, Philadelphia, Pennsylvania*, pp 484–493, DOI 10.1061/9780784482124.049, URL <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784482124.049>
- Boashash B (2016) Time frequency signal analysis and processing: a comprehensive reference, second edition edn. EURASIP and Academic Press series in signal and image processing, Academic Press, Amsterdam Boston
- BOURBIÉ,, Thierry, COUSSY,, ZINSZNER, Olivier,, Bernard (1986) *Acoustique des milieux poreux*
- Boyer, Sylvain, and Jean-Luc Mari (1994) *Sismique et diagraphies*. Éditions Technip,
- Carcione J (2007) Carcione, J. M., 2007, *Wave Fields in Real Media. Theory and numerical simulation of wave propagation in anisotropic, anelastic, porous and electromagnetic media*, Elsevier. (Second edition, extended and revised).
- Chabot L, Henley D, Brown R, Bancroft J (2001) Single-well imaging using the full waveform of an acoustic sonic
- Cohen L (1995) Time frequency analysis. Prentice Hall signal processing series, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ
- Cornet F (1988) Reconnaissance par diagraphies des fractures recoupées par un forage. *Rev Fr Geotech* (45):5–19, DOI 10.1051/geotech/1988045005, URL <http://www.geotechnique-journal.org/10.1051/geotech/1988045005>
- D Chapellier (2023) Cours online de géophysique de l'Université de Lausanne Principes de base
- Dieb H (2008) Développement de l'interprétation quantitative de la sismique réflexion lacustre
- Djeddi Mabrouk (2017) Les méthodes sismiques : Les principes fondamentaux de propagation des ondes sismiques. Département de Géophysique –FHC- Université M'Hamed Bougara de Boumerdes. Algérie.

- Dupuy, B (2011) Propagation des ondes sismiques dans les milieux multiphasiques hétérogènes: modélisation numérique, sensibilité et inversion des paramètres poroélastiques (Doctoral dissertation, Université de Grenoble).
- Falcon-Suarez IH, Papageorgiou G, Jin Z, Muñoz-Ibáñez A, Chapman M, Best AI (2020) CO₂-Brine Substitution Effects on Ultrasonic Wave Propagation Through Sandstone With Oblique Fractures. *Geophysical Research Letters* 47(16):e2020GL088439, DOI 10.1029/2020GL088439, URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2020GL088439>
- Fjær E, Holt R, Horsrud P, Raaen A, Risnes R (2008) Chapter 3 Geological aspects of petroleum related rock mechanics. In: *Developments in Petroleum Science*, vol 53, Elsevier, pp 103–133, DOI 10.1016/S0376-7361(07)53003-7, URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0376736107530037>
- Haldorsen JBU, Johnson DL, Plona T, Sinha B, Valero HP, Winkler K (2006a) Borehole Acoustic Waves. *Oilfield Review*
- Haldorsen JBU, Johnson DL, Plona T, Sinha B, Valero HP, Winkler K (2006b) Borehole Acoustic Waves. *Oilfield Review*
- Korneev V (2010) Low-frequency fluid waves in fractures and pipes. *GEOPHYSICS* 75(6):N97–N107, DOI 10.1190/1.3484155, URL <https://library.seg.org/doi/10.1190/1.3484155>
- Laubach SE, Lander RH, Criscenti LJ, Anovitz LM, Urai JL, Pollyea RM, Hooker JN, Narr W, Evans MA, Kerisit SN, Olson JE, Dewers T, Fisher D, Bodnar R, Evans B, Dove P, Bonnell LM, Marder MP, Pyrak-Nolte L (2019) The Role of Chemistry in Fracture Pattern Development and Opportunities to Advance Interpretations of Geological Materials. *Reviews of Geophysics* 57(3):1065–1111, DOI 10.1029/2019RG000671, URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019RG000671>
- Lawrence E Kinsler, Austin R Frey, Alan B Coppers, James V Sanders (2000) *Fundamentals of acoustics*, 4th edn. J. Wiley & sons, New York
- Mallat SG (2009) *A wavelet tour of signal processing: the sparse way*, 3rd edn. Elsevier/Academic Press, Amsterdam ; Boston
- Mari JL (2020) Chapitre 3 • Diagraphie acoustique. In: *Sismique en forage et diagraphies acoustiques*, EDP Sciences, pp 77–104, DOI 10.1051/978-2-7598-2262-1.c005, URL <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1051/978-2-7598-2262-1.c005/html>
- Mari JL, Vergnault C (2020) *Sismique en forage et diagraphies acoustiques*. EDP Sciences, DOI 10.1051/978-2-7598-2262-1, URL <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1051/978-2-7598-2262-1/html>
- Marie-Aude MA Ploix (2016) *ÉTUDE DE L'ATTÉNUATION DES ONDES ULTRASONORES. APPLICATION AU CONTRÔLE NON DESTRUCTIF DES SOUDURES EN ACIER INOXYDABLE AUSTÉNIQUE*. PhD thesis, NSA de Lyon (France), Lyon France
- Mavko G, Dvorkin J, Mukerji T (2009) *The rock physics handbook: tools for seismic analysis of porous media*, 2nd edn. Cambridge University Press, Cambridge, UK New York
- Morris R, Grine D, Arkfeld T (1964) Using Compressional and Shear Acoustic Amplitudes for The Location of Fractures. *Journal of Petroleum Technology* 16(06):623–632, DOI 10.2118/723-PA, URL <https://onepetro.org/JPT/article/16/06/623/159763/Using-Compressional-and-Shear-Acoustic-Amplitudes>

- Möllhoff M, Bean C, Meredith P (2010) Rock fracture compliance derived from time delays of elastic waves. *Geophysical Prospecting* 58(6):1111–1122, DOI 10.1111/j.1365-2478.2010.00887.x, URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2478.2010.00887.x>
- Nourhan Tartoussi (2023) CARACTÉRISATION DES DISCONTINUITÉS DANS LE MASSIF ROCHEUX. PhD Thesis
- Oppenheim AV, Schaffer RW (2010) *Discrete-time signal processing*, 3rd edn. Pearson, Upper Saddle River
- Philip Siu, Yu Cheung (1984) Procédé pour la détection de fractures du sous-sol à l'aide d'un outil acoustique
- Philipp SL, Acocella V (eds) (2013) *Rock fractures in geological processes: abstracts of the presentations of the Symposium, London, 26 - 27 November 2013*. Universitätsdrucke, Univ.-Verl. Göttingen, Göttingen
- Proakis JG, Manolakis DG (2007) *Digital signal processing*, 4th edn. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., oCLC: ocm62804704
- Przebindowska A, Geerits T, Patterson D, Hellwig O (2016) Acoustic imaging away from the borehole using coherence-based migration. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2016*, Society of Exploration Geophysicists, Dallas, Texas, pp 790–794, DOI 10.1190/segam2016-13838662.1, URL <https://library.seg.org/doi/10.1190/segam2016-13838662.1>
- Pyrak-Nolte L, Morris J (2000) Single fractures under normal stress: The relation between fracture specific stiffness and fluid flow. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 37(1-2):245–262, DOI 10.1016/S1365-1609(99)00104-5, URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1365160999001045>
- Pyrak-Nolte LJ, Nolte DD (1992) Frequency dependence of fracture stiffness. *Geophysical Research Letters* 19(3):325–328, DOI 10.1029/91GL03179, URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/91GL03179>
- Pyrak-Nolte LJ, Myer LR, Cook NGW (1990) Transmission of seismic waves across single natural fractures. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 95(B6):8617–8638, DOI 10.1029/JB095iB06p08617, URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/JB095iB06p08617>
- Saito H, Hayashi K, Iikura Y (2004) Detection of formation boundaries and permeable fractures based on frequency-domain Stoneley wave logs. *Exploration Geophysics* 35(1):45–50, publisher: Taylor & Francis
- Schlumberger Wireline & Testing, (1998) *Log Interpretation Principles/Applications*. Schlumberger Wireline & Testing, Houston, Texas,
- Serra O (1984a) *The Acquisition of Logging Data: Part A*. Elsevier
- Serra O (1984b) *The Acquisition of Logging Data: Part A*. Elsevier
- Serra O (1984c) *Fundamentals of well-log interpretation*. No. 15A-15B in *Developments in petroleum science*, Elsevier ; Elf Aquitaine, Amsterdam ; New York : Pau
- Sheriff RE, Geldart LP (2006) *Exploration seismology*, 2nd edn. Cambridge Univ. Press, Cambridge
- Smith SA (2021) *Seismic Wave Propagation Across Single Fractures*. PhD Thesis
- Smith SW (1999) *The scientist and engineer's guide to digital signal processing*, 2nd edn. California Technical Pub, San Diego, Calif

- Telford WM, Geldart LP, Sheriff RE (1990) Applied geophysics, 2nd edn. Cambridge University Press, Cambridge, DOI 10.1017/CBO9781139167932
- Tse R, Cruden D (1979) Estimating joint roughness coefficients. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 16(5):303–307, DOI 10.1016/0148-9062(79)90241-9, URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0148906279902419>
- Wang H, Toksöz MN, Fehler MC (2020) Borehole Acoustic Logging – Theory and Methods. *Petroleum Engineering*, Springer International Publishing, Cham, DOI 10.1007/978-3-030-51423-5, URL <http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-51423-5>
- Wicquart E, Mari JL (1992a) Traitement des diagraphies acoustiques. Troisième partie : caractérisation d'un réservoir par diagraphies acoustiques obtenues avec un outil dipolaire. *Rev Inst Fr Pét* 47(4):443–464, DOI 10.2516/ogst:1992033, URL <http://ogst.ifpenergiesnouvelles.fr/10.2516/ogst:1992033>
- Wicquart E, Mari JL (1992b) Traitement des diagraphies acoustiques. Troisième partie : caractérisation d'un réservoir par diagraphies acoustiques obtenues avec un outil dipolaire. *Rev Inst Fr Pét* 47(4):443–464, DOI 10.2516/ogst:1992033, URL <http://ogst.ifpenergiesnouvelles.fr/10.2516/ogst:1992033>
- Yang J, Yang D, Han H, Qiu L, Cheng Y (2021) A wave propagation model with the Biot and the fractional viscoelastic mechanisms. *Sci China Earth Sci* 64(3):364–376, DOI 10.1007/s11430-020-9668-5, URL <https://link.springer.com/10.1007/s11430-020-9668-5>
- Yuangui Zhang, Bangrang Di, Feng Gao, and Lei Li (2023) Effects of Background Porosity on Seismic Anisotropy in Fractured Rocks: An Experimental Study
- Zhang Z, Zhu J, Deng J (2023) A comparative study for determining rock joint normal stiffness with destructive uniaxial compression and nondestructive ultrasonic wave testing. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 15(7):1700–1712, DOI 10.1016/j.jrmge.2022.10.010, URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1674775522002207>
- Zhou Z, Caspari E, Barbosa ND, Greenwood A, Holliger K (2022) Mechanical Compliance of Individual Fractures in a Heterogeneous Rock Mass From Production-Type Full-Waveform Sonic Data. *JGR Solid Earth* 127(8):e2022JB024302, DOI 10.1029/2022JB024302, URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2022JB024302>