

Analyse de la méthode P-RAT et caractérisation des argiles  
de la mer Champlain par la vitesse de propagation des ondes  
de cisaillement  $V_s$

par

Guillaume DION GAGNIER

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE  
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION  
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 31 MAI 2019

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Guillaume Dion Gagnier, 2019



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

**PRÉSENTATION DU JURY**

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Yannic Éthier, directeur de mémoire  
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Mourad Karray, codirecteur de mémoire  
Département de génie civil et de génie du bâtiment à l'Université de Sherbrooke

M. Pierre Bélanger, président du jury  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Alan Carter, membre du jury  
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 3 MAI 2019

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE



## REMERCIEMENTS

Mon passage à l'ETS a été marquant et je suis heureux de pouvoir utiliser cet espace pour remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin à rendre la réalisation de ce projet possible.

Tout d'abord, j'ai eu la chance d'être entouré de deux directeurs de recherche qui ont tous les deux une passion contagieuse pour la géotechnique. Je remercie le professeur Yannic Éthier, directeur de cette recherche, pour son support et, en particulier, pour la chance qu'il m'a donnée en me sélectionnant pour ce projet. Je remercie également le professeur Mourad Karray, codirecteur de cette recherche, qui m'a fait grandement bénéficier de sa profonde connaissance de la dynamique des sols et du traitement des signaux.

Je remercie aussi Dania Elbeggo qui m'a énormément aidé durant ce projet. Sans elle, je serais encore dans le laboratoire à essayer de comprendre le fonctionnement des appareils. J'ai eu beaucoup de plaisir à travailler avec toi.

Je remercie tous les employés de soutien : Richard Prowt, Alexis Vadeboncoeur, Sébastien Ménard et Mickaël Dubois qui m'ont aidé à la fabrication des montages et à la réussite des essais géotechniques. Je vous remercie surtout pour la patience dont vous avez fait preuve à répondre à toutes mes questions.

De plus, je remercie les autres étudiants qui m'ont aidé à l'assemblage des cellules Ahmed Mhenni et Quentin Lecuru. À eux s'ajoutent le professeur Pierre Bélanger et son étudiant Aurélien Thon qui m'ont gracieusement permis de mesurer les déplacements des anneaux piézoélectriques.

Enfin, je remercie ma famille, ma mère et mes beaux-parents ainsi que ma conjointe Catherine, qui m'ont accompagné et supporté moralement et financièrement tout au long de mon parcours universitaire. Je vous dois tous beaucoup et je vous suis infiniment redevable.



# **Analyse de la méthode P-RAT et caractérisation des argiles de la mer Champlain par la vitesse de propagation des ondes de cisaillement $V_s$**

Guillaume DION GAGNIER

## **RÉSUMÉ**

La vitesse de propagation des ondes de cisaillement  $V_s$ , en plus d'être un paramètre essentiel à l'analyse parasismique des sites, peut aussi servir à la caractérisation des sols. Actuellement, plusieurs relations empiriques avec  $V_s$  existent dans la littérature, mais peu de ces relations s'appliquent aux argiles de la mer Champlain. Ce mémoire a donc pour but de caractériser en laboratoire des argiles de la mer Champlain par  $V_s$  avec la méthode P-RAT. En plus d'ajouter des mesures de  $V_s$  à la banque de données existantes, ce mémoire vise à améliorer les connaissances quant à la réalisation de ces mesures qui présentent, à ce jour, encore des défis complexes.

À cause de son efficacité à mesurer  $V_s$ , la méthode P-RAT commence à être de plus en plus utilisée. Il a donc été entrepris, durant ce projet, d'automatiser la méthode d'interprétation des signaux et de caractériser avec des mesures en laboratoire les anneaux P-RAT. Cette entreprise avait comme double objectif d'améliorer l'objectivité de l'interprétation des signaux et la conception des anneaux piézoélectriques.

L'analyse des résultats a d'abord démontré que l'algorithme d'automatisation permet d'automatiser la méthode d'interprétation seulement lorsque la fenêtre de fréquence servant à la convergence est connue. Aux vues des résultats, la fenêtre de fréquence semble varier en cours d'essai et ce, d'un échantillon à l'autre et d'un capteur à l'autre.

En ce qui concerne la caractérisation des anneaux P-RAT, il a été démontré que les différents types d'assemblage P-RAT ont un impact sur le comportement piézoélectrique de l'anneau en réduisant leur fréquence de résonance et en diminuant leur déplacement. L'analyseur d'impédance a aussi témoigné de son efficacité quant à la caractérisation des anneaux P-RAT.

De plus, dix échantillons d'argile de la mer Champlain du Québec ont été caractérisés avec un essai de consolidation dans lequel des anneaux P-RAT ont été insérés. En somme, l'analyse montre que l'indice de plasticité et le pourcentage d'argile ont une influence sur  $V_s$ .

**Mots clés :** vitesse des ondes de cisaillement, argile, caractérisation, piézoélectricité, automatisation.





# **Analysis of the P-RAT Method and Characterization of Champlain Clays by the Shear Wave Velocity $V_s$**

Guillaume DION GAGNIER

## **ABSTRACT**

The shear wave velocity  $V_s$  is a key parameter for seismic analysis which can also be used to characterize soil. In the literature, there are many empirical relations with  $V_s$  but few of them are for the Champlain clays. Therefore, the goal of this project is to characterize Champlain clays by  $V_s$  with the P-RAT method. In addition to increase the numbers of  $V_s$  measurements to the existing databank, this project aims to improve knowledge about the realization of these measurements that still present complex challenges.

As the P-RAT method has proven its efficiency to measure  $V_s$ , this technique has been increasingly used. Therefore, the writer has undertaken to automatize the P-RAT method and to characterize with laboratory measurements the P-RAT rings with a double objective of improving the validity of the results and the conception of the piezoelectric rings.

The results have first shown that the algorithm, which has been developed to automatize the P-RAT method, can only converge to a good value of  $V_s$  if the frequency window is known. Moreover, the results indicate that the frequency window seems to be changing during the test. Furthermore, changes have been observed depending on the type of soil and on the type of piezoelectric rings used during the test.

In addition, the characterization of the P-RAT rings has shown that the different types of P-RAT model have an impact on the piezoelectric behaviour by reducing their resonance frequency and decreasing their displacement. Also, the impedance analyzer has been identified has a suitable device to characterize the P-RAT rings.

Finally, ten samples of Champlain clays have been characterized with a consolidation test wherein P-RAT rings have been inserted. The analysis of the results shows that  $V_s$  would be influenced by the percentage of clay particles and the plasticity index.

**Keywords:** shear wave, clay, characterization, piezoelectricity, automatization.



## TABLE DES MATIÈRES

|                                                                                                         | Page |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| INTRODUCTION .....                                                                                      | 1    |
| CHAPITRE 1 ÉTAT DES CONNAISSANCES .....                                                                 | 5    |
| 1.1 Les ondes dans les sols .....                                                                       | 5    |
| 1.1.1 Ondes de volume.....                                                                              | 5    |
| 1.1.2 Ondes de surface.....                                                                             | 8    |
| 1.1.3 La dispersion, la vitesse de phase et la vitesse de groupe.....                                   | 9    |
| 1.1.4 Domaine des très petites déformations .....                                                       | 11   |
| 1.2 Méthodes d'évaluation de $V_s$ <i>in situ</i> .....                                                 | 13   |
| 1.3 Méthodes d'évaluation de $V_s$ en laboratoire .....                                                 | 14   |
| 1.3.1 Colonne de résonance .....                                                                        | 14   |
| 1.3.2 Les éléments piézoélectriques.....                                                                | 16   |
| 1.3.2.1 La piézoélectricité.....                                                                        | 17   |
| 1.3.2.2 Les bilames piézoélectriques .....                                                              | 19   |
| 1.3.2.3 Les ultrasons .....                                                                             | 21   |
| 1.4 Méthodes d'interprétation du signal .....                                                           | 22   |
| 1.4.1 Domaine du temps .....                                                                            | 22   |
| 1.4.1.1 Temps d'arrivée de la première onde S .....                                                     | 23   |
| 1.4.1.2 Temps de parcours entre deux points caractéristiques.....                                       | 23   |
| 1.4.1.3 Corrélation croisée .....                                                                       | 24   |
| 1.4.2 Domaine fréquentiel.....                                                                          | 26   |
| 1.4.2.1 Vitesse de phase.....                                                                           | 27   |
| 1.5 Déphasage des sous-systèmes.....                                                                    | 27   |
| 1.6 Méthode P-RAT .....                                                                                 | 29   |
| 1.6.1 Anneaux piézoélectriques .....                                                                    | 30   |
| 1.6.2 Méthode d'interprétation .....                                                                    | 34   |
| 1.7 Caractérisation des argiles avec $V_s$ .....                                                        | 40   |
| 1.7.1 Paramètres d'influences .....                                                                     | 40   |
| 1.7.2 Relations empiriques existantes.....                                                              | 42   |
| CHAPITRE 2 DÉVELOPPEMENT D'UN ALGORITHME D'AUTOMATISATION DE<br>LA MÉTHODE D'INTERPRÉTATION P-RAT ..... | 45   |
| 2.1 Motivations .....                                                                                   | 45   |
| 2.2 Méthodologie .....                                                                                  | 45   |
| 2.2.1 Paramètres d'entrée.....                                                                          | 45   |
| 2.2.2 Paramètres inconnus .....                                                                         | 50   |
| 2.2.3 Algorithme .....                                                                                  | 51   |
| 2.3 Discussion .....                                                                                    | 53   |
| CHAPITRE 3 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL .....                                                                 | 59   |
| 3.1 Introduction.....                                                                                   | 59   |

|                                                                                       |                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2                                                                                   | Descriptions des sols utilisés .....                                | 59  |
| 3.3                                                                                   | Montage expérimental .....                                          | 61  |
| 3.3.1                                                                                 | Anneaux P-RAT.....                                                  | 63  |
| 3.4                                                                                   | Déroulement des essais .....                                        | 67  |
| 3.4.1                                                                                 | Essais de caractérisation .....                                     | 67  |
| 3.4.2                                                                                 | Essais de consolidation .....                                       | 69  |
| 3.4.3                                                                                 | Essais de $V_s$ .....                                               | 71  |
| CHAPITRE 4 CARACTÉRISATIONS DES ASSEMBLAGES D'ANNEAUX P-RAT .....                     |                                                                     | 73  |
| 4.1                                                                                   | Introduction.....                                                   | 73  |
| 4.2                                                                                   | Modèle du circuit équivalent avec l'impédance .....                 | 74  |
| 4.3                                                                                   | Analyse du mouvement de l'anneau par interférométrie au laser.....  | 79  |
| 4.3.1                                                                                 | Montage expérimental de l'interférométrie au laser .....            | 80  |
| 4.3.2                                                                                 | Déroulement de l'essai à l'interférométrie .....                    | 82  |
| 4.3.3                                                                                 | Résultats de l'interférométrie.....                                 | 84  |
| 4.4                                                                                   | Déformations en cisaillement induites par l'anneau P-RAT .....      | 90  |
| 4.5                                                                                   | Effets de l'encapsulation de l'anneau P-RAT.....                    | 92  |
| 4.6                                                                                   | Discussion.....                                                     | 96  |
| CHAPITRE 5 RÉSULTATS.....                                                             |                                                                     | 101 |
| 5.1                                                                                   | Introduction.....                                                   | 101 |
| 5.2                                                                                   | Résultats des essais de consolidation et des mesures de $V_s$ ..... | 101 |
| 5.3                                                                                   | Caractérisation des échantillons.....                               | 110 |
| 5.4                                                                                   | Corrélations empiriques .....                                       | 111 |
| CHAPITRE 6 DISCUSSION .....                                                           |                                                                     | 117 |
| CONCLUSION.....                                                                       |                                                                     | 119 |
| ANNEXE I PLANS DE L'ENCAPSULATION DE L'ANNEAU P-RAT DE MARQUE<br>STEMINC .....        |                                                                     | 123 |
| ANNEXE II CALIBRATIONS DES CAPTEURS P-RAT.....                                        |                                                                     | 127 |
| ANNEXE III DÉPLACEMENTS MESURÉS À L'INTERFÉROMÈTRE.....                               |                                                                     | 133 |
| ANNEXE IV RÉSULTATS DE LA GRANULOMÉTRIE DES PARTICULES FINES ....                     |                                                                     | 153 |
| ANNEXE V RÉSULTATS INDIVIDUELS DE $V_{SI}/OCR^K$ .....                                |                                                                     | 161 |
| LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....                                             |                                                                     | 171 |
| Algorithme 2.1 Algorithme d'automatisation de la méthode d'interprétation P-RAT ..... |                                                                     | 52  |

## LISTE DES TABLEAUX

|                                                                                             | Page |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Tableau 1.1 Paramètres influençant le module de cisaillement et le taux d'amortissement ... | 41   |
| Tableau 2.1 Paramètres à connaître pour l'automatisation de la méthode P-RAT .....          | 46   |
| Tableau 2.2 Configurations possibles du système P-RAT en fonction de la polarité.....       | 48   |
| Tableau 3.1 Description des échantillons d'argile .....                                     | 60   |
| Tableau 3.2 Propriétés des matériaux piézoélectriques .....                                 | 64   |
| Tableau 3.3 Types d'anneaux P-RAT utilisés pour chaque échantillon.....                     | 67   |
| Tableau 4.1 Paramètres caractéristiques des anneaux P-RAT selon l'impédance .....           | 78   |
| Tableau 4.2 Caractéristiques techniques du contrôleur de laser Polytec OFV-2570.....        | 81   |
| Tableau 4.3 Différences entre les déplacements radiaux pré et post assemblage.....          | 88   |
| Tableau 4.4 Déformation en cisaillement en fonction de la tension.....                      | 91   |
| Tableau 5.1 Caractéristiques des argiles.....                                               | 110  |
| Tableau 5.2 Coefficients de régression K.....                                               | 113  |



## LISTE DES FIGURES

|                                                                                                                                                                       | Page |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Figure 1.1 Les ondes de volumes.....                                                                                                                                  | 6    |
| Figure 1.2 Les ondes de surface.....                                                                                                                                  | 9    |
| Figure 1.3 Courbe typique de dégradation de $G/G_{\max}$ en fonction de la déformation en cisaillement $\gamma$ et valeur seuil du domaine élastique $\gamma_H$ ..... | 12   |
| Figure 1.4 Schéma de la colonne de résonance .....                                                                                                                    | 16   |
| Figure 1.5 Effet direct et inverse d'un matériau piézoélectrique .....                                                                                                | 17   |
| Figure 1.6 Phénomène d'inversion de la polarisation d'un matériau ferroélectrique .....                                                                               | 19   |
| Figure 1.7 Bilames piézoélectriques .....                                                                                                                             | 20   |
| Figure 1.8 Arrivée de la première onde S typique avec l'effet de champ proche.....                                                                                    | 23   |
| Figure 1.9 Détermination du temps de parcours par la corrélation croisée .....                                                                                        | 25   |
| Figure 1.10 Comparaison de l'angle de phase du modèle SDOF et <i>Beam on Springs</i> .....                                                                            | 29   |
| Figure 1.11 Schéma général d'un anneau P-RAT .....                                                                                                                    | 31   |
| Figure 1.12 Schéma d'un assemblage d'anneau P-RAT encapsulé .....                                                                                                     | 32   |
| Figure 1.13 Axe un cylindre piézoélectrique polarisé radialement .....                                                                                                | 33   |
| Figure 1.14 Exemple d'interprétation avec la méthode P-RAT .....                                                                                                      | 39   |
| Figure 2.1 Polarité de l'anneau piézoélectrique en fonction du sens du champ électrique.....                                                                          | 47   |
| Figure 2.2 Comparaison de la réception des différentes configurations possibles de la méthode P-RAT .....                                                             | 49   |
| Figure 2.3 Exemple de mauvaise convergence de $V_s$ causée par la dérivée de la vitesse de phase .....                                                                | 54   |
| Figure 2.4 Impact sur la convergence du déphasage corrigé en fonction de la fenêtre de fréquences .....                                                               | 56   |
| Figure 3.1 Schéma du montage expérimental.....                                                                                                                        | 62   |
| Figure 3.2 Assemblage de l'anneau dans la pierre poreuse avec une languette d'appuie.....                                                                             | 63   |

|                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 3.3 Schéma des deux types de pierre poreuse centrale (en croix et scindée) .....                   | 66  |
| Figure 3.4 Pressoir servant à insérer l'anneau métallique d'un essai de consolidation .....               | 70  |
| Figure 3.5 Signaux d'émission utilisés.....                                                               | 72  |
| Figure 4.1 Module d'impédance des différentes configurations et modèles d'anneaux P-RAT.....              | 75  |
| Figure 4.2 Angle de phase des différentes configurations et modèles d'anneaux P-RAT .....                 | 76  |
| Figure 4.3 Schéma du montage de l'interférométrie .....                                                   | 80  |
| Figure 4.4 Photo de l'interféromètre utilisé.....                                                         | 82  |
| Figure 4.5 Points de mesure avec l'interféromètre.....                                                    | 83  |
| Figure 4.6 Déplacement radial avant l'assemblage .....                                                    | 85  |
| Figure 4.7 Sens du mouvement en fonction de l'orientation de l'émission.....                              | 86  |
| Figure 4.8 Déplacements radiaux maximaux mesurés .....                                                    | 87  |
| Figure 4.9 Déplacements longitudinaux maximaux mesurés .....                                              | 88  |
| Figure 4.10 Facteur de qualité mécanique, $Q$ , évalué à partir des résultats de l'interférométrie.....   | 90  |
| Figure 4.11 Effets de l'encapsulation sur les anneaux P-RAT Steminc lors de la réception ..               | 93  |
| Figure 4.12 Effets de l'encapsulation sur les anneaux P-RAT Steminc au déphasage corrigé                  | 95  |
| Figure 4.13 Comparaison des ratios des déplacements radiaux et longitudinaux .....                        | 97  |
| Figure 5.1 Résultats de la consolidation et des mesures de $V_s$ des échantillons GD10.....               | 102 |
| Figure 5.2 Résultats de la consolidation et des mesures de $V_s$ des échantillons TM12, TM17 et TM29..... | 104 |
| Figure 5.3 Résultats de la consolidation et des mesures de $V_s$ des échantillons MT02 et PS3 .....       | 106 |
| Figure 5.4 Résultats de la consolidation et des mesures de $V_s$ des échantillons SCB1 et SCB2 .....      | 108 |
| Figure 5.5 $V_{s1}/OCR^K$ en fonction de l'indice de vides.....                                           | 114 |



## LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

|        |                                                                                   |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| AP     | Anneau Piézoélectrique                                                            |
| BP     | Bilame Piézoélectrique                                                            |
| ÉTS    | École de technologie supérieure                                                   |
| FFT    | Transformation Rapide de Fourier ou <i>Fast Fourier Transform</i>                 |
| IFFT   | Transformation Inverse Rapide de Fourier ou <i>Inverse Fast Fourier Transform</i> |
| MASW   | <i>Multichannel Analysis of Surface Waves</i>                                     |
| MMASW  | <i>Multi Modal Analysis of Surface Wave</i>                                       |
| Onde L | Onde Love                                                                         |
| Onde P | Onde primaire ou onde de compression                                              |
| Onde R | Onde de Rayleigh                                                                  |
| Onde S | Onde secondaire ou onde de cisaillement                                           |
| P-RAT  | <i>Piezoelectric Ring-Actuator Technique</i>                                      |
| PZT    | Titano-Zirconate de Plomb                                                         |
| SASW   | <i>Spectral Analysis of Surface Waves</i>                                         |
| SDOF   | Système à un degré de liberté                                                     |



## LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Note : Les unités des symboles sont indiquées entre parenthèses après leur définition. Les unités sont conformes à la norme ASTM D653-14 (2014). Les unités applicables sont indiquées par les lettres majuscules en italiques suivantes :

$D$  : Unité sans dimension

$F$  : Unité de force

$L$  : Unité de longueur

$T$  : Unité de temps

$I$  : Unité d'intensité électrique

|                                   |                                                                                           |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ac                                | Activité de l'argile ( $D$ )                                                              |
| B                                 | Module d'élasticité volumétrique ( $FL^{-2}$ )                                            |
| C                                 | Pourcentage passant le tamis 2 $\mu\text{m}$ ou le contenu en particules d'argile ( $D$ ) |
| Cc                                | Indice de compression ( $D$ )                                                             |
| C <sub>1</sub>                    | Condensateur d'un résonateur dans un circuit équivalent ( $T^2 I^2 F^{-1} L^{-1}$ )       |
| d                                 | Distance entre les capteurs piézoélectrique ( $L$ )                                       |
| d <sub>ij</sub>                   | Constante de charge piézoélectrique ( $ITF^{-1}$ )                                        |
| D                                 | Taux d'amortissement ( $D$ )                                                              |
| E <sub>i</sub>                    | Champ électrique dans la direction i ( $FT^{-1}I^{-1}$ )                                  |
| E                                 | Champ électrique ( $FT^{-1}I^{-1}$ )                                                      |
| e                                 | Indice des vides ( $D$ )                                                                  |
| f                                 | Fréquence ( $T^{-1}$ )                                                                    |
| f <sub>a</sub>                    | Fréquence d'antirésonance ( $T^{-1}$ )                                                    |
| f <sub>0</sub> , f <sub>r</sub>   | Fréquence de résonance ou fréquence propre ( $T^{-1}$ )                                   |
| G                                 | Module de cisaillement ( $FL^{-2}$ )                                                      |
| G <sub>max</sub> , G <sub>0</sub> | Module de cisaillement maximal ( $FL^{-2}$ )                                              |
| G <sub>s</sub>                    | Densité des grains secs ( $D$ )                                                           |

|                   |                                                                               |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| $k_{ij}$          | Coefficient de couplage électromécanique ( $D$ )                              |
| $I_p$             | Indice de plasticité ( $D$ )                                                  |
| $k$               | Numéro de l'onde ( $D$ )                                                      |
| LIR               | Ratio d'incrément de charge ( $D$ )                                           |
| $L_1$             | Inductance d'un résonateur dans un circuit équivalent en série ( $LFT^2$ )    |
| $M$               | Module à déformation latérale empêchée ( $FL^{-2}$ )                          |
| $N_{\text{corr}}$ | Nombre de $2\pi$ de décalage de la courbe de déphasage corrigée ( $D$ )       |
| $N_{\text{th}}$   | Nombre de $2\pi$ de décalage de la courbe de déphasage théorique ( $D$ )      |
| $Q$               | Facteur de qualité mécanique ( $D$ )                                          |
| $R$               | Résistance électrique ( $LFT^{-1}F^2$ )                                       |
| $r^2$             | Coefficient de détermination ( $D$ )                                          |
| $R_1$             | Résistance d'un résonateur d'un circuit équivalent en série ( $LFT^{-1}F^2$ ) |
| $s_{ij}$          | Constante de complaisance élastique ( $L^2F^{-1}$ )                           |
| $S_r$             | Degré de saturation ( $D$ )                                                   |
| $t$               | Temps ( $T$ )                                                                 |
| $v$               | Vitesse ( $LT^{-1}$ )                                                         |
| $V$               | Tension ( $FLF^{-1}T^{-1}$ )                                                  |
| $V_{\text{gr}}$   | Vitesse de groupe ( $LT^{-1}$ )                                               |
| $V_p$             | Vitesse de propagation des ondes de compression ( $LT^{-1}$ )                 |
| $V_{\text{ph}}$   | Vitesse de phase ( $LT^{-1}$ )                                                |
| $V_R$             | Vitesse de propagation des ondes de Rayleigh ( $LT^{-1}$ )                    |
| $V_s$             | Vitesse de propagation des ondes de cisaillement ( $LT^{-1}$ )                |

|               |                                                                                                        |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $V_{s1}$      | Vitesse de propagation des ondes de cisaillement normalisée ( $LT^{-1}$ )                              |
| $V_{s30}$     | Vitesse de propagation des ondes de cisaillement moyenne sur une profondeur de 30 mètres ( $LT^{-1}$ ) |
| $X$           | Réactance électrique ( $LFT^{-1}I^2$ )                                                                 |
| $Z$           | Impédance électrique ( $LFT^{-1}I^2$ )                                                                 |
| $\gamma$      | Déformation en cisaillement ( $D$ )                                                                    |
| $\gamma_{tl}$ | Valeur seuil de l'élasticité à la déformation en cisaillement ( $D$ )                                  |
| $\theta$      | Angle de phase ( $D$ )                                                                                 |
| $\nu$         | Coefficient de Poisson ( $D$ )                                                                         |
| $\rho$        | Masse volumique ( $ML^{-3}$ )                                                                          |
| $\sigma'_p$   | Contrainte de préconsolidation ( $FL^{-2}$ )                                                           |
| $\sigma'_v$   | Contrainte effective verticale ( $FL^{-2}$ )                                                           |
| $\phi_{corr}$ | Déphasage corrigé ( $D$ )                                                                              |
| $\phi_e$      | Phase de l'émetteur ( $D$ )                                                                            |
| $\phi_{err}$  | Erreur sur le déphasage ( $D$ )                                                                        |
| $\phi_{exp}$  | Phase expérimentale ( $D$ )                                                                            |
| $\phi_{ini}$  | Erreur sur le déphasage initiale connue ( $D$ )                                                        |
| $\phi_r$      | Phase du récepteur ( $D$ )                                                                             |
| $\phi_{th}$   | Déphasage théorique ou total ( $D$ )                                                                   |
| $\omega$      | Pulsation ( $T^{-1}$ )                                                                                 |
| $\omega_L$    | Limite de liquidité ( $D$ )                                                                            |



## INTRODUCTION

La vitesse de propagation des ondes de cisaillement  $V_s$  est un paramètre essentiel à l'évaluation parasismique des sols. Elle sert notamment dans le code national du bâtiment, via le  $V_s$  moyen sur une profondeur de 30 m,  $V_{s30}$  à catégoriser la réponse sismique des sites (CNBC, 2005). Elle sert, également, à de très petites déformations, comme valeur d'entrée des modèles de courbes de dégradation du module de cisaillement (Atkinson, 2000; Darendeli, 2001). Dès lors, plusieurs essais *in situ* sont utilisés par l'industrie et la recherche pour mesurer  $V_s$  et  $V_{s30}$ . Ces essais *in situ* donnent de bonnes informations quant au profil de  $V_s$  d'un site donné. Or, comme  $V_s$  est contrôlée par la rigidité en cisaillement du squelette granulaire, elle est un paramètre intrinsèque au sol. On peut donc l'utiliser afin de déterminer des paramètres importants de la géotechnique, comme en font foi les études de Hussien et Karray (2016) et L'Heureux et Long (2017) qui démontrent l'efficacité de  $V_s$  à la caractérisation des sols. L'attrait de mesurer  $V_s$  *in situ* est d'autant plus grand qu'il est possible de la mesurer sur de grandes surfaces avec des essais non intrusifs comme le MASW, le MMASW et le SASW. Il devient donc important de faire des modèles de prédictions des paramètres usuels de la géotechnique en fonction de  $V_s$ . Cependant, pour être en mesure de faire des corrélations empiriques entre  $V_s$  et les paramètres géotechniques, on doit obtenir un vaste éventail de caractéristiques pour un sol donné. Et ceci est plus facilement atteignable avec des essais en laboratoire qu'avec des essais *in situ*. Car, en laboratoire, on contrôle la variation de certains paramètres, il est donc possible d'obtenir plusieurs mesures de  $V_s$  en fonction des paramètres contrôlés (Clayton, 2011) pour un même sol. Un des buts de ce mémoire est d'établir des corrélations de  $V_s$  avec des paramètres de la géotechnique en laboratoire.

Les sols étudiés, pour ce projet, sont les argiles de la mer Champlain. Ces argiles sont dites sensibles, car elles perdent presque toute leur résistance en cisaillement une fois qu'elles sont remaniées. De plus, elles sont très présentes dans la vallée du Saint-Laurent où est située la quasi-totalité du patrimoine bâti du Québec. Il est donc important de bien connaître son comportement sous des charges dynamiques lors de la conception d'ouvrage géotechnique.

La méthode utilisée pour mesurer  $V_s$  en laboratoire est la méthode P-RAT qui a été développée dans les laboratoires de l'Université de Sherbrooke (Éthier, 2009; Gamal El-Dean, 2007; Karray, Romdhan, Hussien, & Ethier, 2015). Cette méthode a démontré son efficacité et elle est de plus en plus utilisée (Elbeggo, Éthier, Karray, & Dubé, 2017; Lecuru, 2015; Mhenni, Hussien, & Karray, 2015). Dès lors, dans les laboratoires de l'École de technologie supérieure (ÉTS) et de l'Université de Sherbrooke, plusieurs modèles d'anneaux P-RAT ont été créés par les différents utilisateurs. À cause de leur assemblage particulier, il n'existe pas de modèle théorique qui décrit le comportement sous tension des anneaux P-RAT. En conséquence, l'amplitude des déplacements radiaux et longitudinaux des anneaux P-RAT est inconnue. Il est donc difficile de comparer objectivement les différents modèles d'anneaux P-RAT. Mhenni (2016) a donc entrepris de les modéliser numériquement. Son modèle numérique a permis d'améliorer le concept et de caractériser le comportement des anneaux. À partir de là, il reste à valider la modélisation par des mesures en laboratoire. Il a ainsi été décidé, en parallèle de la caractérisation des argiles de la mer Champlain selon  $V_s$ , de caractériser avec des mesures en laboratoire les anneaux P-RAT qui sont utilisés à l'ÉTS. De plus, dans le but d'augmenter l'objectivité des mesures de  $V_s$  avec la méthode d'interprétation P-RAT ainsi que d'en augmenter leur nombre, il est désormais important d'automatiser la méthode. C'est pourquoi, pour ce mémoire, un algorithme d'automatisation de la méthode d'interprétation P-RAT a été développé.

Le premier chapitre de ce mémoire porte sur l'état des connaissances actuelles jugées d'intérêt quant à la mesure de  $V_s$ . Ainsi, il est tout d'abord présenté les différents types d'ondes avec des notions de mécanique des ondes pertinentes au sujet. Ensuite, il est question des différentes méthodes qui permettent de mesurer  $V_s$  *in situ* et en laboratoire avec un accent sur les méthodes en laboratoire qui utilisent des éléments piézoélectriques. Par la suite, les méthodes d'interprétation utilisées en laboratoire sont présentées et critiquées. Enfin, ce chapitre se conclut par les paramètres géotechniques qui influencent  $V_s$ . Il est suivi d'une présentation des corrélations empiriques de  $V_s$  les plus communes de la littérature.



Le deuxième chapitre expose l'algorithme développé dans le but d'explorer l'automatisation de la méthode d'interprétation P-RAT. Dans ce chapitre, les paramètres qui doivent être connus avant de lancer l'algorithme sont détaillés. Par la suite, il est présenté toutes les étapes qui permettent à l'algorithme de déterminer les inconnus nécessaires à la mesure de  $V_s$ . Ce chapitre se termine avec une discussion sur la validité des résultats obtenus par l'algorithme.

Le troisième chapitre porte sur le programme expérimental. Il commence par une description détaillée des échantillons d'argile de Champlain qui ont été analysés. Il se poursuit avec une description du montage expérimental mis en place pour mesurer  $V_s$  et caractériser les argiles. Ce dernier se termine par une explication du déroulement de chaque essai fait lors de ce mémoire.

Le quatrième chapitre a comme sujet de comparer les caractéristiques piézoélectriques des différents types d'anneaux et d'assemblages P-RAT utilisés lors de ce mémoire. Leurs caractéristiques piézoélectriques sont tout d'abord mesurées par un analyseur de réseau et ensuite par un essai d'interférométrie. Par la suite, les déformations induites au sol par les anneaux sont analysées. Enfin, ce chapitre se conclut par une discussion sur les résultats obtenus où une méthode de caractérisation des anneaux P-RAT est proposée.

Le cinquième chapitre présente les résultats des différents essais et de tous les échantillons qui ont été analysés. Tout d'abord, les résultats bruts sont illustrés, c'est-à-dire les résultats des essais de consolidation, de  $V_s$  en fonction de la contrainte effective verticale et de  $V_s$  en fonction de l'indice des vides. Ensuite, ce chapitre présente le résultat complet des essais de caractérisation des argiles Champlain. Finalement, plusieurs corrélations empiriques, en fonction des caractéristiques spécifiques de l'argile, sont analysées.

Le dernier chapitre est une discussion sur les résultats de la caractérisation des argiles de la mer Champlain selon  $V_s$ . Cette discussion apportera des explications, via des liens avec la littérature scientifique, aux principales observations constatées lors de la caractérisation.



## CHAPITRE 1

### ÉTAT DES CONNAISSANCES

#### 1.1 Les ondes dans les sols

Lorsqu'un sol subit une sollicitation mécanique, comme lors d'un séisme, il se déforme. Le mouvement des particules de sol occasionné par cette déformation est représenté sous forme d'ondes. Dans un milieu infini, les ondes qui se propagent sont des ondes de volume. Tandis que dans un milieu borné, comme c'est le cas réellement, il y a aussi génération d'ondes de surface aux limites du milieu (Kramer, 1996).

##### 1.1.1 Ondes de volume

L'équation générale qui décrit le mouvement d'une onde de volume à une dimension dans une tige infiniment longue est :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1.1)$$

Tiré de Kramer (1996, p. 148) et dans laquelle  $v$  est la vitesse de l'onde,  $u$  est le déplacement selon l'axe  $x$  et  $t$  est le temps.

Les ondes de volume se divisent en deux types qui sont présentés à la figure 1.1.

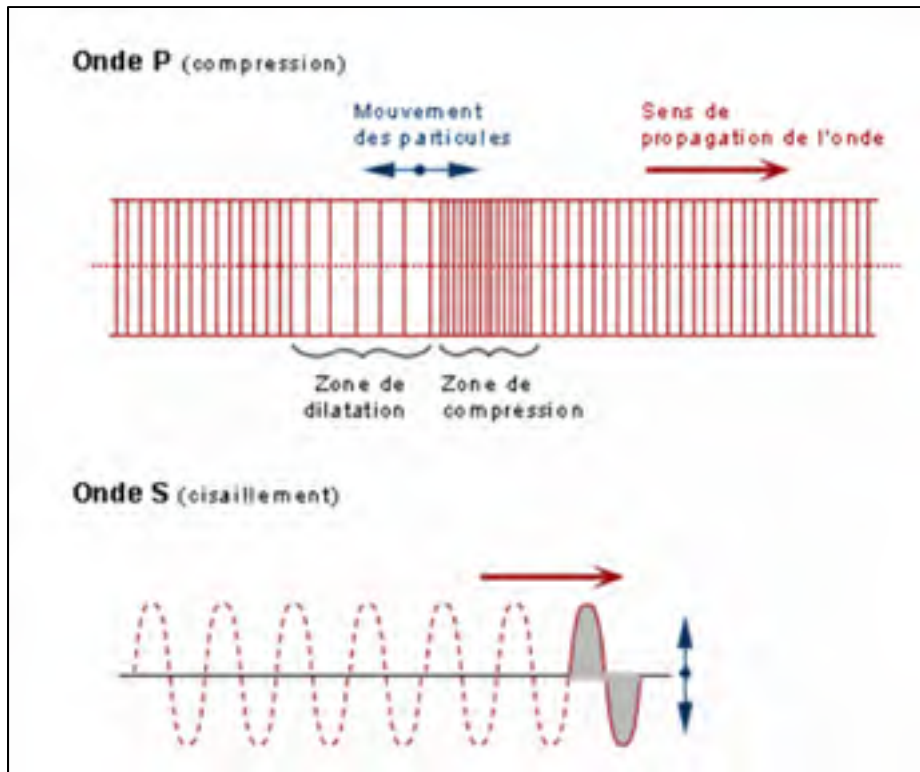


Figure 1.1 Les ondes de volumes  
Adaptée de Bourque (1996)

La propagation des ondes primaires, ondes P, ou ondes de compression dans un sol se fait par la dilatation et la compression sans la rotation des particules. Le mouvement des particules est, dans un milieu isotrope, parallèle à la direction de la propagation de l'onde. En considérant, un mouvement des particules et une propagation de l'onde selon un axe  $x$ , l'équation (1.1) se réécrit pour une onde P de cette façon :

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{M}{\rho} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} \quad (1.2)$$

Tiré de Santamarina, Klein, et Fam (2001, p. 189), dans laquelle,  $M$  est le module de déformation latérale empêchée,  $\rho$  est la masse volumique,  $u$  est le déplacement l'axe  $x$  et  $t$  est le temps.

De l'équation précédente, il découle que la vitesse de propagation des ondes de compression  $V_p$  s'écrit :

$$V_p = \sqrt{\frac{M}{\rho}} = \sqrt{\frac{B + 4G/3}{\rho}} \quad (1.3)$$

Où  $B$  est le module d'élasticité volumétrique et  $G$  est le module de cisaillement. L'équation (1.3) montre que les ondes  $P$  se propagent autant à travers les fluides que les solides, car ces deux matériaux possèdent un  $B$  non nul.

Dans un sol saturé, dont le degré de saturation  $S_r$  est de 100%,  $V_p$  ne permet pas de caractériser adéquatement le sol. En effet, comme  $V_p$  se propage à travers le squelette granulaire et le fluide contenus dans le sol, sa vitesse est influencée par le  $B$  de l'eau et le  $B$  du matériau granulaire. Le  $B$  de l'eau ( $\approx 2,18$  GPa) – l'eau est souvent considérée quasi incompressible – étant largement supérieur à celui d'un sol,  $V_p$  mesurée dans un sol saturé est par conséquent dominée par celle de l'eau : environ 1500 m/s (Clayton, 2011; Richart, Hall, & Woods, 1970). En revanche, lorsqu'un sol non-saturé,  $V_p$  permet d'obtenir des caractéristiques du sol comme  $S_r$  (Stokoe, Joh, & Woods, 2004).

Les ondes  $S$ , ondes de cisaillement ou ondes secondaires, se propagent, quant à elles, par un mouvement oscillatoire perpendiculaire à la direction de la propagation. Son déplacement peut être représenté par un mouvement en torsion dans une tige infiniment longue (Kramer, 1996). Ainsi, en considérant une propagation de l'onde  $S$  selon un axe  $x$  et un mouvement des particules selon un axe  $y$ , le mouvement de l'onde  $S$  se décrit par la modification de l'équation (1.1) de cette façon :

$$\frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} \quad (1.4)$$

Tiré de Santamarina et al. (2001, p. 189), dans laquelle  $G$  est le module de cisaillement de la tige.

À partir de l'équation (1.4), la vitesse de propagation de l'onde de cisaillement  $V_s$  s'écrit de cette façon :

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \Leftrightarrow G = \rho V_s^2 \quad (1.5)$$

L'équation (1.5) montre que les ondes S ont besoin, pour se propager, d'un milieu qui possède une résistance au cisaillement, soit  $G > 0$ . Dès lors, les ondes S ne peuvent pas se propager dans un fluide (Kramer, 1996). Elles ne sont donc pas influencées par la présence de l'eau interstitielle dans le sol, comme l'est  $V_p$ , lorsque le sol est complètement saturé.  $V_s$  est de cette façon un paramètre intéressant à la caractérisation des sols, car elle ne dépend que des propriétés du squelette granulaire qu'elle traverse.

En faisant, le rapport  $V_p/V_s$ , il est possible d'écrire les vitesses uniquement en fonction du coefficient de Poisson,  $\nu$  :

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2 - 2\nu}{1 - 2\nu}} \quad (1.6)$$

En sachant que  $\nu$  est théoriquement pour des matériaux granulaires compris entre 0 et 0,5 (Rothenburg, Berlin, & Bathurst, 1991), le rapport  $V_p/V_s$  en fonction de  $\nu$  montre que  $V_p$  est toujours supérieure à  $V_s$ .

### 1.1.2 Ondes de surface

Aux frontières d'un milieu qui subit une perturbation mécanique, il y a génération d'ondes de surface. Ces ondes de surface se propagent à l'interface du sol et de l'air. Il en existe deux

types qui sont illustrés à la figure 1.2 : les ondes de love, ondes L, et les ondes de Rayleigh, ondes R.

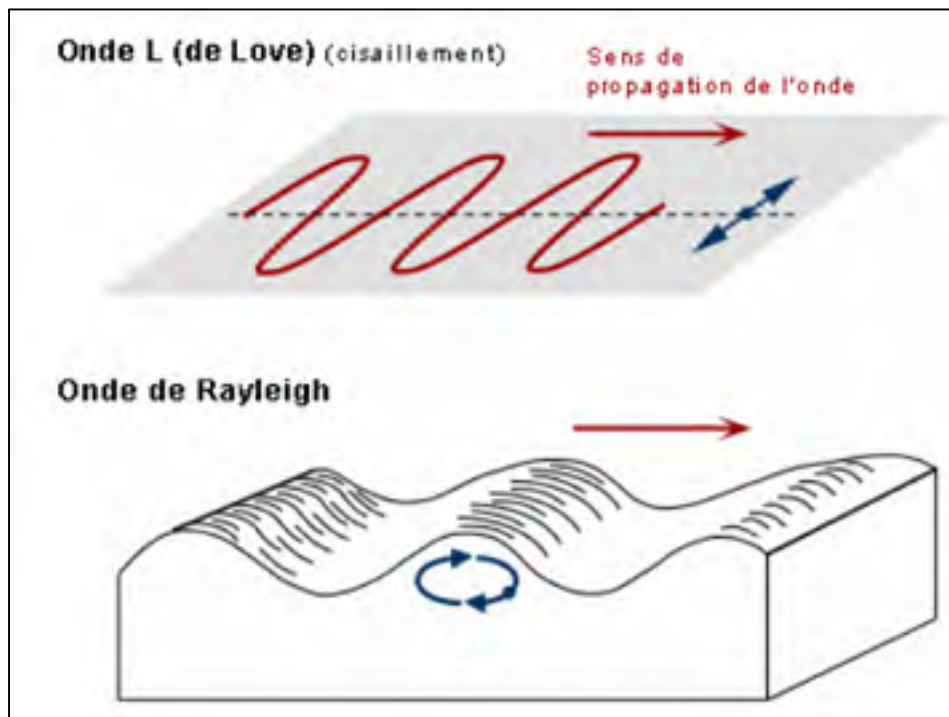


Figure 1.2 Les ondes de surface  
Adaptée de Bourque (1996)

Les ondes L sont des ondes de cisaillement à la surface dans un plan uniquement horizontal. Tandis que les ondes R se propagent à la surface selon un mouvement des particules elliptique comme une vague. Les ondes R sont utilisées et analysées pour mesurer  $V_s$  par les méthodes d'évaluation *in situ* non-intrusives.

### 1.1.3 La dispersion, la vitesse de phase et la vitesse de groupe

Un milieu est dispersif lorsque la vitesse des ondes qui s'y propagent varie en fonction de leur fréquence. La dispersion survient lorsqu'une onde subit des interférences par un changement géométrique - comme pour les ondes de surface -, par une dissipation de l'énergie ou par une excitation des modes de résonance (Alvarado & Coop, 2012). L'hétérogénéité locale des sols pourrait aussi avoir une influence sur la dispersion des ondes qui serait causée par une interaction hétérogène entre les particules (Rio, 2006; Santamarina et al., 2001).

Lorsqu'il y a une perturbation du milieu, comme lors du mouvement d'un émetteur piézoélectrique, un paquet d'ondes est émis. Ce paquet d'ondes comprend plusieurs ondes élémentaires superposées qui possèdent chacune une phase ainsi qu'une fréquence propre constante. Le paquet d'ondes se propage globalement à une vitesse appelée vitesse de groupe  $V_{gr}$ . Cette vitesse est dépendante de chacune des vitesses de phase  $V_{ph}$  des ondes élémentaires. La  $V_{ph}$  s'évalue en sélectionnant un point arbitraire représentatif du paquet d'ondes, comme un pic ou un creux, et la vitesse à laquelle ce point se déplace dans l'espace est la vitesse de phase. Elle est décrite par l'équation suivante :

$$V_{ph} = \frac{\omega}{k} \quad (1.7)$$

Adaptée de Rio (2006, p. 99), où  $\omega$  est la pulsation et  $k$  le numéro de l'onde.

La  $V_{gr}$  est dépendante de chacune des  $V_{ph}$  qui constituent le paquet d'ondes. L'équation qui relie les deux vitesses est la suivante :

$$V_{gr} = V_{ph} + k \frac{dV_{ph}}{dk} \quad (1.8)$$

Adaptée de Kramer (1996, p. 165).

La dispersion survient dès que la vitesse de groupe est différente de la vitesse de phase. Cela se produit de deux manières. La première, la dispersion normale, c'est quand la vitesse de groupe diminue en fonction de la fréquence. Ceci est occasionné par des interférences entre les ondes. La seconde est la dispersion inverse, qui est l'opposée de la première, où la vitesse de groupe augmente en fonction de la fréquence. Cette augmentation est causée par la viscoélasticité du milieu et par les modes de résonance (Alvarado & Coop, 2012). Or, pour qu'un milieu soit non-dispersif, il faut que  $dV_{ph}/dk = 0$ . C'est seulement dans ce cas que la vitesse de groupe égale la vitesse de phase (Kramer, 1996).



#### 1.1.4 Domaine des très petites déformations

Pour un sol élastique, isotrope et linéaire, la vitesse de propagation des ondes de cisaillement est directement reliée au module de cisaillement maximal  $G_{\max}$  ou  $G_0$  par la relation suivante :

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (1.9)$$

Tiré de Dyvik et Madshus (1985, p. 5).

La relation précédente n'est valable que si le matériau est élastique, homogène et isotrope, ce qui n'est pas le cas des sols dont leur nature ainsi que leur méthode de déposition par strates les rendent non linéaires, hétérogènes et anisotropes (Holtz & Kovacs, 1991).

Toutefois, il est raisonnable pour une strate de sol en particulier de supposer qu'elle soit isotrope et homogène transversalement. Il faudrait donc pour être rigoureux ajouter aux paramètres élastiques, présentés précédemment,  $G$  et  $v$ , une dimension verticale et horizontale (Clayton, 2011). Pour ce mémoire, les paramètres élastiques mesurés sont tous verticaux et, par un souci de simplicité, la direction de la mesure ne sera pas explicitée par un indice  $v$ .

Le comportement des sols n'est pas non plus linéaire. À de très petites déformations,  $G$  est à son maximum, il est dès lors noté  $G_{\max}$ . Dès que les déformations augmentent et dépassent la valeur seuil d'élasticité  $\gamma_u$ ,  $G$  se dégrade, comme le montre la figure 1.3 d'une courbe typique de dégradation de  $G$ .

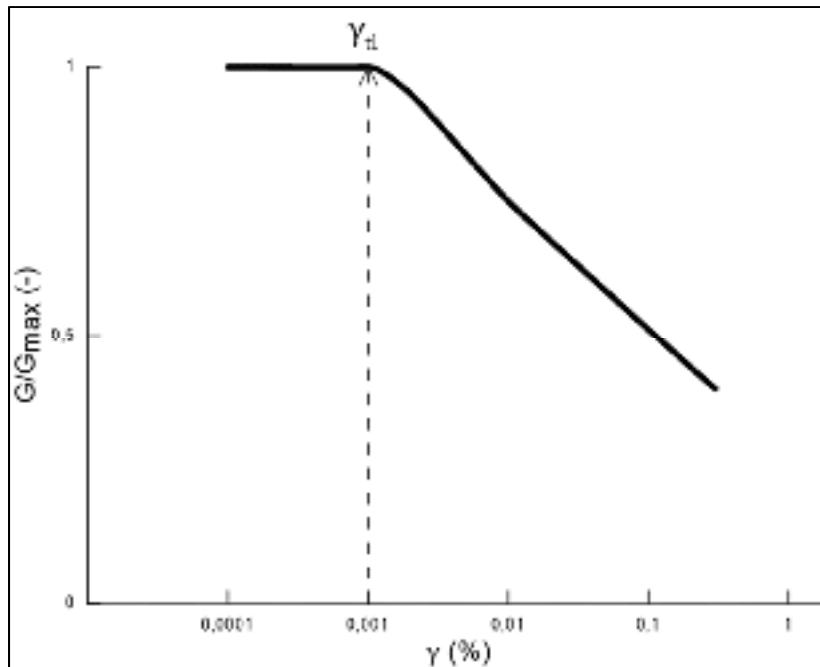


Figure 1.3 Courbe typique de dégradation de  $G/G_{\max}$  en fonction de la déformation en cisaillement  $\gamma$  et valeur seuil du domaine élastique  $\gamma_{el}$   
Adaptée de Darendeli (2001, p. 57)

Cette dégradation montre que les sols se comportent de façon non linéaire et que leurs paramètres élastiques dépendent de la déformation.

Pour que les sols aient un comportement élastique, il faut que les déformations qu'ils subissent n'affectent pas leurs comportements mécaniques. En d'autres mots, il faut que les déformations soient inférieures à  $\gamma_{el}$  pour que les  $V_s$  de soient dans le domaine des très petites déformations. De cette façon, le comportement du matériau n'est pas altéré par la déformation –  $G$  est constant – et c'est toujours le contact entre les grains qui contrôle les déformations (Éthier, 2009).

La  $\gamma_{el}$  dépend du type de sol, de la longueur des particules (Santamarina et al., 2001) et de l'indice de plasticité (Georgiannou, Rampello, & Silvestri, 1991; Vucetic & Dobry, 1991). Il est cependant admis que la valeur seuil minimale pour la majorité des sols est de 0,001% (Clayton, 2011; Darendeli, 2001; Dyvik & Madhus, 1985). Il faut donc que lors des essais en laboratoire la déformation occasionnée par l'appareil soit inférieure à cette valeur seuil pour

qu'elle soit considérée dans le domaine élastique et que l'équation (1.9) puisse s'appliquer. Il s'agit dès lors de la condition à respecter pour que le spécimen demeure intact et que les mesures de  $V_s$  soient reproductibles dans les mêmes conditions.

## 1.2 Méthodes d'évaluation de $V_s$ *in situ*

Il existe plusieurs façons de mesurer  $V_s$  sur le terrain. Elles peuvent se diviser en deux catégories.

La première catégorie d'essais est dite directe. Elle contient principalement les méthodes « holes », c'est-à-dire les essais *crosshole*, *downhole* et *uphole*. Ces essais mesurent  $V_s$  en fonction du temps que met une onde à parcourir une distance connue entre un émetteur et un récepteur. Ce sont des essais intrusifs, car ils nécessitent tous un forage dans lequel il y est mis un émetteur ou un récepteur. Au lieu de faire un forage, il est aussi possible de placer le récepteur dans un cône sismique et d'émettre une onde depuis la surface. Cet essai est aussi intrusif, car il nécessite d'enfoncer le cône dans le sol (Éthier, 2009; Hunter et al., 2015).

La deuxième catégorie de méthodes contient les essais indirects. Ces méthodes sont non-intrusives, car elles utilisent les ondes de surface de Rayleigh, ondes R, afin d'évaluer  $V_s$ . La vitesse de propagation des ondes R,  $V_R$ , peut être reliée à  $V_s$  par le coefficient de Poisson, selon la relation suivante :

$$V_R \cong \frac{0,874+1,117\nu}{1+\nu} V_s \quad (1.10)$$

Tiré de Stokoe II (2008, p. 17).

Les méthodes les plus connues qui utilisent les ondes R sont la *Spectral Analysis of Surface Waves* (SASW), la *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW) et la *Multi Modal Analysis of Surface Waves* (MMASW). Les recherches récentes ont démontré l'efficacité de ces méthodes quant à la détermination d'un profil de  $V_s$  en fonction de la profondeur. Sauf que

les analyses *in situ* ne sont pas en mesure d'évaluer facilement les propriétés du sol qui influencent  $V_s$ , autres que celles spécifiques au site étudié. En effet,  $V_s$  dépend de plusieurs caractéristiques du sol (*Voir* section 1.7.1) et c'est seulement avec des essais en laboratoire qu'il est possible d'obtenir suffisamment de résultats variés pour quantifier l'influence de chacun. Ainsi, en faisant des essais de laboratoire pour déterminer  $V_s$ , les essais *in situ* pourront à terme, en plus de mesurer  $V_s$ , caractériser les sols (Éthier, 2009; Karray et al., 2015).

### 1.3 Méthodes d'évaluation de $V_s$ en laboratoire

En laboratoire, les essais tentent de reproduire sur un échantillon de sol les conditions qui existent sur le terrain et de les faire varier. La variation contrôlée des conditions, comme la contrainte exercée sur un sol et l'indice des vides du sol, permet d'apprécier l'influence qu'elles ont sur les propriétés du sol étudié. Cela permet aussi de prédire avec un certain degré de certitude l'impact d'un événement quelconque sur les conditions de terrain.

Peu d'essais dynamiques en laboratoire ont été développés pour mesurer la résistance du sol à de très petites déformations. Kramer (1996) dénombre trois essais : la colonne de résonance, les ultrasons et les bilames piézoélectriques. À ces essais s'ajoutent, les anneaux piézoélectriques AP développés dans le laboratoire de l'Université de Sherbrooke qui constituent la méthode utilisée dans ce mémoire. Il est à noter que seule la colonne de résonance n'utilise pas d'éléments piézoélectriques.

Dans ce chapitre, les principales méthodes sont brièvement abordées afin de justifier le choix des AP.

#### 1.3.1 Colonne de résonance

Les premières mesures de paramètres dynamiques des sols proviennent essentiellement de la colonne de résonance (Hardin & Black, 1968). La colonne de résonance mesure directement  $G_{max}$  et non  $V_s$ , contrairement aux essais avec des éléments piézoélectriques qui seront traités plus loin.

Un essai avec la colonne de résonance consiste à envelopper un échantillon de sol cylindrique dans une membrane et de le placer entre deux plaques. La plaque du haut est mobile et la plaque du bas est fixe. La rotation de la plaque du haut crée un moment de torsion et une déformation en cisaillement à l'échantillon qui est captés par un capteur placé sur la plaque fixe du bas. La géométrie de l'échantillon et de l'appareil, le moment de torsion et la déformation en cisaillement étant connus, il est possible de déterminer  $G_{\max}$ .  $V_s$  est ensuite déduit par l'équation (1.9).

Il est à noter que, selon la norme ASTM D4015-15e1 (2015), l'appareil peut mesurer des déformations jusqu'à 0,2% ce qui est au-delà de la valeur seuil d'élasticité  $\gamma_{tl}$ . Or, pour que l'appareil mesure  $G_{\max}$ , l'utilisateur doit s'assurer que les déformations restent inférieures à  $\gamma_{tl}$ . En plus, la déformation n'est pas constante, elle est nulle au centre de l'échantillon et maximale à son pourtour, ce qui, selon Kramer (1996), a un impact sur la valeur du  $G$  mesuré.

Lors d'un essai à la colonne de résonance, les contraintes axiales et radiales peuvent être modifiées, ce qui permet d'évaluer l'évolution de  $G$  en fonction de la contrainte. Pour ce faire, à chaque niveau de charge appliquée, il est nécessaire de calibrer la fréquence de rotation de la plaque du haut de telle sorte qu'elle vibre à la fréquence de résonance du système. Pour plus de détails, la norme ASTM D4015-15e1 (2015) a établi une procédure à employer pour la colonne de résonance, ce qui n'est pas le cas des autres méthodes d'essai dynamique sur les sols en laboratoire. La figure 1.4 montre un schéma de la colonne de résonance.

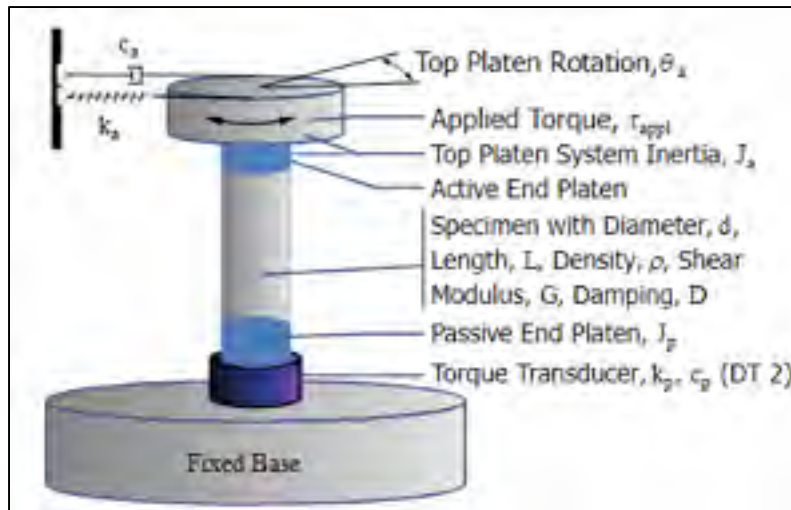


Figure 1.4 Schéma de la colonne de résonance  
Tiré de la norme ASTM D4015-15e1 (2015, p. 2)

Dans le cadre de ce projet, il a été choisi de ne pas utiliser cette méthode, car elle nécessite un appareillage complexe et une expertise approfondie des manipulations afin d'obtenir des résultats satisfaisants (Éthier, 2009).

### 1.3.2 Les éléments piézoélectriques

L'utilisation des éléments piézoélectriques pour mesurer  $V_s$  dans les sols est apparue vers la fin des années 70 (Shirley, 1978; Shirley & Hampton, 1978). L'avantage de leur utilisation est que grâce à leur petite taille, ils sont faciles à insérer dans les appareils conventionnels de la géotechnique, permettant ainsi de faire deux essais concomitants. Dès lors, les éléments piézoélectriques ont été mis dans des cellules triaxiales, des cellules œdométriques, des essais à cisaillement direct et des colonnes de résonance afin de mesurer  $V_s$  en même temps que de faire ces essais (Dyvik & Madhus, 1985). Ils ont aussi l'avantage de pouvoir être placés dans plusieurs directions et d'être en mesure de déterminer l'anisotropie du sol (Clayton, 2011; Roesler, 1979).

### 1.3.2.1 La piézoélectricité

Les matériaux piézoélectriques sont composés, au niveau moléculaire, de molécules chargées positivement et négativement dont le centre de gravité coïncide. Elles sont donc, sans une sollicitation extérieure, neutres. Cependant, dès que le matériau est déformé par une force extérieure, les molécules chargées se déplacent, ce qui change la position du centre de gravité et crée un dipôle électrique. Lorsque ces dipôles forment un champ électrique à la surface du matériau, le matériau est dit polarisé. L'orientation de ce dipôle et le moment causé par le déplacement du centre de gravité indiquent le sens et la force de la polarisation (Arnau Vives, 2004). La polarisation est un phénomène réversible, c'est-à-dire que lorsqu'un matériau piézoélectrique est déformé il génère un champ électrique, effet direct, et lorsqu'il est soumis à un champ électrique il se déforme, effet inverse : ces effets sont illustrés à la figure 1.5. Le comportement intrinsèque des matériaux piézoélectriques est donc régi par le couplage de son comportement électrique et mécanique.

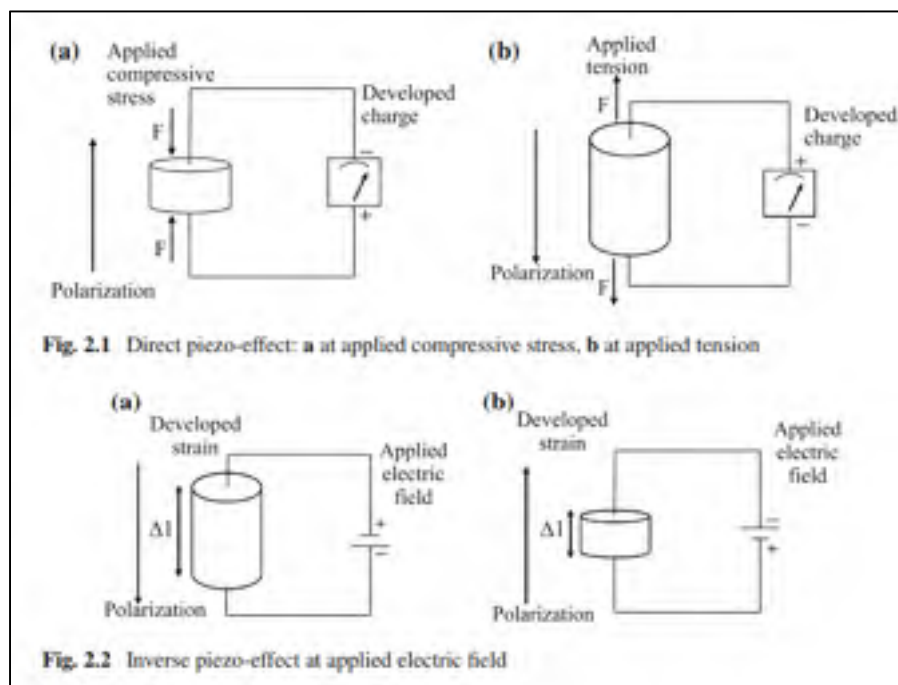


Figure 1.5 Effet direct et inverse d'un matériau piézoélectrique  
Tiré de Dineva, Gross, Müller, et Rangelov (2014, p. 8)

C'est grâce à ce couplage, électrique et mécanique, qu'il est possible de faire propager une onde d'un élément piézoélectrique à un autre. En effet, un élément est soumis à un champ électrique qui le déforme, ce qui génère une onde mécanique dans le sol. Ensuite, l'autre élément capte cette onde qui le déforme et génère un champ électrique interprétable par un oscilloscope.

Les matériaux piézoélectriques utilisés dans le domaine de la géotechnique ont aussi la propriété d'être ferroélectriques. Cette propriété permet à un matériau d'avoir une polarisation spontanée orientée selon un champ électrique extérieur (Jaffé, Cook, & Jaffé, 1971). Ce champ électrique influence la polarisation dans un domaine à  $180^\circ$ , donc dans une orientation diamétralement opposée. Cette orientation peut aussi être influencée par une contrainte extérieure exercée perpendiculairement à la polarisation du champ électrique, mais dans un domaine à  $90^\circ$ . La figure 1.6 schématise l'impact de la contrainte et du champ électrique sur l'orientation de la polarisation du cristal piézoélectrique.



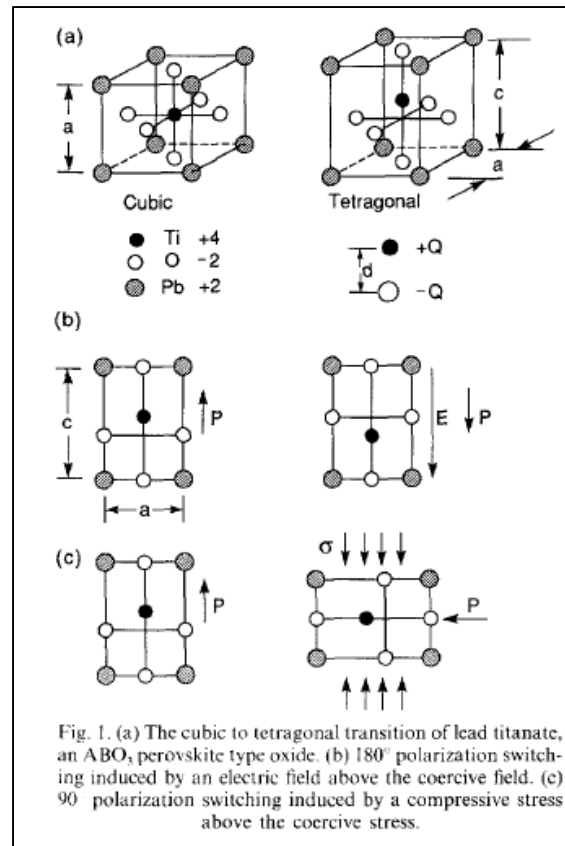


Figure 1.6 Phénomène d'inversion de la polarisation d'un matériau ferroélectrique  
Tiré de Hwang, Lynch, et McMeeking (1995, p. 2074)

Cette propriété de modifier l'orientation de la polarisation est utile pour la génération de signaux, sauf qu'elle peut, comme le soulignent Hwang et al. (1995), dépolariser le matériau. Il y a dépolarisation lorsque la distribution de la polarisation spontanée n'est pas homogène à la surface du matériau. En d'autres mots, la dépolarisation survient lorsque les dipôles des molécules sollicitées ne sont plus toutes orientés dans le même axe.

### 1.3.2.2 Les bilames piézoélectriques

La majorité des chercheurs en géotechnique utilise les bilames piézoélectriques (BP) pour déterminer  $V_s$  en laboratoire. Les BP sont constitués de deux plaques de céramiques piézoélectriques PZT (Titano-Zirconate de Plomb) jointes par une plaque métallique conductrice. Les céramiques sont collées l'une contre l'autre selon leur polarité, si la direction

de leur polarité est opposée, elles forment un capteur en série, et si la direction de leur polarité est dans le même sens, elles forment un capteur en parallèle. La figure 1.7 illustre les assemblages possibles des BP.

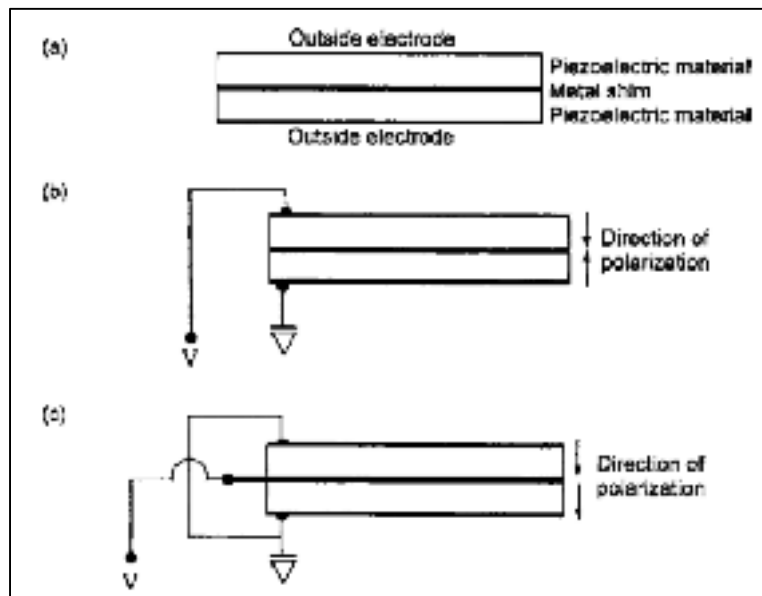


Figure 1.7 Bilames piézoélectriques

- a) Schéma des bilames piézoélectriques b) Polarisation en série c) Polarisation en parallèle  
 Tiré de Lee et Santamarina (2005, p. 1064)

L'assemblage des BP en parallèle a l'avantage de transmettre deux fois plus de mouvements mécaniques que l'assemblage en série. Tandis que l'assemblage en série génère deux fois plus de charges électriques. C'est pourquoi l'assemblage en parallèle est utilisé comme émetteur et celui en série comme récepteur (Dyvik & Madshus, 1985).

Pour mesurer  $V_s$ , les BP sont installés aux extrémités d'un échantillon de sol. Un des BP agit comme émetteur et l'autre comme récepteur. À cause de leurs propriétés piézoélectriques, avec un courant électrique, l'émetteur transmet une onde mécanique au sol. Cette onde traverse le sol pour être ensuite captée par le récepteur qui la transforme en signal électrique. De cette façon,  $V_s$  est la distance que parcourt l'onde  $S$ , entre l'émetteur et le récepteur, divisée par le temps entre son émission et sa réception.

Le mouvement des BP est semblable au fléchissement d'une poutre en porte-à-faux. Dans un sol, ce mouvement se traduit par un déplacement perpendiculaire aux particules par rapport au front de la propagation de l'onde : la même définition que l'onde S. Sauf que ce mouvement dans un sol, comme le montrent Lee et Santamarina (2005), n'est pas purement en cisaillement ; il transmet aussi des ondes P incidentes. Ces ondes P sont beaucoup plus rapides que les ondes S, elles peuvent donc généralement être dissociables. Cependant, les éléments piézoélectriques en géotechnique sont insérés dans des appareils de mesures conventionnels, comme un œdomètre, qui ont des espaces restreints et, bien souvent, des parois rigides. Or, dans ce genre d'espace, les ondes P incidentes sont réfléchies par les parois et elles se superposent aux ondes S, rendant difficile la dissociation des deux ondes. Ce phénomène est souvent appelé l'effet de champ proche (Arulnathan, Boulanger, & Riemer, 1998).

Arulnathan et al. (1998) montrent qu'il est possible d'atténuer l'effet de champ proche en augmentant le ratio de la distance entre les capteurs  $d$  par rapport à la longueur d'onde  $\lambda$ . Ils suggèrent qu'un ratio  $d/\lambda > 2$  donne une erreur minimale quant à la détermination de  $V_s$ . Ce critère n'est pas toujours atteignable (Arulnathan et al., 1998; Wang, Lo, Yan, & Dong, 2007). Effectivement, dans un essai de consolidation avec BP classique, pour une fréquence d'émission de 5 kHz, une  $V_s$  de l'argile de 150 m/s et une distance entre les capteurs de 18 mm, le ratio  $d/\lambda$  est de 0,6. Ce ratio est d'autant plus réduit que la distance entre les capteurs des BP est comprise entre la pointe de l'émetteur et du récepteur.

C'est dans l'optique de diminuer la quantité d'ondes incidentes P émises, d'éliminer la pénétration de l'échantillon de sol par les éléments piézoélectriques et d'augmenter la distance entre les capteurs que les anneaux piézoélectriques P-RAT ont été conçus (Éthier, 2009). Ces anneaux sont le sujet de la section 1.6.1.

### **1.3.2.3 Les ultrasons**

Le fonctionnement de la méthode avec des ultrasons est semblable aux BP. Elle utilise des éléments piézoélectriques disposés aux extrémités d'un échantillon. Un capteur sert à émettre

une onde ultrasonique et un capteur sert à recevoir l'onde. La distance entre les capteurs étant connue, il est possible de déterminer la propagation de l'onde avec le temps de parcours de l'onde émise (Kramer, 1996). La fréquence d'émission est la différence majeure entre les BP et les ultrasons : la fréquence de l'onde émise par les BP est dans le domaine sonore contrairement aux ultrasons.

## 1.4 Méthodes d'interprétation du signal

À ce jour, il n'existe pas de consensus quant à la méthode à employer pour interpréter le signal reçu par des éléments piézoélectriques (Clayton, 2011). Arulnathan et al. (1998) présentent quatre façons d'interpréter les signaux : trois dans le domaine du temps et une dans le domaine fréquentiel. Dans leurs études, ils évaluent les erreurs potentielles de chacune des méthodes d'interprétation. C'est dans cette lignée que s'inscrit ce chapitre. Il présente le fonctionnement ainsi que les limites de chacune des méthodes. Il est important de les comprendre afin d'être en mesure de comparer les résultats obtenus dans ce mémoire avec ceux de la littérature.

### 1.4.1 Domaine du temps

De prime abord, l'interprétation du signal reçu par les éléments piézoélectriques dans le domaine du temps est simple. Il s'agit de la distance entre les capteurs,  $d$ , divisée par le temps,  $t$ , que met l'onde S à parcourir cette distance :

$$V_s = \frac{d}{t} \quad (1.11)$$

Sauf que, comme mentionné précédemment, la réception de l'onde S est oblitérée, lors des essais en laboratoire, par l'effet de champ proche et par les interférences des ondes P incidentes et réfléchies sur les parois rigides. Il devient donc difficile de déterminer exactement le temps de parcours de l'onde S. Il existe dans la littérature plusieurs façons d'évaluer  $t$ , dont trois sont présentées ci-après.

### 1.4.1.1 Temps d'arrivée de la première onde S

Le temps d'arrivée selon la première arrivée de l'onde S est le temps qui sépare le début de l'onde émise au début de l'onde reçue. Toutefois, l'arrivée de l'onde est souvent oblitérée par une déflexion du signal avant la réception de l'onde S ou par le bruit du signal. La déflexion est due à l'effet de champ proche. À cause de cet effet, il n'y a pas de consensus quant au moment à choisir pour l'arrivée de la première onde, la figure suivante illustre ce phénomène.

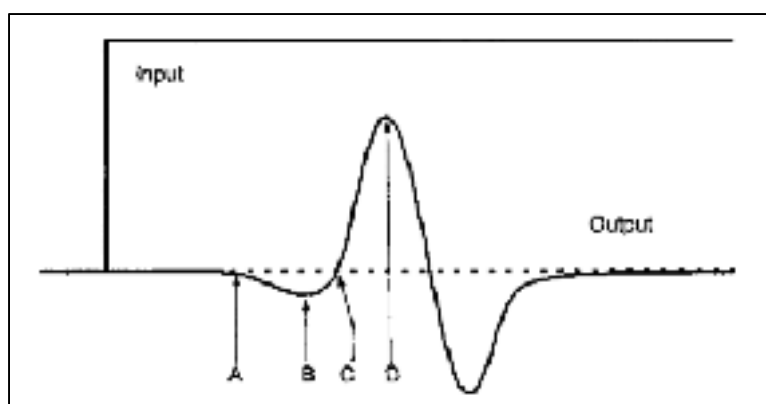


Figure 1.8 Arrivée de la première onde S typique avec l'effet de champ proche  
(A) première déflexion, (B) maximum de la déflexion, (C) retour à zéro après la déflexion et (D) premier pic  
Adaptée de Lee et Santamarina (2005, p. 1067)

Pour l'instant, c'est au choix de l'utilisateur de sélectionner le moment d'arrivée de la première onde selon le type de montage, le type d'application et le signal d'émission (Lee & Santamarina, 2005). Il peut choisir le temps de parcours de l'onde S à partir de la première déflexion, du maximum de déflexion, du retour à zéro après la déflexion et du premier pic. Ainsi, il peut y avoir une grande variabilité des résultats d'un laboratoire à l'autre.

### 1.4.1.2 Temps de parcours entre deux points caractéristiques

Cette méthode d'interprétation consiste à choisir le temps de parcours de l'onde S entre deux points caractéristiques de l'onde émise et reçue. Cette méthode est souvent appelée pic-à-pic ou *peak-to-peak*, car les points caractéristiques généralement choisis sont le pic de l'émission

et le pic de la réception. L'avantage de ce choix est d'avoir un point de référence pour le temps de parcours de l'onde en dehors de la déflexion causée par l'effet de champ proche. Il est à noter que cette méthode suppose que l'onde S est unidimensionnelle et qu'il n'y a pas d'ondes réfléchies et incidentes (Arulnathan et al., 1998).

Clayton (2011) démontre avec des évaluations de  $V_s$  par des chercheurs indépendants pour les mêmes signaux qu'il est moins subjectif d'utiliser la méthode pic-à-pic que le temps d'arrivée de la première onde. Par contre, il remarque que les deux donnent systématiquement des résultats différents. Il suggère donc de faire évaluer les signaux obtenus avec les BP par au moins deux utilisateurs indépendants et avec les deux méthodes.

#### 1.4.1.3 Corrélation croisée

La corrélation croisée est une méthode qui évalue le décalage temporel entre deux signaux. Le temps de parcours de l'onde S est de cette façon le maximum de décalage entre l'émission et la réception. Ce temps correspond aussi au temps de décalage pour lequel les deux signaux se superposent. Pour un signal  $S_1(t)$  et  $S_2(t)$ , la corrélation croisée s'écrit :

$$CC_{S_1-S_2}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_T S_1(t + \tau) S_2(t) dt \quad (1.12)$$

Tiré d'Arulnathan et al. (1998, p. 121), où  $T$  est le temps total du signal et  $\tau$  est le décalage temporel entre les deux signaux.

La corrélation croisée a les mêmes hypothèses que les méthodes précédentes d'interprétation des signaux, c'est-à-dire que la propagation de l'onde est unidimensionnelle et qu'il n'y a pas d'ondes incidentes ni réfléchies. Cependant, il faut aussi que les deux ondes comparées soient semblables. Elles doivent être de même nature et avoir une fréquence semblable (Karray et al., 2015).

La figure 1.9 illustre la détermination du temps de parcours  $t$  de l'onde S pour une onde d'émission en demi-sinus.

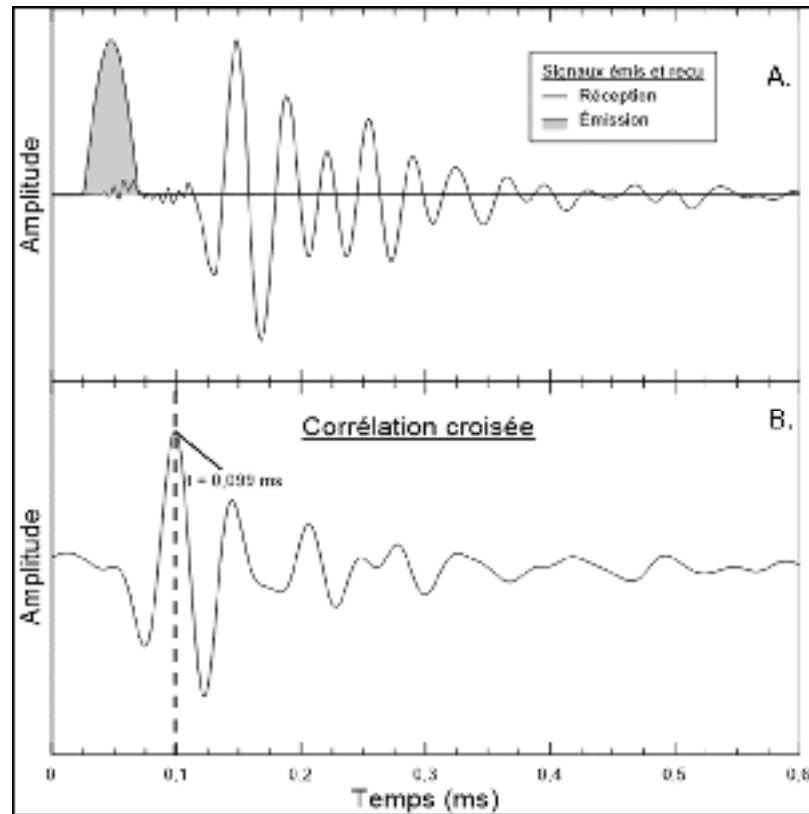


Figure 1.9 Détermination du temps de parcours par la corrélation croisée

La figure 1.9A illustre l'émission et la réception du signal et la figure 1.9B montre le décalage entre ces deux signaux en fonction du temps. Ainsi, le pic de décalage de la figure 1.9B correspond au temps de parcours de l'onde S déterminé par la corrélation croisée.

Même si cette méthode peut se faire dans le domaine temporel, elle peut aussi se faire dans le domaine fréquentiel. Comme le montrent Arulnathan et al. (1998), il faut tout d'abord transformer les signaux du domaine temporel au domaine fréquentiel par une transformation rapide de Fourier FFT :

$$L_{S1}(f) = FFT(S1(t)) \quad (1.13)$$

$$L_{S2}(f) = FFT(S2(t)) \quad (1.14)$$

Où S1 est l'émission, S2 est la réception et  $L_{S1}$ ,  $L_{S2}$  sont leur représentation dans le domaine fréquentiel en fonction de la fréquence  $f$ .

Ensuite, le spectre de puissance croisé est calculé :

$$G_{S1-S2}(f) = L_{S1}^*(f)L_{S2}(f) \quad (1.15)$$

Où  $L_{S1}^*$  est le conjugué de  $L_{S1}$ .

Enfin, il reste à retourner dans le domaine temporel avec une transformation inverse rapide de Fourier IFFT pour que la corrélation croisée soit complétée. Cette étape s'écrit mathématiquement de cette façon :

$$CC_{S1-S2}(\tau) = IFFT(G_{S1-S2}(f)) \quad (1.16)$$

Cette méthode a l'avantage de considérer l'ensemble du signal et non pas des points caractéristiques (Perret, 1995).

### 1.4.2 Domaine fréquentiel

Les méthodes dans le domaine fréquentiel ont été développées pour outrepasser la subjectivité, causée par l'effet de champ proche, de l'arrivée de la première onde S. Il en existe plusieurs : la méthode  $\pi$ -point (da Fonseca, Ferreira, & Fahey, 2009), l'analyse spectrale, les ondelettes (Bonal, Donohue, & McNally, 2012) et la vitesse de phase. Il est généralement observé que ces méthodes déterminent des  $V_s$  inférieures aux méthodes dans le domaine de temps



(Alvarado & Coop, 2012; Camacho-Tauta, Cascante, da Fonseca, & Santos, 2015; Karray et al., 2015). Seule cette dernière est présentée dans cet état des connaissances.

#### 1.4.2.1 Vitesse de phase

La méthode de la vitesse de phase considère que le milieu est non-dispersif, donc que la vitesse de groupe égale la vitesse de phase. En sachant que la pulsation  $\omega$  est  $2\pi f$  et que  $k$  peut s'exprimer en fonction du déphasage entre le signal émis et reçu  $\phi$  ainsi que la distance entre les capteurs  $d$ , l'équation (1.7) de la vitesse de groupe se réécrit :

$$V_{gr} = V_{ph} = 2\pi d \frac{df}{d\phi} \quad (1.17)$$

Tiré de Camacho-Tauta, Ali, Cascante, et da Fonseca (2017, p. 2)

L'angle de phase  $\phi(f)$  est obtenu par le dépliage de la phase (*unwrapped phase*) du spectre de puissance croisé entre les signaux émis et reçus (*Voir l'équation (1.15)*). La pente de l'angle de phase déplié est utilisée pour évaluer  $df/d\phi$ . Comme cette pente n'est pas linéaire, les auteurs Camacho-Tauta et al. (2017) proposent d'estimer la vitesse en fonction d'une pente évaluée selon une fenêtre de fréquences de 3.2 kHz qu'ils déplacent entre 20 et 50 kHz. À chaque fenêtre, les auteurs évaluent  $V_{ph}$  pour ensuite déterminer  $V_s$  par régression linéaire.

### 1.5 Déphasage des sous-systèmes

Certains auteurs suggèrent que les erreurs d'évaluation de  $V_s$  ne sont pas seulement causées par l'effet de champs proche, les ondes incidentes et les interférences, mais qu'il faut aussi y ajouter l'ensemble des déphasages du système qui cause un délai temporel et une modification de l'onde reçue (Brandenberg, Kutter, & Wilson, 2008; Lee & Santamarina, 2005; Wang et al., 2007). Ceci implique que chaque composante du système qui mesure  $V_s$  a une incidence sur le décalage temporel du signal. Le système peut être divisé en quatre sous-ensembles :

1. Les périphériques électroniques qui génèrent l'onde : le câblage et l'oscilloscope.
2. L'interaction entre le sol et l'élément piézoélectrique émetteur.
3. L'interaction entre le sol et l'élément piézoélectrique récepteur.
4. Les périphériques électroniques qui reçoivent l'onde : le câblage, l'amplificateur et la carte d'acquisition.

Si le délai causé par tous les sous-systèmes est connu, il est possible d'éliminer l'erreur dans l'évaluation de  $V_s$ . Pour ce faire, Wang et al. (2007) suggèrent de décrire le système dynamique des BP par trois fonctions de transfert qui relient l'onde émise  $X(\omega)$  à l'onde reçue  $Y(\omega)$  dans le domaine fréquentiel de cette façon :

$$Y(\omega) = H_S(\omega) * H_{sol}(\omega) * H_R(\omega) * X(\omega) \quad (1.18)$$

Adaptée de Wang et al. (2007, p. 565).  $H_S$  est la fonction de transfert qui inclut les sous-systèmes 1 et 2,  $H_{sol}$  est la fonction de transfert du sol et  $H_R$  est la fonction de transfert des sous-systèmes 3 et 4.

Wang et al. (2007) montrent que  $H_{sol}$  a un impact négligeable sur le déphasage de  $10^{-7}$  s et que le déphasage le plus important provient de l'interaction entre les capteurs et le sol. Ce déphasage est causé en grande partie par l'inertie de l'élément piézoélectrique qui ne réagit pas instantanément à la sollicitation extérieure : cette observation corrobore les observations par des mesures de déplacements de BP avec un vibromètre laser de Rio (2006).

La partie mécanique de  $H_S$  et  $H_R$  consiste à modéliser le comportement de l'élément piézoélectrique sous une sollicitation. Deux modèles ont été proposés pour les BP. Un modèle simple de système amorti à un degré de liberté SDOF (Wang et al., 2007) et un modèle analogue à une poutre qui repose sur des ressorts (*Beam On Springs*) (Brandenberg et al., 2008). L'angle de phase obtenue par les deux modèles est présenté à la figure suivante.

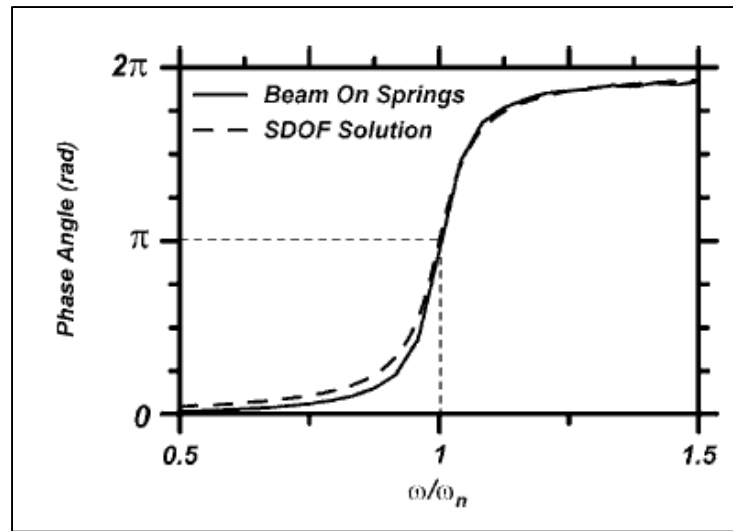


Figure 1.10 Comparaison de l'angle de phase du modèle SDOF et *Beam on Springs*  
Tiré de Brandenburg et al. (2008, p. 1160)

Outre le modèle théorique, Wang et al. (2007) indiquent que  $H_s$  et  $H_R$  peuvent être déterminés en collant les BP l'un sur l'autre. De cette façon, le déphasage électronique et celui des capteurs sont connus.

En combinant les fonctions de transfert, en atténuant l'effet de champ proche et en comprenant l'impact des ondes réfléchies et incidentes, il est possible de déterminer  $V_s$  de façon fiable.

## 1.6 Méthode P-RAT

La méthode P-RAT (*Piezoelectric ring-actuator technique*) est la méthode de détermination de  $V_s$  qui est utilisée lors du programme expérimental de ce projet.

Cette méthode a été développée dans les laboratoires de l'Université de Sherbrooke afin de répondre aux problèmes liés quant à l'interprétation des signaux reçus par des éléments piézoélectriques exposés précédemment. Pour atteindre cet objectif, Karray et al. (2015) ont développé des capteurs piézoélectriques et une méthode d'interprétation qui sont présentés dans les sections suivantes.

Il est à noter que la combinaison des capteurs et de la méthode d'interprétation n'est pas essentielle : les deux peuvent être utilisées indépendamment. L'interprétation des signaux dans le domaine temporel peut se faire avec les capteurs P-RAT et la méthode d'interprétation P-RAT peut s'appliquer aux éléments piézoélectriques comme les BP. Toutefois, il est difficile avec les BP de les appuyer l'un sur l'autre, comme on le fait avec les anneaux P-RAT, dans le but de les calibrer : déterminer la courbe de déphasage théorique du système.

### **1.6.1 Anneaux piézoélectriques**

Lorsque des éléments piézoélectriques sont insérés dans un essai conventionnel de la géotechnique, les parois de l'appareil et la faible distance entre les capteurs occasionnent des difficultés quant à l'interprétation de l'arrivée de l'onde de cisaillement (*Voir* la section 1.4).

Pour tenter de limiter les effets indésirables, la méthode P-RAT utilise au lieu de plaques de cisaillement, comme les BP, des anneaux piézoélectriques AP polarisés radialement avec un cylindre métallique en leur centre qui assure le couplage entre le sol et le mouvement de l'anneau.

Le cylindre métallique au centre de l'anneau est en bronze poreux pour permettre le drainage du sol lors d'un essai de consolidation ou d'un essai triaxial (Éthier, 2009). Il peut aussi être fait d'une pièce métallique pleine texturée mécaniquement et scindée en quatre pour un meilleur couplage avec le sol (Mhenni, 2016). La figure 1.11 illustre un schéma d'anneau piézoélectrique avec une pierre poreuse centrale en bronze.

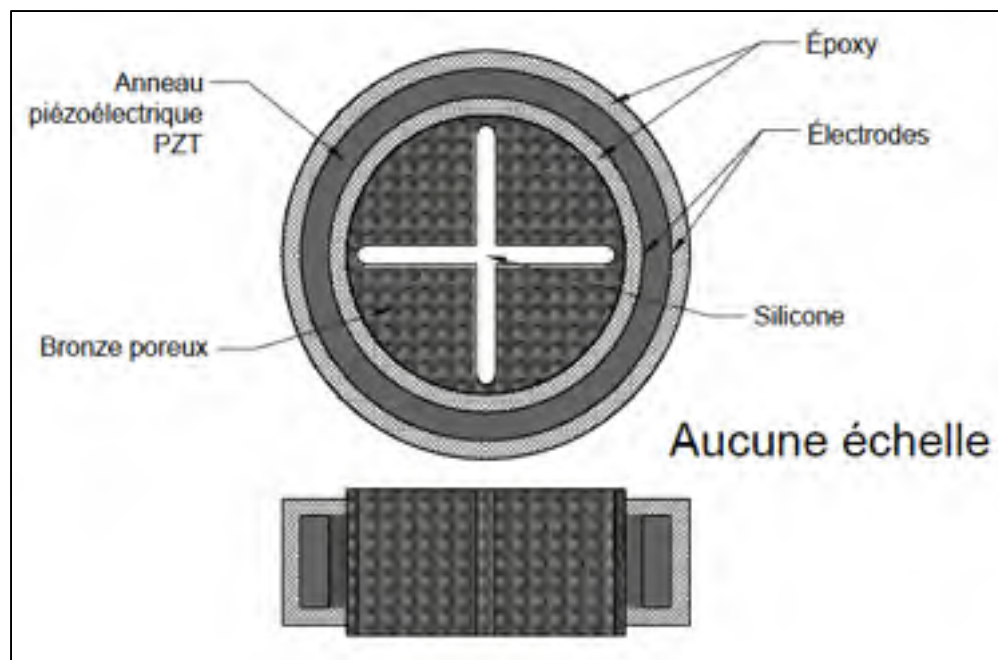


Figure 1.11 Schéma général d'un anneau P-RAT

L'anneau est directement posé sur l'échantillon de sol sans le pénétrer. La déformation en cisaillement du sol est induite par le mouvement radial de l'anneau qui contracte la pierre poreuse centrale en contact avec le sol. Ce mouvement, selon les modélisations numériques de Mhenni (2016) et d'Éthier (2009), réduit considérablement, comparativement aux BP, la génération d'ondes P incidentes. En plus, les modélisations numériques montrent que l'onde S atteint l'anneau récepteur avant les ondes incidentes P diminuant ainsi les interférences à la réception de la première onde S (Karray et al., 2015).

Les AP ne génèrent pas que des ondes S, le mouvement de l'anneau crée aussi des ondes de compression. Effectivement, le mouvement radial de l'anneau le comprime latéralement. Dès lors, selon l'effet de Poisson, une déformation latérale engendre une déformation longitudinale qui génère des ondes P. Mhenni (2016) a réduit l'impact de la déformation longitudinale en encapsulant les capteurs dans une cellule métallique comme le montre la figure 1.12. De cette façon, les ondes P générées par les anneaux sont négligeables par rapport aux ondes S (Karray et al., 2015; Mhenni, 2016).

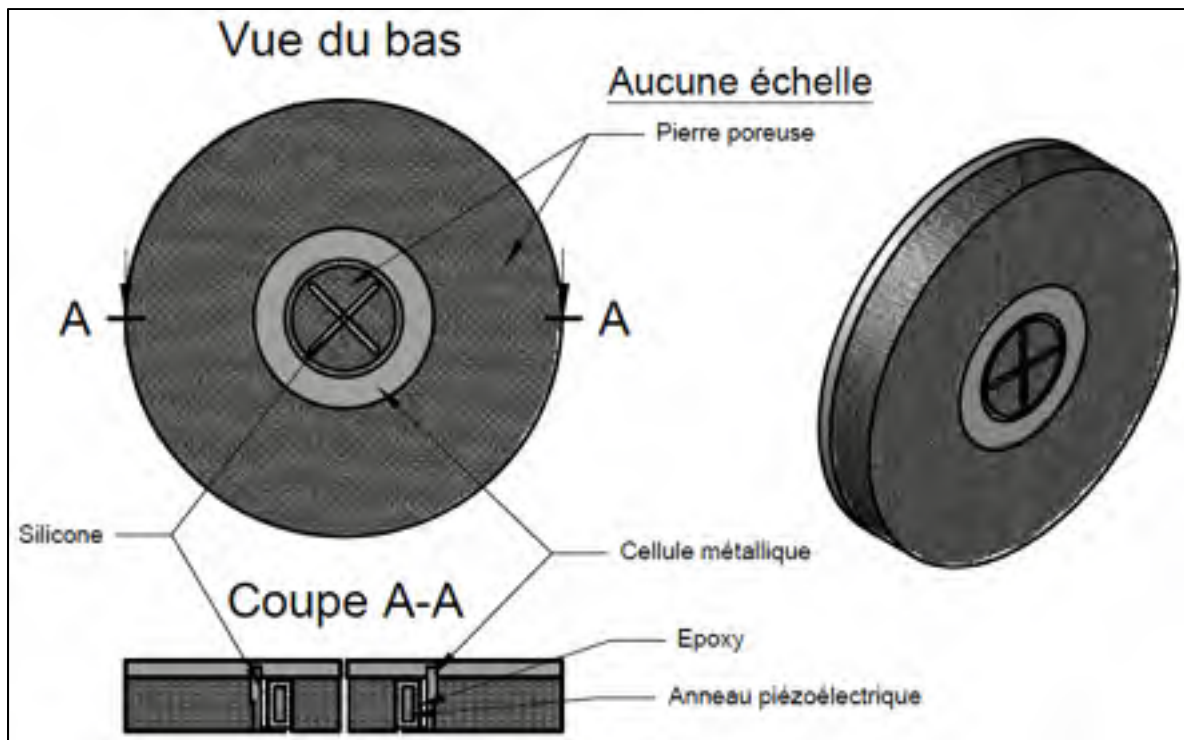


Figure 1.12 Schéma d'un assemblage d'anneau P-RAT encapsulé

De plus, la géométrie des anneaux permet de les calibrer facilement pour tenir compte du déphase des sous-systèmes électriques et des capteurs, c'est-à-dire  $H_s$  et  $H_r$  de l'équation (1.18). Effectivement, la détermination de la phase des anneaux peut se faire en collant les pierres centrales de l'émetteur et du récepteur l'une contre l'autre (*Voir* la section 1.7.2).

Pour que les mesures de  $V_s$  avec les AP soient adéquates, les déformations en cisaillement qu'ils transmettent aux sols doivent être dans le domaine élastique ( $\gamma < 10^{-3} \%$ ). Cependant, cette information n'est pas connue. En effet, l'impact de l'assemblage (époxy, silicone et pierre centrale) sur le déplacement des AP n'est théoriquement pas défini. Les modèles théoriques existants ne sont pas applicables aux anneaux P-RAT quant à la prédiction de leurs déplacements en fonction de la tension. Par contre, ils peuvent être utilisés en tant que borne supérieure, car il est raisonnable d'affirmer que l'ajout de masse et de contraintes aux frontières de l'anneau diminue les déplacements comparativement à un anneau libre (Éthier, 2009).

Pour que le déplacement d'un anneau piézoélectrique soit radial, il faut que celui-ci soit radialement polarisé, comme le cylindre piézoélectrique à la figure suivante :

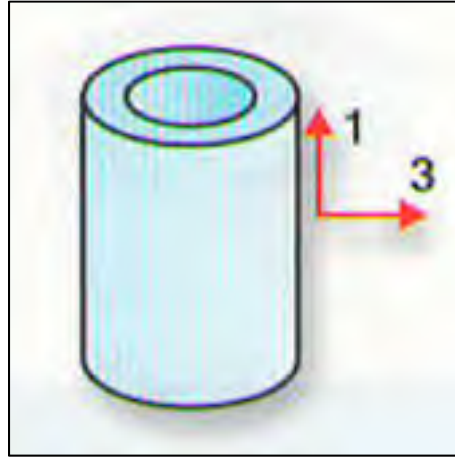


Figure 1.13 Axe un cylindre piézoélectrique polarisé radialement  
Tiré d'APC International Ltd (2002, p. 35)

À la figure 1.13, l'axe 3 est celui de la polarisation. Dans ce cas, le déplacement radial,  $\Delta r$ , peut être évalué selon l'équation suivante :

$$\Delta r = d_{33}V \quad (1.19)$$

Tirée d'APC International Ltd (2002, p. 35), dans laquelle  $d_{33}$  est la constante de charge piézoélectrique et  $V$  est la tension.

À cause de l'effet de Poisson, la déformation radiale d'un anneau s'accompagne avec un déplacement longitudinal,  $\Delta l$ , qui induit les ondes P (Karray et al., 2015; Lecuru, 2015). Selon APC International Ltd (2002) pour un AP polarisé comme celui de la figure 1.13  $\Delta l$  peut être déterminé selon l'équation suivante :

$$\Delta l = \frac{2d_{31}Vl}{d_{ext} - d_{int}} \quad (1.20)$$

Adaptée d'APC International Ltd (2002, p. 35), dans laquelle  $d_{31}$  est la constante de charge piézoélectrique,  $V$  est la tension,  $l$  est la hauteur,  $d_{ext}$  est le diamètre extérieur et  $d_{int}$  est le diamètre intérieur.

Les deux équations précédentes (1.19) et (1.20) montrent deux constantes d'intérêt qui permettent d'évaluer le déplacement des AP en fonction de  $V$  : la  $d_{33}$  et la  $d_{31}$ . Notons que le premier indice indique le sens de la polarisation, tandis que le second correspond à l'axe de déformation.

Actuellement, aucune mesure directe du déplacement des AP n'a été faite. Par conséquent, les déformations en cisaillement induites par les anneaux au sol ne sont pas connues. Cependant, Éthier (2009) a observé en laboratoire, avec des mesures successives de  $V_s$  dans un laps de temps de quelques minutes et des paramètres constants, aucune évolution du signal ainsi que des évaluations de  $V_s$  constantes. Il n'a décelé aucun signe que le déplacement des AP ait déformé en cisaillement le sol au-delà de la limite élastique.

Ainsi, pour la caractérisation des argiles dans une cellule œdométrique, les anneaux P-RAT ont plusieurs avantages comparativement aux BP. Ils ne pénètrent pas l'échantillon d'argile, ce qui élimine le remaniement du sol causé par les capteurs. Ils ont un mouvement radial qui génère moins d'ondes P incidentes, ce qui limite les interférences causées par la réflexion des ondes P sur les parois de l'anneau œdométrique. Enfin, la distance entre les capteurs est augmentée, ce qui dans un espace restreint limite l'effet de champ proche.

### **1.6.2 Méthode d'interprétation**

La méthode d'interprétation P-RAT est une méthode d'évaluation de  $V_s$  dans le domaine fréquentiel qui représente le sol comme un système dynamique. Les équations et les démonstrations suivantes proviennent de Éthier (2009); Karray et al. (2015).



Un système dynamique peut être représenté par une fonction de transfert FT qui relie le signal émis  $X(\omega)$  au signal reçu  $Y(\omega)$  de la façon suivante :

$$\frac{Y(\omega)}{X(\omega)} = A(\omega)e^{i\phi_{exp}(\omega)} \quad (1.21)$$

Tirée de Karray et al. (2015, p. 5), où  $A$  est l'amplitude de la fonction de transfert et  $\phi_{exp}$  est la phase expérimentale.

Il a été vu à la section 1.6 que le mouvement mécanique d'un élément piézoélectrique n'est pas en phase avec la sollicitation électrique. Ce qui indique que lors des mesures en laboratoire l'émission et la réception ne correspondent pas à la réponse du sol. Pour obtenir la réponse exacte du sol, il faudrait que le système dynamique ne produise pas d'amplification ou de déphasage, c'est-à-dire qu'il soit parfait. Comme expérimentalement ce n'est pas le cas, la FT doit être corrigée selon la réponse des capteurs.

Le comportement d'un élément piézoélectrique dans un système dynamique parfait, dans lequel le sol ne produit aucun déphasage, est représenté dans la méthode P-RAT par un système masse ressort amorti à un degré de liberté SDOF. La phase de ce système est décrite par l'équation suivante :

$$\phi_i = \tan^{-1} \frac{2D \left( \frac{f}{f_0} \right)}{1 - \left( \frac{f}{f_0} \right)^2} \quad (1.22)$$

Où  $\phi_i$  est la phase produite par l'émetteur ou le récepteur,  $D$  est le taux d'amortissement,  $f$  est la fréquence et  $f_0$  est la fréquence propre du système.

Si l'émetteur et le récepteur possèdent les mêmes caractéristiques de résonance ( $f_0$  et  $D$ ), la phase totale ou théorique du système est la somme de leur phase. Ce qui revient à écrire l'équation (1.22) :

$$\phi_{th} = \phi_e + \phi_r = 2 * \tan^{-1} \frac{2D \left( \frac{f}{f_0} \right)}{1 - \left( \frac{f}{f_0} \right)^2} \quad (1.23)$$

Où  $\phi_{th}$  est la phase totale ou théorique produite par le système,  $\phi_e$  est la phase produite par l'émetteur et  $\phi_r$  est la phase produite par le récepteur.

Les caractéristiques de résonance du système de l'équation (1.23) s'obtiennent pour des anneaux P-RAT par l'analyse de la phase dépliée déterminée par le spectre de puissance croisé de l'émission et de la réception (*Voir* l'équation (1.15)) lorsque les pierres centrales des capteurs sont collées l'une contre l'autre. Cette étape de calibration du système dynamique est appelée calibration *tip-to-tip* ou face-à-face.

Lors d'un essai œdométrique avec des AP, il est raisonnable de supposer que le sol testé est homogène et linéaire. Dans un système dynamique linéaire, la fonction de transfert devrait être indépendante de l'émission.  $V_s$  devrait donc être constante et ne pas varier en fonction de la fréquence d'émission. Or, les mesures de  $V_s$  en laboratoire montrent nettement que cette assertion n'est pas respectée. De sorte que la vitesse qui est mesurée en laboratoire est plutôt la vitesse de phase  $V_{ph}$  qui, elle, varie en fonction de la fréquence. Par conséquent,  $V_s$  s'écrit :

$$V_s \neq V_{ph}(f) \quad (1.24)$$

Comme c'est  $V_s$  qui nous intéresse, il faut corriger  $V_{ph}$  pour qu'elle soit constante. Pour ce faire, la méthode P-RAT suppose que le déphasage total du système provient uniquement de celui produit par l'émetteur et le récepteur. De plus, la phase corrigée constante correspond à la phase théorique établie par les caractéristiques de résonance des capteurs ( $\phi_{corr} \approx \phi_{th}$ )

(équation (1.23)). De cette façon, il est possible de diviser en deux parties la phase expérimentale de  $V_{ph}$  comme ceci :

$$V_{ph}(f) = \frac{2\pi f d}{\phi_{exp}(f)} = \frac{2\pi f d}{\phi_{th}(f) + \phi_{err}(f)} \quad (1.25)$$

Où,  $f$  est la fréquence,  $d$  est la distance entre les capteurs,  $\phi_{exp}$  est la phase dépliée du spectre de puissance croisé entre l'émission et la réception (*Voir* l'équation (1.15)) en radians,  $\phi_{th}$  est la phase théorique en radians et  $\phi_{err}$  est la fonction de correction en radians.

Lorsque  $\phi_{corr}$  correspond à un déphasage constant,  $V_{ph} = V_s$  et l'équation (1.25) se réécrit :

$$V_s = \frac{2\pi f d}{\phi_{corr}(f)} \quad (1.26)$$

En combinant, les équations (1.25) et (1.26),  $V_{ph}$  s'écrit :

$$V_{ph}(f) = \frac{1}{\frac{\phi_{corr}(f)}{2\pi f d} + \frac{\phi_{err}(f)}{2\pi f d}} = \frac{1}{\frac{1}{V_s} + \frac{\phi_{err}(f)}{2\pi f d}} \quad (1.27)$$

L'équation (1.27) peut se réécrire comme suit :

$$\frac{1}{V_s} + \frac{\phi_{err}(f)}{2\pi f d} = \frac{\phi_{exp}(f)}{2\pi f d} \quad (1.28)$$

En multipliant l'équation (1.28) par la distance parcourue de l'onde,  $d$ , on obtient :

$$\frac{d}{V_s} + \frac{\phi_{err}(f)}{2\pi f} = \frac{\phi_{exp}(f)}{2\pi f} \quad (1.29)$$

L'équation précédente peut être écrite pour toutes les fréquences  $f_0, f_1, f_2 \dots f_n$  dont les deux premières fréquences s'écrivent :

$$\frac{d}{V_s} + \frac{\phi_{err}(f_0)}{2\pi f_0} = \frac{\phi_{exp}(f_0)}{2\pi f_0} \quad (1.30)$$

$$\frac{d}{V_s} + \frac{\phi_{err}(f_1)}{2\pi f_1} = \frac{\phi_{exp}(f_1)}{2\pi f_1} \quad (1.31)$$

Dans laquelle,  $f_0$  n'est pas la fréquence propre du système, mais bien la fréquence initiale.

Il est possible d'éliminer la constante inconnue  $d/V_s$  en soustrayant l'équation (1.31) avec l'équation (1.30). Ainsi, on obtient :

$$\phi_{err}(f_1) = \phi_{exp}(f_1) - \left(\frac{f_1}{f_0}\right) [\phi_{exp}(f_0) - \phi_{err}(f_0)] \quad (1.32)$$

L'équation précédente montre qu'au moment où  $\phi_{err}(f_0)$  est connu, il est possible de déterminer  $\phi_{err}(f_1)$ . Dès lors, l'équation (1.32) se réécrit pour toutes les fréquences de la façon suivante :

$$\phi_{err}(f_{i+1}) = \phi_{exp}(f_{i+1}) - \left(\frac{f_{i+1}}{f_i}\right) [\phi_{exp}(f_i) - \phi_{err}(f_i)] \quad (1.33)$$

L'équation (1.33) peut être entièrement déterminée si seulement une valeur sur la courbe d'erreur de déphasage est connue. Cette valeur est appelée  $\phi_{ini}$ . À basse fréquence, l'émetteur et le récepteur piézoélectriques induisent une erreur de déphasage faible, tandis qu'à haute fréquence ( $f \gg f_0$ ), l'erreur sur le déphasage est de  $2\pi$ . C'est en tenant compte de ces deux caractéristiques d'erreur sur le déphasage que  $\phi_{ini}$  est déterminé. Afin que la courbe d'erreur de déphasage  $\phi_{err}(f)$  colle au mieux la courbe de déphasage théorique  $\phi_{th}(f)$ .

Dans les faits, c'est dans un intervalle de fréquence plus ou moins large et près de la fréquence de résonance du système que  $\phi_{corr}(f)$  colle à  $\phi_{th}(f)$  et que  $V_{ph}(f)$  est constante donc égale à  $V_s$  (Lecuru, 2015). La figure suivante présente un exemple d'interprétation avec la méthode P-RAT.

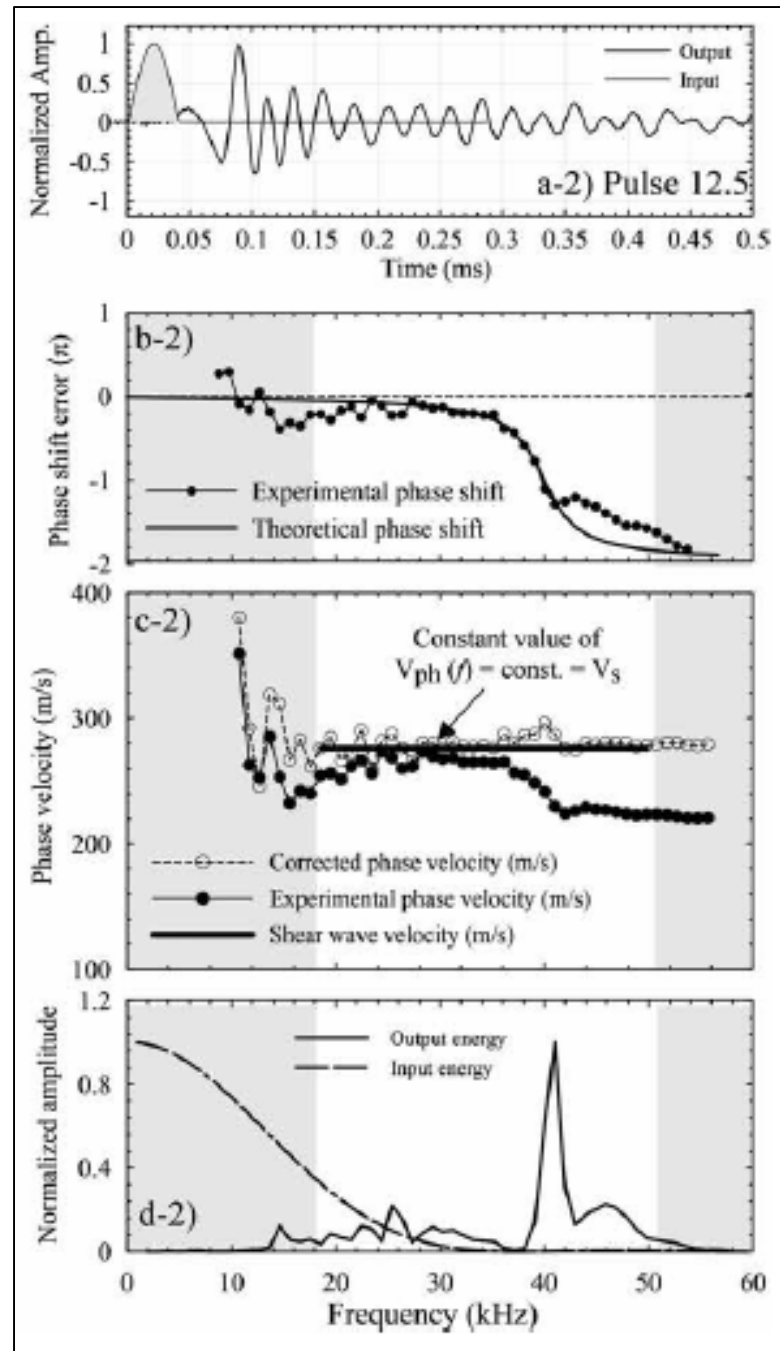


Figure 1.14 Exemple d'interprétation avec la méthode P-RAT  
Tiré de Karray et al. (2015, p. 9)

La figure 1.14 montre que c'est entre la zone ombragée que (b-2))  $\phi_{\text{corr}}(f)$  colle à  $\phi_{\text{th}}(f)$  et que (c-2))  $V_{\text{ph}}(f)$  est constante. Les zones ombragées sont délimitées par le contenu fréquentiel de

l'onde reçue (d-2)), de sorte que, lorsque l'amplitude fréquentielle de l'onde reçue est faible, il n'est pas possible d'établir adéquatement la courbe de correction de déphasage. Il faut donc que l'amplitude fréquentielle soit suffisamment élevée pour pouvoir évaluer  $V_s$ . Signalons également qu'il y a un effet de champ proche marqué dans le signal reçu de la figure 1.14, mais que l'analyse dans le domaine fréquentiel avec la méthode P-RAT permet quand même de déterminer  $V_s$ , contrairement aux méthodes temporelles (Karray et al., 2015).

En bref, la méthode P-RAT a l'avantage de tenir compte du déphasage inhérent des éléments piézoélectriques dans son interprétation et de pouvoir évaluer des  $V_s$  malgré la présence de l'effet de champ proche. Pour ces raisons, elle est une méthode toute désignée pour des évaluations de  $V_s$  dans un essai œdométrique où les dimensions de l'échantillon font que l'effet de champ proche est difficile à oblitérer.

## **1.7 Caractérisation des argiles avec $V_s$**

La vitesse de propagation des ondes de cisaillement est transmise dans un sol par le squelette granulaire, de sorte que  $V_s$  est intrinsèquement liée aux propriétés du sol. Elle est donc un paramètre d'intérêt afin de caractériser les sols (Éthier, 2009).

Dans les sections qui suivent, il est question des paramètres qui influent sur  $V_s$  dans un sol ainsi que des relations empiriques existantes entre les caractéristiques des sols et  $V_s$ .

### **1.7.1 Paramètres d'influences**

Plusieurs paramètres influencent  $V_s$  dans un sol et dans la même mesure  $G_{\max}$  (équation (1.9)). Hardin et Drnevich (1972) dressent une liste de ses paramètres en fonction de leur importance qui influent sur  $G_{\max}$  et sur le taux d'amortissement  $D$ . Cette liste est présentée au tableau 1.1.

Tableau 1.1 Paramètres influençant le module de cisaillement et le taux d'amortissement  
Tiré de Hardin et Drnevich (1972, p. 610)

| Parameter<br>(1)                                                | IMPORTANCE TO <sup>a</sup> |                       |                    |                       |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
|                                                                 | Modulus                    |                       | Damping            |                       |
|                                                                 | Clean sands<br>(2)         | Cohesive soils<br>(3) | Clean sands<br>(4) | Cohesive soils<br>(5) |
| Strain Amplitude                                                | V                          | V                     | V                  | V                     |
| Effective Mean Principal Stress                                 | V                          | V                     | V                  | V                     |
| Void Ratio                                                      | V                          | V                     | V                  | V                     |
| Number of Cycles of Loading                                     | R <sup>b</sup>             | R                     | V                  | V                     |
| Degree of Saturation                                            | R                          | V                     | L                  | U                     |
| Overconsolidation Ratio                                         | R                          | L                     | R                  | L                     |
| Effective Strength Envelope                                     | L                          | L                     | L                  | L                     |
| Octahedral Shear Stress                                         | L                          | L                     | L                  | L                     |
| Frequency of Loading (above 0.1 Hz)                             | R                          | R                     | R                  | L                     |
| Other Time Effects (Thixotropy)                                 | R                          | L                     | R                  | L                     |
| Grain Characteristics, Size, Shape, Gradation, Mineralogy       | R                          | R                     | R                  | R                     |
| Soil Structure                                                  | R                          | R                     | R                  | R                     |
| Volume Change Due to Shear Strain (for strains less than 0.5 %) | U                          | R                     | U                  | R                     |

<sup>a</sup> V means Very Important, L means Less Important, and R means Relatively Unimportant except as it may affect another parameter; U means relative importance is not clearly known at this time.

<sup>b</sup> Except for saturated clean sand where the number of cycles of loading is a Less Important Parameter.

Selon le tableau précédent, les paramètres qui ont le plus d'influence sur  $V_s$  sont l'amplitude des déformations, la contrainte effective moyenne et l'indice des vides. Les trois ont un impact sur le contact entre les grains du sol. Il est dès lors visible que c'est en grande partie le contact entre les grains qui gère  $V_s$ .

Ainsi, la majorité des relations empiriques existantes qui sont dans le domaine des très petites déformations de  $V_s$  sont en fonction de l'indice des vides et de la contrainte effective moyenne.

### 1.7.2 Relations empiriques existantes

Ils existent plusieurs relations empiriques de  $V_s$ . Avant de montrer les principales relations, il est important de comprendre leurs fondements théoriques.

$V_s$  est influencée par le contact entre les grains. Comme ce contact est plus ou moins fort en fonction des contraintes principales du milieu granulaire et de la porosité, la majorité des relations empiriques incluent la contrainte effective moyenne et l'indice des vides,  $e$ .

Pour la contrainte effective moyenne, Santamarina et al. (2001) montrent que, dans un milieu où les contraintes principales sont égales et que les forces capillaires sont négligeables,  $V_s$ , en fonction de la contrainte peut s'écrire de cette façon :

$$V_s = \alpha \left( \frac{\sigma'_0}{1 \text{ kPa}} \right)^\beta \quad (1.34)$$

Adaptée de Santamarina et al. (2001, p. 254), dans laquelle  $\alpha$  (m/s) et  $\beta$  sont déterminés expérimentalement et  $\sigma'_0$  est la contrainte effective moyenne isotrope (kPa).

Physiquement, dans le domaine des très petites déformations,  $\alpha$  et  $\beta$  sont contrôlés par le contact entre les grains. Selon le modèle théorique de Hertz, pour des sphères parfaitement élastiques l'exposant  $\beta$  apposé à la contrainte moyenne est égal à 1/3. Toutefois, expérimentalement pour différents types de sols,  $\beta$  varie entre 0,25 et 0,6 (Clayton, 2011; Elbeggo, Éthier, Karray, & Dubé, 2013; Hardin & Black, 1968).

Généralement, le coefficient  $\alpha$  est séparé en deux parties pour tenir compte de la variation de l'indice des vides d'un même type de sol (Santamarina et al., 2001). De là, l'équation (1.34) se réécrit sous la forme présentée par Hardin et Black (1968) pour  $G_{\max}$  :

$$G_{\max} = A(T)F(e)\sigma'_0{}^n \quad (1.35)$$



Adaptée de Hardin et Black (1968), où  $A(T)$  est un coefficient tenant compte des influences secondaires sur  $G_{max}$  dont le temps ainsi que l'ampleur de l'incrément de charge et  $F(e)$  est un coefficient qui tient compte de la variation de l'indice des vides.

Pour les argiles,  $F(e)$  est lié à l'historique des contraintes. En effet,  $e$  ne varie pas de la même façon si l'argile est surconsolidée que si elle est normalement consolidée. C'est pour cette raison que Hardin et Black (1968) proposent pour les argiles d'inclure dans l'équation (1.35) un coefficient qui tient compte du ratio de surconsolidation (OCR) comme ceci :

$$G_{max} = A(T)F(e)OCR^k \sigma'_0{}^n \quad (1.36)$$

Adaptée de Hardin et Black (1968), où, l'OCR est égal au ratio entre la contrainte de préconsolidation  $\sigma'_p$  et  $\sigma'_0$  et  $k$  est un exposant qui varie entre 0 et 0,5 selon l'indice de plasticité.

Enfin, Viggiani et Atkinson (1995) suggèrent que les coefficients  $A(T)$ ,  $F(e)$  et les exposants  $k$  et  $n$  de l'équation (1.36) peuvent être déterminés empiriquement en fonction de l'indice de plasticité.



## **CHAPITRE 2**

### **DÉVELOPPEMENT D'UN ALGORITHME D'AUTOMATISATION DE LA MÉTHODE D'INTERPRÉTATION P-RAT**

#### **2.1 Motivations**

L'amélioration récente des capteurs P-RAT (Mhenni, 2016) ainsi que l'accroissement de l'utilisation de la méthode d'interprétation P-RAT (Elbeggo et al., 2017; Lecuru, 2015) permettent d'envisager l'automatisation de la méthode d'analyse.

Le but principal de l'automatisation est d'uniformiser la méthode d'interprétation P-RAT en rendant autant que possible l'analyse indépendante de l'utilisateur. De cette façon, les résultats sont plus reproductibles d'un essai à l'autre et d'un utilisateur à l'autre. En même temps, l'automatisation permet d'accroître considérablement la vitesse d'analyse, tout en diminuant les erreurs inhérentes causées par une tâche répétitive. C'est pour ces raisons qu'il a été développé un algorithme permettant d'exécuter l'interprétation des signaux reçus avec la méthode P-RAT automatiquement.

#### **2.2 Méthodologie**

##### **2.2.1 Paramètres d'entrée**

Les signaux obtenus en laboratoire lors des évaluations de  $V_s$  avec des éléments piézoélectriques, comme les anneaux P-RAT, ne sont pas interprétables tant que certains paramètres ne sont pas connus par l'utilisateur. Les prochains paragraphes exposent les étapes et les paramètres d'entrée qui leur sont associés nécessaires à l'interprétation des signaux avec la méthode P-RAT.

L'automatisation prend en compte trois contraintes à la détermination de  $V_s$  avec la méthode P-RAT :

1. La courbe de déphasage corrigée  $\phi_{\text{corr}}(f)$  doit au mieux coïncider avec la courbe de déphasage théorique  $\phi_{\text{th}}(f)$ , donc  $\phi_{\text{corr}}(f) \approx \phi_{\text{th}}(f)$ .
2. La dérivée de la vitesse de phase  $V_{\text{ph}}(f)$  doit être nulle.
3. Les points 1 et 2 doivent survenir simultanément dans une fenêtre de fréquences dont l'amplitude spectrale du signal reçu est non-nulle.

Par conséquent, les paramètres d'entrée à connaître avant de pouvoir automatiser la méthode se résument au  $\phi_{\text{th}}(f)$ , à la polarité du signal d'émission par rapport au signal reçu, à la distance entre les capteurs  $d$  et à la fenêtre de fréquences d'analyse. Le tableau suivant résume les paramètres à connaître ainsi que la façon de les déterminer :

Tableau 2.1 Paramètres à connaître pour l'automatisation de la méthode P-RAT

| Paramètre d'entrée                                                 | La façon de le déterminer                                                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| La courbe de déphasage théorique du système, $\phi_{\text{th}}(f)$ | Avec la calibration face-à-face et l'équation (1.22).                                                                                                             |
| Polarité du signal d'émission                                      | En fonction du branchement des électrodes de l'émetteur et du récepteur. Positif, si les capteurs sont branchés de façon identique et négatif s'ils sont opposés. |
| Distance entre l'émetteur et le récepteur, $d$                     | Mesurée.                                                                                                                                                          |
| Fenêtre de fréquences d'analyse                                    | Déterminée empiriquement en fonction de la fréquence de résonance.                                                                                                |

L'équation (1.22) montre que les inconnues de  $\phi_{\text{th}}(f)$  sont la fréquence de résonance  $f_0$  et le taux d'amortissement  $D$  du système. Ces deux paramètres sont déterminés par la méthode face-à-face (*Voir* la section 1.6.2). Une fois qu'ils sont connus, il est possible d'évaluer le  $\phi_{\text{th}}(f)$  caractéristique du système lors de l'évaluation de  $V_s$ .

L'équation (1.33) de  $\phi_{\text{err}}(f)$  est dépendante de  $\phi_{\text{exp}}(f)$ . Le  $\phi_{\text{exp}}(f)$  s'évalue par le spectre de puissance croisé entre le signal émis et reçu (équation (1.15)). Pour ce faire, les deux signaux doivent être semblables, de même nature et de même signe. Il est donc important d'établir le sens, ou la polarité, de l'émission par rapport à la réception pour que les deux soient de même signe afin d'évaluer  $V_s$ .

La polarité d'un élément piézoélectrique pour un comportement linéaire est par convention dans la même direction que celui du champ électrique  $E$  apposé aux électrodes (Hwang et al., 1995). Toutefois, pour ce mémoire, il a été choisi de distinguer la polarité positive et de la polarité négative par le mouvement de l'anneau. Les électrodes des anneaux sont placées sur les faces intérieure et extérieure de l'élément piézoélectrique afin que le mouvement soit radial. De telle sorte que si une tension  $V$  positive contracte l'anneau, sa polarité est positive, et que si au contraire il se dilate, sa polarité est négative. Ces deux cas sont illustrés à la figure 2.1.

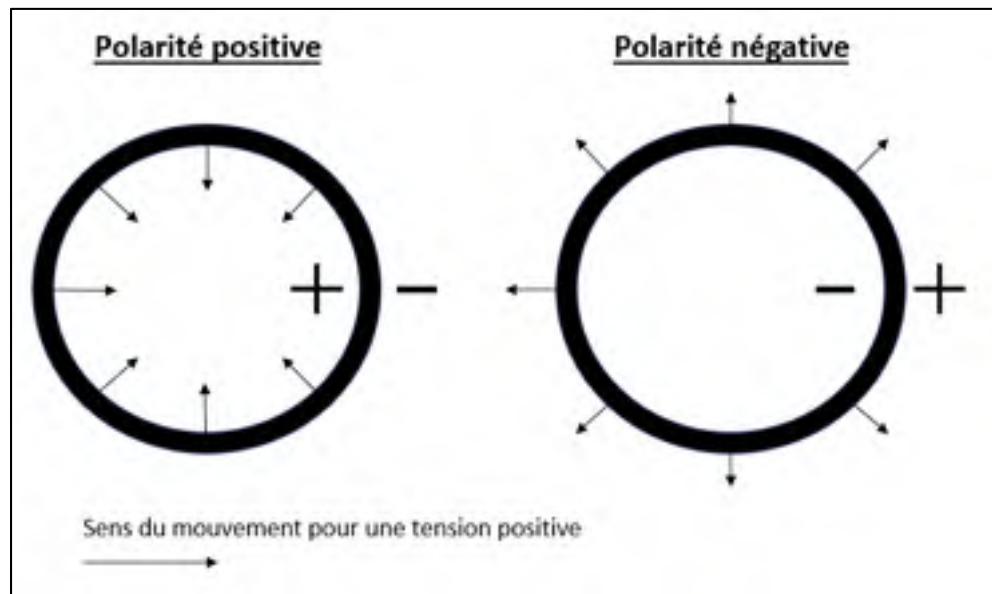


Figure 2.1 Polarité de l'anneau piézoélectrique en fonction du sens du champ électrique

Sur la figure 2.1, on remarque que le sens du mouvement de l'anneau pour une  $V$  positive est dans la même direction que  $E$  dont le sens est représenté par le signe +.

Le mouvement de l'anneau peut être selon deux directions opposées pour une même  $V$ . Le système P-RAT qui est composé de deux capteurs, un récepteur et un émetteur, possède quatre configurations possibles. Ces configurations sont présentées dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 Configurations possibles du système P-RAT en fonction de la polarité

| Configuration | Émetteur | Récepteur |
|---------------|----------|-----------|
| 1             | +*       | +         |
| 2             | -*       | +         |
| 3             | +        | -         |
| 4             | -        | -         |

\*Signe de la polarité, + est positive et – est négative.

Afin de distinguer l'impact des différentes configurations du tableau 2.2 sur la polarité du signal reçu avec une  $V$  positive par rapport au signal émis, l'émission et la réception des configurations sont comparées entre-elles à la figure 2.2. Les signaux illustrés à la figure 2.2 ont été obtenus lors d'un essai de consolidation dans lequel étaient insérés les anneaux P-RAT. Les signaux ont été générés à 25 kHz et ce après que les surpressions interstitielles dans la cellule œdométrique se soient dissipées.

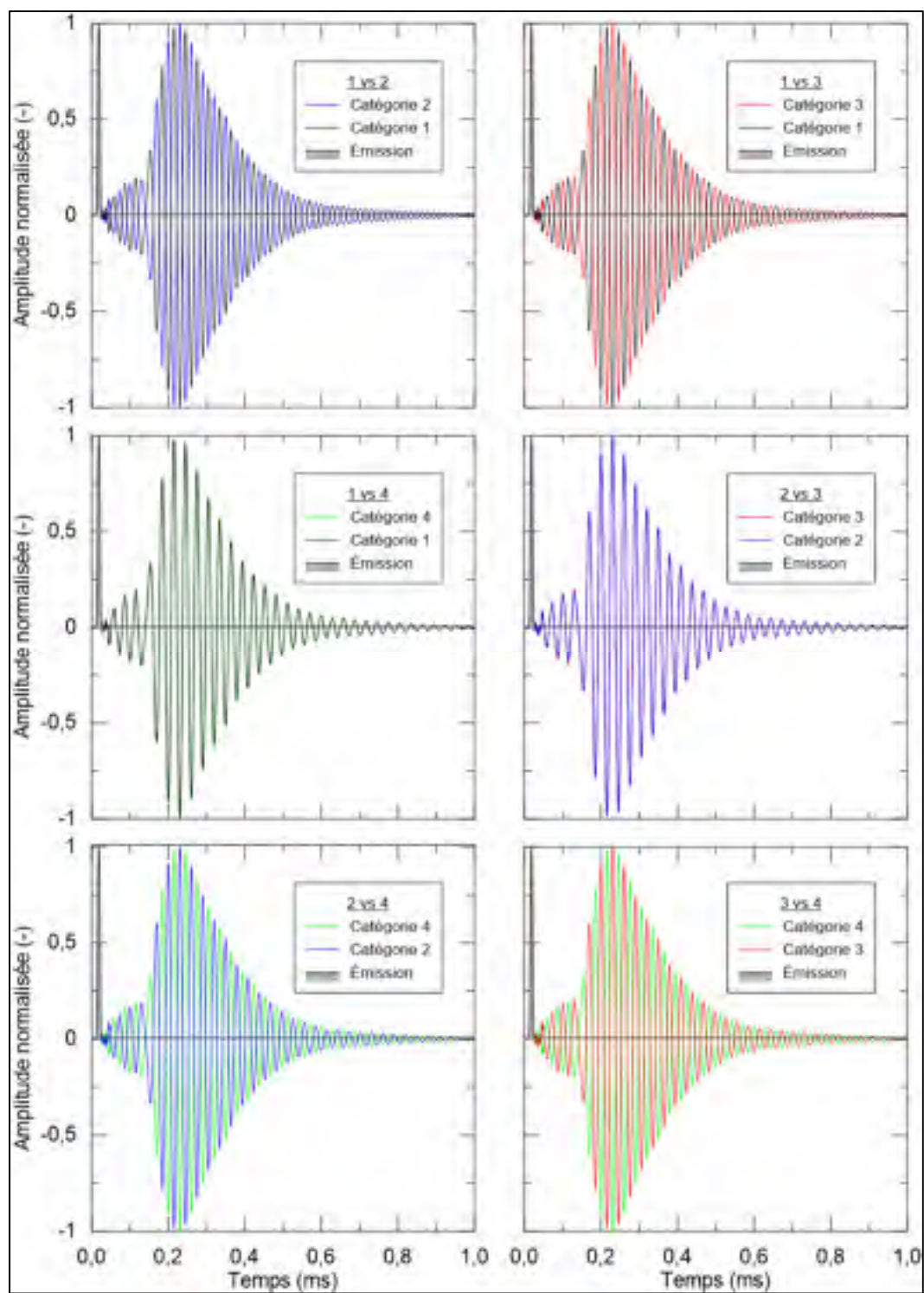


Figure 2.2 Comparaison de la réception des différentes configurations possibles de la méthode P-RAT

Selon la figure 2.2, les configurations 1 et 4 ont la même réception tout comme les configurations 2 et 3. En revanche, lorsque les configurations 1 et 4 sont comparées aux configurations 2 et 3, elles sont de signes opposés. Ceci montre que lorsque les capteurs sont de sens identiques, la polarité est positive, et que lorsqu'ils sont de sens inverses, la polarité est négative. Par exemple, si lors d'un essai de  $V_s$  l'anneau émetteur a un mouvement contractile tandis que l'anneau récepteur a un mouvement dilatant, il est nécessaire de multiplier par -1 le signal émis lors de l'évaluation du spectre de puissance croisé pour que les deux signaux soient de même signe. Ceci est applicable aux configurations 2 et 3, tandis que, pour les deux autres configurations 1 et 4, le signe de l'émission n'a pas à être modifié.

Un autre paramètre nécessaire à la détermination de  $V_s$  selon l'équation (1.26) est la distance parcourue par l'onde S,  $d$  : la distance entre l'émetteur et le récepteur. Cette donnée est généralement mesurée pendant un essai par un capteur de déplacement.

Le dernier paramètre à connaître pour l'automatisation est la fenêtre de fréquences. Sa détermination est d'une grande importance. C'est elle qui délimite la zone dans laquelle sont corrélés  $\phi_{th}(f)$  et  $\phi_{corr}(f)$  et dans laquelle la dérivée de  $V_{ph}(f)$  est nulle. Si elle est mal définie, l'algorithme convergera vers une valeur de  $V_s$  erronée. Sa position est généralement admise aux abords de la fréquence de résonance (Lecuru, 2015) dans la plage de fréquences non nulle de l'amplitude du spectre de fréquences.

### 2.2.2 Paramètres inconnus

Une fois que les paramètres d'entrée sont identifiés, il est possible d'automatiser la méthode d'interprétation P-RAT afin d'évaluer les paramètres inconnus. Il y a trois paramètres qui sont inconnus (*Voir* la section 1.6.2) :

1.  $\phi_{ini}$  qui est le paramètre nécessaire à la détermination de la courbe  $\phi_{err}(f)$  (*Voir* l'équation (1.33)) :  $\phi_{err}(0) = \phi_{ini}$
2. Le nombre de  $2\pi$  de décalage de la courbe de déphasage corrigée,  $N_{corr}$ .



3. Le nombre de  $2\pi$  de décalage de la courbe de déphasage théorique,  $N_{th}$ , qui sert à l'évaluation de  $V_{ph}(f)$ .

En fonction des paramètres inconnus, les équations (1.33) et (1.26) se réécrivent de cette façon :

$$\phi_{err}(f_{i+1}) = 2\pi N_{corr} \left\{ \phi_{exp}(f_{i+1}) - \left( \frac{f_{i+1}}{f_i} \right) [\phi_{exp}(f_i) - \phi_{err}(f_i)] \right\} \quad (2.1)$$

Si  $dV_{ph}(f)/df = 0$ , alors :

$$V_s(f) = V_{ph}(f) = \frac{2\pi f d}{[2\pi N_{th} + |\phi_{exp}(f)|] + \phi_{err}(f)} \quad (2.2)$$

### 2.2.3 Algorithme

L'algorithme qui détermine  $V_s$  fonctionne en deux étapes. La première évalue le  $\phi_{err}(f)$  optimal en faisant varier  $\phi_{ini}$  et  $N_{corr}$  par itération pour que  $\phi_{th}(f) = \phi_{corr}(f)$  et la seconde détermine  $V_s$  en faisant varier  $N_{th}$ . Les étapes de l'algorithme sont détaillées ci-dessous.

### Algorithme 2.1 Algorithme d'automatisation de la méthode d'interprétation P-RAT

#### Étape #1

Données d'entrée : fenêtre de fréquences,  $\phi_{th}(f)$ , signal émis, signal reçu et polarité

Données de sortie :  $\phi_{ini}$  et  $N_{corr}$ .

- 1 Évaluation du  $\phi_{exp}(f)$  par le spectre des puissances croisé entre le signal émis et reçu selon la polarité.
- 2 Détermination de la matrice des courbes possibles de  $\phi_{err}(f)$  pour tous les  $N_{th}$  entier compris entre -6 et 6 et pour tous les  $\phi_{ini}$  entre  $-3\pi$  et  $3\pi$  avec un pas de 0,001.
- 3 Évaluation de l'erreur relative entre  $\phi_{err}(f)$  et  $\phi_{th}(f)$  dans l'intervalle de fréquence correspondant à celui de la fenêtre de fréquences.
- 4 L'erreur relative minimale correspond au  $\phi_{err}(f, \phi_{ini}, N_{corr})$  optimal pour que  $\phi_{th}(f) \approx \phi_{corr}(f)$ .

#### Étape #2

Données d'entrée : fenêtre de fréquences,  $d$ , signal émis, signal reçu, polarité et  $\phi_{err}(f, \phi_{ini}, N_{corr})$  déterminé à l'étape 1.

Données de sortie :  $V_s$  et  $N_{th}$ .

- 5 Évaluation du  $\phi_{exp}(f)$  par le spectre des puissances croisé entre le signal émis et reçu selon la polarité.
- 6 **Boucle for** pour chaque entier de  $N_{th}$  compris entre -3 et 3.
  - 7 Détermination de la vitesse de phase  $V_{ph}(f)$  en fonction de  $d$ ,  $\phi_{err}(f, \phi_{ini}, N_{corr})$  et  $N_{th}$ .
  - 8 Évaluation de la pente moyenne en valeur absolue de  $V_{ph}(f)$  dans la plage de fréquence établie par la fenêtre de fréquences.
  - 9 La pente minimale est égale à  $V_s$  et au  $N_{th}$  correspondant.

Dans l'algorithme 2.1, le choix des intervalles de variation des paramètres inconnus est empirique. Toutefois, à aucun moment lors du traitement des signaux avec la méthode P-RAT de ce mémoire, les bornes imposées aux paramètres inconnus n'ont été dépassées. Il n'est

cependant pas exclu que dans d'autres circonstances et dans d'autres conditions de test, comme avec des matériaux et des capteurs différents, ces bornes soient dépassées.

### 2.3 Discussion

L'automatisation de la méthode P-RAT est possible, car l'ensemble des paramètres inconnus peut être déterminé itérativement par l'algorithme 2.1. À terme, l'automatisation permettra d'obtenir des résultats d'interprétation moins subjectifs et plus reproductibles d'un utilisateur à l'autre et d'un essai à l'autre.

Cependant, il reste une part de subjectivité dans l'analyse avec la méthode proposée ici. La fenêtre de fréquences d'analyse pour la convergence de  $V_s$  varie en fonction du type de capteurs, de la qualité de l'assemblage des capteurs, du type de matériaux testés et des conditions de l'essai (contrainte effective, OCR, degré de saturation, etc). Elle n'est donc pas a priori connue et elle semble varier en cours d'essai. Ce qui fait du choix de la fenêtre de fréquences la principale cause de mauvaise convergence de l'algorithme.

Généralement, la fenêtre de fréquences débute dès que l'amplitude spectrale de la réception est non nulle et s'arrête à la fréquence de résonance, ou elle peut couvrir tout le spectre d'amplitude de fréquence non nul. À ceci s'ajoute le fait que, comme  $dV_{ph}(f)/df$  est supposée être nulle lorsque  $\phi_{th}(f) = \phi_{corr}(f)$ , la fenêtre de fréquences est la même autant pour la corrélation de  $\phi_{corr}(f)$  que pour  $V_s$ .

Lorsque les contraintes précédentes sur la fenêtre de fréquences sont appliquées, l'algorithme ne permet pas de converger vers la bonne valeur de  $V_s$  à tous les coups. Deux types d'erreurs ont été observés qui peuvent être distincts ou concomitants. Le premier type est lorsque  $dV_{ph}(f)/df$  est supérieure à zéro et constante sur une partie ou sur toute la plage de fréquences incluse dans la fenêtre de fréquences. La figure 2.3 dont la zone sans ombrage est la fenêtre de fréquences illustre ce cas.

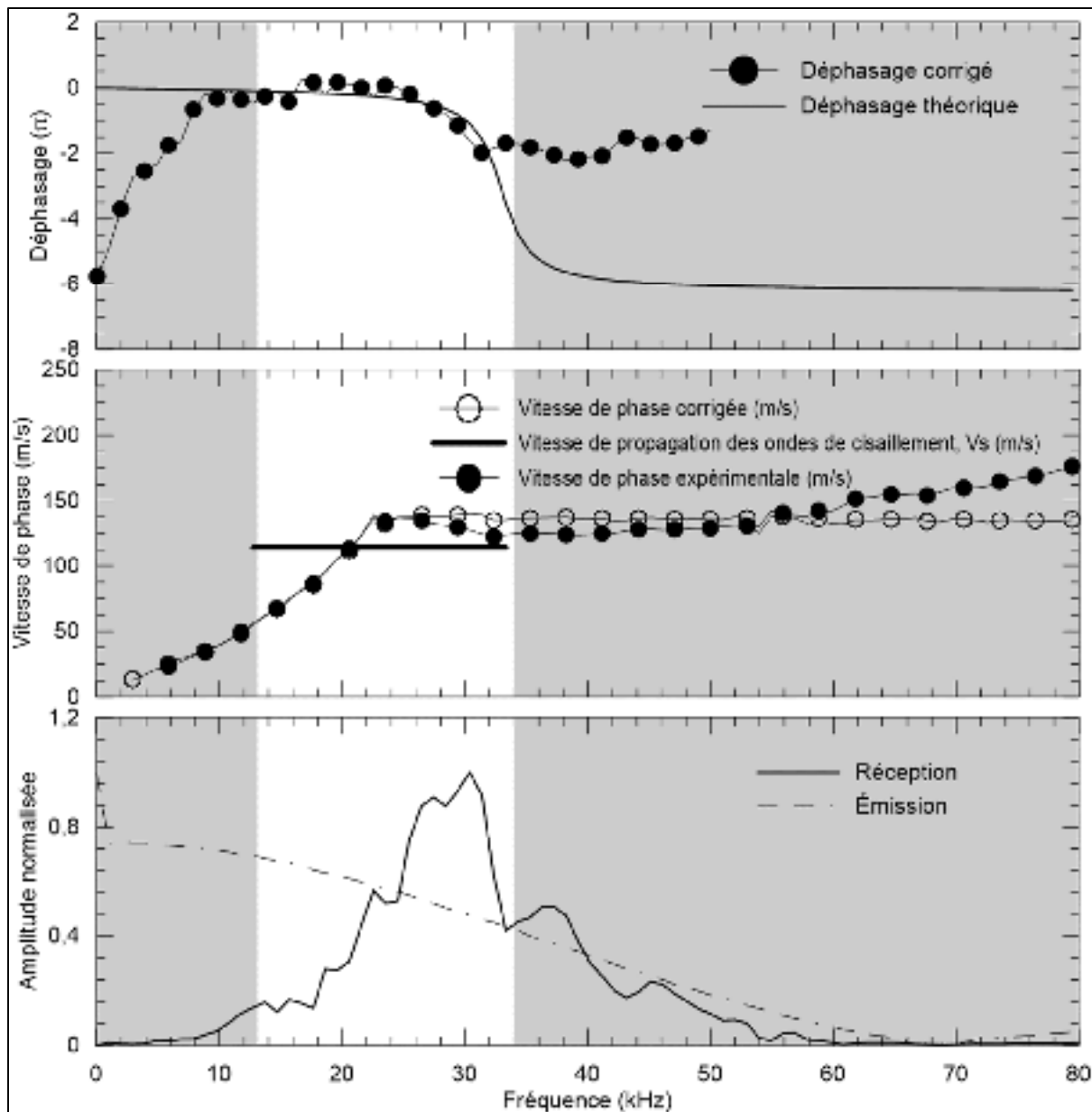


Figure 2.3 Exemple de mauvaise convergence de  $V_s$  causée par la dérivée de la vitesse de phase

La figure 2.3 montre que la corrélation entre  $\phi_{\text{corr}}(f)$  et  $\phi_{\text{th}}(f)$  est adéquate dans la fenêtre de fréquences. Toutefois, une portion non négligeable de la fenêtre de fréquences coïncide avec une augmentation de  $V_{\text{ph}}(f)$  constante. Lorsque cela survient, le critère de la dérivée de  $V_{\text{ph}}(f)$  pour déterminer  $V_s$  ne fonctionne pas, car elle est toujours supérieure à zéro. Cela mène à une

mauvaise évaluation de  $V_s$  par l'algorithme, comme celle exposée à la figure 2.3, où,  $V_s$  devrait être superposée à  $V_{ph}(f)$  corrigée et non en dessous.

Le deuxième type d'erreur survient lorsque la corrélation de  $\phi_{corr}(f)$  et de  $\phi_{th}(f)$  ne converge pas vers le bon  $V_s$  à cause d'un mauvais choix de fenêtres de fréquences. La figure 2.4 illustre un exemple d'un cas où l'élargissement de la fenêtre de fréquences, la zone qui n'est pas ombragée, mène à une mauvaise convergence de  $\phi_{corr}(f)$ . En effet, sur cette figure, pour le même signal, la fenêtre 1 converge à la bonne valeur tandis que la fenêtre 2, plus large, converge à une valeur erronée.

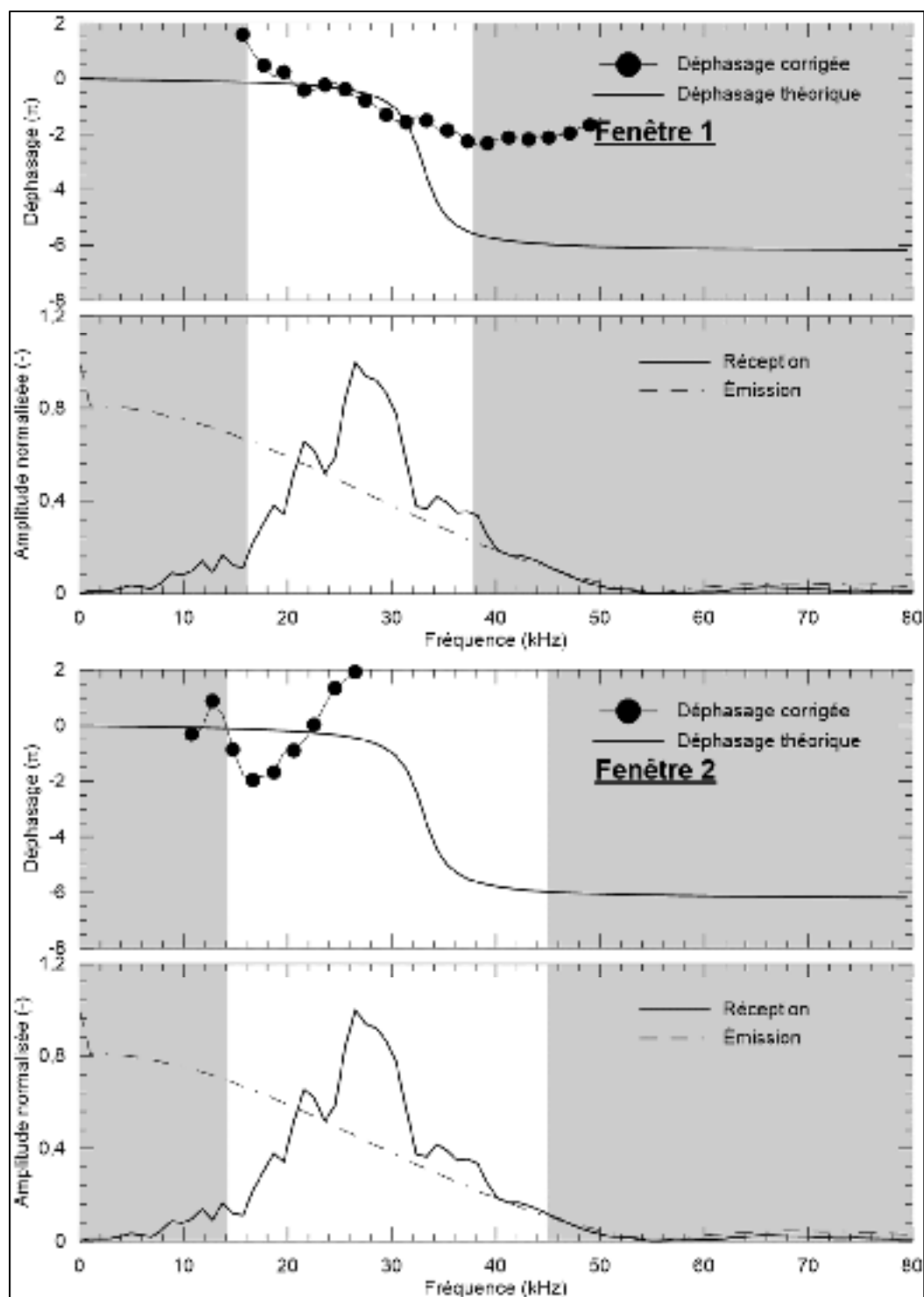


Figure 2.4 Impact sur la convergence du déphasage corrigé en fonction de la fenêtre de fréquences

Finalement, l'automatisation de la méthode P-RAT converge à la bonne valeur de  $V_s$  seulement si la fenêtre de fréquences est bien choisie. Elle peut être déterminée par tâtonnement lors de l'analyse du signal, mais cela enlève les avantages de la vitesse d'analyse à cause de la répétition, et de l'objectivité de l'analyse, parce qu'on insère le jugement de l'utilisateur dans le choix de la fenêtre de fréquences. De plus, lors de ce projet, il a été observé que la fenêtre de fréquences varie en cours d'essai. Il est donc nécessaire de faire plus d'évaluations de  $V_s$  avec la méthode P-RAT afin de bien saisir qu'elle est la meilleure fenêtre de fréquences dans tous les cas. Malgré ces limites, l'automatisation proposée aidera sûrement, à terme, les prochains utilisateurs à obtenir des résultats de  $V_s$  plus objectifs. Enfin, l'algorithme élaboré permettra à d'autres de fournir des pistes de solution quant à l'élaboration d'un algorithme plus robuste.





## **CHAPITRE 3**

### **PROGRAMME EXPÉRIMENTAL**

#### **3.1 Introduction**

Ce chapitre commence par une description des sols qui ont été analysés lors de ce projet. Il se poursuit avec une présentation du montage expérimental qui comprend la cellule œdométrique et les types d'anneaux P-RAT utilisés. Enfin, ce chapitre se clôt sur une présentation du déroulement de tous les essais effectués dans le cadre de ce projet : les normes suivies et/ou les manipulations utilisées.

#### **3.2 Descriptions des sols utilisés**

Au total, dix échantillons d'argile de la mer Champlain ont été caractérisés en fonction de  $V_s$  pour ce mémoire. Le tableau suivant présente la provenance, la forme, les dimensions, la profondeur et une description visuelle des échantillons qui ont été analysés.

Tableau 3.1 Description des échantillons d'argile

| <b>Nom de l'échantillon</b> | <b>Provenance</b>            | <b>Forme</b> | <b>Dimension (H, hauteur et D, diamètre) (cm)</b> | <b>Profondeur (m)</b> | <b>Description visuelle</b>           |
|-----------------------------|------------------------------|--------------|---------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| GD10-Base1                  | Saint-Étienne-de-Beauharnois | Cylindre     | H=15; D=22                                        | 6,8 à 7               | Argile grise                          |
| GD10-Base2                  | Saint-Étienne-de-Beauharnois | Cylindre     | H=15; D=22                                        | 6,8 à 7               | Argile grise                          |
| GD10-Milieu                 | Saint-Étienne-de-Beauharnois | Cylindre     | H=15; D=22                                        | 6,6 à 6,8             | Argile grise                          |
| TM17                        | Site B                       | Cylindre     | H=10; D=6,5                                       | 10,26 à 10,36         | Argile grise                          |
| TM29                        | Site B                       | Cylindre     | H=10; D=6,5                                       | 17,57 à 17,67         | Argile grise avec des traces de sable |
| TM12                        | Site B                       | Cylindre     | H=10; D=6,5                                       | 7,21 à 7,31           | Argile grise                          |
| MT02                        | St-Luc-de-Vincennes          | Cylindre     | H=9; D=6,5                                        | 13,4 à 13,5           | Argile grise                          |
| PS3                         | St-Luc-de-Vincennes          | Cylindre     | H=9; D=6,5                                        | 15,4 à 15,5           | Argile grise                          |
| SCB1                        | Site 1                       | Bloc         | H=10                                              | -                     | Argile grise avec matières organiques |
| SCB2                        | Site 1                       | Bloc         | H=10;                                             | -                     | Argile grise avec matières organiques |

Comme il est présenté dans le tableau 3.1, trois des échantillons de cette étude proviennent de Saint-Étienne-de-Beauharnois. Ils sont le résultat de la division en trois parties (Base, Milieu et Haut) d'un échantillon plus gros, GD10, de 50 cm de hauteur, prélevé au moyen d'un échantillonneur Laval à grand diamètre (22 cm) (La Rochelle, Sarrailh, Tavenas, Roy, & Leroueil, 1981) en 2014 entre six et sept mètres de profondeur. Cet échantillon a été fourni gracieusement à l'ÉTS par Hydro-Québec. De cet échantillon, deux essais de  $V_s$  ont été faits sur la base (GD10-Base1, GD10-Base2) et un autre sur le milieu (GD10-Milieu). Les trois

échantillons avaient une couleur grise et ne semblaient pas contenir de particules ayant un diamètre supérieur à 2,0 mm.

Trois autres échantillons proviennent d'un forage effectué au site B sur la Rive Sud-Est de l'île de Montréal : TM12, TM17 et TM29. Leur diamètre est de 6,5 cm et leur hauteur est de dix centimètres. L'échantillon TM12 a été prélevé entre 7,21 et 7,31 m, l'échantillon TM17 entre 10,26 et 10,36 m et l'échantillon TM29 entre 17,57 et 17,67 m de profondeur. Ce dernier contenait visuellement des traces de sable tandis que les autres échantillons ne contenaient visiblement que des particules d'un diamètre inférieur à 2,0 mm.

Ensuite, d'un forage provenant de Saint-Luc-de-Vincennes deux essais de  $V_s$  ont été faits sur les échantillons MT02 et PS3. Ils ont été échantillonnés à une profondeur de 13,5 m et de 15,5 m. Tous les deux étaient de couleur grise et ne contenaient pas de particules visibles d'un diamètre supérieur à 2,0 mm.

Enfin, deux échantillons (SCB1 et SCB2) prélevés dans la région de Lanaudière, provenant d'un même bloc dont la profondeur est inconnue, ont chacun été caractérisés en fonction de  $V_s$ . Ces deux échantillons contenaient de la matière organique en décomposition qui était visible par des taches brunâtres sur l'échantillon, par une porosité secondaire causée par des racines et par la présence de très fines feuilles.

### **3.3 Montage expérimental**

Les  $V_s$  des échantillons d'argiles ont été mesurées avec des anneaux piézoélectriques P-RAT insérés dans une cellule œdométrique. L'onde émise a été générée et reçue par un appareil Handyscope HS3 de TiePie engineering, qui sert de carte d'acquisition et de générateur d'onde, dont la fréquence d'échantillonnage maximale de l'oscilloscope est de 100 MHz. La modulation de l'onde a été sélectionnée avec l'interface d'un programme, Tie Pie, fourni avec l'oscilloscope. Ce programme permet, entre autres, de générer des formes d'ondes arbitraires, d'empiler les résultats et d'émettre à une fréquence voulue. Une fois que l'onde et la fréquence sont choisies dans le programme, l'appareil génère le signal qui est ensuite amplifié par un

amplificateur Krohn-Hite 7602M avant d'atteindre l'anneau émetteur via un câble coaxial. Enfin, le signal transmis par l'anneau émetteur est capté par l'anneau P-RAT récepteur qui le renvoie à l'oscilloscope, de sorte qu'il peut être visualisé par le programme installé dans un ordinateur personnel fonctionnant sous Windows 7. Le tout est présenté schématiquement à la figure 3.1.

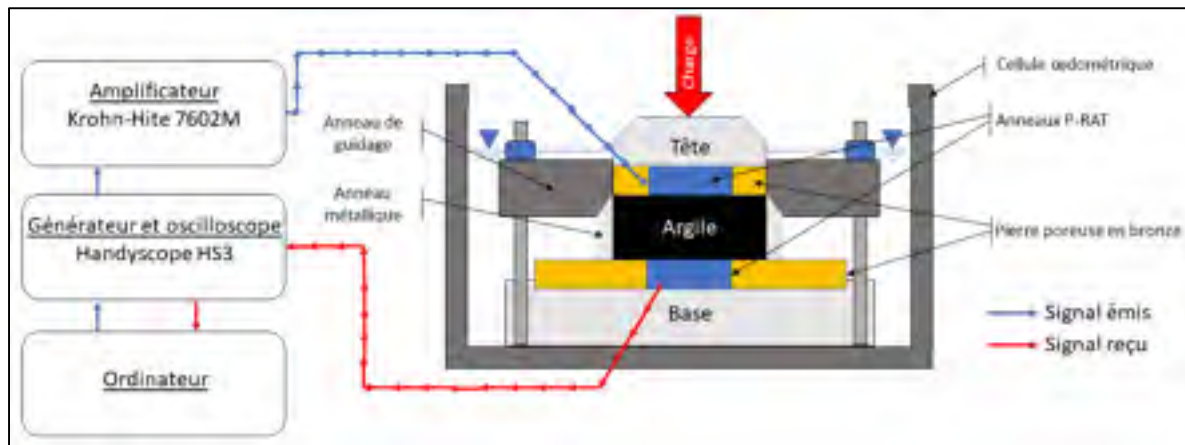


Figure 3.1 Schéma du montage expérimental

Comme l'illustre la figure 3.1, l'échantillon d'argile est centré dans la cellule œdométrique par un anneau de guidage. On y voit aussi que les anneaux P-RAT sont dans les pierres poreuses de bronze de la tête et de la base pour être directement en contact avec l'échantillon. Deux façons d'insérer l'anneau P-RAT dans les pierres poreuses ont été utilisées lors de ce mémoire. La première qui a été utilisée lors des essais sur les échantillons GD10-Base1, GD10-Base2, GD10-Milieu, TM12, TM17 et TM29, consiste à percer préalablement un trou dans la pierre poreuse afin d'y insérer un anneau P-RAT, comme celui de la figure 1.11, tout en laissant une languette inférieure sur laquelle le capteur s'appuie. La figure 3.2 montre cet assemblage.



Figure 3.2 Assemblage de l'anneau dans la pierre poreuse avec une languette d'appuie

L'autre méthode d'insertion de l'anneau dans la pierre poreuse est celle de l'encapsulation de l'anneau, illustrée à la figure 1.12. Cet assemblage a été utilisé lors des essais sur les échantillons SCB1, SCB2, MT02 et PS3. L'ajout de la capsule métallique a été fait afin de prendre en compte les améliorations au montage expérimental recommandées par Mhenni (2016) (*Voir l'ANNEXE I pour les plans détaillés de l'encapsulation des anneaux P-RAT de la marque Steminc*). En effet, selon Mhenni (2016), l'encapsulation diminue l'effet de la contrainte sur la polarisation de l'anneau. Ainsi, l'amplitude des ondes P émises lors de la contraction de l'anneau est réduite et la réception de l'onde S est plus claire.

### 3.3.1 Anneaux P-RAT

Quatre types d'assemblages d'anneaux P-RAT ont été utilisés pour mesurer  $V_s$  lors de ce projet. Ils se distinguent par leurs marques et leurs dimensions (Steminc ou APC) ou par la façon dont leur pierre poreuse centrale est divisée (scindée en quatre morceaux ou trouée en forme de croix). L'objectif des différents assemblages était d'améliorer la clarté des signaux reçus lors des essais. Deux caractéristiques sont recherchées lors de la conception d'un anneau idéal. La première est un mouvement de l'anneau purement radial, c'est-à-dire un anneau qui ne génère pas d'ondes P, bien que ce soit théoriquement impossible à cause de l'effet de Poisson (Karray et al., 2015; Lecuru, 2015). La seconde est une amplitude du mouvement

élevée, mais en évitant d'induire des déformations au-delà de la limite élastique ( $\gamma < 10^{-3} \%$ ) à l'échantillon de sol. Par conséquent, au fil des expérimentations, l'assemblage des anneaux P-RAT a évolué afin d'optimiser ces deux caractéristiques du mouvement. Les paragraphes qui suivent décrivent en détail les différents modèles d'anneaux P-RAT utilisés lors des expérimentations.

Tout d'abord, deux types d'anneaux polarisés radialement provenant de deux fabricants ont été utilisés lors de ce projet. Les anneaux piézoélectriques provenant du fabricant Steminc ont un diamètre extérieur de 20 mm, un diamètre intérieur de 17 mm et une hauteur de 5 mm. Ils sont constitués d'un matériau dérivé du PZT-4 (dur) qui se nomme le SM111. Quant aux anneaux piézoélectriques de la marque APC leur diamètre extérieur est de 19 mm, leur diamètre intérieur est de 16 mm et leur hauteur est de 3,5 mm. Contrairement au Steminc, son matériau de confection est un dérivé du PZT-5 (mou) qui se nomme 850 Type II. Le tableau suivant présente une partie des propriétés des matériaux fournies par les fabricants (APC International Ltd, 2016; Steminc, 2017).

Tableau 3.2 Propriétés des matériaux piézoélectriques

| Marque                      | APC         | Steminc |
|-----------------------------|-------------|---------|
| Matériau                    | 850 Type II | SM-111  |
| $d_{33}$ (pm/V)             | 400         | 320     |
| $-d_{31}$ (pm/V)            | 175         | 140     |
| $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 7,6         | 7,9     |
| Q (-)                       | 80          | 1800    |

Dans le tableau 3.2,  $\rho$  est la masse volumique du matériau piézoélectrique, Q est le facteur de qualité mécanique et les  $d_{ij}$  ( $d_{33}$  et  $d_{31}$ ) sont les constantes de charge piézoélectrique. Q représente la largeur du spectre de fréquence centrée sur la fréquence de résonance : plus Q est faible, plus le spectre est large et inversement pour un Q élevé (Uchino, 2003). La différence entre les deux modèles d'anneau provient de leur matériau : le matériau SM111 est plus rigide

que le matériau 850 Type II. Le SM111 a donc une amplitude de déplacement plus faible et un  $Q$  plus élevé que le matériau 850 Type II. De même, le modèle d'APC a des constantes de charge piézoélectrique plus élevées, il devrait donc générer plus de déplacement et avoir une réception plus claire. En revanche, un matériau piézoélectrique dur, comme le SM111, est moins sensible à faible contrainte ( $< 25$  MPa) qu'un matériau piézoélectrique mou au fluage et à la dépolarisation (Li, Li, & Li, 2015). Cette dureté devrait a priori rendre le modèle de Steminc plus résistant que le modèle d'APC lors des essais de consolidation durant lesquels le matériau est soumis à une contrainte pour plusieurs semaines.

Ensuite, en plus des deux modèles d'anneaux piézoélectriques, deux types de pierre poreuse centrale ont été utilisés lors des essais de  $V_s$ . Les premiers essais ont été faits avec des pierres poreuses dont le centre était troué en forme de croix. Par la suite, dans le but d'améliorer les anneaux P-RAT, la recommandation de Mhenni (2016) de scinder la pierre poreuse centrale en quatre morceaux a été appliquée aux anneaux P-RAT. En effet, selon une modélisation avec COMSOL, Mhenni (2016) a démontré que scinder la pierre poreuse en quatre morceaux diminue l'amplitude des déplacements longitudinaux lors de la génération de l'onde S. Il y a donc moins d'ondes P susceptibles d'interférer avec les ondes S lors de la réception du signal. La figure suivante illustre les deux types d'anneaux P-RAT qui ont été utilisés en fonction de leur pierre poreuse centrale.

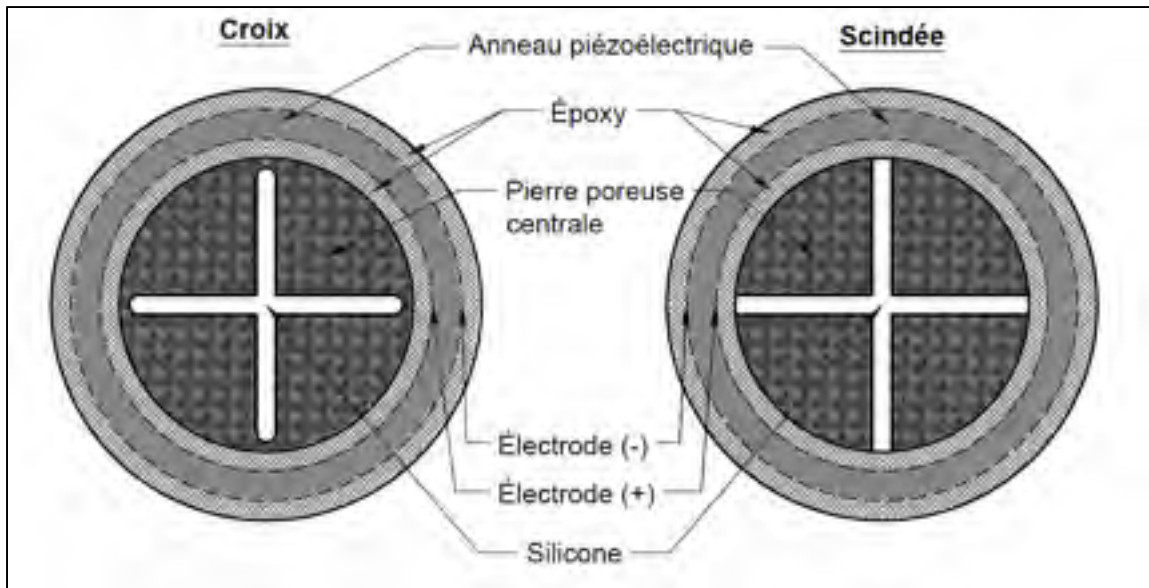


Figure 3.3 Schéma des deux types de pierre poreuse centrale (en croix et scindée)

Il est important de noter que lors de l'assemblage des anneaux P-RAT, l'électrode positive est sur la face intérieure de l'anneau tandis que l'électrode négative est sur la face extérieure.

Enfin, avant chaque essai de  $V_s$ , les anneaux P-RAT étaient calibrés selon la méthode face-à-face afin de déterminer leur courbe caractéristique de déphasages théoriques du système en fonction de  $f_0$  et du  $D$  (Voir la section 1.6.2 et l'équation (1.23)). Le tableau suivant présente, en plus des  $f_0$  et  $D$  caractéristiques du système, le type d'anneau P-RAT utilisé ainsi que la façon dont l'anneau a été inséré dans les pierres poreuses de la tête et de la base pour chaque échantillon analysé durant ce projet. Il est à noter que les résultats détaillés de la calibration sont présentés à l'ANNEXE II.



Tableau 3.3 Types d'anneaux P-RAT utilisés pour chaque échantillon

| Échantillon | Marque de l'anneau |     | Insertion dans la pierre poreuse |              | Pierre poreuse centrale |         | Caractéristiques du déphasage théorique du système |       |
|-------------|--------------------|-----|----------------------------------|--------------|-------------------------|---------|----------------------------------------------------|-------|
|             | Steminc            | APC | Avec capsule                     | Sans capsule | Croix                   | Scindée | $f_0$ (kHz)                                        | D (%) |
| GD10-Base1  |                    | X   |                                  | X            | X                       |         | 34                                                 | 5     |
| GD10-Base2  | X                  |     |                                  | X            | X                       |         | 33                                                 | 2     |
| GD10-Milieu |                    | X   |                                  | X            | X                       |         | 34                                                 | 5     |
| TM12        | X                  |     |                                  | X            | X                       |         | 33                                                 | 2     |
| TM17        |                    | X   |                                  | X            | X                       |         | 34                                                 | 5     |
| TM29        | X                  |     |                                  | X            | X                       |         | 33                                                 | 2     |
| MT02        | X                  |     | X                                |              | X                       |         | 33                                                 | 3     |
| PS3         | X                  |     | X                                |              | X                       |         | 33                                                 | 3     |
| SCB1        | X                  |     | X                                |              |                         | X       | 28                                                 | 6     |
| SCB2        | X                  |     | X                                |              | X                       |         | 33                                                 | 3     |

### 3.4 Déroulement des essais

Les mesures de  $V_s$  des échantillons d'argile ont été faites en même temps qu'un essai de consolidation dans une cellule œdométrique. Ainsi, pour chaque échantillon d'argile testé, la première étape a été de préparer un spécimen intact pour l'essai de consolidation, la deuxième a été de le caractériser et la dernière a été de mesurer  $V_s$  pendant l'essai de consolidation.

#### 3.4.1 Essais de caractérisation

Trois essais de caractérisations ont été faits sur les échantillons d'argile en plus de l'essai de consolidation : les limites plastiques ( $\omega_p$ ) et liquides ( $\omega_L$ ), la densité des grains secs ( $G_s$ ) et la granulométrie des particules fines.

Il faut souligner que tous les spécimens qui ne provenaient pas d'un bloc homogène ont été caractérisés individuellement. Tandis que pour ceux provenant d'un bloc homogène, il a été supposé que les caractéristiques du spécimen étaient identiques à celles du bloc d'où il provient. Dès lors, les essais de caractérisation ont été faits que sur un des spécimens jugé représentatif du bloc (*Voir* le tableau 3.1 pour la description des échantillons).

La limite de liquidité des échantillons d'argile a été déterminée sur des échantillons humides avec l'essai à la coupole de Casagrande selon la méthode A (Méthode à plusieurs points) de la norme ASTM D4318-17 (2017). Quant à la limite plastique, elle a été déterminée avec la méthode des rouleaux faits à la main toujours selon la méthode de la norme ASTM D4318-17 (2017).

La densité des grains secs  $G_s$  a été déterminée avec l'essai au pycnomètre à eau de 500 ml. Lorsque l'échantillon était en quantité suffisante, un ou plusieurs essais ont été faits avec l'échantillon humide. Sinon, à chaque fois, un essai au pycnomètre a été fait à la suite de l'essai de consolidation sur le spécimen contenu dans l'anneau métallique séché préalablement dans l'étuve à 110 °C. Ainsi, la moyenne de tous les essais sur le même échantillon est la  $G_s$  sélectionnée pour les analyses. Les essais aux pycnomètres ont été exécutés conformément à la norme ASTM D854-14 (2014).

Finalement, la granulométrie des particules fines a été faite selon la méthode humide de la norme ASTM D7928-17 (2017) avec un hydromètre 152H. Il est à noter que la méthode utilisée pour mélanger l'échantillon dans le cylindre de décantation a été celle avec l'agitateur manuel et qu'autant le cylindre de décantation que l'hydromètre 152H ont été calibrés avant d'effectuer les essais.

### 3.4.2 Essais de consolidation

Dans l'ensemble, les essais de consolidation ont été exécutés en accord avec la norme ASTM D2435-11 (2011) avec un œdomètre à chargement frontal de la marque Humboldt modèle HM-1100A. Les distinctions entre les essais de ce mémoire et la méthode de la norme proviennent des ratios d'incrément de charges (LIR) ainsi que de la façon dont est inséré l'anneau métallique dans l'échantillon. En effet, la norme D2435-11 suggère de faire des LIR d'au moins 1, c'est-à-dire de doubler la charge à chaque palier, alors que lors des essais de consolidation qui ont été faits, le LIR est souvent inférieur à 0,5. Le choix d'un  $LIR < 0,5$  avant la contrainte de préconsolidation,  $\sigma'_p$ , provient du but d'obtenir une meilleure évaluation de la  $\sigma'_p$ . Quant aux  $LIR < 0,5$  après la  $\sigma'_p$ , l'objectif était d'avoir plus de résultats de  $V_s$  en fonction de plusieurs états de contraintes. Pour ce qui est de l'insertion de l'anneau, il a été exécuté avec l'appareil presseur illustré à la figure 3.4 afin que l'anneau pénètre l'échantillon le plus droit possible tout en évitant le remaniement de l'argile. Il est à noter que lors des essais, les pierres poreuses de la tête et de la base n'ont pas été couvertes d'un papier filtre pour que la pierre poreuse centrale de l'anneau P-RAT soit directement en contact avec l'échantillon. La norme n'exige pas, par ailleurs, l'utilisation d'un papier filtre.

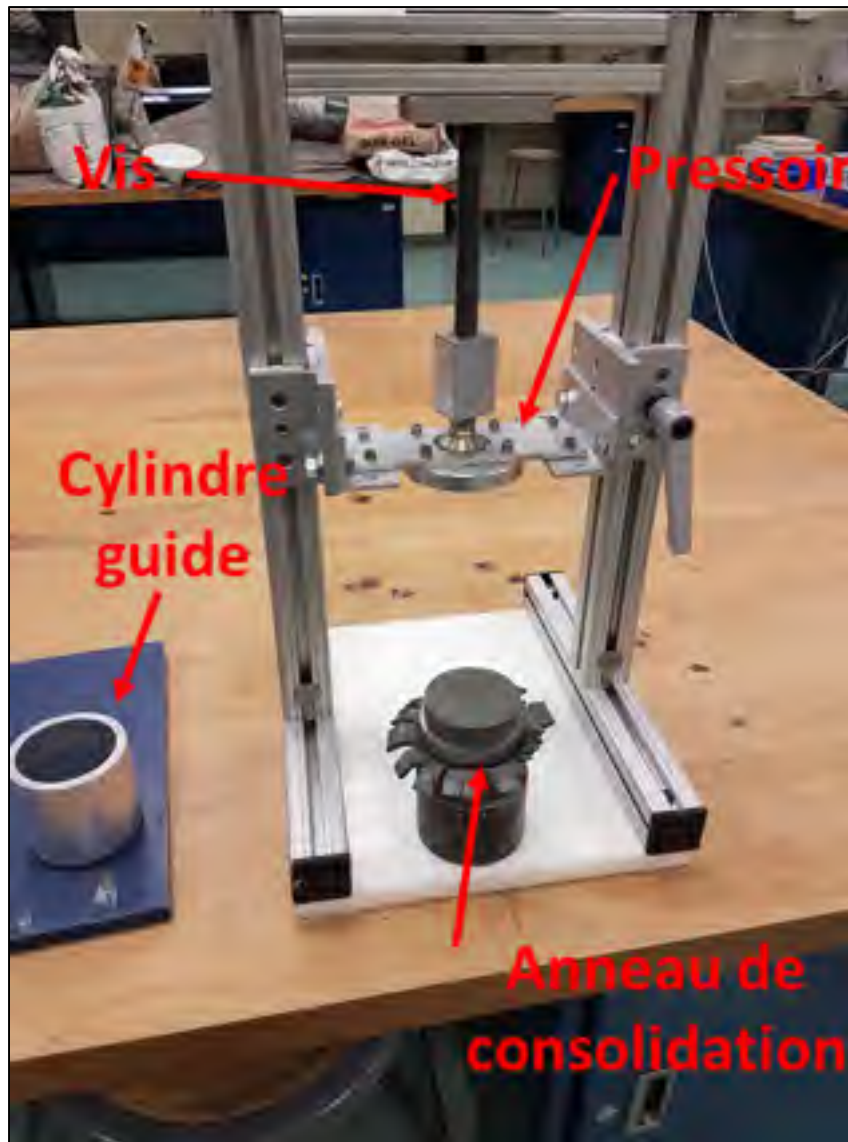


Figure 3.4 Pressoir servant à insérer l'anneau métallique d'un essai de consolidation

De plus, lors des essais de consolidation la charge maximale était dictée soit par des tassements qui approchent la limite de l'appareil ou soit par la limite empirique des anneaux piézoélectriques avant qu'ils ne se brisent : 500 kPa. Le premier cas est survenu pendant les essais GD10-Milieu, SCB1 et SCB2 qui ont atteint des tassements de plus de 7,1 mm, ce qui est près de la limite physique de l'appareil utilisé. Le deuxième cas est pour tous les autres essais, sauf ceux qui ont été faits avec un anneau encapsulé dans une cellule métallique qui les

protégeait de la charge. Ces derniers ont pu atteindre une charge de plus 900 kPa sans montrer aucun bris. La robustesse d'un assemblage impliquant une capsule constitue donc un avantage.

Sauf pour l'essai GD10-Milieu, tous les essais de consolidation ont été faits en deux cycles de chargement/déchargement. Le premier cycle consiste à charger l'appareil jusqu'à une charge d'environ 80 % de  $\sigma'_p$  et de le décharger jusqu'à une contrainte d'environ 5 kPa. Ensuite, l'appareil est rechargé jusqu'à la charge maximale pour être déchargé à nouveau selon les étapes suggérées par la norme ASTM D2435-11 (2011). Le premier cycle de chargement est utile afin d'obtenir un meilleur couplage entre l'anneau P-RAT et l'argile à faible charge lors du second chargement, sinon les signaux obtenus à faible charge s'avèrent plus difficiles à analyser à cause de leur faible amplitude. Il est aussi présumé que le premier cycle de chargement favorise le développement de contraintes horizontales plus proches de celles devant prévaloir en condition œdométrique, c'est-à-dire en condition de déplacement latéral empêché.

### **3.4.3 Essais de $V_s$**

Les essais de  $V_s$  avec les anneaux P-RAT ont été faits en concomitance avec un essai de consolidation. Les mesures de  $V_s$  ont été prises à la fin de chaque palier de charge de l'essai de consolidation, de sorte que les surpressions interstitielles de l'échantillon soient en majeure partie dissipées. De cette façon, la contrainte totale appliquée au sol est égale à la contrainte effective. Lors des mesures, il a été généré plusieurs pulsions d'onde de formes différentes et à plusieurs fréquences afin d'obtenir le plus de résultats possible.

Pour diminuer le bruit lors de la réception, à chaque mesure, la moyenne de huit salves d'ondes a été utilisée. Ensuite, dans le but d'augmenter la fiabilité de la mesure de  $V_s$ , quatre formes d'onde, qui sont présentées à la figure 3.5, ont été générées successivement et à différentes fréquences. Les fréquences émises ont varié entre 2 kHz et la fréquence de résonance du système (*Voir le tableau 3.3*).

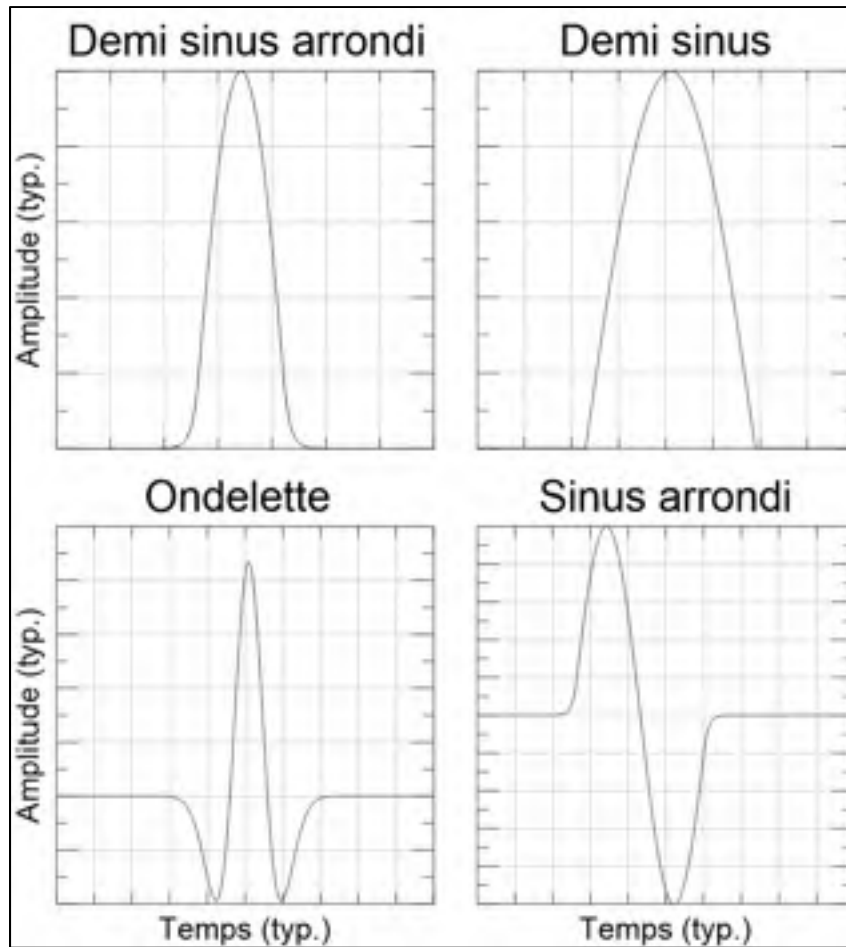


Figure 3.5 Signaux d'émission utilisés

La fréquence d'échantillonnage n'a pas été inférieure lors des essais à 1 MHz. Dès lors, la fréquence de Nyquist a toujours été supérieure à 500 kHz. Ce qui est adéquat, en sachant que dans le domaine fréquentiel, la réception des anneaux P-RAT est environ entre 0 et 100 kHz.

Enfin, les signaux reçus sont interprétés par la méthode P-RAT (Karray et al., 2015) (*Voir la section 1.6.2*) afin de déterminer  $V_s$ .

## CHAPITRE 4

### CARACTÉRISATIONS DES ASSEMBLAGES D'ANNEAUX P-RAT

#### 4.1 Introduction

Les propriétés des matériaux données par les fabricants ne sont pas celles qui auront cours lors des essais de  $V_s$ . Effectivement, les anneaux piézoélectriques sont modifiés afin d'être insérés dans la cellule œdométrique avec l'ajout d'une pierre poreuse centrale, d'une couche d'époxy et de silicone, en plus de la soudure utilisée pour le branchement des fils aux électrodes. Il est donc difficile de prédire le comportement d'un assemblage d'anneaux P-RAT avant de commencer un essai. C'est pour cette raison que plusieurs types d'assemblage, avec et sans encapsulation de l'anneau, ont été utilisés lors de ce mémoire. En plus de l'impact de l'assemblage sur le comportement de l'anneau piézoélectrique, après chaque essai de consolidation on observe une altération, ou vieillissement, du comportement de l'anneau. En effet, l'amplitude des ondes P reçues croît à force d'utilisation, jusqu'à un seuil où l'interférence causée par les ondes P empêche la distinction des ondes S et rendent l'anneau inutilisable. Dès lors, le but de ce chapitre est de caractériser objectivement les différents types d'anneaux piézoélectriques qui ont été utilisés lors de ce projet.

Tout d'abord, deux méthodes ont été utilisées pour caractériser les anneaux P-RAT. La première méthode est la mesure de l'impédance qui servira à comparer le comportement électrique des modèles d'anneaux ainsi que l'impact du vieillissement selon un modèle de circuit équivalent. La seconde méthode est l'interférométrie lors de laquelle les déplacements des différents modèles d'anneaux ont été mesurés.

Ensuite, en utilisant des signaux reçus lors des mesures de  $V_s$  sur des argiles de la mer Champlain, les anneaux P-RAT encapsulés dans une cellule métallique sont comparés à ceux sans la capsule.

Enfin, ce chapitre se termine par une discussion dont le but est, selon les résultats obtenus, de déterminer le meilleur assemblage P-RAT analysé.

## 4.2 Modèle du circuit équivalent avec l'impédance

L'impédance  $Z$  d'un anneau piézoélectrique décrit son comportement électrique à une fréquence donnée. Comme les caractéristiques électriques d'un élément piézoélectrique sont liées aux caractéristiques mécaniques, il est possible d'en décrire le comportement par  $Z$  en fonction de la fréquence avec le modèle de circuit électrique équivalent de Butterworth Van-Dyke (Arnau Vives, 2004). En revanche, ce modèle ne permet pas de déterminer les constantes de charge piézoélectrique ( $d_{31}$  et  $d_{33}$ ) des anneaux piézoélectriques. Cela dit, il permet d'établir un paramètre  $Q$  qui peut être comparé à celui du fabricant. Ce même  $Q$  peut aussi servir à évaluer l'impact de l'utilisation répétée des anneaux.

Pour ce mémoire,  $Z$  a été mesuré en fonction de la fréquence sur plusieurs types d'anneaux piézoélectriques avec un analyseur de réseau Agilent E5061B. En effet, l'analyseur de réseau permet de mesurer  $Z$  d'un matériau piézoélectrique sur une plage de fréquence prédéterminée. Dans ce cas-ci, les mesures ont été prises entre 10 et 75 kHz. Il est à noter que  $Z$  est un nombre imaginaire. Dès lors, l'analyseur de réseau mesure un module d'impédance  $|Z|$  et un angle de phase  $\theta$  que l'on relie à  $Z$  par la somme des parties réel et imaginaire de la façon suivante :

$$Z = |Z| \cos \theta + j|Z| \sin \theta \quad (4.1)$$

Le  $Z$  de deux modèles d'anneau piézoélectrique a été mesurée : Steminc et APC.  $Z$  a tout d'abord été mesurée sur les anneaux directement reçus du fabricant. Ensuite, des mesures ont été prises sur les deux types d'anneaux P-RAT assemblés avec une pierre poreuse centrale trouée en forme de croix (Croix (Inutilisé)) et avec une pierre poreuse scindée en quatre morceaux (Scindée) (Voir la figure 3.3). Enfin, le  $Z$  d'un anneau P-RAT de marque APC et un autre de marque Steminc, tous les deux assemblés avec une pierre poreuse centrale en croix, qui avaient chacun été utilisés lors de trois essais de  $V_s$  dans une cellule œdométrique, a été



mesuré (Croix (Usé)). Les figures suivantes présentent le résultat des évaluations du module d'impédance  $|Z|$  et de l'angle de phase  $\theta$  des différentes configurations d'anneaux P-RAT pour le premier mode de résonance.

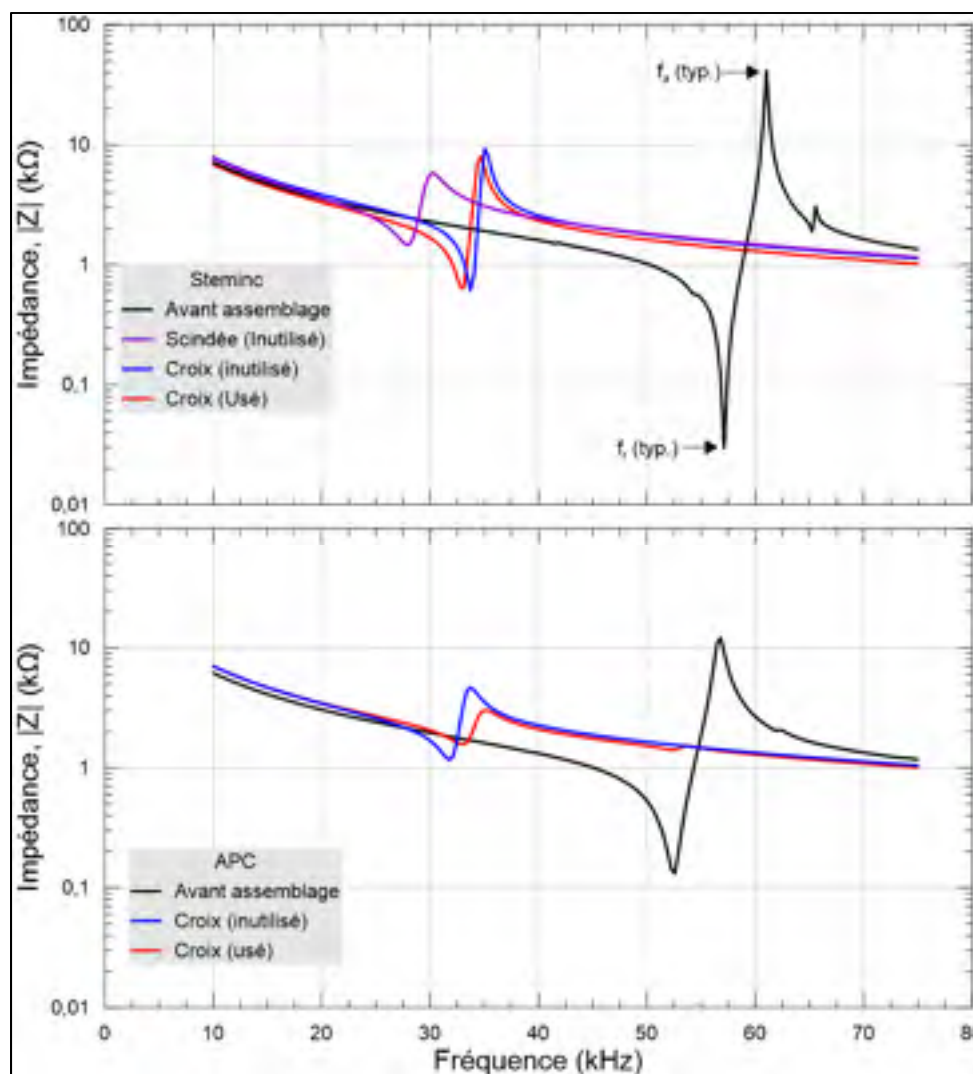


Figure 4.1 Module d'impédance des différentes configurations et modèles d'anneaux P-RAT

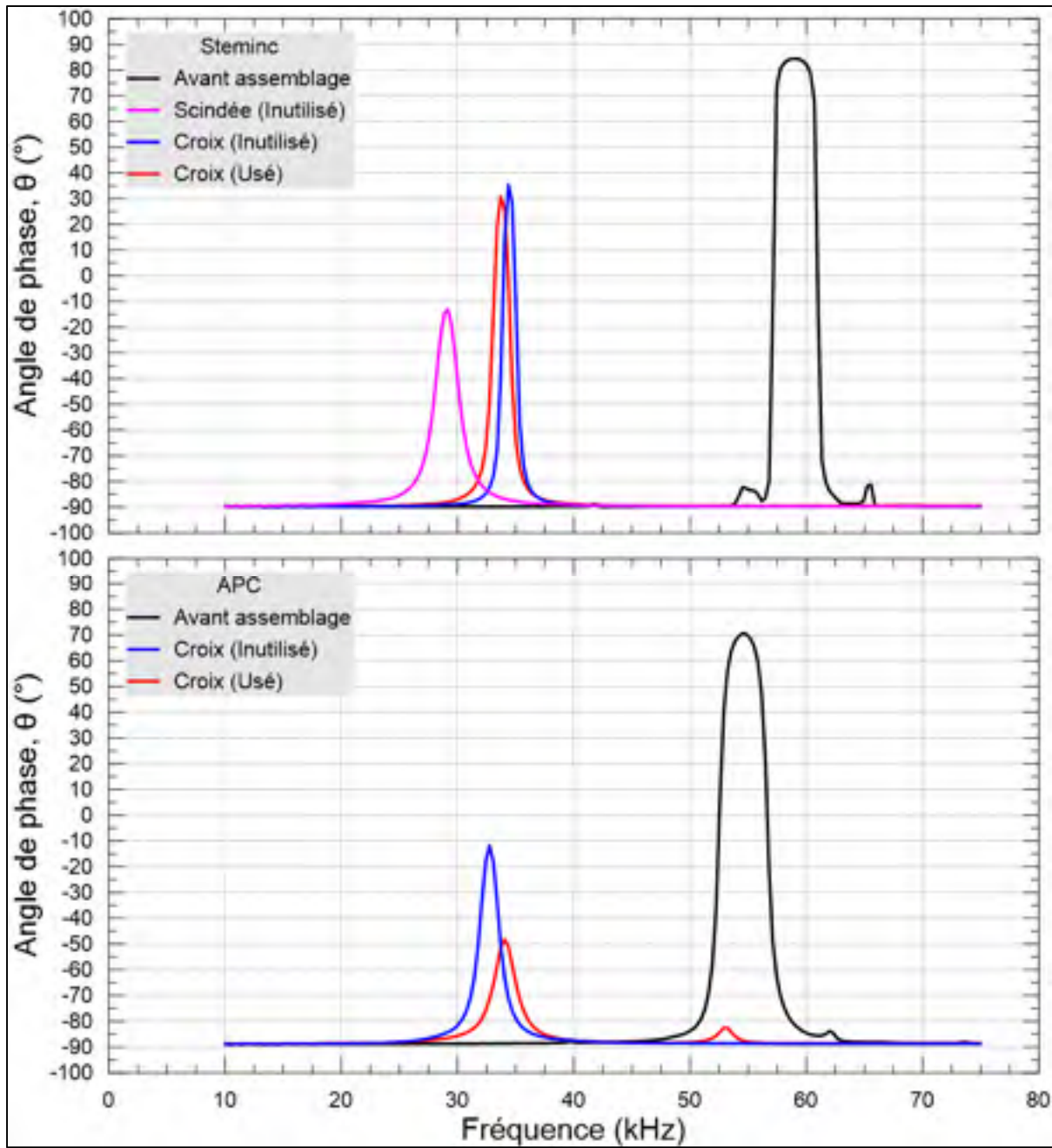


Figure 4.2 Angle de phase des différentes configurations et modèles d'anneaux P-RAT

Les pics d'impédance de la figure 4.1 représentent, lorsque  $Z$  est minimale, la fréquence de résonance  $f_r$  et la fréquence d'antirésonance  $f_a$  lorsque  $Z$  est maximale.

Selon la norme ANSI/IEEE Std 176-1987 (1988) en fonction de  $Z$  et de  $\theta$ ,  $Q$  s'évalue par l'équation suivante :

$$Q = \frac{(L_1/C_1)^{1/2}}{R_1} \quad (4.2)$$

Tirée de l'ANSI/IEEE Std 176-1987 (1988, p. 50), dans laquelle  $L_1$  est l'inductance d'un résonateur dans un circuit équivalent en série en  $H$ ,  $C_1$  est le condensateur d'un résonateur dans un circuit équivalent en série en  $F$  et  $R_1$  est la résistance d'un résonateur d'un circuit équivalent en série en  $\Omega$ .

Toutes les constantes de l'équation (4.2) ont été déterminées selon la norme ANSI/IEEE Std 176-1987 (1988) en respectant les étapes qui suivent.

Tout d'abord, la résistance d'un élément piézoélectrique  $R$  est la partie réelle de  $Z$  ( $R = \text{Re}(Z)$ ). Dès lors,  $R_1$  s'obtient par la différence entre la résistance maximale et la résistance mesurée loin de la fréquence de résonance de l'élément piézoélectrique.

Ensuite,  $C_1$  s'évalue en fonction de la dérivée de la réactance  $X$  ( $X = \text{Im}(Z)$ ) à la fréquence de résonance, de cette façon :

$$C_1 = \frac{1}{\pi f_r^2 \frac{dX(f=f_r)}{df}} \quad (4.3)$$

Adaptée de ANSI/IEEE Std 176-1987 (1988, p. 52).

Enfin, une fois que  $C_1$  est connu,  $L_1$  est déterminée selon la relation suivante :

$$L_1 = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 C_1} \quad (4.4)$$

Adaptée de l'ANSI/IEEE Std 176-1987 (1988, p. 53).

Le tableau suivant compare les différentes configurations d'anneaux P-RAT en fonction de leurs paramètres électriques tirés de la figure 4.1, avec l'anneau avant l'assemblage et les paramètres des fabricants.

Tableau 4.1 Paramètres caractéristiques des anneaux P-RAT selon l'impédance

| Modèle  | Assemblage          | $f_r$ (kHz) | $f_a$ (kHz) | $L_1$ (mH) | $C_1$ (pF) | $R_1$ ( $\Omega$ ) | $Q$ (-) |
|---------|---------------------|-------------|-------------|------------|------------|--------------------|---------|
| Steminc | Avant assemblage    | 57          | 61          | 29         | 268        | 13                 | 779     |
|         | Scindée (Inutilisé) | 28          | 30          | 52         | 629        | 888                | 10      |
|         | Croix (Inutilisé)   | 34          | 35          | 119        | 187        | 473                | 53      |
|         | Croix (Usé)         | 33          | 35          | 102        | 227        | 603                | 35      |
|         | Fabricant           | 57          | -           | -          | -          | -                  | 1800    |
| APC     | Avant assemblage    | 53          | 57          | 22         | 410        | 92                 | 80      |
|         | Croix (Inutilisé)   | 32          | 34          | 37         | 678        | 718                | 10      |
|         | Croix (Usé)         | 33          | 35          | 3          | 8309       | 620                | 1       |
|         | Fabricant           | 51          | -           | -          | -          | -                  | 80      |

Le tableau 4.1 expose que l'assemblage des capteurs P-RAT fait diminuer la fréquence de résonance et augmenter la résistance électrique des capteurs par rapport à l'anneau avant l'assemblage. De plus, la pierre poreuse scindée en quatre morceaux entraîne un  $Q$  plus faible que la pierre trouée en croix. De cette façon, la pierre scindée a un spectre de fréquence plus large que la pierre en croix. D'un autre côté, le modèle de capteurs APC en croix inutilisé possède un  $Q$  égal au modèle Steminc avec la pierre scindée tout en ayant une fréquence de résonance plus élevée.

Pour ce qui est du vieillissement des capteurs, le tableau 4.1 montre que, pour le modèle Steminc avec une pierre poreuse en croix, l'utilisation lors des essais de consolidation a fait diminuer la  $f_r$  de 1 kHz et le Q de 18. Tandis que pour le modèle d'APC, la  $f_r$  a augmenté de 1 kHz et le Q a diminué de 9. Dans les deux cas, la fréquence de résonance a été peu affectée par l'utilisation des anneaux. En revanche, le Q a diminué. Selon ces résultats, il n'est pas possible de déterminer lequel des deux modèles d'anneau supporte le mieux le vieillissement, car les deux semblent avoir subi des altérations semblables dans leur comportement électrique.

Lorsqu'on compare les valeurs de Q mesurées à l'analyseur d'impédance avec les valeurs de Q fournies par le fabricant, on observe qu'elles concordent parfaitement avec celles du fournisseur APC, mais qu'elles diffèrent du Q donné par le fournisseur Steminc.

Bien que la  $f_r$  des anneaux intacts, avant l'assemblage, de la marque Steminc soit plus élevée, les résultats du tableau 4.1 tendent à favoriser les anneaux APC une fois assemblés en croix. En effet, la  $f_r$  des deux types d'anneaux, APC et Steminc, est semblable lorsque ceux-ci sont assemblés. Cependant, le Q de l'anneau APC ( $Q = 10$ ) est plus faible que l'anneau Steminc ( $Q = 53$ ), de cette façon il émettra un spectre de fréquence plus large.

### **4.3 Analyse du mouvement de l'anneau par interférométrie au laser**

L'ampleur du mouvement réel de l'anneau P-RAT n'est pas connue. Lorsqu'on génère une onde, selon le schéma de la figure 3.1, la tension émise à l'anneau émetteur est connue et la tension reçue par l'anneau récepteur est mesurée par l'oscilloscope, mais l'ampleur du déplacement mécanique reste inconnue. Il importe de quantifier ce déplacement pour caractériser l'assemblage de l'anneau P-RAT et pour déterminer si l'anneau P-RAT n'engendre pas des déformations au-delà de la limite élastique au sol.

Il importe donc de mesurer les déplacements des anneaux P-RAT sous tension,  $V$ . Pour ce faire, il a été choisi lors de ce mémoire de procéder avec l'interférométrie au laser. Cet essai consiste à mesurer le déphasage d'un rayon lumineux dirigé vers un objet qui vibre. Comme

la longueur d'onde du rayon lumineux, la phase du rayon lumineux sans mouvement ainsi que la distance entre l'anneau et le laser sont connues, il est possible de mesurer le déplacement de l'anneau.

#### 4.3.1 Montage expérimental de l'interférométrie au laser

Le montage utilisé pour mesurer le déplacement de l'anneau P-RAT en fonction de  $V$  est constitué d'un ordinateur pour afficher et extraire les signaux émis et reçus, d'un générateur d'onde combiné à un oscilloscope pour générer et recevoir les signaux, d'un contrôleur de laser et de lasers. Afin de pouvoir mesurer le déplacement radial et le déplacement longitudinal, il est nécessaire d'avoir deux lasers orientés différemment qui mesurent simultanément les déplacements. Le tout est montré schématiquement à la figure suivante :

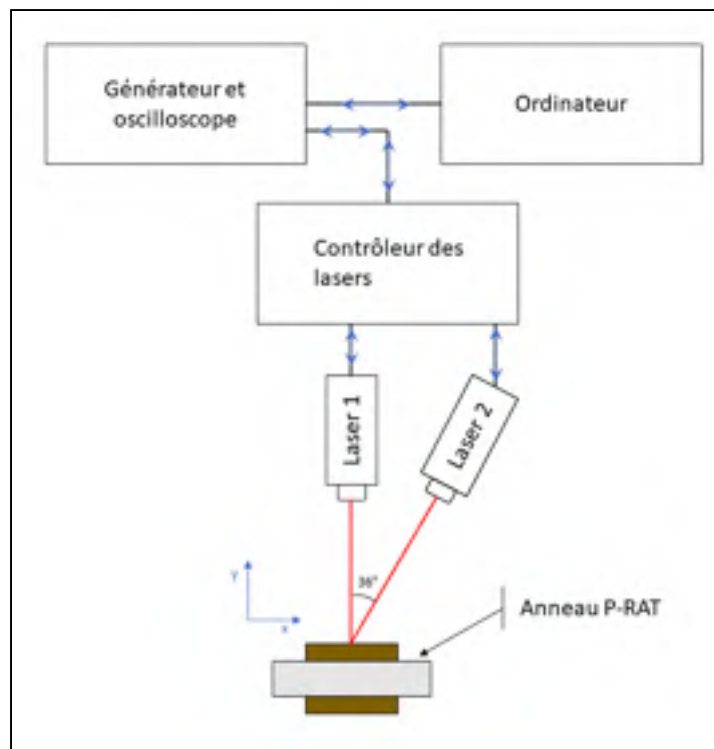


Figure 4.3 Schéma du montage de l'interférométrie

Le schéma du montage de la figure 4.3 montre que le laser 1 mesure uniquement le déplacement longitudinal de l'anneau, tandis que le laser 2 est placé obliquement, selon un angle prédéterminé de  $36^\circ$ , pour mesurer un déplacement composé des déplacements longitudinaux et radiaux. En tenant compte que c'est le déplacement radial qui induit l'onde S, seule la composante radiale du laser 2 est analysée. Notons que le schéma indique que le déplacement est positif lorsque l'anneau se déplace vers le laser.

Toujours selon la figure 4.3, les lasers et leur contrôleur, qui ont été utilisés, sont de la marque Polytec. Le modèle des lasers est le OFV-505 et le modèle du contrôleur est le OFV-2570. Les caractéristiques techniques du contrôleur de laser pour les mesures des déplacements sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 4.2 Caractéristiques techniques du contrôleur de laser Polytec OFV-2570

|                            |                                     |
|----------------------------|-------------------------------------|
| <b>Déplacement mesuré</b>  | 50 nm/V                             |
| <b>Amplitude maximale</b>  | $\pm 75$ nm                         |
| <b>Plage de fréquences</b> | 30 kHz à 24 MHz (-3 dB)             |
| <b>Erreur</b>              | < 2% (jusqu'à l'amplitude de 60 nm) |

Enfin, le modèle de l'appareil qui combine l'oscilloscope et le générateur d'onde est un Agilent 33500 B. La figure suivante est une photo du montage utilisé :



Figure 4.4 Photo de l'interféromètre utilisé

#### 4.3.2 Déroulement de l'essai à l'interférométrie

L'essai à l'interféromètre a été fait sur trois anneaux de la marque Steminc, un non assemblé et deux assemblés. Les deux types d'anneaux assemblés testés sont, l'un, avec une pierre poreuse centrale trouée en forme de croix et l'autre, avec une pierre poreuse centrale scindée en quatre morceaux (*Voir la figure 3.3*). Afin que la réception du signal par les lasers soit nette, le rayon lumineux doit être réfléchi par une surface claire. Du fait que le bronze des pierres poreuses centrales des anneaux est plutôt de couleur mate, un papier autocollant réfléchissant argenté a été placé sur le bronze à l'endroit de la mesure. Notons toutefois que le papier autocollant n'a pas la même rigidité que la pierre et que la liaison entre les deux n'est pas parfaite. Malgré que ce soit la méthode suggérée par le fournisseur Polytec, les déplacements mesurés par les lasers sont de l'ordre du nanomètre et il se peut que l'autocollant altère les



mesures. L'erreur causée par l'autocollant est inconnue, alors il est préférable de considérer les résultats qui suivent comme des tendances et non des mesures exactes.

En ce qui a trait à l'anneau non assemblé, seulement le déplacement radial a été mesuré. Effectivement, l'anneau, durant l'essai, n'était pas déposé à plat comme le montre la figure 4.3, mais sur le côté de sa hauteur, de sorte que c'est le laser 1 qui était en position de mesurer le déplacement radial. Tandis que pour les anneaux assemblés, les lasers 1 et 2 ont été orientés vers un point précis de la pierre poreuse centrale comme l'illustre la figure 4.3. Uniquement pour les anneaux assemblés, à chaque fréquence, l'essai a été répété à trois reprises à trois points équidistants. De cette façon, il est possible de visualiser les déplacements du centre de la pierre jusqu'à son bord près de l'anneau piézoélectrique. La figure suivante illustre les points de mesures de l'anneau P-RAT avec une pierre poreuse centrale trouée en croix. Il est à noter que la disposition des points de mesure était la même pour les anneaux P-RAT avec une pierre poreuse centrale scindée en quatre morceaux.

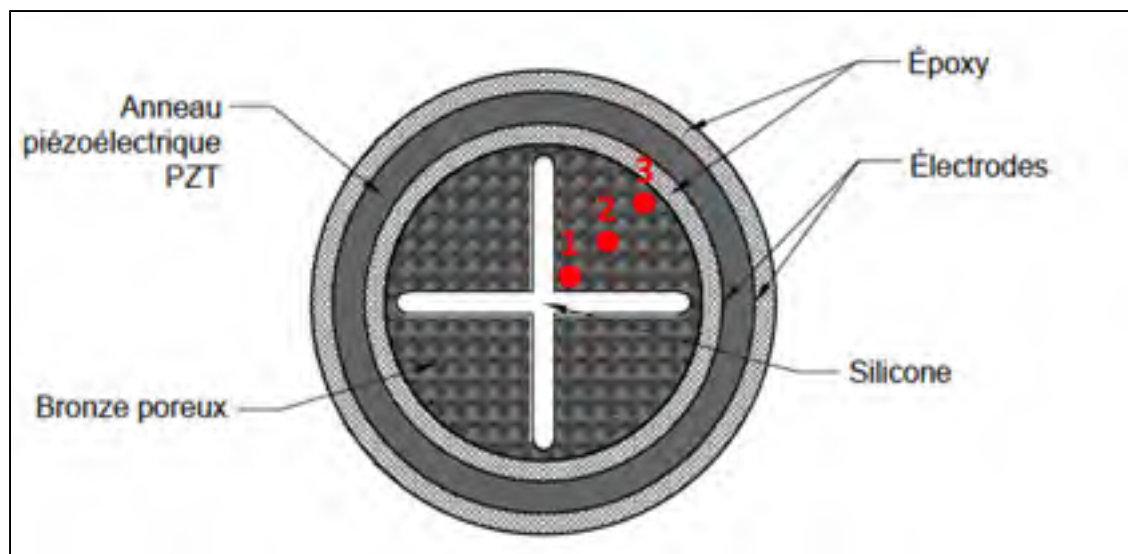


Figure 4.5 Points de mesure avec l'interféromètre

Lors des mesures, l'anneau était fixé par du papier collant à un support métallique mobile. La position du support était contrôlée par des rails dont l'emplacement était déterminé par un ordinateur. De cette façon, il a été possible de déterminer avec exactitude la distance entre

chaque point mesuré de la figure 4.5. La distance entre les points a été déterminée de la façon suivante : un anneau P-RAT de la marque Steminc possède une pierre poreuse centrale dont le diamètre est de 15,0 mm auquel on retire le trou au centre de 1,0 mm. On obtient donc un rayon de 7,0 mm. Ainsi, la distance entre les points de mesure était de 2,0 mm.

Enfin, les déplacements ont été mesurés avec l'interféromètre à plusieurs fréquences, entre 30 et 70 kHz. Le signal d'émission était une pulsation dont la forme était un demi-sinus d'une amplitude maximale de 5 V. Cette émission a été choisie puisqu'elle est une des formes d'émissions utilisées lors des mesures de  $V_s$  avec la méthode P-RAT (*Voir* la section 3.4.3). De plus, il est supposé que le comportement de l'anneau P-RAT n'est pas le même en contraction qu'en dilatation, à cause de l'anisotropie de l'assemblage. Alors pour visualiser la différence entre les deux mouvements, à chaque fréquence mesurée, le signal a été émis avec une tension positive et négative.

### 4.3.3 Résultats de l'interférométrie

Les déplacements de l'anneau avant son assemblage qui ont été mesurés par l'interféromètre sont illustrés à la figure 4.6. Les signes (-) et (+) sur la figure 4.6 indiquent l'orientation de l'émission : (-) est une émission négative et (+) est une émission positive.

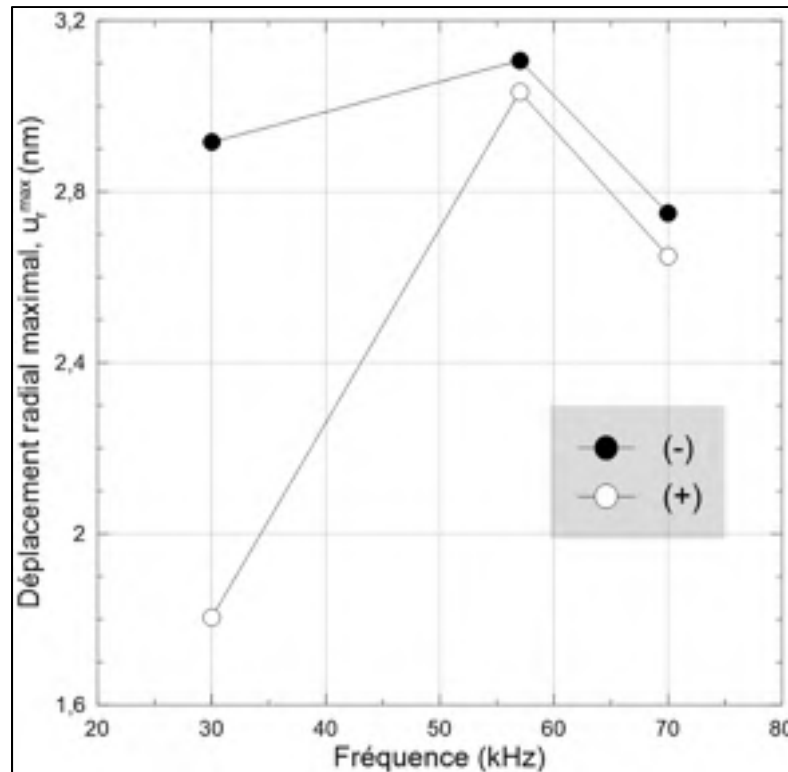


Figure 4.6 Déplacement radial avant l'assemblage

La figure 4.6 montre que le déplacement mesuré est plus élevé pour une émission négative que pour une émission positive. On peut aussi y voir que le déplacement radial  $u_r^{\max}$  atteint un maximum de 3,11 nm à la  $f_r$  des anneaux P-RAT (*Voir* tableau 3.2). De plus, le déplacement moyen obtenu dans la plage de fréquence analysée à la figure précédente est de 2,71 nm. Il est à noter que le  $u_r^{\max}$  (+) à 30 kHz semble aberrant.

Dans le but d'établir le sens du mouvement en fonction de l'orientation de l'émission, la figure 4.7 compare le mouvement d'un anneau P-RAT avec une pierre poreuse centrale trouée en croix selon une émission négative et positive.

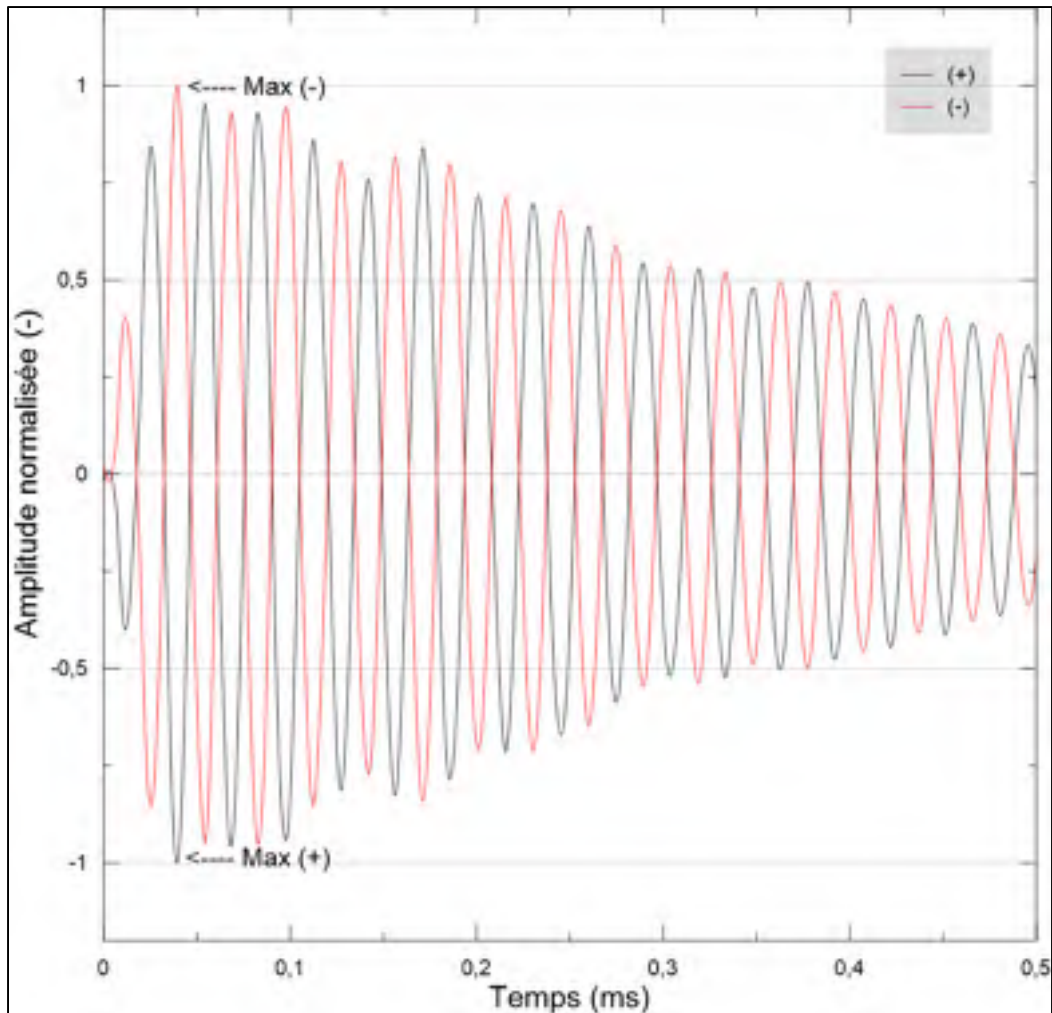


Figure 4.7 Sens du mouvement en fonction de l'orientation de l'émission

La figure 4.7 montre que le déplacement maximal de l'anneau Steminc avec une tension négative (-) est positif et qu'il est négatif avec une tension positive (+). Cela signifie que lorsque l'anneau est soumis à une tension positive, il a un comportement contractant tandis que lorsqu'il est soumis à une tension négative, il a un comportement dilatant. Cette observation reste vraie seulement si la position des électrodes de la figure 3.3 est respectée, sinon le déplacement est inversé.

Une fois que  $u_r^{\max}$  avant l'assemblage est déterminé, il est possible de comparer l'impact du type d'assemblage sur celui-ci. Ainsi, la figure 4.8 illustre les  $u_r^{\max}$  mesurés aux trois points (Voir la figure 4.5) sur la pierre poreuse centrale des deux types de pierre poreuse.

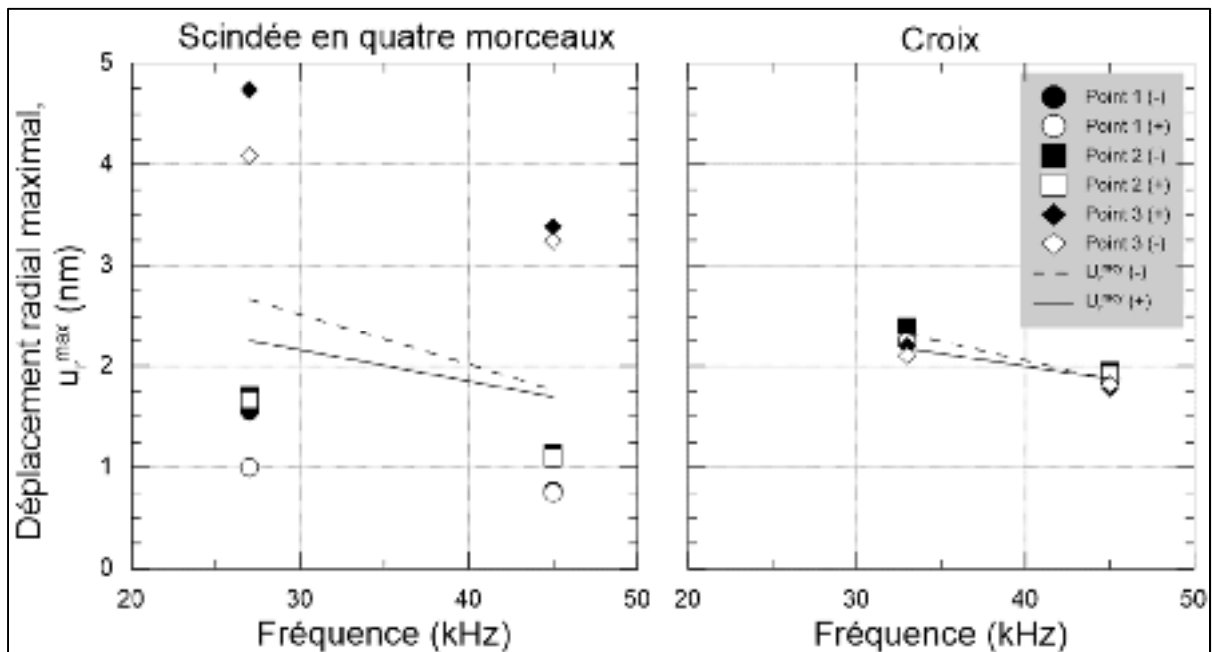


Figure 4.8 Déplacements radiaux maximaux mesurés

La figure 4.8 montre que l'anneau P-RAT avec une pierre poreuse scindée en quatre morceaux génère, seulement au point 3, une amplitude plus grande de mouvements radiaux que l'anneau P-RAT en croix. L'anneau P-RAT scindé a aussi une plus grande variation dans ses déplacements du point 3 au point 1. En effet, ses déplacements sont réduits d'environ un facteur trois du point 3 au point 1. Tandis que les déplacements de l'anneau P-RAT en croix sont uniformes d'un point à l'autre. Globalement, on voit sur la figure 4.8 que l'ajout de masse à l'anneau piézoélectrique lors de l'assemblage restreint ses déplacements de façon significative comme l'a suggéré Éthier (2009). Le tableau 4.3 appuie cette affirmation par la comparaison des  $u_r^{\max}$  moyen établis à partir des figure 4.6 et figure 4.8.

Tableau 4.3 Différences entre les déplacements radiaux pré et post assemblage

| Type d'assemblage          | $u_r^{\max}$ moyen (nm) | Différence relative (%) |
|----------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Anneau                     | 2,71                    | 0,00                    |
| Croix                      | 1,97                    | 27,41                   |
| Scindée en quatre morceaux | 2,23                    | 17,77                   |

Le tableau 4.3 montre que l’anneau assemblé avec une pierre poreuse scindée en quatre morceaux réduit globalement moins les déplacements radiaux par rapport à l’anneau sans assemblage que l’anneau assemblé avec une pierre poreuse centrale en forme de croix.

L’anneau polarisé radialement génère aussi des mouvements longitudinaux,  $u_z$ , à cause de l’effet de Poisson (Karray et al., 2015). Ces déplacements ont été mesurés à l’interféromètre; ils sont présentés à la figure 4.9. Tout comme la figure 4.8, la figure 4.9 est une comparaison des  $u_z$  maximaux entre les différents types de pierre poreuse centrale.

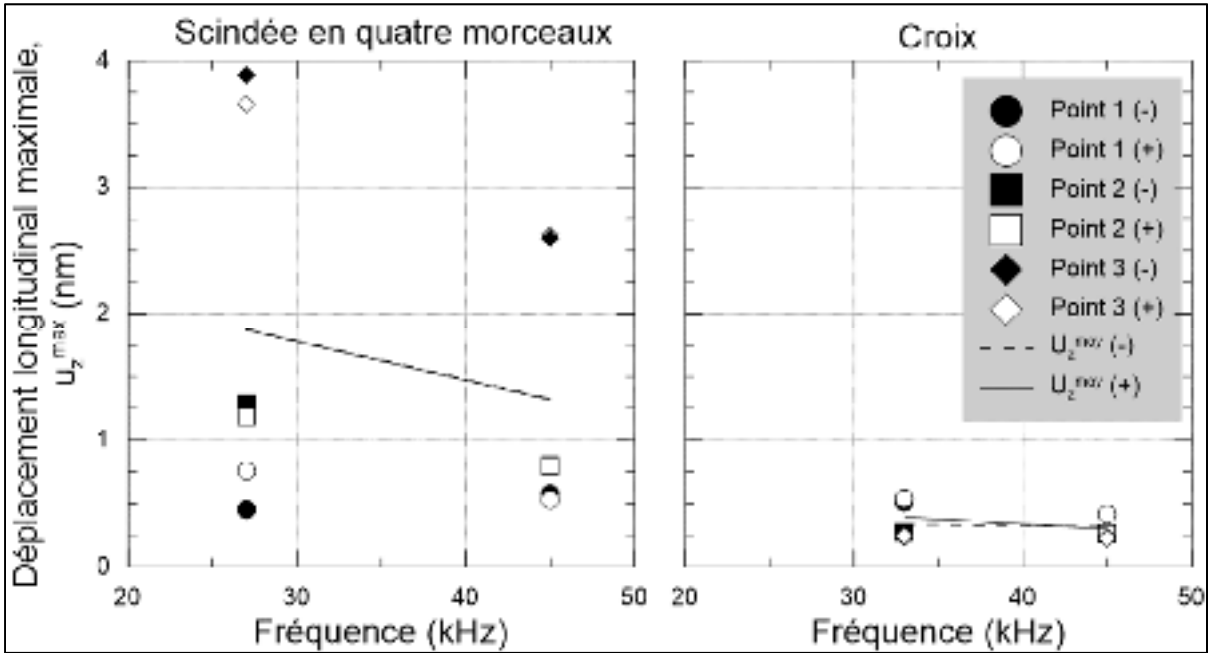


Figure 4.9 Déplacements longitudinaux maximaux mesurés

La figure 4.9 illustre que la variabilité des déplacements  $u_z$  est semblable aux déplacements  $u_r$  de la figure 4.8 pour les deux types de pierre poreuse assemblés avec l'anneau Steminc. Ainsi, les  $u_z$  de l'anneau P-RAT en croix sont plus faibles que ceux de l'anneau P-RAT scindé sauf au point 1 à la fréquence de résonance.

Enfin, en plus des déplacements, les mesures à l'interféromètre permettent d'évaluer  $Q$ , selon la relation suivante :

$$Q = \frac{1}{2D} \quad (4.5)$$

Tirée de Kramer (1996, p. 569).

Le taux d'amortissement  $D$  est déterminé en sachant que le comportement de l'anneau piézoélectrique, lors de l'essai à l'interféromètre, est semblable à celui d'un système masse ressort amorti à surface libre. Alors dans le domaine du temps, son amortissement est proportionnel au coefficient de l'exposant  $b$  de l'interpolation exponentielle des pics de déplacements dont l'interpolation a la forme suivante :

$$\ln(X) = bt + a \quad (4.6)$$

Dans laquelle,  $t$  est le temps,  $X$  est l'amplitude des pics positifs de déplacements,  $a$  et  $b$  sont des constantes de régression.

Une fois que  $b$  est évalué,  $D$  s'évalue de la façon suivante (Kramer, 1996) :

$$D = \frac{-b}{2\pi f_r} \quad (4.7)$$

La figure 4.10 compare les  $Q$  des deux types de pierre poreuse en fonction de la fréquence. Notons que le  $Q$  est calculé seulement pour les déplacements radiaux afin qu'il soit comparable à celui du fabricant Steminc et à celui mesuré avec l'impédance.

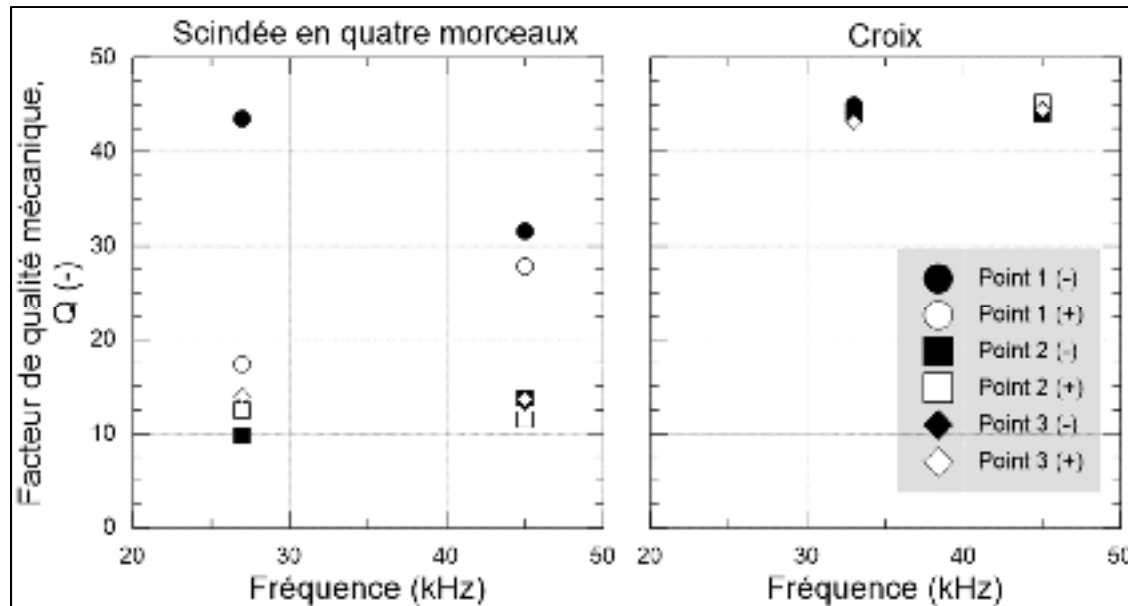


Figure 4.10 Facteur de qualité mécanique,  $Q$ , évalué à partir des résultats de l'interférométrie

La figure 4.10 montre que le  $Q$  de l'anneau P-RAT avec un élément piézoélectrique Steminc et une pierre poreuse trouée en croix est plus élevé que celui dont la pierre est scindée en quatre. En effet, le  $Q$  de l'anneau P-RAT en croix est en moyenne de 45 tandis que l'autre est en moyenne de 15. Notons aussi que le  $Q$  du point 1 de l'anneau avec la pierre poreuse scindée en quatre est plus élevé que les autres points. Il se rapproche même du  $Q$  de l'anneau avec la pierre en croix.

Pour visualiser les signaux qui ont servi à faire les analyses et les figures précédentes, il faut se référer à l'ANNEXE III.

#### 4.4 Déformations en cisaillement induites par l'anneau P-RAT

Maintenant que les déplacements radiaux maximaux sont connus pour les deux types d'assemblage d'anneau P-RAT de la marque Steminc, il est possible de déterminer la déformation en cisaillement qu'induisent ces capteurs au sol en fonction du voltage émis, en supposant que leur comportement est linéaire, et de valider qu'elle ne dépasse pas le seuil élastique ( $\gamma < 10^{-3}\%$ ). Pour ce faire, il suffit de diviser le déplacement radial prédit par la moitié



de la longueur de la pierre poreuse en contact avec le sol. Dans le cas des anneaux P-RAT Steminc, cette longueur est de 7,0 mm. Le tableau 4.4 compare les déformations en cisaillement  $\gamma$  en fonction de  $V$  pour les deux types de pierre poreuse centrale. Il est à noter que le déplacement radial est prédit en fonction du déplacement maximal mesuré à l'interféromètre.

Tableau 4.4 Déformation en cisaillement en fonction de la tension

| Tension (V)                                                                  | 5                   | 25                  | 50                  | 100                 | 200                 | 500                 |
|------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Anneau P-RAT Steminc avec pierre poreuse centrale scindée en quatre morceaux |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| $u_r$ (nm)                                                                   | 4,74                | 23,68               | 47,35               | 94,70               | 189,40              | 473,51              |
| $\gamma$ (%)                                                                 | $6,8 \cdot 10^{-5}$ | $3,4 \cdot 10^{-4}$ | $6,8 \cdot 10^{-4}$ | $1,4 \cdot 10^{-3}$ | $2,7 \cdot 10^{-3}$ | $6,8 \cdot 10^{-3}$ |
| Anneau P-RAT Steminc avec pierre poreuse centrale en croix                   |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| $u_r$ (nm)                                                                   | 2,40                | 12,01               | 24,02               | 48,03               | 96,06               | 240,16              |
| $\gamma$ (%)                                                                 | $3,4 \cdot 10^{-5}$ | $1,7 \cdot 10^{-4}$ | $3,4 \cdot 10^{-4}$ | $6,9 \cdot 10^{-4}$ | $1,4 \cdot 10^{-3}$ | $3,4 \cdot 10^{-3}$ |

Le tableau 4.4 montre que  $\gamma$  est supérieur à la limite élastique pour l'anneau P-RAT avec une pierre poreuse centrale en croix à partir de 144 V. Tandis que les déformations induites par l'anneau P-RAT avec une pierre poreuse centrale scindée en quatre morceaux dépassent la limite élastique à partir de 94 V. En considérant que lors des essais  $V_s$  de ce mémoire, l'amplification du signal d'émission n'a pas été supérieure à 200 V, il y aurait eu un remaniement de l'argile causé par le déplacement des anneaux P-RAT. Cependant lors des essais de  $V_s$  pendant un essai de consolidation, plusieurs mesures consécutives sont prises à chaque palier de charge avec des formes d'ondes et des fréquences d'émission différentes afin de s'assurer de la fiabilité de la mesure. Et en aucun cas, les mesures consécutives prises n'ont indiqué un signe de détérioration du matériau par la génération des ondes. Par conséquent, il est fort probable que la déformation transmise au sol soit plus faible que celle évaluée avec des déplacements à surface libre au tableau 4.4. Toutefois, si l'on considère que le couplage sol/émetteur soit parfait et que la déformation transmise au sol est la même que celle mesurée à surface libre au tableau 4.4, la déformation au-dessus de la limite élastique serait

vraisemblablement localisée près de l'émetteur, car le signal émis est rapidement amorti par le sol (Rio, 2006). Il y aurait, dès lors, qu'une partie insuffisante du sol à l'étude remaniée pour altérer les résultats de  $V_s$ . Néanmoins, avec les assemblages P-RAT étudiés, il paraît prudent de limiter la tension d'émission à environ 100 V.

#### 4.5 Effets de l'encapsulation de l'anneau P-RAT

Les recommandations de Mhenni (2016) suggèrent l'utilisation d'une capsule métallique, dans laquelle est insérée l'anneau piézoélectrique, lors des mesures de  $V_s$  dans une cellule œdométrique. Selon lui, l'encapsulation de l'anneau permettrait de réduire l'effet de la contrainte sur sa polarisation et, par le fait même, réduire l'amplitude des ondes P émises et reçues par les capteurs. Mhenni (2016) émet ce constat en fonction des résultats qu'il a obtenus par une modélisation numérique à éléments finis avec le logiciel COMSOL. Dès lors, c'est basé sur les observations et les conclusions de Mhenni (2016) que le montage expérimental de ce projet a été modifié en cours de route. Or, en ayant des mesures de  $V_s$  avec et sans capsule métallique, il est possible, avec les données expérimentales de ce projet, de comparer les deux. Ainsi, en fonction des signaux obtenus au cours de ce projet, les paragraphes qui suivent présenteront et analyseront l'influence sur les signaux reçus de l'encapsulation de l'anneau.

Pour ce faire, la figure suivante compare les signaux reçus, avec et sans capsule métallique, par des anneaux P-RAT de la marque Steminc (*Voir* le tableau 3.2 pour ses caractéristiques) lors d'essais de consolidation. Sur cette figure, les signaux avec et sans capsule sont comparés dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel. Pour que la comparaison des signaux soit fiable, les anneaux P-RAT utilisés étaient à leur premier essai, ils n'ont donc pas subi l'effet du vieillissement de l'élément piézoélectrique (*Voir* la section 4.1). De plus, l'émission était dans tous les cas un demi-sinus émis à une fréquence de 15 kHz. À cette comparaison s'ajoute, la comparaison entre les signaux reçus lorsque la contrainte verticale est semblable (1) et lorsque  $V_s$  est semblable (2 et 3).

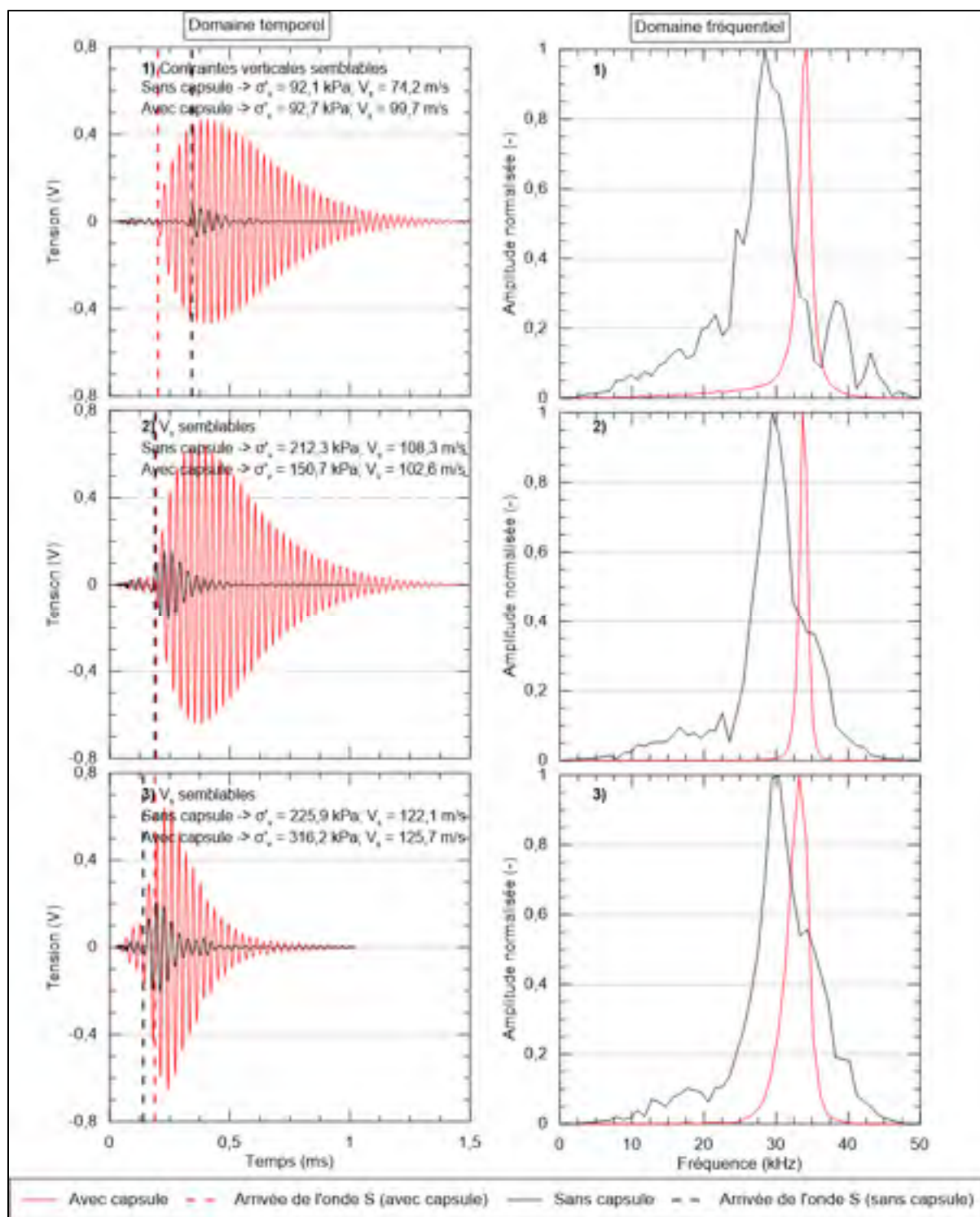


Figure 4.11 Effets de l'encapsulation sur les anneaux P-RAT Steminc lors de la réception

Les signaux reçus dans le domaine temporel de la figure 4.11 ont une amplitude significativement plus grande lorsque l'anneau P-RAT est inséré dans une capsule que lorsqu'il ne l'est pas. Ensuite, l'amplitude des ondes P reçues – on considère que les oscillations observées avant l'arrivée de l'onde S sont uniquement causées par les ondes P – par les anneaux encapsulés est supérieure dans les cas 2 et 3 et semblable pour le cas 1. Cependant, proportionnellement à l'amplitude de l'onde S, l'amplitude des ondes P est inférieure en présence d'une capsule métallique. On peut donc conclure qu'expérimentalement les capsules métalliques réduisent l'ampleur des ondes P émises, comme l'a observé Mhenni (2016).

D'un autre côté, l'analyse dans le domaine fréquentiel de la figure 4.11 montre que la capsule a l'avantage d'offrir une  $f_r$  supérieure. Toutefois, elle a le désavantage de présenter un spectre de fréquence moins large que sans capsule ( $Q$  plus élevé que sans capsule), ce qui devrait désavantager l'anneau encapsulé pendant la correction du déphasage expérimental avec la méthode d'interprétation P-RAT. En effet, il est supposé que plus le spectre de fréquences est mince et plus la plage de fréquences dans laquelle le déphasage corrigé ( $\phi_{\text{corr}}$ ) est superposé au déphasage théorique ( $\phi_{\text{th}}$ ) est petite. Ce constat s'applique également à la plage de fréquences sur laquelle la vitesse de phase corrigée est constante ( $V_{\text{ph}}$ ), car elle est réduite lorsque le spectre est mince (Karray et al., 2015). Dans le but de soutenir ou non cette hypothèse, la figure suivante compare les  $\phi_{\text{corr}}$  par rapport aux  $\phi_{\text{th}}$  avec les mêmes signaux que ceux utilisés précédemment à la figure 4.11.

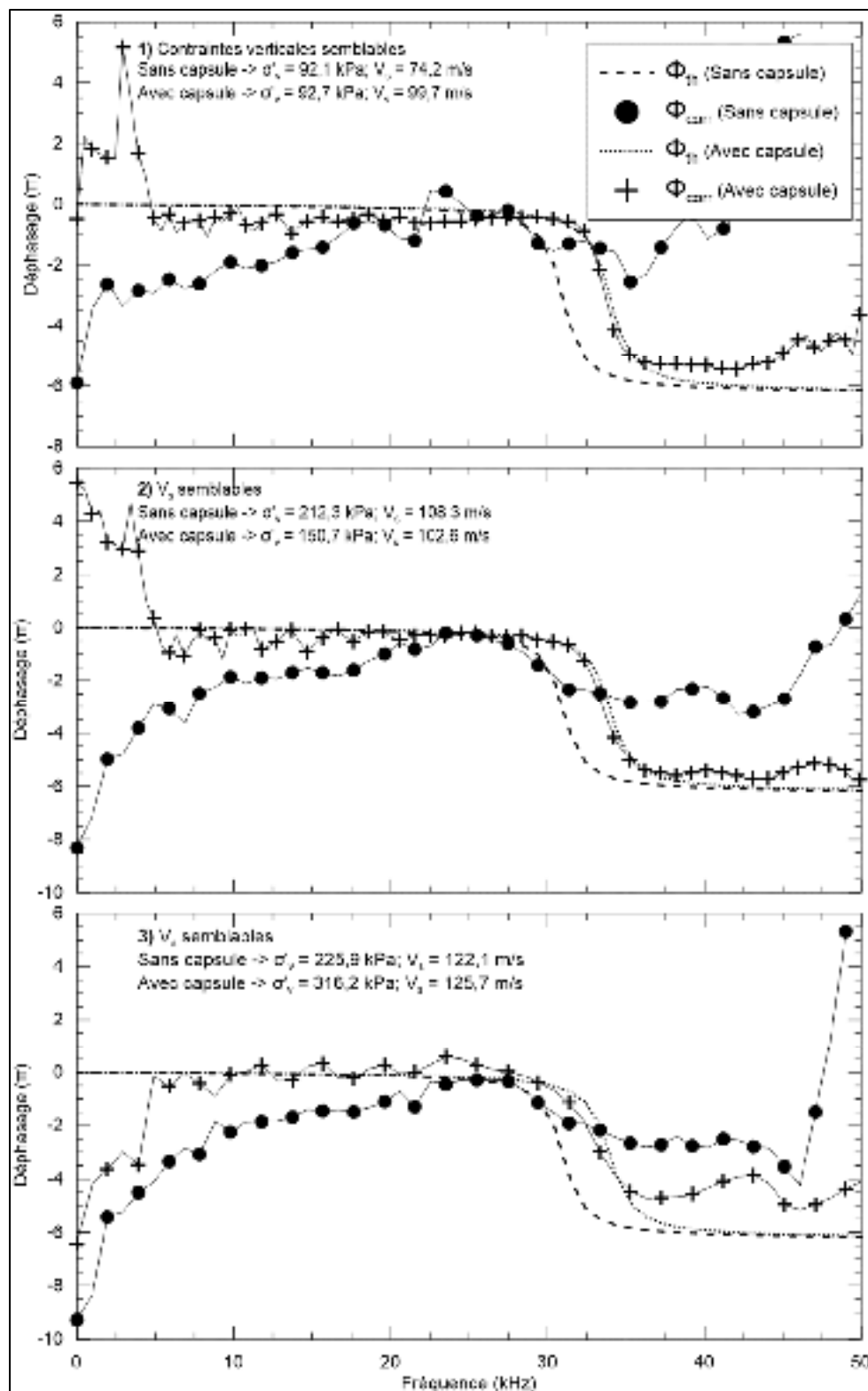


Figure 4.12 Effets de l'encapsulation sur les anneaux P-RAT Steminc au déphasage corrigé

La figure 4.12 illustre que contrairement à ce qu'y était anticipé, pour les trois cas, le  $\phi_{\text{corr}}$  est superposé au  $\phi_{\text{th}}$  sur une fenêtre de fréquences plus large avec une capsule que sans capsule. En effet, malgré un spectre de fréquences moins large, le  $\phi_{\text{corr}}$  colle mieux au  $\phi_{\text{th}}$  que le  $\phi_{\text{corr}}$  de l'anneau sans capsule. Cette constatation s'étend aussi à la constance de la  $V_{\text{ph}}(f)$  pour obtenir  $V_s$ . Effectivement, selon l'équation (1.27), lorsque  $\phi_{\text{err}}$  est nul,  $V_{\text{ph}}$  égale  $V_s$ . Ainsi, comme  $\phi_{\text{err}}$  est l'écart entre le  $\phi_{\text{th}}$  et le  $\phi_{\text{exp}}$ , plus leur écart est faible, plus  $\phi_{\text{err}}$  s'approche de zéro et, par le fait même, d'une  $V_{\text{ph}}(f)$  constante.

#### 4.6 Discussion

Deux essais ont été faits afin de caractériser les différents types d'anneaux P-RAT. Le premier est l'analyse d'impédance qui a permis d'obtenir le facteur  $Q$ , la  $f_r$  et la  $f_a$ . Le second est l'interféromètre avec lequel ont été évalués les déplacements et le  $Q$ . Dans les paragraphes qui suivent, l'on discutera des  $Q$  obtenus par les deux essais, de l'impact de l'assemblage sur les déplacements des anneaux piézoélectriques et, pour finir, du meilleur assemblage sur la base des résultats obtenus.

Tout d'abord, les  $Q$  obtenus avec l'impédance sont semblables à ceux mesurés avec l'interféromètre. Néanmoins, l'évaluation de  $Q$  avec l'impédance est plus facile, plus rapide et nécessite moins d'équipements que l'interférométrie (Fialka & Beneš, 2013). Ainsi, cette méthode facile à mettre en place serait adéquate pour caractériser les anneaux assemblés avant de tenter un essai de  $V_s$ . Comme le  $Q$  représente le comportement mécanique d'un élément piézoélectrique, l'analyse de l'impédance permettrait de quantifier et de comparer objectivement les différents types d'assemblage d'anneaux P-RAT pour de futures expérimentations.

Ensuite, l'essai à l'interféromètre sur les anneaux piézoélectriques avant et après l'assemblage a permis de mesurer leurs déplacements ( $u_r$  et  $u_z$ ). La comparaison des  $u_r$  et  $u_z$  montre que l'assemblage des anneaux P-RAT réduit le déplacement radial par rapport à l'anneau avant l'assemblage. L'impédance a aussi montré que l'ajout de masse diminue la  $f_r$  de l'anneau. Ces

constatations sont logiques, car l'ajout de masse à l'anneau piézoélectrique doit théoriquement diminuer les déplacements et la fr (Yang, 2005). L'assemblage dont les déplacements semblent les moins affectés par l'ajout de masse est celui avec la pierre poreuse centrale scindée en quatre morceaux. Même si les mesures aux bords de l'anneau sont plus faibles que ceux de l'anneau avec une pierre poreuse en croix, les déplacements au centre sont beaucoup plus élevés.

Enfin, la conception idéale d'un anneau P-RAT consiste à ce que son mouvement soit uniquement en cisaillement, c'est-à-dire qu'il n'y ait pas de mouvements longitudinaux de la pierre poreuse centrale lors de l'émission. Selon les résultats à l'interféromètre, l'anneau avec la pierre scindée a des déplacements radiaux supérieurs à ceux de l'anneau en croix. Toutefois, la comparaison des déplacements  $u_z$  de la figure 4.9 montre que ceux de l'anneau P-RAT Steminc avec une pierre poreuse scindée en quatre morceaux sont plus élevés que ceux de la pierre en croix. Il devient dès lors nécessaire de comparer leur ratio  $u_r/u_z$  afin d'apprécier le type d'assemblage qui s'approche le plus de la conception idéale. La figure suivante présente le résultat de ce ratio.

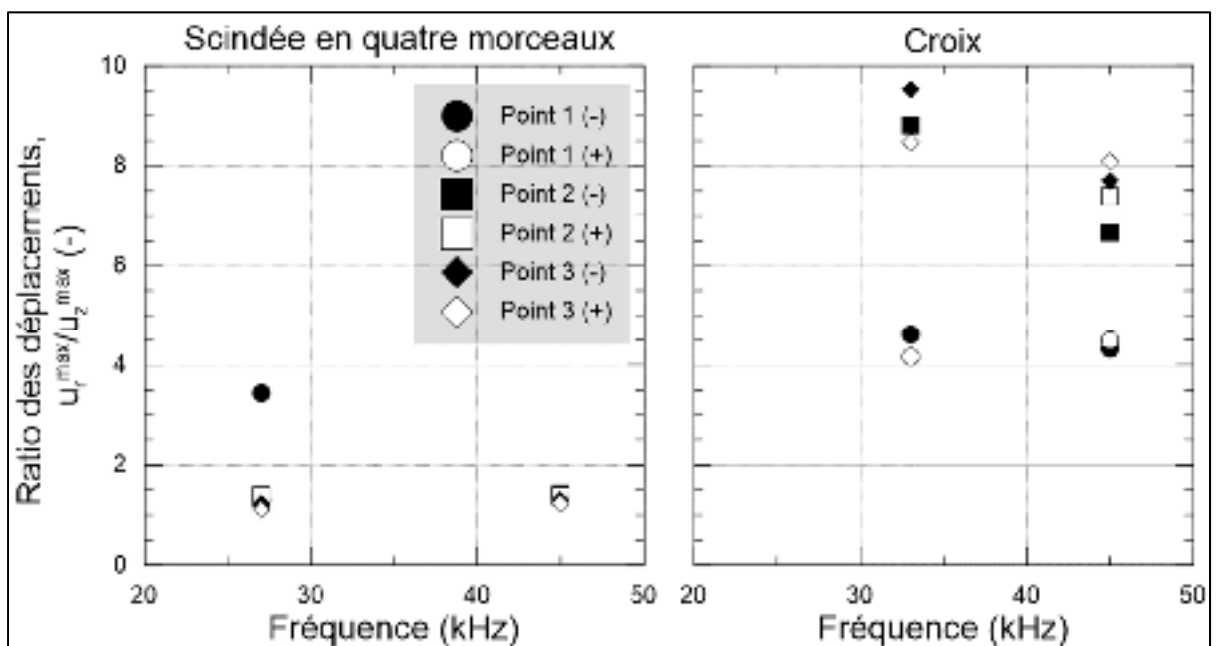


Figure 4.13 Comparaison des ratios des déplacements radiaux et longitudinaux

La figure précédente, illustrant les ratios  $u_r/u_z$ , expose que le type d'anneau P-RAT avec une pierre poreuse centrale trouée en forme de croix génère plus de mouvements radiaux par rapport aux mouvements longitudinaux que les anneaux P-RAT scindés en quatre morceaux. En effet, le ratio pour l'anneau avec la pierre en croix est d'environ 6,8 tandis que celui de la pierre scindée est d'environ de 1,3. Ce résultat est différent de celui obtenu par Mhenni (2016) avec une modélisation des déplacements d'un anneau avec une pierre centrale scindée en quatre morceaux. En effet, il avait plutôt observé un ratio de trois. Cette différence peut s'expliquer par le modèle d'anneau P-RAT modélisé par Mhenni (2016) qui est différent de celui mesuré par l'interféromètre, bien que les deux aient une pierre centrale scindée en quatre morceaux, le matériau piézoélectrique modélisé par Mhenni (2016) était le PZT-5A. Ce matériau est considéré comme un matériau mou – il est comparable à celui du modèle d'APC présenté au tableau 3.2 – en comparaison au SM-111 de l'anneau Steminc. Le PZT-5A possède une  $d_{33}$  plus élevée que le SM-111, on peut donc affirmer qu'une fois assemblé, l'anneau P-RAT avec le PZT-5A produit plus de déplacements radiaux que le SM-111. À ceci s'ajoute, la prise en compte lors de la modélisation de la cellule métallique qui, selon Mhenni (2016) réduit les déplacements longitudinaux, n'était pas utilisée lors de l'essai à l'interféromètre. Ces deux raisons expliquent en partie la différence observée entre les deux résultats.

De plus, les déplacements mesurés ne supportent pas l'hypothèse de la différence entre le comportement contractant et dilatant de l'anneau P-RAT. En effet, les mesures montrent que dans les deux cas (+) et (-), les déplacements sont semblables. Il n'est donc pas nécessaire de changer l'orientation de la polarisation actuelle des capteurs P-RAT.

Les mesures à l'interféromètre ont aussi permis de démontrer que les anneaux P-RAT avec une pierre poreuse scindée en quatre morceaux induisent une déformation en cisaillement environ deux fois supérieure aux anneaux P-RAT avec une pierre poreuse trouée en forme de croix. Dans les deux cas, à partir d'environ 100 V, les déplacements à surface libre excèdent le seuil de déformation élastique des sols. Il est donc recommandé d'être prudent et de ne pas générer des ondes avec une tension supérieure à 100 V lors des essais de  $V_s$ .



En résumé, l'assemblage avec la pierre poreuse trouée en croix, selon l'essai à l'interféromètre, semble meilleur quant à la génération d'ondes S que l'assemblage avec la pierre poreuse scindée en quatre morceaux. Il serait toutefois intéressant de mesurer les déplacements de l'anneau P-RAT APC avec une pierre en croix, car il a le même Q que l'anneau Steminc avec une pierre scindée en quatre morceaux. L'anneau APC devrait donc, a priori, générer un spectre de fréquence aussi large que l'anneau Steminc avec la pierre scindée, tout en conservant l'effet de la croix qui l'empêche de produire des mouvements longitudinaux.

En plus des différents assemblages d'anneaux P-RAT, il est possible d'insérer différemment l'anneau dans la cellule œdométrique : avec ou sans cellule métallique. Selon l'analyse expérimentale présentée précédemment, insérer l'encapsulation de l'anneau P-RAT a des avantages notoires. En effet, il permet premièrement d'obtenir un signal plus clair, parce que l'amplitude du signal reçu est plus élevée que lorsque l'anneau est inséré directement dans la pierre poreuse. Deuxièmement, la cellule métallique permet de réduire l'amplitude des ondes P par rapport aux ondes S. Troisièmement, la fréquence de résonance du système est supérieure avec une capsule comparativement à sans capsule. Quatrièmement, il a été démontré que l'encapsulation a permis une meilleure superposition du  $\phi_{\text{corr}}$  avec le  $\phi_{\text{th}}$ . On peut donc conclure que l'ajout d'une capsule métallique lors des mesures de  $V_s$  dans une cellule œdométrique offre une interprétation des signaux avec la méthode P-RAT plus fiable que si l'anneau P-RAT est inséré directement dans la pierre poreuse.



## **CHAPITRE 5**

### **RÉSULTATS**

#### **5.1 Introduction**

Dans ce chapitre, il est présenté les  $V_s$  mesurées avec la méthode P-RAT lors de dix essais de consolidation. Les dix essais de consolidations ont été faits sur des argiles de la mer Champlain dont l' $I_p$  varie entre 17 et 48.

Dans un premier temps, les résultats de  $V_s$  sont comparés avec les résultats des essais de consolidation afin d'apprécier l'influence de la contrainte effective verticale et de l'indice des vides sur  $V_s$ . Par la suite, il est présenté les caractéristiques intrinsèques de chacune des argiles analysées. Enfin, les caractéristiques des argiles, l'indice des vides et la contrainte verticale sont mis en commun dans un modèle de corrélation empirique dans le but de déterminer quelles sont les caractéristiques qui influencent la détermination de  $V_s$ .

#### **5.2 Résultats des essais de consolidation et des mesures de $V_s$**

La vitesse de propagation des ondes de cisaillement mesurée avec les anneaux P-RAT dépend en grande partie de l'indice des vides  $e$  et de la contrainte appliquée au sol. C'est pourquoi les figures qui suivent présentent la variation de  $e$  en fonction de la contrainte effective verticale  $\sigma'_v$ ,  $e$  en fonction de  $V_s$  et  $V_s$  en fonction de  $\sigma'_v$ . La première figure illustre ces résultats pour les échantillons GD10-Base1, GD10-Base2 et GD10-Milieu.

Pour les cinq figures suivantes, le montage de l'anneau P-RAT utilisé est présenté de cette façon : Steminc-SC-Croix. Le premier terme indique la marque de l'anneau, le second terme désigne l'utilisation ou non de la cellule métallique – SC, pour sans capsule et AC pour avec capsule – et le troisième terme distingue le type de pierre poreuse centrale (Se référer au tableau 3.3 pour les détails).

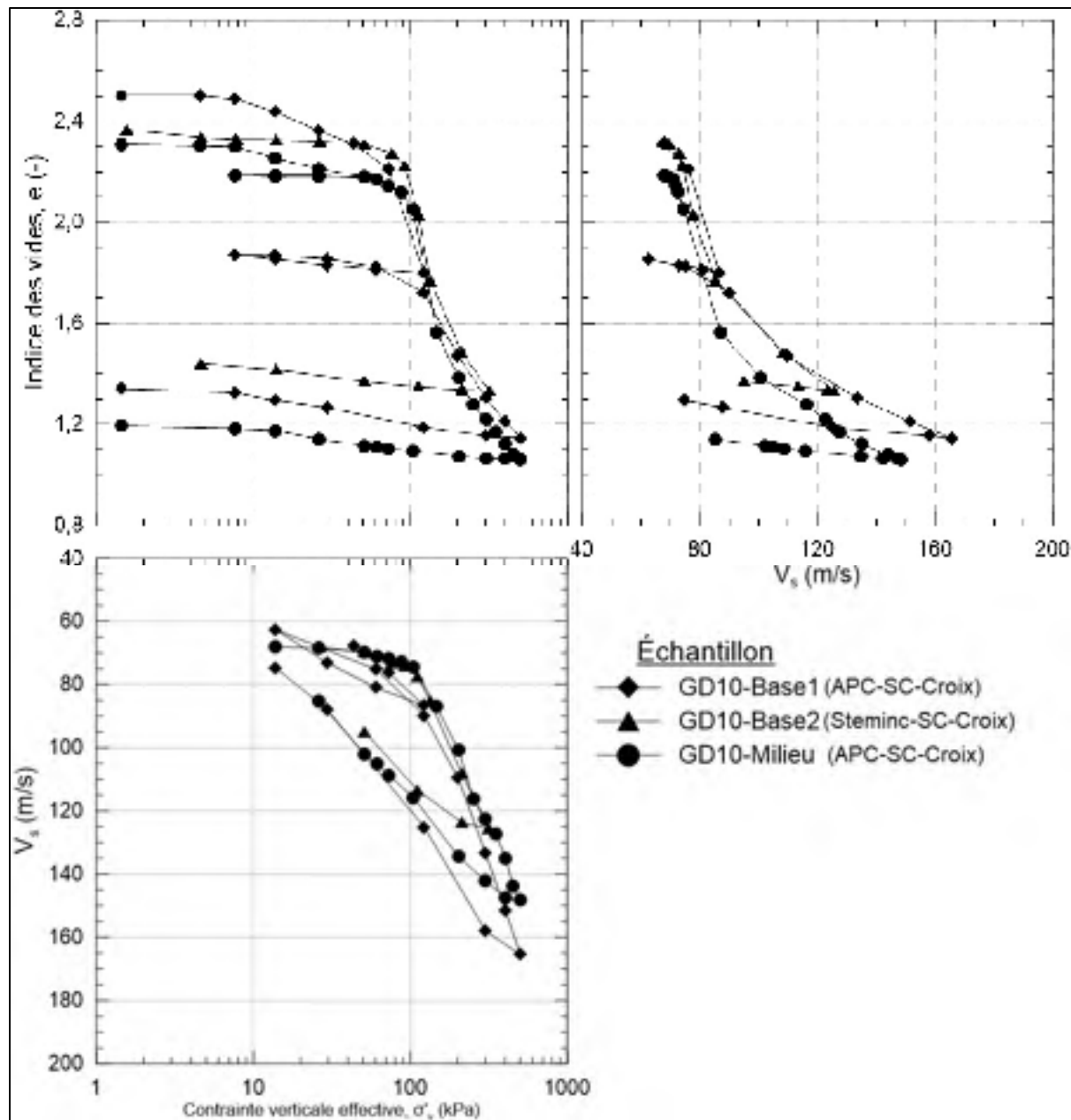


Figure 5.1 Résultats de la consolidation et des mesures de  $V_s$  des échantillons GD10

Les courbes de consolidation de la figure 5.1 montrent que la contrainte de préconsolidation  $\sigma'_p$  de GD10-Base1 est de 65 kPa, que celle de GD10-Base2 est de 99 kPa et que celle de GD10-Milieu est de 100 kPa. Il est à noter que les  $\sigma'_p$  de la figure précédente, ainsi que celles qui suivent, sont déterminées selon la méthode de Casagrande (Holtz & Kovacs, 1991) dans l'espace  $e$ - $\sigma'_v$ . Ces courbes montrent aussi que les deux échantillons GD10-Base2 et

GD10-Milieu ont une cassure nette au niveau de  $\sigma'_p$ . Cette cassure nette indique que ces échantillons étaient intacts. D'un autre côté, l'échantillon GD10-Base1 ne présente pas cette cassure nette, sa  $\sigma'_p$  est donc difficile à déterminer. Deux raisons sont possibles, la première est que l'échantillon a probablement été remanié lors de son insertion dans l'anneau métallique, car l'autre échantillon du même bloc ne montre pas de signe de remaniement. La seconde cause pourrait provenir des paliers de chargement qui ont tous été de 24h pour cet échantillon. Par conséquent, l'échantillon n'était peut-être pas remanié, mais il a pu subir des tassements secondaires qui rendent la distinction de  $\sigma'_p$  floue. C'est pourquoi il est fort probable que la  $\sigma'_p$  de cet échantillon *in situ* soit plus de l'ordre des deux autres, c'est-à-dire de 100 kPa. Toutefois, comme la finalité de ce projet est d'établir une corrélation empirique de  $V_s$  en fonction des caractéristiques, il a été choisi de conserver l'évaluation de Casagrande. De cette façon, l'allure de la courbe et la manière dont  $\sigma'_p$  a été évaluée ont une meilleure cohérence mathématique. Dès lors, l'échantillon GD10-Base1 est conservé pour les prochaines analyses, car au-delà de  $\sigma'_p$ , les mesures de  $V_s$  obtenues lors de l'essai semblent adéquates. En effet, sur les graphiques  $e$  en fonction de  $V_s$  et  $V_s$  en fonction de  $\sigma'_v$  de la même figure, GD10-Base1 et GD-Base2 sont semblables. En revanche, on remarque sur le graphique  $e$  en fonction de  $V_s$  que GD10-Milieu montre une  $V_s$  toujours plus faible pour le même indice des vides que les deux autres échantillons. Cette distinction provient probablement d'une caractéristique intrinsèque de l'échantillon GD10-Milieu différente des deux autres (*Voir* le tableau 5.1). Cette possibilité est analysée et discutée dans les sections subséquentes.

La prochaine figure illustre les résultats de  $V_s$  et des essais de consolidation pour les échantillons, provenant du même forage, TM12, TM17 et TM29.

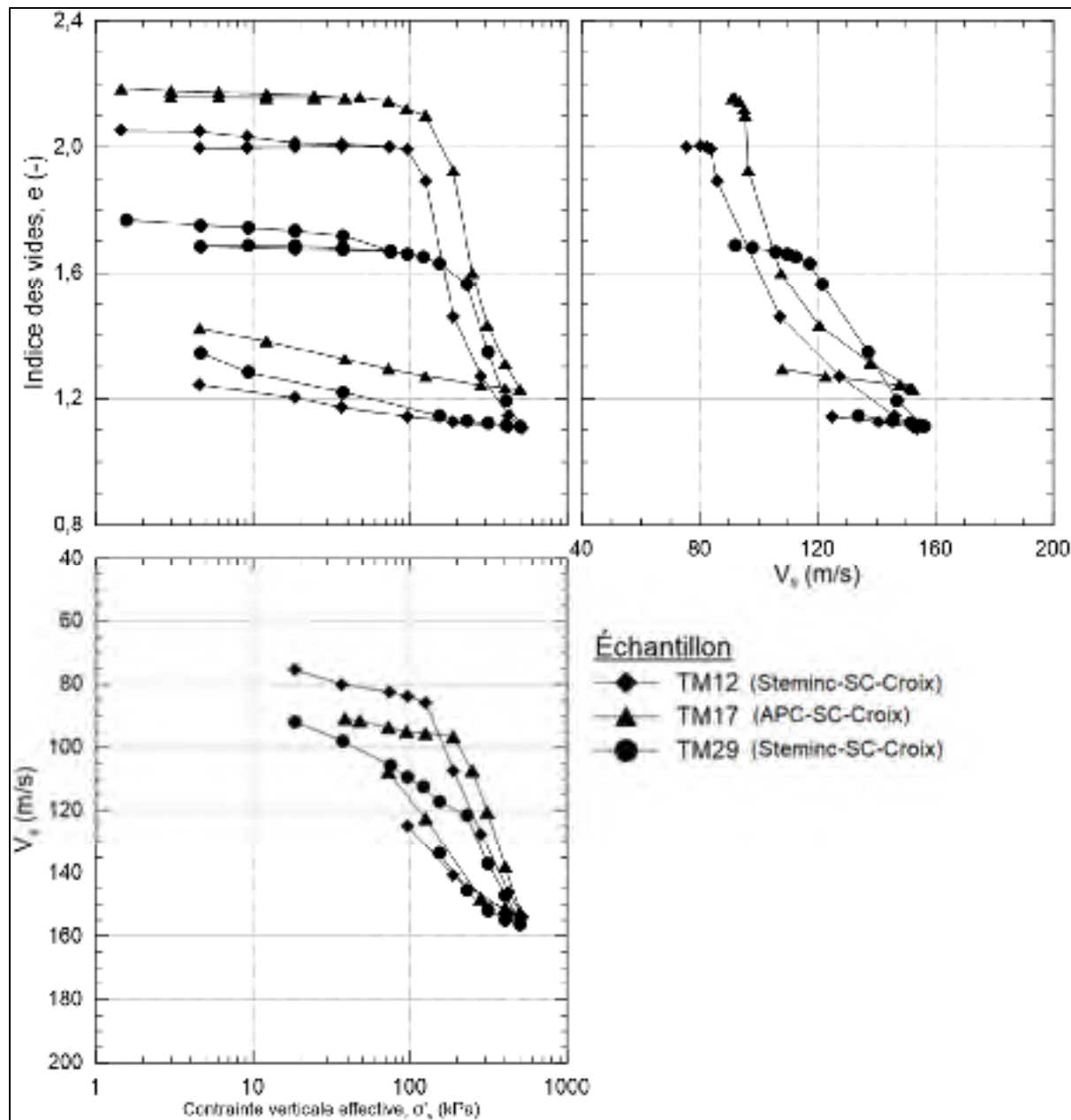


Figure 5.2 Résultats de la consolidation et des mesures de  $V_s$  des échantillons TM12, TM17 et TM29

La figure 5.2 illustre que les échantillons TM12, TM17 et TM29 sont de qualité, car ils présentent une cassure nette dans leur courbe de consolidation. Dès lors,  $\sigma'_p$  est facile à déterminer. De plus, selon les courbes de consolidation,  $\sigma'_p$  augmente en fonction de la profondeur de l'échantillon : TM12, qui est le moins profond (7,21 à 7,31 m), a une  $\sigma'_p$  de

124 kPa, TM17 (10,26 à 10,36 m) a une  $\sigma'_p$  de 178 kPa et TM29, qui est le plus profond (17,57 à 17,67 m), a une  $\sigma'_p$  de 218 kPa.

Sur la même figure, le graphique de  $e$  en fonction de  $V_s$  montre que, bien que la  $V_s$  de TM12 est toujours inférieure à celle de TM17 pour un même  $e$ , les deux échantillons ont une variation semblable. Tandis que TM29 n'a pas une pente aussi prononcée que les deux autres dans le graphique  $e$ - $V_s$  après le  $e$  correspondant à  $\sigma'_p$ . Cette différence provient probablement du fait que l'échantillon TM29 est de faible plasticité, contrairement aux échantillons TM12 et TM17 qui sont de plasticité élevée.

Le graphique de  $V_s$  en fonction de  $\sigma'_v$  de la figure 5.2 montre, quant à lui, que les trois échantillons ont une cassure marquée de la courbe à la  $\sigma'_p$ . En même temps, à partir de la  $\sigma'_p$ , leur pente est presque parallèle. Ceci indique que l'impact de l'augmentation de  $\sigma'_v$  après la  $\sigma'_p$  sur  $V_s$  est le même pour les trois échantillons.

La figure qui suit présente les résultats des essais de consolidation et de mesure de  $V_s$  qui ont été faits sur les échantillons MT02 et PS3 provenant du même forage.

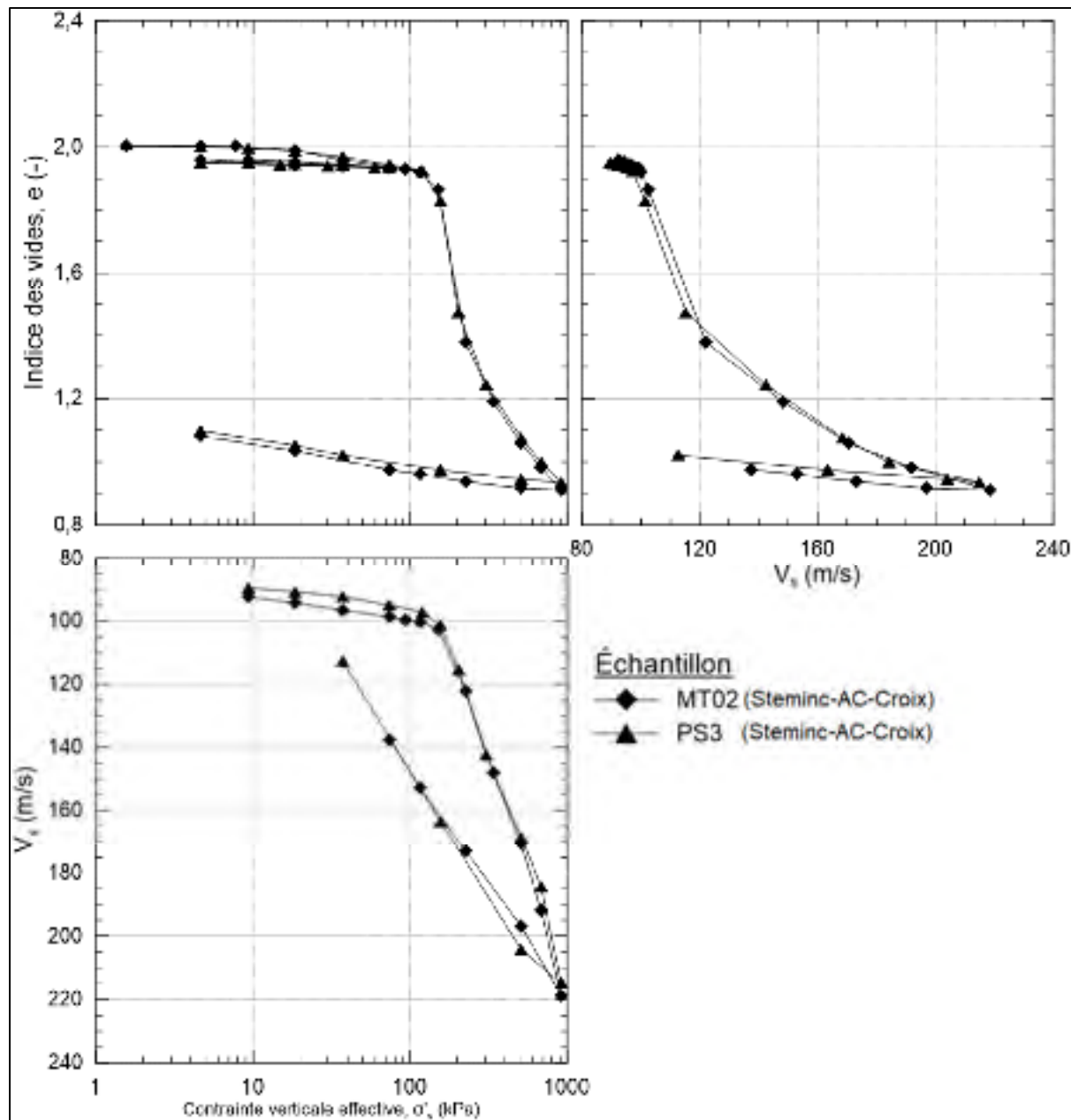


Figure 5.3 Résultats de la consolidation et des mesures de  $V_s$  des échantillons MT02 et PS3

Les courbes de consolidation de la figure 5.3 montrent, comme celles des figures précédentes, que les échantillons qui ont été analysés sont de bonne qualité. En effet, les courbes de consolidation présentent un changement de pente marqué au niveau de  $\sigma'_p$  ce qui permet d'aisément la déterminer. Un fait à remarquer sur le graphique de la consolidation est la faible



différence de  $\sigma'_p$  entre les deux échantillons malgré que PS3 ait une profondeur de 2,0 m de plus que MT02. En effet, MT02 a une  $\sigma'_p$  de 150 kPa tandis que PS3 a une  $\sigma'_p$  de 157 kPa.

Sur les deux autres graphiques de la même figure, on voit que les deux échantillons ont des variations de  $V_s$  en fonction de  $e$  et de  $\sigma'_v$  semblables. Notons tout de même que la cassure de la courbe à  $\sigma'_p$  dans le graphique de  $V_s$  en fonction de  $\sigma'_v$  est plus nette que dans celui de la consolidation, conduisant aux mêmes  $\sigma'_p$ .

La dernière figure qui suit est celle qui illustre le résultat de la consolidation et des mesures de  $V_s$  des échantillons SCB1 et SCB2. Il est à noter que ces deux échantillons proviennent du même bloc prélevé probablement à faible profondeur et que tous les deux contenaient de la matière organique.

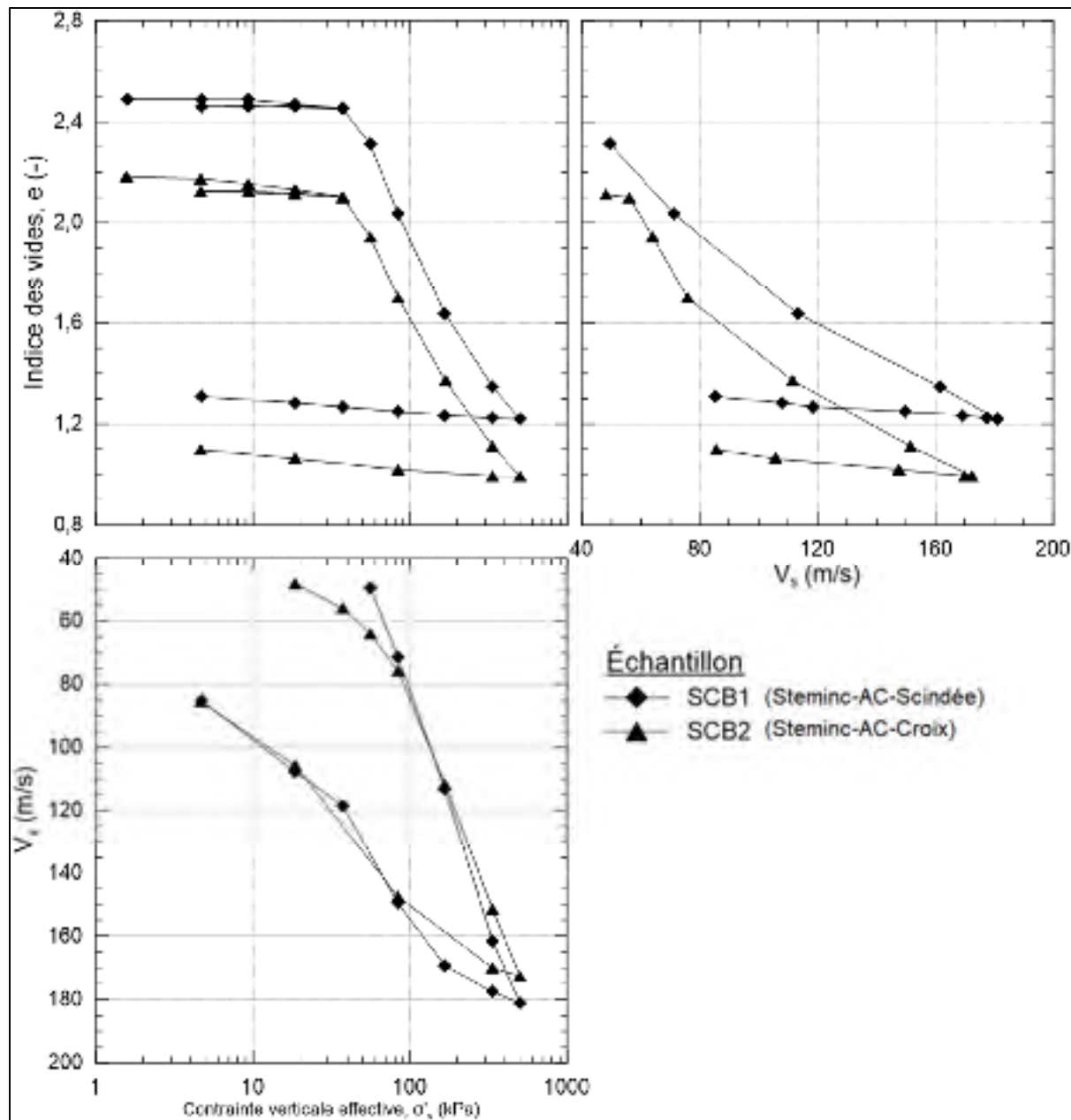


Figure 5.4 Résultats de la consolidation et des mesures de  $V_s$  des échantillons SCB1 et SCB2

La figure 5.4 montre que les deux échantillons SCB1 et SCB2 ont une cassure nette de leur courbe de consolidation au niveau de  $\sigma'_p$ . Ils présentent donc peu de remaniement. En revanche, malgré qu'ils proviennent d'un même bloc, ils ont une grande variation de leur  $e$  d'un échantillon à l'autre. Cette différence est probablement causée par la porosité secondaire créée par la matière organique qu'ils contiennent. On remarque aussi que la pente après  $\sigma'_p$

jusqu'à la contrainte maximale est plus faible que les échantillons analysés précédemment. Les  $\sigma'_p$  des échantillons SCB1 et SCB2 sont de 47 kPa pour SCB1 et de 45 kPa pour SCB2.

À la même figure, il est visible que peu de résultats de  $V_s$  sont présentés avant  $\sigma'_p$ . Ceci est dû aux signaux reçus par les anneaux P-RAT lors des essais en deçà de  $\sigma'_p$  qui étaient de faibles amplitudes en plus de contenir beaucoup d'interférences. Il a donc été impossible de les interpréter correctement, et ce malgré les deux cycles de chargement qui devaient améliorer le couplage sol/capteur. Sur la courbe de  $V_s$  en fonction de  $e$ , la  $V_s$  de SCB1 n'a donc pas pu être mesurée avant  $\sigma'_p$  et SCB2 n'a qu'un résultat avant  $\sigma'_p$ . D'un autre côté, ce graphique illustre que durant l'essai, la  $V_s$  la plus faible qui a été mesurée est d'environ 45 m/s : résultat d'une argile très molle.

La figure 5.4 illustre aussi que contrairement aux figures précédentes, les échantillons SCB1 et SCB2 n'ont pas de cassure nette de la courbe  $V_s$  en fonction de  $\sigma'_v$  au niveau de  $\sigma'_p$ . Malgré cela, la courbe de  $V_s$  en fonction de  $\sigma'_v$  montre que les deux échantillons ont une pente semblable après  $\sigma'_p$ .

Les difficultés rencontrées lors des essais sur les échantillons SCB1 et SCB2 peuvent être expliquées par la capacité des anneaux P-RAT à transmettre une onde de cisaillement lorsque  $V_s$  est faible, c'est-à-dire lorsque  $V_s$  est inférieure à 50 m/s. En effet, il se pourrait que l'onde S n'ait pas le temps d'atteindre l'anneau récepteur avant les ondes P incidentes. Ainsi, l'onde S serait oblitérée lors de la réception. Les difficultés peuvent aussi être dues à la matière organique contenue dans les échantillons qui causerait de l'interférence par des changements d'impédance locaux ou par la porosité secondaire.

Au total, 204 mesures distinctes de  $V_s$  sur des argiles de la mer de Champlain ont été obtenues lors de cette étude.

### 5.3 Caractérisation des échantillons

Tous les échantillons ont été caractérisés en laboratoire. Pour les échantillons GD10 et SCB provenant d'un même bloc, certaines caractéristiques sont supposées identiques : lorsque c'est le cas, l'échantillon supposé semblable est indiqué dans le tableau. Le tableau 5.1 présente les résultats des caractérisations des argiles.

Tableau 5.1 Caractéristiques des argiles

| Nom de l'échantillon                              | GD10-Base1 | GD10-Base2 | GD10-Milieu | TM12  | TM17  | TM29  | MT02  | PS3   | SCB1  | SCB2  |
|---------------------------------------------------|------------|------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Densité des grains secs, $G_s$ (-)                | 2,800      | Base1      | Base1       | 2,729 | 2,711 | 2,739 | 2,726 | 2,737 | 2,703 | SCB1  |
| Teneur en eau naturelle, $\omega_N$ (%)           | 83         | 84         | 82          | 74    | 81    | 64    | 74    | 73    | 91    | SCB1  |
| Limite de plasticité, $\omega_p$ (%)              | 24         | Base1      | 24          | 22    | 24    | 24    | 22    | 25    | 25    | SCB1  |
| Limite de liquidité, $\omega_L$ (%)               | 70         | Base1      | 72          | 64    | 61    | 41    | 58    | 67    | 68    | SCB1  |
| Indice de plasticité, $I_p$ (%)                   | 46         | Base1      | 48          | 42    | 37    | 17    | 36    | 42    | 43    | SCB1  |
| Indice de liquidité, $I_L$ (-)                    | 1,3        | Base1      | 1,2         | 1,2   | 1,5   | 2,4   | 1,4   | 1,1   | 1,5   | SCB1  |
| Pourcentage passant < 2 $\mu m$ (%)               | Base2      | 71         | 62          | 67    | 72    | 73    | 73    | 75    | SCB2  | 65    |
| Activité de l'argile, $A_c$ (-)                   | 0,65       | 0,65       | 0,77        | 0,63  | 0,51  | 0,23  | 0,49  | 0,56  | 0,66  | 0,66  |
| Indice des vides initial, $e_0$ (-)               | 2,505      | 2,359      | 2,304       | 2,033 | 2,213 | 1,770 | 2,004 | 2,006 | 2,465 | 2,181 |
| Contrainte de préconsolidation, $\sigma'_p$ (kPa) | 65         | 99         | 100         | 124   | 178   | 218   | 150   | 157   | 47    | 45    |
| Indice de compression, $C_c$ (-)                  | 1,673      | 3,288      | 3,265       | 2,444 | 2,673 | 1,488 | 2,768 | 3,161 | 1,418 | 1,199 |
| Classe de sol*                                    | CH         | CH         | CH          | CH    | CH    | CL    | CH    | CH    | OH    | OH    |

\*Selon la classification unifiée de la norme ASTM D2487-11 (2011)

Le tableau 5.1 expose que trois classes d'argile ont été analysées. La majorité des échantillons sont classés comme des CH (GD10-Base1, GD10-Base2, GD10-Milieu, TM12, TM17, MT02 et PS3), il y a aussi un CL (TM29) et deux OH (SCB1 et SCB2). Le tableau montre aussi que les variations de  $G_s$  entre 2,7 et 2,8 et de  $\omega_p$  entre 22 et 25 correspondent aux variations observées par Leroueil, Tavenas, et Le Bihan (1983) des caractéristiques des argiles Champlain. Seule l'Ac entre 0,23 à 0,77 a un spectre plus large que celui donné de 0,25 à 0,75 par Leroueil et al. (1983). Par ailleurs, l'indice de compression  $C_c$  est aussi dans la gamme de valeur à laquelle on peut s'attendre pour des argiles de la mer Champlain (Holtz & Kovacs, 1991).

Les résultats détaillés des granulométries des particules fines des argiles sont présentés à l'ANNEXE IV.

#### 5.4 Corrélations empiriques

Il existe plusieurs modèles de corrélation empirique dans la littérature. Celui qui est utilisé pour les argiles Champlain de ce mémoire s'apparente à la corrélation de  $G_{max}$  proposé par Hardin et Black (1968) (*Voir* l'équation (1.36)). Dans la relation de Hardin et Black (1968) pour les argiles,  $G_{max}$  est fonction de la contrainte moyenne, de l'OCR et de l'indice des vides. La différence qu'a cette relation avec celle utilisée ci-après, est que la relation de ce mémoire est exprimée pour une  $V_s$  normalisée en fonction de  $\sigma'_v$  au lieu de  $G_{max}$ . La normalisation de  $V_s$  est faite comme le propose Youd et al. (2001) et Karray et al. (2015) de la façon suivante :

$$V_{s1} = V_s \left( \frac{100 \text{ kPa}}{\sigma'_v} \right)^{0,25} \quad (5.1)$$

Tiré de Karray et al. (2015, p. 255), dans laquelle  $V_{s1}$  est  $V_s$  normalisée en fonction de  $\sigma'_v$  et  $\sigma'_v$  est en kPa.

Ensuite,  $V_{s1}$  peut s'exprimer en fonction de  $e$  et de l'OCR selon la relation suivante :

$$V_{s1} = F(e) * OCR^K \quad (5.2)$$

Dans laquelle,  $F(e)$  est une fonction de  $e$  qui peut s'exprimer sous la forme d'une puissance de la façon suivante :

$$F(e) = Ae^{-B} \quad (5.3)$$

Où  $A$  et  $B$  sont des constantes et  $e$  est l'indice des vides.

Dès lors avec les résultats présentés précédemment, il est possible de déterminer avec une régression linéaire à multiples variables les trois coefficients de régression  $K$ ,  $A$  et  $B$  nécessaires au modèle de corrélation empirique. La régression linéaire utilisée est la suivante :

$$\ln(V_{s1}) = \ln(A) + B * \ln(e) + K * \ln(OCR) \quad (5.4)$$

Où  $e$  est l'indice des vides.

Le tableau 5.2 présente les coefficients  $K$  obtenus pour tous les échantillons analysés lors de ce projet.

Tableau 5.2 Coefficients de régression K

| <b>Échantillon</b> | <b>Coefficient K</b> |
|--------------------|----------------------|
| GD10-Base1         | 0,179                |
| GD10-Base2         | 0,212                |
| GD10-Milieu        | 0,228                |
| TM12               | 0,196                |
| TM17               | 0,252                |
| TM29               | 0,139                |
| MT02               | 0,225                |
| PS3                | 0,218                |
| SCB1               | 0,000                |
| SCB2               | 0,209                |

Le tableau 5.2 montre que SCB1 a un coefficient K égal à zéro. Ce résultat n'est pas surprenant, car, lors de l'essai de  $V_s$  aucune mesure n'a pu être prise avant  $\sigma'_p$ . L'OCR de cet essai ne varie donc pas, il est toujours égal à 1. Ainsi, il est normal que l'OCR n'ait aucun poids dans la détermination de  $V_{s1}$  pour l'essai sur l'échantillon SCB1. En excluant le résultat obtenu sur l'échantillon SCB1, le tableau 5.2 présente aussi une variation de K entre 0,179 et 0,252. Cette variation est semblable à celle observée par Hardin et Black (1968) de 0,12 à 0,35 pour un  $I_p$  de 17 à 48.

La figure suivante illustre les courbes de régression obtenues pour  $F(e)$  de l'équation (5.3) à partir du modèle de prédiction. Pour les courbes détaillées avec les points utilisés pour les régressions, il faut se référer à l'ANNEXE V.

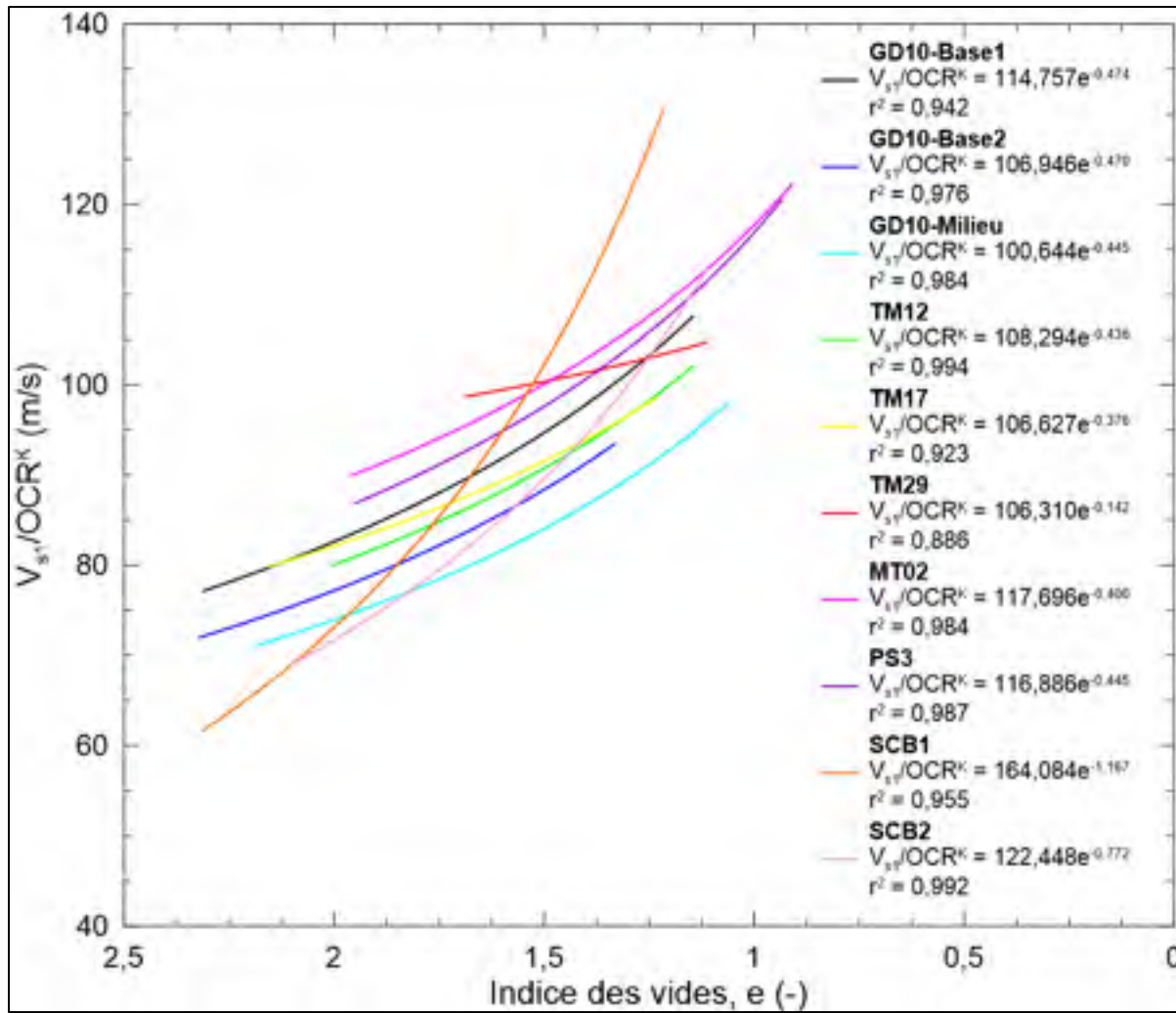


Figure 5.5  $V_{sl}/OCR^K$  en fonction de l'indice de vides

La figure 5.5 montre que les coefficients de détermination  $r^2$  de  $F(e)$  sont entre 0,886 et 0,992. Elle montre aussi que les  $F(e)$  des argiles CH sont parallèles. En même temps, on voit que le ratio  $V_{sl}/OCR^K$  de l'argile CL (TM29) augmente moins que les autres courbes lorsque son  $e$  diminue. De plus, on remarque sur cette figure que les argiles OH (SCB1 et SCB2) varient différemment des autres essais lorsque  $e$  diminue, malgré qu'ils aient des caractéristiques, comme l' $I_p$  et leur pourcentage d'argile, semblables aux autres échantillons. Dès lors, les deux échantillons d'argile OH sont exclues des analyses subséquentes, car ils présentent un comportement dynamique singulier qui a sûrement un lien avec leur contenu en matière organique.



Comme il a été présenté à la section 1.7.1 plusieurs caractéristiques de l'argile peuvent influencer  $V_s$ . Dans le cadre des résultats expérimentaux obtenus lors de cette étude, il a été constaté que les coefficients  $A$ ,  $B$  et  $K$  sont influencés par le pourcentage de particules d'argile et l'indice de plasticité (*Voir* le tableau 5.1). En effet, il semble que le coefficient  $A$  croît en fonction du pourcentage d'argiles et que le coefficient  $B$  et  $K$  augmente en fonction de l' $I_p$ . Enfin, ces observations doivent absolument être validées par plusieurs autres essais avant de pouvoir s'appliquer à la caractérisation d'une argile.



## CHAPITRE 6

### DISCUSSION

Le chapitre 5 a permis de montrer aux figure 5.1, figure 5.2, figure 5.3 et figure 5.4 que  $V_s$  varie en fonction de  $e$  et de  $\sigma'_v$  surtout lorsque  $\sigma'_v$  dépasse  $\sigma'_p$ . En effet, sur ces figures, on voit bien la cassure nette et l'augmentation de  $V_s$  à partir de  $\sigma'_p$ . L'efficacité de la méthode P-RAT a aussi été démontrée par la possibilité d'effectuer des mesures à une  $\sigma'_v$  à plus de 950 kPa et de mesurer des  $V_s$  variant de 45 à 220 m/s. En revanche, elle a aussi démontré une limite lors des essais sur les argiles OH, durant lesquels aucune mesure de  $V_s$  n'a pu être analysée en deçà de  $\sigma'_p$ . Cette difficulté a probablement deux causes. D'un côté, il se peut que ce soit dû au couplage des anneaux P-RAT avec le sol qui est plus difficile à obtenir lorsque le matériau présente une  $V_s$  faible ( $V_s < 40$  m/s). D'un autre côté, la cause ne provient peut-être pas de la méthode, mais du contenu en matière organique du matériau qui engendre beaucoup d'interférences qui oblitèrent la réception de l'onde S.

La variation de  $V_{sl}/OCR^K$  en fonction de  $e$  de la figure 5.5 indique que les argiles OH n'ont pas le même comportement que les autres argiles CH et CL. Malgré que les argiles OH aient des caractéristiques semblables aux argiles CH (*Voir* le tableau 5.1),  $V_s$  augmente beaucoup plus lorsque  $e$  diminue. De plus, lorsque les résultats des argiles OH sont intégrés aux autres argiles dans des modèles de régression linéaire tous les coefficients  $r^2$  deviennent nuls. Ces deux constats pointent vers un comportement dynamique distinct des argiles contenant de la matière organique. Il serait toutefois intéressant de comparer, lors d'une future recherche, leur comportement dynamique en fonction de leur contenu en matière organique comme le propose Kishida, Boulanger, Wehling, et Driller (2006).

On remarque aussi, sur la figure 5.5, que les argiles CH montrent tous un accroissement de  $V_{sl}/OCR^K$  semblable lorsque  $e$  diminue. En même temps, pour un même  $e$ , elles n'ont pas toutes le même ratio  $V_{sl}/OCR^K$ . Certains échantillons ont des ratios plus élevés que les autres. Cette observation semble être liée à un accroissement du coefficient  $A$  (*Voir* l'équation (5.3)).

Or, lors de l'analyse de la sensibilité des coefficients de régression par rapport aux caractéristiques de l'argile, il est constaté que le pourcentage de particules d'argile est la seule caractéristique qui présente une corrélation avec le coefficient A. On peut donc expliquer un ratio  $V_{sl}/OCR^K$  plus élevé pour une argile avec un  $I_p$  semblable par un contenu en particule d'argile supérieure. Théoriquement, l'augmentation en particule d'argile d'un sol se traduit par une augmentation de sa surface spécifique (Holtz & Kovacs, 1991). Ainsi, un sol qui présente une surface spécifique plus élevée a plus de contact entre ses grains. Alors, pour des matériaux saturés ou complètement secs, dont la rigidité des particules est semblable, plus de contact entre les grains augmente leur rigidité globale en cisaillement et par le fait même  $V_s$  (Santamarina et al., 2001). Il faut toutefois souligner qu'il est nécessaire, avant de conclure à une corrélation valide, d'obtenir plus de résultats de  $V_s$  pour des argiles de la mer Champlain avec des contenus en particules d'argiles inférieurs à 65 % et supérieurs à 76 %.

Ensuite, la variation du ratio  $V_{sl}/OCR^K$  de la figure 5.5 illustre que la courbe de l'argile CL augmente moins que celle des argiles CH lorsque  $e$  diminue. Comme la principale caractéristique qui les distingue est leur  $I_p$ , cela suggère que  $V_s$  d'une argile avec un  $I_p$  faible variera moins en fonction de  $e$  qu'une argile avec un  $I_p$  élevé. Cette observation se traduit par un coefficient B plus faible pour une argile CL que pour une argile CH. Comme pour la corrélation obtenue du coefficient A avec le pourcentage d'argile, avant de conclure à une corrélation, il est nécessaire d'obtenir plus de résultats avec des argiles Champlain présentant des  $I_p$  entre 20 et 35.

En conclusion, les corrélations entre les coefficients de régression et les caractéristiques des argiles Champlain peuvent servir d'axe de référence à des études futures plus exhaustives. Effectivement, les résultats présentés précédemment ne sont pas suffisants afin de conclure à des tendances réelles : les tendances observées doivent absolument être validées par plus d'essais en laboratoire.

## CONCLUSION

Les essais *in situ* de mesure de  $V_s$  sont de plus en plus utilisés lors de l'évaluation parasismique d'un site. Comme  $V_s$  est un paramètre intrinsèque du sol, les  $V_s$  obtenues *in situ* peuvent aussi servir à la caractérisation géotechnique des sols. Actuellement, il existe plusieurs relations empiriques dans la littérature, mais peu pour les argiles du Québec. Dès lors, il est nécessaire d'augmenter le nombre de mesures afin d'établir des corrélations empiriques entre  $V_s$  et les caractéristiques des argiles de la mer Champlain.

Les mesures de  $V_s$  en laboratoire, comme lors d'un essai de consolidation, permettent de contrôler certains paramètres d'un sol. Il est dès lors plus facile en laboratoire d'obtenir plusieurs mesures de  $V_s$  selon plusieurs paramètres pour un même sol qu'avec des essais *in situ* et *in fine* pour établir des relations empiriques. La principale difficulté des mesures de  $V_s$  en laboratoire est l'effet de champ proche qui oblitère l'interprétation dans le domaine du temps de  $V_s$ . Ainsi, il a été choisi d'utiliser la méthode P-RAT pour les mesures de  $V_s$ . Car elle a démontré son efficacité à mesurer  $V_s$  dans un essai de consolidation où la faible hauteur de l'échantillon rend le milieu propice à l'effet de champ proche (Éthier, 2009).

Lors du chapitre 2, un algorithme permettant l'automatisation de la méthode P-RAT a été présenté. Pour que cet algorithme fonctionne, il est nécessaire de préalablement connaître, en plus du signal émis et reçu, certains paramètres comme  $\phi_{th}$ , la polarité de l'émission par rapport à la réception et la fenêtre de fréquences à considérer. Cette dernière est nécessaire lors de l'utilisation de l'algorithme, car c'est dans la plage des fréquences contenues dans la fenêtre qu'est corrélée  $\phi_{corr}$  avec  $\phi_{th}$  et c'est aussi dans cette zone qu'est déterminée  $V_s$ . Il a été démontré qu'un mauvais choix de fenêtre de fréquences ne permettait pas à l'algorithme de converger vers la bonne valeur de  $V_s$ . Ainsi, dans le but d'être en mesure de déterminer a priori la fenêtre de fréquences avant un essai de  $V_s$ , il est recommandé d'explorer davantage la façon dont celle-ci varie en cours d'essai.

Les anneaux P-RAT utilisés pour mesurer  $V_s$  durant ce projet ont aussi été caractérisés en laboratoire. La caractérisation a été faite avec deux essais : l'analyseur d'impédance et l'interféromètre. Le premier essai a permis d'établir des caractéristiques en fonction du modèle de circuit équivalent Butterworth Van-Dyke, notamment avec le facteur  $Q$ . Il a été vu que l'assemblage de l'anneau P-RAT diminue la fréquence de résonance et le facteur  $Q$  par rapport à l'anneau piézoélectrique non assemblé. Lors du deuxième essai, les déplacements de l'anneau P-RAT, uniquement de la marque Steminc, ont été mesurés. Ces mesures ont montré que l'assemblage de l'anneau P-RAT avec une pierre poseuse centrale scindée en quatre morceaux possède un ratio  $u_r/u_z$  (1,3) plus faible que l'assemblage de l'anneau P-RAT avec une pierre poreuse centrale trouée en forme de croix (6,8). De ce fait, l'anneau P-RAT avec une pierre poseuse centrale scindée en quatre morceaux génère plus d'ondes P pouvant interférer avec l'onde S.

Les mesures des déplacements ont aussi permis d'établir la déformation en cisaillement qu'induisent les différents types d'anneaux P-RAT. Dès lors, à partir de 144 V, les anneaux P-RAT avec une pierre poreuse centrale trouée en forme de croix génèrent des déformations en cisaillement supérieures à la limite élastique ( $10^{-3}$  %). Tandis que, pour les anneaux P-RAT avec une pierre poreuse centrale scindée en quatre morceaux, c'est à partir de 94 V que les déformations en cisaillements dépassent la limite élastique. Il est par conséquent recommandé de ne pas excéder, lors des essais de  $V_s$ , le seuil de 144 V pour les anneaux P-RAT avec une pierre poreuse centrale trouée en forme de croix et le seuil de 94 V pour les anneaux P-RAT avec une pierre poseuse centrale scindée en quatre morceaux. Pour tous les autres types de capteurs P-RAT, d'une marque différente et/ou d'un assemblage différent, il est préférable de mesurer leurs déplacements en fonction de la tension avant de faire un essai afin d'établir une tension seuil qui permettra de ne pas dépasser la limite élastique.

Le chapitre 5 présente les résultats de la caractérisation en fonction de  $V_s$  obtenus sur dix échantillons d'argiles provenant de la mer Champlain. Lors de l'analyse, il a été constaté à la figure 5.5 que les argiles contenant de la matière organique OH ont un comportement

dynamique distinct des argiles CH et CL. Ces argiles OH mériteraient une analyse indépendante.

Le modèle empirique utilisé dans le cadre de cette étude a montré que  $V_s$  dépend de paramètres géotechniques usuels, comme  $e$ , OCR, la contrainte, le contenu en particule d'argile et  $I_p$ .  $V_s$  peut donc servir à caractériser les argiles de la mer Champlain. En revanche, il est recommandé de valider les tendances mentionnées dans cette étude par plus de mesures de  $V_s$  sur d'autres échantillons d'argile de la mer Champlain, en particulier, sur des argiles avec des  $I_p$  entre 15 et 35 et des pourcentages de particules d'argiles inférieurs à 60 et supérieurs à 76.

Finalement, les tendances entre  $V_s$  et les paramètres géotechniques observés lors de ce mémoire vont permettre à d'autres études d'orienter leur recherche vers des corrélations empiriques fiables. À terme, ces corrélations empiriques vont pouvoir servir à caractériser efficacement les sols avec des essais de  $V_s$  *in situ* et en laboratoire.





## ANNEXE I

### PLANS DE L'ENCAPSULATION DE L'ANNEAU P-RAT DE MARQUE STEMINC

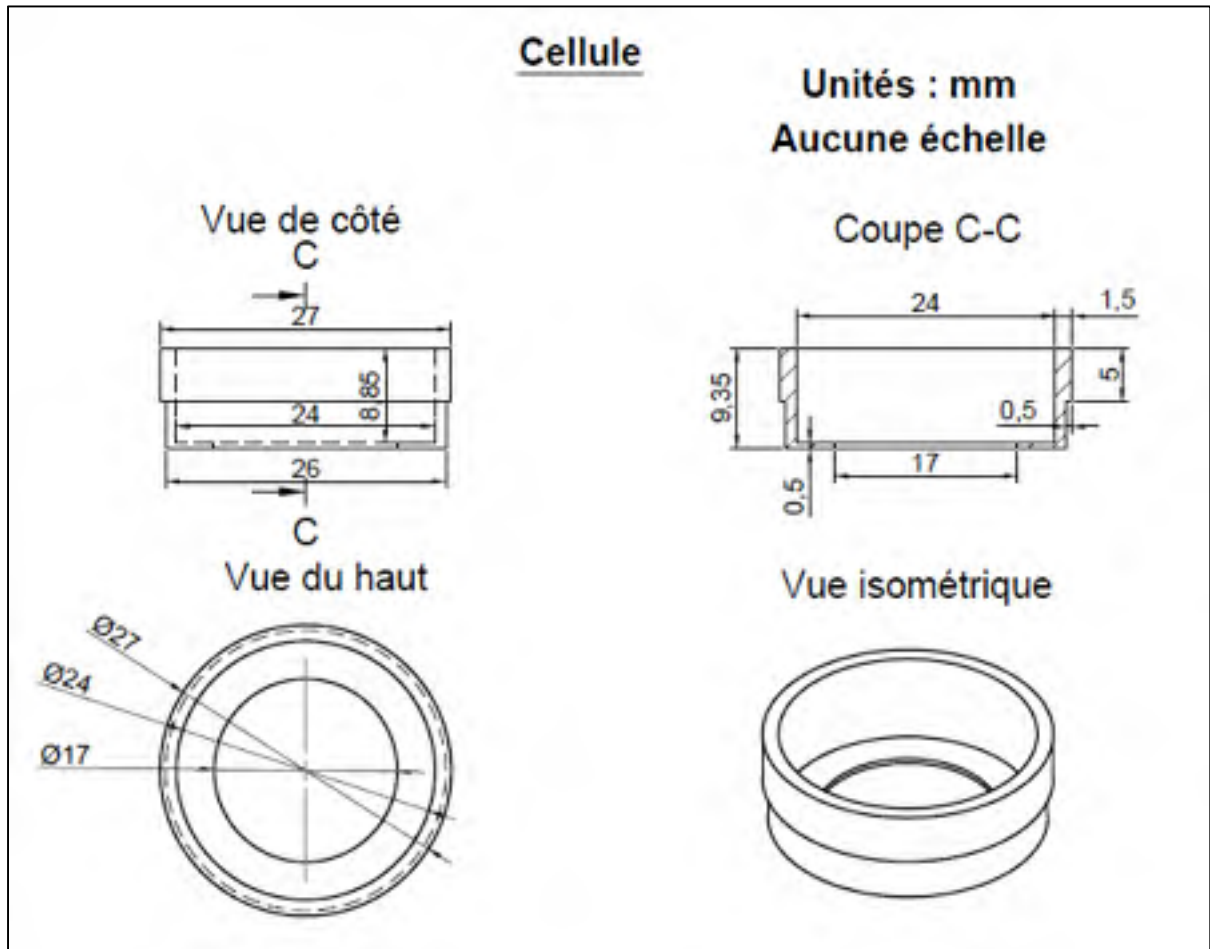


Figure-A I-1 Plan de la cellule métallique

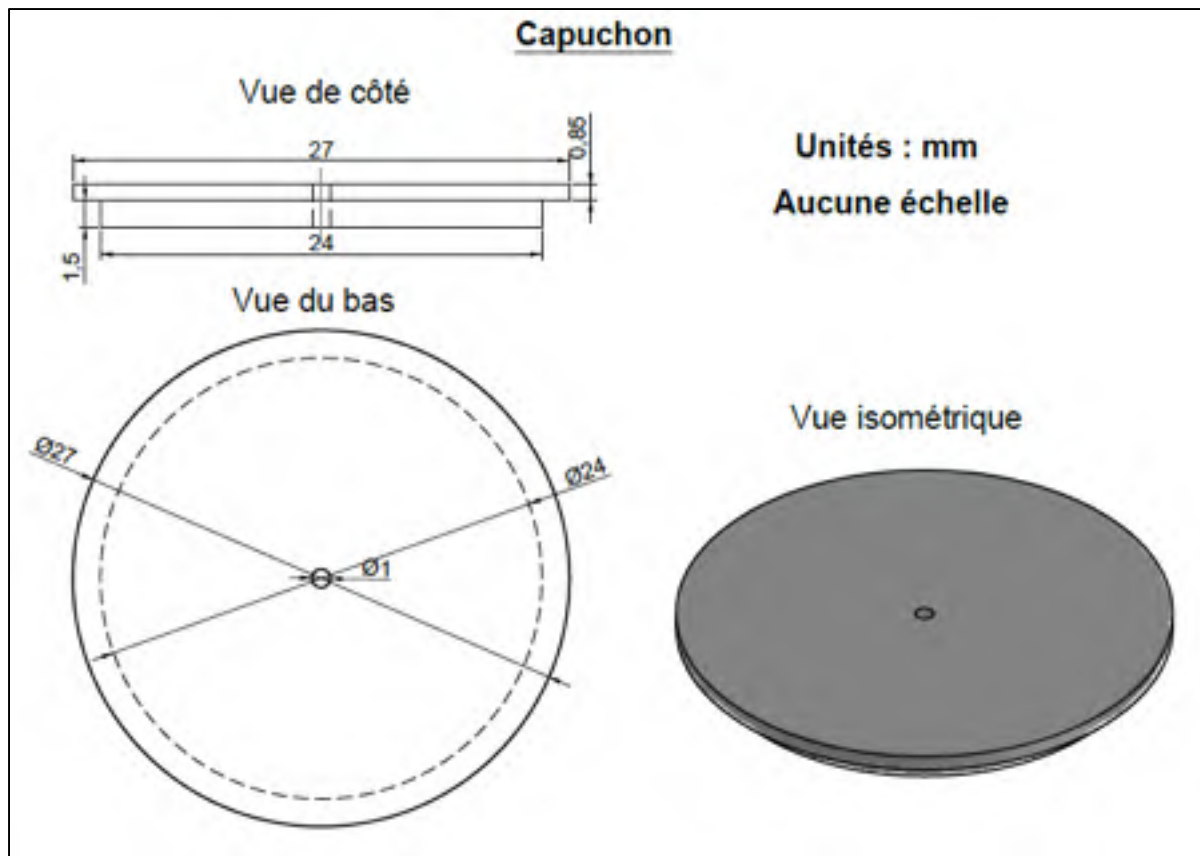


Figure-A I-2 Plan du capuchon

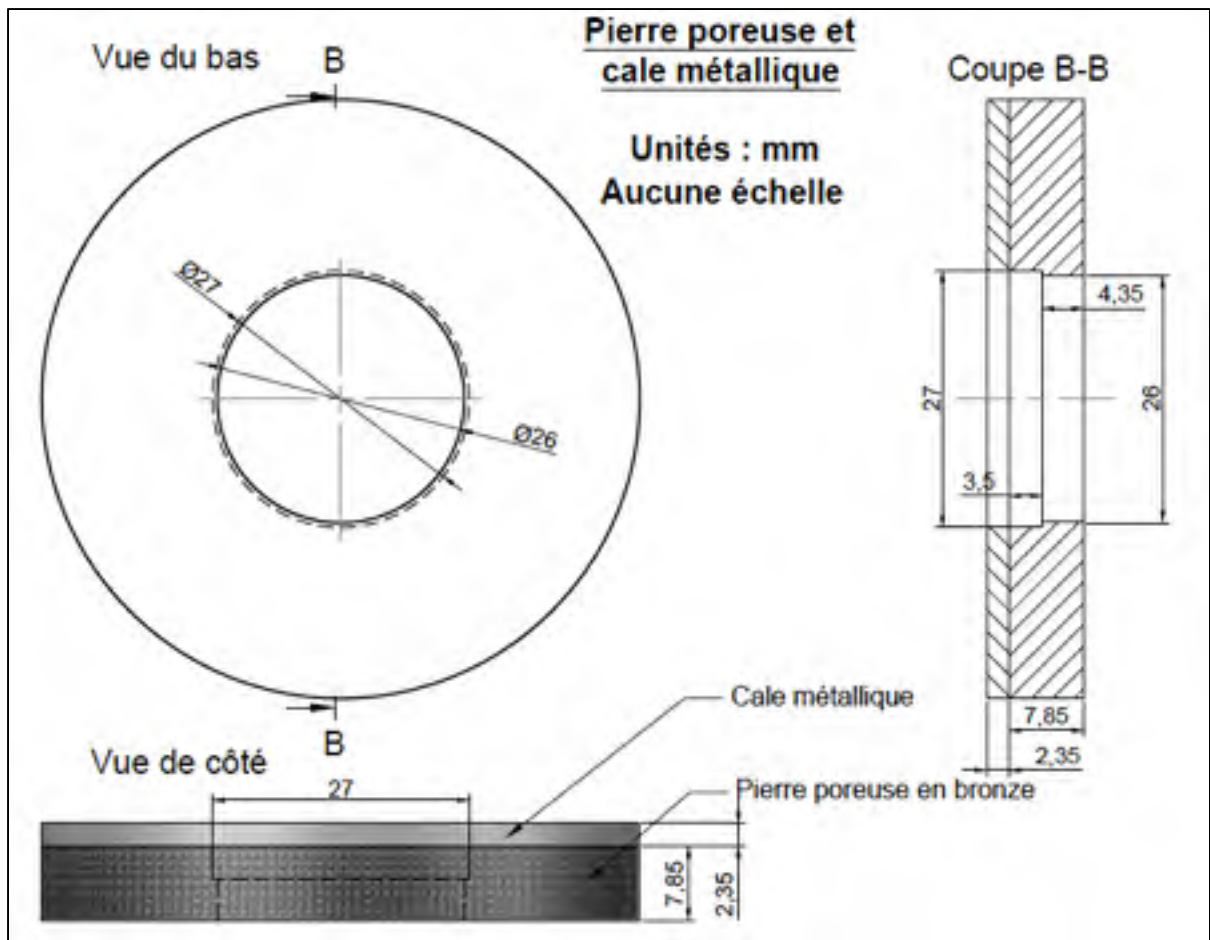


Figure-A I-3 Plan de la pierre poreuse et de la cale métallique



## **ANNEXE II**

### **CALIBRATIONS DES CAPTEURS P-RAT**

Il est important de noter que pour toutes les figures de cette annexe la légende se réfère aux différentes formes d'émission utilisées qui sont présentées à la figure 3.5.

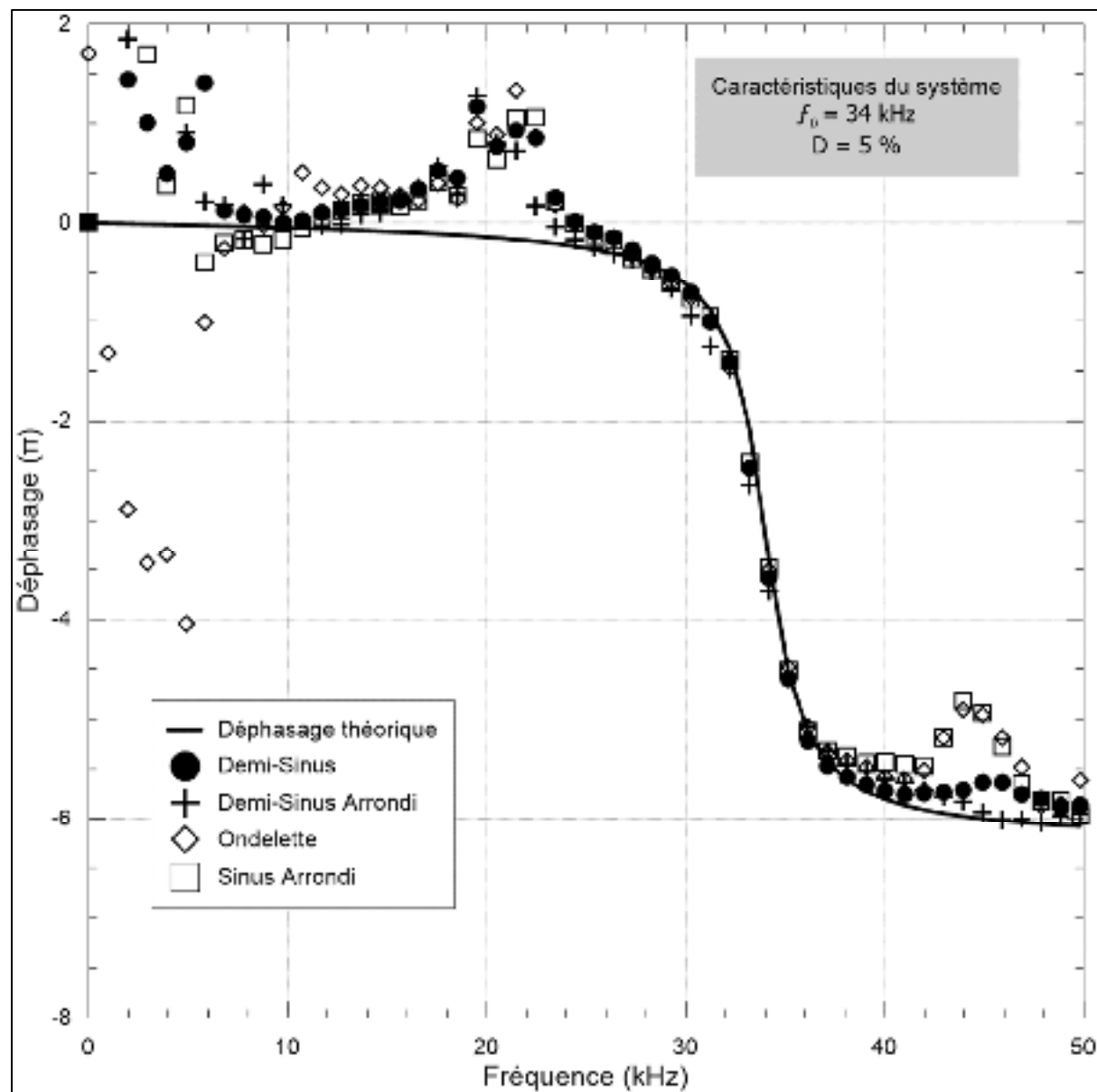


Figure A- II-1 Calibration des capteurs APC avec une pierre poreuse centrale trouée en forme de croix des essais GD10-Base1, GD10-Milieu et TM17

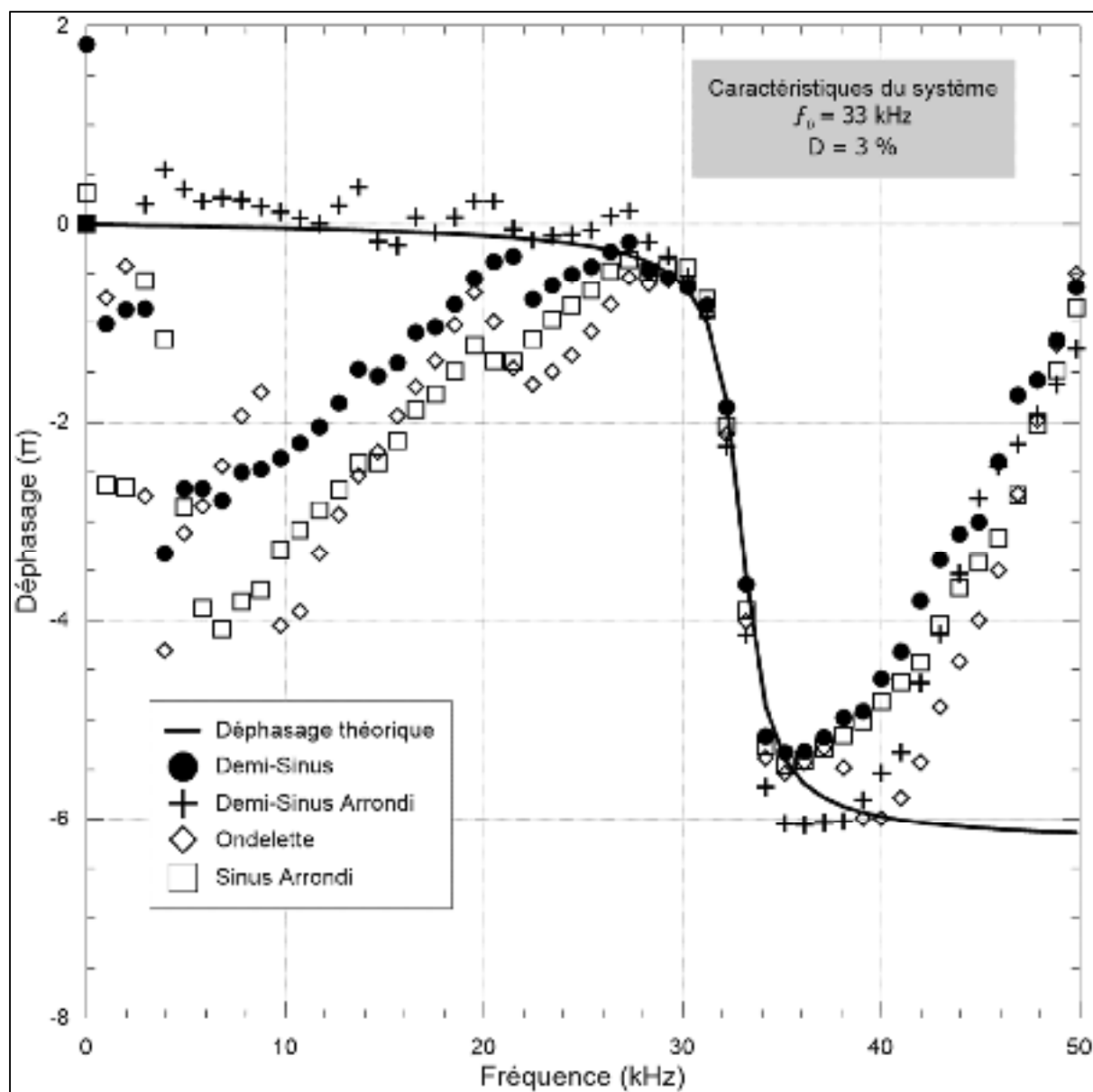


Figure A- II-2 Calibration des capteurs P-RAT Steminc avec une pierre poreuse centrale trouée en forme de croix des essais GD10-Base2, TM12 et TM29

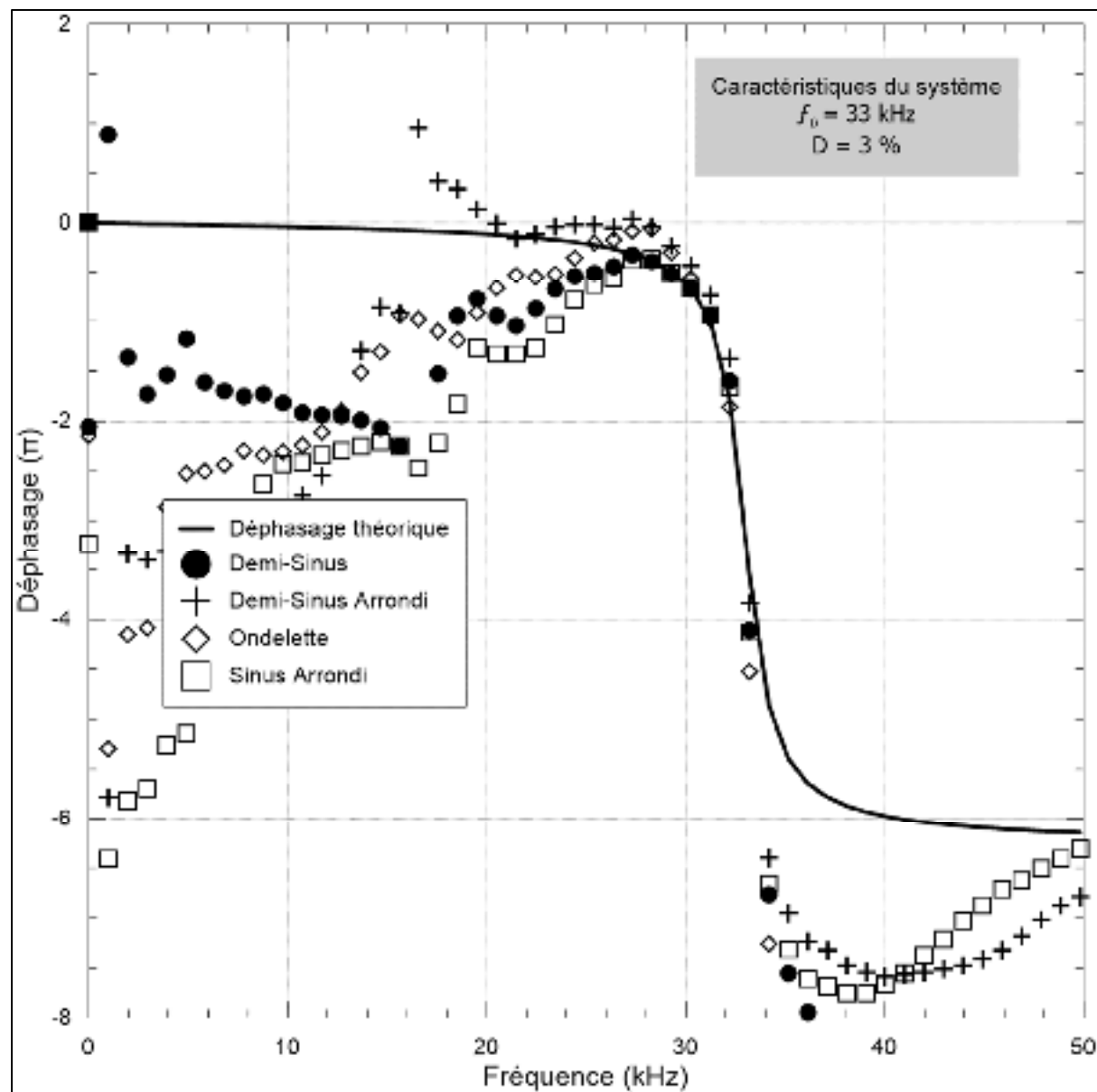


Figure A- II-3 Calibration des capteurs P-RAT Steminc avec une pierre poreuse centrale trouée en forme de croix dans une cellule métallique des essais MT02, PS3 et SCB2



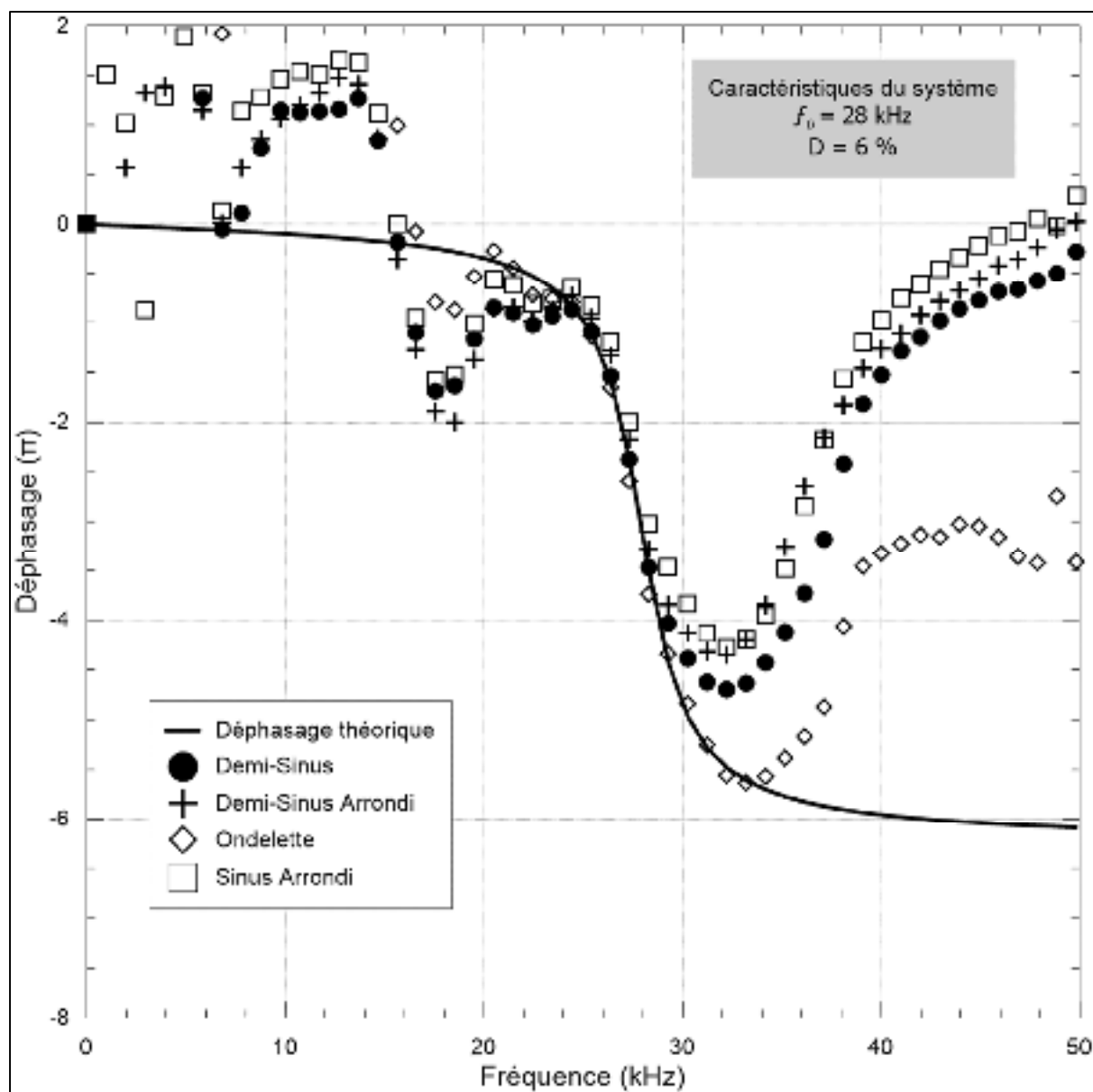


Figure A- II-4 Calibration des capteurs P-RAT Steminc avec une pierre poreuse centrale scindée en quatre morceaux de l'essai SCB1



## **ANNEXE III**

### **DÉPLACEMENTS MESURÉS À L'INTERFÉROMÈTRE**

**Déplacement de l'anneau Steminc avant l'assemblage**

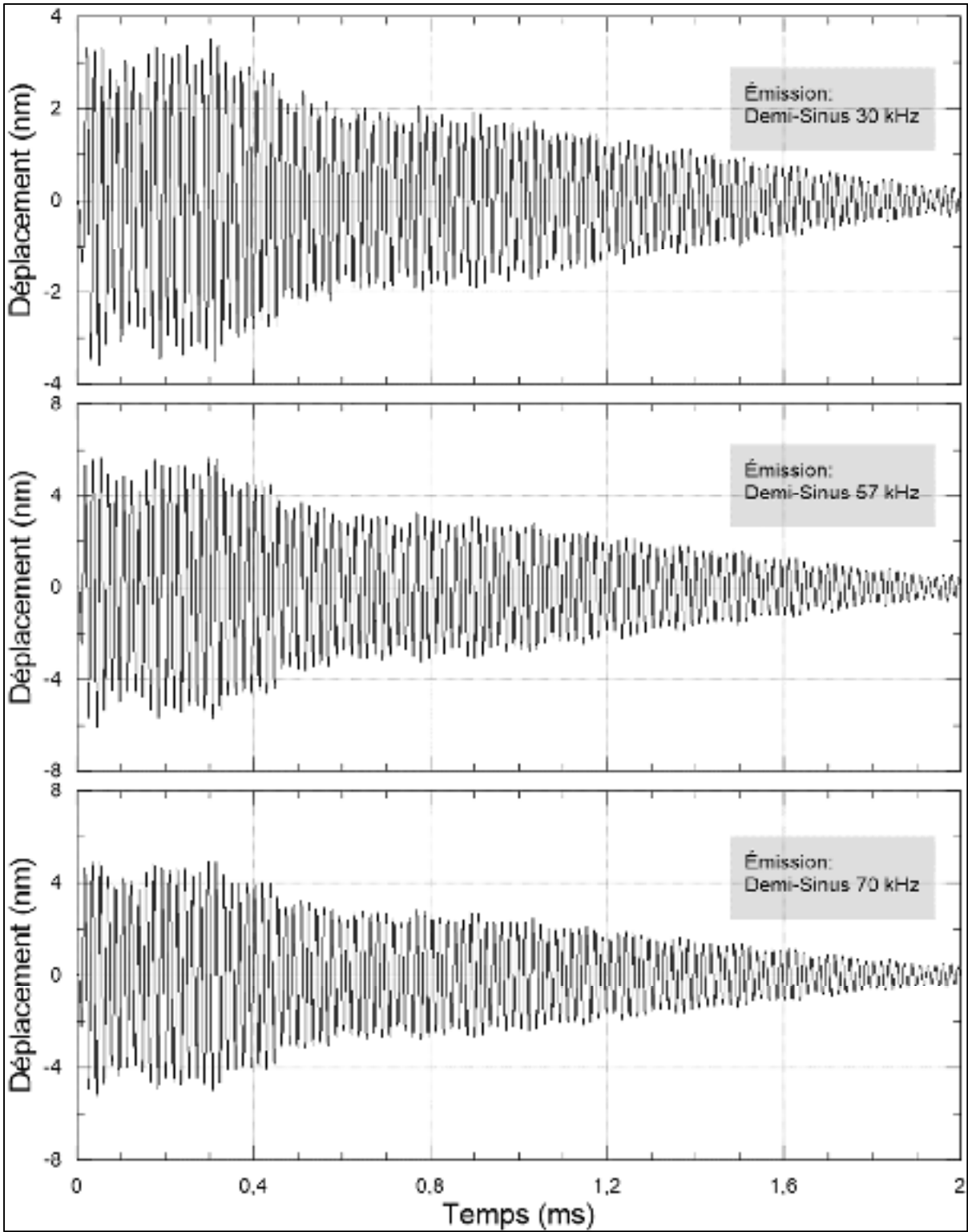


Figure-A III-1 Déplacement radial de l’anneau Steminc avant assemblage (+)

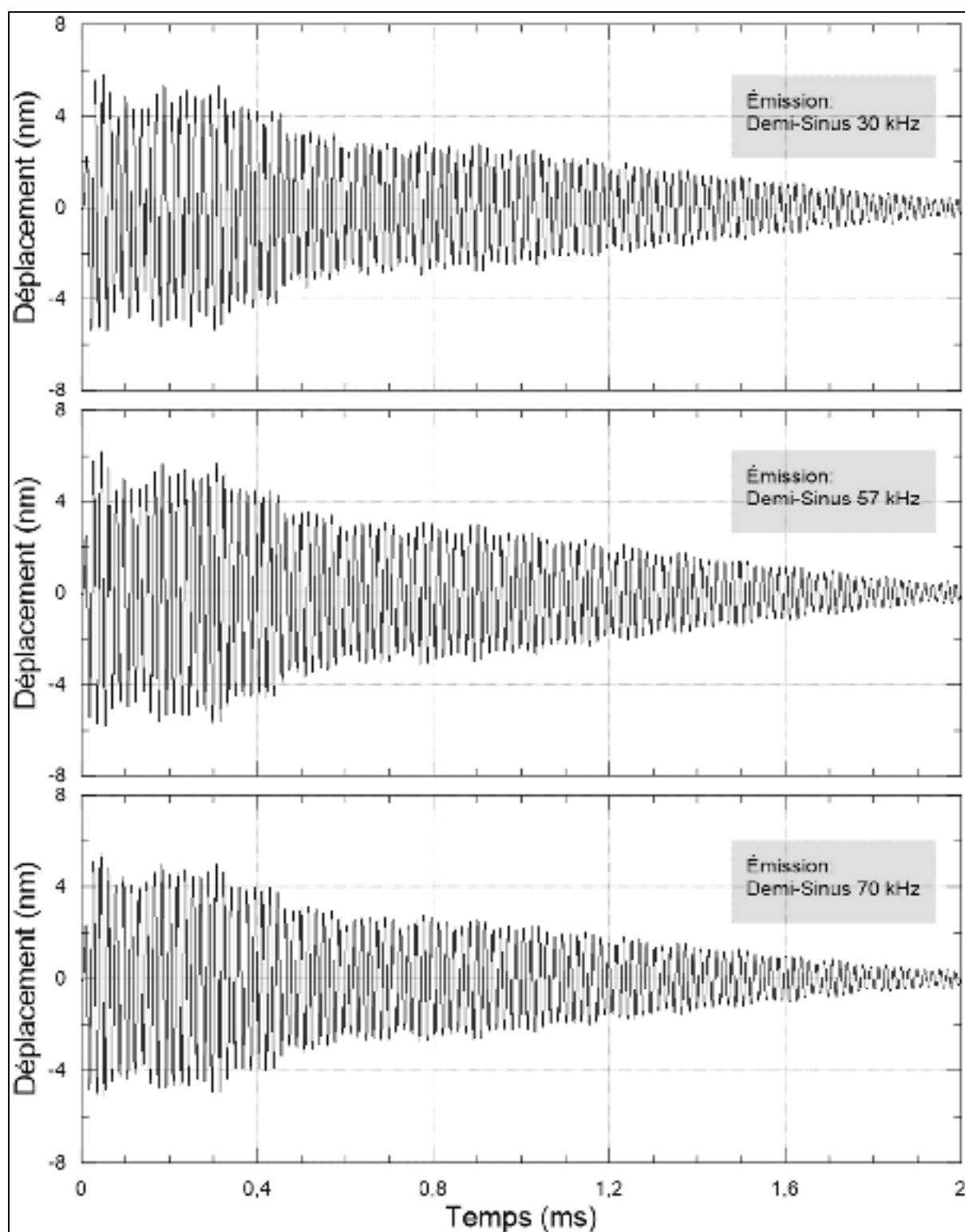


Figure-A III-2 Déplacement radial de l'anneau Steminc avant assemblage (-)

**Déplacement radial de l'anneau P-RAT Steminc avec une pierre poreuse centrale en croix et scindée en quatre morceaux**

Se référer à la figure 4.5 pour la signification des points.

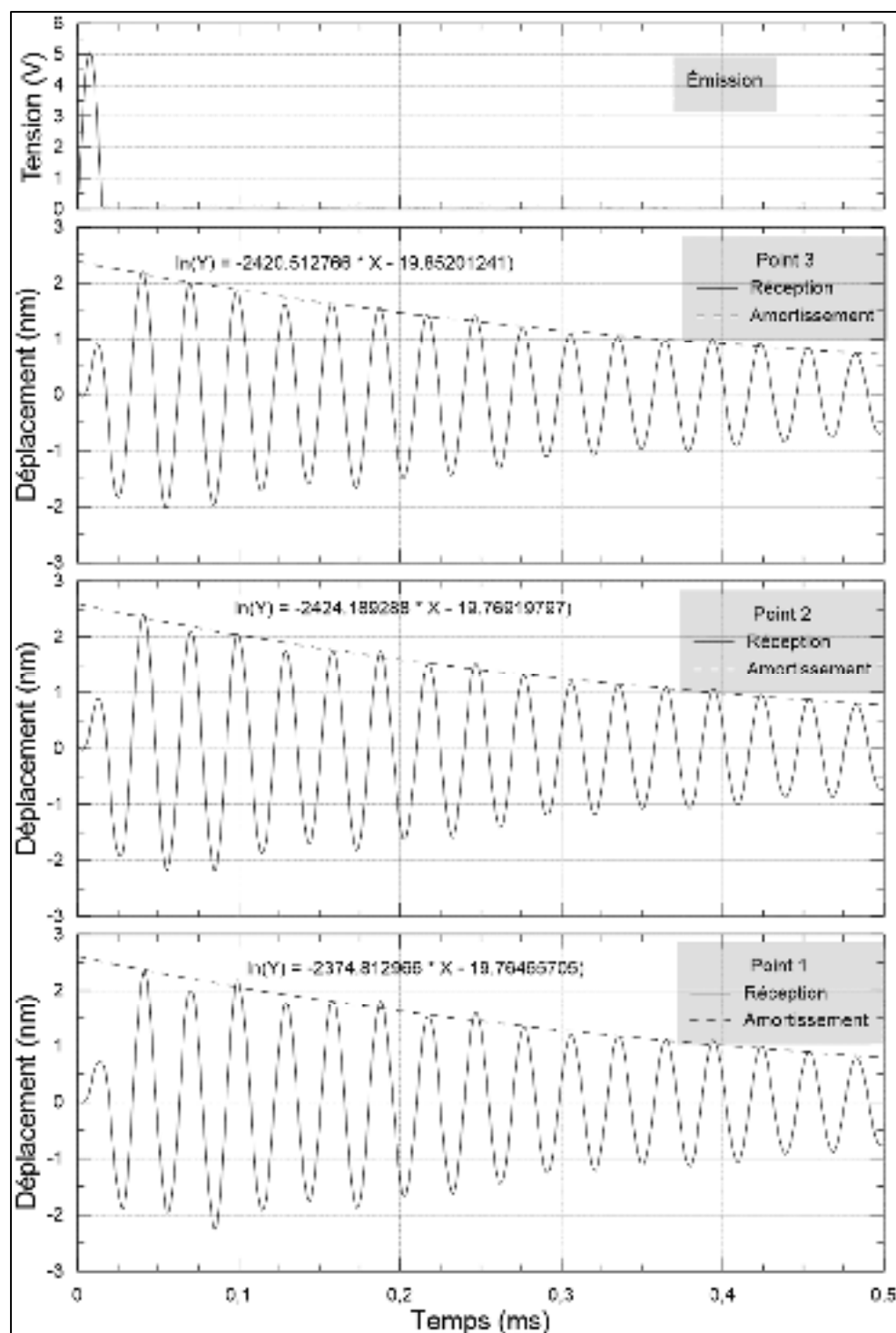


Figure-A III-3 Déplacement radial de l'anneau P-RAT Steminc avec une pierre poreuse centrale en croix lors d'une émission à 33 kHz (-)

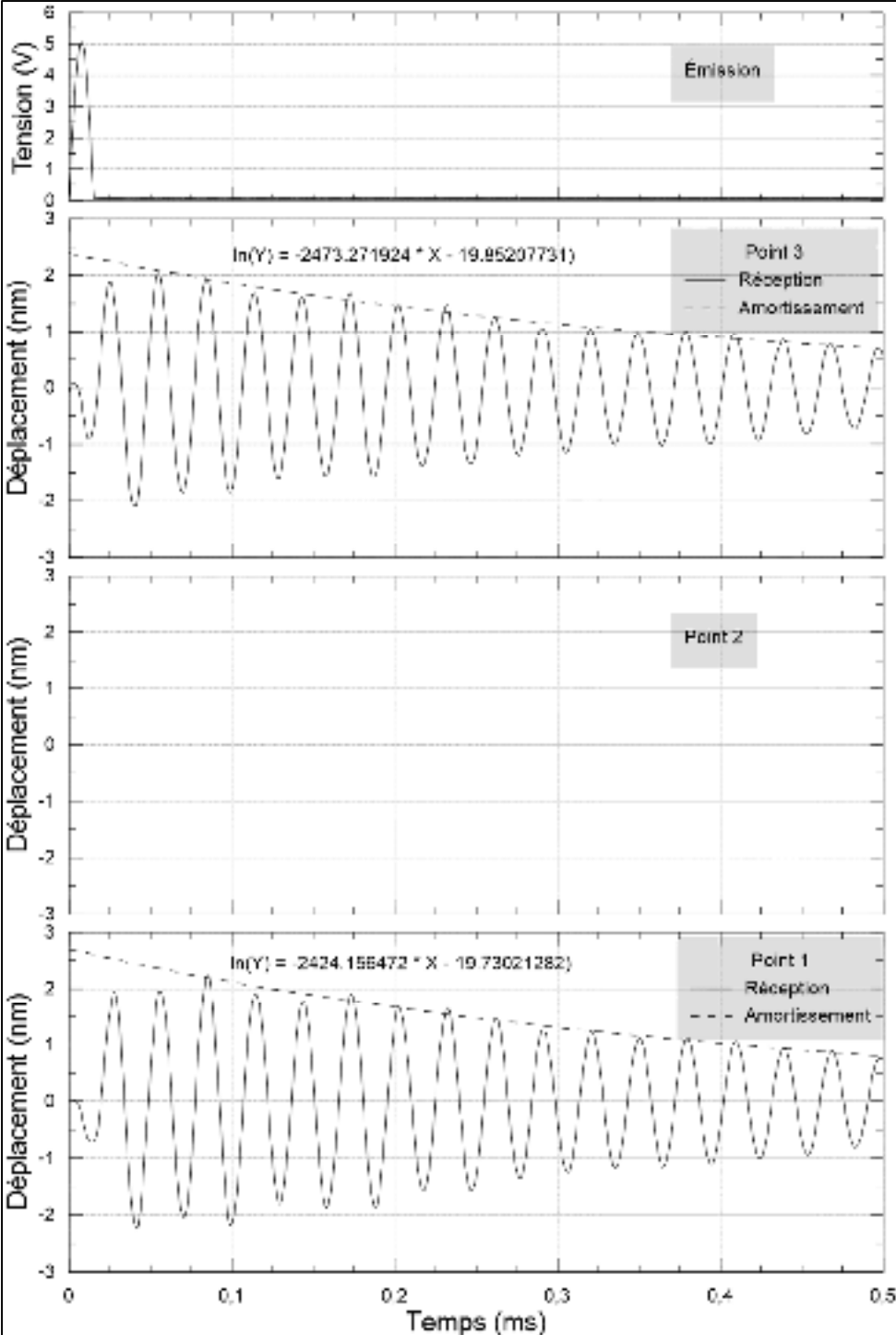


Figure-A III-4 Déplacement radial de l'anneau P-RAT Steminc avec une pierre poreuse centrale en croix lors d'une émission à 33 kHz (+)



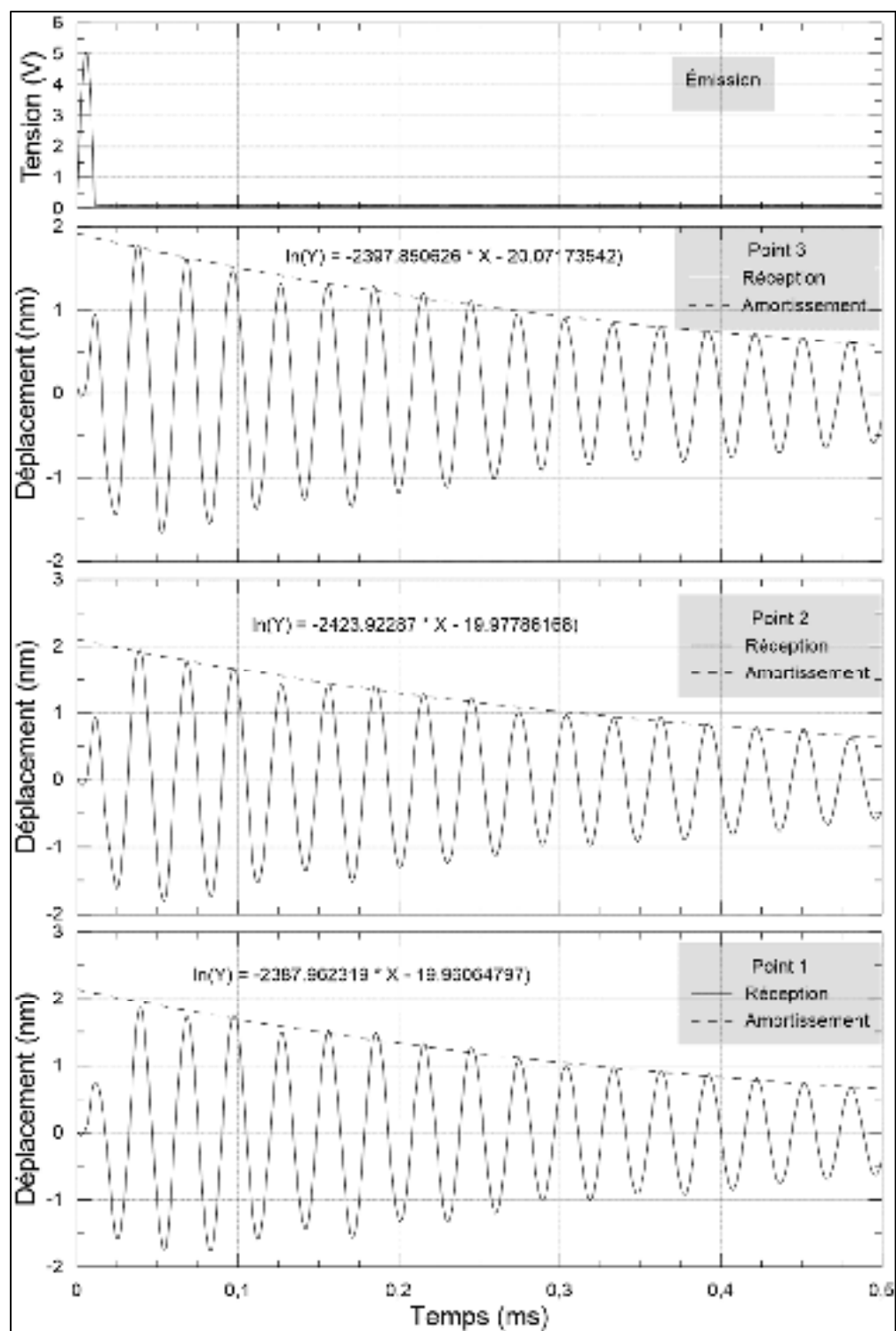


Figure-A III-5 Déplacement radial de l'anneau P-RAT Steminc avec une pierre poreuse centrale en croix lors d'une émission à 45 kHz (-)

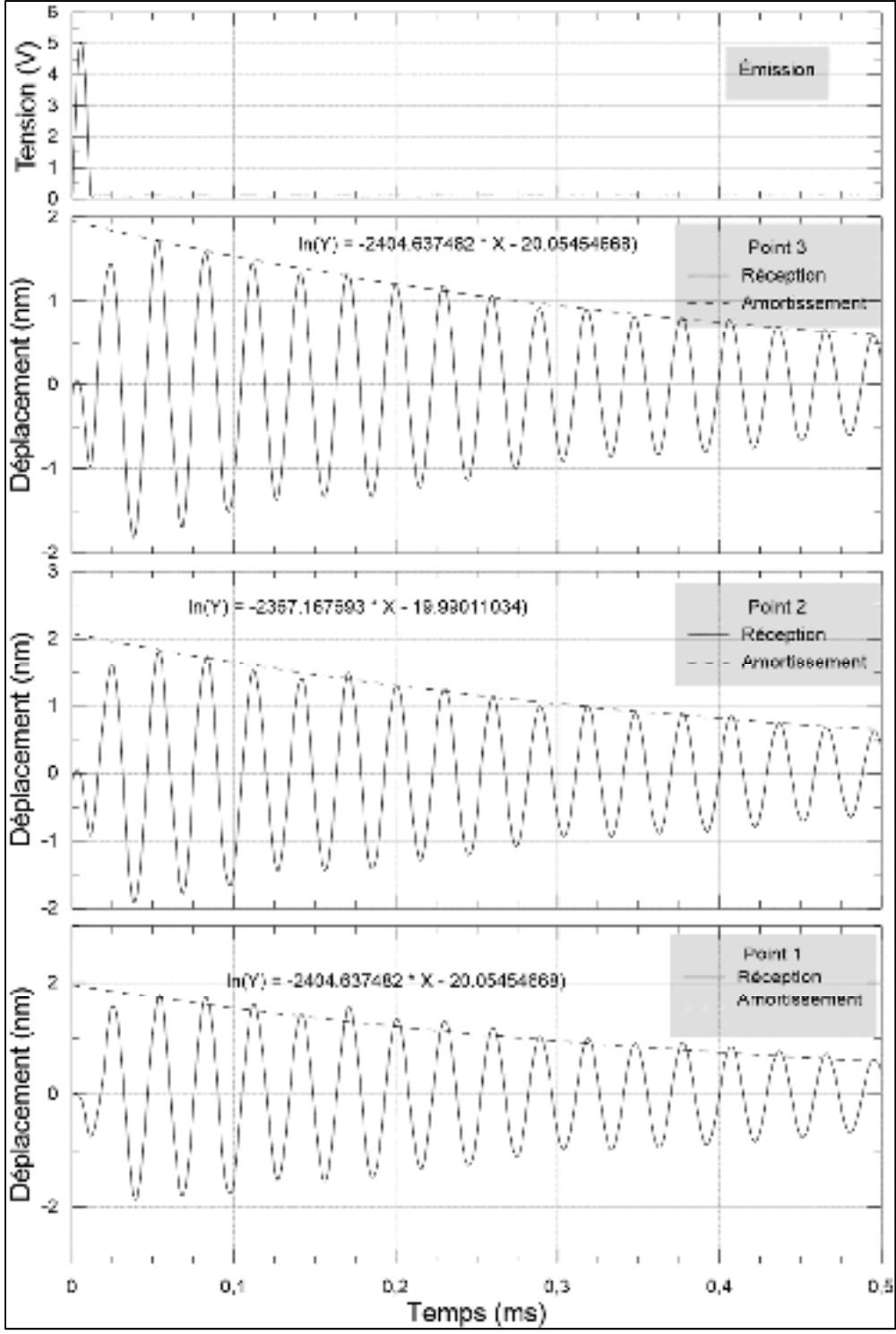


Figure-A III-6 Déplacement radial de l'anneau P-RAT Steminc avec une pierre poreuse centrale en croix lors d'une émission à 45 kHz (+)

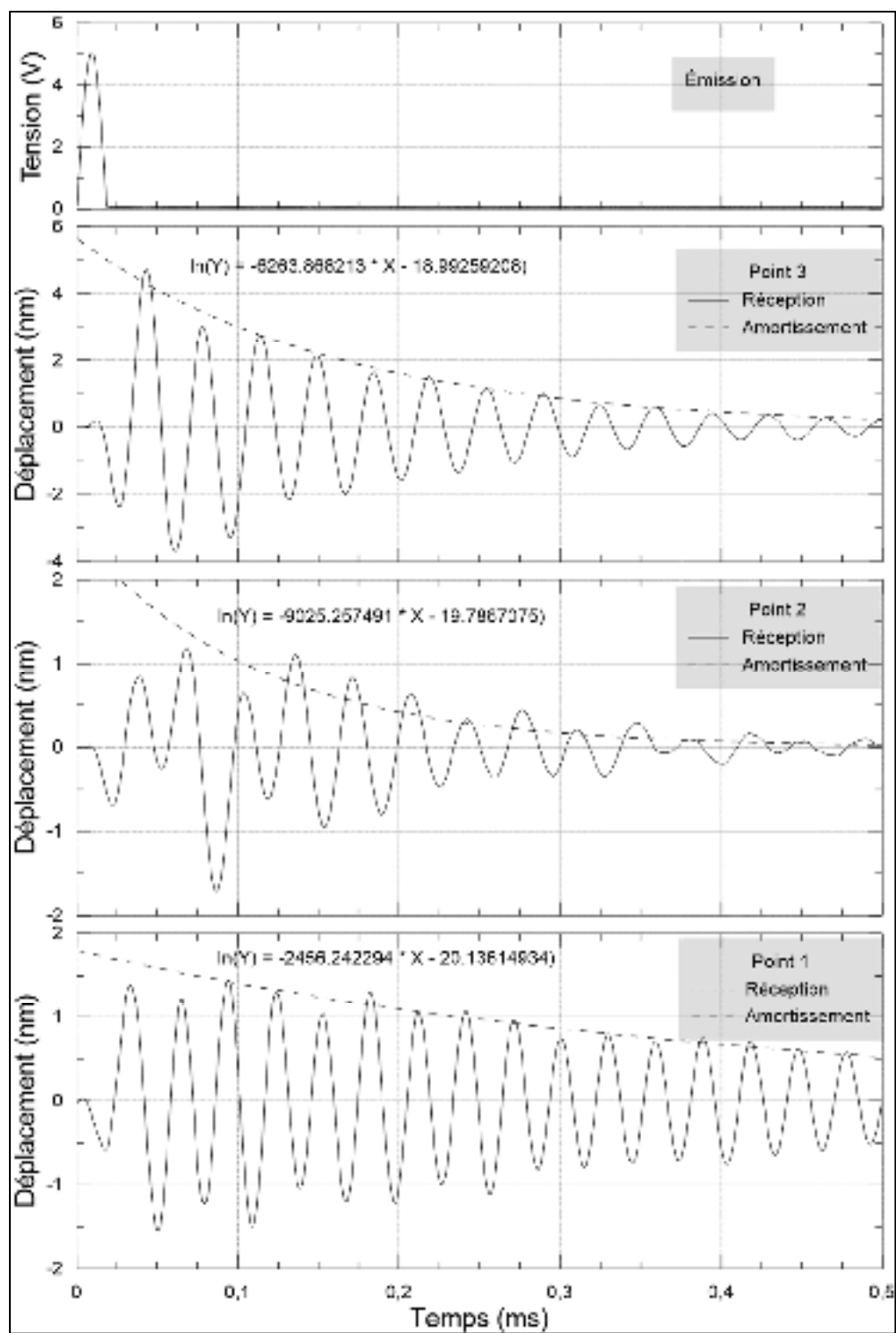


Figure-A III-7 Déplacement radial de l'anneau P-RAT Steminc avec une pierre poreuse centrale scindée en quatre morceaux lors d'une émission à 27 kHz (-)

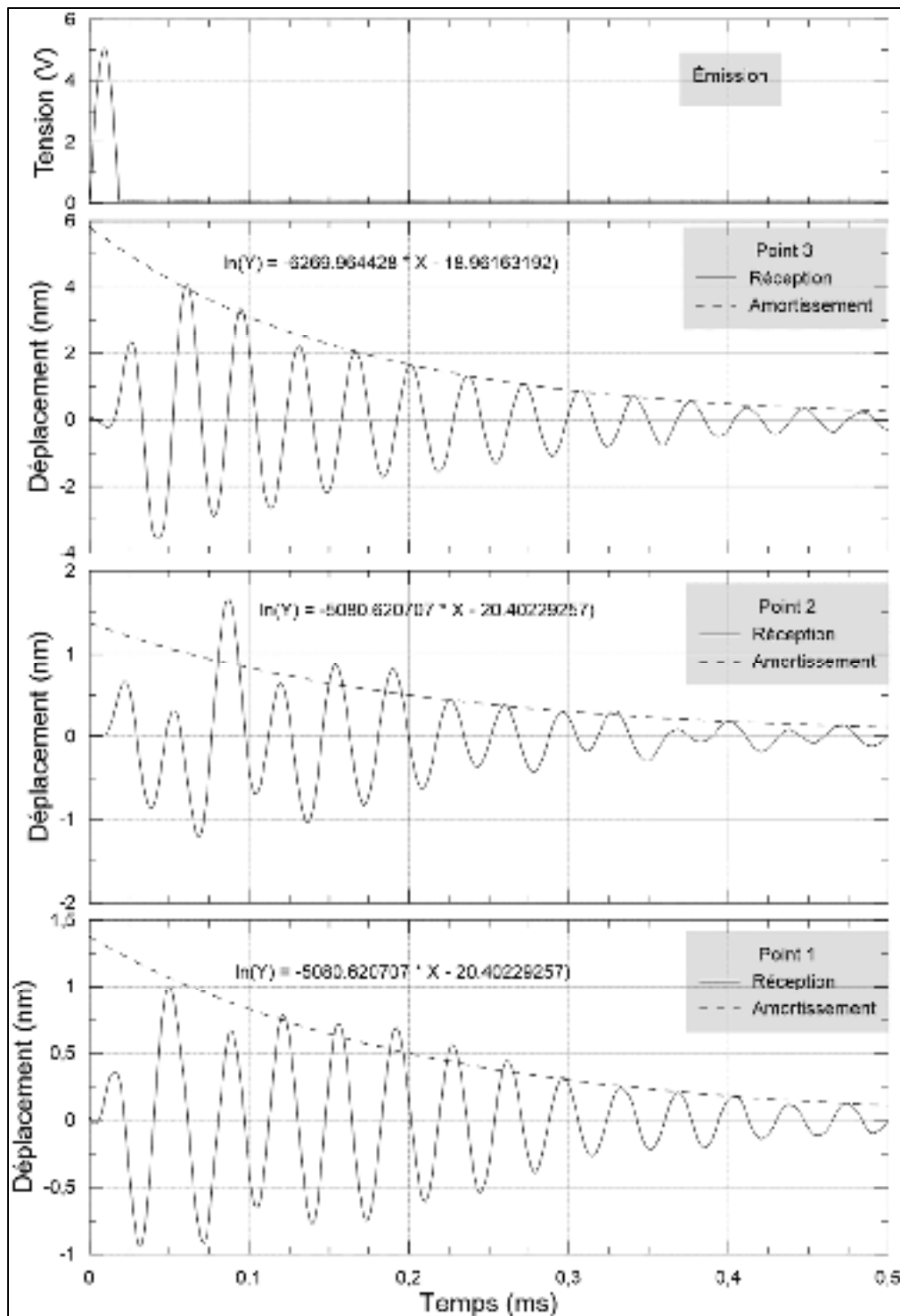


Figure-A III-8 Déplacement radial de l'anneau P-RAT Steminc avec une pierre poreuse centrale scindée en quatre morceaux lors d'une émission à 27 kHz (+)

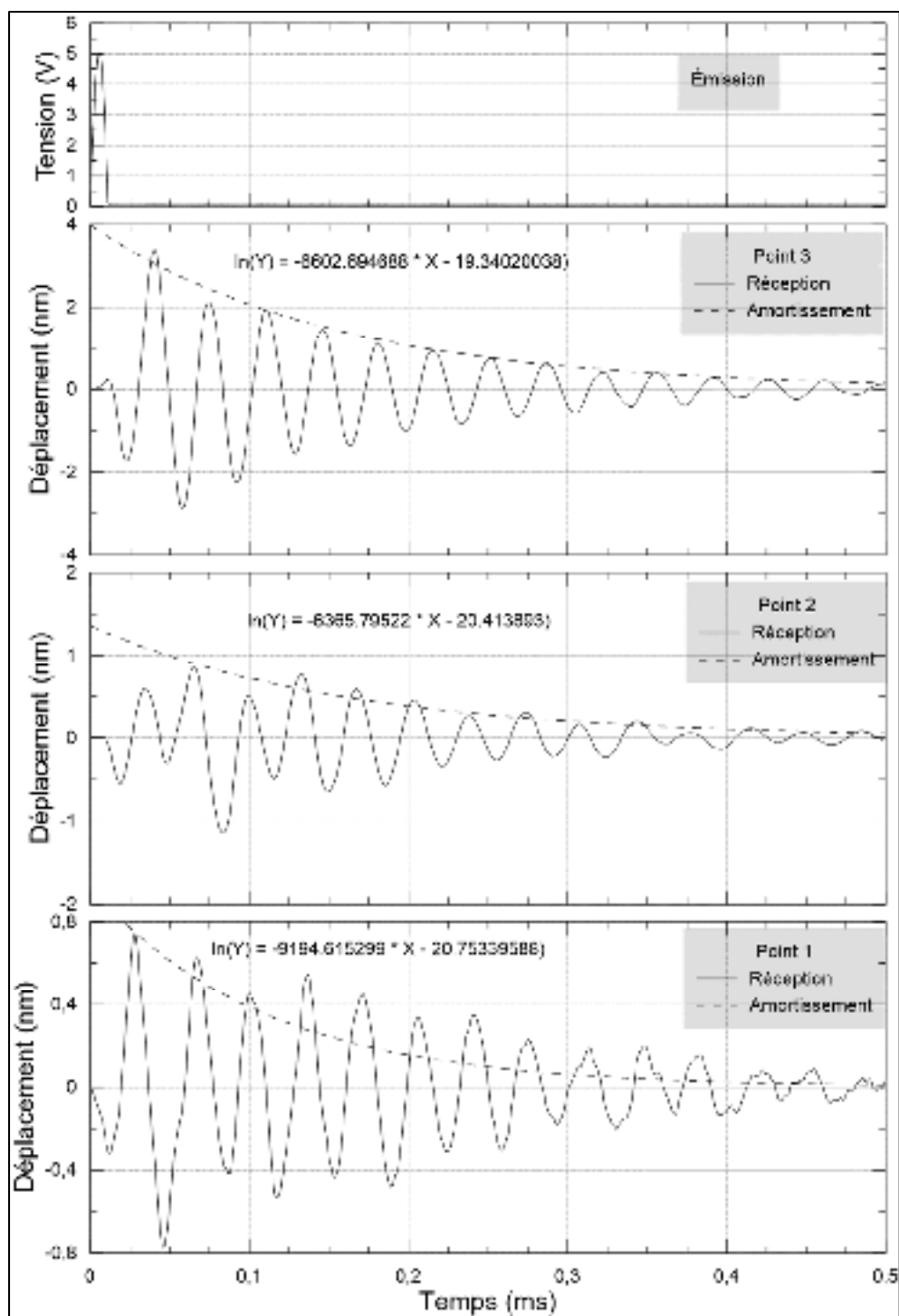


Figure-A III-9 Déplacement radial de l'anneau P-RAT Steminc avec une pierre poreuse centrale scindée en quatre morceaux lors d'une émission à 45 kHz (-)

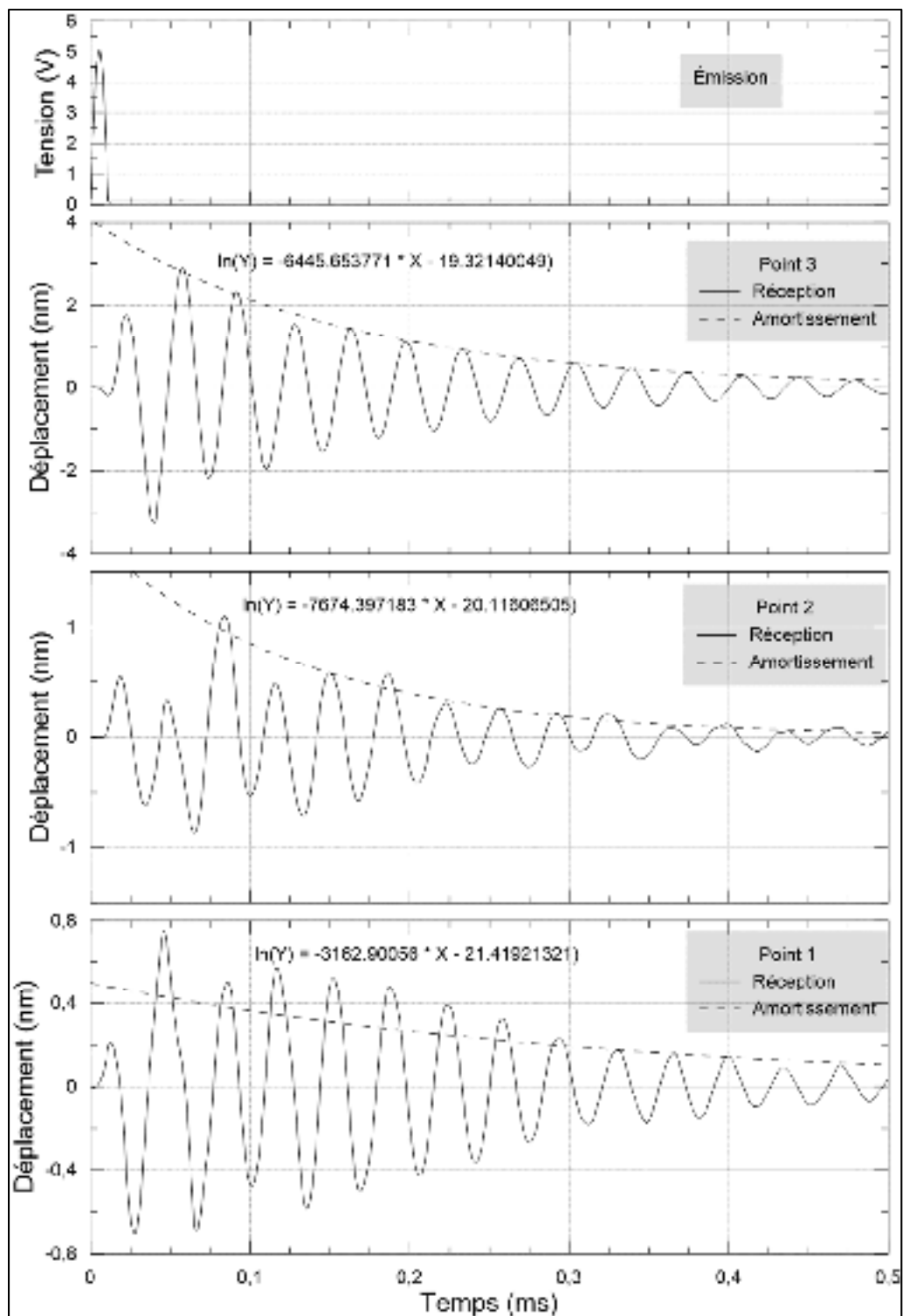


Figure-A III-10 Déplacement radial de l'anneau P-RAT Steminc avec une pierre poreuse centrale scindée en quatre morceaux lors d'une émission à 45 kHz (+)

### Déplacement longitudinal de l'anneau P-RAT avec une pierre poreuse centrale en croix et scindée en quatre morceaux

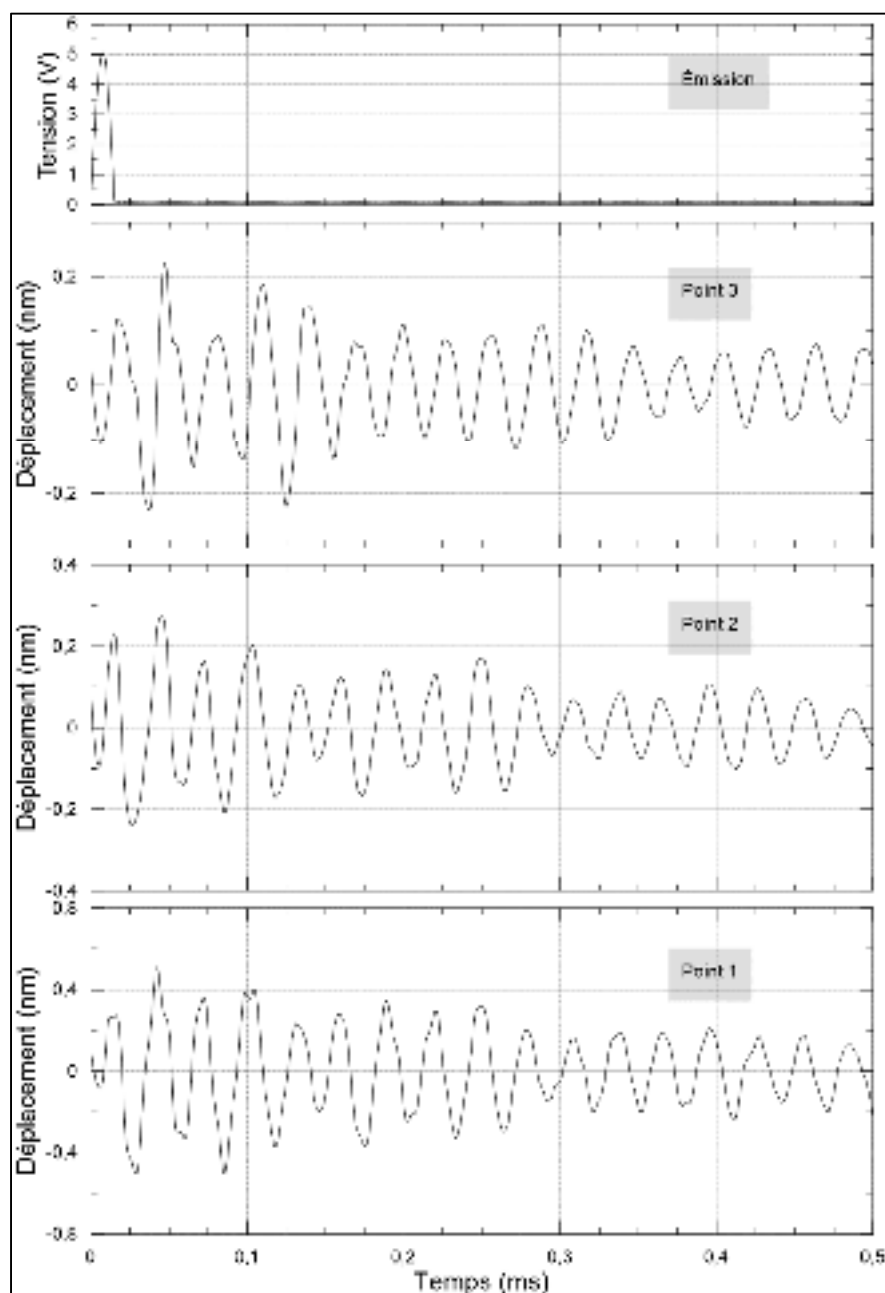


Figure-A III-11 Déplacement longitudinal de l'anneau P-RAT Steminc avec une pierre poreuse centrale en croix lors d'une émission à 33 kHz (-)

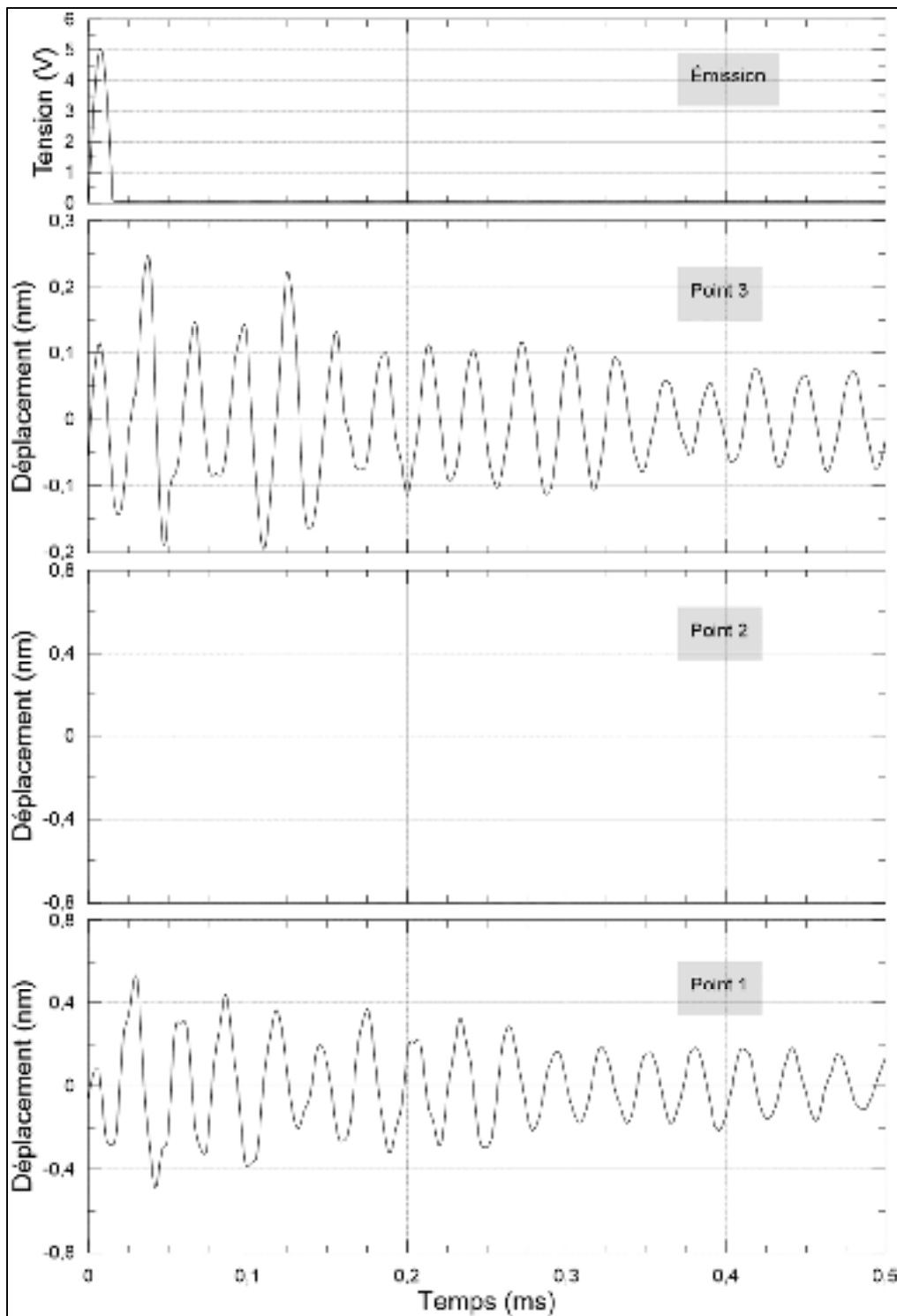


Figure-A III-12 Déplacement longitudinal de l'anneau P-RAT Steminc avec une pierre poreuse centrale en croix lors d'une émission à 33 kHz (+)



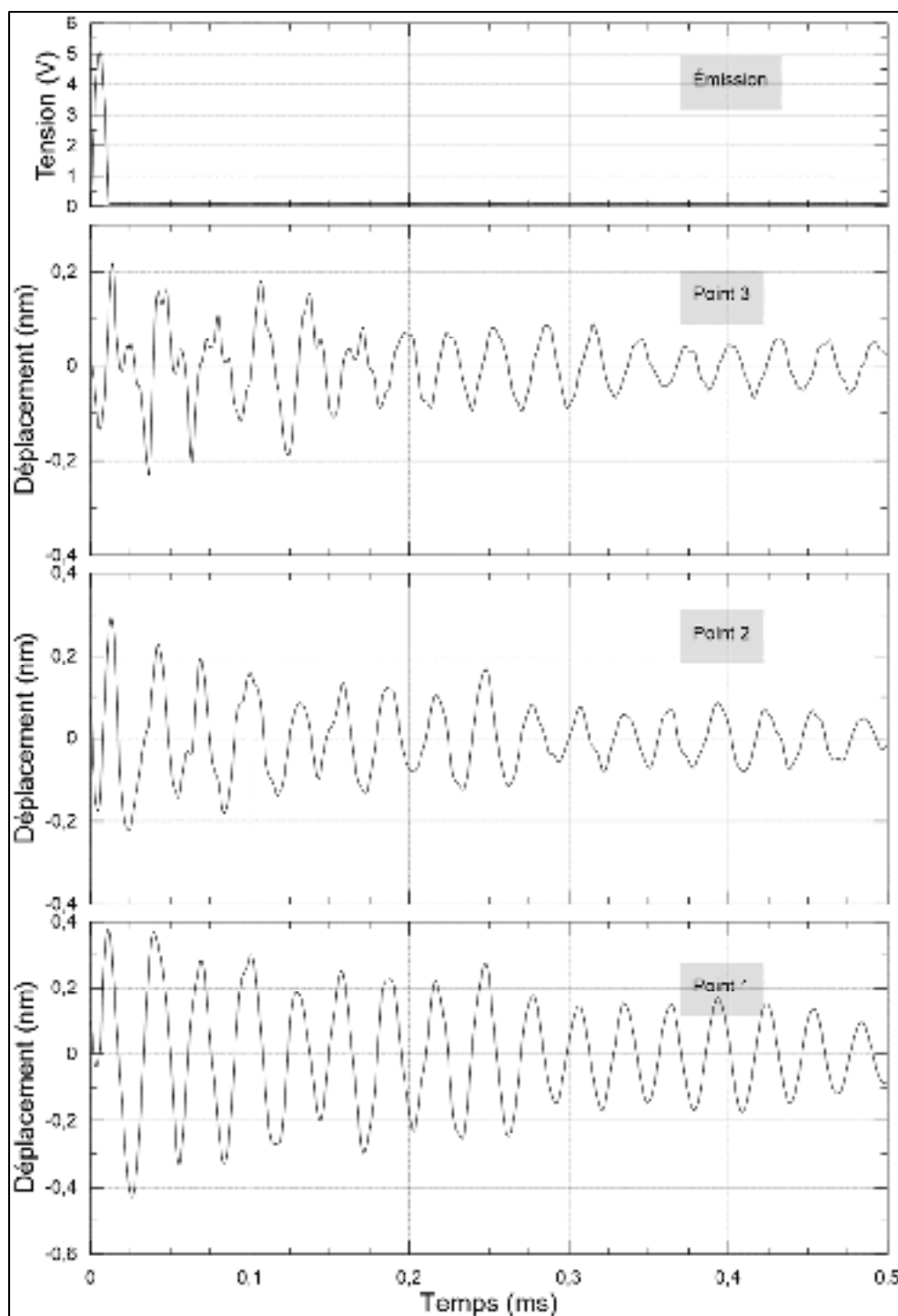


Figure-A III-13 Déplacement longitudinal de l'anneau P-RAT Steminc avec une pierre poreuse centrale en croix lors d'une émission à 45 kHz (-)

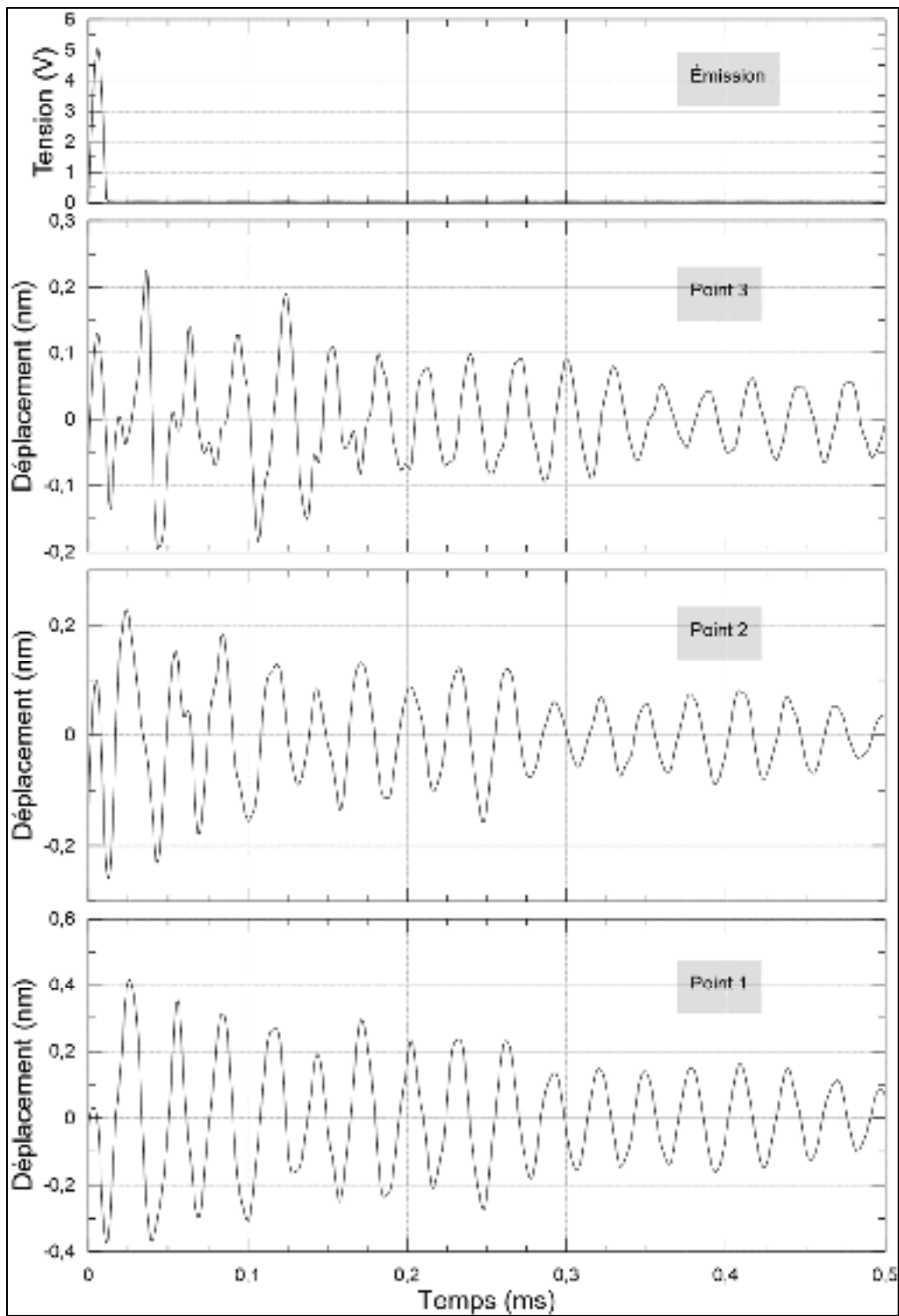


Figure-A III-14 Déplacement longitudinal de l'anneau P-RAT Steminc avec une pierre poreuse centrale en croix lors d'une émission à 45 kHz (+)

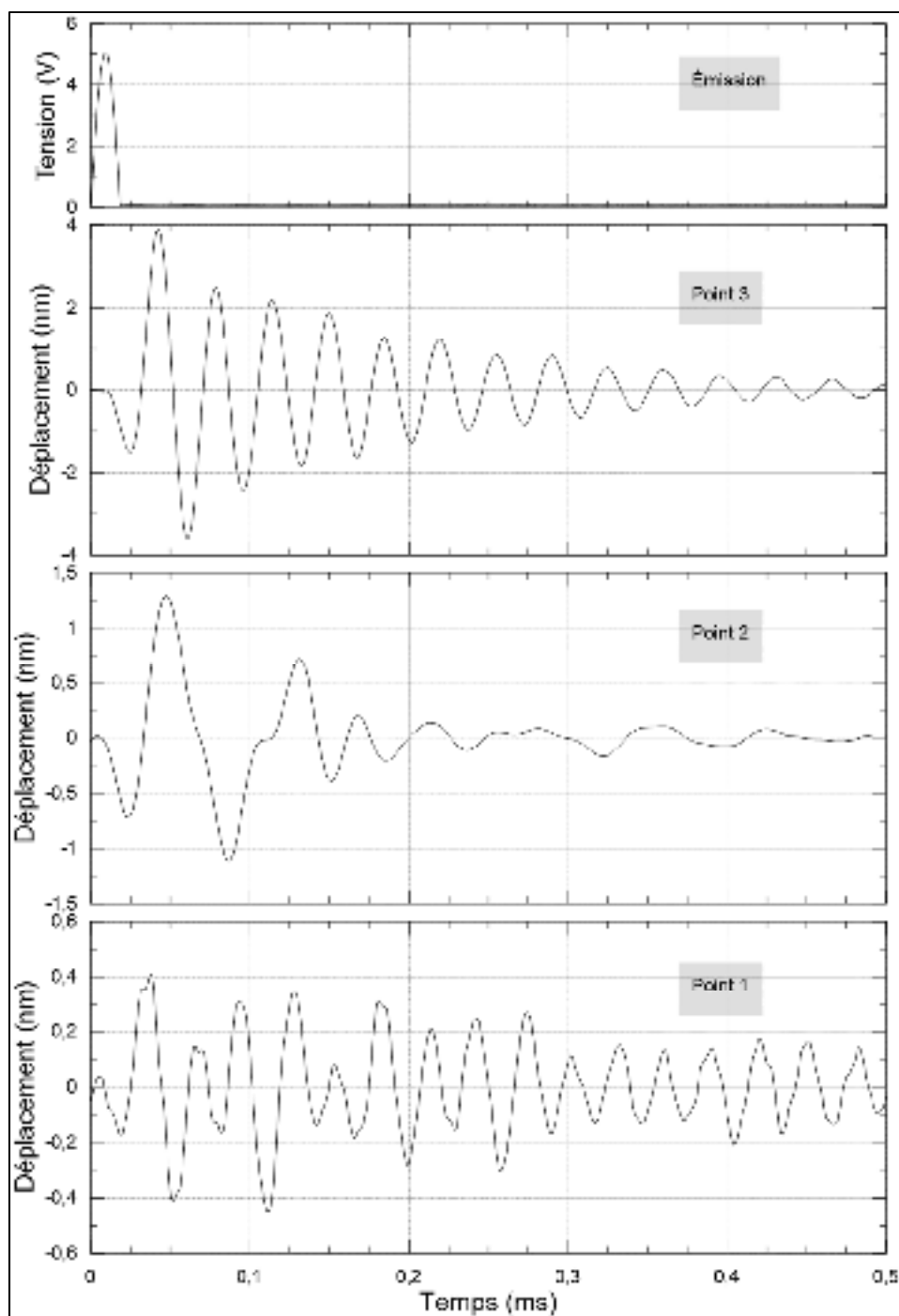


Figure-A III-15 Déplacement longitudinal de l'anneau P-RAT Steminc avec une pierre poreuse centrale scindée en quatre morceaux lors d'une émission à 27 kHz (-)

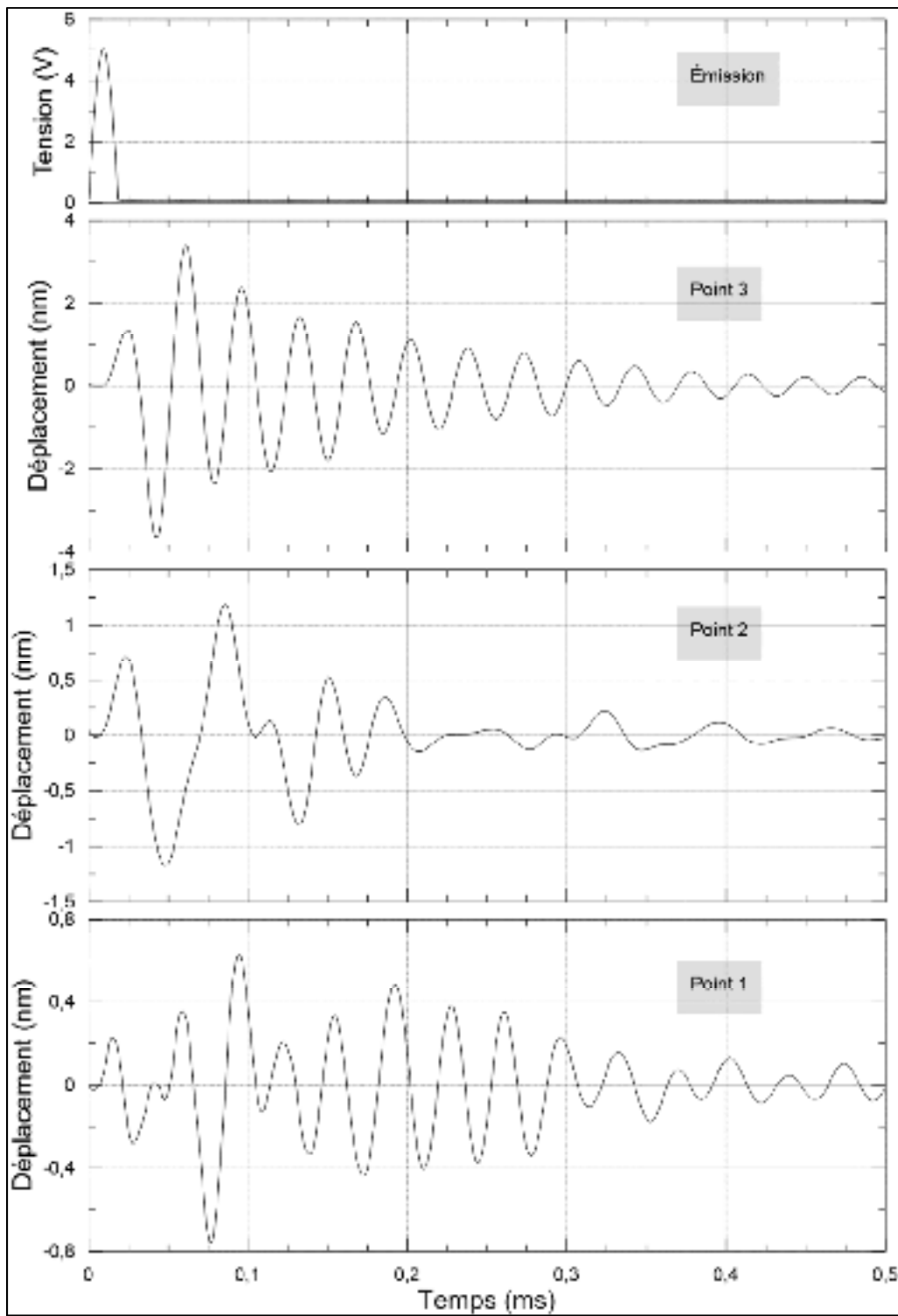


Figure-A III-16 Déplacement longitudinal de l'anneau P-RAT Steminc avec une pierre poreuse centrale scindée en quatre morceaux lors d'une émission à 27 kHz (+)

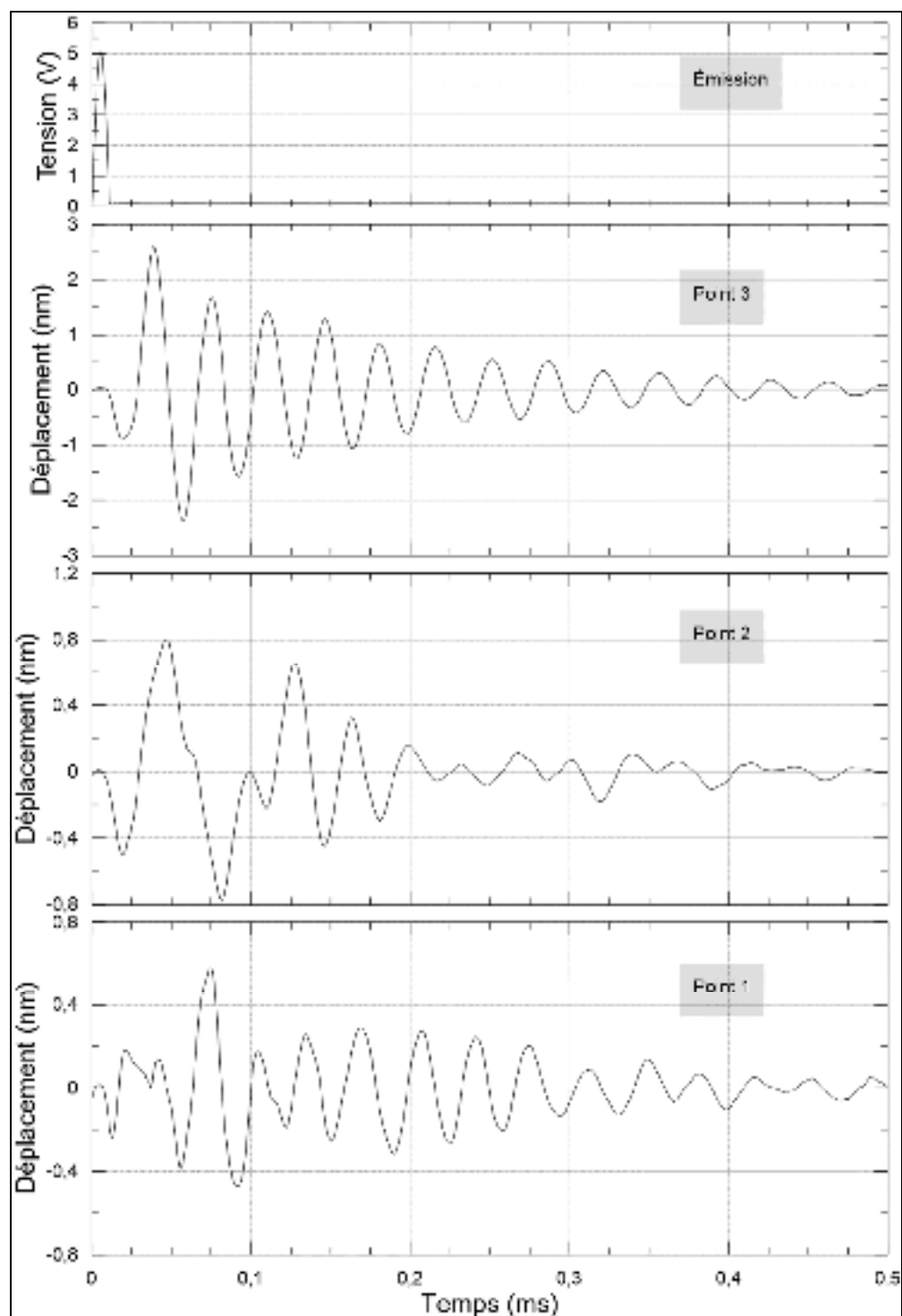


Figure-A III-17 Déplacement longitudinal de l'anneau P-RAT Steminc avec une pierre poreuse centrale scindée en quatre morceaux lors d'une émission à 45 kHz (-)

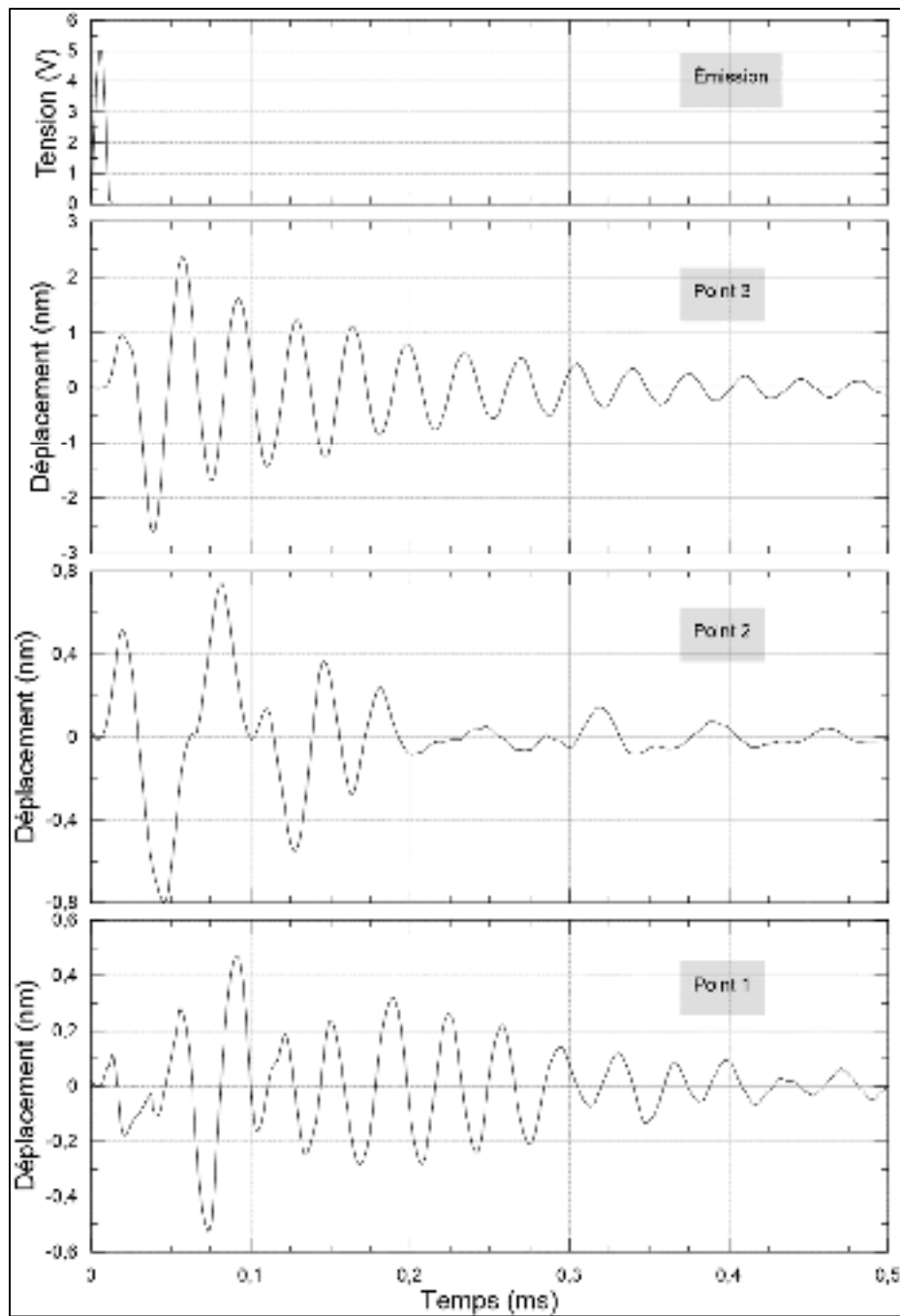


Figure-A III-18 Déplacement longitudinal de l'anneau P-RAT Steminc avec une pierre poreuse centrale scindée en quatre morceaux lors d'une émission à 45 kHz (+)

## ANNEXE IV

### RÉSULTATS DE LA GRANULOMÉTRIE DES PARTICULES FINES

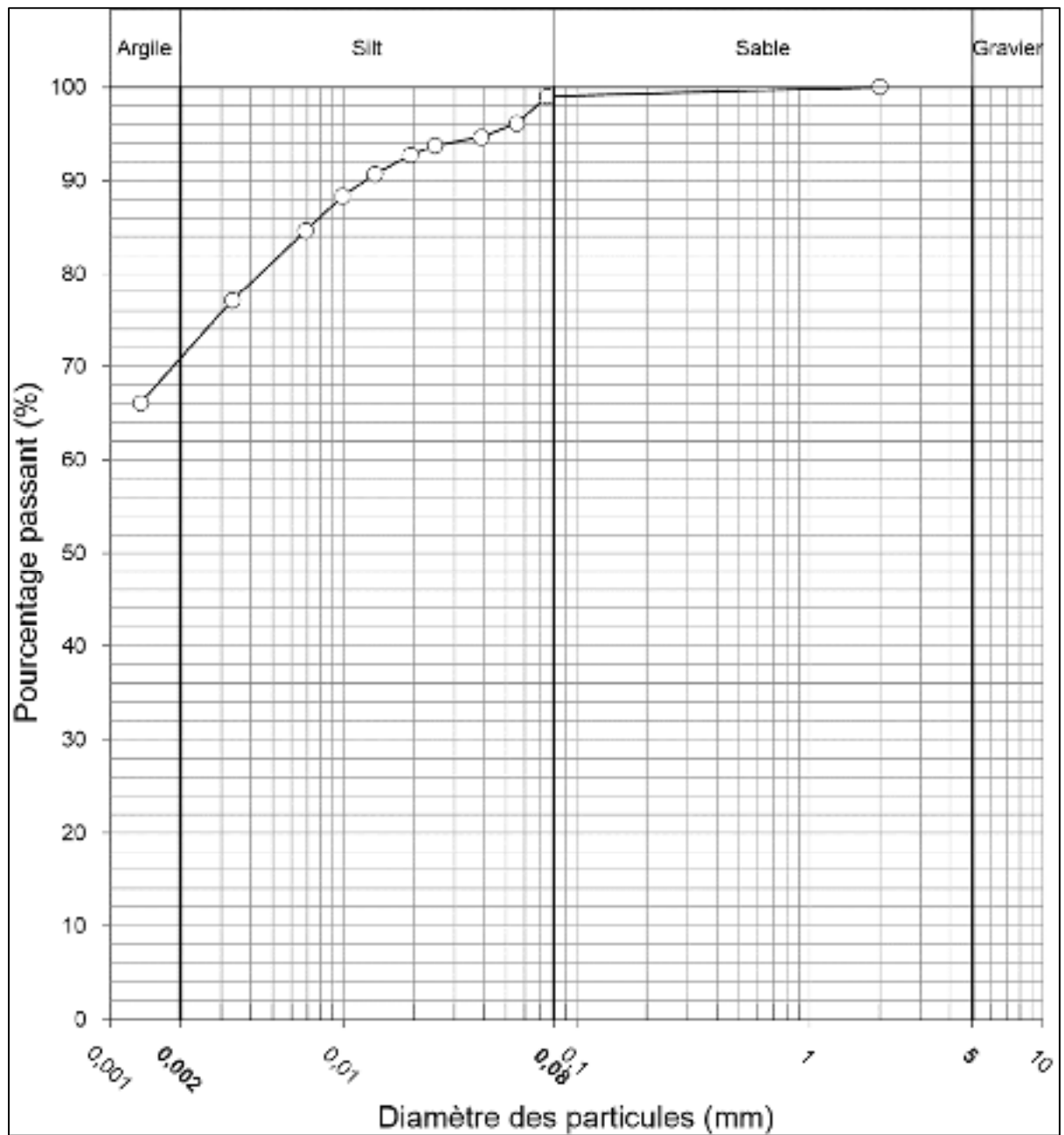


Figure-A IV-1 Granulométrie des particules fines de l'échantillon GD10-Base2

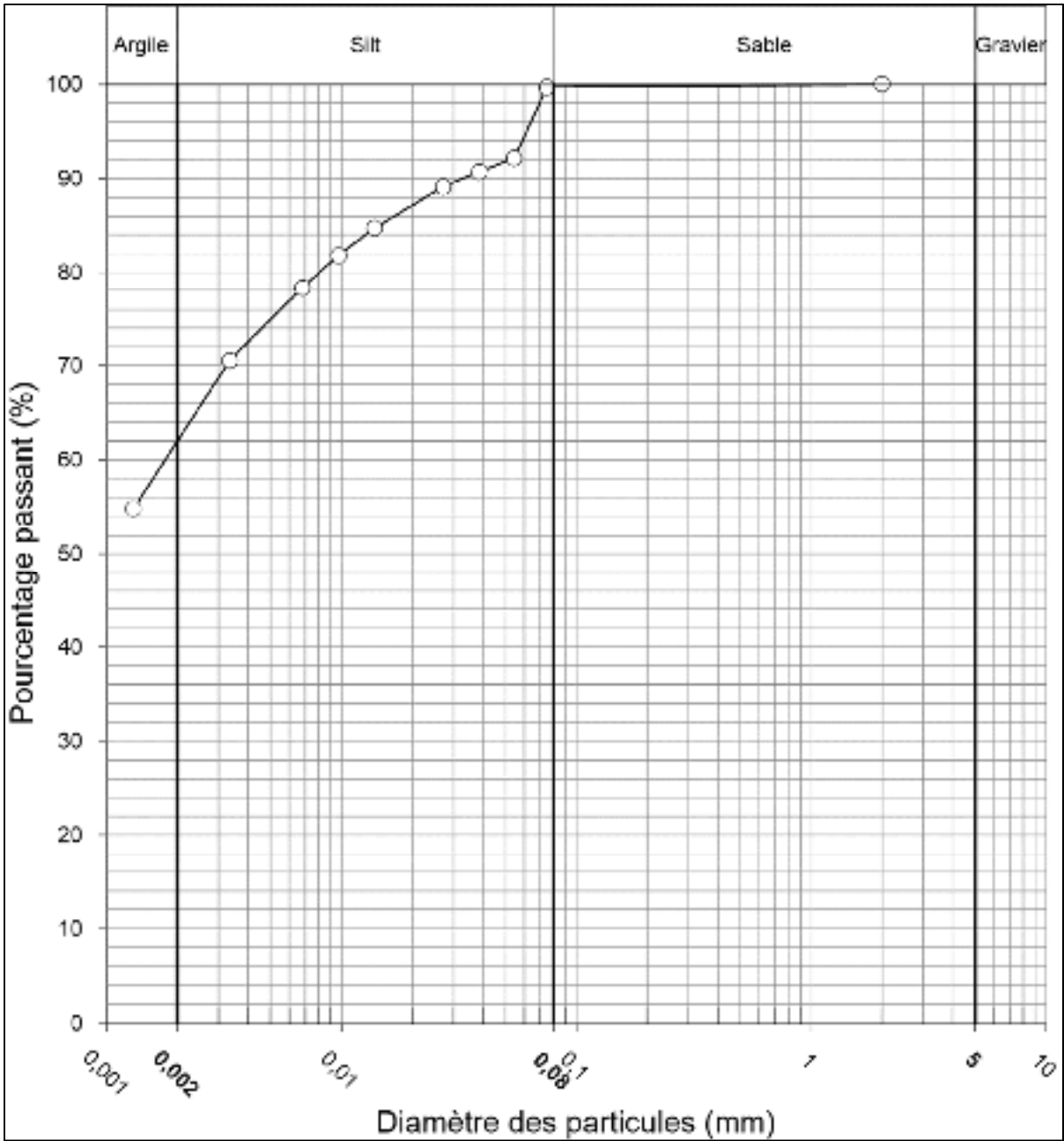


Figure-A IV-2 Granulométrie des particules fines de l'échantillon GD10-Milieu



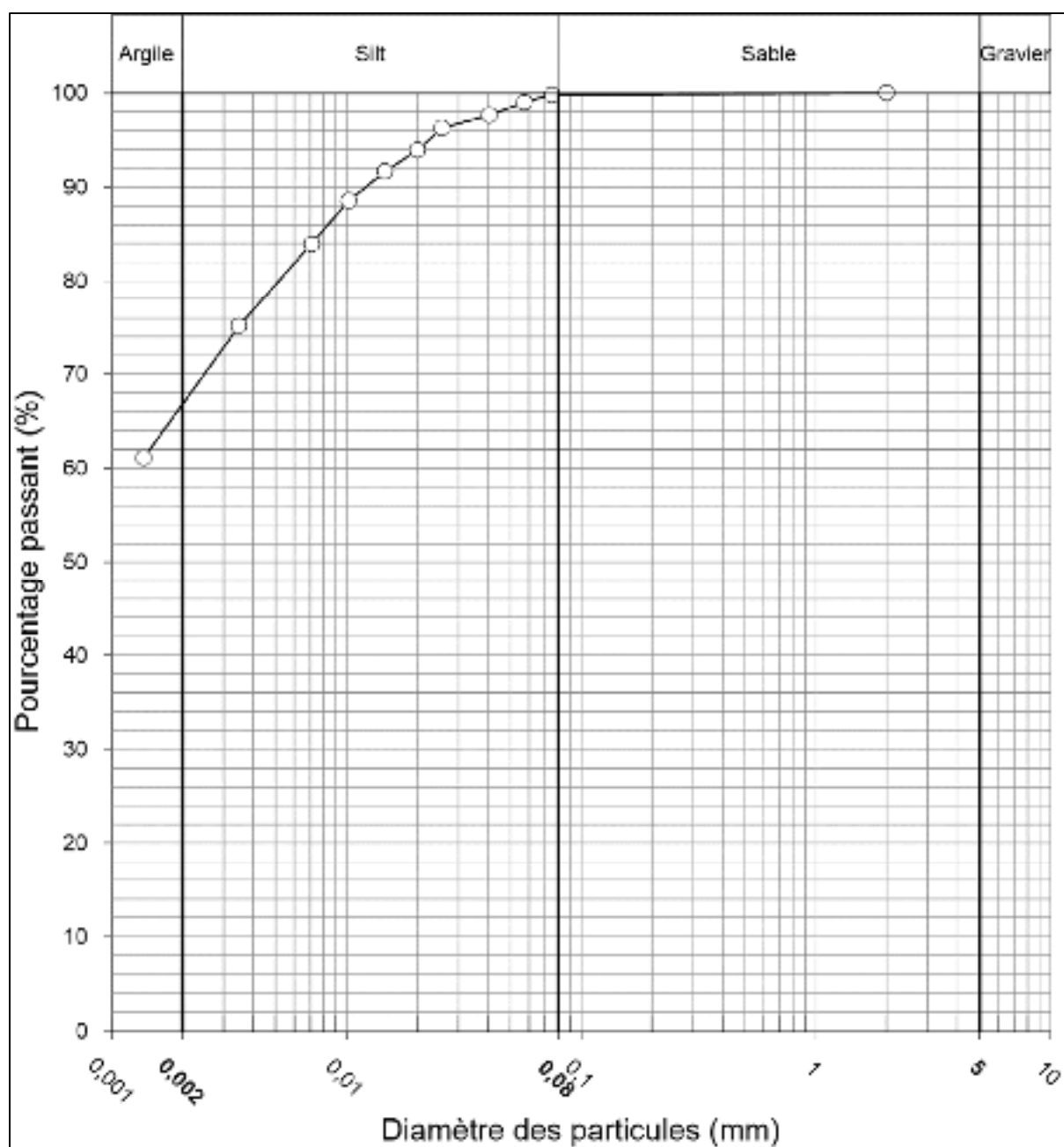


Figure-A IV-3 Granulométrie des particules fines de l'échantillon TM12

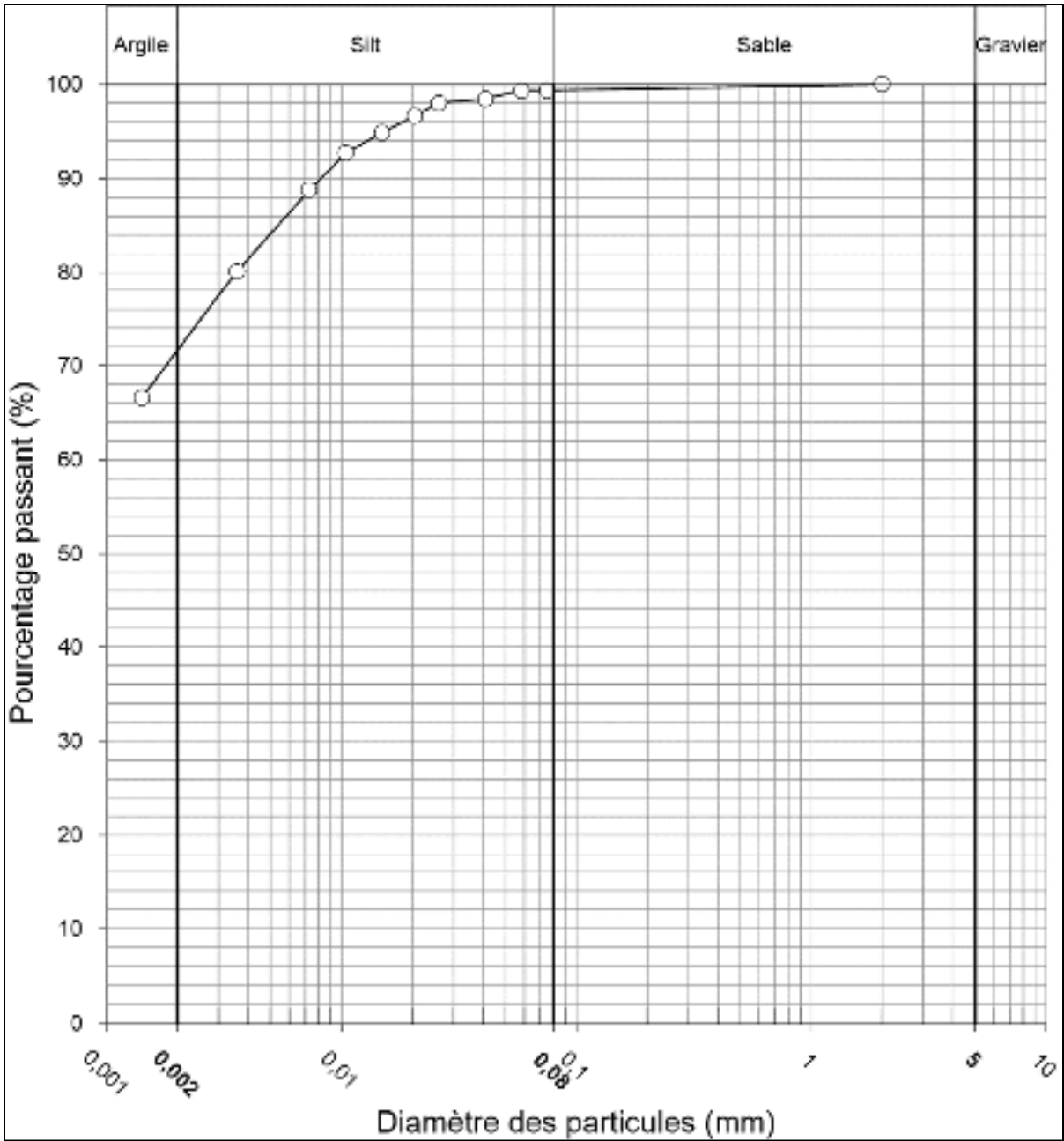


Figure-A IV-4 Granulométrie des particules fines de l'échantillon TM17

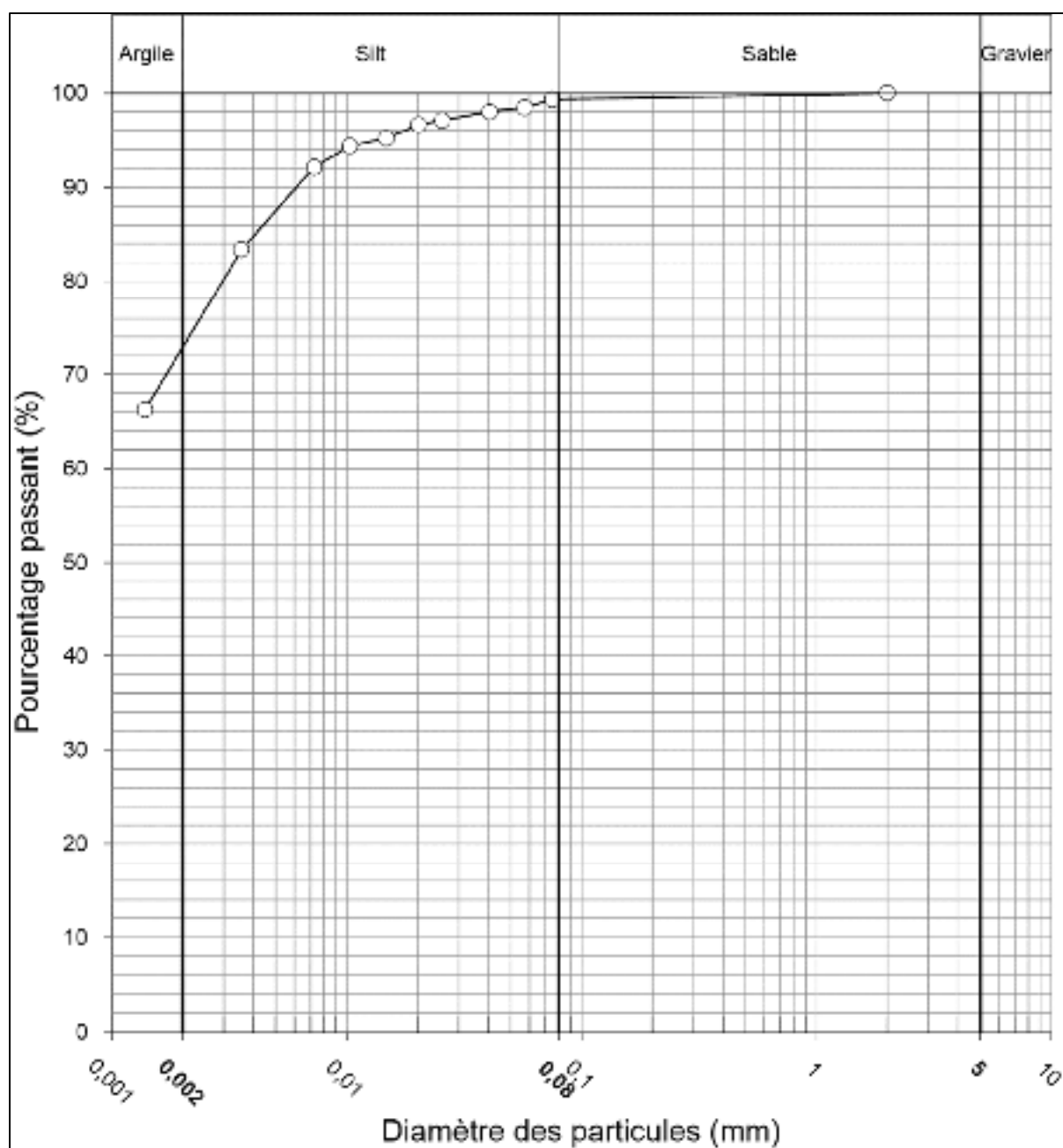


Figure-A IV-5 Granulométrie des particules fines de l'échantillon TM29

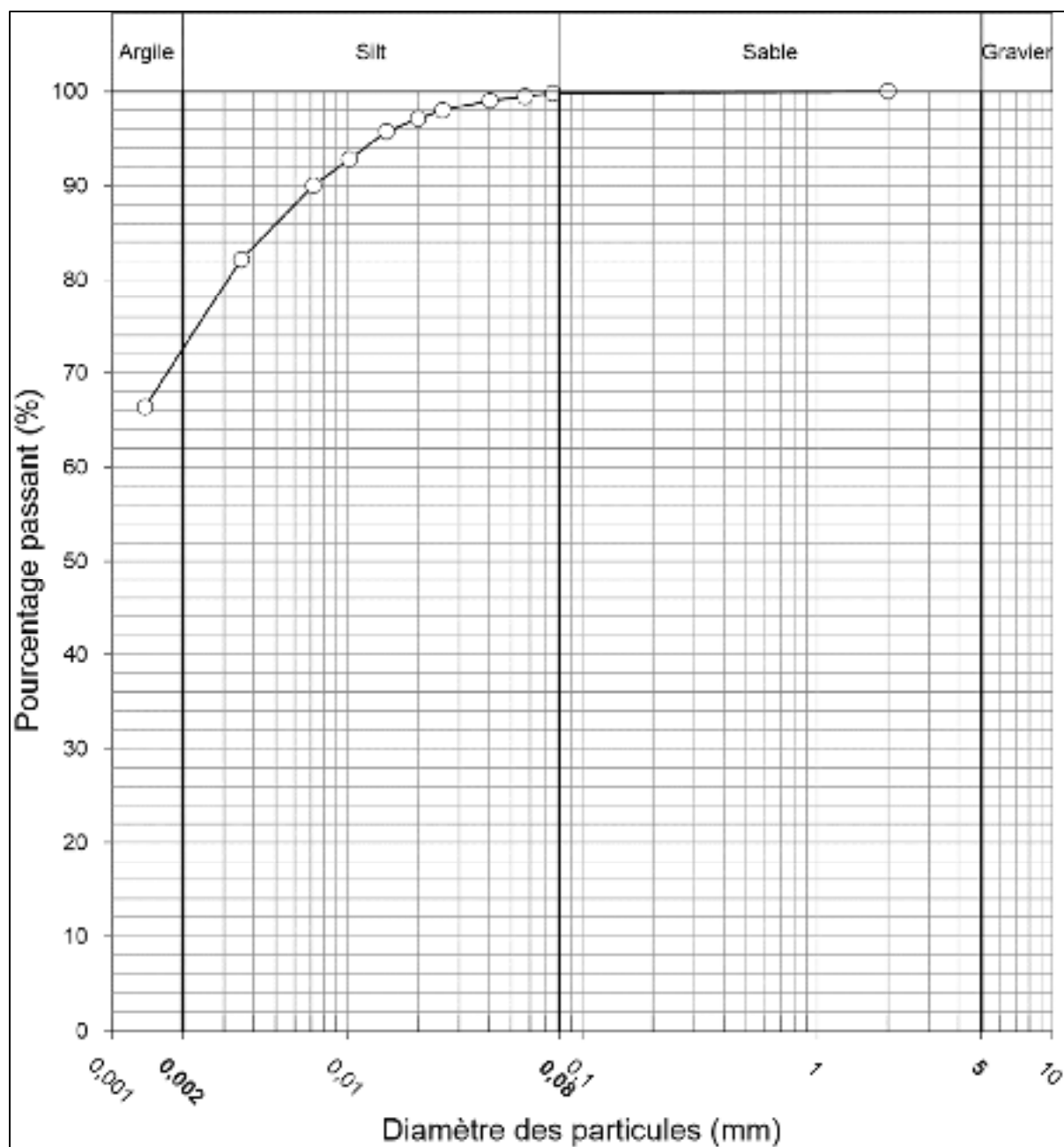


Figure-A IV-6 Granulométrie des particules fines de l'échantillon MT02

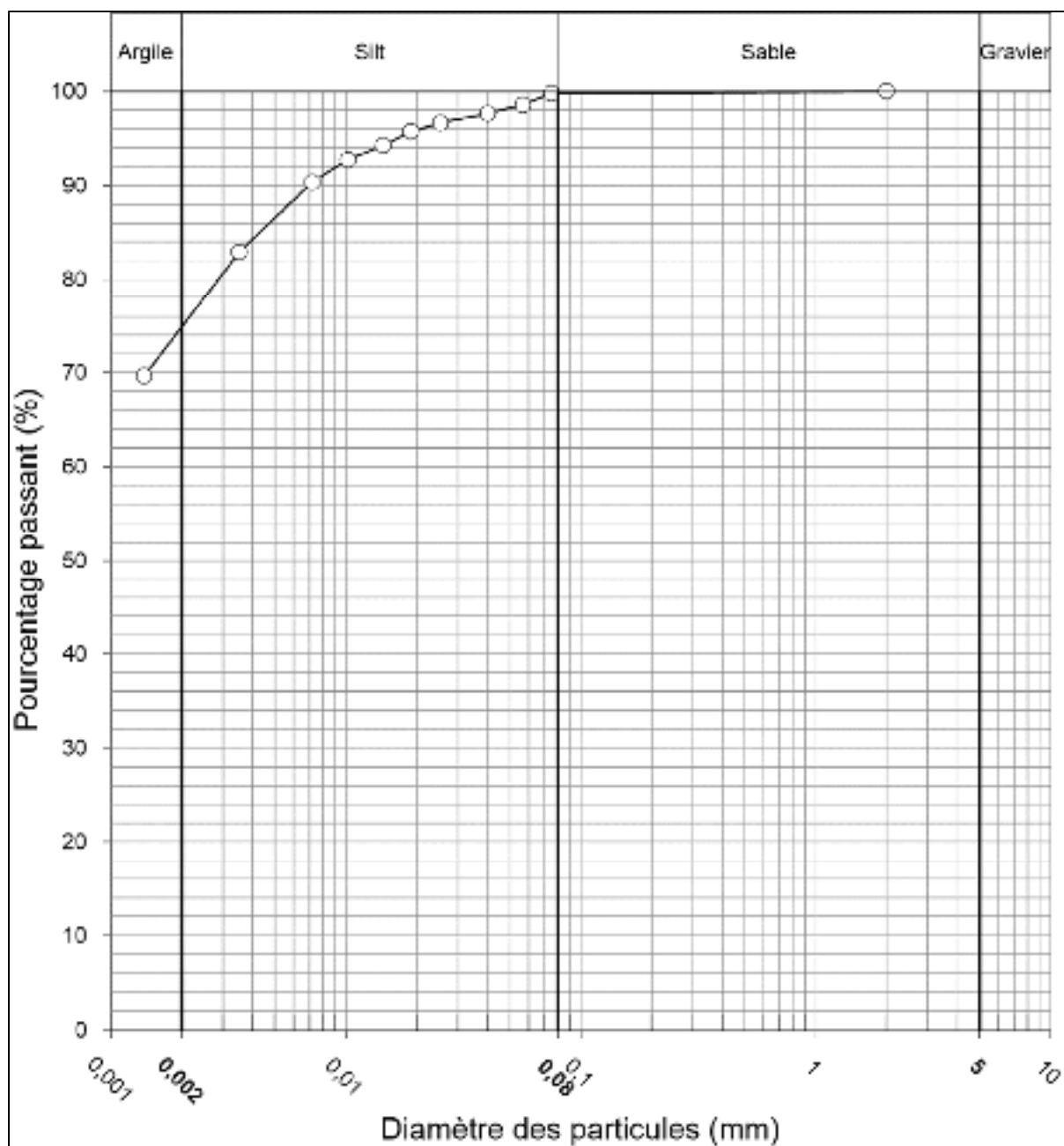


Figure-A IV-7 Granulométrie des particules fines de l'échantillon PS3

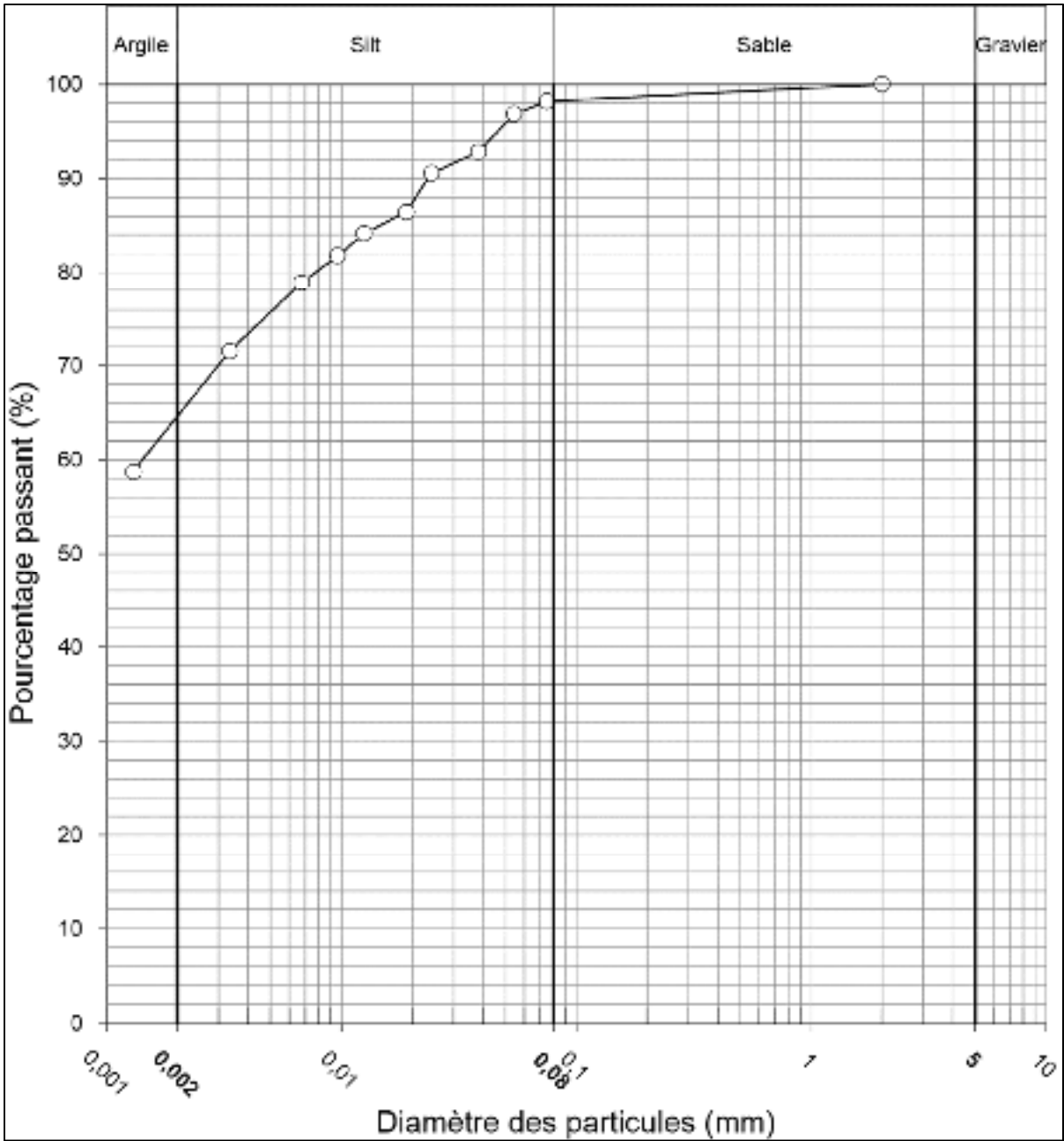


Figure-A IV-8 Granulométrie des particules fines de l'échantillon SCB2

## ANNEXE V

### RÉSULTATS INDIVIDUELS DE $V_{s1}/OCR^K$

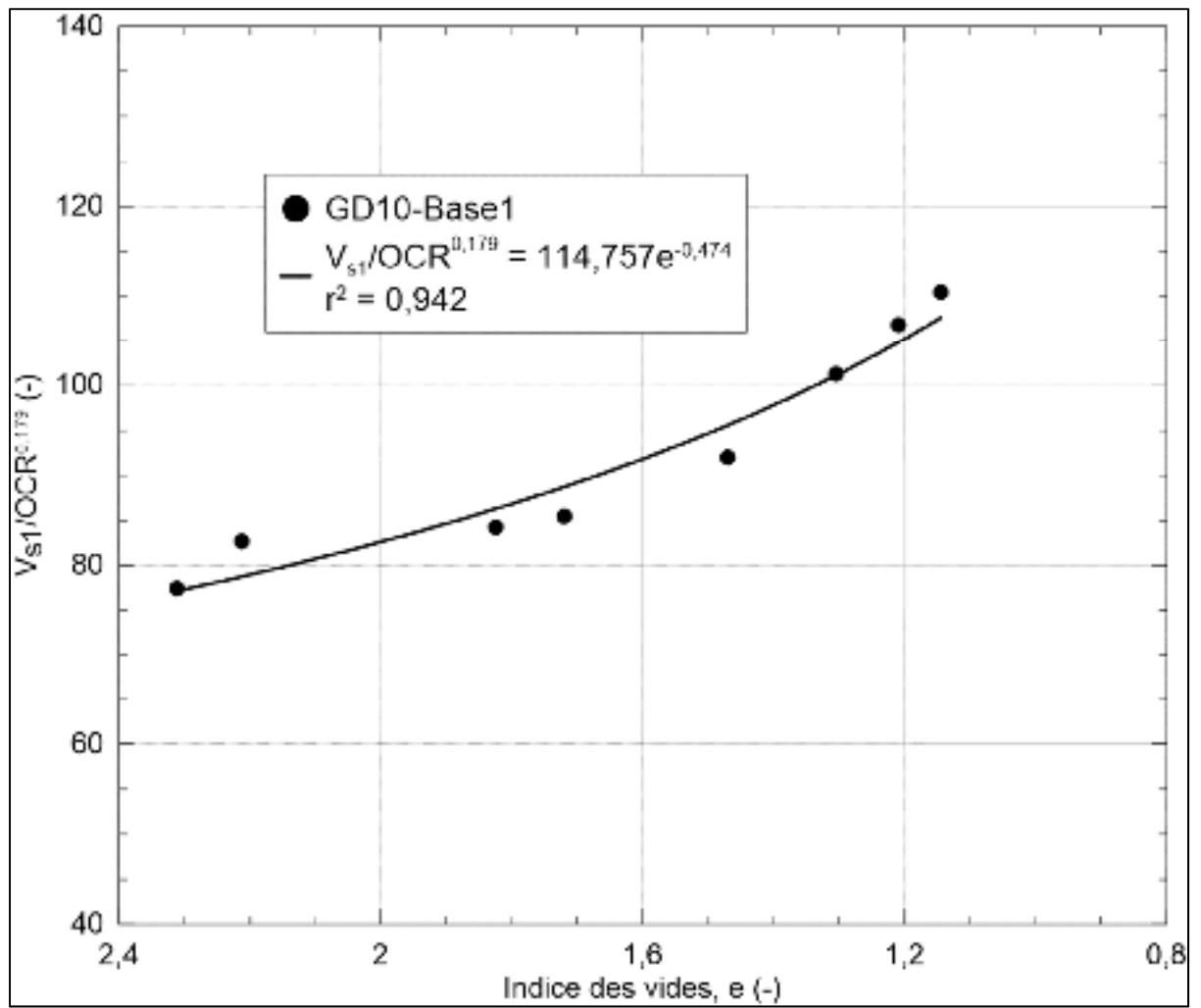


Figure A- V-1  $V_{s1}/OCR^K$  en fonction de l'indice des vides pour l'échantillon GD10-Base1

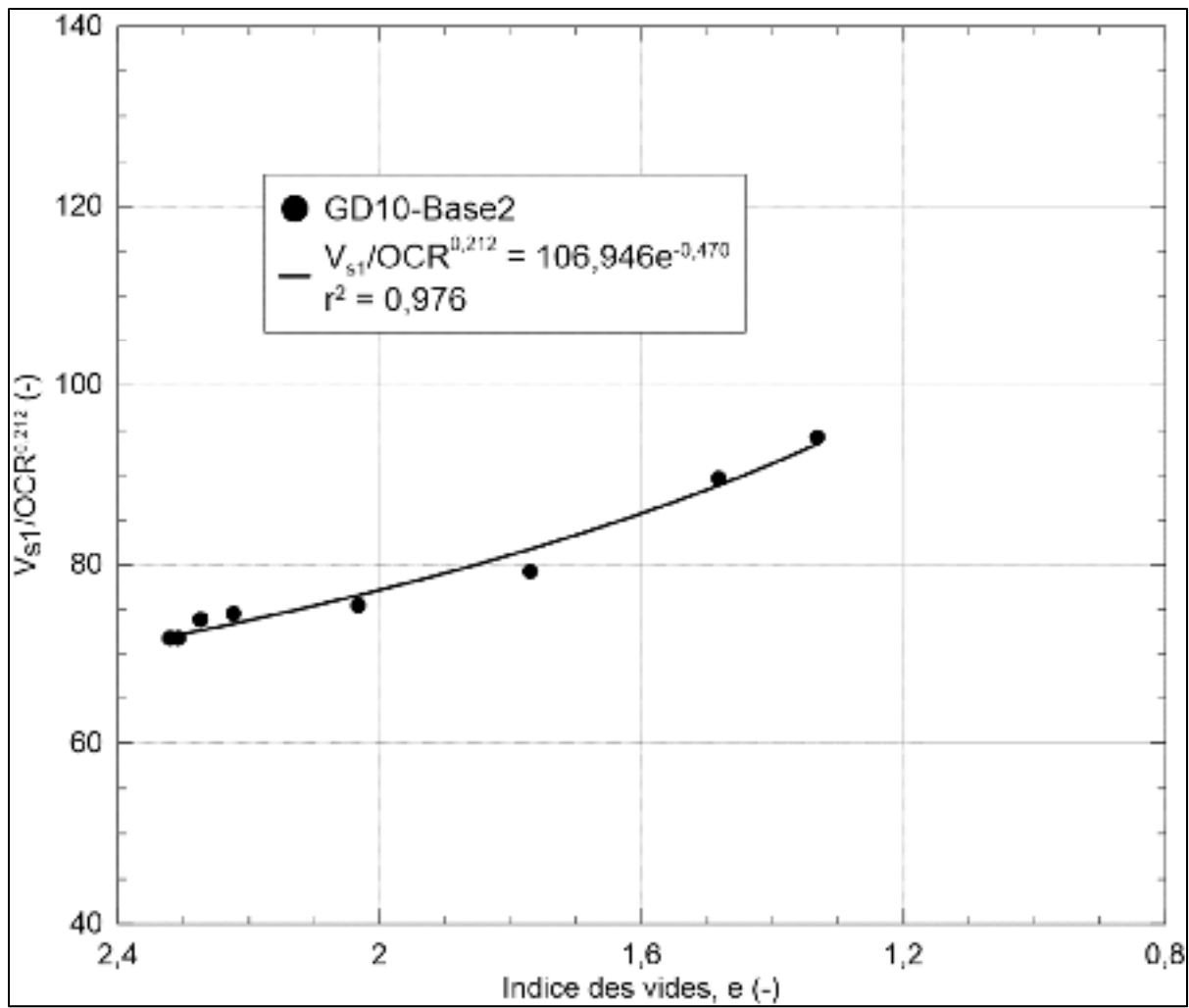


Figure A- V-2  $V_{s1}/OCR^K$  en fonction de l'indice des vides pour l'échantillon GD10-Base2



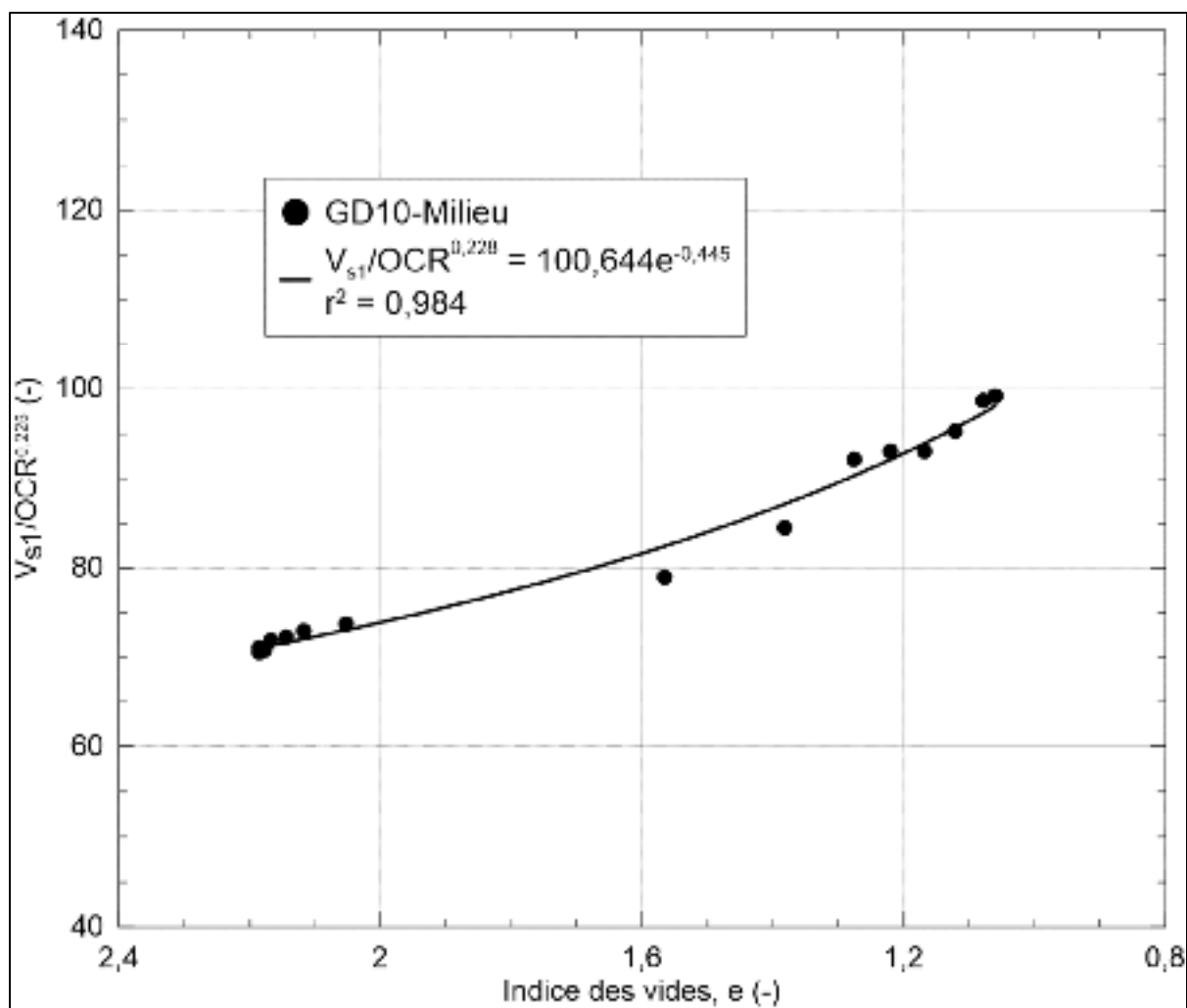


Figure A- V-3  $V_{s1}/OCR^K$  en fonction de l'indice des vides pour l'échantillon GD10-Milieu

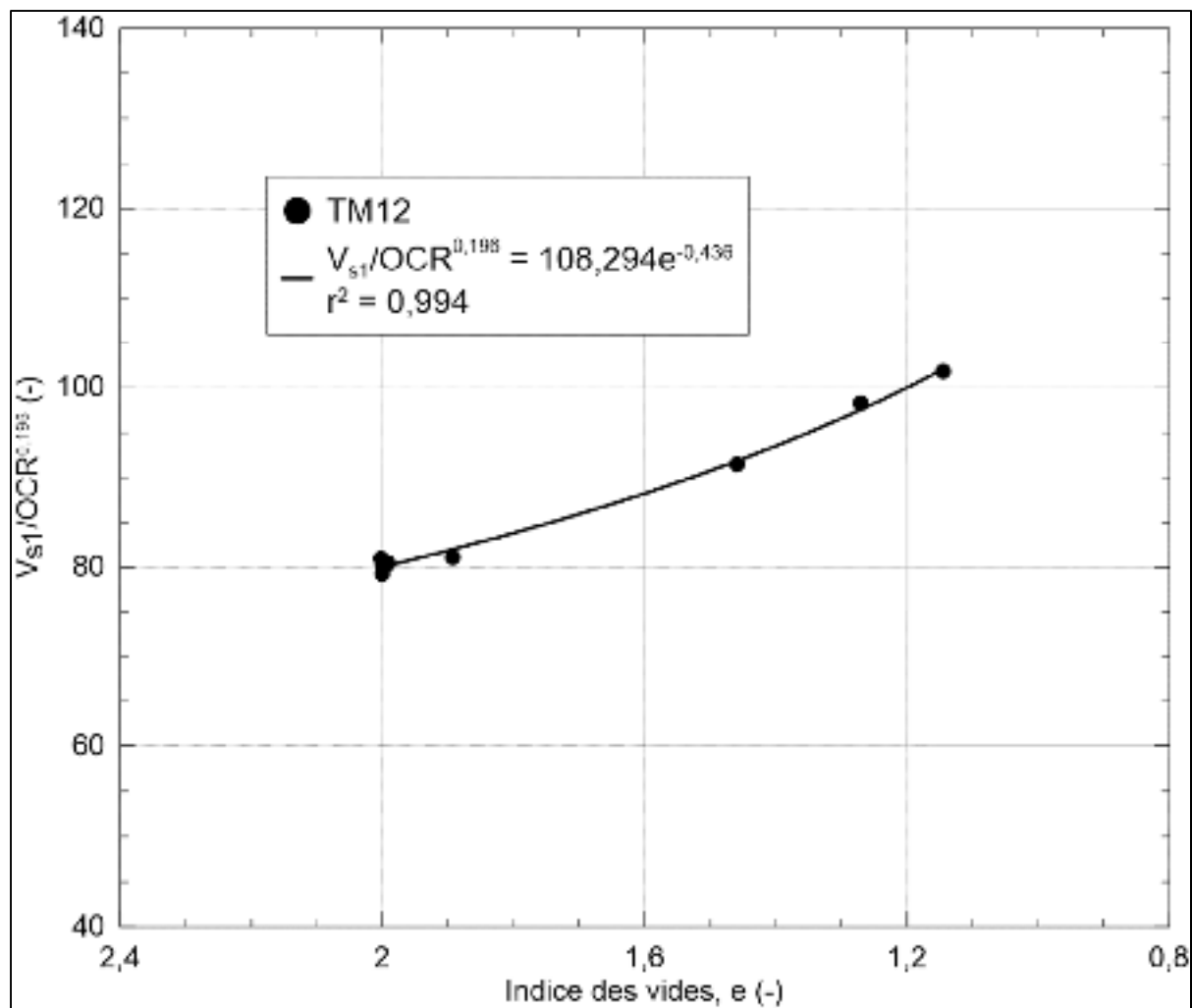


Figure A- V-4  $V_{st}/OCR^K$  en fonction de l'indice des vides pour l'échantillon TM12

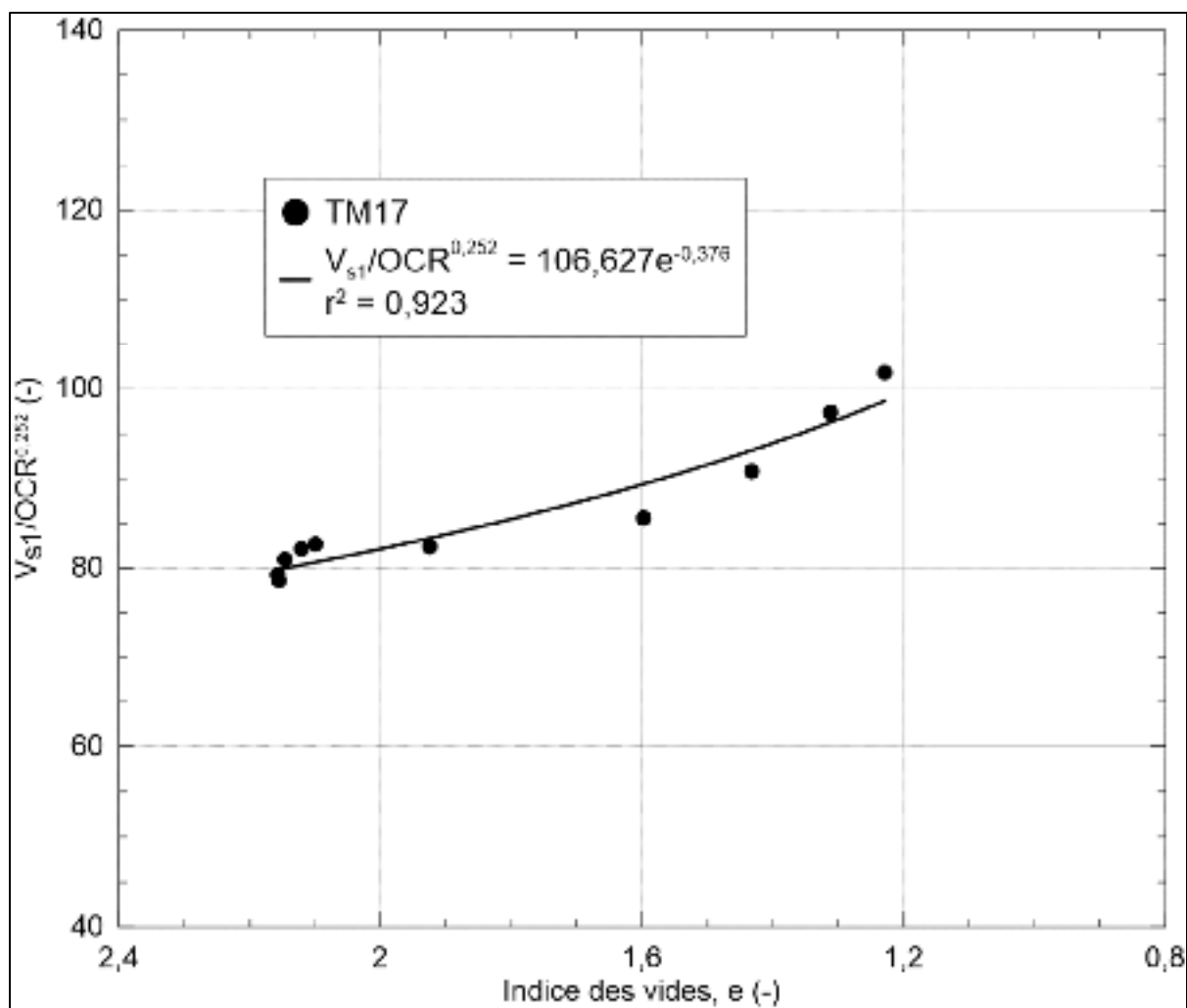


Figure A- V-5  $V_{st}/OCR^K$  en fonction de l'indice des vides pour l'échantillon TM17

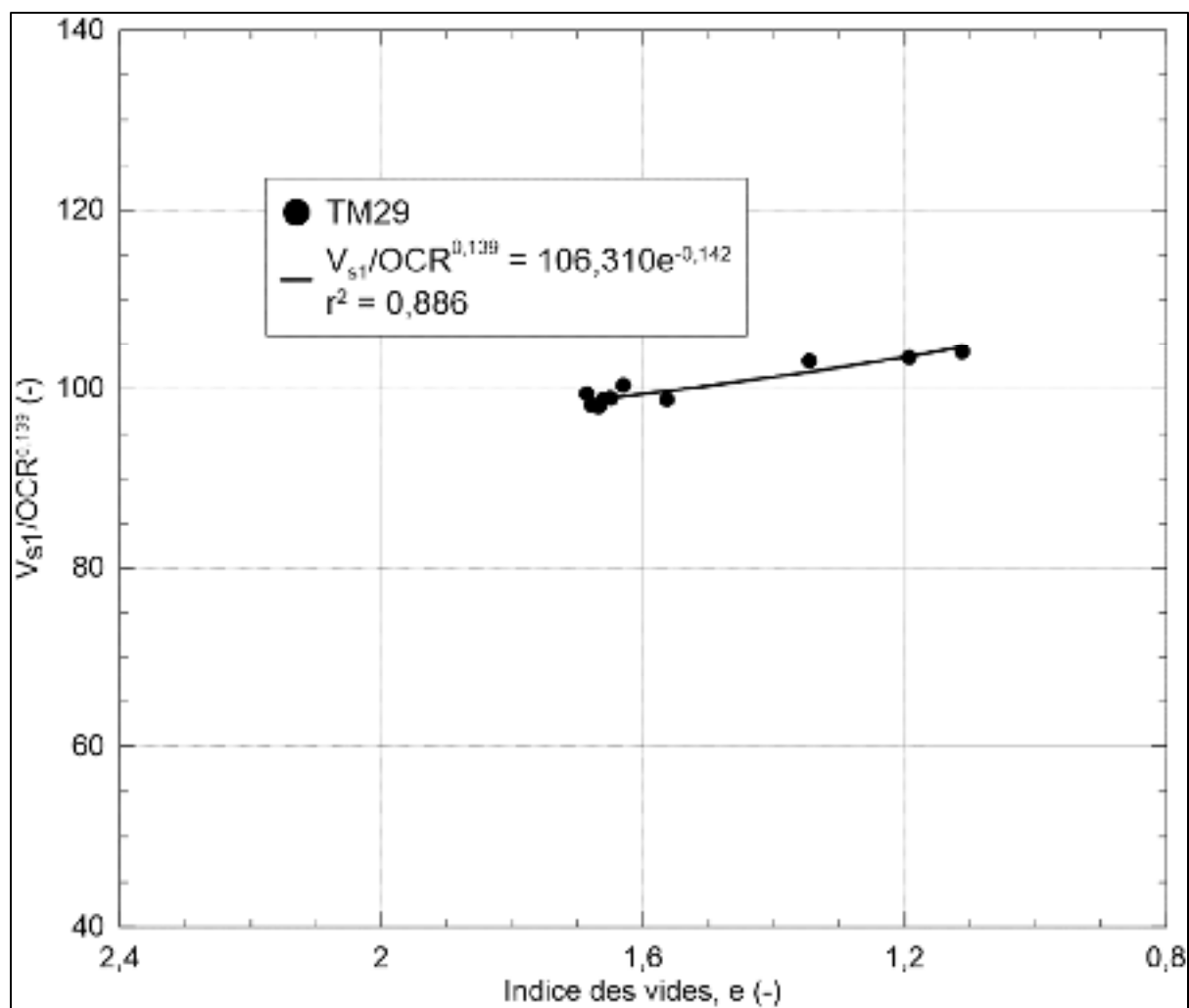


Figure A- V-6  $V_{s1}/OCR^K$  en fonction de l'indice des vides pour l'échantillon TM29

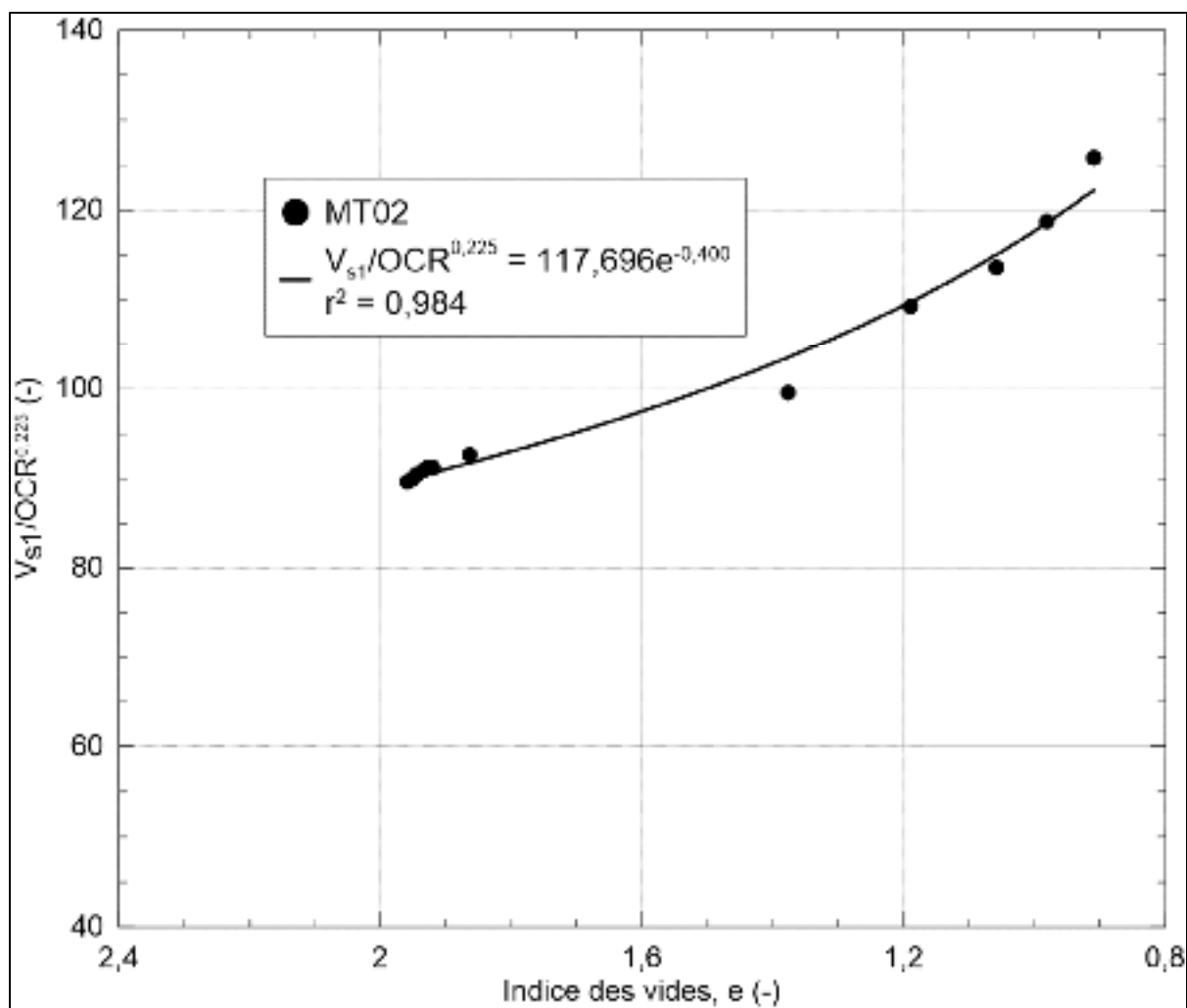


Figure A- V-7  $V_{st}/OCR^K$  en fonction de l'indice des vides pour l'échantillon MT02

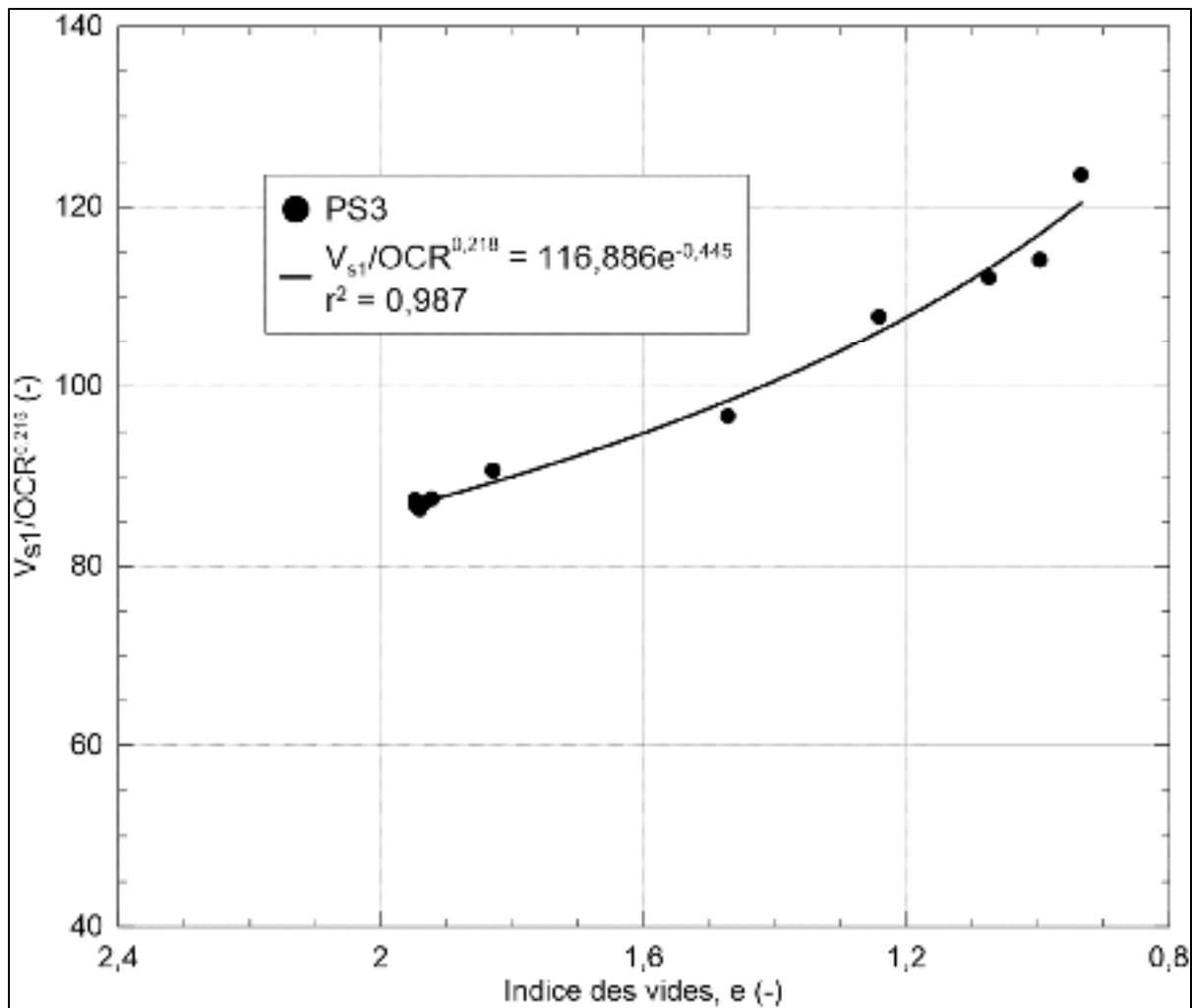


Figure A- V-8  $V_{s1}/OCR^K$  en fonction de l'indice des vides pour l'échantillon PS3

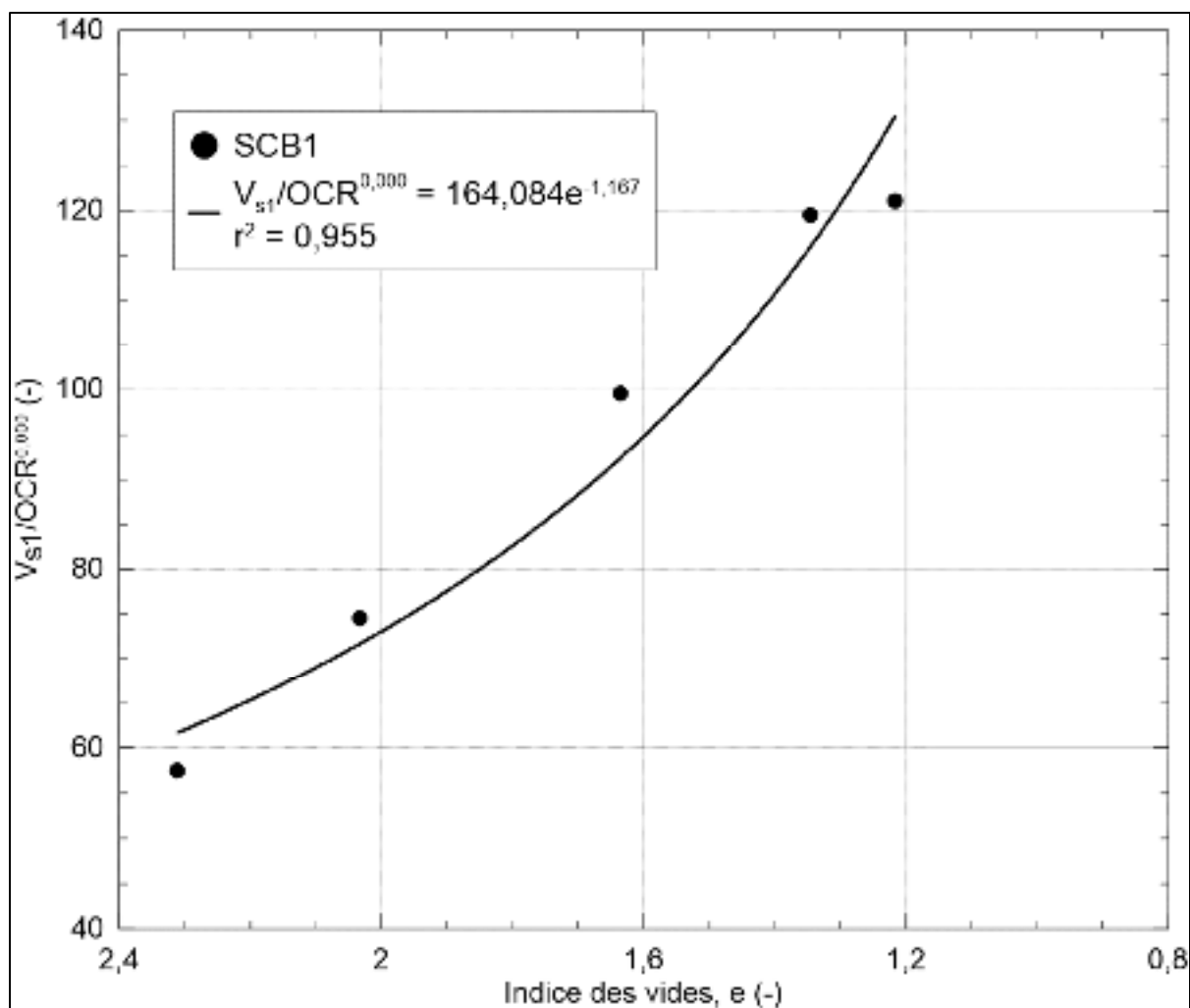


Figure A- V-9  $V_{s1}/OCR^K$  en fonction de l'indice des vides pour l'échantillon SCB1

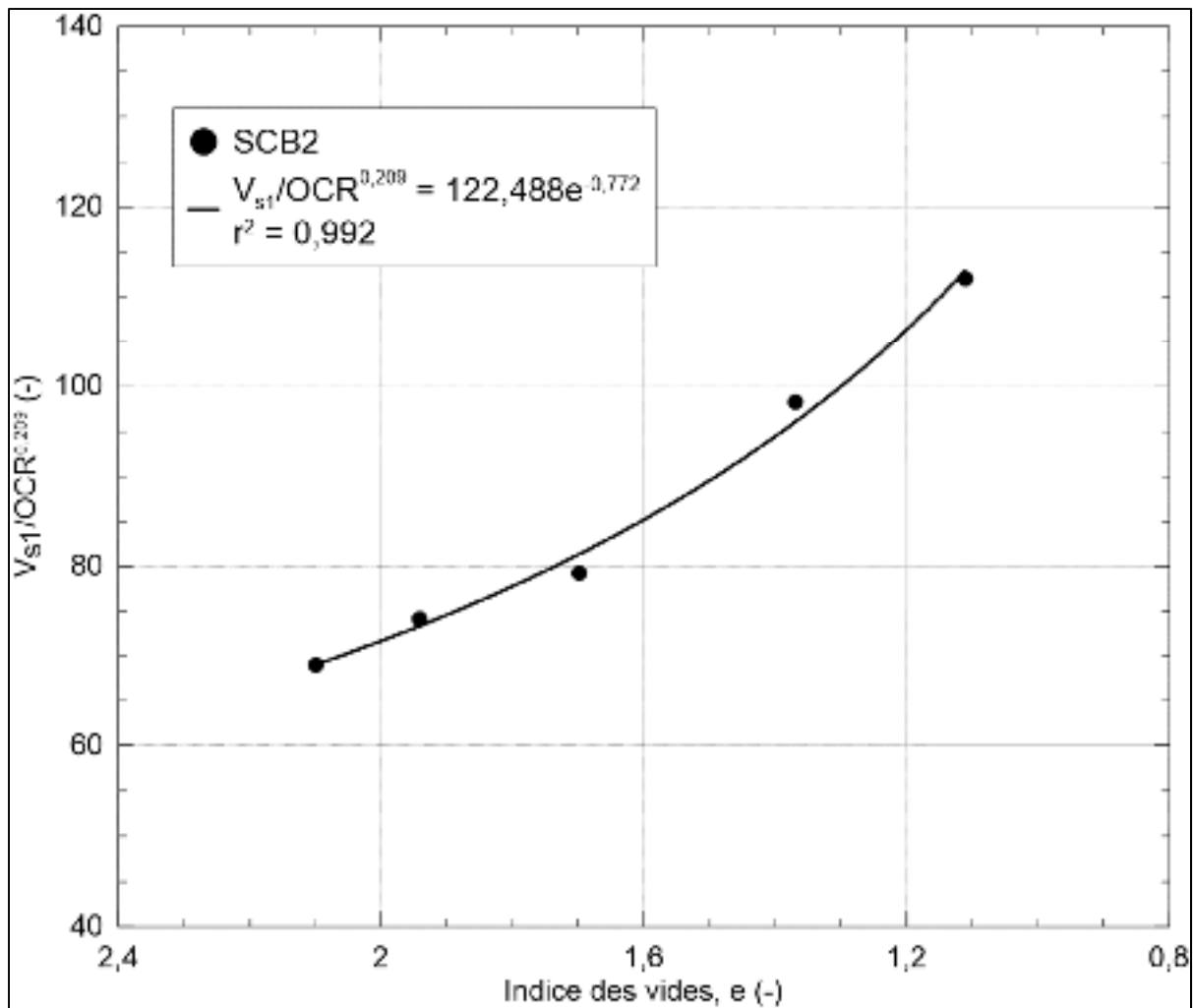


Figure A- V-10  $V_{s1}/OCR^K$  en fonction de l'indice des vides pour l'échantillon SCB2



## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alvarado, G., & Coop, M. R. (2012). On the performance of bender elements in triaxial tests. *Geotechnique*, 62(1), 1-17. doi: 10.1680/geot.7.00086
- ANSI/IEEE Std 176-1987. (1988). *IEEE Standard on Piezoelectricity*. doi: 10.1109/IEEESTD.1988.79638
- APC International Ltd. (2002). *Piezoelectric ceramics: principles and applications*. APC International.
- APC International Ltd. (2016). Physical and piezoelectric properties of APC materials. Repéré le 2018-07-11 à <https://www.americanpiezo.com/apc-materials/piezoelectric-properties.html>
- Arnau Vives, A. (2004). *Piezoelectric Transducers and Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-662-05361-4
- Arulnathan, R., Boulanger, R., & Riemer, M. (1998). Analysis of Bender Element Tests. *ASTM Geotechnical testing journal*, 21(2), 120-131.
- ASTM D653-14. (2014). *Standard Terminology Relating to Soil, Rock, and Contained Fluids*. West conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM D854-14. (2014). *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. West conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM D2435-11. (2011). *Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM D2487-11. (2011). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. West conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM D4015-15e1. (2015). *Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by Fixed-Base Resonant Column Devices*. West conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM D4318-17. (2017). *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. West conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM D7928-17. (2017). *Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis*. West conshohocken, PA: ASTM International.

- Atkinson, J. H. (2000). Non-linear soil stiffness in routine design. *Geotechnique*, 50(5), 487-508. doi: 10.1680/geot.2000.50.5.487
- Bonal, J., Donohue, S., & McNally, C. (2012). Wavelet analysis of bender element signals. *Geotechnique*, 62(3), 243-252. doi: 10.1680/geot.9.P.052
- Bourque, P.-A. (1996, 2010/08/02). Planète Terre. Repéré le 2018/05/24 à [http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete\\_terre.html](http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html)
- Brandenberg, S. J., Kutter, B. L., & Wilson, D. W. (2008). Fast stacking and phase corrections of shear wave signals in a noisy environment. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(8), 1154-1165.
- Camacho-Tauta, J., Ali, H., Cascante, G., & da Fonseca, A. V. (2017). Experimental and numerical observations of the frequency-domain method in bender-element testing. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(2). doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001603
- Camacho-Tauta, J., Cascante, G., da Fonseca, A. V., & Santos, J. A. (2015). Time and frequency domain evaluation of bender element systems. *Geotechnique*, 65(7), 548-562. doi: 10.1680/geot.13.P.206
- Clayton, C. R. I. (2011). Stiffness at small strain: Research and practice. *Geotechnique*, 61(1), 5-37. doi: 10.1680/geot.2011.61.1.5
- CNBC. (2005). *Code national du bâtiment*. Conseil national de recherches du Canada, Ottawa, Canada: Commission canadienne des codes du bâtiment et de prévention des incendies.
- da Fonseca, A. V., Ferreira, C., & Fahey, M. (2009). A Framework Interpreting Bender Element Tests, Combining Time-Domain and Frequency-Domain Methods.
- Darendeli, M. B. (2001). *Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves* (Thèse de doctorat, Université du Texas à Austin, Austin, Texas).
- Dineva, P., Gross, D., Müller, R., & Rangelov, T. (2014). Piezoelectric Materials. Dans *Dynamic Fracture of Piezoelectric Materials* (pp. 7-32). Springer.
- Dyvik, R., & Madshus, C. (1985). *Lab measurements of Gmax using bender elements* présentée à Advances in the Art of Testing Soils Under Cyclic Conditions. Proceedings of a session held in conjunction with the ASCE Convention., Detroit, Michigan.

- Elbeggo, D., Éthier, Y., Karray, M., & Dubé, J.-S. (2013). *Shear Wave Velocity Values in Canadian Champlain Sea Clays as predicted by empirical correlations* présentée à 66th Canadian Geotechnical Conference - GeoMontreal, Montreal, Qc.
- Elbeggo, D., Éthier, Y., Karray, M., & Dubé, J.-S. (2017). *The role of lateral stress coefficient ( $K_0$ ) on Shear wave velocity correlations for Canadian Clays* présentée à 70th Canadian Geotechnical Conference - GeoOttawa, Ottawa, ON.
- Éthier, Y. A. (2009). *La mesure en laboratoire de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement* (Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Qc). Repéré à <http://savoirs.usherbrooke.ca/handle/11143/1929>
- Fialka, J., & Beneš, P. (2013). Comparison of Methods for the Measurement of Piezoelectric Coefficients. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 62(5), 1047-1057. doi: 10.1109/TIM.2012.2234576
- Gamal El-Dean, D. (2007). *Development of a new piezoelectric pulse testing device and soil characterization using shear waves* (These de doctorat en genie civil, Université de Sherbrooke).
- Georgiannou, V. N., Rampello, S., & Silvestri, F. (1991). Static and dynamic measurements of undrained stiffness on natural overconsolidated clays. Dans *Proceedings of the 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (Vol. 1, pp. 91-95).
- Hardin, B. O., & Black, W. L. (1968). Vibration modulus of normally consolidated clay. *American Society of Civil Engineers Proceedings, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 94(SM2), 353-369.
- Hardin, B. O., & Drnevich, V. P. (1972). Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, 98(SM6), 603-624.
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1991). *Introduction à la géotechnique*. Montréal, QC: Éditions de l'École Polytechnique de Montréal.
- Hunter, J., Crow, H., Arsenault, J., Atukorala, U., Best, M., Campos, D., . . . Dutrisac, H. (2015). *Shear wave velocity measurement guidelines for Canadian seismic site characterization in soil and rock*. Natural Resources Canada.
- Hussien, M. N., & Karray, M. (2016). Shear wave velocity as a geotechnical parameter: an overview. *Canadian geotechnical journal*, 53(2), 252-272. doi: 10.1139/cgj-2014-0524

- Hwang, S. C., Lynch, C. S., & McMeeking, R. M. (1995). Ferroelectric/ferroelastic interactions and a polarization switching model. *Acta Metallurgica et Materialia*, 43(5), 2073-2084.
- Jaffe, B., Cook, W. R., & Jaffe, H. L. (1971). *Piezoelectric ceramics*. Londre et New York: Academic Press.
- Karray, M., Romdhan, M. B., Hussien, M. N., & Ethier, Y. (2015). Measuring shear wave velocity of granular material using the piezoelectric ring-actuator technique (P-RAT). *Canadian geotechnical journal*, 52(9), 1302-1317.
- Kishida, T., Boulanger, R. W., Wehling, T. M., & Driller, M. W. (2006). Variation of small strain stiffness for peat and organic soil. Dans *Proc., 8th US National Conf. on Earthquake Engineering*. Earthquake Engineering Research Institute.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- L'Heureux, J.-S., & Long, M. (2017). Relationship between Shear-Wave Velocity and Geotechnical Parameters for Norwegian Clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(6). doi: doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001645
- La Rochelle, P., Sarrailh, J., Tavenas, F., Roy, M., & Leroueil, S. (1981). Causes of sampling disturbance and design of a new sampler for sensitive soils. *Canadian geotechnical journal*, 18(1), 52-66. doi: 10.1139/t81-006
- Lecuru, Q. (2015). *Caractérisation des matériaux bitumineux retraités à froid au moyen de la vitesse des ondes de cisaillement* (Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure, Montréal, Qc).
- Lee, J.-S., & Santamarina, J. C. (2005). Bender Elements: Performance and Signal Interpretation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(9), 1063-1070. doi: doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:9(1063)
- Leroueil, S., Tavenas, F., & Le Bihan, J.-P. (1983). Propriétés caractéristiques des argiles de l'est du Canada. *Canadian geotechnical journal*, 20(4), 681-705. doi: 10.1139/t83-076
- Li, Y. W., Li, Y. H., & Li, F. X. (2015). Creep behaviour of soft and hard PZT ceramics during mechanical loading and unloading. *Journal of the European Ceramic Society*, 35(14), 3827-3834.
- Mhenni, A. (2016). *Amélioration de la technique des anneaux piézoélectrique (P-RAT)* (Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Qc).

- Mhenni, A., Hussien, M. N., & Karray, M. (2015). *Improvement of the Piezo-electric Ring Actuator technique (P-RAT) using 3D numerical simulations* présentée à 68th Canadian Geotechnical conference, GeoQuebec.
- Perret, D. (1995). *Diagenèse mécanique précoce des sédiments fins du fjord du Saguenay* (Thèse (Ph. D.), Université Laval).
- Richart, F. E., Hall, J. R., & Woods, R. D. (1970). Vibrations of soils and foundations.
- Rio, J. F. M. E. (2006). *Advances in laboratory geophysics using bender elements* (Thèse de doctorat, University of London, London, UK).
- Roesler, S. K. (1979). Anisotropic shear modulus due to stress anisotropy. *American Society of Civil Engineers, Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 105(7), 871-880.
- Rothenburg, L., Berlin, A. A., & Bathurst, R. J. (1991). Microstructure of isotropic materials with negative Poisson's ratio. *Nature*, 354(6353), 470-472.
- Santamarina, J. C., Klein, A., & Fam, M. A. (2001). Soils and waves: Particulate materials behaviour, characterization and process monitoring. *Journal of Soils and Sediments*, 1(2), 130-130.
- Shirley, D. J. (1978). An improved shear wave transducer. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 63(5), 1643-1645. doi: 10.1121/1.381866
- Shirley, D. J., & Hampton, L. D. (1978). Shear-wave measurements in laboratory sediments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 63(2), 607-613. doi: 10.1121/1.381760
- Steminc. (2017). Piezo material properties. Repéré le 2018-07-11 à [http://www.steminc.com/piezo/PZ\\_property.asp](http://www.steminc.com/piezo/PZ_property.asp)
- Stokoe II, K. H. (2008). *The Increasing Role of Seismic Measurements in Geotechnical Engineering* présentée à The Sixteenth Buchanan Lecture. Repéré à [https://www.youtube.com/watch?v=iW\\_TA2-mDng&list=PLXHjEGSzGOPNLB-M3oFeO0eMt20UZguOr&index=7](https://www.youtube.com/watch?v=iW_TA2-mDng&list=PLXHjEGSzGOPNLB-M3oFeO0eMt20UZguOr&index=7)
- Stokoe, K., Joh, S.-H., & Woods, R. (2004). Some contributions of in situ geophysical measurements to solving geotechnical engineering problems. Dans *Proceedings* (pp. 97-132).
- Uchino, K. (2003). *Introduction to piezoelectric actuators and transducers*. Pennsylvania: University Park.

- Viggiani, G., & Atkinson, J. H. (1995). Stiffness of fine-grained soil at very small strains. *Geotechnique*, 45(2), 249-265.
- Vucetic, M., & Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(1), 89-107.
- Wang, Y. H., Lo, K. F., Yan, W. M., & Dong, X. B. (2007). Measurement Biases in the Bender Element Test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(5), 564-574.
- Yang, J. (2005). *An Introduction to the Theory of Piezoelectricity*. Boston, MA: Springer Science and Business Media, Inc.
- Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., . . . Stokoe, K. H. (2001). Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(10), 817-833. doi:doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:10(817)