

Thèse CIFRE N° 2018/1627
Sol Solution
Institut Pascal – Axe M3G

Note technique : comparatifs c_p - c_p^{DCLT}

Caroline F. Oliveira

Encadrement

PIERRE BREUL
BASTIEN CHEVALIER
MIGUEL ANGEL BENZ NAVARRETE
QUOC ANH TRAN

22 juin 2021

1 Introduction

Comme on a vu, dans le domaine élastique, le module à faibles déformations peut être déterminé en connaissant la masse volumique du milieu.

En outre les particularités de chaque technique de mesure, il s'avère important de tenir compte du fait que, les essais fournissent des différents paramètres à faibles déformations (E_{max} , G_{max} , v_s , v_p , comme synthétisé dans le Tableau 5). La vitesse d'ondes estimée par l'essai DCLT est, par hypothèse, de compression. Donc celle-ci ne serait comparable directement qu'à des techniques fournissant une mesure de c_p . Toutes les autres comparaisons reposent sur des hypothèses quant aux les valeurs de poisson e /ou des masses volumiques. Afin de prendre cela en compte, les comparatifs qui seront présenté son issue techniques déterminant c_p .

Les comparatifs se focalisent uniquement dans les résultats obtenus en laboratoire pour les sables propres de référence (sable d'Hostun HN31 et de Fontainebleau NE34). Le choix de ces sables permettent de profiter des différents résultats rapportés dans la littérature pour ces matériaux.

1.1 Objectif

Ce document a pour objectif de comparer les résultats de la vitesse d'ondes de compression issus de l'essai DCLT (c_p^{DCLT}) aux résultats issus d'autres techniques. On souhaite vérifier dans quelle mesure la vitesse d'ondes issue de l'essai DCLT correspond la vitesse d'ondes de compression c_p et ainsi si celle-ci permettrait, comme dans le cas d'autres techniques, d'estimer le module à faibles déformations (E_0 ou $E_{max} = \rho c_p^2$).

2 RAPPEL : détermination de la vitesse d'ondes à partir de l'essai DCLT

Dans les années 70, Aussedat (1970) et Meunier (1974) ont introduit l'application des essais de choc à l'essai de pénétration. Ils ont également réalisé des tests selon la méthode de barres de Hopkinson (Split Hopkinson Pressure Bar - SHPB) adaptés pour les sols. Ils se sont appuyés sur des principes des chocs et sur les équations d'état (équations de Rankine-Hugoniot), qui régit leur propagation. A l'aide des équations de la mécanique classique et des lois de comportement (équations rhéologiques), ces équations dites « mixtes » décrivent la relation entre les contraintes et les vitesses (nommé polaire de choc) lors de la propagation d'un ébranlement. Elles se sont basées sur le phénomène de l'onde plane et cherchent à relier les caractéristiques du milieu au front de choc. Ces relations permettent d'étudier le comportement du sol soumis à un impact, permettant de déterminer l'impédance mécanique de celui-ci (Z) et d'en déduire la vitesse de propagation d'ondes de compression.

Omidvar et al. (2012) expliquent que les essais des propagations d'ondes en géotechnique (comme les essais de choc) sont complexes à mettre en place car il est souvent difficile d'avoir le suivi des contraintes dans le sol et de s'affranchir de réflexions des ondes. Dans ce type d'essai l'instrumentation la plus courante est l'insertion de capteur à l'intérieur de l'échantillon ce qui conduit souvent à des erreurs.

Cette limitation a été résolue avec l'instrumentation de la tige et l'application des méthodes découplage et de reconstruction d'ondes dans la tige appliquée à l'essai DCLT au pénétromètre Panda 3®. Les capteurs situés dans au niveau de la tête enregistrent les contraintes engendrées par le passage de l'ébranlement et son retour de manière quasi-continue (50 kHz) pour un intervalle Δt égal à $2L/c$. Avec L la longueur de la barre et c la vitesse d'ondes dans l'acier (de l'ordre de 5200m/s).

Au cours de l'essai, l'impact du marteau produit une onde incidente entraînant une vitesse v_i et une contrainte qui se propage par la tige. Une partie de l'onde incidente de force F_I dans le sol est réfléchie vers la tige avec une vitesse v_R et une force F_R , tandis qu'une autre partie est transmise au sol. Dans la tige, l'onde réfléchie s'ajoute à l'onde incidente. Tant que les deux milieux adjacents restent collés, leurs particules situées des deux côtés présentent la même vitesse et des contraintes normales de même intensité (principe d'action et réaction). Ceci constitue le principe

général d'obtention des forces transmises (F_T) au sol pour chaque impact et ainsi la contrainte en pointe σ_p .

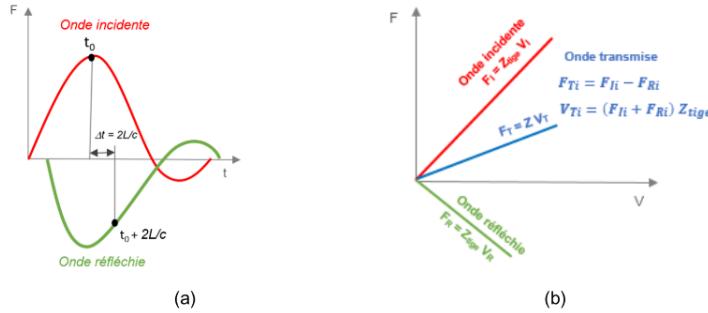


FIGURE 1 – (a) ondes découplées et (b) Polaire de choc de la tige et du sol

L'exploitation de signaux mesurés de force et accélération mesurés au niveau de la tête permet d'estimer les contraintes et les vitesses en pointe, à l'interface sol-pointe (Benz-Navarrete, 2009). La vitesse d'ondes (c_p^{DCLT}) est déduite à partir de la vitesse particulière en pointe (v_p), de la contrainte en pointe (σ_p) et de la masse volumique ρ du milieu (Équation 1) pour l'intervalle de temps $[0 ; 2L/c]$.

$$c_p^{DCLT} = \frac{\sigma_p}{\rho \cdot v_p} \quad (1)$$

L'équation 1 est déduite à partir de la conservation de la masse et de quantité d'énergie avant et après le passage de l'ébranlement. La déduction de cette relation est présentée dans le Rapport de 1er Année (en pièce-jointe) et également dans Aussedat (1970); Meunier (1974). L'application de l'équation 1 requiert un certain nombre d'hypothèses pour cet intervalle de temps analysé $[0 ; 2L/c]$:

- le contact entre le sol et la pointe pendant la transmission de l'onde est supposé plan et perpendiculaire ;
- l'amortissement au long des tiges est négligeable ;
- le contact entre le sol et la pointe pendant la transmission de l'onde est supposé plan et perpendiculaire ;
- la déformation radiale dans le sol est négligeable.

Benz-Navarrete (2009) a appliqué la méthode proposée par Aussedat (1970), à l'essai DCLT. Il a testé différents matériaux (béton, bois et différents sols) en laboratoire. Les polaires de choc obtenues sont répétables et sensibles aux matériaux. Les valeurs de c_p^{DCLT} obtenus sont de l'ordre de grandeur conforme aux valeurs typiques rapportées pour ces matériaux.

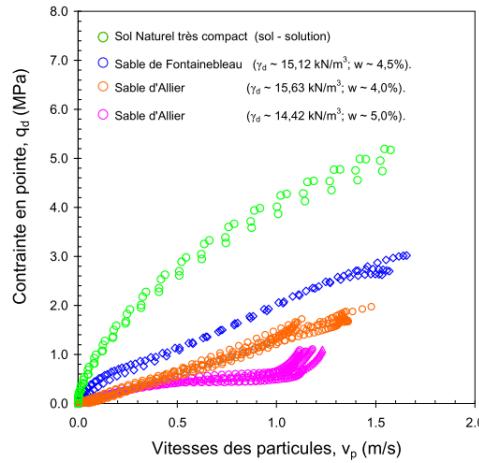


FIGURE 2 – (a) Polaires de choc expérimentales pour différents sols (Benz-Navarrete, 2009) et (b) Valeurs de c_p^{DCLT} obtenues et valeurs typiques pour les matériaux testés

Matériaux	c_p^{DCLT} (m/s)	c_p (m/s)
Béton	3944	3200 à 4000
	4045	
	3301	
Bois (sens parallèle aux fibres)	5200	3000 à 6000 ^(*)
	5516	
	5034	
Marne	2227	1800 à 3500 ^(**)
	2330	
	2272	
Sable d'Allier (DR ≈ 53 %)	824	500 à 1000 ^(**)
	695	
	849	
	561	
Sable d'Allier (DR ≈ 26 %)	352	500 à 1000 ^(**)
	384	

FIGURE 3 – Valeurs de c_p^{DCLT} obtenues et valeurs typiques pour les matériaux testés Benz-Navarrete (2009). (*) Krause et al. (2015), (**) Cassan (1988)

Escobar (2015) a également réalisé des comparatifs de (c_p^{DCLT}) et des estimations de c_p à la partir de la méthode de surface MASW. Ces essais ont été importants pour montrer la faisabilité et répétabilité de la méthode. Bien qu'encourageants ces comparatifs n'ont pas permis de valider la mesure.

3 Comparatifs

La vitesse d'ondes de compression dans le sol est fonction de divers facteurs (état de densité, hydrique et de contrainte, plasticité, ...). Pour les sables propres, les facteurs majeurs sont : l'indice de vides (ou DR), l'état de contrainte, l'état hydrique et les caractéristiques intrinsèques du matériau (tailles, forme des grains) Hardin (1972).

Quant à la l'état hydrique, ceci est important pour distinguer l'état saturé du non saturés ($S < 95\%$). Pour les sables l'état non saturé, ce facteur secondaire est secondaire car il n'engendre que des variations de l'ordre de 10% (Emerson, 2005). Tous les comparatifs analysés dans ce document correspondent à l'état non-saturé.

Afin de minimiser les effets intrinsèques liés aux matériaux, on travaille avec des sables de référence dont on dispose des résultats DCLT et des résultats c_p rapportés.

3.1 Données rapportées dans littérature pour les sables d'Hostun et Fontainebleau

En laboratoire, la vitesse d'ondes de compression est déterminée l'aide de capteurs piézo-électriques de compression (méthode connue comme *extenders elements*, méthode analogue de la méthode *bender elements*) (Duttine, 2005; Sauzeat, 2003). Autre méthode d'obtention de la vitesse d'ondes de compression est la méthode *cross-hole*. Celle-ci a été appliquée par Emerson (2005) et par Emerson and Foray (2006) en laboratoire avec les sables SH et SF. Les résultats présentés sont des déterminations obtenus en laboratoire pour des échantillons reconstitués par pluviation à sec.

Matériau	Taille échantillon (mm) (D : diamètre, H : hauteur)	e_o	γ_d (kN/m ³)	DR (%)	σ (kPa)	w (%)	Technique	Préparation de l'échantillon	Référence	c_p (m/s)
SF	cylindre D1200 x H1500	0,74	14,70	50	1,4	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	140
SF	cylindre D1200 x H1500	0,74	14,70	50	1,5	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	147
SF	cylindre D1200 x H1500	0,74	14,70	50	2,9	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	152
SF	cylindre D1200 x H1500	0,74	14,70	50	3,0	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	155
SF	cylindre D1200 x H1500	0,74	14,70	50	4,4	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	170
SF	cylindre D1200 x H1500	0,74	14,70	50	4,4	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	180
SF	cylindre D1200 x H1500	0,74	14,70	50	7,3	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	186
SF	cylindre D1200 x H1500	0,74	14,70	50	5,9	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	190
SF	cylindre D1200 x H1500	0,74	14,70	50	5,9	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	194
SF	cylindre D1200 x H1500	0,74	14,70	50	8,8	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	201
SF	cylindre D1200 x H1500	0,74	14,70	50	7,3	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	201
SF	cylindre D1200 x H1500	0,74	14,70	50	8,8	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	209
SF	cylindre D1200 x H1500	0,74	14,70	50	10,3	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	210
SF	cylindre D1200 x H1500	0,74	14,70	50	10,3	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	224
SF	cylindre D1200 x H1500	0,70	15,20	60	1,5	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	159
SF	cylindre D1200 x H1500	0,70	15,20	60	4,6	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	196
SF	cylindre D1200 x H1500	0,70	15,20	60	6,0	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	214
SF	cylindre D1200 x H1500	0,70	15,20	60	7,5	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	217
SF	cylindre D1200 x H1500	0,70	15,20	60	12,1	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	228
SF	cylindre D1200 x H1500	0,70	15,20	60	9,1	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	229
SF	cylindre D1200 x H1500	0,70	15,20	60	13,7	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	237
SF	cylindre D1200 x H1500	0,70	15,20	60	10,6	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	237
SF	cylindre D1200 x H1500	0,70	15,20	60	15,2	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	256
SF	cylindre D1200 x H1500	0,6	15,90	75	1,6	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	144
SF	cylindre D1200 x H1500	0,6	15,90	75	1,6	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	148
SF	cylindre D1200 x H1500	0,6	15,90	75	1,6	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	153
SF	cylindre D1200 x H1500	0,6	15,90	75	1,6	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	160
SF	cylindre D1200 x H1500	0,6	15,90	75	3,2	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	162
SF	cylindre D1200 x H1500	0,6	15,90	75	3,2	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	165
SF	cylindre D1200 x H1500	0,6	15,90	75	3,2	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	167
SF	cylindre D1200 x H1500	0,6	15,90	75	1,5	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	168
SF	cylindre D1200 x H1500	0,6	15,90	75	3,1	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	178
SF	cylindre D1200 x H1500	0,6	15,90	75	3,2	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	184
SF	cylindre D1200 x H1500	0,6	15,90	75	3,2	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	188
SF	cylindre D1200 x H1500	0,6	15,90	75	4,8	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	204
SF	cylindre D1200 x H1500	0,6	15,90	75	4,8	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	209
SF	cylindre D1200 x H1500	0,6	15,90	75	6,3	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	225
SF	cylindre D1200 x H1500	0,6	15,90	75	4,7	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	227
SF	cylindre D1200 x H1500	0,6	15,90	75	4,7	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	233
SF	cylindre D1200 x H1500	0,6	15,90	75	6,3	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	235
SF	cylindre D1200 x H1500	0,6	15,90	75	6,3	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	243
SF	cylindre D1200 x H1500	0,6	15,90	75	9,5	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	244
SF	cylindre D1200 x H1500	0,6	15,90	75	9,4	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	247
SF	cylindre D1200 x H1500	0,6	15,90	75	7,9	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	252
SF	cylindre D1200 x H1500	0,6	15,90	75	7,9	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	253
SF	cylindre D1200 x H1500	0,6	15,90	75	9,5	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	255
SF	cylindre D1200 x H1500	0,6	15,90	75	9,5	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	265
SF	cylindre D1200 x H1500	0,6	15,90	75	7,9	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	267

FIGURE 4 – Données rapportées dans la littérature de c_p pour SF

Matériaux	Taille échantillon (mm) (D : diamètre, H : hauteur)	θ_o	γ_d (kN/m ³)	DR (%)	σ (kPa)	w (%)	Technique	Préparation de l'échantillon	Référence	c_p (m/s)
SH	cylindre D1200 x H1500	0,82	14,28	41	1,4	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	120
SH	cylindre D1200 x H1500	0,82	14,28	41	3,0	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	120
SH	cylindre D1200 x H1500	0,82	14,28	41	4,4	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	122
SH	cylindre D1200 x H1500	0,82	14,28	41	7,2	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	127
SH	cylindre D1200 x H1500	0,82	14,28	41	8,6	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	128
SH	cylindre D1200 x H1500	0,82	14,28	41	10,1	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	128
SH	cylindre D1200 x H1500	0,82	14,28	41	11,6	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	130
SH	cylindre D1200 x H1500	0,82	14,28	41	5,8	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	131
SH	cylindre D1200 x H1500	0,82	14,28	41	8,8	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	132
SH	cylindre D1200 x H1500	0,82	14,28	41	2,9	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	134
SH	cylindre D1200 x H1500	0,82	14,28	41	4,4	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	134
SH	cylindre D1200 x H1500	0,82	14,28	41	7,2	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	135
SH	cylindre D1200 x H1500	0,82	14,28	41	10,2	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	135
SH	cylindre D1200 x H1500	0,82	14,28	41	14,4	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	136
SH	cylindre D1200 x H1500	0,82	14,28	41	11,5	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	136
SH	cylindre D1200 x H1500	0,82	14,28	41	13,0	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	136
SH	cylindre D1200 x H1500	0,82	14,28	41	15,9	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	137
SH	cylindre D1200 x H1500	0,82	14,28	41	15,9	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	143
SH	cylindre D1200 x H1500	0,69	15,34	78	1,4	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	130
SH	cylindre D1200 x H1500	0,69	15,34	78	3,0	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	140
SH	cylindre D1200 x H1500	0,69	15,34	78	1,4	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	151
SH	cylindre D1200 x H1500	0,69	15,34	78	4,4	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	155
SH	cylindre D1200 x H1500	0,69	15,34	78	7,7	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	159
SH	cylindre D1200 x H1500	0,69	15,34	78	2,9	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	160
SH	cylindre D1200 x H1500	0,69	15,34	78	6,0	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	160
SH	cylindre D1200 x H1500	0,69	15,34	78	4,6	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	162
SH	cylindre D1200 x H1500	0,69	15,34	78	6,1	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	177
SH	cylindre D1200 x H1500	0,69	15,34	78	7,7	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	179
SH	cylindre D1200 x H1500	0,69	15,34	78	14,0	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	181
SH	cylindre D1200 x H1500	0,69	15,34	78	9,2	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	184
SH	cylindre D1200 x H1500	0,69	15,34	78	10,7	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	191
SH	cylindre D1200 x H1500	0,69	15,34	78	9,2	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	193
SH	cylindre D1200 x H1500	0,69	15,34	78	10,7	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	194
SH	cylindre D1200 x H1500	0,69	15,34	78	12,2	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	204
SH	cylindre D1200 x H1500	0,69	15,34	78	12,3	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	212
SH	cylindre D1200 x H1500	0,69	15,34	78	13,8	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	217
SH	cylindre D1200 x H1500	0,68	15,49	83	1,5	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	151
SH	cylindre D1200 x H1500	0,68	15,49	83	1,6	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	155
SH	cylindre D1200 x H1500	0,68	15,49	83	3,1	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	166
SH	cylindre D1200 x H1500	0,68	15,49	83	4,8	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	168
SH	cylindre D1200 x H1500	0,68	15,49	83	4,7	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	177
SH	cylindre D1200 x H1500	0,68	15,49	83	9,4	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	180
SH	cylindre D1200 x H1500	0,68	15,49	83	11,0	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	180
SH	cylindre D1200 x H1500	0,68	15,49	83	6,3	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	180
SH	cylindre D1200 x H1500	0,68	15,49	83	7,9	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	180
SH	cylindre D1200 x H1500	0,68	15,49	83	6,3	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	184
SH	cylindre D1200 x H1500	0,68	15,49	83	7,8	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	186
SH	cylindre D1200 x H1500	0,68	15,49	83	12,6	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	195
SH	cylindre D1200 x H1500	0,68	15,49	83	11,0	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	195
SH	cylindre D1200 x H1500	0,68	15,49	83	9,4	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	195
SH	cylindre D1200 x H1500	0,68	15,49	83	14,2	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	197
SH	cylindre D1200 x H1500	0,68	15,49	83	14,1	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	214
SH	cylindre D1200 x H1500	0,68	15,49	83	12,5	0	Cross-hole en laboratoire	Pluviation à sec	Emerson (2005)	216
SH	cylindre creux D160-200 x H120	0,71	15,20	70	55,0	0	Capteurs piézoelectriques	Pluviation à sec	Duttine (2005) / (Sauzeat, 2003)	307
SH	cylindre creux D160-200 x H120	0,81	14,36	40	50,0	0	Capteurs piézoelectriques	Pluviation à sec	Duttine (2005) / (Sauzeat, 2003)	273
SH	cylindre creux D160-200 x H120	0,64	15,85	91	50,0	0	Capteurs piézoelectriques	Pluviation à sec	Duttine (2005) / (Sauzeat, 2003)	355
SH	cylindre creux D160-200 x H120	0,65	15,76	88	75,0	0	Capteurs piézoelectriques	Pluviation à sec	Duttine (2005) / (Sauzeat, 2003)	373
SH	cylindre creux D160-200 x H120	0,63	15,95	94	80,0	0	Capteurs piézoelectriques	Pluviation à sec	Duttine (2005) / (Sauzeat, 2003)	401

FIGURE 5 – Données rapportées dans la littérature de c_p pour SH

3.2 Données DCLT à Navier

Les essais DCLT ont été réalisé en chambre d'étalonnage simulant les conditions au repos (k_0). Les éprouvettes ont été constitué par pluviation à sec. La chambre cylindrique permet de confectionner des éprouvettes de 730 mm de hauteur et de 547 de diamètre. Un système de pression hydraulique est installé en dessous du couvercle supérieur. Ce couvercle est doté d'une membrane en caoutchouc qui se dilate appliquant ainsi une pression verticale à l'échantillon. La pression appliquée est pilotée à l'aide d'une cellule de charge. Pour plus de détail sur sur le système s'adresser à Le Kouby et al. (2008) et Muhammed (2016).

Les essais DCLT ont été réalisé dans l'axe de l'éprouvette en faisant varier la pression appliquée. Un nombre d'impact est réalisé (> 9) ensuite la pression est incrémentée, une nouvelle série d'impact est effectuée. La procédure continue pour toute la profondeur de l'éprouvette. Les pressions appliquée sont 10 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 75 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa et 400 kPa (Lopez Retamales et al., 2020).

3.3 Comparatif des mesures

Parmi des résultats de c_p rapportées dans la littérature, on compare ceux correspondant aux conditions (DR et σ_v) égales ou le plus proche possible de celles des essais DCLT (Table 1). La Figure 6 présente les données sur la forme de graphe.

Matériaux	LITTÉRATURE					DCLT							Variation (%)	
	DR (%)	w (%)	Contrainte verticale (kPa)	Référence (littérature)	c _p (m/s)	Référence DCLT	DR (%)	w (%)	Contrainte verticale (m/s)	c _{p,DCLT} (m/s)	Ecart-type (m/s)	Nombre de donnée (-)	CoV (%)	
SF	50	0	9.5-10.5	Cross-hole (Emerson, 2005)	210	9 (Navier)	50	0	10	466	96	19	21	122
	60	0	9.5-10.5	Cross-hole (Emerson, 2005)	237	19 (Navier)	60	0	10	525	180	27	34	122
	75	0	9.5-10.5	Cross-hole (Emerson, 2005)	253	11 (Navier)	70	0	10	432	89	23	21	71
	75	0	9.5-10.5	Cross-hole (Emerson, 2005)	253	14 (Navier)	80	0	10	949	232	10	24	275
SH	50	0	9.5-10.5	Cross-hole (Emerson, 2005)	189	26 (Navier)	50	0	10	287	106	25	37	52
	40	0	50	Extender elements (Duttine, 2005)	273	25 (Navier)	30	0	50	295	101	9	34	8
	40	0	50	Extender elements (Duttine, 2005)	273	26 (Navier)	50	0	50	520	80	9	15	90
	75	0	75	Extender elements (Duttine, 2005)	373	21 (Navier)	75	0	75	842	68	10	8	126
	75	0	75	Extender elements (Duttine, 2005)	373	22 (Navier)	70	0	75	711	104	9	15	91

TABLE 1 – Comparatifs pour le SF et SH

On constate que les valeurs de c_p^{DCLT} sont supérieures à ceux figurant dans la littérature. La seule éprouvette pour laquelle la différence reste inférieure à 15%.

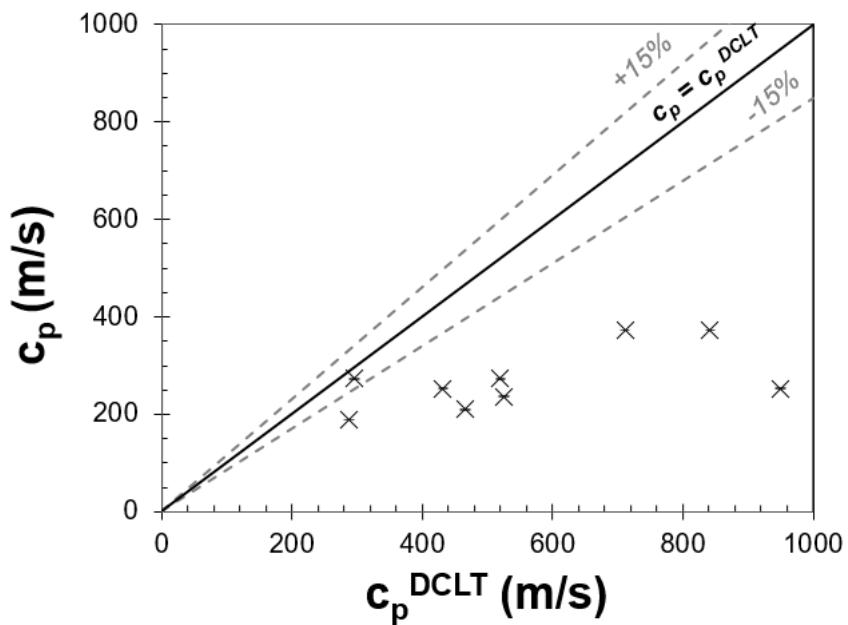


FIGURE 6 – Comparatifs pour le SF et SH

4 Analyse globale des données DCLT

5 Conclusion et perspectives

Ce document présente des comparatifs entre les résultats de vitesse d'ondes de compression rapportés dans la littérature et ceux issues de l'essai DCLT. L'objectif était de vérifier dans quelle mesure c_p^{DCLT} est comparable à c_p .

Ces comparatifs se sont basés en deux sables de référence, (SH et SF), secs. Pour les matériaux analysés, les principaux facteurs influençant la vitesse d'ondes de compression sont l'état de densité et de contrainte. Ainsi, on compare les mesures pour lesquels ces facteurs sont identiques ou, lorsque cela n'est pas possible, le plus proche.

Les comparatifs ont permis de constaté que pour ce cas de figure les valeurs de c_p^{DCLT} sont supérieures à c_p . Cette constatation est en accord avec les résultats obtenus par Escobar (2015). L'auteur avait rapporté des résultats élevés de c_p^{DCLT} pour des valeurs supérieures à 300 m/s. Escobar (2015) attribué cette différence à des perturbations dues aux raccourcissements élastiques des tiges ($L \geq 6\text{m}$). Les comparatifs montrés permettent de constater que la différence persiste pour des essais réalisés avec les tiges d'un mètre.

Characterization of sand using the Kolsky bar is more complex than conventional materials such as metals. The longitudinal wave speed in a granular system, such as sand, is governed by complex interactions between sand particles, pore air, and pore water. Various parameters such as grain size distribution and moisture content affect the wave

speed. Furthermore, as the sand compacts under the dynamic loading, the wave speed varies depending on the degree of compaction. Compared to most other engineering materials, the wave speeds in sand are orders of magnitude slower. Charlie et al. (1990) determined the longitudinal wave velocity in silica sand at various moisture contents using a conventional Kolsky bar. Using a sufficiently long sample to allow for a single passage of the stress wave through the sample, they determined the longitudinal wave velocities to lie in the range of 212–454 ms⁻¹. Brown et al. (2007) determined the longitudinal wave velocity in silica sand to be 243 ms⁻¹ using flyer plate experiments. Martin et al. (2009) used the conventional Kolsky bar method to determine the wave velocity in sand. They measured the wave velocity of about 300 ms⁻¹ which is within the range reported by Charlie et al. During the Kolsky bar experiment, strain rate in the specimen has to be increased from zero to a desired level. The desired strain rate is achieved by the reflections of stress waves in the specimen from interfaces between the specimen and the bars. High wave speeds in the specimen facilitate an evenly distributed stress field in the specimen and is required to acquire stress equilibrium. When the longitudinal wave velocity is significantly lower, such as that in sand, the specimen may fail to achieve stress equilibrium if the loading rate is high. To allow for a more uniform deformation in the early stages of the experiment, the initial loading rate needs to be controlled such that the stress in the specimen increases nearly uniformly. A controlled loading rate is achieved using the pulse-shaping technique (Chen and Song, 2011; Frew et al., 2005). More details on pulse-shaping technique are presented in Section 2.1. Most types of sands do not exhibit a cohesive behavior. Hence, to investigate the high strain-rate compressive response, sand specimens need to be confined prior to the dynamic compressive loading. Conventionally, confinement is provided by fitting a jacket over the sand specimen to hold the sand in place when compressed. It has been observed that the material of the jacket affects the dynamic response of sand (Junyu et al., 2014; Lu et al., 2009; Song et al., 2009). The jacket also introduces nonuniform state of stress in the specimen due to inertia and friction effects. A triaxial Kolsky bar has been developed to study the effects of confinement on the dynamic response of sand (Kabir, 2010; Martin et al., 2013). Confinement methods and triaxial Kolsky bar techniques are expanded further in Sections 2.2 and 2.3, respectively.

Références

- Aussehat, G. (1970). *Sollicitations rapides des sols*. PhD thesis.
- Benz-Navarrete, M. A. (2009). *MESURES DYNAMIQUES LORS DU BATTAGE DU PENETROMETRE PANDA 2*. PhD thesis, Université Blaise Pascal.
- Cassan (1988). Essai in situ des mécaniques des sols. 1 réalisation et interprétation.
- Duttine, A. (2005). *Comportement des sables et des mélanges sable / argile sous sollicitations statiques et dynamiques avec et sans "rotations d'axes"*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Emerson, M. (2005). *Corrélations entre données géotechniques et géophysiques à faible profondeur dans des sables*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Emerson, M. and Foray, P. (2006). Laboratory P-wave measurements in dry and saturated sand. *Acta Geotechnica*, 1(3) :167–177.
- Escobar, E. (2015). *Mise au point et exploitation d'une nouvelle technique pour la reconnaissance des sols : le PANDA 3*. PhD thesis.
- Hardin, B. O. (1972). Shear modulus and damping in soil : Measurement and parameter effects. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, 98(sm6) :8977.
- Krause, M., Dackermann, U., and Li, J. (2015). Elastic wave modes for the assessment of structural timber : ultrasonic echo for building elements and guided waves for pole and pile structures. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 5(2) :221–249.
- Le Kouby, A., Canou, J., and Dupla, J. (2008). Contribution à l'étude du comportement des pieux. Etude en chambre d'étalonnage. In *JNNG 2006*, volume 1, pages 129–136.
- Lopez Retamales, S., Canou, J., Dupla, J. C., and Benz Navarrete, M. A. (2020). PENETROMETRE DYNAMIQUE ET INDICE DE DENSITE DES SABLES . APPLICATION A L'EVALUATION DU RISQUE DE LIQUEFACTION DES MASSIFS SABLEUX. In *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur (JNNG)*, pages 1–9.
- Meunier, J. (1974). *Contribuition à l'étude des ondes et des ondes de choc dans les sols*. PhD thesis, Université de Grenoble.
- Muhammed, R. D. (2016). *Etude en chambre d'étalement du frottement sol-pieu sous grands nombres de cycles . Application au calcul des fondations profondes dans les sols fins saturés To cite this version*. PhD thesis.
- Omidvar, M., Iskander, M., and Bless, S. (2012). Stress-strain behavior of sand at high strain rates. *International Journal of Impact Engineering*, 49 :192–213.
- Sauzeat, C. (2003). Comportement du sable dans le domaine des petites et moyennes déformations : rotations "d'axes" et effets visqueux [Behavior of sand in the small and medium strain domains : rotation of axes and viscous effects].