

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

23 juin 2021

1 Introduction

Le module de déformation est un des paramètres les plus difficiles à déterminer car il dépend de nombreux facteurs (granulométrie, densité, confinement, histoire de chargement, niveau de déformation ...) (Briaud, 2001).

Par ailleurs, à partir des années 70, le développement de techniques expérimentales de plus en plus précises ont mis en évidence la limitation des essais classiques pour traduire le comportement des sols à petites déformations (Burland, 1989; Atkinson, 2000; Gomes Correia, 2004).

Ces travaux ont montré le domaine élastique pour les sols est assez restreint et difficile à déterminer (souvent associé à déformations 10^{-5}). Les essais de propagations d'ondes (capteurs piezo-électriques en laboratoire et essais de forage in situ) induisent des déformations très faibles, inférieures à 10^{-5} . L'hypothèse d'un comportement élastique linéaire est donc justifiée (Dano, Christophe; Hicher, 2002). Il est donc possible d'obtenir le module à faibles déformations (E_{max} ou E_0) à partir des mesures de vitesse d'ondes et de la masse volumique du milieu ρ (équation 1).

$$E_{max} = \rho c_p^2 \quad (1)$$

Les essais de propagations d'ondes sont, toutefois, peu courant dans la pratique. Cela induit à des estimations de déformations peu réalistes dans les dimensionnements et constitue une limitation à l'application des modèles de comportement plus poussés (alimentés par les paramètres à faibles déformations).

L'essai de chargement dynamique en pointe pénétrométrique (DCLT) au pénétromètre dynamique léger Panda 3[®] est une technique simple et à faible coût. Lors des premiers instants suivant l'impact, cet essai est assimilable à un essai de choc (Aussedat, 1970; Semblat, 2012; Iskander and Omidivar, 2015). Comme un essai de choc, l'exploitation des signaux de force et de vitesse dans le sol permet d'étudier le comportement à faibles déformations et d'estimer la vitesse d'ondes de compression (c_p^{DCLT}).

Il reste évaluer dans quelle mesure c_p^{DCLT} correspondrait à la vitesse d'ondes de compression c_p issue des techniques connues. Dans ce document on compare les résultats de c_p^{DCLT} et c_p sous des conditions semblables. La vitesse d'ondes de compression issue de l'essai DCLT étant par hypothèse de compression, les valeurs de c_p présentées sont issues techniques déterminant c_p (aucune estimation à partir de c_s).

Les comparatifs se focalisent uniquement sur 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})¹ 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.

1.2 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. À 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

1. On adopte la notation c_p pour la vitesse d'ondes, la notation v_p faisant référence à la vitesse particulaire

(nommé polaire de choc) lors de la propagation d'un ébranlement. 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 appliqué à l'essai DCLT. 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 DCLT, l'impact du marteau crée une onde incidente. Une partie de l'onde incidente de force F_I et de vitesse v_I est réfléchiée. L'onde réfléchiée de force F_R se propage dans le sens inverse à une vitesse v_R , tandis qu'une autre partie est transmise au sol. Dans la tige, l'onde réfléchiée s'ajoute à l'onde incidente. Tant que les deux milieux adjacents restent collés, leurs particules situées des deux côtes 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).

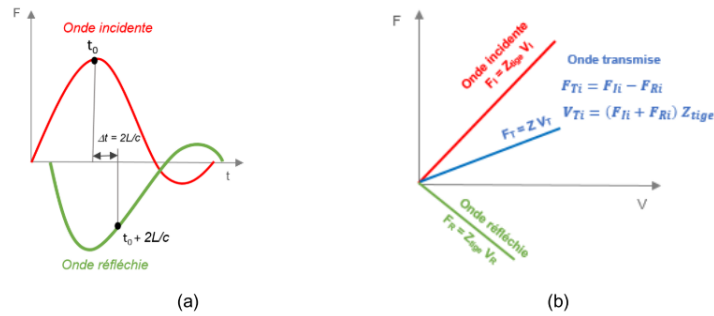


FIGURE 1 – (a) ondes découplées et (b) polaire de choc de la tige et du sol

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

$$c_p^{DCLT} = \frac{\sigma_p}{\rho \cdot v_p} \quad (2)$$

L'équation 2 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 2 s'appuie sur 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 rapportées pour ces matériaux.

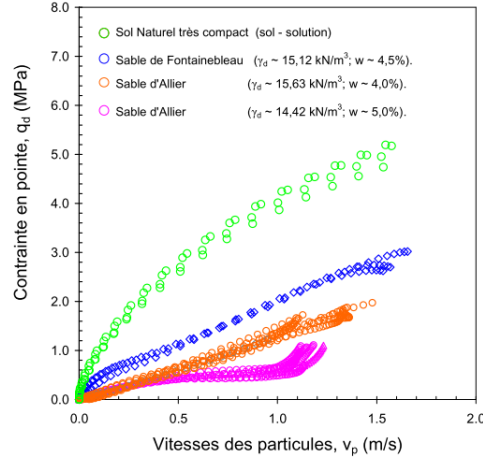


FIGURE 2 – (a) Polaires de choc expérimentales pour différents sols (Benz-Navarrete, 2009) et (b) Valeurs de c_p^{DCLT} obtenues et valeurs typiques pour les matériaux testés

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 \approx 53 %)	824	500 à 1000 ^(**)
	695	
	849	
Sable d'Allier (DR \approx 26 %)	561	
	352	
	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 obtenus avec 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. La méthode MASW s'appuie sur la dispersion des ondes de surface. Celle-ci est utilisée pour estimer le profil vertical du terrain, donc les résultats sont moins précis que ceux issus du DCLT. Par ailleurs, la méthode MASW dépend largement du modèle du terrain utilisé pour l'inversion des données. C'est pourquoi, on s'appuie par la suite sur les techniques plus précises, en laboratoire et permettant d'obtenir directement c_p .

2 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 majeures 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 l'état hydrique, ceci est important pour distinguer l'état saturé du non saturé ($S < 95\%$). Pour les sables non saturés, ce facteur 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.

2.1 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

Matériau	Taille échantillon (mm) (D : diamètre, H : hauteur)	e_0	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	6,8	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	50	0	Capteurs piézoélectriques	Pluviation à sec	Dutline (2005) / (Sauzeat, 2003)	307
SH	cylindre creux D160-200 x H120	0,81	14,36	40	50	0	Capteurs piézoélectriques	Pluviation à sec	Dutline (2005) / (Sauzeat, 2003)	273
SH	cylindre creux D160-200 x H120	0,64	15,85	91	50	0	Capteurs piézoélectriques	Pluviation à sec	Dutline (2005) / (Sauzeat, 2003)	355
SH	cylindre creux D160-200 x H120	0,65	15,76	88	75	0	Capteurs piézoélectriques	Pluviation à sec	Dutline (2005) / (Sauzeat, 2003)	373
SH	cylindre creux D160-200 x H120	0,63	15,95	94	80	0	Capteurs piézoélectriques	Pluviation à sec	Dutline (2005) / (Sauzeat, 2003)	401

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

2.2 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 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 appliquées sont 10 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 75 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa et 400 kPa (Lopez Retamales et al., 2020).

2.3 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 forme graphique.

Matériaux	LITTÉRATURE					DCLT							Variation (%)
	DR (%)	w (%)	Contrainte verticale (kPa)	Référence (littérature)	c _p (m/s)	DR (%)	w (%)	Contrainte verticale (kPa)	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	50	0	10	466	96	19	21	122,0
	60	0	9,5-10,5	Cross-hole (Emerson, 2005)	237	60	0	10	525	180	27	34	121,6
	75	0	9,5-10,5	Cross-hole (Emerson, 2005)	253	70	0	10	432	89	23	21	70,7
	75	0	9,5-10,5	Cross-hole (Emerson, 2005)	253	80	0	10	949	232	10	24	275,2
SH	50	0	9,5-10,5	Cross-hole (Emerson, 2005)	189	50	0	10	287	106	25	37	51,8
	40	0	50	Extender elements (Duttine, 2005)	273	30	0	50	295	101	9	34	8,1
	40	0	50	Extender elements (Duttine, 2005)	273	50	0	50	520	80	9	15	90,4
	70	0	50	Extender elements (Duttine, 2005)	373	70	0	50	714	49	9	7	91,6

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% étant SF à DR=50% et contrainte de 50 kPa. On constate également que c_p^{DCLT} est sensible à la densité. Pour les résultats SH à la contrainte de 50 kPa, on observe l'augmentation de c_p^{DCLT} avec la densité. Les écart-types ont été moins importants pour les éprouvettes denses à des confinements importants. Cela est en accord avec les constatations d'Emerson (2005). Il relate de dispersion importantes les valeurs de c_p obtenus à faibles confinements (en surface).

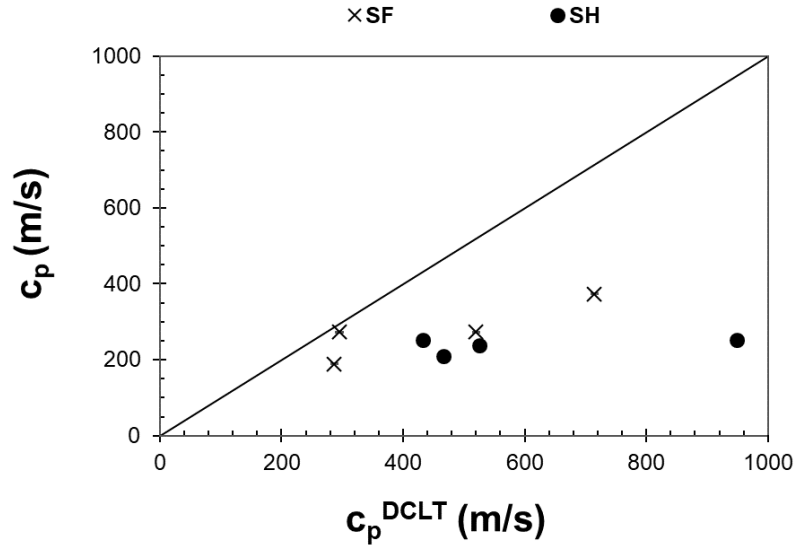


FIGURE 6 – Comparatifs pour le SF et SH

3 Bilan et perspectives

Ce document présente des comparatifs entre les résultats de vitesse d'ondes de compression rapportés dans la littérature et ceux issus 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 de 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 constater que pour ce cas de figure les valeurs de c_p^{DCLT} sont supérieures à c_p pour des conditions semblables. 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 in situ. Escobar (2015) a attribué cette différence à des perturbations dues aux raccourcissements élastiques des tiges ($L \geq 6m$). Les comparatifs présentés dans ce document permettent de constater que la différence persiste pour des essais réalisés avec les tiges d'un mètre.

Toutefois, on a pu constater que c_p^{DCLT} est sensible à la densité et au confinement des éprouvettes et que toutes les valeurs obtenues restent globalement dans la gamme attendu pour des sables sèches (Figure 3, (Cassan, 1988)).

Comme expliqué, la démarche appliquée pour déterminer c_p^{DCLT} est celle des essais de choc. Traditionnellement, les essais de choc sont réalisés en laboratoire avec des éprouvettes de petite taille. Omidvar et al. (2012); Iskander and Omidvar (2015) relatent que la caractérisation de sols à partir des essais de choc est plus complexe que pour d'autres matériaux (comme les métaux par exemple). Pour des essais de choc pour les matériaux de vitesse d'ondes plus élevés une distribution de contraintes dans l'échantillon est plus uniforme. Dans le cas de matériaux granulaires comme les sables, la vitesse de propagation n'étant pas très élevée, parfois, l'échantillon n'atteint pas une distribution uniforme de contrainte pour des chargements rapides. D'après les auteurs cela constitue un aspect essentiel pour l'application de essais de choc (Felice, 1986).

Selon Lv et al. (2019), dans le cadre des essais de choc, deux solutions sont envisagées pour minimiser ce problème : réduire l'épaisseur de l'échantillon ou modifier l'onde incidente afin d'augmenter le temps de chargement quasi-uniforme (technique de pulse-shaping).

D'ailleurs pour les matériaux peu cohésifs (comme les sables) les éprouvettes doivent être confinées avant le chargement dynamique. Souvent un tubage est utilisé afin d'assurer un confinement latérale, même si certains travaux ont montré que cela influe sur les résultats (Junyu et al., 2014; Lu et al., 2009; Song et al., 2009). D'autres travaux essaient de mettre en place un système triaxial afin de mieux étudier l'effet du confinement.

Étant donné les difficultés relatives pour les essais de choc dans les sols, il paraît pertinent d'étudier dans un premier temps l'influence de la forme de l'onde, temps de monte de l'onde (matériau et géométrie du marteau, ...). Dans un deuxième temps, l'influence de la taille de l'échantillon et des conditions aux limites afin de mieux répondre aux hypothèses initiales (déformations radiales négligeables, surface plane normale à la vitesse de propagation à l'interface sol-pointe). Le contact entre le sol et la pointe pendant la transmission de l'onde est supposé plan et perpendiculaire. Pour cela, le modèle numérique serait utile afin de mener une étude paramétrique initiale afin guider vers la solution plus économique capable de fournir des résultats attendus. La solution retenue devrait par la suite être validée expérimentalement.

Références

- Atkinson, J. H. (2000). Non-linear soil stiffness in routine design. *Geotechnique*, 50(5) :487–508.
- Aussedat, 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.
- Briaud, J.-L. (2001). INTRODUCTION TO SOIL MODULI. Technical report.
- Burland, J. B. (1989). Ninth Laurits Bjerrum Memorial Lecture : "Small is beautiful"—the stiffness of soils at small strains. *Canadian Geotechnical Journal*.
- Cassan (1988). Essai in situ des mécaniques des sols. 1 réalisation et interprétation.
- Dano, Christophe ; Hicher, P.-Y. (2002). Mesure du module de cisaillement de différents matériaux par la technique des bender elements. (January 2002).
- 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.
- Felice (1986). *THE RESPONSE OF SOIL TO IMPULSE LOADS USING THE SPLIT-HOPKINSON PRESSURE BAR TECHNIQUE*. PhD thesis, University of Utah.
- Gomes Correia, A. (2004). Características de deformabilidade dos solos que interessam à funcionalidade das estruturas.
- Hardin, B. O. (1972). Shear modulus and damping in soil : Measurement and parameter effects. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, 98(sm6) :8977.
- Iskander, M. and Omidivar, M. (2015). *RAPID PENETRATION INTO GRANULAR MEDIA*. *RAPID PENETRATION INTO GRANULAR*.
- 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 *JNGG 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 (JNGG)*, pages 1–9.
- Lv, Y., Liu, J., and Xiong, Z. (2019). One-dimensional dynamic compressive behavior of dry calcareous sand at high strain rates. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(1) :192–201.
- Meunier, J. (1974). *Contribution 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' étalonnage 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].
- Semblat, J. F. (2012). Modeling seismic wave propagation and amplification in 1D/2D/3D linear and nonlinear unbounded media. *International Journal of Geomechanics*, 11(6) :440–448.