HAL open science

Estimation de la vitesse des ondes de cisaillement Vs à partir du module pressiométrique Ménard

Eric Petitjean, Catherine Jacquard, Philippe Reiffsteck, Jean Benoit, Théo Besson

To cite this version:

Eric Petitjean, Catherine Jacquard, Philippe Reiffsteck, Jean Benoit, Théo Besson. Estimation de la vitesse des ondes de cisaillement Vs à partir du module pressiométrique Ménard. 11èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon [INSA Lyon], CFMS, CFMR, CFGI, Jun 2022, Lyon, France. hal-03720165

HAL Id: hal-03720165

https://hal.science/hal-03720165v1

Submitted on 11 Jul 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ESTIMATION DE LA VITESSE DES ONDES DE CISAILLEMENT VS A PARTIR DU MODULE PRESSIOMETRIQUE MENARD

PREDICTION OF SHEAR WAVE VELOCITY VS FROM PMT

Eric PETITJEAN[1], Catherine JACQUARD[1], Philippe REIFFSTECK[2], Jean BENOIT[3], Théo BESSON[1]
[1] *Fondasol, Avignon, France*
[2] *Université Gustave Eiffel, Marne-la-Vallée, France*
[2] *University New Hampshire, Durham, USA*

RÉSUMÉ – La vitesse des ondes de cisaillement est une propriété dynamique du sol couramment utilisée pour la réponse dynamique du site et la classification des sites pour la conception parasismique. Les résultats expérimentaux obtenus sur de nombreux sites ont permis de proposer des corrélations entre la vitesse des ondes de cisaillement V_S et le module pressiométrique Ménard (PMT). L'emploi de ces corrélations sur de nouveaux sites permet de vérifier et commenter ces corrélations et de proposer une démarche de classification des sites à partir des valeurs pressiométriques pour la conception parasismique.

ABSTRACT – Shear wave velocity is a dynamic soil property commonly used for dynamic site response and site classification for seismic design. The paper examines the correlations to obtain reliable estimates of the shear wave velocity V_S from pressuremeter testing (PMT) compared to other correlations. While the direct measurement of V_S is obviously preferable, these correlations can be useful in various circumstances. Experimental results from many international research sites and real construction projects suggest that pressuremeter predictions of V_S from the Menard modulus is reliable, and some formulas are proposed, as well as a proposal of site classification for seismic design is given.

1. Introduction

Cette communication traite des corrélations développées pour estimer la vitesse de l'onde de cisaillement V_S à partir d'essais pressiométriques (PMT). Bien qu'il soit préférable de mesurer directement V_S, ces corrélations peuvent être utiles pour la conception parasismique.

Cet article reprend les corrélations entre la vitesse de l'onde de cisaillement Vs et les mesures de module pressiométrique Ménard E_M. qui ont été présentées à la conférence de Sydney (Reiffsteck et al, 2022). Nous avons testé ces corrélations sur plusieurs projets dans lesquels étaient réalisés des essais cross hole et des essais pressiométriques.

2. Méthodes permettant de mesurer V_S

Il existe plusieurs méthodes pour mesurer in situ la vitesse des ondes de cisaillement des sols et roches. L'essai de référence est le Cross-hole : les mesures sont réalisées entre deux ou trois forages distants de quatre à huit mètres. Les vitesses des ondes de compression (V_P) et de cisaillement (V_S) sont déterminées directement entre une sonde émettrice et une sonde réceptrice situées à même profondeur dans les différents forages. Cet essai sismique sollicite le sol à un taux de déformation inférieur à 3.10^{-4} % ce qui

permet de calculer directement, à partir des mesures de V_S, le module de cisaillement G_{max} pour l'analyse du comportement dynamique des structures (Figure 1).

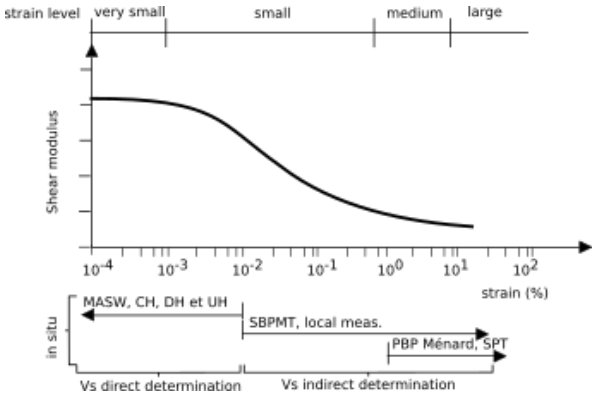

Figure 1. Gamme de déformation des différents essais.

La relation suivante issue de la théorie de l'élasticité relie G_{max} (Pa ou kg.m/s^2) à V_s (m/s) et la densité ρ (kg/m^3) :

$$G_{max} = \rho \cdot V_s^2 \quad (1)$$

De plus, le coefficient de Poisson υ peut être calculé à partir de V_s et de V_p:

$$\upsilon = \frac{V_p^2 - 2 \cdot V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (2)$$

Le module d'Young maximal peut alors être obtenu via la relation:

$$E_{max} = 2(1 + \upsilon) \cdot G_{max} \quad (3)$$

La masse volumique ρ est mesurée sur des échantillons. Sinon, elle peut être estimée entre 1700 et 2100 kg/m^3 selon la compacité du sol, et davantage pour des roches.

3. Démarche de corrélation pour obtenir Vs à partir de l'essai pressiométrique Ménard (PMT)

L'étude réalisée sur de nombreux sites de recherche internationaux et sur des projets réels en France, a permis de montrer que l'on pouvait obtenir une corrélation satisfaisante pour certains types de sols ou roches entre le module pressiométrique de Ménard E_M et la vitesse des ondes de cisaillement Vs (Reiffsteck et al, 2022). Cet article a présenté les méthodes proposées par différents auteurs pour obtenir une vitesse de cisaillement à partir de différents essais in situ (Figure 2):

- Deux relations sont décrites par Gonin et al. (1992) et Akkaya et al. (2019) ; la première corrélation relie le nombre de coups mesurés au *standard penetration test* (SPT) N_{SPT} au module pressiométrique E_M selon l'équation (4) avec des coefficients α et β correspondant à différents types de sols ; la seconde est basée sur l'équation (5) avec des coefficients c et d variant selon les auteurs.

$$N_{SPT} = \alpha \cdot p_\ell * \text{ et } N_{SPT} = \beta \cdot E_M \quad (4)$$

$$V_s = c \cdot {N_{SPT}}^d \quad (5)$$

- Ménard et Rousseau (1962) puis Semblat et Pecker (2009) ont proposé de relier E_M au module de cisaillement à faible distorsion Gmax, selon l'équation (6), où λ est un paramètre sans dimension, et ont proposé l'équation (7) en combinant (5) et (1)

$$G_{max} = \lambda \cdot E_M \quad (6)$$

$$V_s = (\rho)^{-0.5} \cdot (\lambda \cdot E_M)^{0.5} \quad (7)$$

L'article de Reiffsteck et al (2022) a permis de montrer une relation satisfaisante entre Vs et E_M en utilisant l'équation (8):

$$V_s = a \cdot E_M^b \quad (8)$$

Cette formule est applicable sur la plupart des sols. Une incertitude moyenne d'environ 20 % est aussi représentée Figure 2 sur une plage de module étendue. Pour les roches et les sols raides, les vitesses Vs estimées avec cette formule sont cependant jugées non représentatives.

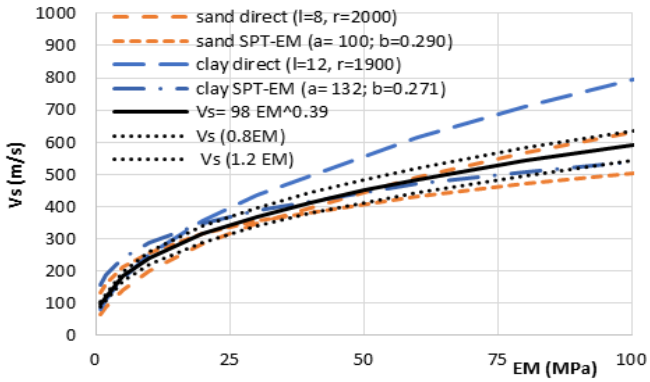

Figure 2. Extrait Reiffsteck et al, 2022. Comparaison de différentes méthodes de corrélation.

Parmi la centaine de sites combinant des mesures cross-hole et des mesures pressiométriques, l'étude présentée à Sydney s'est concentrée sur 26 sites ayant des caractéristiques géologiques pouvant être considérées comme homogènes et pour lesquelles un sondage pressiométrique distant de moins de 30 m du panneau cross-hole était disponible. Compte tenu de la relative dispersion de E_M observée au sein de la même formation lithologique, l'étude a porté sur les valeurs moyennes de E_M et de Vs pour chaque formation au lieu de considérer distinctement chaque couple E_M-Vs à même profondeur.

70 paires de valeurs (E_M moyen ; Vs moyen) ont été ainsi sélectionnées, représentant 750 paires de mesure (E_M; Vs). A partir de ces 70 couples, 5 classes de sol ont été distinguées et représentées Figure 4. Les paramètres a et b de l'équation (8) qui en découlent sont présentés Tableau 1, et les courbes correspondantes en Figure 3

Tableau 1. Coefficients de corrélation pour l'équation (4) pour 5 types de sol.

Type de terrain	E_M (MPa)	a	b	Courbe
Calcaire et craie	50 - 500	168	0,32	1
Marne	35 - 350	189	0,25	2
Gravier et sable dense	10 - 350	125	0,33	3
Sable	5 - 150	116	0,27	4
Argile	10 - 180	98	0,29	5

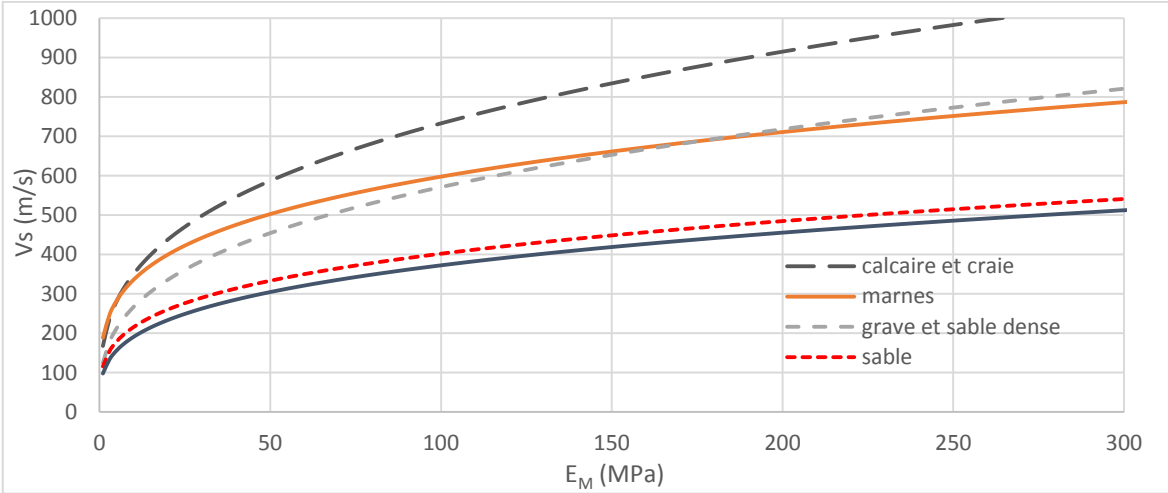

Figure 3. Courbes de corrélation issues du tableau 1.

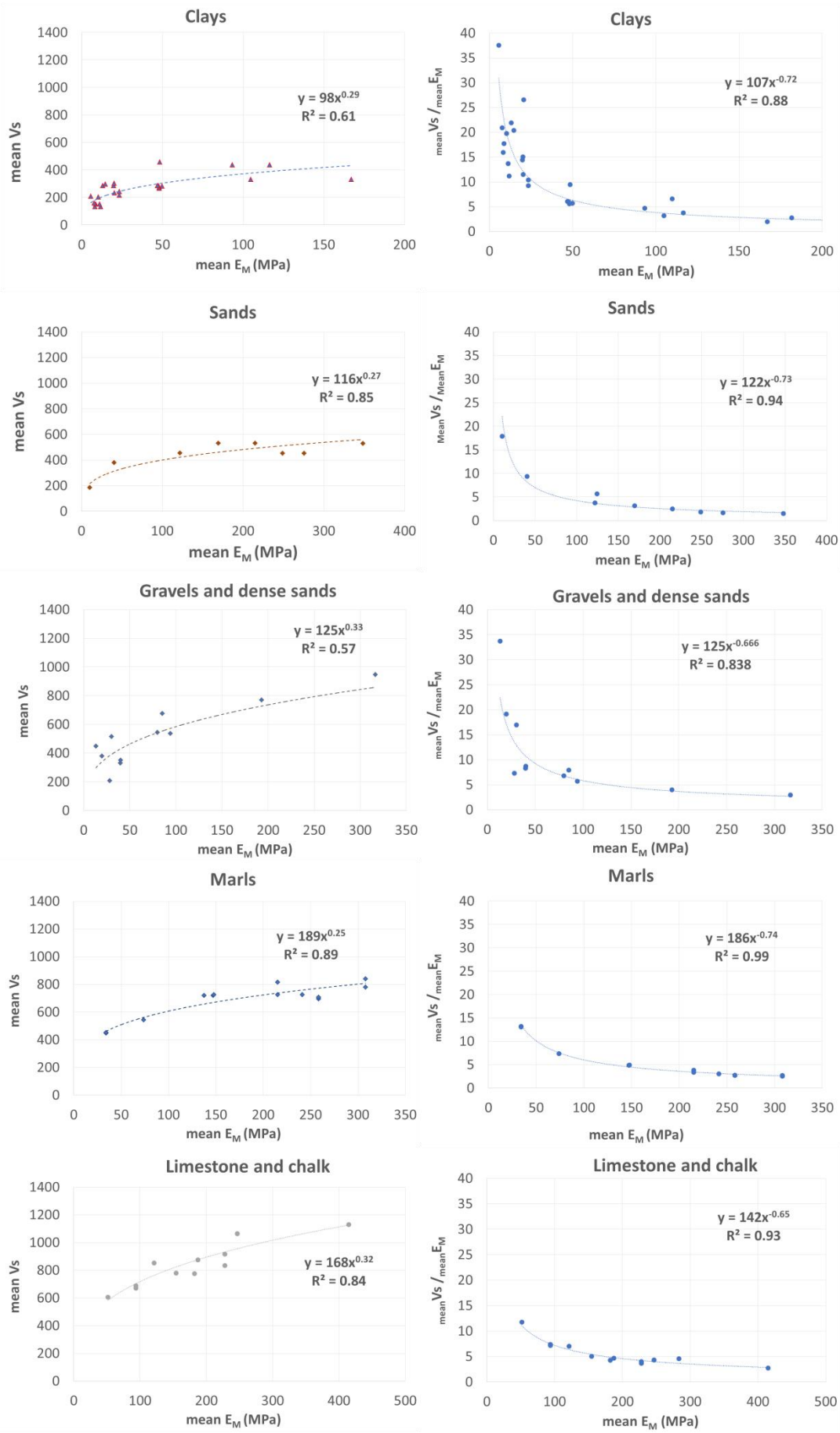

Figure 4. Mesures in-situ et courbes de corrélation pour quelques sites localisés en France (extrait Reiffsteck et al, 2022).

4. Application de la méthode sur 5 projets

4.1. Méthodologie

Nous avons cherché à vérifier l'applicabilité de ces corrélations sur de nouveaux sites pour lesquels nous disposions de mesures de vitesses d'onde de cisaillement. Nous avons ainsi considéré 4 sites (Saint-Cyr, Golbey, Marcoule, Nice) sur lesquels un essai cross-hole avait été réalisé à proximité d'un sondage pressiométrique (moins de 5m), et un site à Clermont-Ferrand avec 4 sondages pressiométrique réalisés à moins de 30m d'un essai downhole.

Le Tableau 2 présente les moyennes harmoniques de module pressiométrique E_M par couche élémentaire, ainsi que la vitesse de cisaillement Vs calculée par corrélation en considérant la nature du sol, qui est comparée à la Vs mesurée par cross-hole ou downhole, et le ratio entre les deux valeurs.

Tableau 2. Valeurs de Vs issues de 5 chantiers déduites de E_M

	Faciès lithologique	nb d'essais	E_M (MPa)	Vs calculé (m/s)	Vs mesuré (m/s)	ratio mes/calc	0.8 Vs calculé (m/s)	faciès retenu pour la Loi de corrélation
Marcoule	Grave sableuse totalité	5	66	498	422	0.85	398	Sables et graviers
	Grave sableuse triée	3	50	455	422	0.93	364	Sables et graviers
	Marnes argileuses	8	29	439	429	0.98	351	Marnes
Nice	Sables lâches	3	7.8	202	305	1.51	162	Sables
	Graves sableuses	2	12.3	286	321	1.12	229	Graves et sables denses
	Sables limono-argileux	7	14.0	237	232	0.98	190	Sables
	Graves sableuses	3	27.3	372	457	1.23	298	Graves et sables denses
Saint-Cyr	Sables graveleux et argiles sableuses i	48	19	330	380	1.15	264	Sables et graviers
	Calcaires marneux		11	344	342	0.99	275	Marnes
	Marnes argileuses		38	469	223	0.48	375	Marnes
Golbey	Grave sableuse	6	70	365	421	1.15	292	Sables
	Sables graveleux	4	250	515	574	1.11	412	Sables
	Grès altéré	3	89	550	519	0.94	440	Graves et sables denses
Clermont-Ferrand	argile sablo-graveleuse	13	14	213	173 à 301	1.11	170	Argile
	argile marneuse	5	29	260	208	0.80	208	Argile
	marne	11	162	674	544	0.81	539	Marne

4.2. Discussion des résultats

On constate une certaine dispersion sur la Figure 5 (minimum 0.48, maximum 1.51) entre les valeurs mesurées souvent plus faibles que la valeur déduite de la corrélation, même si la moyenne des ratios sur l'ensemble des 16 couches élémentaire s'établit à 1.01.

Le choix de la catégorie de sol associée à la couche élémentaire est parfois difficile à faire, compte tenu des descriptions pas nécessairement précises des sondages destructifs réalisés pour faire les essais pressiométriques. Il est donc recommandé de

disposer d'identifications précises des formations traversées, afin de proposer la corrélation la plus pertinente.

Ainsi sur Saint-Cyr, en considérant les marnes argileuses qui présentent un module pressiométrique assez faible comme des argiles, on obtient Vs= 281 m/s soit un ratio de 0.79 avec Vs mesuré, ce qui est plus satisfaisant.

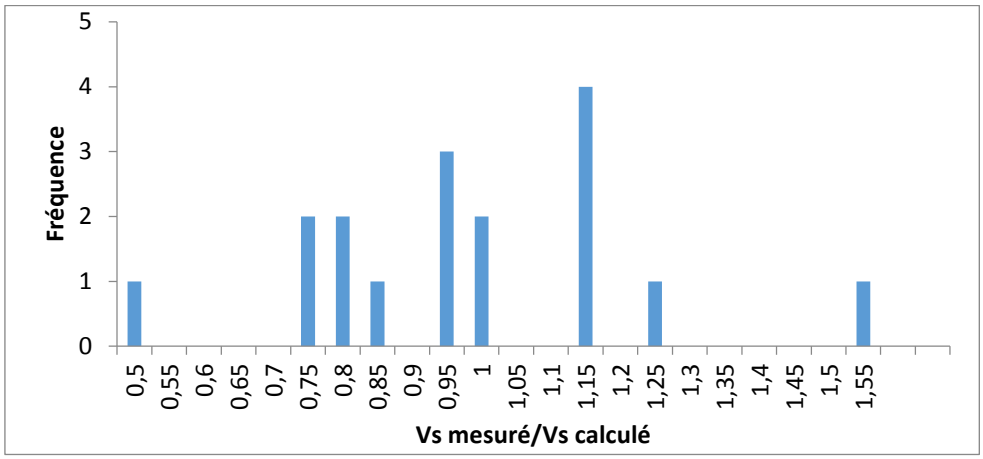

Figure 5. Histogramme du ratio Vs mesuré/ Vs calculé

Tableau 3. Classification sismique des sols selon la valeur de Vs issue de 5 chantiers

		Vs calculé (m/s)	Classe sismique	Vs mesuré (m/s)	Classe sismique	0.8 Vs calculé (m/s)	Classe sismique	tendance
Marcoule	Grave sableuse	455	B	422	B	364	C	-
	Marnes argileuses	439	B	429	B	351	C	-
Nice	Sables lâches	202	C	305	C	162	D	-
	Graves sableuses	286	C	321	C	229	C	ok
	Sables	237	C	232	C	190	C	ok
	Graves sableuses	372	C	457	B	298	C	- -
Saint-Cyr	Sables graveleux et argiles sableuses	330	C	380	B	264	C	- -
	Calcaires marneux	344	C	342	C	275	C	ok
	Marnes argileuses	469	B	223	C	375	B	+ +
Golbey	Grave sableuse	365	C	421	B	292	C	- -
	Sables graveleux	515	B	574	B	412	B	ok
	Grès altéré	550	B	519	B	440	B	ok
Clermont-Ferrand	argile sablo-graveleuse	213	C	237	C	170	D	-
	argile marneuse	260	C	208	C	208	C	ok
	marne	674	B	544	B	539	B	ok

Nous avons donné dans le Tableau 3 la classe sismique de chacune des couches élémentaires résultant de la valeur de Vs, pour la valeur déduite de E_M, pour la valeur mesurée et enfin pour 0.8 Vs déduit de E_M. On constate que dans près de la moitié des cas (7 cas sur 15), la classification reste la même quel que soit Vs ; dans 4 cas sur 15, le fait de considérer 0.8Vs calculé conduit à baisser d'une classe ; dans 3 cas sur 15 les deux valeurs Vs et 0.8Vs calculées conduisent à baisser d'une classe ; enfin dans un seul cas, les valeurs de Vs et 0.8 Vs calculé conduisent à augmenter d'une classe. L'utilisation de la formule et les coefficients proposés donnent donc des résultats satisfaisants pour obtenir une classe de sol sismique représentative.

5. Proposition d'une méthodologie

Compte tenu du résultat obtenu avec cette corrélation sur ces 5 sites, nous pouvons donc valider le principe d'obtenir une valeur de vitesse de cisaillement Vs par corrélation, avec l'équation (8) et les paramètres du Tableau 1, en utilisant une moyenne harmonique du module pressiométrique E_M pour une unité lithologique homogène donnée.

Nous proposons de retenir une valeur en fourchette entre 0.8 Vs et Vs ainsi calculée, pour l'estimation de la classe de sol sismique.

Dans le cas où cette démarche conduit à obtenir une valeur de Vs_{30} proche d'une limite de classe de sol sismique, il conviendra alors de retenir la classe de sol qui conduit au dimensionnement le plus sécuritaire de l'ouvrage ou de déterminer précisément la valeur de Vs_{30} à retenir par méthode cross-hole, down-hole ou MASW.

6. Proposition d'une classification modifiée

La Figure 6 montre une comparaison des corrélations directes E_M-V_S avec les limites de classes de sol données par l'Eurocode 8-1 (2015), en ajoutant des limites pour les valeurs de E_M, pour tout type de sol (à gauche) et uniquement pour les argiles (à droite).

On propose ainsi de faire évoluer la classification proposée dans l'Eurocode 8 avec une évolution des bornes inférieures et supérieures des valeurs de Vs associées aux classes de sol sismique en fonction du type de sol (Tableau 4).

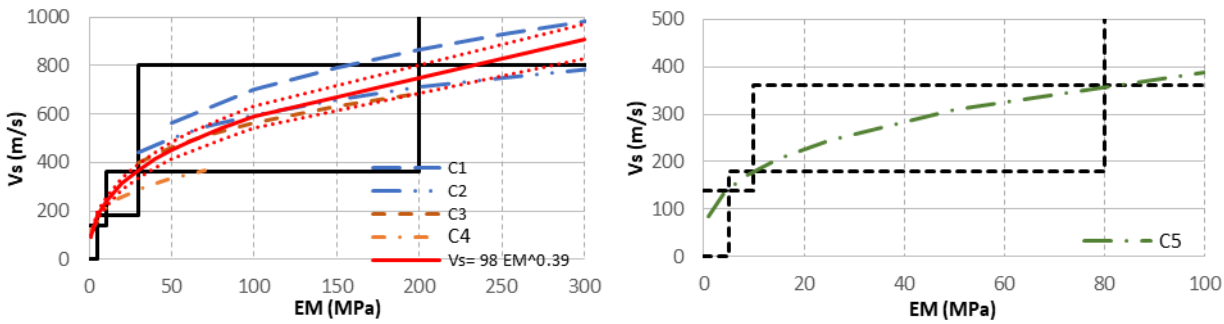

Figure 6. Comparaison entre les courbes de corrélation proposées et les intervalles définissant les différentes classes de sol selon l'EC8.

Tableau 4. Proposition de correspondance entre les caractéristiques géotechniques des sols, la gamme de Vs, et la classe de sol.

Terrain	N_{60} (ER=60%)	E_M *(MPa)*	p_{IM}* *(MPa)*	Vs *(m/s)*	Classe de sol
Roche, sol raide	-	> 150	> 5,0	> 800	A
Sable très dense, gravier	40 - 60	30 - 120	2,0 - 5,0	360 - 800	B
Sable dense, gravier	15 - 40	10 - 30	1,0 - 2,0	180 - 360	C
Sol sans cohésion de compacité moyenne	8 - 15	5 - 10	0,5 – 1,0	140 - 180	D
Sol sans cohésion très lâche	< 8	< 5	< 0,5	< 140	S1
Argile compacte	-	> 80	> 2,0	360 - 800	B
Argile rigide	-	10 - 80	1,2 - 2,0	180 - 360	C
Sol cohésif lâche à ferme	-	5 - 10	0,4 - 1,2	140 - 180	D

7. Conclusion

Cet article a démontré la possibilité d'estimer la vitesse des ondes de cisaillement par corrélation avec des modules pressiométriques, dans le but d'obtenir une classification des sols en zone sismique, lorsque des mesures directes ne sont pas disponibles.

Des paramètres de corrélation permettant d'évaluer la vitesse de cisaillement des sols Vs à partir du module pressiométrique de Ménard E_M ont été proposés et discutés pour certains types de sols. Comme toute corrélation, il y a une dispersion et il convient d'utiliser celle-ci avec prudence. Ces corrélations doivent être considérées comme des ordres de grandeur en l'absence de mesure de Vs, et leur utilisation doit prendre en compte le contexte géologique et géotechnique du site.

La démarche proposée permet une évaluation de Vs pour une estimation de la classification sismique des sols, quand des mesures *in situ* de Vs ne sont pas disponibles. Lorsque l'on se situe en limite de classe de sol, la classe retenue doit correspondre à une estimation prudente vis-à-vis du dimensionnement de l'ouvrage projeté.

Par ailleurs, de nouvelles limites sont proposées pour évaluer les classes de sols et pour compléter les bornes fixées par les autres techniques d'investigation actuellement proposées dans le cadre des règles de conception pour les structures sous sollicitation sismique issues de l'Eurocode 8.

8. Références bibliographiques

Akkaya, I., Özvan, A., & Özvan, E.E. (2019). A new empirical correlation between pressuremeter modules (EM) and shear wave velocity (Vs) for clay soils. Journal of Applied Geo-physics, 171, 103865.

Amar S., Baguelin F., Frank R. and Jezequel J.F. 1995. The adimensional pressuremeter curve in clays. The Interplay be-tween Geotech¬nical Engineering and Engineering Geology. Proc. 11th ECSMGE, Copenhagen, Danemark, DGF, Bull. 11, pp. 1.7-1.11

Gonin H., Vandangeon P. and Lafeuillade 1992, Etude sur les corrélations entre le standard penetration test et le pressiomètre (Correla¬tion study between standard penetration and pressuremeter tests) in French, Revue Française de Géotechnique N°58, pp. 67-78.

Ménard L., Rousseau J. 1962. L'évaluation des tassements, tendances nouvelles. Sols-Soils, N°1, Paris.

Semblat J.F., Pecker A. 2009 Waves and vibrations in soils : Earthquakes, Traffic, Shocks, Construction works, IUSS Press, Institute of Advanced Study of Pavia, 490 pages,

Reiffsteck P., Jacquard C., Jandel E., Petitjean E., Benoit J.(2022) ISSMGE, Sydney. Prediction of Shear Wave Velocity Vs from PMT

Eurocode 8 — Design of structures for earthquake resistance — Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings NF EN 1998-1- september 2005.