

LE DILATOMETRE SISMIQUE SDMT. UN ESSAI IN SITU MODERNE ET INNOVANT

THE SEISMIC DILATOMETER. A MODERN AND INNOVATIVE IN SITU TEST

Bertrand DUMOLARD¹, Laure MARCHAND¹, Alexandre LESAGE², Gérald GERBAUD²

¹ Techniques Porte de France, Grenoble, France

² Fimurex-Armazol, Réaumont, France

RÉSUMÉ – Le SDMT est la combinaison d'une sonde sismique et d'un test au dilatomètre plat. Cet essai *in situ* rapide et fiable est à redécouvrir en particulier dans les sols fins les plus difficiles : sable et argile compressibles, liquéfiables, consolidés ou non. Depuis fin 2009, les essais sismiques et dilatométriques sont simultanément enregistrés dépouillés et interprétés *in situ*.

ABSTRACT – Seismic Dilatometer Marchetti Test (SDMT) is a combination flat dilatometer and seismic Vs probe. These two tests are fast, polyvalent and easily reproducible. SDMT is very well-adapted for compressibility prediction, consolidation ratio or liquefaction analysis with worst fine soils. Software with *in situ* instantaneous interpretation is available for dilatometer and seismic tests since the end of 2009.

1. Introduction

A l'essai d'origine au dilatomètre plat DMT (Marchetti 1975 et 1980), a été ajouté une mesure des ondes de cisaillement (Marchetti 2008). L'ensemble nommé SDMT est maintenant largement diffusé et utilisé à travers le monde entier. L'essai DMT fait l'objet d'un fascicule de documentation (ISO, 2005), et fait partie intégrante des essais *in situ* de l'Eurocode 7 (AFNOR 2005 et 2007)

En France, après quelques tentatives concluantes, cet essai est resté jusqu'à aujourd'hui presque inconnu. Deux raisons peuvent expliquer ce retard :

- la première est la prédominance d'essais géotechniques simples de type pénétromètre dynamique (DPT) pour les ouvrages courants. Cette tendance est en déclin au profit du développement de l'usage des pénétromètres statiques (CPT). En effet sur certains sites, les résultats du DPT et du carottier battu (SPT) sont uniquement indicatifs et ce sont les analyses de volume (géophysique) et visuelles (géologie et hydrogéologie) et dans certains cas les essais en laboratoire qui permettent au géologue-géotechnicien expérimenté de conclure valablement.

- la deuxième est le développement depuis les années 1960 du pressiomètre de Louis MENARD (PMT) qui apporte comme le DMT une réponse sur la déformation des sols.

- dans ce contexte, le SDMT apparaît comme un essai complémentaire du pressiomètre et des pénétromètres statiques, dans tous les sols fins lorsqu'ils sont de structure fragile et hétérogènes, qu'ils soient sous-consolidés, normalement ou surconsolidés, à risque de glissement ou de liquéfaction.

2. SDMT : matériel et mesures



Figure 1. Vue des principaux éléments du SDMT. En bas la dernière tige avec la sonde S à gauche, la lame de la sonde DMT et sa membrane déformable à droite

L'essai au SDMT comprend plusieurs mesures distinctes : la mesure de vitesse des ondes de cisaillement V_s (S) et les mesures au dilatomètre plat (DMT).

2.1. Mesures sismiques (S)

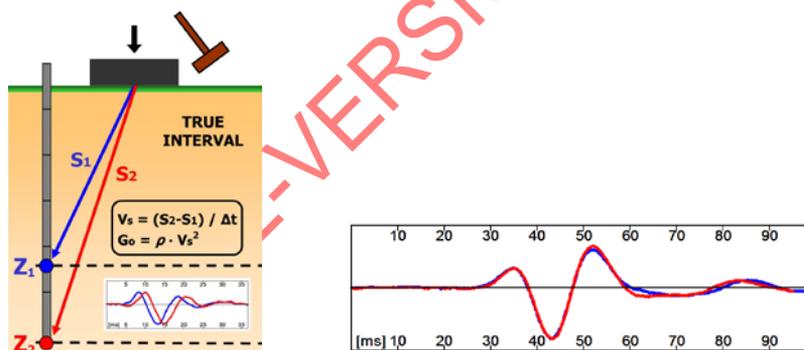


Figure 2. Principe de la mesure en mode S avant-après rephasage.

Le signal source est une onde de cisaillement appliquée en-tête et très proche du train de tiges. Il est transmis au sol à l'aide d'un marteau frappant une cale elle-même plaquée au sol par la masse de l'engin porteur.

Les mesures géophysiques de vitesse des ondes sismiques sont obtenues par les signaux enregistrés à la base du train de tiges dans la sonde S. celle-ci est constituée de deux géophones et de deux inclinomètres distants de 50 cm et placés sur la tige immédiatement au-dessus de la sonde DMT (figure 1).

Le transfert à la surface puis le traitement par un logiciel intégré sont pris en charge automatiquement, sous contrôle de l'opérateur. Toutes les données de l'essai sont enregistrées, pour permettre l'édition des résultats et un post-traitement si nécessaire.

2.2. Mesures au dilatomètre plat (DMT)

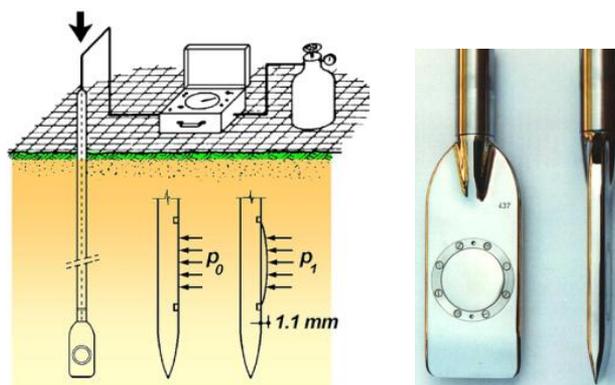


Figure 3. Principe de la mesure DMT – Détail de la lame et de la membrane

Les mesures électropneumatiques au dilatomètre plat (DMT) agissent par chargement latéral rapide des trois phases d'un sol : grains, air et eau. La sonde est constituée d'une lame en acier descendue par fonçage à la profondeur de l'essai, avec un espacement usuel vertical entre deux essais de 20 cm. A la surface d'un côté de la lame affleure une membrane métallique souple de 60 mm de diamètre.

La membrane est maintenue par vis à son pourtour qui est fixe. Arrêtée à la profondeur d'essai, la membrane est déformée horizontalement par mise en pression d'azote dans l'espace lame-membrane, et cette pression mobilise la réaction du sol qui s'oppose à la déformation de la membrane.

Les mesures de pression sont lues en surface sur deux manomètres et enregistrées par un capteur, reliés à la sonde par une tubulure électropneumatique. Un fil électrique inclus dans la tubulure pour l'azote transmet le signal de coupure du circuit lorsque la membrane se décolle en son centre, la membrane faisant fonction d'interrupteur.

Le début de la mise en pression intervient immédiatement après l'arrêt de la sonde. La lecture « A » est enregistrée au décollement du centre de la membrane. Elle indique que la pression d'azote compense la contrainte extérieure horizontale appliquée par le sol, après refoulement de part et d'autre au fonçage de la lame.

La pression d'azote est augmentée régulièrement jusqu'à provoquer un déplacement du centre de la membrane de 1,1 mm (lecture « B »). A ce moment, le contact électrique est rétabli par une butée. L'opérateur interrompt immédiatement la mise en pression au signal et purge le circuit d'azote.

Une troisième lecture « C » peut être prise avec une purge progressive de la membrane jusqu'à revenir au contact à sa position au décollement. La lecture C corrigée suit la droite hydrostatique et correspond à la pression interstitielle dans les sables drainés. Par contre elle donne une valeur de pression d'équilibre décalée de la droite hydrostatique dans les sols partiellement drainés.

Auparavant, les lectures A et B ont été réalisées à l'air libre pour mesurer l'inertie propre de la membrane. La membrane agit uniquement en séparateur neutre entre la pression d'azote et la pression du sol.

Les lectures sont simultanément enregistrées, ce qui permet à l'opérateur de visualiser immédiatement l'interprétation, avec un gain de temps et une fiabilité accrue par rapport au même essai retranscrit manuellement.

3. Paramètres mesurés et déduits de l'essai SDMT

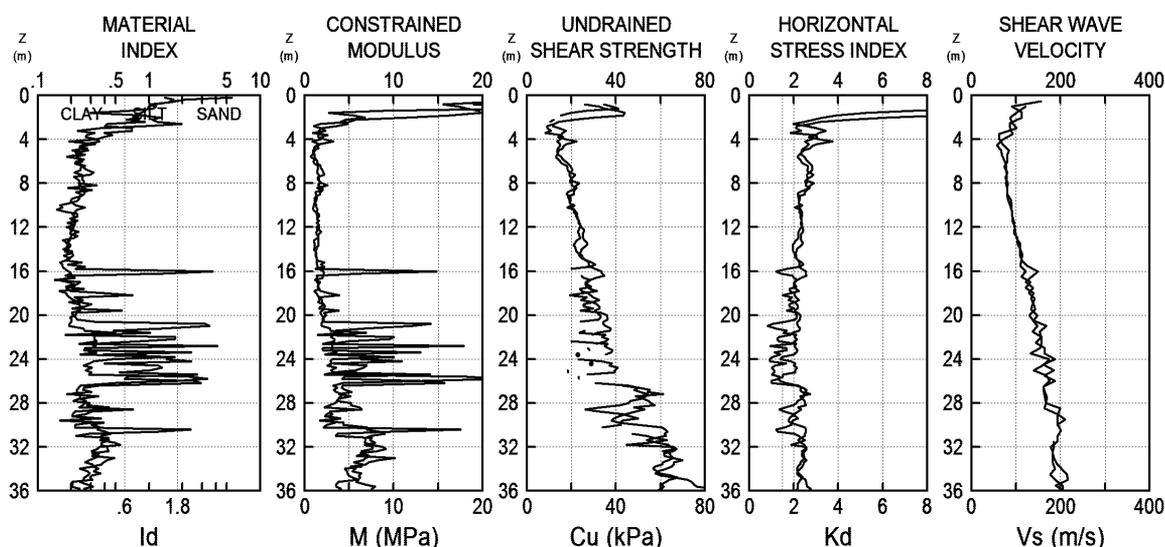


Figure 4. Deux sondages SDMT dans les argiles de Fiumicino (Italie)

Les valeurs corrigées p_0 , p_1 et p_2 sont obtenues à partir de la combinaison des lectures A, B à l'air libre, et des lectures A, B et C à la profondeur de l'essai.

Le paramètre direct, non utilisable isolément, est le module dilatométrique établi à partir de la théorie de l'élasticité pour la géométrie de la membrane et un déplacement imposé au centre de 1.1 mm :

$$E_{DMT} = 34,7(p_1 - p_0) \quad (1)$$

Avec la pression interstitielle u_0 il est possible de calculer un indice dilatométrique du matériau :

$$I_{DMT} = \frac{(p_1 - p_0)}{(p_0 - u_0)} \quad (2)$$

Cet indice permet de classer le sol en quatre familles : vase ou tourbe - argile - limon - sable. Il s'agit ici d'un critère représentatif d'une moyenne granulométrique liée au comportement : un « limon » peut être un mélange d'argile et de sable.

Connaissant u_0 et une estimation (ou une mesure) de la densité en place des matériaux testés, il est déterminé un coefficient de contrainte horizontale dilatométrique :

$$K_{DMT} = \frac{(p_0 - u_0)}{\sigma'_{v0}} \quad (3)$$

Sont obtenus par corrélations à partir de ces trois paramètres principaux :

- le poids volumique et un module d'élasticité vertical drainé M_{DMT} (figure 4, Marchetti 2001). Ce module semi-empirique est obtenu à partir de E_{DMT} multiplié par un coefficient fonction de I_{DMT} et K_{DMT}

- dans les sables avec $I_{DMT} > 1.8$, le paramètre complémentaire est l'angle de frottement fonction de K_{DMT} et de u_0 .

Dans les argiles avec $I_{DMT} < 1.2$, les paramètres complémentaires obtenus à partir de K_D sont le coefficient des terres au repos K_0 , le taux de surconsolidation OCR, la cohésion non drainée c_u .

4. Limites pour l'utilisation du SDMT

C'est principalement la lame du DMT qui détermine les limites de l'utilisation du SDMT, la sonde sismique étant incorporée dans le train de tiges.

Le SDMT est principalement utilisé comme le CPT dans les sables, limons et argiles pour lesquels les grains sont très inférieurs au diamètre de la membrane.

La résolution de l'essai est élevée même dans les cas de sols pratiquement sans consistance : vases sous-consolidées, tourbes, tufs, craies altérées, etc.

Le SDMT peut traverser des bancs graveleux ou indurés selon la capacité de l'engin porteur. La lame supporte une poussée de 250 kN. La sonde DMT seule accepte un battage dynamique de type SPT ou DPSH-B (64 Kg, chute libre de 75 cm), le fonçage à 2cm/s est préférable pour le meilleur contact membrane-sol.

Le SDMT est adaptable à toutes les machines utilisées en essais in situ :

- les plus adaptés sont les engins porteurs pour sondes CPT type 200 kN,
- les machines de forage sur camion ou chenillard permettent de réaliser des avant-trous tubés par exemple dans les remblais,
- les pénétromètres statiques légers ancrés pour les sols les moins raides
- en prospection off-shore, à toute profondeur, à partir d'une plate-forme autoélevatrice, d'une barge, d'un bateau équipé de mât de forage ou sur un bâti CPT descendu au fond de l'eau. L'intérêt du SDMT réside dans une mesure sonde à l'arrêt, indépendante des mouvements en surface.

Pour un aperçu des possibilités du SDMT, les plages de mesures sont :

- pour la cohésion non drainée c_u de 2 kPa (argile) à 1200 kPa (marne)
- pour le module dilatométrique M_{DMT} de 0,5 MPa à 400 MPa
- pratiquement non limitée en V_s

5. Quelques applications spécifiques du SDMT

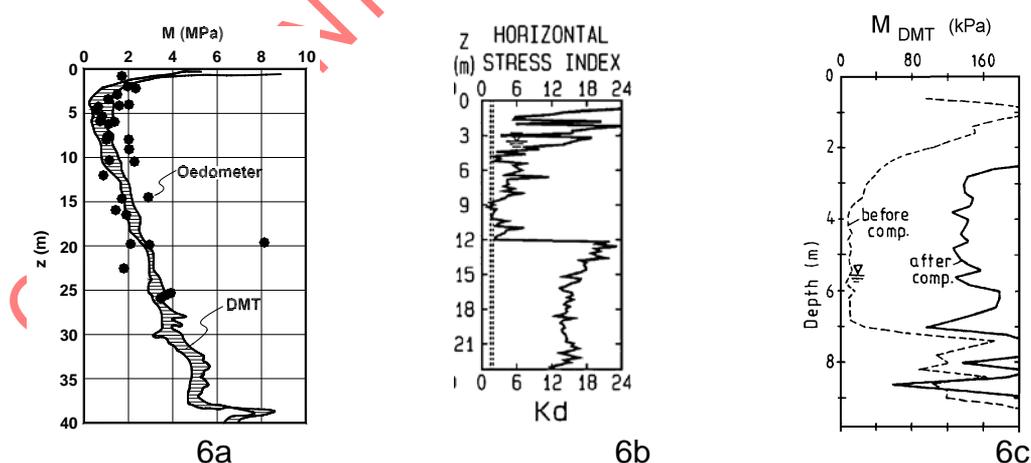


Figure 6. a : comparaison des modules oedomètre-DMT, b: surface de glissement active ou ancienne lorsque $K_{DMT} \approx 2$; c : module M_{DMT} avant et après amélioration

Au-delà de son usage classique pour la caractérisation géotechnique des sites, le SDMT est particulièrement pertinent pour les applications suivantes :

- l'utilisation du module de déformation M_{DMT} dans les applications de la méthode des tranches de Boussinesq (figure 6a, Marchetti 2001 d'après Lacasse et al.1986)
- la mise en évidence de surfaces de glissement actives ou anciennes en stabilité des pentes lorsque la valeur de K_D est autour de 2 (figure 6b, Marchetti 2001),
- des prévisions de tassement plus réalistes ont été obtenues en renforcement des sols par exemple après vibro-compaction dans les sables. Le DMT apparaît dans ce cas plus sensible que le CPT (figure 6c, Marchetti 2001 d'après Van Impe et al. 1994),
- l'analyse du potentiel de liquéfaction des sables, et de l'influence de l'effet de l'âge des dépôts, à partir de K_{DMT} pour obtenir le taux de résistance cyclique CRR (figure 7a, Monaco 2007), à comparer avec les corrections nécessaires pour CRR-Vs, CRR-qc-friction ratio et CRR-SPT (Youd 2001).
- la mesure du module de cisailment dans la partie la plus sensible de la courbe G-gamma (figure 7b, sols normalement consolidés en bas, surconsolidés en haut, Marchetti 2008)

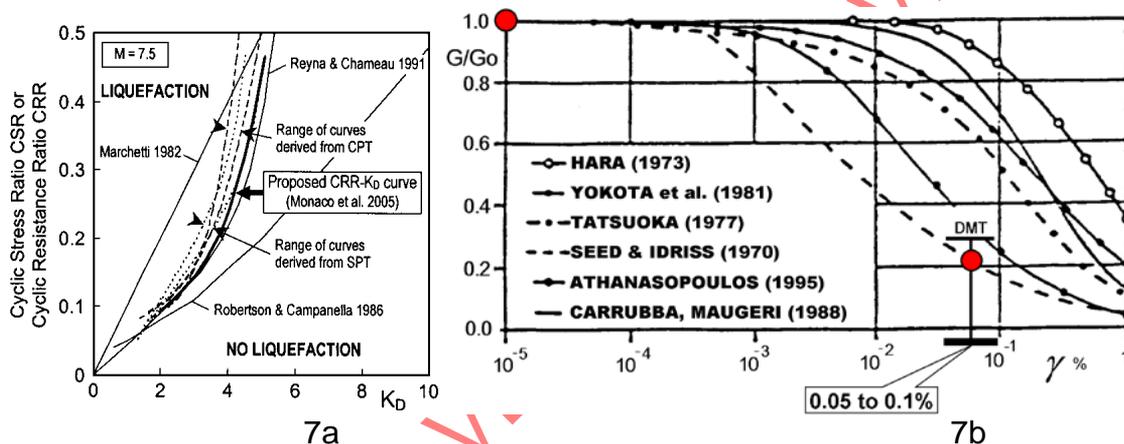


Figure 7. a : courbes CRR - K_{DMT} , b : l'essai DMT dans la courbe G-gamma,

6. Déformation préalable à la mesure

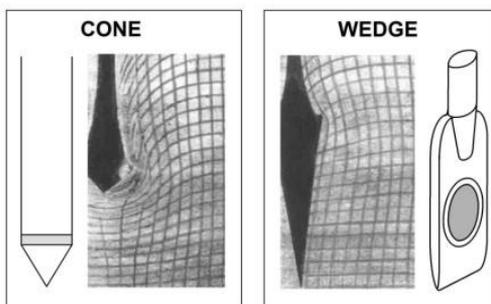


Figure 8. Distorsion au passage du cône (CPT) et de la lame (DMT)

Les représentations schématiques de la figure 8 (Marchetti 2001 d'après Baligh 1975) montrent l'influence des modes de mise en place dans le cas d'une sonde CPT et d'une sonde DMT.

- Avec le cône CPT le refoulement provoque la rupture et la mesure est effectuée à une vitesse de 2 cm/s, avec augmentation de la pression interstitielle en présence d'eau dans les vides du sol.

- La lame du DMT découpe le sol et le repousse de part et d'autre à la même vitesse que le cône du CPT (1 à 3 cm/s). La déformation apparaît moindre, l'augmentation de pression interstitielle également.

Le déplacement de la membrane, lame à l'arrêt, correspond à un essai de chargement et donne un module d'élasticité, ce qui est plus approprié pour les prévisions des tassements.

- En mode SDMT, le contact permanent contre le sol de la tige apporte une meilleure qualité du signal transmis aux géophones.

7. Prévision des tassements

Trente années de tests ont montré que le DMT apporte une qualité et une finesse d'analyse du module vertical équivalentes aux autres essais in situ.

Dans le cas des sols lâches ou hétérogènes, les essais en laboratoire deviennent inadaptés, et les résultats sur sols reconstitués s'éloignent de la réalité de la structure complexe des sols. Des méthodes à moindre remaniement (par congélation) permettent de conserver au mieux la structure du sol en place et sans être vraiment idéales, elles sont réservées par leur coût à des ouvrages exceptionnels.

Les avantages objectifs avancés par les auteurs durant ces trente années sont :

- le remaniement moindre du sol au contact avec la membrane du DMT,
- la pertinence et l'originalité du paramètre K_{DMT} qui traduit la réaction de l'histoire et de la structure intrinsèque du sol et de son histoire
- un volume testé proche de ce qui est obtenu en laboratoire, avec des mesures multipliées représentatives en sol homogène comme en dépôts très hétérogènes,

8. Conclusion

Depuis les sols lâches les plus difficiles à tester (in situ comme au laboratoire) jusqu'aux roches tendres, les avantages du SDMT sont :

- une mesure fiable, répétitive et un profil presque continu de résistance du sol associé à un module de déformation comme cela est recherché par exemple dans les essais de chargement de pointe au CPT (Borel 2006).
- des caractéristiques fiables et des corrélations semi-empiriques éprouvées,
- un enregistrement et un traitement in situ et en temps réel des mesures,
- des tests géophysiques et dilatométriques indépendants et un pas de mesure adaptable à chaque problème posé, la possibilité de réaliser différents protocoles additionnels et complémentaires des lectures A et B (lecture C, lecture DMT-A),
- la réduction du facteur humain pour les mesures comme pour leur interprétation,
- la rapidité de formation au matériel et au protocole de mesure pour les opérateurs on-shore et off-shore, pratiquement quelles que soit leurs compétences préalables et leur matériel de sondage, de forage ou de carottage,
- des paramètres V_s et DMT repris dans les méthodes d'essais *in situ* et les classifications de l'Eurocode 7.

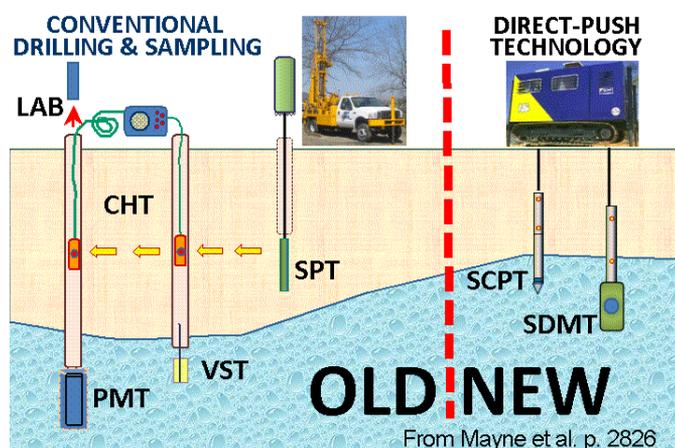


Figure 9. SDMT : un essai multicritère moderne (Mayne 2009)

Le SDMT est en cours d'expérimentation sur des sites destinés à la construction en France et les résultats permettent d'affirmer qu'il mérite de prendre sa place dans la catégorie des essais polyvalents, rapides et indispensables à l'avenir d'une ingénierie géotechnique de qualité (figure 9).

9. Références bibliographiques

- Borel, S., Reiffsteck, P. (2006) Caractérisation de la déformabilité des sols au moyen d'essais en place. LCPC, pp 106-121
- ISO/TS 22476-11 (2005) Reconnaissance et essais géotechniques — Essais en place — Partie 11: Essai au dilatomètre plat.
- Marchetti, S. (1975). A new in situ test for the measurement of horizontal soil deformability. Proc. Conf. on "In Situ Measurement of Soil Properties", ASCE Spec. Conf., Raleigh, Vol. 2: 255-259.
- Marchetti, S. (1980) In situ test by flat dilatometer Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proc. ASCE, Vol. 106, N. GT3, pp 299-321.
- Marchetti, S., Monaco, P., Totani, G., Calabrese, M. (2001) The flat dilatometer test (DMT) in soil investigations, ISSMGE TC16 Report Bali: Proc. Insitu, 41 pages.
- Marchetti, S., Monaco, P., Totani, G., Marchetti, D. (2008). In Situ Tests by Seismic Dilatometer (SDMT). In J.E. Laier, D.K. Crapps & M.H. Hussein (eds), *From Research to Practice in Geotechnical Engineering*, ASCE Geotech. Spec. Publ. No. 180 pp 292-311.
- Monaco, P., Marchetti, S. (2007) "Evaluating Liquefaction Potential by Seismic Dilatometer (SDMT) accounting for Aging" Proc. 4th Intern. Conf. on Earthquake Geotech. Eng. Thessaloniki.
- Monaco, P., Marchetti, S., Totani, G, Marchetti, D. (2009) "Interrelationship between Small Strain Modulus G_0 and Operative Modulus". IS-Tokyo 2009. International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering.
- Mayne, P. W., Liao, T. (2004) CPT-DMT interrelationship in Piedmont residuum, Proc. 2nd Int. Conf. on Site Characterisation ISC'2, Porto, 1, 345-350
- Mayne, P. W., Coop, M. R., Springman, M., S., Huang, A.-B., Zornberg, J. G., (2009) Proc. of the 17th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Alexandria, Vol. 4, 2777-2872
- NF EN 1997-1 (2005) Eurocode 7 : Calcul géotechnique - Partie 1 : Règles générales, AFNOR
- NF EN 1997-2 (2007) Eurocode 7 : Calcul géotechnique - Partie 2 : Reconnaissance des terrains et essais, AFNOR
- Youd, T.L., and Idriss, I.M. (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*, ASCE, 127(4), 297-313