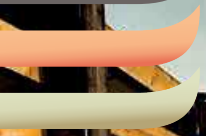


g é o t e c h n i q u e , f o r a g e e t f o n d a t i o n s

SOLSCOPE

MEG



CHANTIERS À CREUSER

EUROMÉDITERRANÉE VOIT GRAND POUR SON
BASSIN DE RÉTENTION

page 86

PROJET D'AGRANDISSEMENT SUR LE PORT
VAUBAN D'ANTIBES

page 90

DOSSIER

TRAVAUX SOUTERRAINS

L'ART CACHÉ DE L'INGÉNIEUR :
LE MONDE SOUTERRAIN

PAGE 38

ACTUALITÉS

Il était une fois... Solscope

page 22

Les référentiels évoluent :
quelles sont les nouveautés ?

Page 32

Caractérisation du risque de liquéfaction à l'aide des pénétromètres dynamiques à énergie variable.

Liquéfaction des sols et évaluation *in situ* du risque

Le phénomène de liquéfaction concerne certaines formations géologiques définies par leur nature (sables, limons, vases), granulométrie (uniforme, de 0,05 à 2 mm) ; cohésion (plasticité faible), densité (lâche et moyenne) et degré de saturation (saturée). Généralement ce phénomène a lieu dans des sols sableux non cohésifs et saturés ; mais aussi dans des sables moyennement grossiers, des limons alluvionnaires, des cendres, des résidus miniers... qui peuvent former des dépôts peu denses et instables, particulièrement si ceux-ci présentent une granulométrie uniforme et des particules de forme arrondies. La liquéfaction se produit principalement dans les sols proches de la surface ($z < 15\text{m}$) et rarement dans des couches plus profondes. La plupart des cas recensés dans la littérature concernent les 10 premiers mètres de profondeur.



Essais de contrôle pour la vérification du potentiel de liquéfaction au pénétromètre dynamique à énergie variable.

La liquéfaction des sols est associée principalement à l'action sismique (tremblement de terre), mais elle peut se produire aussi quand des actions quasi statiques (excavations, effet de la houle...) ou des actions dynamiques (explosions, vibrations...) affectent la stabilité statique du sol et de l'ouvrage. Cela conduit à une augmentation des pressions interstitielles jusqu'à annuler complètement les contraintes de confinement et, par conséquent, la résistance au cisaillement du sol, entraînant que celui-ci se comporte comme un fluide.

Les conséquences les plus fréquentes d'une défaillance par liquéfaction des sols sont ; (a) : perte de la résistance au cisaillement ; (b) : tassement total ou différentiel ; (c) : écoulement du matériau liquéfié ; et (d) : ondulations du terrain. La déconsolidation brutale du sol post-liquéfaction se traduit par la destruction du sol, rendant particulièrement

instables les constructions reposant sur ces formations. Dans le domaine du génie civil, les problèmes entraînés par la liquéfaction de sols peuvent également affecter des ouvrages divers ; des bâtiments, des ouvrages en terre, des ouvrages souterrains comme des réseaux de gaz ou d'eau, etc.

La liquéfaction des sols est ainsi l'un des phénomènes les plus destructeurs et les conséquences peuvent être désastreuses pour les structures, l'environnement, l'économie et la population. Les dégâts et l'impact économique sont ainsi très importants.

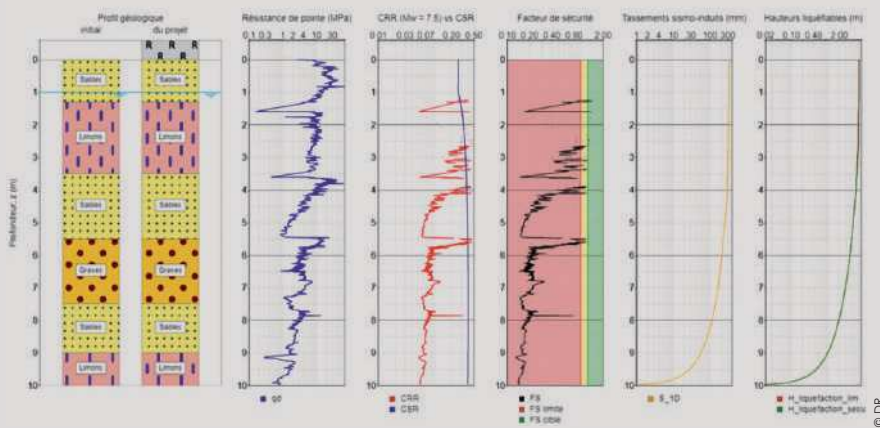
ÉVALUATION *IN SITU* DU POTENTIEL À LA LIQUÉFACTION

C'est seulement à partir des années 1960, à la suite d'importants séismes ayant secoué Niigata (Japon) et Prince William Sound (Alaska) et entraîné des

dégâts dévastateurs liés en grande partie à la liquéfaction de sols, que les ingénieurs et chercheurs se sont consacrés à l'étude de ce phénomène. Ceci pour mieux le comprendre, mais aussi pour le quantifier et bâtir des méthodes d'ingénierie permettant d'évaluer le potentiel d'un sol à liquéfier.

Le potentiel de liquéfaction des sols n'est rien d'autre que la résistance qu'oppose le sol à se liquéfier. Ils existent 3 principales méthodes pour quantifier le risque à la liquéfaction des sols : (a) : à partir d'essais *in situ* ; (b) : à partir d'essais de laboratoire ; et (c) : celles basées sur la modélisation numérique.

Au vu de la difficulté d'obtenir *in situ* des échantillons de sol sableux représentatifs et peu perturbés, l'évaluation du potentiel à la liquéfaction des sols à partir d'essais *in situ* devient une étape importante et nécessaire dans le cadre de l'étude de la susceptibilité sismique



Évaluation du potentiel à la liquéfaction et détermination du facteur de sécurité à partir des mesures au pénétromètre dynamique à énergie variable - Cas des piles de lixiviation au Chili (source : Application WebSprint - Module pour l'évaluation du risque à la liquéfaction).

d'un site ou d'un ouvrage.

Pour répondre à ce besoin, différentes méthodes pour l'évaluation du risque à la liquéfaction ont été développées. La plupart s'appuient sur l'exécution des essais de pénétration dynamique ou statique. Ces méthodes ont été développées depuis plusieurs d'années sur la base de résultats empiriques obtenus sur des sols de sites ayant liquéfié ou en laboratoire. Elles sont presque toutes fondées sur les travaux réalisés initialement par Seed et Idriss en 1971. Cette méthode, dite « méthode simplifiée », est recommandée internationalement par le MCEER (anciennement NCEER ; National Center for Earthquake Engineering Research) et en France par le cahier technique n°45 de l'AFPS, qui représente encore l'état de l'art en vigueur.

Le principe de la méthode de Seed est très simple ; elle consiste à calculer successivement les rapports de cisaillement cyclique CSR (Cyclic Stress Ratio) et de la résistance cyclique CRR (Cyclic Resistance Ratio). Un coefficient de sécurité vis-à-vis du risque de liquéfaction FSL correspond au rapport entre ces deux grandeurs.

La détermination de la valeur du CSR dépend essentiellement des caractéristiques sismiques, géographiques, géologiques, profondeur de la nappe et de la nature du projet. Sa détermination ne relève d'aucune difficulté pour l'ingénieur. La détermination du CRR peut se faire en considérant les résultats de différents essais *in situ* ; SPT, CPT, CPTu, DPT et Vs. Les méthodes d'analyse les plus développées sont basées sur le SPT et le CPT/CPTu. Néanmoins, dans la pratique il est toujours recommandé d'utiliser plusieurs méthodes d'analyse et de vérifier les résultats afin d'obtenir une évaluation précise et fiable du potentiel de liquéfaction. Bien que la démarche

générale pour la détermination du CRR à partir d'essais *in situ* soit presque la même, leur implémentation n'est pas une tâche aisée pour les ingénieurs. Très peu de logiciels intègrent toute ces méthodes d'analyse.

En outre, une des grandes problématiques que l'ingénieur doit affronter est le fait de disposer de mesures *in situ* de qualité, en grande quantité et avec une résolution verticale et spatiale suffisante lui permettant d'alimenter ces méthodes d'analyse tout en évaluant l'aléa général du site. En effet, souvent les sites d'étude concernent des zones où l'accès est difficile et les conditions de terrain ou le budget alloué aux études géotechniques est restrictif, ce qui limite l'application des méthodes conventionnelles (SPT ou CPT).

C'est pourquoi la disponibilité de méthodes alternatives pour l'analyse du potentiel de liquéfaction *in situ*, permettant une analyse plus précise et complémentaire aux techniques traditionnellement utilisées, apparaît nécessaire.

Depuis environ 20 ans déjà, à Clermont-Ferrand, différents travaux ont été réalisés afin de proposer des méthodes pour l'évaluation du potentiel de liquéfaction. Elles sont basées sur les données issues du pénétromètre dynamique français à énergie variable P.A.N.D.A (pénétromètre autonome numérique dynamique) et ont été développées au laboratoire, mais aussi sur le terrain.

LES PÉNÉTRIMÈTRES DYNAMIQUES FRANÇAIS À ÉNERGIE VARIABLE

Le principe et le concept du pénétromètre dynamique à énergie variable P.A.N.D.A est une invention française. À l'heure actuelle, on compte plus de 3200 appareils dans 93 pays différents. Créé en France en 1989, l'idée

originale a été de concevoir un pénétromètre dynamique instrumenté, à faible coût, léger, mais avec une puissance de pénétration suffisante pour sonder la plupart des sols de surface. Le battage est réalisé manuellement permettant ainsi d'adapter l'intensité de l'impact en fonction de la compacité des sols rencontrés en profondeur. Actuellement, plusieurs versions de l'appareil ont été développées, fournissant a minima la valeur de la résistance à la pénétration QD. Dans la version la plus aboutie de l'appareil, des capteurs supplémentaires ont été installés afin de déterminer la vitesse d'onde de cisaillement du sol, le module de déformation et d'autres grandeurs.

Plus récemment, le procédé de mesure du P.A.N.D.A a été appliqué au DPSH (NF EN ISO 22476-2) afin de concevoir le premier pénétromètre dynamique lourd à énergie variable servo-assisté par ordinateur ; le Grizzly-EV. Il s'agit d'un pénétromètre monté sur chenilles et équipé de différents capteurs permettant l'automatisation des mesures, l'adaptation automatiquement asservie de l'énergie de battage appliquée avec 4 hauteurs de chute qui correspondent aux modes DPL, DPM, DPH et DPSH de la norme NF EN ISO 22476-2. Il permet également de réaliser des essais SPT et une instrumentation supplémentaire permet de mesurer en temps réel l'énergie transmise au train de tiges à chaque impact et de déterminer d'autres paramètres du sol.

La technique du pénétromètre dynamique français à énergie variable présente un intérêt majeur pour les études du potentiel de liquéfaction *in situ*. Le pouvoir de pénétration, la simplicité, le coût et le temps de l'essai, la facilité de le déployer dans la plupart des configurations où l'opérateur peut accéder, l'instrumentation et les logiciels post-traitements associés et surtout la finesse de la mesure en profondeur en font un outil très adapté pour l'identification des couches liquéfiables.

Différentes méthodes d'analyse ont été proposées afin d'évaluer le potentiel de liquéfaction. Elles s'appuient principalement sur les méthodes proposées par (Seed, 1971 ; Seed and Idriss, 1986). Elles nécessitent principalement la connaissance de la résistance du sol (QD) et de la quantité de fines (passant le 80 μ m). D'autres méthodes spécifiques ont été également développées pour l'auscultation des barrages en France (Lepetit, 2002) et des tailings dams au Chili (Villavicencio, 2009). Plus récemment, des études au laboratoire, en chambre d'étalonnage ont permis d'établir le lien entre la résistance ●●●

••• de pointe QD du P.A.N.D.A, l'indice de densité (ID) et le CRR (López Retamales, 2022; Teyssier *et al.*, 2022).

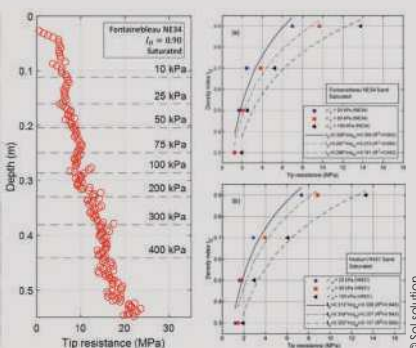
ÉTUDE EN CHAMBRE D'ÉTALONNAGE KO

Dans le cadre du programme FUI-24, et au sein du projet EMeRG3r (élaboration des méthodes de reconnaissances géotechniques de 3^e génération) qui a associé différents partenaires (université Gustave-Eiffel, laboratoire Navier (École des Ponts ParisTech), Fondasol, CIO Systems et Sol Solution) une méthode d'évaluation du potentiel de liquéfaction a été proposée. Une centaine d'essais P.A.N.D.A ont été réalisés sur de spécimens de sables d'Hostun HN31 et de Fontainebleau NE34 dans une chambre d'étalonnage KO en faisant varier l'indice de densité, la contrainte de confinement verticale et la teneur en eau.

Des essais triaxiaux cycliques pour évaluer les propriétés de liquéfaction des deux sables ont été aussi effectués.



Essais au laboratoire en chambre d'étalonnage Ko (ENPC, Laboratoire Navier) dans le cadre des études pour le développement d'une méthodologie pour l'évaluation du potentiel à la liquéfaction.



Essais au laboratoire en chambre d'étalonnage Ko (ENPC, Laboratoire Navier) résultats obtenus pour un sable de Fontainebleau et Hostun en faisant varier la contrainte verticale, l'indice de densité et la saturation des éprouvettes.

Les résultats obtenus permettent de conclure que la méthode, basée sur l'exécution d'essais de pénétration

dynamique d'énergie variable P.A.N.D.A, est capable d'évaluer les propriétés de liquéfaction des sables.

APPLICATION AUX TAILINGS DAMS AU CHILI

Avec presque 40 % de la production mondiale, le Chili est actuellement le premier producteur de cuivre au monde. Cette activité génère des quantités astronomiques de résidus (tailings) ayant une granulométrie quasi uniforme (0/1 mm), avec une faible cohésion et avec une teneur en eau élevée. Pour stocker ces résidus, des barrages dits « *tailings dams* » sont édifiés. Il s'agit de structures, construites avec ces mêmes résidus, de très grandes dimensions comme la digue du réservoir de El Mauro, qui mesure près de 300 m de hauteur, 10 km de longueur et retient 1,7 million de m³ de résidus miniers compactés. À l'heure actuelle, on y recense presque 1000 barrages miniers dont plus de 80 % sont inactifs ou abandonnés.

Le Chili, est de plus, le pays le plus sismique du monde, la terre y tremble tous les jours. Le séisme de 1960 à Valdivia, le plus puissant enregistré dans l'histoire de l'humanité, a dégagé une énergie équivalente à 20000 bombes d'Hiroshima.

En prenant en compte la nature des résidus, la géographie très pentue du pays, mais aussi sa forte activité sismique, le risque de liquéfaction de ces ouvrages est très important. De plus, ces ouvrages sont souvent situés dans des zones d'accès difficile, près de réserves naturelles et en amont de rassemblement de population considérable. Assurer la stabilité générale de ces ouvrages est donc un enjeu très important.

C'est dans ce contexte et pour apporter une réponse à ce problème qu'une coopération scientifique et technologique a été établie en 2001 entre l'université catholique de Valparaiso (Chili), l'université Blaise-Pascal de Clermont-Ferrand et Sol-Solution. L'objectif était de proposer une méthodologie pour le contrôle et le diagnostic des *tailings dams*. Elle s'appuie sur la détermination *in situ* des paramètres géomécaniques à l'aide du P.A.N.D.A en vue de caractériser les matériaux, leur variabilité spatiale et leur mise en œuvre au sein des ouvrages. Cette méthodologie prend en compte également cette variabilité pour l'étude de la stabilité et du risque de liquéfaction dans une approche probabiliste. Fruit de cette coopération, une norme pour le contrôle de compactage à l'aide du pénétromètre dynamique français a été publiée en 2012 au Chili.

Plus récemment, dans le cadre d'une étude menée pour le compte d'une grande compagnie minière mexicaine et l'université polytechnique de Catalogne, cette méthodologie a été appliquée pour caractériser et étudier des dépôts de stockage de résidus miniers du Mexique.

APPLICATION DANS LE CADRE D'ÉTUDES DE CARACTÉRISATION DE SITES PRÉSENTANT DES LIQUÉFACTIONS OU DES PALÉO-LIQUÉFACTIONS

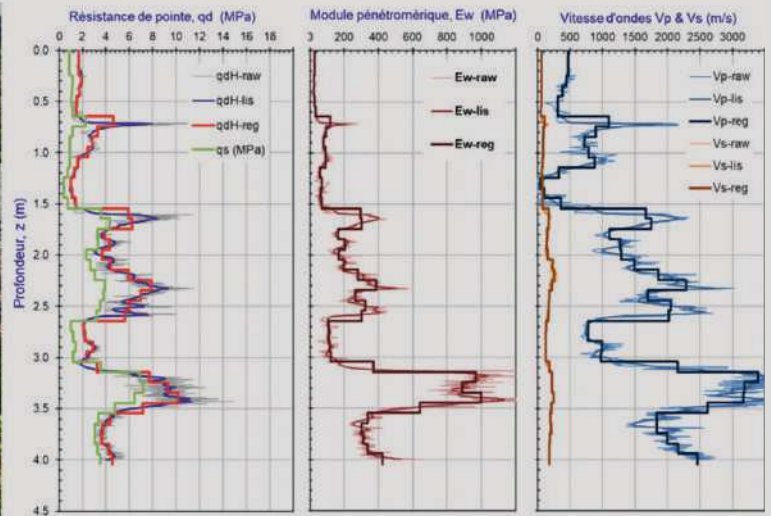
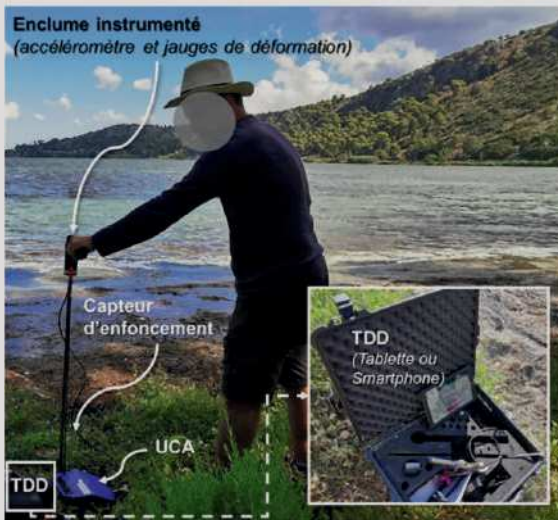
Plus récemment, dans le cadre des travaux menés par l'IRSN, deux campagnes au pénétromètre dynamique ont été menées sur des sites fortement touchés par des séismes anciens ou récents, l'île de Céphalonie en Grèce occidentale (1953, Mw = 7,2) et l'aire géographique de Petrinja au sud de Zagreb en Croatie (2020, Mw = 6,4) marquée par de nombreuses éjections en surface liées à des liquéfactions.

L'un des objectifs de ces études est de caractériser et d'identifier à l'aide des pénétromètres P.A.N.D.A et Grizzly-EV, les différentes formations de surface ($z < 10$ m à 15 m) afin « d'éclairer » les zones liquéfiées en profondeur par fusion avec les données géophysiques acquises en parallèle (Croatie) ou bien de préciser l'influence de la variabilité des formations superficielles sur l'amplification du mouvement sismique des zones étudiées (Grèce).

Outre la finesse des mesures obtenues, permettant d'estimer les propriétés des sols quasi en continu en fonction de la profondeur, ces outils ont pu être déployés rapidement sur ces sites d'accès difficile dans un contexte d'environnement de type lagunaire (bassin de Koutavos, île de Céphalonie) ou bien le long des rives fragilisées de la rivière Kupa dans le secteur de Petrinja (Croatie).

APPLICATION AUX BARRAGES HYDRAULIQUES

Dans le cadre des études de diagnostic sismique réalisées sur des digues fluviales en France (Lepetit, 2002; Duchesne, Fry and Racana, 2005), il est apparu nécessaire de connaître en grandeur réelle la représentativité des zones faibles détectées ponctuellement à l'aide des essais géophysiques et géotechniques. Des mesures réalisées sur deux ouvrages ont permis de mettre en œuvre des mesures pénétrométriques au P.A.N.D.A et au Grizzly-EV sur plusieurs points des ouvrages étudiés. L'interprétation des résultats, grâce à sa résolution fine, dans un matériau bien



Études des sites post-liquéfaction - Essais P.A.N.D.A à Koutavos (Grèce) et exemple de pénétrogrammes obtenus en fonction de la profondeur : résistance de pointe, module pénétrométrique et vitesses d'ondes dans le sol.

identifié, permet d'avoir des caractéristiques tout à fait représentatives des sols rencontrés. En particulier, il a été identifié dans le corps de la digue des alternances de couches résistantes et faibles qui ont pu être modélisées par les gestionnaires de ces ouvrages afin de réduire l'échelle d'incertitude.

Dans ce type d'ouvrage, comportant souvent de couches de grave-sableuse très résistantes en surface, le pénétromètre dynamique à énergie variable DPSH Grizzly-EV présente un intérêt majeur pour les gestionnaires d'ouvrage ; il est facile à déployer, et sa puissance de pénétration permet de traverser les couches graveleuses de surface sans préforage, et le fait d'adapter et de réduire l'énergie de battage permet de maximiser la prise des mesures et leur fiabilité dans le corps du barrage. De plus, l'énergie de battage étant mesurée

à chaque impact, l'application des méthodes de corrections énergétiques, telles que préconisées dans la norme NF EN ISO 22476-2, se révèle un atout majeur pour la fiabilité des mesures. ■

Miguel Angel Benz Navarrete

Responsable Recherche,
Développement et Innovation

Philippe Moustant

Responsable commercial

Jean-Christophe Pellet

Responsable géotechnique

Références bibliographiques :

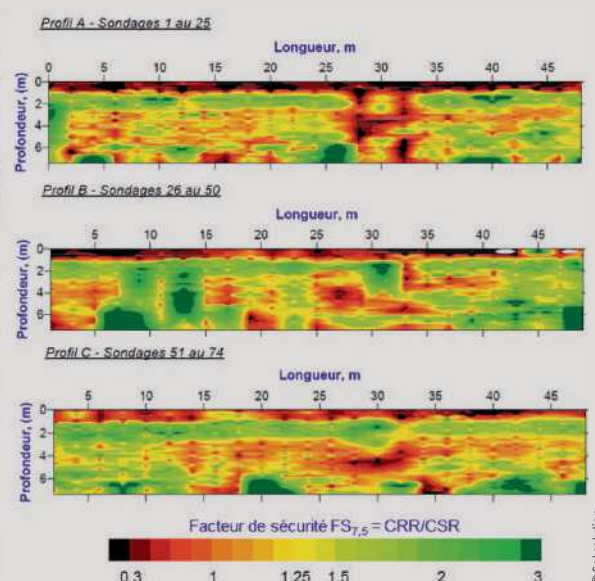
Duchesne, L., Fry, J. and Racana, N. (2005) « Utilisation d'une méthode de reconnaissance géotechnique à rendement élevé sur l'aménagement de Vallabrègues », No spécial Ingénieries-EAT-21 (2005): Sécurité des digues fluviales et de navigation, 21, pp. 103–110.

Lepetit, L. (2002) « Étude d'une méthode de diagnostic de digues avec prise en compte du risque de liquéfaction », p. 287.

López Retamales, S. (2022) « Development of a method to evaluate the risk of liquefaction of sands from a dynamic penetrometer test ». École des Ponts ParisTech.

Teyssier, A. et al. (2022) « Application d'une méthode d'étude du risque de liquéfaction P.A.N.D.A 3 et Grizzly 3 sur des mesures in situ et comparaison avec le CPTU », 11es Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur – Lyon 2022, (Juin), pp. 1–8.

Villavicencio, G. (2009) « Méthodologie pour évaluer la stabilité des barrages de résidus miniers ». Université Blaise-Pascal.



Exemple des résultats obtenus lors des mesures au pénétromètre dynamique à énergie variable dans un barrage hydraulique – 75 sondages effectuées dans une zone où la susceptibilité et opportunité à la liquéfaction s'est avéré.