

APPLICATION D'UNE METHODE D'ETUDE DU RISQUE DE LIQUEFACTION PANDA 3® ET GRIZZLY 3® SUR DES MESURES IN SITU ET COMPARAISON AVEC LE CPTU

APPLICATION OF A LIQUEFACTION RISK STUDY METHOD WITH PANDA 3® AND GRIZZLY 3® ON IN SITU MEASUREMENTS: COMPARISON WITH CPTU

Alexandre TEYSSIER¹, Sebastian LOPEZ-RETAMALES², Jean CANOU², Jean-Claude DUPLA², Miguel-Angel NAVARRETE-BENZ³, Catherine JACQUARD¹

¹ Fondasol, Avignon, France

² Ecole des Ponts ParisTech, Champs-sur-Marne, France

³ Sol Solutions, Riom, France

RÉSUMÉ – Cet article vise à mettre en application la méthode d'étude du risque de liquéfaction proposée pour les pénétromètres dynamiques, appliquée à des mesures Panda 3® et Grizzly 3®. On s'est tout d'abord appuyé sur les résultats de campagnes d'essais en laboratoire réalisées sur deux sables de référence (Fontainebleau et Hostun) dans une chambre d'étalonnage du type « K_0 » sur des massifs de sable reconstitués à différents indices de densité. Cette étude montrant un lien entre mesures de résistance de pointe (q_d) et indice de densité (I_d), cela permet d'appliquer la méthode d'étude du risque de liquéfaction proposée par Jara (2013) sur des mesures in situ au Panda 3® et Grizzly 3® sur un site sableux dans le sud de la France et de comparer les résultats obtenus en termes de liquéfaction avec des mesures réalisées au piézocône (CPTu) selon la méthode de Robertson et Wride (1998).

ABSTRACT – This article aims to apply the method of studying the risk of liquefaction proposed for dynamic penetrometers, applied to Panda 3® and Grizzly 3® measurements. We first relied on the results of laboratory test campaigns carried out in two reference sands (Fontainebleau and Hostun) in a " K_0 " calibration chamber on reconstituted sand beds, at different density index. A good correlation is established between the dynamic cone resistance (q_d) and the soil density index (I_d), allowing to apply the liquefaction risk study method proposed by Jara (2013) on in situ measurements with Panda 3® and Grizzly 3® on a sandy site in southern France and to compare the results obtained with piezocone measurements (CPTu) according to Robertson and Wride (1998) method.

1. Introduction

La liquéfaction des sols (Lade & Yamamuro, 1999) génère des effets néfastes sur le sol et les structures, pouvant entraîner un risque non négligeable pour les personnes ainsi que des dégâts matériels et impacts économiques importants (Idriss & Boulanger, 2008 ; National Academies of Sciences Engineering and Medicine, 2016). Par conséquent, et dû à la difficulté d'obtenir in situ des échantillons de sol représentatifs, l'évaluation du potentiel de liquéfaction à partir d'essais sur le terrain devient une étape importante et nécessaire dans le cadre de l'étude de la susceptibilité sismique d'un site (Chang et al., 1987 ; Idriss & Boulanger, 2008 ; Javelaud, 2015).

Pour répondre à ce besoin, différentes méthodes pour l'évaluation in situ du risque ont été développées. La grande majorité s'appuie sur l'exécution des essais de pénétration dynamique (SPT) ou statique (CPT). D'autres méthodes plus récentes se basent sur la mesure d'ondes de cisaillement (Andrus et al., 2004).

Pour ce qui concerne les méthodes basées sur le CPT, chaque équipement présente des avantages et des inconvénients lorsqu'on considère, par exemple, les différentes conditions de terrain, l'accessibilité, l'équipement en lui-même, son mode opératoire, le temps et le coût de l'essai, ce qui rend leur utilisation impossible dans des terrains d'accès difficile ou pour des ouvrages dont le budget alloué aux investigations resté modéré.

Il s'avère donc nécessaire de développer de nouvelles techniques permettant de répondre à ces besoins, basées sur d'autres équipements qui soient légers, rapides, tout en s'appuyant sur la démarche générale de la méthode pénétrométrique (Idriss & Boulanger, 2008). C'est pourquoi les pénétromètres dynamiques légers et lourds à énergie variable, du type Panda® (Gourvès, 1991) et Grizzly®, développés en France, semblent adaptés.

Par leurs caractéristiques, les pénétromètres du type Panda et Grizzly permettent de caractériser le sol en surface assez finement, facilitant l'étude de la variabilité spatiale (Jurado et al., 2020), mais aussi le couplage avec d'autres techniques conventionnellement utilisées (CPT, SPT, PMT...) dans le cadre d'une étude géotechnique. L'usage de ces appareils est aujourd'hui très répandu en France et dans le monde, où ils sont utilisés pour un large éventail d'applications géotechniques.

Cette étude vise à évaluer l'applicabilité de l'essai de pénétration dynamique à énergie variable Panda/Grizzly en prenant en compte les effets de l'indice de densité (I_d) du sable (ou densité relative D_R) et de la contrainte verticale effective (σ'_{vc}). Ces résultats permettent d'évaluer l'utilisation de ce type de pénétromètres dans l'auscultation des sols sensibles aux phénomènes de liquéfaction sous différentes conditions. La connaissance de la relation entre la résistance à la pénétration dynamique (q_d), l'indice de densité (I_d) et la contrainte verticale effective (σ'_{vc}), permet d'analyser le comportement du sol dans des conditions similaires et de développer une évaluation du comportement du sol prévisible sous sollicitations sismiques. La méthode d'évaluation du risque de liquéfaction proposée par Jara (2013) s'inspire de la méthode proposée par Robertson et Wride (1998) basée sur le piézocône (CPTu).

Dans cet article, après une présentation des équipements utilisés, la relation entre la résistance à la pénétration dynamique (q_d), l'indice de densité (I_d) et la contrainte verticale effective (σ'_{vc}), validée par le biais d'essais en laboratoire sur des sables de référence (Hostun, Fontainebleau) sera présentée. Ensuite une application d'étude de liquéfaction au Panda/Grizzly sur site sableux dans le sud de la France sera détaillée, avec une comparaison du risque de liquéfaction estimé à l'aide de la méthode traditionnelle au CPTu.

2. Matériel mis en œuvre : Panda 3, Grizzly 3, Chambre K_0

2.1. Panda 3 et Grizzly 3

Développé depuis une dizaine d'années en France (Benz, 2009), le principe général de l'essai au pénétromètre dynamique instrumenté de troisième génération, présenté sur l'exemple du Panda et détaillé en Figure 1, est le suivant : au cours du battage, il est mesuré dans la tige, au voisinage de l'enclume, les variations de déformation $\varepsilon(t)$, d'accélération $a(t)$ et les déplacements $s(t)$ entraînées par l'onde de choc créée par l'impact lors du battage.

En effet, lorsque le marteau heurte la tête de battage ou l'enclume du pénétromètre, une onde de compression $u(x,t)$ est créée dans les tiges, se propageant à vitesse c_t en direction de la pointe. Lorsque l'onde $u(x,t)$ arrive à l'interface pointe/sol, une partie de celle-ci est utilisée pour faire pénétrer la pointe dans le sol. L'autre partie est réfléchi

dans les tiges vers la surface. Des cycles aller-retour au sein de tiges se poursuivent jusqu'à ce que l'énergie des ondes ne soit plus suffisante pour faire pénétrer la pointe dans le sol. Pendant son voyage au sein des tiges, l'onde $u(x,t)$ entraîne en tout point x le long des tiges une variation de déformation $\varepsilon(x,t)$ et de vitesse $v(x,t)$ représentés par la superposition des deux ondes élémentaires.

Une des solutions les plus utilisées pour reconstituer le signal en pointe est celle obtenue par le biais de la méthode des caractéristiques, représentée par la superposition de deux ondes élémentaires, u_f et u_g ; respectivement les ondes descendantes et remontantes au sein d'un milieu élastique et homogène. La technique de reconstruction d'ondes consiste à calculer, à partir des signaux découplés, les signaux de force $F_N(t)$ et de vitesse $v_N(t)$ en chaque point de changement d'impédance le long des tiges (notamment au niveau de la pointe), la tige étant considérée comme un matériau élastique parfait.

Une fois que les signaux en pointe ont été reconstitués, la courbe charge-enfoncement est tracée pour chaque impact. À partir de cette courbe, différents paramètres sont déterminés, à savoir : la résistance de pointe dynamique (q_{da}) et statique (q_{ca}), le module pénétrométrique de chargement (E_{dP3} en vert) et déchargement (E_{rP3} en jaune), la vitesse d'ondes de compression (V_p) puis de cisaillement (V_s) ainsi qu'un coefficient d'amortissement dit coefficient d'amortissement de Smith (J_n) (Figure 1).

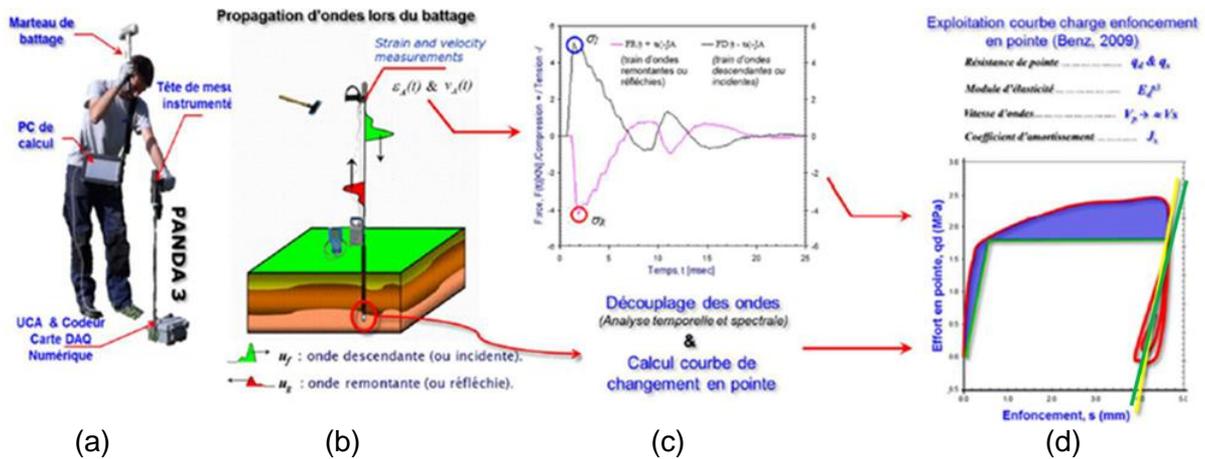


Figure 1 : L'essai au pénétromètre dynamique instrumenté (a), principe de mesure et propagation des ondes (b), découplage des ondes (c) et courbe charge-enfoncement obtenue en pointe (d)

Plus récemment, ce même procédé de mesure a été appliqué au pénétromètre dynamique lourd DPSH Grizzly (Escobar et al., 2016). 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 correspondant aux modes (DPL, DPM, DPH et DPSH de la norme NF EN ISO 22476-24), ainsi que la mesure en temps réel de l'énergie transmise au train de tiges pour chaque impact (Benz et al., 2012) (Figure 2).

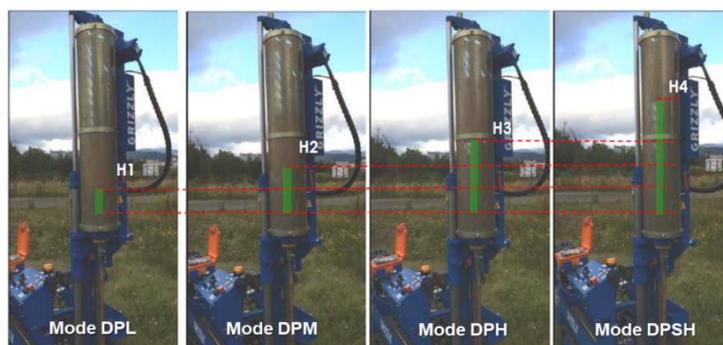
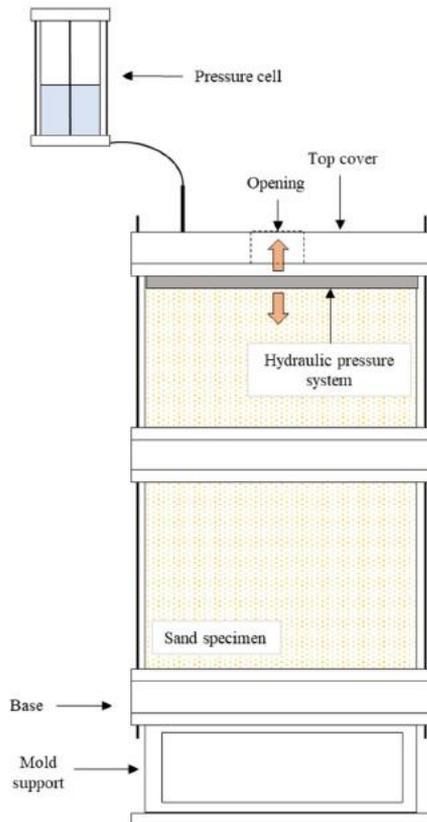


Figure 2 : Séquences du système de battage avec 4 hauteurs de chutes (Escobar et al., 2016)

2.2. Chambre d'étalonnage K_0



La chambre d'étalonnage K_0 utilisée dans l'équipe Géotechnique du laboratoire Navier de l'École des Ponts ParisTech pour la reconstitution et la mise sous contrainte des massifs de sable simule les conditions « K_0 » par le biais de l'application d'une contrainte verticale grâce à une boudruche en néoprène (Figure 3).

Elle est composée d'une base cylindrique, elle-même composée de deux cylindres supplémentaires et d'un couvercle supérieur qui, ensemble, permettent la reconstitution d'un massif de 730 mm de hauteur et 547 mm de diamètre. Le système est fermé et ajusté au moyen de tiges filetées serrées grâce à des écrous. Au-dessous du couvercle supérieur, la boudruche en néoprène est positionnée au préalable sur la surface du massif. Elle permet, par pressurisation (pression d'eau), de générer l'état de contrainte souhaité sur le massif. Elle peut également être saturée selon le protocole souhaité.

Le pilotage de la pression dans la boudruche est réalisé à l'aide d'une cellule d'air-eau reliée à un détendeur. Une description plus détaillée de la chambre, ainsi que du mode opératoire sont présentés par Le Kouby et al. (2008) et Muhammed et al. (2016).

Figure 3 : Schéma de la chambre de calibration K_0

3. Essais en chambre d'étalonnage K_0

3.1. Protocole expérimental

Pour cette étude, la réalisation de chaque essai est effectuée en trois étapes :

- (1) Reconstitution du massif.
- (2) Application de la contrainte verticale effective (σ'_{vc}).
- (3) Réalisation des essais de pénétration dynamique Panda 3.

Les essais ont été réalisés sur des massifs reconstitués de sables d'Hostun HN31 et de Fontainebleau NE34. Pour la construction de chaque massif, l'indice de densité initial (I_d) du sable a été défini au préalable. Par la suite, le spécimen a été construit en déposant des couches d'épaisseur uniforme de sable sec, déposées chacune selon l'indice de densité spécifié.

Une fois le massif reconstitué et après avoir refermé la chambre d'étalonnage, la contrainte verticale effective souhaitée est appliquée, puis on procède à la réalisation de l'essai de pénétration.

L'ensemble des conditions expérimentales sont détaillées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Essais de pénétration dynamique en chambre de calibration K_0

Essai	I_d	Contrainte verticale effective (kPa)
Essais 1	0,3	10 - 25 - 50 - 75 - 100 - 200 - 300 - 400
Essais 2	0,6	
Essais 3	0,9	

3.2. Présentation des résultats

En considérant l'existence d'une relation biunivoque entre la résistance dynamique à la pénétration (q_d^{p3}) et la densité sèche du sol (γ_d) (Chaigneau, 2001), il est possible d'établir une corrélation entre la résistance à la pointe (q_d) et l'indice de densité (I_d). Pour le cas du Panda 3, cette corrélation s'écrit de la façon suivante (Equation 1) :

$$I_d = A \ln(q_d^{p3}) + B \quad (1)$$

avec A et B les coefficients de régressions pour le sol étudié.

Dans la Figure 4, on peut noter le bon ajustement entre les mesures de q_d^{p3} et I_d à différentes valeurs de contraintes verticales effectives (σ'_{vc}) et les courbes théoriques issues de l'Equation 1, calées avec les coefficients de régressions A et B.

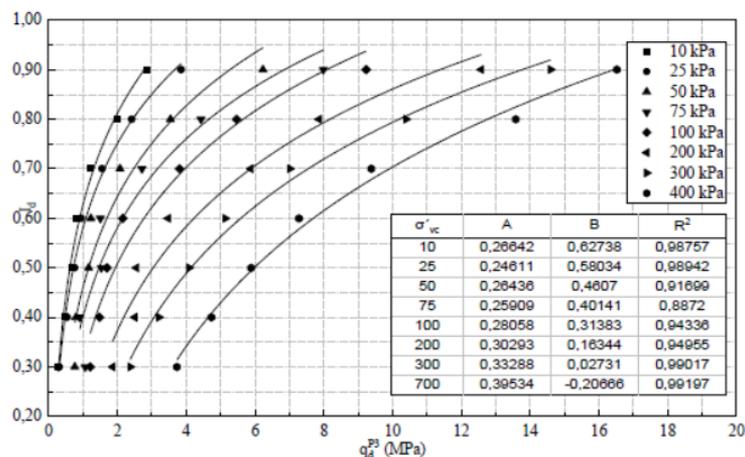


Figure 4 : Relation q_d^{p3} - I_d sous différentes conditions de confinement vertical

4. Campagne expérimentale in situ

4.1. Description du site et résultats des essais in situ et en laboratoire

Le site de la carrière de sables de Messanges, dans le sud-ouest de la France a été retenu pour ces essais (Figure 5). Le site est globalement plat et horizontal et est composé majoritairement de sables. Plusieurs investigations ont été réalisées :

- 2 essais de pénétration statiques à pointe piézocône u_2 : CPTu1 et CPTu3 descendus à 10 m de profondeur.
- 1 essai de pénétration dynamique Panda 3 : PDA1 descendu à 7,8 m de profondeur.
- 4 essais de pénétration dynamique Grizzly 3 : GRZ1 à GRZ4 descendus entre 7,8 m et 10,5 m de profondeur



Figure 5 : Localisation du site de Messanges (Openstreet Map)

Les résultats de résistance de pointe statique (q_c) et dynamique (q_d) sont synthétisés en Figure 6 a. Les principales couches de sols identifiées sont récapitulées en Figure 6 b.

Il est à noter que ces couches présentent une hétérogénéité spatiale observable d'après les résultats de résistance de pointe (épaisseur des sables moyennement denses variable, élévation variable du niveau des sables à matières organiques). La nappe est considérée à 1,7 m de profondeur.

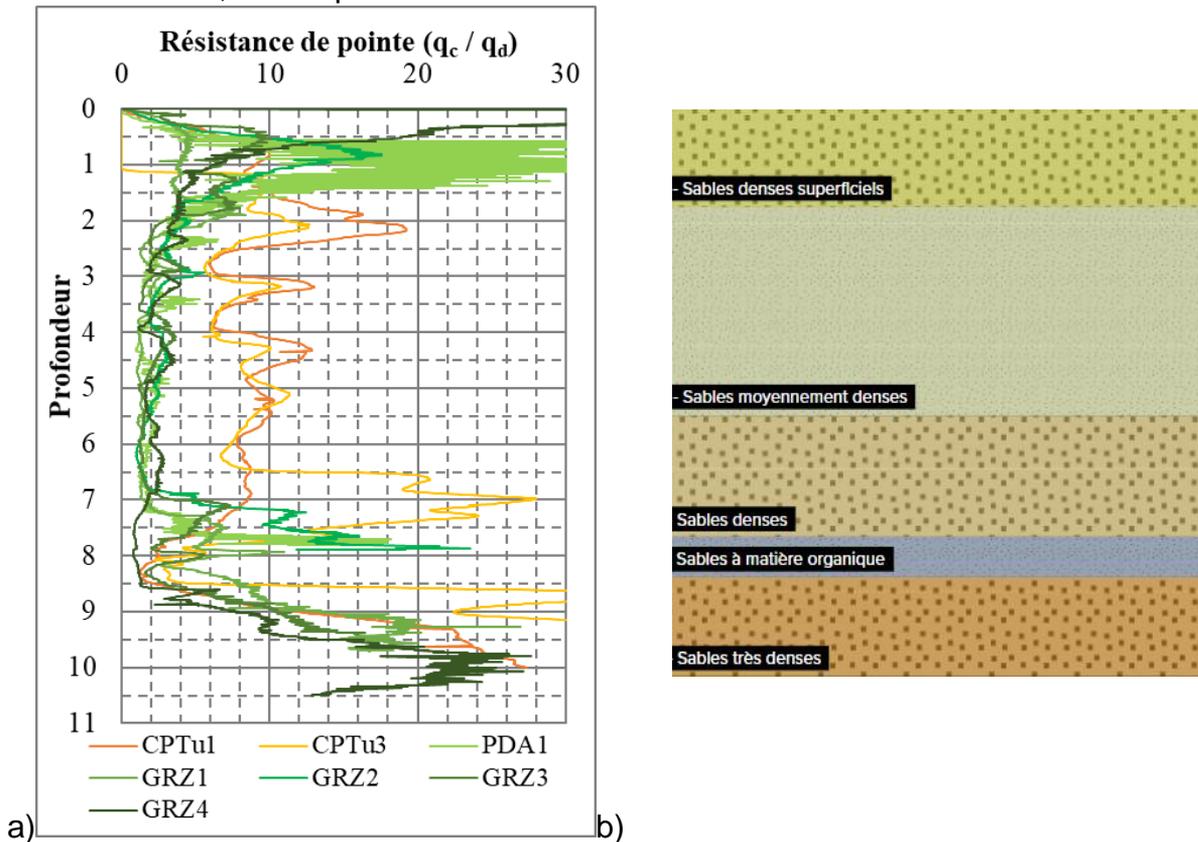


Figure 6 : a) Synthèse des essais de pénétration b) Principales formations stratigraphiques identifiées

On peut noter un écart significatif entre les mesures de résistance de pointe statique (q_c) et les mesures de résistance de pointe dynamique au Panda 3 et Grizzly 3 (q_d), d'environ un facteur 3.

Des essais en laboratoire ont également été menés sur un échantillon de sables denses superficiels. Les résultats sont récapitulés dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Synthèse des paramètres mesurés en laboratoire sur les sables de Messanges

Paramètre	ρ_s	D_{max}	Passant 50 mm	Passant 2 mm	Passant 80 μ m	Passant 63 μ m	e_{max}	e_{min}
Unité	t/m ³	Mm	%	%	%	%	-	-
Ech 1	2,636	3	100	100	0,1	0	0,542	0,795

4.2. Méthodologie d'étude du risque de liquéfaction

Les sondages CPTu sont utilisés pour évaluer le risque de liquéfaction selon la méthode Robertson et Wride (1998), rapportée par Youd et Idriss (NCEER) au pénétromètre statique (CPTu).

Les sondages au Panda 3 et au Grizzly 3 sont utilisés pour évaluer le risque de liquéfaction selon la méthode proposée par Jara (2013) et détaillée en Figure 7 a. Cette méthode est une adaptation de la méthode proposée par Robertson et Wride, en admettant une égalité entre q_c mesuré au pénétromètre statique et q_d mesurée au Panda 3 / Grizzly 3. Pour valider l'usage de cette méthode pour ce site, un facteur 3 sera appliqué aux mesures de q_d .

Dans les deux cas, une même accélération sera considérée à $a_{max} = 2,88 \text{ m/s}^2$, une magnitude des ondes de surface $M_s = 6$ et un facteur de correction de magnitude $CM = 2,2$. Il est recherché un facteur de sécurité (CSR/CRR) de 1,25. En-dessous de cette valeur, le risque de liquéfaction est avéré. Les résultats sont présentés en Figure 6 b.

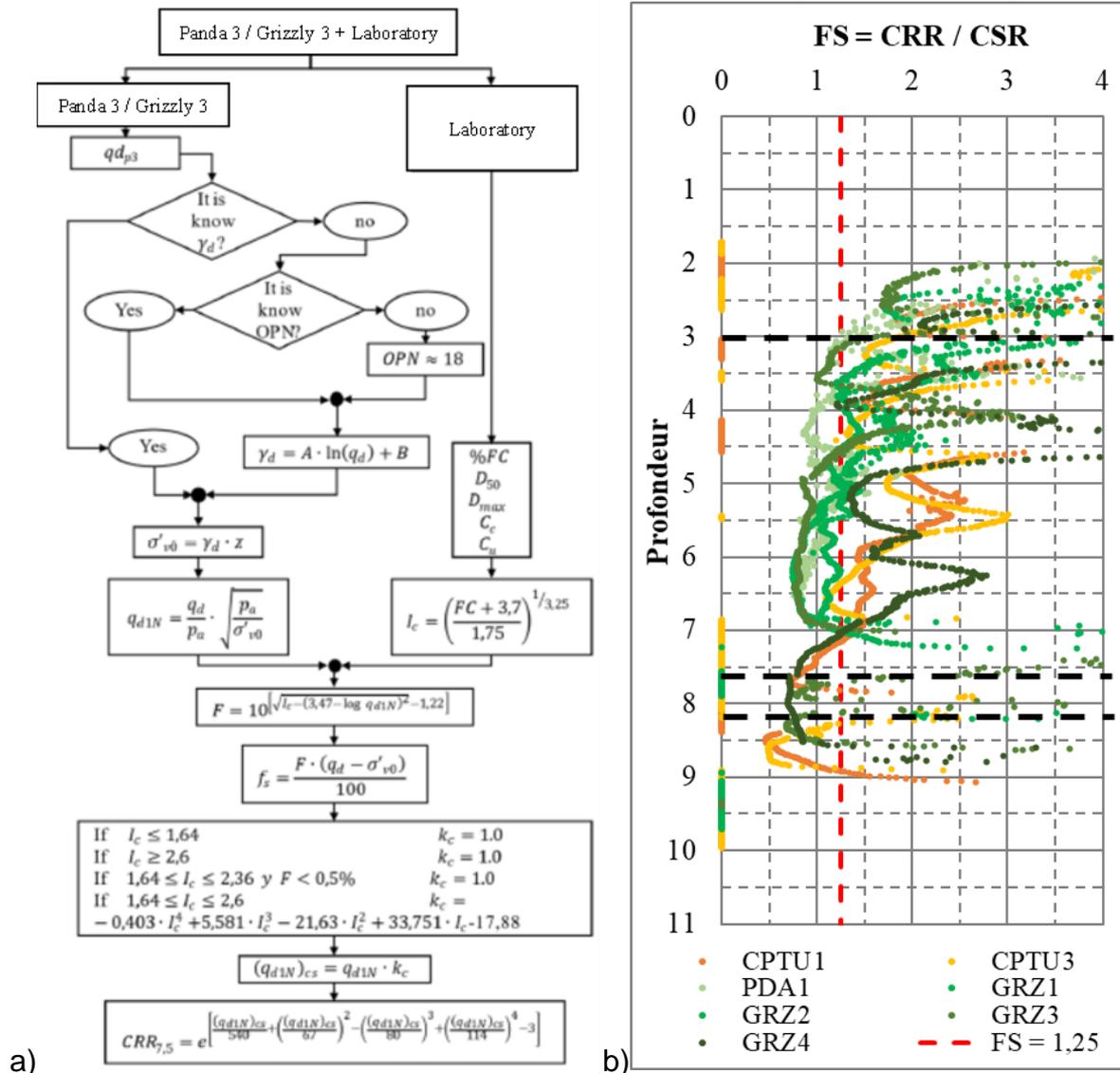


Figure 7 : a) Méthode d'étude du risque de liquéfaction selon Jara (2013) b) Résultats de risque de liquéfaction sur le site de Messanges

L'équation 1 permet de déterminer l'indice de densité (I_d) pour chacun des pénétromètres Panda 3 et Grizzly 3 à l'aide des coefficients A et B proposés en Figure 4 selon les valeurs de contrainte verticale effective estimée (σ'_{vc}). A partir des mesures de I_d et des mesures laboratoires de e_{min} et e_{max} , il est possible de déterminer l'indice des vides e , puis d'obtenir une estimation précise de la contrainte verticale effective.

Il est possible de noter avec tous les pénétromètres des zones de lentilles liquéfiables affectant les sables moyennement denses et les sables denses entre 3 m et environ 7,5 m de profondeur. Pour la majorité des sondages (excepté GRZ3 et GRZ4) le passage par les sables à matière organique, contenant une part importante de particules fines, montre que cet horizon n'est pas ou peu liquéfiable. La profondeur de cet horizon varie entre les sondages et semble être détectée plus en profondeur sur GRZ3 et GRZ4.

Enfin au toit des sables très denses profonds, il est possible de noter une zone potentiellement liquéfiable de faible épaisseur.

5. Conclusion

Cet article vise à présenter une première application des technologies Panda 3® et Grizzly 3® dans l'étude du risque de liquéfaction sur les sols granulaires sous nappe. Les essais menés en laboratoire ont montré une bonne corrélation entre la résistance de pointe (q_d), l'indice de densité (I_d) et la contrainte verticale effective (σ'_{vc}). Cette corrélation donne le lien permettant d'appliquer la méthode d'étude de liquéfaction proposée par Jara (2013), qui est une adaptation de la méthode Robertson et Wride (1998), rapportée par Youd et Idriss (NCEER) au pénétromètre statique (CPTu).

L'usage de matériels plus légers et moins coûteux peut être un avantage notable pour évaluer ce risque dans les zones soumises à une réglementation parasismique. Les premiers résultats obtenus à partir du Panda 3® et du Grizzly 3® sont en bonne adéquation avec les résultats mesurés à l'aide de la méthode traditionnelle au CPTu.

En perspective, il est envisagé de renouveler la comparaison entre les deux méthodes pour confirmer la répétabilité et la valeur du facteur à appliquer à la résistance de pointe dynamique, proposée au § 3 de cet article. Il est également envisagé de comparer l'autre méthode proposée par Jara basée sur les vitesses d'ondes de cisaillement mesurées avec des essais cross hole avec les mesures de vitesses de cisaillement d'ondes déduites des essais Panda 3® et Grizzly 3®.

6. Bibliographie

- Benz Navarrete M. A. (2009). Mesures dynamiques lors du battage du pénétromètre Panda 2. Thèse Université Blaise Pascal, Clermont II (Clermont Ferrand, France).
- Benz Navarrete M. A., Escobar Valencia E. J., Gourvès R., Haddani Y., Breul P., Bacconnet C. (2013). Mesures dynamiques lors du battage pénétrométrique – Détermination de la courbe charge-enfoncement dynamique en pointe. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 499–502.
- Escobar E., Benz Navarrete M.-A., Gourvès R., Breul P., Chevalier B. (2016). Le Grizzly 3® à énergie variable : nouveaux développements de l'essai de pénétration dynamique. JNGG 2016.
- Jara F. (2013). Etude d'une nouvelle méthodologie pour la détermination du potentiel de liquéfaction des sols à l'aide du Panda 3® et de la géoendoscopie: Cas des «tranques de Relave» au Chili. Polytech'Clermont Ferrand.
- Lopez Retamales S., Canou J., Dupla J.-C., Benz Navarrete, M. A. (2020). Pénétromètre dynamique et indice de densité des sables. Application à l'évaluation du risque de liquéfaction des massifs sableux. JNGG 2020.
- Lopez Retamales S., Canou J., Dupla J.-C., Benz Navarrete, M. A. (2021). Evaluation of soil liquefaction resistance with variable energy dynamic penetration test, PANDA®: state of the art. ICS6.
- NF EN 1998-1. (2005). Eurocode 8 - Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 1 : règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments.
- Teyssier A., Jacquard C., Forestti Oliveira C., Tran Q. A., Benz Navarrete M. A. (2020). Comparaisons et couplage des modules de déformation mesurés à l'aide de pénétromètres dynamiques instrumentés et des mesures pressiométriques et pénétrométriques. JNGG 2020.
- Youd T. L., Idriss I. M. (1997). Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of liquefaction resistance of soils. NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils.