

ANALYSE DES DONNÉES CPTu VIS-À-VIS DE LA LIQUEFACTION

ANALYSIS OF CPTu DATA TOWARDS LIQUEFACTION

Ankit SHARMA¹, Christophe DANO¹, Panteleimon RAPANKIS¹, Hamid Hosseini SADRABADI²,
Luc SIBILLE¹, Bruno CHAREYRE¹

¹ University of Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR, F-38000, Grenoble, France,

² Equatech R&D, Equaterre, Annecy, France

RÉSUMÉ – Cet article présente un outil numérique permettant d'analyser les données du piézocône CPTu et de prédire diverses propriétés du sol, en se concentrant principalement sur la susceptibilité à la liquéfaction. Tout d'abord, des relations empiriques utilisant les données du CPTu sont présentées et l'effet des paramètres d'entrée est montré. Ensuite, l'outil est appliqué à deux cas d'étude in situ, sur les sites de Saint Martin D'Hères et au Bourget-du-Lac. Différentes méthodes pour calculer le rapport de résistance cyclique (Robertson, 2010 ; Idriss et Boulanger, 2014) sont utilisées, et les différences dans leurs prédictions sont comparées. Enfin, les résultats obtenus à partir de notre outil développé sous Python sont comparés avec le logiciel sous licence correspondant CLIQ pour valider les résultats. Cet article aide à mieux comprendre les méthodes existantes pour interpréter les données CPTu. Il fournit un outil d'aide à la décision intégrant les hypothèses d'entrée.

ABSTRACT – This paper presents a numerical tool for analysing CPTu piezocone data and predicting various soil properties, focusing primarily on liquefaction susceptibility. First, a few empirical relationships using CPTu data are presented and the effect of input parameters is shown. Then, the tool is applied to two in situ case studies, the first one at Saint Martin D'Hères and the second one at Bourget-du-Lac. Different methods for calculating the cyclic resistance ratio such as (Robertson, 2010; Idriss and Boulanger, 2014) are used, and the differences in their predictions are compared. Finally, the results obtained from our tool developed in Python are compared with the corresponding licensed software CLIQ to validate the results. This paper helps to better understand the existing methods for interpreting CPTu data and provides a tool that makes it easier for engineers to choose among the different methods available and understands the possible variations caused by the interpretation methods and different values of the input parameters.

1. Introduction

L'essai de pénétration au cône existe depuis les années 1930 à des fins d'identification physique et mécanique des sols. Il a, depuis, connu de nombreuses avancées technologiques (mesure du frottement latéral et de la pression interstitielle). Cependant, l'identification des propriétés mécaniques à des fins d'ingénierie s'appuient souvent sur des corrélations empiriques issues de l'expérience. Des logiciels commerciaux sont aujourd'hui proposés pour interpréter les données d'essais CPT, sans visibilité sur les procédures de calcul sous-jacentes et donc sur la pertinence des résultats. Cette communication apporte une contribution à cette analyse de l'effet des grandeurs géotechniques critiques sur l'interprétation des données CPTu, par le biais de deux campagnes expérimentales sur site dédiées à la détection de la susceptibilité de liquéfaction des sols.

Historiquement, les travaux de Robertson ont permis d'établir des abaques basés sur les observations de terrain et les paramètres mesurés au cours d'essais CPTu conduits à une

vitesse de pénétration de 2cm/s : résistance de pointe, frottement latéral et pression interstitielle. Ces abaques (Robertson, 1990, Robertson & Wride, 1998) définissent ainsi des classes de comportement des sols, au travers d'indices empiriques corrélés aux propriétés mesurées, comme l'indice de comportement du sol I_c . Le lecteur pourra se référer aux références bibliographiques citées ci-dessus pour avoir le détail des classifications de Robertson.

2. Susceptibilité à la liquéfaction à partir d'essais CPTu

Pour évaluer la susceptibilité à la liquéfaction d'un sol, il est important de déterminer la stratigraphie du sol et l'état in-situ des dépôts. Le CPT est un essai in-situ idéal pour évaluer le potentiel de liquéfaction du sol en raison de sa répétabilité, de sa fiabilité et de ses données continues. La pratique actuelle de calcul de la susceptibilité à la liquéfaction implique de caractériser la sollicitation sismique en termes de rapport de contrainte cyclique (CSR) pour représenter la contrainte de cisaillement appliquée à différentes profondeurs. La définition la plus largement utilisée du CSR a été donnée par Seed & Idriss (1971). Seed & Idriss (1971) ont proposé de représenter les contraintes de cisaillement irrégulières causées lors d'un séisme par une série uniforme équivalente de cycles de contraintes qui provoquent une accumulation de pression interstitielle équivalente à celle de l'historique des contraintes de cisaillement réelles à une amplitude de 65% de la contrainte de cisaillement réelle maximale. De plus, ils l'ont normalisé par la contrainte verticale effective du sol en place. Ils ont ainsi déduit le nombre de cycles uniformes nécessaires pour provoquer une augmentation de la pression interstitielle similaire à celle du séisme réel pour différentes magnitudes. Cette valeur sans dimension a été utilisée pour caractériser la sollicitation de cisaillement pour une magnitude donnée du tremblement de terre.

En parallèle de la sollicitation, la résistance du sol normalisée par la contrainte verticale à la même profondeur est appelée Rapport de Résistance Cyclique (CRR), déduit de l'interprétation d'essais in situ en général, en particulier l'essai CPT et de l'indice de comportement du sol cité plus haut. La prédiction de la résistance cyclique des sols sableux à partir de l'essai CPT est dérivée d'une vaste base données expérimentale, même si pour les projets d'envergure, il est recommandé d'estimer le CRR à partir d'essais en laboratoire.

3. Essais CPTu in-situ et leur analyse via "pyCPTu"

Nous avons développé un code sous Python, appelé pyCPTu, intégrant les méthodes décrites dans la littérature pour transcrire les données CPTu en données géotechniques utiles à l'ingénieur, en particulier la susceptibilité à la liquéfaction. Après avoir comparé ce code à un code commercial, nous l'avons utilisé pour étudier l'effet des paramètres d'entrée des méthodes utilisées pour calculer le CRR sur la susceptibilité à la liquéfaction. Ainsi, dans cette communication, nous nous sommes basé sur les deux méthodes les plus utilisées pour calculer le CRR : La méthode Boulanger-Wride (1998) et la méthode Robertson-Idriss (2014).

La méthode de Boulanger & Wride (1998) propose deux formulations du CRR en fonction de la résistance de pointe normalisée en sable propre q_{c1Ncs} telle que (Eq. 1) :

$$CRR = \begin{cases} 93(q_{c1Ncs}/1000)^3 + 0.08, & 50 \leq q_{c1Ncs} \leq 160 \\ 0.833(q_{c1Ncs}/1000)^3 + 0.05, & q_{c1Ncs} \leq 50 \end{cases}$$

Equation 1.

La méthode de Boulanger-Idriss (2014) est calculée en utilisant la résistance normalisée en pointe pour une contrainte de 1 atm de surcharge (q_{c1N}) et à son équivalent en sable propre (q_{c1Ncs}).

$$CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1atm} = \exp \left(\frac{q_{c1Ncs}}{113} + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{1000} \right)^2 - \left(\frac{q_{c1Ncs}}{140} \right)^3 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{137} \right)^4 - 2.8 \right)$$

Equation 2

L'indice de susceptibilité à la liquéfaction le plus couramment utilisé est le facteur de sécurité obtenu en comparant la résistance (rapport CRR) à la sollicitation (CSR) du sol, tel que $FS = CRR / CSR$. Une valeur supérieure à 1 pour une couche de sol particulière indique qu'il est peu probable qu'elle se liquéfie pour un événement sismique donné. Inversement, une valeur inférieure à 1 est un signe d'alerte.

Néanmoins, à l'échelle d'un site, la susceptibilité à la liquéfaction doit être intégrée sur une certaine profondeur. Ainsi, Iwasaki et al. (1981) ont suggéré d'utiliser l'indice de potentiel de liquéfaction (LPI, Eq. 3) qui peut quantifier la susceptibilité à la liquéfaction d'un site pour une profondeur allant jusqu'à 20 m de profondeur :

$$LPI = \int_0^{20} (F_1(FS) \cdot W(z)) dz$$

Equation 3

où $F_1(FS) = 1 - FS$ si $FS < 1$ ou $F_1(FS) = 0$ si $FS > 1$. $W(z)$ est une fonction de la profondeur z telle que $W(z) = 10 - 0.5z$. Plus la valeur de LPI est élevée, plus le risque de liquéfaction est élevé. Une valeur supérieure à 15 est considérée comme un indicateur d'un site à haut risque de liquéfaction.

En utilisant toutes ces méthodes, et en exploitant des corrélations reliant les mesures pénétrométriques aux propriétés des sols (Robertson & Cabal, 2015), nous pouvons calculer le type de comportement du sol, l'angle de frottement, les rapports CSR et CRR, le facteur de sécurité. Ces propriétés sont calculées tous les 2 centimètres dans notre code. Ce code permet également de déterminer le paramètre LPI final du site.

4. Exemples d'applications

Site 1 : Saint Martin D'Hères, Grenoble.

Dans le cadre du programme de Recherche et Développement du Groupe Equaterre relatif à l'identification des sols liquéfiables, une première campagne d'essais CPTu a été conduite sur le Campus Universitaire de Saint-Martin d'Hères, près de Grenoble. L'emplacement exact est indiqué sur la Figure 1. Les essais ont été réalisés avec une pointe de cône de 10 cm² de diamètre en août 2019. La pointe du cône a atteint une profondeur d'environ 20 m. La Figure 2 représente les résultats bruts en termes de résistance à la pointe, frottement latéral et pression interstitielle. Le graphique de la pression interstitielle montre également la pression hydrostatique avec la nappe phréatique à 5 m. Ces données ont ensuite été analysés à l'aide de pyCPT afin d'identifier le profil du sous-sol, l'indice de comportement du sol, la résistance normalisée de pointe et calculer les rapports CRR et CSR du sol et les résultats sont montrés sur la Figure 3.

Nous pouvons observer que la majorité du dépôt de sol sur les 14 premiers mètres tombe dans la catégorie des sables propres ($1,31 < I_c < 2,05$) (en rouge) et il y a une couche de sol argileux entre 14,5 et 17,5 m de profondeur ($2,95 < I_c < 3,6$) (en vert). La région en jaune correspond à un sol de type sable silteux. Les zones bleues de gauche et de droite représentent des sous-sols de type gravier et limon sableux. De plus, les calculs de la résistance de pointe normalisée selon la méthode Idriss-Boulanger et la méthode Robertson sont assez similaires.

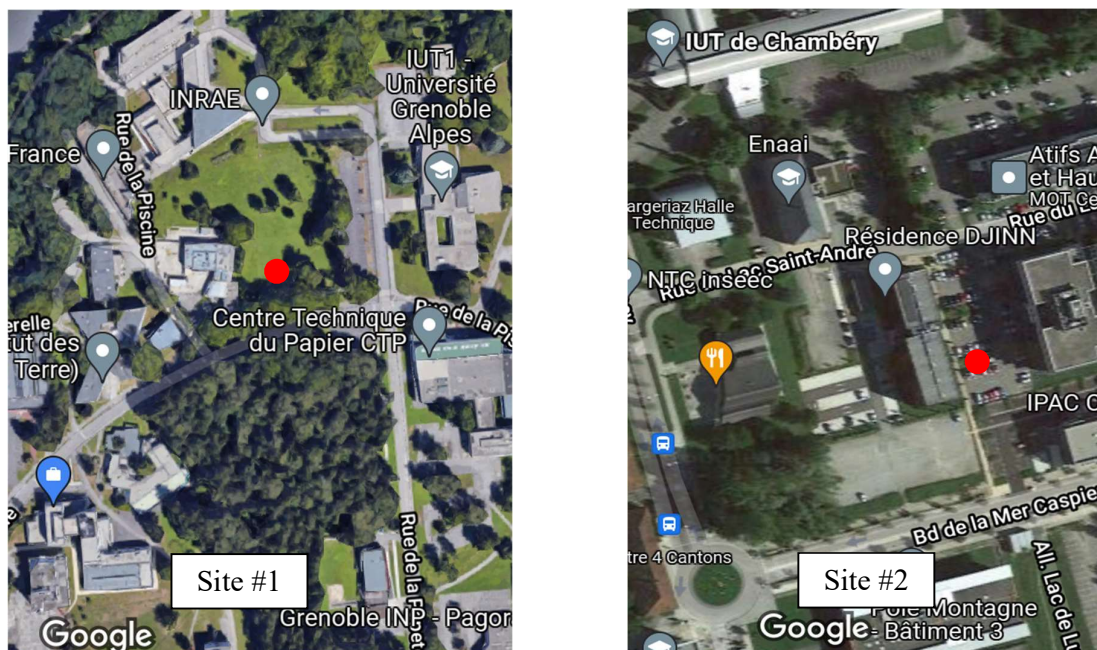


Figure 1: Localisation des sites d'essais

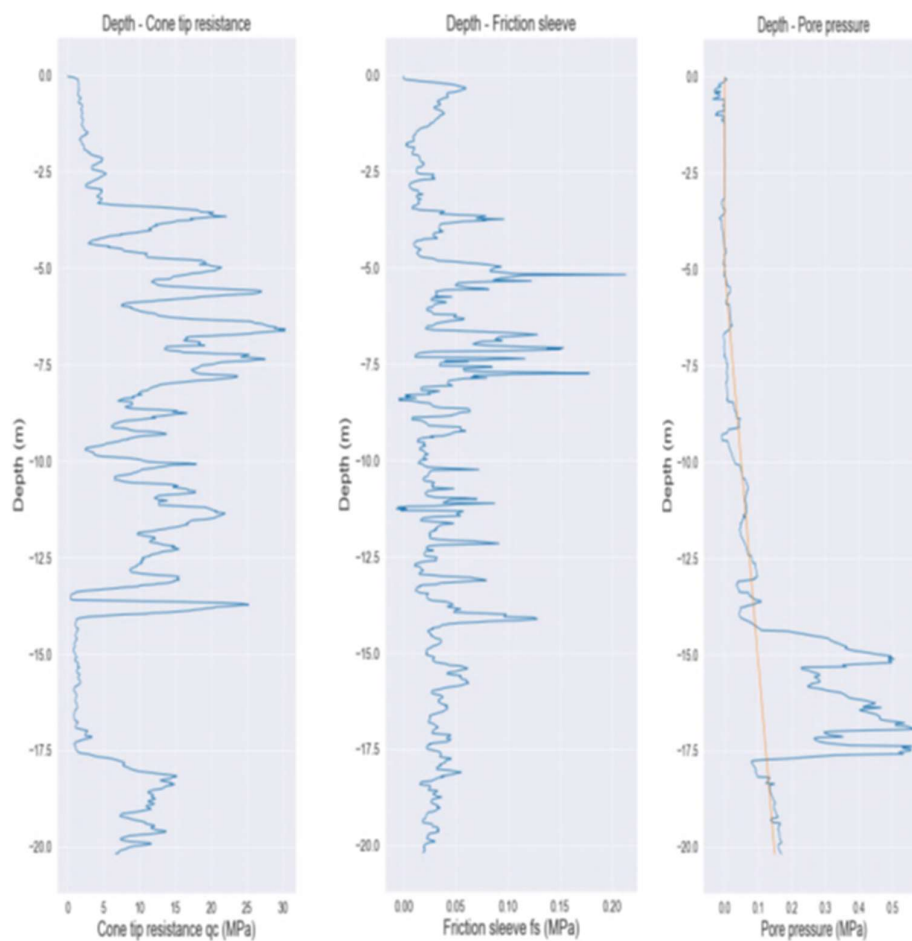


Figure 2: Résultats bruts des essais du Site 1.

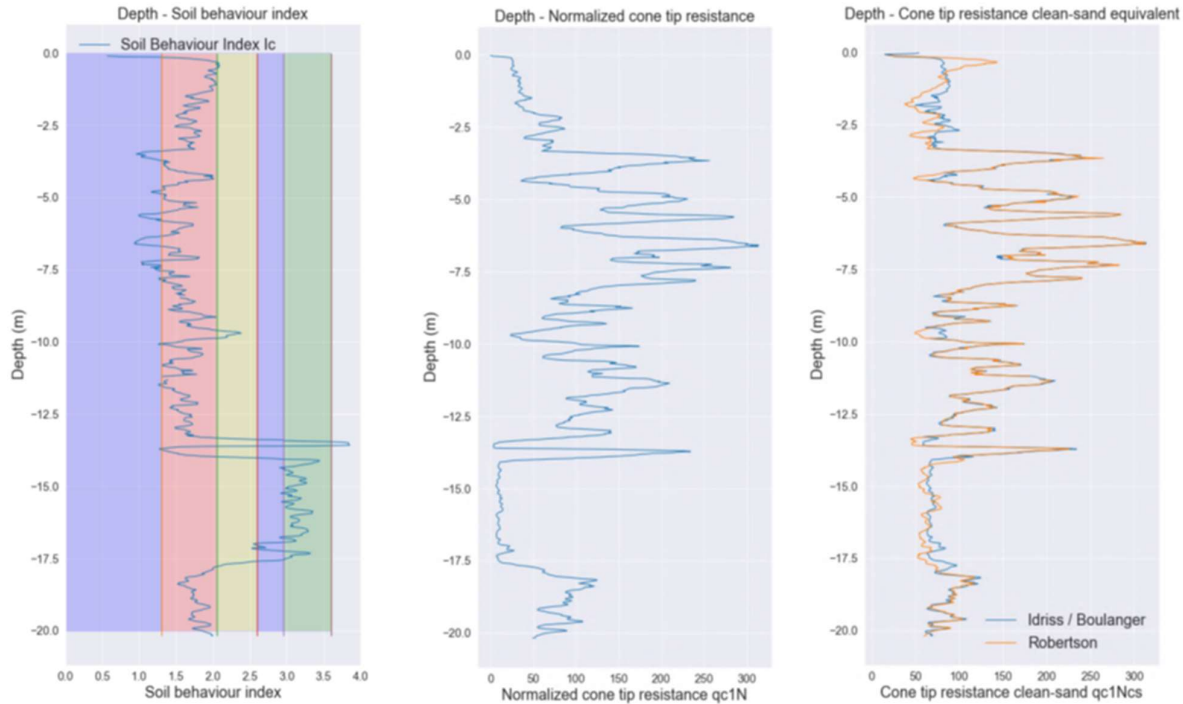


Figure 3: Résultats de l'analyse des essais du Site 1 par pyCTPu.

Site 2 : Bourget-du-Lac, Chambéry.

Un essai CPTu a été réalisé au Bourget-du-Lac, près de Chambéry, pour étudier le tassement d'un bâtiment construit sur un sol compacté sur les deux premiers mètres, marqués par une résistance de pointe élevée au-dessus de la profondeur de 2 mètres. Les quantités mesurées sur ce site sont indiquées sur la Figure 4. Immédiatement en dessous, nous avons une résistance de pointe très faible jusqu'à 8 m de profondeur correspondant à un sol argileux comme on peut le voir dans l'indice de comportement du sol montré dans la Figure 5. En utilisant les résultats montrés sur les Figures 4 et 5, l'équation 2 et les corrélations reliant les données pénétrométriques et l'angle de frottement (Kulhawy & Mayne, 1990), nous pouvons calculer la résistance à la liquéfaction du sol tous les 2 centimètres. En utilisant la définition du CSR de Seed & Idriss (1971) et une accélération du sol attendue de $1,92 \text{ m/s}^2$ pour la région où ces tests CPTu ont été effectués, nous avons calculé un LPI de 4,12 sur le site n° 1 et de 8,75 sur le site n° 2. En comparant les deux, nous pouvons avoir un facteur de sécurité (FS) et calculer LPI en utilisant l'équation 3. Ces résultats sont validés par les résultats du logiciel CLIQ qui ont donné des lectures similaires comme le montrent les figures 6 et 7 pour les sites 1 et 2 respectivement.

5. Effet des paramètres d'entrée sur la susceptibilité à la liquéfaction

En utilisant notre code pyCPTu, nous avons observé l'effet du niveau des eaux souterraines, des données CPTu d'entrée et de l'accélération du sol attendue du tremblement de terre sur le coefficient LPI. En changeant simplement le niveau des eaux souterraines de 5 m à 1 m pour le site 1, le coefficient LPI a changé de 4,12 à 17,07. Ce changement important du LPI fait passer le risque de liquéfaction de faible à élevé, comme indiqué dans le Tableau

1. De même, le LPI pour ce site passe de 4,12 à 2,61 et 6,16 en augmentant et en diminuant (respectivement) la résistance de pointe de 20 % sans changer aucun autre paramètre. Le changement du frottement latéral d'une valeur similaire de 20% change le LPI de moins de 0,3, tandis qu'un changement similaire de la pression interstitielle n'a presque aucun effet sur le calcul de LPI.

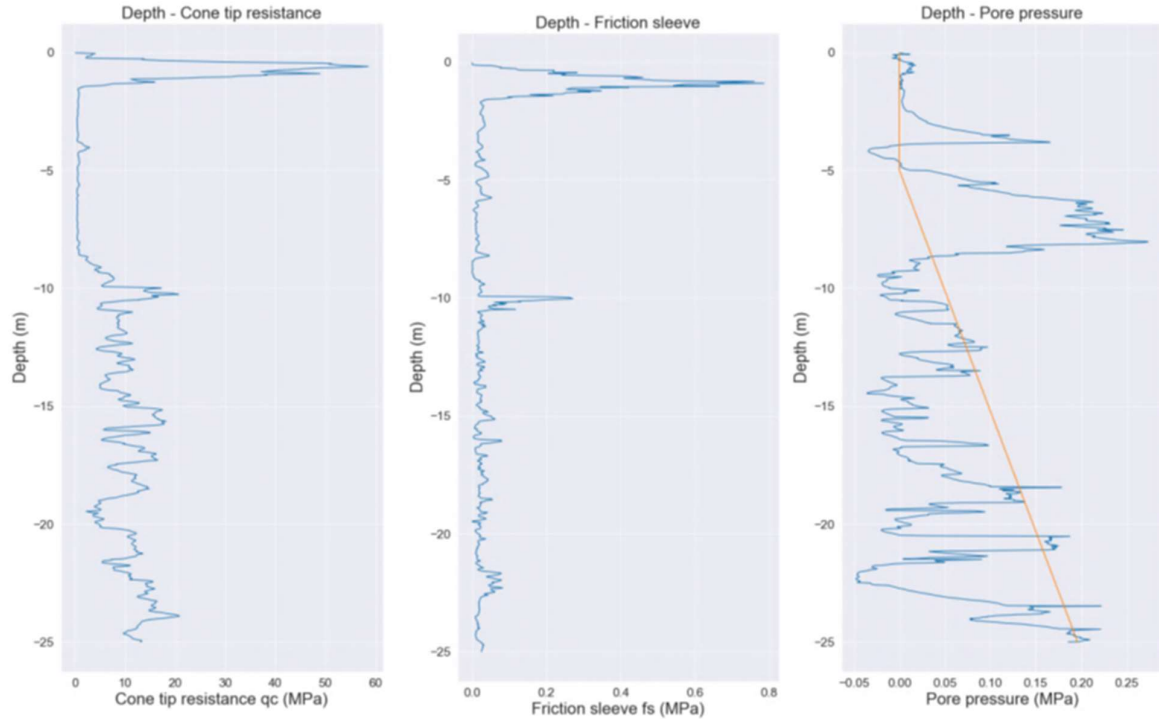


Figure 4: Résultats bruts des essais du Site 2.

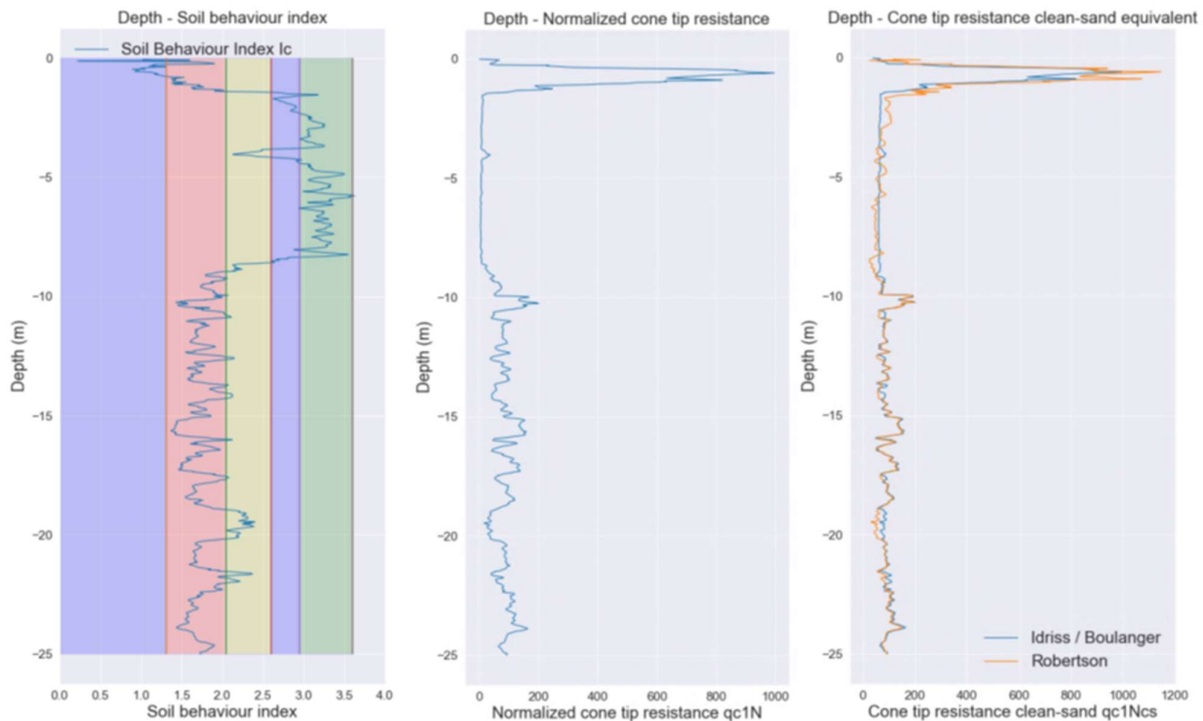


Figure 5: Résultats de l'analyse des essais du Site 2 par pyCTPu.

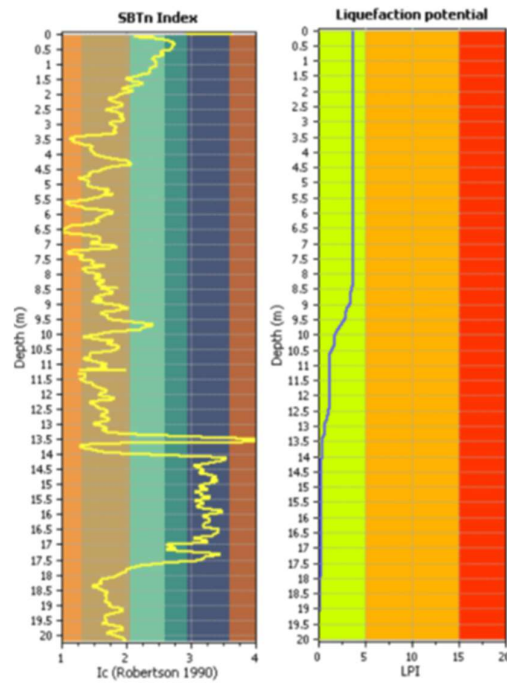


Figure 6: Résultats du logiciel CLIQ pour le site 1.

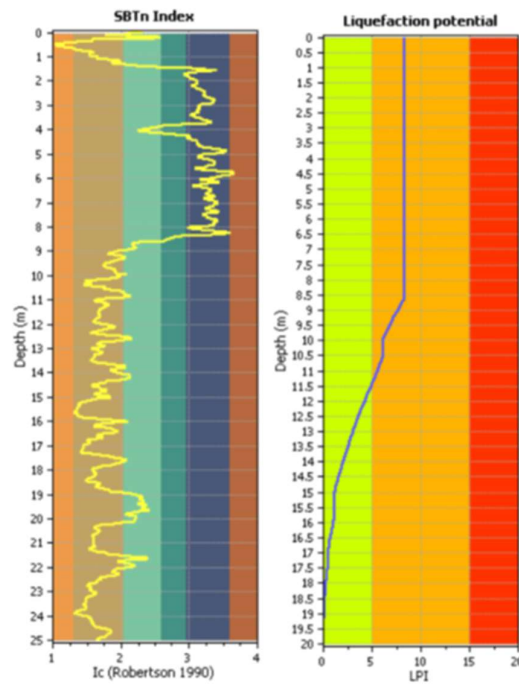


Figure 7: Résultats du logiciel CLIQ pour le site 2.

Un paramètre d'entrée important pour le calcul du rapport CSR et donc du facteur de sécurité FS et de l'indice de potentiel de liquéfaction LPI est l'accélération maximale du sol attendue pour un événement sismique. Cette accélération est généralement recommandée dans les codes de conception et est de 0,19g pour le site n° 1. Cependant, ces valeurs peuvent varier entre 0,16g et 0,30g en fonction de zonage sismique réglementaire français. Nous avons calculé le coefficient LPI pour les trois valeurs de 0,19g, 0,24g et 0,15g. Nous avons constaté que le LPI pour ces cas passe de 4,12 à 7,53 puis 1,14

respectivement. Ce paramètre, ainsi que le niveau de la nappe phréatique, peut donc modifier considérablement le potentiel de liquéfaction du site. Puisque l'eau souterraine peut changer au cours des différentes saisons et que l'accélération du sol dépend de la période de retour du tremblement de terre, les calculs de LPI peuvent facilement changer en fonction des paramètres utilisés pour l'étudier.

Indice de risque de liquéfaction	
0	Très faible
0 – 5	Faible
5 – 15	Moyen
> 15	Elevé

Tableau 2 : Domaines des coefficients LPI (Iwasaki et al., 1981)

6. Conclusions

Les principales caractéristiques du code développé sont les suivantes :

- Représentation facile des données brutes CPTu enregistrées pour chaque profondeur ;
- Calcul de l'indice de comportement du sol ;
- Calcul du CRR basé sur la méthode de Robertson (2009) ou celle de Boulanger & Idriss (2014) et du CSR basé sur la méthode Seed & Idriss (1971) ;
- Calcul de LPI et d'autres indices de susceptibilité à la liquéfaction.

Le code est constamment modifiable et améliorable en calculant les différents paramètres de sol basés sur les différentes méthodes développées par les chercheurs. Il est encore possible d'améliorer le code en ajoutant le potentiel de liquéfaction provenant d'autres tests comme le SPT et les tests in-situ d'ondes de cisaillement ou différents paramètres de vulnérabilité à la liquéfaction.

7. Références bibliographiques

- Boulanger R.W., & Idriss I.M. (2014). CPT and SPT based liquefaction triggering
- Iwasaki T., Tokida K., & Tatsuoka F. (1981). Soil Liquefaction Potential Evaluation with Use of the Simplified Procedure. First International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 209–214.
- Kulhawy F H, and Mayne P W. (1990) Manual on estimating soil properties for foundation design. United States.
- Robertson P. K. (1990). Soil classification using the cone penetration test.
- Robertson P. K. (2016). Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system — an update. Canadian Geotechnical Journal, 53(12), 1910–1927.
- Robertson P. K., & Cabal K. L. (2015). CPT Guide 2015, GREGG.
- Robertson P. K., & Wride C. E. F. (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test.
- Seed H.B. and Idriss I.M. (1971) Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE 97, SM9, 1249-1273.