



HAL
open science

Banc de qualification pour une application de la méthode simplifiée d'analyse du risque de liquéfaction des sols à partir des essais in situ SPT et CPT

E. Javelaud, D. Moiriat, J.F Serratrice, N. Dufour, D. Folliard, J. J. Fry, Alexandre Gaal, M. Hocde, P. Miraillet, S. Reynaud

► To cite this version:

E. Javelaud, D. Moiriat, J.F Serratrice, N. Dufour, D. Folliard, et al.. Banc de qualification pour une application de la méthode simplifiée d'analyse du risque de liquéfaction des sols à partir des essais in situ SPT et CPT. 10ème Colloque National AFPS 2019, AFPS, Sep 2019, Strasbourg, France. cea-02862383

HAL Id: cea-02862383

<https://cea.hal.science/cea-02862383>

Submitted on 9 Jun 2020

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.

Banc de qualification pour une application de la méthode simplifiée d'analyse du risque de liquéfaction des sols à partir des essais *in situ* SPT et CPT

E. Javelaud¹, D. Moiriat², J.F. Serratrice³, N. Dufour³, D. Folliard⁴, J.J. Fry⁵, A. Gaal⁶, M. Hocde⁷, P. Miraillet¹, S. Reynaud⁸

¹ EDF-DI-TEGG, 905 avenue du Camp de Menthe, 13097 Aix-en-Provence Cedex 02

² IRSN, B.P. 17, 31 avenue de la division Leclerc, 92262 Fontenay-aux-Roses Cedex

³ Cerema, UMR 7329 GEOAZUR, Pôle d'activités Les Milles, Avenue Albert Einstein CS 70499, 13593 Aix-en-Provence Cedex 3

⁴ FUGRO GEOCONSULTING S.A.S, 20 ZAC du Pujol 1, 13390 Auriol

⁵ EDF-CIH, 4 allée du Lac de Tignes, 73290 La Motte Servolex

⁶ CEA, 13108 Saint Paul lez Durance Cedex

⁷ TERRASOL, Immeuble Central Seine - 42/52 quai de la Râpée CS 71230, 75583 Paris Cedex 12

⁸ EGIS, 3 rue du Docteur Schweitzer, 38180 Seyssins

RÉSUMÉ. Dans la pratique courante, la quantification du risque de liquéfaction des sols sous l'effet de séismes passe par l'utilisation de la méthode simplifiée appliquée aux essais *in situ* de type SPT ou CPT. Initialement proposée par Seed et Idriss en 1971, cette méthode permet d'estimer des coefficients de sécurité vis-à-vis de ce risque (F_{sl}). La méthode a fait l'objet d'états de l'art successifs dont le dernier a été établi par le NCEER lors d'un colloque en 1997 (Youd et al., 2001). Si la démarche empirique est largement acceptée, certains détails de sa mise en œuvre pratique font débat, laissant à l'utilisateur l'initiative d'une interprétation. A défaut de résoudre toutes les indéterminations, il est apparu important de fiabiliser la progression des calculs des coefficients F_{sl} à partir des données *in-situ* SPT et CPT. Dans ce but, un banc de qualification des options de calcul a été mis en partage entre utilisateurs pour aboutir à des recommandations de mise en œuvre de la méthode simplifiée.

ABSTRACT. Soil liquefaction triggering during earthquakes is usually evaluated by the SPT or CPT based simplified method. This method, first proposed by Seed and Idriss in 1971, allows evaluating the factor of safety against liquefaction. Several states of the art have been published over the years, the later being at the NCEER' 1997 workshop (Youd et al., 2001). Practical utilisation of this state of the art provides results that are user-dependant. Whereas all the questions raised by the NCEER's practical utilisation are not exhaustively addressed in this paper, it has being found interesting to share the current practices. This paper provides the results of two benchmarks that put into practice the SPT and CPT based simplified method.

MOTS-CLÉS : Liquéfaction ; méthode simplifiée ; NCEER ; quantification ; coefficient de sécurité ; cas test ; SPT ; CPT

KEYWORDS: Liquefaction ; simplified method; NCEER ; quantification ; factor of safety ; benchmark ; SPT; CPT.

1 Introduction

Le projet de Recommandations 2020 de l'Association Française de Génie Parasismique vise à établir l'état de l'art actuel à destination des intervenants de la Construction, principalement les concepteurs, en se basant sur les derniers développements scientifiques et techniques largement acceptés dans ce domaine professionnel. Dans le cadre des recommandations, la partie Géotechnique inclut la liquéfaction des sols sous l'effet des séismes, et, plus particulièrement, la quantification du risque de liquéfaction par la méthode simplifiée fondée sur les essais *in situ*.

La méthode simplifiée (Youd *et al.*, 2001) consiste à comparer la contrainte de cisaillement cyclique induite par le séisme à la résistance au cisaillement cyclique du sol à différentes profondeurs de la couche de sol concernée. Pour être comparées, ces deux grandeurs sont normalisées et s'expriment respectivement par le rapport de cisaillement CSR (Cyclic Stress Ratio) et le rapport de résistance cyclique CRR (Cyclic Resistance ratio). Un coefficient de sécurité vis à vis du risque de liquéfaction F_{SL} est calculé ensuite. La mise en œuvre pratique de la méthode simplifiée repose sur la procédure NCEER (National Center for Earthquake Engineering Research, USA) proposée dans la publication de Youd *et al.* (2001).

Si cette démarche empirique est largement acceptée, certains détails de sa mise en œuvre pratique font débat, laissant à l'utilisateur l'initiative d'une interprétation. A défaut de lever toutes les indéterminations, il est apparu important de fiabiliser la progression des calculs des coefficients F_{SL} à partir des données d'essais *in situ* SPT et CTP. Dans ce but, un banc de qualification des options de calcul a été mis en partage entre différents utilisateurs pour aboutir à des recommandations de mise en œuvre de la méthode simplifiée. Deux cas tests constitués par des données recueillies au carottier SPT et au pénétromètre statique CPT ont été proposés aux participants du sous-groupe de travail « Liquéfaction » afin de trouver un accord sur les modalités de mise en œuvre de la procédure NCEER. Cet article présente les principaux résultats et les enseignements tirés de ces deux ateliers.

Parmi les paramètres en jeu dans la méthode NCEER, les deux cas tests n'examinent pas le choix du coefficient correctif de magnitude (dénommé CM ou MSF), ni celui des coefficients correctifs pour la présence de contraintes de cisaillement statiques ($K\alpha$) et des fortes pressions sous le poids des terres ($K\sigma$). Ces paramètres relèvent de l'application des conditions générales du projet.

2 Niveau de la nappe d'eau à considérer pour les études de liquéfaction

Ces deux exemples ont permis de rappeler que deux niveaux de nappe distincts sont à considérer : un niveau de nappe lors de la réalisation des essais *in situ* et un niveau de nappe en situation « de projet ». Les participants aux cas tests ont retenu un poids volumique de l'eau γ_w égal à 9,81 kN/m³.

Le niveau de la nappe lors de la réalisation des essais CPT ou SPT est requis pour évaluer le rapport de résistance cyclique CRR : ce niveau intervient en particulier pour l'essai SPT dans le calcul du facteur correctif C_N lié à la profondeur et pour l'essai CPT pour le calcul de la résistance de pointe normalisée Q et du coefficient correcteur C_q .

L'évaluation du rapport de cisaillement CSR requiert de spécifier un niveau de nappe « de projet », concomitant avec la sollicitation sismique, qui dépend du référentiel normatif (Javelaud, 2015).

3 Evaluation du rapport de cisaillement CSR

Le rapport de cisaillement CSR est évalué en champ libre en mode pseudo-statique grâce à l'expression suivante :

$$CSR = \frac{\tau_{moy}}{\sigma'_{v0}} = 0,65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} r_d$$

où τ_{moy} est la contrainte de cisaillement moyenne pendant un demi-cycle du mouvement sismique, a_{max} (ou PGA) l'accélération horizontale maximale à la surface du sol, g l'accélération de la pesanteur, σ_{v0} la contrainte verticale

totale à la profondeur z considérée, σ'_{v0} la contrainte verticale effective et r_d un facteur de réduction avec la profondeur. Le coefficient 0,65 représente une approximation du rapport entre la contrainte de cisaillement uniforme équivalente et la contrainte de cisaillement maximale du signal sismique. Le calcul des pressions interstitielles et de la contrainte verticale effective est effectué avec le niveau de nappe « de projet ».

Pour effectuer le calcul du coefficient r_d dans le deux cas tests, les participants ont retenus la formule de Blake (Youd *et al.*, 2001) :

$$r_d = \frac{(1,000 - 0,4113z^{0,5} + 0,04052z + 0,001753z^{1,5})}{(1,000 - 0,4177z^{0,5} + 0,05729z - 0,006205z^{1,5} + 0,001210z^2)}, \text{ où la profondeur } z \text{ est inférieure ou égale à } 30 \text{ m.}$$

4 Banc de qualification pour une application de la méthode simplifiée basée sur l'essai au carottier SPT

4.1 Résultats bruts d'essais SPT

Les résultats d'un essai *in situ* fictif de pénétration au carottier sont présentés dans le Tableau 1. Les essais sont réalisés dans des sols de poids volumiques saturés γ_{sat} et non-saturés γ_{humide} respectivement égaux à 20 kN/m³ et 18,5 kN/m³. Le niveau de la nappe lors de la réalisation du forage se trouve à -1 m par rapport au terrain naturel. Le carottier utilisé possède un diamètre intérieur de 35 mm. Le diamètre du forage est compris entre 65 et 115 mm.

Tableau 1. Données brutes du cas test pour les essais de pénétration au carottier SPT en sondage

Profondeur (m)	$N_{\text{SPT}/30\text{cm}}$	Rapport d'énergie E_r (%)	Fraction fines FC (%)	Hauteur sous enclume (m)
1,5	14	40	4	3,8
3	9	55	5	4,8
4,5	13	60	7	5,8
6	15	90	9	7,8
7,5	11	58	5	8,8
9	17	64	8	10,8
10,5	19	68	8	12,8
12	13	51	25	13,8
13	70	49	4	14,8

4.2 Donnée des conditions sismiques

L'évaluation du rapport de cisaillement cyclique induit par le séisme est effectuée en considérant un séisme de magnitude M_w égale à 7,5, une accélération PGA égale à 0,17 g, et un niveau d'eau « de projet » affleurant (situé au droit du terrain naturel).

4.3 Démarche suivie et recommandations

Le choix des facteurs de correction à appliquer au nombre de coups $N_{\text{SPT}/30\text{cm}}$ mesuré lors de l'essai a été fait par les participants de la façon suivante afin de répondre aux spécifications de la norme NF EN ISO 22476-3.

4.3.1 C_R est un facteur de correction lié à la longueur du train de tiges

Les participants ont retenu les termes correcteurs C_R suivants relatifs à la longueur totale de tiges L :

$$\begin{aligned} C_R &= 0,75 && \text{pour } L \leq 4 \text{ m,} \\ C_R &= 0,85 && \text{pour } 4 < L \leq 6 \text{ m,} \end{aligned}$$

$$C_R = 0,95 \quad \text{pour } 6 < L \leq 10 \text{ m,}$$

$$C_R = 1 \quad \text{pour } 10 < L < 30 \text{ m.}$$

Ces facteurs de correction sont issus de la norme NF EN ISO 22476-3 : 2005 (annexe A) et sont globalement en accord avec ceux de la procédure NCEER.

Les participants recommandent de veiller à recueillir de la part de l'équipe de forage la longueur de tiges sous l'enclume à chaque essai. Supérieure à la profondeur d'essai, la longueur des tiges à retenir comprend ainsi aussi la partie hors du trou, qui entre dans le calcul. Les participants ont retenus comme profondeur conventionnelle de l'essai la cote située entre les passes de mesures des nombres de coups N_1 et N_2 (soit 30 cm après le début de l'amorçage N_0).

4.3.2 C_S est un facteur de correction lié au type de carottier SPT utilisé

Les facteurs de correction C_S liés au type de carottier SPT sont issus de la norme NF EN ISO 22476-3 : 2005 (annexe A) et sont globalement en accord avec ceux de la procédure NCEER. Lorsque le carottier possède un diamètre intérieur de 35 mm, le facteur C_S vaut 1 (ce qui peut être le cas d'un carottier qui a un diamètre intérieur supérieur à 35 mm contenant un étui qui ramène le diamètre intérieur à 35 mm). Lorsque le carottier possède un diamètre intérieur de 38 mm et que l'étui intérieur n'est pas mis en place, le facteur C_S est retenu à 1,15.

Il est recommandé d'éviter l'utilisation des carottiers munis d'une réservation en l'absence d'étui et de demander à l'équipe de forage de bien noter le type de carottier utilisé.

4.3.3 C_N est un facteur de correction lié à la profondeur d'essai

Le coefficient de correction C_N ramène la valeur du nombre de coups mesuré N à une profondeur z à celle qu'on obtiendrait, toutes choses égales par ailleurs, si la contrainte verticale effective au niveau de l'essai était de 100 kPa (soit à typiquement 10 m de profondeur avec une nappe phréatique subaffleurante).

Les participants ont retenu la formulation $C_N = \sqrt{\frac{Pa}{\sigma'_{v0}}}$ proposée par la norme NF EN ISO 22476-3 : 2005, en limitant son application à des contraintes verticales effectives σ'_{v0} inférieures à 200 kPa et en adoptant pour la pression atmosphérique la valeur $Pa = 100$ kPa, au lieu de la valeur de 98 kPa retenue dans la norme. Pour des contraintes verticales effectives σ'_{v0} comprises entre 200 kPa et 300 kPa, il est proposé d'utiliser la formule $C_N = 2,2 / (1,2 + \frac{\sigma'_{v0}}{Pa})$, qui est proposé également dans la procédure NCEER et dont les valeurs sont légèrement plus faibles que celles retenues avec la précédente formulation dans cette gamme de contraintes. Les participants proposent enfin de limiter ce facteur C_N à une valeur maximale de 1,7.

Pour effectuer le calcul de la résistance CRR, les contraintes verticales effectives et les pressions hydrostatiques sont évaluées en tenant compte du niveau d'eau à la date de l'essai.

4.3.4 Autres recommandations

Les participants recommandent d'effectuer la mesure en laboratoire de la teneur en fines (correspondant au passant à 80 μm pour les études simplifiées de liquéfaction) du sol extrait du carottier SPT lorsque la valeur normalisée de la résistance à la pénétration $(N_1)_{60}$ est inférieure à 30.

4.4 Résultats

Les résultats obtenus par les participants au cas test sont présentés dans le Tableau 2. Plusieurs itérations se sont avérées nécessaires pour converger vers un enchaînement des opérations de calcul reconnu par l'ensemble des participants.

Tableau 2. Evaluation du rapport de résistance cyclique CRR, du rapport de cisaillement CSR et du facteur de sécurité à la liquéfaction F_{SL}

Profondeur (m)	Calcul du CRR														Calcul du CSR					Facteur de sécurité à la liquéfaction F_{SL}
	σ_{v0} (kPa)	u (kPa)	σ'_{v0} (kPa)	C_N	C_E	C_B	C_R	C_S	N_1	$(N_1)_{60}$	$(N_1)_{60-CS}$	$CRR_{7,5}$	MSF	CRR_M	σ_{v0} (kPa)	u (kPa)	σ'_{v0} (kPa)	r_d	CSR	
1,5	28,5	4,905	23,595	1,70	0,67	1	0,75	1	23,80	11,90	11,90	0,130	1	0,130	30	14,715	15,285	0,990	0,215	0,61
3	58,5	19,62	38,88	1,60	0,92	1	0,85	1	14,43	11,25	11,25	0,124	1	0,124	60	29,430	30,57	0,979	0,212	0,58
4,5	88,5	34,335	54,165	1,36	1,00	1	0,85	1	17,66	15,01	15,26	0,163	1	0,163	90	44,145	45,855	0,969	0,210	0,77
6	118,5	49,05	69,45	1,20	1,50	1	0,95	1	18,00	25,65	26,64	0,329	1	0,329	120	58,860	61,14	0,958	0,208	1,58
7,5	148,5	63,765	84,735	1,09	0,97	1	0,95	1	11,95	10,97	10,97	0,122	1	0,122	150	73,575	76,425	0,943	0,205	0,60
9	178,5	78,48	100,02	1,00	1,07	1	1	1	17,00	18,13	18,66	0,199	1	0,199	180	88,290	91,710	0,923	0,200	1,00
10,5	208,5	93,195	115,305	0,93	1,13	1	1	1	17,69	20,05	20,61	0,223	1	0,223	210	103,005	106,995	0,894	0,194	1,15
12	238,5	107,91	130,59	0,88	0,85	1	1	1	11,38	9,67	15,07	0,161	1	0,161	240	117,720	122,28	0,857	0,186	0,87
13	258,5	117,72	140,78	0,84	0,82	1	1	1	59,00	48,18	48,18	Non liquéfiable	1	Non liquéfiable	260	127,530	132,47	0,827	0,179	Non liquéfiable

Où

σ_{v0} est la contrainte verticale totale au niveau de la mesure, en kPa
 σ'_{v0} est la contrainte verticale effective au niveau de la mesure, en kPa
u est la pression hydrostatique, en kPa
 C_N est un coefficient correcteur lié la profondeur de l'essai
 C_E est un coefficient correcteur lié à l'énergie appliquée sur le train de tiges
 C_B est un coefficient correcteur lié au diamètre du forage dans lequel est effectué l'essai SPT
 C_R est un terme correcteur lié à la longueur du train de tiges
 C_S est un coefficient correcteur lié au type de carottier SPT utilisé
 N_1 représente le nombre de coups brut $N_{SPT/30cm}$ normalisé pour un poids des terres de 100 kPa

$(N_1)_{60}$ représente la valeur de N_1 correspondant à un facteur d'énergie de 60%, nécessaire pour enfoncer le carottier de 30 cm

$(N_1)_{60-CS}$ le nombre de coups corrigé et rapporté à un sable propre équivalent

$CRR_{7,5}$ est la valeur du CRR pour un séisme de magnitude de 7,5

MSF est le facteur de correction de magnitude

CRR_M est la valeur du CRR pour un séisme de magnitude M

r_d est le facteur de réduction avec la profondeur du cisaillement cyclique induit par le séisme

CSR est le rapport de cisaillement

F_{SL} est le coefficient de sécurité vis-à-vis du risque de liquéfaction

5 Banc de qualification pour une application de la méthode simplifiée basée sur l'essai au pénétromètre statique CPT / CPTu

5.1 Résultats bruts d'essais CPT

Les résultats d'un essai *in situ* fictif au pénétromètre statique CPT sont présentés dans le Tableau 3 où les résistances de pointe q_c et les frottements latéraux f_s sont donnés à six profondeurs. Les essais sont réalisés dans des sols de poids volumiques saturés γ_{sat} et non-saturés γ_{humide} respectivement égaux à 20 kN/m³ et 18,5 kN/m³. Le niveau de la nappe lors de la réalisation du forage se trouve à -1 m par rapport au terrain naturel.

Tableau 3. Données brutes du cas test pour les essais de pénétration au cône CPT en sondage

Profondeur/terrain naturel (m)	Résistance de pointe (q_c) en kPa	Frottement (f_s) en kPa
1	3087	80
2	1919	25
3	1985	85
4	1007	13
5	1924	110
6	1595	75

5.2 Donnée des conditions sismiques

L'évaluation du rapport de cisaillement cyclique induit par le séisme est effectuée en considérant un séisme de magnitude M_w égale à 7,5, une accélération PGA égale à 0,14 g, et un niveau d'eau « de projet » affleurant (situé au droit du terrain naturel).

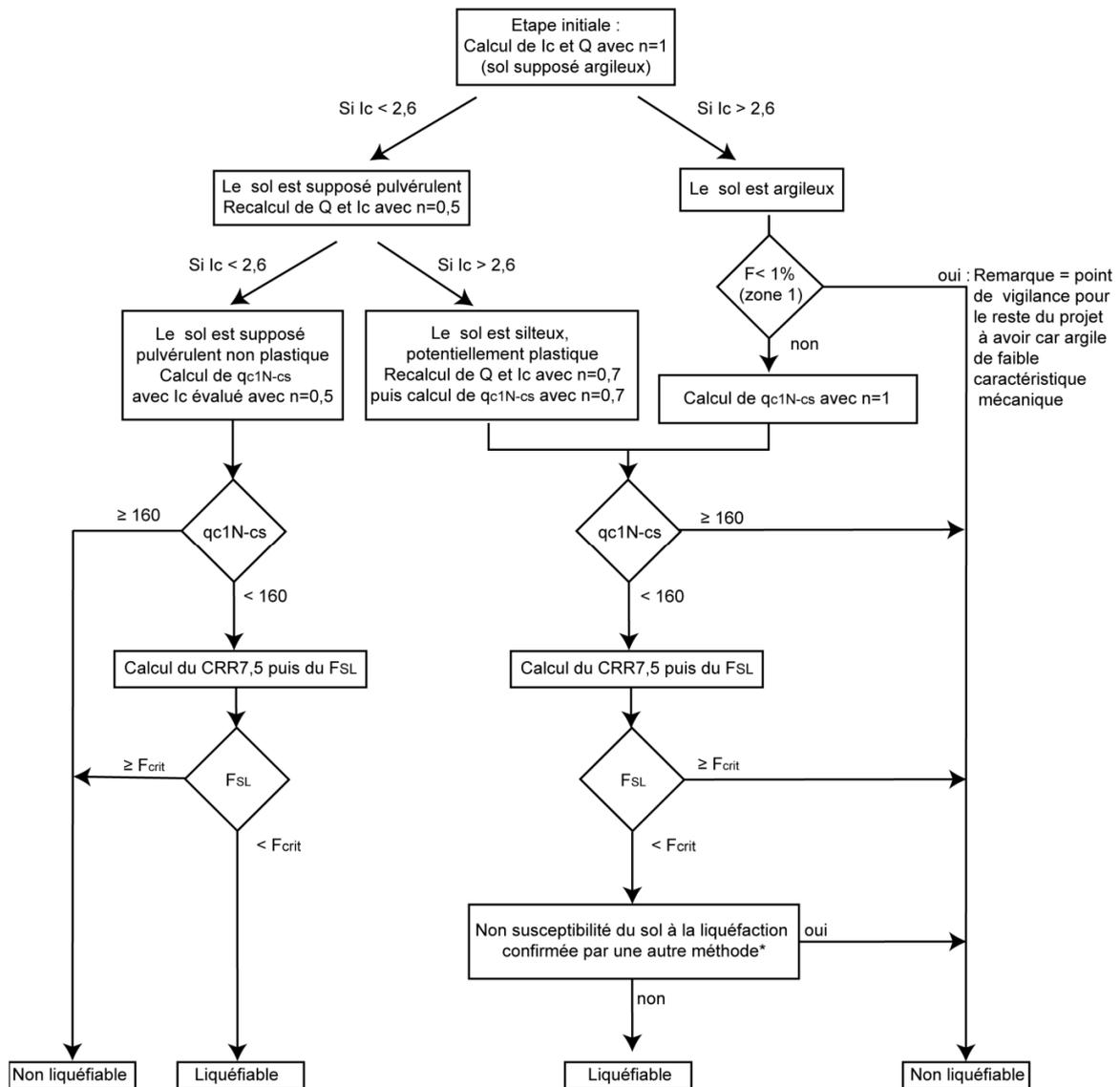
5.3 Démarche suivie et recommandations

La démarche suivie est celle décrite dans la procédure NCEER. Les participants ont mis en œuvre cette méthode en appliquant le logigramme présenté sur la Figure 1.

En particulier, ce logigramme prend en compte le cas des argiles de faibles caractéristiques mécaniques ($I_c > 2,6$ et $F < 1\%$) qui ne sont pas liquéfiables au sens des sables. En identifiant ces terrains, la procédure permet également d'alerter le géotechnicien pour les conséquences possibles de leur présence dans le projet.

Pour les matériaux silteux ($n = 0,7$) ou argileux ($n = 1$, $F \geq 1\%$), où n est un exposant qui marque le type de sol, la procédure NCEER suggère d'évaluer la résistance à la liquéfaction du sol, puis de vérifier sa susceptibilité de se liquéfier au moyen d'un autre critère fondé sur les propriétés physique du sol. Ici, les participants ont confirmé la poursuite de l'analyse dans ces deux cas de sols silteux et argileux, mais ne recourent à un autre critère seulement lorsque le facteur de sécurité visé n est pas atteint.

Dans ce cas, les méthodes à mettre en œuvre pour confirmer ou exclure la susceptibilité du sol incluent la réalisation soit d'essais au piézocône CPT_u accompagnés d'essais de dissipation, soit des analyses de laboratoire à partir de prélèvements représentatifs des sols en question. La connaissance globale du site acquise à l'issue des reconnaissances géotechniques contribue à éclairer le jugement.



* Vérification de la susceptibilité par une autre méthode, telles que :

- en phase « chantier » où des reconnaissances géotechniques complémentaires sont possibles et peuvent être réalisées, par exemple avec des essais au piézocône CPTu accompagnés d'essais de dissipation, ou bien des analyses de laboratoire permettant de compléter l'analyse de la susceptibilité des sols ;
- plus généralement, en utilisant les informations relatives à la connaissance du site.

Figure 1. Logigramme utilisé pour évaluer le rapport de résistance cyclique du sol

5.4 Résultats du cas d'étude.

Les résultats obtenus par les participants au cas test sont présentés dans les Tableau 4 et Tableau 5. La convergence des pratiques vers un enchaînement des opérations de calcul reconnu par l'ensemble des participants a été obtenue en deux itérations.

Tableau 4. Evaluation du rapport de résistance cyclique CRR

Profondeur (m)	σ_{vo} (kPa)	u (kPa)	σ'_{vo} (kPa)	F (%)	Etape 1: Détermination de l'indice de comportement du sol I_c et de l'exposant n dépendant du type de sol								Etape 2: Normalisation des valeurs de pointe en fonction du terrain		Etape 3: Correction de la valeur de q_{c1N} (fines) (Méthode de Robertson originale)		Etape 4: Calcul de CRR		
					Première sous-étape d'itération avec n=1		Deuxième sous-étape d'itération avec n=0,5		Troisième sous-étape d'itération avec n=0,7		Paramètres retenus		Cq	q_{c1N}	Kc	q_{c1N-cs}	CRR _{7,5}	MSF	CRR _M
					Q (n=1)	I_c n=1	Q (n=0,5)	I_c n=0,5	Q (n=0,7)	I_c n=0,7	n	I_c							
1	18,50	0,00	18,50	2,61	165,86	2,06	71,34	2,30	-	-	0,50	2,30	1,70	52,48	1,95	102,29	0,180	1	0,180
2	38,50	9,81	28,69	1,33	65,55	2,13	35,11	2,35	-	-	0,50	2,35	1,70	32,62	2,11	68,82	0,110	1	0,110
3	58,50	19,62	38,88	4,41	49,55	2,57	30,90	2,72	37,32	2,66	0,70	2,66	1,70	33,75	3,72	125,51	0,264	1	0,264
4	78,50	29,43	49,07	1,40	18,92	2,58	13,25	2,72	15,28	2,66	0,70	2,66	1,65	16,58	3,73	61,90	0,102	1	0,102
5	98,50	39,24	59,26	6,03	30,80	2,82	-	-	-	-	1,00	2,82	1,69	32,47	4,92	159,60	0,458	1	0,458
6	118,50	49,05	69,45	5,08	21,26	2,88	-	-	-	-	1,00	2,88	1,44	22,97	5,51	126,60	0,269	1	0,269

où

 σ_{vo} est la contrainte verticale totale au niveau de la mesure, en kPa

u est la pression hydrostatique, en kPa

 σ'_{vo} est la contrainte verticale effective au niveau de la mesure, en kPaF est le rapport de frottement, en %, avec $F = \frac{f_s}{q_c - \sigma_{vo}} \cdot 100$ Q est la résistance de pointe normalisée, avec $Q = \frac{q_c - \sigma_{vo}}{Pa} \cdot \left(\frac{Pa}{\sigma'_{vo}}\right)^n$ I_c est l'indice de comportement du sol, avec $I_c = [(3,47 - \log Q)^2 + (\log F + 1,22)^2]^{0,5}$ Cq est un coefficient normalisateur, avec $Cq = \left(\frac{Pa}{\sigma'_{vo}}\right)^n$ q_{c1N} est la résistance de pointe normalisée $q_{c1N} = \frac{q_c}{Pa} Cq$ Kc est le facteur de correction des fines. Kc=1 pour $I_c \leq 1,64$ et $Kc = -0,403I_c^4 + 5,581 I_c^3 - 21,63 I_c^2 + 33,75 I_c - 17,88$ pour $I_c > 1,64$ q_{c1N-cs} est la résistance de pointe normalisée q_{c1N} ajustée sur la teneur en fines, avec $q_{c1N-cs} = Kc q_{c1N}$ CRR_{7,5} est le rapport de résistance cyclique du sol pour un séisme de magnitude 7,5

MSF est le facteur de correction de magnitude

CRR_M est la valeur du CRR pour un séisme de magnitude M

Tableau 5. Evaluation du rapport de cisaillement CSR

Profondeur (m)	σ_{vo} (kPa)	u (kPa)	σ'_{vo} (kPa)	Calcul du CSR	Facteur de sécurité à la liquéfaction F_{SL}
1	20	9,81	10,19	0,178	1,01
2	40	19,62	20,38	0,176	0,63
3	60	29,43	30,57	0,175	1,51*
4	80	39,24	40,76	0,174	0,59*
5	100	49,05	50,95	0,172	2,66*
6	120	58,86	61,14	0,171	1,57*

où

σ_{vo} est la contrainte verticale totale au niveau de la mesure

σ'_{vo} est la contrainte verticale effective au niveau de la mesure

u est la pression interstitielle

F est le rapport de frottement, en %, avec $F = \frac{f_s}{q_c - \sigma_{vo}} \cdot 100$

CSR est le rapport de cisaillement

F_{SL} est le coefficient de sécurité vis-à-vis du risque de liquéfaction

* Sol silteux ($n=0,7$) ou argileux ($n=1$). Une vérification de la susceptibilité du sol à la liquéfaction est demandée sur des échantillons du sol. En l'absence d'informations complémentaires provenant du laboratoire, le sol est considéré susceptible de se liquéfier et le facteur de sécurité à la liquéfaction calculé est présenté.

6 Conclusion

Cet article présente les résultats de l'application de la méthode simplifiée NCEER (Youd *et al.*, 2001) pour l'analyse de la liquéfaction des sols à partir des essais *in situ* SPT et CPT. Les modalités d'application pratique de la méthode simplifiée NCEER à partir de ces données de terrain ont fait l'objet d'une approbation partagée par les participants aux deux ateliers. Ces derniers soulignent toute l'importance à donner au recueil des informations spécifiques qui encadrent la réalisation des essais sur le site et qui contribuent à la bonne qualité des reconnaissances et de leurs analyses. Cela vaut tout particulièrement pour l'essai SPT.

Ce travail n'aborde pas le choix des termes MSF (CM), K_α et K_σ dont le rôle est important dans le résultat de l'analyse de la susceptibilité d'une couche de sol à la liquéfaction par la méthode NCEER. Il ne propose pas non plus de seuils (F_{crit}) servant de critère pour quantifier le risque. Dans l'état actuel, ces choix dépendent de la connaissance du site et de la nature du projet et sont laissés à l'intelligence du concepteur et l'arbitrage du maître d'ouvrage. Des précisions sont attendues dans la prochaine version de l'Eurocode 8-5. Une progression des connaissances est espérée avec les développements des programmes de recherches tels que le projet ANR Isolate.

7 Bibliographie

- ANR Isolate : Characterizing and Improving SOILs Against Liquefaction <https://anr.fr/Project-ANR-17-CE22-0009>
- AFNOR (2005). NF EN ISO 22476-3. Sols : reconnaissance et essais géotechniques – Essais en place. Partie 3 Essai de pénétration au carottier.
- AFNOR (2013). Norme NF EN ISO 22476-1. Reconnaissance et essais géotechniques – Essais en place. Partie 1 Essai de pénétration au cône électrique et au piézocône.
- Javelaud E. (2015). Etat de l'art des méthodes d'évaluation du risque de liquéfaction. Cas des ouvrages à risques normal et spécial en France. 9^{ème} colloque National AFPS, IFSTTAR, 11 p.
- Seed H.B., Idriss I.M. (1971) Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, vol. 97, n° 9, pp. 1249-1273.
- Youd T.L., I.M. Idriss (1997). Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. Technical Report NCEER-97-0022, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.
- Youd T.L., I.M. Idriss, R.D. Andrus, I. Arango, G. Castro, J.T. Christian, R. Dobry, W.D. Liam Finn, L.F. Harder Jr, M.E. Hynes, K. Ishihara, J.P. Koester, S.S.C. Liao, W.F. Marcusson III, G.R. Martin, J.K. Mitchell, Y. Moriwaki, M.S. Power, P.K. Robertson, R.B. Seed, K.H. Stokoe II (2001). - Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. J. Geotech. and Geoenviron. Engng., vol. 127, n° 10, pp. 817-833. Discussion : J. Geotech. and Geoenviron. Engng., vol. 129, n° 3, pp. 283-286.