CARACTÉRISATION DYNAMIQUE D'UN SITE NUCLÉAIRE EN CONTEXTE BRITANNIQUE

DYNAMIC CHARACTERIZATION OF A NUCLEAR SITE IN THE UK

Baptiste PELLETIER¹

¹ EDF S.A. service Géologie & Géotechnique, Aix-en-Provence, France

RÉSUMÉ – Du fait de la sollicitation sismique très élevée prise en compte dans les études d'interaction sol-structure dynamique et de réponse de site des ouvrages nucléaires, la caractérisation géotechnique du site requiert une attention particulière. L'article présente le contexte historique et réglementaire du projet, les méthodes employées et leur intérêt dans l'analyse pour aboutir à un modèle de sol robuste pour le dimensionnement sismique.

ABSTRACT – Given the very high seismic solicitation taken into account in soil-structure interaction and seismic site response studies for new nuclear buildings, the geotechnical characterization of the site requires specific attention. This article presents the historical context and regulatory framework, the investigation methods that have been used and their specific interest in the analysis which lead to a robust soil model for the seismic design.

1. Introduction

Dans le cadre du renouvellement de son parc nucléaire, le Royaume-Uni construit actuellement 2 tranches EPR 1600 MW à Hinkley Point, et en envisage (entre autres) 2 nouvelles sur le site de Sizewell, dans le Suffolk sur la côte est de l'Angleterre. Le projet est actuellement développé par EDF. Le Service Géologie & Géotechnique est responsable des définition, suivi, et analyse des reconnaissances, et de l'élaboration du modèle de sol.

Le site de Sizewell C est adjacent à l'implantation des tranches A (2 réacteurs Magnox exploités entre 1966 et 2006) et B (1 réacteur REP 1200 MW exploité depuis 1995). L'implantation couvre environ 18 ha à terre, les ouvrages en mer courent sur près de 4 km en mer (tunnels de prise et de rejet d'eau).

2. Cadre de travail

Le code pour la conception et la construction nucléaire retenu pour l'EPR au Royaume-Uni est le code ETC-C (2012) de l'AFCEN, qui impose notamment les éléments suivants :

- Des reconnaissances au droit des ouvrages à terre et en mer jusqu'à 2B;
- Une caractérisation spécifique de l'aléa sismique, incluant un calcul de réponse de site sismique depuis le substratum rocheux ;
- Des études d'interaction sol-structure (ISS) dynamique incluant les terrains jusqu'à 2B, et d'éventuels contrastes majeurs (ratio de Vs de l'ordre de 3) jusqu'à 6B.

Dans le cas étudié, du fait de la taille des ouvrages considérés, la largeur des fondations B est grande : on retient par exemple 50 m pour le radier principal de l'EPR. Cela implique donc une caractérisation exhaustive jusqu'à environ 100 m de profondeur, et une analyse stratigraphique qualitative jusqu'à au moins 300 m pour justifier l'absence de contraste fort, et potentiellement plus pour l'évaluation de la réponse de site sismique si le substratum rocheux n'est pas atteint.

Par ailleurs, la pratique britannique conduit à réaliser les études d'effet de site sismique de façon probabiliste (PSHA) et non déterministe (DSHA). Une attention particulière est réservée à la caractérisation des paramètres de sol moyens, mais également de leur variabilité. Ceci implique de disposer d'un grand nombre d'essais pour avoir des résultats significatifs afin de pas pénaliser le projet avec des hypothèses trop conservatives.

De ce point de vue, la pratique britannique d'organisation des projets, qui mène à impliquer un grand nombre de bureaux de contrôle pour le compte des différentes instances (client, autorité de sûreté, bureau d'étude en charge des études aval, gouvernement, etc.), conduit à muscler fortement les reconnaissances et va dans le même sens.

Cet article se concentre sur la caractérisation dynamique du site, utilisée pour les études ISS et PSHA. Naturellement, les études de caractérisation de site comprennent également des volets géomécanique statique, hydrogéologie, recherche de failles, etc.

3. Les données

Le développement du site de Sizewell commence en 1957 aux débuts du programme nucléaire britannique. La construction des tranches A, puis B, et les projets successifs de futures tranches C ont conduit à réaliser 17 campagnes de reconnaissances géotechniques distinctes avant la reprise du projet par EDF. À partir de 2009, deux phases de reconnaissances dédiées au nouveau projet ont été réalisées, comprenant 3 campagnes chacune (sondages à terre respectivement en 2011 & 2019, en mer en 2013 & 2019, et sismigue marine en 2010 & 2015).

Les campagnes de la seconde phase étaient principalement dédiée à la caractérisation dynamique (sondages à terre et en mer de 2019) et à préciser la stratigraphie le long du tracé des tunnels (sismique marine de 2015), comprenant de nombreux essais PSSL (mesures des vitesses des ondes P et S en forage), sondages carottés pour réaliser des essais cycliques en laboratoire, essai cross-hole, et plusieurs autres méthodes listées au § 5.1 pour comparer les résultats ou compléter les acquisitions.

L'ensemble des logs des campagnes historiques a été revu en 2019 suivant un guide établi avec le British Geological Survey (BGS, homologue du BRGM au Royaume-Uni) et les sociétés de sondage afin d'homogénéiser le repérage des marqueurs et l'interprétation stratigraphique, rendant ainsi la comparaison entre campagnes la plus fiable possible. Parallèlement, une base de données a été créée pour l'ensemble des logs et résultats d'essais des campagnes historiques, et les nouvelles données y sont intégrées au fur et à mesure.

4. La géologie du site de Sizewell

Sur la base de ce travail, un modèle stratigraphique 3D a été établi utilisant 609 sondages. Le pendage général des couches est vers la mer. Une attention particulière a été apportée à la cartographie du toit des sables des Norwich Crag, qui est la couche retenue pour la fondation des ouvrages nucléaires.

La stratigraphie est résumée dans le Tableau 1. Les interfaces entre les grandes unités (sables des Crag, argiles de Thames / Lambeth / Montrose, craie) sont plus aisées à identifier que les limites intermédiaires, ce qui explique les variations du nombre de sondages utilisables dans le modèle pour chaque couche.

Les glaciations récentes ont érodé les dépôts sableux les plus jeunes (comme les Wroxham Crag), ainsi que la partie supérieure des Norwich Crag. L'activité glaciaire se traduit également par une légère surconsolidation des dépôts qui subsistent.

En-deçà de la craie, on rencontre l'argile du Gault (27 m estimés) puis le rocher du Silurien. On retrouve cette succession et les profondeurs des interfaces dans les sondages profonds historiques (pétroliers) disponibles proches du site, et sur les profils de sismique réflexion effectués en mer le long du tracé des futurs tunnels du projet en 2010 et 2015.

5. La colonne de sol

Les résultats sont discutés pour les V_S uniquement, le même travail a été réalisé sur les V_P. Le modèle est établi autant que possible à l'aide des mesures invasives (§ 5.1), puis sur les mesures géophysiques de surface pour les profondeurs plus importantes (§ 5.2).

Tableau 1. Succession stratigraphique du site et description géologique

Couche	Description	Âge	Épaiss. moy.	Nb. sond.					
Remblais (MG)	Remblais (à terre, issus des Crag) et débris de construction	4 m	-						
Récents (URD)	Tourbes et argiles Sables fins remaniés et graviers	Holocène	7 m	247					
Glaciation (il y a 0,45 Ma) – Pleistocène Moy.									
Crag (CG)	Norwich Crag (NCG) : sable fin. Contient des lits faiblement cimentés, des bancs de débris coquillers et des lentilles d'argile.	Fin du	32 m	408					
	Transgression au Pleistocène Inf.	Tertiaire –							
	Red Crag (RCG): similaire au NCG	début du		74					
	Transgression	Quaternaire							
	Coralline Crag (CCG – en mer, dépôts érodés à terre) : calcarénites cimentées			-					
Importante érosion de l'Oligocène au Miocène. Le dépôt des Crag débute au Pliocène									
Thames (TG)	Londres (LCF – en mer) : argile silteuse fortement surconsolidée Harwich (HWH) : argile silteuse fortement surconsolidée. Comprend un marqueur stratigraphique important (succession de 3 à 4 bancs calcaires centimétriques)	Paleogène – Éocène	13 m	142					
Lambeth (LG)	Reading (RSB) : lits sablo-silteux puis silto-argileux fortement surconsolidés	Dalasakas	11 m	64					
` ′	Upnor (UPR) : argile sableuse	Paleogène	2 m						
Montrose (MTG)	Lista (LIST): marnes glauconitiques et argiles. Lit basal riche en silex.		11 m	56					
Le toit de la craie est érodé de façon significative du fait des variation du niveau marin									
Chalk (CH)	Craie blanche avec des bancs de silex	Crétacé	≈ 200 m	65					

5.1. Jusqu'au toit de la craie

En termes de caractérisation dynamique, le site compte les essais in-situ suivants :

- 6 cross-hole (réalisés en 1975, 1980, 1989, 1994, 2011, 2019);
- 28 PSSL (dont 20 en mer, 2013 et 2019);
- 14 down-hole (dont 9 en mer, 2019) :
- 19 acquisitions acoustiques en forage (réalisées en 1989 et 2019) ;
- 2 profils MASW (2019);
- 1 mesure de bruit de fond en réseau (AMV, 2019) et 16 individuelles (H/V, 2016);
- 7 dilatomètres sismiques sDMT et 3 pénétromètres sismiques sCPT (2019).

Tous les essais ont été revus méthodiquement, ce qui a conduit à valider la plupart des acquisitions, et en écarter certaines — pour les $V_{\rm S}$:

- les acquisitions acoustiques ont été écartées, car les vitesses dans le terrain sont trop faibles pour que les résultats soient pertinents, selon Vergniault et Mari (2018);
- de sérieux doutes sur les protocoles des essais de 1975 down-hole et cross-hole ont été émis : source en tête du train de tige, le temps de trajet non corrigé pour sa longueur, résonnances parasites dans les tiges, pas de mesure de la déviation des forages, absence de cimentation du puits récepteur;

- les essais cross-hole présentent des indices de réfraction sur les bancs calcaires dans l'argile de Harwich et dans les dépôts quaternaires récents;
- les mesures cross-hole dans la craie ont un contenu fréquentiel très élevé ce qui limite la précision du pointage;
- le ratio signal/bruit des mesures PSSL dans les premiers 20 m est très mauvais ;
- les sCPT sont très bruités.

De 20 m de profondeur jusqu'à la craie, les résultats des PSSL et des cross-hole sont dépendants de la qualité de la cimentation du tubage au terrain, mais les valeurs et la dispersion des mesures sont comparables. Pour les 20 premiers mètres, les données downhole et sDMT aident à préciser les données.

Une fois le jeu de données fiables établi, chaque mesure est affectée à une couche de la stratigraphie à l'aide du modèle 3D (le log n'est pas toujours disponible – ou fiable – dans le sondage où a été faite l'acquisition) par un script d'interface entre les grilles issues de la modélisation et la base de données des sondages.

Le modèle de poids volumique est obtenu en prenant la moyenne directe des mesures de laboratoire pour chaque couche, toutes campagnes confondues (922 valeurs en tout). L'ensemble du modèle (p, V_S, V_P) retenu jusqu'à la craie est représenté Figure 1.

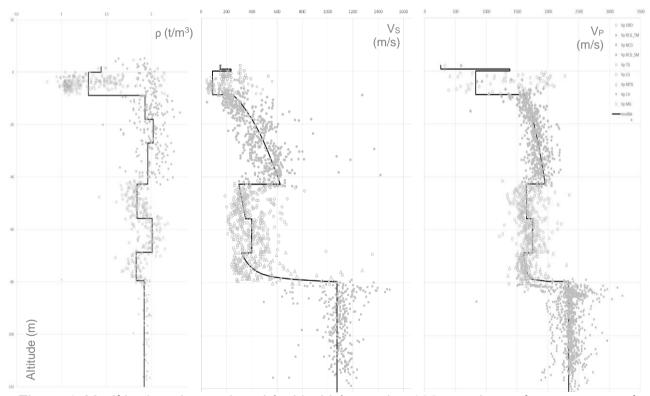


Figure 1. Modèle de colonne de sol (ρ, Vs, Vp) pour les 100 premiers mètres superposé aux données acquises à terre en fonction de l'altitude

Les valeurs de Vs dans les Crag sont très élevées pour des sables (entre 200 et 600 m/s), ce qui s'explique par la forte consolidation glaciaire mentionnée lors de l'étude géologique. Les Coralline Crag, légèrement plus anciens et cimentés par rapport aux Red Crag à terre présentent toutefois des valeurs similaires (moyenne des Vs dans les CCG de 555 m/s).

La comparaison des mesures faites à terre et en mer montre des écarts dans les Crag et les argiles de Harwich, qui s'expliquent par l'histoire géologique présentée au § 4 :

- les valeurs dans les Crag sont plus élevées en mer du fait de leur plus grande profondeur – et donc leur consolidation glaciaire plus importante ;

- l'argile de Harwich est érodée à terre, les valeurs moyennes sont plus élevées car elles ne représentent que le bas de la couche alors qu'en mer la couche est présente toute entière;
- dans les autres niveaux, les écarts n'excèdent pas 10%.

Ces justifications conduisent à intégrer l'ensemble des valeurs dans la définition de la variabilité, à condition de correctement représenter la progression des valeurs au sein d'une même couche quand cela est nécessaire. Par exemple, en plus des Crag et Harwich cités précédemment, dans l'argile de Lista la présence de lits comprenant des silex induit une forte augmentation des valeurs près du toit de la craie, les valeurs sont donc toutes rapportées à leur distance au toit de la craie pour établir le modèle (Figure 2).

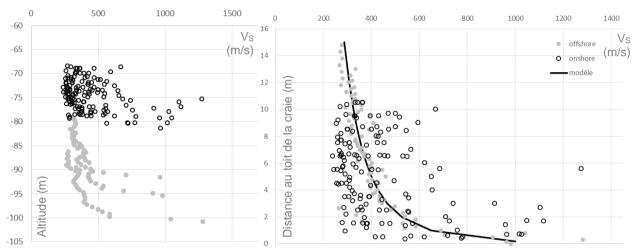


Figure 2. Réalignement des valeurs au toit de la craie dans l'argile de Lista : mesures en fonction de l'altitude (à gauche), et rapportées à l'altitude du toit de la craie (à droite)

Pour les études probabilistes de réponse de site sismique, la variabilité autour du modèle retenu est représentée sous la forme d'une loi lognormale par couche (sur les données corrigées de la tendance). Ceci s'avère bien représenter la distribution des données autour du modèle, hormis pour les dépôts récents et les remblais, du fait de leur nature hétérogène. Les données issues de chaque type d'essai sont intégrées et pèsent le même poids dans l'estimation de la variabilité.

Aucune variabilité n'est appliquée au poids volumique.

5.2. Jusqu'au toit du Silurien

L'analyse des mesures de bruit de fond en réseau (AMV) ou ponctuelles (H/V) montre une fréquence propre du site $f_0 = 0.70$ Hz, et un second pic $f_1 = 1.52$ Hz.

L'inversion montre que le contraste au toit de la craie est associé au second pic (f₁), et que le pic fondamental (f₀) est lié au toit du Silurien, à environ 350 m de profondeur. De ce fait, l'étude de réponse de site sismique doit considérer cette seconde interface comme substratum rocheux, plus profond que celui retenu en ISS (Cabas et al, 2014).

Le modèle établi pour les 100 premiers mètres est complété par des hypothèses pour la craie, le Gault et le Silurien basées sur les études bibliographiques. Il s'ensuit une phase de minimisation de l'écart aux mesures sur trois critères :

- la vraisemblance géologique du modèle ;
- la comparaison de la fonction de transfert aux mesures de bruit de fond H/V;
- la comparaison de la courbe de dispersion à celles issues du MASW et de l'AMV.

Le modèle final présente une $f_0 = 0.71$ Hz, et une $f_1 = 1.37$ Hz (Figure 3). La courbe de dispersion est jugée très satisfaisante (Figure 4). Le calcul de la fonction de transfert est décrit dans Javelaud et Semblat (2017).

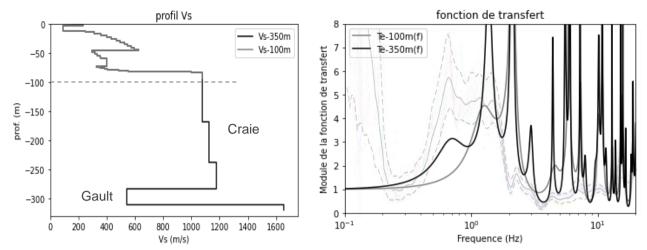


Figure 3. Modèle (à gauche) et comparaison de la fonction de transfert aux mesures H/V (à droite) jusqu'à la craie (100 m) et la colonne complète (350 m)

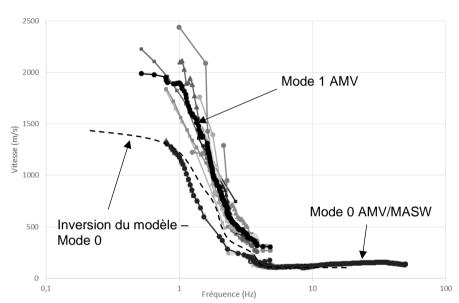


Figure 4. Courbe de dispersion du modèle et des acquisitions AMV et MASW

6. Les courbes de dégradation et d'amortissement

Les essais dynamiques historiques sont constitués principalement de 31 essais triaxiaux avec des cycles de chargement-déchargement réalisés dans les Crag et de colonnes résonnantes dans les argiles tels qu'en grande partie décrits dans Hight et al (1997).

Lors des campagnes de 2019, des essais dynamiques ont été réalisés en laboratoire : 39 au triaxial cyclique et 26 à la colonne résonnante. 3 essais triaxiaux ont échoué (données aberrantes). Le reste des essais a été jugé exploitable, portant la base de données à 93 essais (provenant de 17 sondages différents), répartis comme indiqué dans le Tableau 2.

Dans les sables Norwich et Red Crag, les échantillons ont été recompactés (le prélèvement a été réalisé au carottier "sonic", assurant une bonne récupération, mais empêchant tout prélèvement intact). Dans les argiles et Coralline Crag, les échantillons ont été prélevés au carottier double, et la bonne tenue mécanique des terrains a permis des prélèvements jugés de très bonne qualité. Dans la mesure du possible, les échantillons ont été prélevés par paire, afin d'associer un essai triaxial à une colonne résonnante et limiter les effets de la variabilité du matériau au sein d'une même couche. Une partie des essais a été réalisée au laboratoire géotechnique d'EDF d'Aix-en-Provence. Les protocoles ont été cadrés au mieux afin d'obtenir la meilleur reproductibilité possible entre les différents laboratoires impliqués.

Couche		IP (%)	2019 (à terre)	Essais hist.	2019 (en mer)	Total
NCG et RCG	Sables	-	16	8	-	24
CCG		-	•	•	8	8
LCF	Argiles	69	-	-	9	9
HWH		52	10	12	2	24
LG		33	10	2	-	12
MTG		93	7	9	-	16

Tableau 2. Quantités d'essais par couche (et indice de plasticité des niveaux argileux)

Grâce aux précautions prises, les résultats des deux types d'essais se raccordent correctement le plus souvent, tant au niveau des modules que des amortissements.

Les valeurs de modules maximales obtenues sont comparées aux mesures in-situ :

- les ratios in-situ/laboratoire dans les NCG et RCG (sables tertiaires surconsolidés) vont jusqu'à 4, que l'on impute au remaniement des échantillons ;
- dans les argiles, les ratios sont le plus souvent inférieurs à 2.

Dans la suite, on raisonne sur les courbes adimensionnées (G/G_{max}) pour les modules et les pourcentages d'amortissement, en fonction de la distorsion γ (simple amplitude).

Comparés aux fuseaux de Seed et al (1986), les Norwich et Red Crag dégradent et amortissent peu, sans en sortir pour autant. Dans la mesure où les échantillons ne sont pas intacts, cet effet est attribué à la compaction appliquée – et non à la structure liée à l'âge et à la consolidation. Dans les Coralline Crag (prélevés intacts du fait de la meilleure tenue des terrains et la légère cimentation), la dégradation est cependant similaire malgré le fait que leur structure ait a priori été conservée : si un effet de la structure semble net sur la Vs (ratio in-situ/laboratoire jusqu'à 4), ce ne semble donc pas être le cas pour la courbe de dégradation. L'amortissement en revanche est plus faible dans les Coralline Crag que dans les Norwich et Red Crag, probablement du fait de la légère cimentation.

Dans les formations argileuses, les résultats se corrèlent bien avec les courbes proposées par Vucetic et Dobry (1991) en fonction de l'indice de plasticité – même si la correspondance est moins bonne pour le Lambeth, ce qui s'explique probablement par son caractère plus sablo-silteux qu'argileux à proprement parler.

Plusieurs contraintes de confinement ont été testées (de 300 à 1000 kPa en fonction des couches testées). En effet, le calcul de réponse de site prend en compte l'état de contrainte en champ libre, tandis que les calculs d'ISS intègrent l'incrément lié aux ouvrages.

Les essais montrent que la dépendance à la contrainte de confinement est très faible sur la courbe adimensionnée (elle joue en revanche sur la valeur du module, comme elle jouait sur la V_S mesurée in-situ), elle sera négligée dans les calculs. Dans des études antérieures de 1993, une dépendance était introduite dans les Crag mais l'influence restait faible : le fuseau s'écartait d'au plus 10% de la médiane.

Les amortissements mesurés à la colonne résonnante sont souvent très importants dans les argiles à faible distorsion (3 à 5% pour γ < 1.10⁻⁴). Une piste d'explication pourrait être la fréquence plus élevée (jusqu'à 100 Hz) dans la colonne par rapport au triaxial cyclique (\approx 1 Hz). Des corrections ont été appliquées suivant Ciancimino et al (2019), qui rapportent tout à une fréquence unitaire et permettent de retrouver des amortissements crédibles dans cette plage de distorsion.

Les courbes retenues sont exprimées suivant un modèle hyperbolique comprenant une limite élastique (1). L'amortissement D est exprimé à l'aide d'un modèle adapté d'après Darendeli (2001) dans les sables, et d'une loi plus simple dans les argiles (2). Les modèles et leurs paramètres sont choisis pour coller au mieux aux données de laboratoire.

Dans la craie, les courbes sont reprises de EPRI (1993) pour les études de réponse de site sismique (et n'ont que peu d'influence du fait de la très faible distorsion dans les couches profondes).

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma - \gamma_{elas}}{\gamma_{ref}}\right)^{\alpha}} \tag{1}$$

$$D = D_{min} + b \left(\frac{G}{G_{max}}\right)^{p} \cdot \frac{1}{\pi} \left[4 \cdot \frac{\gamma - \gamma_{ref} \cdot ln\left(\frac{\gamma + \gamma_{ref}}{\gamma_{ref}}\right)}{\frac{\gamma^{2}}{\gamma + \gamma_{ref}}} - 2 \right] \text{(sable) ou } D = b \left(\frac{G}{G_{max}}\right)^{p} \cdot \gamma^{q} \text{ (argile)}$$
 (2)

La variabilité (pour les études probabilistes de réponse de site) sur les courbes (3) est reprise de Darendeli (2001), et il est ensuite vérifié que le modèle couvre bien les données.

$$\frac{G}{G_{max}} \equiv \overline{\left(\frac{G}{G_{max}}\right)} + \mathcal{N}(0, \sigma_{NG}) \quad \text{et} \quad \sigma_{NG} = 0.015 + 0.16 \cdot \sqrt{0.25 - \left[\overline{\left(\frac{G}{G_{max}}\right)} - 0.5\right]^2}$$
(3)

où $\mathcal{N}(0,\sigma_{NG})$ est la loi normale centrée d'écart-type σ_{NG} , et $\overline{\left(\frac{G}{G_{max}}\right)}$ la courbe médiane retenue. Les courbes sont écrêtées au-dessus de 1 (afin de ne pas mélanger la variabilité sur la courbe adimensionnée avec celle des V_S elles-mêmes) et en-dessous de 0.

7. Conclusion

Les nombreux essais in-situ et en laboratoire réalisés lors des campagnes dédiées, ainsi que la revue méthodique des essais historiques a permis une caractérisation complète des propriétés dynamiques du site de Sizewell C dans le cadre du projet de centrale nucléaire.

Ce travail a abouti grâce à une forte collaboration entre géologues, géotechniciens, géophysiciens et sismologues.

Le modèle de sol dynamique est utilisé dans les études probabilistes de réponse de site via des tirages de Monte-Carlo (les colonnes obtenues sont ensuite filtrées avec des critères sur les fréquences propres et la courbe de dispersion). Les études d'ISS dynamique sont déterministes et imposent une variabilité plus forfaitaire sous forme d'analyse de sensibilité.

Association Française des Constructeurs Électronucléaires (2012). EPR Technical Construction Code for Civil works (ETC-C)

Cabas A., Carcamo P., Rodriguez-Marek A., Godfrey B. et Olgun G. (2014). Where to locate the elastic half-space in site response analysis. Proceedings of the second European conference of Earthquake Engineering and Sismology, Istanbul

Ciancimino A., Lanzo G., Alleanza G.A., Amoroso S., Bardotti R., Biondi G., Cascone E., Castelli F., Di Giulio A., d'Onofrio A. et Foti S. (2019). Dynamic characterization of finegrained soils in central Italy by laboratory testing. Bulletin of Earthquake Engineering, 1-29

Darendeli M.B. (2001). Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves. Texas University, Austin

Electric Power Research Institute (1993). Method and guidelines for estimating earthquake ground motion in eastern North America, 1

Hight D.W., Bennell J.D., Chana B., Davis P.D., Jardine R.J. et Porovic E. (1997). Wave velocity and stiffness measurements of the Crag and Lower London Tertiaries at Sizewell. Géotechnique, 47-3

Javelaud E. et Semblat J.F. (2017) Effets de site sismiques pour les ouvrages de surface. Techniques de l'Ingénieur, C260

Seed H.B., Wong R.T., Idriss I.M. et Tokimatsu K. (1986). Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. Journal of Geotechnical Engineering, 112-11

Vergniault C. et Mari J.L. (2018). Shear velocity measurement in boreholes. Well seismic surveying and acoustic logging, EDP Sciences

Vucetic M. et Dobry R., (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. Journal of Geotechnical Engineering, 117-1