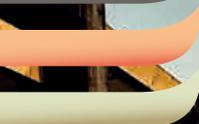


g é o t e c h n i q u e , f o r a g e e t f o n d a t i o n s

SOLSCOPE

MAJ



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

Comment mieux quantifier le risque géotechnique lié à la liquéfaction du sol ?

La liquéfaction est un phénomène géotechnique, survenant lorsque le sol se comporte comme un liquide lors d'un choc sismique. Le risque d'apparition du phénomène doit être étudié en amont de la construction des installations industrielles sensibles, comme le site nucléaire à l'étude (site anonyme). La liquéfaction y est étudiée grâce aux mesures SPT (essais de pénétration dynamique au carottier) et Vs (vitesse de propagation des ondes de cisaillement) acquises *in situ* dans différents sondages.

La liquéfaction des sols est un phénomène qui peut survenir lors d'un séisme, généralement dans les terrains pulvérulents, sableux, peu denses, sous nappe. La secousse fait monter la pression interstitielle jusqu'à l'annulation de la contrainte effective, le terrain se comportant alors comme un liquide (jusqu'à ce que les pressions interstitielles se rééquilibrent). Les effets sur les ouvrages sont alors très importants (perte de stabilité générale, déplacements pouvant entraîner la défaillance des structures, etc.). Les détails sur le phénomène et les méthodes d'évaluation, ainsi qu'une bibliographie exhaustive sur le sujet, peuvent être retrouvés dans le Cahier technique 45 de l'Association française de génie parasismique ⁽¹⁾.

Les vitesses de propagation des ondes sismiques sont un paramètre essentiel qui entre dans les études d'interaction sol-structure sous séisme, ainsi que dans les calculs de réponse de site (modification du signal sismique lors de sa traversée des couches meubles superficielles) ; sa connaissance repose généralement sur un nombre restreint de points de mesures et une incertitude forfaitaire est souvent prise en compte dans les études. Pour une introduction aux méthodes, voir la référence ⁽²⁾.

La géotechnique est un domaine en constante évolution, les praticiens sont toujours à la recherche de nouveaux outils susceptibles d'améliorer la conception, en leur permettant de mieux gérer les incertitudes et la variabilité spatiale parfois conséquente des caractéristiques des terrains, liée à la nature des matériaux et à leur histoire. À cet égard, dans cet article, la théorie de la géostatistique est utilisée afin de répondre à deux problématiques géotechniques : l'amélioration de l'interpolation d'un paramètre géotechnique

La géostatistique permet d'améliorer la cartographie de la vitesse des ondes de cisaillement en intégrant les essais au pénétromètre dynamique

mesuré sur un nombre restreint d'emplacements, la vitesse de propagation des ondes de cisaillement (Vs), à l'aide d'essais de pénétration au carottier (SPT) plus densément représentés, spatialement (meilleure couverture) nombreux, mais qui ne mesurent pas directement cette vitesse : méthode d'interpolation de cokrigage ; et l'analyse spatiale du risque de liquéfaction dans les couches sableuses de fondation : méthode des simulations géostatistiques.

SITE ET DONNÉES GÉOTECHNIQUES

Le site étudié par le service géologie & géotechnique d'EDF* est constitué sous la fondation d'une couche sableuse sous nappe, sables denses tertiaires dont les premiers mètres sont altérés et présentent des caractéristiques moins favorables sur une épaisseur variable. À ce titre, l'étude de liquéfaction est importante, afin d'estimer les volumes potentiellement liquéfiables, qu'il est nécessaire de purger et substituer avant construction de la centrale proprement dite. La nouvelle implantation couvre environ 18 ha à terre, et les ouvrages en mer courent sur près de 4 km en mer (tunnels de prise et de rejet d'eau).

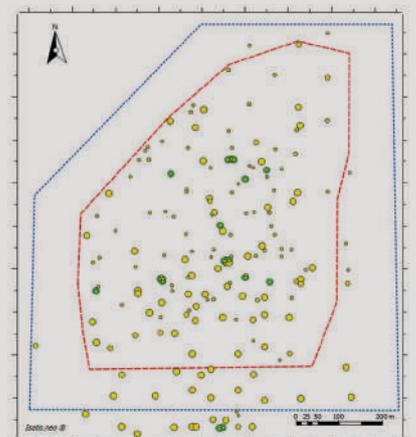
Les reconnaissances ont débuté pour le site en 1957. L'implantation de nouvelles installations est étudiée spécifiquement depuis 1975. En 2022, 28 campagnes de reconnaissance sont réalisées à terre et en mer, incluant plus de 350 sondages carottés, environ 5 000 essais *in situ* au droit de plus de 1 000 emplacements et 5 000 essais de laboratoire, ainsi que près de 70 km de lignes sismiques.

Au cours de ces différentes campagnes, les essais SPT (essai *in situ* consistant à mesurer la résistance du terrain comme

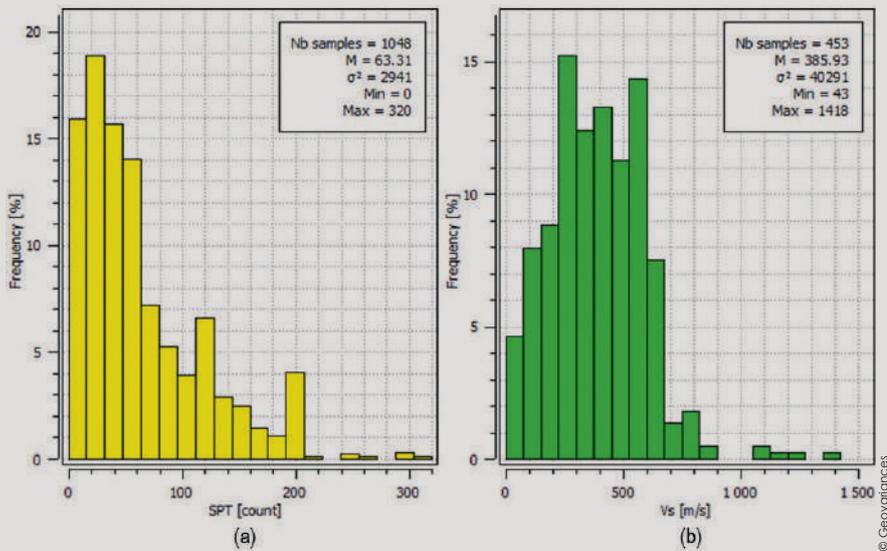
le nombre de coups nécessaires pour enfoncer de 30 cm un carottier à l'aide d'un mouton normalisé) sont particulièrement représentés. La base de données comprend 3 850 essais SPT entre 1957 et 2019, dont 1 553 dans les couches de sables dans la zone étudiée. Dans l'ensemble, les valeurs croissent avec la profondeur.

À partir des mesures SPT, l'analyse du risque de liquéfaction est effectuée selon la méthode déterministe du NCEER (2001) ⁽³⁾. Des marges sont prises sur le niveau sismique et le résultat final, et conduit à définir pour la conception un seuil de 15 coups, sans tenir compte de l'effet de la profondeur ni de la teneur en particules fines du matériau (en deçà, les terrains doivent être excavés et substitués par un matériau adéquat). En pratique, cela se traduit par un niveau général d'excavation dans la zone fixée à la cote - 10 m AOD, et des surexcavations locales autour des sondages présentant des valeurs faibles au-delà (jusqu'à - 12 m).

Les mesures de vitesses des ondes de cisaillement utilisées dans cet article



(Fig. 1.) Implantation des sondages étudiés, zone d'intérêt (ligne pointillée rouge) et enveloppe (ligne pointillée bleue) contenant les sondages marginaux. La taille de points est proportionnelle au nombre de valeurs SPT (jaune) et Vs (vert) dans chaque sondage.



(Fig. 2.) Distribution statistique de SPT (a) et de Vs (b).

sont réalisées en sondage, essentiellement par des essais cross-hole, down-hole et PSSL (sonde descendue en forage) (figure 1). D'autres essais réalisés en surface (MASW) ne sont pas représentés.

Les analyses géostatistiques sont réalisées sur un volume d'intérêt qui est latéralement limité par une zone d'intérêt (représentée sur la figure 1) de surface égale à 373 396 m². Le volume d'intérêt est verticalement limité aux formations sédimentaires déposées pendant le pliocène tardif, représentant une épaisseur d'environ 42 m. Le volume d'intérêt est rempli par 31 637 420 blocs de la taille de 1 x 1 x 0,5 m³, donc le volume à l'étude s'élève à 15 818 710 m³.

Implantation des sondages étudiés, zone d'intérêt (ligne pointillée rouge) et enveloppe (ligne pointillée bleue) contenant les sondages marginaux. La taille de points est proportionnelle au nombre de valeurs SPT (jaune) et Vs (vert) dans chaque sondage.

Bien que les sondages dans lesquels Vs est mesurée aient une répartition spatiale restreinte, les sondages SPT ont une couverture plus représentative dans la zone d'intérêt (figure 1). Dans l'enveloppe contenant les sondages marginaux, 1048 mesures de SPT et 453 mesures de Vs sont disponibles. Les distributions statistiques des deux paramètres géotechniques sont asymétriques (figure 2). Les échantillons SPT et Vs ne sont pas colocalisés. En d'autres termes, les coordonnées des essais SPT sont différentes de celles des mesures de Vs. Du fait de ce manque d'échantillons colocalisés, il est impossible d'étudier la statistique bi-variable entre les mesures de SPT et de Vs basées sur les échantillons.

THÉORIE DE LA GÉOSTATISTIQUE

Dans le domaine géotechnique, la géostatistique est utilisée afin de cartographier les paramètres catégoriels, par exemple le faciès, ou les paramètres continus, comme la porosité ou UCS. Cette méthode repose sur l'analyse de données spatialisées. La géostatistique allie une approche naturaliste et structurale, qui répond aux caractères mêmes des variables/objets étudiés et une approche stochastique reposant sur des principes probabilistes (théorie des variables aléatoires). L'analyse géostatistique, en plus de générer des distributions statistiques de données, examine les connexions géographiques qui existent entre les variables. Sa valeur ajoutée repose sur plusieurs points ⁽⁴⁾ :

- lors de l'interpolation aux points non mesurés, la géostatistique intègre la variabilité spatiale via un modèle du variogramme. Cette connaissance de la structure spatiale rend possible à la fois l'interpolation elle-même (krigeage), mais également la quantification de l'erreur d'interpolation attendue ou écart-type de krigeage ou l'incertitude associée. Cette incertitude, inéluctable, est liée à la connaissance uniquement parcellaire du phénomène et à l'hétérogénéité spatiale du phénomène ; la précision attendue de la cartographie d'une variable sera différente selon que les couches géologiques sont intactes et homogènes, relativement continues ou très hétérogènes (par exemple, dépôts morainiques, massif karstifié...) ou bien que ce sont les couches géologiques intactes et homogènes relativement continues. En outre, l'anisotropie probable liée à la stratification géologique (variabilité verticale plus importante) sera intégrée dans la modélisation ;

- la quantification de l'incertitude

associée au krigeage (écart-type de krigeage) dépend de la structure spatiale du phénomène à l'étude, mais également de la configuration géographique des échantillons : l'absence d'investigations dans certaines zones ne pourra ainsi être interprétée comme une valeur zéro de la variable à l'étude, mais conduira au contraire à une incertitude localement accrue. L'évaluation de cette incertitude associée à l'interpolation peut également permettre d'orienter l'échantillonnage complémentaire. Pour un cas d'étude d'application de la géostatistique dans l'optimisation d'échantillonnage, voir Masoudi (2021) ⁽⁵⁾ ;

- la prise en compte d'informations auxiliaires permet d'affiner le modèle construit à partir des résultats analytiques et d'en réduire l'incertitude ;

- Afin d'évaluer le risque de dépassement d'un seuil d'intérêt, il est fréquemment recommandé de ne pas se baser uniquement sur une courbe d'iso-valeur issue de l'interpolation par krigeage. En effet, cette courbe peut être entachée d'incertitude, en particulier lorsqu'il n'y a pas eu d'échantillonnage à proximité. Ainsi fonder des décisions exclusivement sur cette courbe peut conduire à des erreurs significatives. Par conséquent, il est préférable de baser de telles décisions sur une cartographie de la probabilité de dépassement du seuil d'intérêt qui intègre bien l'incertitude liée à l'interpolation spatiale. Le zonage sera alors fondé non plus sur une courbe d'iso-valeur mais plutôt sur une courbe de risque de dépassement du seuil.

ANALYSE SPATIALE MONOVARIALE ET ANALYSE VARIOGRAPHIQUE MONOVARIALE

Dans le cadre de la géostatistique, la variabilité d'une mesure spatialisée est souvent étudiée par une analyse variographique. Pendant l'analyse variographique, une fonction mathématique (le modèle de variogramme) est ajustée pour décrire la variabilité en fonction de la distance. La courbe du variogramme est généralement ascendante, ce qui signifie moins de variabilité entre les échantillons proches et plus de variabilité entre les échantillons éloignés ⁽⁶⁻⁷⁾. L'analyse variographique monovariante est réalisée séparément sur chacune des variables.

La bonne couverture horizontale des échantillons SPT, permet d'effectuer une analyse variographique multidirectionnelle. Le variogramme révèle deux types d'anisotropies (figure 3a), attendues en raison d'une organisation géologique en strates horizontales : ●●

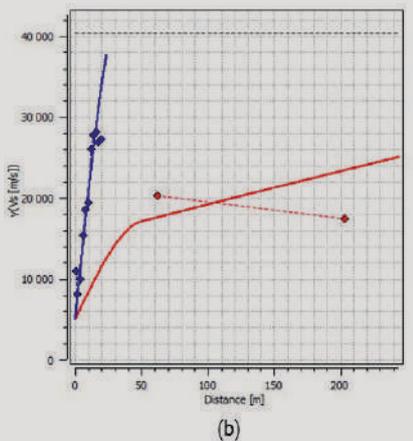
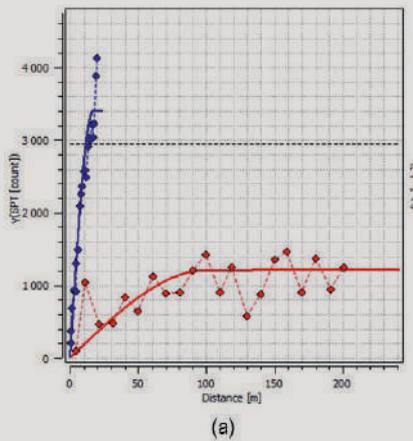
...

- anisotropie géométrique : la corrélation spatiale (la portée, lue sur l'axe de distance) est plus importante dans la direction horizontale (en rouge sur la figure 3a et dans l'Eq. 1) que verticale ;
- anisotropie zonale : la variabilité totale (le palier, lu sur l'axe des ordonnées) est plus importante dans la direction verticale (en bleu sur la figure 3a et dans l'Eq. 1).

L'analyse variographique de Vs dans la direction verticale est effectuée à l'aide d'un variogramme expérimental présentant plus d'information dans la direction verticale que dans la direction horizontale, qui est due à la faible couverture horizontale des échantillons Vs. En se basant sur les informations disponibles, force est de constater que dans la direction verticale, la variabilité est plus importante (figure 3 b et dans l'Eq. 2).

$$\gamma_{SPT} = N_{lag}(0) + Sph([100m, 17m], 1200) + Sph([50'000m, 17m], 2200) \quad \text{Eq. 1}$$

$$\gamma_{Vs} = N_{lag}(5000) + Sph([50m, 35m], 10'000) + Sph([1000m, 35m], 28'000) \quad \text{Eq. 2}$$



(Fig. 3.) Analyse variographique monovariante multidirectionnelle de SPT (a) et de Vs (b). La courbe bleue est le variogramme dans la direction verticale et la courbe rouge est le variogramme dans la direction horizontale.

CARTOGRAPHIE MONOVARIABLE DES PARAMÈTRES GÉOTECHNIQUES

La carte d'interpolation de SPT (figure 4a) est conditionnée aux échantillons de SPT qui ont une bonne couverture spatiale (figure 1). La variabilité spatiale de SPT est mise en évidence sur la carte d'interpolation. Elle dépend de la densité des échantillons disponibles et du modèle de variogramme sous-jacent (figure 3a). Sur la carte d'interpolation, les zones avec une valeur SPT inférieure à la valeur critique de 15 sont mis en évidence à l'aide d'un contour rouge.

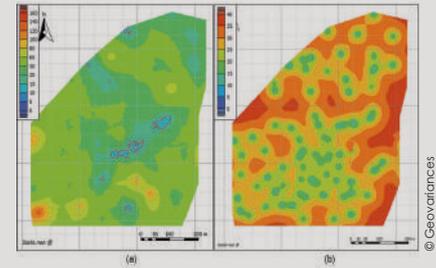
Associée à la carte d'interpolation géostatistique, une carte d'écart-type d'erreur d'interpolation de SPT (figure 4 b) constitue une information importante qui permet d'identifier localement les zones présentant une grande erreur sur l'interpolation. Sur la carte d'écart-type, l'erreur d'interpolation diminue près des mesures, alors qu'elle augmente dans les endroits où la densité des échantillons est faible.

La carte d'interpolation de Vs (figure 5a) est conditionnée par le nombre restreint des mesures de Vs qui ont une faible couverture spatiale (figure 1). Cela induit une variabilité spatiale plus faible.

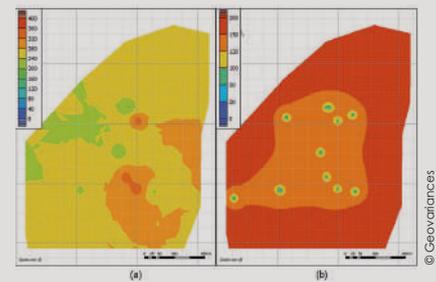
La carte d'écart-type d'erreur d'interpolation de Vs (figure 5 b) met en évidence la faible couverture spatiale des échantillons de Vs. Les zones avec l'écart-type élevé ont une faible variabilité spatiale sur la carte d'interpolation de la figure 5a. Des sondages supplémentaires dans ces zones incertaines seraient justifiés pour réduire l'erreur d'interpolation (voir (5)).

ANALYSE SPATIALE MULTIVARIABLE

Dans un contexte multivariable, étudier la variabilité spatiale des mesures hétérotopiques (non-colocalisées comme SPT et Vs ici), nécessite de migrer géographiquement les observations/mesures d'une des deux variables à l'emplacement de la seconde. Pour ce faire, la méthode d'interpolation de krigeage ordinaire, présentée en amont, est réutilisée afin de reproduire les valeurs de SPT sur les échantillons de Vs. Ce qui nous permet d'étudier la corrélation entre ces deux variables (figure 6). Les échantillons de $V_s > 1000 \frac{m}{s}$ correspondant à du rocher, sont supprimés avant d'établir une relation non linéaire entre Vs et SPT dans le sol (Eq. 3) avec un coefficient de corrélation non linéaire atteignant 0,79. Il faut noter que la forme fonctionnelle dans l'Eq. 3 est cohérente avec les corrélations proposées dans la



(Fig. 4.) Cartographie de SPT par la méthode de krigeage ordinaire (a), et son écart-type (b). Altitude = - 10 m AOD.



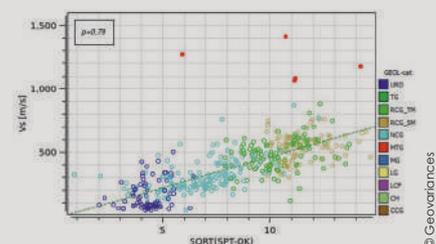
(Fig. 5.) Cartographie de Vs par la méthode de krigeage ordinaire (a), et son écart-type (b). Altitude = - 10 m AOD.

littérature. Cette équation permet de préciser cette corrélation pour le site étudié.

$$V_s \left[\frac{m}{s} \right] = 48,7199 \times \sqrt{SPT_{OK}} - 26,0261 \quad \text{Eq. 3}$$

Un coefficient de corrélation élevé entre les deux variables SPT interpolé et Vs est un prérequis pour justifier de modéliser un variogramme croisé afin de pouvoir effectuer l'interpolation de cokrigeage par la suite (6). Le variogramme croisé (figure 7 et dans l'Eq. 4) reproduit l'anisotropie, c'est-à-dire la variabilité plus importante dans la direction verticale qui est due à la stratification horizontale des couches géologiques. De plus, le variogramme croisé dans la direction horizontale présente plus d'informations que la direction horizontale du variogramme monovariante de Vs (figure 3 b), ce qui confirme la robustesse de la modélisation.

$$\begin{aligned} \gamma_{SPT} &= N_{lag}(0) + Sph([100m, 17m], 1200) + Sph([50'000m, 17m], 2200) \\ \gamma_{Vs} &= N_{lag}(5000) + Sph([100m, 17m], 10'000) + Sph([50'000m, 17m], 28'000) \\ \gamma_{SPT-Vs} &= N_{lag}(0) + Sph([100m, 17m], 1340) + Sph([50'000m, 17m], 6000) \end{aligned} \quad \text{Eq. 4}$$



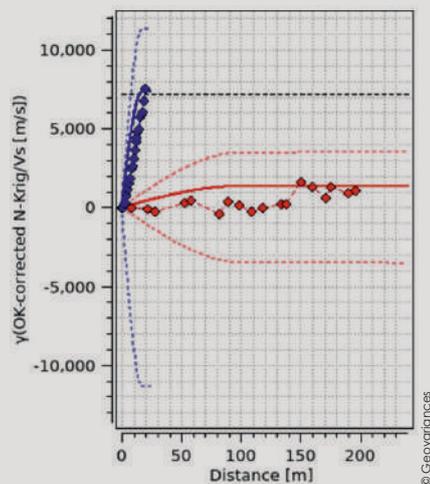
(Fig. 6.) Corrélation non linéaire entre SPT interpolé et Vs.

En comparant le variogramme croisé (Eq. 4) avec les variogrammes simples (Eq. 1 et Eq. 2), on peut constater que les paliers sont identiques. La portée dans le variogramme croisé est plutôt influencée par les mesures SPT qui sont plus fréquentes dans la direction horizontale.

CARTOGRAPHIE DE VS ANALYSE MULTIVARIABLE COKRIGEAGE

La carte d'interpolation de Vs (figure 8a) est conditionnée à la fois aux échantillons de Vs [la variable principale (figure 1)], et les données SPT interpolées (figure 4a), [la variable auxiliaire avec une couverture spatiale plus importante]. La variabilité spatiale de la cartographie de Vs est améliorée en intégrant les données SPT. La qualité de la carte produite dépend de :

- la densité des échantillons de Vs [la variable principale],
- la densité des échantillons de SPT [la variable auxiliaire] et
- le modèle du variogramme croisé sous-jacent (figure 7).



(Fig. 7.) Analyse variographique multivariable multidirectionnelle entre SPT interpolé et Vs.

ANALYSE DE RISQUE PAR LA MÉTHODE DE SIMULATIONS GÉOSTATISTIQUES

Les simulations géostatistiques permettent de générer de multiples valeurs possibles de la variable étudiée afin de quantifier l'incertitude d'estimation. L'exploitation probabiliste de ces réalisations permet la quantification du risque résiduel de liquéfaction à la profondeur jusqu'à laquelle il a été prévu de substituer les terrains.

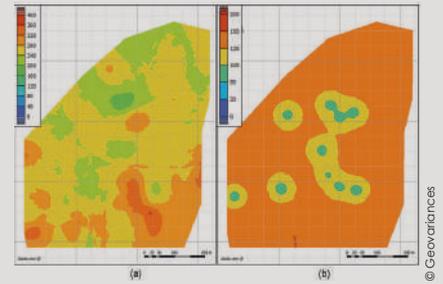
La méthode de simulation par bandes tournantes (SBT) est utilisée afin de générer cent réalisations. L'algorithme de SBT est conçu pour simuler une variable avec la distribution statistique gaussienne. Or toutes les variables n'ayant pas de distribution statistique gaussienne, elles doivent être transformées en variables gaussiennes équivalentes avant d'appliquer la méthode de SBT⁽⁹⁾. À ce propos, l'anamorphose gaussienne est fréquemment utilisée afin de convertir les données brutes (espace brut) en leurs équivalents gaussiens (espace gaussien) en amont de l'analyse variographique.

Par analogie à l'espace brut (figure 3a et dans l'Eq. 1), la fonction sphérique est utilisée afin de modéliser le variogramme dans l'espace gaussien (figure 9 et dans l'Eq. 5). Dans l'espace gaussien, la portée horizontale du variogramme est inférieure à celle de l'espace brut. En revanche, l'anisotropie géométrique est moins importante dans l'espace gaussien, ce qui est probablement dû à la répartition spatiale des données et à la distribution statistique. Les simulations par bandes tournantes (SBT) est utilisée pour générer cent réalisations de la variable SPT dans chaque bloc d'interpolation de taille 100 cm par 100 cm par 50 cm. Chacune de ces réalisations est comparée avec le seuil de 15 coups SPT afin de générer la carte de la probabilité de dépassement de seuil (figure 10).

$$\gamma_{SPT} = N_{ug}(0) + Sph([20m, 1.7m], 0.3) + Sph([2500m, 1.7m], 0.7) \quad \text{Eq. 5}$$

DISCUSSION ET CONCLUSION

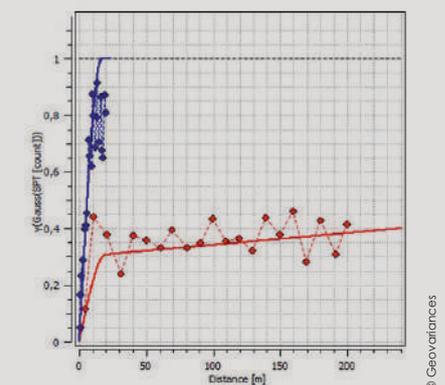
Cette étude est une application de la géostatistique pour la géotechnique, dans un projet de construction sur un site nucléaire, afin de vérifier l'adéquation et la pertinence des estimations de volumes d'excavation/substitution effectuées par des méthodes plus simples. L'objectif est de permettre la quantification continue spatialement du risque de liquéfaction par (co)krigeage, ainsi que par une approche utilisant les simulations géostatistiques par bandes



(Fig. 8.) Cartographie de Vs par la méthode de cokrigage ordinaire (a), et son écart-type (b). Données auxiliaires : SPT interpolé. Altitude = - 10 m AOD.

tournantes. Ceci pour permettre de mieux justifier les choix techniques réalisés (critère retenu, couverture des sondages, excavations proposées) et le cas échéant d'identifier les points de faiblesse nécessitant une attention particulière (reconnaitances supplémentaires, surcreusement, etc.).

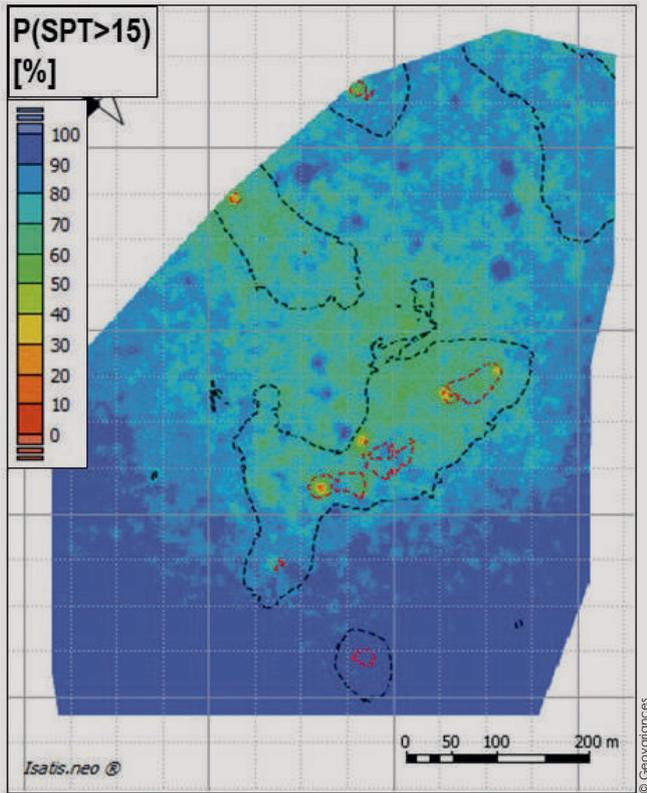
L'étude du risque de liquéfaction conduit en première approche, à retenir pour la conception un seuil de 15 coups SPT – les terrains présentant un nombre de coups inférieur devront être purgés et substitués. Par conséquent, selon l'approche par la méthode de krigage ordinaire, le risque d'avoir SPT<15 est matérialisé par le contour rouge sur la figure 10. Selon l'approche d'analyse de risque par méthode de simulation TBS, le risque de liquéfaction est inversement proportionnel à la probabilité du dépassement du seuil. En acceptant un



(Fig. 9) Analyse variographique monovariante SPT dans l'espace gaussien, en rouge variogramme dans le plan horizontal, en bleu variogramme vertical.

risque de 30 %, les blocs avec une probabilité (de SPT<15) inférieure à 70 % seront considérés comme dépassant le critère. Cela représente 1974269 m³ de sol (soit 12,5 % du volume d'intérêt), principalement à des cotes supérieures à - 12 m AOD (figure 11).

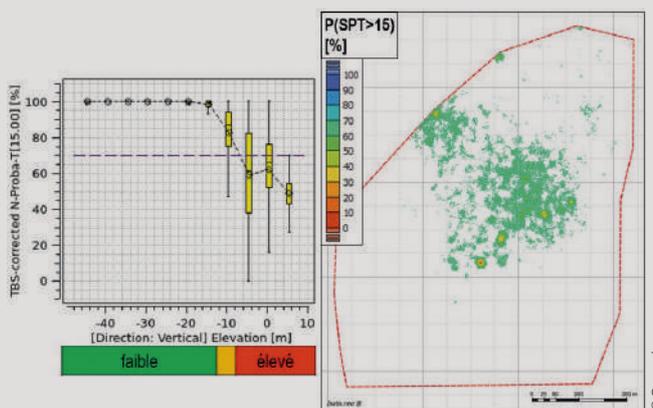
Au-dessus de - 10 m AOD ●●●



(Fig. 10) Probabilité de dépassement du seuil de 15 coups pour la variable SPT (échelle de couleur). Les isolignes superposées à la carte en couleur font référence aux valeurs SPT interpolées par krigeage ordinaire : SPT=15 (rouge) et SPT=30 (noir). Altitude = - 10 m AOD.

••• (localement - 12 m AOD), le sol sera substitué préalablement à la construction. Cependant l'analyse de risque confirme la présence en deçà du niveau - 10 m AOD d'un risque résiduel d'avoir SPT<15 dans certaines zones (figure 11a). Une vérification détaillée par la méthode du NCEER 2001(3) qui permet de tenir compte de la profondeur et de la teneur en particules fines a permis de confirmer que le coefficient de sécurité à la liquéfaction était partout largement supérieur à la valeur requise (1,25).

La carte de la figure 11 b affiche les blocs (altitude = - 10 m AOD) où la probabilité de dépassement du critère SPT>15 est inférieure à 70 % (équivalent au risque supérieur à 30 %). Cette carte peut être mise à jour pour d'autres cotes et d'autres seuils de risque pour d'autres vérifications.



Risque de dépassement du seuil SPT>15 en fonction de l'élévation. b) Probabilité de dépassement du seuil de 15 coups pour la variable SPT inférieure à 70 %. Altitude = - 10 m AOD.

Dans les deux approches géostatistiques proposées, la variabilité spatiale des données géotechniques est modélisée ce qui permet de conditionner la cartographie interpolée aux mesures géotechniques. De plus, cette carte d'interpolation est complétée par une carte d'incertitude liée à la fois à la répartition des échantillons et à la variabilité spatiale du phénomène, ce qui permet de quantifier la qualité de cette interpolation. Enfin, la modélisation géostatistique peut compléter les études géotechniques afin d'optimiser le budget des travaux en fixant un risque maximal pour des paramètres géotechniques comme la résistance à la liquéfaction. ■

REMERCIEMENT

Ce projet a été réalisé par l'équipe de consultants au sein de Géovariances sur les spécifications du Service géologie et géotechnique d'EDF. Les calculs géostatistiques ont été entièrement exécutés à l'aide du logiciel de Isatis.neo (v.2022). Nous remercions Mme Claire Faucheu (consultante à Geovariances) et M. Jean-Jacques Péraudin (chef de l'équipe consultants à Geovariances) pour les relectures, les commentaires et les conseils.

Cyril Simon, Baptiste Pelletier

EDF

Hélène Binet, Pedram Masoudi, Frédéric Rambert, Yvan Assy

Geovariances

* EDF n'a pas souhaité communiquer le nom du site.

Références

1. AFPS (2021) « Cahier technique 45 - Évaluation du risque de liquéfaction des sols sous l'effet des séismes : Connaissances pratiques et applications aux projets géotechniques. » Association française de génie parasismique. <http://www.afpssisme.org/PUBLI/Cahiers-techniques/Cahier-Technique-45-Evaluation-du-risque-de-liquefaction-des-sols-sous-l-effet-des-seismes-Connaissances-pratiques-et-applications-aux-projets-geotechniques-2021>.
2. P. Desourtheau et V. Perset (2022) « L'apport du S-CPTu (Seismic Cone Penetration Test) dans les études géotechniques en contexte sismique ». *Solscope Mag* : 21. <https://www.solscope.fr/fichiers/articles-1153-53.pdf>.
3. T.L. Youd et al. (2001) « Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* »: 127(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:10\(817\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:10(817)).
4. D.S. Young (1987) « Random vectors and spatial analysis by geostatistics for geotechnical applications ». *Mathematical Geology* 19(6). <https://doi.org/10.1007/BF00896915>.
5. P. Masoudi, Y. Desnoyers et M. Grey (2021) « Spatio-temporal optimization of groundwater monitoring network at Pickering nuclear generating station ». *Geostatistics Toronto 2021, Springer Proceedings*. https://doi.org/10.1007/978-3-031-19845-8_15.
6. P. Masoudi (2022) « Fuzzy membership function for weighting pairs in variographical analysis ». *Spatial Statistics*: 57. <https://doi.org/10.1016/j.spasta.2022.100717>.
7. E. Gringarten et C.V. Deutsch (2001) « Teacher's Aide Variogram Interpretation and Modeling ». *Mathematical Geology*: 33. <https://doi.org/10.1023/a:1011093014141>.
8. H. Wackernagel (2003) « Multivariate Geostatistics, An Introduction with Applications ». Springer-Verlag. ISBN: 3-540-60127-9. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-05294-5>.
9. J.P. Chilès et P. Delfiner (2012) « Geostatistics, Modeling Spatial Uncertainty (2nd edition). *Wiley series in probability and statistics*. » ISBN: 978-0-470-18315-1. <https://www.wiley.com/en-fr/Geostatistics:+Modeling+Spatial+Uncertainty,+2nd+Edition-p-9780470183151>.