

Analyse probabiliste, inférence bayésienne et méthode observationnelle : application au tassement dû au passage d'un tunnelier

Yi Zhang^{1,*} , Stéphane Commend^{2,3}  et Gil Jacot-Descombes³ 

¹ Eiffage Génie Civil, 3-7 place de l'Europe, 78140 Vélizy-Villacoublay, France

² iTEC, School of Engineering and Architecture (HEIA-FR), HES-SO, University of Applied Sciences Western Switzerland, Péroles 80, CH-1700 Fribourg, Suisse

³ GeoMod SA, Epinettes 32, CH-1007 Lausanne, Suisse

Résumé – La variabilité des sols, les incertitudes du modèle et des paramètres géotechniques, et les variations de réponse du modèle associées, etc. sont des sujets géotechniques à traiter difficilement par des méthodes déterministes ou semi-probabilistes. De ce point de vue, la méthode probabiliste peut être une approche plus adaptée pour prendre en compte ces incertitudes. Dans cet article, un cadre d'approche probabiliste basé sur les modèles aux éléments finis et couplé à la méthode observationnelle est d'abord présenté. Il se compose de quatre parties fondamentales, à savoir : une analyse de sensibilité à l'aide des indices de Sobol (ou Kucherenko) pour identifier les paramètres géotechniques les plus influents sur les résultats, une analyse de fiabilité pour calculer les probabilités de défaillance de la structure *a priori*, une analyse des mesures observées issues de l'auscultation et une rétro analyse bayésienne utilisant ces mesures pour calculer les probabilités de défaillance de la structure *a posteriori* afin d'améliorer les performances de prédiction. Ensuite, cette approche probabiliste est appliquée à un cas concret, qui est la prévision des déplacements induits par le creusement pressurisé des tunnels au droit de pieux de fondation. C'est un sujet technique complexe, dépendant de nombreux facteurs, comme l'effet 3D de l'interaction tunnel/terrain/pieux, les caractéristiques géotechniques du terrain, les multiples sources de déplacement autour des tunneliers, etc. Dans ce cas d'étude, un modèle aux éléments finis 3D est réalisé pour simuler l'interaction tunnel/terrain/pieux, puis une analyse de sensibilité est menée pour déterminer les variables probabilistes d'entrée les plus influentes sur les résultats. L'inférence bayésienne est utilisée pour mettre à jour les hypothèses de calcul à l'aide des mesures de l'auscultation/expérimentation (cuvette de tassement) afin d'affiner les prédictions des déformations (de l'*a priori* vers l'*a posteriori*).

Mots clés : propagation des incertitudes / approche probabiliste / interaction tunnel-terrain-pieux / auscultation / rétro analyse

Abstract – **Probabilistic analysis, Bayesian inference and observational method: application to settlement due to the passage of a tunnel boring machine.** Soil variability, geotechnical model and parameters uncertainties, and associated model response variations, etc. are geotechnical subjects difficult to deal with by deterministic or semi-probabilistic methods. From this point of view, the probabilistic method may be a more suitable approach to take these uncertainties into account. In this article, a framework of probabilistic approach based on finite element models and coupled with the observational method is first presented. It consists of four fundamental parts, namely: a sensitivity analysis using Sobol (or Kucherenko) indices to identify the most influential geotechnical parameters on the results, a reliability analysis to calculate the *a priori* probabilities of failure of the structure, an analysis of field monitoring measurements, and a Bayesian back analysis using these field measurements to calculate the *a posteriori* probabilities of failure of the structure in order to improve the prediction performance. Then, this probabilistic approach is applied to a real life case, which is the prediction of the displacements induced by the pressurized tunnel excavation in line with foundation piles. It is a complex technical subject, depending on many factors such as the 3D effect of tunnel/ground/piles interaction, the geotechnical characteristics of the soils, the multiple sources of displacement around the tunnel boring machines, etc. In this case study, a 3D finite element model is first produced to simulate the tunnel/ground/piles interaction, a sensitivity analysis is then carried out to

* Auteur de correspondance : yi.zhang@eiffage.com

determine the most influential input probabilistic variables on the results. Bayesian inference is used to update calculation hypotheses based on auscultation/experimentation measurements (settlement basin) to refine deformation predictions (from *a priori* knowledge to *a posteriori* knowledge).

Keywords: uncertainties propagation / probabilistic approach / tunnel-ground-piles interaction / monitoring / back analysis

1 Introduction

La variabilité des sols, les incertitudes du modèle et des paramètres géotechniques, et les variations de réponse du modèle associées, etc. sont des sujets géotechniques à traiter difficilement par des méthodes déterministes ou semi-probabilistes. De ce point de vue, la méthode probabiliste peut être une approche plus adaptée pour prendre en compte ces incertitudes, et présente une opportunité de considérer le problème dans son ensemble et de faire émerger de nouvelles idées. Elle est devenue de plus en plus importante grâce aux essors des calculs numériques (Bedford et Cooke, 2001 ; Baecher et Christian, 2003 ; Ang et Tang, 2007 ; Griffiths et Fenton, 2007 ; De Rocquigny *et al.*, 2008 ; Marelli et Sudret, 2014 ; Low, 2014 ; Phoon et Retief, 2016 ; Cao *et al.*, 2017). Grâce aux analyses probabilistes, les risques peuvent être mieux évalués et la prise de décision peut être également facilitée, ce qui permet de ramener le risque à un niveau acceptable.

De plus, les méthodes usuelles de dimensionnement des ouvrages géotechniques courants sont des règles de calcul codifiées avec des dispositions constructives. Mais ces méthodes usuelles peuvent s'avérer insuffisantes dans certains contextes et l'économie du projet est directement liée à la marge de sécurité attachée au modèle et aux paramètres géotechniques. La méthode observationnelle, ou le dimensionnement interactif des ouvrages, est alors une approche pertinente qui permet, dans les contextes délicats, d'aboutir à des ouvrages qui ne sont pas inutilement surdimensionnés et donc plus coûteux, en faisant bien sûr aucune concession sur les objectifs visés de sécurité et de comportement normal de l'ouvrage. La méthode observationnelle doit être appliquée avec rigueur et pourrait être utilisée plus souvent (Terzaghi *et al.*, 1996 ; Peck, 2001 ; CEN, 2004 ; Wu, 2011).

Avec ces objectifs en vue, cet article présente un cadre de l'approche probabiliste basée sur les modèles aux éléments finis et couplée à la méthode observationnelle. Ce cadre se compose de quatre éléments fondamentaux (Minini *et al.*, 2023), à savoir : une analyse de sensibilité à l'aide des indices de Sobol (ou Kucherenko) pour identifier les paramètres géotechniques les plus influents sur les résultats, une analyse de fiabilité pour calculer les probabilités de défaillance de la structure *a priori*, une analyse des mesures observées issues de l'auscultation et une rétro analyse bayésienne utilisant ces mesures pour calculer les probabilités de défaillance *a posteriori* afin d'améliorer les performances de prédiction. Ce cadre développé se matérialise par la liaison entre ZSoil (ZSoil, 2020), un logiciel d'interaction sol-structure par éléments finis non linéaires, et UQLab (Marelli et Sudret, 2014), un logiciel basé sur MATLAB, boîte à outils de quantification de l'incertitude.

Cette approche probabiliste est ensuite appliquée à un cas concret, qui est la prévision des déplacements induits par le

creusement pressurisé des tunnels au droit de pieux de fondation. C'est un sujet technique complexe, dépendant de nombreux facteurs comme l'effet tridimensionnel (3D) de l'interaction tunnel/terrain/pieux, les caractéristiques géotechniques du terrain, les multiples sources de déplacement autour des tunneliers, etc.

Dans ce cas d'étude, un modèle aux éléments finis 3D est réalisé pour simuler l'interaction tunnel/terrain/pieux, puis une analyse de sensibilité est menée à l'aide de l'indice Sobol pour déterminer les variables probabilistes d'entrée les plus influentes sur les résultats. L'inférence bayésienne est utilisée pour mettre à jour les hypothèses de calcul à l'aide des mesures de l'auscultation/expérimentation (cuvette de tassement) afin d'affiner les prédictions des déformations (de l'*a priori* vers l'*a posteriori*).

2 Analyse probabiliste et inférence bayésienne

2.1 Analyse probabiliste

L'approche probabiliste consiste essentiellement à évaluer la fiabilité de l'ouvrage, qui couvre sa sécurité, son aptitude au service, sa durabilité et sa robustesse. L'évaluation de la fiabilité des ouvrages s'appuie sur la probabilité de défaillance P_f ou l'indice de fiabilité β (CEN, 2002 ; Phoon et Retief, 2016 ; Zhang et Toutlemonde, 2018, 2022). La détermination de la probabilité de défaillance (ou l'indice de fiabilité) nécessite d'avoir à disposition une fonction mathématique définissant l'état de défaillance de la structure étudiée. À l'aide de cette description mathématique, l'approche probabiliste fournit un moyen de distinguer les situations où les incertitudes sont particulièrement élevées ou faibles.

Dans le domaine géotechnique, le choix des valeurs caractéristiques pour les paramètres géotechniques peut influencer fortement sur les résultats des calculs. Par contre, le manque de données, la variabilité spatiale des sols, la sensibilité des résultats par rapport aux données d'entrée, etc. sont des points qu'il est difficile d'aborder par un calcul déterministe, voire semi-probabiliste. Dans ce cas, l'approche probabiliste peut être une meilleure solution car elle permet de propager les incertitudes des données d'entrée vers les résultats (Baecher et Christian, 2003 ; Griffiths et Fenton, 2007 ; Lacasse et Nadim, 2007 ; De Rocquigny *et al.*, 2008 ; Marelli et Sudret, 2014 ; Phoon et Retief, 2016).

De plus, la méthode aux éléments finis est une méthode couramment utilisée pour modéliser le comportement hydro-mécanique des ouvrages géotechniques (Potts et Zdravkovic, 1999, 2001 ; Lees, 2016 ; AFTES, 2018). Les calculs aux éléments finis permettent d'étudier finement les sujets comme l'interaction sol-structure en tenant compte du phasage des travaux, de la non-linéarité des sols et des structures, des conditions hydrauliques et des chargements complexes, etc.

Analyse probabiliste

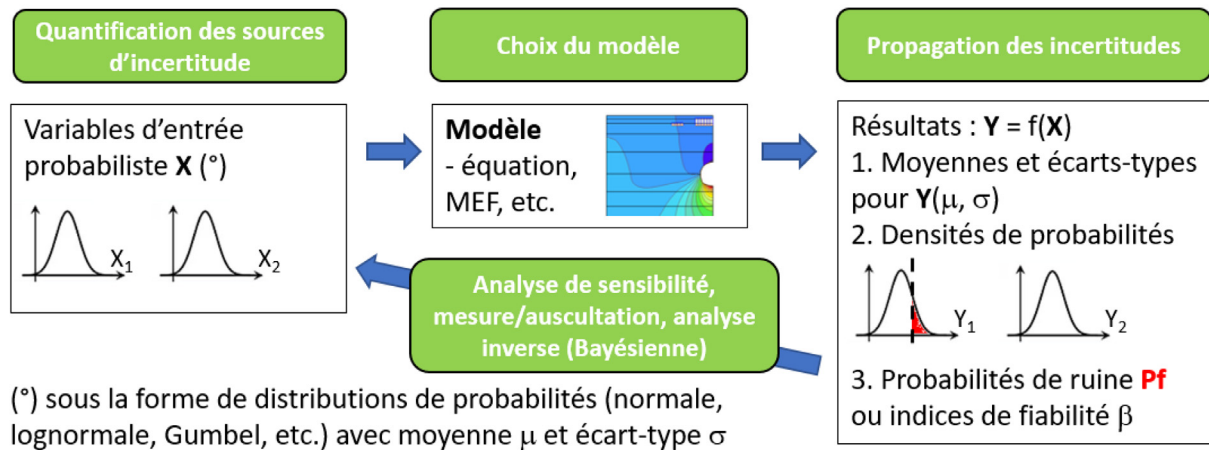


Fig. 1. Approche probabiliste couplée à la méthode observationnelle.

Fig. 1. Probabilistic approach coupled with the observational method.

Sur cette base, une approche probabiliste a été développée pour évaluer la fiabilité des ouvrages souterrains, à l'aide du couplage entre l'approche probabiliste et les modèles aux éléments finis (Zhang et Commend, 2021 ; Minini *et al.*, 2023). Compte tenu du nombre important des calculs lancés, les techniques comme les métamodèles (par exemple Polynomial Chaos Expansion – PCE) sont souvent utilisées pour l'approximation afin de gagner en temps de calcul (Schöbi *et al.*, 2021). Ces techniques permettent d'approximer le comportement du modèle aux éléments finis à l'aide d'une équation polynomiale reliant données d'entrée et résultats, engendrant un gain de temps de calcul significatif. La comparaison entre les résultats numériques et les mesures issues d'auscultations ou des expérimentations au cours de construction est nécessaire pour vérifier les résultats des calculs probabilistes et orienter les choix techniques du projet. La Figure 1 présente les éléments fondamentaux de ce cadre probabiliste développé: l'analyse probabiliste à l'aide d'un modèle aux éléments finis de l'interaction sol-structure pour étudier la performance de la structure (les probabilités de défaillance *a priori*), l'analyse de sensibilité pour identifier les paramètres géotechniques les plus impactants sur les résultats, l'analyse des mesures observées pendant la construction pour obtenir des mesures de surveillance fiables, et l'inférence bayésienne basée sur ces mesures pour affiner les prédictions du comportement de la structure (les probabilités de défaillance *a posteriori*).

À ce jour, le recours aux techniques d'intelligence artificielle (Joshi, 2020 ; Theodoridis, 2020), en particulier d'apprentissage supervisé, est relativement difficile à mettre en œuvre dans le domaine de la géotechnique en raison de la complexité des données d'entrée. Commend *et al.* (2019) ont toutefois mis en œuvre des réseaux de neurones afin de prédire le comportement de fouilles en termes de déplacements et d'efforts, en partant d'une base de données synthétique, forte de 20 000 cas environ, générée au moyen d'un logiciel aux éléments finis. Phoon et Zhang (2023) confirment la complexité d'appliquer les techniques de machine learning à la prédiction de problèmes aux valeurs limites, et indiquent

plutôt un potentiel grandissant d'utiliser l'intelligence artificielle afin de définir les lois constitutives des géomatériaux. Sudret (2019) compare les approches d'apprentissage supervisé (machine learning) et de métamodèles (par exemple PCE) et tire les conclusions suivantes: contrairement à l'apprentissage supervisé, l'approche métamodèle se base sur un modèle réellement physique, permet d'utiliser un jeu des données d'apprentissage de taille réaliste (quelques dizaines ou centaines de cas, au lieu d'un ordre de grandeur mille fois plus grand pour l'apprentissage supervisé), et permet d'introduire de manière explicite l'approche probabiliste décrite ci-dessus.

2.2 Inférence bayésienne

L'inférence statistique effectue une mise à jour sur la distribution de probabilité qui la décrit, compte tenu des observations d'un phénomène aléatoire. Plus particulièrement, l'inférence bayésienne consiste à mettre à jour les hypothèses des calculs en considérant les mesures d'auscultation pour améliorer les prédictions des réponses de la structure étudiée. Dans le cadre bayésien, les connaissances actualisées sur les données d'entrée (distribution « *a priori* ») sont représentées par leur distribution « *a posteriori* », dans laquelle une fonction de vraisemblance est introduite pour refléter l'ajustement du modèle avec les observations du site (Colosimo et Del Castillo, 2007 ; Straub et Papaioannou, 2015 ; Wagner *et al.*, 2021 ; Li *et al.*, 2021). Un grand nombre de paramètres probabilistes et leurs interrelations peuvent être également considérés dans une structure systématique. Le changement d'un paramètre influencera les autres dans la structure à travers leur interrelation.

Dans le domaine géotechnique, l'inférence bayésienne est considérée comme efficace pour mettre à jour les paramètres des sols et les prédictions de réponse. Elle peut également évaluer l'incertitude des paramètres géotechniques et géométriques par les distributions de probabilité *a posteriori* obtenues. En utilisant le théorème de Bayes, on peut combiner

la distribution *a priori* et une fonction de vraisemblance pour obtenir la distribution *a posteriori* (Eq. 1).

$$f_X(X|Z) = a \times L(X, Z) \times f_X(X) \quad (1)$$

où $f_X(X)$ est la fonction de densité de probabilité *a priori*, $L(X, Z)$ est la fonction de vraisemblance, a est la constante ($a^{-1} = \int_{-\infty}^{+\infty} L(x) f_X(x) dx$), $f_X(X|Z)$ est la fonction de densité de probabilité *a posteriori*.

Les ingénieurs utilisent leur expérience et les résultats des investigations géotechniques pour décider la forme de la distribution *a priori*. Des mesures de l'auscultation enregistrées pendant les travaux peuvent ensuite être utilisées pour mettre à jour ces hypothèses *a priori*, qui permet de donner du poids aux experts tout en tenant compte de l'évidence des mesures et rend la méthode bayésienne populaire parmi les experts.

Les applications de l'inférence bayésienne aux problèmes géotechniques couvrent divers aspects, notamment l'incertitude des modèles géotechniques (Zhang *et al.*, 2009), la caractérisation du site, des sols et des roches (Wang *et al.*, 2016; Cao *et al.*, 2017; Zhang et Commend, 2022), et concernent les fondations sur pieux (Zhang *et al.*, 2023), les excavations profondes (Hsiao *et al.*, 2008; Minini et Commend, 2023) et les travaux de tunnel (Feng *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2022; Minini *et al.*, 2023). Par conséquent, la méthode bayésienne qui considère les paramètres du sol comme des variables probabilistes a attiré une attention accrue en tant qu'approche robuste dans la rétro analyse et la mise à jour des paramètres. Cela est probablement dû à la capacité de l'approche bayésienne à incorporer des informations préalables telles que des observations sur le terrain et un jugement technique dans le modèle. Ainsi, dans les travaux souterrains où les données de surveillance sont collectées progressivement, les paramètres du modèle peuvent être mis à jour facilement en intégrant les données acquises dans le modèle, puis prédire à nouveau les efforts et déformations causés par les travaux souterrains.

En plus des données d'observation spécifiques au projet, le modèle s'appuie sur les informations disponibles sur le site avant le projet (par exemple, l'expérience et le jugement de l'ingénieur), qui sont appelées « connaissances antérieures ou *a priori* » dans le cadre bayésien. Les informations fournies par les données d'observation acquises en cours de projet sont intégrées aux connaissances « *a priori* » par le biais d'une « fonction de vraisemblance » pour fournir des informations « mises à jour ou *a posteriori* » dans le cadre bayésien.

Dans l'avenir, la méthode bayésienne peut être très utile avec l'utilisation croissante des technologies numériques et le développement de la collecte et de l'analyse des données dans l'industrie de la construction. Ceci permet son utilisation pour résoudre des problèmes géotechniques complexes (Sousa et Einstein, 2012; Zhang *et al.*, 2020; Jong *et al.*, 2021). Ceci est réalisé en établissant des modèles d'analyses et des données d'entrée pour ces modèles afin de produire une interprétation proche de la réalité. Les modèles développés et mis en œuvre à partir de ces technologies numériques sont basés sur les données, qui sont généralement simplifiées en faisant certaines hypothèses. Dans ces modèles, la mise à jour des hypothèses à

l'aide des observations est donc très importante ce que permet la méthode bayésienne.

Malgré leurs avantages, les approches statistiques et les concepts de probabilité ne doivent pas se substituer à la compréhension du contexte géologique, du comportement des matériaux, des conditions de chargement et des mécanismes de rupture.

3 Méthode observationnelle

Les méthodes usuelles de justification des ouvrages géotechniques courants utilisent des dispositions constructives et des règles de calcul souvent codifiées. Mais ces méthodes usuelles peuvent s'avérer insuffisantes dans certains contextes et l'économie du projet est directement liée à la marge de sécurité attachée à chaque paramètre géotechnique. La méthode observationnelle, ou dimensionnement interactif des ouvrages, est alors une approche pertinente et pourrait être efficace (Terzaghi *et al.*, 1996; Peck, 2001; Allagnat, 2005; Finno et Calvello, 2005; Wu, 2011; Yeow *et al.*, 2014).

Terzaghi et Peck (Terzaghi *et al.*, 1996) ont décrit la méthode observationnelle comme :

“Design based on the most unfavorable assumptions is inevitably uneconomical, but no other procedure provides the designer in advance of construction with the assurance that the soil-supported structure will not develop unanticipated defects. However, if the project permits modifications of the design during construction, large savings can often be made by designing on the basis of the most probable rather than the most unfavorable possibilities. The gaps in the available information are filled by observations during construction, and the design is modified in accordance with the findings.”

Le principe de la méthode observationnelle définie dans l'Eurocode 7 (CEN, 2004) est également cité ci-dessous :

(1) “Quand il est difficile de prévoir le comportement géotechnique d'un ouvrage, il peut être approprié d'appliquer l'approche connue sous le nom de « méthode observationnelle », dans laquelle la conception est revue pendant la construction.”

(2) “Les exigences suivantes doivent être remplies avant le début de la construction :

- les limites du comportement acceptable de l'ouvrage doivent être établies ;
- le domaine des comportements possibles doit être analysé et on doit montrer qu'il existe une probabilité acceptable que le comportement réel soit compris dans le domaine des comportements acceptables ;
- un plan d'instrumentation doit être établi, pour vérifier si le comportement réel est compris entre les limites acceptables. Le suivi doit pouvoir le montrer clairement et aussitôt que possible et avec une fréquence de mesures qui permette de mettre en œuvre efficacement les mesures destinées à rectifier le projet ;
- le temps de réponse des instruments de mesure et les procédures d'analyse des résultats doivent être suffisamment rapides par rapport à l'évolution possible du système ;
- un plan d'actions de sauvegarde doit être établi, pour être mis en œuvre si le suivi relève un comportement sortant des limites acceptables.”

(3) “Pendant la construction, le suivi doit être exécuté tel que planifié.”

(4) “Les résultats des observations doivent être analysés à des étapes appropriées du projet et on doit mettre en œuvre le plan d’actions de sauvegarde si l’on sort des limites du comportement autorisé.”

(5) “L’équipement de mesure doit être soit remplacé soit étendu en cas d’incidents, afin de fournir des données fiables de type approprié et en quantité suffisante.”

Les facteurs clés impliqués dans la réussite de la méthode observationnelle sont une base technique solide, le management des risques et la confiance entre les intervenants (client, concepteur et entreprises). L’application de la méthode observationnelle est basée sur une définition complète du comportement attendu par le concepteur et la vérification du comportement réel de la structure par le constructeur pendant les travaux, suivi par le concepteur, voire le client. L’ingénieur géotechnicien doit être qualifié et expérimenté afin d’être en mesure d’évaluer l’état d’équilibre ou les processus critiques de redistribution des efforts à partir de l’évaluation des données auscultées.

La méthode observationnelle est une technique puissante avec des avantages pratiques pour les grands projets d’infrastructure. Utilisée efficacement, elle peut engendrer d’importantes économies sur le coût et le délai, une augmentation de la sécurité et une collaboration plus efficace entre les concepteurs et les constructeurs (Spross et Johansson, 2017 ; Powderham et O’Brien, 2020 ; Zhang et Hamet, 2022 ; Zhang, 2024). De plus, ces dernières années, il y a eu des améliorations importantes dans la qualité de l’instrumentation. Ces nouveaux systèmes d’auscultation et de gestion des données peuvent fournir une surveillance en temps réel et promettent de fournir de nouvelles informations importantes pour la méthode observationnelle.

Malgré ses avantages, la méthode observationnelle est souvent utilisée comme un outil de gestion des risques et reste largement sous-utilisée (Beth *et al.*, 2021). Les contraintes principales sont le temps pour réviser la conception pendant la construction, les conditions contractuelles et le manque de partage équitable des avantages et des risques entre les intervenants (client, constructeur et concepteur).

4 Cas d’études – interaction tunnelier/terrain/pieu

L’expansion durable des zones urbaines conduit à une multiplication des projets souterrains de transport en commun, à l’image du Grand Paris Express. Les tunneliers à front pressurisé sont généralement utilisés pour construire les tunnels en zones urbaines. Aujourd’hui, la prévision des déplacements induits par le creusement pressurisé des tunnels au droit des fondations profondes reste un sujet technique complexe et délicat (AFTES, 2018), en raison des problèmes principaux suivants :

- l’interaction tunnel/terrain/pieux est tridimensionnelle, et le creusement génère des sollicitations variables au cours du temps ;
- de multiples sources de déplacements existent autour du tunnelier : pression frontale et soutènement mécanique de la roue de coupe, pression d’injection du mortier de

bouillage, géométrie du bouclier, prise progressive du mortier de bouillage, consolidation dans les sols fins, etc. ;

- l’historique de chargement des pieux et une loi d’interface terrain/pieu adaptée doivent être considérés.

La limitation de l’impact des tunneliers sur les pieux est une problématique d’importance pour la Société des Grands Projets (SGP), qui a monté le projet de recherche TULIP (Tunneliers et Limitation des Impacts sur les Pieux) avec la participation du Centre d’Études des Tunnels (CETU), de l’École Nationale des Travaux Publics de l’État (ENTPE) et de l’Université Gustave Eiffel (UGE).

Nous présentons ici l’application de l’approche probabiliste développée, couplée à la méthode observationnelle, pour mieux appréhender le mécanisme d’interaction tunnel/terrain/pieux (Zhang *et al.*, 2023). L’application de cette approche probabiliste à l’interaction tunnel/terrain/pieux est basée sur les résultats d’une expérimentation en vraie grandeur, conduite dans le projet TULIP sur la ligne 16 lot 1 du Grand Paris Express (Berthoz *et al.*, 2022 ; Mohamad *et al.*, 2022).

4.1 Description de l’expérimentation

Dans le cadre du projet TULIP, trois pieux (P1, P2 et P3) en béton armé (C35/45) avec un diamètre de 500 mm ont été réalisés et instrumentés sur le tracé d’un tunnelier, ou à sa proximité immédiate (Fig. 2). Le pieu P3 fait l’objet de la présente étude, il a une profondeur de 20,5 m et une charge exercée en tête égale à 2060 kN. Le diamètre excavé du tunnel est $D = 9,87$ m, et la profondeur de son axe est égale à 21 m. Le creusement est réalisé avec un tunnelier à pression de terre.

4.2 Géologie

La colonne stratigraphique de sol au droit du terrain d’expérimentation consiste en (Fig. 2) : les remblais (R), les Calcaires de Saint-Ouen (CSO ou SO), les Sables de Beauchamp (SB), les Marnes et Caillasses (MC) et les Calcaires Grossiers (CG). La nappe phréatique a un niveau stable à 11,5 m de profondeur. Le niveau d’eau EC est retenu pour les calculs, à savoir +48,8 NGF.

4.3 Mode de construction

Le tunnelier utilisé est appelé TBM6 dans le cadre des travaux de la ligne 16 lot 1 réalisés par Eiffage Génie Civil. Il s’agit d’un tunnelier à pression de terre (Earth Pressure Balance – EPB) de la marque Herrenknecht. Le tunnelier est constitué des éléments suivants (Fig. 3) :

- une roue de coupe de diamètre de 9,87 m ;
- un bouclier avant de 9,83 m de diamètre extérieur avec une longueur de 3,5 m et un bouclier central de 9,815 m de diamètre extérieur avec une longueur de 3,5 m ;
- une jupe de 9,80 m de diamètre et 4,0 m de longueur.

Les caractéristiques des anneaux (béton C40/50 en voussoirs) sont (Fig. 3) :

- diamètres intrados/extrados : 8,7 m/9,5 m ;
- épaisseur des voussoirs : 0,40 m ;
- nombre de voussoirs : 7 ;
- largeur de l’anneau : 2,0 m.

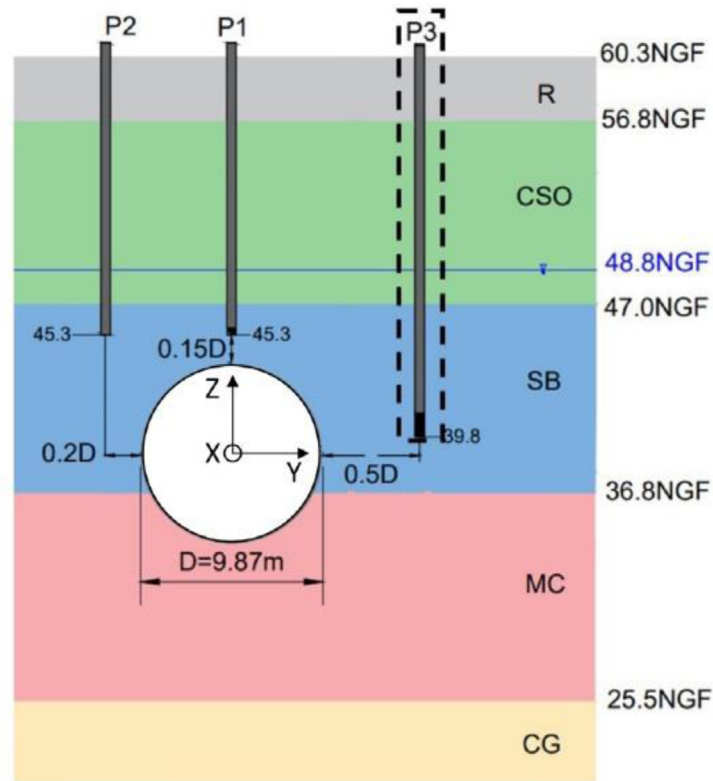


Fig. 2. Position des trois pieux et du tunnel (Berthoz *et al.*, 2022).
 Fig. 2. Position of the three piles and tunnel (Berthoz *et al.*, 2022).

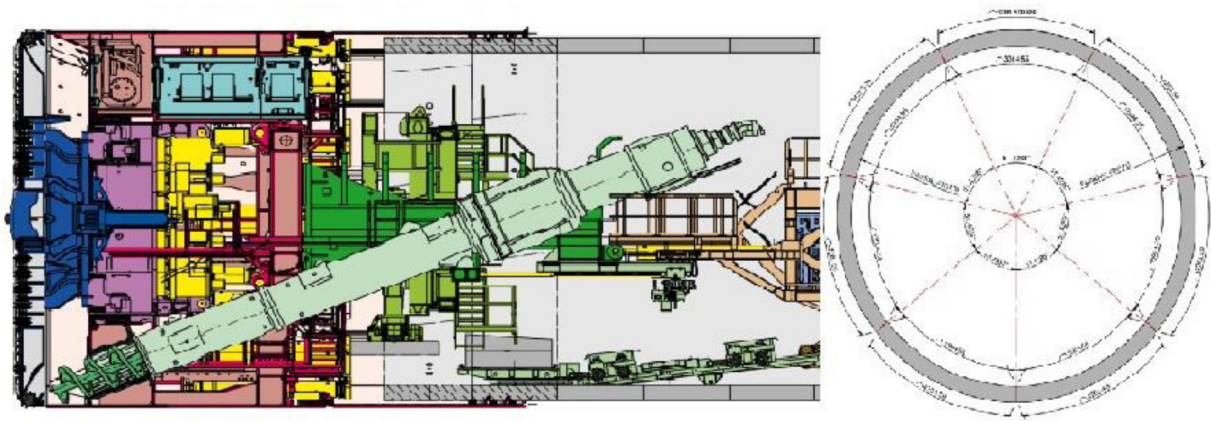


Fig. 3. Coupe du tunnelier EPB et des anneaux.
 Fig. 3. Section of the EPB tunnel boring machine and the rings.

5 Simulations numériques – modèle et phasage

5.1 Modèle aux éléments finis

Un modèle aux éléments finis 3D (Fig. 4) a été réalisé pour simuler l'interaction entre le creusement du tunnel et le pieu P3 à l'aide du logiciel ZSoil (ZSoil, 2020). Ce modèle consiste en 100 800 éléments volumiques trilineaires à 8 nœuds

(formulation «Enhanced Assumed Strains») et 1 point d'intégration super convergent (Zienkiewicz et Zhu, 1992). Les éléments volumiques ont une taille moyenne de $0,4\text{ m}^3$. Le modèle a une hauteur de 45 m, une largeur de 30 m et une profondeur de 30 m. Il a été créé avec un plan de symétrie situé à l'axe du tunnel pour optimiser le temps de calcul.

Dans ce modèle 3D, la méthode de Muir-Wood (Wood, 1975) qui conduit à définir une épaisseur réduite pour l'anneau (épaisseur équivalente) a été appliquée pour tenir compte de la présence des joints entre les voussoirs d'un même anneau.

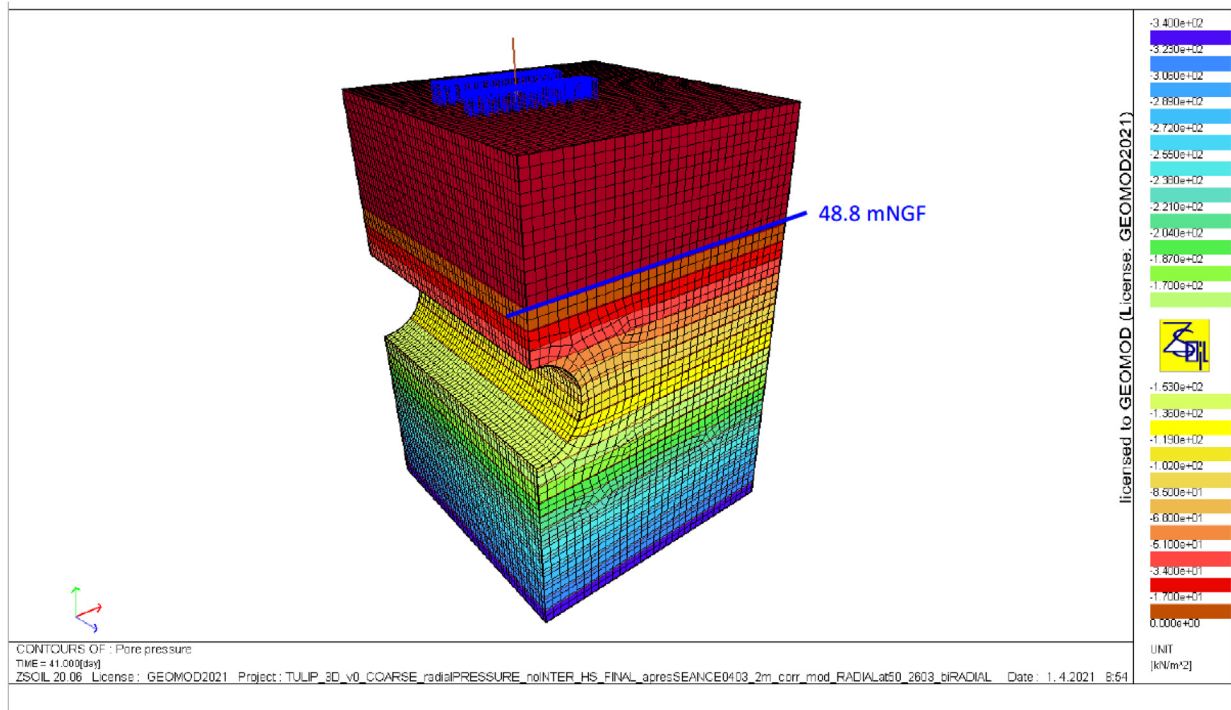


Fig. 4. Modèle aux éléments finis 3D.

Fig. 4. 3D Finite element model.

Tableau 1. Frottement axial unitaire limite (q_s) et pression de rupture du terrain (q_b).

Table 1. Unit axial friction (q_s) and ground rupture pressure (q_b).

Sol	γ_h (kN/m ³)	E_M (MPa)	p^*_{LM} (MPa)	Nature du sol	$\alpha_{pieu-sol}$	f_{sol} (kPa)	q_s (kPa)	q_b (kPa)
R	19	16	1.2	argile	1.5	43	64	
SO(2)	18	35	1.9	calcaire marneux	1.6	95	152	
SB(2)	21	98	4.9	sable grave	1.8	109	170	8085

γ_h : poids volumique ;

E_M : module pressiométrique ;

p^*_{LM} : pression limite ;

f_{sol} : une fonction qui ne dépend que du type de sol et des valeurs de p^*_{LM} .

La pression de confinement appliquée est : 223 kPa en clé et 313 kPa en radier, incluant deux parties :

- la pression mesurée dans la chambre d’abattage : 130 kPa en clé et 220 kPa en radier ;
- l’effort complémentaire exercé par la roue de coupe sur le front de taille (soutènement mécanique) : 7000 kN, soit une pression uniforme de 93 kPa.

Le bouclier n’a pas été modélisé explicitement, mais à l’aide d’une pression radiale sur toute la longueur du bouclier, équivalente à la pression mesurée dans la chambre d’abattage en clé, soit 130 kPa.

La présence de mortier de bourrage n’est pas introduite explicitement dans le modèle. Les caractéristiques mécaniques du mortier de bourrage sont meilleures que celles des sols environnants (SO et SB), c’est pourquoi le mortier n’est pas

modélisé en phase service. Nous considérons l’influence du mortier de bourrage uniquement par la pression d’injection en phase travaux, qui est de 175 kPa à proximité de la clef.

Un calcul couplé hydromécanique est réalisé. Le champ de pressions interstitielles est défini grâce à l’introduction de conditions aux limites du modèle (Fig. 4). Toutes les modélisations sont réalisées en absence d’écoulement. Le niveau de la nappe pris en compte dans les calculs est +48,8 NGF. Les voussoirs sont considérés comme imperméables.

L’interface pieu/sol a été modélisée à l’aide d’un frottement axial unitaire limite q_s et d’une résistance en pointe du terrain q_b . Leurs valeurs sont évaluées conformément à la norme NF P 94-262 – Fondations profondes et présentées dans le Tableau 1.

Tableau 2. Caractéristiques des sols.
Table 2. Soils characteristics.

Sol	α	Rapport	Module de chargement	Module de déchargement / rechargement	c'	φ'	c_u	K_0	K_{h*}	K_{v*}	ν	ψ
			E_{ur}/E'	$E' = E_M/\alpha$ (MPa)								
R	1/2	2.5	32	80	0	28	40	0.53	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	0,3	0
SO(2)	1/3	2.5	105	263	10	33	60	0.46	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-5}$	0,3	3
SB(2)	1/2	2.5	196	490	10	33	60	0.46	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	0,3	3
MC(3)	1/3	3.0	501	1503	25	35	120	0.43	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,3	5
MC(5)	2/3	2.5	614	1534	50	35	-	0.43			0,3	5
CG(3)	1/2	2.5	954	2385	100	35	-	0.43	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$8,4 \cdot 10^{-7}$	0,3	5

α : coefficient rhéologique ;

E' : Module de déformation ;

E_{ur} : Module de rechargement déchargement ;

c' , φ' : cohésion et angle de frottement interne du sol (conditions drainées) ;

c_u : cohésion du sol (conditions non drainées) ;

K_0 : coefficient de poussée des terres au repos ;

K_{h*} : coefficient de perméabilité horizontale ;

K_{v*} : coefficient de perméabilité verticale ;

ν : coefficient de Poisson ;

ψ : angle de dilatance.

5.2 Loi de comportement

Les calculs aux éléments finis sont effectués en contraintes effectives et en conditions drainées. Le comportement des sols est simulé en considérant une loi de comportement élasto-plastique avec écrouissage en utilisant un modèle HSM (Hardening Soil Model) simplifié ($m=0,5$). La loi de comportement HSM (Schanz *et al.*, 1999) est considérée plus adaptée pour prédire les déplacements dans les travaux souterrains (Hejazi *et al.*, 2008) car elle permet de prendre en compte les phénomènes comme la dilatance avant rupture, la variation du module en fonction de l'état de contrainte, le module en déchargement différant de celui en chargement. Le modèle HSM peut être considéré comme une amélioration de modèle hyperbolique de Duncan-Chang (Duncan et Chang, 1970). La surface de charge est décrite par deux mécanismes avec écrouissage isotrope contrôlant respectivement les déformations volumiques et déviatoriques.

Les caractéristiques des sols prises sont présentées dans le Tableau 2. SO(2), SB(2), MC(3), MC(5) et CG(3) sont respectivement les sous-couches de SO, SB, MC et CG. Les caractéristiques utilisées proviennent-elles d'essais de labo sur des échantillons prélevés sur le site de construction.

5.3 Phasage

Le principe de phasage retenu est le suivant :

- Phase 1 : Initialisation des contraintes dans le sol avec les caractéristiques mécaniques et de déformation drainées. Le champ de contraintes initiales est obtenu par équilibre, avec application progressive de la gravité, et prise en compte des pressions interstitielles.
- Phase 2 : Réalisation du pieu.

- Phase 3 : Application des surcharges de 2060 kN en têtes du pieu P3.
- Phase 4 : Simulation du passage du tunnelier.
 - Application de la pression de confinement ;
 - Passe de 2 m, soit largeur d'un anneau, en désactivant les éléments volumiques correspondants, et apparition de pressions radiales de 130 kPa qui modélisent le bouclier.
- Phase 5 : Pose des voussoirs, les voussoirs sont considérés comme étanches, la pression hydrostatique à l'intérieure des voussoirs est nulle.
- Phase 6 : Injection de mortier de bourrage modélisé à l'aide d'une pression radiale de 175 kPa sur 2 m de largeur et à 10 mètres à l'arrière de la roue de coupe.

6 Simulations numériques – résultats et discussion

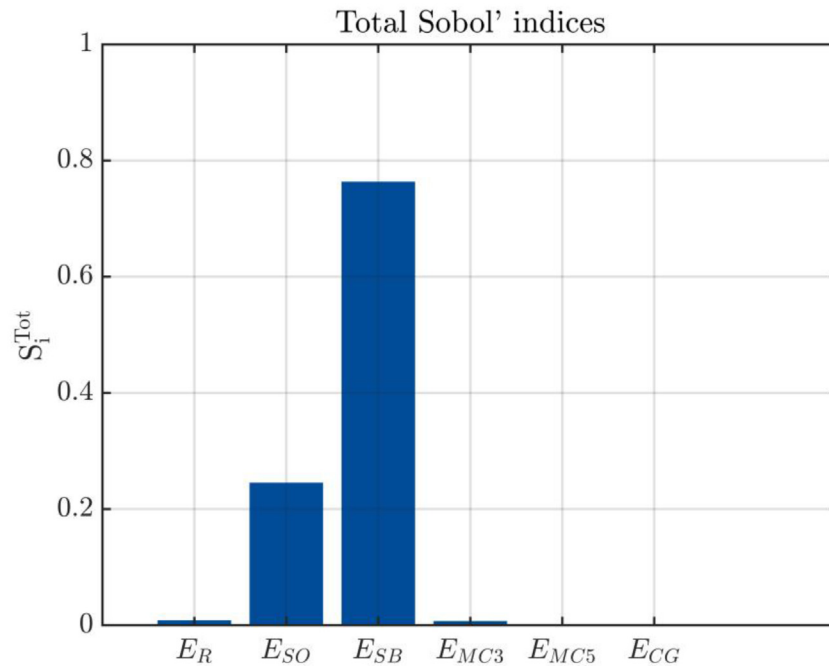
6.1 Sensibilité sur les paramètres géotechniques

Dans l'approche probabiliste, les paramètres géotechniques importants sur le tassement sont considérés comme des variables probabilistes, définies par une distribution lognormale qui est couramment utilisée dans le cadre de la représentation de paramètres associés à la résistance des matériaux. Selon les résultats des investigations géotechniques, la valeur moyenne (μ) et le coefficient de variation (COV) de ces paramètres sont présentés dans le Tableau 3. Il s'agit des distributions *a priori*. Dans la présente étude, seuls les modules E' sont considérés comme variables probabilistes.

Tableau 3. Valeur moyenne (μ) et coefficient de variation (COV) *a priori*.**Table 3.** Mean value (μ) and coefficient of variation (COV) *a priori*.

Sol	$E' = E_M/\alpha$ (MPa)		c' (kPa)		φ' (°)	
	μ	COV	μ	COV	μ	COV
R	32	0.40	0	-	28	-
SO(2)	105	1.20	10	-	33	-
SB(2)	196	0.50	10	-	33	-
MC(3)	501	0.60	25	-	35	-
MC(5)	614	0.35	50	-	35	-
CG(3)	954	0.15	100	-	35	-

Remarque : bien que le coefficient de variation du module des Calcaires de Saint-Ouen atteigne 120 %, il a été décidé de le limiter à 50 % afin de rester dans les limites usuelles rencontrées dans la littérature (Phoon et Retief, 2016).

**Fig. 5.** Étude de sensibilité vis-à-vis de tassement à l'aide de l'indice de Sobol.**Fig. 5.** Sensitivity study of surface settlement using the Sobol indices.

Afin de rendre l'approche probabiliste plus efficace en temps de calcul, un modèle éléments finis 2D a été calé sur le modèle 3D. Avec un taux de déconfinement approprié, il est possible de reproduire avec le modèle 2D la cuvette de tassement du terrain naturel dans le modèle 3D. Ensuite, un métamodèle PCE reproduisant la cuvette de tassement du terrain naturel a été réalisé pour faire l'approximation du modèle 2D à l'aide du couplage des logiciels ZSoil (ZSoil, 2020) et UQLab (Marelli et Sudret, 2014). L'avantage du métamodèle PCE est que son évaluation est immédiate, au contraire d'un modèle EF. Ceci permet de rendre les analyses de sensibilité et de fiabilité beaucoup plus rapides avec la même précision.

Une étude de sensibilité vis-à-vis de tassement en surface a été ensuite effectuée sur le module des couches (E') à l'aide des indices de Sobol. Dans le cadre probabiliste, l'utilisation de ces indices permet de décomposer la variance d'un des résultats (output) du modèle en fractions qui peuvent être attribuées aux

variables d'entrée (input). Cette étude de sensibilité a permis d'identifier les deux couches les plus impactantes sur le tassement (Fig. 5), à savoir les Sables de Beauchamp E_{SB} (74 %) et les Calcaires de Saint-Ouen E_{SO} (24 %).

6.2 Inférence bayésienne

Les mesures d'auscultation pour l'analyse inverse bayésienne sont les tassements mesurés sur trois points de la cuvette (Tab. 4).

Une inférence bayésienne a été ensuite menée grâce au couplage des logiciels ZSoil et UQLab. Elle a pour but de mettre à jour les PDF (Probability Density Function) des variables d'entrée probabiliste les plus influentes du modèle de calcul (identifiées plus haut grâce à l'analyse de sensibilité) sur la base des mesures d'auscultation (Fig. 6). En l'occurrence, la comparaison de la prédiction du tassement maximal et de la valeur mesurée au centre de la cuvette permet cette mise à jour.

Tableau 4. Tassement mesuré sur 3 points (données CETU).

Table 4. Settlement measured at 3 points (CETU data).

État final (loin à l'arrière du front)	Tassement maximal en surface du terrain	$U_{zmax-terrain}$	-10,0	mm
	Distance transversale où le tassement vaut 60 % de $U_{zmax-terrain}$	$Y_{60%-uzmax}$	8,0	m
	Distance transversale où le tassement vaut 30 % de $U_{zmax-terrain}$	$Y_{30%-uzmax}$	12,5	m

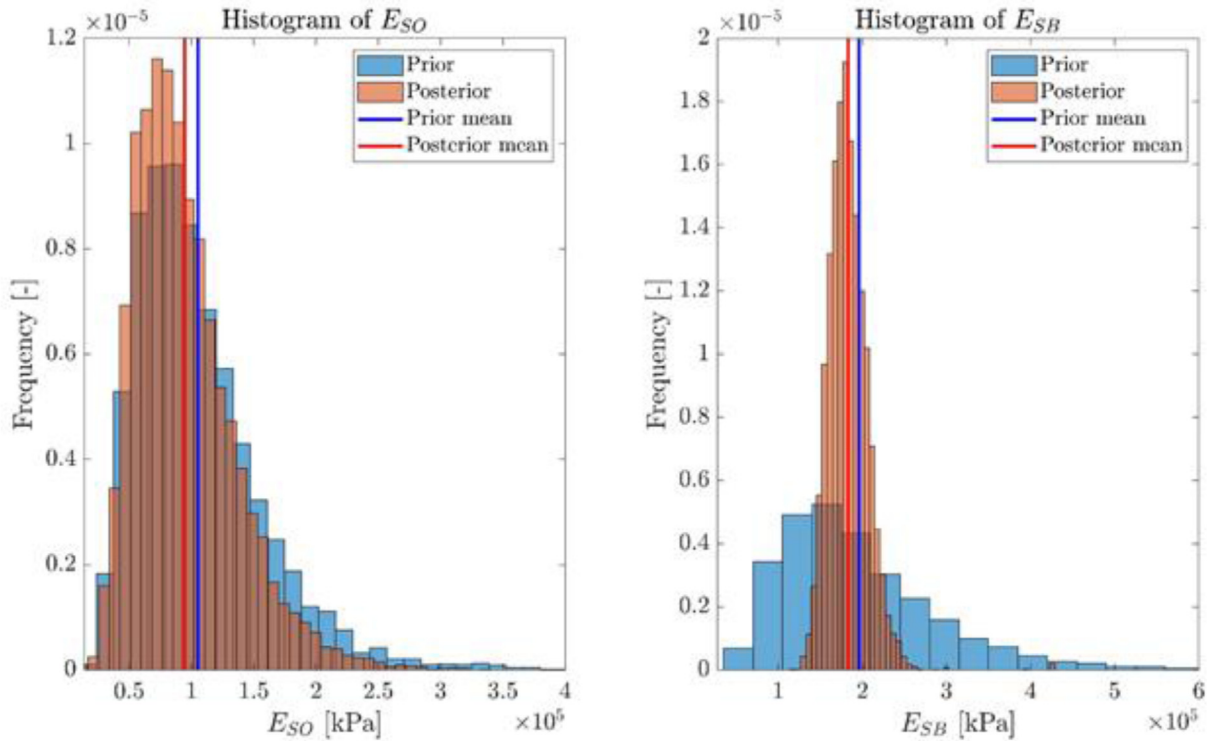


Fig. 6. Mise à jour des PDF du module E en fonction des mesures.

Fig. 6. Update PDFs of modulus E based on measurements.

Tableau 5. Prior et posterior PDF avec μ et COV en lognormal.

Table 5. Prior and posterior PDF with μ and COV in lognormal.

	Valeur déterministe	Prior PDF	Posterior PDF
E_{SO}	105 000 kPa	LN($\mu = 105\ 000$, COV = 50 %)	LN($\mu = 94\ 490$, COV = 43 %)
E_{SB}	196 000 kPa	LN($\mu = 196\ 000$, COV = 50 %)	LN($\mu = 183\ 100$, COV = 13 %)

En conséquence, l'analyse inverse bayésienne permet de calculer la valeur moyenne (μ) et le coefficient de variation (COV) des modules E_{SB} , E_{SO} (Tab. 5). Ces valeurs moyennes *a posteriori* ont ensuite été utilisées dans le modèle de calcul 2D. Les résultats du calcul avec les valeurs mises à jour des E_{SB} et E_{SO} sont présentés dans le chapitre 6.3.

6.3 Comparaison avec les résultats expérimentaux

Les cuvettes de tassement des simulations *a priori* (E_{SO} : $\mu = 105\ 000$ kPa et COV = 50 %; E_{SB} : $\mu = 196\ 000$ kPa et COV = 50 %) et *a posteriori* (E_{SO} : $\mu = 94\ 490$ kPa et COV = 43 %; E_{SB} : $\mu = 183\ 100$ kPa et COV = 13 %) sont présentées dans la Figure 7.

La valeur *a posteriori* du tassement à l'axe du tunnel après inférence bayésienne est plus proche de la mesure, grâce à la mise à jour des hypothèses (modules E_{SB} et E_{SO}). Dans le cas présent, la prédiction *a priori* était relativement proche de la mesure de tassement maximal, impliquant une mise à jour des valeurs moyennes des modules E' relativement modeste (cf. Fig. 5). La forme de la cuvette reste néanmoins moins raide que celle du profil expérimental, en raison de l'approche continue du modèle aux éléments finis.

À noter qu'une mise à jour alternative sur la valeur du déplacement à 6 m de l'axe (au lieu de la valeur à l'axe) modifierait de manière significative le profil *a posteriori* (Fig. 7).

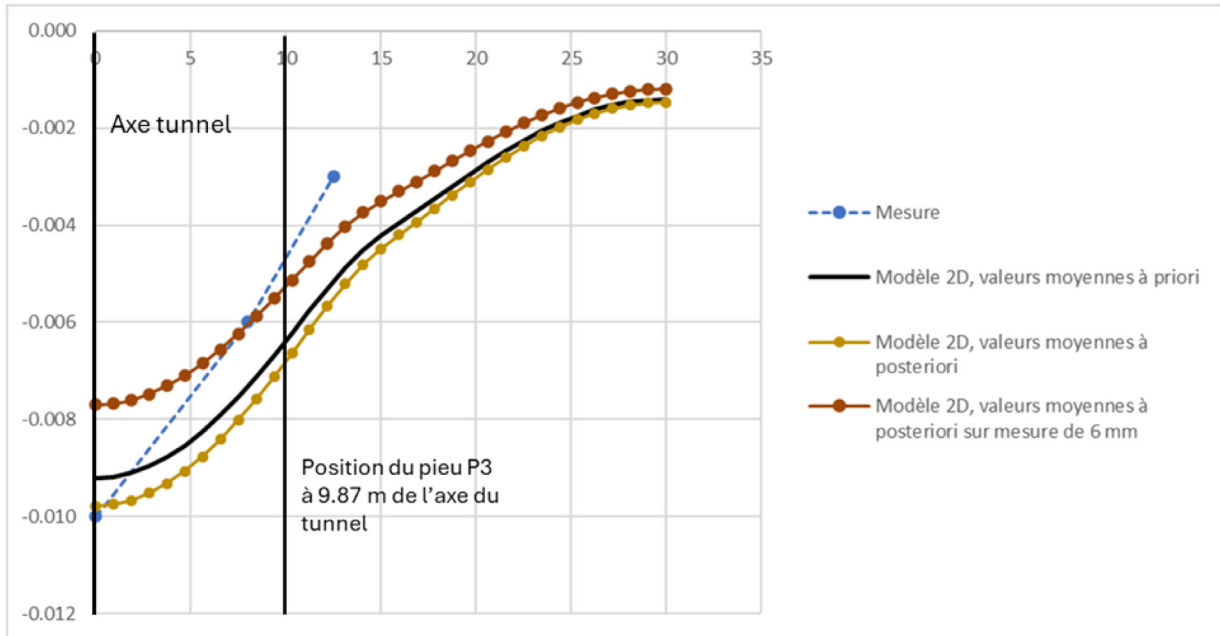


Fig. 7. Géométrie de la cuvette de tassement au droit du pieu P3 sans et avec inférence bayésienne et comparaison avec les mesures de terrain.
Fig. 7. Geometry of the settlement basin at pile P3 without and with Bayesian inference and comparison with field measurements.

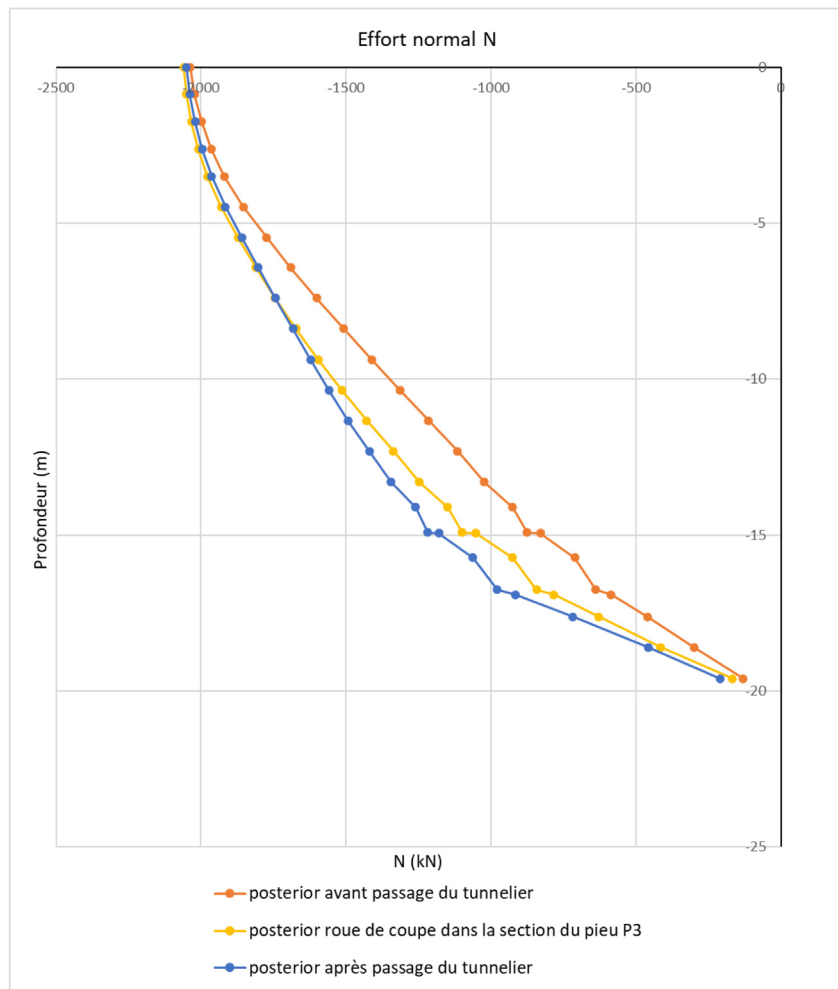


Fig. 8. Effort normal dans le pieu P3.
Fig. 8. Normal force in pile P3.

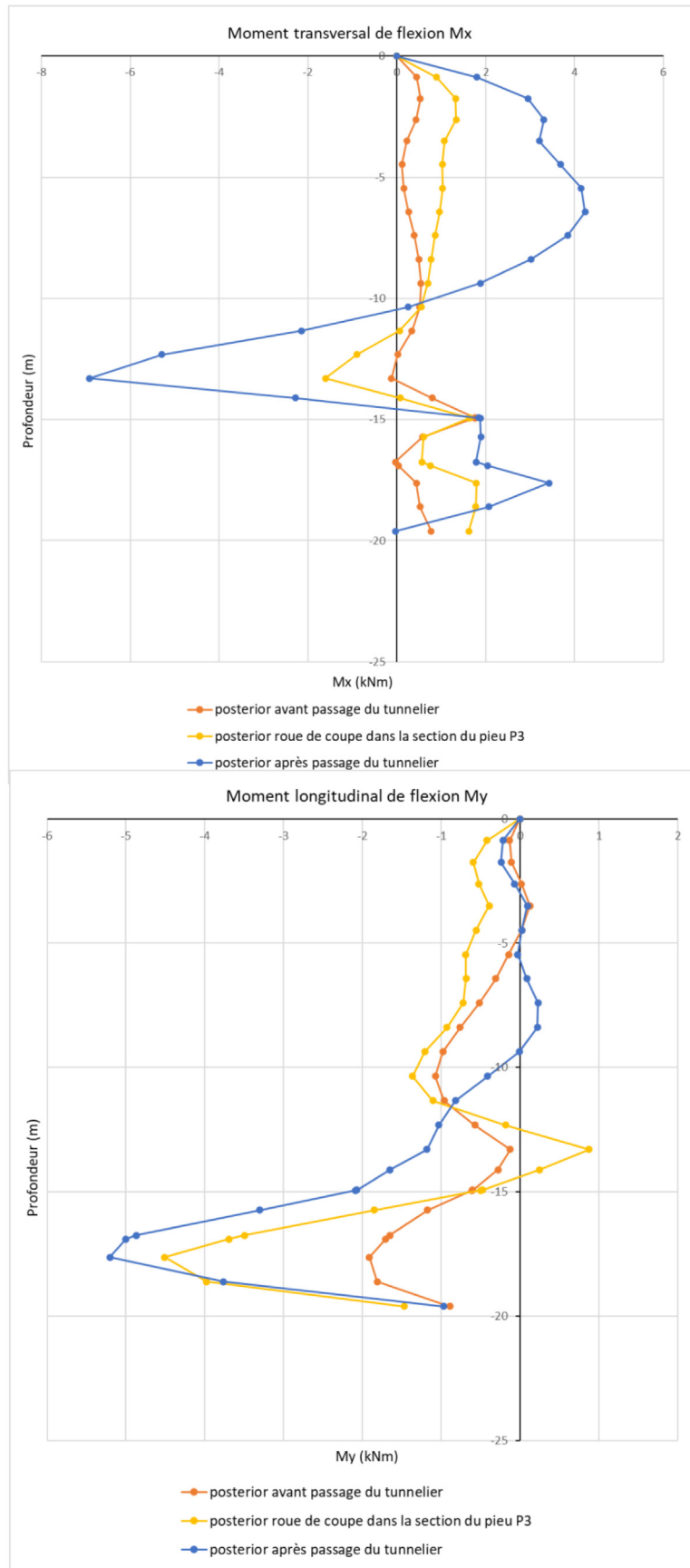


Fig. 9. Moments de flexion dans le pieu P3.
Fig. 9. Bending moments in pile P3.

De plus, les résultats des calculs montrent que le passage du tunnelier a bien engendré des variations des efforts (N et M) dans le pieu chargé. La distance entre la roue de coupe et la section du pieu P3 avant et après le passage du tunnelier est 10 m, dans sa zone d'influence géotechnique. En raison d'absence des résultats expérimentaux, nous illustrons ci-après à titre indicatif l'impact de passage du tunnelier sur l'effort normal N (Fig. 8) et les moments de flexion M (Fig. 9, avec Mx fléchissant le pieu en direction du tunnel) avec les hypothèses « *a posteriori* ». On y constate notamment une augmentation des moments de flexion Mx après passage du tunnelier.

Avec les mesures des efforts, une retro analyse bayésienne pourrait être envisagée vis-à-vis des hypothèses de calcul « *a priori* » comme la cohésion (c') et l'angle de frottement (φ').

7 Discussion et conclusions

Cet article présente d'abord le principe d'une approche probabiliste et de l'inférence bayésienne couplée à la méthode observationnelle.

Ensuite une application de cette approche probabiliste est présentée concernant l'interaction tunnelier/terrain/pieux sur un site expérimental du lot 1 de la ligne 16 du projet Grand Paris Express à l'aide du modèle aux éléments finis. Dans cette application, les modèles aux éléments finis sont réalisés, avec les paramètres géotechniques des sols (E') considérés comme des variables probabilistes, les hypothèses (distributions de probabilité *a priori*) se sont basées sur des données issues de sondages géotechniques réalisés. Grâce aux études de sensibilité, les paramètres les plus influents sur le tassement en surface sont identifiés, à savoir les modules E_{SB} et E_{SO} dans les sables de Beauchamps et les calcaires de St Ouen respectivement.

Grâce à l'expérimentation mise en place, les tassements en surface au droit du pieu P3 sont mesurés. En utilisant ces mesures d'auscultation, l'inférence bayésienne a été menée pour raffiner la prédiction de tassement au droit du pieu P3 (distributions de probabilité « *a posteriori* »). Avec cette rétro analyse, les hypothèses sur des paramètres des sols les plus influents (E_{SB} et E_{SO}) sont mises à jour, ainsi que les tassements en surface et les efforts (N et M) dans le pieu P3. Ceci pourrait aider à mieux appréhender les interactions entre le sol et la structure et à prédire les comportements tunnelier/terrain/pieux.

De plus, la méthodologie probabiliste développée à l'aide des outils informatiques permet de réduire considérablement le temps des rétro-analyses, ce qui permettra de favoriser l'application de la méthode observationnelle. Ces dernières décennies, il y a également eu des améliorations impressionnantes dans la qualité de l'instrumentation. Ces nouveaux systèmes d'instrumentation et de gestion des données peuvent assurer une auscultation en temps réel et promettent de fournir des mesures fiables pour appliquer la méthode observationnelle.

Enfin, l'approche bayésienne, utilisée en cours de travaux, permet de formaliser et donner un cadre mathématique à la méthode observationnelle utilisée de longue date en géotechnique. Une diminution *a posteriori* de la probabilité de défaillance de la structure étudiée, basée sur les observations in situ (inclinomètres, extensomètres, piézomètres) permettra

d'alléger le design initial, entraînant une économie de moyens et de ressources.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier le soutien de Pascal HAMET, Thierry HUYGHUES-BEAUFOND et Charles KREZIAK à l'approche probabiliste développée et présentée dans cet article.

Références

- AFTES GT16R2F1 . 2018. Recommandation : prise en compte des effets induits par le creusement sur les constructions avoisinantes dans la conception et la réalisation des ouvrages souterrains.
- Allagnat D. 2005. La méthode observationnelle pour le dimensionnement interactif des ouvrages. Paris: Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
- Ang AHS, Tang WH. 2007. Probability concepts in engineering: Emphasis on applications to civil and environmental engineering (2nd edition). Wiley.
- Baecher GB, Christian JT. 2003. Reliability and statistics in geotechnical engineering. Wiley.
- Bedford T, Cooke R. 2001. Probabilistic risk analysis: Foundations and methods. United Kingdom: Cambridge University Press.
- Berthoz N, Bourgeois E, Branque D, *et al.* 2022. Impact du creusement au tunnelier sur un pieu : synthèse de l'exercice de prévision TULIP. *Rev Fr Geotech* 173(2): 1–16.
- Beth M, Dupont M, De Gaullier E, Bertrand B, Gehu G, Camafort M. 2021. Projet EOLE : auscultation et méthode observationnelle lors de l'excavation de la station Porte Maillot. Paris (France) : The 16th International Congress of the French Tunnelling and Underground Space Association.
- Cao ZJ, Wang Y, Li DQ. 2017. Probabilistic approaches for geotechnical site characterization and slope stability analysis. Zhejiang University Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- CEN . 2002. EN 1990-Basis of structural design. Brussels: European committee for standardization.
- CEN . 2004. EN 1997-1-Geotechnical design: General rules. Brussels: European committee for standardization.
- Colosimo BM, Del Castillo E. 2007. Bayesian process monitoring, control and optimization. Chapman & Hall/CRC.
- Commend S, Wattel S, Hennebert J, Kuonen P, Vulliet L. 2019. Prediction of unsupported excavations behavior with machine learning techniques. Proceedings of XIV International Conference on Computational Plasticity, Fundamentals and Application (COMPLAS 2019), pp. 529–535.
- De Rocquigny E, Devictor N, Tarantola S. 2008. Uncertainty in industrial practice a guide to quantitative uncertainty management. John Wiley & Sons.
- Duncan JM, Chang CY. 1970. Nonlinear analysis of stress and strain in soil. *J Soil Mech Found Div (ASCE)* 96: 1629–1693.
- Feng XD, Jimenez R, Zeng P, Senent S. 2019. Prediction of time-dependent tunnel convergence using a Bayesian updating approach. *Tunn Undergr Space Technol* 94: 103118.
- Finno RJ, Calvello M. 2005. Supported excavations: Observational method and inverse modeling. *ASCE-J Geotech Geoenviron Eng* 131(7): 826–836.
- Hejazi Y, Dias D, Kastner R. 2008. Impact of constitutive models on the numerical analysis of underground constructions. *Acta Geotech* 3: 251–258.

- Hsiao ECL, Schuster M, Juang CH, Kung GTC. 2008. Reliability analysis and updating of excavation-induced ground settlement for building serviceability assessment. *ASCE-J Geotech Geoenviron Eng* 134(10): 1448–1458.
- Griffiths DV, Fenton GA. 2007. Probabilistic methods in geotechnical engineering. Springer.
- Jong SC, Ong DEL, Oh E. 2021. State-of-the-art review of geotechnical-driven artificial intelligence techniques in underground soil-structure interaction. *Tunn Undergr Space Technol* 113: 103946.
- Joshi AV. 2020. Machine learning and artificial intelligence. Springer Nature Switzerland.
- Lacasse S, Nadim F. 2007. Probabilistic geotechnical analyses for offshore facilities. *Georisk: Assessment and management of risk for engineering systems and geohazards* 1(1): 21–42.
- Lees A. 2016. Geotechnical finite element analysis – a practical guide. ICE Publishing.
- Li ZB, Gong WP, Li TZ, Juang CH, Chen J, Wang L. 2021. Probabilistic back analysis for improved reliability of geotechnical predictions considering parameters uncertainty, model bias, and observation error. *Tunn Undergr Space Technol* 115: 104051.
- Low BK. 2014. FORM, SORM, and spatial modelling in geotechnical engineering. *Struct Saf* 49: 56–64.
- Marelli S, Sudret B. 2014. UQLab: A framework for uncertainty quantification in MATLAB. In : *The 2nd International Conference on Vulnerability and Risk Analysis and Management (ICVRAM 2014)*, pp. 2554–2563. United Kingdom: University of Liverpool.
- Minini J, Zhang Y, Gros Lambert M, Commend S. 2023. Finite element-based probabilistic framework including Bayesian inference for predicting displacements due to tunnel excavation. *Comput Geotech* 162: 105604. DOI: [10.1016/j.compgeo.2023.105604](https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105604).
- Minini J, Commend S. 2023. Prediction of diaphragm wall displacement using Bayesian model calibration. Dublin (Ireland) : The 14th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering.
- Mohamad W, Bourgeois E, Le Kouby A, *et al.* 2022. Full scale study of pile response to EPBS tunnelling on a Grand Paris Express site. *Tunn Undergr Space Technol* 124. DOI: [10.1016/j.tust.2022.104492](https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104492).
- Peck RB. 2001. The observational method can be simple. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. *Geotech Eng* 149(2): 71–74.
- Phoon KK, Retief JV. 2016. Reliability of geotechnical structures in ISO2394. CRC Press.
- Phoon KK, Zhang W. 2023. Future of machine learning in geotechnics. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards* 17(1): 7–22. DOI: [10.1080/17499518.2022.2087884](https://doi.org/10.1080/17499518.2022.2087884).
- Potts DM, Zdravkovic L. 1999. Finite element analysis in geotechnical engineering: Theory. London: Thomas Telford.
- Potts DM, Zdravkovic L. 2001. Finite element analysis in geotechnical engineering: Application. London: Thomas Telford.
- Powderham A, O'Brien A. 2020. The Observational Method in Civil Engineering – Minimising Risk, Maximising Value. London: CRC Press.
- Schanz T, Vermeer PA, Bonnier PG. 1999. The hardening soil model: Formulation and verification, Beyond 2000 in Computational Geotechnics. Rotterdam: Balkema.
- Schöbi R, Marelli S, Sudret B. 2021. UQLab user manual – Polynomial chaos Kriging, Report # UQLab-V1.4-109, Chair of Risk, Safety and Uncertainty Quantification. Switzerland: ETH Zurich.
- Sousa RL, Einstein HH. 2012. Risk analysis during tunnel construction using Bayesian Networks: Porto Metro case study. *Tunn Undergr Space Technol* 27: 86–100.
- Sudret B. 2019. Surrogate modelling meets machine learning. Proc. 3rd Int. Conf. Uncertainty Quantification in Computational Sciences and Engineering (UNCECOMP). Crete Island (Greece), June 25th. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000359596>.
- Spross J, Johansson F. 2017. When is the observational method in geotechnical engineering favourable? *Struct Saf* 66: 17–26.
- Straub D, Papaioannou I. 2015. Bayesian analysis for learning and updating geotechnical parameters and models with measurements. In : Phoon KK & Ching J, eds. *Risk and reliability in geotechnical engineering*. Taylor and Francis.
- Terzaghi K, Peck RB, Mesri G. 1996. Soil mechanics in engineering practice (3rd edition). New York: John Wiley & Sons.
- Theodoridis S. 2020. Machine Learning: A Bayesian and Optimization Perspective (2nd edition). Elsevier Academic Press.
- Wagner P-R., Nagel J, Marelli S, Sudret B. 2021. UQLab user manual – Bayesian inference for model calibration and inverse problems, Report # UQLab-V1.4-113, Chair of Risk, Safety and Uncertainty Quantification. Switzerland: ETH Zurich.
- Wang Y, Cao ZJ, Li DQ. 2016. Bayesian perspective on geotechnical variability and site characterization. *J Eng Geol* 203: 117–125.
- Wood M. 1975. The circular tunnel in elastic ground. *Geotech* 25(1): 115–127.
- Wu TH. 2011. 2008 Peck Lecture: The Observational Method: Case History and Models. *ASCE-J Geotech Geoenviron Eng* 137(10): 862–873.
- Yeow HC, Nicholson D, Man CL, Ringer A, Glass P, Black M. 2014. Application of observational method at Crossrail Tottenham Court Road station UK. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. *Geotech Eng* 167(2): 182–193.
- Zhang J, Zhang LM, Tang WH. 2009. Bayesian framework for characterizing geotechnical model uncertainty. *ASCE-J Geotech Geoenviron Eng* 135(7): 932–940.
- Zhang QL., Hu WF, Liu ZY, Tang JR. 2020. TBM performance prediction with Bayesian optimization and automated machine learning. *Tunn Undergr Space Technol* 103: 103493.
- Zhang Y, Toutlemonde F. 2018. Calcul des coefficients partiels selon l'objectif de fiabilité attendu pour l'ouvrage. *Bulletin Ouvrages d'Art – CEREMA* 74: 36–59.
- Zhang Y, Commend S. 2021. Calculs probabilistes des déplacements dus à la réalisation de tunnels à l'aide d'un modèle aux éléments finis. *Rev Fr Geotech* 167(5): 1–15. DOI: [10.1051/geotech/2021018](https://doi.org/10.1051/geotech/2021018).
- Zhang Y, Commend S, Gros Lambert M. 2022. Analyses et modélisations sur les argiles plastiques du Sparnacien du Bassin parisien. *Rev Fr Geotech* 171(3): 1–30. DOI: [10.1051/geotech/2022003](https://doi.org/10.1051/geotech/2022003).
- Zhang Y, Toutlemonde F. 2022. Calibrating partial safety factors in line with required reliability levels for concrete structures. *Eur J Environ Civ Eng* 26(9): 3863–3879. DOI: [10.1080/19648189.2020.1824820](https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1824820).
- Zhang Y, Commend S. 2022. Experimental study and numerical simulation of Paris plastic clay. Copenhagen (Denmark) : The world tunnel congress WTC 2022.
- Zhang Y, Hamet P. 2022. Ligne 16-1 du Grand Paris Express : retours d'expérience sur le management des risques techniques. *Tunnels et espace souterrain* 281: 70–92.
- Zhang Y, Commend S, Jacot-Descombes G, Hamet P. 2023. Approche probabiliste et méthode observationnelle – application à l'interaction

- entre tunnelier et pieux dans le cas du projet L16-1. Paris (France) : The 17th International Congress of the French Tunnelling and Underground Space Association.
- Zhang Y. 2023. Application of risk management plan to technical risks in metro construction: Case study of the Grand Paris Express project. *Tunn Undergr Space Technol* 147: 105716. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105716>.
- Zienkiewicz OC, Zhu JZ. 1992. The superconvergent patch recovery and *a posteriori* error estimates. Part 1: The recovery technique. *Int J Numer Methods Eng* 33(7): 1331–1364.
- ZSoil (User manual ZSoil.PC) . 2020. Soil, Rock and Structural Mechanics in dry or partially saturated media. Lausanne (Switzerland) : ZACE Services Ltd, Software Engineering.

Citation de l'article : Yi Zhang, Stéphane Commend, Gil Jacot-Descombes. Analyse probabiliste, inférence bayésienne et méthode observationnelle : application au tassement dû au passage d'un tunnelier. Rev. Fr. Geotech. 2024, 179, 4