ANNEXE 1 : PRESENTATION DU PROJET

Développement de méthode de reconnaissance géophysique pour la caractérisation des paramètres géotechniques : application aux aménagements en zones urbaines et péri-urbaines de la Polynésie Française.

Fayçal Rejiba – Professeur des universités – Université de Rouen Normandie, UMR 6143 M2C, 78721 Mont Saint Aignan, France.

Christophe Boulay – Gérant TP Conseil BP140681 98701 ARUE TAHITI

Romain Biennais – étudiant ENSG (soutenance de stage de fin d'étude en septembre 2021).

***Durée :** 2 years*

Mots-clefs: géophysique de la proche surface, géotechnique, pénétromètre dynamique, contexte polynésien, aménagement éco-responsable du territoire.

Contexte général, justifications techniques et scientifiques

Dans le cadre de la conception des aménagements en zones urbaines et péri urbaines (résidences, routes, ouvrages d'art, ouvrages de soutènements…), la caractérisation géotechnique des terrains superficielles constitue une première étape préalable indispensable à la définition des spécifications techniques de l'ensemble des aménagements et réaménagements en génie civil au sens large en zones urbaines et périurbaines.

Les essais géotechniques usuels sont séparés en deux grandes classes : les essais de caractérisation en laboratoire et ceux effectués in situ. L'ensemble de ces essais visent à quantifier les principaux paramètres mécaniques et pétrophysiques des sols (portance, densité, teneur en eau, teneur en fines, module d'élasticité, module de cisaillement…).

Pour l'ensemble des essais en laboratoire, il est nécessaire de prélever des échantillons préservés à l'endroit des futures fondations. Ces prélèvements de sol « préservé » sont effectués sous la forme de "carottes géotechniques" ; leur recueillement constitue une étape cruciale, extrêmement chronophage, et particulièrement couteuses. Il n'existe objectivement pas d'alternative à ces prélèvements systématiques et réguliers sur les sites concernés, sachant que quel que soit la quantité de forages, il n'est pas possible de spatialiser l'information géotechnique de manière continue : entre les forages l'incertitude est permanente quant à la caractéristique mécanique du sous-sol. Cette incertitude est à l'origine des principaux désordres rencontrés à postériori, une fois l'ouvrage construit.

Afin de compléter l'information géotechnique directement obtenue par les essais en laboratoire sur les carottes prélevées, des essais in situ sont effectués en complément. Parmi ceux-ci, l'essai au pénétromètre dynamique (DCP – Dynamic Cone Penetrometer) constitue un des principaux essais standardisés couramment utilisé pour la mesure sur un échantillon préservé. Il s'agit de la portance des sols (permettant de dimensionner les fondations) calculée empiriquement à partir de la mesure de la résistance de pointe fournie par l'essai DCP.

En pratique, l'essai DCP consiste à appliquer une force standardisée (à l'aide d'une masse guide par une tige pose sur le sol). Cet essai très ponctuel, et très sensible aux hétérogénéités locales, est néanmoins beaucoup plus rapide et facile à mettre en œuvre sur les premiers mètres.

Dans le cadre de ce projet, un des objectifs visera à proposer une démarche scientifique permettant de limiter significativement la nécessité de faire des forages pour caractériser le sous-sol. Pour cela, on se

propose dans le cadre de ce projet de poursuivre le développement d'une stratégie de reconnaissance géophysique des sols basée sur les méthodes électriques à courant continu, et sur les méthodes sismiques de type réfraction et par analyse des ondes de surface. Ces méthodes géophysiques sont éprouvées, et permettent d'estimer certains paramètres physiques du sous-sol (résistivité électrique, vitesse de propagation des ondes de compression et de cisaillement), paramètres particulièrement bien corrélés avec les paramètres géotechniques d'intérêts (portance, teneur en eau, densité), et ce, à des échelles spatiales proches de ce qui est requis pour le dimensionnement des ouvrages (*e.g.* Cosenza *et al.*, 2006; Bitri *et al.* 2013; Abidin *et al.*, 2014; Kowalczyk *et al.*, 2014).

Ce projet s'appuiera sur les résultats récents (Rejiba *et al.*, 2019) obtenus sur ancienne base de l'OTAN à Grostenquin (Moselle, France) dans le cadre d'une collaboration avec l'Université de Dayton Research Institute (UDRI) et l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussée (Institut Navier). Cette étude a permis d'illustrer en pratique, dans un contexte géologique d'altération sédimentaire, le lien qualitatif et quantitatif entre des données issus de prospection géophysique (méthode électrique et électromagnétique) et des mesures de résistance de pointe issus de l'essai DCP.

Le contexte géologique des formations superficielles en Polynésie Française consiste essentiellement en des formations d'altération issu de roche volcanique, mais aussi de remblais de remplissage, que ce soit en zones urbaines ou péri-urbaines. L'analogie avec les contextes d'altération issus des travaux précédents est suffisamment marquée pour envisager efficacement l'application des méthodes géophysiques pressenties.

Cette analogie vis-à-vis de la mise en œuvre et des réponses du sous-sol aux méthodes géophysiques envisagées a pu être observée courant aout 2020 dans le cadre d'un contrat d'étude scientifique avec l'entreprise TP Conseils concernant une étude hydrogéophysique (i.e. caractérisation hydrogéologique à l'aide de l'imagerie géophysique) sur le bassin versant de Temae (commune de Teavaro et commune de Moorea-Maiao). Cette étude a permis d'identifier de futurs emplacements potentiels pour l'implantation de forages d'exploitation d'eau potable. Le laboratoire M2C ayant été chargé de mettre en œuvre la stratégie de prospection géophysique sur les sites d'études (sur, et à proximité du Moorea Green Pearl Golf).

Le bureau d'étude TP Conseils dispose de l'expertise géotechnique pour la caractérisation géotechnique du sous-sol pour l'ensemble des applications BTP envisagées associés aux constructions, aménagements ou réaménagements en contexte urbain et péri-urbain. TP Conseils dispose également d'une certaine expérience en prospection géophysique appliquée à la géotechnique, en particulier pour la mise en œuvre de sismique réfraction. Depuis la dernière collaboration (2020) avec le laboratoire M2C, les échanges se sont intensifiés pour établir une méthodologie pratique et théorique permettant de quantifier le lien entre mesures géophysiques et géotechniques sur les premiers mètres de profondeur et à l'échelle des zones d'études. Il s'agit d'un sujet extrêmement porteur que ce soit dans une perspective scientifique pour le laboratoire et technico-économique pour l'entreprise.

Pour le laboratoire M2C, l'intérêt scientifique consiste naturellement à l'accès sur un territoire emblématique, urbanisé, à un nombre considérable de mesures géotechniques ayant été associées à des mesures géophysiques acquises suivant un protocole respectant les codes des bonnes pratiques de prospection tels que décrit dans le guide de l'AGAP (https://www.agapqualite.org/le-code-de-bonne-pratique/). Actuellement, en France il n'existe pas de norme standardisant la pratique de la prospection géophysique. Les prémices d'une normalisation viennent à peine de commencer dans le cadre de l'eurocode 8 qui précise les normes pour le domaine du BTP pour lesquelles le contrôle non destructif est parfois utilisé. En particulier, les données géophysiques et géotechniques déjà acquises ou à acquérir

sur de nombreux sites issus des activités contractuelles de TP Conseils, seront utilisées pour le développement d'algorithmes de traitement et d'analyse innovants, en particulier dans le cadre des méthodes associées à l'intelligence artificielle et aux techniques d'apprentissage (Machine Learning, Deep Learning...), qu'elles soient supervisées ou non supervisées.

Pour le bureau d'étude TP Conseils, cette collaboration permettra de conforter sa position dans le domaine de la géologie et de la géotechnique en proposant des méthodes d'investigations du sous-sol écoresponsables s'appuyant sur la complémentarité entre les indispensables observations directes par forages et les méthodes de reconnaissance géophysique. Il est important de rappeler ici que TP Conseils est d'ores et déjà engagé dans une démarche écoresponsable qui lui a valu d'être choisi comme BET agréé par la Direction de l'environnement mais aussi comme Expert Assermenté auprès du ministère de la Justice du Grand-Duché du Luxembourg.

Depuis la dernière collaboration avec le laboratoire M2C, TP Conseils met déjà en œuvre des investigations géophysiques qui ont permis entre autres d'élargir ses domaines d'intervention habituelles, en particulier concernant la cartographie des zones de vulnérabilité que ce soit à l'infiltration (à proximité par exemple des zones de décharges non constructibles) mais aussi à la vulnérabilité au mouvement/glissement de terrain. Ces nouvelles données (géophysiques) acquises par TP Conseils permettent également à l'entreprise d'avoir une interprétation plus rationnelle des conditions de terrassements. De plus, l'ensemble des données géophysiques récoltées et interprétées scientifiquement dans le cadre de cette collaboration entre TP Conseils et le laboratoire M2C de l'université de Rouen Normandie pourront permettre d'optimiser la définition des spécifications de conception des ouvrages à fondations superficielles, ce qui constitue un apport très appréciable pour l'activité essentielle de l'entreprise.

Dans un cadre plus large concernant l'intérêt pour le territoire Polynésien, il est important de noter que la caractérisation des sols en Polynésie, qui date de 1985 (Brousse, et al., 1985), pourra être significativement complétées et affinée. Cet aspect offrira une opportunité pour mieux comprendre l'évolution des sols en milieu tropical, ce qui constitue l'une des principales problématiques en sciences du sols (pédologie) mais aussi en agronomie.

Enfin en termes d'emploi un tel projet conduira très probablement non seulement à la création d'un ou deux emplois pérennes en Polynésie (opérateur, technicien) voire d'un ingénieur.

Résultats antérieurs

Ce projet s'appuie sur les résultats obtenus dans le cadre de travaux récents menés par le laboratoire M2C de l'université de Rouen Normandie en collaboration d'une part avec l'Université de Dayton Research Institute (Ohio, Etats Unis), Sorbonne Université (Paris, France), l'Institut Navier de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussée (Marne la Vallée, France), et du CEREMA Normandie Centre (Rouen, France) dans le cadre du projet Odyssey, et d'autre part, avec TP Conseils dans le cadre du « Hydrogéophysique sur le Bassin versant de Temae ».

Dans le cadre du projet Odyssey (2018-2024) - https://m2c.cnrs.fr/recherche/projets-de-recherche/odyssey-and-more-2018-2022/ , des premières mesures couplées géophysiques-géotechniques ont été acquises sur un site d'étude localisé à Grostenquin (Moselle, France) et ont permis d'établir un premier lien formel entre des mesures au pénétromètres dynamiques et une série de mesures géophysiques à l'échelle d'une parcelle (Figure 1). Sur cette parcelle, où une fosse pédologique a pu être effectuée pour disposer d'une information directe sur les sols en place (Figure 2). L'un des principaux résultats (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) illustrent les correspondances entre les

points d'inflexions pointés sur les courbes de variation de l'indice CBR (California Bearing Ration) et les position des interfaces issues de l'inversion d'un sondage électrique à la même position.

Figure 1 : localisation du site de Grostenquin (Moselle). A droite les marques jaunes indiquent la position de la parcelle d'étude.

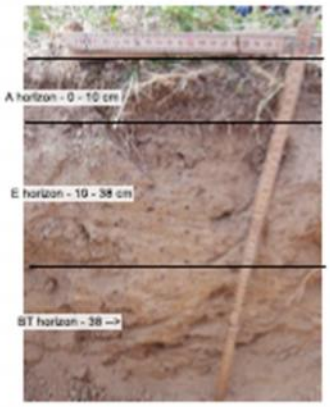

Figure 2 : description des sols dans une fosse localisée sur la parcelle d'étude.

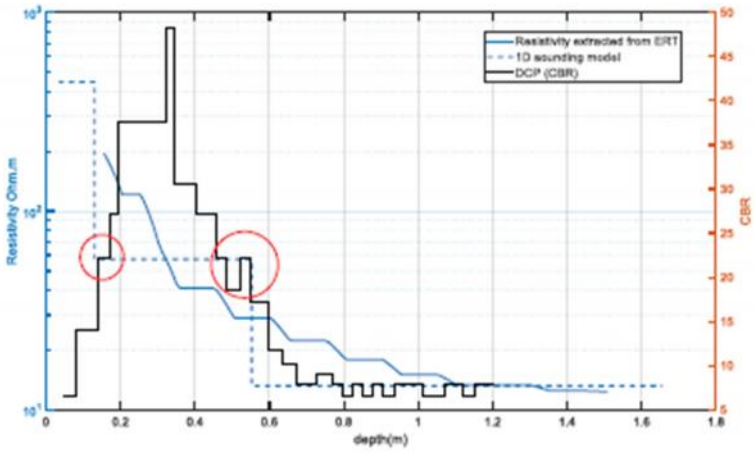

Figure 3: superposition des résultats de sondages électriques, tomographie électrique (à l'aplomb du sondage) et DCP (indice CBR) sur le site d'étude à Grostenquin.

4

Dans le cadre du contrat d'étude scientifique effectué en collaboration avec TP Conseils sur le bassin versant de Temae (Mooréa), l'objectif consiste à localiser les formations superficielles permettant l'extraction de nouvelles ressources en eau. Durant cette campagne, un certain nombre de méthodes géophysiques (géoradar, électrique en courant continu, électromagnétique dans le domaine temporel) ont été déployées sur le bassin versant afin d'étudier la structuration des formations volcaniques et leur possible influence sur la circulation des eaux souterraines, et la géométrie des réservoirs afin d'affiner la définition des sites favorables et des ouvrages adaptés à l'extraction des eaux souterraines sur le bassin versant.

Les sites d'études sont illustrés (Figure 4) indique une partie des positions des profils électriques effectués sur la zone d'étude (golf de Moorea). A titre d'exemple, le profil de tomographie électrique P2 (Figure 5) montre la distribution de résistivité électrique inversée du sous-sol sur une profondeur d'environ 20m. Sur ce profil une zone de suintement (entre les abscisses 120m et 140m) correspond en surface à des matériaux conducteurs, inférieurs à 15 Ω.m, d'épaisseur d'environ 2 mètres. À l'abscisse 60 m, une petite zone humide apparait avec les mêmes caractéristiques. Ces matériaux conducteurs reposent sur des zones résistantes (supérieures à 100 Ω.m). Étant donné la distribution spatiale des résistivités électriques, les matériaux résistants (électriquement) pourraient donc soit, jouer le rôle d'un aquitard imperméable pour des arrivées d'eau latérales, soit constituer eux même une source d'alimentation.

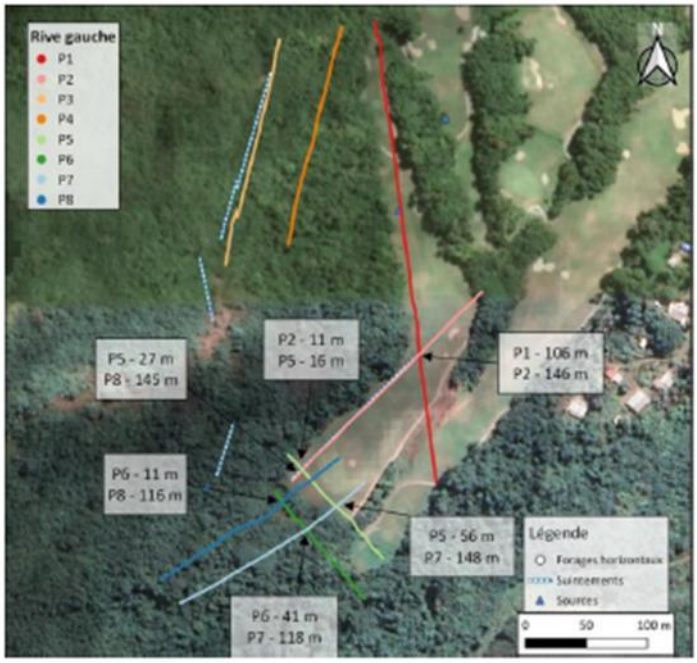

Figure 4 : Localisation des profils de tomographie électrique P1 à P8 (secteur golf de Moorea).

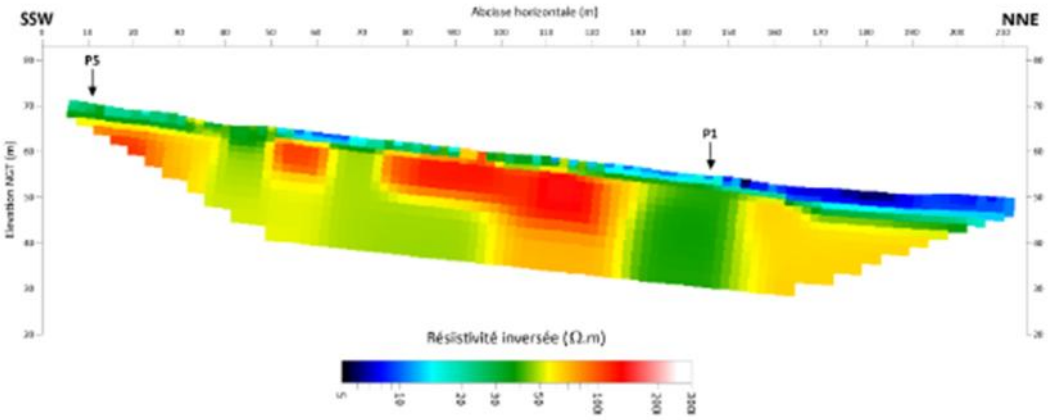

Figure 5 : Profil de résistivité inversée P2.

Conclusion

Ce projet a pour objectif scientifique de permettre l'amélioration de l'évaluation quantitative du lien entre données géophysiques et géotechniques afin de limiter la quantité de forages carottés pour la caractérisation géotechnique du sous-sol. Ce projet s'intègre par ailleurs dans le cadre d'un projet scientifique international sur lequel le laboratoire M2C de l'université de Rouen Normandie est pilote. La plus-value scientifique est essentiellement mais pas exclusivement associé à l'accès à des données géophysiques et géotechniques représentatives d'un contexte réel et en quantité suffisante pour envisager les analyses basées sur des algorithmes d'intelligence artificielle.

Le bureau d'étude TP Conseils a déjà collaboré avec succès avec le laboratoire M2C sur la Polynésie il y a moins d'un an pour des problématiques hydrogéophysiques concernant la caractérisation des ressources en eau. Il s'agit dans le cadre de ce projet de développer une activité R&D en géophysique environnementale pérenne qui constituerait une plus-value significative pour le développement de son activité. En plus d'une augmentation prévue des recrutements au sein de l'entreprise, ces travaux sur le territoire polynésiens permettraient non seulement de permettre à l'entreprise de renforcer son activité vis-à-vis du risque anthropique lié à l'aménagement en zone urbaine d'un territoire extrêmement sensible aux effets du changement climatique.

Programme de travail de l'ingénieur recruté

Le candidat retenu aura participé à l'ensemble des acquisition géotechniques et géophysiques, sur l'ensemble des sites d'études de l'entreprise TP Conseils.

Les deux principales taches de l'ingénieur recruté seront :

1- De concevoir et structurer de manière optimale la base de données destinée à héberger l'intégralité des données (qu'il aura participer à acquérir) pour chaque site d'étude : ce qui inclue les données géophysiques, géotechniques, et géologiques ainsi les métadonnées (positionnement, archives photos).
2- De participer au développement des algorithmes d'analyse statistique et stochastiques du lien entre mesurables géophysiques et géotechniques à l'aide mes méthodes d'apprentissage (Machine Learning, Deep Learning)

Principaux participants au projet

Name	Affiliation Title	expertise
Fayçal Rejiba	§ Professeur des universités - *Normandie Rouen Université, M2C Lab., Rouen (France)*	Géophysique
Christophe Boulay	$ Gérant de TP Conseils (Polynésie Française)	Géologie/Géotechniques
Romain Biennais	µ Ingénieur junior (*Ecole Nationale de Géologie de Nancy – diplômé en sep 2021)*	Geosciences

References

Abidin M.H.Z., Saad R., Ahmad F., Wijeyesekera D.C., and Baharuddin M.F.T. 2014. Correlation Analysis Between Field Electrical Resistivity Value (ERV) and Basic Geotechnical Properties (BGP), *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 51(3), 117-125, https://doi.org/10.1007/s11204-014-9264-x.

Bitri, A., Samyn, K., Brulé, S., and Javelaud, E. H. 2013. Assessment of ground compaction using multi-channel analysis of surface wave data and cone penetration tests. *Near Surface Geophysics*, 11(6), 683-690, https://doi.org/10.3997/1873-0604.2013037.

Brousse R., Boutault G., Eisenstein A., Gelugne P., 1985. Carte géologique, carte des formations de surface (échelles 1125000ème), carte des instabilités et des risques naturels (échelle 1150000ème), de l'île de Tahiti ; Feuille Papeete. Ministère de l'équipement, de l'Aménagement, de l'Energie et des Mines. Papeete. Notice, 46 p.

Cosenza P., Marmet E., Rejiba F., Cui Y.J., Tabbagh A., and Charlery Y. 2006. Correlations between geotechnical and electrical data: A case study at Garchy in France, *Journal of Applied Geophysics*, 60(3-4), 165-178, ISSN 0926-9851.

Glover, P. W. J. 2015. Geophysical properties of the near surface Earth: Electrical properties.

Kowalczyk S., Maślakowski M., and Tucholka P. 2014. Determination of the correlation between the electrical resistivity of non-cohesive soils and the degree of compaction, *Journal of Applied Geophysics*, 110, 43-50, https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.08.016.

Rejiba F., Schamper C., Bodet L., Fleitz P., Ceranski A., Fraga LH., Finco C., Levaillant R. 2019. Relation between dcp data and geophysical measurements on unimproved landing zones. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Portland (Oregon), 17-21 march.