



HAL
open science

Intégration des méthodes géophysiques et géotechniques marines pour la définition du modèle géologique d'un site complexe – projet Haliotis II, Nice

Arian Cipa, Camille de la Taille, Thomas Portenart

► To cite this version:

Arian Cipa, Camille de la Taille, Thomas Portenart. Intégration des méthodes géophysiques et géotechniques marines pour la définition du modèle géologique d'un site complexe – projet Haliotis II, Nice. Rencontres de l'Ingénierie Maritime 2024, Builders École d'ingénieurs, Jun 2024, Caen, France. hal-04710851

HAL Id: hal-04710851

<https://hal.science/hal-04710851v1>

Submitted on 26 Sep 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Intégration des méthodes géophysiques et géotechniques marines pour la définition du modèle géologique d'un site complexe – projet Haliotis II, Nice (France)

Integrated marine geophysical and geotechnical investigations for the purposes of a complex site characterization – Haliotis II Project , Nice (France)

CIPA Arian^{a*}, DE LA TAILLE Camille^a and PORTENART Thomas^a

^a*GEOTEC - Service Maritime, 50 rue Pierre Curie, 78370 Plaisir, France;*

*Arian Cipa, arian.cipa@geotec.fr, GEOTEC - Service Maritime, 50 rue Pierre Curie, 78370 Plaisir, France

Intégration des méthodes géophysiques et géotechniques marines pour la définition du modèle géologique d'un site complexe – projet Haliotis II, Nice

Résumé

Cette étude concerne les investigations géophysiques et géotechniques maritimes réalisées par GEOTEC dans le cadre du projet de conception-réalisation-exploitation du nouveau complexe HALIOTIS II à Nice. Ces campagnes ont contribué à la connaissance géologique de la partie maritime du site, dans une zone où les informations géologiques à l'échelle du projet étaient absentes. La zone d'étude est principalement constituée par d'épaisses séquences de sédiments marins, estuariens et deltaïques de l'embouchure du Var recouvrant un gravier fluvial basal du Pléistocène. La méthode de la sismique-réflexion multitrace a servi de base à l'interprétation structurale et stratigraphique, complétée par les données de la sismique monotrace et la UMASW pour les vitesses de cisaillement V_s . La correspondance avec les horizons géologiques définis dans la partie terrestre a été réalisée par des profils prolongés dans la partie maritime. L'ensemble des informations obtenues a été intégré dans un modèle géologique 3D. Il a mis en évidence un empilement sédimentaire monoclinale des alluvions quaternaires légèrement penté vers le SSE érodé postérieurement. La méthode UMASW a mis en évidence des vitesses de cisaillement supérieures à 330m/s pour les horizons profonds et des vitesses entre 220 m/s et 80 m/s pour les remblais et les dépôts alluvionnaires.

Abstract

This paper describes marine geophysical and geotechnical surveys carried out by GEOTEC as part of the design-construction-exploitation of the new wastewater treatment plant HALIOTIS II site in Nice. These surveys contributed to the geological characterization of the marine part of this site where geological data were almost completely absent. The study area consists of a thick sequence of marine, estuarine and deltaic sediments of the Var River mouth overlying a basal Pleistocene fluvial gravel. Structural and stratigraphic interpretation is based on multichannel seismic-reflection data completed by single-channel data and UMASW data for shear velocities V_s . Extended terrestrial/marine geological cross-sections were constructed to establish correspondence with already defined

geological horizons. The collected multisource data were integrated into a 3D geological model which highlighted an eroded monocline sedimentary pile of Quaternary alluvial deposits slightly dipping to the SSE. UMASW data revealed shear velocities greater than 330m/s for deepest horizons and between 220 m/s and 80 m/s for uppermost debris flows and alluvial deposits.

Mots-clés : sismique ; géotechnique ; Var ; glissements sous-marins ; liquéfaction ; modélisation géologique 3D

Keywords: seismics; geotechnical investigations; Var River ; submarine landslides ; liquefaction ; 3D geological modelling

Introduction

La station d'épuration HALIOTIS a été mise en service en phases successives de 1970 à 1988. Elle a été construite sur le terre-plein de Ferber qui avait été gagné sur la mer par remblaiement progressif pendant 25 ans (fig. 1). La plateforme est protégée par une digue composée d'un noyau filtrant en matériau tout-venant avec une carapace et une prédalle en blocs d'enrochements de 5 à 20 tonnes.

Le projet HALIOTIS II prévoit une mise en œuvre de nouvelles installations de traitement qui seront effectués sur le site actuel de la station d'épuration. L'ouvrage concerné par le Plan de Prévention des Risques Sismiques de la ville de Nice se situe en zone B1 et B2. L'analyse des risques de liquéfaction est nécessaire pour toutes les catégories d'importance des ouvrages et doit être étendue pour toutes les phases de travaux et d'exploitation.

La zone d'étude est soumise à des conditions d'accès particulières imposées par la DGAC et la Préfecture Maritime. Une des contraintes majeures imposée par la DGAC est le tirant d'air maximal autorisé de 8m : cône d'envol de l'aéroport de Nice. La limite de tirant d'air ne permet pas d'utiliser sur les différents secteurs, ni un navire de forage géotechnique offshore, ni une plateforme géotechnique jack-up, ni une plateforme

flottante avec pieux ce qui réduit le champ des investigations à l'emploi de navires adaptés à celles des méthodes géophysiques (sismiques) ou géotechniques sous-marines.

Dans le cadre du projet de conception-réalisation-exploitation du nouveau complexe HALIOTIS II à Nice mené par le groupement d'entreprises pour le compte du maître d'ouvrage Eau d'Azur, GEOTEC a réalisé les investigations géophysiques et géotechniques maritimes suivantes :

- un levé bathymétrique à l'échosondeur multifaisceaux (MBES), pour analyse l'état actuel du site;
- une imagerie au sonar à balayage latéral (SSS) pour valider l'implantation des profils UMASW;
- une acquisition en sismique réflexion monotrace (SCS);
- une acquisition en sismique réflexion multitrace (MCS);
- une acquisition multicanal des ondes de surface (UMASW);
- une campagne de reconnaissance géotechnique sous-marine par CPT et Vibrocore;

Le but de ces investigations était de :

- caractériser les propriétés physiques et mécaniques des matériaux anciennement mis en remblai sur le substratum et les faciès en place sur la base des nouvelles données disponibles.
- qualifier les horizons identifiés par les caractéristiques des vitesses sismiques.
- réaliser une synthèse des résultats de l'ensemble des méthodes d'investigation et rendre cohérente la continuité des horizons entre les parties terrestre et maritime.

CONTEXTE DU SITE

Bathymétrie

La zone d'étude s'étend de la côte jusqu'à une distance de 300-400 m au large couvrant une superficie d'environ 0,34 km² à l'intérieur de la zone d'étude, la bathymétrie varie entre -0 et -142 m NGF (fig. 2). Les fonds présentent une très grande variabilité et une morphologie très complexe induite par les canyons sous-marins démarrant très près de la côte sur ce secteur et aux remblais historiques.

CONTEXTE GEOLOGIQUE

Le projet est situé dans le bassin versant de la Basse Vallée et dans l'embouchure du Var. L'embouchure du Var présente d'épaisses séquences de sédiments holocènes marins, estuariens, deltaïques et de chenaux fluviaux qui recouvrent le gravier fluvial basal du Pléistocène (fig. 3).

A la fin du Miocène, suite à des événements géodynamiques importants, la mer Méditerranée est séparée de l'Atlantique, subissant une très forte perte du niveau marin et se transforme en bassin fermé à forte évaporation ce qui, a changé profondément les conditions de sédimentation et créé des circonstances favorables aux dépôts d'évaporites (Dubar, 2012). Durant cette période, par réajustement des profils, les basses vallées des fleuves sont le siège d'une érosion linéaire intense et sont fortement incisées (fig. 4).

Au début du Pliocène, vers 5,3 Ma, les basses vallées incisées de Provence orientale et de Ligurie sont envahies par la mer et transformées en rias. La ria du Var fonctionne par remblaiement deltaïque (Dubar, 1987). Le dispositif général pliocène est fondamentalement marqué par l'emboîtement des dépôts dans l'incision messinienne préexistante. Le matériel alluvial y est puissamment étalé, pentu et lité, constituant « le poudingue du Var » (Dubar, 2012).

Au Pléistocène, on assiste à un ralentissement de la sédimentation. Les processus érosifs dominant et ravinent le paysage deltaïque antérieur. L'accumulation sédimentaire dans le lit des anciennes vallées sous-marines peut être affectée de glissements en masse occasionnels. Ces glissements ravinent la base des pentes, ce qui favorise les éboulements latéraux.

Le front du delta est affecté par des phénomènes de glissements de grande ampleur : slumps, courants turbidites, avalanches accélérant l'évacuation de matériel vers le bassin (Cochonat et al., 1993 ; Dan, 2007).

L'élévation du niveau de la mer à l'Holocène a conduit au stockage de sédiments à grains fins dans les environnements marins peu profonds, estuariens et deltaïques de la zone côtière actuelle (Piper & Savoye 1993; Savoye et al. 1993; Savoye & Piper, 1993).

Les terrains attendus selon les études du groupement sont :

(1) Remblais

- Horizon H1 : remblais du terre-plein de la STEP actuelle. Ils sont présents sur 10 à 45 m d'épaisseur avec des hauteurs importantes dans l'axe d'un ancien talweg situé en partie centrale du site.

(2) Dépôts quaternaires

Ils peuvent atteindre une épaisseur de 60 à 80 m en bordure du plateau continental. On distingue au droit du site :

- Horizon H2 : Alluvions sablo-silteuses ou limoneuses. Ce sont essentiellement des sables limoneux bruns à grisâtre avec des proportions variables de particules argileuses et sableuses. Trois niveaux ont été distingués au sein de cet horizon :

- Alluvions (H2a) : dépôts de sables fins à moyens,
- Alluvions (H2b) : dépôts de sables fins à limoneux dont l'épaisseur augmente vers la mer (côté Est),
- Alluvions (H2c) : dépôts de sables denses grossiers parfois graveleux.
- Horizon H3 : Alluvions sablo-graveleuses à galets. Ils sont présents sur l'ensemble du site et l'épaisseur varie entre 15 et 50 m.

(3) Substratum pliocène

Le substratum n'a pas été reconnu lors des campagnes d'investigation précédentes.

Données acquises

Sismique réflexion monotrace

La sismique monotrace réalisée, avec l'utilisation d'un boomer comme source (source électrodynamique basée sur le principe d'une action alternative d'un électroaimant sur deux plaques métalliques) a consisté en 67 sections totalisant 29,2 km (fig. 5b).

Sismique réflexion multitrace

La sismique-réflexion multitrace réalisée, en utilisant un sparker comme source (dispositif électrique qui génère des ondes sismiques grâce à une décharge électrique entraînant très localement une vaporisation de l'eau), a consisté en 24 profils pour une longueur totale de 19,2 km (fig. 5a). La distance moyenne entre les Points Miroirs Communs (CMP) est d'environ 1,5m.

Les analyses des vitesses, c.-à-d., la vitesse choisie pour corriger les données avant la sommation ont été effectuées en moyenne tous les 50m sur l'ensemble des sections.

Sismique réfraction et ondes de surface

L'acquisition en UMASW utilisant un canon à air comme source a consisté en 13 profils exploités d'une longueur totale de 6,3 km (fig. 5c).

Cette campagne a permis d'obtenir les valeurs des vitesses des ondes de compression (V_p) et de cisaillement (V_s) le long des profils.

Données géotechniques

Les données géotechniques comprennent les différentes campagnes de reconnaissance sur la partie terrestre, les données d'archive de la Banque du Sous-Sol du BRGM et celles de la présente mission.

La campagne de reconnaissance de la présente mission a consisté en l'exécution de 10 essais au pénétromètre statique sous-marin (CPT) et de 10 sondages carottés par Vibrocore sous-marin. Ces sondages (fig. 5d) ont permis de visualiser la nature des sols traversés et de prélever des échantillons intacts pour analyses en laboratoire.

Interprétation des données de la sismique réflexion

Interprétation des données de la sismique réflexion multitrace

Les données de la sismique multitrace sont de bonne qualité et permettent une interprétation commode en donnant une image globale satisfaisante des formations géologiques. L'origine de l'axe du temps est le 0 NGF. La profondeur de la pénétration du signal paraît correcte jusqu'à environ 160 ms en temps double.

Les fréquences dominantes sur les sections finales atteignent 400 à 1000 Hz ce qui donne, pour des vitesses de 1500 et 2500 m/s des résolutions verticales respectivement de 0,4-1 m et de 0,6-1,5 m.

Les pointés des marqueurs ont été effectués sur les vues 2D des sections. L'établissement des correspondances avec les couches du découpage lithologique défini a été fait postérieurement, après la conversion temps-profondeur en utilisant des profils intégrant des parties terrestres et maritimes. Les 8 marqueurs nommés T2 à T9 peuvent être groupés en 5 marqueurs (fig. 6).

Le marqueur T7 est un marqueur continu à fort amplitude et a pu être pointé facilement sur l'ensemble de la zone d'étude. Il est observé, au plus haut, vers 20 ms dans la partie nord de la zone et jusqu'à 75 ms, au plus bas, dans la partie sud, montrant ainsi un pendage vers le Sud perturbé par des ondulations locales.

Le marqueur T8 est continu et à forte amplitude. Il est localisé sous le T7 qui comme ce dernier peut être pointé sur l'ensemble de la zone d'étude. Ces deux marqueurs délimitent le faciès sismique 1 caractérisé par des réflexions internes subparallèles à forte amplitude. Ce faciès montre un épaississement du Nord vers le Sud. Il est absent (érodé) dans la partie centrale de la zone entre les platiers Nord et Sud.

Le marqueur T6 est semi-continu à amplitude modérée, partiellement présent au-dessus du marqueur T7, et qui n'a pas pu être pointé sur l'ensemble de la zone où le T7 est présent. Ces deux marqueurs délimitent le faciès sismique 2 caractérisé des réflexions internes discontinues à faible amplitude.

Les marqueurs T4 et T5 pointés respectivement sur les platiers Nord (T4) et Sud (T5) semblent correspondre à une surface de discordance entre deux séquences (séries) aggradantes et progradantes définies par les faciès 3 et 4. Ces deux faciès sont caractérisés par de multiples réflecteurs internes fins sigmoïdes et/ou obliques.

Les marqueurs T2 et T9 correspondent à des dépôts limitant la pénétration sismique sur les platiers nord et sud ou à la base des dépôts situés au fond du canyon central. Ce faciès sismique (faciès 5) est caractérisé par des réflecteurs fins et discontinus.

Deux autres types de faciès pouvant indiquer la présence d'instabilités gravitaires : faciès chaotique (6) et faciès transparent (7). Le faciès chaotique présent dans le canyon central est caractérisé par une structure interne désorganisée, avec des réflecteurs visibles, mais discontinus. Le faciès transparent sans réflecteur interne est observé sous les platiers nord et sud là où le marqueur T2 est présent.

Sur les flancs du canyon central, on observe localement entre 80 et 100 ms un autre réflecteur (A) très puissant mais de longueur très limitée sur les sections.

Les intersections entre les horizons pointés sur l'ensemble des profils ont été vérifiées et corrigées en 3D (fig. 7)

Les pointés de tous les marqueurs ont été utilisés pour le calcul des cartes (maillages 2D) isochrones (carte du temps d'arrivée de l'onde réfléchie sur un horizon en temps double). Ce calcul a été fait sur OpendTect en utilisant la méthode d'interpolation des valeurs pondérées par l'inverse du carré de la distance. Les cartes isochrones (fig. 8a-d) ont été limitées à l'intérieur des aires où les marqueurs ont été pointés.

La carte isochrone du marqueur T7 montre un pendage vers le SSE de ce marqueur avec une érosion du marqueur dans la zone du canyon central (fig. 8a) qui le divise en deux parties. Dans la partie nord, il est observé entre 20 et 55 ms, alors que dans la partie sud, il est observé entre 35 et 75 ms en temps double. Sa présence sous les remblais entre les deux parties dans le secteur entre la digue du terre-plein et la première ligne sismique reste possible. Au Sud, il serait affleurant ou subaffleurant sous la

morphologie complexe en crêtes et thalwegs, ce qui a été créé probablement par les glissements naturels ou des remblais déposés. Sous le platier sud, sa limite correspond à celle d'apparition du faciès transparent décrit plus haut.

La carte isochrone du marqueur T8 montre les mêmes tendances que la carte du marqueur T7 avec une érosion du marqueur dans la zone du canyon central (fig. 8b) qui le divise en deux parties. Dans la partie nord, il est observé entre 35 et 65 ms, alors que dans la partie sud, il est observé entre 50 et 85 ms en temps double. L'épaisseur du faciès sismique 1 décrit plus haut serait donc comprise grossièrement entre 10 et 15 ms.

La carte isochrone des marqueurs T4 et T5 montre une érosion du marqueur dans la zone du canyon central (fig. 8c) qui limite sa présence uniquement sur les platiers nord et sud. Dans la partie nord, il est observé entre 20 et 40 ms, mais il pourrait remonter davantage dans le coin nord-ouest sous le platier nord où sa présence reste discutable. Dans la partie sud, il est observé entre 25 et 45 ms en temps double.

Les marqueurs T2 et T9 ont été fusionnés car ils correspondent, soit à la base des remblais anthropiques d'épaisseur variable sur l'ensemble de zone, soit à la base des éboulis de glissements (avalanches), soit un mélange des deux (fig. 8d). Il sont observés à des profondeurs variant à moins de 10ms, sous les platiers nord et sud, jusqu'à plus de 150 ms, dans la partie la plus distale du canyon central.

Transformation temps-profondeur

La transformation temps-profondeur a été réalisée en utilisant la vitesse de sommation (V_{som}) qui correspond à la vitesse choisie lors du traitement pour corriger les données avant la sommation. Elle dépend de la méthode utilisée car les traces regroupées en CMP n'ont pas le même angle d'incidence au réflecteur. La correction dynamique (NMO) utilise la vitesse de sommation pour compenser l'effet d'obliquité

des trajets. Généralement, la vitesse de sommation est proche de la vitesse moyenne quadratique.

Les vitesses de sommation ont été estimées à des intervalles d'environ 50m sur chaque section. Elles ont été utilisées pour le calcul par interpolation spatiale du bloc 3D des vitesses sur OpendTect (fig. 9).

Les valeurs des vitesses de sommation varient entre 1520 (vitesse dans l'eau) et 2550 m/s. La bathymétrie très complexe du site et les pendages des marqueurs font que la couche d'eau soit au contact avec tous les faciès sismiques (couches) à vitesses d'intervalle différentes sur l'ensemble du site et rendent parfois imprécise l'interpolation de la vitesse de sommation.

Les vitesses correspondantes aux surfaces 2D des marqueurs ont été extraites à partir du bloc 3D des vitesses. Le choix des vitesses de sommation pour la conversion temps-profondeur présente toutefois un inconvénient ; à cause d'éventuelles anomalies dans les valeurs des vitesses, les différents marqueurs risquent de se croiser. Un contrôle préalable a été effectué afin d'éviter cet inconvénient.

Interprétation des données de la sismique-réflexion monotrace

L'interprétation des données de la sismique-réflexion monotrace a été utilisée pour compléter l'interprétation de la sismique multitrace.

Les sections sismiques en temps ont été chargés sur OpendTect parallèlement aux interprétations de la sismique multitrace (fig. 10) afin de vérifier la correspondance des marqueurs. Les marqueurs pointés en sismique monotrace ont été utilisés pour compléter la couverture spatiale.

En revanche, les conversions temps-profondeur n'ont pas été utilisées dans cette synthèse car elle ont été effectuées à vitesse moyenne constante (1700m/s), ce qui reste un des inconvénients de la sismique-réflexion monotrace.

Croisement avec les données terrestres

Ce croisement a été fait dans le but d'établir les correspondances entre les couches du modèle lithologique établi et leur continuité dans la partie maritime. Le groupement a établi 6 profils intégrant l'ensemble des résultats des campagnes de reconnaissances terrestres prolongés dans la partie maritime. Cette intégration a été faite en utilisant le logiciel Rockworks.

Ces profils ont permis d'établir une correspondance entre les couches rencontrées sur l'ensemble du site. Cette correspondance entre les marqueurs sismiques et les horizons lithologiques est donnée dans le tableau 1.

Dorénavant, seuls les noms des horizons lithologiques seront utilisés.

Intégration des données de la UMASW

L'intégration de ces données concerne les valeurs des vitesses de cisaillement V_s , cette méthode étant la seule à pouvoir les estimer dans la zone étudiée.

Le nuage de points des valeurs estimées de la V_s couvrent une zone d'environ 820m de longueur, de 40-140m de largeur, sur une altitude variant de -8 à -132 m (fig. 11a). La plage des valeurs de la V_s se situe entre 60 et 1000 m/s. Le densité spatiale des points est d'environ 10m en plan et de 2-8 m en profondeur.

Les valeurs de la V_s ont été interpolées sur Rockworks afin de créer un maillage 3D (fig. 11b) en utilisant la méthode d'interpolation anisotropique des valeurs pondérées par l'inverse du carré de la distance, laquelle cherche le point de mesure le plus proche dans chacun des secteurs de 90 degrés autour du nœud du maillage.

Les pas du maillage en XYZ sont respectivement 5x5x1m. Le bloc 3D montre des V_s allant de 50 à 280 m/s dans les premiers mètres sous le fond sur l'ensemble de la zone, à l'exception de deux couloirs au Nord et au Sud où des valeurs supérieures à 330 m/s se rencontrent à faible profondeur sous le fond (fig. 11b). Ce bloc 3D a été

utilisé dans les coupes géotechniques afin d'obtenir des informations sur la valeur de la V_s au sein des horizons lithologiques.

DONNÉES GEOTECHNIQUES

Essais au pénétromètre statique

Cette campagne comprend la réalisation de 10 essais au pénétromètre statique Neptune 5000 à pointe piézocône de 5cm² (CPTu) selon les spécifications de la norme ISO 22476-1.

Ces essais ont permis de distinguer les niveaux H2a/H2b au sein des alluvions H2. En revanche, la distinction remblais H1/H2a n'apparaît pas clairement sur les diagrammes. Seulement 4 parmi eux (CPT04A, CPT08, CPT09 et CPT11) ont atteint le toit de l'horizon H3 et pénétré de quelques centimètres avant le refus (fig. 12a et b).

Le CPT03 (fig. 12c) montre une évolution des valeurs de la résistance en pointe (Q_c) en profondeur qui n'a pas été rencontrée sur les autres CPT. Les valeurs mesurées sur ce point sont très faibles jusqu'à la profondeur maximale de 18,5m. Il se trouve dans une zone du platier sud où la sismique réflexion montre un faciès transparent, sans réflecteur visible. Le tableau 2 regroupe les paramètres statistiques principaux de la valeurs du Q_c en MPa par horizon, sans tenir compte des valeurs du CPT03.

Les horizons H1 et H2a ont été regroupés car dans les secteurs où ils ont été échantillonnés (platiers nord et sud), ils présentent des caractéristiques très similaires. Les remblais H1 montrent des valeurs de Q_c faibles par rapport à ceux de la partie terrestre avec une valeur moyenne de 1.5 MPa. Le passage H1/H2a n'est pas clair probablement à cause du mélange entre les remblais et les dépôts des glissements. Il s'agit, selon l'indice de Robertson (2009), principalement de sables propres à silteux et parfois graveleux. Les alluvions H2a montrent des valeurs de Q_c similaires à celles de

H1 avec une valeur moyenne de 2.5 MPa. Il s'agit principalement de sables propres à silteux.

Les valeurs de Q_c des alluvions H2b montrent un horizon formé principalement de silts sableux et de silts argileux à argiles silteuses avec une proportion importante de fines soulignée par la présence des argiles à argiles silteuses. La valeur moyenne de Q_c est de 1.1 MPa.

L'horizon H3 a pu être caractérisé sur des hauteurs assez limitées à cause de la présence de graves et donc d'un refus rapide. Les parties échantillonnées montrent un Q_c moyen de 8.4 MPa avec des valeurs maximales mesurées avant refus ou au refus de 25.1 MPa.

ESSAIS EN LABORATOIRE

Analyses granulométriques

Les analyses granulométriques comprennent 23 échantillons sur 8 sondages carottés au Vibrocore (GeoVibroCorer 6000). Compte tenu de la profondeur limitée (6m maximum) de l'échantillonnage, seul les horizons supérieurs (H1+H2a) ont été atteint, à l'exception du VC04 qui a échantillonné l'horizon H3.

Les différents sols ont été regroupés en cinq classes principales conformément à la norme ISO 14688-1:2017.

Les échantillons analysés appartiennent à deux intervalles ; de -7 à -20m NGF et de -33 à -45 m NGF.

Les sondages du platier sud (VC01 et VC03) montrent une tendance d'augmentation de la part des fines (éléments de moins de 80 μ m) avec la profondeur, jusqu'à 97% pour le VC03. Le sondage VC04 situé dans le thalweg a

vraisemblablement échantillonné l'horizon H3 et montre une augmentation du pourcentage de graves jusqu'à 42% près de sa base.

Les sondages de la partie centrale (VC05, VC06 et VC07) montrent une tendance d'augmentation de la proportion des fines à la même profondeur, jusqu'à 97% pour le VC03, ce qui, compte tenu de leurs positions, implique un léger pendage vers l'Est.

Le sondage VC09 sur le platier nord montre une tendance d'augmentation de la fraction sableuse avec la profondeur. Le sondage VC11 situé dans un thalweg a échantillonné une séquence très réduite de dépôts au-dessus de l'horizon H3, sa base correspondant à la profondeur du H3.

Les courbes granulométriques des matériaux sont présentées à la figure 13.

Elles sont comparées à un fuseau granulométrique des matériaux potentiellement liquéfiables selon Kishida (1970) qui est représenté en rouge sur la figure 13. Le choix du fuseau granulométrique à retenir dans le cadre de la liquéfaction est du ressort de la mission G2, cette représentation, ici est indicative.

Les granulométries de l'horizon H3 (VC04) sont globalement très étalées avec un coefficient d'uniformité (D_{60}/D_{10}) très élevé ce qui indiquerait un caractère non/peu liquéfiable.

Au sein des remblais et des alluvions limoneuses, on peut distinguer trois familles qui se suivent grossièrement du haut en bas dans les sondages (fig. 13):

- Matériaux principalement sableux avec teneur en fines comprise entre <40 % potentiellement liquéfiables (1 sur la figure 13).
- Matériaux limoneux avec une teneur en fines comprise entre 40 et 60% présentant un faible risque de liquéfaction d'autant plus réduit que la fraction des fines est plus importante (2 sur la figure 13).

- Matériaux argileux présentant une teneur en fines supérieure à 60% considérés comme non/peu liquéfiables (3 sur la figure 13).

DISCUSSION

Intégration des données sismiques et géotechniques et modélisation 3D

L'intégration de l'ensemble des données sismiques et géotechniques a d'abord été effectuée en prolongeant dans la partie maritime les profils terrestres, puis par l'élaboration d'un modèle géologique 3D.

Profils géotechniques

La localisation des profils est présentée à la figure 14. Il s'agit de 6 profils parallèles, orientés N112°, d'une longueur de 600-1000m, nommés P11 à P16 (fig. 15a-f). Ils ont été élaborés en recoupant les maillages des marqueurs sismiques après la conversion en profondeur, le bloc 3D des Vs obtenu par la UMASW et en y intégrant les images des profils géotechniques sur la partie terrestre.

Les profils P11 à P14 (fig. 15a-d) montrent des caractéristiques proches avec une bonne continuité des horizons entre les parties terrestre et maritime. L'épaisseur de l'horizon H1 varie de 10 à 15 mètres. Les toits des horizons H2b et H3 se situent respectivement de -20 à -25 m de -30 à -35 m NGF. L'horizon H2a s'amincit parfois et disparaît probablement sous les remblais.

Les données de la UMASW montrent des Vs supérieures à 330m/s à l'intérieur de H3, sauf aux endroits où il est subaffleurant, probablement recouvert par une mince couche d'éboulis et des Vs légèrement inférieures pour les autres horizons.

Sur le profil P15 (fig. 15e), l'horizon H1 paraît s'épaissir en atteignant une épaisseur maximale qui dépasse 20m. Tous les horizons inférieurs jusqu'au H3 sont

érodés, s'amincissent et sont recouverts sous une couche épaisse d'éboulis. Le toit du H2b, en dehors de la partie érodée, est situé vers -25 m d'après la sismique réflexion.

Le toit du H3 se situe vers -35 m NGF et montre une bonne continuité terre-mer.

Les données de la UMASW montrent des Vs supérieures à 280m/s à l'intérieur de H3. A l'intérieur des remblais et des éboulis, les Vs varient de 80-220 m/s, s'accroissent avec la profondeur, montrant ainsi plusieurs niveaux différents au sein de ces formations.

Sur le profil P16 (fig. 15f), l'horizon H1 paraît s'épaissir en atteignant une épaisseur maximale de 25m. Tous les horizons inférieurs y compris le H3 sont érodés dans la partie maritime où l'horizon H1 repose directement sur le H3, d'après la sismique réflexion.

Les données de la UMASW sur ce profil couvrent un intervalle de 70 m de largeur situé à environ 90 m de la fin de la partie terrestre. A l'intérieur des remblais et des éboulis, les Vs varient de 150-280 m/s avec une tendance d'accroissement avec la profondeur.

Modèle géologique 3D

Nous avons réalisé un modèle géologique 3D qui intègre l'ensemble des données disponibles. La zone modélisée correspond à un rectangle de 520x1230m (fig. 16). Le modèle peut être manipulé interactivement et permet également d'effectuer des coupes géologiques dans toutes les directions.

La séquence lithologique représentée dans le modèle est la suivante :

- H1 : remblais du terre-plein et dépôts d'éboulis
- H2a : dépôts de sables fins à moyens,

- H2b : dépôts de sables fins à limoneux
- H3 : Alluvions sablo-graveleuses à galets
- H4 : Horizon rajouté dont le toit correspond à la base du H3 pointé en sismique-réflexion et sa base correspond à la base de la zone modélisée (-150 m NGF).

Les surfaces de toutes les couches (maillages) sont celles obtenues en sismique-réflexion multitrace, complétées par la sismique monotrace uniquement pour le H3.

Leur succession a été construite du bas vers le haut.

Le modèle est présenté aux figures 17a-b.

La base des remblais et des éboulis H1 est une surface d'érosion qui affecte l'ensemble des formations jusqu'au H3 (fig. 17a). L'ensemble de ces formations forme un empilement sédimentaire monoclinale des alluvions plio-quadernaires légèrement penté vers le SSE.

Les niveaux H2a et H2b s'amincissent en allant du Sud au Nord et disparaissent entièrement à la hauteur du profil P16 où l'horizon se dépose directement sur H3 (fig. 17a). Encore plus au Nord, l'épaisseur de H1 atteint sa valeur maximale proche de 40 m dans l'axe de l'ancien thalweg situé en partie centrale du site.

L'horizon H2a a une épaisseur moyenne de 9 m avec une valeur maximale de 19m dans la partie Sud. L'horizon H2b a une épaisseur moyenne de 8 m avec une valeur maximale de 22m dans la partie Sud. L'horizon H3 montre un pendage d'environ 20° vers le SSE (fig. 18). Son épaisseur moyenne est de 12m avec une valeur maximale de 26m dans la partie Sud.

CONCLUSIONS

La présente étude concerne les investigations géophysiques et géotechniques maritimes réalisées par GEOTEC dans le cadre du projet de conception-réalisation-

maintenance du nouveau complexe HALIOTIS II à Nice. Elle réalise l'intégration des informations de toutes les méthodes dans le même canevas d'interprétation permettant la synthèse géologique et géotechnique.

- Ces campagnes d'investigations géophysiques et géotechniques contribuent à la connaissance géologique de la partie maritime du site, dans une zone où les informations géologiques à l'échelle du projet étaient absentes et ne pouvaient être obtenues par des moyens habituels du fait du cône d'envol de l'aéroport. La zone d'étude est principalement constituée par les dépôts sédimentaires de l'embouchure du Var. Cette embouchure présente d'épaisses séquences de sédiments quaternaires marins, estuariens, deltaïques et de chenaux fluviaux qui recouvrent le gravier fluvial basal du Pléistocène.
- La méthode de la sismique-réflexion multitrace par ses avantages, notamment celui qui permet d'obtenir des vitesses d'horizons même sans données de sondage, a servi de base à l'interprétation structurale et stratigraphique. Elle a été complétée par les données de la sismique monotrace et la UMASW.
- La transformation temps-profondeur a été réalisée en utilisant les vitesses de sommation, en absence de données de sondage, de diagraphies soniques ou de tirs de contrôle (checkshots).
- La correspondance des marqueurs sismiques avec les horizons géologiques définis dans la partie terrestre a été réalisée par des profils prolongés dans la partie maritime. Ils ont confirmé la bonne continuité des formations présentes dans la partie terrestre (horizons H1, H2 et H3).
- L'ensemble des informations structurales obtenues a été intégré dans un modèle géologique 3D. Il a mis en évidence un empilement sédimentaire monoclinale des alluvions plio-quaternaires légèrement penté vers le SSE érodé postérieurement.

La base des remblais et des éboulis de glissements gravitaires H1 est une surface d'érosion qui affecte l'ensemble des formations jusqu'au H3.

- La méthode UMASW a mis en évidence des vitesses de cisaillement au sein de l'horizon H3 supérieures à 330m/s. Au droit des zones de remblais et de dépôts alluvionnaires, les vitesses varient entre 220 m/s et 80 m/s mettant en évidence une hétérogénéité au sein de ces horizons.

Remerciements

Nous tenons à remercier pour leur contribution MM. Fantin et Drappier de Vinci Construction, M. Trucchi de Razel Bec, MM. Geisler et Folliard de Structure Geotechnics et les équipes de CREOCEAN, G-TEC et SISMOCEAN.

Références

- Cochonat, P., Dodd, L., Bourillet, J.F. & Savoye, B. (1993). Geotechnical Characteristics and Instability of Submarine Slope Sediments, the Nice Slope (N-W Mediterranean Sea). *Marine Georessources and Geotechnology 11*, 131-151.
- Dan, G. (2007). *Processus Gravitaires et Evaluation de la Stabilité des Pentes : Approches Géologique et Géotechnique. Application à la marge algérienne et à l'effondrement de l'aéroport de Nice en 1979*. Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale. <https://archimer.ifremer.fr/doc/2007/these-3881.pdf>
- Dubar, M. (1987). Données nouvelles sur la transgression holocène dans la région de Nice (France). *Bulletin de la Société Géologique de France 8(3)*, 195-198.
- Dubar, M., & Antony, E.J. (1995). Holocene Environmental Change and River-Mouth Sedimentation in the Baie des Anges, French Riviera. *Quaternary Research 43(3)*, 329-343.
- Dubar, M. (2012). Les dépôts pliocènes et pléistocènes de la basse vallée du Var (Nice, Alpes-Maritimes): variations du niveau marin et néotectonique depuis 5 millions d'années. *Ann. Mus. Hist. nat. Nice, XXVI*, 35-54.
- Kishida, H. (1970). Characteristics of Liquefaction of Level Sandy Ground During the Tokachioki Earthquake, *Soils Found. 10(2)*, 103-111.
- Piper, D.J.W., & Savoye, B. (1993). Processes of late Quaternary turbidity current flow and deposition on the Var deep-sea fan, north-west Mediterranean Sea. *Sedimentology 40*, 557-582.
- Robertson, P.K. (2009). Interpretation of cone penetration tests - A unified approach. *Canadian Geotechnical Journal 46(11)*, 1337-1355.
- Savoye, B., Piper, D.J.W. & Droz, L. (1993). Plio-Pleistocene evolution of the Var deep-sea fan off the French Riviera. *Marine and Petroleum Geology 10*, 550-571.
- Savoye, B., & Piper, D.J.W. (1993). Quaternary sea-level change and sedimentation on the continental shelf and slope off Antibes, French Riviera. *Gea-Marine Letters 13*, 2-8.

Figures

Figure 1. Localisation de la zone d'étude

Figure 2. Bathymétrie de la zone d'étude

Figure 3. Carte géologique schématique (d'après Dubar et Anthony, 1995)

Figure 4. Séquences sédimentaires à l'embouche du Var (d'après Dubar et Anthony, 1995)

Figure 5a,b,c,d – a) Localisation des profils en sismique-réflexion multitrace ; b) Localisation des profils en sismique-réflexion monotrace ;c) Localisation des profils UMASW ;d) Localisation des CPT et des Vibrocores

Figure 6. Marqueurs sismiques pointés sur la section sismique 23NI15

Figure 7. Vue 3D des sections sismiques et du pointé du marqueur T7

Figure 8a,b,c,d. Cartes isochrones du marqueur T7 (a) ;T8 (b) ; T4 et T5 (c) ; T2 et T9 (d)

Figure 9. Bloc 3D des vitesses de sommation

Figure 10. Sections de la sismique monotrace avec le pointé du marqueur H3 en monotrace (vert) et en multitrace (jaune)

Figure 11a,b. Nuage de points (a) et bloc 3D (b) des Vs obtenu en UMASW

Figure 12a,b,c. Logs de la valeur du Qc avec les horizons

Figure 13. Analyses granulométriques dans les sondages

Figure 14. Localisation des profils géotechniques

Figure 15. Profils géotechniques ; a) P11 ; b) P12 ; c)P13 ; d) P14 ;e) P15 ;f) P16. Les lignes noires sont les isovitesses de la Vs m/s.

Figure 16. Localisation de la zone du modèle

Figure 17a,b. Vue du modèle 3D sans les remblais (a) toit de l'horizon H3 avec isohypses (b)

Figure 18. Coupe N-S du modèle

Tableaux

Tableau 1. Correspondance entre les marqueurs sismiques et les horizons lithologiques.

Marqueur sismique	Horizon lithologique	Formation
T2 et T9	Base H1	Base des remblais et des éboulis
T4 et T5	Toit H2b ou proche	Sables fins à limoneux
T7	Toit H3	Alluvions sablo-graveleuses à galets
T8	Base H3	

Tableau 2. Paramètres statistiques principaux des valeurs du Qc en MPa par horizon

Horizon	Nb. Val.	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Médiane	Variance
H1	7522	0.0	9.1	1.5	1.3	1.2	1.6
H2a	11141	0.1	9.8	2.5	1.9	2.0	3.7
H2b	6136	0.1	4.0	1.1	0.6	1.0	0.3
H3	584	2.3	25.1	8.4	4.1	7.8	17.0