

Caractérisation géologique régionale par méthodes géophysiques (gravimétrie et HVSR) dans le cadre du développement d'une ville nouvelle asiatique

Regional geological characterization using geophysical methods (gravity and HVSR) as part of the development of a new Asian town.

Clément MOGENIER*¹, Julie COTEAUX¹, Maria SAADE^{1,2}, Louka DEROBERT-MASURE¹, and Claire LAM³

¹ Sixense Monitoring, Nanterre, France

² IGP, Paris, France

³ Sixense Limited, Hong Kong, HKSAR

* clement.mogenier@sixense-group.com

RESUME : Dans le cadre du développement d'une ville nouvelle en Asie, couvrant plusieurs dizaines de kilomètres carrés, des études préalables ont été engagées afin d'élaborer un modèle géologique régional. Ce dernier constitue un outil d'aide à la planification des futures investigations détaillées nécessaires à la conception d'infrastructures lourdes, telles que des systèmes de transport urbain, ainsi qu'à l'établissement des plans d'urbanisme.

Une campagne géophysique régionale a été réalisée, combinant la gravimétrie (3 500 stations) et la méthode sismique passive Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSR, 300 stations), afin de fournir des informations essentielles à la construction du modèle géologique. La zone étudiée présente de fortes contraintes, liées à la coexistence d'espaces naturels sensibles et de secteurs densément urbanisés.

Les objectifs principaux consistaient à cartographier les variations de densité des terrains par gravimétrie, à travers des approches analytiques et l'inversion de modèles de densité 3D, et à estimer la stratigraphie locale par la méthode HVSR, permettant d'évaluer la profondeur du substratum, l'épaisseur des formations de recouvrement et les principales unités structurales. Les résultats ont été comparés avec une base de données de près de 500 sondages géotechniques disponibles dans la zone d'étude.

L'interprétation conjointe des données géophysiques et géotechniques a permis d'identifier plusieurs structures profondes, des discontinuités majeures et des zones susceptibles d'être affectées par des phénomènes karstiques ou des instabilités locales. Ces résultats constituent une base solide pour la planification urbaine et la gestion des risques géotechniques dans un contexte de développement urbain à grande échelle.

ABSTRACT: As part of the development of a new town in Asia, covering several tens of square kilometers, preliminary studies were undertaken to establish a regional geological model. This model serves as a decision-making tool for planning future detailed investigations required for the design of major infrastructure, such as urban transport systems, as well as for the development of urban planning strategies.

A regional geophysical campaign was carried out, combining gravimetry (3,500 stations) and the passive seismic Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio method (HVSR, 300 stations), in order to provide essential information for constructing the geological model. The study area presents significant constraints due to the coexistence of environmentally sensitive zones and densely urbanized sectors.

The main objectives were to map subsurface density variations using gravimetry, through both analytical approaches and 3D density-model inversion, and to estimate the local stratigraphy using the HVSR method, enabling the assessment of bedrock depth, overburden thickness, and major structural units. The results were compared with a database of nearly 500 geotechnical boreholes available within the study area.

The joint interpretation of geophysical and geotechnical data made it possible to identify several deep-seated structures, major discontinuities, and zones potentially affected by karst processes or local instabilities. These results provide a robust foundation for urban planning and geotechnical risk management in the context of large-scale urban development.

Mots-clés: Gravimétrie ; Sismique passive ; HVSR ; Modèle géologique ; Aménagement urbain.

1 INTRODUCTION

1.1 Préambule

Les études sur ce projet étant toujours en cours, les localisations exactes ainsi que les parties prenantes ont été anonymisées.

Certaines des figures présentées ne peuvent donc pas être référencées pour cette raison.

1.2 Contexte du projet

Le projet est situé dans le sud de la Chine et porte sur le développement d'une ville nouvelle dans les années à venir (Figure 1). Il nécessite la définition d'un modèle géologique à grande échelle afin de planifier les aménagements et d'élaborer un modèle géologique de référence, pour les futurs développements potentiels dans la zone : villes nouvelles, logements, lignes de métro et de transport, etc.

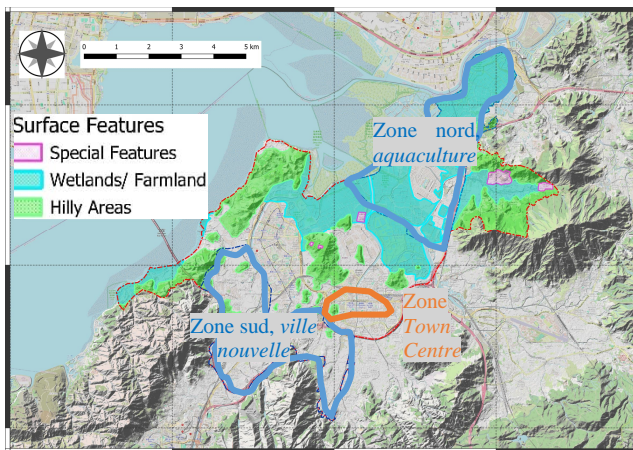


Figure 1. Contexte géographique du projet

Dans ce cadre, le Département du Génie Civil et du Développement du gouvernement a attribué à Sixense Group un marché de *Site Investigation*, en sous-traitance d'un *Main Contractor* en charge du management de projet, des études historiques et des nouvelles reconnaissances par sondages.

Le groupe Sixense est responsable des reconnaissances géophysiques régionales.

Ce contrat est supervisé par le *Resident Engineer*, dont la mission est d'élaborer le modèle géologique régional final basé sur l'ensemble des données historiques et nouvellement acquises.

1.3 Géographie et géologie du site

La zone d'étude occupe une région de basse altitude dont une grande partie ne se situe qu'à quelques mètres au-dessus du niveau de la mer. Elle s'étend sur environ 25 km de long et jusqu'à 6 km de large dans la zone de

la ville principale. Elle est bordée au sud-ouest par une chaîne de collines culminant à 583 m et à l'est par des contreforts atteignant 957 m. La limite terrestre nord est constituée par une baie et un fleuve.

Une grande partie de la zone est à vocation agricole, avec une prédominance de l'aquaculture et de l'élevage de canards dans le nord-est. Le sud est une zone urbanisée avec des complexes résidentiels qui jouxtent des villages anciens, dont la modernisation est en cours.

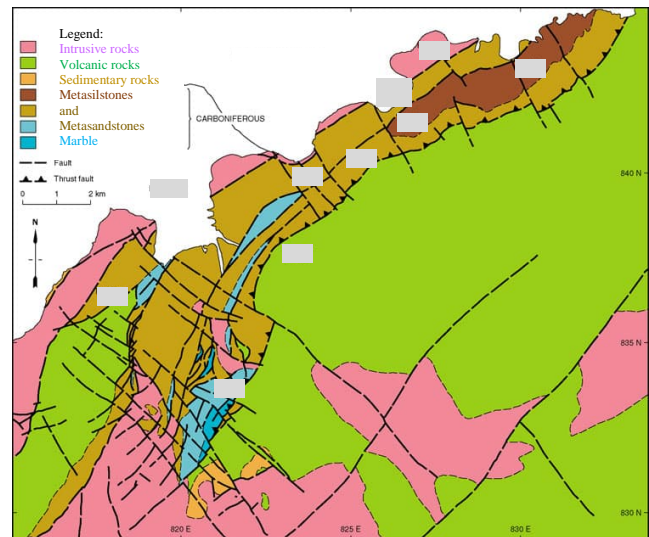


Figure 2. Contexte géologique

Le secteur étudié est situé au sein d'un bassin sédimentaire paléozoïque à structure complexe, encadré par des roches magmatiques mésozoïques de nature granitique et volcanique (Figure 2).

Les formations carbonifères dominent la région, bien qu'en grande partie recouvertes par des dépôts tertiaires et quaternaires. Elles ont été affectées par un métamorphisme régional post-jurassique, avec localement un métamorphisme de contact lié aux intrusions magmatiques. Les séries paléozoïques comprennent à la base des marbres épais surmontés de formations détritiques métamorphisées (calcaires argileux, pélites, siltites, grès), totalisant plusieurs centaines de mètres d'épaisseur.

Des roches volcaniques jurassiques supérieur-crétacé inférieur (laves andésitiques, tufs, brèches) et des intrusions granodioritiques et granitiques recourent l'ensemble. La structure est contrôlée par un large couloir de failles NE-SO, recoupées perpendiculairement par un réseau secondaire.

Le substratum est recouvert par 20 à 80 m de formations superficielles (alluvions, dépôts marins, colluvions, remblais). Les roches volcaniques présentent une altération marquée, atteignant

localement plus de 100 m d'épaisseur, surtout près des failles.

Les formations carbonatées sont sujettes à une karstification superficielle (épikarst) d'épaisseur significative, caractérisé par des surfaces très irrégulières, des fissures élargies et des cavités. Des vides karstiques sont également observés à grande profondeur, parfois comblés par des matériaux fins.

1.4 Enjeux

La détermination de la profondeur du substratum, du degré d'altération des roches et de la présence éventuelle de cavités karstiques constitue un enjeu majeur pour les futurs aménagements souterrains. La présence de karsts dans les formations carbonatées, représente un aléa géotechnique majeur. Ces facteurs conditionnent la faisabilité des ouvrages enterrés, la conception des ouvrages, et les reconnaissances à intégrer dès la planification.

2 ZONES D'ETUDE

2.1 Zone d'aquaculture (Nord) et ville nouvelle (Sud)

La première phase de l'étude s'est concentrée sur une zone d'analyse à l'échelle régionale, subdivisée en deux secteurs distincts (Figure 1).

Le secteur nord (Figure 3) correspond à une zone de 12km² majoritairement dédiée à l'aquaculture, caractérisée par une topographie très plane, située au niveau de la mer. Peu de forages profonds sont disponibles dans cette zone.

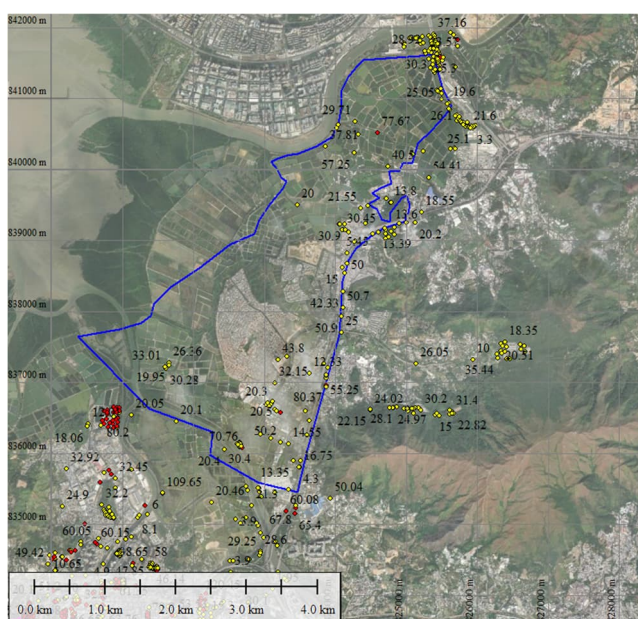


Figure 3. Zone Nord « Aquaculture » et forages disponibles (jaune : 60m prof. ou moins, rouge : 60m prof. et plus)

Le second secteur (Figure 4), situé au sud, correspond à une zone urbanisée en développement, constituant une ville nouvelle d'une superficie d'environ 11 km². Ces deux secteurs sont séparés par une distance d'environ 3 km.

L'étude menée sur ces deux zones s'inscrit dans une approche à vocation régionale, avec pour objectif principal d'améliorer la compréhension du contexte géologique global, en particulier la géologie structurale et la profondeur du substratum rocheux.

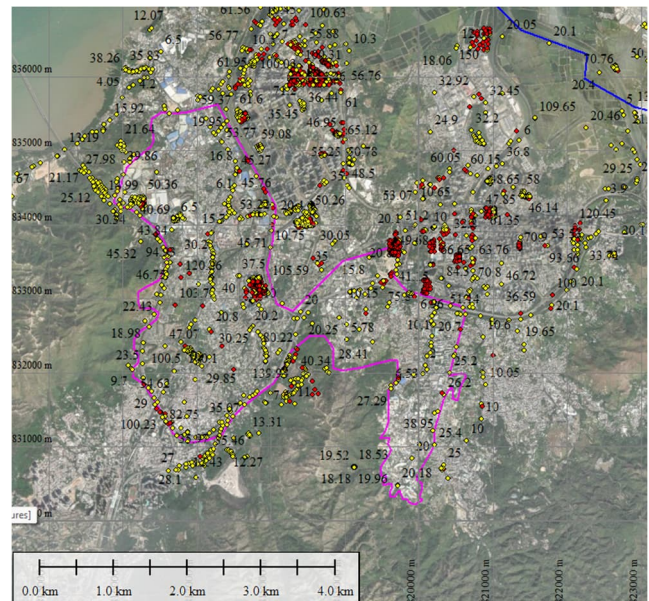


Figure 4. Zone Sud « Ville Nouvelle » et forages disponibles (jaune : 60m prof. ou moins, rouge : 60m prof. et plus)

2.2 Zone Town Centre

La deuxième phase de l'étude s'est concentrée sur une zone d'analyse plus restreinte, dans un centre-ville d'une ville nouvelle voisine attenante à la première étude. Cette zone a été désignée Town Centre ci-après (Figure 5).



Figure 5. Zone « Town Centre »

L'étude réalisée sur cette zone restreinte de 1,3 km² s'inscrit dans une approche plus locale, avec un

objectif de résolution plus élevé que dans les investigations régionales voisines. Elle vise principalement à caractériser le toit du bedrock au sens géotechnique du terme, ainsi qu'à caractériser le risque karstique et la recherche d'indices de cavité, dans les niveaux de marbre situés en profondeur sous les formations métamorphiques (metasiltstone, metasandstone)

3 METHODES GEOPHYSIQUES MISES EN ŒUVRE

3.1.1 Choix des méthodes

Compte tenu des contraintes spécifiques du site (environnement fortement urbanisé sur certaines zones, difficulté d'obtenir les permis et autorisations dans zones rurales) il était nécessaire de privilégier des méthodes d'acquisition légères. Les techniques retenues devaient fonctionner efficacement en contexte urbain, malgré les contraintes habituelles liées aux vibrations ambiantes ou aux interférences liées aux infrastructures. Elles devaient permettre d'investiguer des profondeurs de l'ordre de 100 m.

La méthode sismique passive Horizontal-To-Vertical Spectral Ratio (HVSr) et la gravimétrie se révèlent particulièrement adaptées.

3.1.2 Gravimétrie

Un levé gravimétrique mesure les variations du champ gravitationnel terrestre afin de détecter les contrastes de densité dans le sous-sol (Figure 6).



Figure 6. Mise en œuvre du MicroGravimètre Scintrex CG5

Comme chaque type de roche ou de structure (failles, changements de lithologie, vides) possède une densité différente, ces variations de gravité permettent de cartographier l'architecture géologique en profondeur (Figure 7).

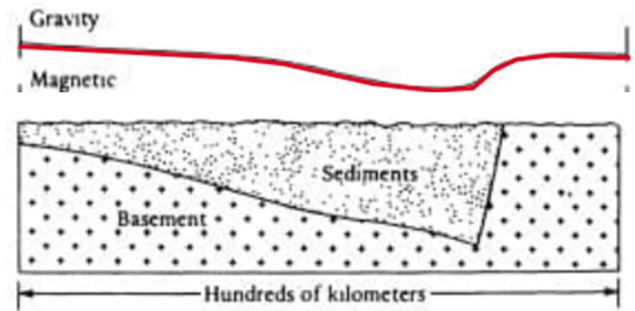


Figure 7. Anomalie gravimétrique vs. géologie

3.1.3 Sismique Passive HVSr

La méthode du rapport spectral horizontal/vertical (HVSr) est une méthode passive 1D qui utilise le bruit sismique ambiant. Elle permet d'estimer la profondeur du substratum rocheux en caractérisant la fréquence de résonance des couches superficielles à partir de mesures réalisées avec un seul capteur de vibration tri-directionnel (Figure 8).



Figure 8. Mise en œuvre des acquisitions HVSr (gauche : Smartsolo 3C, droite : Syscom MR3000)

Dans le cas d'un milieu constitué d'une couche meuble reposant sur un substratum rocheux rigide, la fréquence d'amplification correspond à la fréquence de résonance du sol, calculée à partir des spectres des composantes horizontales (H) et verticale (V) du signal sismique.

Plus le substratum rocheux est profond ou plus les sédiments sont meubles, plus la fréquence de résonance est faible.

Au lieu d'utiliser la formule analytique classique $f_0 = \frac{V_s}{4h}$, où f_0 est la fréquence de résonance principale, V_s la vitesse des ondes de cisaillement, et h l'épaisseur des matériaux de couverture, mais qui suppose une vitesse d'onde de cisaillement constante, nous avons choisi d'employer une relation empirique entre la profondeur observée du bedrock, d'après les sondages disponibles dans la zone, et les valeurs de f_0 mesurées.

Les données de forages et les informations provenant des investigations géotechniques ont été obtenues auprès du portail GEO Open Data du Gouvernement.

Cette approche permet de mieux prendre en compte les variations non linéaires de vitesse au sein des terrains meubles en profondeur (Tün et al., 2016, Johnson and Lane, 2016, Moon et al., 2019, Thabet, 2019).

Elle permet une estimation plus réaliste de la profondeur du toit du rocher sur l'ensemble de la zone d'étude, notamment en présence de gradients de vitesse ou de lithologies mixtes.

4 RESULTATS DES CAMPAGNES GEOPHYSIQUES

4.1 Zone d'aquaculture (Nord) et ville nouvelle (Sud)

4.1.1 Programme de mesures

Les deux zones cumulées, la « Ville nouvelle » au Sud et la zone « Aquaculture » au Nord, ont été couvertes par 2100 stations gravimétriques. La maille moyenne entre points était de 100m (Figure 9)

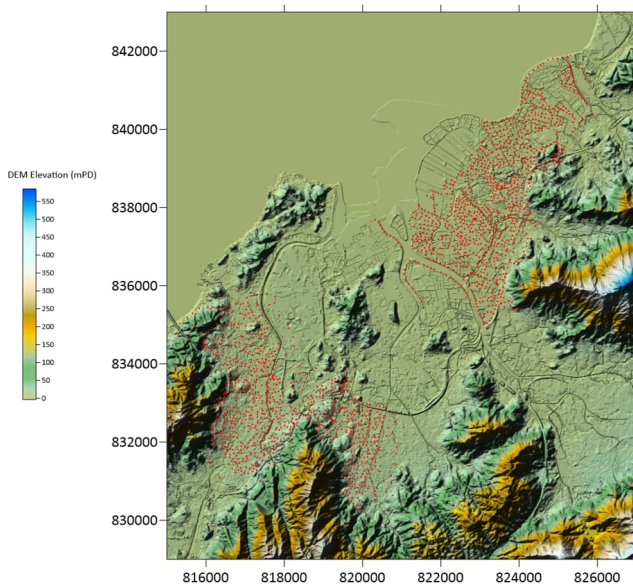


Figure 9. Localisation des stations gravimétriques (zones d'aquaculture et ville nouvelle)

4.1.2 Réduction des données, calcul de l'anomalie de Bouguer et de l'anomalie résiduelle

Les données gravimétriques ont été corrigées des effets non géologiques (marées luni-solaires, dérive instrumentale, air libre, terrain) pour obtenir une carte de l'anomalie de Bouguer (Figure 10).

Une correction régionale a permis de supprimer la tendance basse fréquence liée aux structures profondes (continuation vers le haut de 200 m).

Cette technique projette les données de gravité à une altitude supérieure, ce qui atténue les anomalies de

courte longueur d'onde et met en évidence les tendances régionales associées aux structures géologiques profondes.

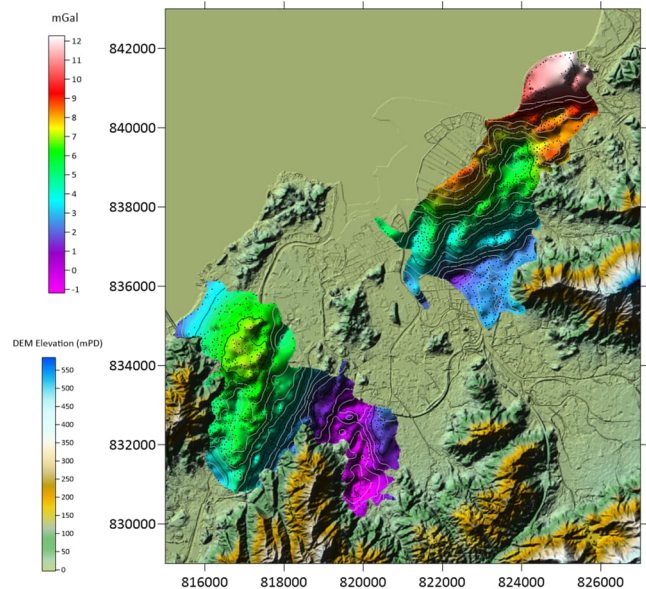


Figure 10. Anomalie de Bouguer (zones d'aquaculture et ville nouvelle)

La continuation vers le haut est privilégiée par rapport aux ajustements polynomiaux, car elle respecte la physique du champ de gravité et évite les distorsions artificielles (sur-ajustement, choix arbitraire du degré du polynôme, effets de bord).

Par soustraction de la correction régionale à l'anomalie de Bouguer, la carte d'anomalie résiduelle a été calculée (Figure 11)

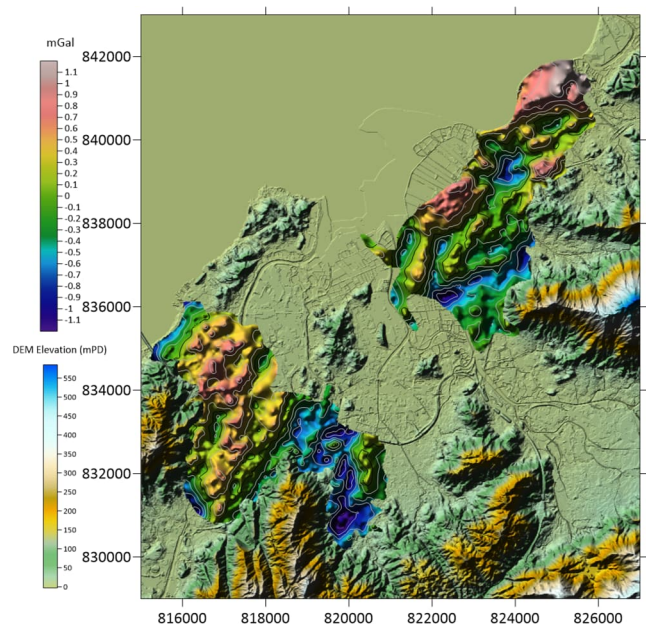


Figure 11. Anomalie résiduelle (zones d'aquaculture et ville nouvelle)

4.1.3 Traitement analytique des données

La technique du Total Horizontal Derivative (THDR) identifie les limites structurales dans les données gravimétriques en localisant les zones où les gradients horizontaux sont les plus forts, correspondant aux variations de densité abruptes. Appliquée à une carte gravimétrique, elle met en évidence les contacts géologiques majeurs et les linéaments associés (Figure 12).

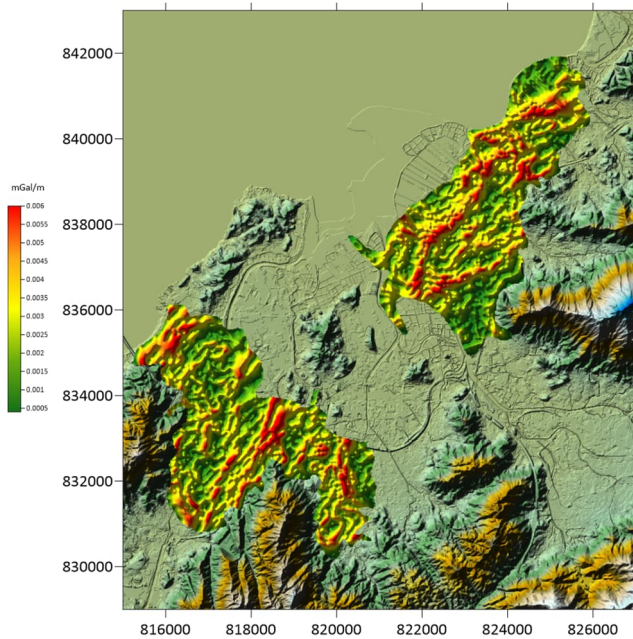


Figure 12. Traitement THDR (zones d'aquaculture et ville nouvelle)

4.1.4 Inversion des données et construction d'un modèle de densité 3D

Un processus d'inversion des données permet d'obtenir un modèle 3D de densités relatives (Figure 13).

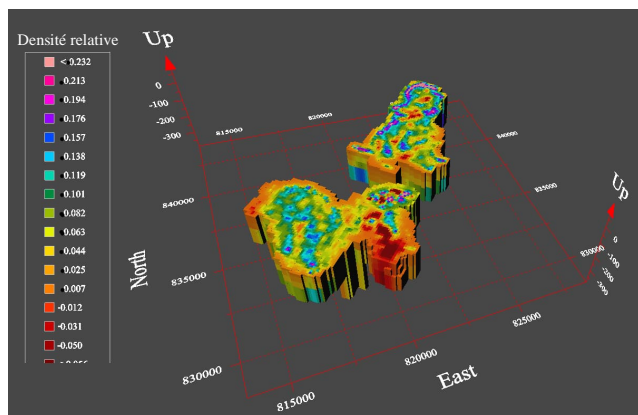


Figure 13. Inversion 3D des données de gravimétrie (zones d'aquaculture et ville nouvelle)

4.2 Zone Town Centre

4.2.1 Méthode gravimétrique

Un total de 1400 stations a été mesuré, à la maille moyenne de 20m (Figure 14).



Figure 14. Stations gravimétriques (zone Town Centre)

La chaîne de traitement des données étaient identique à celle réalisée pour la première étude, permettant de calculer l'anomalie de Bouguer, l'anomalie résiduelle, le signal THDR, et un modèle de densité 3D par inversion.

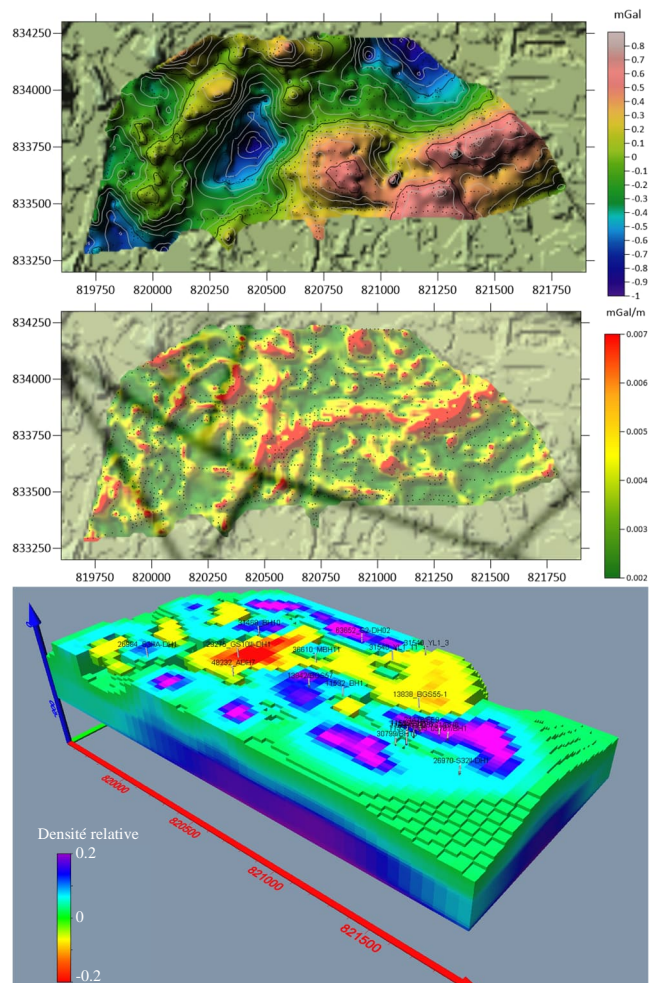


Figure 15. Résultats de la méthode gravimétrie, zone Town Centre (haut : anomalie résiduelle, milieu, traitement THDR, bas : modèle de densité 3D)

4.2.2 Méthode HVSR

Un total de 300 stations a été mesuré (Figure 16).



Figure 16. Stations HVSR (zone Town Centre)

Un premier traitement a consisté en la construction d'un modèle 3D représentant l'amplitude des fréquences de résonance à chaque pseudo-profondeur calculée par méthode empirique (3.1.3), et à extraire des sections 2D issues de ce modèle. Cette technique permet de rapidement identifier les interfaces dans le terrain, entre couches de contraste d'impédance sismique. La Figure 17 présente une section 2D Est-Ouest traversant la zone, comparée à une section extraite du modèle de densité obtenu par gravimétrie. La comparaison des deux méthodes apporte de la robustesse à l'interprétation.

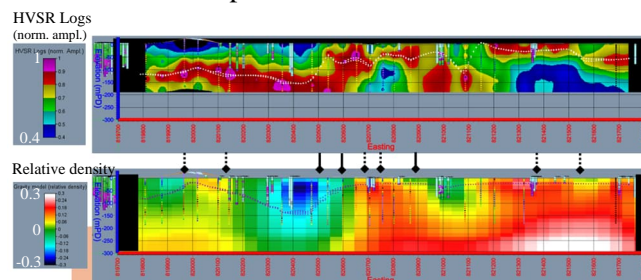


Figure 17. Section 2D HVSR (haut) vs. section 2D du modèle de densité (bas), zone Town Centre

5 INTERPRETATION ET SYNTHÈSE DES RESULTATS

5.1 Zone d'aquaculture (Nord) et ville nouvelle (Sud)

Deux résultats majeurs sont obtenus :

- Une carte du toit du bedrock (Figure 18), obtenue grâce à l'analyse de l'anomalie résiduelle, étalonnée par comparaison empirique avec la base de données de sondages. L'approche empirique utilisée est similaire à l'approche ITRESC (Florio, 2020) : avec cette approche, il n'est pas nécessaire de définir au préalable une fonction de densité. La méthode repose sur l'analyse croisée entre la profondeur du bedrock, connue en différents

points de contrôle (obtenues par analyse des données de forage obtenues auprès du portail GEO Open Data du Gouvernement) et les valeurs de l'anomalie gravimétrique résiduelle, permettant d'établir leur relation fonctionnelle.

- Une carte structurale et des sections 2D interprétées (Figure 19) obtenues grâce à l'analyse des linéaments gravimétriques et à l'inversion 3D des données.

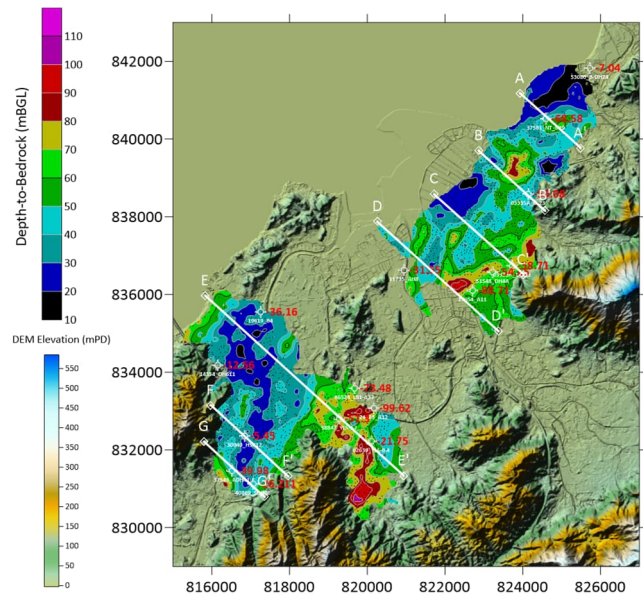


Figure 18. Carte de la profondeur du bedrock (zone d'aquaculture et ville nouvelle)

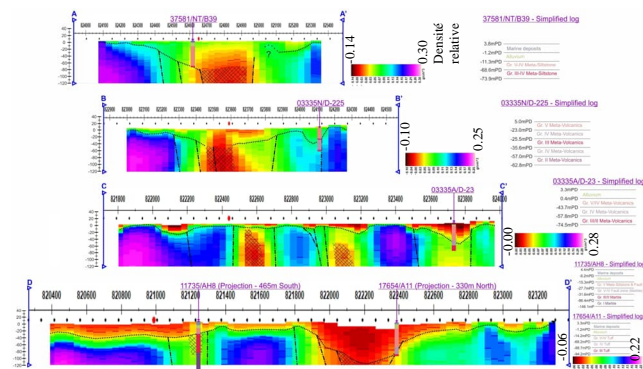


Figure 19. Sections 2D interprétées (zone d'aquaculture)

5.2 Zone town Centre

- Le contexte géologique complexe, avec des matériaux de couvertures reposant sur des roches sédimentaires métamorphisées, et la présence de marbre karstifié en profondeur, a nécessité une analyse détaillée et comparée des différents résultats. Des sections interprétées regroupant les interfaces HVSR et l'analyse du modèle de densité ont permis de définir l'organisation des différentes unités géologiques, étalonné par comparaison

empirique avec la base de données de sondages (Figure 20),

- Une analyse particulière par filtrage (différence médiane) a permis d'extraire des données gravimétriques les déficits de masse localisés, interprétés comme des indices de cavité élevés. comparaison empirique avec la base de données de sondages (Figure 21).

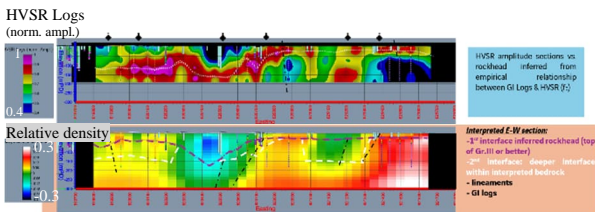


Figure 20. Section 2D Est-Ouest interprétée (zone Town centre)

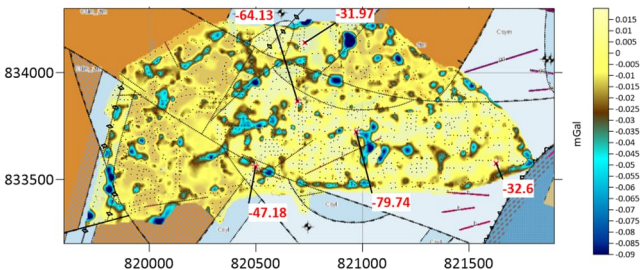


Figure 21. Indices de cavité forts (zone Town centre)

6 CONCLUSIONS

Dans un contexte urbain dense ou rural peu accessible, où les méthodes géophysiques conventionnelles et la réalisation de nouveaux sondages sont souvent limitées par les contraintes d'autorisation et les restrictions environnementales, l'utilisation de techniques géophysiques légères et peu intrusives offre une alternative opérationnelle pour caractériser le sous-sol en profondeur.

Le croisement des cartes et sections 2D issues des données HVSr et gravimétriques a permis d'obtenir une vision intégrée de la géométrie du substratum, des structures profondes et du risque cavité. Ces éléments constituent une base solide pour la définition d'un modèle géologique synthétique, exploitable dès les phases amont de planification, particulièrement dans des environnements où l'accès aux investigations profondes est restreint.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

SESAME European research project. (2004). Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations Measurements, Processing, and Interpretation*.

European Commission – Research General Directorate Project No. EVG1-CT-2000-00026 SESAME.

Florio, Giovanni. “The Estimation of Depth to Basement Under Sedimentary Basins from Gravity Data: Review of Approaches and the ITRESC Method, with an Application to the Yucca Flat Basin (Nevada).” *Surveys in Geophysics*, vol. 41, no. 5, Sept. 2020, pp. 935–61. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1007/s10712-020-09601-9>.

Johnson, Carole, and John Lane. “STATISTICAL COMPARISON OF METHODS FOR ESTIMATING SEDIMENT THICKNESS FROM HORIZONTAL-TO-VERTICAL SPECTRAL RATIO (HVSr) SEISMIC METHODS: AN EXAMPLE FROM TYLERVILLE, CONNECTICUT, USA.” *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2016* [Denver, Colorado, USA], 2016, pp. 317–23. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.4133/SAGEEP.29-057>.

Moon, Sung-Woo, et al. “Bedrock Depth Evaluation Using Microtremor Measurement: Empirical Guidelines at Weathered Granite Formation in Singapore.” *Journal of Applied Geophysics*, vol. 171, Dec. 2019, p. 103866. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103866>.

Thabet, Mostafa. “Site-Specific Relationships between Bedrock Depth and HVSr Fundamental Resonance Frequency Using KiK-NET Data from Japan.” *Pure and Applied Geophysics*, vol. 176, no. 11, Nov. 2019, pp. 4809–31. Springer Link, <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02256-7>.

Tün, M., et al. “An Investigation into the Bedrock Depth in the Eskisehir Quaternary Basin (Turkey) Using the Microtremor Method.” *Geophysical Journal International*, vol. 207, no. 1, Oct. 2016, pp. 589–607. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1093/gji/ggw294>.