

Caractérisation de sites après un événement extrême par couplage des techniques géophysiques et d'essais géotechniques innovants : application à la ville de Golbasi (Adiyaman, Turquie) après les séismes du 6 février 2023

Espinoza Escudero Sergio¹, Denis Moiriat², Benz Navarrete Miguel Angel³, Rojas Vivanco Jorge Andres¹, Tran Quoc Anh³, Philippe Reiffsteck⁴, Pierre Breul⁵, Didier Combescure⁶, Carolina Franco⁶ and Gabriel Villavicencio Arancibia¹

¹*Pontificia Universidad Católica de Valparaíso – Avenida Brasil 2950, Valparaíso, Chili*

²*Service de Caractérisation des Aléas Naturels– Autorité de Sureté Nucléaire et de Radioprotection (ASNR)– F-92120, Montrouge, France*

³*Research, Development and Innovation Departement. Sol Solution– Sol Solution– 23 Avenue Georges Gershwin. 63204, Riom, France*

⁴*Laboratoire Sols, Roches et Ouvrages Géotechniques– Université Gustave Eiffel– 14-20 Boulevard Newton Cite Descartes, Champs sur Marne F-77447 Marne la Vallée, France*

⁵*Institut Pascal, Université Clermont Auvergne, Aubière Cedex, France*

⁶*Association Française du Génie Parasismique (AFPS)*

**espinoza.sergioivan181@gmail.com*

RESUME : Cette étude propose une approche intégrée associant des méthodes géotechniques (iDCPT) et géophysiques (HVSr, 2D-MASW, MAM) pour la caractérisation des sols en contexte post-sismique. La méthodologie a été appliquée à la ville de Gölbaşı (Turquie), affectée par des phénomènes de liquéfaction à la suite des séismes du 6 février 2023 ($M_w \geq 7,5$). La combinaison de ces techniques permet d'établir des profils détaillés de la résistance des sols et de la vitesse des ondes de cisaillement, ainsi que des modèles unidimensionnels et bidimensionnels restituant la variabilité verticale et latérale du sous-sol. Les résultats mettent en évidence la pertinence de cette approche pour produire des diagnostics rapides, fiables et économiquement accessibles en phase post-catastrophe, tout en améliorant la compréhension de l'hétérogénéité spatiale des sols et de son influence sur le comportement sismique des infrastructures.

ABSTRACT: This study proposes an integrated approach combining geotechnical methods (iDCPT) and geophysical techniques (HVSr, 2D-MASW, MAM) for post-seismic soil characterization. The methodology was applied to the city of Gölbaşı (Turkey), which was affected by soil liquefaction following the February 6, 2023 earthquakes ($M_w \geq 7.5$). The joint implementation of these techniques enables the derivation of detailed profiles of soil resistance and shear wave velocity, as well as one-dimensional and two-dimensional models capturing both vertical and lateral subsurface variability. The results highlight the relevance of this approach for delivering rapid, reliable, and cost-effective diagnostics in post-disaster contexts, while enhancing the understanding of spatial soil heterogeneity and its influence on the seismic response of infrastructures.

Mots-clés: Séisme, géophysique, géotechnique, liquéfaction, penetromètre, CPT, Panda, HVSr, MASW, Lateral spreading.

1 INTRODUCTION

Dans le domaine du génie civil et du génie parasismique, l'analyse des effets des séismes sur les infrastructures constitue un enjeu majeur pour la compréhension et la réduction des risques associés. Parmi les mécanismes clés étudiés figurent la liquéfaction des sols, les déplacements latéraux et la variabilité spatiale de la réponse sismique des terrains. Dans ce contexte, de nombreuses organisations internationales et institutions de recherche conduisent des missions de reconnaissance post-sismique visant

non seulement à évaluer l'ampleur et la nature des dommages structurels et géotechniques, mais également à collecter des données permettant de mieux appréhender la réponse sismique locale et d'améliorer les modèles prédictifs existants.

Au cours des dernières années, plusieurs séismes majeurs ont marqué l'actualité, notamment celui de Petrinja en Croatie en 2020 ($M_w \approx 6,4$) et celui de Türkiye–Syrie en février 2023 ($M_w \geq 7,5$), tous deux à l'origine de dommages structurels significatifs et de pertes humaines considérables. Ces événements ont

donné lieu à des campagnes de reconnaissance géotechnique dédiées à l'évaluation et à la caractérisation du comportement dynamique des sols superficiels dans les zones affectées, en mettant en évidence les phénomènes de liquéfaction et leurs conséquences associées, telles que les tassements différentiels, les déplacements latéraux et la subsidence du terrain. Dans ce contexte, des campagnes de recherche ont été menées en Türkiye en 2024, notamment dans la ville de Gölbaşı, située à proximité d'Adıyaman, qui a subi des tassements significatifs attribués à la faible capacité portante des sols en lien avec des phénomènes de liquéfaction (Cetin et al., 2024; Onder Cetin et al., 2024).

Cet article présente une synthèse de la campagne d'essais ainsi que des équipements géotechniques et géophysiques mobilisés, en mettant en évidence l'intérêt de la combinaison entre les méthodes conventionnelles et l'utilisation d'un pénétromètre dynamique instrumenté (iDCPT), afin d'enrichir et de renforcer les informations acquises in-situ.

2 MÉTHODE UTILISÉE

Les méthodes portables fournissent des mesures précises et reproductibles, aussi bien en profondeur que selon une distribution spatiale étendue. Les techniques géophysiques permettent, quant à elles, d'investiguer de larges volumes de sol, mais au prix d'une résolution verticale généralement limitée. À l'inverse, les forages géotechniques offrent des données ponctuelles de haute précision ; toutefois, leur mise en œuvre peut s'avérer difficile dans les zones sinistrées, en raison de contraintes logistiques ou d'accès. Ainsi, la combinaison de méthodes géophysiques, telles que le MASW ou le HVSR ; avec des pénétromètres dynamiques instrumentés (iDCPT) permet de réaliser des caractérisations de site rapides, fiables et économiquement accessibles (Sastre et al., 2021; Villavicencio et al., 2011).

2.1 L'essai de pénétration dynamique (iDCPT)

Le pénétromètre dynamique instrumenté Panda® (Gourvès, 1992), dorénavant dit iDCPT, peut explorer le sol jusqu'à des profondeurs de 10 à 15 m, voire davantage dans les sols mous. En particulier, l'iDCPT développé en France (Figure 1), offre des solutions polyvalentes et économiques permettant de collecter de grands volumes de données du terrain. Le principe fondamental de son fonctionnement, présenté par Benz et al. (2024), repose sur le paramètre (qd), que plusieurs études ont montré comme fortement corrélé à la résistance au cône CPT (qc) et, par conséquent, au

nombre de coups du SPT. Des recherches récentes ont démontré que la combinaison avec des équations d'ondes améliore significativement l'interprétation des données obtenues à l'aide de pénétromètres dynamiques, permettant des estimations fiables de la résistance du sol, de la vitesse de l'onde de cisaillement et du module de sol à l'aide du iDCPT (M. Benz et al., 2022). Le principal avantage de cet équipement réside dans sa portabilité et sa facilité d'utilisation, car il permet de réaliser de nombreux essais sur différents emplacements. Pesant environ 20 kg, l'iDCPT permet l'enregistrement en temps réel du profil de résistance de pointe. Pour une description plus détaillée de son fonctionnement et de ses applications, on se réfère à la littérature disponible.

2.2 Essais géophysiques: MASW et HVSR

Les méthodes géophysiques de surface, telles que le MASW (Analyse Multicanal des Ondes de Surface), le MAM (Méthode des micro-tremblements avec Réseau) et le HVSR (Rapport Spectral Horizontal-Vertical), sont également des techniques légères, portables et bien adaptées aux environnements post-catastrophe. Ces méthodes non invasives permettent d'étudier les conditions du sous-sol sur de vastes zones avec des contraintes logistiques limitées.

Le MASW est une technique sismique active qui analyse la dispersion des ondes de surface générées par une source contrôlée (Figure 1). En enregistrant les champs d'ondes le long d'un réseau linéaire de géophones et en effectuant une inversion 2D, le MASW fournit des profils 2D spatiaux continus de la vitesse des ondes de cisaillement (V_s). Cette technique est particulièrement efficace pour identifier les variations latérales et verticales de la rigidité du sol et détecter les hétérogénéités proches de la surface. Le MAM est une technique sismique passive qui utilise les micro-tremblements environnementaux enregistrés sur de petits réseaux pour analyser la dispersion des ondes de surface. Contrairement au MASW, dont la profondeur d'investigation est limitée par l'énergie de la source et la longueur du réseau, le MAM peut explorer des structures de sol plus profondes, constituant ainsi un complément efficace pour identifier les stratigraphies profondes et ajuster les profils V_s dans les bassins sédimentaires épais.

Le HVSR est une autre technique sismique passive basée sur les vibrations environnementales. Elle calcule le rapport entre les amplitudes spectrales horizontales et verticales pour identifier les fréquences de résonance associées à des contrastes d'impédance sismique. Cette technique est couramment utilisée pour déterminer la fréquence fondamentale du sol.



Figure 1. Essais géophysiques et géotechniques portables : (a) HVSR, (b) iDCPT (Panda), (c-d) iDCPT (Panda) et mesures 2D-MASW. Illustrations des mesures iDCPT (Panda®) et 2DMASW réalisées à Gölbaşı (Türkiye) en mai 2024

Elle s'avère particulièrement efficace pour estimer la profondeur du substratum ou de contrastes lithologiques marqués à partir de mesures ponctuelles, y compris en milieu urbain ou dans des zones difficiles d'accès. Par ailleurs, son efficacité opérationnelle a été confirmée dans plusieurs contextes d'ingénierie sismique, notamment au cours des missions post-sismiques menées par l'AFPS au Mexique en 2017 et en Albanie en 2019. (Nazé et al., 2022).

2.3 Présentation du site et des essais

La ville de Gölbaşı, située dans la dépression du même nom qui s'étend sur environ 30 km le long d'une branche de la faille active de l'Anatolie orientale (EAFZ), a subi d'importants dégâts humains et matériels lors du séisme de février 2023, en particulier dans la partie basse de la ville, entre 880 et 910 m d'altitude, construite principalement sur des sols alluviaux et lacustres quaternaires. L'activité tectonique le long de l'EAFZ entraîne une subsidence de cette plaine à un taux d'environ 10 mm/an, tandis que les taux de déplacement le long des segments d'Erkenek et de Pazarcık sont légèrement inférieurs, autour de 7,5 mm/an (Moss et al., 2025; Moug et al., 2023; Onder Cetin et al., 2024; Yönlü et al., 2013).

Cette région a été affectée par plusieurs séismes de forte magnitude dans le passé, comme le soulignent (Duman et al., 2018). Les événements les plus forts récemment enregistrés se sont produits le 6 février 2023 : d'abord le séisme de Pazarcık ($M_w = 7,8$), suivi quelques heures plus tard par celui d'Elbistan ($M_w = 7,6$), avec des profondeurs focales de 8,6 km et 7 km, respectivement. Par la suite, plus de 400 répliques de magnitude supérieure à 4 M_w ont été enregistrées, provoquant des dommages importants aux bâtiments, aux systèmes de transport, aux ouvrages de terre, aux ports et aux réseaux de gaz, d'eau et d'électricité, comme rapporté dans plusieurs études post-sismiques (Çetin et al., 2023; Moug et al., 2023).

Dans le cas particulier de Gölbaşı, environ 60 % des bâtiments du centre-ville se sont effondrés et la plupart des structures restantes ont été gravement endommagées (Moss et al., 2025; Onder Cetin et al., 2024). Des déformations généralisées du sol induites par la liquéfaction, incluant des tassements et des déplacements latéraux, ont affecté la ville et les zones proches du lac Gölbaşı. Ces déformations ont provoqué l'inclinaison et le renversement des bâtiments, en particulier ceux de 5 à 7 étages. De plus, des ruptures superficielles associées à un mouvement de cisaillement latéral gauche ont été clairement observées le long de la ville (Figure 2).

2.4 Essais de terrain réalisés à Gölbaşı

En 2024, une campagne de recherche de cinq jours a été menée à Gölbaşı, en considérant trois sites spécifiques (sites 1 à 3 sur la Figure 2), où des déplacements latéraux ont été observés, en particulier aux sites 1 et 2. Lors de cette campagne, un plus grand nombre d'essais iDCPT et de tests géophysiques ont été réalisés, permettant d'évaluer la couche superficielle du sol et d'établir des corrélations entre la résistance au cône (qd) et la vitesse de l'onde de cisaillement (V_s).

Un total de 9 profils 2D-MASW/MAM, 74 points HVSR et 61 iDCPT ont été effectués. Chaque essai iDCPT incluait des mesures de couple à chaque incrément d'avancement de la tige afin d'évaluer l'influence du frottement entre la tige et le sol. Les valeurs de couple sont restées constamment faibles (< 6 Nm), confirmant une résistance minimale sur le fût et assurant la fiabilité des lectures de qd .

De plus, avant et après la campagne de terrain, une révision exhaustive des données publiées pour la zone de Gölbaşı a été réalisée, permettant de compiler un ensemble de données comprenant 31 profils Cone Penetration Test (CPT) et Piézocône (CPTu), 9 essais SPT, 4 profils MASW et 136 mesures HVSR.

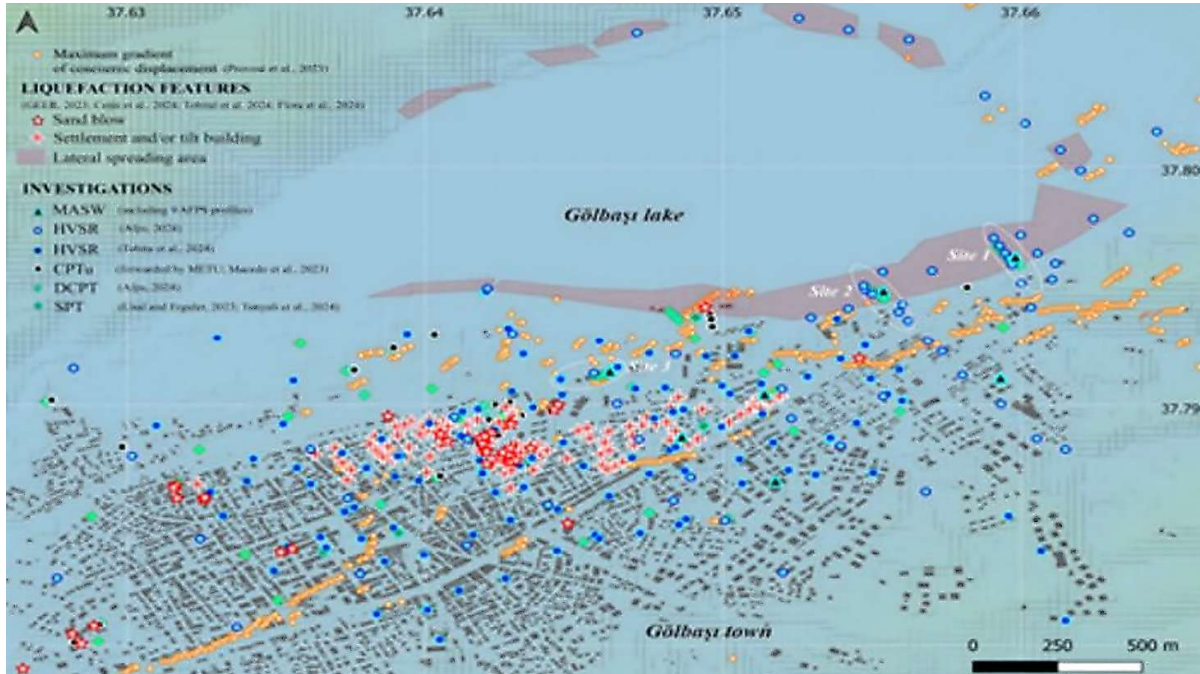


Figure 2. Localisation des investigations à Gölbaşı (Turquie) et indices de liquéfaction ($M_W \geq 7,5$). Points jaunes : déplacements maximaux ; étoiles rouges : sand blows ; points rouges : tassements et bâtiments fortement endommagés. Les polygones mauves indiquent les zones de lateral spreading. Les autres marqueurs correspondent aux mesures acquises (MASW, HVSR, iDCPT...).

Ces données se trouvent principalement dans (Çetin et al., 2024; Flora et al., 2024; Milev et al., 2024; Moss et al., 2025; Moug et al., 2023; Onder Cetin et al., 2024; Tonyalı et al., 2024; Ünal, 2023), ou sont disponibles en téléchargement (CPTs via (Macedo et al., 2025) et HVSRs via (Tobita et al., 2024)), et ont même été fournies par le METU-Ankara (9 CPTus réalisés en 2023). Ces informations ont contribué à une meilleure compréhension des conditions du sous-sol, fournissant un cadre de référence pour l'interprétation et la validation des résultats récemment acquis (Figure 2). De même, toutes ces données ont été géoréférencées, permettant une intégration spatiale précise et facilitant l'élaboration de cartes détaillées ainsi que la réalisation de corrélations.

2.5 Analyse des données

L'objectif principal a été la constitution d'une base de données d'essais géophysiques et géotechniques sur les sites mentionnés, permettant de collecter des informations dans des zones affectées par des catastrophes, de réaliser des analyses croisées, de comparer les résultats et d'établir des corrélations in situ. Cette approche augmente la quantité d'informations utiles extraites et contribue à une meilleure compréhension du comportement du sol superficiel, tout en fournissant des estimations des paramètres géotechniques clés pertinents pour les études de liquéfaction. Dans un premier temps, après

avoir organisé et structuré l'ensemble des données disponibles, une analyse de corrélation entre les principaux paramètres mesurés est proposée. Par la suite, l'accent est mis sur la distribution spatiale des mesures et sur la modélisation de la variabilité spatiale des propriétés déduites. Les résultats présentés ici proviennent principalement de la ville de Gölbaşı, où la plus grande concentration d'essais a été réalisée. De plus, des données de Mala Gorica (Croatie) sont également prises en compte uniquement pour affiner davantage les corrélations entre les mesures géotechniques et géophysiques, étant donné que le comportement du sol et sa typologie sont similaires.

2.6 Profils de sol de Gölbaşı

Les profils de sol identifiés dans la ville de Gölbaşı présentent une variabilité spatiale importante, tant en termes de nature que de stratigraphie (Figure 3). Alors que les couches superficielles sont souvent principalement composées de sols fins (argiles) avec une plasticité variable (Argiles de plasticité faible (CL) à argiles de grande plasticité (CH)), plusieurs études ont signalé la présence de couches liquéfiables interstratifiées avec d'épais dépôts argileux — ce qui pourrait expliquer les nombreuses éjections de sable (*sand boils*) observées immédiatement après le séisme (Onder Cetin et al., 2024). Cette variabilité reflète les séquences de dépôt et les sources sédimentaires diverses caractéristiques d'un environnement de sédimentation alluvial et lacustre.

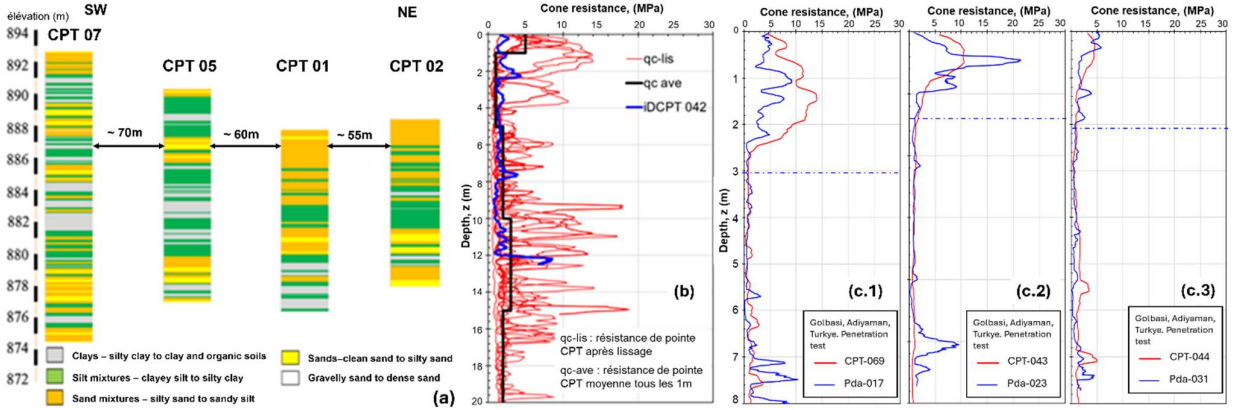


Figure 3. (a) Variabilité des sols basée sur le Soil Behavior Type (SBT) à partir des CPT dans le centre-ville de Gölbasi ; (b) Comparaison des profils CPT et iDCPT montrant une forte variation verticale de la résistance CPT ; et (c) Comparaisons entre les résistances dynamiques (iDCPT) et statiques (CPT) mesurées in-situ à Gölbasi, Türkiye.

De manière remarquable, un grand nombre de propriétés du sol ne répondent pas aux critères conventionnels de susceptibilité à la liquéfaction ; cependant, des preuves de liquéfaction ont été documentées à plusieurs endroits de la ville (c.f. Figure 1). La profondeur de la nappe généralement été observée entre 0 et 4 mètres dans l'ensemble de la zone étudiée, à proximité du lac.

2.7 Résultats des essais de pénétration à Gölbasi et comparaison

Les iDCPT ont été spatialement répartis afin d'assurer une couverture étendue de la zone d'étude. Un ensemble dense d'essais a été réalisé conjointement aux profils sismiques 2DMASW/MAM pour améliorer la caractérisation des sols superficiels et permettre une corrélation robuste entre q_d et V_s (Sites 1 à 3, cf. Figure 2). Les CPT et iDCPT ont également été analysés ensemble afin d'enrichir la base de données géotechnique intégrée.

Les résultats de CPT et d'iDCPT révèlent une variabilité verticale significative de la résistance de pointe du cône (Figure 3). Près de la surface (0–1 m), les valeurs de résistance atteignent environ 5 MPa, suivies d'une diminution marquée jusqu'à environ 1 MPa entre 1 et 5 m. Entre 5 et 10 m, la résistance augmente jusqu'à une moyenne de 2 MPa, culminant à 3 MPa entre 10 et 15 m, avant de diminuer à nouveau vers 2 MPa entre 15 et 20 m. Cela met en évidence l'hétérogénéité spatiale et stratigraphique des matériaux du sous-sol, illustrée dans la Figure 3, qui présente à la fois les profils CPT et les mesures iDCPT les plus profondes.

La Figure 3 présente trois exemples de profils de résistance à la pénétration obtenus par iDCPT et CPT réalisés à proximité l'un de l'autre. Les résultats montrent une bonne concordance entre les deux méthodes, tout en soulignant la résolution verticale

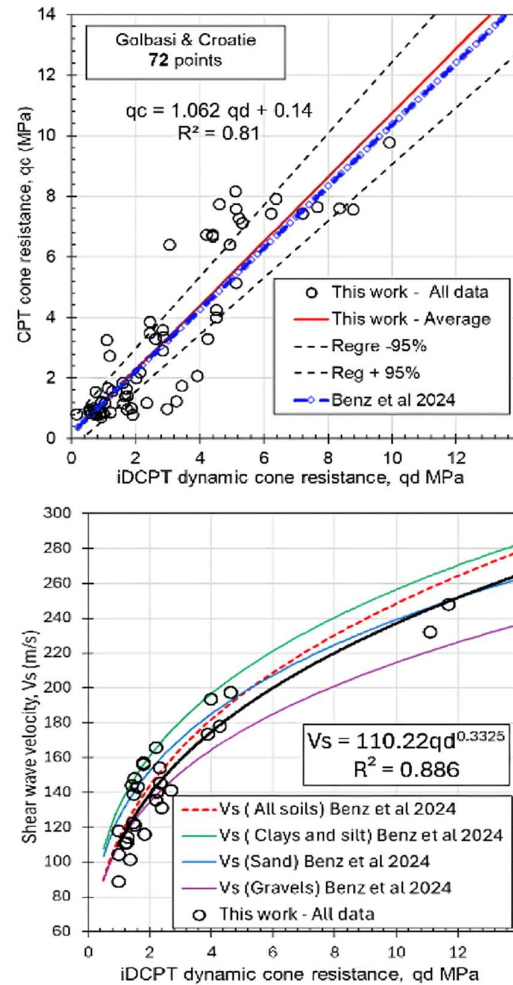


Figure 4. Relation entre les résistances de pointe iDCPT–CPT (en haut), et relation q_d – V_s (en bas).

Dans la Figure 5 on présente un exemple des résultats HVSR, correspondant à la courbe HVSR et les résonances directionnelles.

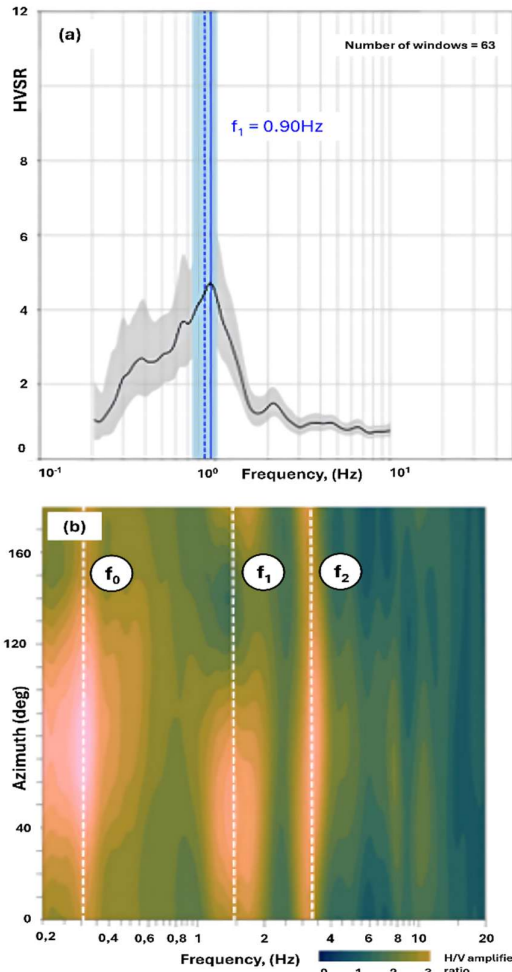


Figure 5. Exemples de résultats HVSR. (a) Courbe HVSR (pic f_1 , station n°50_04) et (b) Résonances directionnelles (station n°51_08).

De manière générale, les résonances directionnelles (Figure 5.b) correspondent à des variations de la fréquence ou de l'amplitude du pic HVSR en fonction de la direction horizontale analysée. Elles reflètent la présence d'effets 2D/3D, d'anisotropies latérales ou de contrastes d'impédance orientés dans le sous-sol.

Or, la fréquence dominante (f_0) correspond à une interface profonde, vraisemblablement le substratum rocheux (calcaire éocène décrit dans (Yönlü et al., 2013), et varie entre 0,5 Hz et 0,3 Hz, avec des azimuts orientés dans la direction de l'axe du bassin, subparallèle à celui de l'EAFZ. Le second pic de fréquence (f_1), autour de 0,95 Hz (Figure 5.a), varie entre 0,7 Hz et 1,5 Hz. Ce pic f_1 , présent dans l'ensemble du bassin de Gölbaşı, montre des azimuts variables à proximité de la faille EAFZ et nécessite une analyse complémentaire. Le troisième pic (f_2), dont l'amplitude diminue régulièrement depuis les collines situées au-dessus de 920 m d'altitude ($f_2 > 5$ Hz)

jusqu'aux rives du lac à 880–890 m d'altitude, atteignant 1,3 Hz (Figure 6), peut être associé au remplissage sédimentaire probablement holocène, dont l'épaisseur augmente des collines vers le lac. Cela est cohérent avec le contexte géologique et concorde avec les travaux d'autres chercheurs. Le nombre limité de valeurs f_2 permet d'en analyser les polarisations (c.f. Figure 5.b). La Figure 6 montre que les occurrences de liquéfaction ou leurs conséquences semblent se distribuer spatialement sous des valeurs de f_2 de 2–3 Hz, à partir d'une certaine épaisseur du remplissage sédimentaire.

Cependant, les dommages aux bâtiments, y compris ceux causés par la liquéfaction, s'étendent également en partie le long de l'EAFZ, qui traverse la ville de Gölbaşı selon une direction sud-ouest–nord-est. À cet égard, il convient de noter que les ruptures superficielles et les images aériennes mettent en évidence au moins deux segments de faille qui ont joué en février 2023 : l'un correspondant à une partie du segment EAFZ (f_1 sur la Figure 6) et un autre, décrochant sénestre d'orientation approximativement nord–sud, passant près des rives du lac (F2 sur la Figure 5), décrits en détail dans (Pucci et al., 2025).

2.8 Résultats MASW 2D et MAM

Dans la partie basse de la ville et le long de la rive du lac, les mesures de vitesse des ondes de cisaillement indiquent des valeurs de V_s d'environ ~ 150 m/s jusqu'à une profondeur de 15 m. En intégrant les techniques 2D-MASW et MAM, la vitesse moyenne sur toute la profondeur investiguée (~ 45 m) est estimée à ~ 174 m/s. Les valeurs de V_{S30} calculées pour les sites 1 à 3 (cf. Figure 3) varient entre ~ 155 m/s et 178 m/s, les classant majoritairement en catégorie de site E (sols mous). En croisant les valeurs de V_s avec les mesures HVSR (le pic de fréquence f_2 sur la Figure 6), on déduit une épaisseur sédimentaire supérieure à 30 m près de la rive du lac.

Les profils MASW 2D, réalisés à des emplacements clés présentant des indices de *lateral spreading* (déformation latérale du sol), ont permis d'identifier des zones de « décompression ». Pour améliorer la robustesse des inversions de V_s , un nombre important d'iDCPT a ensuite été réalisé le long de chaque profil.

La Figure 6 montre les résultats du site 2 et met en évidence une zone de « décompression », corroborée par une réduction marquée de la résistance de pointe dans les 5 premiers mètres, indicative d'un affaiblissement superficiel probablement induit par un déplacement latéral du sol.

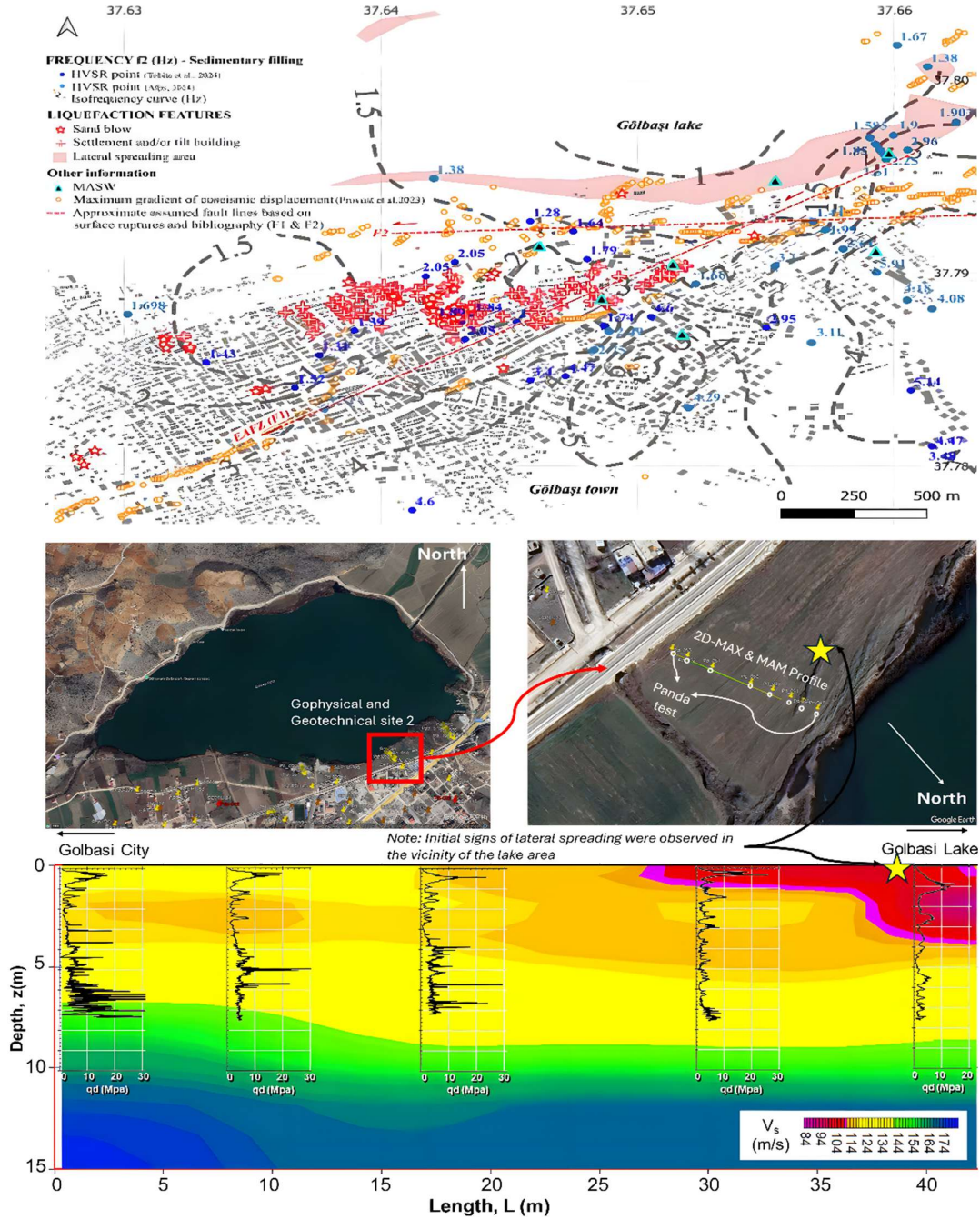


Figure 6. (en haut) Schéma du remplissage sédimentaire superficiel et des courbes d'iso-fréquence (Hz) d'après les analyses HVSR sous la ville de Gölbaşı, et (en base) profil MASW 2D et sondages iDCPT réalisés sur le site 2 dans une zone de lateral spreading. Gölbaşı (Turquie)

Par ailleurs, des corrélations empiriques ont été développées entre les valeurs de qd et de V_s dérivées aux trois sites 1 à 3. Ces jeux de données ont également été complétés par des mesures supplémentaires provenant de Mala Gorica (Croatie) (Moiriat et al., 2023), et comparés aux corrélations de référence disponibles dans la littérature (Benz et al., 2024) (c.f. Figure 4). Malgré une dispersion notable, les résultats se situent globalement dans les enveloppes de

tendance attendues, et la relation obtenue sera ensuite utilisée pour interpoler spatialement les valeurs de V_s sur l'ensemble de la zone de Gölbaşı, améliorant la résolution de la caractérisation sismique du site.

2.9 Modélisation de la variabilité spatiale

La variabilité verticale et horizontale de qd et qc a été évaluée à l'aide d'indicateurs statistiques tels que l'indice d'entropie de Shannon (Sastre et al. 2018).



Figure 7. Variabilité de la résistance au cône obtenue à partir des essais iDCPT et CPT. Indice de Shannon normalisé – Gölbaşı (Turquie).

Il permet de saisir les fluctuations verticales de la résistance du sol le long des profils en profondeur. La variabilité horizontale a également été évaluée à l'aide de l'indice de variabilité horizontale (HVI), tel que proposé par (Sastre et al., 2021). Ces deux indicateurs fournissent un cadre robuste pour caractériser l'hétérogénéité du sous-sol, améliorant ainsi l'interprétation du comportement des sols superficiels dans la zone étudiée. La modélisation spatiale des valeurs obtenues a été réalisée à l'aide du krigeage classique.

Enfin, sans être exhaustive et dans le cadre d'une première analyse de cette vaste campagne, les résultats intégrés des méthodes géophysiques et géotechniques révèlent une hétérogénéité multi-échelle marquée des dépôts alluviaux et lacustres de la plaine de Gölbaşı, tant en profondeur qu'à l'horizontale. Les variations de résistance dynamique (q_d), de résistance statique (q_c), des vitesses d'ondes de cisaillement (V_s) et des fréquences de résonance issues des mesures HVSR mettent en évidence un milieu sédimentaire dont l'épaisseur et la composition évoluent fortement depuis les zones collinaires vers la rive du lac. Cette variabilité est confirmée par les profils MASW 2D, les cartes d'iso-fréquences et les analyses statistiques, et correspond étroitement à la distribution des dommages structuraux, aux zones de liquéfaction et aux phénomènes de lateral spreading observés après les séismes de 2023. Ces observations suggèrent que la structure interne du sous-sol, fortement hétérogène, a joué un rôle majeur dans l'amplification locale du mouvement sismique et dans les mécanismes de rupture enregistrés. Elles soulignent la nécessité d'une caractérisation fine des conditions de site pour comprendre le comportement dynamique des terrains dans des environnements sédimentaires complexes soumis à une sollicitation sismique intense.

3 CONCLUSIONS

Cette étude met en évidence la faisabilité et l'efficacité d'une approche intégrée combinant des techniques portables et à déploiement rapide pour la caractérisation post-sismique des sites en environnements difficiles d'accès. Les campagnes de terrain ont été conduites à Gölbaşı (Turquie) à l'aide d'équipements légers, incluant un pénétromètre dynamique instrumenté (iDCPT), l'analyse des ondes de surface (MASW) et des méthodes fondées sur le bruit ambiant (MAM et HVSR).

À Gölbaşı, les données acquises révèlent une variabilité verticale et latérale marquée des conditions du sous-sol, en lien avec l'hétérogénéité des dépôts alluviaux et lacustres dominants dans la partie basse de la ville. Trois pics de fréquence de résonance ont été identifiés à l'échelle urbaine : un premier, vraisemblablement associé à l'interface avec le substratum rocheux (f_0), autour de 0,36 Hz ; un second (f_1), proche de 0,95 Hz, dont les directions de résonance apparaissent perturbées à proximité de la trace de la faille EAFZ ; et un troisième (f_2), atteignant environ 1 Hz, plus variable et correspondant à l'augmentation de l'épaisseur sédimentaire depuis les zones collinaires vers les rives du lac. Cette interprétation demeure préliminaire et devra être confirmée par des investigations complémentaires.

Dans la partie basse de la ville, les sols présentent globalement une rigidité faible à moyenne, caractérisée par des vitesses des ondes de cisaillement inférieures à 150 m/s dans les 10 premiers mètres et par des résistances au cône proches de 2 MPa. L'iDCPT a permis d'atteindre une profondeur maximale de 12,5 m, tandis que l'intégration des méthodes MASW et MAM a conduit à l'établissement de profils de vitesse des ondes de cisaillement jusqu'à 45 m de profondeur. Dans les zones investiguées, les valeurs moyennes de V_{s30} inférieures à 180 m/s correspondent à des sols très mous, confirmant des conditions géotechniques défavorables.

La corrélation croisée entre les résultats issus de l'iDCPT, des mesures CPT et des profils MASW (V_s) montre une forte concordance, renforçant la fiabilité et la valeur ajoutée de l'iDCPT en tant qu'outil de diagnostic pour les évaluations post-sismiques. Les corrélations proposées dans cette étude doivent toutefois être interprétées dans les limites du jeu de données disponible, à savoir des résistances q_d ou q_c comprises entre 1 et 14 MPa et des vitesses d'ondes de cisaillement variant entre 80 et 240 m/s. Leur validité en profondeur s'étend de 0 à 12 m pour les essais de pénétration et de 0 à 7 m pour la relation q_d-V_s . Des investigations complémentaires, incluant notamment des essais de type DPSH (Benz et al., 2024; Benz et

al., 2019) permettant d'atteindre des profondeurs supérieures, seront nécessaires pour étendre et consolider ces relations empiriques.

Cette approche intégrée et à coût maîtrisé permet une caractérisation détaillée des conditions de site, indispensable à l'évaluation de la susceptibilité à la liquéfaction et à l'identification de mécanismes de rupture du sol, tels que le déplacement latéral (*lateral spreading*). À terme, ces investigations pourraient être enrichies par la corrélation avec des technologies portables complémentaire, telles que le LiDAR ou l'imagerie par drone (UAV), afin d'améliorer la compréhension des mécanismes de déformation du sol, de glissement latéral et d'endommagement des structures. Enfin, le développement de modèles probabilistes tridimensionnels des indicateurs géotechniques dans les couches superficielles apparaît comme une perspective prometteuse pour de futures recherches fondées sur l'ensemble des données.

REMERCIEMENTS

Les auteurs expriment leur gratitude aux autorités françaises et turques, à l'AFPS (France), à la METU Ankara (Turquie), ainsi qu'à l'entreprise Sol Solution et à l'Autorité de Sûreté Nucléaire et de Radioprotection (ASNR), pour le soutien technique, scientifique, financier et logistique apporté à cette étude.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Benz, M. A., Breul, P., Tran, Q. A., Forestti, C., & Luong, T. A. (2024). Lighthweight and heavy-duty instrumented, servo assisted dynamic cone penetrometers for shallow soil characterisation. 7th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization (ISC 2024), June, 18–21. <https://doi.org/10.23967/isc.2024.264>
- Benz, M., Breul, P., & Gourvès, R. (2022). Application of wave equation theory to improve dynamic cone penetration test for shallow soil characterisation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(1), 289–302. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.07.004>
- Benz, M., Breul, P., Villavicencio, G., Moustan, P., & Teissier, L. (2024). a Review of 30 Years of French Instrumented Dynamic Cone Penetrometer Panda. *Proceedings of the 7th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization*, June, 18–21.
- Benz Navarrete, M. A., Breul, P., & Moustan, P. (2019). Servo-Assisted and Computer-Controlled Variable Energy Dynamic Super Heavy Penetrometer. *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons Learned and Future Challenges*, 0, 65–72. <https://doi.org/10.3233/STAL190024>
- Çetin, Jonathan D. Bray, J. David Frost, Ayse Hortacsu, Eduardo Miranda, Robb Eric S. Moss, & Jonathan P. Stewart. (2023). February 6, 2023 Türkiye Earthquakes: Report on Geoscience and Engineering Impacts. <https://doi.org/10.18118/G6PM34>
- Çetin, K. ., Moug, D., Soylemez, B., Ayhan, B., Zarzour, M., Suhaily, A., Akil, B., Unutmaz, B., Firat, S., Tekin, E., Çakır, E., Frost, D., Macedo, J., Bray, J., Moss, R., Bassal, P., Gurbuz, A., Işık, N. S., Akin, M., & Duman, E. (2024). Ground failures and foundation performances in Adıyaman–Gölbaşı following the 6 February 2023 Kahramanmaraş–Türkiye. *Earthquake Spectra*, Vol. (41), 41 p.
- Cetin, K. O., Soylemez, B., Guzel, H., & Cakir, E. (2024). Soil liquefaction sites following the February 6, 2023, Kahramanmaraş–Türkiye earthquake sequence. *Bulletin of Earthquake Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s10518-024-01875-3>
- Duman, T. Y., Çan, T., Emre, Ö., Kadirioğlu, F. T., Başarır Baştürk, N., Kılıç, T., Arslan, S., Özalp, S., Kartal, R. F., Kalafat, D., Karakaya, F., Eroğlu Azak, T., Özel, N. M., Ergintav, S., Akkar, S., Altınok, Y., Tekin, S., Cingöz, A., & Kurt, A. İ. (2018). Seismotectonic database of Turkey. In *Bulletin of Earthquake Engineering* (Vol. 16, Issue 8). <https://doi.org/10.1007/s10518-016-9965-9>
- Flora, A., Bilotta, E., Valtucci, F., Fierro, T., Perez, R., Santucci de Magistris, F., Modoni, G., Spacagna, R., Kelesoglu, M. K., Sargin, S., Altinok, E., Oztoprak, S., Bozbey, I., & Aysal, N. (2024). Liquefaction effects in the city of Gölbaşı: from the analysis of predisposing factors to damage survey. *Engineering Geology*, 338. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107633>
- Macedo, J., Bray, J., Moug, D., Bassal, P., & Arnold, C. (2025). “Subsurface Characterization of Iskenderun - 2024”, in *Subsurface Characterization of Selected Liquefaction Case Histories - 2023 Kahramanmaras Earthquake Sequence [v.2]*. DesignSafe-CI.
- Milev, N., Takashi, K., Briones, J., Briones, O., Cinicioglu, O., & Torisu, S. (2024). Liquefaction-induced damage in the cities of Iskenderun and Golbasi after the 2023 Turkey earthquake. *Archives for Technical Sciences*, 1(30). <https://doi.org/10.59456/afts.2024.1630.079m>
- Moiriat, D., Luong, T. A., & Louis, K. J. (2023). Preliminary results of geotechnical and geophysical investigations on sites with liquefaction occurrences in the greater Petrinja area

- after the 2020 Earthquake. 9th Conference of Croatian Geotechnical Society, May, 121–132.
- Moss, R. E. S., Altunel, E., Bassal, P., Bray, J. D., Buckreis, T. E., Cetin, K. O., Clahan, K., Duman, E., Frost, D., Hashash, Y., Koehler, R. D., Kozaci, O., Lozano, J. M., Macedo, J., Moug, D., Nichols, E., Pehlivan, M., Pretell, R., Stewart, J. P., ... Yildirim, C. (2025). Geotechnical and geological reconnaissance observations of the 6 February 2023 Türkiye earthquakes. *Earthquake Spectra*, 41(1), 219–248. <https://doi.org/10.1177/87552930241281007>
- Moug, D., Bassal, P., Bray, J. D., Çetin, K. Ö., Kendir, S. B., Şahin, A., Çakır, E., Söylemez, B., & Ocak, S. (2023). February 6, 2023 Türkiye Earthquakes: GEER Phase 3 Team Report on Selected Geotechnical Engineering Effects. <https://doi.org/10.18118/G6F379>
- Nazé, P.-A., Dujarric, C., & Brûlé, S. (2022). Le retour d'expérience sismo-géotechnique de l'AFPS sur les mesures de bruit de fond sismique H/V lors des missions post-sismiques de Mexico 2017 et Durrës 2019. 11èmes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur, 8. <https://hal.science/hal-03720251v1>
- Onder Cetin, K., Soylemez, B., Guzel, H., Cakir, E., Sahin, A., Umut Ayhan, B., Ocak, S., Turkezzer, M., Moss, R., D. Bray, J., Moug, D., Bassal, P., Frost, D., Duman, E., Macedo, J., J. Ulmer, K., Unutmaz, B., Gurbuz, A., & Firat, S. (2024). The Characteristics of Liquefied Soil Ejecta Retrieved after the February 6, 2023 Kahramanmaraş-Türkiye Earthquake Sequence. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 10(11), 288–293. <https://doi.org/10.3208/jgssp.v10.ss-6-05>
- Pucci, S., Caciagli, M., Azzaro, R., Di Manna, P., Blumetti, A. M., Poggi, V., De Martini, P. M., Civico, R., Nappi, R., Ünsal, E., & Tatar, O. (2025). Examples of Rupture Patterns of the 2023, Mw 7.8 Kahramanmaraş Surface-Faulting Earthquake, Türkiye. *Geosciences (Switzerland)*, 15(7), 1–39. <https://doi.org/10.3390/geosciences15070252>
- Sastre, C., Breul, P., Bacconnet, C., & Benz, M. (2021). Probabilistic 3D modelling of shallow soil spatial variability using dynamic cone penetrometer results and a geostatistical method. *Georisk*, 15(2), 139–151.
- Tobita, T., Kiyota, T., Torisu, S., Cinicioglu, O., Tonuk, G., Milev, N., Contreras, J., Contreras, O., & Shiga, M. (2024). Geotechnical damage survey report on February 6, 2023 Turkey-Syria Earthquake, Turkey. *Soils and Foundations*, 64(3). <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2024.101463>
- Tonyalı, I., Akbas, S. ., Beyaz, T., Kayabalı, K., & Gokceoglu, C. (2024). Case study of a foundation failure induced by cyclic softening of clay during the 2023 Kahramanmaraş earthquakes. *Engineering Geology*. 332, 107477, 13 p.
- Ünal, H. & E. Z. . (2023). The Effect of Kahramanmaraş Earthquakes on Engineering Structures in Adıyaman-Gölbasi Settlement Area and Earthquake-Soil Interaction. *Yerbilimleri*, 2023, 44 (3), 202-221.
- Villavicencio, A. G., Breul, P., Bacconnet, C., Boissier, D., & Espinace, A. R. (2011). Estimation of the Variability of Tailings Dams Properties in Order to Perform Probabilistic Assessment. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(6), 1073–1084. <https://doi.org/10.1007/s10706-011-9438-5>
- Yönlü, Ö., Altunel, E., Karabacak, V., & Akyüz, H. S. (2013). Evolution of the Gölbasi basin and its implications for the long-term offset on the East Anatolian Fault Zone, Turkey. *Journal of Geodynamics*, 65, 272–281. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2012.04.013>