

# Préciser la configuration géotechnique du lac du parc des Buttes-Chaumont en compilant données historiques, mesures géophysiques et sondages géotechniques

## Clarifying the geotechnical configuration of the lake in the Buttes-Chaumont Park by compiling historical data, geophysical measurements and geotechnical boreholes.

Gildas NOURY<sup>1\*</sup>, Thomas JACOB<sup>1</sup>, Jacques DEPARIS<sup>1</sup>, Florian MASSON<sup>1</sup>, Isabelle HALFON<sup>1</sup>, Marc PERUZZETTO<sup>1</sup>

*1 BRGM, Orléans, France*

*\*g.noury@brgm.fr*

**RESUME :** Le parc des Buttes-Chaumont à Paris présente des signes de vieillissement et de mouvements de terrain qui ont nécessité de fermer certaines zones au public. Dans le cadre d'un réaménagement d'ampleur, la ville de Paris a souhaité préciser la configuration du secteur, notamment au niveau du lac. Le BRGM a pour cela complété une synthèse historique initiée en 2022. Les archives relatent plusieurs effondrements survenus au niveau du lac au cours de son aménagement (1864-1867) et peu de temps après. Ces mouvements s'expliquent par une configuration géotechnique sensible aux apports d'eau non maîtrisés venus du lac. L'ouvrage, originellement non étanchéifié, repose en effet sur des remblais argileux et gypseux, atteignant par endroit 12 m d'épaisseur ; ces remblais comblerent d'anciennes carrières à ciel ouvert, en dessous desquelles se trouvent également d'anciennes carrières souterraines. Après de nombreuses petites réparations infructueuses, deux phases de réfection d'ampleur ont été entreprises dans les années 1900-1910, puis 1950-1960 ; le fond du lac est alors « devenu » une dalle portée par 350 pieux environ et il n'est plus apparu de nouveaux désordres d'ampleur. Le BRGM a toutefois observé en 2021 des instabilités sur les bords du lac et des fissures sur ses dalles. Les mesures géophysiques effectuées en janvier 2024 (microgravimétrie et géoradar - BRGM) confirment en grande partie la configuration des ouvrages anciens et identifient plusieurs anomalies, pouvant a priori correspondre à des zones instables. Les sondages géotechniques effectués par la suite n'ont pas révélé de grands vides sous les dalles mais ont détecté quelques petits vides et des matériaux peu résistants correspondant vraisemblablement à des remblais ayant évolué. L'ensemble de ces analyses a alimenté la conception des ouvrages à venir, en permettant notamment 1) d'évaluer les risques de mouvements de terrain et 2) de fournir un plan des ouvrages anciens avec la profondeur supposée des pieux.

**ABSTRACT:** The Buttes-Chaumont Park in Paris is currently affected by significant signs of aging and ground instability, which have resulted in the closure of several areas to the public. As part of a large-scale redevelopment project, the City of Paris sought to gain a clearer understanding of the site's configuration, particularly in the lake area, which is a key feature of the park. To support this effort, BRGM expanded and updated a historical and technical synthesis of the site's structures and subsurface conditions, initially undertaken in 2022. Historical archives document several collapses that occurred during the original construction of the lake between 1864 and 1867, as well as shortly thereafter. These events are attributed to a complex and sensitive geotechnical context. The lake rests on thick layers of clayey and gypsum-rich fill materials, reaching up to 12 meters in thickness in some locations. These fills were used to backfill former open-pit quarries, beneath which older underground quarries are also present. Originally, the lake was not waterproofed, allowing uncontrolled water inflows that weakened the underlying materials and increased instability. After numerous minor and largely ineffective repair attempts, two major reconstruction campaigns were carried out, first in the early twentieth century and later in the 1950s–1960s. During these works, the lake bottom was transformed into a concrete slab supported by approximately 350 piles. This structural solution significantly improved stability, and no major disorders were reported for several decades. However, in 2021, new signs of deterioration were observed, including instabilities along the lake's edges and cracking in the slab. Geophysical surveys conducted in January 2024, including microgravity and ground-penetrating radar investigations, largely confirmed the configuration of the historical structures while identifying several anomalies potentially associated with unstable zones. Subsequent geotechnical boreholes did not reveal large voids beneath the slab but did detect small cavities and weak materials, likely corresponding to altered fill. Together, these studies contributed to assessing ground movement risks and provided essential data for designing future engineering works.

**Mots-clés:** gypse ; effondrement ; pieu ; géophysique ; géotechnique ; Paris

## 1 INTRODUCTION

A la suite d'une étude du BRGM (Noury et al., 2022) montrant que plusieurs aléas de mouvements de terrain affectent le parc des Buttes-Chaumont, la Ville de Paris a renforcé son attention sur les secteurs les plus sensibles, notamment le lac qui est un des paysages les plus symboliques du site.

Le présent article présente les résultats des recherches concernant cet ouvrage majeur. Ces travaux consistent en une analyse documentaire approfondie, suivie en 2024 d'investigations géophysiques (mesures géoradar et micro-gravimétriques) et de sondages géotechniques ; l'ensemble faisant l'objet d'une synthèse globale fournie à la ville de Paris.

## 2 Contexte général

### 2.1 Géologie et exploitation du gypse

Poumon vert du nord-est parisien, le parc des Buttes Chaumont se situe à l'extrémité ouest du plateau de Romainville, vaste butte-témoin des formations de l'Oligocène inférieur (Stampien : -33,9 à -28,1 MA) et de l'Eocène supérieur (« Ludien » : -37,8 à -33,9 MA). Son sommet s'établit à 90-95 m d'altitude ; le lac se trouve en bas, vers 58 m d'altitude.

Le Ludien est à cet endroit constitué de l'alternance des quatre « masses » de gypse et de leurs intercalaires (Briais, 2015). Le front de la colline entaille la première masse de gypse qui y a longuement été exploitée à ciel ouvert avant que la proximité des

moulins présents sur la butte limite définitivement cette méthode. Cette masse ainsi que les masses inférieures ont par ailleurs été exploitées dans de vastes carrières souterraines.

La catastrophe de Ménilmontant en 1778 (sept victimes dans l'effondrement d'une carrière souterraine rue Boyer) contribue à réglementer davantage l'activité. Des confortements, certains par foudroyage, beaucoup par remblaiement, sont engagés dans le secteur. L'Inspection Générale des Carrières documente peu à peu le secteur (celui-ci se situant à l'époque hors de l'enceinte de Paris). L'Atlas des carrières fournit de précieuses informations qui restent toutefois parcellaires dans le secteur des Buttes-Chaumont (Thomas, 2006).

### 2.2 Histoire du parc

Le parc est aménagé entre 1864 et 1867 dans le cadre des travaux d'aménagement menés par le baron Haussmann. Sous la houlette de l'architecte Alphand et de l'ingénieur des Ponts et Chaussée Darcel, le parc occupe un secteur de 25 ha qui était auparavant exploité pour l'extraction du gypse. Les travaux sont colossaux, avec des terrassements volumineux, la construction de nombreux ouvrages d'art, la création d'un lac de 2,2 ha et une mise en scène romantique de l'espace pour créer un parc urbain de renommée internationale (Alphand, 1873 et *Figure 1*).

Le parc accueille aujourd'hui 6 millions de visiteurs par an.

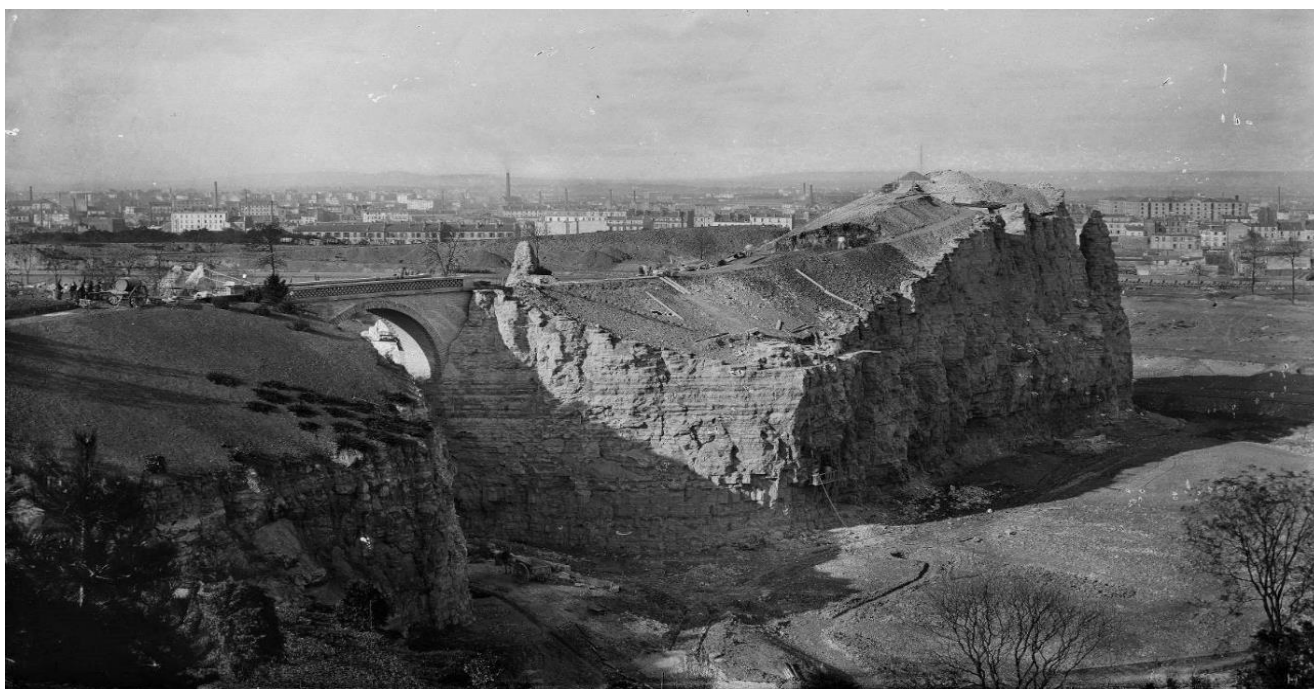


Figure 1. Le parc des Buttes-Chaumont vers 1866, avec la future île ; le lac n'est pas encore achevé (Marville)

### 2.3 Problématique actuelle et méthode de travail

Très « travaillé » et situé dans un contexte géologique particulièrement sensible, le parc subit depuis de nombreuses années de multiples détériorations. La Ville de Paris a engagé une nouvelle phase de réfection qui prévoit de rendre à l'île son aspect originel. Engager de tels travaux impose de connaître aussi précisément que possible la configuration géotechnique du site, au vu notamment des faiblesses toujours possibles, notamment des effondrements de terrain sous ou à côté du lac.

Le BRGM a effectué pour cela une série d'analyses et d'investigations. Les archives, réparties dans différents endroits, ont été collectées, bancarisées, synthétisées et analysées avec une approche méthodique. Un grand plan d'Alphand, représentant la topographie du parc avant et après les travaux, a notamment été utilisé pour la première fois. Des investigations complémentaires se sont ensuite avérées nécessaires pour préciser certaines lacunes et chercher d'éventuelles instabilités souterraines. Des mesures géophysiques et géotechniques ont été réalisées : mesures au géoradar et microgravimétriques par le BRGM, sondages géotechniques divers coordonnés par l'IGC et effectués par GeoEst. L'ensemble a fait l'objet de rapports fournis à la Ville de Paris (Noury et al., 2022) et d'une première communication générale aux JNGG 2024 (Noury et al., 2024).

## 3 L'AMENAGEMENT DU LAC... ET SES DEBOIRES

### 3.1 Configuration du secteur du lac et de l'île

Suivant les archives, le lac s'établit sur un secteur abondamment exploité à ciel ouvert et en souterrain. Entre 1864 et 1867, l'endroit est aménagé autour d'un promontoire résiduel de gypse : celui-ci est retaillé et détaché du front de taille principal de manière à former une île artificielle ; les fosses d'extraction qui l'entouraient sont remblayées (sur des hauteurs atteignant 11 m à deux endroits suivant le plan d'Alphand de 1873), aplanies et revêtues d'un dallage non armé constituant le fond du futur lac (appelé « radier »).

La configuration préexistante des anciennes carrières souterraines n'est documentée que partiellement. Les incertitudes persistantes concernent la localisation des creusements : des descenderies atteignaient clairement la deuxième et la troisième masse mais les entrées ne sont pas indiquées et les contours des chambres d'exploitation sont souvent hypothétiques. La réglementation de l'époque

imposait par ailleurs le comblement des vides souterrains mais les informations disponibles sont lacunaires : les observations effectuées lors du percement de l'actuelle ligne 7 bis du métro qui passe au sud du lac révèlent que ces comblements sont parfois partiels (présence de vides résiduels) et qu'ils sont faits de matériaux mous et sensibles à l'eau (Suquet, 1911).

Les travaux du parc sont relatés dans de nombreuses archives, mais la plupart concernent les terrassements et la construction des ouvrages en surface ; aucune information sur d'éventuels confortements en souterrain faits entre 1864 et 1867 n'a été retrouvée.

### 3.2 Des effondrements, dès la mise en eau

Des effondrements surviennent immédiatement après l'inauguration du parc. L'un des premiers mesure 8 m de diamètre et 1,50 m de profondeur. L'ingénieur Darcel en recense neuf entre avril et novembre 1867. Il en attribue la cause à l'effondrement « *d'anciennes galeries de la troisième masse de gypse, abandonnées depuis longtemps et inconnues* » et précise qu'elles auraient été « *incomplètement bourrées par les exploitants* ».

Les travaux de réparation consistent alors à poser un batardeau, à remblayer et à reconstituer le fond du lac sous la même forme qu'auparavant.

De nouveaux effondrements surviennent les années suivantes. Ils déclenchent à chaque fois d'importantes fuites dans le lac (Figure 2).

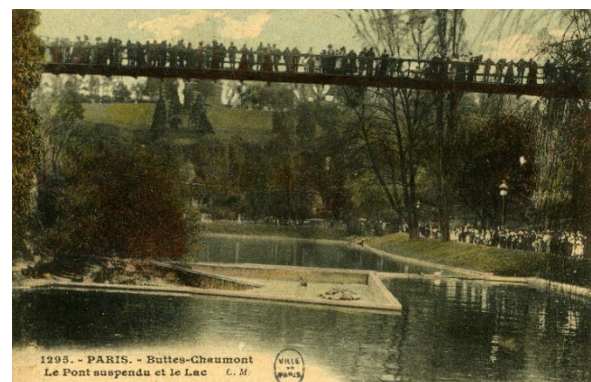


Figure 2. Lac en partie vidé pour la réparation d'un fontis (secteur ouest - début 20<sup>e</sup> siècle)

Ces mouvements ont plusieurs origines possibles : 1) des mouvements liés aux anciennes carrières souterraines mal comblées, 2) la dissolution du gypse présent dans les remblais ou celui présent dans les terrains en place, 3) le tassement des remblais. Tous ces phénomènes ont certainement été causés ou aggravés par des circulations d'eaux dans le sous-sol (fuites du fond du lac, précipitations).

### 3.3 Deux périodes de travaux de renforcement

Les colmatages superficiels ne pouvant remédier durablement à des instabilités aux causes profondes, des travaux conséquents sont lancés dans les années 1900 et 1910. 260 « puits » de 1,20 m de diamètre sont descendus côté île et côté route circulaire à des profondeurs variant entre 8 et 17 m : ils soutiennent des poutres qui portent le fond du lac. Le secteur central est en revanche refait directement sur l'ancien dallage non armé. Le résultat est donc un ouvrage mixte : dalle portée sur les pourtours intérieur et extérieur et dallage non armé au centre.

Une accalmie dans les effondrements suit cette première période de travaux. Trois mouvements d'ampleur et d'importantes fissurations sont toutefois recensés dans les années 1940 et 1950, avec par exemple un mouvement de 20 m de diamètre et 1 m de profondeur en 1942. Un autre en 1955 est localisé dans un secteur où le fond du lac « était établi à même le sol sans fondation ». Les mêmes causes déclenchent les mêmes conséquences : le fond du lac n'est pas encore suffisamment protégé des instabilités souterraines.

Entre 1957 et 1968, de nouveaux travaux complètent les travaux du début du siècle : 303

nouveaux pieux de 40 à 60 cm de diamètre portent des poutres retenant une dalle armée (Figure 3).



Figure 3. Confortement du lac vers 1969 (montage vidéo INA)

Les 260 + 303 = 563 pieux couvrent alors presque toute l'emprise du lac (Figure 4). Seul un petit secteur situé au sud-ouest ne semble comporter aucun pieu. Cela s'explique certainement par une configuration considérée comme plus favorable, avec un substratum affleurant, sans remblai des carrières à ciel ouvert.

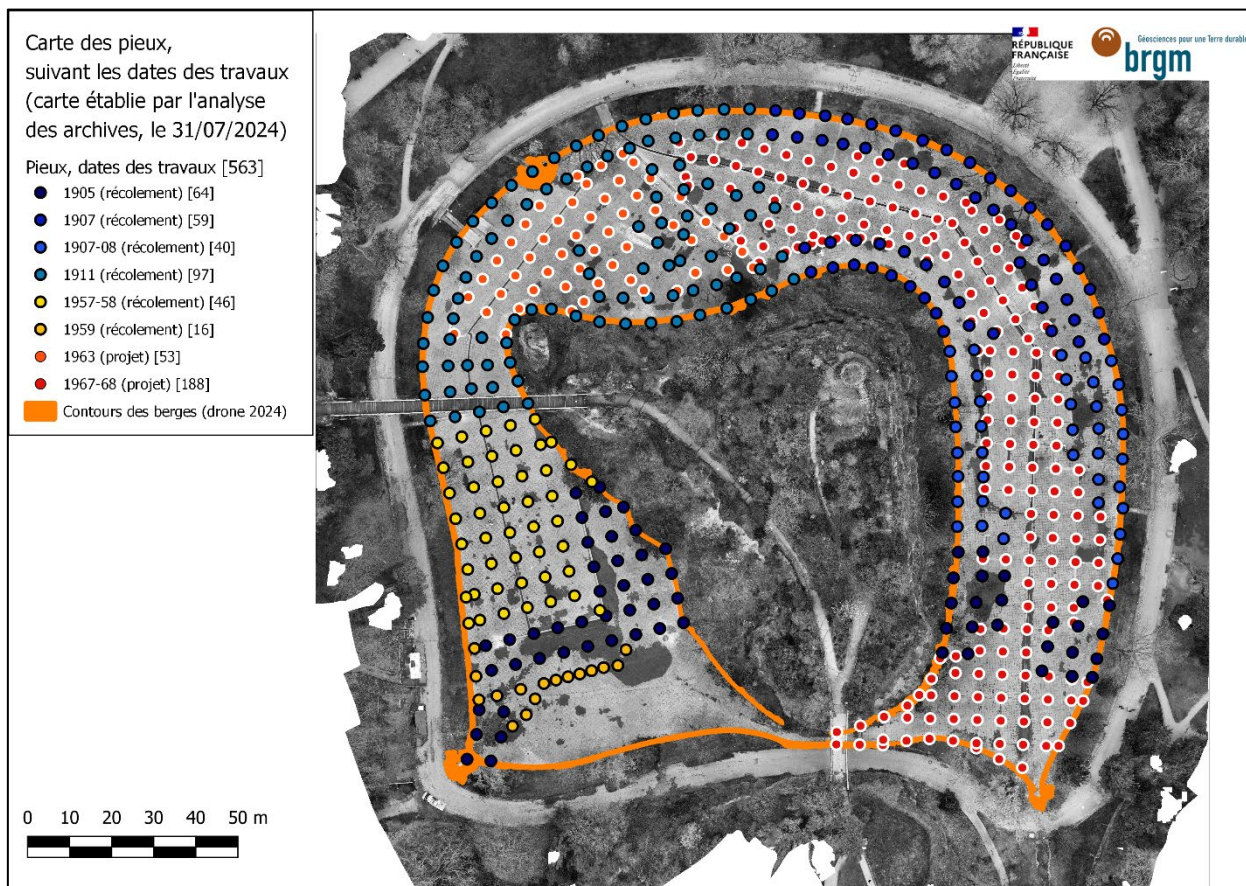


Figure 4. Carte des pieux du lac, suivant leur date de réalisation (BRGM - fond : Ginger CEBTP)

### 3.4 Etat du lac en 2022 et questions résiduelles

A la suite des travaux des années 1950 et 1960, aucun mouvement d'ampleur n'est signalé jusqu'à ce qu'un affaissement soit observé sur les bords du lac en 2022. Des fissures sur le béton du fond du lac font également penser que des instabilités sont toujours possibles.

Avec la future rénovation prochaine de ce secteur, il devient alors indispensable de vérifier et de compléter les connaissances issues des archives : de nouvelles investigations sont alors programmées par la Ville de Paris et coordonnées par le BRGM.

## 4 LES INVESTIGATIONS RECENTES ET LEURS RESULTATS

Le lac a été vidé début 2024 pour permettre la réalisation des investigations depuis le fond du lac.

### 4.1 Inspections visuelles complémentaires

L'inspection visuelle du fond du lac découvre un affaissement, au sud-est, contre la berge de l'île. Son diamètre est d'environ 9 m et sa profondeur de 40 cm.



Figure 5. Affaissement près de la paroi est de l'île au moment de son investigation par sondage (BRGM)

### 4.2 Levé LiDAR et photographique

Un levé par drone a été effectué par Ginger CEBTP début 2024. Il fournit :

- Une photographie aérienne haute résolution qui révèle les dalles, les dallettes et confirment ainsi l'organisation des confortements du 20<sup>e</sup> siècle.
- Un nuage de points LiDAR. Une fois traité, il fournit une topographie précise du secteur et permet de tracer les contours intérieurs et extérieurs du lac ainsi que le bas des parois de l'île.

### 4.3 Mesures géophysiques

Leur objectif est de rechercher des signes de vides. Elles suivent deux méthodes complémentaires : le géoradar pour la localisation d'objets ou de structures de faible dimension situés à relativement faible profondeur dans le cas où le milieu est résistant électriquement (ondes pénétrant alors à quelques mètres de profondeur) ; la microgravimétrie pour les objets ou structures plus profonds et ceux qui perturberaient trop les mesures géoradar.

#### 4.3.1 Mesures géoradar

Le radar a été acquis sur 21,9 km ce qui représente environ 656 km de profil cumulé (Figure 7) en comptant les 30 canaux de mesure. L'espacement entre chaque trace radar est de 1 cm. Les données radars ont été traitées afin de positionner géographiquement l'ensemble des traces, d'éliminer les effets parasites (perturbations basses et hautes fréquences), d'amplifier les arrivées des ondes tardives (réfléchies) et d'éliminer les signaux stationnaires.

L'analyse des résultats (exemple en Figure 6) aboutit à retenir 23 anomalies radar (carte en Figure 7). Elles peuvent a priori correspondre à des zones décomprimées (telles que des vides), des zones présentant des éléments plus grossiers ou des matériaux secs plus résistants (plus argileux par exemple).

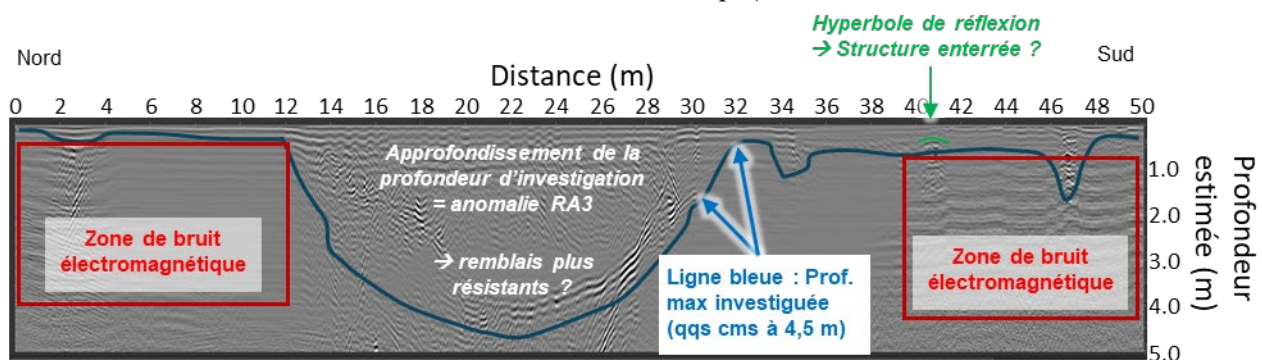


Figure 6. Exemple d'interprétation d'un profil radar (localisation : trait rouge en Figure 7) (BRGM)

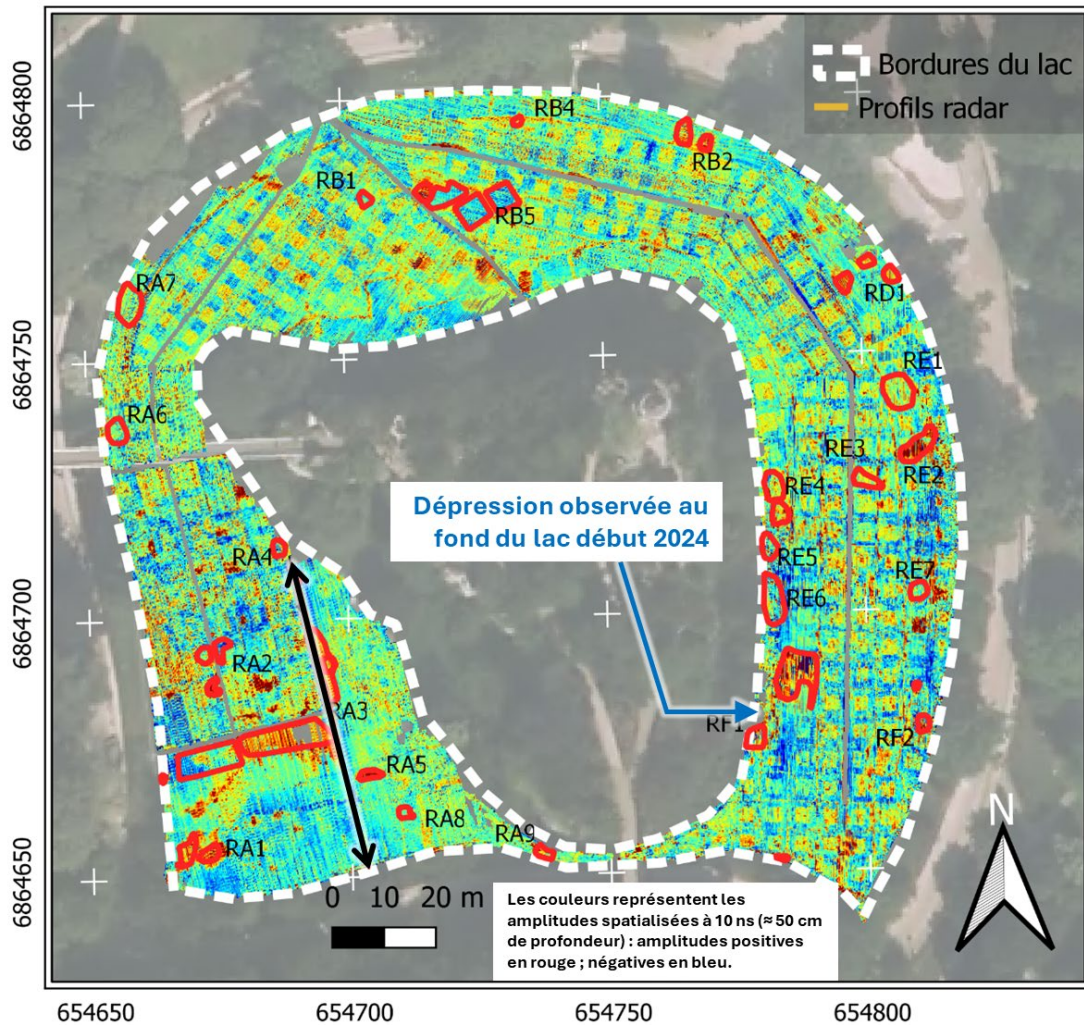


Figure 7. Carte des amplitudes brutes à environ 50 cm de profondeur (BRGM)

#### 4.3.2 Mesures microgravimétriques

913 stations gravimétriques ont été implantées, nivelées et mesurées en gravimétrie suivant une maille de 5 m x 5 m. Le protocole de mesure respecte strictement les préconisations de l'AGAP, notamment pour ce qui concerne le taux de reprise des mesures (21%), les corrections des mesures (notamment des effets topographiques), l'évaluation des erreurs de mesure, l'estimation du seuil de signification (variant entre 0,011 à 0,170 mGal suivant l'endroit), et la

détermination des critères de qualité. On retiendra que l'anomalie régionale a été obtenue par ajustement d'une surface interpolée et lissée (suivant une méthode d'interpolation bicubique non détaillée ici).

La carte de la Figure 8 présente les 27 anomalies résiduelles négatives retenues (défauts de masse dont les amplitudes maximales varient de -0,023 mGal à -0,083 mGal). Elles sont soit peu étendues, soit jointives entre elles, formant alors de grandes plages (5 secteurs nommés de A à F sur la carte). Ces zones moins denses peuvent être liées à des « décompressions » (vides, francs ou remblayés).

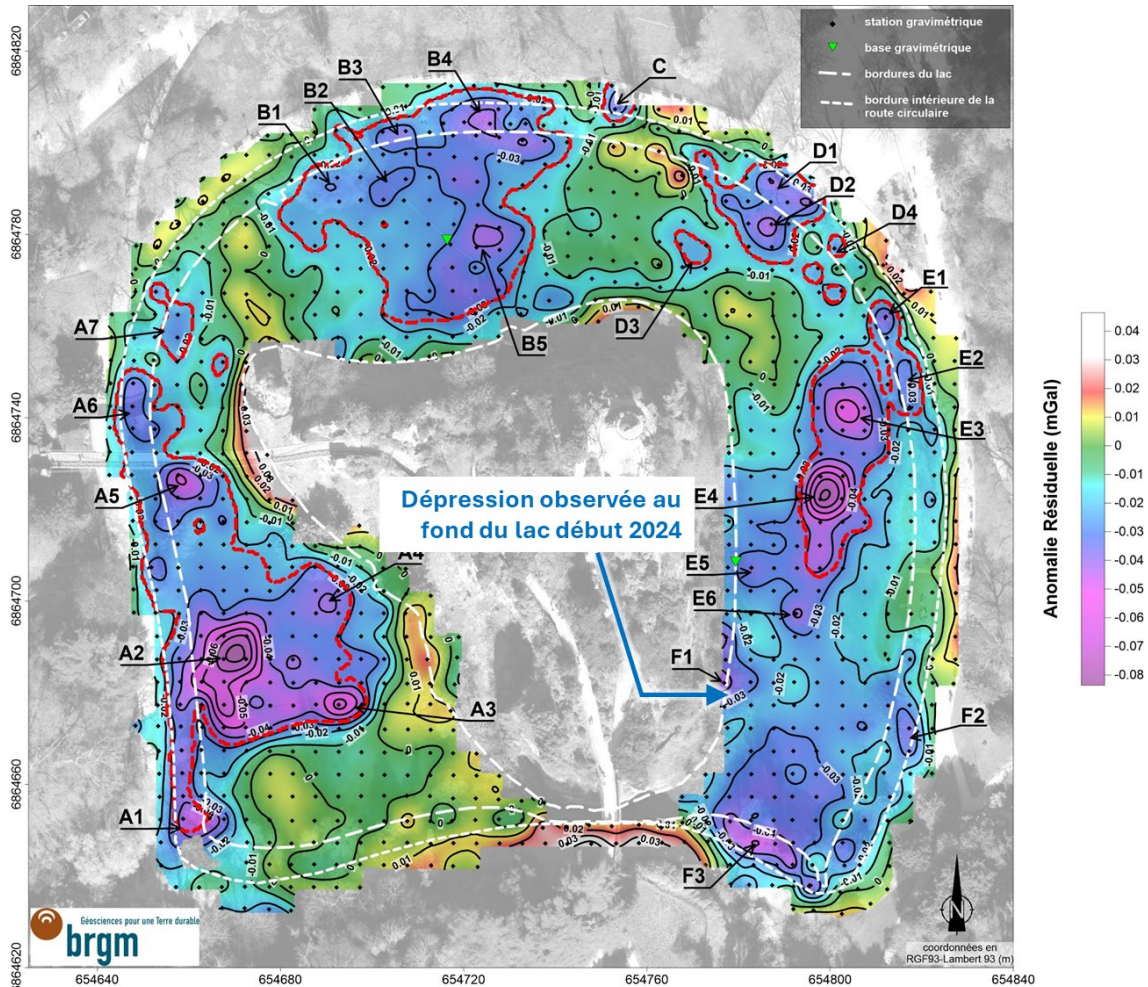


Figure 8. Carte d'anomalie résiduelle. Les anomalies négatives significatives sont entourées par un trait rouge discontinu. Les anomalies de la présente étude sont numérotées de A1 à F3 (BRGM)

#### 4.4 Sondages géotechniques

Une série de sondages géotechniques a ensuite été effectué, notamment au droit des anomalies topographiques (affaissement découvert au sud-est) et au droit des anomalies géophysiques de manière à en préciser leur nature et également à compléter les connaissances acquises grâce aux archives.

Les sondages ont été effectués par l'entreprise GeoEst. 36 sondages destructifs (à la boue bentonitique et au taillant de 63 mm), 3 sondages à la tarière et un sondage carotté ont notamment été réalisés. L'ensemble a été effectué avec une foreuse EMCI 450. Le sondage carotté a été réalisé par un carottier triple (diam. 116 mm).

Ces sondages révèlent, sous le fond du lac, des remblais particulièrement hétérogènes : surtout argileux et argilo-marneux de couleur vert-pale, gris-vertâtre ou beige, avec cailloutis, blocs de gypse et de béton, de calcaires et des graviers calcaires ou siliceux. Leur épaisseur varie de quelques mètres à un peu plus d'une dizaine de mètres (maximum observé à 13,2 m).

Des fouilles au bord du lac et depuis le fond du lac ont également découvert de nombreuses zones vides, étendues sur quelques mètres carrés et peu profondes, hautes de quelques décimètres au plus (Figure 9 – fouille localisée au niveau de l'anomalie microgravimétrique A2 et de l'anomalie radar RA2).



Figure 9. Vide découvert au sud-ouest du lac lors des investigations géotechniques (GeoEst)

Plus profondément, quatre sondages ont traversé des matériaux indiquant la présence de quatre zones de carrière souterraine remblayée de la 3<sup>e</sup> masse.

## 5 SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

### 5.1 Principaux résultats à retenir

Les analyses documentaires ainsi que les mesures géophysiques sont cohérentes avec les résultats des investigations géotechniques. Les particularités suivantes sont à retenir :

- Les épaisseurs de remblais ainsi que les altitudes du gypse non exploité à ciel ouvert sont conformes à celles estimées grâce aux archives.
- La majorité des anomalies géoradar ayant fait l'objet de sondages coïncident avec la présence de vides petits à moyens (les petits s'expliquant a priori par le tassement des remblais).
- La forte anomalie microgravimétrique localisée au sud-ouest du lac (anomalie A2, avec une amplitude maximale à -0,080 mGal) coïncide non seulement avec une zone plus importante de vides (qui s'explique, après ouverture, par un coffrage perdu : un des vides découverts sous la surface du radier mesure 2,3 x 5 m pour 0,75 m de profondeur : *Figure 9*), mais aussi à un endroit où l'exploitation à ciel ouvert était étendue et profonde (avec donc un important volume de remblais, moins denses que l'encaissant).
- A l'est, trois des quatre zones de carrière souterraine découvertes en sondage coïncident avec une zone d'anomalies gravimétriques marquées (E3-E4, avec l'amplitude maximale observée pour l'étude, à -0,080 mGal) ; la dernière se trouve également sur une anomalie, mais moins marquée (-0.030 mGal environ).
- L'affaissement observé au fond du lac contre la paroi sud-est de l'île coïncide non seulement avec le bord franc d'un creusement prononcé (Alphand, 1873 – ce qui fait penser à une possible entrée de carrière souterraine) mais également à un endroit où la profondeur des pieux des années 1900 – 1910 (deux pieux à 6 m à cet endroit) est très inférieure à celle des remblais telle qu'observée en sondage par GeoEst (11 m). Les perturbations de masses liées à la proximité de cet endroit avec les parois de l'île (et malgré les corrections effectuées) expliqueraient l'absence d'anomalie microgravimétrique marquée. Une forte anomalie géoradar est en revanche mesurée à cet endroit. L'affaissement pourrait donc s'expliquer par une éventuelle entrée de carrière, peut-être mal remblayée, qui aurait déstabilisé les terrains ;

instabilité que n'aurait pas compensé le confortement, insuffisant à cet endroit.

### 5.2 Conclusion

La configuration géotechnique du lac du parc des Buttes-Chaumont a été précisée grâce à l'expertise croisée de différents éléments. Les archives ont apporté de nombreuses informations, qui ont été vérifiées et complétées par une série d'analyses : inspection visuelle, levé LiDAR, mesures géophysiques, sondages géotechniques. L'analyse effectuée diminue les incertitudes et permet désormais d'envisager plus sereinement la poursuite du projet.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Ville de Paris qui a financé les études présentées ici.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alphand A. (1873). Les promenades de Paris : histoire, description des embellissements, dépenses de création et d'entretien des Bois de Boulogne et de Vincennes, Champs-Élysées, parcs, squares, boulevards, places plantées, études sur l'art des jardins et arboretum.
- Briais, J. (2015). Le Cénozoïque du bassin de Paris : un enregistrement sédimentaire haute résolution des déformations lithosphériques en régime de faible subsidence (Thèse, Université Rennes 1).
- Marville C. (1866). Parc des Buttes-Chaumont. Bibliothèque Historique de la Ville de Paris
- Noury G., Lévy C., Halfon I. (2022) – Parc des Buttes-Chaumont (75) - Stratégie de sécurisations vis-à-vis des risques de mouvements de terrain – Phase 1 : Etat des connaissances et définition des besoins. Rapport final. BRGM/RP-71751-FR, 128 p. <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-71751-FR.pdf>
- Noury G., Lévy C., Halfon I., Flipo-Houze M., Masson F., Peruzetto M. (2024). Comprendre le comportement géotechnique du Parc des Buttes-Chaumont en reconstituant son histoire. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*, Jun 2024, Poitiers, France. <https://hal.science/hal-04627319v1>
- Thomas G. (2006). Les dessous de Paris – Cartes sur table (1ère partie). *Revue XYZ*, n°107.
- Suquet, L. (1911). Le métropolitain de Paris – Construction de la partie de la ligne n°7 située dans les anciennes carrières des Buttes-Chaumont. *Le Génie Civil*, 31e année, tome LVIII, n°25.