

Biarritz, 19 &amp; 20 juin 2025

## Programme Geoscan. Des campagnes publiques d'exploration du sous-sol pour la géothermie profonde : l'ouest parisien et le bassin de l'Arc

Alexandre Stopin, BRGM, Camille Maurel, BRGM, Norbert Bommensatt, ADEME

a.stopin@brgm.fr

c.maurel@brgm.fr

norbert.bommensatt@ademe.fr

Mots clés : géothermie profonde, Bassin parisien, Dogger, Urgonien, exploration

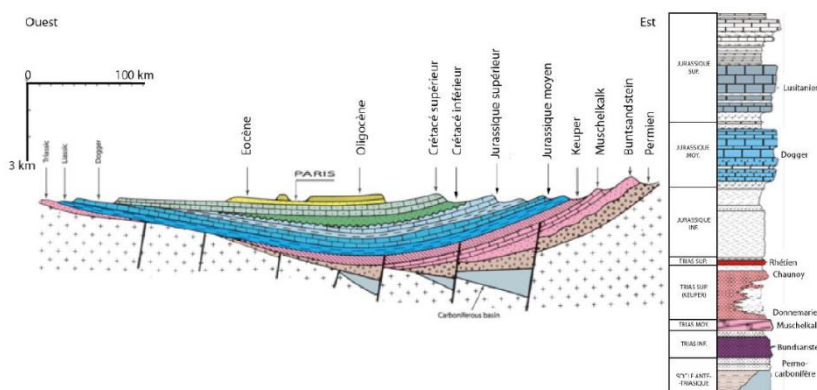
### 1. INTRODUCTION

Après plus de 50 ans d'exploitation des ressources géothermales pour l'alimentation de réseaux de chaleur sur le territoire métropolitain, la filière de géothermie profonde se trouve désormais à une période charnière où des développements conséquents sont nécessaires pour atteindre les objectifs fixés à l'échelle nationale et locale en matière de mix d'énergie renouvelable. Pour atteindre ces objectifs, il apparaît primordial d'améliorer la connaissance du sous-sol au droit de sites d'intérêt, où la géothermie semble présenter de forts potentiels et pourrait répondre à des besoins énergétiques identifiés en surface. L'ADEME, avec le support technique du BRGM, a mis en place un programme d'exploration du sous-sol dans deux secteurs clés pour le développement de la géothermie profonde en France métropolitaine : le croissant de l'Ouest et Sud parisien (Illustration 2) ainsi que la zone du synclinal de l'Arc (Illustration 4) qui est encore très mal connue. Ces projets se placent dans l'action 4A du plan d'action pour la Géothermie présenté en février 2023 par la ministre de la Transition Énergétique et se nomment respectivement Geoscan Ile-de-France et Geoscan Arc.

Ces deux projets comportent, pour la première fois pour la géothermie, des campagnes d'acquisition de données géoscientifiques (géophysiques, géologique) financées par l'ADEME. L'objectif de ces nouvelles acquisitions est de permettre de combler le manque de données mais aussi d'obtenir un niveau d'information supérieur par rapport aux données existantes. L'intégration de ces données avec les données de puits et les connaissances géologiques permettra, à la fin de ces projets de 2 ans, d'obtenir des avancées sur la connaissance des réservoirs géothermiques ciblés. Dans cette présentation, les objectifs et états d'avancement des deux projets Geoscan sont présentés.

### 2. GEOSCAN ÎLE-DE-FRANCE

Le site d'exploration de l'Ouest et du Sud parisien se situe dans la partie centre-ouest du Bassin de Paris, bassin sédimentaire recouvrant des formations du Carbonifère et du Permien dont l'origine est liée à une période de rift au Permo-Trias. La partie centrale du bassin, là où l'affaissement est le plus important à l'est de l'Île-de-France, est remplie d'environ 3000 m de sédiments (Delmas et al., 2002 ; Perrodon et al., 1990) tel que présenté en Illustration 1.

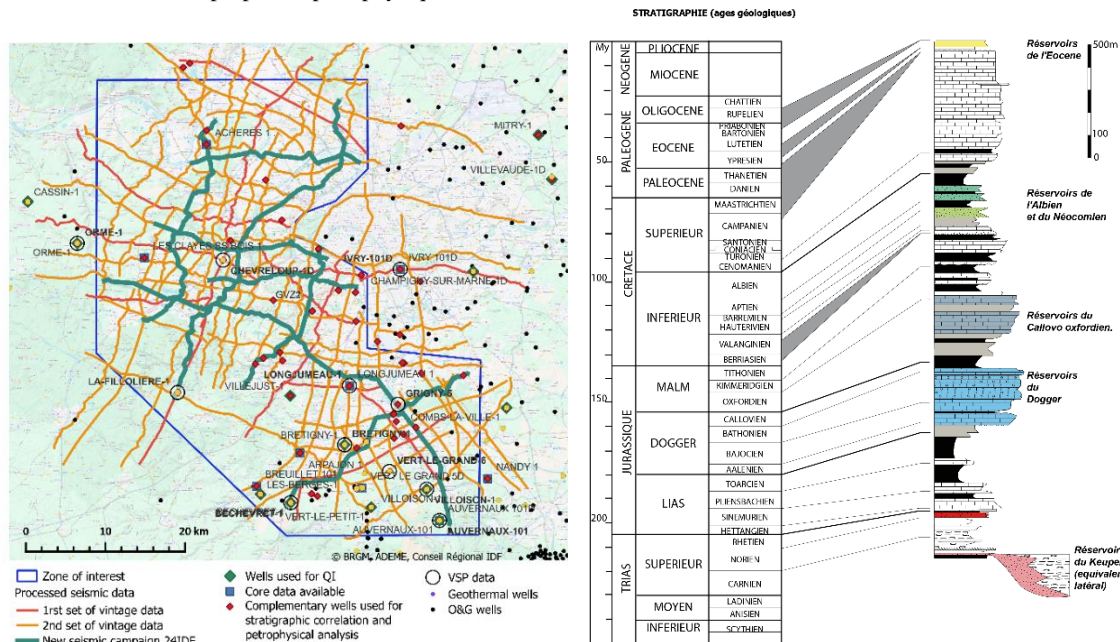


**Illustration 1 : Coupe géologique générale du Bassin de Paris et localisation des formations aquifères, d'après (Perrodon et al., 1990)**

Deux structures majeures traversent la zone d'étude : la faille de Beynes-Meudon située sur la partie centrale sud et la faille de Banthelu située plus au nord-ouest. Les différentes cibles de géothermie profonde du Bassin de Paris qui sont étudiées dans le cadre du programme correspondent aux formations clastiques de l'Albien et du Néocomien, aux carbonates de l'Oxfordien et du Dogger et enfin aux formations clastiques du Trias. La reconstitution de la géométrie des failles et des formations ciblées ainsi que de la distribution des faciès et propriétés de réservoirs, en particulier dans le Dogger à proximité de la bordure de plateforme carbonatée de l'ouest francilien et la présence du sillon marneux et de dépôts de marnes et d'argiles d'offshore inférieur (Andrieu, 2016), constituent des enjeux majeurs du programme d'exploration pour la compréhension des favorabilités à la géothermie profonde sur cette zone encore peu exploitée.

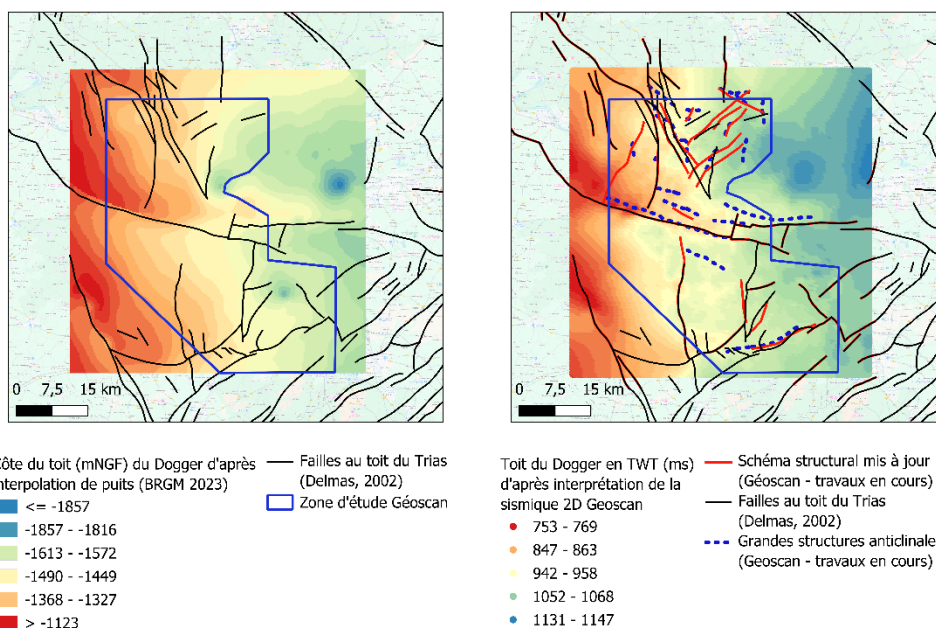
L'exploration pétrolière du Bassin parisien dans les années 80 a permis l'acquisition d'une grande quantité de profils sismiques 2D (Illustration 2). Ces lignes recouvrent la zone d'étude de manière quasi uniforme mais certains trous peuvent être observés. Par

ailleurs, la qualité des données acquises dans les années 80 ne permet pas toujours d'effectuer une interprétation quantitative permettant de caractériser les propriétés pétrophysiques du réservoir.



**Illustration 2 : Carte de la zone d'étude de Geoscan Ile-de-France avec les indications des lignes anciennes à retraiter et des lignes nouvelles acquises (à gauche) ainsi qu'un résumé de la stratigraphie (à droite) du Bassin parisien d'après le BRGM et Guillaucheu et al. (2000)**

Cependant, l'acquisition sismique a énormément progressé depuis les années 1980 en termes d'échantillonnage spatial et de contenu fréquentiel autorisé. Ces avancées, et en particulier la capacité à acquérir des données à large bande (Baeten et al 2010), ont un impact positif sur l'interprétation quantitative (ten Kroode, 2013). Pour ces raisons, mais aussi pour apporter de nouvelles connaissances dans des zones de prospect, l'acquisition d'une nouvelle campagne de sismique 2D sur 280 km (Illustration 2) a été réalisée entre mars et avril 2024. Les nouvelles lignes de réflexion sismique (Maurel et al., 2024) ont été acquises avec un balayage de fréquence à large bande de 48 secondes allant de 2 Hz à 96 Hz. Les récepteurs sont des accéléromètres sans fil espacés de 20 mètres. La source est un unique vibreur avec une force maximale de 65 000 lbs avec un intervalle de 10 m. L'utilisation de balayages aléatoires a permis l'acquisition d'une ligne donnée avec trois vibreurs répartis sur la ligne. L'acquisition a eu lieu la nuit, ce qui a considérablement réduit le bruit enregistré. En amont de l'acquisition, une intense campagne de permittage et de communication a été menée pour obtenir les autorisations de passage pour la centaine de communes concernées par l'acquisition et sensibiliser les citoyens au passage des camions vibreurs et à la géothermie profonde.



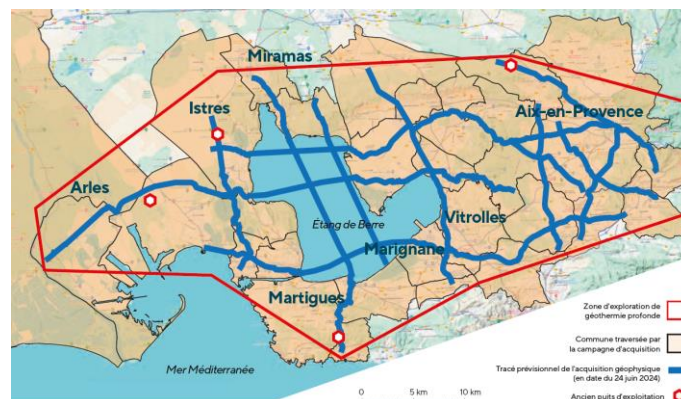
**Illustration 3 : Comparaison du schéma structural et de la cartographie du toit du Dogger telle que connue avant l'étude Geoscan, d'après Delmas et al. (2002) et BRGM, et les premiers résultats des travaux d'interprétation de la sismiques 2D dans le cadre du programme Géoscan et la mise à jour du schéma de faille et du toit du Dogger (interprétation en temps).**

Les données ont été traitées en utilisant une séquence de traitement permettant de préserver les amplitudes. L'étape d'imagerie consiste en une migration temps avant sommation, car les variations de vitesse latérales et verticales sont trop faibles pour nécessiter l'utilisation d'un modèle de vitesse en profondeur. Des étapes de post-traitement légères sont appliquées après la sommation pour améliorer les données.

Les données ainsi retraitées sont recalées en temps pour assurer une homogénéité d'interprétation d'une ligne à l'autre. Une fois cette étape effectuée les données sont interprétées. Les toits et murs des principales cibles sont identifiés en s'appuyant sur les corrélations de puits. Les structures et failles sont interprétées. Grâce à la haute densité des lignes retraitées, l'interpolation des horizons identifiés sur les lignes peut être effectuée avec un degré élevé de confiance. L'illustration 3 montre à gauche le schéma structural au toit du Trias tel que connu avant l'étude Geoscan (d'après Delmas et al. (2002) et BRGM) et la cote du toit du Dogger à partir d'interpolation de données de puits et à droite la mise à jour du schéma de faille et du toit du Dogger, interprété en temps, à partir de la sismique 2D analysée dans le cadre du programme Géoscan. Les nouvelles interprétations apportent plus de détails sur le schéma structural avec de nombreuses nouvelles failles ayant été identifiées, surtout dans le nord de la zone ainsi que des structures anticlinales. L'interprétation quantitative qui suivra, permettra de fournir des informations sur les propriétés réservoirs pour les différentes cibles géothermales et de pouvoir mieux évaluer les secteurs plus ou moins favorables.

### 3. GEOSCAN ARC

Le site d'étude du projet Geoscan Arc, se situe sur une zone allant de Gardanne à l'est à Port Saint Louis à l'ouest et bordée au Sud par la Nerthe et au Nord par le chaînon de La Fare. Contrairement au projet Île-de-France, il n'y a pas dans la zone d'étude d'opérations de Géothermie, malgré un besoin en surface important et un potentiel géothermique identifié par une étude BRGM (Clot et al, 1978). L'objectif du projet sera d'apporter les connaissances nécessaires pour aider au développement de la géothermie, sachant que deux projets sont déjà en cours d'étude à Vitrolles et à Aix-en-Provence.



**Illustration 4 : Tracé des nouvelles lignes d'acquisition sismique du projet Geoscan Arc**

L'objet géologique étudié est le synclinal de l'Arc, une structure géologique majeure formée lors de l'orogénèse pyrénéo-provençale, s'étendant sur plus de 75 km. Traditionnellement, on pense que cette structure est interrompue à l'ouest par le système de failles Salon-Cavaillon, mais les données gravimétriques suggèrent qu'elle se poursuit sous la plaine de la Crau. La caractérisation de cette terminaison occidentale est cruciale pour comprendre le système hydrogéologique du synclinal, considéré comme l'exutoire du système karstique du Crétacé.

Les limites du synclinal sont définies par des unités chevauchantes du Jurassique au nord et au sud. Cependant, des études récentes montrent que le synclinal est compartimenté par la faille d'Aix, avec des flancs courts contre la Nerthe et la Sainte-Victoire.

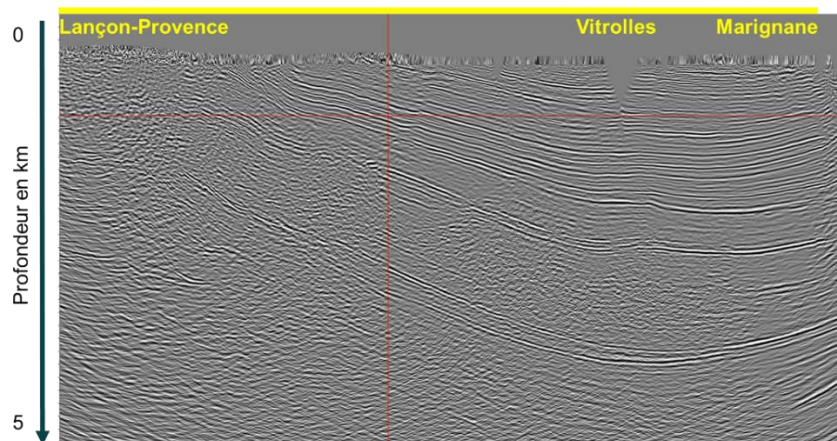
Le synclinal de l'Arc coïncide avec le bassin continental du Crétacé supérieur, où se sont accumulées des formations marines et fluvio-lacustres. La modélisation géométrique la plus récente confirme une géométrie en éventail ouvert vers l'ouest et le sud. Peu de données sont disponibles pour le secteur de l'Étang de Berre, mais les forages existants indiquent une remontée progressive des horizons du Crétacé.

Bien que des données sismiques issues de l'exploration pétrolière des années 60 à 80 existent, elles ne couvrent pas l'intégralité de la zone d'étude et ne permettent pas de lever toutes les incertitudes sur la structure géométrique de la partie ouest du synclinal et de valider le modèle hydrogéologique. Des questions restent en suspens concernant l'extension des faciès de l'Urgonien, les unités en contact au-dessus de la discordance, et la présence de failles mettant en contact l'Urgonien et/ou le Jurassique avec des unités perméables du Campano-Maastrichtien. L'acquisition de nouvelles données géophysiques est donc nécessaire pour améliorer la compréhension de cette structure et de son rôle dans le système hydrogéologique. Par ailleurs, pour mieux contraindre la structure et les propriétés des différentes cibles, un volet de géologie est inclus dans le projet. Cette partie comporte des campagnes de terrain, pour étudier les affleurements et mieux comprendre le système de karsts, l'analyse des lames minces faites à partir des échantillons récoltés sur le terrain, et l'étude des carottes de forages et des diagraphies.

L'acquisition géophysique réalisée s'est faite le long de 260 km de profil terrestre et de 60 km de profil « marine » sur l'étang de Berre. C'est la première fois qu'une telle acquisition est réalisée, permettant d'avoir une image continue entre l'est et l'ouest de l'étang de Berre. Du fait de la présence en surface de calcaire, une source est constituée d'une flotte de deux vibrateurs pour augmenter l'énergie transmise dans le sol, soit une force maximale de 120 000 lbs. Deux flottes opèrent au même moment. Le balayage de fréquence large bande va de 2 Hz à 96 Hz, et un point source est réalisé tous les 20 mètres. Les récepteurs sont des accéléromètres

sans fil espacés de 20 mètres. L'acquisition a eu lieu la nuit, ce qui a considérablement réduit le bruit enregistré. Sur l'étang une source marine de 320 cu.in a été utilisée avec un tir tous les 10 m. Des récepteurs autonomes marins ont été disposés au fond de l'étang tous les 40m. L'acquisition marine s'est effectuée de jours pour des raisons de sécurité. Au total, 5 semaines auront été nécessaires à partir du 21 octobre 2025 pour l'acquisition des données. Comme pour le projet Geoscan IDF, des journées portes ouvertes ont été organisées ainsi qu'une communication dans les journaux pour sensibiliser les citoyens au passage des camions vibreurs, mais aussi à la géothermie.

Le traitement de la donnée se fait dans un premier temps pour obtenir la structure et dans un second temps en préservant au maximum les amplitudes pour réaliser une étude plus quantitative de la donnée. Une migration en profondeur avec la construction d'un modèle de vitesse pour prendre en compte les variations de vitesses très fortes. L'illustration 5 montre un résultat intermédiaire du traitement de la nouvelle donnée sismique. On distingue bien la forme en gouttière du synclinal. Les roches qui sont à l'affleurement vers Lançons de Provence se retrouvent enfouies à plusieurs km de profondeur sous Vitrolles.



**Illustration 5 : Coupe sismique le long du profil nord-sud (NS04) acquis lors de la campagne Geoscan Arc**

Les actions à venir vont permettre d'obtenir une image en profondeur qui sera utilisée pour la construction d'un modèle géologique structurale 3D. Les études de géologie de terrain sont en cours et vont se poursuivre jusqu'à l'automne 2025. L'intégration des différentes données de structures et de propriétés réservoir, permettra de mieux comprendre le système géothermal et d'apporter des informations pertinentes aux pouvoirs publics, collectivités et industriels. Les rendus sont attendus à la fin du premier semestre 2026.

#### 4. CONCLUSION

Les programmes Geoscan, bien qu'ils ne soient pas encore terminés, ont d'ores et déjà permis d'apporter des informations pertinentes sur les deux zones d'études. Les études en cours permettront d'affiner les résultats et l'intégration des différentes données de structures et des propriétés réservoir, dans le but de mieux comprendre les différentes ressources géothermales étudiées. Ces informations seront pertinentes pour les pouvoirs publics, collectivités et industrielles dans leurs décisions de développement de la géothermie profonde. Les rendus sont attendus pour le début 2026 pour Geoscan IDF et à la fin du premier semestre 2026 pour Geoscan Arc.

#### 5. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Région Île-de-France pour son soutien du projet Geoscan Île de France, ainsi que la Région Sud, le département des Bouches du Rhône, et la Métropole Aix-Marseille-Provence pour leur soutien du projet Geoscan Arc.

#### BIBLIOGRAPHIE:

- Andrieu, S. (2016). Lien entre diagenèse des discontinuités, faciès sédimentaire et stratigraphie séquentielle : exemple de la plate-forme carbonatée de l'ouest de la France (Aalénien- Oxfordien). Thèse de doctorat de l'Université Paris Saclay.
- Baeten, G. et al., [2010]. Low-frequency generation using seismic vibrators: 72nd Annual International Conference and Exhibition, EAGE, Extended Abstracts, B015
- Clot, A., et Glintzboeckel, C. (1978). Etude des possibilités d'utilisation des ressources géothermiques à Marignane (Bouches-du-Rhône). Avant-projet technique et géologique. Rapport final BRGM/78-SGN-321-PRC
- Delmas, Jocelyne, P Houel, et R Vially. « Rapport régional d'évaluation pétrolière. » Institut Français du Pétrole, 2002.
- Guillocheau F. et al. (2000) « Meso-Cenozoic geodynamic evolution of the Paris Basin: 3D stratigraphic constraints. » *Geodinamica Acta* 13 (4), 189-245.
- Maurel C. et al. (2024) Données brutes de sismique réflexion 2D - campagne 24IDF du programme Géoscan Île-de-France. <https://doi.org/10.18144/f65a0388-1e27-4cbe-af5e-9fe3cf27afbd>
- Perrodon, A, et J Zabek. « Paris Basin, in Interior Cratonic Basins ». AAPG Memoir 51 (1990): 633-79.
- ten Kroode F, et al (2013) Broadband seismic data — The importance of low frequencies. *Geophysics*. 78 (2): WA3–WA14. doi: <https://doi.org/10.1190/geo2012-0294.1>