

# Projet : UPGEO

Communication, Résumé, Tfinal + 60 Mois - 14/10/2025

Navigation dans la fiche

---

Identité du projet

Résumé

Informations projet

Résumé public de suivi

## Identité du projet

### Informations projet

#### Code décision ANR du projet

ANR-19-CE05-0032

#### Titre du projet

Changement d'échelle et simulation des flux de chaleur pour améliorer l'efficacité des systèmes géothermiques profonds

#### Résumé du projet

La géothermie, c'est-à-dire la mobilisation de la chaleur contenue dans le sous-sol à très basse, basse ou haute température, est l'une des méthodes pour réaliser la transition énergétique. La stratégie énergie-climat de l'Île-de-France prévoit d'augmenter assez significativement à l'horizon 2030 la production de chaleur par géothermie profonde (x3,5 par rapport à 2015). Le rythme de développement actuel ne permettra pas d'atteindre cet objectif. Il faudrait atteindre un taux de 6 à 10 fois supérieur. La nouvelle programmation pluriannuelle de l'énergie renouvelable vient de revoir à la baisse ces objectifs en terme de déploiement de la géothermie profonde en France. Les retours d'expérience sur les opérations récentes en France ont soulevé des problèmes techniques et/ou scientifiques pour un fonctionnement efficace et durable des doublets géothermiques, tels que le risque élevé, mais non quantifié, de faible

débit d'eau / faible épaisseur du réservoir (métrique), le risque d'interférence entre doublets géothermiques dans les zones urbaines à forte densité d'infrastructures ou le risque de percée thermique précoce. Il existe un réel risque qu'une opération nouvelle n'obtienne pas une ressource géothermique présentant des caractéristiques de débit et de température suffisantes pour assurer la rentabilité du projet pendant sa durée de vie. Ce risque géologique constitue un obstacle au développement futur de la géothermie en France et en Ile-de-France. Il est clairement établi dans la stratégie énergie-climat de travailler à l'innovation en proposant des solutions qui optimisent et explorent le développement de nouvelles zones. Cette optimisation nécessite (1) une connaissance précise de l'hétérogénéité du réservoir en termes de géométries sédimentaires, porosité/perméabilité, connectivité du réservoir et (2) des simulations numériques fiables des écoulements et flux de chaleur à +30 ans, voire +100 ans après le début de la production. Le principal objectif est de réussir le changement d'échelle entre la perméabilité mesurée en laboratoire et la connectivité sédimentaire des corps réservoirs à l'échelle kilométrique. La façon d'homogénéiser les coefficients efficaces comme la porosité, la perméabilité, la déformation mécanique (tenseur de Gassman et coefficient de Biot) ou la dispersion thermique effective par des équations valables en tout point pour les constituants fluides et solides constituera le défi majeur de ce projet qui nécessitera de coupler des données et concepts géologiques et mathématiques.

## Résumé

### Résumé public de suivi ⓘ

**Site Web du Projet** (52/250 caract. max)

<http://hebergement.universite-paris-saclay.fr/upgeo/>

**Titre d'accroche du projet** (125/200 caract. max)

Changement d'échelle et simulation des flux de chaleur Pour améliorer l'efficacité de systèmes Géothermiques profonds - UPGEO

### **Sous - titre / Argument du projet** (499/500 carac. max)

En France, la géothermie a produit 7 térawattheures (TWh) de chaleur en 2023 : 2,3 TWh pour la géothermie profonde et 4,7 TWh pour la géothermie de surface, soit 0,49 % des 1420 TWh d'énergie produite. Son déploiement est limité par un risque géologique difficilement prédictible. UPGEO travaille à mettre au point un outil numérique prédictif permettant d'effectuer des simulations thermo-hydro-mécaniques et d'évaluer la performance d'un lieu donné en Ile-de-France sur son potentiel géothermique.

### **Titre de la partie enjeux et objectif** (130/200 carac. max)

Gestion des risques géologiques, prédiction de l'efficacité et de la durabilité des doublets géothermiques en domaine sédimentaire

### **Enjeux et objectifs** (2983/3000 carac. max)

La géothermie, c'est-à-dire la mobilisation de la chaleur contenue dans le sous-sol à très basse, basse ou haute température, est l'une des méthodes permettant de réaliser la transition énergétique. Malgré son potentiel, la géothermie pour le chauffage (hors production d'électricité) n'a produit qu'un million de térajoules (TJ) en 2020, soit seulement 0,17 % de la production annuelle mondiale d'énergie, qui s'élevait à 580 millions de TJ. En France, la géothermie a produit 7 térawattheures (TWh) de chaleur en 2023 : 2,3 TWh pour la géothermie profonde et 4,7 TWh pour la géothermie de surface, soit 0,49 % des 1 420 TWh d'énergie produits en France en 2023. Une des raisons de ce faible déploiement réside dans les risques géologiques élevés qu'une nouvelle opération n'obtienne pas une ressource géothermique présentant des caractéristiques de débit et de température suffisantes pour assurer la rentabilité du projet pendant sa durée de vie. Ce risque géologique constitue un obstacle important au développement futur de la géothermie en France et en Île-de-France.

Le projet UPGEO mène des recherches novatrices pour mieux prédire la géométrie des réservoirs géothermiques « stratigraphiques » dans les bassins et les transferts de chaleur associés. L'originalité du projet repose sur la constitution d'une équipe multidisciplinaire réunissant sédimentologues, hydrogéologues, géophysiciens et mathématiciens issus de neuf institutions : Géosciences Paris-Saclay (GEOPS), le Laboratoire de Mathématiques d'Orsay (LMO), le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), l'Institut Camille Jordan (ICJ), la Fédération de Mathématiques de CentraleSupélec (FdM), EPOC, l'IFPEN, le BRGM et

GEOFLUID.

Ce projet consiste à développer des méthodes innovantes de modélisation en proposant des solutions permettant d'optimiser et d'explorer le développement de nouvelles zones en domaine sédimentaire. Cette optimisation nécessite (1) une connaissance précise de l'hétérogénéité du réservoir en termes de géométries sédimentaires, de porosité/perméabilité et de connectivité du réservoir, et (2) des simulations numériques fiables des écoulements et flux de chaleur à +30 ans, voire +100 ans après le début de la production.

L'objectif principal du projet est d'améliorer, dans les modèles géologiques, le saut d'échelle entre les analyses ponctuelles mesurées en laboratoire (perméabilité) et leur représentation aux échelles du réservoir et du bassin (connectivité sédimentaire des corps réservoirs). La manière d'homogénéiser les coefficients efficaces, tels que la perméabilité ou la dispersion thermique effective, par des équations valables en tout point pour les constituants fluides et solides, constitue le défi majeur du projet. Celui-ci nécessite de coupler données et concepts géologiques et mathématiques. L'un des défis consiste à associer deux communautés scientifiques travaillant rarement ensemble en France : les géologues et les mathématiciens.

### **Titre de la partie Méthodes / Approches** (71/200 caract. max)

De la géologie de terrain aux simulations hydrodynamiques et thermiques

### **Méthodes / Approches** (2838/3000 caract. max)

L'approche et les méthodes utilisées dans UPGEO sont :

- Utiliser des diagraphies de puits, en particulier la RMN, ainsi que des échantillons de carottes ou de cuttings observés au microscope ou caractérisés au  $\mu$ CT scan pour caractériser les faciès, la microstructure et les propriétés pétrophysiques.
- Améliorer la qualité des relations permettant de mesurer les perméabilités à partir de l'outil RMN de puits.
- Compiler la base de données publiques de puits du Bassin de Paris afin de construire, à haute résolution, un modèle géologique 3D de deux aquifères du Bassin de Paris : les Calcaires du Jurassique moyen et les Sables de l'Albien.
- Utiliser des statistiques pour peupler les faciès et les géométries stratigraphiques des réservoirs carbonatés et silicoclastiques.

- Intégrer des données provenant d'affleurements analogues à des réservoirs de sub-surface par acquisition photogrammétrique par drones (surfaces stratigraphiques, surfaces sédimentaires, faciès, inclinaison des strates ou bancs...) afin de réaliser des modèles 3D analogues aux réservoirs de sub-surface.
- Utiliser les affleurements numériques et les modèles statiques associés afin d'améliorer la qualité des modèles statiques des réservoirs de subsurface.
- Commencer à constituer un catalogue d'affleurements analogues à des réservoirs géothermiques (Oolithe Blanche affleurant en Bourgogne, Calcaires bathoniens dans les Charentes, Grès de Roda de l'Yprésien dans le Bassin de Grauss-Tremp, Sables néocomiens dans le Pays de Bray).
- Proposer de nouveaux concepts de connectivité des réservoirs, à partir de modèles géostatistiques, pour accroître la fiabilité des simulations d'écoulement.
- Proposer de nouvelles équations pour le changement d'échelle, i.e. des équations Thermo-Hydro-Mécaniques (THM), incluant les équations quasi-statiques de Biot, pour la simulation d'écoulement dans des sables non fracturés ainsi que dans des réservoirs silicoclastiques et carbonatés fracturés.
- Travailler sur l'établissement de codes de simulation intégrant l'upscaling.
- Comparer les résultats des simulations THM aux données d'exploitation.
- Tester et discuter la qualité des prédictions THM en fonction des données de perméabilité utilisées (mesures en laboratoire versus perméabilités issues des tests de puits).
- Élaborer des modèles prédictifs pour la simulation de l'écoulement dans les systèmes sédimentaires géothermiques carbonatés et clastiques.
- Proposer une application de la nouvelle méthode à une installation spécifique pour estimer le risque géologique de l'exploration géothermique profonde dans le Bassin de Paris, et ainsi aider à la décision pour une municipalité ou une agglomération souhaitant construire un doublet géothermique.
- Fournir un flux de travail novateur pour la simulation, applicable à d'autres bassins sédimentaires.

## **Résultats** (2998/3000 carac. max)

Résultat 1 — Géomodélisation d'affleurements analogues aux réservoirs géothermiques

Une méthodologie a été développée pour reconstruire des affleurements numériques et créer des géomodèles 3D analogues aux réservoirs

géothermiques. Par photogrammétrie drone, les surfaces affleurantes sont modélisées en 3D, puis exploitées en laboratoire pour interpréter structures et faciès. Un « cube » numérique est ensuite généré et habillé en propriétés. Cette approche a été appliquée à quatre affleurements. Les données (terrain, carottes, échantillons) ont permis de caractériser les hétérogénéités de faciès, pétro-acoustique et RMN, définissant géométries et connectivités à haute résolution. Un catalogue d'analogues de réservoirs a été initié.

#### Résultat 2 — Hétérogénéités géologiques des aquifères du Dogger et de l'Albien

Les hétérogénéités des deux réservoirs ont été étudiées à plusieurs échelles (du  $\mu\text{m}$  au bassin). En Île-de-France, une modélisation fine (maille  $100 \times 100 \times 1,5$  m) révèle pour le Dogger des lentilles perméables (4 m d'épaisseur, 1,6 km de long), et pour l'Albien des niveaux sableux peu argileux vers le sommet. Cette caractérisation est un prérequis pour le positionnement optimal des futurs doublets géothermiques.

#### Résultat 3 — Calibration RMN pour la perméabilité

L'aquifère carbonaté du Dogger étant largement exploité, un outil RMN a été calibré en fonction des microfaciès pour estimer la perméabilité de façon continue. La relation établie entre signal RMN, faciès et perméabilité permet une interprétation plus fiable avec la sonde CMR<sup>©</sup> et la construction de nouveaux modèles pétrophysiques.

#### Résultat 4 — Analyse numérique poro-élastique déterministe

Le modèle de Biot, décrivant couplage entre écoulement et déformation, a été étudié avec coefficients connus. À l'aide de méthodes d'éléments finis et d'un schéma d'Euler implicite, l'existence, l'unicité et la convergence de la solution discrétisée ont été démontrées.

#### Résultat 5 — Analyse numérique poro-élastique stochastique

Les coefficients (Lamé, perméabilité) sont ici considérés aléatoires pour intégrer les incertitudes géothermiques. Une décomposition de Karhunen-Loève et une approche Monte-Carlo permettent d'estimer les comportements statistiques. Le couplage avec une équation de température conduit à un modèle thermo-poro-élastique décrivant l'injection d'eau froide et l'extraction de chaleur.

## Résultat 6 — Modélisation des écoulements et transferts thermiques

Des simulations thermiques et hydrauliques ont été réalisées dans les aquifères bathonien et albien. Les modèles 3D intégrant les mesures de perméabilité reproduisent mieux les temps de percée thermique que les modèles transmissifs simples. Pour l'Albien, des zones favorables ont été identifiées via un partitionnement k-means. Le modèle analytique de Gringarten & Sauty (1975) est étendu par des simulations géostatistiques et méthodes d'upscaling pour traiter les hétérogénéités verticales et latérales des réservoirs multicouches.

### **Perspectives** (1805/3000 carac. max)

Le projet a permis de poser les bases de nouvelles dynamiques de recherche et ouvre des perspectives structurantes à moyen et long terme.

Sur le plan mathématique, les travaux initiés autour du système de Biot seront poursuivis en étroite interaction avec les équipes de géologie. L'objectif est de développer des méthodes numériques avancées permettant d'exploiter les mesures des coefficients physiques obtenues par les géologues et de les intégrer dans le système thermo-poro-élastique. Le développement de méthodes statistiques performantes, telles que la méthode de Monte Carlo multi-niveaux, sera essentiel pour traiter efficacement les incertitudes. Nous envisageons également d'aborder des modèles non linéaires avec des conditions aux limites réalistes, afin de mieux représenter la complexité des systèmes géothermiques.

Du point de vue géologique, plusieurs axes de recherche ont été identifiés pour lever des verrous encore existants :

- Améliorer la compréhension des écarts importants de perméabilité observés entre les différentes méthodes de mesure (essais de puits versus mesures sur carottes) ;
- Mieux contraindre la diagenèse des niveaux perméables (origine, âge, température, processus), afin de mieux en comprendre la distribution spatiale et son impact sur la productivité des réservoirs ;
- Exploiter de manière plus systématique les analogues d'affleurement pour affiner la connaissance de la subsurface, en mobilisant notamment des approches statistiques avancées telles que les méthodes multi-point statistics.

Ces perspectives ouvrent la voie à de nouvelles collaborations interdisciplinaires, à des développements méthodologiques ambitieux et à

une meilleure intégration des connaissances pour optimiser l'exploration et l'exploitation durable des ressources géothermiques.

### **Catchy project title** *(93/200 carac. max)*

UPscaling and heat simulations for improving the efficiency of deep GEOthermal energy - UPGEO

### **Basis and Rationale of the project** *(484/500 carac. max)*

In 2023, geothermal energy produced 7 terawatt-hours (TWh) of heat in France: 2.3 TWh from deep geothermal systems and 4.7 TWh from shallow geothermal systems, representing only 0.49% of the 1,420 TWh of total energy produced. Its deployment is limited by geological risks that remain difficult to predict. UPGEO aims to develop a predictive digital tool for thermo-hydro-mechanical (THM) simulations to evaluate the geothermal potential of specific sites in the Île-de-France region.

### **Shows the general objective of the project and the main issues**

#### **raised** *(122/200 carac. max)*

Geological risk management, prediction of the efficiency and durability of geothermal doublets in sedimentary environments

### **Main issues raised & general objectives** *(1732/3000 carac. max)*

Geothermal energy — the use of subsurface heat at very low, low, or high temperature — is a key technology for the energy transition. Despite its potential, geothermal heating (excluding power generation) produced only 1 million terajoules (TJ) in 2020, i.e. 0.17% of global annual energy production (580 million TJ). In France, geothermal heat production in 2023 reached 7 TWh, accounting for 0.49% of total national energy production.

One major barrier to wider deployment is the geological risk that a new installation may not deliver sufficient flow rates and temperatures to ensure long-term project viability. This risk is particularly critical in the Paris Basin.

UPGEO develops innovative methods to better predict the geometry of stratigraphic geothermal reservoirs and associated heat transfers. The project brings together sedimentologists, hydrogeologists, geophysicists and mathematicians from nine institutions: GEOPS, LMO, LSCE, ICJ, FdM, EPOC, IFPEN, BRGM and GEOFLUID.

The project focuses on developing innovative modeling approaches to optimize and explore new sedimentary zones. This requires (1) a detailed

understanding of reservoir heterogeneity (sedimentary geometries, porosity–permeability, connectivity) and (2) reliable numerical simulations of fluid flow and heat transfer over periods of +30 to +100 years.

The main objective is to improve upscaling methods that link laboratory-scale permeability measurements to reservoir- and basin-scale connectivity of sedimentary bodies. Developing effective parameter homogenization (e.g. permeability, thermal dispersion) requires coupling geological and mathematical approaches and fostering collaboration between communities that rarely interact in France.

### **Shows the methods or technologies used** (74/200 carac. max)

From 3D outcrop analogues to geothermal reservoir hydrodynamic simulations

### **Methods or technologies used** (1317/3000 carac. max)

To sum up, the main methods of UPGEO will be:

- Use well logs (especially NMR), core and cuttings (microscopy,  $\mu$ CT scan) to characterize facies, microstructure and petrophysical properties.
- Improve correlations between NMR well logs and permeability.
- Compile public well databases to build high-resolution 3D geological models of the Middle Jurassic limestone and Albien sandstone aquifers.
- Use statistical methods to populate facies and stratigraphic geometries.
- Integrate photogrammetric drone acquisitions of outcrop analogues to build 3D analogue models.
- Use digital outcrops to enhance static reservoir models and create an analogue outcrop catalogue (e.g. Oolithe Blanche, Bathonian carbonates, Roda sandstones, Neocomian sands).
- Develop new reservoir connectivity concepts using geostatistical models.
- Propose new upscaling equations (THM), including quasi-static Biot equations for fractured and unfractured siliciclastic and carbonate reservoirs.
- Implement THM simulation codes and compare results to operational data.
- Evaluate predictive performance using different permeability datasets (lab vs. well tests).
- Apply the method to a real case to support geothermal exploration decisions for municipalities.
- Provide an innovative, transferable workflow for sedimentary basins worldwide.

## **Main results** (1841/3000 charac. max)

### Result 1 — Geomodeling of Outcrop Analogues

A methodology was developed to reconstruct digital outcrops and generate 3D geomodels of geothermal reservoir analogues. Drone photogrammetry and lab analysis were applied to four key outcrops, allowing high-resolution characterization of facies, petrophysical and NMR heterogeneities. A reservoir analogue catalogue was initiated.

### Result 2 — Geological Heterogeneities of Dogger and Albien Aquifers

Heterogeneities were characterized at multiple scales. High-resolution 3D models reveal permeable Dogger lenses (4 m thick, 1.6 km long) and sand-rich Albien layers. These data are critical for optimal geothermal doublet placement.

### Result 3 — NMR Calibration for Permeability

The Dogger aquifer was studied extensively. NMR well logs were calibrated with microfacies data, improving permeability estimation and enabling more robust petrophysical modeling.

### Result 4 — Deterministic Poroelastic Analysis

The Biot model was analyzed using finite element methods and implicit Euler schemes. Existence, uniqueness, and convergence of the discretized solution were demonstrated.

### Result 5 — Stochastic Poroelastic Analysis

Lamé parameters and permeability were treated as random variables. Karhunen–Loève decomposition and Monte Carlo methods provided statistical estimates. Coupling with temperature equations yielded a thermo-poroelastic model of heat extraction.

### Result 6 — Flow and Heat Transfer Modeling

Thermal and flow simulations in Bathonian and Albien aquifers using 3D permeability models better reproduced thermal breakthrough times than transmissivity-only models. For the Albien, favorable zones were identified using k-means clustering. The Gringarten & Sauty (1975) analytical model was extended using geostatistical simulations and upscaling to account for reservoir heterogeneity.

## **Outstanding feature (or focus) and future prospect** (894/3000 charac. max)

This project lays the groundwork for long-term interdisciplinary research dynamics.

Mathematics:

Future work will develop advanced numerical methods to integrate geological measurements into the thermo-poroelastic system. Efficient stochastic methods, such as multi-level Monte Carlo, will be key to handling uncertainties. Non-linear models with realistic boundary conditions will be explored.

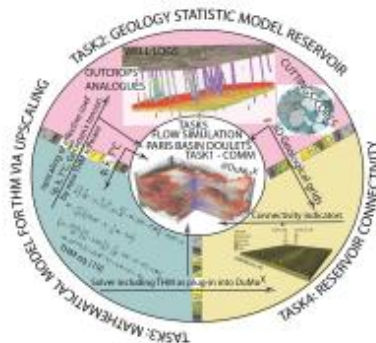
Geology:

Future directions include:

- Reducing discrepancies between well test and core permeability measurements.
- Better constraining diagenetic processes controlling reservoir quality.
- Systematically using outcrop analogues combined with advanced statistics (e.g. multiple-point statistics) to refine subsurface models.

These developments will strengthen interdisciplinary collaboration and provide more accurate, reliable tools for optimizing sustainable geothermal resource exploitation.

## Illustration du projet 1



### Légende et crédits de l'illustration (57/500 carac. max)

Organisation du projet UPGEO autour de différentes tâches

### Illustration description or photo credits (56/500 carac. max)

Organisation of the UPGEO project around different tasks

