

Le sous-sol, le grand oublié de la transition énergétique ?

CNRS-Le Journal 12.09.2022, par [Anaïs Culot](#)

<https://lejournale.cnr.fr/articles/le-sous-sol-le-grand-oublie-de-la-transition-energetique>

Quelles sont les ressources du sous-sol ? Quels en sont les usages possibles dans le cadre de la transition énergétique ? Du stockage à la production d'énergie, de l'exploitation minière à l'enfouissement de CO₂, zoom sur les potentiels, les risques associés et la légitimité de ces promesses souterraines.

Réduire de 50 % les émissions de gaz à effet de serre (GES) d'ici 2030 et atteindre la neutralité carbone en 2050. Cet objectif affiché par la France pour maintenir le réchauffement global en dessous de 2 °C demande une transformation massive de nos modes de production et de consommation d'énergie. Ironie du sort : et si le sous-sol, dont ont été extraites les énergies fossiles responsables du changement climatique, faisait aussi partie de la solution ? « *Depuis la sortie des hydrocarbures, son exploitation a mauvaise presse* », constate Laurent Jammes, directeur des relations industrielles de l'Institut national des sciences de l'Univers (Insu) du CNRS. *Énergie, matières, minéraux, stockage... celui-ci a pourtant beaucoup à offrir à la transition énergétique.* »

Alors quel rôle stratégique pourrait-il jouer ? Quels sont les risques et impacts associés ? Le colloque « [Ressources et usages du sous-sol dans la transition énergétique](#) » qui se tiendra les 27 et 28 septembre 2022 à la Cité des sciences et de l'industrie – organisé par le CNRS, le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), IFP Énergies nouvelles (Ifpen), l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) et le pôle Avenia – a pour but de mettre un coup de projecteur sur les usages du sous-sol. À cette occasion, plongeons ensemble vers les profondeurs à la découverte des atouts dissimulés de la Terre.

Géothermie : une pratique ancestrale sous-exploitée

Il existe deux grands types de géothermie : celle de surface où l'énergie est prélevée à moins de 200 mètres de profondeur, et une plus profonde. Cette dernière présente un avantage certain dans le cadre de la transition énergétique. En effet, l'exploitation de fluides à des températures plus élevées qu'en surface permet d'alimenter des réseaux de chaleur ou des procédés industriels, mais aussi de produire de l'électricité en alimentant des turbines, voire même les deux à la fois lorsque les températures sont au-delà de 110 °C (cogénération).

Le défi de la géothermie profonde est d'augmenter la perméabilité du milieu tout en contrôlant la taille des séismes générés par cette manipulation.

Mais comment ça marche ? « *En pratique, il faut forer à grande profondeur – jusqu'à plusieurs kilomètres – pour extraire des fluides du sous-sol. Ces derniers sont pompés vers la surface afin de récupérer leur chaleur, avant d'être réintroduits dans le sous-sol une fois refroidis et ce, le plus loin possible des aquifères utilisés pour l'eau potable* », explique Jean Schmittbuhl, chercheur en géosciences à l'Institut Terre et environnement de Strasbourg¹.

Il est parfois nécessaire de modifier la perméabilité du sous-sol pour favoriser le transport de ces fluides (technique dite EGS pour *Enhanced Geothermal Systems*). L'objectif est alors d'utiliser les failles géologiques existantes. Cependant ces failles sont aussi à l'origine des séismes. Le défi de la géothermie profonde est ainsi d'augmenter la perméabilité du milieu tout en contrôlant la taille des

séismes générés par cette manipulation. Un domaine encore mal maîtrisé comme en témoigne la récente crise sismique de Strasbourg.

Actuellement, la France dispose de plusieurs réseaux de chauffage urbain (60-90°C) utilisant la géothermie de surface à l'image de l'utilisation de l'eau profonde du Dogger dans le fond du bassin parisien. Elle dispose également de centrales géothermiques électrogènes de forte puissance situées en général à proximité de structures volcaniques. Un des enjeux nationaux est d'étendre cette technologie à des régions non volcaniques pour l'utilisation de fluides chauds profonds (150-200 °C contre au-delà de 250 °C actuellement). En ce sens, des projets pilotes existent en Alsace à Soultz-sous-Forêts et Rittershoffen.

Néanmoins, des développements sont encore nécessaires pour que la chaleur terrestre joue un rôle significatif dans la transition énergétique française. La géothermie a des atouts : elle n'a pas de problème d'intermittence contrairement aux autres énergies renouvelables. Sa production de chaleur est efficace et génère peu de CO₂. Par ailleurs, d'autres perspectives émergent avec des utilisations plus diversifiées des fluides profonds comme l'exploitation de lithium et de l'hydrogène natif qu'ils peuvent contenir.

Captage et stockage du CO₂ : une piste pour dépolluer l'atmosphère

Afin d'atteindre la neutralité carbone, certains pays envisagent également de capter une partie des émissions anthropiques de CO₂, voire d'extraire directement le CO₂ de l'atmosphère. Des [projets commerciaux](#) ont d'ores-et-déjà démontré la faisabilité technique des technologies de captage en sortie d'usine et de stockage géologique de CO₂. La plus grande usine de captage et de stockage de CO₂, dénommée Orca, se trouve actuellement en Islande. Mais jusqu'à présent la méthode qu'elle utilise consomme trop d'énergie pour envisager un déploiement viable de cette technologie à grande échelle.

Comment ça marche ? Le principe du stockage géologique exploite la porosité naturelle du sol. Tel un aquarium empli de cailloux, le sol est parsemé d'espaces vides pouvant accueillir des fluides. Le CO₂ est alors stocké dans des conditions dites supercritiques : il a la densité d'un liquide et la mobilité d'un gaz. « *Les sites potentiels se trouvent pour la plupart dans les bassins sédimentaires – les bassins aquitain et parisien en France – par exemple les aquifères salins profonds, les réservoirs déplétés de pétrole ou de gaz, ou encore les veines de charbon* », explique Laurent Jammes. Idéalement, ces sites doivent être proches des lieux d'émission afin de limiter le transport de CO₂. Néanmoins, d'autres structures géologiques sont à l'étude dont les basaltes² et les roches mantelliques afin de contourner cette contrainte spatiale.

Plus largement, les recherches portent sur la capacité d'injection de gaz dans le sous-sol, le devenir à long terme du CO₂ et la qualité du confinement. De même, de nombreuses études sont menées sur le contrôle des risques. Par exemple : les fuites de gaz vers la surface et de contamination des aquifères d'eau potable, d'acidification des sols ou encore les impacts possibles sur la faune et la flore. Comme pour la géothermie, l'injection de CO₂ peut aussi induire de la sismicité. « *Ces effets peuvent, quant à eux, être contrôlés lors des opérations à partir de modèles et de mesures de monitoring, qui permettent de suivre le comportement des roches sous l'effet de la pression* », précise Laurent Jammes.

Stockage géologique : des développements entre terre et mer

Dans un premier temps, c'est surtout en mer que les projets de stockage géologique de CO₂ pourraient se multiplier à l'image du projet Sleipner³, en Norvège, où sont stockées [0,9 mégatonnes de CO₂ par an](#). D'autres projets *offshore* sont en cours de développement en Norvège, aux Pays-Bas et en Angleterre. Ces derniers s'appuient sur les résultats de recherche et le savoir-faire engrangés lors de la

réalisation des projets pilotes européens des années 2010, à Ketzin en Allemagne et à Chapelle-de-Rousse dans le Béarn.

Cependant, le déploiement de la technologie piétraire en Europe et en France. Elle est mentionnée pour la première fois dans la deuxième [Stratégie nationale bas-carbone](#) en 2020⁴, mais aucun projet n'a été réalisé depuis. Seule l'initiative [Pycasso5](#) de captage, stockage et utilisation de CO₂, poussée par le pôle Avenia, progresse dans la définition d'une feuille de route régionale en réunissant différents acteurs sur le sujet.

La question du stockage ne se limite pas au CO₂. Des vecteurs énergétiques comme le gaz naturel, la chaleur ou le froid et l'hydrogène peuvent aussi être stockés temporairement dans le sous-sol.

Coté recherche, un des axes du nouveau [Programme et équipements prioritaires de recherche \(PEPR\) centré sur la décarbonation de l'industrie](#) s'intéressera notamment aux conditions de déploiement de la filière sur le sol français à compter de septembre 2022. Mais la question du stockage ne se limite pas au CO₂. Des vecteurs énergétiques comme le gaz naturel, la chaleur ou le froid et l'hydrogène peuvent aussi être stockés temporairement dans le sous-sol. Ils assurent ainsi l'approvisionnement en énergie des consommateurs en fonction de la demande des réseaux.

Enfin, le sous-sol est aussi envisagé comme une possibilité pour le stockage à très long terme pour les déchets nucléaires (projet Cigéo), cette filière restant un pilier stratégique de la transition énergétique française. La durée de vie et la vitesse à laquelle se détériorent les contenants de ces déchets dépendent toutefois des conditions chimiques de l'environnement qui les entoure. Ainsi, des incertitudes demeurent toujours sur le risque de libération de radiations après enfouissement de ces déchets.

Métaux : l'or noir de la transition énergétique

Considérés comme critiques, les métaux rares extraits des mines sont souvent au cœur de l'attention politique et médiatique. Or, ces ressources représentent une goutte d'eau dans l'océan minéral en perpétuelle croissance qui est utilisé chaque année à travers le monde. Avec la transition énergétique, les matières n'auront pas besoin d'être critiques pour devenir problématiques.

En 2022, la majorité des près de 100 milliards de tonnes de ressources consommées chaque année correspond au sable, gravier et ciment, puis aux métaux comme l'acier, l'aluminium et le cuivre⁶. Ces derniers sont largement utilisés dans les technologies des énergies renouvelables. Sauf qu'à puissance équivalente, les infrastructures et technologies associées aux énergies renouvelables consomment plus de métaux qu'une centrale nucléaire ou thermique⁷. Produire davantage d'électricité par énergies renouvelables augmentera donc la consommation de ressources minières.

Produire davantage d'électricité par énergies renouvelables augmentera la consommation de ressources minières.

Pouvons-nous alors anticiper les besoins de demain ? Avec son équipe, Olivier Vidal, géologue à l'Institut des sciences de la Terre⁸, modélise la demande future en matières selon différents scénarios de production d'énergie. D'ici le milieu du siècle, le chercheur estime « *qu'il faudra produire autant de métaux en trente ans que depuis l'aube de l'humanité* ». [Un rapport de l'Académie des sciences et de l'Académie des technologies](#) sur les métaux rares a, quant à lui, montré que le programme de véhicules électriques français réclame des quantités de lithium excédant les productions mondiales d'aujourd'hui.

Mais ce n'est pas juste un problème de ressources et de réserves. « *La quantité d'eau nécessaire pour répondre à la demande de cuivre jusqu'en 2050 (estimée à 200 km³), sera l'équivalent d'un litre d'eau par personne au niveau mondial* », décrit Olivier Vidal. Sans compter sur l'eau nécessaire à la

production de différents métaux et les conflits d'usages avec d'autres secteurs comme l'agriculture. Au chercheur d'ajouter : « *les impacts environnementaux de la production des matières premières sont conséquents : érosion des sols, émissions de gaz à effet de serre, etc. C'est la réalité derrière la transition énergétique.* »

Autre point critique : les seuils de tolérance des populations locales aux changements engendrés par l'exploitation minière. Le Salvador, par exemple, a banni les mines de son territoire suite à des pollutions massives. Enfin, l'extraction de ces matières demandera beaucoup d'énergie et va à l'encontre d'une stratégie énergétique qui serait basée sur une plus grande sobriété. Environ 35 % de la consommation énergétique de l'industrie mondiale sert actuellement à produire les ressources minérales. Une activité responsable de 50 % des émissions de CO₂ du secteur industriel⁹. Autrement dit, la transition énergétique pourrait entraîner dans un premier temps une hausse de la consommation d'énergie et de la pollution. « *Cela ne signifie pas que la transition est impossible. L'enjeu est de bien définir le besoin en ressources et en déduire des stratégies adaptées pour y accéder* », souligne Olivier Vidal.

Creuser les enjeux géostratégiques du sous-sol

L'avenir de l'exploitation minière ne saurait se défaire d'une démarche d'économie circulaire. Le recyclage des métaux consomme moins d'énergie que leur extraction. « *Cependant, tant que nous serons en période de croissance de la consommation avec l'émergence économique de pays très peuplés, la partie recyclable des métaux qui correspond aux productions d'il y a 20 à 30 ans, ne pourra pas répondre à la demande* », explique Olivier Vidal.

Pour les scientifiques, la part de métaux recyclés dans la production mondiale ne sera significative qu'à partir de la deuxième moitié du siècle.

Pour les scientifiques, la part de métaux recyclés dans la production mondiale ne sera significative qu'à partir de la deuxième moitié du siècle. L'accès aux ressources minières est donc au cœur de stratégies géopolitiques. Consommatrice de 20 % de la production mondiale de métaux, alors qu'elle en produit moins de 5 %, l'Europe est fortement dépendante d'autres nations. Conséquence : la fragilisation de certaines chaînes de valeurs industrielles très consommatrices.

Le [PEPR « Sous-sol bien commun »](#), coordonné par le CNRS et le BRGM à compter de septembre 2022, aura entre autres pour objectif d'identifier les ressources disponibles sur le territoire français et de réévaluer le potentiel méconnu du Massif central¹⁰.

Des usages à débattre

Pour autant, le sous-sol ne figure pas dans les plans de la transition énergétique française. Jusqu'à présent, ses usages à la marge n'ont pas toujours été couronnés de succès. Crise de la géothermie profonde à Strasbourg entre 2019-2021, abandon du projet de captage et de stockage de CO₂ Ulcos, dans le cadre programme européen NER 300, réforme limitée du code minier en France... Les oppositions sont souvent mises en avant pour expliquer ces échecs.

C'est le manque de portage politique qui pousse généralement à l'abandon des projets, et non les oppositions qui sont normales en démocratie.

Xavier Arnould de Sartre, géographe au laboratoire Transitions énergétiques et environnementales¹¹, s'est intéressé aux conflits des dernières décennies. « *Habituellement, lorsqu'un projet est remis en cause, on oppose l'intérêt particulier du riverain à l'intérêt général. Sauf que la France n'a jamais défendu qu'il était de l'intérêt supérieur de la nation que d'exploiter le sous-sol. C'est le manque de*

portage politique qui pousse généralement à l'abandon des projets, et non les oppositions qui sont normales en démocratie », explique le chercheur.

De leur côté, les mines sont toujours au cœur de controverses comme l'a démontré [l'enquête publiée en mars 2022](#) par les journalistes de *Forbidden stories* sur la pollution massive des terres et des eaux par un géant de l'industrie minière au Guatemala.

Plusieurs facteurs freinent encore l'exploitation des ressources ou des usages du sous-sol. Les marchés associés aux différentes ressources sont difficiles à prédire, avec des incertitudes sur les stocks disponibles et donc risqués pour les industriels. De plus, depuis la fermeture des mines en France, l'administration publique a perdu le savoir-faire nécessaire à la mise en place et au contrôle de l'exploitation minière. Enfin, l'absence de stratégie politique pour l'exploitation des ressources ou les usages du sous-sol a fragmenté ce dernier en filières concurrentes. L'exploitation du sous-sol en France n'en est qu'à ses balbutiements. « *Pour que cela change, il faut rassembler les différentes parties prenantes et mettre en débat son utilisation globale en partant des besoins de la transition énergétique et non des intérêts des différentes filières industrielles. Au même titre que les océans, le sous-sol doit devenir un bien commun* », conclut Xavier Arnauld de Sartre. ♦

Informations

Colloque « [Ressources et usages du sous-sol dans la transition énergétique](#) », 27 et 28 septembre 2022 à la Cité des sciences et de l'industrie à Paris, organisé par le CNRS, le BRGM, Ifpen, l'Ademe et Avenia.

Notes

- [1.](#) Unité CNRS/Université de Strasbourg.
- [2.](#) Le projet de recherche européen [CarbFix](#) a, par exemple, montré que 95 % du CO₂ injecté à l'aide d'eau dans une roche basaltique se fixait sous forme de calcite en seulement deux ans.
- [3.](#) Il s'agit de la plus ancienne unité du genre. Elle est opérationnelle depuis 1996 et est rattachée à une plateforme d'exploitation de gaz naturel en mer du Nord.
- [4.](#) Instaurée par la loi du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte, la première stratégie nationale bas-carbone (SNBC) est la feuille de route de la France pour conduire la politique d'atténuation du changement climatique.
- [5.](#) En Nouvelle-Aquitaine et Occitanie.
- [6.](#) Selon [les prévisions de l'Organisation de coopération et de développement économiques \(OCDE\)](#), la demande mondiale en métaux devrait atteindre près de 20 milliards de tonnes d'ici 2060.
- [7.](#) En moyenne, l'énergie éolienne a une intensité en acier de 250 tonnes/MégaWatt de capacité, alors que l'énergie nucléaire a une intensité de 60-120 tonnes d'acier par MégaWatt de capacité. Par ailleurs, il faut beaucoup plus d'infrastructures, environ 700 éoliennes (de 6 MégaWatt), pour produire la même quantité d'énergie qu'une centrale nucléaire de 1 300 MégaWatt. Voir [Présentation d'Olivier Vidal](#) au séminaire Transition énergétique et ressources minérales, Les défis à relever - 9 avril 2018.
- [8.](#) Unité CNRS/IRD/Université Grenoble-Alpes/Université Savoie Mont-Blanc.
- [9.](#) En prenant en compte la production d'acier et de ciment.
- [10.](#) Le dernier inventaire minier national a été mené entre 1975 et 1992.
- [11.](#) Unité CNRS/Université de Pau et des pays de l'Adour.