



**CONTACT PRESSE**

Tél. 02 38 64 46 65  
Port. 06 84 27 94 14  
[presse@brgm.fr](mailto:presse@brgm.fr)

## ***Le sous-sol et l'énergie : opportunités et enjeux***

Le monde souterrain joue un rôle très important dans le domaine énergétique : ressources minérales, stockage, exploitation de chaleur... Son potentiel est connu, mais son utilisation nécessite des efforts de recherche et développement notamment dans le cadre de la transition énergétique. Ce dossier fait le tour d'horizon des enjeux et des usages du sous-sol.

### **Sommaire**

- 1/ L'espace souterrain, un rôle stratégique sous-estimé ?
- 2/ La géothermie, un potentiel encore élevé
- 3/ Le sous-sol, un espace de stockage naturel
- 4/ Les métaux critiques au cœur de la transition énergétique

p.2  
p.3  
p.5  
p.8



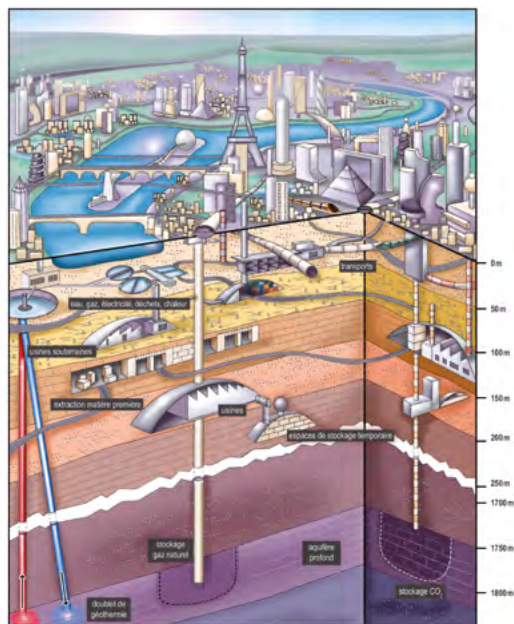


# 1/ L'espace souterrain, un rôle stratégique sous-estimé ?

**Le monde souterrain joue un rôle très important dans le domaine énergétique : ressources minérales, stockage, exploitation de chaleur... Les approches technologiques pour utiliser le sous-sol sont multiples et la recherche pour développer de nouvelles techniques se poursuivent. Si les différents usages du sous-sol sont connus d'assez longue date, son potentiel demeure important. Ainsi de la géothermie qui permet d'exploiter la température relativement stable des roches, du stockage de CO<sub>2</sub> ou d'hydrogène, encore peu développé, ou de la recherche de ressources minérales.**

Les potentialités du sous-sol sont multiples en matière de transition énergétique.

© BRGM



La question des métaux est particulièrement prégnante. Les énergies renouvelables et l'électromobilité vont en effet mobiliser de grandes quantités d'éléments. Selon les projections actuelles, nous pourrions consommer autant de métaux dans les prochaines décennies que depuis les premiers pas de la métallurgie au Néolithique. La demande en cuivre, indispensable au réseau électrique, pourrait doubler d'ici 2030 et celle de nickel tripler. Pour le lithium et les terres rares, elle devrait être multipliée par quatre selon certaines projections.

**Une exploitation intelligente et durable du sous-sol nécessite un préalable : une connaissance poussée et une bonne compréhension des risques associés.** Née en Europe il y a plusieurs siècles, la science géologique s'est considérablement développée au fil du temps, intégrant un corpus de savoirs toujours plus important. Loin d'être achevée, la connaissance du sous-sol peut se renouveler et être considérablement affinée, notamment via des campagnes géophysiques systématiques. ■

## LA CONNAISSANCE DU SOUS-SOL, UN ENJEU CLEF DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Depuis la fin des années 90, le Service géologique national relance des campagnes d'acquisition de données par géophysique aéroportée, lesquelles permettent d'affiner la connaissance du sous-sol français. Les nouvelles techniques développées ces dix dernières années et l'usage de l'hélicoptère ont considérablement amélioré la qualité des informations obtenues.

Durant l'été 2022, un hélicoptère a ainsi survolé la moitié ouest du Massif central pour doter la région d'une couverture moderne de données électromagnétiques, magnétiques et gamma-spectrométriques. Ces relevés géophysiques présentent l'intérêt d'une couverture rapide, homogène et continue du territoire survolé et le traitement des données restitue une imagerie multi-paramètres du sous-sol que l'on combine avec des modèles 3D. Ils contribuent à caractériser le sous-sol depuis la proche surface jusqu'à plusieurs centaines de mètres de profondeur, pour aider à en reconnaître les ressources minérales, hydrologiques et géothermiques, ou encore évaluer les aléas et venir en soutien à des travaux d'aménagement.



Campagne de géophysique hélicoptérée.

© BRGM



## 2/ La géothermie, un potentiel encore élevé

La géothermie regroupe l'ensemble des technologies qui permettent d'exploiter la chaleur de la terre, en surface ou en profondeur. Elle répond à des besoins variés, chauffage, eau chaude sanitaire, rafraîchissement ou encore production d'électricité.



Réalisation d'un champ de 13 forages géothermiques de 100 m de profondeur sur la plate-forme Géothermie du BRGM.  
© BRGM-ADEME - DIDIER DEPOORTER

Il existe différents types de géothermie. Celle dite de surface utilise l'énergie présente dans le sous-sol à des profondeurs variant de quelques mètres à 200 mètres. La température du sol est stable, entre 10 et 20 degrés. En hiver, le sol refroidit moins vite que l'air extérieur et constitue un réservoir de chaleur. En été c'est l'inverse.

L'énergie peut être captée par des échangeurs enterrés qui alimentent une pompe à chaleur (PAC) géothermique, laquelle transforme cette énergie pour les usages souhaités et la transmet via diverses installations, radiateurs, planchers chauffants, etc. Les PAC géothermiques peuvent équiper des bâtiments de tous types et toutes tailles, neuf, ancien, habitat individuel, collectif, bureaux, etc. Elles sont aussi adaptées aux piscines, pour chauffer les bassins et déshumidifier l'air,

à des établissements de santé ou dans le secteur agricole, pour chauffer des serres ou pour l'élevage.

### Géothermie de surface, géothermie profonde



La centrale de géothermie profonde de Soultz-sous-Forêts.  
© BRGM

La géothermie dite profonde valorise quant à elle l'énergie du sous-sol au-delà de 200 mètres de profondeur. En France, 59 réseaux de chaleur urbains sont alimentés par de la géothermie profonde. C'est l'Île-de-France qui concentre le plus grand nombre d'équipements. Ils exploitent principalement l'aquifère du Dogger, situé entre 1600 et 1800 m de profondeur, qui referme une eau entre 56 et 85 degrés.

Elle permet aussi de produire de l'électricité en alimentant des centrales de puissance électrique allant de 10 à 50 MWe. Les ressources géothermiques pour cet usage se trouvent souvent dans des zones de volcanisme actif ou récent, entre 500 et 1500 m de profondeur, avec des températures de 250 à 350 degrés. Une très bonne connaissance du sous-sol acquise via des campagnes d'exploration est nécessaire pour engager un projet.





En France, ces ressources sont présentes en outre-mer, par exemple en Guadeloupe avec [la centrale en exploitation à Bouillante \(15 MWe\)](#), mais aussi dans des zones stables à des profondeurs bien plus grandes, dans des réservoirs fracturés naturellement comme en Alsace. La centrale de Soultz-sous-Forêts, au nord d'Haguenau, produit une puissance électrique de 1,5 MWe depuis sa mise en service en 2008.

## Une énergie renouvelable et durable

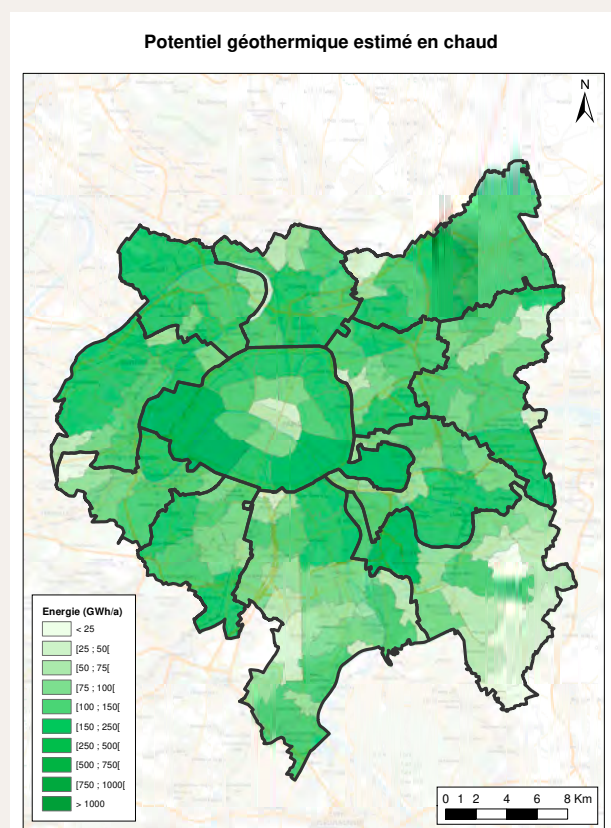
**Ces installations ont une emprise au sol non négligeable, mais elles peuvent fonctionner en continu indépendamment de la température extérieure.** La technologie valorise l'énergie sur place, sans transport ni combustion, avec une empreinte carbone faible. Pour la géothermie profonde, les équipements de production de chaleur valorisent directement l'énergie du sous-sol sans pompe à chaleur, avec une efficacité élevée. Sur les réseaux de chaleur d'Île-de-France, 1 kWh d'électricité consommé par l'installation permet de produire environ 20 kWh de chaleur.

En France on dénombre près de 200 000 installations, essentiellement des pompes à chaleur géothermique de maisons individuelles. La géothermie est présente à peu près partout sur le territoire à des profondeurs allant de quelques mètres à 5 km, mais cette ressource pourrait être davantage exploitée. ■

### LA GÉOTHERMIE POURRAIT COUVRIR LA MOITIÉ DES BESOINS THERMIQUES DU GRAND PARIS

C'est un grand travail de cartographie des nappes d'eau souterraine favorables à la géothermie de surface qu'ont entrepris le BRGM et la métropole du Grand Paris, avec l'appui de l'Ademe, entre 2020 et 2022. [Les géologues et thermiciens du Service géologique national ont pu ainsi évaluer la quantité d'énergie qui pourrait être extraite du sous-sol métropolitain](#) via deux techniques éprouvées (les échangeurs verticaux et les doublets sur nappes) à Paris et dans les 130 communes environnantes, avec pour objectif de créer un outil d'aide à la décision pour déployer davantage cette énergie.

Le potentiel est jugé très important. Actuellement la consommation du Grand Paris en énergie thermique (chauffage, eau chaude sanitaire et climatisation) est estimée à près de 51 TWh par an. Selon cette étude, la géothermie de surface pourrait en théorie couvrir plus de la moitié de ces besoins si tous les bâtiments disposaient des systèmes de distribution adéquats exigés par les pompes à chaleur. À ce jour, on estime à près de 900 le nombre d'installations de géothermie de surface sur le territoire du Grand Paris.



Énergie que peut fournir la géothermie en chauffage sur chaque commune en GWh par an.

© BRGM

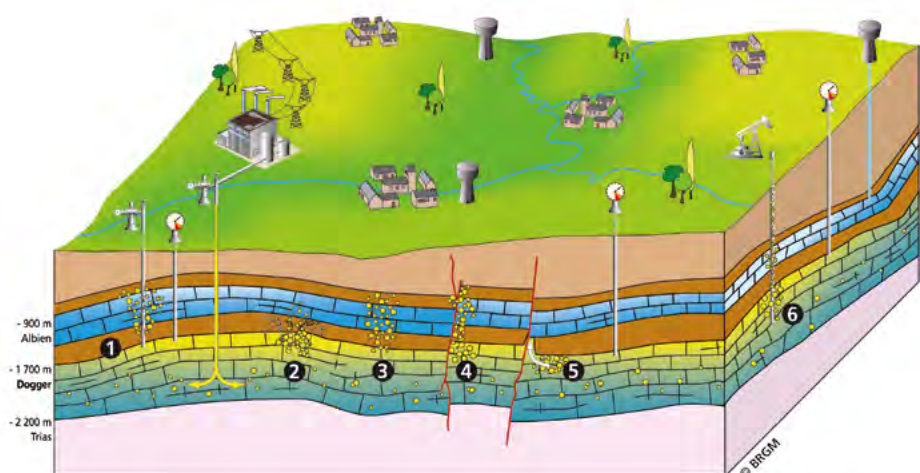
### 3/ Le sous-sol, un espace de stockage naturel

Alors que des accords internationaux incitent à réduire les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), l'injection et le stockage de ce gaz en sous-sol sont considérés comme l'une des solutions. L'espace souterrain, qui sert aujourd'hui au stockage du gaz naturel, pourrait également être utilisé pour stocker de l'hydrogène, un gaz très léger considéré comme l'un des combustibles du futur.

Complémentaire aux puits de carbone terrestres (sols et forêts) et océaniques, le stockage artificiel du CO<sub>2</sub>, l'un des principaux gaz dits à effet de serre, agit comme un puits de carbone géologique. Cette technologie est considérée comme un moyen de compenser partiellement les émissions issues de l'exploitation des combustibles fossiles.

Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), le stockage du CO<sub>2</sub> pourrait potentiellement contribuer à hauteur de 15 % à la réduction globale des émissions de CO<sub>2</sub> d'ici le milieu du siècle. Mais le déploiement de cette technologie reste encore loin des ambitions affichées.

## Injection et stockage du CO<sub>2</sub> Propositions de scénarios de référence d'évolution (normale et dégradée)



Usine produisant et captant le CO<sub>2</sub>



Puits d'injection de CO<sub>2</sub>



Puits d'observation



Ancien puits de pétrole



Fautes géologiques

**Injection et stockage du CO<sub>2</sub> - Propositions de scénarios de référence d'évolution (normale et dégradée), représentation schématique.**

© BRGM

- Aquifère d'eau potable à protéger
- Couverture étanche (argile...)
- Aquifère profond (réservoir)

- Scénarios de remontées de CO<sub>2</sub>
- 1 Dégradation d'un puits
  - 2 Fracturation due à la surpression
  - 3 Migration par perméabilité de la couverture
  - 4 Mouvement par faille existante
  - 5 Migration des eaux de gisement
  - 6 Remontée par un puits abandonné ou un forage accidentel



## Un principe simple, une pratique qui ne l'est pas

Capté au niveau d'installations industrielles, le CO<sub>2</sub> est transporté par bateau ou par canalisation jusqu'à un lieu de stockage et injecté dans une formation géologique par l'intermédiaire d'un forage en vue d'un stockage à long terme. Le CO<sub>2</sub> doit être stocké à de grandes profondeurs dépassant 800 mètres pour obtenir un gaz plus dense (dit supercritique) nécessitant moins de volume. Plusieurs types de réservoirs peuvent être exploités, comme les gisements de pétrole et de gaz naturel épuisés qui offrent une possibilité de stockage immédiate, ou les nappes aquifères profondes.



Vue des cheminées d'une usine de production d'électricité au charbon.  
© DANICEK, FOTOLIA

Des données géotechniques telles que la porosité et la perméabilité de la roche, ou la présence d'une couverture imperméable qui empêche les gaz de s'échapper, constituent des éléments essentiels à un projet d'enfouissement. Enfin, le site de stockage doit idéalement être proche du lieu d'émission pour éviter d'avoir à transporter le CO<sub>2</sub> en générant un coût supplémentaire. Les sites potentiels se trouvent pour la plupart dans des bassins sédimentaires, comme en Aquitaine ou le Bassin parisien en France.

## Que devient le CO<sub>2</sub> une fois injecté sous terre ?

Le CO<sub>2</sub> vient se loger dans les interstices des constituants de la roche, entre les grains et dans les fractures, en déplaçant et remplaçant le fluide déjà présent (eau, gaz ou pétrole). Dans les anciens sites pétroliers ou gaziers, le CO<sub>2</sub> à l'état supercritique repousse vers le haut le gaz ou le pétrole résiduel. S'il s'agit d'un aquifère salin, le CO<sub>2</sub>, moins dense que l'eau, remonte jusqu'au niveau de la couverture. Avec le temps, une fraction du CO<sub>2</sub> se retrouve piégée dans les pores de l'aquifère et y reste, une autre partie se dissout dans l'eau sous forme d'acide carbonique, ce qui peut engendrer des réactions chimiques avec la roche. À plus long terme, on obtient des roches carbonatées. Cette phase minérale constitue le piégeage ultime du CO<sub>2</sub>, le plus sûr.

Une fois l'injection terminée dans un réservoir adapté, la zone de stockage et en particulier les puits d'injection qui peuvent être des voies de remontées possibles du gaz sont soumis à un contrôle en continu afin de détecter et de corriger d'éventuelles anomalies qui pourraient survenir.

Le contrôle des risques - fuites vers la surface, contamination de l'eau potable, acidification possible ou impact sur la faune et la flore - fait l'objet de nombreuses recherches.





**Monitoring environnemental au droit d'un site de stockage de CO<sub>2</sub> en Algérie.**

© BRGM - F. GAL

## DES PROJETS QUI SE MULTIPLIENT

Les données nationales et celles des entreprises réunies par l'AIE montrent qu'une trentaine de projets de captage, stockage et valorisation du CO<sub>2</sub> de plus de 100 000 tonnes par an sont opérationnels dans le monde, pour un total annuel de 40 millions de tonnes. Après une période de stagnation, on observe actuellement une accélération du nombre de projets en cours, et un déploiement des techniques testées.

En Europe, les projets portent notamment sur la création de hubs destinés à mutualiser le coût du transport et du stockage. Les pays les plus avancés sont les Pays-Bas, le Royaume uni et la Norvège. Avec le projet Northern Lights par exemple, TotalEnergies, Equinor et Shell vont développer le transport et le stockage du CO<sub>2</sub> en mer du nord septentrionale, et viennent de signer un premier contrat commercial.

Sur le volet recherche, le BRGM coordonne le projet PilotSTRATEGY qui fait suite au projet STRATEGY CCUS. Il vise à développer des pilotes de stockage dans le Bassin de Paris, le bassin lusitanien au Portugal et le bassin de l'Ebre en Espagne. Il doit aussi permettre d'affiner la compréhension des ressources de stockage en Macédoine occidentale (Grèce) et en Haute-Silésie (Pologne). Un autre projet, CO<sub>2</sub>-Dissolved, a démontré la faisabilité d'associer le stockage de CO<sub>2</sub> dissout en aquifère et la récupération d'énergie géothermique. Les sites de stockage visés sont des aquifères profonds (1 500 à 2 500 m) dont la température atteint 60 à 80 °C. En France, 650 sites industriels potentiellement compatibles (25 % des émissions nationales) ont été inventoriés.

## Des cavités salines pour stocker de l'hydrogène

Le stockage de l'énergie est un élément clé si l'on veut intégrer largement les énergies renouvelables intermittentes dans le mix électrique. **Pour l'hydrogène, des solutions de stockage souterraines sont à l'étude, et le recours aux cavités salines – cavités creusées par dissolution des dépôts géologiques de sel – suscite un intérêt croissant.** En effet, la très forte mobilité de l'hydrogène rend le stockage de ce gaz particulièrement difficile, mais la halite (chlorures de sodium) représente une barrière naturelle très efficace.

Plusieurs projets expérimentaux sur ce sujet sont actuellement en cours en France, dont le projet Hy-géo, lancé en 2020, qui réunit les entreprises Terega et HdF ainsi que le BRGM. Il vise l'installation d'un pilote (en Nouvelle-Aquitaine sur la commune de Carresse-Cassaber) afin de démontrer la faisabilité de ce type de stockage, et pourrait déboucher à terme sur le développement d'une filière de stockage souterrain d'énergie en utilisant de l'hydrogène dit vert (car obtenu par l'électrolyse de l'eau). Cet hydrogène doit être stocké dans une cavité saline abandonnée, auparavant utilisée pour le stockage d'hydrocarbures. La première étape du projet qui s'est terminée au printemps 2022 consistait à établir une synthèse des connaissances géologiques et de l'impact potentiel sur le sous-sol dans la zone choisie.

Hygeo prévoit à terme de stocker environ 1,5 GWh d'énergie soit l'équivalent de la consommation annuelle de 400 foyers. L'investissement pour la réalisation de ce site pilote est de 13,5 millions d'euros. ■

## 4/ Les métaux critiques au cœur de la transition énergétique

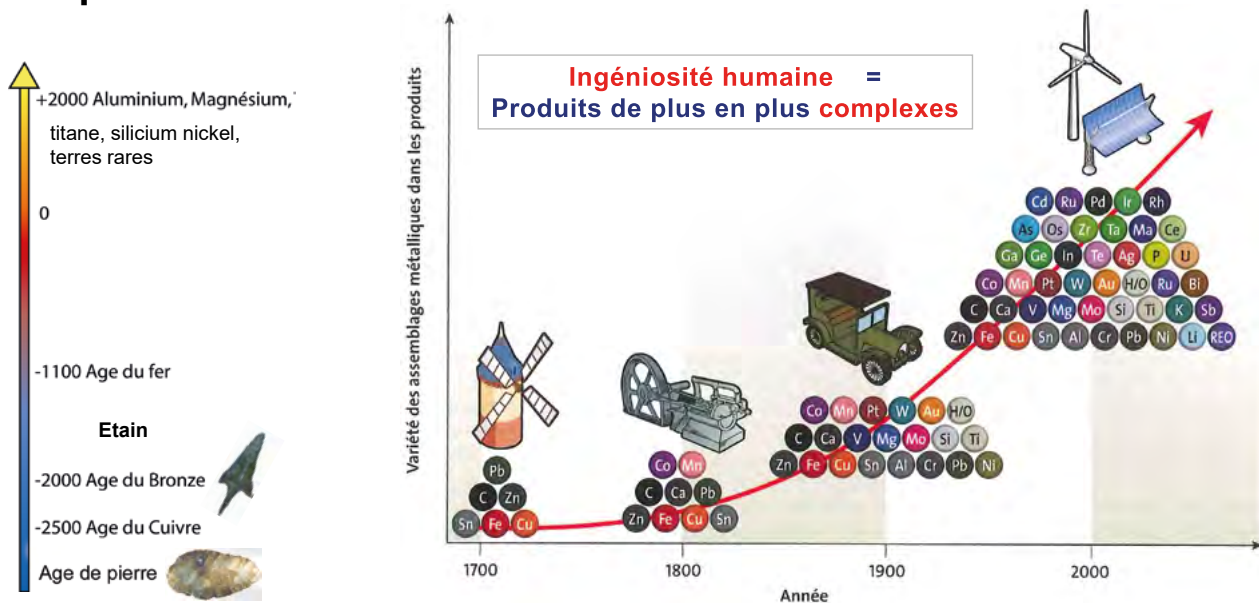
Avec le remplacement progressif des énergies fossiles par des énergies décarbonées, la consommation de métaux va augmenter. Les technologies liées aux énergies renouvelables, à l'électromobilité et au numérique consomment en effet de grandes quantités d'éléments extraits du sous-sol. Au niveau mondial, cette situation va générer des problèmes d'offre, avec à la clé des enjeux en terme de disponibilité des ressources, de souveraineté, de coût et d'impacts environnementaux.

### Trente éléments critiques

Parmi ces ressources, un certain nombre de métaux essentiels au fonctionnement de nombreux écosystèmes industriels sont dits critiques. Ils sont définis par le croisement de deux critères : une importance forte au plan économique, et un risque élevé en matière d'approvisionnement, qu'il s'agisse de leur disponibilité quantitative ou de leurs coûts d'acquisition.

À l'horizon 2030, l'Europe devrait par exemple importer 70 à 80 % des métaux de la transition que sont entre autres le nickel, le cobalt ou le lithium. La Chine lui fournit 98 % des terres rares et 93 % du magnésium, la Turquie 98 % de ses approvisionnements en borate, et l'Afrique du Sud 71 % du platine...

### Pourquoi a-t-on besoin des ressources minérales ?



Évolution de notre consommation de métaux au fil du temps.

© BRGM

3





Pour évaluer les risques, [les pays membres de l'Union européenne réalisent des analyses de criticité et établissent une liste de matières premières révisée tous les trois ans](#) et élargie à quelques ressources non minérales. La dernière en date, publiée en 2020, identifie 30 matières premières considérées comme critiques, essentiellement à cause d'une forte dépendance aux importations chinoises. Cette liste comprend notamment le graphite, le lithium et le cobalt, utilisés dans la fabrication de batteries, le silicium, composant des panneaux solaires, les terres rares utilisées par exemple pour les aimants permanents – essentiels pour propulser les voitures électriques et faire fonctionner les éoliennes, ou encore les platinoïdes, utilisés dans les pots d'échappement catalytiques des automobiles et les composants électroniques.



**Le prospect à terres rares de Motzfeldt, Province du Gardar, Groenland.**  
© BRGM - J. TUDURI

## Ouvrir de nouvelles mines, un défi économique et sociétal

L'exploitation minière est une activité à forte intensité capitaliste pour laquelle les délais de démarrage des opérations d'extraction sont longs. Dans ce contexte, il n'est pas rare que les nouveaux projets soient en retard par rapport à l'évolution des prix, rendant incertain leur viabilité économique. De plus, l'extraction devient de plus en plus difficile car les gisements les plus faciles à exploiter sont en voie d'être épuisés.

Malgré des efforts pour améliorer la traçabilité des métaux et rendre l'industrie minière plus « éthique », ces projets peinent en outre à recueillir l'adhésion des populations, en particulier en Europe, du fait leur impact social et environnemental. Nombre de nations européennes concentrent pourtant d'importantes ressources dans leur sous-sol, et celles-ci sont loin d'être toutes connues, les données d'exploration étant souvent assez anciennes. Du fer, du cuivre ou encore du zinc sont ex-traités en quantité en Suède, en Finlande, en Espagne ou en Pologne par exemple. En France, il n'existe aujourd'hui plus de mines de métaux en exploitation.



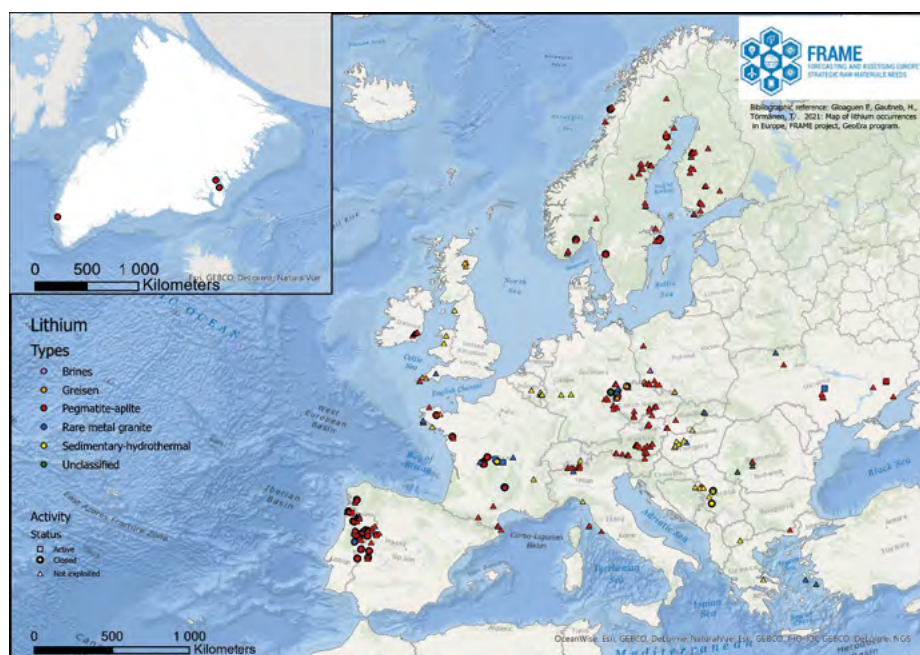


Exploitation à ciel ouvert d'un gisement de cuivre, Mine de Aitik, Suède.  
© BRGM

## Le recyclage en soutien

Dans ce contexte, le recyclage apparaît comme une solution pour sécuriser une partie des approvisionnements. **À l'échelle européenne, 12 % des matières premières utilisées dans l'industrie proviennent du recyclage, mais les chiffres sont très variables selon les métaux.** Les platinoïdes utilisés dans la catalyse industrielle sont recyclés à 95 % tandis que l'indium, utilisé dans les écrans plats, a un taux de recyclage quasi nul. En France, le plomb est, avec l'or et l'argent, un des métaux dont le taux de recyclage est le plus fort (supérieur à 90 %).

A contrario, le recyclage du cuivre pâtit d'une perte de savoir-faire. Le développement du recyclage est en outre freiné par l'hétérogénéité et l'évolution rapide de la composition des objets en fin de vie, à l'instar des lampes LED. Toutefois, des filières se mettent en place. Une plate-forme de retraitement des aimants va voir le jour sur le site de Lacq, dans le sud de la France. Et la réglementation va se durcir. En Europe, on prévoit par exemple qu'à partir de 2035, les batteries compteront 30 % de matériaux recyclés. ■



Gisements potentiels de lithium en roche dure Europe.  
© GEOFRAME - BRGM





## UNE RÉGLEMENTATION EN ÉVOLUTION

La loi climat et résilience du 22 août 2021 a engagé une réforme du code minier, complétée par une série d'ordonnances. Le texte prévoit que « la gestion et la valorisation des substances minérales ou fossiles et des usages du sous-sol sont d'intérêt général » et « concourent aux objectifs de développement durable des territoires et de la nation » avec pour objectif de « développer l'activité extractive sur le territoire national en veillant à un haut niveau d'exigences environnementales et sociales, de relocaliser les chaînes de valeur, de sécuriser les circuits d'approvisionnement, de garantir la connaissance, la traçabilité et le réemploi des ressources du sous-sol et de réduire la dépendance de la France aux importations ».

Dans son chapitre sur l'après-mine, la loi prévoit que cinq ans avant la fin de sa concession, l'exploitant devra remettre à l'État un dossier présentant le potentiel de reconversion de ses installations ou de leur site d'implantation pour d'autres usages du sous-sol. Cette loi a notamment revu en profondeur les conditions d'attribution de titres miniers, de gîtes géothermiques et de stockages souterrains.



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Siège - centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemin,

BP 36 009 - 45060 Orléans Cedex 2 - France

Tél. : 02 38 64 34 34 - [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)