

Le sous-sol, un acteur invisible et impensé de la transition énergétique

Christophe Poinssot*, Patrick d'Hugues*,
Francis Claret*, Alain Dupuy*

@76412

Mots-clés : ressources, sous-sol, géothermie, métaux, stockage

Le débat sur la transition énergétique se résume malheureusement souvent à une controverse sur la place respective du nucléaire et des énergies renouvelables, et la vitesse de déploiement des véhicules électriques ou de l'hydrogène. Malgré son absence du débat, le sous-sol est pourtant un acteur incontournable pour réussir la transition énergétique, tant pour les ressources indispensables qu'il nous apporte (eau, métaux, énergie...) que les espaces de stockage sûr de CO₂, de gaz ou de déchets qu'il permet. Peu ou pas enseigné, le sous-sol reste pourtant méconnu de nos concitoyens et un grand absent du débat politique depuis la fermeture des dernières mines en France. Il est donc urgent de mieux l'enseigner pour le démystifier et lui redonner sa place dans nos choix de société.

L'accélération des événements climatiques extrêmes depuis une dizaine d'années a contribué à élargir la prise de conscience de l'urgence à s'engager dans une trajectoire ambitieuse de sobriété et de décarbonation pour limiter l'ampleur du changement climatique et faciliter l'adaptation des sociétés. Depuis la COP21 de Paris en 2015, chaque pays est ainsi régulièrement amené à publier ses engagements en faveur d'une réduction des émissions de gaz à effet de serre avec l'ambition de limiter le réchauffement (initialement à 1,5 °C). Cette focalisation politique et médiatique sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre a conduit de nombreux pays à s'engager sur une trajectoire d'émissions nettes nulles autour du milieu du siècle, y compris les plus grands émetteurs comme les États-Unis ou la Chine. Pour autant, le rythme de réduction tout autant que les solutions pour y parvenir sont loin de faire consensus ni d'être totalement documentés. Cela conduit en toute logique le débat public

à se focaliser sur les différents scénarios proposés et leurs implications, aux dépens d'une réflexion plus systémique sur les prérequis technologiques, économiques ou sociétaux qui détermineront les conditions de succès ou d'échec de ces profondes transformations de nos sociétés. La place du sous-sol, de ses ressources, de ses potentialités et de ses risques, fait partie des sujets occultés dans le débat actuel alors même qu'il aura dans tous les cas un rôle important à y jouer : le sous-sol fournit en effet la majeure partie des ressources minérales dont nous avons besoin pour construire nos infrastructures énergétiques décarbonées qui sont appelées à remplacer les énergies fossiles. Ses ressources souterraines en eau jouent également un rôle central dans la disponibilité en eau douce tant pour l'alimentation humaine que pour les usages énergétiques ou industriels. Le sous-sol est aussi en mesure de fournir des calories décarbonées facilement utilisables pour les chauffages domestiques ou tertiaires, voire dans des situations spécifiques

* BRGM.

produire de l'électricité, sans parler de sa capacité à stocker le dioxyde de carbone (CO₂) que nous aurions pu préalablement piéger. Pour autant, il reste très largement absent du débat public, ce qui risque de rendre difficile l'acceptabilité de son usage et freiner la transition énergétique. C'est pour remédier à cette difficulté que cet article vise à expliciter la place que le sous-sol doit avoir dans la transition énergétique et les enjeux qui y sont associés, et à éclairer les débats publics indispensables qui devront être associés à son usage potentiel.

1. Le sous-sol est à l'origine de nombreuses ressources indispensables

1.1. Ressources minérales

Exit le mythe d'une société tertiarisée et dématérialisée, l'accès aux ressources minérales revêt une importance stratégique.

Suite à la fermeture des dernières mines en France dans les années 1980 et à la désindustrialisation progressive qui s'est installée en parallèle, notre société a vécu depuis lors dans un biais cognitif généralisé qui a conduit à oublier que nos modes de vie requièrent des ressources minérales en quantité importante au-delà des seules ressources énergétiques (charbon, pétrole, gaz). Que ce soient nos maisons, nos entreprises, nos réseaux publics ou nos objets du quotidien, toutes ces infrastructures ont besoin de métaux, de minéraux industriels ou de matériaux pour leur fabrication qui proviennent quasi exclusivement du sous-sol, qu'ils aient été extraits dans des mines ou carrières à ciel ouvert en proche surface ou dans des mines souterraines plus profondes. L'histoire du développement des sociétés humaines épouse étroitement celle de l'exploitation des ressources du sous-sol : après l'apprentissage du travail du cuivre natif vers le VIII^e millénaire avant J.-C., le développement de la métallurgie du cuivre grâce à la fonte du minerai se développe à partir du V^e millénaire et permet la découverte des alliages et notamment du bronze (cuivre et étain) qui se développe fortement à compter du III^e millénaire avant J.-C., conduisant

du fait des compétences requises à la création de sociétés plus structurées et organisées, prémices de nos sociétés actuelles. Depuis lors, nos sociétés n'ont cessé de progressivement élargir la palette des métaux et matériaux maîtrisés, et d'explorer puis exploiter le sous-sol à la recherche de nouveaux gisements. La France n'a pas fait exception et l'activité minière a existé depuis le Néolithique et s'est fortement développée à partir de la révolution industrielle des XVIII^e et XIX^e siècles. Même si la France n'a jamais été un grand pays exportateur, elle a acquis une tradition et une culture minières pour plusieurs substances : charbon, fer, étain, or, antimoine, aluminium (bauxite), tungstène, uranium, et plomb-zinc entre autres. Au cours des XIX^e et XX^e siècles, l'État a délivré 4384 titres miniers, dont 3144 concessions permettant l'exploitation de substances minières au sens du Code minier, dont des hydrocarbures (gaz et pétrole) et l'uranium. Parmi les substances d'importance, la France a notamment été le troisième producteur européen de tungstène jusqu'en 1986 (mines de Salau et district d'Échassières), premier producteur mondial d'antimoine au début du XX^e siècle (mines de La Lucette et district de Brioude-Massiac), et premier producteur européen d'or (gisement de Salsigne). Toutes ces mines sont aujourd'hui fermées et la France dépend intégralement des importations essentiellement sous forme de produits transformés, et dans une moindre mesure de matières premières.

La transition énergétique va conduire à une explosion des besoins en ressources minérales pour construire les nouvelles infrastructures énergétiques requises par l'abandon souhaité et souhaitable des ressources fossiles et le développement des énergies décarbonées. En effet, les énergies renouvelables comme le photovoltaïque ou l'éolien se caractérisent par une très forte intensité matière du fait de leur intermittence, de leur durée de vie limitée à quelques décennies, ou de leur faible capacité énergétique. Les intensités matières publiées en 2021 par l'AIE montrent ainsi qu'en prenant en compte le facteur de charge moyen européen, l'éolien requiert 20 à 25 fois plus de métaux par kilowattheure produit qu'une centrale au gaz prise ici en référence,

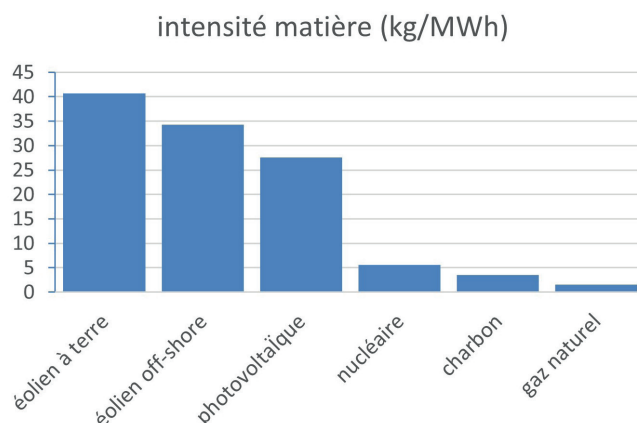


Figure 1. Intensité matière (quantité de matière consommée par unité d'énergie produite) comparée des différentes sources d'énergie normalisées sur l'énergie produite (MWh) et non la puissance installée

le photovoltaïque plus de 15 fois, alors que le nucléaire ne requiert que 4 fois plus de métaux.

De la même manière, la décarbonation par l'électrification de nombreux usages, à commencer par celui des transports, va nécessiter des quantités importantes de métaux. À titre d'illustration, un véhicule particulier électrique contient 6 fois plus de métaux en moyenne qu'un véhicule équivalent thermique (hors carrosserie).

La décarbonation de l'industrie qui nécessite notamment le développement des énergies renouvelables ne se fera donc pas sans disposer sur le long terme des ressources minérales stratégiques indispensables à ces technologies, qu'il s'agisse des terres rares pour les aimants permanents des alternateurs ou des moteurs électriques, des métaux comme le nickel, le cobalt, le lithium ou le graphite pour les batteries électriques (majoritairement nickel-manganèse-cobalt — NMC — à ce jour, mais cela pourrait évoluer sur le long terme) sans oublier le cuivre qui reste le conducteur électrique privilégié pour beaucoup d'usages. Évidemment, les besoins sont difficiles à anticiper et fluctuent au gré des innovations technologiques qui émergent, mais difficile de prédire dans ce contexte la réalité de ce que seront les besoins dans quelques décennies. Pourtant,

l'industrie minière est une industrie au temps long qui requiert des investissements importants sur la durée (17 ans en moyenne pour ouvrir une mine à l'échelle mondiale selon l'AIE). Sécuriser les approvisionnements sur le long terme devient donc un enjeu non seulement pour les entreprises de ces secteurs, mais plus globalement pour la souveraineté énergétique et économique nationale, dans un contexte d'incertitudes sur la capacité du marché à pourvoir à ces besoins en temps et en heure.

Saura-t-on fournir les ressources minérales indispensables à la transition énergétique en temps et en heure?

Les besoins en ressources minérales pour construire ces nouvelles infrastructures sont colossaux. Le BRGM a évalué que la quantité de ressources minérales à extraire du sous-sol d'ici 2050 est équivalente à la quantité de métaux que l'humanité a extrait depuis l'âge du bronze. Pour autant, la principale crainte n'est pas celle d'un manque de ressources, mais d'une incapacité à les extraire du sous-sol sur un temps très court alors que des trajectoires de développement très rapide des technologies décarbonées ont été engagées (l'Europe ambitionne par exemple d'arrêter la production de véhicules

thermiques d'ici 2035), de disposer des infrastructures industrielles pour les raffiner et les transformer, et de l'énergie suffisante pour accomplir l'ensemble de ces opérations. En effet, l'humanité est loin d'avoir épuisé les ressources du sous-sol, comme le montre la Figure 2 sur le cas du cuivre, même si les réserves quantifiées et prêtes à être exploitées restent limitées faute d'investissement suffisant dans l'exploration. Les ressources les plus facilement accessibles ont pour l'essentiel été exploitées, et il nous faut maintenant aller chercher des gisements plus profonds, moins concentrés, ou plus complexes à traiter (polymétalliques). Dans ce contexte, développer de nouvelles mines représente un investissement de plus en plus important que les entreprises ont de plus en plus de mal à endosser seules, d'autant que le retour sur investissement ne se fait qu'à long terme. C'est pourquoi les projets engagés sont aujourd'hui insuffisants pour subvenir aux besoins du marché dans la prochaine décennie, comme le montre la Figure 2.

Nul doute que les tensions sur le marché de ces métaux ne sont pas près de disparaître et que le prix des ressources minérales va donc être croissant sur le long terme sans que cela ne préjuge de la variabilité liée à la structure de ces marchés, comme le montre la baisse récente des cours du lithium ou du nickel. Cette variabilité est amplifiée par le poids croissant de ces ressources dans la politique étrangère des grands pays, et la place centrale prise par la Chine sur ces marchés dans un double objectif de protéger son industrie et de s'en servir comme outil de coercition sur le monde occidental.

Quelles solutions pour préserver la souveraineté économique et industrielle européenne ?

Face à cette situation qui ne peut que se détériorer sur le long terme, l'Europe se devait de réagir fortement, ce qui a été le cas depuis la fin de la crise du Covid-19 et le démarrage de la guerre en Ukraine. En France, le gouvernement

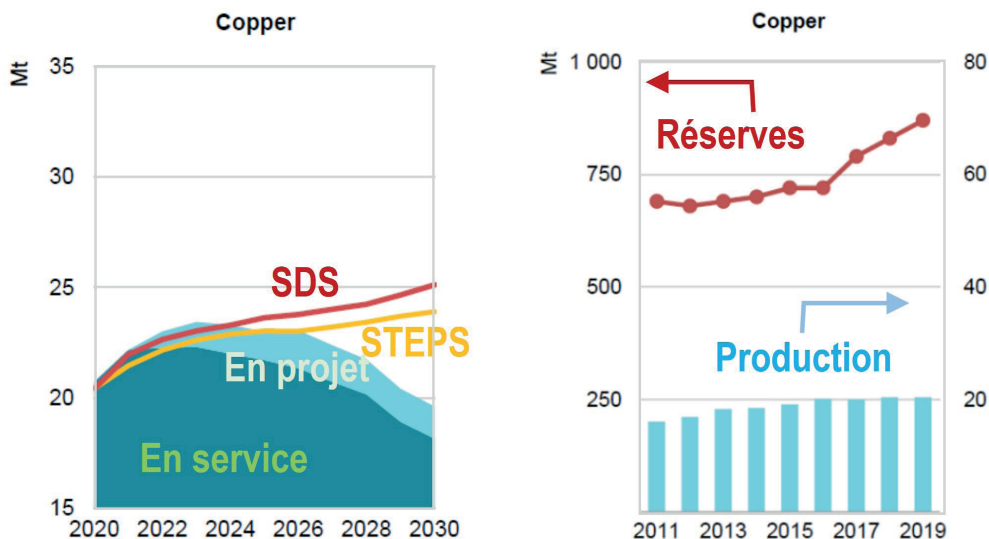


Figure 2. Évolution des fondamentaux du marché du cuivre : (i) évolution de la demande en cuivre selon 2 scénarios (STEPS correspondant au respect des engagements annoncés par les États, SDS à un scénario plus ambitieux permettant de tenir les 2 °C d'augmentation de température) et (ii) comparaison de l'évolution de la production de cuivre (échelle de droite en Mt/an) et des réserves (échelle de gauche en Mt/an) estimées entre 2011 et 2019

Source : AIE, 2021

a pris de nombreuses initiatives dans la lignée du rapport Varin remis en janvier 2022 :

- nomination d'un délégué interministériel pour assurer la coordination des politiques publiques sur ce sujet éminemment transverse (le DIAMMS),
- création de l'Observatoire français des ressources minérales (OFREMI), autour du BRGM, du CEA et de l'IFPEN (avec l'aide de l'ADEME, du CNAM et de l'Ifri),
- lancement d'un nouvel inventaire national des ressources minérales confié au BRGM et financé par France 2030,
- mise en place d'une véritable diplomatie des ressources minérales axée sur des partenariats stratégiques de long terme développés avec des pays clés comme le Canada, l'Australie, la République démocratique du Congo (RDC) ou le Chili,
- création d'un fonds d'investissement public/privé porté par Infravia et doté de 0,5 milliard d'euros (Md€) de financement privé,
- mise en place d'un appel à projets géré par la BPI sur les matériaux critiques de 0,5 Md€ également,
- préparation de normes et labels, certifiables, pour accompagner le concept de «mine responsable», en lien avec le règlement batteries en cours d'examen au niveau européen.

Toutes ces mesures ont trouvé un écho cohérent avec le *Critical Raw Material Act* européen entré en vigueur en mai 2024 et qui ambitionne que 10 % des ressources minérales utilisées soient d'origine européenne, que 40 % aient été transformées en Europe, que 25 % proviennent du recyclage et que l'Europe ne dépende pas à plus de 65 % d'un seul pays. C'est un vaste programme quand on sait que l'Europe dépend à 100 % de la Chine pour plus de 10 métaux comme les terres rares, le graphite, et à plus de 70 % d'autres pays pour le cobalt, le lithium ou les platinoïdes...

Cette dépendance est non seulement responsable d'un transfert de souveraineté et d'opportunité industrielle, mais elle a également pour conséquence de transférer à d'autres pays les impacts environnementaux et sociaux associés à nos modes de vie. Cette dimension éthique est portée par les enjeux d'approvisionnement responsable associés aux filières aval en contact avec les consommateurs européens.

Alors que la France avait abandonné toute velléité de disposer d'activités minières et extractives sur son territoire depuis plus de 40 ans, c'est donc à un véritable *aggiornamento* que nous avons assisté en 18 mois, démontrant si besoin était l'ampleur de la crise.

Ces mesures visent trois objectifs complémentaires et indissociables :

- Développer et accélérer le développement d'une industrie du recyclage pour limiter l'extraction de ressources du sous-sol au strict nécessaire, sachant que la France dispose de compétences reconnues dans ce domaine mais que les entreprises ont du mal à se développer pour des raisons économiques et réglementaires. Déployer le recyclage requiert également de disposer des industries de transformation sur le territoire national ou européen, et constitue un moyen pertinent de réinvestir dans un tissu industriel qui a été fortement impacté par la désindustrialisation. Malgré tout, il convient de réaliser que le recyclage ne permettra jamais de répondre à l'intégralité des besoins, d'une part car les métaux utilisés dans les produits en fin de vie ne couvrent pas la diversité de ceux nécessaires aux technologies d'aujourd'hui, et encore moins celles de demain, d'autre part parce que le recyclage ne permet jamais de récupérer l'intégralité des métaux présents (incapacité à récupérer la totalité des objets en fin de vie, impossibilité physique à récupérer la totalité des métaux présents dans un objet, impossibilité chimique à récupérer des éléments traces dispersés dans des matrices complexes...). Cela n'en reste pas moins un bras de levier incontournable dans un souci

de réduction de l'empreinte matière de nos économies et de réduction de l'appel à de nouvelles ressources.

- Redévelopper des activités minières et de transformation responsables en France et en Europe non pas pour atteindre une indépendance illusoire, mais pour réduire les dépendances et augmenter notre souveraineté, augmenter nos marges de manœuvre et valider des approches plus vertueuses déclinables sous forme de standards ou de normes. En effet, la France, comme l'Europe, dispose encore de ressources minérales d'intérêt dans son sous-sol et la fermeture des mines décidée dans les années 1990 répondait surtout à des objectifs économiques et sociétaux (transfert vers des pays à bas coût de main-d'œuvre et moindres contraintes réglementaires

d'activités par ailleurs contestées) que la fracturation en cours du marché mondial a fait passer au second plan. Le nouvel inventaire souhaité par le président de la République vise à mieux connaître les ressources d'intérêt stratégique et économique présentes sur le territoire national afin de permettre l'émergence de nouveaux projets miniers qui ne verront pas le jour avant une décennie *a minima* vu les temps normaux de développement de tels projets, à l'exception du projet de mine de lithium d'Imerys à Échassières (Allier) qui en est au stade du débat public (celui-ci vient de se terminer le 31 juillet 2024). Ce programme d'inventaire d'un montant de 63 M€ permettra d'investiguer les régions françaises les plus prometteuses en termes de ressources minérales stratégiques afin d'identifier les anomalies d'intérêt méritant des investigations plus

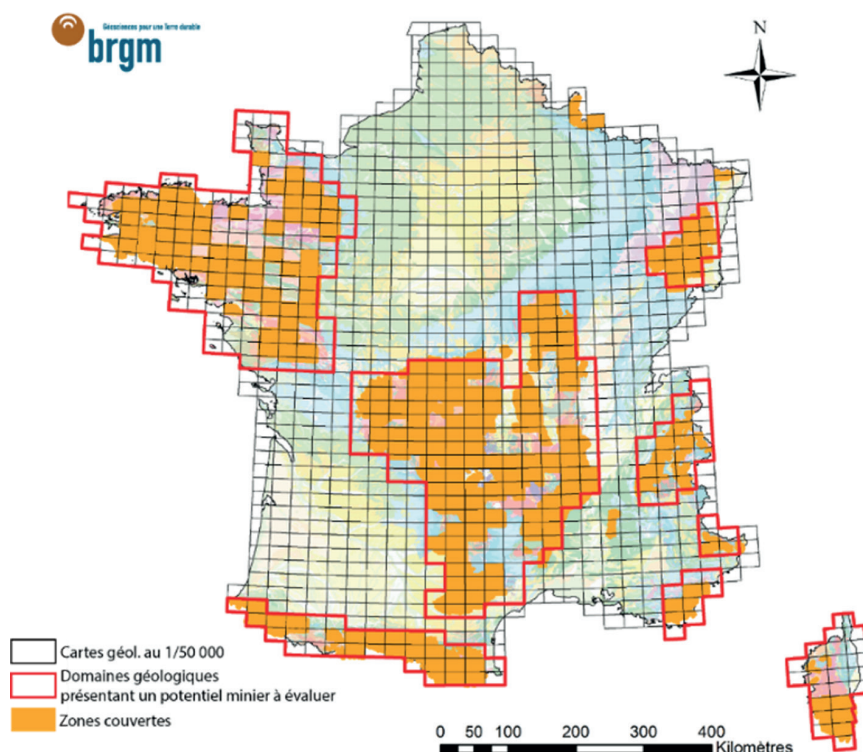


Figure 3. Régions françaises (entourées en rouge) présentant un intérêt minier potentiel et dont certaines d'entre elles feront l'objet d'une exploration stratégique dans le cadre du programme national d'inventaire des ressources minérales (IRM) lancé en 2024

poussées lors d'une phase ultérieure de prospection tactique.

- Sécuriser des approvisionnements auprès de partenaires étrangers avec lesquels la France et l'Europe développent des partenariats stratégiques de long terme construits dans une logique de soutien au développement de ces pays et non d'accaparement des ressources. Évidemment, il s'agit d'une ambition de long terme dont l'issue n'est jamais garantie, d'autant que les puissances illibérales actuelles agissent en sous-main pour contrer ces efforts qui sont autant nationaux qu'européens.

Sécuriser les approvisionnements requiert de connaître et maîtriser l'ensemble des chaînes de valeur et pas la seule activité extractive. La complexité de ces chaînes de valeur en fait un véritable sujet d'expertise et a justifié la création de l'OFREMI qui vise à décrypter et simuler les chaînes de valeur et analyser les risques d'approvisionnement au service des pouvoirs publics comme des entreprises françaises.

Le développement de nouvelles activités extractives ou de transformation en France reste un enjeu sociétal majeur tant il va à l'encontre d'une partie de l'opinion publique. C'est sans nul doute l'un des plus gros risques pesant sur ces activités, point qui sera abordé dans la dernière partie.

1.2. Hydrogène natif

L'hydrogène natif, encore appelé hydrogène blanc ou naturel, est un hydrogène produit dans le sous-sol par des réactions chimiques qui sont principalement liées à l'oxydation des minéraux ferreux, la radiolyse de l'eau, la maturation de la matière organique et le dégazage du manteau terrestre. La communauté scientifique est actuellement très active sur le sujet, notamment en France et aux États-Unis. Cet engouement pour l'hydrogène naturel est-il fondé? Si les émanations d'hydrogène gazeux sont connues depuis longtemps et laissent anticiper un potentiel intéressant, l'exploitation industrielle de cet hydrogène naturel dans des conditions économiquement rentables est une question encore ouverte. La délivrance d'un permis exclusif de recherche



Figure 4. Partenariats stratégiques initiés par l'Union européenne dans le cadre de la diplomatie des ressources minérales pour sécuriser des approvisionnements sur le long terme

de mines d'hydrogène natif, hélium et substances connexes dans le département des Pyrénées-Atlantiques sur une surface d'environ 225 km² souligne une volonté d'acteurs industriels de s'emparer du sujet. À l'échelle internationale, à l'initiative de l'Agence internationale de l'énergie, une *task force* sur l'hydrogène naturel vient d'être créée. En France, la direction générale de l'énergie et du climat (DGECC) a confié à l'IFPEN la coordination d'une étude impliquant une quinzaine d'experts académiques dont le BRGM sur le potentiel de l'hydrogène naturel en France avec la volonté de décliner un plan d'action pour le futur.

1.3. Géothermies

Le milieu souterrain a la particularité de disposer d'une température constante fonction de la profondeur, et indépendante des fluctuations climatiques pour peu qu'on s'éloigne de l'extrême surface. Cela en fait donc une cible de choix, d'une part comme milieu d'échange à faible profondeur pour des pompes à chaleur, d'autre part comme source de chaleur à moyenne température à grande profondeur. C'est l'objet de la géothermie qui, au-delà de la région parisienne, reste pourtant peu développée en France et largement

en deçà de son potentiel, ce qui en fait un bras de levier important pour la transition énergétique. De plus, à des profondeurs plus importantes ou dans des zones avec de forts gradients thermiques, la géothermie peut être électrogène (par exemple la centrale de Bouillante en Guadeloupe qui produit environ 100 GWh/an).

Géothermie à faible profondeur

La géothermie à faible profondeur consiste à profiter de la stabilité de la température du sous-sol pour faire fonctionner une pompe à chaleur géothermique et éviter ainsi deux des inconvénients majeurs des pompes à chaleur aérothermique qui sont leur incapacité à bien fonctionner lors des épisodes de grand froid ou de canicule et la création d'îlots de chaleur urbains liée à l'usage grandissant de la climatisation par aérothermie. Associée préférentiellement aujourd'hui à des forages verticaux inférieurs à 100 m de profondeur, cette géothermie est déployable sur près de 90 % du territoire national et pourrait offrir une solution décarbonée de chauffage individuel, pour le petit collectif ou pour le tertiaire.

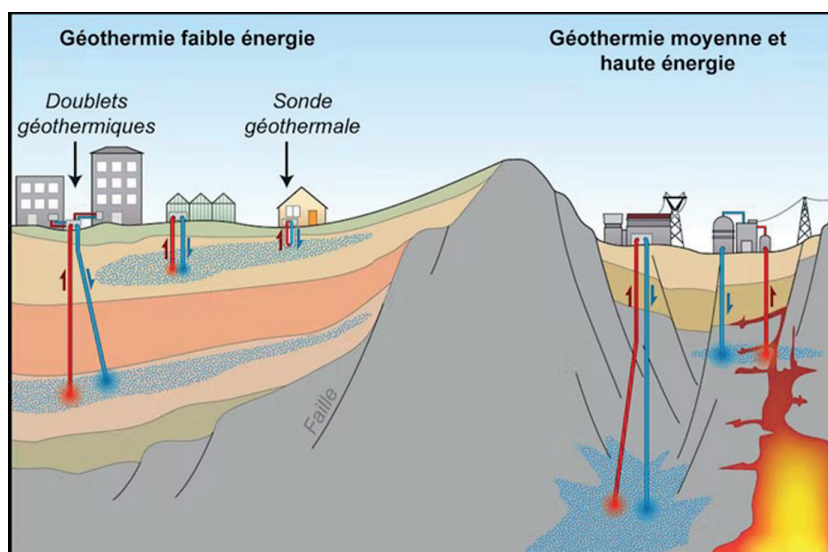


Figure 5. Bloc diagramme présentant les différents concepts de géothermie de surface à faible énergie ou profonde à moyenne et haute énergie

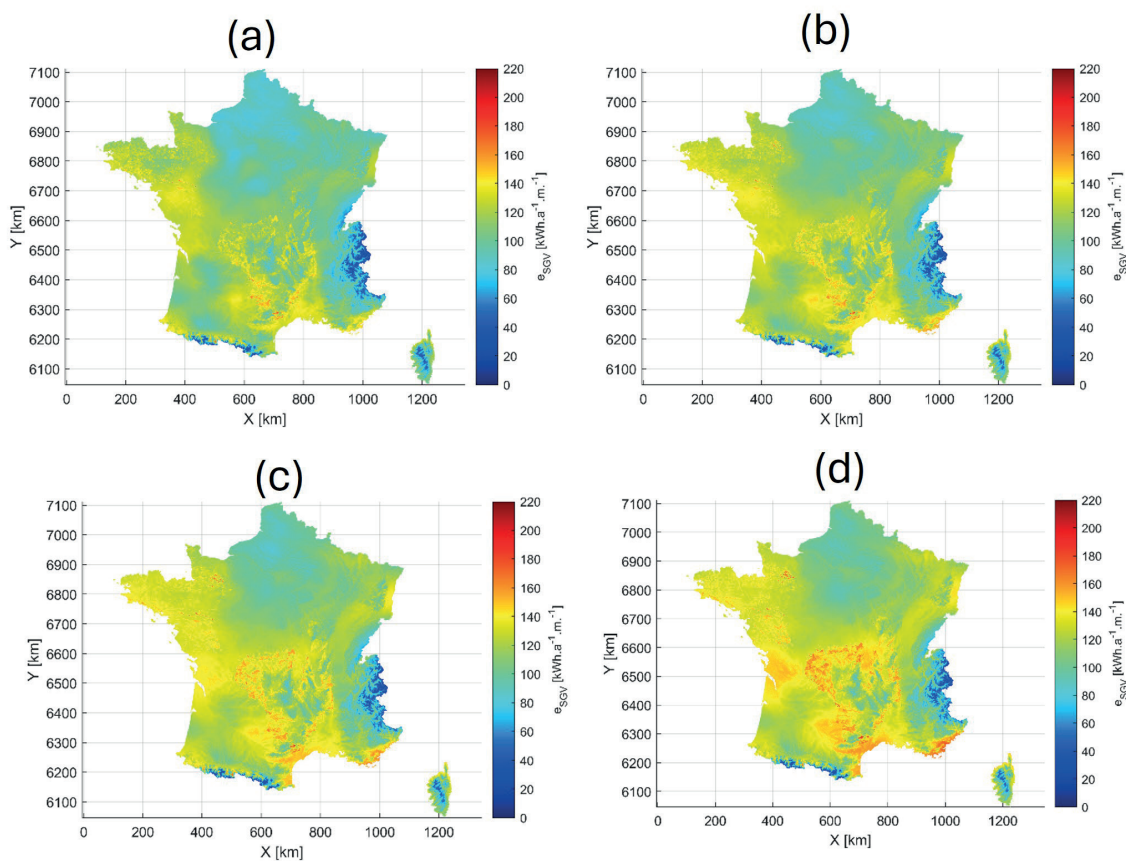


Figure 6. Quantité de chaleur eSGV [kWh/(m.an)] par mètre de forage pour chaque profondeur H considérée :
(a) H = 50 m; (b) H = 100 m; (c) H = 150 m; (d) H = 200 m

Source : Bader, A. G., Maragna, C., Baptiste, J., Baudouin V., Gilardi, N., Mato, C., Grataloup, S., Coueffé, R., Tran, V.H., 2024.
 Cartographie de la favorabilité du sous-sol au déploiement de la géothermie de surface sur sondes verticales,
 rapport BRGM RP 73607-FR

Néanmoins, elle présente l'inconvénient de requérir un investissement conséquent en amont qui reste l'un des principaux freins à son développement malgré la faiblesse des coûts de fonctionnement ensuite constatés qui permet d'avoir un temps de retour sur investissement d'une dizaine d'années seulement. Les figures suivantes (Figure 7) présentent le cas théorique de l'impact d'une isolation optimisée et du remplacement d'une chaudière à gaz en fin de vie sur une maison individuelle par différents types de chauffage.

En outre, ces technologies permettent de fournir du frais en période de canicule et de refroidir

à moindre coût les bâtiments tout en évitant les effets de points chauds créés en extérieur par les climatiseurs. Leur fonctionnement est totalement indépendant de la température de l'air extérieur, éliminant tout risque d'intermittence. Malgré ces avantages évidents, ces modes de chauffage restent peu développés en France : on estime qu'environ 200 000 pompes à chaleur (PAC) géothermique ont été installées en France durant ces 20 dernières années, principalement en Auvergne-Rhône-Alpes et en Pays de la Loire. Au-delà des problèmes d'investissements, le manque de bureaux d'études et de foreurs compétents reste aujourd'hui un frein important

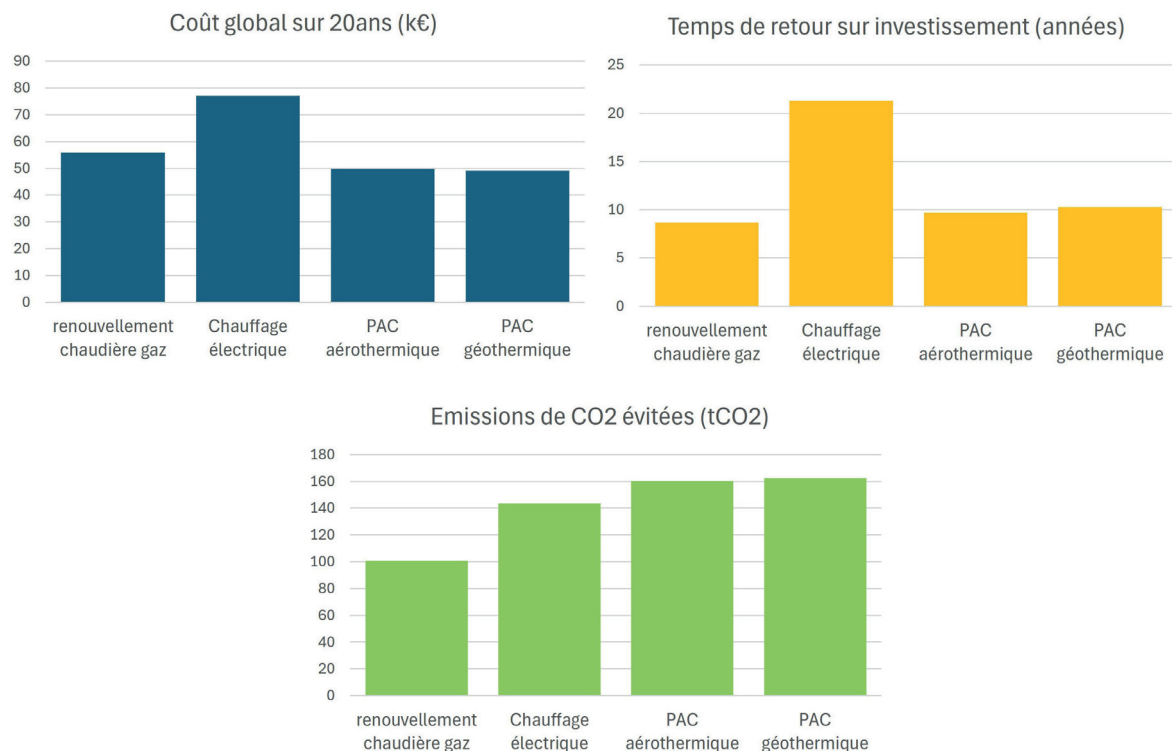


Figure 7. Coût global, temps de retour sur investissement et émissions de CO₂ évitées lors de l'isolation optimisée et le remplacement d'une chaudière au gaz en fin de vie par une nouvelle chaudière gaz, un chauffage électrique, une pompe à chaleur aérothermique ou une pompe à chaleur géothermique

à leur développement et c'est pourquoi le plan national géothermie lancé par le gouvernement en février 2022 vise tout à la fois à former de nouveaux foreurs pour augmenter l'offre nationale et à doubler le nombre de pompes à chaleur géothermique installées en France d'ici 2025. Pour ce faire, le BRGM a été mandaté pour réaliser une cartographie nationale des propriétés thermiques du sous-sol pour faciliter l'appropriation et les évaluations de performances lors de l'achat d'un bien ou le lancement d'un projet de rénovation.

Géothermie sur doublet à plus grande profondeur

La température du sous-sol augmentant avec la profondeur, on peut facilement accéder à des eaux dont la température est comprise entre 60 et 80 °C en forant à plus de 1 000 m de profondeur.

La réalisation d'un tel forage représente un coût qui dépasse plusieurs millions d'euros, ce qui en réserve l'usage à des fins collectives, aujourd'hui principalement pour alimenter des réseaux de chaleur urbains, notamment dans l'est de la région parisienne où plus de 350 000 logements sont ainsi chauffés. Le principe est alors de faire un forage de pompage qui permet de pomper de l'eau dans un aquifère profond conducteur, et un deuxième forage proche pour la réinjecter après avoir récupéré une partie de ses calories, d'où la terminologie de doublet géothermique. La performance d'un tel doublet repose avant tout sur la conductivité hydraulique de l'aquifère utilisé, ce qui suppose évidemment de mener au préalable des campagnes de reconnaissance des différents aquifères, mais aussi qu'en cas de conductivité hydraulique insuffisante, le forage peut s'avérer infructueux. C'est pour mutualiser ce

Le sous-sol, un acteur invisible et impensé de la transition énergétique

risque et encourager le développement de la géothermie que le fonds chaleur géré par l'ADEME prend en charge le risque de puits infructueux. Réduire le risque passe aussi par une meilleure connaissance du milieu géologique. C'est pourquoi le BRGM participe à la campagne Géoscan au côté de l'ADEME et des pouvoirs publics pour caractériser le potentiel géothermique dans les régions sédimentaires telles que l'ouest du Bassin parisien¹ et le synclinal de l'Arc².

À ce jour, seule une cinquantaine de réseaux de chaleur sur les 850 existants en France sont alimentés par de la géothermie. Le programme national³ ambitionne d'accélérer la transformation de ces réseaux et d'augmenter de 40 % les doubles géothermiques.

Géothermie haute température électrogène

Dans des environnements spécifiques où le gradient géothermique est plus fort (zones volcaniques comme la Guadeloupe, zones d'extension comme le Fossé rhénan...), il est aussi possible d'accéder à des eaux dépassant les 175 °C capables d'être utilisées pour alimenter une turbine et produire de la chaleur. Cette géothermie électrogène a fait récemment parler d'elle en Alsace du fait des séismes induits par la circulation forcée de fluides dans des zones faillées à grande profondeur. Le BRGM et l'INERIS ont publié un guide de bonnes pratiques pour la maîtrise de la sismicité induite par les opérations de géothermie profonde [BRGM, INERIS, 2023]. Cette géothermie permet aussi d'accéder à des fluides géothermaux riches en lithium qui ont permis de relancer l'intérêt économique pour de tels projets comme le montrent les nombreux permis

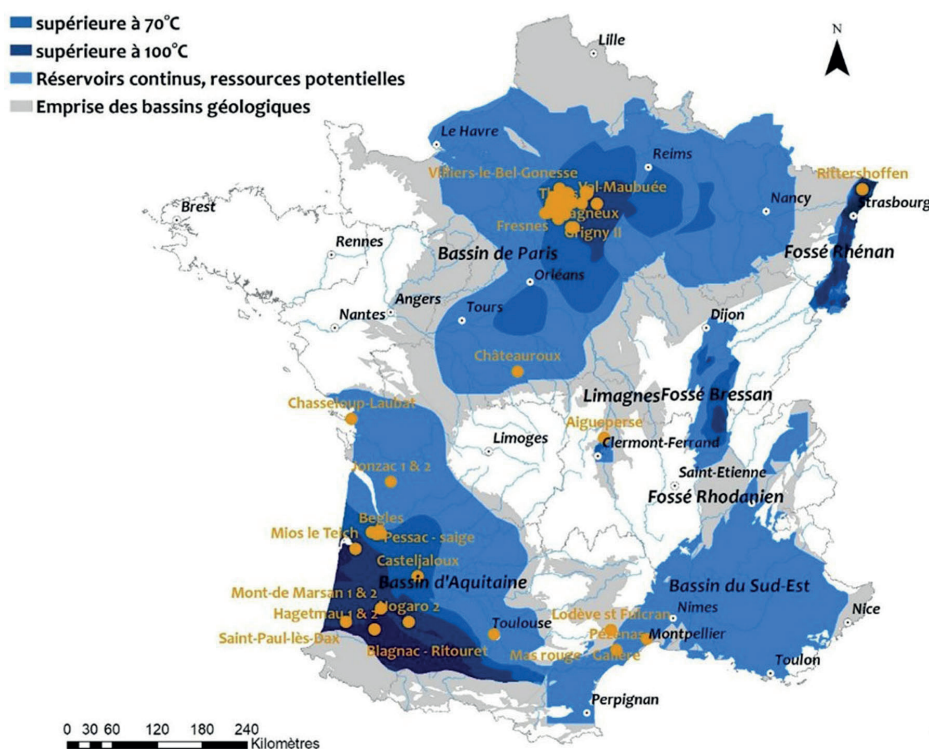


Figure 8. Présentation des aquifères profonds adaptés à la géothermie sur doublet

Source : © BRGM

déposés en ce sens en Alsace. Elle nécessite une maîtrise suffisante du contexte géologique et des conditions opératoires pour maîtriser le risque de sismicité induite. En revanche, elle reste d'intérêt évident pour les zones non interconnectées comme les territoires volcaniques des DROM, comme le montre le retour d'expérience favorable de la centrale de Bouillante en Guadeloupe.

Quel intérêt pour un pays comme la France ?

En cumulant la géothermie de surface et celle profonde, la France espère ainsi réussir à produire l'équivalent de 100 TWh/an de chaleur géothermale représentant plus que les importations annuelles de gaz russe avant 2022 et l'équivalent d'environ 20 % de la production électrique annuelle française. La géothermie possède donc un potentiel évident qui doit encore être déployé en accélérant son appropriation par les bureaux d'étude du secteur qui manquent souvent de compétences sur le sujet, en augmentant le nombre de foreurs disponibles en France, et en facilitant le financement des investissements qui restent importants. Cette nouvelle dynamique devra permettre l'émergence de nouveaux acteurs privés qui pourront également essayer de se positionner sur les programmes ambitieux lancés par nos pays voisins comme l'Allemagne ou la Suisse.

Outre la production de chaleur, la géothermie peut également être hybridée à d'autres applications, notamment la récupération de lithium dissous dans les eaux profondes (lithium géothermal) ou le stockage de CO₂ dans les aquifères. Ainsi, dans une récente étude conduite pour l'IEAGHG, le BRGM décrit les technologies de pointe combinant la production d'énergie géothermique et la capture et séquestration du carbone [IEAGHG, 2023].

Ces usages multiples présentent l'intérêt évident de mutualiser les coûts d'investissements et de faciliter tant l'acceptation que la rentabilité des projets géothermiques.

2. Le sous-sol, réservoir tampon des ressources d'eau douce

2.1. De l'importance des eaux souterraines

Les eaux douces ne représentent que 2,5 % de la ressource en eau terrestre, mais seuls 0,4 % de ces eaux douces sont constitués par les eaux de surface (rivières, lacs, eau dans les sols ou la végétation...), le reste étant constitué pour 69 % par les calottes glaciaires, les inlandsis et glaciers, et pour 30 % par les eaux souterraines. Alors que la disponibilité de la ressource en eau est d'ores et déjà mise sous tension par les multiples usages et le changement climatique, on ne peut aborder la question de l'eau sans y intégrer la question des eaux souterraines.

La production énergétique reste très dépendante de la ressource en eau utilisée pour le refroidissement tant des centrales thermiques que nucléaires. Les prélèvements pour le refroidissement des centrales sont ainsi la première source de prélèvements avec 45 % du total des prélèvements d'eau en France. Néanmoins, il est important de rappeler que la majeure partie de cette eau est rapidement restituée au milieu naturel au même endroit après avoir contribué à refroidir le circuit tertiaire du réacteur. Cela constitue néanmoins une connexion forte entre l'enjeu énergétique et celui de l'eau comme le montrent les limitations induites sur le fonctionnement des centrales en période de canicule (limitations liées au souhait de limiter l'impact thermique sur les cours d'eau).

À ce jour, 67 % de l'eau potable, 40 % de l'eau industrielle et 37 % des eaux utilisées pour l'irrigation agricole proviennent de ressources souterraines, sans parler du lien étroit qui unit nappes et cours d'eau : en période d'étiage, il est fréquent en effet que la majeure partie du débit des cours d'eau provienne de l'alimentation souterraine par les nappes alluviales. Contrairement aux idées reçues, les nappes souterraines ne sont ni des lacs, ni des rivières souterraines coulant à grand débit. Il faut plutôt s'imaginer le sous-sol comme une éponge imbibée plus ou moins compacte et laissant ainsi circuler plus ou moins

rapidement l'eau au sein des pores de la roche. La roche poreuse et l'eau qui y circule forment ainsi un aquifère dans lequel l'eau souterraine peut être exploitée. Il n'est ainsi pas rare que s'empilent sous nos pieds plusieurs étages successifs d'aquifères séparés par des niveaux moins perméables (aquitards).

2.2. Une ressource en eau sous tension sous l'effet du changement climatique

Le changement climatique va conduire à une modification radicale du régime des précipitations et une diminution rapide des glaciers montagnards qui alimentent une partie de nos grands fleuves. Il faut donc s'attendre à une disparité temporelle beaucoup plus grande avec une alternance plus marquée de périodes très humides pouvant même conduire à des inondations, et de périodes sèches plus longues avec des sécheresses de ce fait plus intenses. C'est ce que montrent clairement les exercices de

prospective comme Explore2 dont les résultats ont été présentés en juin 2024 : la moitié nord du territoire hexagonal devrait ainsi connaître une pluviométrie et une capacité de recharge naturelle des nappes croissantes, contrairement à la partie méridionale qui verra la pluviométrie et la capacité de recharge des nappes diminuer jusqu'à moins 30 % à l'image ce qu'on constate déjà en Espagne ou dans les Pyrénées-Orientales. Ces évolutions globales s'accompagneront d'un rythme de précipitations très différent et beaucoup plus intermittent que celui dont nous avons l'habitude.

Ces évolutions quantitatives auront un impact également sur la qualité des eaux dans la mesure où l'environnement est d'ores et déjà marqué par les activités industrielles ou agricoles passées, et où la mobilité des polluants reste fortement dépendante des conditions physico-chimiques. Que ce soit sous l'effet du lessivage, d'une concentration liée à la réduction des débits, ou

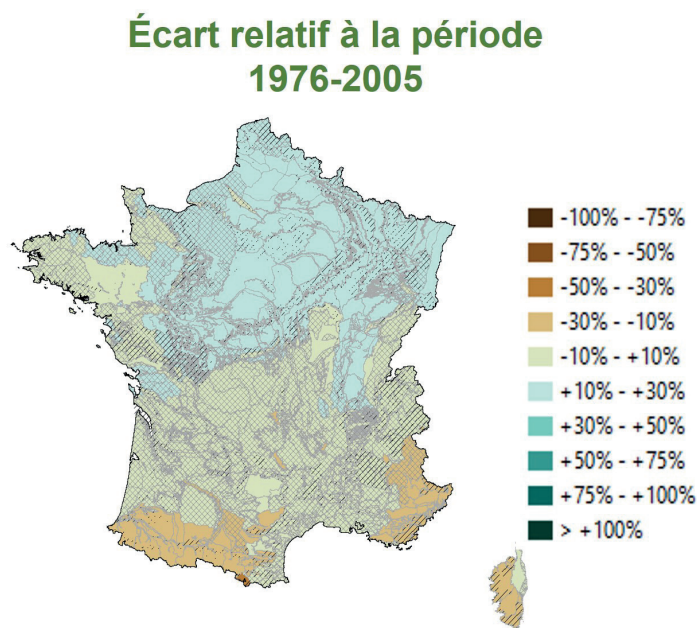


Figure 9. Évolution attendue de la recharge des nappes d'eau souterraine à l'échéance 2070 par rapport à la période de référence 1976-2005 d'après l'exercice Explore2 (2024)

On constate une augmentation de la recharge sur la moitié nord du pays et une réduction croissante sur la moitié sud, en particulier sur le piémont pyrénéen et le pourtour méditerranéen.

de la hausse des températures, une partie de ces polluants présents dans l'environnement risque d'être relâchée dans les eaux souterraines ou de surface sous l'effet de ces variations climatiques.

Dans tous les cas, les questions de la sécurisation de l'accès à l'eau, du bon partage de la ressource entre les différents usages et milieux, et des moyens de pallier l'intermittence croissante annoncée sont des enjeux de premier plan qui vont nécessiter des adaptations sociétales fortes. Dans ce contexte, la ressource en eau souterraine est appelée à jouer un rôle croissant, notamment par les possibilités qu'elle peut offrir pour lisser l'intermittence de la ressource en eau de surface :

- D'une part, les nappes, notamment alluviales, constituent le soubassement d'étiage des cours d'eau en période de sécheresse, cours d'eau qui jouent un rôle important dans le refroidissement des centrales en bord de fleuve. Ces nappes, pour peu qu'elles soient suffisamment rechargées, contribuent à une part importante du débit d'étiage. C'est l'une des motivations qui a poussé à l'émergence de solutions de recharge maîtrisée des nappes libres proches de la surface, en particulier les nappes alluviales. Le démonstrateur R'Garonne lancé sur le cours amont de la Garonne vise par exemple à alimenter en hiver la nappe alluviale via des canaux d'infiltration positionnés à une distance permettant à cette eau d'être disponible au niveau du fleuve en période estivale d'étiage.
- D'autre part, les nappes d'eaux souterraines plus profondes peuvent également servir de réserve en substitution à des prélèvements de surface pour la période estivale, pour peu qu'elles ne constituent pas de réserve d'eau potable et qu'on soit capable d'en assurer une recharge avec des eaux de qualité en période de fortes disponibilités en eaux.

La recharge maîtrisée des aquifères fait partie intégrale des solutions fondées sur la nature (SFN). Les SFN s'appuient notamment sur une gestion proactive et durable des écosystèmes comme celle des sols, des aquifères. La recharge

maîtrisée des aquifères, utilisée depuis de nombreuses années et dans de nombreux pays, est une des plus efficaces pour l'amélioration de la disponibilité des ressources en eau. Ainsi, l'adaptation et la réduction des risques de catastrophe fondées sur les écosystèmes constituent autant d'approches proactives efficaces, destinées à améliorer la résilience à long terme et le bien-être humain.

Toutefois, les SFN comme les réponses d'ingénierie environnementale et celles plus technologiques ne peuvent être déployées et donc efficaces sur un périmètre géographique ou un territoire sans avoir été pensées à l'aune de l'enjeu de l'acceptabilité sociétale, comme nous le rappellent les conflits récents autour des réserves de substitution. Les travaux de recherche en sciences humaines et sociales soulignent l'importance d'intégrer au plus tôt dans le processus décisionnel les populations des territoires concernés par ces projets. L'acceptation sociétale des solutions d'adaptation est en effet un enjeu crucial qui conditionne la possibilité réelle de les déployer. Cette implication doit permettre à l'ensemble des parties prenantes d'un territoire d'être associées à la démarche de co-construction et de définition commune d'une trajectoire d'adaptation pour le territoire concerné prenant en compte les intérêts des différents groupes sociaux. Ce processus suppose implicitement que chaque groupe social admette l'existence d'enjeux et de contraintes multiples et complexes qui vont au-delà de ceux qu'il défend, et soit prêt à construire par le dialogue un compromis global.

3. Le sous-sol comme pourvoyeur d'espace de stockage

3.1. Stockage de chaleur

Plusieurs technologies telles que le stockage en aquifère, le stockage en champ de sondes géothermiques verticales, le stockage dans d'anciennes mines permettent le stockage souterrain de chaleur. Intersaisonnier, il permet de mieux faire coïncider l'offre et la demande en stockant par exemple de la chaleur en été pour l'utiliser en hiver et inversement. Il peut aussi permettre

de valoriser la chaleur fatale, c'est-à-dire l'énergie thermique émise par un procédé dont elle n'est pas la finalité. Quelques démonstrateurs existent dans le monde mais le déploiement de ces technologies fait face à quelques freins pointés dans un récent rapport de l'Académie des technologies [Académie des technologies, 2023] qui livre aussi des recommandations en lien avec la réglementation, les financements, la formation et la R&D pour les lever.

3.2. Stockage de CO₂

Le captage et stockage de CO₂ en réservoir profond est une technologie reconnue par les experts du GIEC comme une option incontournable pour atteindre la neutralité carbone en 2050. Dans la directive européenne NZIA (*Net Zero Industry Act*), un objectif de 50 MtCO₂ par an a été récemment confirmé pour 2030. Ce stockage

long terme pourra être effectué dans des aquifères salins (comme le propose le projet commercial Northern Lights⁴), d'anciens gisements d'hydrocarbures ou via la minéralisation de roches ultramafiques (roches magmatiques pauvres en silice qui réagissent avec le CO₂ pour former des roches carbonatées) comme testé sur le pilote Carbfix⁵ en Islande. En France, sous l'égide de l'ADEME et de la DGEC, le BRGM et ses partenaires industriels et académiques sont en train de finaliser une étude sur les capacités de stockage de CO₂ afin de pouvoir réaliser des stockages souverains sur le territoire français.

Le BRGM a notamment développé de longue date une solution permettant de stocker le CO₂ sous forme dissoute dans des aquifères profonds salins (impropres à la consommation) grâce à l'utilisation d'un doublet géothermique exploitant un aquifère profond : il s'agit du

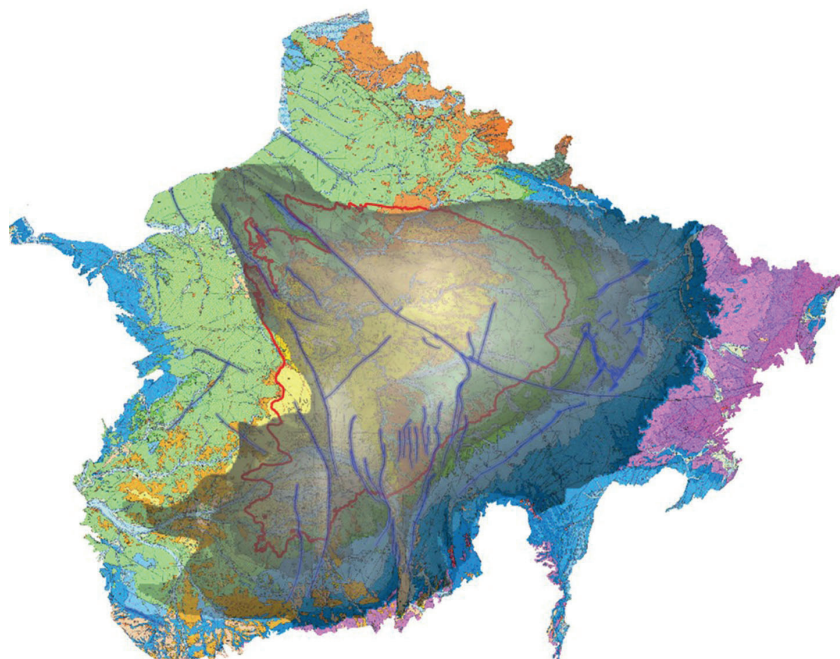


Figure 10. Évaluation BRGM des zones de stockage potentiel de CO₂ (hors pièges structuraux) dans les aquifères du Dogger et du Trias dans le Bassin parisien

L'estimation, conduite avec une méthode basée sur des paramètres physiques évaluant le volume de stockage disponible pour le CO₂ en supposant une surpression admissible maximale de 20 %, indique des capacités de stockage d'environ 1 Gt CO₂ pour cette zone. Cette valeur est basée uniquement sur l'analyse des connaissances et données existantes. Ainsi, les capacités de stockage réelles seront nécessairement plus limitées.

procédé CO₂-Dissolved pour lequel le BRGM cherche aujourd'hui avec SLB à construire un démonstrateur industriel. Cette technologie permettrait de proposer à l'échelle des territoires une solution de stockage au droit des émissaires ultimes de taille intermédiaire et d'accélérer la décarbonation de l'industrie. Elle a l'avantage de prévenir l'existence de phases gazeuses ou super-critiques dans l'aquifère, éliminant ainsi tout risque de remontée gravitaire du CO₂ injecté. De surcroît, la dissolution du CO₂ dans la saumure réinjectée génère une phase aqueuse plus dense que la saumure initiale et qui a ainsi tendance à migrer naturellement vers les couches profondes du réservoir, renforçant ainsi la sécurité de l'opération. Elle permet en outre de réduire le coût d'investissement et réduire les risques en les mutualisant avec la production de chaleur géothermique. Le principe du stockage reposant sur la solubilisation totale et pérenne du CO₂ dans la saumure géothermale, la concentration du CO₂ dans l'eau du réservoir doit être maintenue inférieure à la limite de solubilité, qui est d'environ 50 kg de CO₂ par mètre cube d'eau, ce qui permet d'injecter de 85 à 150 kt de CO₂ dissous par an et par doublet en intégrant le débit classique d'un doublet géothermique.

Ces projets font écho à la volonté récente affichée par le gouvernement sur la concrétisation du lancement de la stratégie de stockage en France. Néanmoins, le déploiement industriel de tels projets nécessitera au préalable de déployer des démonstrateurs et des pilotes industriels permettant de confirmer la faisabilité technologique et industrielle et d'optimiser les procédés. Il y va de la crédibilité de cette solution tant vis-à-vis des industriels qui demanderont à voir la démonstration industrielle avant d'investir, que de l'opinion publique qui voudra être rassurée sur la capacité à faire et les risques associés. La réalisation de tels démonstrateurs se heurte néanmoins aujourd'hui à des difficultés réglementaires qui devront être levées peut-être par des expérimentations territoriales.

3.3. Stockage souterrain de l'hydrogène

L'hydrogène devrait être amené à jouer un rôle important dans les objectifs de neutralité climat pour l'Europe à horizon 2050. Dans le plan REPowerEU, il est prévu de passer à l'utilisation de 20 Mt d'hydrogène en 2030 contre 9 Mt en 2022, tout en décarbonant sa production par électrolyse à partir d'énergie renouvelable intermittente. Dans ce contexte, le rôle potentiel de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique pour équilibrer le réseau électrique sera lié au développement d'infrastructures de stockage souterrain de larges quantités d'hydrogène, permettant ainsi de gommer le caractère intermittent de la production. Différentes technologies existent. Le stockage en cavité saline a déjà fait ses preuves aux États-Unis ou au Royaume-Uni dans des cavernes qui permettent de stocker environ 1 000 à 10 000 tonnes par caverne. Le stockage en aquifère salin quant à lui est actuellement une piste qui fait l'objet de recherches actives avec par exemple l'utilisation de gaz coussins tels que le CO₂, pour notamment démontrer la faisabilité du stockage de l'hydrogène avec des taux de récupération de gaz raisonnables.

3.4. Stockage des déchets

Qu'ils soient dangereux ou radioactifs, le sous-sol offre une solution sûre et pérenne pour stocker les déchets du fait de la très grande stabilité et pérennité du milieu géologique. Ainsi, depuis une trentaine d'années, des études sont conduites à travers le monde pour stocker en couches géologiques profondes (roches cristallines comme le granite en Suède ou en Finlande, formations argileuses en France, Suisse ou Belgique) des déchets nucléaires. Les concepts de stockage dépendent en partie des formations encaissantes. Ainsi, dans un milieu très peu perméable comme les formations argileuses, le transfert des radionucléides sera très lent, d'autant plus que la roche aura une large capacité de sorption, alors que dans des milieux plus fracturés tels que les granites un effort supplémentaire sera porté sur les barrières entre les déchets et les formations encaissantes, avec par exemple l'utilisation de conteneurs en cuivre pour réduire les phénomènes de corrosion

autour des colis de déchets. De la même manière, des déchets ne pouvant pas être stockés dans des décharges en surface du fait de leur dangerosité peuvent être stockés dans des mines de sel. La complexité autour du stockage des déchets n'est pas qu'un défi technique, d'autant plus que la R&D conduite sur ces sujets depuis plusieurs décennies, y compris dans des laboratoires souterrains de recherche (par exemple le laboratoire de Meuse/Haute-Marne⁶ opéré par l'Andra en France), permet d'en faire un sujet maîtrisé (par exemple en Finlande, sur le site d'Olkiluoto, le stockage est en phase de mise en service), mais il est aussi un défi social et politique comme pour beaucoup de sujets en lien avec l'utilisation du sous-sol.

4. Le sous-sol, un milieu méconnu du grand public et absent du débat public

4.1. De la révolution industrielle à Gaïa

On l'a vu dans le début de cet article, le sous-sol abrite donc des ressources d'intérêt pour la transition énergétique (ressources minérales, eau, chaleur...) et constitue des espaces de stockage dont la grande stabilité dans le temps des conditions physico-chimiques présente un intérêt évident. À ce titre, il est donc appelé à jouer un rôle important dans la transition énergétique, et pourtant il reste le plus souvent absent des débats publics. Ce paradoxe est lié d'une part à son invisibilité, son inaccessibilité pour le public, mais aussi à la méconnaissance généralisée sur la structure, les caractéristiques et la dynamique du sous-sol. Alors qu'il a été le vecteur de la révolution industrielle au XIX^e siècle, le sous-sol est progressivement sorti de la sphère publique et rationnelle pour devenir un objet dépolitisé ouvrant la porte au retour de croyances ancestrales autour de la terre nourricière et de Gaïa. Toute intrusion souterraine est ainsi souvent perçue par une partie de la société comme une agression forcément inutile et à visée purement mercantile contre la terre qui nous abrite. Il n'est donc pas surprenant de constater aujourd'hui l'opposition croissante d'une partie de la société à l'exploitation des ressources souterraines, d'autant qu'avec la

mondialisation et la désindustrialisation, beaucoup ont oublié que le sous-sol fournit une part importante des ressources indispensables à nos modes de vie. Tout ce qui ne se cueille ou ne se récolte pas s'extrait du sous-sol... mais trop peu en ont conscience ! Et pourtant, les mines de métaux ne représentent à ce jour que moins de 1 % de ce qui est extrait du sous-sol...

4.2. De la médiation scientifique à la co-construction des projets

Nos sociétés européennes se retrouvent aujourd'hui face à un dilemme croissant entre le besoin de faire appel au sous-sol pour extraire des métaux indispensables à la transition énergétique, extraire des calories utiles pour se chauffer ou assurer nos approvisionnements en eau, et la protection extensive de l'environnement que prône une part croissante de la population. Ces deux points de vue sont-ils condamnés à s'affronter, ou peut-on imaginer des chemins de réconciliation ? Il nous semble que sortir de cet affrontement nécessitera un effort conséquent dans deux directions complémentaires :

- D'une part, permettre une meilleure connaissance de la structure, des propriétés et de la dynamique du sous-sol pour qu'il devienne un objet étudié et enseigné et non une *terra incognita*. Cela passe certainement par une meilleure place des géosciences dans les enseignements scolaires, enseignement souvent assuré par des enseignants peu au fait de ces sujets. Cela passera aussi et surtout par un effort de pédagogie et de médiation scientifique des géoscientifiques envers la société civile. Cet effort doit permettre de présenter, expliquer, illustrer les connaissances et les recherches menées sur le globe terrestre. Il nécessitera également de pouvoir s'appuyer autant que nécessaire sur des jumeaux numériques couplés à des démonstrateurs permettant à la fois de tester en conditions réelles les solutions ou usages envisagés et de démystifier ces usages mal connus.
- D'autre part, associer la société civile à la définition des projets impliquant le sous-sol,

au-delà des enquêtes et débats publics classiquement déployés en France. De ce point de vue, l'expérience des dernières décennies en Suède et Finlande est particulièrement éclairante. Ces pays, dont la vitalité démocratique et le souci environnemental ne sont contestés par personne, ont pourtant réussi à continuer à développer une activité minière importante (l'une des plus importantes en Europe aujourd'hui), et à finaliser et lancer la construction d'un stockage souterrain de déchets nucléaires, sujet pourtant hautement polémique. Sur ce dernier point, leur succès est lié notamment à l'implication de représentants des collectivités locales dans le pilotage de ces projets à fort enjeu environnemental, avec une réelle possibilité de l'influer, voire dans le cas extrême d'y mettre un terme. La co-construction de projets est sans doute une clé de l'acceptabilité, comme le montrent aussi des expériences en France sur la gouvernance partagée de la ressource en eau.

Quelles que soient les solutions retenues, ramener le sous-sol dans le débat politique est aujourd'hui un impératif pour réussir tant la transition énergétique que l'adaptation au changement climatique. Il en va ainsi de l'avenir de nos sociétés, de leur résilience face au changement climatique et de la vitalité des démocraties que nous laisserons à nos enfants.

NOTES

1. <https://www.geothermies.fr/geoscan-idf>.
2. <https://www.geothermies.fr/geoscan-arc>.
3. <https://www.ecologie.gouv.fr/geothermie-plan-daction-accelerer>.
4. <https://norlights.com/what-we-do/>.
5. <https://www.carbfix.com/>.
6. <https://meusehautemarne.andra.fr/landra-en-meusehaute-marne/installations/le-laboratoire-souterrain>.

BIBLIOGRAPHIE

Académie des technologies, 2023. Le stockage intersaisonnier de chaleur : un atout pour le climat et la souveraineté, <https://www.academie-technologies.fr/publications/le-stockage-intersaisonnier-de-chaleur-un-atout-pour-le-climat-et-la-souverainete/>.

BRGM, INERIS, 2023. Guide de bonnes pratiques pour la maîtrise de la sismicité induite par les opérations de géothermie profonde, <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/Guide-geothermie.pdf>.

IEAGHG, 2023. Prospective integration of geothermal energy with carbon capture and storage, <https://ieaghg.org/publications/prospective-integration-of-geothermal-energy-with-carbon-capture-and-storage/>.

BIOGRAPHIES

CHRISTOPHE POINSSOT est directeur général délégué et directeur scientifique du BRGM depuis 2020. Ancien élève de l'École normale supérieure de Paris où il étudie les sciences de la terre et la physique, il obtient en 1997 un doctorat en physique/sciences des matériaux sur le stockage géologique des déchets nucléaires avant de rejoindre le CEA après un post-doctorat à l'Institut Paul Scherrer en Suisse. Après une dizaine d'années à Saclay où il dirige les équipes travaillant sur les impacts environnementaux du nucléaire et le stockage des déchets, il rejoint en 2008 le CEA Marcoule où il dirige durant 10 ans les équipes travaillant sur le recyclage des matières nucléaires avant d'être nommé en 2018 conseiller nucléaire à l'ambassade de France en Chine.

FRANCIS CLARET est directeur du programme Transition énergétique et espace souterrain. Il est titulaire d'un diplôme d'ingénieur de l'école Polytech Orléans et d'un doctorat de l'Université Joseph Fourier-Grenoble en géochimie de l'environnement. En 2007, il rejoint le BRGM. Ses travaux portent notamment sur la modélisation des phénomènes couplés en lien avec l'utilisation du sous-sol pour des problématiques de stockage. Il a écrit ou coécrit 88 publications de rang A et deux chapitres de livres. Il est membre du comité éditorial du journal *Scientific Reports*.

Après une première partie de carrière académique (professeur des universités en hydrogéologie), **ALAIN DUPUY** est depuis 2024 détaché au BRGM à Orléans comme directeur du programme sur les ressources en eaux souterraines. Ses activités de recherche concernent l'étude des systèmes aquifères par transferts de pression, masse et énergie, et la disponibilité des ressources en eau en regard du changement climatique et les mesures d'adaptation associées. Il est également codirecteur pour le BRGM du programme et équipement prioritaire de recherche (PEPR-PIA4) sur l'eau OneWater – Eau bien commun.

PATRICK D'HUGUES est microbiologiste et a obtenu son doctorat sur la biolixiviation appliquée au traitement des minerais en 1996. Après un post-doctorat à l'Université de Warwick (Royaume-Uni), il rejoint le BRGM en 1999 et participe à la mise en route de l'usine de production de cobalt par biohydrométallurgie de Kasese (Ouganda). À partir de 2004, il intervient dans des projets de R&D européens sur la production de métaux. De 2010 à 2019, il assure le management de l'équipe Procédé-ACV du BRGM. Il est aujourd'hui directeur du programme scientifique Ressources minérales et économie circulaire.

À lire également dans *La Revue de l'Énergie*

- Séminaire : les ressources non énergétiques, un frein aux transitions énergétiques? (n° 643, mars-avril 2019)
- Un retour des stocks stratégiques de métaux critiques dans la dynamique de transition bas carbone?, Emmanuel Hache, Frédéric Jeannin (n° 669, novembre-décembre 2023)
- Économie des métaux : un aperçu de la littérature académique, Maylis Peyret, Frédéric Gonand (n° 669, novembre-décembre 2023)

À retrouver sur www.larevuedelenergie.com.