

INERIS

références



**Garantir la sécurité des transitions
énergétique et écologique sur les territoires**

JUIN 2023

**Héritage minier :
post-exploitation,
nouveaux usages et
reconversion du sous-sol**

Ont contribué à ce dossier :

Ineris: Xavier Daupley*, Philippe Gombert, Stéphane Lafortune, Frédéric Poulard, Romuald Salmon, Nathalie Velly (direction Sites et territoires); Franz Lahaie, Aurélie Prévot (direction de la Stratégie, de la politique scientifique et de la communication).

INERIS

références



**Garantir la sécurité des transitions
énergétiques et écologiques sur les territoires**

JUIN 2023

**Héritage minier :
post-exploitation,
nouveaux usages et
reconversion du sous-sol**



Sommaire

05 — RÉSUMÉ NON TECHNIQUE

06 — INTRODUCTION

L'Ineris et les mutations de l'exploitation du sous-sol

08 — DE QUOI PARLE-T-ON ?

Des formes d'exploitation très variées

14 — CONTEXTE

Un cadre réglementaire en évolution

18 — MAÎTRISE DES RISQUES

Les risques liés à la post-exploitation

29 — PERSPECTIVES

Opportunités et risques liés aux nouvelles exploitations ou usages du sous-sol

40 — ATTENTES SOCIÉTALES

Le sous-sol, laboratoire de la fabrique des territoires ?

42 — CONCLUSION

Un enjeu de risques industriels... et d'impacts environnementaux

43 — PRÉCONISATIONS DE LA CORE

44 — ANNEXES

Le développement des sociétés humaines s'est fondé, de tout temps, sur l'exploitation des ressources du sous-sol. Matériaux de construction, minéraux industriels, métaux, hydrocarbures... cette exploitation a connu des formes et des fortunes diverses, marquées notamment en Europe et en France par un lent déclin des activités minières au siècle passé. En parallèle, d'autres formes d'exploitation ont perduré (carrières) ou ont progressivement émergé (stockages souterrains). Si la prise de conscience des limites planétaires a conduit à s'interroger sur l'utilisation des énergies fossiles, les transitions énergétique et numérique n'ont pas pour autant affranchi les sociétés des ressources du sous-sol.

Comme toute activité anthropique, l'exploration puis l'exploitation du sous-sol engendrent des risques et des impacts pour l'Homme et les écosystèmes. Un des enjeux propres au sous-sol réside dans la persistance de ces risques et impacts parfois très longtemps après l'arrêt de l'activité (« post-exploitation »). La connaissance de l'héritage minier est ainsi au cœur de l'expertise développée par l'Ineris sur la sécurité de l'utilisation du sous-sol. C'est ce lien entre les leçons tirées de « l'après-mine » et les nouveaux usages du sous-sol que le dossier Ineris références entend explorer.

L'arrêt des activités minières a suscité de nombreux travaux en lien avec la maîtrise des risques, qui ont pu bénéficier à d'autres activités en phase de post-exploitation (risques liés aux anciens puits d'hydrocarbures, carrières abandonnées...). Les phénomènes dangereux post-miniers sont principalement des mouvements de terrains, auxquels s'ajoutent des perturbations hydrologiques, des remontées de gaz et des phénomènes de combustion (terril).

FIGURE 1

Installation de géothermie de Wairakei, zone volcanique de Taupo (Nouvelle-Zélande).



Parmi les désordres les plus récemment observés, on compte la sismicité induite par l'activité humaine, dont la connaissance nécessite d'être approfondie.

Ces phénomènes imposent, pour être évalués, de déterminer et cartographier leur aléa dans une zone donnée. Une autre composante essentielle des risques « après-mine » est la possible contamination chimique de l'environnement, ainsi que les impacts pour les milieux naturels et pour la santé qui en découlent. Leur évaluation s'appuie davantage sur des méthodologies proches de celles utilisées dans le domaine des sites et sols pollués.

En France, la « mine » est une notion juridique permettant d'encadrer l'exploitation de ressources du sous-sol jugées stratégiques. Ce cadre réglementaire d'exception est en pleine évolution, tendant à rapprocher le Code minier du régime juridique des autres activités extractives (« carrières »), qui relèvent des dispositions du Code de l'environnement relatives aux installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE).

En effet, l'exploitation du sous-sol reste un levier de développement dans le cadre de la transition énergétique. La géothermie est une forme d'énergie bas carbone possédant de nombreux atouts pour contribuer à la transition énergétique. Le développement des stockages souterrains, stockage d'hydrogène décarboné et stockage du CO₂, peuvent également concourir à la stratégie globale mise en œuvre pour sortir des énergies fossiles. Le sous-sol offre également un potentiel de réutilisation des espaces souterrains à des fins diverses : stockage de chaleur, station de transfert d'énergie par pompage (STEP)... Enfin, les filières renouvelables mobilisent nombre de métaux que l'Europe et la France ne produisent pas ou plus : les besoins d'approvisionnement relancent la question de l'exploitation minière.

Face à ces enjeux de transition, le rapport des sociétés au sous-sol a cependant changé. Compte tenu des impératifs climatiques et environnementaux, l'exploitation de la ressource ne peut plus être conçue comme un simple processus d'épuisement, mais dans une perspective durable. L'exploitation du sous-sol, jusqu'alors affaire d'experts, est de nouveau objet d'attention et de revendications de la part de la société civile. Le débat sociétal, empreint de fortes controverses, met en lumière des attentes diverses : inquiétudes sur les effets d'une activité ancienne ou nouvelle sur son environnement direct ; opposition de principe fondée sur des arguments écologiques ; critique de l'utilisation industrielle du sous-sol comme symbole d'un « système » économique à repenser... Loin d'être une simple question d'acceptabilité, l'exploitation du sous-sol cristallise une demande de « mise en politique » exprimée par la société civile : elle doit se concevoir comme une partie intégrante de la construction d'un territoire.

L'Ineris et les mutations de l'exploitation du sous-sol

Dans un contexte en mutation, l'Ineris est fortement mobilisé sur les risques et les impacts de la post-exploitation des mines, ainsi que sur la sécurité du développement d'usages du sous-sol en lien avec la transition énergétique et la reconversion des ouvrages souterrains.

DÉCLIN DE L'EXPLOITATION MINIÈRE ET DÉVELOPPEMENT DE NOUVELLES FILIÈRES

L'exploitation du sous-sol a joué un rôle essentiel dans les transformations économiques de l'Occident contemporain, tout en marquant fortement l'organisation spatiale et les représentations culturelles des communautés sociales. En France, cet enjeu économique crucial incarné par le sous-sol s'est traduit, à l'avènement de l'ère industrielle, par une distinction opérée entre l'exploitation de ressources stratégiques, encadrée par une réglementation qui lui est propre (Code minier) et les autres activités extractives (carrières). En effet, en tant que ressource, le sous-sol a été exploité, durant plusieurs siècles, sur une grande partie du territoire français avant que l'essentiel des sites miniers ne ferment.

Afin d'accompagner le développement des activités, de garantir leur sécurité et limiter les impacts au cours de leur cycle de vie, des évolutions techniques et réglementaires ont été engagées, certaines en réponse à de grands accidents d'exploitation (à Courrières, mines du bassin houiller du Nord-Pas-de-Calais, 1906) ou de post-exploitation

(à Clamart et Issy, carrières de craie, 1961 ; à Auboué, mines du bassin ferrifère lorrain, 1996).

Depuis les années 1990, à la suite d'un lent déclin industriel, un tournant de l'activité minière a été opéré avec l'arrêt définitif des grands bassins miniers (charbon, fer), des mines polymétalliques réparties dans de nombreuses régions du territoire métropolitain, et avec la diminution progressive de l'exploitation pétrolière et gazière. Ne subsistent, à grande échelle, que des exploitations d'hydrocarbures et des exploitations minières de sel gemme par dissolution, et quelques exploitations très locales.

Avec le déclin du charbon en Europe, le lien entre les pratiques sociales et les activités minières a progressivement disparu, conduisant à une « mise à distance » des sociétés avec leur sous-sol et avec les ressources qu'il renferme. Seule l'industrie extractive exploitant les matériaux de construction et minéraux industriels a maintenu un niveau d'activité élevé. Ce faisant, elle a délaissé, pour partie, le monde souterrain, qui nécessitait de mobiliser des compétences pointues se raréfiant, au profit des exploitations à ciel ouvert que les progrès liés à la mécanisation ont favorisées.

Parallèlement à l'arrêt progressif des activités minières, d'autres types d'usage du sous-sol sont apparus depuis les années 1940, en particulier la fonction de « stockage ». Les stockages de gaz naturel et d'hydrocarbures se sont développés les premiers sur le territoire, en réutilisant d'anciennes exploitations minières, par la création *ex nihilo* de cavités dédiées ou au sein d'aquifères profonds. Les nouvelles activités du sous-sol restent ainsi un levier du développement économique, s'inscrivant pour la plupart d'entre elles dans le cadre de la transition énergétique. Géothermie, stockage d'énergie renouvelable... sont aujourd'hui autant de nouveaux enjeux d'usage à considérer.

FIGURE 2

Les exploitations et usages du sous-sol en France au cours des temps.

Chronologie	Exploitations	Dates marquantes
Âges des métaux	Mines métalliques, matériaux de construction	1777 : création de l'inspection générale des carrières
Ère industrielle	Combustibles et matériaux stratégiques	1810 : loi sur les mines
XX ^e siècle	Puits pétroliers Stockages d'hydrocarbures Géothermie Stockage Énergie/ Espaces urbains	1906 : catastrophe de Courrières 1961 : effondrements de Clamart et Issy 1995 - 2006 : arrêt exploitation, loi après-mine 1996 : affaissements du bassin ferrifère lorrain 2017 : loi hydrocarbures

Les besoins des transitions énergétique et numérique ont remis en lumière les enjeux économiques considérables représentés par les ressources minérales. Associés à des préoccupations de souveraineté, ils posent ainsi avec une acuité nouvelle la question de l'approvisionnement en métaux stratégiques, dans un contexte politique mondial instable, et remettent en débat l'exploitation minière du sous-sol français et européen. Or la notion d'« économie minière » renvoie, dans les représentations collectives, à une logique d'exploitation jusqu'à épuisement des ressources. Changement climatique, érosion de la biodiversité... la prise de conscience des limites planétaires et de la finitude des ressources naturelles, dont la consommation a triplé en cinquante ans, impose désormais de penser ces perspectives d'exploration, d'exploitation et de post-exploitation du sous-sol dans une dimension éthique et durable.

QUELS ENJEUX POUR LA GESTION DE LA POST-EXPLOITATION ET DES NOUVELLES FILIÈRES ?

Au regard de cette longue histoire, l'urbanisation et le développement de nombreuses zones sont parfois fortement contraints par les risques et impacts liés aux exploitations passées : la gestion de la post-exploitation et la reconversion des anciens ouvrages sont un enjeu important pour le développement du territoire. Pour y répondre, des travaux méthodologiques sont nécessaires. Concernant les anciennes exploitations minières, il existe aujourd'hui un important retour d'expérience dans le cadre d'une gestion spécifique, par l'État, dite d'« après-mine ». De même, s'agissant des carrières souterraines abandonnées, le risque diffus qu'elles constituent sur l'ensemble du territoire a nécessité le développement d'une politique publique dédiée, impliquant largement les collectivités.

Pour d'autres activités d'exploitation du sous-sol développées plus récemment, pour l'exploitation des hydrocarbures dont la fin d'activité est programmée (en 2040) ou encore pour les mines toujours actives, en métropole ou à l'étranger, des études spécifiques restent à mener afin de gérer leur post-exploitation future. Les enjeux de ces travaux sont non seulement scientifiques (mécanismes couplés complexes, réutilisation optimale des anciens sites) mais également sociétaux : recommandations d'usage des sols et des eaux, principes d'aménagement des territoires, gestion à long terme des risques résiduels comme pour les sites plus anciens. S'agissant des filières d'exploitation du sous-sol en développement, elles doivent s'inscrire dans un contexte où les questionnements sociétaux sont importants, notamment au regard des pratiques du passé, aboutissant parfois à des controverses vives. Les exigences environnementales sont renforcées et s'appliquent à l'ensemble du cycle de vie des exploitations avec une vigilance permanente de l'ensemble des parties prenantes (industriels, administrations, riverains, ONG...). Des questionnements scientifiques et techniques subsistent et imposent des évaluations approfondies (stockages de l'hydrogène, sismicité en lien avec la géothermie...).

Risques résiduels liés aux exploitations passées (France métropolitaine)

- 7 000 anciens titres miniers
- 53 730 ha d'aléas post-exploitation
- 12 000 anciens puits pétroliers
- 3 000 communes concernées par des cavités souterraines et anciennes carrières

FIGURE 3

Mesure de gaz à proximité d'un ancien puits de mine, bassin houiller en post-exploitation.



POSITIONNEMENT DE L'INERIS

De l'héritage du Centre de recherche des Charbonnages de France (CERCHAR), l'Institut a conservé et approfondi certaines compétences transversales. L'Ineris a fait le choix de ne pas poursuivre ses travaux sur les risques propres à l'exploitation, pour recentrer son expertise sur la dimension « post-exploitation ». Cette expertise est mise au service des politiques publiques pour quantifier les aléas « après-mine » et caractériser la dégradation de la qualité des milieux (sols, eaux et végétaux) attribuable à l'exploitation minière passée, puis évaluer les risques qui en découlent. Dans cette même logique, les équipes de l'Ineris ont développé un savoir-faire spécifique sur les risques liés à l'arrêt de l'exploitation des hydrocarbures. Par sa connaissance fine des phénomènes dits « gravitaires¹ », l'Institut a fait des risques liés aux carrières de l'industrie extractive et aux cavités abandonnées un autre domaine clé « historique » de son expertise.

Fort de ces expériences, l'Ineris intervient depuis quelques années auprès du ministère chargé de l'environnement dans le cadre de la transition énergétique, pour évaluer les risques liés à de nouveaux types d'exploitation ou reconversion d'exploitation du sous-sol, comme la filière géothermie ou les usages du sous-sol en stockage notamment. En complément, l'Ineris met également au service de la transition écologique ses compétences dans le domaine de la sécurité de l'économie circulaire (recyclage et « seconde vie » notamment).

Note 1. Les phénomènes gravitaires se traduisent, dans le sous-sol, par des mouvements de terrain du bas vers le haut (effondrement de vide souterrain ou affaissement en surface) ou du haut vers le bas (éboulements et chutes de blocs).

Des formes d'exploitation du sous-sol très variées

Les « exploitations du sous-sol » recouvrent une réalité complexe. Il s'agit d'activités variées portant chacune des questions de sécurité propres, allant de l'extraction d'une ressource sous forme solide, liquide ou gazeuse à l'utilisation des propriétés du sous-sol pour un usage spécifique comme le stockage.

UNE CLASSIFICATION SELON LA NATURE DE LA RESSOURCE OU DE L'ACTIVITÉ

L'exploitation du sous-sol est entendue assez communément comme l'exploitation de ressources minérales servant à la production de matières premières, utilisées dans tous les secteurs d'activité industrielle des sociétés modernes. Plus largement, les exploitations du sous-sol comprennent également les activités destinées à extraire de la chaleur (géothermie) et celles qui utilisent certaines propriétés du sous-sol (étanchéité en particulier) pour stocker des produits divers (substances énergétiques ou déchets notamment).

Les ressources minérales non énergétiques sous-marines

Les fonds marins côtiers constituent une ressource en sables « coquilliers » moyens à grossiers, graviers ou sables siliceux et galets. Les granulats coquilliers sont un très bon matériau pour l'amendement des sols agricoles acides, tandis que ceux de nature siliceuse sont valorisés en construction (ouvrages en béton). Ces exploitations représentent 2% de la production française (7,5 M t/an). D'autres ressources sous-marines font l'objet d'explorations scientifiques : nodules polymétalliques, encroûtements cobaltifères ou sulfures hydrothermaux des grands fonds.

Les stockages souterrains sont classés selon la nature des substances stockées. Les plus anciens visaient à ajuster l'offre à la demande d'hydrocarbures liquides, liquéfiés ou gazeux et à garantir la sécurité d'approvisionnement. S'y ajoutent aujourd'hui les stockages d'énergies décarbonées, issues des sources renouvelables (pour « lisser » leur production par nature intermittente) ou de l'électricité nucléaire, sous diverses formes (hydrogène, chaleur, froid, air comprimé, énergie hydraulique).

Les stockages dits « géologiques », dont la conception ne repose pas sur un cycle d'utilisation (injection-soutirage), sont destinés à accueillir durablement les produits stockés en garantissant sur le long terme des propriétés d'étanchéité maximale (dioxyde de carbone, déchets industriels solides...).

L'exploitation du gaz de charbon

Le gaz de charbon désigne le méthane naturellement contenu dans certains gisements. Il est souvent accompagné d'autres gaz, en particulier le dioxyde de carbone (cet ensemble correspond au « grisou »). On distingue le « gaz de couche » ou *Coal Bed Methane* (CBM), récupéré avant l'exploitation du charbon ou dans les gisements non exploités ; le « gaz de mine » ou *Abandoned Mine Methane* (AMM), capté par pompage dans des mines fermées non ennoyées. Dans le premier cas, le recours à des forages horizontaux permet d'augmenter la productivité et de réduire l'emprise au sol des installations de surface. La plupart du temps, on y associe des techniques de stimulation (injection d'eau sous pression sans ajout d'adjuvants), pour accroître la perméabilité des couches de charbon et assurer un drainage et un débit convenable du gaz. Dans le second cas, le gaz est capté au sein des galeries souterraines et/ou des puits miniers existants.

FOCUS SUR...

Panorama des exploitations du sous-sol

Les exploitations du sous-sol s'appuient sur une grande variété de techniques, qui ont évolué au cours de l'histoire. Ces techniques ont permis de rationaliser l'activité en optimisant la récupération des gisements, de limiter les impacts en termes de mouvements de terrain ou d'effets sur l'Homme et les écosystèmes, d'accéder à des gisements plus profonds ou encore de développer des activités nouvelles.

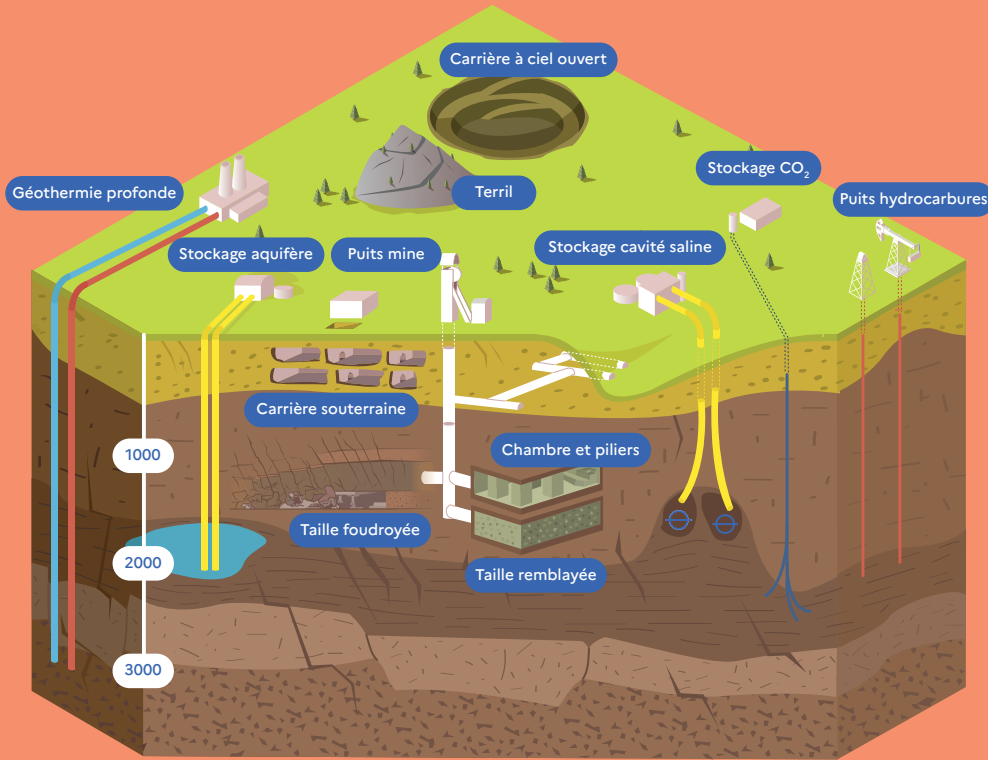


FIGURE 4

Les catégories de ressources du sous-sol.

Ressources minérales primaires non-énergétiques			Ressources primaires énergétiques	
Matériaux de construction	Roches et minéraux industriels	Minerais et métaux	Minérales non renouvelables	Renouvelables
Granulats Pierres ornementales	Carbonates (calcaire & craie) Argiles Silices (quartz) Minéraux spécifiques (gypse, talc) Sel & potasse	Non ferreux (aluminium) Ferreux (chrome) Spéciaux (lithium) Précieux (or) D'alliages (cuivre)	Hydrocarbures liquides, gazeux, solides Combustibles fossiles (hors tourbe) Matières fissibles (uranium)	Gîtes géothermiques - Minime importance - Basse et haute température

LES RESSOURCES SOLIDES : EXPLOITATIONS À CIEL OUVERT OU SOUTERRAINES

La grande variété de formes et de caractéristiques des gisements minéraux et les progrès constants de la technologie expliquent les très nombreuses méthodes d'exploitation mises au point pour assurer l'extraction des ressources minérales solides. Certains matériaux exploités sont enfouis à des milliers de mètres de profondeur alors que d'autres sont situés à proximité immédiate de la surface. Qu'il s'agisse des mines ou des carrières², qui partagent globalement les mêmes techniques, l'exploitation se fait à ciel ouvert ou en souterrain³.

Les exploitations à ciel ouvert consistent à extraire le minerai depuis une excavation ouverte en surface. Le minerai est souvent atteint et exploité après avoir enlevé les matériaux stériles qui le surmontent. En fonction de la disposition des zones minéralisées, l'exploitation est dite « en découverte » lorsqu'elle est étendue et peu profonde, tandis que l'exploitation dite « en fosses » présente une extension verticale importante.

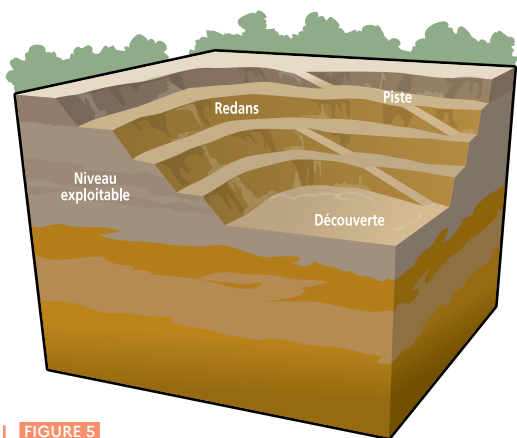


FIGURE 5

Exploitation à ciel ouvert.

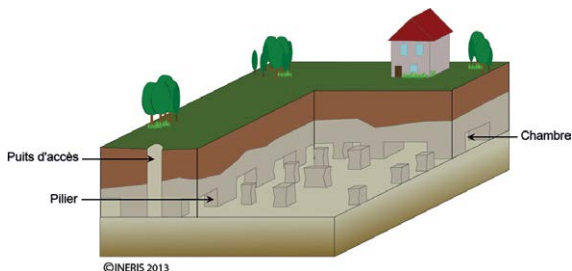


FIGURE 6

Exploitation souterraine.

Dans les exploitations souterraines, le gisement est atteint et exploité à partir d'ouvrages d'accès permettant la descente du personnel, du matériel, la remontée en surface du minerai et des fluides d'exhaure ou encore l'aéragé des travaux souterrains. On parle de « puits » pour les ouvrages verticaux ou sub-verticaux et de « galeries souterraines » pour les accès peu inclinés depuis la surface. On distingue les exploitations qui maintiennent des vides résiduels dans le sous-sol de celles qui assurent un traitement intégral de ceux-ci. La méthode d'exploitation la plus connue entrant dans la première catégorie est dite « par chambres et piliers abandonnés ». Au fur et à mesure de l'avancée du front de taille, les chambres exploitées sont laissées vides et séparées par des piliers destinés à supporter le poids des terrains sus-jacents et assurer la stabilité de l'ensemble de la zone exploitée. À l'opposé, la suppression des vides est réalisée soit par apport de matériaux de remblayage soit en torpillant les structures de soutènement (piliers), ou en foudroyant le toit des excavations, les matériaux éboulés venant alors occuper les vides initiaux.

L'exploitation alluvionnaire

Les placers sont des zones d'alluvions où se sont accumulés des minéraux exploitables. En Guyane, ils constituent l'exploitation minière traditionnelle de référence de l'or. À ciel ouvert, elle est fondée sur plusieurs excavations successives de faibles dimensions (30x30 m et de moins de 10 m de profondeur), appelées barranques, permettant la mise en place d'un circuit fermé de décantation et récupération des eaux nécessaires au dégagement des horizons minéralisés.

LES RESSOURCES LIQUIDES OU GAZEUSES : HYDROCARBURES, ÉVAPORITES, GÉOTHERMIE

Les produits pétroliers sont généralement⁴ extraits du sous-sol sous forme liquide ou gazeuse, par l'intermédiaire de puits réalisés par les techniques de forage. Les gisements concernés sont des réservoirs poreux⁵ permettant l'accumulation des fluides pétroliers. Les puits pétroliers se distinguent des puits de mine par leurs diamètres réduits (10 à 20 cm au plus à leur extrémité) et ont pour fonction essentielle, en phase d'exploration, d'assurer la descente d'outils de reconnaissance et en phase d'exploitation, de faire remonter efficacement et en sécurité les effluents vers la surface. Les techniques pétrolières permettent l'accès aux gisements depuis la terre (onshore) ou depuis la mer (offshore). Le développement depuis les années 1980 des techniques de forages directionnels permet d'exploiter plusieurs horizons géologiques d'un même gisement à partir d'un ou plusieurs puits (clusters) regroupés sur une même plateforme.

L'exploitation par dissolution concerne les minerais solubles (ou roches évaporitiques), tels que le sel gemme

(ou halite) présent naturellement dans le sous-sol. Le principe consiste à dissoudre le minerai en place par apport d'eau douce injectée depuis la surface par des conduits artificiels (puits ou sondages) et à extraire par pompage la saumure ainsi créée. Il en résulte le développement de cavités. Lorsque le gisement est présent à grande profondeur (≥ 1000 m), la méthode consiste à exploiter le gisement par cavité isolée (un seul puits par cavité). Les cavités sont en général de grandes dimensions (certaines dépassent 1 M m^3) et présentent une forme allongée verticalement. Elles sont exploitées pour être stables à long terme et peuvent être conçues pour accueillir une activité de stockage d'hydrocarbures. À plus faible profondeur (200 à 300 m), le gisement est exploité par des méthodes dites extensives ou intensives. Les premières créent des cavités connectées ou isolées laissant une partie du gisement en place afin de rester mécaniquement stables à long terme. Les secondes ont été développées pour optimiser la récupération du gisement sur une faible surface: tout le gisement est exploité dans son épaisseur et les cavités créées sont destinées à s'effondrer.

La géothermie est l'exploitation de l'énergie thermique contenue dans le sous-sol pour produire de la chaleur, du froid ou de l'électricité. Elle se structure autour de trois grandes filières: la première exploite la chaleur à basse température des premières centaines de mètres sous la surface et, par l'ajout d'une pompe à chaleur (PAC), permet de chauffer ou de climatiser des bâtiments. La deuxième exploite la chaleur provenant d'horizons plus profonds et alimente des réseaux de chaleur pour le chauffage urbain collectif. La troisième exploite la chaleur à haute température dans des zones volcaniques ou des systèmes faillés profonds (technologie dite « EGS »), afin de produire de l'électricité et/ou de la chaleur à usage industriel. À basse température, on trouve une variété de techniques d'extraction: boucles enterrées, pieux géothermiques, sondes géothermiques verticales, forages sur nappes superficielles. À plus haute température, le principe d'exploitation repose sur la réalisation de puits profonds (un à plusieurs kilomètres), proches de ceux que l'on trouve dans l'industrie pétrolière, par lesquels des eaux ou vapeurs chaudes sont extraites, valorisées en surface et le plus souvent, réinjectées dans le sous-sol par un deuxième forage (principe du « doublet géothermique »).

FIGURE 7

Les différentes classifications de la géothermie.

LES DIFFÉRENTES CLASSIFICATIONS DE LA GÉOTHERMIE			
Classification énergétique	Classification réglementaire	Classification selon l'utilisation	Principes d'exploitation
Très basse énergie	Géothermie de minime importance	Production de chaleur pour le chauffage résidentiel (assistée par PAC)	Capteurs enterrés Sondes verticales Forages sur nappes aquifères superficielles
30°C	200 m	50°C	50°C
Basse énergie	Basse T°	Production de chaleur pour le chauffage urbain ou l'industrie (usage direct)	Forages profonds (1500 - 5000 m) Nappes aquifères Systèmes faillés profonds (ECS) Systèmes volcaniques
90°C	150°C	120°C	
Moyenne énergie	Haute T°	Production d'électricité	
150°C			
Haute énergie			
		GÉOTHERMIE PROFONDE	

Note 2_ En France, les notions de « carrière » et « mine » sont réglementaires : les carrières sont régies par le Code de l'environnement et les mines par le Code minier (cf. infra).

Note 3_ Voir le tome 6 de la collection « La mine en France » : <https://mineralinfo.fr/fr/collection-mine-france>

Note 4_ De façon exceptionnelle, les hydrocarbures peuvent être extraits par des techniques minières classiques. C'est le cas de certaines mines de schistes bitumineux au Canada ou d'exploitations très anciennes, telle celle de Pechelbronn en Alsace. Cette mine fut au XIX^e siècle un des berceaux de l'exploitation pétrolière mondiale. Les mineurs y récupéraient les huiles des couches pétrolières à partir de galeries souterraines desservies par des puits de mine.

Note 5_ Les hydrocarbures présents dans les réservoirs poreux, les plus facilement accessibles et largement exploités par les compagnies pétrolières, constituent les gisements dits « conventionnels ». Les gisements « non conventionnels » sont ceux dont l'exploitation est rendue difficile par leur profondeur extrême (par exemple en offshore ultra-profond), par les propriétés physiques des effluents (par exemple des huiles très visqueuses) ou par le caractère très compact des réservoirs qui les hébergent, nécessitant la mise en œuvre de techniques d'extraction particulières (par exemple la fracturation hydraulique). Sont inclus dans cette catégorie les gaz et pétroles de schistes, les gaz de charbon ou les pétroles lourds des sables et schistes bitumineux.

LES STOCKAGES SOUTERRAINS: GISEMENT DÉPLÉTÉ, AQUIFÈRE, CAVITÉ

Selon les activités ou filières considérées, les formes de stockage peuvent être très différentes. Les stockages d'hydrocarbures sont les plus nombreux en France, avec 23 stockages actifs en 2020. Dans le cadre de la transition énergétique, les principes envisagés pour le stockage de l'hydrogène, de l'air comprimé ou du CO₂ sont très similaires à ceux des stockages d'hydrocarbures.

Les hydrocarbures peuvent être stockés en gisements de gaz ou de pétrole déplétés (dont les ressources sont épuisées), qui sont des stockages naturels. Protégés par un recouvrement géologique imperméable, les hydrocarbures y ont été piégés au sein d'une roche poreuse et perméable, appelée roche-réservoir. Du fait de leur profondeur et de leur histoire géologique, ces gisements sont sous forte pression, de l'ordre de plusieurs centaines de bars. Une fois leur exploitation terminée, au lieu de les abandonner à faible pression, ils sont parfois reconvertis en stockage de gaz naturel.

Le stockage en aquifère est l'équivalent « artificiel » d'un gisement d'hydrocarbures naturel. Le gaz naturel est injecté dans une nappe aquifère, naturellement poreuse, recouverte d'une roche imperméable interdisant toute migration du gaz vers la surface. Le site est en général sélectionné dans une structure géologique en dôme, susceptible de piéger le gaz stocké et d'éviter qu'il ne migre latéralement. Injecté à une pression supérieure à celle de l'eau qui sature les pores de l'aquifère, le gaz peu miscible (au moins à court terme) va alors repousser cette eau et la remplacer.

Le stockage en cavité nécessite de creuser un vide au sein d'une roche, soit à l'aide d'engins mécaniques ou d'explosifs s'il s'agit d'une roche dure (cavité minée), soit par dissolution s'il s'agit d'une roche soluble (cavité saline). Pour les cavités minées, le confinement des produits est assuré le plus souvent hydrauliquement, c'est-à-dire que la cavité est maintenue en dépression par rapport à la nappe d'eau environnante. Pour les cavités salines, ce sont les propriétés physiques naturelles du sel, de faible porosité et d'imperméabilité, qui sont mises à profit pour assurer l'étanchéité du stockage. Un dernier cas, actuellement peu usité, est le stockage en cavité abandonnée, i.e. la réutilisation à des fins de stockage d'anciennes cavités creusées pour d'autres usages (extraction de minerai).

Note : L'Ineris a choisi de concentrer son propos sur la question des risques et impacts liés à l'héritage minier. Les autres activités extractives ne sont pas traitées de façon exhaustive, sinon dans leurs seuls points de convergence avec les problématiques post-minières, dans la perspective de nouveaux usages. Dans cette logique, l'exploitation de l'eau souterraine, qui constitue une ressource essentielle du sous-sol, ainsi que les ouvrages souterrains ne concourant pas à l'exploitation d'une ressource (tunnels, ouvrages de génie civil...) n'entrent pas dans le périmètre du présent dossier. Enfin, du fait de leur caractère très spécifique, les risques et impacts liés à la filière nucléaire (stockage de déchets...) ne sont pas abordés.

Le stockage souterrain des énergies décarbonées

Un des enjeux de la transition énergétique consiste à récupérer puis stocker l'électricité issue des sources renouvelables intermittentes (éolien, solaire) ou de l'industrie nucléaire produite en heures creuses en la convertissant sous forme d'énergie chimique (hydrogène) ou d'énergie potentielle (air comprimé, station de transfert d'énergie par pompage souterraine). Lorsque la demande augmente, cette énergie est libérée pour différents types d'utilisation : production d'électricité (hydrogène, air comprimé, STEP), mobilité, industrie chimique ou méthanation (hydrogène). Les travaux les plus avancés portent sur le stockage de l'hydrogène en cavité saline.

Contrairement aux gisements déplétés ou aux aquifères, utilisés exclusivement pour le stockage de gaz naturel⁶, les cavités se prêtent au stockage de tous types de produits solides ou fluides (gazeux, liquéfiés ou liquides), sous réserve parfois de certains aménagements.

Une autre forme de stockage d'énergie décarbonée est celle de l'énergie thermique non utilisée (chaleur dite « fatale ») récupérée de certaines activités industrielles. Cette énergie peut être directement stockée dans le sous-sol sous forme thermique (eau chaude) pour être réutilisée ultérieurement pour le chauffage. On peut également stocker de l'eau froide pour des besoins de climatisation.

FIGURE 8

Les catégories de stockages souterrains.

STOCKAGES SOUTERRAINS		
Produits pétroliers	Énergie	Géologique
Hydrocarbures gazeux		CO ₂
Hydrocarbures liquéfiés	Hydrogène	Déchets industriels solides
Hydrocarbures produits par l'industrie chimique / pétrochimique	Air comprimé	Déchets radioactifs
Hydrocarbures liquides	Eau (STEP, chaleur)	

Note 6. Les gisements de gaz naturels et les aquifères profonds font partie des solutions envisagées pour le stockage du CO₂.

POINTS DE REPÈRE SUR LES EXPLOITATIONS DU SOUS-SOL EN FRANCE

REPÈRES HISTORIQUES, SUBSTANCES, TYPES D'EXPLOITATION

Chronologie	Exploitations	Dates marquantes
Néolithique	Mines à silex (travaux souterrains Nord-Pas-de-Calais, Île-de-France)	
Âges de métaux	Mines métalliques, matériaux de construction	
1000 ans avant JC	Aurières et stannière Limousin, Bretagne	
Époque Gallo-Romaine	Exploitations souterraines métaux (Au, Ag, Pb, Cu, Sn, Fe)	
XI ^e - XIII ^e	Exploitations du charbon (Hérault, Provence)	
Révolution industrielle	Exploitations artisanales /industrielles Diversification des métaux recherchés Exploitation des hydrocarbures (Mine souterraine de Pechelbronn)	
XIX ^e - XXI ^e	Développement de l'activité minière: métaux, sels Combustibles solides (charbon, lignite)	1810: Loi du 21 avril, fonde la législation minière (matériaux concessibles) 1906: Catastrophe de Courrières (1099 morts) 1907: Laboratoire "grisou" à Liévin
Après-guerre	Développement de l'activité minière: Exploitation pétrolière (bassin aquitain, fossé Rhénan) Exploitation d'uranium, Limousin, Vendée, Aveyron, Lozère (années 1960) Exploitation d'or en Guyane (années 1970)	1947: Création du Cerchar 1956: Décret du 16 août, Code minier 1958: Pic de production nationale du charbon 1977 (juin): Introduction de la géothermie dans le Code minier
Années 1990	Géothermie: Maison de la Radio (1961) Sultz-Forêts laboratoire international (1985) Bouillante 1 (1986) Stockages d'hydrocarbures: Aquirère Beynes (1956) Cavités minées Petit Couronne (1966) Cavités salines Manosque (1967) Arrêt des grands bassins miniers (lacs, bassins, houilles, potasse, ferrifère, uranium)	1995: Décret du 9 mai, qui fixe les modalités de la procédure d'arrêt des travaux miniers 1996: Affaïssement minier d'Auboué 1999: Loi du 30 mars, dite "loi après-mine" instaure la garantie de l'État en cas de disparition ou de défaillance du responsable des dommages
Années 2000 - 2010	Poursuite de l'exploitation de sel (halite) (mine et dissolution) Stockage de CO₂: Pilote Lacq-Rousse (2010-2013) Géothermie: Bouillante 2 (2005) 1 ^{re} concession Métropole: Sultz (2015)	2001: Création de Géoderis (groupement d'intérêt scientifique Ineris-BRGM, expert après-mine pour l'État) 2004: Cessation de l'exploitation de charbon en France avec la fermeture de La Houve dans le bassin houiller lorrain 2006: Création du Département de la prévention et de la sécurité minière (travaux, maîtrise d'œuvre) déléguée et gestion des installations permanentes confiés par l'État au BRGM 2010: Loi du 12 juillet, transportation partielle en droit français de la directive 2009/31/CE sur le stockage du CO ₂ 2015: Décret du 8 janvier qui encadre la réglementation des activités géothermiques dites "de minime importance" suite à plusieurs accidents 2017: Loi du 19 décembre (loi hydrocarbures) mettant fin à la recherche et exploitation des hydrocarbures conventionnels et non conventionnels 2019: Loi du 8 novembre 2019 relative à l'énergie et au climat
Années 2020		2021: Ordonnance du 17 février 2021 relative à l'hydrogène Loi du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets

Un cadre réglementaire en évolution

Le cadre réglementaire, assez ancien, des activités minières lui est spécifique. L'évolution des dispositions du Code minier tend aujourd'hui à les rapprocher du régime des autres activités extractives, et plus généralement du cadre réglementaire commun aux activités économiques à risque, posé par le Code de l'environnement.

UN CADRE RÉGLEMENTAIRE EN ÉVOLUTION

L'exploitation du sous-sol est régie par un ensemble de textes de droit, pour certains aux racines très anciennes. Ainsi, la différence qui est faite entre les mines et les autres activités extractives n'est, pour l'essentiel, pas une distinction d'ordre technique mais juridique. Pour les matières minérales, c'est la nature de la substance qui définit le cadre législatif et réglementaire dans lequel s'inscrit son exploitation. Ces matières relèvent de deux régimes juridiques principaux : celui des mines, ou celui des carrières, selon leur importance économique ou leur relative rareté. Le Code minier définit comme « mine » tout site où sont exploités un ou plusieurs des minerais énumérés dans le régime légal des mines (art. L111) ; les minerais non listés dans ce régime sont exploités sous le régime des « carrières », encadré par le Code de l'environnement. Dans la pratique, les mines concernent les minerais d'intérêt industriel stratégique : combustibles fossiles, sels de sodium ou de potassium, métaux et métalloïdes, éléments radioactifs...

L'appellation « carrières » s'applique aux minerais à valeur ajoutée modérée, principalement ceux destinés à la construction : pierres à bâtir et ornementales, granulats, etc. Pour les stockages souterrains ou encore l'exploitation de gîtes géothermiques, peuvent s'appliquer le Code minier ou le Code de l'environnement, voire les deux (conjointement ou successivement selon la phase d'exploitation).

Au-delà de ces deux principaux régimes juridiques, l'exploitation du sous-sol est concernée par d'autres corpus réglementaires : le Code civil sur les questions de propriété du sol et du sous-sol ; le Code du travail sur la santé, la sécurité et les conditions de travail des personnes exerçant l'activité ; le Code de l'énergie sur les activités relative aux ressources énergétiques, en particulier les hydrocarbures ; le Code de l'urbanisme sur la prise en compte des contraintes de l'activité dans l'aménagement du territoire.

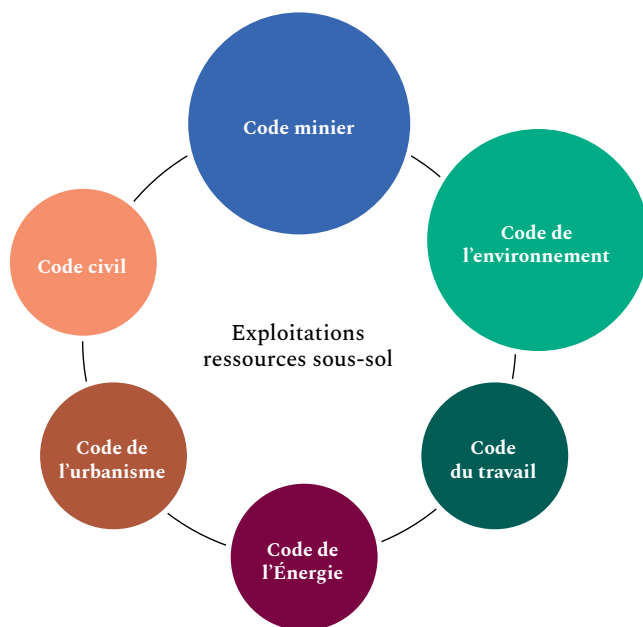


FIGURE 10
Le socle réglementaire français actuel.

Cet ensemble a connu des modifications ces dernières années du fait du développement de nouveaux usages du sous-sol. Les stockages géologiques de CO₂ ont, par exemple, été renvoyés du Code de l'environnement vers le Code minier en 2010, en lien avec le contexte mondial de réduction des gaz à effet de serre. La nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) a été modifiée en 2015 pour y introduire les installations de stockage souterrain de gaz et hydrocarbures. La géothermie de minime importance a été introduite, également en 2015, dans le Code minier, à la suite des désordres survenus à Lochwiller (Bas-Rhin) et Hilsprich (Moselle). En outre, plusieurs textes structurant les règles d'exploitation du sol et du sous-sol ont été adoptés, dont, au premier rang, la loi 2017-1839 mettant fin à la recherche et à l'exploitation des hydrocarbures mais également la loi 2021-1104 portant lutte contre le dérèglement climatique. Cette dernière spécifie que l'État pourra refuser d'attribuer un titre minier en cas de doute sérieux sur la possibilité de procéder aux recherches ou à l'exploitation du gisement mentionné sans porter une atteinte grave aux intérêts protégés du Code minier (environnement, milieux, santé, sécurité...).

LES FONDEMENTS DU CODE MINIER

En France, un propriétaire possède un terrain et son sous-sol sauf dans le cas, prévu par le Code minier, où des ressources « minières » se trouvent dans ce sous-sol, auquel cas elles appartiennent exclusivement à l'État. Ce dernier peut alors autoriser un tiers à explorer ou exploiter cette ressource, sous réserve que ce tiers ait obtenu le droit d'usage minier du sol, attribué par l'Administration centrale (attribution d'un « titre minier » par décret ou arrêté ministériel) ainsi que le droit de réaliser des travaux miniers (*via* une autorisation ou une déclaration), attribué par les services déconcentrés de l'État en région (arrêtés préfectoraux).

Un titre minier donne un droit d'exclusivité à son titulaire pour la recherche ou l'exploitation de produits relevant du Code minier dans un périmètre défini, sans nécessiter l'autorisation du propriétaire du sol, et pour une durée spécifique⁷. La notion d'utilité publique prime mais des conventions sont souvent établies pour gérer des servitudes en lien avec l'utilisation directe des terrains de surface (édification d'installations de routes ou de voies ferrées). Plusieurs types de titres miniers existent : permis exclusif de recherches de mine (PER) et concession, ainsi qu'autorisation de recherches minières (ARM), permis d'exploitation (PEX) et autorisation d'exploitation (AEX), spécifiques à la Guyane. L'obtention d'un titre minier nécessite de constituer une analyse environnementale, économique et sociale⁸ comprenant notamment un mémoire technique et une évaluation de l'impact sur l'environnement. Le processus inclut un ensemble de consultations publiques. Le titulaire peut, à tout moment, et après une procédure spéciale validée par l'État, renoncer à son titre, ce qui marque le début de la période dite « d'après-mine ».

L'autorisation de réaliser des travaux miniers (exploration ou exploitation) est délivrée après que les services de l'État se sont assurés que l'exploitant (le titulaire du titre minier ou une société sous-traitante) entend respecter la ressource (exploitation rationnelle et optimale), l'environnement, les personnes (riverains, publics et travailleurs), les biens (en particulier ceux d'autrui, dans le cas de potentiels désordres générés en surface) et les activités (en surface et dans le sous-sol). Au cours de la vie de l'exploitation, les services déconcentrés régionaux en charge de l'environnement⁹ effectuent le travail de surveillance et d'inspection, dit de police des Mines.

QUELLES DIFFÉRENCES AVEC LES DISPOSITIONS DU CODE DE L'ENVIRONNEMENT ?

La réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE)¹⁰, au cœur du code de l'Environnement, vise à limiter les conséquences potentielles d'activités dangereuses (hors nucléaire régi par des textes spécifiques) sur le territoire, pour la santé des populations, la préservation des milieux naturels et l'intégrité des biens matériels environnants. Depuis la loi 93-3 du 4

La demande d'arrêt définitif de travaux miniers (DADT)

Lorsque l'exploitant envisage de cesser son activité, il doit réaliser un dossier qui est soumis au préfet, instruit par les services de l'État et soumis à la procédure de participation du public prévue par le Code de l'environnement. L'exploitant doit prendre toutes les mesures nécessaires pour faire cesser les désordres et nuisances qu'il a engendrés (affaissements miniers, inondations, rejets d'effluents polluants...), pour prévenir les risques d'apparition de tels désordres et pour ménager, le cas échéant, les possibilités de reprise de l'exploitation. En l'absence de mesures techniques raisonnablement envisageables pour prévenir ou faire cesser un désordre, l'exploitant étudie et présente les mesures, en particulier de surveillance, qu'il estime devoir être poursuivies après l'arrêt des travaux. L'arrêt des travaux s'accompagne ainsi d'études sur les risques, l'impact hydrologique et sur divers travaux de mise en sécurité (stabilisation des haldes et terrils, démolition d'installations vétustes, prévention des risques de pollution des eaux...). Depuis la loi Climat et résilience, l'exploitant devra remettre à l'État, cinq ans avant la fin de sa concession, un dossier présentant le potentiel de reconversion de ses installations ou de leur site d'implantation pour d'autres usages du sous-sol, notamment la géothermie, ou pour d'autres activités économiques, en particulier l'implantation d'énergies renouvelables.

janvier 1993, les activités extractives sont inscrites dans la nomenclature des installations classées sous la rubrique 2510 « exploitation de carrière ou autres extractions de minéraux ». Plus largement, une section spécifique aux carrières existe dans le Code de l'environnement (articles L.515-1 et suivants et R.515-1 et suivants).

Les installations classées sont soumises à des régimes plus ou moins contraignants en fonction du degré de danger, de risque et de nuisance qu'elles sont susceptibles de faire peser sur leur environnement direct :

Note 7. Depuis 1919, les titres miniers sont limités dans le temps (50 ans au maximum pour une concession et 5 ans pour un permis exclusif de recherche) mais peuvent être renouvelés.

Note 8. Depuis la promulgation de la loi 2021-1104 du 22 août 2022 dite « Climat et Résilience ».

Note 9. Directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) en France métropolitaine (hors Ile-de-France) et Directions de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DEAL) en Outre-Mer. L'Ile-de-France dispose d'une Direction régionale et interdépartementale de l'environnement, de l'aménagement et des transports (DRIEAT).

Note 10. Pour consulter la réglementation environnementale : <https://aida.ineris.fr/>

autorisation avec servitude d'utilité publique, simple autorisation, enregistrement, déclaration avec contrôles périodiques, simple déclaration. Les activités ICPE les plus dangereuses sont soumises à autorisation du préfet, après examen d'un dossier de demande d'autorisation d'exploiter (DAE). Ce dossier doit démontrer que l'exploitant a mis tout en œuvre pour limiter, réduire et éliminer les risques que son activité pourrait générer pour les riverains, le milieu naturel et le patrimoine matériel alentour. La plupart des carrières relèvent de ce régime d'autorisation. De manière générale, l'exploitation et la remise en état des carrières impose d'en maîtriser les impacts : risque de pollution des eaux, bruit, poussières, impacts sur la faune et la flore, impact visuel (« esthétique »), notamment par la mise en œuvre de techniques « propres ».

Le régime de simple déclaration, qui concerne les activités les moins dangereuses et les moins polluantes, ne nécessite qu'une déclaration en préfecture et le respect de prescriptions nationales standards (« arrêtés-type »).

La nomenclature des installations classées

Le classement ICPE octroie à l'État le droit d'autoriser ou non les activités, de les réglementer, de les contrôler et de les sanctionner en cas de manquements, par le biais du corps des inspecteurs des installations classées, placés sous l'autorité du Préfet. Les installations, qu'elles soient industrielles ou agricoles, sont classées au moyen d'un référentiel national appelé « nomenclature des installations classées ». Cette nomenclature définit le régime de classement d'une installation et son statut vis-à-vis des réglementations européennes dites « IED » sur les émissions industrielles et « Seveso » sur la prévention des accidents majeurs (les statuts Seveso « seuil haut » et « seuil bas » correspondant schématiquement aux ICPE soumises aux régimes les plus contraignants, respectivement « autorisation avec servitude d'utilité publique » et « autorisation simple »). La nomenclature s'organise en « rubriques », qui permettent de classer une installation à la fois en fonction de son activité et en fonction des substances dangereuses qu'elle stocke, utilise ou produit. Une même installation peut relever de plusieurs rubriques. Les activités extractives sont principalement concernées par les rubriques 2510 (exploitation de carrière ou autre extraction de matériaux), 2515 et 2540, 2546 et 3210 (traitement de minerais, minéraux et résidus).

Le régime de déclaration est applicable uniquement aux carrières, exploitant « marne, craie ou tout matériau destiné au marnage des sols, d'arène granitique, à ciel ouvert et sans but commercial » ou « pierre, sable et argile destinés à des travaux de restauration de monuments et bâtiments historiques ». Ces carrières sont limitées en taille et volume et doivent être suffisamment éloignées de toute autre carrière.

UNE VOLONTÉ DE RAPPROCHER LE RÉGIME MINIER DU RÉGIME « COMMUN » DES ACTIVITÉS ÉCONOMIQUES À RISQUE

La réglementation minière faisait jusqu'à présent figure de régime d'exception : il s'agit aujourd'hui de rapprocher ce cadre de celui régissant les autres activités à risque. Cela se traduit par la mise en cohérence du Code minier avec les exigences environnementales portées par le Code de l'environnement et, pour la sécurité des travailleurs, par l'harmonisation des règles de l'industrie extractive avec celles du Code du travail.

Démarrée en 2010, la refonte du Code minier entend répondre aux besoins nouveaux (construction durable, transports propres, énergies renouvelables, économie circulaire...) et aux attentes sociétales fortes en termes de justice environnementale. Elle est guidée par deux grands principes : améliorer l'information et la participation du public et intégrer davantage la problématique de protection de l'environnement par une évaluation environnementale renforcée¹¹. Ces principes ont été actés dans la loi dite « Climat et Résilience », qui modifie le Code minier et le Code de l'environnement, en permettant au gouvernement de légiférer par ordonnances pour introduire toute modification complémentaire en matière de droit minier (dans un délai de 18 mois). Cinq ordonnances ont ainsi été publiées en 2022 (ordonnance 2022-534 à 2022-537 du 13 avril) (ordonnance 2022-1423 du 10 novembre).

Les dispositions relatives à la santé et la sécurité au travail dans les mines et carrières étaient définies par une réglementation spécifique, le Règlement général de l'industrie extractive (RGIE). La loi 2009-526 du 12 mai 2009 de simplification et de clarification du droit et d'allègement des procédures a officialisé la disparition progressive du RGIE, en rendant applicable dans les mines et carrières les dispositions relatives à la santé et la sécurité au travail du Code du travail. Seules les dispositions spécifiques du RGIE, sans équivalents dans le Code du travail, resteront applicables en tant que compléments ou adaptations d'autres dispositions générales en santé et sécurité au travail. Dans le cadre de ce processus, l'Ineris alimente depuis octobre 2013 le portail SSTIE¹², pour apporter une information à jour sur l'état d'avancement de cette mise en cohérence réglementaire.

Note 11. Voir Gay, A. « Révision du RGIE : actualités depuis 3 ans et stratégie de poursuite ». Mines et Carrières n°277, février 2020 : <https://fr.calameo.com/read/005252878015368ac3P4>

Note 12. Voir <https://sstie.ineris.fr/>

FOCUS SUR...

L'exploitation minière active en France

Parmi les substances non énergétiques (sel, métaux, métaux précieux, terres rares), la France métropolitaine dénombre aujourd'hui 22 titres miniers valides (20 concessions et 2 permis exclusifs de recherche) et 6 titres miniers en cours de modification¹³. Sur la dizaine de permis de recherche délivrés depuis 2012, seuls 3 sont encore valides et aucun n'a donné lieu à une concession (8 dossiers de demandes de permis de recherche sont en cours d'instruction dans les services de l'État).

L'exploitation minière active en métropole concerne principalement d'anciennes mines dont l'exploitation se poursuit; elles portent principalement sur le sel, une mine de calcaires bitumineux dans l'Ain et deux mines de bauxite (utilisée pour des applications cimentières essentiellement) dans l'Hérault. Une carrière dans l'Allier, disposant d'une autorisation spéciale, produit un peu de tantal, du niobium et de l'étain. Enfin, une dizaine de demandes de permis de recherche sont en cours d'instruction, dont les plus récentes déposées mi-2019 portent sur le lithium dans le Bas-Rhin.

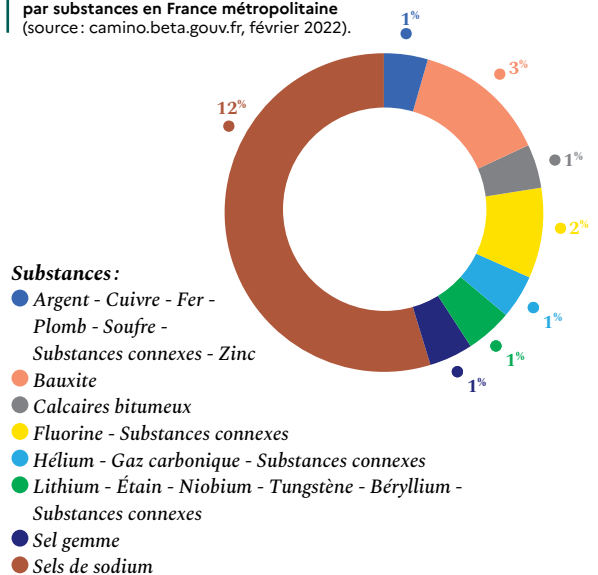
L'exploitation du sel en France métropolitaine

Le sel minier, par opposition au sel marin (exploité en marais salants), est extrait de gisements souterrains formés de couches de sel fossile. Les principaux gisements français de sel gemme se concentrent sur un axe Rhin-Rhône (Alsace, Lorraine, Bresse, Drôme, Provence) et le long des Pyrénées (Midi-Pyrénées et Aquitaine) correspondant aux bassins salifères formés au Trias (ère secondaire) ou à l'Oligocène (ère tertiaire). On recense un cas d'exploitation par extraction mécanique (méthode dite des "chambres et piliers abandonnés"), la mine de Varangéville (Lorraine). Le sel extrait mécaniquement est quasi exclusivement destiné au salage des voiries. L'exploitation par dissolution est de loin la plus utilisée. La saumure extraite par dissolution est le plus souvent valorisée comme matière première de l'industrie chimique (production de carbonate ou bicarbonate de sodium, de chlore et de soude). La quinzaine d'exploitations connue produit chaque année près de 4 millions de tonnes de sel.

L'exploitation outre-mer

En Outre-mer, l'activité minière reste soutenue en Guyane et en Nouvelle-Calédonie. En Guyane, l'activité aurifère légale est notable, avec une production de l'ordre de 1 à 1,5 tonne par an. Deux grands types d'exploitation minière existent actuellement en Guyane: l'exploitation d'or primaire en subsurface (filons de quartz aurifère dans la partie altérée - saprolite - du socle géologique) et l'exploitation d'or alluvionnaire en surface (altération et érosion des filons primaires, puis transport et dépôt de l'or dans les rivières sous la forme de placers). On recense une soixantaine de sites en exploitation répartis sur environ 90 titres miniers valides. Une trentaine de titres miniers d'or sont en cours d'instruction. En Nouvelle-Calédonie, les activités minières relèvent des autorités locales et sont gérées par un Code minier néo-calédonien adopté en 2009¹⁴. Avec 12 millions de tonnes de réserves de nickel, l'archipel se situe au deuxième rang mondial derrière l'Australie (20 millions de tonnes). Le nickel, et le cobalt qui lui est lié, y sont exploités, principalement à ciel ouvert. Le cadastre minier néo-calédonien compte au début de l'année 2020, 1510 titres miniers (1494 concessions, 14 permis de recherche, 2 réserves techniques provinciales), couvrant quasiment 250 000 hectares.

FIGURE 11
Répartition des titres miniers valides (minerais, hors hydrocarbures) par substances en France métropolitaine (source: camino.beta.gouv.fr, février 2022).



Note 13. Source: <https://camino.beta.gouv.fr> (février 2022). Le panorama « minier » actuel français en métropole comprend également 74 titres miniers valides pour hydrocarbures liquides ou gazeux (une grande partie de ces titres n'est plus associée à des exploitations actives), 15 titres miniers valides pour géothermie, 8 titres miniers valides pour éléments radioactifs et 21 titres valides pour granulats marins.

Note 14. Voir <https://dimenc.gouv.nc/mines-et-carrieres/le-secteur-minier>

Les risques liés à la post-exploitation

Le déclin des activités minières a suscité des travaux méthodologiques importants pour l'évaluation des phénomènes dangereux et des risques associés à l'après-mine, qui peuvent bénéficier aux autres enjeux de post-exploitation (arrêt des hydrocarbures, carrières abandonnées) et d'utilisation du sous-sol (géothermie, stockage).

La cessation de l'activité minière en France n'a pas pour autant induit la disparition des phénomènes (mouvements de terrain, émissions de gaz du sol...) susceptibles d'affecter les territoires situés dans l'emprise des anciennes exploitations. Durant la période qui suit l'exploitation, dite d'« après-mine », de nombreux désordres peuvent se développer, dès l'arrêt des travaux mais aussi beaucoup plus tardivement. Les affaissements miniers, survenus dans les années 1990 dans le bassin ferrifère lorrain (Auboué 1996, Moutiers 1997, Moyeuve-Grande 1998, Roncourt 1999), longtemps après l'arrêt définitif des travaux d'extraction, ont conduit à une prise de conscience des problèmes, potentiellement graves, liés à la phase de post-exploitation des exploitations minières¹⁵. L'activité minière a par ailleurs pu générer des impacts sur les compartiments environnementaux (air, eau, sols...), pouvant être à l'origine d'enjeux sanitaires pour les populations.

Si les risques liés à l'après-mine ont largement mobilisé l'attention ces trente dernières années, d'autres formes d'exploitation du sous-sol voient leur activité progressivement s'arrêter et soulever des questions quant aux risques que les ouvrages, laissés en place, sont susceptibles de générer à long terme. C'est le cas de l'exploitation pétrolière qui, en France, a laissé derrière elle des milliers de puits, parfois anciens (plus d'un siècle), dont l'intégrité à long terme n'est pas assurée, comme le montrent les nombreux cas de fuites observés sur d'anciens puits d'hydrocarbures en Amérique du Nord. L'arrêt programmé de l'ensemble des puits d'hydrocarbures en France d'ici 2040 ouvre un champ d'études et de recherches sur les mécanismes à l'origine de ces fuites, l'évaluation des risques occasionnés et les méthodes de gestion les plus adaptées. Les stockages souterrains d'hydrocarbures, quant à eux, sont pour une grande majorité encore en activité : en matière de risques, des questions se posent sur le devenir de leurs ouvrages à long terme¹⁶.

LES PREMIERS TRAVAUX SUR LES RISQUES

Du point de vue des phénomènes redoutés, c'est dans un premier temps la famille des « mouvements de terrain » qui a fait l'objet d'études et analyses spécifiques, notamment sur le bassin ferrifère lorrain ou le bassin houiller stéphanois. La constitution d'importants vides résiduels en souterrain, de fronts rocheux de grandes dimensions en surface ou de volumineux dépôts de résidus d'exploitation peut engendrer des déplacements, plus ou moins brutaux, du sol ou du sous-sol. Ces mouvements sont susceptibles de mettre en péril la sécurité des personnes ou d'induire des dommages sur les constructions et les infrastructures. Ce type de phénomène « gravitaire » (*i.e.* lié à l'attraction terrestre) se propage soit du bas vers le haut (effondrement de vide souterrain), soit du haut vers le bas (éboulements, glissements ou écroulements de fronts rocheux ou de dépôts). Il présente des caractéristiques diverses, tant en termes de surface impactée (phénomène localisé ou étendu) que de soudaineté/cinétique (phénomène brutal ou progressif). Selon la vitesse de déplacement, on observe des mouvements lents (affaissements, tassements, glissements), qui entraînent une déformation progressive des terrains, pas toujours perceptible par l'Homme. Les mouvements rapides (effondrements, chutes de pierres et de blocs, éboulements, coulées boueuses) se propagent quant à eux de manière brutale et soudaine. Un mouvement lent peut par ailleurs être précurseur d'un mouvement rapide.

D'autres phénomènes ont ensuite fait l'objet de travaux méthodologiques pour en maîtriser les risques associés. L'activité minière a pu contribuer à perturber les conditions de circulation des eaux souterraines ou de surface, ainsi que le montre l'exemple du bassin houiller lorrain. L'arrêt de l'exploitation minière s'accompagne de celui du pompage des eaux souterraines (« exhaure ») qui a permis la conduite des chantiers en profondeur ; plus largement dans le bassin minier, il conduit à une baisse des consommations d'eau de la part des industries et de la collectivité. Dès lors, il s'ensuit une remontée de la nappe d'eau souterraine qui retrouve progressivement un niveau d'équilibre, remplissant ainsi, intégralement ou pour partie, les vides miniers créés (« ennoyage »), et pouvant rejoindre, en surface, le réseau hydrographique ou les points bas topographiques créés par l'exploitation minière. Ces perturbations peuvent provoquer une augmentation ou une réduction du débit des sources ou des cours d'eau ; des remontées de nappes en surface avec apparition de zones détrempees et de marécages ; des phénomènes d'inondations plus ou moins violents. Après l'arrêt de l'exploitation minière, les vides souterrains non ennoyés peuvent constituer un réservoir plus

ou moins confiné, dans lequel les gaz (qui sont dilués ou évacués par ventilation lors de l'exploitation) peuvent s'accumuler à des concentrations élevées et, en remontant à la surface, devenir potentiellement dangereux : intoxication, asphyxie, inflammation, explosion. Le gaz de mine est généralement un mélange de gaz d'origines diverses, à des teneurs variables. Certains gaz sont contenus dans le gisement avant l'exploitation : méthane (CH₄), dioxyde de carbone (CO₂), radon, etc. D'autres sont produits à partir d'une transformation chimique du gisement ou de certains éléments de la mine, pendant ou après l'exploitation : monoxyde de carbone (CO), sulfure d'hydrogène (H₂S), etc. Sous l'effet de différents mécanismes, le gaz de mine peut être acheminé vers la surface au travers de drains naturels (failles, fractures, fissures...) ou artificiels (puits, galeries...). L'exploitation minière peut également avoir généré des drains (fissures, crevasses, terrains « déconsolidés » ...) mettant en liaison des formations souterraines émettrices de gaz et la surface. C'est par exemple le cas dans le bassin houiller du Nord-Pas-de-Calais.

Certains dépôts miniers contiennent des matériaux combustibles et d'autres matières oxydables comme les sulfures de fer (pyrite), qui peuvent entrer en combustion. La combustion d'un terril peut se propager lentement de la surface vers la profondeur, sur plusieurs décennies¹⁸, comme en témoignent certains terrils du bassin houiller stéphanois¹⁷. Enfin, une situation couramment rencontrée

dans le contexte post-minier est le cas de personnes pénétrant dans des ouvrages qui ne sont plus entretenus mais accessibles, s'exposant ainsi à des dommages corporels (chute de blocs...).

LE RISQUE ENVIRONNEMENTAL ET SANITAIRE

Au droit de zones de gisements « métalliques », les gammes de teneurs en métaux et métalloïdes dans les sols sont généralement plus élevées que celles couramment rencontrées sur le territoire national (on parle dans ce cas d'« anomalie géochimique »). Ce contexte géologique a ainsi favorisé le développement de l'activité minière, qui a pu générer des impacts sur l'environnement.

Les travaux d'extraction et d'exploitation, le transport du minerai, le stockage des stériles d'exploitation, le stockage des stériles et des résidus de traitement représentent un ensemble d'activités qui ont pu être à l'origine d'une pollution des milieux environnementaux.

Note 15 - Voir les travaux de l'Ineris « Guide Évaluation des aléas miniers » <https://www.ineris.fr/fr/guide-evaluation-aleas-miniers> et le document Ineris-Cerema-Geoderis « Guide de gestion du risque minier post-exploitation » : <https://www.ineris.fr/fr/guide-gestion-risque-minier-post-exploitation>.

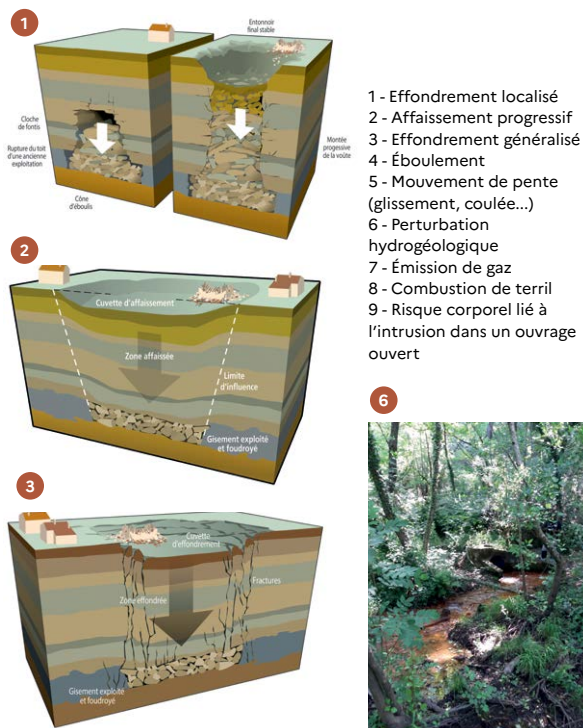
Note 16 - Voir les travaux de l'Ineris : « Synthèse de l'état des connaissances et des pratiques en matière d'abandon des stockages souterrains » <https://www.ineris.fr/fr/synthese-etat-connaissances-pratiques-matiere-abandon-stockages-souterrains> et « L'abandon des cavités de stockage lessivées dans le sel : stratégies envisagées pour la fermeture des cavités et la maîtrise des aléas à long terme » : <https://www.ineris.fr/fr/abandon-cavites-stockage-lessives-sel-strategies-envisagees-fermeture-cavites-maitrise-aleas-long>.

Note 17 - Voir Y. Paquette, J. Laversanne « Guide du détenteur de terrils et autres dépôts miniers issus de l'activité charbonnière (verse, bassins de décantation, dépôts de cendres) », Les fascicules de l'Industrie Minière, 2003.

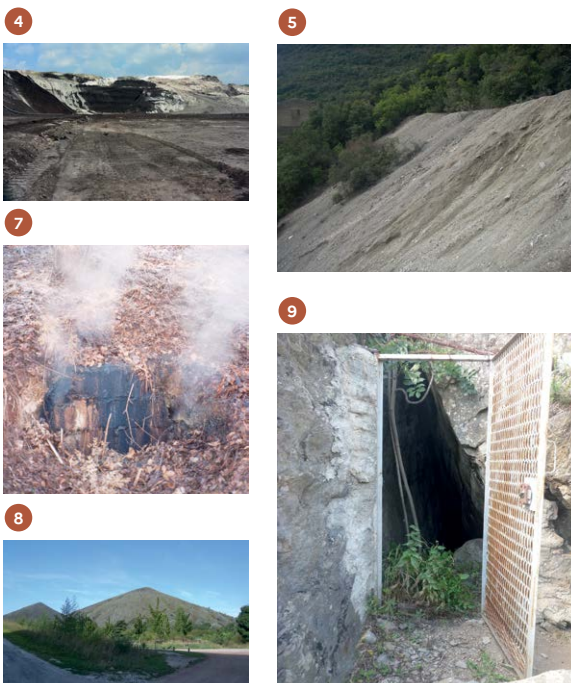
FIGURE 12

Les phénomènes redoutés de l'après-mine.

Ai. disponible sur Adobe Stock



- 1 - Effondrement localisé
- 2 - Affaissement progressif
- 3 - Effondrement généralisé
- 4 - Éboulement
- 5 - Mouvement de pente (glissement, coulée...)
- 6 - Perturbation hydrogéologique
- 7 - Émission de gaz
- 8 - Combustion de terril
- 9 - Risque corporel lié à l'intrusion dans un ouvrage ouvert



Les eaux de débordement d'ouvrages miniers ennoyés, les eaux de lessivage des dépôts de minerai, de stériles ou de déchets de laverie, ou encore les eaux de percolation dans les anciens travaux, les poussières chargées en particules métalliques issues des sols transportées sous l'influence des vents ont pu également constituer des vecteurs de la pollution vers les milieux naturels. L'impact des anciennes activités minières peut ainsi concerner des territoires éloignés des anciens sites miniers. Concernant les mines polymétalliques, les métaux et métalloïdes associés à la paragenèse minérale (association des minéraux de la roche exploitée) constituent les principales substances polluantes susceptibles d'avoir contaminé les compartiments environnementaux.

Outre les impacts environnementaux générés par l'activité minière, les substances chimiques associées, par leur toxicité¹⁸ potentielle, sont également susceptibles d'induire des effets sanitaires chez les personnes qui y sont exposées.

LES DÉFIS DE L'APRÈS-MINE APPARUS CES 20 DERNIÈRES ANNÉES

De manière concomitante à la formation de cuvettes d'affaissement, l'exploitation minière peut s'accompagner, dans des cas particuliers, de la création de crevasses dans le recouvrement. Certaines crevasses apparaissent en surface plusieurs années après l'arrêt d'une exploitation. Les crevasses se présentent sous la forme de fissures ouvertes sur plusieurs centimètres, et pouvant s'étendre sur plusieurs mètres. Leur profondeur réelle ne correspond pas à ce qui est visible, et n'est généralement pas connue. Les crevasses sont susceptibles de mettre en relation des horizons géologiques propices à des réactions chimiques avec la surface. Ces réactions chimiques peuvent modifier

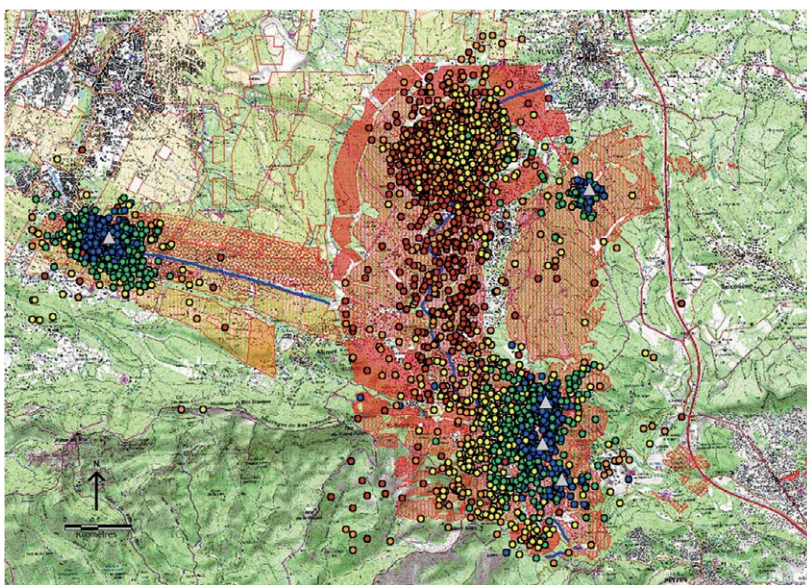
la composition de l'atmosphère dans des espaces confinés proches de la surface (caves). C'est par exemple le cas sur le site de Cocheren, dans le bassin houiller lorrain. La réaction d'oxydation de la pyrite contenue dans les terrains, suivie par une attaque acide des carbonates, est à l'origine des atmosphères enrichies en CO₂ et appauvries en O₂ se manifestant en surface, via le vecteur des crevasses.

Une activité sismique peut se produire lorsque l'exploitation du sous-sol par l'Homme perturbe l'équilibre des contraintes naturelles subies par les roches. La sismicité anthropique liée aux travaux miniers peut perdurer longtemps après l'arrêt de l'exploitation. En effet, la fermeture des mines peut conduire à l'abandon d'ouvrages souterrains et de vides miniers importants, susceptibles d'instabilités avec le temps. Selon les conditions géologiques, l'ennoyage progressif des vides souterrains peut s'accompagner de la subsidence ou de l'effondrement des terrains sus-jacents, ou de leur surrection, et ainsi générer potentiellement de la sismicité.

Dans ce contexte, la région de Gardanne (Bouches-du-Rhône) constitue un objet d'étude pour lequel l'Ineris cherche à identifier les mécanismes en œuvre localement dans cette ancienne région minière. L'exploitation s'est arrêtée en 2003 et les vides ont été progressivement ennoyés. Grâce au réseau de surveillance microsismique, plus de 2000 événements sismiques ont été détectés depuis 2008, localisés principalement au niveau du front d'ennoyage. Plusieurs pics ont été enregistrés en 2012, 2014 et 2017, avec de nombreux événements ressentis par la population. La sismicité semble être en lien avec les fluctuations saisonnières de la nappe, les travaux miniers ayant modifié de manière significative le système hydrogéologique naturel.

FIGURE 13

Sismicité post-minière enregistrée dans l'ancien bassin houiller de Gardanne entre 2008 et 2015.



Note 18. Propriété intrinsèque d'une substance susceptible de provoquer des effets biologiques néfastes à un organisme qui y est exposé (source : Organisation mondiale de la santé).

FOCUS SUR...

L'après-mine ailleurs en Europe

Bien que l'Union européenne reste le troisième producteur mondial de minéraux industriels (avec une centaine de mines en activité), deux situations coexistent.

Certains pays sont encore massivement tournés vers l'exploitation minière (Finlande, Suède, Pologne, Bulgarie et, dans une moindre mesure, Espagne et Irlande); d'autres, de plus en plus nombreux, sont déjà dans une phase de fermeture des mines et de gestion post-minière (Allemagne, Belgique, Croatie, Danemark, France, Italie, Luxembourg, Pays-Bas, Slovaquie, Tchéquie).

Cependant, la majorité des pays a mis en place des politiques et une législation nationale qui prévoient la fermeture complète des mines. Il semble que seules la France et l'Allemagne se soient dotées d'une organisation spécialement dédiée au traitement opérationnel des séquelles post-minières.

Les impacts et nuisances liés à l'exploitation post-minière sont globalement comparables d'un pays à l'autre et d'un type de mine à l'autre. Un premier enjeu concerne l'eau et les milieux aquatiques, avec des perturbations qualitatives (pollution) et/ou quantitatives (perturbation du débit, remontée de nappe...) liées aux rejets d'eaux de mine ou au lessivage des déblais miniers et des résidus de traitement stockés en surface.

Cela impacte les eaux superficielles et souterraines. Les autres compartiments de la biosphère les plus affectés sont les sols et la biodiversité (faune, flore, paysage).

Les conséquences environnementales de la post-exploitation minière sur les eaux, les sols et les écosystèmes sont les questions les plus étudiées dans la plupart des pays d'Europe. Les mouvements de terrain restent un deuxième enjeu fort : il s'agit d'affaissements, d'effondrements, d'instabilités de pente, plus rarement de soulèvements ou de séismes induits.

La spécificité du mode d'exploitation ou du contexte géologique de certains pays induit des risques méconnus en France. Dans certaines zones houillères de Pologne, de Russie ou d'Allemagne, la présence

de radium, qui passe facilement en phase liquide (contrairement à l'uranium et au thorium), pose problème, en induisant des risques pour la santé, associés aux rayonnements ionisants. Les eaux de mine fortement minéralisées précipitent et forment alors des sédiments contenant des radionucléides, dont la teneur dépasse le seuil naturel, de plusieurs ordres de grandeur.

Dans certains bassins de décantation de résidus miniers, des quantités importantes de radium se sont accumulées : ces dépôts peuvent représenter un danger pour l'Homme et la faune, si le ruissellement et l'érosion transportent les sédiments vers les terres et les cours d'eau environnants.

Certains pays miniers à forte densité de travaux peu profonds et d'ouvrages débouchant au jour rencontrent des contraintes spécifiques. C'est le cas de la Belgique où l'exploitation houillère a été très active à ses débuts, avec de nombreuses concessions cantonnées à la surface, au plus près des affleurements.

Plus d'une dizaine de milliers de puits de mines ont ainsi été dénombrés sur le territoire wallon, le plus souvent à l'occasion d'un effondrement, car leur existence est généralement ignorée.

Certains territoires rencontrent enfin des difficultés dans la gestion de l'eau liées à l'abandon des exhaures minières. On observe de nombreux exemples de « démergement » (évacuation des eaux) au sein du bassin houiller wallon, en Belgique, ou de celui de la Ruhr, en Allemagne, où il a fallu notamment entreprendre d'importants travaux de reprofilage des cours d'eau.

L'ÉVALUATION DES RISQUES « APRÈS-MINE »

Un enjeu majeur de la maîtrise des risques liés à l'après-mine réside dans sa temporalité particulière : la plupart des phénomènes redoutés se développent sur la longue durée, à l'échelle de plusieurs années, voire de décennies. Cela met en relief avec acuité la question des conséquences de la fin de la responsabilité de l'exploitant. Il en résulte ainsi l'absolue nécessité de conserver la mémoire des ouvrages exploités et d'en assurer le suivi dans le temps. Ces aspects justifient d'autant l'intervention de l'État, au travers d'une organisation dédiée. C'est à la fin des années 1990, après une série de mouvements de terrains inattendus qui ont détruit plusieurs dizaines d'habitations dans le sud du bassin ferrifère de la Lorraine, qu'il a été décidé d'établir un dispositif permettant la gestion durable des conséquences de l'activité minière (loi du 30 mars 1999). L'État a donc mis en place un ensemble d'outils pour assurer cette gestion des risques de l'après-mine, avec pour objectifs d'anticiper le risque, le prévenir et enfin réparer les dommages résultant de l'exploitation minière.

Les acteurs de la gestion de l'après-mine en France

La gestion des risques miniers résiduels est pilotée par le ministère en charge de l'environnement et ses services déconcentrés (DREAL, DEAL, DRIEAT). En matière d'évaluation des impacts et des risques associés sur le territoire, l'État s'appuie par ailleurs sur un pôle d'expertise nationale de l'après-mine, constitué par le groupement d'intérêt public GEODERIS, qui associe des compétences de l'Ineris et du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM). Enfin, par délégation de l'État, le Département prévention et sécurité minière (DPSM) du BRGM assure une mission opérationnelle de gestion des installations et sites concernés : mise en sécurité de sites miniers, surveillance d'ouvrages de sites miniers, gestion des archives techniques minières.

La grande majorité des phénomènes redoutés font l'objet d'une « étude d'aléa ». L'aléa, composant essentiel de l'évaluation de risque, est caractérisé par l'intensité prévisible d'un phénomène, associée à sa probabilité d'occurrence. La complexité des mécanismes du sous-sol, la nature hétérogène du milieu naturel, le caractère très partiel des informations disponibles et le fait que de nombreux désordres ne soient pas répétitifs expliquent qu'il est souvent impossible de déployer une approche « probabiliste » comme on le fait généralement en sécurité industrielle. On privilégie une classification qualitative caractérisant la prédisposition d'un site à être affecté par tel ou tel type de phénomène. Les recherches effectuées pour évaluer les aléas sur les zones d'emprise d'anciennes exploitations

L'aléa le plus courant : le fontis

La réalisation des cartes d'aléas « mouvements de terrain », liés à la présence d'anciens travaux miniers, montre que le phénomène majoritairement attendu est l'effondrement localisé ou « fontis ». Le fontis correspond à l'apparition soudaine en surface d'un cratère dont l'extension horizontale varie généralement de quelques mètres à quelques dizaines de mètres de diamètre. L'aléa de niveau « faible » ou « moyen » associé au fontis recouvre des configurations diverses, en particulier en termes d'intensité (représentée par le diamètre de l'effondrement). Ces configurations induisent des dispositions constructives spécifiques dans les zones susceptibles d'être affectées par des fontis de diamètre limité (< 5 m). L'analyse d'une base de données recensant plus de 1800 fontis¹⁹ a montré que 90 % des effondrements miniers ont un diamètre inférieur à 10 m. Les effondrements de très grand diamètre sont donc exceptionnels et correspondent à des contextes miniers très spécifiques. Plus d'un tiers des effondrements ont un diamètre strictement inférieur à 3 m et près des deux tiers ont un diamètre inférieur à 5 m. Au regard des préconisations²⁰ du Comité scientifique et technique du bâtiment (CSTB), des solutions constructives sont donc très souvent envisageables dans la majorité des zones soumises à un aléa « effondrement localisé », sous réserve que la conception des bâtiments tienne compte de cet aléa. Aucun cas n'a par ailleurs été relevé d'effondrement localisé au droit de travaux miniers situés à plus de 50 m de profondeur. L'analyse ne permet toutefois pas d'identifier une éventuelle baisse de fréquence de l'apparition de fontis avec le temps.

minières se traduisent par la réalisation d'une carte des aléas, qui localise et hiérarchise les zones exposées à des phénomènes potentiels en surface. Les aléas sont classés selon plusieurs niveaux allant de « faible » à « fort ». La carte d'aléa²¹ n'intègre pas la nature de l'occupation de la surface ; elle transcrit, de manière objective, le potentiel de dangers ou de nuisances que l'ancienne exploitation minière est susceptible d'engendrer, à terme, dans le secteur d'étude. Des situations particulièrement complexes peuvent aboutir à la réalisation d'un Plan de prévention des risques miniers (PPRM).

Note 19 _ Voir le rapport de l'Ineris « Retour d'expérience sur les effondrements localisés miniers » : <https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/drs-15-149489-10509a-fina-unique-1446806603.pdf>

Note 20 _ Guide de dispositions constructives pour le bâti neuf situé en zone d'aléa de type fontis de niveau faible : https://www.hauts-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/2014_guide_de_dispositions_constructives_pour_le_bati_neuf_situe_en_zone_d_aléa_de_type_fontis_de_niveau_faible_cstb_2012-10-29.pdf

Note 21 _ Voir le Guide évaluation des aléas miniers : <https://www.ineris.fr/fr/guide-évaluation-aléas-miniers>.

FOCUS SUR...

Gestion de l'après-mine & enjeux de surveillance

Une fois l'aléa déterminé, il est mis en regard de la vulnérabilité des populations, des milieux naturels, des biens matériels qu'il pourrait atteindre (les « enjeux du territoire »). En fonction du niveau de risque qui en est déduit, les services de l'État déterminent les mesures les plus appropriées à mettre en œuvre : la surveillance ; le traitement de la zone (par exemple, comblement des vides, recouvrement pour supprimer les envois de particules métalliques, etc.) en fonction de critères techniques, économiques, environnementaux (notamment en cas de fermeture d'ouvrage) voire l'expropriation (en cas de menace grave pour les personnes).

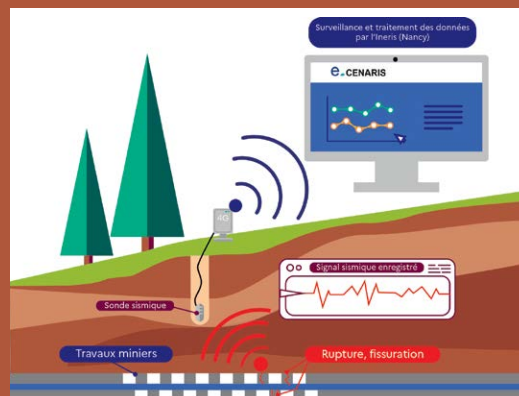
Traitement des vides souterrains et valorisation des terres excavées

Les terres excavées qui sortent du site dont elles sont extraites ont un statut de déchet²². Elles ont deux exutoires possibles : l'entreposage en installation de stockage de déchets non dangereux (ISDND), dangereux (ISDD) ou inertes (ISDI)²³ en fonction de leurs caractéristiques ; la valorisation au sein de projets d'aménagement notamment en vue du remblayage d'anciens sites d'exploitation du sous-sol. Pour faciliter cette valorisation, l'arrêté ministériel du 4 juin 2021 fixe des critères de sortie du statut de déchet²⁴.

Les risques d'affaissement et d'effondrements concernent des exploitations souterraines étendues. Les exploitations abandonnées sont, en outre, souvent inaccessibles (instabilités, atmosphère, ennoyage...). De ce fait, il est nécessaire de disposer de méthodes, déployées depuis la surface, capables de détecter sur de grands volumes de roche les ruptures fragiles, initiées au stade précoce dans les niveaux exploités, et se propageant ensuite dans le recouvrement. Deux objectifs sous-tendent la mise en œuvre de tout système de surveillance : l'aptitude à détecter des signes précurseurs du phénomène redouté, essentielle pour disposer d'un délai suffisant pour organiser l'évacuation ; la capacité à générer le moins de fausses alarmes possible.

FIGURE 14

La surveillance microsismique.



La surveillance microsismique répond à ces exigences. Elle peut s'exercer au moyen d'un nombre limité de stations en forage, depuis la surface. Il s'agit d'une technique passive non intrusive qui consiste à détecter et enregistrer les ondes émises lors de la fracturation et de la fissuration des massifs rocheux. Éprouvée depuis les années 1980 dans des contextes d'exploitations actives, la surveillance microsismique a fait l'objet d'une validation dans différents environnements géologiques avant d'être déployée pour surveiller les exploitations abandonnées : expérimentations *in situ* dans les mines de fer de Lorraine (détection, depuis la surface, des ruptures liées à l'effondrement et au foisonnement induits au toit de piliers torpillés) ; expérimentation *in situ* dans le bassin houiller de Provence.

Le suivi de l'activité microsismique par un réseau de surveillance local est pertinent pour détecter des signes précurseurs de l'affaissement ou l'effondrement d'ouvrages souterrains et de géostructures naturelles ou anthropiques : chutes de toit, fracturation de pilier, etc. Elle est particulièrement adaptée lorsque le phénomène d'instabilité est rapide sans être trop brutal, pour laisser le temps par exemple de restreindre l'accès à des travailleurs ou d'évacuer la population exposée.

Note 22_ L'article L. 541-1-1 du Code de l'environnement définit comme un déchet : « toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire ».

Note 23_ Voir le rapport de l'Ineris « Remblayage de carrières à ciel ouvert par des déchets inertes. Guide de bonnes pratiques sur les critères de stabilité des remblais » : <https://www.ineris.fr/fr/remblayage-carrieres-ciel-ouvert-dechets-inertes-guide-bonnes-pratiques-criteres-stabilite-remblais>

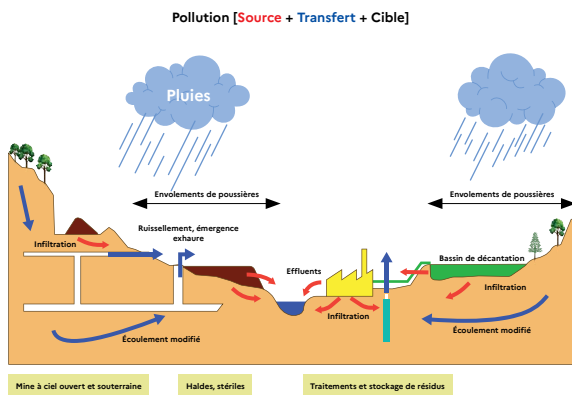
Note 24_ <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043704475>

L'ÉVALUATION DU RISQUE ENVIRONNEMENTAL ET SANITAIRE

La démarche d'évaluation de l'aléa, croisement d'une intensité et d'une probabilité, est inappropriée pour évaluer les impacts environnementaux et les risques sanitaires générés par la pollution des milieux attribuable à l'exploitation minière. À la différence du risque accidentel, les méthodologies d'évaluation du risque dit « chronique » (caractérisant des phénomènes lents, durables et très souvent d'intensité faible) s'appuient sur les concepts de danger et d'exposition. Il s'agit donc d'identifier les sources de pollution, de caractériser leurs modes de transfert dans les milieux et d'analyser les cibles potentiellement exposées. Un inventaire des dépôts miniers a été établi par GEODERIS entre 2009 et 2012 (hors exploitation de l'uranium²⁵), pour les sites fermés ou abandonnés, sur le territoire métropolitain, en application de la directive européenne 2006/21/CE sur la gestion des déchets de l'industrie extractive. À l'issue de cet inventaire, pour les déchets issus des mines « métalliques », les dépôts, regroupés en secteurs²⁶, ont été hiérarchisés selon des critères environnementaux et sanitaires.

FIGURE 15

Sources de pollution et voies de transfert de polluants en contexte minier.



La mise en œuvre d'études sanitaires et environnementales est requise lorsque les dépôts miniers ont été identifiés comme susceptibles de générer des risques pour la santé humaine. Ces études, basées sur la démarche d'Interprétation de l'état des milieux (IEM) issue de la méthodologie de gestion des sites et sols pollués, intègrent les spécificités des sites miniers, notamment en termes de géologie, d'hydrogéologie, de sources de pollution et de polluants associés, de comportement des polluants dans l'environnement minier. Ces études permettent d'évaluer l'impact des activités minières sur la qualité des milieux (sol, eau, air et végétaux), de déterminer si les usages constatés sont compatibles avec l'état des milieux et de proposer, le cas échéant, des actions de gestion pour rétablir la compatibilité

et réduire les expositions. Dans le cadre de ces études, la prise en compte de la bio-accessibilité orale²⁷ des métaux (cadmium, arsenic et plomb²⁸) peut permettre une meilleure évaluation des expositions par ingestion et des risques associés.

La prévention des risques sanitaires dans le contexte après-mine est complétée par une disposition de la loi ALUR du 26 mars 2014 qui introduit les Secteurs d'information sur les sols (SIS). Ceux-ci recensent les terrains où la pollution avérée des sols justifie (notamment en cas de changement d'usage) la réalisation d'études de sols et la mise en œuvre de mesures de gestion de la pollution pour préserver la sécurité, la santé ou la salubrité publique et l'environnement. Cette disposition contribue à la conservation de la mémoire à la fois des sources de pollution et des parcelles où les sols sont pollués, dans la perspective de projets d'aménagements.

L'expertise de l'Ineris sur l'après-mine

Dans le cadre de l'après-mine, l'Ineris apporte un appui méthodologique et scientifique pour l'évaluation des aléas et des risques : développement de méthodes et outils de surveillance alternative aux inspections de vides souterrains ; étude du comportement des réservoirs post-miniers (évolution des circulations d'eau et de gaz) ; élaboration de guides pour l'évaluation des aléas et la gestion du risque ; veille réglementaire et internationale ; étude des facteurs d'influence de la bio-accessibilité orale des sols. L'Ineris peut également accompagner les industriels dans l'établissement des études techniques inhérentes à la constitution de leur dossier d'arrêt, d'abandon ou de fermeture liés à la cessation de leur activité extractive.

L'APRÈS HYDROCARBURES : LES RISQUES LIÉS AUX ANCIENS Puits

Depuis l'émergence de l'industrie pétrolière au milieu du XIX^e siècle, on estime que plus de 4 millions de puits ont été forés dans le monde à des fins de recherche ou d'exploitation d'hydrocarbures. La majorité de ces puits ne sont aujourd'hui plus actifs. Ces dernières années, de nombreux cas de fuites ont été signalés sur d'anciens puits dans plusieurs pays du monde, notamment aux États-Unis et au Canada. Ces incidents ont soulevé la question de la pérennité de ces ouvrages et des risques que de telles fuites pourraient occasionner sur les personnes et sur l'environnement, mais aussi sur le climat, dans les années à venir. Les fuites d'hydrocarbures liquides peuvent provoquer la pollution des nappes d'eau souterraines, par le biais de



FIGURE 16

Puit abandonné (Amérique du Nord).

la mise en communication de différents horizons géologiques. Ce type d'incidents est d'ailleurs caractéristique de toutes les activités ayant recours à des forages souterrains (géothermie, stockage...). Le même phénomène de pollution peut se produire avec les fuites d'hydrocarbures gazeux, auquel s'ajoute un risque de rejet à l'atmosphère de gaz, ayant notamment des impacts climatiques. Les incidents signalés ont également révélé les difficultés que créent les questions de coût et de responsabilité juridique dans la remédiation de ces puits, dont beaucoup ont été délaissés (puits dits « orphelins ») et sont revenus dans le giron de l'État.

En France, le territoire compte plus de 12 000 puits d'hydrocarbures, hérités d'une histoire pétrolière qui prend son origine dès le XVIII^e siècle dans la région de Pechelbronn, en Alsace, et qui s'est étendue sous une forme plus industrielle à partir des années 1920, d'abord en Alsace puis dans le bassin de Paris et dans le sud-ouest de la France. Seuls 5% de ces puits, soit environ 600 puits, sont encore actifs aujourd'hui, dans l'attente de leur arrêt programmé pour 2040. Si très peu d'incidents sont à déplorer, les quelques fuites recensées, notamment à Cébazat (Puy-de-Dôme) en 2012 ou à l'Est de Paris dans les années 1990 (Chailly en 1991 et 1996), montrent que l'intégrité des puits peut être compromise et poser des enjeux de sécurité des personnes et des biens et de protection de l'environnement, y compris en France.

Dans ce contexte, l'Ineris a entrepris de procéder à une évaluation préliminaire des risques liés aux anciens puits d'hydrocarbures situés sur le territoire français. Cette étude consiste à établir une première hiérarchisation des puits selon les niveaux de risque qu'ils présentent vis-à-vis de plusieurs phénomènes : inflammation-explosion, émanation de gaz toxiques, contamination de nappes souterraines, mouvements de terrain. Le niveau de risque est qualifié, pour chaque puits et pour chaque phénomène, en fonction d'un ensemble de critères liés aux informations disponibles dans les bases de données nationales sur les puits (<http://www.minergies.fr/fr>), leur contexte géologique (<https://infoterre.brgm.fr/>), leur contexte hydrogéologique (<https://bdlisa.eaufrance.fr/>) et les enjeux présents en surface (<https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/corine-land-cover-2018>).

Note 25_ <https://www.legifrance.gouv.fr/iorfid/IOFTEXT000043704475>.

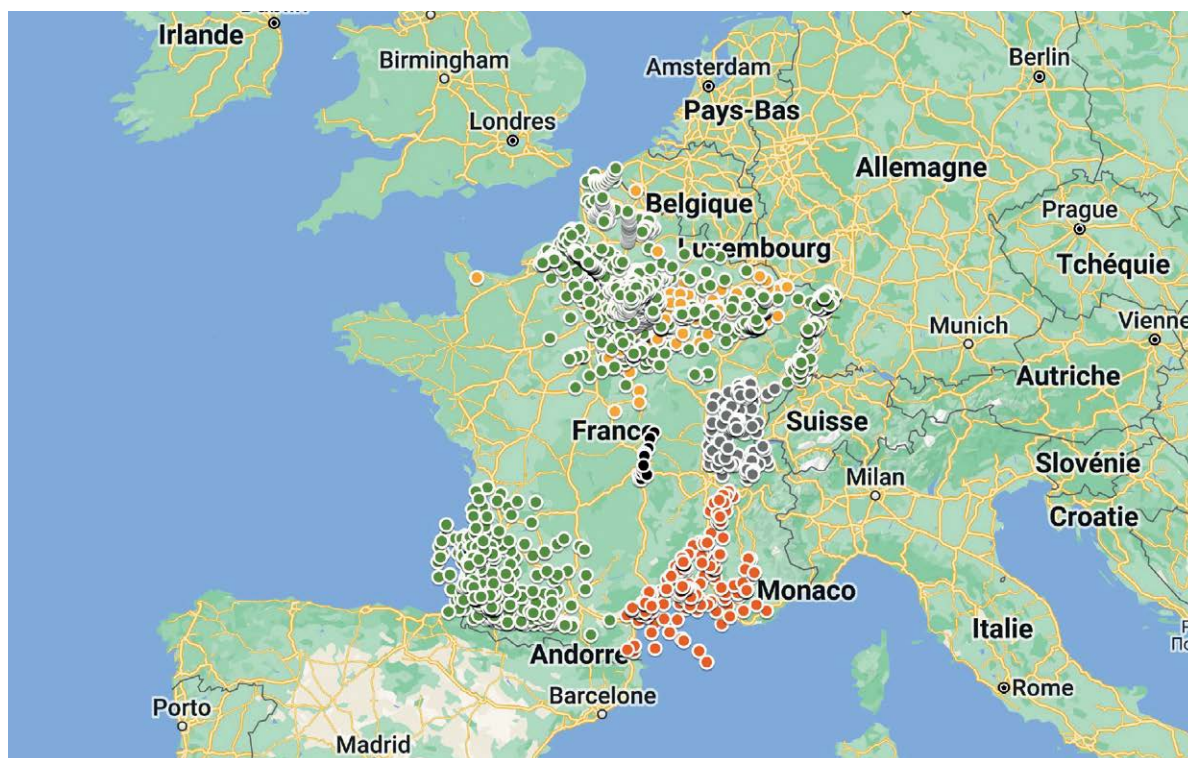
Note 26_ Secteur : regroupement de titres miniers (contenant des dépôts et ouvrages de retenues), élaboré notamment sur la base de critères géologiques, géologiques (i.e. en lien avec la connaissance des gisements), de substances exploitées et/ou produites et de proximité géographique.

Note 27_ Fraction libérée dans les sucs gastro-intestinaux humains et donc disponibles pour absorption (source : <https://ssp-infoterre.brgm.fr/fr/methodologie/methodologie-nationale-gestion-ssp>).

Note 28_ Seuls métaux actuellement documentés pour l'exposition par ingestion.

FIGURE 17

Situation des puits d'hydrocarbures en France métropolitaine.



Le retour d'expérience tiré des cas d'incidents documentés en France et à l'étranger a permis de tirer un certain nombre d'enseignements utiles à l'évaluation des risques. La mémoire des puits est souvent très parcellaire et ne donne pas d'informations sur l'état actuel des puits; ce déficit d'information rend délicat le travail d'évaluation des risques. L'emplacement des puits est parfois difficile à repérer sur le terrain et les méthodes de détection sont encore peu concluantes. Les pratiques de bouchage des puits sont très variables selon les régions et les époques et dépendantes de certains facteurs économiques, comme le prix du baril de pétrole. Les phénomènes induits par des défauts d'intégrité des puits sont généralement des remontées en surface de méthane, qui au-delà de leur caractère inflammable, peuvent avoir des conséquences globales importantes sur le climat. De nombreux cas de contamination d'aquifères sont également constatés à l'échelle du globe. Les causes les plus fréquentes de fuites sont des malfaçons dans le bouchage ou la cimentation du puits ou des processus d'altération chimique du puits (corrosion des aciers, altération chimique des ciments). Les chemins empruntés par les fuites peuvent être très complexes, rendant difficile la prévision du lieu et du débit de résurgence des fuites dans l'environnement et par voie de conséquence, leur surveillance. Le rebouchage d'un puits fuyard est extrêmement coûteux et n'est pas

garanti de succès. Dès lors, la stratégie de gestion la plus fréquente dans de nombreux pays est la simple dispersion dans l'atmosphère (« mise à l'évent ») ou le brûlage contrôlé des gaz (« torchage »).

Ces premiers éléments de retour d'expérience révèlent un besoin d'approfondissement de connaissances dans plusieurs domaines, à la fois techniques et scientifiques, travaux pour lesquels l'Ineris dispose de compétences: meilleure compréhension des mécanismes et de la cinétique de vieillissement des puits, meilleure compréhension des processus de transfert des fuites dans les milieux souterrains, amélioration des méthodes de repérage des puits et de détection des fuites, définition de stratégies de gestion adaptées en cas d'incidents.

FOCUS SUR...

Risques après-mine et carrières abandonnées : des points communs ?

Une grande partie des phénomènes redoutés dans le domaine de l'après-mine sont susceptibles de survenir dans le cas de carrières souterraines abandonnées, en particulier les phénomènes liés aux vides souterrains. En revanche, la maîtrise de ces risques ne s'est pas développée de la même façon et leur gestion n'est pas organisée comme l'est le cadre post-minier. La connaissance des risques post-exploitation dans ces contextes reste précieuse, au même titre que la connaissance de l'après-mine, pour accompagner le développement de nouveaux usages du sous-sol.

L'aléa principal reste constitué par les mouvements de terrain pouvant impacter les enjeux de surface. En fonction du mode de rupture initial des ouvrages souterrains lié à la configuration parfois complexe des cavités et à la nature des terrains de recouvrement (sol, remblais, roche), les désordres en surface peuvent prendre des formes très diverses (fontis, effondrements en masse, affaissements). Même si bon nombre de galeries ont pu longtemps être occupées et entretenues par des champignonnistes après la fin de l'extraction, les carrières, abandonnées de droit ou de fait, sont pour la majorité sans exploitant connu. La propriété de l'ouvrage souterrain et donc la responsabilité des dégradations reviennent en théorie au propriétaire de la surface, quel qu'il soit, même si l'on observe couramment des situations de démembrement de la propriété entre le sous-sol et la surface.

Historiquement, la connaissance des risques liés à ces carrières abandonnées était détenue par les services déconcentrés de l'État et localement, dans certains territoires très exposés (région parisienne, nord, gironde...), par des « services d'inspection des carrières ». La gestion de ce type de risque dépend maintenant des collectivités territoriales, qui se concentrent essentiellement sur les emprises relevant de leur compétence (routes, établissements scolaires...).

Toutefois, la question des carrières souterraines abandonnées est prise en compte dans le Plan national pour la prévention du risque d'effondrement de cavités souterraines (dit Plan National Cavité), instauré en 2013.

La connaissance de l'aléa doit être régulièrement entretenue et améliorée. En effet, la détection et la reconnaissance des galeries souterraines demandent à être développées: les emprises réelles de beaucoup d'anciennes carrières souterraines abandonnées ne sont plus vraiment connues, soit parce que les accès sont inaccessibles, soit parce que des zones entières ont été condamnées par des effondrements. D'autre part, les plans de ces carrières peuvent être faux, incomplets ou manquants. Il est donc important de pouvoir les recaler ou les lever avec précision, y compris dans les secteurs difficiles ou impossibles d'accès. Ce point reste primordial pour établir une cartographie du risque en surface, notamment dans les zones urbaines.

Les conditions de stabilité et le comportement des ouvrages dans le long terme sont encore peu analysés. Les diagnostics peuvent maintenant s'appuyer de plus en plus sur les techniques d'observation et d'auscultation pointues ainsi que sur des modélisations numériques performantes. Ces analyses permettent de préciser les mécanismes et phénomènes attendus, de mieux comprendre l'influence des facteurs aggravants, notamment l'influence de l'eau, et de proposer des modes de surveillance adaptés. La gestion des cavités est hétérogène: les mouvements de terrain et particulièrement les aléas liés aux cavités proches de la surface peuvent être supprimés ou réduits de façon efficace. Des solutions de valorisation de ces vides résiduels sont même temporairement envisageables. Les méthodes de mise en sécurité sont connues et bien maîtrisées techniquement, mais elles restent complexes et onéreuses à mettre en œuvre à l'échelle des particuliers.

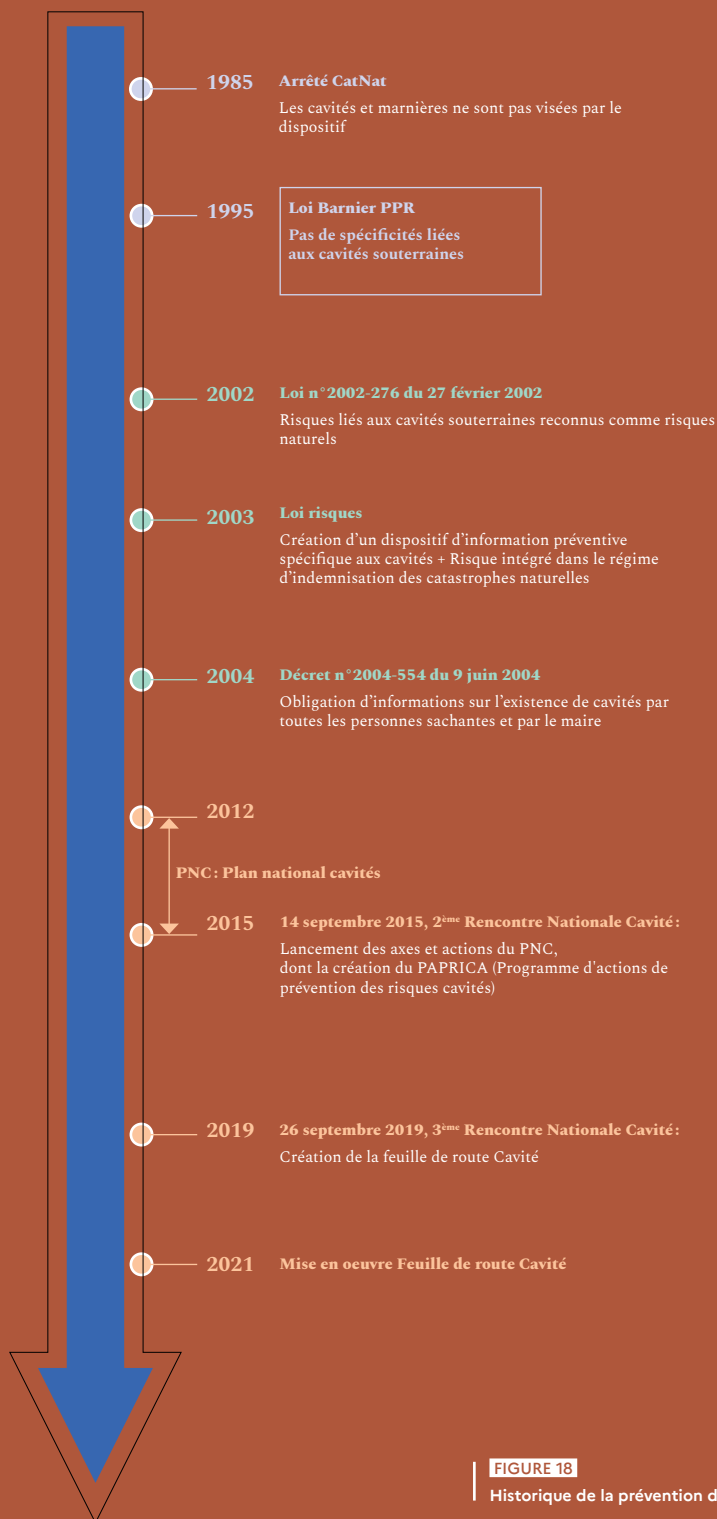


FIGURE 18

Historique de la prévention du risque « cavités ».

Opportunités et risques liés aux nouvelles exploitations ou usages du sous-sol

Réserve de ressources énergétiques et minérales, le sous-sol reste un levier du développement d'un pays et de la souveraineté d'un État : ses nouvelles formes d'exploitation et d'usage se cristallisent aujourd'hui autour des enjeux cruciaux de la transition énergétique.

Le sous-sol offre de nombreuses opportunités en termes de ressources et d'espaces valorisables, notamment pour répondre aux enjeux climatiques. Il n'en demeure pas moins que son exploitation ou son usage présente des risques et impacts potentiels, qu'il convient d'identifier, d'évaluer et de maîtriser. L'Ineris se donne pour ambition de jouer un rôle central, en appui aux pouvoirs publics et aux entreprises, pour assurer un développement sûr et maîtrisé de ces nouvelles activités.

L'observation et l'analyse des effets de la surexploitation des ressources naturelles se sont intensifiées ces dernières années : changement climatique, érosion de la biodiversité, utilisation de l'eau douce, changement de l'utilisation des sols...²⁹. Cette prise de conscience collective a conduit à l'accélération des transitions, numérique, écologique et énergétique. Ces transitions, si elles conduisent à renoncer à certaines ressources énergétiques du sous-sol, s'appuient très largement sur d'autres ressources minérales, pour la plupart des métaux, dont l'exploitation est à nouveau en débat.

La géothermie, en tant qu'énergie renouvelable, devrait également occuper une place croissante dans le mix énergétique. La reconversion potentielle d'anciens puits d'hydrocarbures en puits de géothermie pourrait, à ce titre, constituer une opportunité.

Le sous-sol peut également constituer, par l'étanchéité naturelle offerte par certaines formations géologiques,

un milieu propice au stockage de produits. Le milieu souterrain présente de nombreux atouts : grands volumes de stockage, éloignement des produits par rapport aux enjeux en surface, réduction de l'emprise au sol.

Le recours massif aux énergies renouvelables suscite un besoin de stocker dans le sous-sol de nouveaux vecteurs énergétiques (hydrogène, air comprimé, chaleur, énergie hydraulique). La stratégie bas carbone impulsée par la France pourrait favoriser la mise en place de solutions de captage et de stockage géologique du CO₂ issu des industries les plus émettrices.

Enfin, les nombreuses cavités et galeries laissées par les anciennes mines ou carrières souterraines constituent des espaces potentiellement disponibles pour de nouveaux usages : exutoires pour des déchets inertes, centres de données, archivage, entrepôts, etc.

L'EXPLOITATION DE MINÉRAIS STRATÉGIQUES POUR LA TRANSITION

Pour faire face à l'urgence climatique, toute nouvelle exploitation d'énergie fossile est interdite en France depuis 2017, à l'exception du gaz de mine (AMM). Le développement des nouvelles filières décarbonées, comme les énergies renouvelables, ne diminue pas pour autant la dépendance aux ressources du sous-sol. Pas moins de 62 éléments chimiques, pour la plupart issus de l'industrie minière, sont considérés comme essentiels au secteur de l'énergie.

La transition bas-carbone crée ainsi de nouveaux besoins en minerais stratégiques (silicium, lithium, platinoïdes, terres rares, etc.) ou traditionnels (cuivre, fer, aluminium).

Ces besoins croissants conduisent à un regain d'intérêt pour les ressources minérales du sous-sol³⁰ européen et français. Le stockage électrochimique de l'énergie (batteries) nécessite par exemple de grandes quantités de cuivre, nickel, cobalt et lithium (80 kg de cuivre pour un véhicule électrique contre 20 pour un véhicule thermique). Les technologies de l'éolien requièrent du cuivre et des terres rares ; les dispositifs photovoltaïques et solaires du silicium et du cadmium et la pile

Note 29. Voir le rapport sur l'environnement en France – Focus ressources naturelles, ministère de la Transition écologique, Commissariat général au développement durable, 2020 : <https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/economie/l-economie-circulaire-ressources/article/focus-ressources-naturelles>.

Note 30. Dès 2008, la Commission européenne a en effet estimé que le fait de garantir un accès fiable et sans distorsion à une quinzaine de matières premières qualifiées de « stratégiques » était un facteur essentiel pour la compétitivité de l'UE (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52013DC0442&from=EN>).

Note 31. <https://www.mineralinfo.fr/fr/actualite/actualite/actualisation-de-liste-des-substances-critiques-pour-lue>.

à combustible des platinoïdes. En 2020, l'Europe a identifié une trentaine de matières premières dites « critiques », au sens géologique (disponibilité de la ressource), économique (concentration de la production) et géostratégique (répartition des gisements) du terme, principalement pour le développement des technologies de l'énergie et du numérique³¹.

Ce n'est toutefois pas tant la question de l'épuisement des réserves géologiques qui se pose avec acuité que celle du coût économique et environnemental de leur extraction. Émissions polluantes dans les milieux (air, eau, sols), fortes quantités d'eau mobilisée, production importante de déchets... Le groupe international d'experts sur les ressources (GIER) a récemment pointé la nécessité de réformer la gouvernance de l'exploitation du sous-sol pour tenir compte de la gestion d'autres ressources naturelles et des droits des populations³².

La notion de mine responsable³³ qui entend répondre à ces enjeux sociaux et environnementaux implique ainsi d'anticiper et prévenir les impacts négatifs de l'activité sur l'ensemble de son cycle de vie, y compris la post-exploitation. La mobilisation des ressources du sous-sol pour la transition est aujourd'hui inséparable de la maîtrise des impacts et d'une gestion plus sobre, intégrant une conception circulaire de l'économie³⁴.

De fait, le nécessaire recours aux métaux pour la transition bas-carbone soulève des questions de souveraineté. En effet, l'Union européenne et la France en particulier sont fortement dépendantes des pays étrangers pour leur approvisionnement, dans un contexte où les tensions géopolitiques se sont aggravées, comme en témoigne le conflit russo-ukrainien.

L'Union européenne est par exemple tributaire à 100% de la Chine pour les terres rares, à 80% de l'Amérique du Sud pour le lithium et à 70% de l'Afrique pour le Cobalt. Sur le plan national, la dépendance de la France à des métaux stratégiques a ainsi conduit les pouvoirs publics à engager depuis quelques années une réflexion approfondie³⁵, et l'État à mettre en place des actions pour sécuriser ses filières d'approvisionnement³⁶. Dans cette perspective, un observatoire français des ressources minérales pour les filières industrielles (OFREMI), animé par le BRGM, a été lancé en novembre 2022. La place de l'approvisionnement local est naturellement au cœur de la réflexion.

La France dispose d'un potentiel pour certaines des ressources de la transition : fluorine, antimoine, germanium, tungstène, lithium (dans les roches dures), cobalt, niobium-tantale³⁷. À ce potentiel terrestre pourrait s'ajouter dans le futur les ressources profondes ultramarines, la France détenant le second plus grand espace maritime au monde³⁸.

Ressources minérales et énergie : quels enjeux pour demain ?

Des travaux de modélisation récents ont été réalisés sur la base des différents scénarios de la transition énergétique.

Ils montrent que la disponibilité des ressources minérales dans leur ensemble (et pas seulement celle des métaux rares) est préoccupante, notamment du fait de l'accroissement attendu de la demande d'ici la fin du siècle (nouvelles technologies, nouveaux acteurs mondiaux...).

Dans ce contexte, trois enjeux se révèlent particulièrement forts, dont il sera nécessaire de se saisir : la maîtrise du coût énergétique de la production ; le recyclage massif et efficace des ressources minérales ; la limitation des impacts environnementaux³⁹.

Note 32 <https://www.resourcepanel.org/reports/mineral-resource-governance-21st-century>.

Note 33 La « mine responsable » est une approche éthique développée par les opérateurs miniers. Ce concept largement utilisé, bien que ne disposant pas d'une définition de référence, a émergé au tournant des années 2000. Robert Goodland, ancien conseiller à la Banque Mondiale, en a défini 8 principes en 2012. L'IRMA (Initiative for Responsible Mining Assurance), créée en 2006, a publié un premier cadre normatif en 2014. Le concept a été introduit en France par la stratégie nationale de transition écologique vers un développement durable (SNTEDD) 2015-2020.

Note 34 Voir D'Hugues, P., Christmann, P., Didier, C. Mine responsable : est-ce possible ?, *Géoresources* n°26, juin 2022.

Note 35 Voir le rapport en 2019 du Conseil général de l'économie, de l'industrie et de l'énergie et des technologies (CGEJET) : https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cge/vulnerabilite-approvisionnement.pdf et l'avis du Conseil économique, social et environnemental (CESE) de la même année : https://www.lecese.fr/sites/default/files/pdf/Avis/2019/2019_03_métaux_strat%C3%A9giques.pdf Plus récemment, le rapport d'information du Sénat sur la souveraineté économique publié en juillet 2022 aborde la question de l'approvisionnement en minéraux stratégiques : <https://www.senat.fr/notice-rapport/2021/r21-755-notice.html>

Note 36 Sur la base du rapport remis par Philippe Varin en janvier 2022 sur la sécurisation de l'approvisionnement de l'industrie en matière premières minérales : <https://www.gouvernement.fr/actualite/l-etat-veut-securiser-l-approvisionnement-en-metiaux-strategiques>.

Note 37 Voir le rapport de l'académie des sciences et de l'académie des technologies publié en 2018 sur la stratégie d'utilisation des ressources du sous-sol pour la transition énergétique française : https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/rc_transition_energie_0718.pdf

Note 38 Voir le rapport de la mission d'information du Sénat sur « l'exploration, la protection et l'exploitation des fonds marins : quelle stratégie pour la France ? » publié en juin 2022 : <https://www.senat.fr/notice-rapport/2021/r21-724-notice.html>

Note 39 Voir notamment VIDAL, O. *Matières premières et énergies, les enjeux de demain*. ISTE Editions Ltd, 2018.

La valorisation du gaz de mine

Toute nouvelle exploitation du gaz de charbon est interdite en France par la loi de 2017, à l'exception du gaz de mine (AMM). Son exploitation, qui relève du Code minier, est possible si elle répond à des impératifs de maîtrise des risques et si elle se fait sans action directe autre que celle rendue nécessaire pour recueillir le gaz, notamment lorsqu'il s'agit de maintenir les vides miniers en dépression (action de stimulation ou de fracturation proscrite).

En région Hauts-de-France, deux concessions valides, octroyées en 1992, regroupent 4 sites en activité d'exploitation du gaz de mine. Ce dernier, extrait des anciennes mines souterraines du bassin charbonnier du Nord-Pas-de-Calais, est ensuite, pour une petite partie, injecté sur le réseau gazier et, plus généralement, converti en électricité. Est également à l'étude, la production de chaleur par cogénération pour injection sur les réseaux locaux de chaleur.

Sur les 20 dernières années, les installations exploitées sur ces deux concessions ont capté près de 95 millions de Nm³, soit l'équivalent de 610 GWh, ce qui correspond à l'énergie consommée par une ville de 60 000 habitants.

LA GÉOTHERMIE

La géothermie possède de nombreux atouts pour contribuer à la transition énergétique. C'est une énergie renouvelable, non intermittente, à faible émission de gaz à effet de serre et source d'indépendance énergétique. Pour autant, la géothermie, qui a connu un fort développement en France au début des années 1980 à la suite du second choc pétrolier, peine à trouver un second souffle, du fait essentiellement de coûts d'investissement élevés et pour la géothermie haute température, du risque dit « géologique », c'est-à-dire de ne pas découvrir une ressource ayant les caractéristiques de température et de débit adéquates. Ainsi, la géothermie représente encore une faible part (1,6 %) de la production d'énergies renouvelables en France, loin derrière le bois-énergie, l'hydraulique ou l'éolien.

Toutefois, à la faveur de mécanismes de soutien, de fonds de garantie permettant de couvrir le risque géologique et d'une simplification du cadre réglementaire pour la géothermie de minime importance, la France mise sur un développement de son parc géothermique.

Ce parc compte aujourd'hui environ 200 000 pompes à chaleur (PAC) géothermiques, 80 installations de production de chaleur d'origine profonde et deux installations de production d'électricité.

La France affiche l'ambition d'un quasi-doublement de la production de chaleur par PAC géothermiques (de 3 à 5 TWh), d'un quadruplement de la production de chaleur d'origine profonde (de 1 à 4 TWh) et d'un décollage de la géothermie électrique (capacité passant de 1 à 24 MW) d'ici 2028⁴⁰. Les régions qui présentent le plus fort potentiel pour la géothermie profonde sont les bassins parisien et aquitain, l'Alsace, la vallée du Rhône, la Limagne et les DRON. On compte, pour la géothermie haute température, deux concessions (une en métropole et une en Guadeloupe) et 18 permis de recherche valides (16 en métropole, un en Guadeloupe et un à la Réunion). 90 % de ces titres valides ont été octroyés après 2016.

Comme toute activité industrielle, la géothermie s'accompagne de risques ou de nuisances pour les personnes ou pour l'environnement, de natures très différentes selon les types de géothermie. En ce qui concerne la géothermie superficielle, l'impact le plus significatif lié aux pompes à chaleur est le bruit et l'utilisation de fluides frigorigènes (risque de fuite) à fort potentiel de réchauffement climatique. La recherche et développement, ainsi qu'un règlement d'application de la directive européenne sur l'éco-conception des produits liés à l'énergie adopté en 2015, ont permis de relever les exigences de performance et de niveau acoustique des PAC mises sur le marché. Par ailleurs, même s'il n'est pas restreint à la géothermie superficielle, le risque de désordres environnementaux (contaminations de nappes, mouvements de terrain) liés à des malfaçons lors d'opérations de forage, a particulièrement marqué l'actualité à la fin des années 2000, avec les désordres survenus à Hilsprich (2006), Kircheim (2007) et Lochwiller (2008), dans l'Est de la France. Ces événements ont conduit à une profonde mise à jour de la réglementation, interdisant désormais ce type de travaux dans certaines zones, sans l'avis d'un expert agréé voire une autorisation au titre du Code minier.

En ce qui concerne la géothermie profonde, l'Ineris a établi une base de données internationale d'environ 40 accidents ou incidents, permettant de dresser une typologie des principaux phénomènes redoutés et mécanismes accidentels associés à cette activité.

Des indicateurs plus quantitatifs sur la sécurité dans ce secteur et une comparaison avec celle d'autres secteurs d'activité sont en revanche plus difficiles à établir compte tenu de l'absence d'un recensement des incidents et accidents liés à la géothermie à l'échelle internationale.

Note 40_Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (<https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/20200422%20Programmation%20pluriannuelle%20de%201%27e%CC%81nergie.pdf>). Valeurs de référence : 2017.

FIGURE 19

Appréciation comparée des risques et impacts liés à la géothermie profonde.

		PHASE DE VIE				
		Forage	Essais	Exploitation	Post-exploitation	
RISQUES OU IMPACTS	NUISANCES OU IMPACTS DE NATURE CHRONIQUE					
	Impact paysager et occupation du sol	■	■	■	■	
	Bruit	■	■	■	S. O.	
	Trafic routier	■	■	■	S. O.	
	Impact sur les écosystèmes	■	■	■	■	
	Impact sur la ressource en eau	■	■	■	■	
	Émissions de gaz et d'odeurs	■	■	■	■	
	Impact carbone	■	■	■	S. O.	
	Radioactivité pour les travailleurs	■	■	■	S. O.	
	RISQUE D'ÉMANATIONS GAZEUSES OU D'ÉPANCHEMENTS ACCIDENTELS EN SURFACE					
	Éruption de puits	● ■	● ■	● ■	S. O.	
	Fuite/débordement d'un réservoir en surface	● ■	● ■	● ■	S. O.	
	Fuite sur le circuit primaire ou secondaire	S. O.	S. O.	● ■	S. O.	
	Émission de gaz dissous	● ■	● ■	● ■	● ■	
	RISQUE DE POLLUTION ACCIDENTELLE DE NAPPES D'EAU SOUTERRAINE					
	Mise en communication d'aquifères	● ■	● ■	● ■	● ■	
	Fuite du puits vers un aquifère	● ■	● ■	● ■	● ■	
	RISQUE DE DÉSORDRES EN SURFACE D'ORIGINE GÉOMÉCANIQUE					
Secousses sismiques	● ■	● ■	● ■	S. O.		
Soulèvement de la surface du sol	● ■	● ■	● ■	● ■		
Abaissement de la surface du sol	● ■	● ■	● ■	● ■		
Glissement de terrain	● ■	● ■	● ■	● ■		

Légende: ● Vraisemblance ■ Gravité des conséquences ou impacts S.O. sans objet

■ peu plausible ou sans impact notable

■ peu probable ou avec un impact faible

■ probable ou avec dommages non structurels / impact environnemental modéré

■ très probable ou atteinte aux personnes / dommages structurels / impact environnemental fort

Une remontée systématique, centralisée et un partage, élargi à la communauté scientifique et à la société civile, du retour d'expérience des accidents dans ce secteur bénéficieraient indéniablement à la sécurité de cette filière.

L'Ineris a établi une appréciation comparée des risques et impacts liés à la géothermie profonde, selon les phases de vie d'un projet géothermique.

Les nuisances occasionnées par la géothermie profonde sont essentiellement présentes lors des travaux de forage et d'essais, phase qui dure entre six mois et un an. Ces nuisances (bruit, trafic routier, impact paysager) ne sont toutefois pas différentes de celles liées à un chantier de

construction ou de génie civil en milieu urbain: des solutions techniques ou organisationnelles existent permettant de les réduire.

En ce qui concerne les risques accidentels, le risque d'éruption de puits (*blowout*) est globalement moins présent en géothermie que dans le domaine de l'industrie pétrolière, les réservoirs étant généralement moins pressurisés et les fluides extraits étant souvent sous forme liquide (hormis dans les contextes volcaniques). En matière de sécurité au travail, le principal risque est celui d'un dégazage du fluide géothermal, éventuellement lent et diffus, mais pouvant donner lieu à une accumulation de gaz toxiques (H₂S, CO₂) dans des espaces peu ventilés (cave de puits, local technique).

Des effets sur la santé du personnel (intoxication, asphyxie) peuvent en découler, comme cela s'est produit au Japon en 1998 ou plus récemment en France, à Sucy-en-Brie en 2017 (évacuation des résidents) ou à Montesson en 2018 (deux morts).

Un risque moins aigu mais pouvant avoir des impacts environnementaux et économiques importants est le risque de fuite du fluide géothermal ou de mise en communication entre plusieurs aquifères, pouvant conduire à la pollution d'un aquifère d'eau potable ou stratégique, telle que la nappe de l'Albien en Île-de-France. Des cas de contaminations, liés à une corrosion des aciers ou à des cimentations défectueuses ont été observés dans les années 1990 (Coulommiers, 1996). Même si ces mécanismes sont désormais mieux compris et mieux détectés (notamment par un contrôle périodique de la corrosion des cuvelages exigé réglementairement), une vigilance reste de mise dans ce domaine.

Un autre risque accidentel déjà évoqué dans le domaine de la géothermie superficielle est la possibilité de mouvements de terrain (surrection, affaissement) liés à des désordres géomécaniques affectant des formations sensibles à l'eau (roches évaporitiques telles que du sel ou de l'anhydrite) traversées par des puits géothermiques et mises accidentellement en communication avec de l'eau à la suite d'un défaut d'étanchéité du puits.

Puits pétroliers et géothermie : une vie après la mort ?

L'existence sur le territoire de nombreux puits pétroliers en fin de vie laisse entrevoir la possibilité de convertir ces puits pour d'autres usages, notamment pour la géothermie. L'Ineris et le BRGM mènent parallèlement des études visant à évaluer, d'une part, le potentiel économique d'une reconversion des puits d'hydrocarbures en puits géothermiques et d'autre part, les risques et impacts pouvant résulter d'une telle reconversion. Préalablement, les deux organismes avaient collaboré dans un projet de recherche national (ANR PRÉGO), dans lequel l'Ineris avait initié une base de données sur des cas d'ouvrages reconvertis et réalisé une analyse des risques spécifiques à la reconversion des puits. Les principaux risques identifiés sont des fuites liées à l'inadaptation potentielle de l'architecture des puits à leur nouvel usage, ou bien à la défaillance de leur revêtement (tubages, cimentations) consécutive à l'effet du vieillissement et de la corrosion des aciers.

FIGURE 20

Centrale géothermique de Nesvajellir Thingvellir (Islande).



La sismicité induite par la géothermie

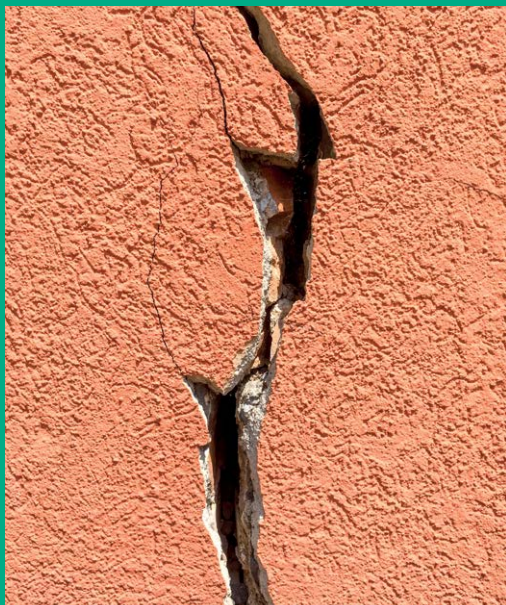


FIGURE 21

Fissure de façade engendrée par des phénomènes de sismicité induite par une activité géothermique.

Une préoccupation croissante dans le domaine de la géothermie haute température, et qui constitue aujourd'hui un frein au développement de cette filière, est celle de la sismicité produite essentiellement lors de la phase d'essais. Les séismes de Bâle en 2006 (magnitude 3.4), celui de Pohang en Corée en 2018 (magnitude 5.5) et plus proche de nous, les épisodes sismiques ressentis à Strasbourg en 2019 et 2020 (magnitude 3.3), soulèvent des interrogations sur le lien entre activité géothermique et sismicité, sur la compréhension des mécanismes en jeu et sur les mesures de maîtrise possibles de ce risque.

Les opérations de géothermie profonde induisent des changements de contraintes dans le sous-sol qui sont à l'origine de nombreux événements sismiques : on parle alors de « sismicité induite » ou

« sismicité anthropique ». La très grande majorité sont des microséismes indétectables par la population mais certains, lorsqu'ils atteignent une magnitude d'environ 2, peuvent être ressentis en surface et occasionner des dommages aux bâtiments voire, dans les cas extrêmes, des atteintes aux personnes.

Les mécanismes initiateurs de cette sismicité induite sont liés à la propagation de fluides (boue de forage, fluide de stimulation hydraulique, fluide géothermal réinjecté) au sein du réservoir à travers la matrice rocheuse ou les fractures. Plus précisément, la sismicité induite semble principalement résulter de l'augmentation de la pression de pore qui peut générer des glissements sur des failles préexistantes et/ou amener à la création de nouvelles fractures si la pression est très élevée (fracturation hydraulique). En outre, des phénomènes thermoélastiques (liés aux variations de température) et poroélastiques (liés aux variations de volume), ainsi que la déformation asismique (*i.e.* lente, qui n'induit pas une rupture de la roche), peuvent jouer un rôle important dans la génération de la sismicité induite.

Aujourd'hui, des modèles relativement simples ont été établis, basés sur des données historiques, ainsi que des modèles physiques supposant un couplage hydromécanique linéaire. Ils permettent la prédiction des événements sismiques induits en fonction du volume de fluide injecté. Néanmoins, l'estimation de la magnitude maximale attendue reste un défi de la recherche actuelle, comme l'a récemment démontré l'événement de magnitude 5.5 survenu à Pohang (Corée du Sud). Les conséquences socio-économiques de cet événement ont été particulièrement dramatiques, notamment du fait de la vulnérabilité de cette région naturellement peu sismique et de standards de construction relativement bas.

Les recherches menées à l'Ineris visent à mieux comprendre la complexité des mécanismes initiateurs de cette sismicité et à améliorer les estimations de magnitude maximale. L'Institut s'est également investi dans l'amélioration des systèmes d'alerte dans le cadre de la surveillance sismique (*traffic light systems*) afin de suivre et caractériser la réponse (sismique ou asismique) du réservoir aux injections de fluide et mieux anticiper la survenue d'un événement majeur.

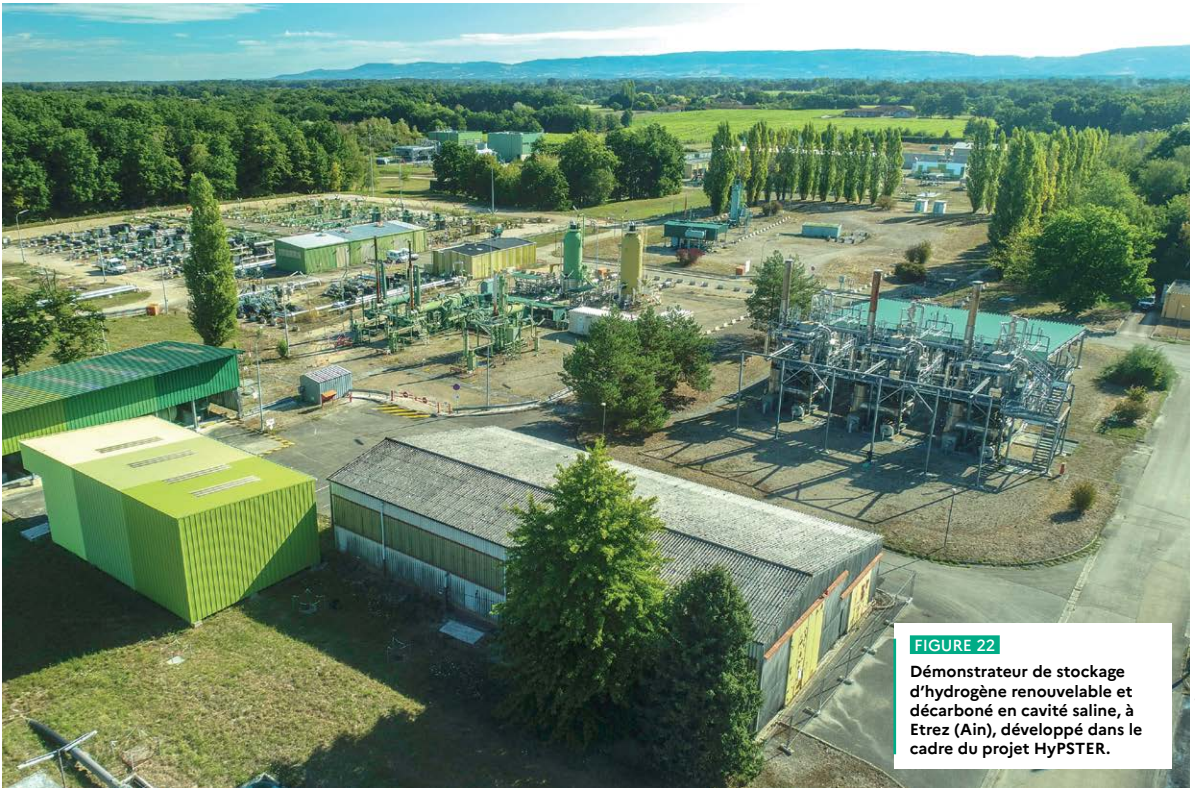


FIGURE 22

Démonstrateur de stockage d'hydrogène renouvelable et décarboné en cavité saline, à Etrez (Ain), développé dans le cadre du projet HYPER.

Etrez@credit-ArcomDesign

LE STOCKAGE SOUTERRAIN D'HYDROGÈNE DÉCARBONÉ

Aujourd'hui, l'hydrogène est produit à 98 % à partir de procédés carbonés (essentiellement par vaporeformage du gaz naturel) et utilisé comme réactif de base dans l'industrie chimique et pétrochimique. La perspective de produire demain de l'hydrogène, par électrolyse de l'eau, à partir d'électricité issue d'énergies renouvelables (solaire, éolien) ou bas carbone (nucléaire) fait naître l'espoir de décarboner non seulement les secteurs qui consomment déjà de l'hydrogène, mais aussi des secteurs, difficiles à décarboner, dans lesquels l'hydrogène pourrait se substituer aux énergies fossiles : mobilité lourde, chauffage industriel, sidérurgie, etc. Les bénéfices attendus de l'hydrogène décarboné sur le plan climatique mais aussi environnemental, économique, social et de la souveraineté énergétique, sont les raisons du fort soutien public affiché, notamment par la France⁴¹ ⁴² ⁴³ et l'Europe⁴⁴ pour la filière de l'hydrogène décarboné.

À moyen terme, l'hydrogène apparaît également comme un moyen de stocker massivement l'électricité issue des énergies renouvelables intermittentes (éolien, solaire) et ainsi de faciliter leur intégration dans les systèmes énergétiques. Le milieu souterrain offre, pour cela, un environnement particulièrement propice à un stockage massif de l'hydrogène : grands volumes potentiellement disponibles, stockage sous forte pression (poids naturel

des terrains), faible empreinte en surface, éloignement du produit par rapport aux enjeux vulnérables, étanchéité naturelle offerte par certaines formations géologiques. Toutes les options sont à l'étude, comme le montrent les projets en cours en Autriche⁴⁵, en Argentine⁴⁶, en Suède⁴⁷, ou diverses études concernant des aquifères⁴⁸.

Néanmoins, la solution qui apparaît la plus mûre pour répondre aux besoins de stockage souterrain de l'hydrogène décarboné est le stockage en cavités salines⁴⁹. Le sel offre en effet des propriétés d'étanchéité remarquables (perméabilité au gaz naturel inférieure à 10^{-18} m²)

Note 41. Plan hydrogène présenté le 1^{er} juin 2018 par Nicolas Hulot : <https://www.ecologie.gouv.fr/nicolas-hulot-annonce-plan-deploiement-hydrogene-transition-energetique>.

Note 42. Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France, annoncée le 8 septembre 2020 : <https://www.economie.gouv.fr/presentation-strategie-nationale-developpement-hydrogene-decarbon-france>.

Note 43. Plan d'investissement France 2030 <https://www.elysee.fr/emmanuel-macron/france2030>.

Note 44. Stratégie hydrogène de l'Europe, 8 juillet 2020 https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf

Note 45. Bauer et al., 2017.

Note 46. Bader, 2015 ; Pérez et al. 2016.

Note 47. SSAB, 2019.

Note 48. Pfeiffer & Bauer, 2015 ; Hagemann et al., 2016 ; Sørensen, 2007.

Note 49. Voir <http://hyunder.eu/>

et le principe de stockage par compression-détente (identique à celui d'une bouteille de gaz) permet d'injecter-soutirer le produit avec un débit rapide. Il est ainsi possible d'effectuer des « cyclages » fréquents, caractéristiques de ceux attendus dans le cadre d'une filière de l'hydrogène décarboné. On peut estimer qu'une cavité de 500 000 m³ (volume standard pour une cavité saline) portée à une pression de 200 bar est capable de stocker une quantité d'hydrogène équivalente à 300 GWh, ce qui représente la production énergétique moyenne d'environ 70 éoliennes pendant un an.

La faisabilité et la sécurité du stockage d'hydrogène en cavités salines ont déjà été démontrées. En effet, quatre sites de stockage sont opérationnels depuis plusieurs décennies, au Royaume-Uni et aux États-Unis, pour des usages industriels. D'autre part, le stockage souterrain de l'hydrogène peut s'appuyer sur un retour d'expérience de plusieurs décennies dans le domaine du stockage souterrain de gaz naturel.

Néanmoins, il doit prendre en compte les spécificités de l'hydrogène et les risques qui en résultent. D'abord, la légèreté et la mobilité de la molécule d'hydrogène, induite par sa très petite taille, et sa réactivité potentielle avec certaines espèces chimiques susceptibles d'être présentes dans la matrice rocheuse⁵⁰, les équipements des puits ou les installations de surface. L'activité microbiologique peut également catalyser des mécanismes de corrosion et les aciers peuvent être fragilisés au contact de l'hydrogène (*embrittlement*). Ces caractéristiques peuvent accentuer le risque de fuite et donc d'inflammation ou d'explosion en surface, d'autant que l'hydrogène est extrêmement inflammable (comparativement au gaz naturel), avec un domaine d'explosivité dans l'air bien plus large (4 à 75 % vol.) et une énergie minimale d'inflammation très faible (17 µJ). Le risque de contamination de nappes aquifères, en cas de fuite de l'hydrogène et de réaction de celui-ci avec des espèces chimiques présentes dans le sous-sol, doit également être étudié. Enfin, au-delà des propriétés physiques de l'hydrogène, c'est aussi le mode d'exploitation envisagé pour les stockages souterrains d'hydrogène décarboné, avec des cycles très rapides, voire journaliers, qui pourraient à long terme occasionner un endommagement des ouvrages (cavités salines, puits). Cet endommagement doit être suivi et maîtrisé, notamment par des moyens de surveillance.

Le stockage souterrain possède donc de nombreux atouts pour permettre un stockage massif de l'hydrogène et favoriser le déploiement de la filière de l'hydrogène décarboné. La maîtrise des risques et impacts environnementaux liés à l'ensemble de la chaîne de valeur hydrogène, notamment le stockage souterrain, est toutefois une question centrale. Y répondre est un des objectifs des projets auxquels participe l'Ineris.

Stockage souterrain de l'hydrogène : l'implication de l'Ineris dans la recherche

Plusieurs projets de démonstrateurs ou de stockages commerciaux d'hydrogène en cavités salines sont actuellement en développement en France, notamment à Etrez dans l'Ain, à Manosque dans les Alpes de Haute-Provence et à Carresse-Cassaber dans les Pyrénées-Atlantiques. Mettant à profit ses compétences intégratrices, l'Ineris contribue à plusieurs de ces projets de recherche.

Le projet français ROSTOCK-H (2016-2021) vise à une meilleure compréhension des mécanismes et phénomènes physiques en jeu dans le stockage géologique d'hydrogène en cavités salines en France et en Europe, afin d'améliorer l'efficacité du procédé industriel, d'évaluer sa viabilité économique et de maîtriser sa sécurité et son impact environnemental. L'Ineris intervient dans l'évaluation des conditions de sécurité d'un futur stockage souterrain d'hydrogène et dans la mise en place d'un suivi approprié pour la gestion des risques, notamment dans le cadre d'une détection précoce des fuites en surface. À cet effet, une simulation de fuite d'hydrogène dans un aquifère peu profond a été réalisée sur le site expérimental CatLab implanté à Catenoy (Oise).

Le projet français STOPIL-H2 (2018-2021) étudie le développement d'un pilote industriel de stockage d'hydrogène en cavité saline à Etrez (Ain). Il s'agit de réaliser une étude de faisabilité afin d'analyser tous les aspects liés à la réalisation de ce pilote. L'Ineris participe notamment à l'analyse des risques, à l'examen du cadre réglementaire et au choix des méthodes de surveillance.

Le projet européen HYPSTER (2021-2024) vise à concevoir et à opérer un démonstrateur industriel de production et de stockage d'hydrogène dans une cavité saline expérimentale du site d'Etrez. Dans la continuité du projet STOPIL-H2, il s'agit de mettre en œuvre le pilote et d'y réaliser des essais d'étanchéité et de cyclage journalier. L'Ineris intervient dans l'analyse des risques, la prévision par modélisation numérique du comportement de la cavité, l'évaluation du risque d'éruption de puits, le retour d'expérience du pilote et l'analyse du cadre réglementaire et normatif, en France et en Europe.

LE CAPTAGE ET LE STOCKAGE DU CO₂

La France vise à atteindre la neutralité carbone en 2050⁵¹. La filière du captage, du transport et du stockage souterrain du dioxyde de carbone (CO₂), ou CSC, figure parmi les solutions envisagées pour réduire les émissions atmosphériques de CO₂ des secteurs industriels fortement émetteurs et n'ayant pas d'autres solutions de décarbonation. Depuis 30 ans, de nombreux projets de recherche ont été menés et plusieurs démonstrateurs ou projets pilotes ont été réalisés. Les gisements de gaz ou de pétrole déplétés et les aquifères profonds constituent, avec les gisements de charbon non exploités ou non exploitables et les roches basiques ou ultrabasiques, les quatre possibilités actuellement étudiées pour le stockage géologique du CO₂. À ce jour, une vingtaine de projets CSC à l'échelle industrielle sont en opération dans le monde, essentiellement en lien avec des exploitations d'hydrocarbures, pour un total de 23 MtCO₂ stockées par an.

L'expérimentation pilote de Lacq-Rousse

En 2006, le groupe industriel Total a lancé un projet associant le captage des émissions de CO₂ d'une chaudière à gaz du site de Lacq convertie à l'oxycombustion, le transport du CO₂ par conduite terrestre sur une distance de 27 kilomètres et son injection dans le réservoir de gaz déplété de Rousse, à 4 500 mètres de profondeur. Le projet a démarré le 8 janvier 2010, l'injection a été arrêtée le 15 mars 2013 et une période de surveillance post-injection de 3 ans a débuté. Entre 2010 et 2013, plus de 51 000 tonnes de CO₂ ont été injectées. L'Ineris a participé à la surveillance géochimique de surface, en contribuant aussi bien à l'établissement de l'état initial, qu'au suivi durant l'injection et en phase de post-injection. Dans le cadre du projet ANR SENTINELLE, l'Institut a également contribué au test d'outils de surveillance sur le site de Rousse, afin de vérifier leur applicabilité à la surveillance des futurs sites industriels de stockage géologique de CO₂.

L'Ademe⁵² estime que le CSC a encore de nombreux défis à relever, en particulier sur la maîtrise des coûts, et envisage sa mise en œuvre en France comme la dernière étape d'une stratégie de décarbonation qui doit commencer par des actions plus matures et performantes (efficacité énergétique, énergies renouvelables). L'Agence identifie trois territoires disposant d'un potentiel favorable, car répondant aux deux critères de zone accueillant de gros

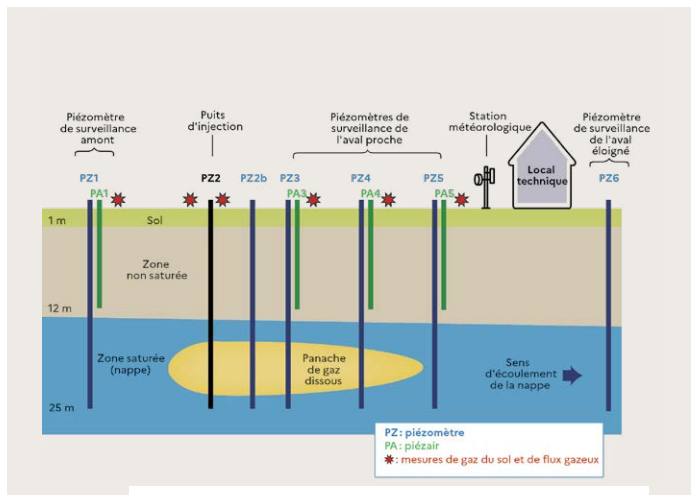


FIGURE 23

Expérimentation par l'Ineris de fuites gazeuses du sous-sol.

émetteurs et de présence de capacité de stockage géologique. Ces territoires sont localisés autour des villes de Dunkerque (59), du Havre (76) et de Lacq (64), pour un potentiel d'environ 24 MtCO₂ par an.

Les principaux risques liés au CSC sont des pertes de confinement des installations de surface et des fuites potentielles en milieu souterrain, qui peuvent induire, dans certains cas, des risques accidentels ou des impacts environnementaux. La maîtrise de ces risques au niveau des installations de surface (captage, transport et injection) et du stockage géologique est effectivement l'un des principaux enjeux du CSC, à la fois sur le plan de la sécurité et de l'environnement, mais aussi en termes de réduction effective des émissions anthropiques de CO₂.

À cette fin, les travaux de recherche et l'expérience acquise sur les projets pilotes améliorent les connaissances sur la résistance des matériaux en présence de CO₂, aussi bien au niveau des équipements de surface que des équipements de puits, sur le devenir du CO₂ injecté dans le sous-sol, sur le maintien de l'intégrité du réservoir de stockage et sur les moyens de surveillance des sites. L'Ineris contribue à ces travaux à l'échelle française et européenne. Capitalisant sur ses compétences pluridisciplinaires, l'Institut a notamment développé une méthodologie intégrée d'analyse des risques, qui prend en compte l'ensemble de la chaîne captage-transport-stockage. Au niveau international, l'Ineris est impliqué dans le comité technique n°265 de l'organisation internationale de normalisation (ISO) et participe à la conception de documents normatifs pour les activités liées au CSC.

Note 50. L'hydrogène est inerte vis-à-vis du sel mais peut, dans certaines conditions, réagir avec les espèces soufrées comme le gypse ou l'anhydrite.

Note 51. Loi n° 2019-1147 du 8 novembre 2019 relative à l'énergie et au climat

Note 52. ADEME (2020). Le captage et stockage géologique du CO₂ (CSC) en France. Le CSC, un potentiel limité pour la réduction des émissions industrielles. <https://www.ademe.fr/captage-stockage-geologique-co2-csc-france>.

LA RÉUTILISATION DES ESPACES SOUTERRAINS

Le sous-sol est principalement utilisé depuis des millénaires pour l'extraction de matières premières. Notre territoire comporte ainsi environ 500 000 cavités souterraines, dont près de 6 000 mines et au moins 40 000 carrières souterraines connues. Les questions qui se posent aujourd'hui concernent l'évolution de l'urbanisme souterrain au droit des grandes villes et la possibilité de reconvertir ces espaces souterrains hérités du passé pour de nouveaux usages.

Outre la géothermie qui exploite l'énergie thermique du sous-sol, ce dernier peut être mobilisé pour stocker de la chaleur ou du froid. La technologie la plus utilisée dans le monde, avec plusieurs dizaines de milliers de réalisations, est le stockage d'énergie thermique en aquifère qui consiste à pomper l'eau froide d'une nappe en été pour climatiser des locaux, et à réinjecter l'eau ainsi réchauffée afin de pouvoir la récupérer en hiver. Pour des finalités identiques, il existe également quelques stockages d'énergie thermiques en cavités souterraines en Scandinavie.

Une autre opportunité de réutilisation de vides souterrains pour le stockage d'énergie concerne les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP). Ce concept vise à stocker de l'énergie potentielle en période de surproduction électrique ou de basse consommation, en pompant de l'eau depuis un réservoir inférieur vers un réservoir supérieur, puis à produire de l'électricité par turbinage en période de forte demande ou pour des besoins de régulation du réseau électrique.

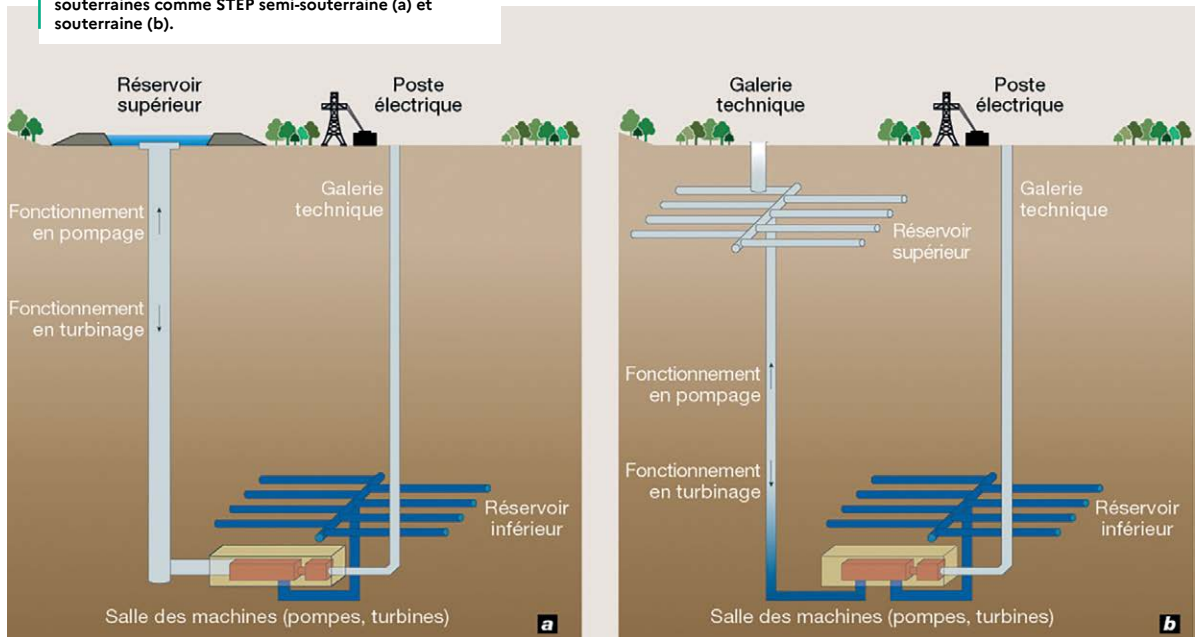
À ce jour, il existe plus de 40 STEP dans le monde. Il serait possible d'économiser la construction du réservoir inférieur en réutilisant d'anciennes carrières ou mines souterraines, voire d'implanter les deux réservoirs en souterrain à condition qu'ils se trouvent à deux niveaux différents : c'est le concept de STEP-3S, c'est-à-dire de STEP souterraine ou semi-souterraine dont un pilote est en cours d'étude dans une ancienne mine de charbon en Allemagne. Les projets actuellement les plus matures en matière de réutilisation de vides souterrains pour le stockage d'énergie concernent l'hydrogène.

Les vides souterrains peuvent également être utilisés pour le stockage et le traitement de déchets. En Europe, l'Allemagne a particulièrement développé le stockage, dans d'anciennes mines de sel ou de potasse, de déchets chimiques (Heilbronn, Herfa-Neurode, Stetten...) et radioactifs (Asse, Morsleben...). En France, en dehors du projet CIGEO qui porte sur le stockage de déchets nucléaires, le seul exemple connu de stockage de déchets solides est celui de Stocamine : à Wittelsheim (Haut-Rhin), une ancienne mine de potasse, la mine dite « Amélie », a été réutilisée à partir de 1999 pour le stockage de 44 000 tonnes de déchets ultimes.

Un incendie survenu, en 2002, au sein du bloc 15 a conduit à l'arrêt de l'activité. La fermeture du site est réalisée, depuis 2009, dans un contexte d'opposition sociétale forte au choix, pris par l'État, du stockage définitif total assorti de mesures de sécurité, au détriment d'une solution de déstockage partiel ou total des déchets entreposés.

FIGURE 24

Schéma simplifié de l'utilisation d'anciennes mines souterraines comme STEP semi-souterraine (a) et souterraine (b).



Des usages toujours plus variés

Le milieu souterrain peut être utilisé conjointement pour des usages multiples comme l'illustre l'exemple emblématique des carrières souterraines de calcaire de Kansas City (États-Unis), qui accueillent le plus grand centre d'affaire souterrain au monde, SubTropolis, sur plus de 500 ha. Il regroupe une cinquantaine d'entreprises attirées par les faibles coûts des loyers et du chauffage. En France, près de Saumur (Maine-et-Loire), un module expérimental de datacenter a été installé en 2016, à 20 m de profondeur, dans une ancienne carrière souterraine de craie. D'une puissance de 20 kW, il ne consomme que 0,17 kW pour le refroidissement des serveurs du fait de l'utilisation de la fraîcheur ambiante du milieu souterrain, stable autour de 12°C.

Lors de la phase d'arrêt des travaux et de cessation de l'activité extractive, l'exploitant est tenu de mettre en sécurité de manière pérenne les anciens ouvrages souterrains : murer et interdire l'accès aux cavités souterraines jugées dangereuses, voire conforter ou combler les zones et ouvrages potentiellement sujets à des instabilités. La réglementation évolue actuellement, avec la loi Climat et résilience, pour intégrer de manière plus spécifique

contraintes en termes de conception, de configuration et de construction. Cela suscite des besoins de recherche et développement afin de contribuer à un aménagement souterrain économe, durable et résilient, notamment basé sur une gestion coordonnée des principales ressources apportées par le sous-sol (eau, matériaux, énergie...).

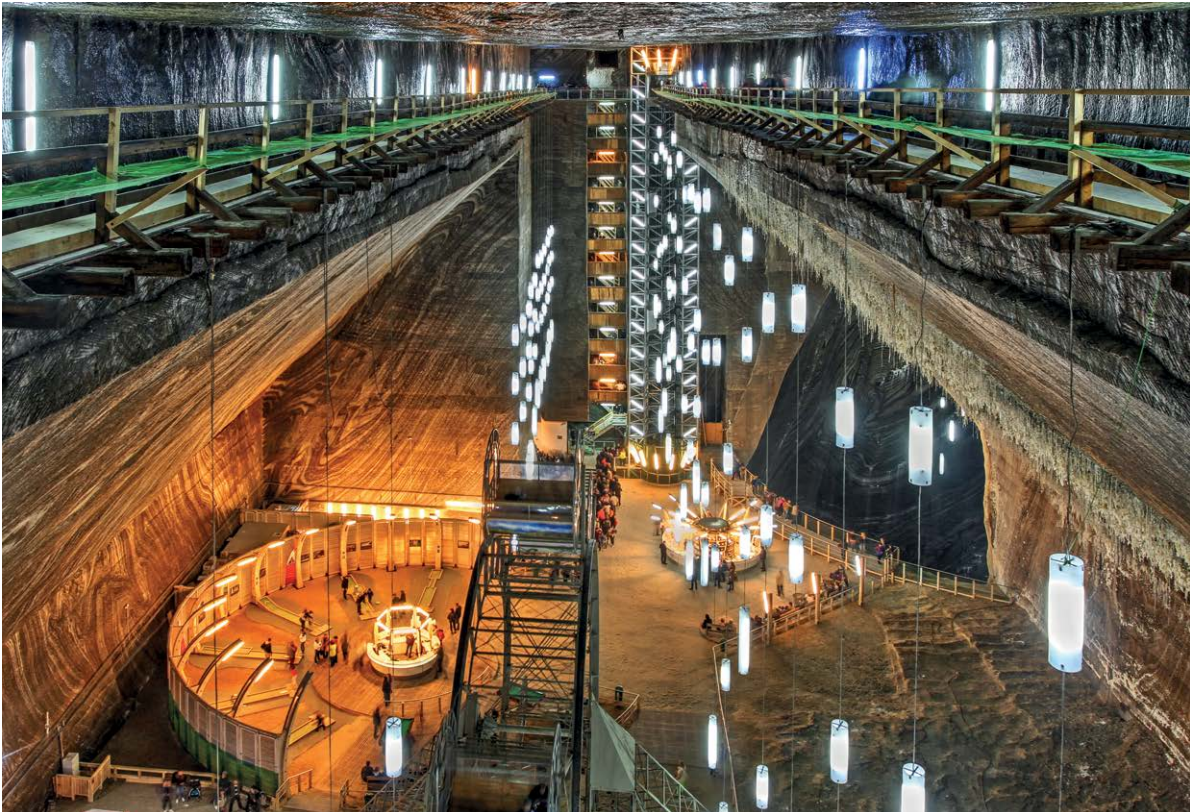
des études de faisabilité de potentielles valorisation ou réutilisation de ces sites après leur activité extractive initiale.

Le développement de nouveaux modes d'utilisation du milieu souterrain est de nature à créer des risques, pouvant être aggravés du fait du confinement des installations et des difficultés d'accessibilité des secours ou d'évacuation du public.

Leur maîtrise nécessitera donc des approches spécifiques qui auront un impact significatif sur les coûts d'aménagement et imposeront des

FIGURE 25

Le centre de loisirs et de santé installé dans l'ancienne mine de sel de Turda en Transylvanie (Roumanie).



Le sous-sol, laboratoire de la fabrique des territoires

Domaine régalien par excellence, l'exploitation du sous-sol est l'objet de revendications portées par la société civile. Le débat sociétal traduit une forte demande de « mise en politique publique » du sous-sol de la part des citoyens, désireux de participer activement au déploiement des transitions écologique et énergétique sur les territoires.

En tant que moteur de la révolution industrielle puis du développement économique, le monde souterrain est resté longtemps affaire de spécialistes : l'État, les acteurs économiques et les experts scientifiques. En effet, l'exploitation du sous-sol nécessite de mobiliser des savoirs très spécialisés et coûteux, le monde souterrain n'étant pas directement « visible » ou perceptible. D'autre part, la connaissance du sous-sol reste très largement incomplète, et souvent associée à de très fortes incertitudes.

UN INTÉRÊT COLLECTIF RENOUVELÉ AVEC LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

L'intérêt renouvelé de la société civile pour l'utilisation du sous-sol, avec les nouveaux enjeux qu'elle porte, est concomitant de l'émergence du débat sur le changement climatique. L'exploitation traditionnelle du sous-sol apporte une contribution non-négligeable au réchauffement de la planète, au point de remettre en question l'utilisation de certaines ressources (énergies fossiles). En parallèle, la montée des préoccupations vis-à-vis de la « santé environnementale » a renforcé l'attention collective sur les pollutions générées par les activités minières, y compris dans le cadre de « l'après-mine » les impacts sanitaires et environnementaux associés étant longtemps restés « invisibles »⁵³. L'analyse de ces héritages du passé est venue alimenter, au sein d'une partie de la population, les connaissances et les représentations sociétales sur les conséquences négatives de l'exploitation du sous-sol.

Or, les technologies de la transition énergétique reposent très largement sur les ressources minérales ; l'exploitation du sous-sol propose des solutions pour décarboner les activités humaines. Dans le même temps, les citoyens manifestent une conscience assez faible de la dépendance de leurs modes de vie aux ressources du sous-sol. La question des usages futurs du sous-sol ne peut donc pas ignorer les inquiétudes et revendications des populations.

UN DÉBAT SOCIÉTAL AUTOUR DU SOUS-SOL EMPREINT DE FORTES CONTROVERSES

En France, l'opposition au projet d'exploitation des gaz de schiste, qui a émergé brutalement en France en 2010, offre un premier exemple emblématique de controverse en matière d'utilisation du sous-sol⁵⁴. Suscitant de fortes mobilisations sociétales, elle a entraîné des répercussions sans précédent, en premier lieu l'interdiction par voie législative de la fracturation hydraulique. Plus récemment, les enjeux soulevés à l'occasion du projet dit « Montagne d'Or » constituent une synthèse des attentes sociétales actuelles vis-à-vis de l'exploitation du sous-sol, qu'elles interviennent dans le cadre du « renouvellement minier »⁵⁵ comme dans d'autres projets d'exploitation du sous-sol, comme la géothermie⁵⁶ ou le stockage du CO₂⁵⁷.

Lancé en 2011, le projet de mine d'or industrielle « Montagne d'Or » situé dans la région de Saint-Laurent-du-Maroni en Guyane, a suscité une forte opposition à partir de 2016, jusqu'à l'annonce par l'État de son abandon en 2019. La controverse met en lumière plusieurs dimensions dans la position des opposants au projet : ceux-ci expriment la volonté de préserver les écosystèmes naturels d'activités polluantes et mobilisent la lutte contre le réchauffement climatique pour dénoncer les effets négatifs du projet. Les opposants entendent également agir pour la protection de la santé, en vertu de la « justice environnementale ». Mais la question environnementale est loin d'épuiser le débat : sont pointés le manque de transparence du débat public et un cloisonnement de l'information préjudiciable aux populations concernées.

Note 53_ Voir le rapport de la Commission d'enquête du Sénat sur les pollutions industrielles et minières de sols publié en septembre 2020 : https://www.senat.fr/commission/enquete/pollution_des_sols.html.

Note 54_ Voir les analyses de F. Chateauraynaud et J. Debaz : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00662501/document_ainsi_que_Chailleux, S. Non au gaz de schiste ! " Cadrages et débordements de la controverse sur les hydrocarbures non conventionnels en France et au Québec, 2015 : <https://theses.hal.science/tel-01280729/document>.

Note 55_ Voir Chailleux, S., Le Berre, S. La gouvernance du renouvellement minier européen face aux contestations, *Revue Gouvernance*, vol. 18, n°2, 2021.

Note 56_ Voir Chavot, P., Masseran, A., Serrano, Y., Zougrana J. L'information comme enjeu ? La controverse autour de la géothermie profonde à l'euro-métropole de Strasbourg. *Natures Sciences Sociétés*, 2021/supp. 5 : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03462618/>.

Note 57_ Voir Arnauld de Sartre, X., Chailleux, S. L'acceptabilité au prisme du stockage géologique du CO₂ : retour sur un débat non émergé. *Natures Sciences Sociétés*, 2021/supp. 5 : <https://hal.science/hal-03460725/document>.

FIGURE 26

Lac rouge acide de la mine de cuivre abandonnée de Kokkinopezoula à Mitsero, Chypre.



Le conflit fait également remonter l'expression d'un refus du modèle économique dominant, dont la dimension consumériste et capitaliste est jugée dépassée. Dans le cas guyanais, comme cela a été observé dans le débat autour de l'exploitation du nickel en Nouvelle-Calédonie⁵⁸, la controverse met en exergue une dimension davantage politique : la défense des droits des populations locales autochtones, ainsi que la reconnaissance de leurs compétences et de leurs savoirs sur le territoire concerné.

VERS UNE RE-TERRITORIALISATION DES POLITIQUES DU SOUS-SOL ?

Loin de mobiliser le seul impératif environnemental, les attentes sociétales interrogent l'exploitation du sous-sol en tant que « projet de territoire » porteur d'enjeux socio-économiques, d'où la demande de « mise en politique » exprimée par les parties prenantes de la société civile au travers des controverses sur les usages du sous-sol⁵⁹. La question de la re-territorialisation des activités souterraines est souvent posée en termes d'« acceptabilité » sociale : le territoire est conçu comme un élément extérieur, contextuel, dont les caractéristiques sont immuables et qu'il faut mobiliser au service d'objectifs et de priorités définis en dehors de lui.

Or, de nombreuses études sociologiques montrent que le territoire est plutôt le résultat d'un processus permanent, qui est modelé et modèle l'activité du sous-sol qui s'y exerce. Une exploitation durable et éthique du sous-

sol doit se concevoir comme une partie intégrante de la construction d'un territoire. Cette « fabrique » implique un examen continu des impacts, y compris après la fin de l'activité, une participation à la vie des territoires, la gestion de problèmes non anticipés... Il s'agit de construire et maintenir un territoire dans la durée dans ses dimensions environnementales et humaines. Plus que « faire accepter », l'enjeu est d'identifier ce qu'il faut faire durer, mettre en valeur et sur quelles bases élaborer un futur commun⁶⁰. En particulier, ce processus de construction implique, en matière décisionnelle, de prendre en compte la répartition équitable du bénéfice-risque entre les parties prenantes ; l'analyse de l'utilité sociale des projets ; le dialogue et la participation du public⁶¹.

Note 58. Voir Merlin, J. *L'épreuve des mines : autochtonie et environnement en Nouvelle-Calédonie*, 2018 : <https://theses.hal.science/tel-03267822/>.

Note 59. Voir Arnauld de Sartre, X., Chailleux S. *L'incomplète mise en politique du sous-sol français*, Natures Sciences Sociétés, 2021/supp. 5 : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03460740>.

Note 60. Voir Laurent, B. « Quelle politique du territoire face à l'extraction ? Maintenir, mettre en valeur élaborer un destin commun » in Cerceau, J. et Laurent, B. (dir.) *Quand la mine déborde. Enquêtes sur la fabrique des territoires extractifs*, Presses des Mines, 2023 (à paraître).

Note 61. Voir Friser, A., Arpin, M.-L., Gendron, C. Yates, S. *Encore des mines demain ? Géosciences n°26*, juin 2022.

Un enjeu de risques industriels... et d'impacts environnementaux

Malgré le déclin des énergies fossiles, le sous-sol demeure plus que jamais porteur d'enjeux collectifs. Impact environnemental, transition énergétique... la place que la post-exploitation et les nouveaux usages du sous-sol peuvent être amenés à prendre, rend indispensable d'en caractériser les impacts et d'évaluer les risques associés.

Le déclin de l'activité minière en Europe et la diminution attendue de l'utilisation des ressources fossiles ne font pas disparaître la relation étroite du sous-sol avec les hommes et les écosystèmes en surface. De tout temps, les sociétés ont été en interaction avec leur sous-sol, dont l'exploitation n'a jamais cessé, tout en connaissant des transformations, parfois profondes. Le déclin des activités minières traditionnelles a laissé la place à de nouvelles formes d'utilisation, dont la fonction de stockage. Cette histoire longue permet de comprendre comment le sous-sol continue d'accueillir des activités très diverses, qui contribuent à la complexité des défis à relever en matière de maîtrise des risques. Cette diversité, aux mutations de plus en plus rapides, explique également l'important chantier d'évolution engagé sur les outils dont dispose la puissance publique pour encadrer et réguler l'utilisation du sous-sol.

Deux séries d'enjeux se posent en matière de risques et impacts pour les sociétés et leur environnement, sur lesquels l'Ineris a choisi de porter ses efforts. La sécurité des activités souterraines se conçoit au-delà de la phase d'exploitation proprement dite, et la gestion de leurs conséquences s'envisage sur le long terme. La question de la « post-exploitation » est devenue une priorité, y compris pour les activités existantes : pour faciliter leur gestion, il faut travailler à une meilleure connaissance de ces risques et de ces impacts, avant même l'arrêt des activités. Le sous-sol porte également des enjeux forts vis-à-vis de la transition énergétique, dans laquelle son utilisation peut être appelée à jouer un rôle de premier plan : comme lieu de production d'une énergie renouvelable (géothermie), comme espace de stockage de l'énergie (hydrogène énergie, STEP...), comme levier de maîtrise des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (stockage du CO₂...), comme espace de ressources primaires pour les nouvelles filières énergétiques (métaux rares...) en complément des filières de recyclage. Quelle que soit la place qui lui sera accordée, l'utilisation du sous-sol dans le



FIGURE 27

Essai de drone sur la plateforme souterraine géotechnique de l'Ineris.

contexte de la transition énergétique nécessite d'évaluer les risques associés.

La maîtrise des risques et des impacts ne peut s'envisager sans tenir compte des attentes sociétales fortes en la matière. Il s'agit de reconnaître la demande de mise en débat des activités souterraines et la volonté des parties prenantes de la société civile d'être un acteur de la gestion du sous-sol. La « mise en politique publique » du sous-sol autour de nouveaux enjeux est loin d'être achevée. Faire du sous-sol un levier de la transition écologique et un laboratoire de la fabrique des territoires nécessite de réunir les conditions de cette « politisation », qui s'appuie sur la crédibilité technique des activités et usages, la justesse de leur gouvernance et leur caractère légitime aux yeux de l'ensemble des acteurs.

Préconisations de la Core

L'exploitation et les usages du sous-sol étant étroitement liés à des choix de société, la Core encourage l'Ineris à continuer d'alimenter le dialogue science-société sur ce sujet, pour « donner de la hauteur » à l'analyse des risques sur les territoires. En situation de controverse vive, la position d'expert public peut s'avérer délicate, mais l'Institut joue un rôle important pour équiper les choix des parties prenantes et donner des outils pour les décideurs. L'Ineris a la capacité d'apporter une réelle valeur ajoutée au débat sociétal : les discussions interviennent souvent dans le périmètre local d'un projet souterrain, là où l'Institut étudie et met en perspective la question des risques à l'échelle d'un territoire.

Les nouveaux usages du sous-sol sont exemplaires des difficultés que rencontre l'anticipation des risques liées aux activités humaines. L'Ineris pourrait utilement contribuer à l'analyse de la dimension prospective de cette question d'usage du sous-sol à l'échelle

française et européenne, en particulier en lien avec les enjeux de transition énergétique.

La Core insiste sur la nécessaire prise en compte des enjeux démocratiques sous-jacents à la question du sous-sol et de ses usages, en remobilisant la notion de « bien commun ». Il apparaît indispensable que l'Institut puisse jouer son rôle d'expert dans le cadre d'une concertation plus approfondie avec les populations locales sur les usages futurs.

La question de la post-exploitation et des nouveaux usages du sous-sol interroge les enjeux propres à la perte d'intérêt collectif pour une activité au fil du temps, et donc à la perte de « la mémoire » et de la compétence associée à cette activité. L'Ineris a vocation à participer à une réflexion plus large sur la pérennisation de l'expertise sur l'exploitation du sous-sol.

La Core et la démarche d'ouverture de l'Ineris

La Commission d'orientation de la recherche et de l'expertise (Core) concrétise l'ouverture de la gouvernance scientifique de l'Ineris à la société civile organisée. C'est une instance pluraliste, qui traduit la diversité des parties prenantes de l'Institut : monde académique, industriels, organisations non gouvernementales (ONG), syndicats, élus (auxquels sont associés deux représentants de l'État). La Core a pour mission de partager les questionnements citoyens et les attentes sociétales en lien avec les sujets d'intérêt de l'Ineris ; de contribuer aux orientations et à la programmation des travaux de recherche et d'expertise de l'Institut ; de participer à rendre plus accessibles les connaissances scientifiques produites par l'Ineris. L'Ineris est l'un des premiers opérateurs scientifiques de l'État à avoir ouvert, dans les années 1990, sa gouvernance à des parties prenantes de la société civile. La réflexion de l'Institut sur le dialogue science-société s'est inscrite dans un mouvement plus large de transformation des politiques environnementales au tour-

nant des années 2000, qui accorde au citoyen le droit fondamental de prendre une part active au processus de décision publique. L'Institut s'est engagé dans une démarche structurée d'ouverture à la société en 2008, profitant de la dynamique impulsée par le Grenelle de l'environnement.

L'Ineris a la conviction que le dialogue science-société est structurant pour la conduite de ses missions, en créant les conditions favorables à des travaux scientifiques de qualité sur les risques technologiques, et à une meilleure anticipation des risques émergents. Étroitement associée au développement de la science ouverte à l'Institut, l'ouverture est un engagement pris à l'échelle du pilotage global de ses activités : gouvernance scientifique ouverte ; efforts de co-construction de projets avec les parties prenantes ; attention particulière accordée à l'accessibilité des connaissances, dont la collection Ineris références est une expression.

Annexes



P. 46 — ANNEXE 1

Quelques publications de l'Ineris

P. 47 — ANNEXE 2

Histoire du Code minier et de sa refonte

P. 48 — ANNEXE 3

Synthèse du cadre juridique des exploitations
du sous-sol

P. 49 — ANNEXE 4

Glossaire de l'exploitation du sous-sol

Quelques publications de l’Ineris

Après-mine

- Évaluation de l'aléa « gaz de mine » - Guide méthodologique, 2016 : <https://www.ineris.fr/fr/evaluation-de-lalea-gaz-de-mine-guide-methodologique>
- Guide Évaluation des aléas miniers, 2018 : <https://www.ineris.fr/fr/guide-evaluation-aleas-miniers>

Post-exploitation des hydrocarbures

- Contexte et aspects fondamentaux du forage et de l'exploitation des puits d'hydrocarbures, 2015 : <https://www.ineris.fr/fr/contexte-aspects-fondamentaux-forage-exploitation-puits-hydrocarbures>
- Les enseignements de l'accidentologie liée à l'exploration et l'exploitation des hydrocarbures, 2015 : <https://www.ineris.fr/fr/enseignements-accidentologie-liee-exploration-exploitation-hydrocarbures>
- État des lieux des puits réalisés par forage en France, 2017 : <https://www.ineris.fr/fr/etat-lieux-puits-realises-forage-france>

Stockages souterrains

- Dossier de référence Ineris sur les stockages souterrains, 2016 : <https://www.ineris.fr/fr/ineris/ouverture-societe/collection-ineris-references>

Usages en lien avec la transition énergétique

- Captage et stockage géologique du CO₂ : retour d'expérience et perspectives, 2017 : <https://www.ineris.fr/fr/captage-stockage-geologique-co2-retour-experience-perspectives>
- État des connaissances sur les risques, impacts et nuisances potentiels liés à la géothermie profonde, 2017 : <https://www.ineris.fr/fr/etat-connaissances-risques-impacts-nuisances-potentiels-lies-geothermie-profonde>
- État des connaissances concernant les aléas et les risques liés à la sismicité anthropique, 2017 : https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/DRS-17-149681-07390D-RAP-sismicite%C3%A9_induite-EKI-ICo_2.pdf
- Analyse de cas de sismicité liée à l'exploitation de la géothermie profonde, 2021 : <https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Ineris-200953-2503220-RAP%20Geothermie-%20DRS07%20v2.pdf>
- État des connaissances sur le stockage de l'hydrogène en cavité saline et apport du projet ROSTOCK, 2021 : <https://www.ineris.fr/fr/etat-connaissances-stockage-hydrogene-cavite-saline-apport-projet-rostock>
- Guide de bonnes pratiques pour la maîtrise de la sismicité induite par les opérations de géothermie profonde, Ineris - BRGM, 2023 : <https://www.ineris.fr/fr/ineris/actualites/maitrise-sismicite-induite-geothermie-profonde-nouveau-guide-est-disponible>

Liens utiles

- Base de données géoscientifiques du BRGM : <https://infoterre.brgm.fr/>
- Base de données hydrogéologiques française : <https://bdliisa.eaufrance.fr/>
- Cadastre minier numérique ouvert : <https://camino.beta.gouv.fr>
- Inventaire de l'occupation des sols : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/corine-land-cover-0>
- Portail de cartographie des risques sur le territoire : <https://www.georisques.gouv.fr/> dont la rubrique « installations classées » : <https://www.georisques.gouv.fr/risques/installations>
- Portail français des ressources énergétiques du sous-sol : <http://www.minergies.fr/fr>
- Portail français des ressources minérales non énergétiques : www.mineralinfo.fr dont la collection « La mine en France » : <https://www.mineralinfo.fr/fr/actualite/actualite/publication-de-collection-mine-france>
- Réglementation de la prévention des risques et de la protection de l'environnement : <https://aida.ineris.fr/>
- Réglementation en santé et sécurité au travail des industries extractives : <https://sstie.ineris.fr/>

Histoire du Code minier et de sa refonte

- **X^e - XIII^e siècles** : des premiers textes de droit « moderne » réglementent l'activité minière (exemple du contrat de l'évêque de la Province de Trente en 1185).
- **1413** : Charles VI reconnaît « la liberté de la recherche et de l'exploitation de toutes les substances métalliques par toutes personnes et dans tous terrains, à charge d'indemniser le propriétaire du sol et de payer au roi une redevance d'un dixième ».
- **1471** : Louis XI met en place, par ordonnance « un système de permissions ou concessions octroyées par le souverain, avec un droit de préférence en faveur du propriétaire du sol ». Dès cette période, la législation des mines s'organise en fonction de la substance extraite.
- **XVI^e siècle** : un système de privilèges individuels pour la recherche et l'exploitation minière se généralise. De nombreuses lettres patentes donnant droit d'exploitation seront accordées par Henri II et Charles IX.
- Les édits d'Henri IV de janvier 1597 et de juin 1601 organisent l'administration des mines, veillent à leur bonne exploitation et au recouvrement de l'impôt qu'elles génèrent.
- **1739** : Louis XV rappelle le système des concessions pour les mines métalliques, le concessionnaire devant payer au roi une redevance du dixième du produit brut, et au propriétaire du sol, une indemnisation.
- **1810** : la loi du 21 avril 1810 introduit le système de « déclaration au Maire de la commune », et de « surveillance des exploitations par l'administration ».
- **16 août 1956** : le « Code minier » est fondé.
- **Entre 1972 et 2002**, le Code minier est enrichi de différentes dispositions (lois et décrets) sans remettre en cause ses fondements.
- **Depuis 2010**, travaux de refonte du Code minier :
 - **2010** : étude sur les modifications à apporter au Code minier par le juriste Arnaud Gossement proposant 40 mesures réformatrices.
 - **2012** : travaux du groupe de concertation « Tuot » établissant un avant-projet de loi.
 - **2015-2016** : après deux consultations, le projet de loi est repris par le groupe socialiste à l'Assemblée nationale et les membres des Commissions du développement durable et des affaires économiques.
 - **Fin 2016** : une 1^{re} puis une 2^e proposition de loi sont déposées permettant d'engager les travaux parlementaires.
 - **Début 2017** : le projet de loi est amendé et adopté en 1^{re} lecture par l'Assemblée nationale; il est transmis au Sénat fin février 2017 pour examen.
 - **Fin 2017** : l'ordonnance 2011-91 du 20 janvier 2011 portant codification de la partie législative du Code minier est ratifiée par la loi 2017-1839 du 30 décembre 2017 mettant fin à la recherche ainsi qu'à l'exploitation des hydrocarbures et portant diverses dispositions relatives à l'énergie et à l'environnement.
 - **2019** : lors du premier Conseil de défense écologique, le ministre de la Transition écologique annonce la relance du dossier de réforme du Code minier dans le contexte sensible du projet minier de la Montagne d'or en Guyane. Le gouvernement ouvre, à l'automne 2019, la phase de concertation avec les parties prenantes puis celle de consultation (Conseil national de la transition écologique, Conseil d'État...).
 - **2021** : la loi 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets, modifie, par ses articles 65 à 80, plusieurs dispositions du Code minier, en vue d'améliorer la prise en compte des enjeux environnementaux liés aux activités minières, de rénover la participation du public, de moderniser le droit minier, de prendre les dispositions relatives à l'outre-mer, ou encore de préciser les mesures relatives aux dommages miniers.
 - **2022** : Les quatre ordonnances 2022-534 à 2022-537 du 13 avril et l'ordonnance du 2022-1423 du 10 novembre sont publiées en application de la loi dite « Climat et Résilience ».

SYNTHÈSE DU CADRE JURIDIQUE DES EXPLOITATIONS DU SOUS-SOL			
Type	Définition réglementaire	Code minier (nouveau)	Code de l'environnement
Ressources minérales	Les gîtes connus pour contenir les substances minérales ou fossiles listées à l'article L111-1 du Code minier. Typiquement : minéraux combustibles fossiles (tourbe exceptée), solides ou liquides, minéraux métalliques ou de terres rares, minéraux utiles à l'énergie atomique et plus généralement minéraux d'intérêt national stratégique.	[Recherche et exploitation] Articles L111-1, L111-3, L122-1 à L122-3, Articles L132-1 à L132-7.	[Traitement minier] Notamment les rubriques 2515, 2540, 2546 et 3210 des ICPE (1716 et 3250 pour minerais radioactifs).
Ressources minérales	Les exploitations de carrières, soit celles des gîtes connus pour contenir les substances minérales ou fossiles non listées à l'article L111-1 du Code minier.		[Aménagement, exploitation et de traitement minier] Notamment les rubriques 2510, 2515, 2540 des ICPE.
Ressources minérales	Les substances minérales (celles listées à l'article L111-1 et celles de carrières « non » mentionnées à l'article L. 111-1 lorsqu'elles sont contenues dans les fonds marins du domaine public).	[Recherche et exploitation] Articles L123-1 à L123-15, L133-1 à L133-13.	[Traitement de minierai] Rubriques 2510, 2515, 2540 notamment des ICPE.
Ressources non minérales	Les gîtes dont on peut extraire de l'énergie sous forme thermique, notamment par l'intermédiaire des eaux chaudes et des vapeurs souterraines, dits « gîtes géothermiques » (basse ou haute température), y compris les gîtes géothermiques de minime importance.	[Recherche et exploitation] Articles L112-1 à L112-3, L124-1 à L124-9 et L134-1 à L135-14.	
Stockages de chaleur	Les gîtes où l'on peut stocker en souterrain de l'énergie sous forme thermique, y compris les gîtes de stockage calorifique de minime importance.	[Recherche et exploitation] Articles L126-1 à L126-2 et L135-1 à L135-3.	
Stockages d'hydrocarbures	Les cavités souterraines, naturelles ou artificielles, ou les formations souterraines naturelles présentant les qualités requises pour constituer des réservoirs étanches ou susceptibles d'être rendus tels, en vue du stockage de gaz naturel, hydrocarbures liquides, liquéfiés ou gazeux ou produits chimiques à destination industrielle.	[Recherche, création, essais ⁶² , aménagement] Article L211-2.	[Exploitation du stockage ⁶³] Rubriques 1414, 4318, 4310, 4330, 4331, 4715 et 4734 des ICPE.
Stockages de CO ₂	Les formations souterraines aptes au stockage géologique de dioxyde de carbone à des fins de lutte contre le réchauffement climatique.	[Recherche, essais, aménagement] <i>Renvoyé vers Code minier par Sections 5 et 6 du chap IX du titre II du livre II du code de l'environnement</i>	[Exploitation du stockage] Rubrique 2970 des ICPE.
Stockages de déchets	Les stockages souterrains de déchets dangereux.		[Exploitation du stockage] Rubrique 3560 des ICPE.
Ressources minérales	Les masses constituées par des haldes et des terrils de mines et par les déchets d'exploitation de carrières.	[Exploitation], par titulaire d'un titre minier Article L137-1.	[Exploitation], par titulaire d'un titre minier Rubriques 2510 des ICPE.

Note 62_ Les essais restent de droit minier tant que les quantités stockées sont inférieures au seuil de déclaration de la rubrique ICPE concernée (qui varie en fonction du produit stocké).

Note 63_ Si les travaux d'exploitation sont régis par le Code de l'environnement, ceux-ci nécessitent toutefois l'obtention d'un titre minier.

Glossaire de l'exploitation du sous-sol

Aléa	Probabilité qu'un phénomène dangereux se produise, au cours d'une période de référence, en atteignant une intensité qualifiable ou quantifiable.
Aquifère	Couche de roche perméable, traversée par les eaux souterraines, qui peut emmagasiner beaucoup d'eau.
Bloc	Fragment rocheux de taille supérieure à 25 cm de diamètre.
Chambre	Espace ou volume excavé et vidé de sa substance minérale valorisable.
Couche	Dépôt sédimentaire bien délimité, aux caractéristiques homogènes ; c'est la plus petite subdivision du terrain.
Ennoyage	À l'arrêt d'une exploitation souterraine, maintenue à sec par pompage, phénomène d'accumulation des eaux d'infiltration dans les vides créés par les travaux miniers.
Exhaure	Action de remonter au jour, par pompage, toutes les eaux accumulées au fond d'une exploitation.
Foudroyage	Éboulement de roches délibérément provoqué de façon à combler les vides générés par l'extraction du minerai, par la dislocation et la chute rapides des terrains sus-jacents.
Front de taille	Surface verticale suivant laquelle on attaque la couche de minerai à exploiter, elle sépare les chantiers des zones de minerai non exploitées.
Galerie	Toute excavation souterraine, horizontale ou faiblement inclinée, qui présente une longueur bien supérieure à ses hauteurs et largeurs.
Gisement	Lieu où un matériel géologique donné s'est accumulé et que l'on peut exploiter en totalité ou en partie. Le gisement constitue l'ensemble des réserves d'une exploitation.
Gîte	Lieu où l'on rencontre une ou plusieurs masses minérales susceptibles de faire l'objet d'une exploitation.
Grisou	Gaz, constitué principalement de méthane, se dégageant dans certaines mines. Il forme un mélange inflammable avec l'air ambiant lorsque sa teneur est comprise entre 5 % et 15 %.
Halde	Amas de matériaux constitué avec les déchets de triage et de lavage d'une mine (le plus souvent métallique).
Horizon	Dépôt associé à une ère géologique et caractérisé par la présence de fossiles typiques. Par extension, niveaux sédimentaires que l'on peut distinguer au sein d'une section verticale de sol.
Pilier	Partie du gisement laissée en place afin de soutenir le toit et le recouvrement d'une exploitation souterraine (de taille métrique à décimétrique).
Puit	Voie de pénétration dans le gisement, verticale, partant de la surface, comportant des accrochages, donnant accès à différents étages d'une mine et permettant de les desservir.
Saumure	Eau à forte concentration de sel.
Stériles	Matières ou partie de la couche de minerai non exploitable et/ou non valorisable.
Terril	Colline artificielle formée de sous-produits de l'exploitation minière, principalement de charbon, il est dans ce cas le plus souvent constitué de schistes, de grès carbonifères et de restes de houille.
Titre minier	Tout droit de recherche ou d'exploitation délivré conformément au Code minier.
Toit (ou ciel)	Terrains stériles situés au-dessus du minerai exploité. Par extension, plafond d'une infrastructure souterraine.
Torpillage	Opération de destruction des piliers, souvent à l'explosif, pour provoquer le foudroyage.

LIGNE ÉDITORIALE

Mise à disposition de tous, la collection Ineris références s'adresse en premier lieu aux parties prenantes organisées de la société civile.

Ses dossiers, qui visent à apporter un éclairage à la fois stratégique et technique, font partie des outils développés dans le cadre de la démarche d'ouverture à la société de l'Institut, avec l'objectif de faciliter les débats sur les questions scientifiques en lien avec les risques technologiques et les pollutions.

À PROPOS DE L'INERIS

L'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) est l'établissement public de référence des risques technologiques et des pollutions (hors nucléaire). Opérateur indépendant, l'Institut produit des connaissances scientifiques pour évaluer ces risques et les moyens de les maîtriser.

Sur les questions de risque technologique, l'Ineris s'est vu confier une mission d'appui aux politiques environnementales, que viennent alimenter des travaux de recherche appliquée et des collaborations avec des acteurs privés. Ses travaux portent sur la sécurité des activités industrielles à l'échelle d'un site ou d'un territoire ; les dangers des substances chimiques et leur impact sur l'Homme et la biodiversité ; les risques liés à la mise en œuvre de la transition énergétique et de l'économie circulaire.

Créé en 1990, l'Ineris est un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC) sous la tutelle du ministère chargé de l'environnement.

Il compte 513 collaborateurs pour un budget de 74,6 millions €. Son siège situé à Verneuil-en-Halatte (Oise) accueille 25 ha de plateformes d'essais et 30 000 m² de laboratoires.

INERIS

références

