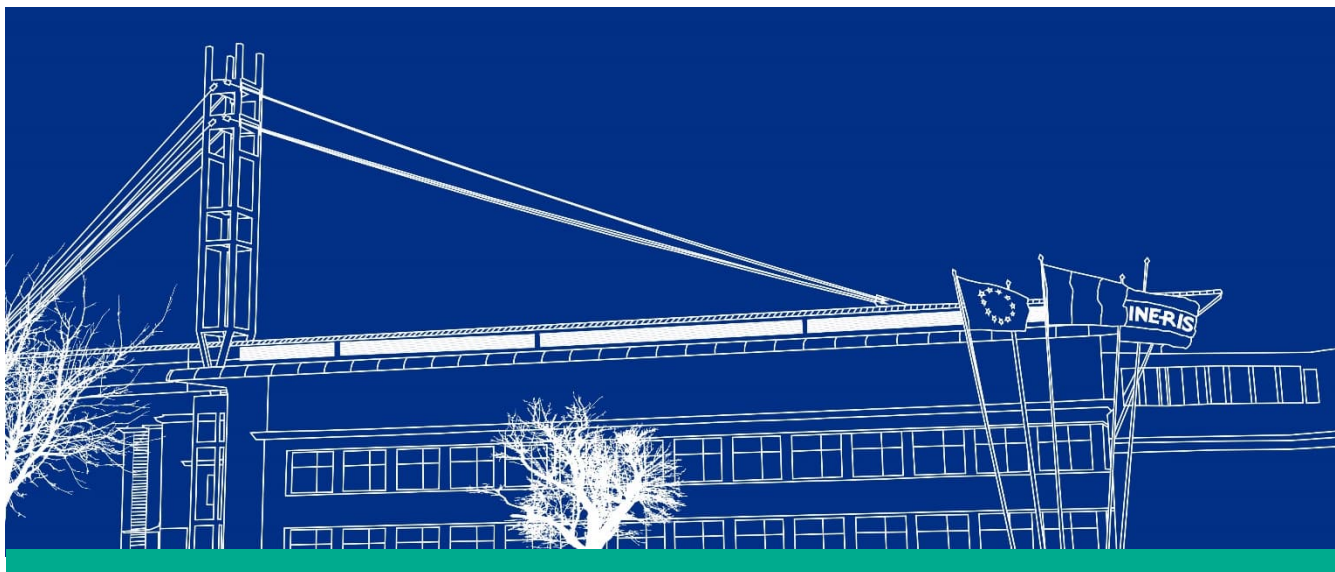




(ID Modèle = 454913)

Ineris - 230696 - 2835675 - v1.0

24/09/2025

Synthèse des connaissances sur le transfert des gaz au sein des réservoirs post-miniers complexes

Jalon 4 - COP 2020-2025

PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : DIRECTION SITES ET TERRITOIRES

Rédaction : GOUZY Aurelien

Vérification : POULARD FREDERIC

Approbation : BAROUDI HAFID - le 24/09/2025

Liste des personnes ayant participé à l'étude : GOMBERT Philippe

Table des matières

1	Lexique	6
2	Introduction	9
2.1	Les travaux miniers souterrains en Europe (hors hydrocarbure).....	10
2.1.1	Contexte général.....	10
2.1.2	État actuel de l'exploitation minière souterraine en France.....	10
2.1.3	Focus : Les mines souterraines de charbon.....	12
2.2	Contexte spécifique au transfert des gaz au sein des réservoirs post-miniers	13
3	Le gaz de mine.....	15
3.1	Principaux gaz constituant le gaz de mine (ou grisou).....	15
3.2	Autres gaz pouvant être présents (ou absents) d'un gaz de mine	16
4	Transfert du gaz de mine des travaux miniers vers la surface	19
4.1	Voies de transfert du gaz de mine vers la surface.....	19
4.2	Mécanismes de transfert du gaz de mine vers la surface	19
4.3	Mise en pression du réservoir post-minier.....	20
4.4	Mécanisme de tirage thermique.....	21
4.5	Mécanisme de pistonnage par ennoyage des vides miniers.....	22
4.6	Mécanisme de transfert des gaz de mines sous forme dissoute.....	25
4.7	Autres mécanismes.....	26
5	Gestion du transfert du gaz de mine vers la surface.....	27
5.1	Aperçu des techniques de détection et de surveillance des émissions de gaz.....	27
5.2	Gestion et prévention des émissions de gaz en surface.....	29
6	Conclusions	30
7	Références.....	32

Table des figures

<i>Figure 1 – Nature et localisation des principaux bassins miniers français.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure 2 – Photographie d'une galerie desservant la mine d'argent de Schwaz (Autriche) ; crédit : A. Gouzy.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 3 – Schématisation des principaux éléments d'un ancien site minier souterrain.</i>	<i>11</i>
<i>Figure 4 – Photographie d'une galerie desservant une mine de charbon ; crédit : Ineris.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure 5 - « Triangle » de l'émission du gaz de mine en surface présentant les composantes nécessaires à l'observation d'un transfert significatif.</i>	<i>13</i>
<i>Figure 6 – Principales voies de transfert du gaz de mine en lien avec une ancienne exploitation minière (d'après Ineris, 2016).</i>	<i>19</i>
<i>Figure 7 – Schématisation du mécanisme d'écoulement du gaz de mine par mise en pression du réservoir post-minier.</i>	<i>20</i>
<i>Figure 8 – Schématisation de l'effet de la pression atmosphérique sur le transfert des gaz de mine ; à gauche par mise en dépression du réservoir post-minier par rapport à l'atmosphère ; à droite par mise en surpression du réservoir post-minier par rapport à l'atmosphère.</i>	<i>21</i>
<i>Figure 9 – Schématisation de l'effet de la différence de température entre l'atmosphère et celle observée dans les anciens travaux miniers sur le transfert des gaz de mine.</i>	<i>22</i>
<i>Figure 10 – Schématisation de l'effet de l'ennoyage des anciens travaux miniers sur le transfert des gaz de mine vers la surface.</i>	<i>23</i>
<i>Figure 11 – Représentation schématique d'un réservoir post-minier agrémentée de vignettes représentant les principaux mécanismes permettant d'appréhender le transfert des gaz de mine depuis les travaux miniers souterrains vers la surface.</i>	<i>30</i>

À la fin de certains paragraphes, des encadrés ont été ajoutés à ce document. Ils traitent d'une question spécifique, vous pourrez les retrouver aux pages suivantes :

A. Quelle est la dernière mine française de charbon à avoir fermé ? -----	12
B. Qu'est-ce qu'un réservoir post-minier ? -----	14
C. Dans une mine de charbon, d'où vient le méthane, constituant redouté du grisou ? -----	16
D. Libérer du méthane dans l'atmosphère est-ce problématique si ce gaz n'est pas assez concentré pour présenter un risque d'inflammation/explosion ? -----	18
E. Comment se déroule l'ennoyage d'une mine ? -----	24
F. Y'a-t-il encore des émissions de gaz de mine une fois l'ensemble des anciens travaux miniers ennoyés ? -----	25
G. Comment l'effet Venturi se matérialise-t-il en contexte post-minier ? -----	26

Résumé

L'exploitation des mines souterraines peut créer un réseau dense de galeries, de cavités et de fractures dans le sol. A la fermeture des installations minières, ces vides interconnectés se comportent comme des réservoirs complexes dans lequel des gaz, naturellement présents dans les terrains géologiques ou bien libérés suite à certaines réactions bio/géochimiques (initiées par les perturbations engendrées par l'exploitation), ont pu s'accumuler.

Des recherches ont montré que, à la suite de leur fermeture, certaines anciennes mines souterraines continuent de relâcher du gaz de mine pendant des décennies, en raison de la persistance du gaz dans les cavités souterraines et de la lenteur de son dégagement vers la surface.

Les conditions géologiques (profondeur de l'exploitation, degré de fracturation des terrains, présence d'eau d'infiltration au sein des travaux miniers) tout comme le contexte météorologique local en surface (variations de pression atmosphérique, de température, régime des vents, ...) sont autant de facteurs permettant d'expliquer la libération en surface de ces gaz accumulés en souterrain (le gaz de mine).

À travers l'expérience acquise par l'Ineris, ce document vise à expliciter et illustrer de façon pédagogique les principaux mécanismes de transfert de ces gaz depuis les anciens travaux miniers souterrains vers l'atmosphère de surface.

Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Synthèse des connaissances sur le transfert des gaz au sein des réservoirs post-miniers complexes, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 230696 - v1.0, 24/09/2025.

Mots-clés :

après-mine ; charbon ; dioxyde de carbone ; gaz de mine ; grisou ; méthane ; réservoir post-minier

1 Lexique

*Dans l'optique d'être facilement identifiés, les termes présentés par ce lexique seront **inscrits en italique et colorés en bleu** dans le texte de ce document à l'occasion de leur première occurrence.*

Aérage : action de faire circuler de l'air dans les zones de travaux d'une mine souterraine en exploitation. L'aérage peut être naturel ou forcé par des ventilateurs qui créent localement une dépression (aérage aspirant) ou une suppression (aérage soufflant). Synonyme : ventilation ; (SIM, 1983).

Affleurement : composante géologique d'un terrain visible à la surface d'un sol.

Aléa : correspond à la probabilité qu'un phénomène (d'origine minière dans le cas présent) se produise sur un site, au cours d'une période de référence, en atteignant une intensité qualifiable ou quantifiable. La caractérisation d'un aléa repose classiquement sur le croisement de l'intensité prévisible du phénomène avec sa probabilité d'occurrence. L'aléa est spatialisé et peut être cartographié ; (Ineris 2018).

Anémomètre : appareil mesurant la vitesse de déplacement d'une masse d'air ; (SIM, 1983).

Aquifère : terrain, formation géologique perméable contenant une nappe d'eau souterraine.

Calcaire asphaltique : roche d'origine sédimentaire contenant des proportions notables d'asphalte susceptibles d'être exploitées par pyrolyse.

Charbon : terme générique le plus souvent employé au sens large pour désigner un combustible fossile d'origine organique, provenant essentiellement de la décomposition de végétaux enfouis sous forme de sédiments il y a plusieurs millions d'années. Cette roche sédimentaire est un combustible utilisé principalement pour la production d'énergie et la fabrication de l'acier.

Il existe une grande variété de charbons en lien avec leurs compositions chimiques. Usuellement, les charbons sont classés en fonction de leur concentration en carbone selon un ordre croissant : tourbe ; lignite ; houille, anthracite, graphite.

Charge hydraulique : altitude d'un niveau piézométrique (hauteur de la colonne d'eau) par rapport à un plan de référence.

Coup de grisou : lors de l'exploitation souterraine d'une mine de charbon, un mélange gazeux variable en composition et en concentration (le « grisou » ou gaz de charbon) peut naturellement se dégager des terrains. Si, après mélange de ce gaz avec l'atmosphère présente dans les travaux miniers, une concentration résultante de méthane est observée dans des valeurs de l'ordre de 5 à 15 % en volume, le mélange gazeux peut déflagrer en présence d'une source d'inflammation, l'explosion étant appelée « coup de grisou ».

Les coups de grisou sont à l'origine de nombreuses catastrophes ayant entraîné la mort de mineurs du fait d'effets thermiques (flux de chaleur) ou mécaniques (ondes de pression préjudiciables pour les travailleurs ou la stabilité de leur environnement de travail).

Débordement : un débordement d'eau d'origine minière est observé lorsque l'eau qui a infiltré les travaux miniers atteint une hauteur suffisante pour s'écouler en surface par la simple force de gravité. Les débordements sont notamment observés pour les exploitations minières souterraines situées en montagne et présentant un fort gradient d'altitude.

Dissolution : processus chimique par lequel les matériaux solubles d'un sol, d'une roche se dissout dans un liquide (solvant) pour former une solution homogène (Ineris, 2023).

Encaissant : en contexte minier, une roche encaissante désigne la lithologie dominante d'une zone par rapport au minerai ciblé.

Ennoyage : remplissage de la mine par l'eau, après l'arrêt de l'exhaure.

Exhaure : évacuation des eaux drainées par les divers travaux d'une mine souterraine (généralement par puisage ou pompage) ; (SIM, 1983).

Faille : fracture de terrain, suivie du glissement d'un des deux compartiments le long de l'autre.

Foudroyage : opération par laquelle les vides de l'exploitation sont comblés par l'éboulement des terrains sus-jacents. Désigne également les terrains foudroyés ; (SIM, 1983).

Galerie (de mine) : nom générique désignant les voies de communication souterraines horizontales ou faiblement inclinées (SIM, 1983). En contexte post-minier, la plupart des galeries ont été fermées par un bouchon mais certaines demeurent ouvertes ou permettent tout du moins les échanges de gaz et d'eau entre les travaux miniers et la surface (intentionnellement ou non).

Gaz à effet de serre : gaz qui, une fois présents dans l'atmosphère, retiennent une partie de la chaleur reçue du soleil par la surface terrestre via le rayonnement. L'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère se traduit par des perturbations climatiques et une hausse de la température globale de la planète. Certains gaz à effet de serre sont d'origine naturelle (vapeur d'eau par exemple) et/ou issus des activités humaines.

GEODERIS : groupement d'Intérêt Public (GIP) constitué par le ministère de la transition écologique et solidaire, le BRGM et l'Ineris. Il apporte à l'état (administrations centrales et services déconcentrés) une assistance et une expertise en matière d'après-mine ; cf. <https://geoderis.fr/>.

Hydrostatique (pression) : cette pression désigne la force exercée par un fluide immobile (on dit également au repos), comme l'eau, sur une surface en contact avec celui-ci.

Ineris : l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) est un établissement public à caractère industriel et commercial, placé sous la tutelle du ministère chargé de l'environnement ; cf. <https://www.ineris.fr/fr>.

Dans le domaine des mines et des géosciences, l'Ineris s'inscrit dans la continuité d'une histoire plus ancienne. En effet, l'Institut hérite des compétences et savoir-faire du CERCHAR, organismes publics créés en 1947 en réponse au besoin de recherche qui a été mis en lumière lors de la catastrophe de Courrières en 1906 (Ineris, 2005).

Matériaux concéssibles : ressources du sous-sol déclarées d'intérêt général telles que définies, dans la législation française, par l'article L.111-1 du code minier. Les matériaux concéssibles se caractérisent par leur rareté et leur importance économique et/ou stratégique : en France, leur gestion est ainsi confiée à l'État.

Mine (souterraine) : exploitation (souterraine) de matériaux concéssibles : une mine souterraine de charbon est ainsi une exploitation industrielle où le charbon est extrait du sous-sol ; (SIM, 1983).

Minerai : roche ou ensemble rocheux suffisamment riche en substances utiles pour justifier son exploitation en vue de son traitement. Un minerai peut également contenir des minéraux sans valeur qui constituent ainsi une gangue ; (SIM, 1983).

Mur (minier) : terrains généralement stériles situés au-dessous de la formation de minerai exploité. Opposé : Toit (minier) ; (SIM, 1983).

Perméabilité : aptitude d'un milieu (une roche dans le cas qui nous intéresse ici) à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de pression.

Potasse : ce terme désigne couramment plusieurs sels contenant l'élément chimique potassium présent à une concentration exploitable. La potasse est souvent utilisée comme engrais ou comme matière première pour l'industrie chimique.

Puits (de mine) : voie de pénétration dans le gisement, verticale ou fortement inclinée, partant de la surface, donnant accès à différents niveaux des travaux souterrains et permettant de les desservir. Généralement un puits assure tout ou partie des services suivants ; extraction du minerai, circulation du personnel, transport du matériel, descente des remblais, aérage (entrée ou retour d'air), exhaure... ; (SIM, 1983). En contexte post-minier, la plupart des puits ont été fermés (bouchonnés et/ou remblayés) mais certains demeurent ouverts ou permettent tout du moins les échanges de gaz (voire d'eau dans certaines situations de pompage) entre les travaux miniers et la surface (intentionnellement ou non).

Remblayage : action de remplir un vide minier par un matériau (stériles miniers, coulis...) ; selon le mode de mise en place on distingue le remblayage manuel, mécanique, pneumatique ou hydraulique (SIM, 1983).

Schiste bitumineux : roche d'origine sédimentaire contenant des proportions notables de bitume susceptibles d'être exploitées par pyrolyse.

Terril : amas d'origine anthropique constitué de l'accumulation des déblais résultant de l'exploitation d'une mine.

Toit (minier) : terrains généralement stériles situés au-dessus de la formation de minerai exploité. Opposé : Mur (minier) ; (SIM, 1983).

2 Introduction

Durant plusieurs siècles, la France a exploité des ressources minérales présentes dans son sous-sol, et notamment celles dites *concessibles* (selon la législation française [article L.111-1 du code minier], qui regroupent entre autres les métaux, les hydrocarbures, le sel, la *potasse*, les phosphates...). Une grande partie de ces exploitations a été réalisée via le creusement de *mines* souterraines et a été à l'origine de la création de situations pouvant permettre la production, l'accumulation voire le dégagement en surface de gaz de mine.

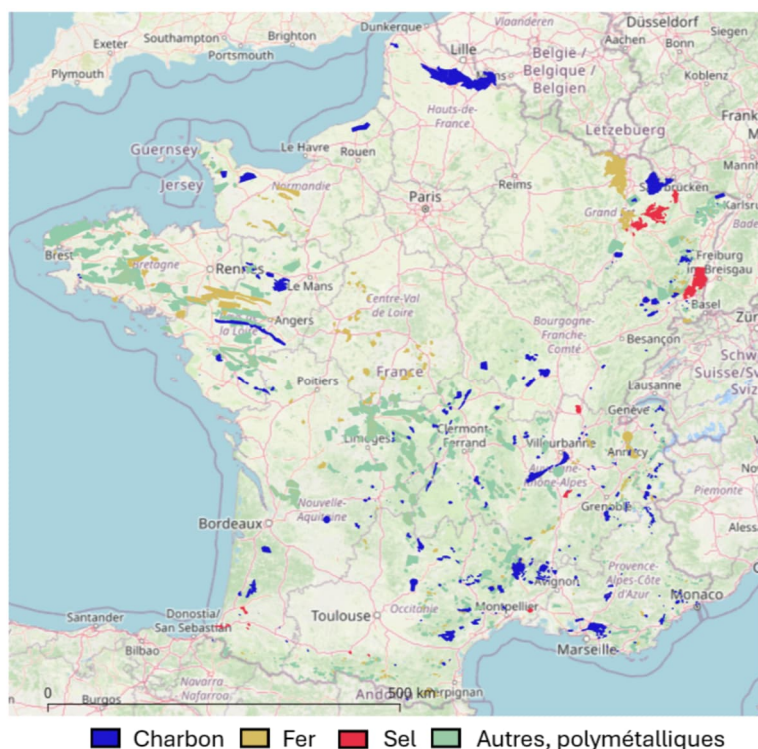


Figure 1 – Nature et localisation des principaux bassins miniers français.

La France a progressivement vu ses sites d'extraction fermer et notamment ceux qui ont intéressé les grands bassins miniers (cf. Figure 1).

La cessation de l'activité minière n'a pas pour autant induit la disparition des risques et nuisances susceptibles d'affecter les terrains de surface situés dans l'emprise des anciennes exploitations. Ainsi, des années après la cessation des activités d'extraction minière (dans la période dite d'après-mine ou de post-minier), ces phénomènes de production, d'accumulation, voire de dégagement, de gaz de mine peuvent perdurer et ainsi faire peser des risques (ou tout du moins des nuisances) non seulement sur les personnes et sur les biens présents en surface mais aussi sur l'environnement.

Dans une optique pédagogique, le présent document se propose de décrire et d'illustrer de façon synthétique :

- l'origine des mélanges gazeux présents dans les anciens travaux miniers souterrains ;
- les différentes voies et phénomènes de transfert de ce gaz jusqu'à la surface, qui constituent le « cœur » du présent document ;
- ainsi que la gestion et la prévention des phénomènes redoutés en lien avec la libération des gaz de mine en surface dans un contexte post-minier.

Remarque :

On notera que les problématiques particulières ci-dessous listées ne sont pas traitées dans ce document qui se veut généraliste :

- la présence au sein d'anciens travaux miniers, de radon et de produits gazeux spécifiques générés par les combustions souterraines (autres que le CO et le CO₂) ; cf. § 3.2 ;

- le cas particulier des hydrocarbures¹ (liquide ou gazeux) et notamment le cas des mines d'hydrocarbures, qui, pour ces dernières et dans la majorité des cas, ne constituent pas un réservoir post-minier complexe ;
- le cas particulier des mines de sel exploitées par dissolution² (Ineris, 2023) qui, pour ces dernières et dans la majorité des cas, ne constituent pas un réservoir post-minier complexe.

2.1 Les travaux miniers souterrains en Europe (hors hydrocarbure)

2.1.1 Contexte général

En Europe (et en France notamment), l'exploitation minière souterraine remonte bien avant l'ère industrielle. Néanmoins, les travaux miniers souterrains ont principalement connu une véritable expansion avec la révolution industrielle au XIX^{ème} siècle.

Pendant cette période, l'extraction massive de **charbon**, fer, cuivre, plomb et d'autres matières premières minérales essentielles à l'industrialisation a permis l'essor de l'industrie lourde, contribuant ainsi au développement économique global. Les mines de charbon ont, en particulier, joué un rôle crucial en approvisionnant en énergie les usines et centrales thermiques³.

Les méthodes d'extraction souterraines, bien que variées, reposent toutes sur un principe commun : retirer les minéraux ciblés (ou la roche les contenant) ou le **minéral** du sous-sol tout en assurant la stabilité des **galeries** creusées.



Figure 2 – Photographie d'une galerie desservant la mine d'argent de Schwaz (Autriche) ; crédit : A. Gouzy.

Outre les contraintes imposées par le contexte géologique local d'une exploitation (profondeur, épaisseur, orientation, ... des couches exploitées), les techniques d'extraction ont évolué au fil du temps, notamment dans l'objectif d'optimiser la sécurité des mineurs mais aussi dans l'optique d'améliorer les rendements. Chaque exploitation minière souterraine possède donc des caractéristiques qui lui sont propres et qu'il convient d'appréhender si l'on souhaite comprendre son fonctionnement.

2.1.2 État actuel de l'exploitation minière souterraine en France

Même s'il existe encore des mines souterraines en exploitation en France (notamment pour l'extraction de sel en Meurthe-et-Moselle, de calcaires et de **schistes bitumineux** dans l'Ain, ...), la fermeture des

¹ En droit français, les hydrocarbures liquides ou gazeux sont des substances qui relèvent du régime légal des mines.

² La méthode d'extraction du sel par dissolution est largement utilisée en France et dans le monde, en raison de sa capacité à atteindre de grandes profondeurs (allant jusqu'à plusieurs milliers de mètres), ce qui permet une production de sel plus importante par rapport à la technique minière tout en préservant une rentabilité économique (Ineris, 2023).

³ Bien qu'anecdotique, en France, en 2024, EDF indique qu'encore 0,1 % de la production d'électricité est basée sur la combustion de charbon (contre 33 % au niveau mondial) ; <https://www.edf.fr/groupe-edf/comprendre/production/thermique/thermique-en-chiffres> (consulté en juillet 2025).

dernières mines souterraines, notamment de charbon, au début des années 2000 a marqué un fort recul de cette pratique industrielle. Ainsi, nous considérons, qu'à cette époque, nous sommes passés d'un « contexte minier » à un contexte « post-minier ». Le contexte post-minier perdure encore de nos jours : en effet, les conséquences⁴ de l'extraction minière souterraine sont gérées et cette gestion se poursuivra sur le temps long.

La Figure 3 ci-après présentée, schématise les principaux éléments que l'on peut actuellement retrouver sur un site marqué par une ancienne exploitation minière souterraine. Certains de ces éléments peuvent encore contribuer à des phénomènes de production, d'accumulation voire de dégagement de gaz de mine.

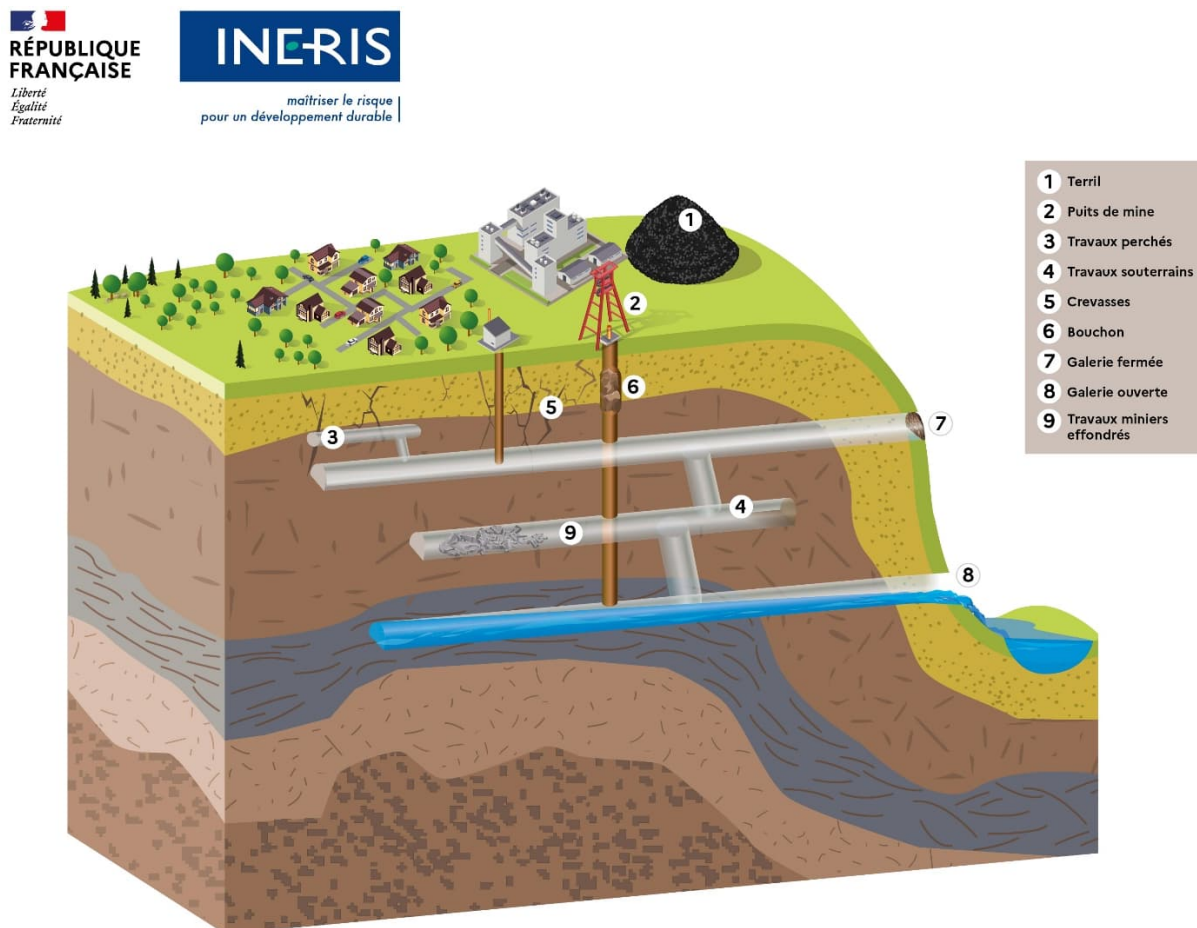


Figure 3 – Schématisation des principaux éléments d'un ancien site minier souterrain.

Remarque :

En France, les aspects de sécurité des ouvrages miniers (effondrement, risque de chute, ...) et les principales problématiques environnementales (pollution des sols et des eaux) ou de santé publique (risque d'exposition, d'asphyxie voire d'intoxication) sont pris en compte depuis de nombreuses années. Ce n'est que plus récemment qu'il y a eu une prise de conscience⁵ de l'impact de ces anciennes activités industrielles sur des phénomènes comme le changement climatique, notamment à travers le potentiel transfert vers l'atmosphère de gaz à effet de serre produits au sein des anciens travaux miniers souterrain.

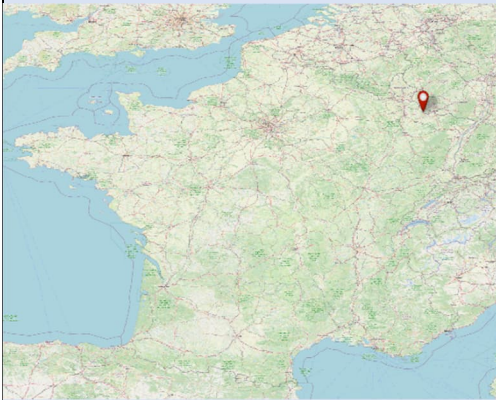
⁴ C'est la survenance de phénomènes ou nuisances (comme l'émission de gaz depuis les anciens travaux souterrains qui est traitée dans ce document) qui conduit aujourd'hui l'Etat à gérer les conséquences de l'arrêt des activités minières.

⁵ Notamment à travers l'édiction du règlement (UE) 2024/1787, adopté le 13 juin 2024, visant à réduire les émissions de méthane dans le secteur de l'énergie (incluant les anciennes mines de charbon et les anciens puits d'hydrocarbures).

En France, tout comme à l'étranger, dans de nombreuses situations, il conviendrait donc de se réinterroger :

- sur les potentiels impacts des anciens sites miniers sur l'environnement à travers le prisme du changement climatique ;
- à contrario, sur les effets possibles du changement climatique sur les phénomènes expliquant le transfert des gaz depuis les anciens travaux miniers souterrains.

A. Quelle est la dernière mine française de charbon à avoir fermé ?



Il y a une vingtaine d'années, en 2004, la dernière mine souterraine française de charbon fermait.

Il s'agit de la mine de la Houve, située à Creutzwald en Moselle, qui a fonctionné sur une durée d'une centaine d'années (de 1898, date du début de l'extraction de charbon à sa fermeture en 2004).

On estime que cette mine a produit plus de 100 millions de tonnes de charbon au cours de sa période d'exploitation.

Pour mémoire : En 2004, les travaux atteignaient une profondeur de 900 mètres. À cette date, 410 agents y étaient employés (comptant 120 mineurs).

2.1.3 Focus : Les mines souterraines de charbon

En France, les anciennes exploitations souterraines de charbon tiennent une place particulière dans les études des *aléas* et de risques d'émission de gaz de mine menées par l'*Ineris* en relation avec *GEODERIS* : en effet, durant leur période de production, ces exploitations sont les plus sujettes à la production de gaz de mine (le « fameux *grisou* » ; cf. encadré présenté au §C, page 16). Par le passé, cette activité industrielle a souvent été entachée d'accidents miniers, parfois mortels, liés à des dégagements de gaz de mine suivis de leurs explosions ou « *coups de grisou* ». Néanmoins, il convient de garder à l'esprit que les exploitations minières souterraines d'autres minerais que le charbon peuvent présenter des problématiques « gaz de mines » en contexte post-minier.

Pour une exploitation souterraine de charbon (par opposition aux installations à ciel ouvert où l'exploitation se fait directement depuis la surface dans les situations où le charbon est à l'*affleurement* ou bien très peu profond), afin d'atteindre les couches de minerais situées en profondeur, il faut creuser dans le sous-sol et s'y enfoncer parfois, voire souvent, profondément.

À titre illustratif, rappelons qu'en France, du charbon a été exploité jusqu'à des profondeurs dépassant les 1 000 mètres dans les grands bassins charbonniers de Lorraine, du Centre Midi, du Nord Pas de Calais, de Provence...

Dans la plupart des cas, la profondeur où le charbon est présent est atteinte par le creusement d'un *puits* (voire d'un couple de puits dont, schématiquement, l'un assure l'accès des travailleurs et l'autre la ventilation des zones de travaux) auquel se rattachent les galeries desservant les zones où le charbon est prélevé. Dans les zones minières, des kilomètres de galeries souterraines peuvent ainsi avoir été creusées dans l'optique d'exploiter la ressource. Ces galeries (et autres ouvrages techniques qui y sont apparentés) représentent ainsi d'impressionnants volumes de vides creusés au sein ou à proximité des gisements.



Figure 4 – Photographie d'une galerie desservant une mine de charbon ; crédit : Ineris.

2.2 Contexte spécifique au transfert des gaz au sein des réservoirs post-miniers

Les émissions des gaz depuis les anciens travaux miniers souterrains constituent un sujet d'étude bien documenté qui est appuyé par de nombreuses publications de référence. Dans le contexte français, le rapport Évaluation de l'aléa « Gaz de mine » (Ineris, 2016) développe une approche scientifique dédiée à l'établissement de l'aléa « gaz de mine ». Le présent document n'a ainsi pas vocation à reprendre les éléments qui y sont déjà exposés mais se propose de synthétiser⁶ et d'illustrer les phénomènes à appréhender pour comprendre le fonctionnement d'un réservoir souterrain post-minier vis-à-vis de ses éventuelles émissions de gaz de mine en surface.

Rappelons ainsi que notre principal objet d'étude, que sont les réservoirs souterrains post-miniers, est particulièrement adapté à l'analyse du phénomène redouté de remontée en surface de gaz de mine susceptibles de présenter des dangers ou des nuisances. En effet, les anciennes mines souterraines sont à même de réunir les trois éléments principaux, nécessaires pour observer l'apparition du phénomène redouté illustrés par la :

- ① la présence de vides résiduels constituant un milieu plus ou moins confiné pouvant contenir/accumuler un gaz de mine (cf. encadré présenté au §B page 14) ;
- ② la présence de gaz dangereux ou d'atmosphères appauvries en oxygène (cf. §3.2) ;
- ③ les possibilités de production et de transfert de ces gaz en quantités significatives, vers la surface.

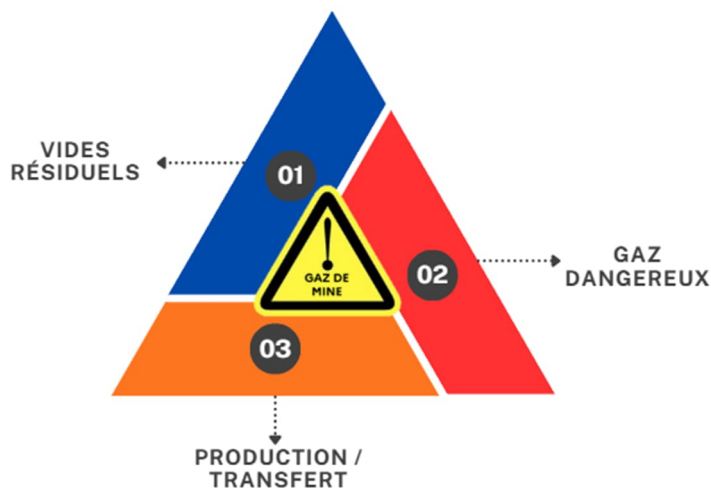
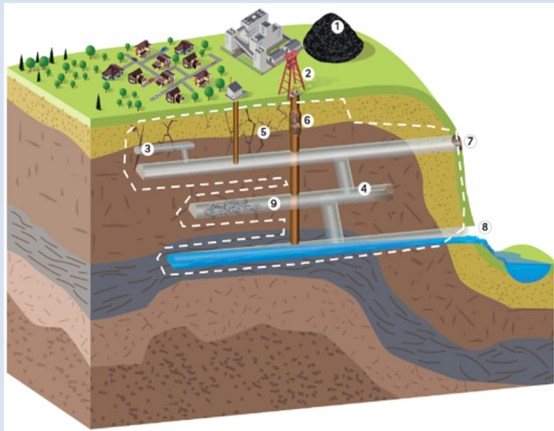


Figure 5 - « Triangle » de l'émission du gaz de mine en surface présentant les composantes nécessaires à l'observation d'un transfert significatif.

⁶ Pour une vision plus large de cette problématique, l'auteur recommande de consulter la littérature disponible sur le sujet, notamment Didier (2001) ; Pokryszka *et al.* (2005) ; Le Gal (2012) ; ...cf. § 7, page 30.

B. Qu'est-ce qu'un réservoir post-minier ?



Schématisation d'un réservoir post-minier

Les vides résultant de l'activité minière (travaux non *remblayés* ou bien encore travaux remblayés ou *foudroyés* présentant une certaine porosité) constituent un espace permettant le dégagement, la production et l'accumulation de gaz de mine. Ces vides perdurent au-delà de la cessation des activités industrielles et, s'ils ne sont pas *ennoyés*, constituent un véritable réservoir souterrain post-minier⁷.

Il s'agit d'ensembles plus ou moins interconnectés, constitués des vides résiduels d'exploitation (cavités, galerie, conduits techniques, ...) ainsi que des terrains avoisinants perturbés par l'exploitation, donc présentant a priori une fracturation et une porosité plus importantes, comparativement à leur niveau naturel (avant exploitation).

Pour mémoire : Selon l'étendue de l'exploitation, la quantité de matériau extrait, le comportement des terrains, le niveau d'ennoyage etc., les réservoirs post-miniers peuvent, dans certaines configurations, atteindre des volumes très importants (quelques millions à dizaines de millions de mètres cubes pour une mine de charbon ou de fer bien développée).

⁷ Ce phénomène est d'autant plus sensible qu'il se déroule en l'absence de ventilation naturelle ou artificielle.

3 Le gaz de mine

3.1 Principaux gaz constituant le gaz de mine (ou grisou)

Le gaz de mine, présent dans les anciens travaux miniers souterrains, est constitué d'un mélange, en quantités variables, de gaz pouvant soit provenir de la surface, soit avoir été créés et/ou libérés à la suite de l'exploitation industrielle des minerais. Afin de mieux appréhender cette grande variabilité en composition et en concentration des gaz constituant un « gaz de mine », nous parlons usuellement de « mélange gazeux ».

Du gaz de mine peut être rencontré dans tous les types d'exploitations souterraines de minerais (charbon, fer et autres métaux, ...).

Le **grisou**, quant à lui, est un terme populaire associé aux exploitations souterraines de charbon et de potasse qui :

- n'a pas de définition scientifiquement arrêtée ;
- désigne un mélange gazeux variable en composition et en concentration pouvant se dégager des couches de charbon exploitées.

Le grisou est très souvent associé à un caractère d'explosivité lors de la mise en présence de ce gaz avec l'atmosphère présente dans les travaux miniers et de celle d'une source d'inflammation, les explosions étant populairement appelées « coups de grisou » (cf. encadré présenté au §C page 16).

Les atmosphères rencontrées au sein des différents réservoirs post-miniers peuvent présenter des compositions très différentes d'un site à l'autre notamment en fonction :

- du minerai exploité ;
- de la nature de la roche encaissante ;
- de la présence de gaz préalablement à la mise en place d'une activité extractive, d'éventuelles réactions géochimiques pouvant se dérouler dans le réservoir ;
- de l'intensité des échanges se déroulant entre le réservoir et l'atmosphère de surface ;
- de la présence d'une ventilation naturelle des travaux ;
- ...

Néanmoins, généralement, les composantes les plus fréquemment rencontrées d'un gaz de mine incluent :

- **Le méthane⁸ (CH₄)** : Le méthane est principalement émis par les anciennes mines de charbon et les exploitations de pétrole (et plus anecdotiquement dans les mines de sel, de potasse, de bauxite, de schistes bitumineux ou encore de **calcaires asphaltiques**). Ce gaz est considéré comme un **gaz à effet de serre** et est incolore, inodore et inflammable (lorsqu'il est mélangé dans l'air à des teneurs situées entre 5 et 15 %) ;
- **Le dioxyde de carbone (CO₂)** : Le dioxyde de carbone peut être rencontré dans tous les types d'exploitations souterraines du fait de phénomènes de combustion⁹, d'oxydation de matières carbonées ou bien encore de réactions géochimiques influencées par l'exploitation. Ce gaz est considéré comme un gaz à effet de serre et est incolore, inodore, non inflammable et toxique ;
- **Le monoxyde de carbone (CO)** : Le monoxyde de carbone est couramment rencontré dans les anciennes exploitations de charbon notamment du fait de phénomènes de combustion⁹ en situation de disponibilité restreinte d'oxygène. Ce gaz est incolore, inodore, inflammable (lorsqu'il est mélangé dans l'air à des teneurs supérieures à 12 %) et toxique ;
- **L'hydrogène sulfuré (H₂S)** : L'hydrogène sulfuré (ou sulfure d'hydrogène) peut être rencontré dans tous les types d'exploitations souterraines du fait de phénomènes de décomposition (par

⁸ À proprement parler, il conviendrait de citer le méthane et ses homologues supérieurs (éthane, propane, butane, ...). Néanmoins le méthane est toujours très largement prépondérant parmi les hydrocarbures observés.

⁹ En présence d'une combustion souterraine, d'autres gaz spécifiques peuvent être générés (hydrocarbures aromatiques, oxydes d'azote, oxydes de soufre, etc.). Leur présence sur le terrain étant extrêmement limitée, ces composants ne sont listés ici qu'à titre d'exhaustivité.

exemple la décomposition des vieux bois de soutènement) ou de réactions géochimiques influencées par l'exploitation, voire par l'action de certaines bactéries présentent dans les anciens travaux miniers. Ce gaz incolore, qui présente une odeur caractéristique d'œuf pourri décelable à de très faible concentration, est également toxique et inflammable (lorsqu'il est mélangé dans l'air à des teneurs supérieures à 4 %) ;

- **Les composantes de l'air atmosphérique** : Pour mémoire, la composition d'un air pur et sec est la suivante (teneurs volumiques) : oxygène 20,9 % ; azote 78,1 % ; argon 0,9 % ; dioxyde de carbone 0,04 % ; autres gaz (Ne, He, NO, CH₄...) 0,06 %.

C. Dans une mine de charbon, d'où vient le méthane, constituant redouté du grisou ?



Représentation simplifiée
d'une molécule de méthane

Avant exploitation, le méthane (ainsi que certains autres gaz constitutifs du grisou) se trouve « piégé », majoritairement sous forme adsorbée, dans le matériau exploité (le charbon) et, de manière minoritaire, sous forme libre dans les pores et fissures des roches encaissantes.

Pendant l'exploitation minière (et après celle-ci), du fait de la détente des terrains liée à la création de vides souterrains, le méthane se dégage du charbon abattu et des terrains influencés par l'exploitation et peut se mêler au mélange gazeux présent au sein des travaux miniers.

Le dégagement gazeux, même s'il est lent et qu'il adopte une cinétique fortement influencée par les caractéristiques locales du site, peut donc perdurer durant une longue période en phase post-minièr, jusqu'à l'établissement d'un nouvel équilibre entre le méthane encore contenu dans les roches et le mélange gazeux présent dans les vides souterrains.

Pour mémoire : En France le dernier coup de grisou recensé pour une mine de charbon date d'une quarantaine d'années avec la catastrophe du Puits Simon (à Forbach en Moselle) qui est à l'origine de la mort de 22 mineurs.

De même, rappelons que, même si la majorité des coups de grisou est liée à l'exploitation du charbon, l'exploitation d'autres minerais peut également donner lieu à ce type d'accidents : citons, à titre d'exemple, l'accident du 23 juillet 1940 dans les mines de potasse d'Alsace qui fit une vingtaine de victimes.

Remarque :

Le méthane (ainsi que les éventuels homologues supérieurs de cet hydrocarbure) présent dans le gaz de mine peut, dans certaines conditions (en particulier des conditions opérationnelles liées à la disponibilité de quantités suffisamment importantes de gaz de mine ainsi que de concentration en hydrocarbures de ce mélange gazeux) être valorisé, notamment à travers sa combustion destinée à la production d'électricité (voire de chaleur).

3.2 Autres gaz pouvant être présents (ou absents) d'un gaz de mine

Dans certaines configurations géologiques, le mélange gazeux constitutif du gaz de mine peut contenir du radon : le radon est un gaz radioactif naturellement présent dans les roches et constitue, dans une grande majorité des cas, un composant très mineur du gaz de mine (traces). Ce gaz est inodore,

incolore et inerte chimiquement¹⁰. Le radon n'est pas produit spécifiquement du fait de l'activité minière. Néanmoins, le réseau de vides et/ou de la fracturation des terrains résultant de l'exploitation minière peut faciliter son transfert vers la surface.

Contrairement aux autres composantes potentielles du gaz de mine qui peuvent présenter un risque immédiat pour la santé ou les biens (intoxication, asphyxie, inflammation, explosion), l'exposition au radon présente un risque potentiel pour la santé en situation d'exposition sur de longues périodes¹¹. Lorsque ce gaz est présent dans le mélange gazeux présent dans les anciens travaux miniers, il doit donc être géré de façon spécifique. Ce document ne traitera pas de cette situation.

Concernant les produits spécifiques liés aux combustions souterraines et non traités au paragraphe précédent (hydrocarbures aromatiques, oxydes d'azote, oxydes de soufre, etc.), leur présence sur le terrain est limitée à des cas très rares, isolés et, habituellement, de faible étendue géographique. Là encore, le risque afférent est plutôt de type chronique.

Enfin, précisons que même en l'absence de gaz toxique il convient également de s'intéresser au déficit d'oxygène dans le gaz de mine qui peut potentiellement présenter un risque pour la santé (par asphyxie). En effet, les gaz ci-avant listés (cf. §3.1) peuvent être libérés en quantité telle qu'il peut être possible d'observer une forte diminution de la concentration en oxygène du mélange gazeux par simple dilution. De même, la mise en place de réactions géochimiques au sein des réservoirs miniers peut consommer l'oxygène présent et ainsi aboutir à la désoxygénation totale ou partielle du gaz de mine.

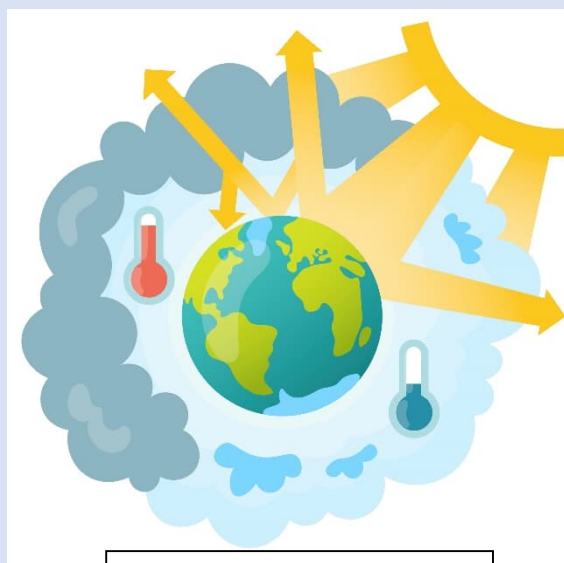
¹⁰ Cf. <https://www.asn.fr/information/dossiers-pedagogiques/le-radon-et-la-population#le-radon-en-france> (site consulté en juillet 2025).

¹¹ Risque lié à l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants de laquelle résulte un accroissement consécutif de la probabilité de voir advenir des maladies cancéreuses.

D. Libérer du méthane dans l'atmosphère est-ce problématique si ce gaz n'est pas assez concentré pour présenter un risque d'inflammation/explosion ?

Au-delà des risques d'inflammation et d'explosion que la présence d'un mélange suffisamment concentré en méthane (entre 5 et 15 %) peut faire peser sur les personnes et les biens, la libération de ce gaz dans l'atmosphère impacte également l'environnement.

En effet, le méthane est considéré comme un gaz à effet de serre. Toute augmentation de sa présence dans l'atmosphère se traduit donc potentiellement par le renforcement des perturbations climatiques et de la hausse de la température globale de la planète (autrement dit, cela participe au changement climatique).



Schématisation de l'effet de serre à l'échelle planétaire

Pour mémoire : Afin de pouvoir comparer les gaz à effet de serre entre eux, la capacité de chaque gaz présent dans l'atmosphère à renvoyer de l'énergie vers le sol (effet de serre) est évalué comparativement à celle du CO₂. On parle de potentiel de réchauffement global (PRG). Le PRG d'un gaz dépend de sa capacité à intercepter et renvoyer les rayonnements solaires ainsi que de sa durée de vie dans l'atmosphère. La valeur du PRG est déterminée selon une échelle de temps, généralement 100 ans. Le PRG se mesure relativement au CO₂ et s'exprime en tonnes d'équivalent CO₂. Pour exprimer les émissions de gaz à effet de serre en tonnes d'équivalent CO₂, les émissions de chaque gaz sont pondérées par un coefficient fonction de son PRG. A titre d'exemple, ce coefficient est de 1 pour le CO₂ et de 25 pour le CH₄.

4 Transfert du gaz de mine des travaux miniers vers la surface

4.1 Voies de transfert du gaz de mine vers la surface

Après la fermeture d'une exploitation minière souterraine, un certain nombre de voies de transfert des gaz existe, entre le fond et la surface (cf. Figure 6), résultant de l'activité minière. Ces voies peuvent être :

- totalement ou partiellement ouvertes (notamment les orifices existants tels que les *puits* non bouchés ou de façon non hermétique, les *galeries* ouvertes ou jouant le rôle de point de *débordement* des eaux de mine, ...)
- des terrains présentant une forte *perméabilité* (notamment les terrains de recouvrement fracturés, de faible épaisseur) ;
- ou des spécificités géologiques comme des *failles* tectoniques.

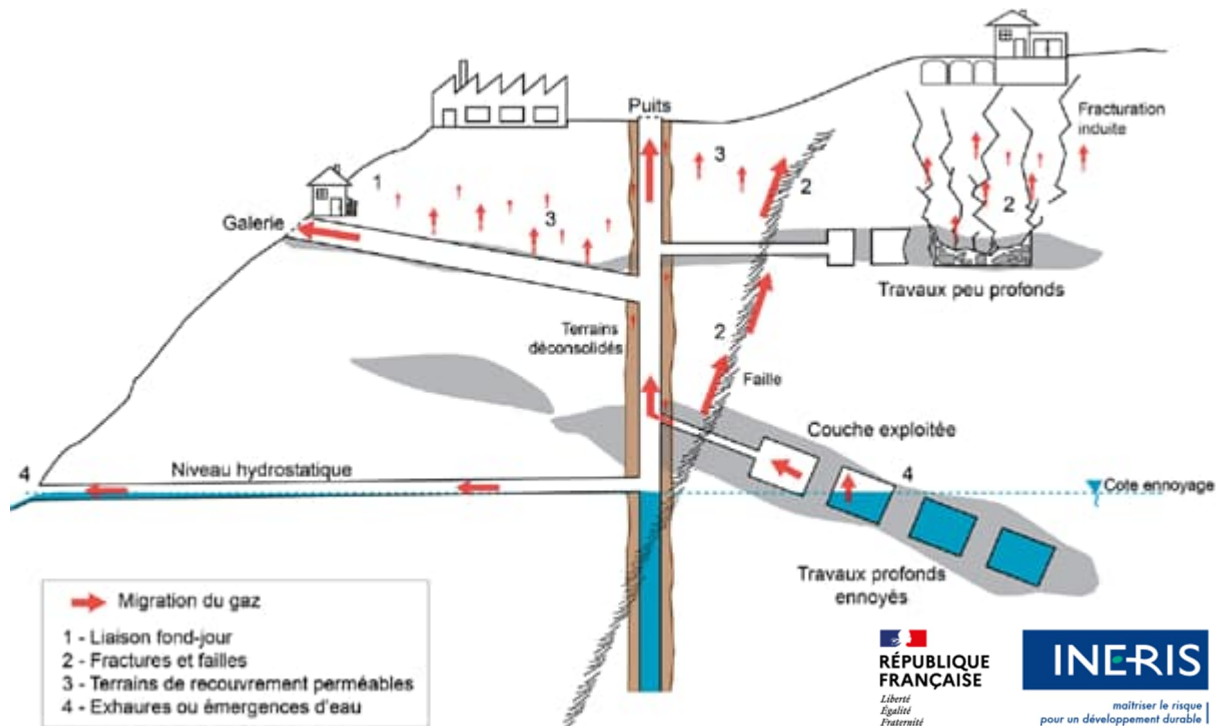


Figure 6 – Principales voies de transfert du gaz de mine en lien avec une ancienne exploitation minière (d'après Ineris, 2016).

Ces différentes voies sont considérées comme voies de transfert du gaz de mine dès l'arrêt de la ventilation mécanique¹² des travaux miniers à la suite de la fermeture de l'exploitation souterraine.

4.2 Mécanismes de transfert du gaz de mine vers la surface

Le mélange constitutif du gaz de mine peut être libéré en surface :

- sous forme gazeuse, via les voies de transfert identifiées précédemment ;
- sous forme dissoute dans de l'eau, via les eaux d'*exhaure* minière ou de débordement ;
- ou de façon simultanée, sous forme gazeuse et forme dissoute.

¹² Lors de l'exploitation d'une mine souterraine, une ventilation mécanique des travaux est mise en place (et maintenue jusqu'à la cessation des opérations minières) afin d'assurer l'approvisionnement de la mine en air extérieur (dit « air frais ») et par là même éliminer/diluer les contaminants tels que les poussières, les gaz issus des opérations minières tout comme ceux se libérant des terrains exploités.

Certains mécanismes peuvent accélérer (ou bien freiner) la libération en surface de gaz de mine. Sans viser à l'exhaustivité, les paragraphes suivants illustrent les principaux mécanismes que l'on peut rencontrer (ces différents mécanismes pouvant se combiner entre eux).

Remarque :

Notons que, même si les quantités de gaz en jeu peuvent varier, les mécanismes de transfert du gaz de mine sont identiques quels que soient le minéral exploité et le type d'exploitation souterraine considérée (l'exploitation de charbon présentant fréquemment des quantités de gaz de mine libérées supérieures à celles observées pour les exploitations de métaux, de calcaire asphaltique, de sel de potasse, de schistes bitumineux, ...).

4.3 Mise en pression du réservoir post-minier

Si le mélange gazeux contenu dans un réservoir souterrain post-minier est mis en pression (c.à.d. atteint une pression supérieure à celles rencontrées habituellement en surface), un écoulement du gaz de mine depuis le réservoir vers la surface peut être observé via des interconnexions entre les travaux et la surface (cf. Figure 7).

Les raisons fréquemment observées responsables de la mise en pression d'un réservoir post-minier sont :

- Le dégagement des gaz initialement présents dans le gisement (adsorbés ou bien présents dans les fractures du massif rocheux) ;
- La génération au sein des anciens travaux miniers de réactions bio/géochimiques libérant des gaz néoformés.

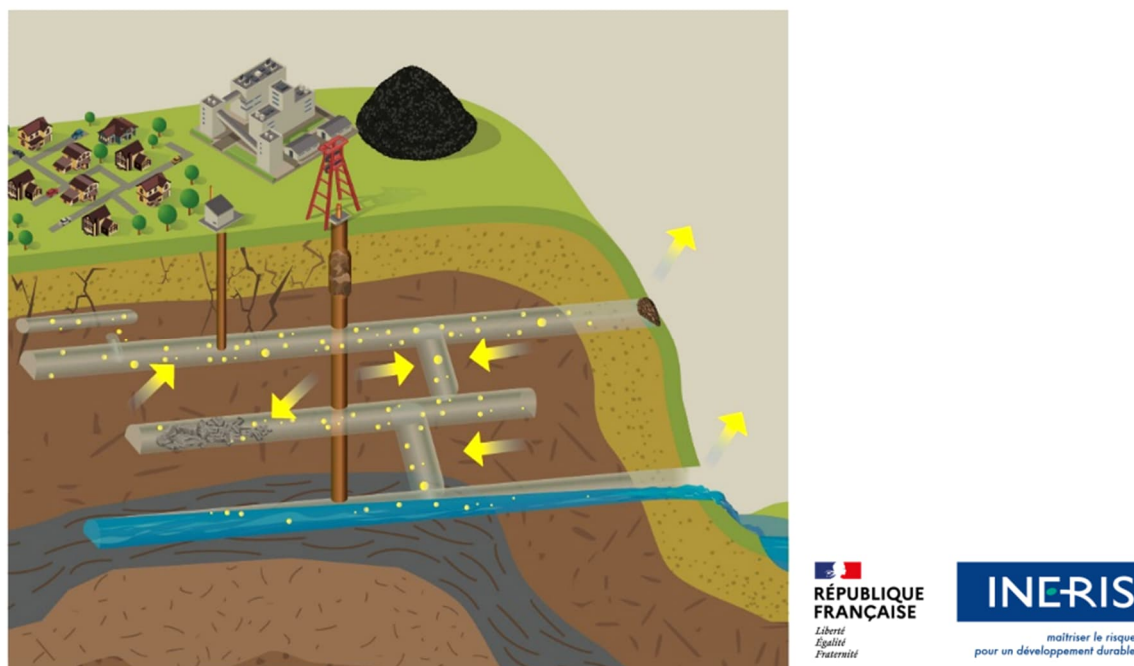


Figure 7 – Schématisation du mécanisme d'écoulement du gaz de mine par mise en pression du réservoir post-minier.

Dans cette situation, le transfert du gaz de mine vers la surface s'explique par un différentiel de pression observé entre les travaux miniers et l'atmosphère extérieure. Il est évident que les conditions météorologiques rencontrées à l'extérieur (notamment la pression atmosphérique) influent ainsi sur le phénomène (cf. Figure 8).

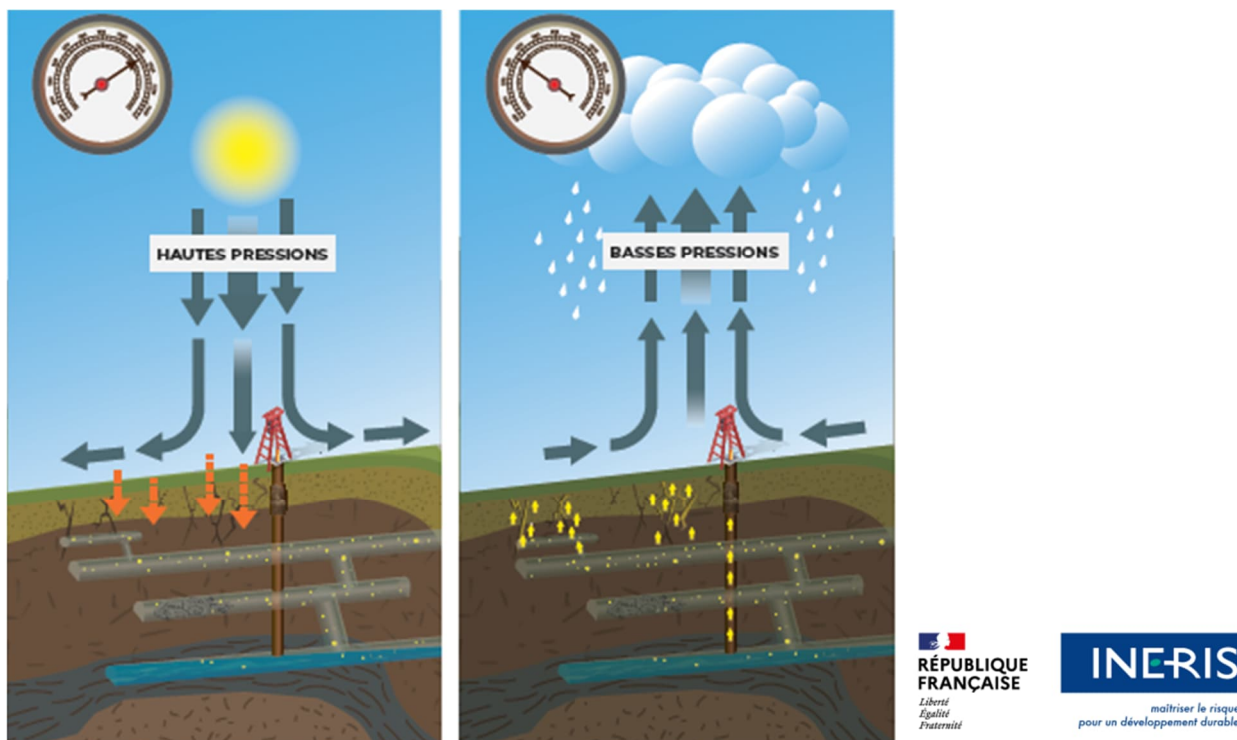


Figure 8 – Schématisation de l'effet de la pression atmosphérique sur le transfert des gaz de mine ; à gauche par mise en dépression du réservoir post-minier par rapport à l'atmosphère ; à droite par mise en surpression du réservoir post-minier par rapport à l'atmosphère.

Dans des conditions météorologiques se traduisant par une pression atmosphérique importante, le transfert de gaz de mine vers la surface peut être freiné voire annulé. Dans des situations extrêmes, il est même possible d'observer un mouvement inverse se traduisant par la pénétration dans les anciens travaux miniers de gaz provenant de l'atmosphère libre de surface.

Dans des conditions météorologiques se traduisant par une pression atmosphérique faible, le transfert de gaz de mine vers la surface peut être facilité voire accéléré. Il est ainsi possible d'observer un mouvement aboutissant à l'émission en surface du mélange gazeux provenant des anciens travaux miniers souterrains.

L'émission de gaz de mine à l'atmosphère par mise en pression du réservoir post-minier est ainsi un phénomène dynamique qui peut varier (voire s'inverser) dans le temps et ce de manière relativement rapide (au rythme du passage des dépressions atmosphériques par exemple). De surcroît, le transfert des gaz peut s'accélérer dans des zones géologiquement instables (via la création de nouvelles fractures) ou en raison de changements climatiques qui peuvent affecter la pression atmosphérique et sa fréquence d'oscillation.

4.4 Mécanisme de tirage thermique

L'écart thermique constaté entre l'atmosphère en surface et les gaz présents dans les anciens travaux miniers souterrains engendre des mouvements de gaz liés aux changements de masse volumique des gaz présents. Ces mouvements peuvent entraîner l'émission de gaz de mine en surface (ou bien, à l'opposé, la pénétration d'air « frais » à l'intérieur des anciens travaux miniers) (cf. Figure 9).

Ce mécanisme est appelé « tirage thermique » par analogie avec le fonctionnement d'une cheminée (les gaz « chauds » sont moins denses et ont tendance à s'élever alors que les gaz « froids » sont plus denses et ont tendance à adopter une position basse). Il se manifeste ainsi tout particulièrement dans les situations où il existe une dénivellation topographique importante entre les différentes parties, interconnectées et ouvertes à l'atmosphère, du réservoir post-minier.

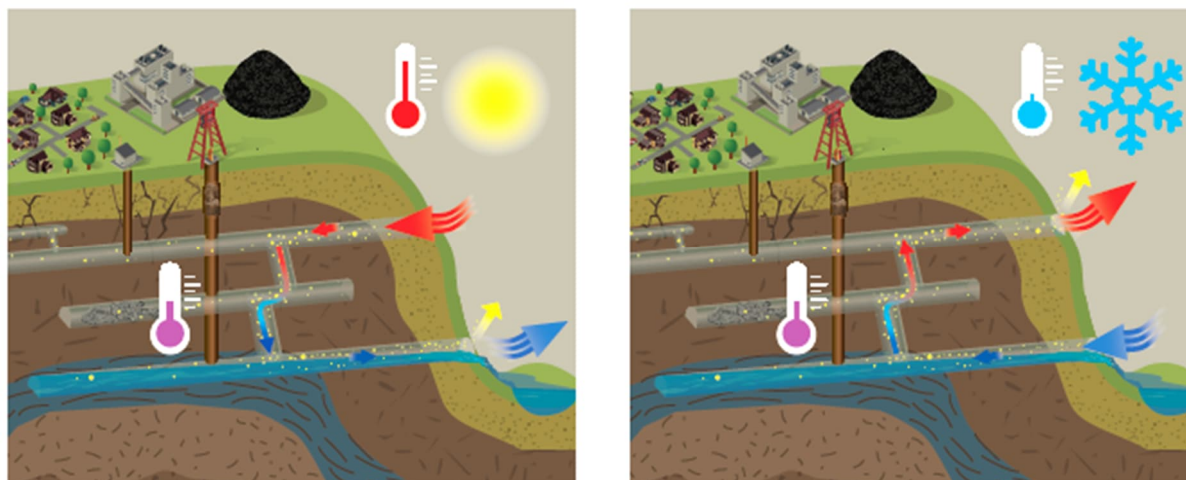


Figure 9 – Schématisation de l'effet de la différence de température entre l'atmosphère et celle observée dans les anciens travaux miniers sur le transfert des gaz de mine.

Les températures observées dans les anciens travaux miniers souterrains situés à proximité de la surface s'échelonnent principalement sur la gamme entre 10 et 14°C. Ainsi, dans des conditions météorologiques se traduisant par une température atmosphérique forte (i.e. > 14°C), les points les plus bas « topographiquement », où les travaux miniers sont en contact avec l'extérieur, peuvent se révéler émetteur de gaz de mine (alors que les points hauts pourront se distinguer par la pénétration locale d'air extérieur dans les travaux miniers). De plus, cette situation s'inverse quand la température atmosphérique est basse (i.e. < 10 °C).

L'émission de gaz de mine à l'atmosphère par tirage thermique du réservoir post-minier est ainsi un phénomène dynamique qui peut se modifier (voire s'inverser) dans le temps (en fonction du cycle jour/nuit mais aussi en fonction de la saison) et varier dans l'espace. De surcroît, le transfert des gaz peut s'accélérer pour les réservoirs post-miniers présentant des connexions franches à l'atmosphère de surface ou en raison de changements climatiques qui peuvent affecter fortement les températures des masses d'air.

4.5 Mécanisme de pistonnage par ennoyage des vides miniers

Dans les situations géologiques propices à sa survenue, *l'ennoyage* des anciens travaux miniers est un phénomène dynamique qui peut s'étendre sur plusieurs années (voire plus d'un siècle dans des conditions particulières). Il en résulte une diminution du volume des vides miniers résiduels, par envahissement de ces vides par les eaux souterraines, et ainsi la montée en pression des gaz qui y sont stockés (phénomène dit de « pistonnage »).

Comme illustré par la *Figure 10*, la période de remontée des eaux constitue donc une période transitoire pouvant entraîner l'émission en surface des gaz de mine (et ce de façon d'autant plus marquée que l'ennoyage est rapide). Notons également, que la conjonction entre la hauteur du front d'ennoyage et la configuration des travaux peut entraîner une modification en surface de la/des localisation(s) où le gaz de mine, originaire des anciens travaux miniers, est relâché à l'atmosphère.

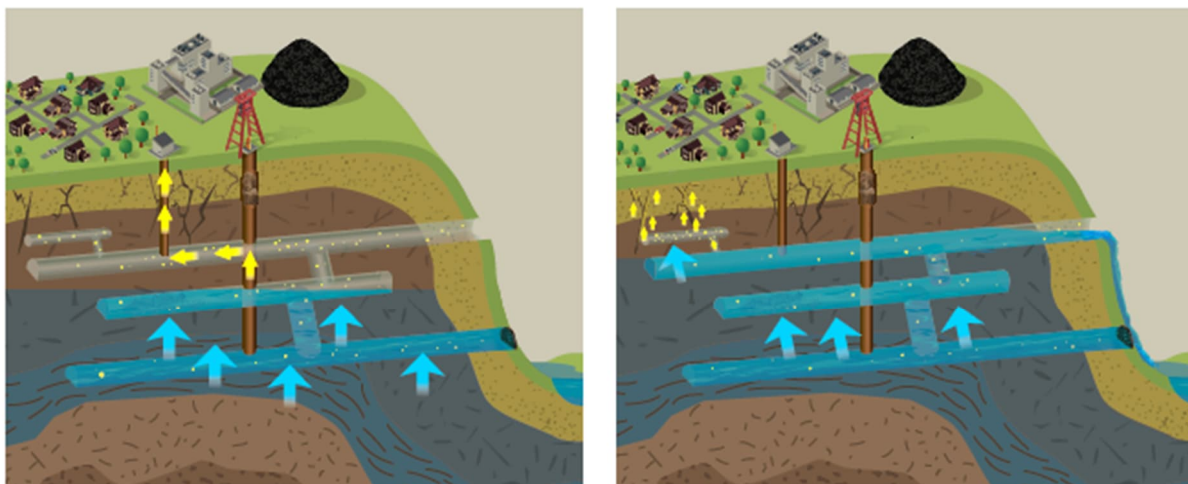


Figure 10 – Schématisation de l'effet de l'envoyage des anciens travaux miniers sur le transfert des gaz de mine vers la surface.

L'émission de gaz de mine à l'atmosphère par pistonage lié à l'envoyage du réservoir post-minier est ainsi un phénomène dynamique mais transitoire¹³ (le temps d'atteindre le niveau d'envoyage maximum des travaux miniers) dans le temps et, potentiellement, dans l'espace.

¹³ Notons tout de même que, dans certaines exploitations où l'envoyage est achevé, il peut subsister des phénomènes transitoires tels que des battements de la nappe souterraine conduisant à des remplissages et vidanges successifs de tout ou partie du réservoir post-minier, ce qui peut avoir un impact sur les émissions de gaz en surface.

E. Comment se déroule l'ennoyage d'une mine ?

Du fait de leur profondeur, la plupart des mines souterraines ont été creusées sous le niveau des nappes *aquifères*. Celles-ci peuvent comprendre, de la surface vers les profondeurs du sous-sol, une nappe libre et une ou plusieurs nappes profondes, généralement confinées (et donc en charge).

Comme les vides miniers sont à la pression atmosphérique, dès leur creusement, ils se comportent comme des drains et sont soumis à des infiltrations d'eau au *toit* ou à des venues d'eau aux *murs*. Il en résulte la nécessité d'extraire en permanence cette eau de la mine par pompage et de l'évacuer vers l'extérieur. Cela crée un « cône » de rabattement au sein de la (ou des) nappe(s) aquifère(s) recoupée(s), qui perdure pendant toute la durée d'exploitation de la mine.

En revanche, après la phase d'abandon, le pompage de cette eau est généralement arrêté, ce qui conduit à l'ennoyage de la mine car les travaux miniers - qu'ils soient vides, remblayés ou foudroyés - constituent généralement un milieu plus poreux et perméable que l'*encaissant* rocheux et forment ainsi un « aquifère minier ». La durée d'ennoyage dépend de la taille des vides miniers et de la perméabilité des aquifères encaissants, du contexte hydrologique local, ... : elle peut varier de quelques mois à quelques années, voire à plusieurs décennies (Didier *et al.*, 2006), et même plusieurs siècles comme cela est le cas dans le vaste bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais (> 40 km²).

Notons que l'on considère que, en situation d'ennoyage total des travaux miniers, l'émission de gaz de mine en surface diminue drastiquement (voire disparaît) si la *charge hydraulique* résultant de l'ennoyage de la mine exerce une contre-pression suffisante sur les terrains exploités (Tauziède et Pokryszka, 2002), voir encadré F ci-après.

F. Y'a-t-il encore des émissions de gaz de mine une fois l'ensemble des anciens travaux miniers ennoyés ?



Prélèvement d'eau de mine en vue de l'analyse de son contenu en gaz dissous : **crédit : Ineris**

Dans certaines configurations géologiques, en phase finale d'ennoyage, l'ensemble des vides miniers peut être totalement ennoyé : dans cette situation, le risque résiduel d'émission gazeuse vers la surface peut être considéré comme quasi nul (CL:AIRE, 2021; Tauziède et Pokryszka, 2002 ; Krause et Karbownik, 2019).

Néanmoins, Pokryszka et al. (2005) ont mis en évidence, en laboratoire, que du charbon finement divisé et inondé sous une mince lame d'eau peut libérer du gaz avec une cinétique de désorption très faible (environ dix fois inférieure à celle du charbon sec). En revanche, lorsque la pression d'ennoyage augmente, en lien avec la hauteur de la colonne d'eau, la cinétique de libération du gaz diminue. Ce mécanisme se poursuit jusqu'à ce que la pression de l'eau se rapproche de la pression interstitielle initiale

du gaz adsorbé, stade à partir duquel les quantités de gaz libérées deviennent insignifiantes (quelques pourcents du volume désorbable). Ainsi, une fois l'équilibre atteint, la cinétique de désorption du gaz du charbon et la quantité de méthane désorbée sont fortement réduites par la seule présence d'eau au-dessus des couches de charbon, (Pokryszka et Krause, 2007).

En conclusion, un réservoir post-minier totalement ennoyé, même sous quelques centaines de mètres d'eau, peut encore être la source d'émissions gazeuses mais de très faible intensité comparativement aux émissions observées avant l'ennoyage (notamment par diffusion de l'eau de mine chargée en gaz ou en cas de captage/débordement de mine chargée en gaz dissous).

4.6 Mécanisme de transfert des gaz de mines sous forme dissoute

Dans les vides miniers, les eaux d'infiltration présentes peuvent se charger en gaz par leur simple mise en contact avec une atmosphère contenant des gaz de mine.

Certains gaz se retrouvent ainsi présents dans l'eau sous forme dissoute selon un équilibre lié à la solubilité des gaz rencontrés, la température et la pression du mélange gazeux rencontré dans les vides miniers (la solubilité d'un gaz donné diminuant avec l'augmentation de la température de l'eau et augmentant avec la pression *hydrostatique* constatée).

Par la suite, au contact de l'atmosphère extérieure (par exemple dans le cas d'une eau de mine pompée et libérée en surface), la modification des conditions de température et de pression peut entraîner un dégazage se traduisant par la libération en surface de tout ou partie des gaz originaires des travaux miniers.

Outre les notions de cinétiques, notons que les différents gaz constitutifs du gaz de mine ont des caractéristiques de solubilité dans l'eau très différentes les uns des autres¹⁴ : le mélange gazeux obtenu¹⁵ par dégazage des eaux d'exhaure ou de débordement ne constitue ainsi qu'un témoignage indirect du mélange présent dans les anciens travaux miniers.

*À titre d'exemple, 1 m³ d'eau de mine initialement saturée en gaz sous une surpression de 1 MPa (soit une *charge hydraulique* de 100 m) et à la température de 10°C peut ainsi relarguer par détente environ 0,5 m³ de méthane et 12 m³ de CO₂ (Didier et al., 2006).*

¹⁴ Une eau de mine peut ainsi potentiellement contenir et véhiculer une grande quantité de dioxyde de carbone et de sulfure d'hydrogène (gaz très solubles) mais des quantités sensiblement plus faibles des autres gaz.

¹⁵ Il s'agit principalement du CO₂, de l'H₂S et du radon qui sont des gaz très solubles (respectivement environ 1,7 g/L, 5 g/L et 2,2 g/L à 1 bar et 20°C) ainsi que, dans une moindre mesure, du CH₄ (environ 22 mg/L).

Dans un contexte post-minier, le mécanisme de transfert de gaz vers la surface sous forme dissoute ne se présente que localement au droit des zones d'émergence (aménagées ou spontanées). Cependant, le transfert de gaz de mine vers la surface sous forme dissoute dans l'eau est difficile à évaluer car le nombre de configurations possibles est important : nature du gaz, débit d'eau, taux de saturation en gaz, cinétique de dégazage, etc.

Enfin, comme pour les mécanismes précédents, ce mécanisme peut être influencé par le changement climatique, notamment en raison des modifications du régime des pluies influençant un territoire post-minier.

4.7 Autres mécanismes

Aux mécanismes présentés dans les 3 paragraphes précédents, peuvent venir se superposer d'autres processus, notamment :

- La stratification gravitaire des gaz au sein d'un réservoir post-minier

Dans un mélange gazeux où les masses volumiques de ses différents constituants sont contrastées, les gaz, en l'absence de perturbations marquées (c'est-à-dire de mouvements aérauliques pouvant participer à l'homogénéisation du mélange), auront tendance à se stratifier en fonction de leur masse volumique. La composition d'un gaz de mine peut donc varier au sein d'un même réservoir post-minier si les anciens travaux interconnectés présentent une différence de profondeur marquée.

- Les effets des vents de surface

Dans certaines configurations topographiques, les masses d'air déplacées par les vents de surface peuvent interagir sur les gaz de mine et s'opposer et/ou favoriser leur émission en surface (notamment par effet Venturi, cf. encadré suivant présenté au §G page 26).

Ces interactions sont directement dépendantes de la topographie locale, de la présence de vents de surface et des caractéristiques de ceux-ci. Elles sont donc à la fois extrêmement variables dans le temps et dans l'espace et difficilement appréhendables.

Une fois de plus, ce mécanisme peut être influencé par le changement climatique, notamment en raison des modifications du régime des vents influençant un territoire post-minier.

G. Comment l'effet Venturi se matérialise-t-il en contexte post-minier ?

L'effet Venturi est un phénomène de dynamique des fluides selon lequel, un fluide en écoulement (assimilable à des masses d'air atmosphériques en déplacement sous l'effet des vents de surface dans le cas des émissions de gaz de mine) présente une baisse de pression là où sa vitesse augmente du fait de la section rétrécie du conduit qu'il traverse (assimilable aux reliefs abritant les anciens travaux miniers dans le cas qui nous intéresse).

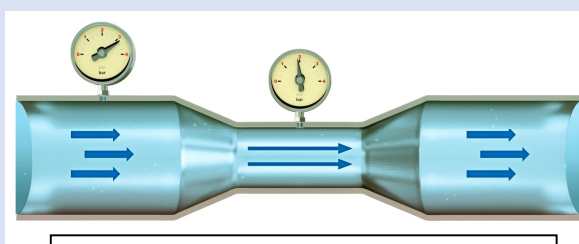


Schéma simplifié de l'effet Venturi représenté dans une canalisation

Cette diminution locale de pression peut à son tour avoir des conséquences sur le transfert des gaz de mine du fait d'une potentielle modification locale du gradient de pression entre les anciens travaux miniers et la surface, sous l'influence des vents.

5 Gestion du transfert du gaz de mine vers la surface

La possibilité d'émissions de gaz depuis les anciens travaux miniers après la fin de l'exploitation plaide pour l'étude et la mise en place de systèmes de surveillance des anciennes mines quant à cette problématique.

Cependant, la gestion de cette question peut constituer un véritable défi notamment pour les territoires où les anciennes mines sont nombreuses, fortement urbanisés, difficiles d'accès ou bien encore quand les ressources pour les surveiller sont contraintes.

5.1 Aperçu des techniques de détection et de surveillance des émissions de gaz

Lorsque les anciens sites miniers sont accessibles, il est possible de mener plusieurs types d'investigations¹⁶ in-situ. Bien que ce document n'ait pas pour objectif de lister les techniques utilisées, notons tout de même qu'il est possible de réaliser des :

- Mesures ponctuelles

Différents types de mesures ponctuelles peuvent être envisagés afin de caractériser un phénomène d'émission de gaz en surface depuis des anciens travaux miniers souterrains :

- analyse directe de la phase gazeuse émise par un ouvrage minier ouvert ou des paramètres physiques (pression atmosphérique, température, ...) dirigeant cette émission ;



crédit photos : Ineris

- prélèvement de la phase gazeuse émise par un ouvrage minier ouvert en vue d'une analyse au laboratoire ;

¹⁶ Notons qu'il convient d'avoir intégré les dynamiques des différents mécanismes ci-avant présentées afin de réaliser des mesures techniques qui soient utilisables à des fins de diagnostic.

- caractérisation de la dynamique d'émission des différentes composantes du gaz de mine à travers les terrains surplombant les anciens travaux miniers (mesure des flux de gaz émis à la surface des sols en surplomb des anciens travaux miniers),



crédit photos :
Ineris

crédit photos : Ineris

- qualification du contenu en gaz dissous dans les eaux de mines émises en surface,



crédit photos : Ineris

Pour la plupart d'entre elles, ce type de mesures s'avère rapide à mettre en œuvre et peu coûteux en matériel mais nécessite la présence d'une équipe d'opérateurs sur le terrain. Une surveillance permanente des émissions de gaz depuis les anciens travaux miniers nécessiterait ainsi le déploiement de moyens techniques robustes et télé-opérables qui eux, s'avèrent coûteux. Fort de ce constat, il nous apparaît donc difficile d'imaginer à court terme une surveillance permanente des émissions de gaz des anciens sites miniers.

- Mesures en continu

- la composition de la phase gazeuse émise par un ouvrage minier ouvert ainsi que les paramètres physiques permettant d'expliciter les émissions (photo de droite pour la mesure de la vitesse de déplacement des masses d'air dans une galerie de mine par un [anémomètre](#) ; photo de gauche pour les mesures des concentrations en gaz de l'atmosphère issue des anciens travaux miniers) peuvent également (sous certaines conditions, notamment d'accessibilité) être suivis en continu directement depuis le site minier.



crédit photos :
Ineris

Ce type de mesures nécessite des aménagements avant de pouvoir être mises en place (conception et installation des arrivées électriques par exemple) et s'avère plus laborieuse à mettre en place que les mesures ponctuelles. Si les appareils sont équipés pour être interrogés à distance (via le réseau téléphonique mobile par exemple) une surveillance permanente des émissions de gaz est envisageable. Du fait de son coût, ce type d'installation est réservée aux anciens travaux miniers présentant de forts enjeux.

Enfin précisons également que des moyens innovants sont en cours de développement sur des thématiques telles que l'émission de gaz depuis les anciens travaux miniers :

- mesures de paramètres physiques et chimiques par drone, notamment par drone volant pour les secteurs difficilement accessibles ;
- mesures de paramètres physiques et chimiques à partir de satellites (à ce jour limité du fait de la faible résolution des appareils disponibles) ;
- mesures de paramètres physiques et chimiques à partir de capteurs à bas coût (notamment développés dans le cadre du règlement européen 2024/1787 déjà évoqué) ;
- modélisations des comportements géophysiques et des réactions géochimiques se déroulant au sein des réservoirs post-miniers pour documenter la prédiction des émissions de gaz ;
- ...

5.2 Gestion et prévention des émissions de gaz en surface

Comme illustré dans l'ensemble de ce document, la fermeture des anciennes exploitations minières souterraines n'induit pas automatiquement la disparition des nuisances résultant de l'émission en surface du gaz de mine. Pour faire face à cette situation, des outils de gestion ont été développés.

Ainsi, pour répondre au besoin de définir dans l'espace la survenue de ces potentielles nuisances, il est possible d'évaluer (et donc, par la suite, de cartographier) les aléas résultants de l'émissions de gaz de mine¹⁷. Les cartes ainsi produites peuvent alors être utilisées par l'administration et les collectivités pour gérer la sécurité des personnes et des biens en surface (enjeux existants ou futurs).

¹⁷ Cf. site internet de GEODERIS consulté en juillet 2025 (<https://geoderis.fr/nous-connaître/activites/mouvement-de-terrain-et-gaz/>).

6 Conclusions

L'exploitation minière souterraine, largement répandue en France au cours des siècles passés, a laissé derrière elle un héritage caractérisé par des cavités souterraines potentiellement remplies de gaz d'origine minière. Le dioxyde de carbone, le méthane ainsi que d'autres composés peuvent ainsi s'accumuler dans ces espaces et, s'ils rencontrent des conditions favorables, migrer vers la surface.

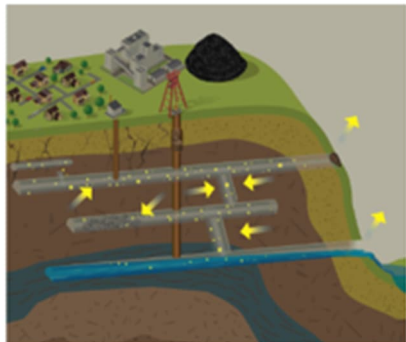
Les émissions de gaz en surface provenant des anciens travaux miniers souterrains représentent une problématique complexe avec de potentielles répercussions à la fois sanitaires et environnementales.

Réservoir post-minier par réservoir post-minier, les experts de l'Ineris évaluent et caractérisent l'intensité et les potentialités de ces émissions de gaz de mine, au regard des différents mécanismes et scénarios de transfert détaillés et illustrés dans ce document et schématiquement synthétisés ci-après (cf. *Figure 11*, présentée en page suivante), afin d'accompagner les pouvoirs publics dans la gestion des risques et des aléas générés par ces phénomènes d'émissions de gaz de mine.

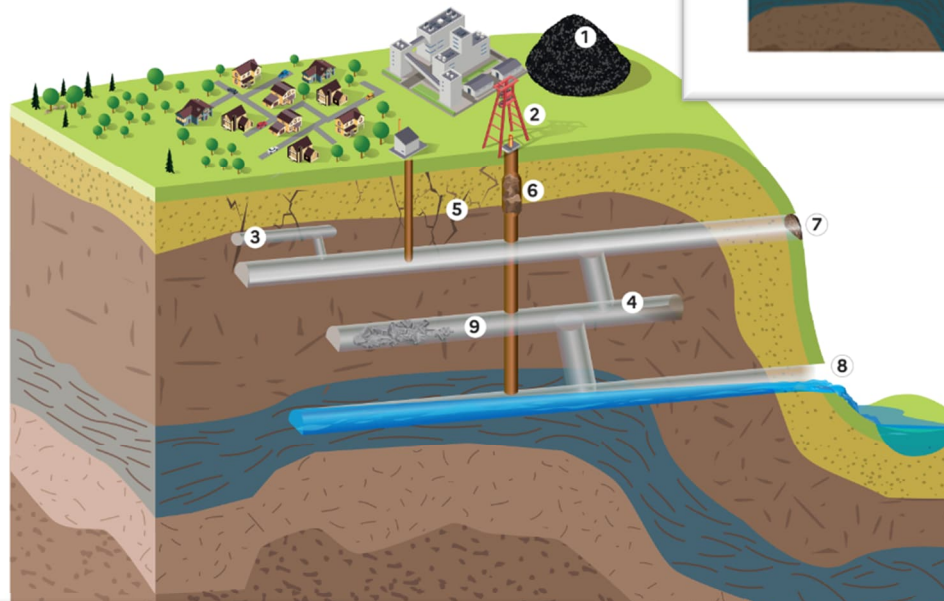
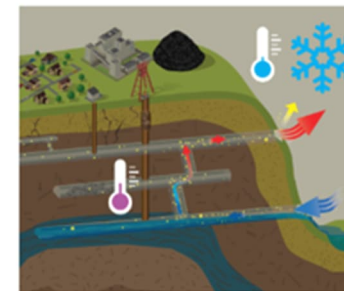
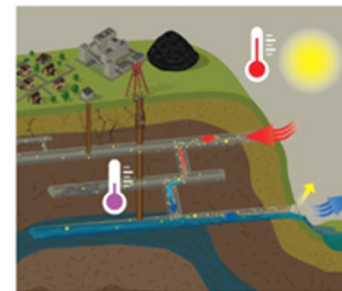
Au-delà des enjeux de sécurité des biens et des personnes, cette problématique doit également être appréhendée en lien avec le contexte du changement climatique où le méthane, et dans une moindre mesure, le dioxyde de carbone jouent le rôle de gaz à effet de serre.

Page suivante : Figure 11 – Représentation schématique d'un réservoir post-minier agrémentée de vignettes représentant les principaux mécanismes permettant d'appréhender le transfert des gaz de mine depuis les travaux miniers souterrains vers la surface.

Migration des gaz

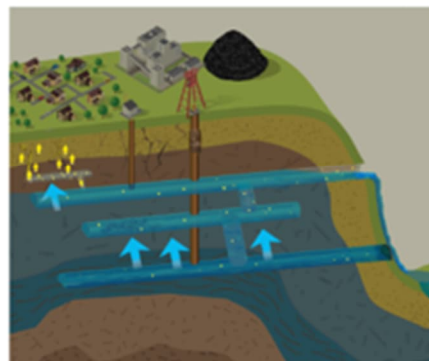
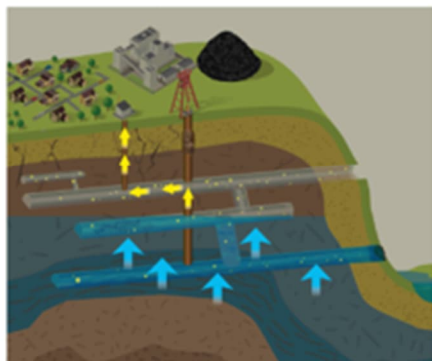


Tirage thermique

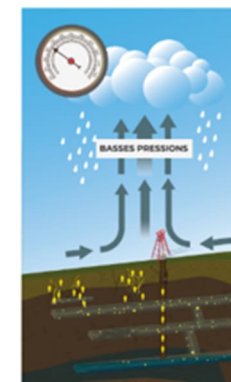
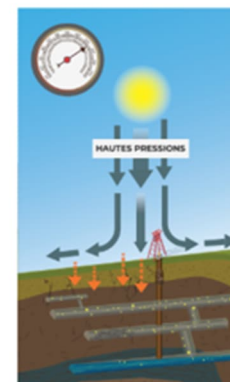


- 1 Terril
- 2 Puits de mine
- 3 Travaux perchés
- 4 Travaux souterrains
- 5 Crevasses
- 6 Bouchon
- 7 Galerie fermée
- 8 Galerie ouverte
- 9 Travaux miniers effondrés

Pistonnage par remontée de nappe



Différence de pression atmosphérique



7 Références

- CL:AIRE, 2021. Good practice for risk assessment for coal mine gas emissions. CL:AIRE, Buckinghamshire. ISBN 978-1-905046-39-3.
- Didier, C., 2001. Guide méthodologique pour l'arrêt des exploitations minières. Rapport INERIS-DRS-01-25750/R01.
- Didier, C., Josien, J.P., Ledoux, E., Pokryszka, Z. et al., 2006. L'élaboration des Plans de Prévention de Risques Miniers. Guide méthodologique. Volet technique relatif à l'évaluation de l'aléa. Les risques de mouvements de terrain, d'inondations et d'émissions de gaz de mine. Rapport INERIS-DRS-06-51198/R01.
- Ineris, 2005. Le magazine de l'Institut national de l'environnement industriel et des risques, n°14 (<https://www.ineris.fr/fr/ineris-magazine-ndeg14-novembre-2005>).
- Ineris, 2016. Évaluation de l'aléa « Gaz de mine » : Guide méthodologique. Rapport d'étude INERIS DRS-15-149493-10366B, 26/02/2016 (<https://www.ineris.fr/fr/evaluation-alea-gaz-mine-guide-methodologique>).
- Ineris, 2018. Évaluation des aléas miniers. Guide. Rapport Ineris 17-164640-01944A (<https://www.ineris.fr/fr/guide-evaluation-aleas-miniers>).
- Ineris, 2023. Devenir post-exploitation des cavités salines, Rapport Ineris 213206-2761217-v1.0, 14/11/2023 (<https://www.ineris.fr/sites/default/files/contribution/Documents/Ineris-213206-2761217-RAP-Remblayage%20cavit%C3%A9s%20salines%20v1.pdf>).
- Krause, E., Karbownik, M., 2019. Tests of methane desorption and emission from samples of hard coal in the context of mine closures through flooding. Journal of Sustainable Mining 18 (2019): 127–133 (<https://doi.org/10.1016/j.jsm.2019.03.005>).
- Le Gal, N., 2012. *Libération et migration du méthane depuis le charbon dans un contexte hydrogéologique post-minier : Développement d'un protocole expérimental et approche numérique* (Numéro 2012ENMP0021); Thèses, École Nationale Supérieure des Mines de Paris (<https://pastel.hal.science/pastel-00734686>).
- Pokryszka, Z., Krause, E., 2007. Methane emission from flooded coal seams in abandoned mines, in the light of laboratory investigations. Research Reports of Central Mining Institute "Mining & Environment" Quarterly N° IV/2007, Mining & Environment, 4 (2007): 205-212.
- Pokryszka, Z., Tauziède, C., Lagny, C., Guise, Y., Gobillot, R., Planchenault J.M., Lagarde, R., 2005. Gas migration from closed coal mines to the surface. risk assessment methodology and prevention means. Post-Mining 2005, November 16-17, Nancy, France.
- Pokryszka Z., Charmoille A., Bentivegna G., 2010 : Development of methods for gaseous phase geochemical monitoring on the surface and in the intermediate overburden strata of geological CO2 storage sites. Oil & Gas science and Technology, 2010, vol. 65, n° 4, pp. 653-666.
- SIM, 1983. Vocabulaire de la mine souterraine. Supplément à la Revue de l'Industrie Minérale de décembre 1982.
- Tauziède, C., Pokryszka, Z., 2002. Évaluation du risque d'émission de gaz à la surface du sol par les anciennes mines de charbon et mesures préventives. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur (JNGG 2002), Oct 2002, Nancy, France.

