

RAPPORT D'ÉTUDE  
DRS-15-149493-10366B

26/02/2016

**Evaluation de l'aléa « Gaz de mine »**  
**Guide méthodologique**

**INERIS**

maîtriser le risque |  
pour un développement durable |



# Evaluation de l'aléa « Gaz de mine »

## Guide méthodologique

Direction des Risques du Sol et du Sous-sol

### Liste des personnes ayant participé à l'étude :

A. CHARMOILLE et C. LAGNY, Ingénieurs à l'unité Eaux Souterraines et Emissions de Gaz de la Direction des Risques du Sol et du sous-sol

X. DAUPLEY Responsable de l'unité Risques Géotechniques de la Direction des Risques du sol et du sous-sol

R. FARRET, Responsable de l'unité Eaux Souterraines et Emissions de Gaz de la Direction des Risques du Sol et du sous-sol

P. GOMBERT, Référent technique en Hydrologie à l'unité Eaux Souterraines et Emissions de Gaz de la Direction des Risques du Sol et du sous-sol

R. SALMON, Ingénieur à l'unité Risques Géotechniques de la Direction des Risques du sol et du sous-sol

## PREAMBULE

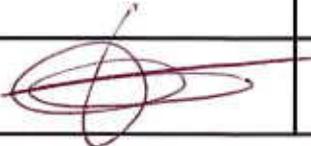
Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	Rédaction	Vérification	Approbation
<b>NOM</b>	Z. POKRYSZKA	C. DIDIER	M. GHOREYCHI
<b>Qualité</b>	Référent Technique en Emissions et Transfert Souterrain de Gaz à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Directeur Scientifique Adjoint	Directeur des Risques du Sol et du sous-sol
<b>Visa</b>			

# TABLE DES MATIÈRES

<b>1. CONTEXTE ET OBJECTIFS.....</b>	<b>7</b>
<b>2. DESCRIPTION DU PHÉNOMÈNE DANGEREUX REDOUTÉ.....</b>	<b>9</b>
2.1 Généralités.....	9
2.2 Notion de réservoir minier .....	9
2.3 Nature et origine du gaz de mine .....	10
2.4 Caractéristiques et effets sur la santé et la sécurité des composants les plus fréquents du gaz de mine.....	11
2.4.1 Méthane et ses homologues supérieurs (éthane, propane.....)	11
2.4.2 Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> ).....	12
2.4.3 Monoxyde de carbone (CO) .....	13
2.4.4 Sulfure d'hydrogène (H <sub>2</sub> S).....	14
2.4.5 Air désoxygéné.....	15
2.4.6 Effet cumulatif.....	16
2.5 Mécanismes initiateurs de la migration de gaz vers la surface .....	17
2.5.1 Phénomènes induisant l'écoulement de gaz par mise en pression des réservoirs miniers .....	17
2.5.2 Transport sous forme dissoute dans l'eau .....	25
2.6 Voies de migration de gaz vers la surface.....	26
<b>3. DÉFINITION DE L'ALÉA.....</b>	<b>29</b>
3.1 Rappel de la définition générale de l'alea.....	29
3.2 Définition de l'alea « gaz de mine » et de ses composants.....	30
3.3 Prise en compte de l'évolution d'un site minier dans le temps .....	32
<b>4. INTENSITÉ DU PHÉNOMÈNE REDOUTÉ ET PRINCIPES DE SON ÉVALUATION.....</b>	<b>33</b>
4.1 Complément de la définition et principaux facteurs à considérer .....	33
4.2 Critères d'évaluation.....	34
4.2.1 Définition des teneurs limites pour les gaz émis .....	36
4.2.2 Qualification du flux (ou débit) de gaz généré .....	39
4.2.3 Prise en compte du volume des vides miniers et de la nature des phénomènes animant la migration de gaz.....	40
4.3 Influence réductrice de l'ennoyage des vides miniers sur l'intensité des phénomènes gazeux.....	43
4.4 Cas particulier des ouvrages miniers isolés .....	46

<b>5. PRÉDISPOSITION À L'ÉMISSION DE GAZ DE MINE EN SURFACE ET PRINCIPES DE SON ÉVALUATION.....</b>	<b>47</b>
5.1 Complément de la définition et principaux facteurs à considérer .....	47
5.2 Prédiposition à la migration de gaz à travers les terrains de recouvrement	47
5.2.1 Prise en compte de l'épaisseur du recouvrement, de sa perméabilité et de l'influence des travaux miniers.....	48
5.2.2 Prise en compte des formations géologiques particulières à faible perméabilité au gaz .....	51
5.2.3 Prise en compte de drains naturels .....	53
5.2.4 Prise en compte de l'instabilité des terrains.....	55
5.3 Prédiposition à la migration de gaz à travers les ouvrages débouchant au jour .....	56
5.3.1 Prédiposition des puits et des ouvrages sub-verticaux .....	57
5.3.2 Prédiposition des galeries et autres ouvrages subhorizontaux débouchant au jour .....	60
5.3.3 Cas particulier des événements pour le gaz de mine et des sondages de contrôle et de décompression.....	62
<b>6. QUALIFICATION ET CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA GAZ.....</b>	<b>63</b>
6.1 Critères de qualification de l'aléa .....	63
6.2 Aléa lié à la migration de gaz par les terrains de recouvrement.....	63
6.2.1 Evaluation et délimitation initiales.....	63
6.2.2 Etendue latérale des zones d'aléa.....	63
6.2.3 Homogénéisation des zones d'aléa.....	66
6.3 Aléa lié à la migration par les ouvrages débouchant au jour .....	66
6.3.1 Qualification initiale.....	66
6.3.2 Etendue latérale des zones d'aléa.....	67
6.3.3 Etendue finale de la zone d'aléa.....	68
6.3.4 Ajustement au niveau de l'aléa de migration de gaz par les terrains .....	69
6.4 Prise en compte des dispositifs de prévention ou de protection.....	69
6.5 Aléa lié aux sondages de contrôle et de décompression et aux événements .....	69
6.6 Cartographie de l'alea .....	71
6.6.1 Prise en compte de l'incertitude cartographique .....	71
6.6.2 Cartographie des failles et d'autres drains potentiels .....	71
<b>7. RECUEIL DES DONNÉES NÉCESSAIRES.....</b>	<b>73</b>
7.1 Phase informative.....	73
7.1.1 Données générales.....	73

7.1.2 Recherche de données spécifiques à la problématique de gaz de mine .	73
7.1.3 Données et informations à rechercher ou à confirmer sur le site.....	74
7.2 Investigations spécifiques ou complémentaires in situ .....	75
7.2.1 Apport des mesures in situ dans l'évaluation de l'intensité.....	76
7.2.2 Apport des mesures in situ dans l'évaluation de la prédisposition.....	77
7.2.3 Apport des mesures dans l'évaluation de la pertinence du niveau de l'aléa pré-établi.....	78
7.2.4 Prise en compte de la présence naturelle des gaz dans le sol .....	78
7.2.5 Représentativité des mesures .....	79
7.2.6 Interpolation des données .....	79
<b>8. ORGANISATION ET RÔLE DES DIFFÉRENTES ÉTAPES D'ÉVALUATION DE L'ALÉA GAZ DE MINE.....</b>	<b>81</b>
<b>9. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>83</b>
<b>10. LISTE DES ANNEXES .....</b>	<b>87</b>



## **1. CONTEXTE ET OBJECTIFS**

Le présent document a pour vocation de développer une méthode d'évaluation de l'aléa « gaz de mine », puis d'en préciser les modalités de mise en œuvre, telles qu'utilisées par l'INERIS dans le cadre de l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers (PPRM).

Il s'appuie sur deux sources principales :

- le guide méthodologique général PPRM, dans lequel les principes de base de l'évaluation de l'aléa gaz de mine ont été établis (INERIS 2006) ;
- l'expérience acquise au travers des différentes études d'aléas et/ou de risques liés au gaz, effectuées sur des principaux bassins miniers français. Il s'agit notamment des études dans le cadre desquelles des éléments spécifiques méthodologiques ou/et expérimentaux ont été développés, concernant les secteurs miniers suivants :
  - les houillères du centre et du midi (Tauziède et Pokryszka 1998),
  - le bassin houiller lorrain (Pokryszka, 2000),
  - le bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais (Pokryszka et Lagny 2002, Pokryszka, 2007),
  - le bassin ferrifère lorrain (Pokryszka, 2006),
  - les exploitations de fer de Normandie (Pokryszka, 2008),
  - le bassin houiller d'Aubin-Decazeville (Lagny et Gombert, 2011),
  - et le bassin houiller du Dauphiné (Pokryszka, 2012).

L'approche proposée vise à fournir au lecteur les outils et pré-requis nécessaires à l'évaluation de l'aléa « gaz de mine » dans les règles de l'art. Elle définit les différentes étapes de la démarche, de manière à ce que celle-ci puisse être appliquée aux différentes configurations qui le nécessiteront.

Il sera légitimement appliqué dans un premier temps aux sites potentiellement les plus sensibles vis à vis de ce type d'aléa. De fait, il peut engager le recours, en tant que de besoin, à des campagnes de mesures, ce qui n'est pas l'approche la plus classique dans la démarche PPRM.

Après une description des phénomènes redoutés, le document définit les principes d'évaluation et de combinaison de l'intensité et de la prédisposition (qui sont les deux composants qui définissent l'aléa). Une attention particulière est portée à la collecte des données nécessaires à la mise en œuvre de la démarche d'expertise.

On notera pour finir que les problématiques particulières concernant 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 CO<sub>2</sub>) ne sont pas traitées dans ce document.

Le radon est un gaz radioactif naturellement présent dans les roches. Il n'est pas produit spécifiquement du fait de l'exploitation minière et constitue, dans une grande majorité des cas, un composant très mineur du gaz de mine (traces). Le lien de ce gaz avec l'environnement minier résulte principalement du réseau des vides post-miniers susceptibles de faciliter son émanation vers la surface.

Le risque présenté par ce gaz est de type chronique (augmentation de l'exposition aux rayonnements ionisants et accroissement de la probabilité de maladies cancéreuses), mettant en jeu une exposition longue (plusieurs années), contrairement aux composants principaux habituels du gaz de mine, dont les effets potentiels sont tout d'abord de type accidentel (exposition courte, cf. chapitre 4.1). La gestion de la problématique radon, lorsqu'elle s'impose, doit donc être traitée par une approche différente de celle des composants majeurs du gaz de mine.

Concernant les produits spécifiques liés aux combustions souterraines (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. De plus, pour certains de ces produits, notamment les hydrocarbures aromatiques, les teneurs sont souvent faibles. Là encore, le risque afférent est plutôt de type chronique. Il semble donc plus judicieux de ne pas tenter d'établir des règles générales particulièrement complexes et de privilégier un traitement du problème au cas par cas, lorsque le besoin s'en fait ressentir.

## **2. DESCRIPTION DU PHÉNOMÈNE DANGEREUX REDOUTÉ**

### **2.1 GÉNÉRALITÉS**

Le phénomène redouté correspond à la remontée en surface de gaz de mine susceptible de présenter des dangers, principalement pour les personnes et, plus exceptionnellement, pour les biens ou l'environnement. Il s'agit des dangers d'inflammation, d'explosion, d'asphyxie et d'intoxication. Le phénomène d'émission de gaz de mine en surface, susceptible d'engendrer des dangers, ne concerne pratiquement que les exploitations minières souterraines. En effet, les anciennes mines souterraines sont à même de réunir trois éléments principaux, nécessaires pour l'apparition du phénomène redouté :

- la présence de vides résiduels constituant un milieu plus ou moins confiné. Ces vides peuvent être directement d'origine minière ou apparus dans les terrains encaissants, suite à l'influence d'une exploitation. Dans de très nombreux cas, ces vides présentent des volumes importants et interconnectés (notion de réservoir souterrain, cf. chapitre 2.2) ;
- la présence de gaz dangereux ou d'atmosphères appauvries en oxygène ;
- les possibilités de production et/ou d'accumulation de ces gaz en quantité significative et de migration, à des teneurs dangereuses, vers la surface.

Les exploitations souterraines engendrent, en effet, trois modifications fondamentales du milieu favorisant directement le dégagement, la production, l'accumulation et la circulation de gaz au sein des massifs rocheux :

- la création de vides résiduels provenant des travaux d'exploitation et des ouvrages d'infrastructures (galeries, puits...). En fonction du type d'exploitation (totale ou partielle), de la quantité de matériau extrait et du traitement des espaces excavés (foudroyage, remblayage...), le volume des vides résiduels peut être plus ou moins important. A titre d'exemple, les évaluations menées dans des mines de houille exploitées avec foudroyage des terrains ont permis d'estimer que le volume de ces vides résiduels pouvait atteindre jusqu'à 40%, du volume total de minerai extrait voire plus (Didier, 2001);
- la détente mécanique des terrains de recouvrement et leur fracturation, qui induit l'augmentation de leur porosité et de leur perméabilité et, par conséquent, facilite la migration des fluides (gaz et eau). On observe, certes, une recompaction des terrains avec le temps mais, dans la plupart des cas, les terrains ne retrouvent pas, à l'échelle temporelle considérée (de l'ordre de quelques dizaines d'années à deux ou trois siècles au maximum), leurs propriétés aérauliques initiales ;
- un rabattement de la (des) nappe(s) aquifère(s), ce qui peut faciliter encore plus la migration de gaz au sein des vides post miniers et dans les terrains de recouvrement. Cette perturbation de la situation hydrogéologique peut-être irréversible (cas du bassin du Dauphiné) ou le retour à (ou proche de) l'équilibre initial peut être long voire très long (plus d'un siècle dans le bassin du Nord et du Pas-de-Calais).

### **2.2 NOTION DE RÉSERVOIR MINIER**

Les vides résultant de l'activité minière constituent un espace permettant le dégagement, la production et l'accumulation de gaz de mine. Lors de la phase

d'exploitation, ces gaz sont dilués et évacués par la ventilation mécanique. Après l'arrêt de l'exploitation, les vides miniers, s'ils ne sont pas ennoyés en totalité, constituent un véritable réservoir souterrain plus ou moins confiné qui reste le plus souvent non ou très mal ventilé par les échanges naturels. Dans ce réservoir, les gaz peuvent s'accumuler à des concentrations élevées.

Les réservoirs post-miniers ne présentent généralement pas de délimitation ni de forme bien précises, qui pourraient correspondre uniquement aux contours des anciennes exploitations et ouvrages miniers. Il s'agit en effet d'ensembles plus ou moins interconnectés, constitués des vides résiduels d'exploitation 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).

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 m<sup>3</sup> pour une mine de charbon ou de fer bien développée).

### 2.3 NATURE ET ORIGINE DU GAZ DE MINE

L'atmosphère au sein d'un réservoir post-minier peut avoir une composition très différente d'un site à l'autre. Elle dépend de plusieurs facteurs dont les principaux sont la nature du matériau exploité et des roches encaissantes, les gaz présents dans le gisement avant l'exploitation, les réactions géochimiques au sein du réservoir et les échanges gazeux entre le réservoir et l'atmosphère de surface.

Il s'agit souvent d'un mélange de gaz d'origines diverses, à des teneurs variables. Globalement, les constituants du gaz de mine peuvent avoir deux origines différentes :

- une origine endogène : il s'agit de gaz contenus dans le gisement et/ou dans les roches encaissantes avant l'exploitation. Ces gaz se libèrent plus ou moins partiellement en cours de l'exploitation, mais, le plus souvent, continuent ensuite à se dégager vers les vides post-miniers, après l'arrêt de l'exploitation. Il s'agit classiquement du méthane, de ses homologues supérieurs, du dioxyde de carbone et bien plus rarement d'autres gaz (azote, hydrogène, argon, sulfure d'hydrogène...);
- une origine exogène : ce sont des gaz produits par des réactions chimiques spécifiques, pendant ou après l'activité minière, suite à la perturbation de l'équilibre géochimique initial provoquée par l'exploitation. Il s'agit le plus souvent de monoxyde de carbone, dioxyde de carbone ou sulfure d'hydrogène.

On notera que souvent le mélange gazeux renfermé dans les vides miniers contient des gaz de ces deux origines, ceci d'autant plus que certains composants peuvent intrinsèquement avoir une double origine (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S...).

En parallèle avec la présence de gaz spécifiques, les atmosphères rencontrées dans les réservoirs post-miniers présentent très souvent un déficit en oxygène pouvant aller, dans certains cas, jusqu'à une disparition totale. Cette désoxygénation peut être induite par plusieurs mécanismes physiques, chimiques ou biologiques.

Même s'il existe beaucoup d'exceptions, la composition des mélanges gazeux présents est très liée à la nature et à l'environnement géologique des matériaux

extraits. Par exemple, on s'attendra à la présence de CH<sub>4</sub> et de CO<sub>2</sub> dans les anciennes mines de charbon, tandis que les atmosphères de mines métalliques présenteront plutôt un appauvrissement en oxygène avec la présence souvent limitée d'autres gaz nocifs.

## 2.4 CARACTÉRISTIQUES ET EFFETS SUR LA SANTÉ ET LA SÉCURITÉ DES COMPOSANTS LES PLUS FRÉQUENTS DU GAZ DE MINE

Suivant la nature et la composition de ce gaz de mine, les émissions gazeuses en surface peuvent présenter des risques ou nuisances vis-à-vis des personnes et des biens. On retiendra notamment les risques d'asphyxie, d'intoxication, d'inflammation ou d'explosion

Les principaux constituants du gaz de mine sont décrits ci-après. Ils ne présentent pas les mêmes niveaux de risque pour les personnes ou les biens situés en surface. Par ailleurs, même si cet aspect concerne la vulnérabilité en surface et qu'il ne fait donc pas partie de l'analyse des aléas (cf. chapitre 3), on rappelle que les risques sont accrus lorsque le gaz de mine s'accumule dans des locaux confinés et ils sont souvent réduits dans le cas d'une émission diffuse en atmosphère ouverte.

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, CH<sub>4</sub>...) 0,06%.

### 2.4.1 Méthane et ses homologues supérieurs (éthane, propane...)

Le méthane (CH<sub>4</sub>) est le gaz qui se rencontre essentiellement dans les exploitations de combustibles solides et, de manière moins importante, dans les mines de sel ou de potasse, dans les exploitations minières de pétrole, de calcaire asphaltique, de schistes bitumineux ou encore de bauxite.

Dans les mines de charbon ou de lignite, le méthane représente généralement une partie très majoritaire du gaz de gisement (jusqu'à 95 %, voire plus). D'autres gaz (dioxyde de carbone, éthane, propane, butane, azote...) peuvent également être présents dans des proportions variables d'un gisement à l'autre. Ce mélange de gaz, appelé « grisou » dans la terminologie minière, se trouve « piégé » sous forme adsorbée dans le matériau exploité (charbon, lignite, schistes bitumineux...) et, de manière minoritaire, sous forme libre dans les pores et fissures des roches encaissantes.

Pendant l'exploitation et peu après celle-ci, du fait de la détente des terrains, le grisou se dégage du charbon abattu et des terrains influencés par l'exploitation. Néanmoins, des quantités notables de ce gaz restent contenues dans le gisement non exploité et dans les roches encaissantes. Le dégagement gazeux, même s'il est lent, peut donc perdurer durant une longue période, jusqu'à l'établissement d'un nouvel équilibre, différent pour chaque site, entre le grisou encore contenu dans les roches et le gaz libre existant dans les vides souterrains.

Le méthane est un gaz inodore, incolore et sans saveur. Il est presque deux fois moins dense que l'air et a donc tendance à s'accumuler dans les points hauts et à migrer vers la surface. C'est un gaz non toxique et inoffensif sur le plan physiologique, dans la mesure où sa présence n'engendre pas une diminution importante de la teneur en oxygène de l'atmosphère (danger d'asphyxie, voir plus

loin). C'est essentiellement son inflammabilité (ou son explosibilité) qui fait du méthane un gaz particulièrement dangereux.

Un mélange binaire d'air et de méthane est directement inflammable lorsque la teneur en méthane est comprise entre 5% (limite inférieure d'explosibilité ou LIE) et 15% (limite supérieure d'explosibilité ou LSE). L'inflammation d'un tel mélange peut provoquer des effets thermiques (flux de chaleur) et mécaniques (onde de pression) dangereux pour les personnes et dommageables pour les biens.

Les effets d'une inflammation de méthane dépendent du volume de gaz disponible, de l'homogénéité du mélange et de son degré de confinement. On parlera ainsi, selon le cas, d'inflammation<sup>1</sup> qui se caractérise par des effets thermiques très prépondérants ou d'explosion<sup>2</sup> lorsque les effets thermique et mécanique (onde de pression) se manifestent simultanément.

Notons qu'un mélange trop riche en méthane (teneur supérieure à la limite supérieure d'explosibilité) peut s'avérer également très dangereux du fait de son caractère asphyxiant (déficit d'oxygène). Par la suite, sa dilution dans l'air peut le rendre directement inflammable.

#### 2.4.2 Dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)

Le dioxyde de carbone, qui est probablement le gaz le plus fréquemment rencontré dans les anciennes exploitations minières souterraines, peut avoir plusieurs sources.

Très fréquemment, il se trouve sous forme libre dans les pores et fissures des roches. Dans certaines mines de charbon, on peut rencontrer des grisous constitués, en tout ou partie, de CO<sub>2</sub>. Ce gaz est alors présent, sous forme adsorbée dans le charbon, comme le méthane.

Le dioxyde de carbone peut également provenir de la combustion (feux souterrains) ou de l'oxydation lente de matières carbonées. C'est le cas des exploitations de charbon et de lignite, mais cela peut aussi concerner, dans une moindre mesure, tout autre type d'exploitation souterraine où de la matière carbonée est présente. Celle-ci peut également être d'origine anthropique (bois de soutènement par exemple) ou être importée de la surface par la circulation d'eau (matières organiques).

Enfin, une autre cause de la production de CO<sub>2</sub> peut résider dans les différentes réactions géochimiques au sein du réservoir souterrain ou dans les roches encaissantes influencées par l'exploitation (par exemple, l'action d'eau acide sur des roches carbonatées). Cette situation peut se rencontrer dans de nombreuses mines, indépendamment de la substance exploitée. A noter que la production de CO<sub>2</sub> conduit dans la plupart des cas à une réduction concomitante de la teneur en oxygène.

Le dioxyde de carbone est un gaz incolore, inodore et non inflammable. Il est couramment considéré comme étant un gaz inerte remplaçant l'oxygène dans l'air atmosphérique. Cependant, c'est tout d'abord un gaz toxique qui perturbe les processus métaboliques par acidification du sang.

---

<sup>1</sup> « Flambée de grisou », en langage minier.

<sup>2</sup> « Coup de grisou », en langage minier.

Par conséquent, même s'il est peu toxique aux faibles concentrations, il devient rapidement dangereux si sa teneur augmente au-delà de quelques pour cent, y compris en présence d'oxygène en quantité suffisante. Le tableau 1 résume les principaux troubles constatés sur l'organisme humain, en fonction de la teneur en CO<sub>2</sub> dans l'air inspiré.

Teneur en CO <sub>2</sub> (% vol.)	Troubles constatés sur l'organisme humain
Jusqu'à 2%	Peu d'effets, même pendant plusieurs heures
3%	La respiration augmente et s'approfondit
4%	Doublement du rythme respiratoire, maux de tête, augmentation de la pression artérielle, éventuellement syncope
8%	Difficulté respiratoire très grave, syncope
10%	Syncope, la mort intervient rapidement
A partir de 20%	Syncope et mort presque immédiate, en quelques secondes

*Tableau 1. Effets sur la santé humaine d'un enrichissement de l'air en CO<sub>2</sub> (de Conninck, 1963).*

Plus lourd que l'air (densité 1,5), le CO<sub>2</sub> a tendance à s'accumuler dans les points bas non ventilés des locaux et à remplacer d'autres composants de l'air, dont l'oxygène. Par conséquent, en plus de son caractère toxique, il peut également présenter un risque d'asphyxie pour les personnes exposées (voir chapitre 2.4.5).

Dans la réglementation minière, la concentration instantanée dans l'air de 1% constitue un premier seuil limitant l'exposition au CO<sub>2</sub> pendant le travail<sup>3</sup>. Pour l'activité professionnelle autre que l'industrie extractive, une valeur limite indicative de 0,5% est définie<sup>4</sup>. Il s'agit d'une valeur limite de moyenne d'exposition sur 8 heures (VME) non contraignante (objectif à atteindre).

### 2.4.3 Monoxyde de carbone (CO)

Dans les exploitations minières abandonnées, ce gaz résulte de l'oxydation, en général lente et à basse température, de charbon, d'hydrocarbures ou de toute autre matière organique présente. Le CO est également généré lors d'une combustion, surtout en cas de disponibilité restreinte d'oxygène (feu en milieu confiné). Il est couramment présent dans les anciennes exploitations de charbon ou lignite, matériaux susceptibles d'auto-échauffement (oxydation intensive), lorsqu'une faible circulation d'air perdure au travers des ouvrages souterrains.

Le CO est un gaz incolore, inodore, sans saveur, très diffusif et dont la masse volumique est très proche de celle de l'air. Il est inflammable lorsqu'il est mélangé dans l'air à des teneurs très élevées (au-delà de 12%), très peu susceptibles d'être rencontrées in situ. Son caractère fortement toxique le rend très dangereux.

<sup>3</sup> Arrêté du 8 juin 1990 relatif à la teneur minimale en oxygène ainsi qu'aux teneurs limites en substances dangereuses admissibles dans l'atmosphère des travaux souterrains.

<sup>4</sup> Arrêté du 26 octobre 2007 modifiant la liste des valeurs limites d'exposition professionnelle indicatives en application de l'article R. 232-5-5 du code du travail.

En effet, il entrave le transport de l'oxygène par le sang du fait de sa fixation difficilement réversible sur l'hémoglobine.

Comme pour beaucoup de substances toxiques, les effets du CO sont une fonction croisée de la teneur et du temps d'exposition. Par conséquent, les limites de dangerosité diminuent fortement avec ce dernier (figure 1).

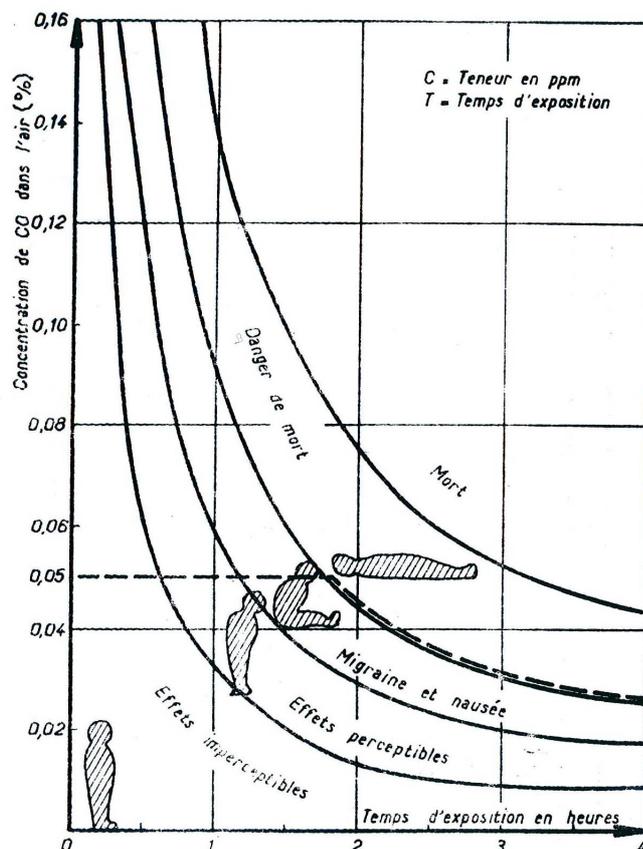


Figure 1. Effets de l'oxyde de carbone sur des êtres humains (CERCHAR, 1978).

Pour information, la réglementation du travail en vigueur (INRS, 2008) fixe à 50 ppm (0,005 %) la valeur limite de moyenne d'exposition sur 8 heures.

#### 2.4.4 Sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S)

Le sulfure d'hydrogène peut être rencontré dans les vieux travaux de tous les types de mines puisqu'il peut provenir de la décomposition des vieux bois de soutènement, de la réaction d'eaux acides sur la pyrite contenue dans les minerais ou roches encaissantes ou encore de l'action de certaines bactéries sur les sulfates. Il peut également être localement présent comme composant mineur du grisou contenu dans les gisements de charbon ou être transporté sous forme dissoute par les eaux souterraines.

Le sulfure d'hydrogène est un gaz incolore qui présente une odeur caractéristique et désagréable d'œuf pourri sans que la sensation olfactive n'augmente avec la concentration : l'odeur, décelable à de très faibles concentrations (0,1 à 0,2 ppm), s'atténue ou même disparaît à forte concentration par « anesthésie de l'odorat ». Il est légèrement plus lourd que l'air. Comme le monoxyde de carbone, il est inflammable lorsqu'il se trouve mélangé à de l'air à des teneurs élevées (plus de 4%), impossibles à rencontrer in situ.

C'est un gaz hautement toxique s'attaquant au système nerveux, à partir de teneurs assez basses. Les effets de ce gaz sur l'homme, en fonction de la teneur et du temps d'exposition, sont présentés dans le tableau 2 ci-après.

Teneur en H <sub>2</sub> S (ppm vol)	Durée d'exposition			
	15 min	15 min - 1 h	1 - 4 h	4 - 8 h
10				irritation oculaire
50 - 100	perte de la détection olfactive	irritation oculaire	irritation oculaire et bronchiale	danger en cas d'exposition continue
150 - 250	perte de la détection olfactive, irritation oculaire et bronchiale	irritation oculaire et bronchiale	détresse respiratoire sérieuse et asthénie	
300 - 400	perte de conscience	détresse respiratoire et asthénie aiguë	œdème pulmonaire et risque de mort	
500 - 1000	perte de conscience, détresse respiratoire	risque d'œdème pulmonaire et mort		
> 1000	perte de conscience immédiate et détresse respiratoire			

*Tableau 2. Effets sur la santé humaine d'un enrichissement de l'air en H<sub>2</sub>S (Ullmann, 1989).*

On note qu'une exposition à des teneurs de 400 ppm et plus, peut s'avérer mortelle en moins d'une heure. Pour le lieu de travail, la réglementation en vigueur (INRS, 2008) définit la teneur de 5 ppm (0,0005%), comme la valeur limite de moyenne d'exposition sur 8 heures (VME). La valeur limite court terme (VLCT), correspondant à une exposition sur 15 minutes, est fixée à 10 ppm.

#### 2.4.5 Air désoxygéné

La désoxygénation de l'atmosphère au sein d'un réservoir souterrain peut être induite par l'émission de gaz endogènes (effet de dilution). Les gaz concernés sont, dans une très large majorité des cas, le méthane et le dioxyde de carbone qui peuvent ainsi être rencontrés à des teneurs atteignant plusieurs pour cents voire plusieurs dizaines de pour cents. Les autres gaz ne présentent, sauf exception, que des teneurs beaucoup plus faibles.

Les autres mécanismes rencontrés fréquemment sont des réactions géochimiques conduisant à la production de ces gaz exogènes (effets croisés de consommation et dilution de l'oxygène) et/ou encore par certains phénomènes physico-chimiques entraînant la fixation de l'oxygène sans production d'autres composants gazeux (chimisorption...). Ces derniers conduisent à des situations, relativement fréquentes, de disparition partielle ou totale de l'oxygène sans présence en quantité importante d'un autre gaz d'origine minière. Dans ce cas, le gaz de mine est alors essentiellement composé d'azote.

Les situations de déficit en oxygène sont susceptibles d'être rencontrées dans tous les types d'exploitation minière, mais particulièrement dans les exploitations houillères. Le gaz de mine présente alors un danger d'asphyxie pour les personnes. Une atmosphère où l'oxygène fait défaut entraîne, en effet, une perturbation des systèmes respiratoire et sanguin de la personne exposée. Un fort déficit en oxygène peut entraîner la mort rapidement.

Quelques exemples de données bibliographiques synthétisant les effets d'un déficit en oxygène de l'air respiré sur la santé humaine sont présentés dans le tableau 3.

Teneur en O <sub>2</sub> (% vol.)	Troubles constatés sur l'organisme humain
21% à 18%	Pas de trouble
18% à 16%	Légère accélération du pouls et de la respiration
15%	Confusion, mal de tête et vision troublée se développent
12% à 16%	Accélération de la respiration et du rythme cardiaque, difficulté de concentration et d'écriture, coordination musculaire affectée
9% à 14%	Troubles du jugement, fatigue anormale
6% à 10%	Efforts musculaires pénibles, nausées, vomissements, pertes de conscience
Moins de 6%	Convulsions, arrêt respiratoire, mort

*Tableau 3. Effets sur la santé humaine d'un déficit en oxygène dans l'air (Monomakoff, 1978).*

Ces données montrent que les effets graves apparaissent pour les teneurs en O<sub>2</sub> situées entre 14% et 16%. Pour rappel, en ce qui concerne les espaces de travail, la réglementation en vigueur<sup>5</sup> fixe la teneur minimale en oxygène dans l'atmosphère à 19%, la teneur normale dans l'air étant de 20,9%.

#### 2.4.6 Effet cumulatif

Les chapitres précédents présentent l'action et les effets observés séparément pour chaque gaz. Toutefois, les dangers de chacun des composants décrits ci-avant se combinent. Ainsi, une même teneur en gaz toxique sera plus dangereuse dans un mélange gazeux contenant d'autres gaz toxiques (ou encore un déficit en oxygène) que si elle y est seule.

Il s'agit le plus fréquemment d'un effet cumulatif de l'enrichissement en CO<sub>2</sub> et de l'appauvrissement en O<sub>2</sub> pouvant conduire à des troubles importants sur l'organisme humain, même si les conséquences séparées pour chaque gaz sont en apparence moins graves.

<sup>5</sup> Code du travail et Arrêté du 8 juin 1990 relatif à la teneur minimale en oxygène ainsi qu'aux teneurs limites en substances dangereuses admissibles dans l'atmosphère des travaux souterrains.

Notons enfin que les données précédentes concernent des personnes en bonne santé. Des personnes présentant des troubles de santé, tels qu'une déficience respiratoire chronique, pourraient subir des effets négatifs à des concentrations en gaz plus modérées que celles indiquées comme critiques.

## 2.5 MÉCANISMES INITIATEURS DE LA MIGRATION DE GAZ VERS LA SURFACE

Il existe trois formes différentes de migration de gaz de mine en milieu souterrain qui peuvent être à l'origine de sa remontée vers la surface. Dans l'ordre de leur importance quantitative, il s'agit de :

- **l'écoulement**, qui est animé par une différence de pression entre un réservoir minier souterrain et l'atmosphère libre en surface. Si le gaz de mine présent dans les vides souterrains se trouve en surpression relative (mise en charge), même faible, par rapport à l'atmosphère externe, il aura tendance à migrer (s'écouler) vers la surface. Toutes choses égales par ailleurs, cet écoulement sera d'autant plus important que la différence de pression entre le sous-sol et la surface sera élevée ;
- **le transport de gaz par l'eau**. Il s'agit de gaz présents sous forme dissoute dans l'eau au sein du réservoir minier et qui peuvent être « relargués » au droit des émergences en surface ;
- **la diffusion**, transfert moléculaire de gaz lié à la différence des concentrations en gaz entre le milieu souterrain et l'atmosphère libre en surface. Le gaz diffuse du compartiment ayant la plus forte concentration vers celui ayant la plus faible concentration, jusqu'à équilibre des concentrations.

Le plus souvent, ces trois formes coexistent simultanément, d'autant plus que leurs mécanismes initiateurs sont partiellement reliés via un certain nombre de paramètres physiques communs (pression partielle de gaz, par exemple). Cependant, dans la pratique, le mécanisme largement prépondérant en termes de quantité de gaz migrant est l'écoulement, animé par la pression différentielle entre le sous-sol et la surface.

Concernant **la diffusion**, il s'agit d'un **phénomène très lent** qui n'engendre qu'un très faible flux, largement inférieur aux deux autres formes de migration. Par conséquent, sauf exception, **ce phénomène ne sera pas pris en compte dans l'analyse de l'aléa « gaz de mine »**.

### 2.5.1 Phénomènes induisant l'écoulement de gaz par mise en pression des réservoirs miniers

Plusieurs phénomènes, agissant seuls ou simultanément, peuvent conduire à la mise en pression d'un réservoir minier souterrain et entraîner une migration de gaz de mine vers la surface sous forme d'écoulement. Les moteurs les plus fréquents et pertinents dans le contexte étudié sont les suivants :

- le dégagement des gaz contenus initialement sous pression dans le gisement ;
- la variation de pression atmosphérique ;
- le tirage naturel thermique ;
- le pistonnage par remontée de nappe phréatique (ennoyage des vides) ;

- la stratification gravitaire des gaz ;
- les effets dynamiques liés au vent ;
- les phénomènes exceptionnels liés à l'instabilité des terrains ou des ouvrages miniers.

Il est à noter, que tous ces phénomènes peuvent être présents et agir simultanément sur un site donné, sachant que certains peuvent induire aussi bien une surpression qu'une dépression de l'atmosphère au sein d'un réservoir, selon des cycles réguliers ou, au contraire, aléatoires. La pression régnant au sein d'un réservoir minier sera donc une résultante de l'action de ces différents mécanismes qui peuvent tous, localement et/ou temporairement, contribuer à la mise en pression du réservoir ou bien s'opposer mutuellement.

Il est à remarquer que, indépendamment du contexte du site, les échanges gazeux entre un réservoir souterrain et la surface sont toujours plus ou moins influencés par les évolutions de la pression atmosphérique, les effets du vent et les effets thermiques. De même, divers autres mécanismes physico-chimiques ou géochimiques peuvent induire des dégagements gazeux ou la production de gaz au sein d'un réservoir souterrain minier ou dans les terrains encaissants influencés par l'exploitation minière (cf. chapitre 2.3).

Il s'agit par exemple de la production du CO<sub>2</sub> par l'attaque acide des roches carbonatées, de l'oxydation de la matière carbonée (charbon, lignite...) conduisant à la production de CO<sub>2</sub> et de CO ou encore de la production de sulfure d'hydrogène engendrée par les diverses réactions géochimiques.

Cependant, pour tous ces mécanismes, les quantités de gaz produit et/ou la cinétique du dégagement sont habituellement faibles. Par conséquent, ils ne conduisent pas à une augmentation significative de la pression de gaz dans le réservoir souterrain.

#### **2.5.1.1 Dégagement des gaz contenus initialement dans le gisement**

Certains gisements peuvent contenir à l'origine des gaz adsorbés et /ou enfermés dans les fractures et les pores du massif rocheux. Dans de très nombreux cas, les gaz se trouvent sous une pression plus ou moins importante. Ils se dégagent en cours d'exploitation minière mais, dans la plupart des cas, continuent à se dégager après son arrêt.

Il s'agit classiquement des gisements houillers (charbon et lignite) où la désorption du grisou initialement contenu (adsorbé) dans le charbon doit être considérée comme susceptible de conduire à une augmentation notable de la pression interne du réservoir minier souterrain.

Cette pression interne sera déterminée par la pression d'équilibre qui s'établit dans le massif rocheux environnant le réservoir post-minier après l'arrêt de l'activité minière. La nouvelle pression d'équilibre dépendra de la pression initiale régnant dans le gisement avant exploitation et du degré d'influence engendrée par l'exploitation sur le massif rocheux environnant (importance et étendue spatiale du dégazage de ce massif).

Il est à noter que le dégazage du massif situé autour des zones d'exploitation est habituellement important, mais que ses effets s'atténuent avec la distance depuis

les limites du réservoir post-minier. Par conséquent, dans les gisements houillers dits « grisouteux », le charbon non exploité restant dans des parties non ou peu influencées du massif rocheux peut encore contenir des quantités considérables de grisou (jusqu'à 5 à 15 m<sup>3</sup> de méthane ou 10 à 20 m<sup>3</sup> de dioxyde de carbone par tonne de charbon, voire plus encore) à des pressions pouvant atteindre 1 MPa ou plus (cf. figure 2).

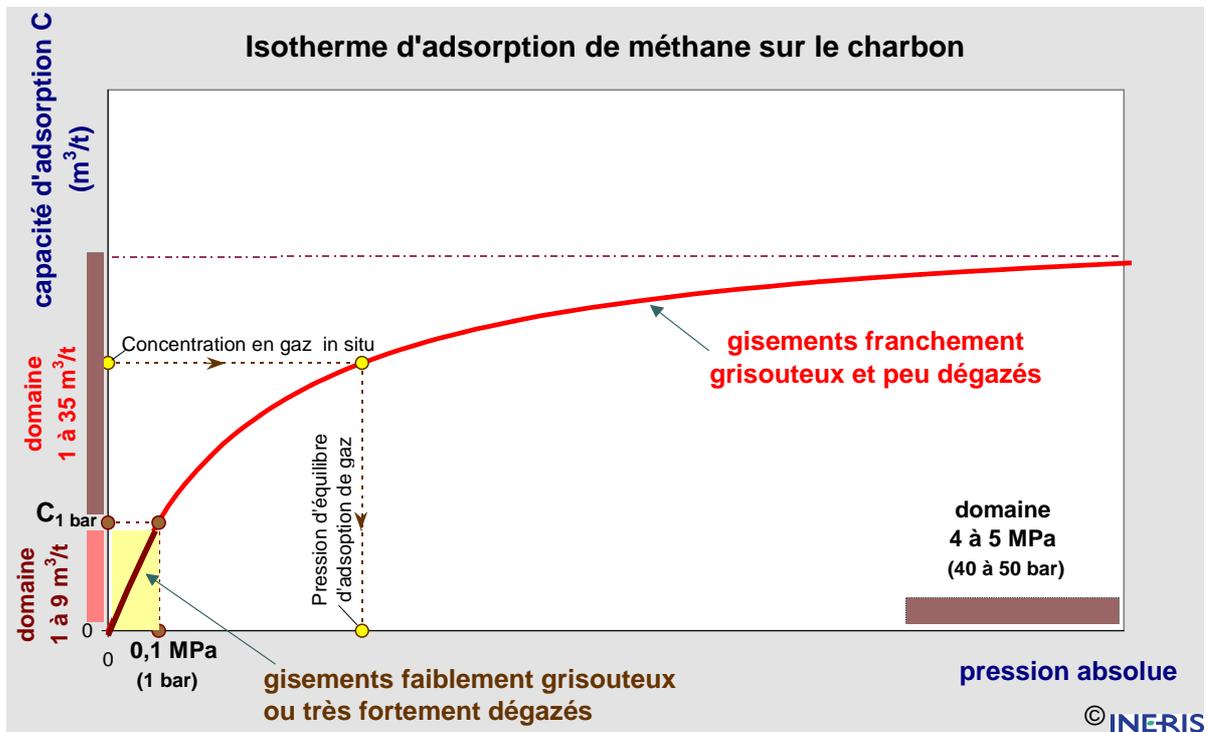


Figure 2. Principaux domaines caractéristiques de la liaison méthane-charbon dans un gisement houiller.

Il est donc théoriquement possible que des pressions d'un niveau très significatif puissent être atteintes dans les anciennes exploitations de houille par désorption du grisou contenu dans des parties voisines non exploitées du gisement. Ce phénomène est certes lent mais il peut perdurer longtemps après l'arrêt de l'extraction et doit donc être pris en compte.

Il faut souligner ici que l'envoyage des vieux travaux réduit fortement le dégagement gazeux (désorption) depuis le charbon. Cet aspect est développé en détails dans le chapitre 4.3.

Concernant le cas spécifique des exploitations des autres gisements dits « grisouteux » - comme certains gisements de sel ou de potasse, de calcaire asphaltique, de schistes bitumineux etc. - le phénomène de dégagement gazeux est similaire à celui observé dans les anciennes mines de charbon, avec cependant des quantités de gaz et des pressions engendrées plus faibles.

### 2.5.1.2 Variation de la pression atmosphérique

Les variations de pression atmosphérique engendrent un phénomène aléatoire et alternatif de compression et de dilatation de l'atmosphère des volumes confinés appelé « pompage barométrique ».

Ce phénomène peut impliquer des échanges gazeux plus ou moins importants entre le réservoir souterrain et la surface. En effet, il favorise des sorties de gaz du milieu souterrain lors des baisses de pression atmosphérique ou, à l'envers, il force l'air atmosphérique à entrer dans le milieu souterrain pendant les périodes de hausse barométrique.

La charge aéraulique générée par ce phénomène est représentée par la pression différentielle entre le réservoir souterrain et l'atmosphère extérieure (surpression ou dépression). Elle est proportionnelle au gradient de pression entre ces deux compartiments.

De ce fait, lors du passage d'une dépression météorologique, les anciens travaux miniers peuvent se trouver pendant un certain temps en surpression liée à la dilatation de l'atmosphère souterraine, celle-ci engendrant (ou accentuant) alors la migration de gaz vers la surface. Ce phénomène est transitoire, mais peut durer dans certaines configurations météorologiques plusieurs jours et conduire à un écart de pression significatif entre le sous-sol et la surface.

Par conséquent, les flux gazeux induits par les variations de pression atmosphérique peuvent être considérables et ils ne sont pas à négliger, en particulier lorsque les vides souterrains présentent des volumes importants. En effet, la quantité du mélange gazeux « produit » au sein d'un réservoir souterrain lors du passage d'une dépression barométrique est directement proportionnelle au volume de ce réservoir et au gradient des pressions entre le sous-sol et l'atmosphère libre en surface.

La figure 3 présente les mesures effectuées en tête d'un forage relié directement avec un réservoir minier houiller : elles illustrent une réaction (surpression) très rapide et significative des vides miniers suite à une baisse barométrique.

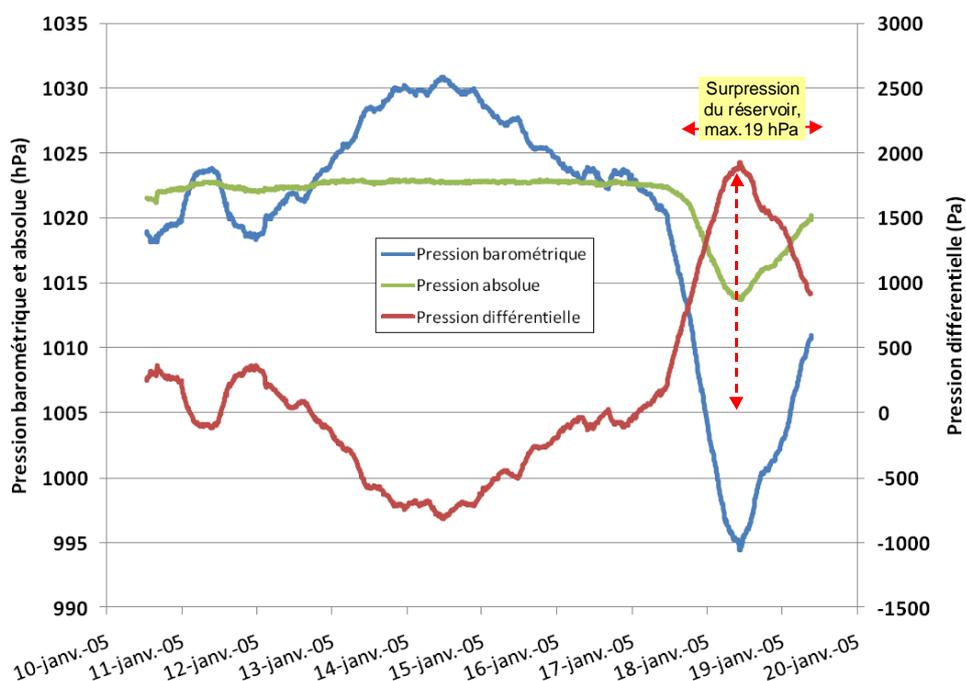


Figure 3. Réaction aux variations de pression barométrique d'un réservoir post-minier non envoyé dans le bassin houiller du Nord-Pas de Calais (Lagny, 2005 ; Lagny et al., 2013)

Dans la zone climatique européenne, les baisses de pression atmosphérique sont habituellement inférieures à 50 Pa/h, mais elles peuvent atteindre et dépasser 200 Pa/h sur une courte période, par exemple en approche d'une tempête.

### 2.5.1.3 Tirage naturel thermique

Les écarts de températures (gradient thermique) entre différents compartiments ou différentes parties d'un compartiment engendrent l'apparition d'une charge aéraulique spécifique (tirage thermique). Elle est liée aux changements de la masse volumique des gaz présents.

Cette charge peut provoquer des écoulements dont le sens et l'intensité sont gouvernés par le gradient thermique. Le phénomène est directement proportionnel à ce gradient thermique et obéit donc à une loi linéaire. Le tirage thermique se manifeste de manière particulièrement importante dans le cas où existent de fortes dénivellations entre les différents compartiments interconnectés d'un réservoir.

Dans le cas des réservoirs souterrains, le gradient impliquant le tirage thermique est déterminé par la différence de températures entre l'atmosphère à la surface et le sous-sol. La température du sous-sol évolue peu, habituellement autour de 10 à 14°C en France, dans les parties peu profondes.

En revanche, la température ambiante à la surface varie beaucoup : en dehors des variations aléatoires liées aux passages des fronts atmosphériques et aux anomalies météorologiques, elle évolue tout d'abord selon un cycle nyctéméral (jour-nuit), auquel se superpose un cycle climatique saisonnier.

De ce fait, le gradient thermique et la charge aéraulique engendrée peuvent être franchement positifs ou franchement négatifs, passant par des valeurs nulles ou faibles quand la température atmosphérique est proche de celle régnant dans le sous-sol.

Par conséquent, la charge aéraulique du tirage thermique évolue tout d'abord selon un cycle court diurne-nocturne, auquel se superpose un cycle climatique saisonnier. Pour ce second, en conditions climatiques tempérées, on observe souvent des inversions durables du sens des échanges gazeux entre le réservoir et l'atmosphère extérieure, en fonction de la saison.

En été, les parties hautes du réservoir sont majoritairement en dépression (aspirantes) et les parties basses en surpression (soufflantes).

En hiver, le sens général de la charge aéraulique et des échanges gazeux s'inverse. C'est par exemple le cas des parties non ennoyées des anciennes mines de fer en Lorraine (Pokryszka, 1999) ou encore des mines de fer en Normandie (Pokryszka, 2008).

La figure 4 montre, à titre d'exemple, les échanges gazeux cycliques saisonniers engendrés par le tirage naturel thermique sur l'une des galeries d'accès au réservoir post-minier de Moyeuve-Grande (bassin ferrifère lorrain).

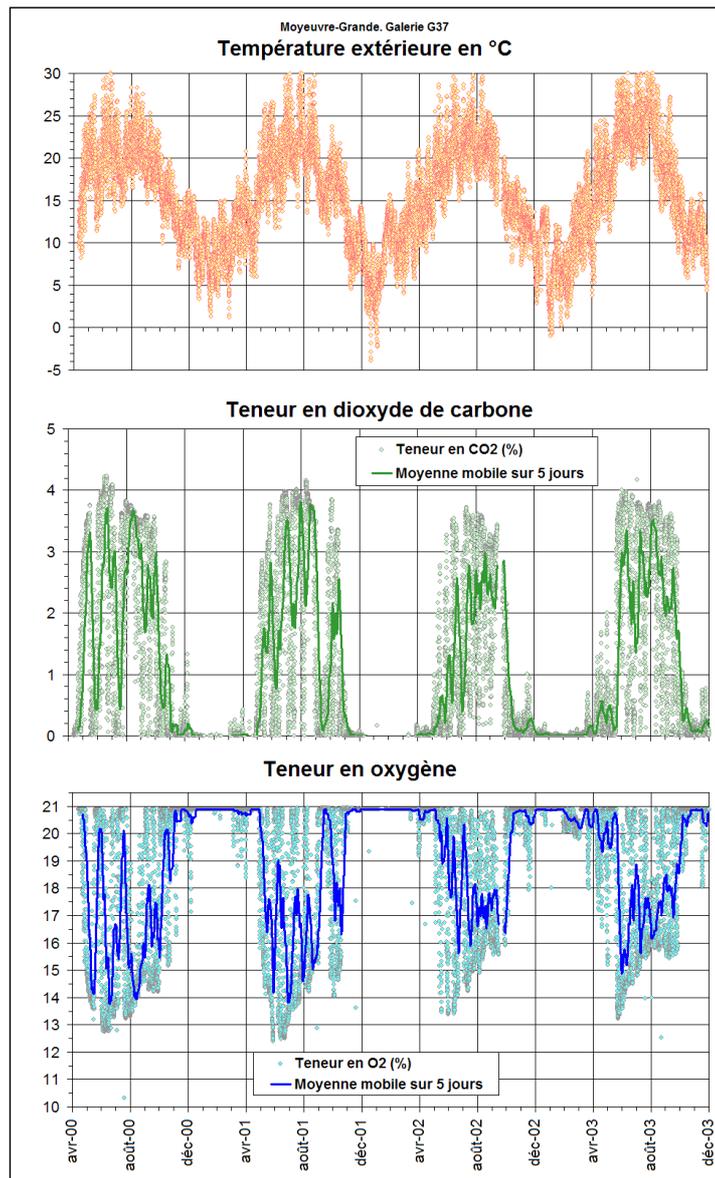


Figure 4. Exemple des sorties cycliques de gaz de mine par une galerie sans fermeture étanche, sur le site de Moyeuve-Grande, suite à l'action saisonnière été/hiver du tirage thermique (Pokryszka, 2006).

La charge aéraulique créée par le tirage naturel thermique entre le sous-sol et l'atmosphère extérieure dépend principalement du gradient de température entre ces deux milieux et de la position spatiale des différentes parties du réservoir souterrain par rapport à la surface (dénivellation). Pour situer l'ordre de grandeur, en considérant l'air pur, une dénivellation de 100 m et une différence de température entre l'atmosphère extérieure et les vides miniers de 25°C (valeur extrême), la charge du tirage thermique peut se situer entre 40 Pa et 90 Pa, selon les hypothèses prises concernant la distance nécessaire pour équilibrer la température de gaz (Pokryszka, 1999).

Dans la pratique, les dénivellations dans l'emprise d'une exploitation minière ne dépassent pas quelques centaines de mètres. Par conséquent, sauf configurations exceptionnelles, la charge aéraulique du tirage thermique dans le contexte post-minier sera limitée à quelques centaines de Pa.

#### 2.5.1.4 Pistonnage par remontée de nappe (ennoyage des vides)

L'ennoyage du réservoir minier réduit progressivement le volume des vides résiduels disponibles, avec pour effet de chasser le gaz de mine qu'ils contiennent. Selon la durée de cet ennoyage (pouvant varier de quelques mois à plusieurs décennies, voire plus d'un siècle<sup>6</sup>), le volume total des vides et la répartition spatiale du réservoir, le phénomène de pistonnage du gaz par l'eau sera plus ou moins fort. La période de remontée des eaux constitue donc une configuration transitoire importante vis-à-vis du risque de remontée en surface de gaz de mine.

Toutes choses égales par ailleurs, le débit de gaz et la pression de gaz au sein d'un réservoir souterrain engendrés par la remontée des eaux seront autant plus importants que la vitesse de l'ennoyage (remontée du niveau d'eau) sera rapide.

La phase habituellement la plus sensible est l'ennoyage des parties sommitales des vides post miniers et des terrains déconsolidés sus-jacents, les plus proches de la surface. Dans cette phase, selon la répartition spatiale des différentes parties du réservoir post minier et le contexte hydrologique du site, des quantités significatives de gaz, déplacées des parties ennoyées, peuvent être piégées et progressivement mises en pression dans les points hauts du réservoir. Ces accumulations de gaz de mine en surpression peuvent constituer une source de migration préférentielle vers la surface.

Il est à noter qu'une différence du niveau d'ennoyage entre deux ou plusieurs compartiments d'un même réservoir minier, même relativement faible (de l'ordre de quelques mètres), est susceptible d'engendrer un gradient de pression du gaz (surpression) très significatif (une différence des niveaux d'eau de 10 m correspondant à un gradient de pression de  $10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ bar}$ ).

On note aussi que, dans certaines exploitations où la phase d'ennoyage est déjà achevée, il peut subsister des phénomènes hydrodynamiques 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 a un impact potentiel sur les émissions de gaz.

#### 2.5.1.5 Stratification gravitaire de gaz

Ce phénomène ne concerne que les gaz dont la masse volumique est très différente de celle de l'air : le  $\text{CO}_2$  et le  $\text{CH}_4$ , dans le cas présent. Il agit de manière sensible quand les teneurs de ces gaz dans l'atmosphère atteignent un niveau significatif (quelques pour cent et plus), dans la mesure où le réservoir souterrain présente une porosité importante et interconnectée, sans pour autant être soumis à des échanges gazeux trop intensifs avec l'atmosphère extérieure (dilution de gaz).

Par principe, l'action significative de ce mécanisme n'est envisageable que dans le cas des réservoirs miniers alimentés en continu en gaz à forte concentration de  $\text{CO}_2$  ou de  $\text{CH}_4$ , ce qui limite sa pertinence au contexte d'anciennes exploitations de charbon.

---

<sup>6</sup> Cas des parties centrale et occidentale du bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais.

La charge aéraulique (surpression) induite par la stratification du CO<sub>2</sub> ou du CH<sub>4</sub> est difficile à estimer de manière précise car elle dépend des dimensions de la zone de stratification, du niveau des teneurs en gaz atteint et de très nombreux facteurs propres au site donné. Cependant, elle est limitée de par les principes physiques du phénomène. Par exemple, pour une dénivellation de 100 m entre les différentes parties du réservoir souterrain, elle ne peut pas dépasser la limite maximale théorique<sup>7</sup> de 700 Pa environ pour le CO<sub>2</sub> et de 500 Pa environ pour le CH<sub>4</sub>.

#### **2.5.1.6 Effets dynamiques liés au vent**

Ces effets sont engendrés par une interaction aérodynamique entre les masses d'air déplacées et la surface du sol (principalement par effet Venturi). Pour une configuration topographique donnée, ils sont directement liés à la direction et à la vitesse du vent. Ils sont donc aléatoires et agissent selon des cycles courts d'une durée allant de quelques minutes à quelques dizaines d'heures. Leur action conduit à des charges aérauliques relativement faibles et intermittentes, dans le temps et dans l'espace, orientées du réservoir vers la surface ou dans le sens inverse, en fonction de la direction du vent, du relief à la surface et de la répartition spatiale des vides miniers.

#### **2.5.1.7 Interaction entre les différents mécanismes**

Il est à noter, que tous les phénomènes décrits ci-avant peuvent être présents et agir simultanément sur un site donné, sachant que certains peuvent agir temporairement dans le sens d'une surpression ou au contraire d'une dépression de l'atmosphère d'un réservoir. La pression régnant au sein d'un réservoir minier sera donc une résultante des actions respectives de ces différents mécanismes qui peuvent tous contribuer, localement et/ou temporairement, à la mise en pression du réservoir ou bien s'opposer mutuellement.

Il est à remarquer que, indépendamment du contexte du site, les échanges gazeux entre un réservoir souterrain et la surface sont toujours plus ou moins influencés par les évolutions de la pression atmosphérique, les effets du vent et les effets thermiques.

#### **2.5.1.8 Phénomènes exceptionnels liés à l'instabilité de terrains**

Il s'agira principalement de sorties de gaz de nature dynamique, provoquées par un événement brutal de type effondrement des terrains ou instabilité d'un ouvrage d'infrastructure minière, accompagné d'un déplacement de volumes importants de roches et/ou de remblai.

On citera le cas le débouillage des remblais d'un puits incorrectement traité qui peut mettre en relation directe le réservoir minier et la surface, mais aussi occasionner une mise en pression rapide et des sorties volumineuses de gaz, en particulier sous l'effet d'un pistonnage dû à la descente brutale du remblai. Ce phénomène s'est déjà produit à plusieurs reprises. Le cas le mieux connu est celui du puits 7bis de Lens à Wingles dans le bassin du Nord et du Pas-de-Calais en

---

<sup>7</sup> Charge maximale créée par la différence entre la masse volumique de l'air pur et celle respectivement du CO<sub>2</sub> pur ou du CH<sub>4</sub> pur.

1987 (Sénat, 1987). Dans le même ordre d'idées, il est possible d'imaginer des effets similaires, suite à un effondrement brutal d'anciens travaux miniers partiels non remblayés de type chambres et piliers ou encore l'effondrement d'un segment important d'une galerie de mine non remblayée, débouchant vers la surface et/ou peu profonde.

Ces phénomènes sont difficilement prévisibles. Leur prise en compte dans l'analyse de l'aléa gaz de mine est à faire dès lors que cela est justifié par des résultats de l'étude des aléas liés aux mouvements de terrains.

### 2.5.2 Transport sous forme dissoute dans l'eau

Les gaz susceptibles d'être rencontrés au sein d'un réservoir minier souterrain ont des caractéristiques de solubilité dans l'eau très différentes. L'eau circulant ou stagnant dans les travaux miniers peut ainsi être mise en contact direct avec le gaz de mine et dissoudre ses constituants. Par ailleurs, l'augmentation de la perméabilité du milieu engendrée par une exploitation minière peut faciliter la circulation des eaux contenant naturellement le gaz et conduire, dans des cas particuliers, à leur émergence et à leur dégazage en surface.

La dissolution de gaz dans l'eau s'opère à des degrés variables selon les espèces concernées. Ainsi, l'eau de mine peut potentiellement contenir et véhiculer une grande quantité de dioxyde de carbone et de sulfure d'hydrogène (gaz très solubles) ainsi que des quantités sensiblement plus faibles d'autres gaz.

La solubilité d'un gaz donné diminue avec l'augmentation de la température de l'eau et augmente proportionnellement avec la pression hydrostatique. Lors de l'émergence en surface, la température de l'eau peut s'élever et surtout sa pression diminuer fortement si l'eau a une origine profonde.

Ces deux facteurs conduisent à un relargage plus ou moins rapide d'une partie des gaz dissous. A titre d'exemple, une eau à 10°C initialement saturée en gaz sous une surpression de 1 MPa (soit 100 m de charge hydraulique) peut perdre, lors de sa détente, environ 0,5 m<sup>3</sup> de méthane et 12 m<sup>3</sup> de dioxyde de carbone par mètre cube.

Les dangers de cette situation sont évidents. A noter que des accidents liés un relargage de gaz dissous se sont déjà produits dans le passé, notamment lors de l'exploitation des mines de charbon.

Dans le contexte de « l'après-mine », le problème du transfert de gaz vers la surface sous forme dissoute dans l'eau ne se présente, dans la pratique, que localement au droit des zones d'émergence (aménagées ou spontanées).

La quantité de gaz libérés en surface et leurs teneurs engendrées localement à la source dépendent de nombreux facteurs, dont les plus importants sont la nature (solubilité) de gaz, le débit d'eau et son degré de saturation en gaz (pression partielle). Ce dernier paramètre est une fonction complexe de la quantité disponible, des teneurs et de la pression de gaz au sein du réservoir souterrain ainsi que du parcours et du temps de séjour de l'eau dans ce réservoir. Parmi quelques cas connus en France, les gaz concernés sont : le CO<sub>2</sub> dans une large majorité des cas, beaucoup plus rarement le H<sub>2</sub>S et exceptionnellement le CH<sub>4</sub>.

## 2.6 VOIES DE MIGRATION DE GAZ VERS LA SURFACE

Comme démontré dans les chapitres précédents, le gaz de mine présent dans le réservoir minier souterrain peut, sous certaines conditions, migrer en quantité significative vers la surface.

Ces échanges gazeux avec la surface peuvent se faire de préférence :

- par les anciens ouvrages débouchant au jour (ODJ) comme les puits, descenderies, galeries d'accès, sondages, etc. Même s'ils sont obturés et isolés du jour, ils constituent toujours des « points potentiellement faibles », par lesquels un passage des gaz vers la surface reste privilégié ou possible ;
- par les terrains de recouvrement, en fonction de leur épaisseur, de leur perméabilité globale naturelle, du degré de leur perturbation par l'exploitation et de la présence de drains préférentiels naturels, comme failles, crevasses naturelles ou certaines couches particulières à perméabilité élevée.

On note aussi que les émergences d'eaux minières (aménagées ou non) constituent toujours des lieux de relargage potentiel des gaz dissous, dans la mesure où les conditions du site et la nature du gaz ont permis sa dissolution en quantité significative (cf. chapitre 2.5.2).

La figure 5 illustre les différentes voies potentielles de remontée en surface de gaz de mine.

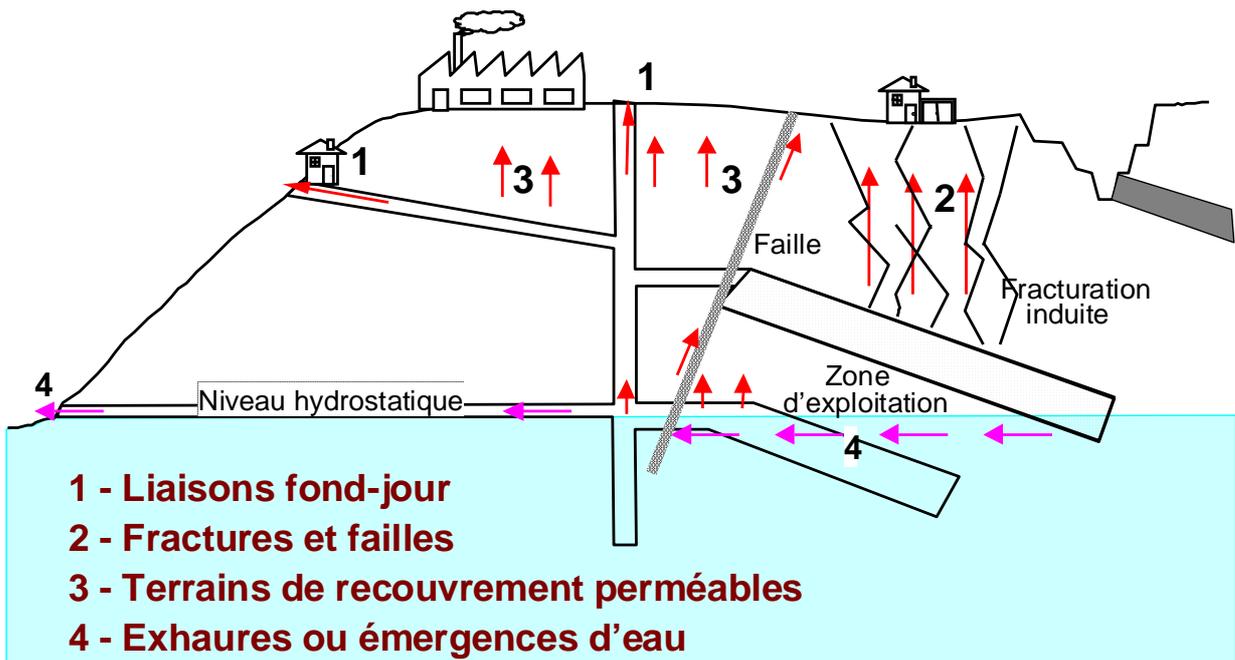


Figure 5. Voies de migrations de gaz de mine vers la surface (Pokryszka et al., 2005).

La photo sur la figure 6 montre un exemple de sortie de gaz de mine par une galerie d'accès laissée ouverte pour des raisons techniques.



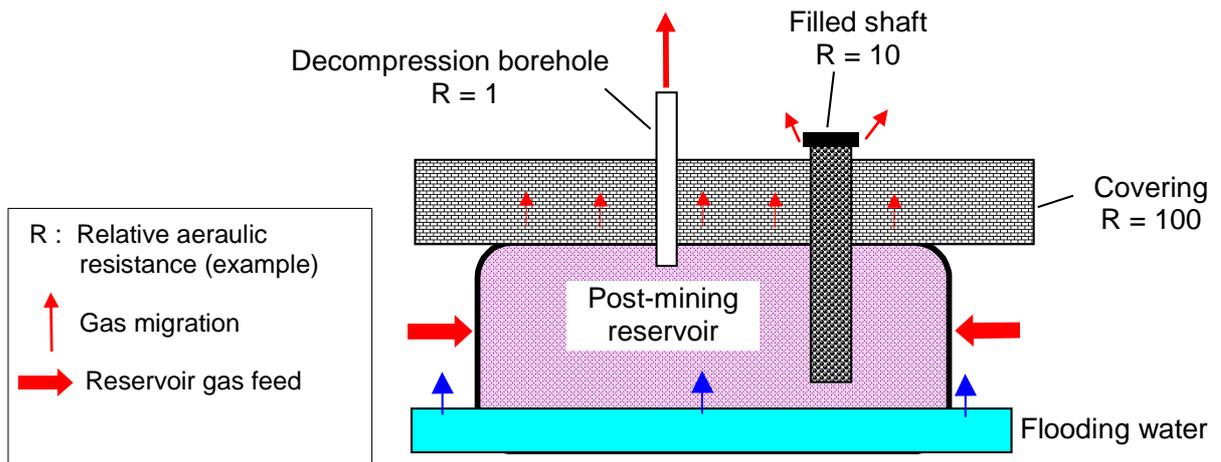
*Figure 6. Visualisation, à l'aide de fumigène, de la sortie de gaz de mine par une galerie minière ouverte, dans le bassin ferrifère lorrain.*

Il est à noter que, dans le but de mieux gérer les risques liés aux gaz, on met en place, dans certains cas, des exutoires préférentiels et contrôlés pour le gaz (ouvrages de décompression).

Il s'agit d'ouvrages d'infrastructure minière déjà existante et convenablement aménagés (puits, le plus souvent) ou de forages réalisés spécialement pour relier les travaux souterrains avec la surface. Ils sont destinés à canaliser une partie du gaz en lui offrant une voie de sortie sensiblement moins résistante que des anciennes liaisons fond-jour fermées ou les terrains de recouvrement (Tauziède et Pokryszka 1998 ; 2002).

Dans le cas d'une mise en pression du réservoir souterrain, la migration de gaz par écoulement sera répartie selon la résistance aéraulique des terrains de recouvrement, des anciens ouvrages d'infrastructure minière débouchant vers la surface et, s'ils existent, des ouvrages aménagés pour canaliser le gaz (ouvrages de décompression).

La figure 7 montre un schéma conceptuel de la répartition du flux gazeux émanant d'un réservoir souterrain en surpression, selon la résistance relative des différentes voies de migration possibles.



*Figure 7. Schéma de principe de la répartition du flux gazeux émanant d'un réservoir souterrain en surpression, selon la résistance relative des différentes voies de migration (Pokryszka et al., 2005).*

Il est à noter que, si la situation le justifie, les ouvrages de décompression peuvent être équipés d'un système de ventilation mécanique voire d'un dispositif de pompage (captage) de gaz.

Les réservoirs miniers riches en méthane peuvent même faire l'objet d'un captage à l'échelle industrielle visant à valoriser le gaz de mine comme une ressource énergétique.

Une grande partie du gaz produit par le réservoir post minier peut ainsi être canalisée et récupérée en surface. C'est par exemple le cas d'une partie majeure des vieux travaux miniers du bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais, où le captage de gaz de mine depuis la surface est opéré à une grande échelle depuis les années 1980.

### **3. DÉFINITION DE L'ALÉA**

#### **3.1 RAPPEL DE LA DÉFINITION GÉNÉRALE DE L'ALEA**

L'aléa correspond à la probabilité qu'un phénomène dangereux donné se produise sur un site donné, au cours d'une période de référence, en atteignant une intensité qualifiable ou quantifiable. La caractérisation d'un aléa repose donc classiquement sur le croisement de **l'intensité prévisible du phénomène** avec sa **probabilité d'occurrence**.

Dans une optique de prévention des risques et d'aménagement du territoire telle que retenue dans le cadre de l'élaboration d'un PPRM, la période de référence pour identifier le niveau d'aléa est généralement le **long terme**. Il est ainsi nécessaire d'intégrer à l'analyse l'évolution dans le temps des phénomènes dangereux concernés et du site étudié lui-même.

L'**intensité du phénomène** correspond à l'ampleur des désordres, séquelles ou nuisances susceptibles de résulter du phénomène redouté. Cette notion intègre à la fois une notion de hiérarchisation des grandeurs caractérisant les conséquences des événements redoutés, mais également leur potentiel de gravité sur les personnes, les biens et l'usage du sol (possibilité de faire des victimes ou des dégâts, existence et/ou coût de parades de prévention...).

La notion de **probabilité d'occurrence**, qui traduit pour sa part la sensibilité que présente un site à être affecté par l'un ou l'autre des phénomènes analysés, est généralement moins aisée à appréhender et à quantifier que celle d'intensité. Quelle que soit la nature des événements redoutés, la complexité des mécanismes, la nature hétérogène du milieu naturel, le caractère très partiel des informations disponibles et le fait que de nombreux désordres, séquelles ou nuisances ne soient pas répétitifs expliquent qu'il est généralement impossible de raisonner sur la base de probabilités quantitatives (X% de risque de développement d'un désordre).

Par conséquent, dans la démarche d'évaluation des aléas « après mine », il a été choisi de privilégier une classification qualitative caractérisant une **prédisposition** du site à subir tel ou tel type de désordres ou nuisances (INERIS, 2006). C'est donc cette notion de **prédisposition** qui sera retenue dans la suite du document pour évaluer l'aléa « gaz de mine ».

La **prédisposition** d'un site à l'apparition de désordres ou nuisances est évaluée et qualifiée en fonction de paramètres spécifiques (géologiques, hydrogéologiques, géomécaniques, aérauliques, géochimiques...) caractérisant l'environnement du secteur considéré. Le choix des paramètres est fait en fonction du type d'aléa étudié. Dans tous les cas, il est également indispensable de prendre en compte les techniques d'exploitation utilisées et leur influence sur les caractéristiques du secteur.

Le guide méthodologique pour l'élaboration des PPRM préconise l'emploi des termes suivants pour définir la prédisposition d'un site : « nulle », « peu sensible », « sensible » et « très sensible » (INERIS, 2006).

L'intensité d'un phénomène redouté correspond à l'ampleur des désordres, séquelles ou nuisances susceptibles de résulter de ce phénomène. Elle s'exprime généralement sous la forme d'une échelle graduée. Par convention, les qualificatifs « nulle », « limitée », « modérée » et « élevée » ont été retenus pour caractériser les niveaux d'intensité croissante (INERIS, 2006).

Le principe de qualification de l'aléa consiste donc à combiner les critères permettant de caractériser l'intensité d'un phénomène redouté avec ceux permettant de caractériser la classe correspondante de prédisposition du site étudié (cf. figure 8).

Prédisposition \ Intensité	Peu sensible	Sensible	Très sensible
Limitée			
Modérée			
Elevée			

Figure 8. Principe de qualification de l'aléa par la combinaison de l'intensité d'un phénomène redouté avec la prédisposition du site étudié (INERIS, 2006).

Le croisement de la prédisposition et de l'intensité sous la forme d'une matrice précise n'est pas obligatoire mais, dans la pratique, c'est cette représentation qui est le plus souvent retenue.

Le guide PPRM préconise d'utiliser trois classes d'aléa « faible », « moyen » et « fort » (INERIS, 2006).

### 3.2 DÉFINITION DE L'ALEA « GAZ DE MINE » ET DE SES COMPOSANTS

L'aléa « gaz de mine » est lié aux effets potentiels de la remontée, depuis les vides miniers vers la surface, de gaz dangereux qui peuvent porter atteinte à la santé ou à la sécurité publique, en raison de leur capacité à intoxiquer, à asphyxier, à s'enflammer ou à exploser (cf. chapitre 2.4).

Cet aléa concerne tous les travaux miniers et les formations géologiques influencées par ces travaux, susceptibles de produire ou de contenir des gaz dangereux, à partir desquels des mélanges gazeux peuvent ensuite migrer et être émis en surface.

En pratique, sauf configuration exceptionnelle, l'aléa « gaz de mine » ne concerne que les exploitations minières souterraines (cf. chapitre 2.1).

La phase d'évaluation de l'aléa a pour objectif de localiser et de hiérarchiser les zones exposées au phénomène d'émission de gaz de mine en surface, en fonction de l'intensité de ce phénomène et de la prédisposition prévisible du site à que ce phénomène se présente en surface.

Comme mentionné dans la définition globale de l'aléa, son **évaluation ne prend pas en compte la vulnérabilité des cibles, c'est-à-dire ici la nature de l'occupation en surface.**

L'aléa « gaz de mine » se singularise des autres aléas liés à l'après-mine par l'influence simultanée et parfois croisée de plusieurs mécanismes ou facteurs physiques ou physico-chimiques particuliers. En effet, l'aléa n'est pas uniquement déterminé par les propriétés du sous-sol, des vides anthropiques post-miniers et du massif rocheux encaissant, mais il est aussi dépendant de la nature des gaz présents, de leurs propriétés intrinsèques, des possibilités de leur migration, de leurs interactions éventuelles avec le milieu et enfin de leurs effets potentiels sur l'homme et, dans le cas de gaz inflammables, aussi sur les biens.

De ce fait, il est important d'identifier le rôle de ces différents paramètres, pour les positionner clairement dans l'une des deux composants nécessaires pour l'évaluation de l'aléa : l'intensité et la prédisposition.

L'intensité du phénomène correspond à l'ampleur potentielle des séquelles et nuisances susceptibles de résulter du phénomène redouté.

Dans le cas de l'aléa « gaz de mine », l'**intensité** s'exprime (i) par l'**aptitude du réservoir minier à produire ou à contenir les gaz dangereux** (en termes de composition et de quantité) et (ii) par l'**importance potentielle du flux de ces gaz vers la surface.**

Les termes concernant les gaz dangereux et l'importance potentielle du flux de ces gaz sont développés dans le chapitre 4.

La prédisposition d'un site dans le contexte de l'analyse de l'aléa correspond à sa sensibilité à l'apparition de désordres ou nuisances, c'est-à-dire, dans le cas des gaz de mine, à l'apparition des gaz en surface.

Dans l'analyse de l'aléa « gaz de mine » la **prédisposition** d'un site post-minier, s'exprime par les **propriétés du milieu environnant ce site à permettre (ou au contraire à limiter) la migration vers la surface de gaz présents au sein des vieux travaux miniers.**

Il est important de noter que l'approche présentée ci-avant est spécifique à la problématique de gaz de mine et se distingue partiellement du schéma général appliqué aux autres aléas post-miniers, tel l'aléa « mouvements de terrain ».

Dans le cas du gaz de mine, l'intensité n'est pas considérée en surface. La démarche proposée consiste à évaluer l'intensité du phénomène redouté au niveau du réservoir post-minier, que l'on viendra ensuite croiser avec la prédisposition du milieu environnant à laisser migrer les gaz vers la surface.

### **3.3 PRISE EN COMPTE DE L'ÉVOLUTION D'UN SITE MINIER DANS LE TEMPS**

Comme dans le cas de certains autres aléas post-miniers, l'évaluation de l'aléa « gaz de mine » doit tenir compte des différentes phases d'évolution d'un site minier. Il s'agit principalement de la situation hydrologique (avant, pendant ou après la remonté des eaux), mais aussi, ultérieurement, d'autres évolutions principalement d'ordre géochimique ou hydrogéologique, lorsqu'elles peuvent avoir une influence sur la présence ou sur la migration des gaz dangereux.

Le document synthétisant l'évaluation de l'aléa pour un site donné doit préciser clairement la (les) phase(s) concernée(s) par l'étude et si possible sa (leur) durée prévisible.

Pour certains sites, l'aléa « gaz de mine » établi à un instant donné pourra nécessiter d'être révisé par la suite. Suivant les configurations (ennoyage des vides notamment), l'évolution dans le temps des phénomènes gazeux (intensité ou/et prédisposition) peut en effet s'avérer suffisamment importante pour modifier le niveau d'aléa (aggravation ou atténuation) ou sa spatialisation en surface.

## 4. INTENSITÉ DU PHÉNOMÈNE REDOUTÉ ET PRINCIPES DE SON ÉVALUATION

### 4.1 COMPLÉMENT DE LA DÉFINITION ET PRINCIPAUX FACTEURS À CONSIDÉRER

L'intensité du phénomène redouté s'exprime, dans le cas de l'aléa « gaz de mine », par l'aptitude du réservoir minier à produire ou à contenir les gaz dangereux (en termes de composition et de quantité) et par l'importance potentielle du flux de ces gaz vers la surface.

L'importance potentielle du flux de gaz dépend, elle-même, de l'existence de phénomènes (moteurs), évoqués au chapitre 2.5, nécessaires pour animer la migration de ces gaz vers la surface, ainsi que de leur puissance.

La remontée en surface d'un gaz de mine est susceptible de présenter des dangers, principalement pour les personnes et, en cas de gaz inflammables, aussi pour les biens. Il s'agit des dangers d'inflammation, d'explosion, d'asphyxie et d'intoxication.

Des dangers vis-à-vis des biens ou infrastructures n'existent que lorsque le gaz de mine est inflammable, car son accumulation peut conduire à une inflammation ou une explosion. Cependant, les personnes étant également exposées dans un tel scénario, nous considérerons par la suite, pour simplifier l'analyse, que l'intensité du phénomène ne se traduit qu'en termes de dangerosité sur les personnes.

De par la nature des phénomènes dangereux, prise en compte pour l'évaluation de l'aléa gaz de mine, **on considère une exposition de type accidentel, c'est-à-dire de courte durée** (de l'ordre de l'heure ou moins), à l'opposé d'une exposition de type chronique de longue durée qui n'est pas pertinente dans le cas présent (cf. chapitre 1).

Les grandeurs les plus importantes permettant de décrire l'intensité du phénomène redouté sont les suivantes :

- **la composition du gaz de mine ;**

Parmi les gaz ou les mélanges gazeux redoutés, seuls quelques composants sont inflammables ou toxiques et, parmi les gaz toxiques, tous n'ont pas le même niveau de toxicité.

En parallèle, il faut prendre en compte le caractère potentiellement asphyxiant des mélanges gazeux présents. C'est donc par la connaissance de la composition du gaz de mine que l'on peut en déterminer les dangers et leur niveau. La composition du gaz de mine peut être déterminée à partir des données recueillies dans la phase informative et/ou par des mesures in situ (cf. chapitre 7).

Le tableau 4 ci-après résume les principaux dangers à considérer pour les composants les plus fréquents du gaz de mine.

<b>Caractéristique de l'atmosphère</b>	<b>Principal effet dangereux associé</b>
Déficit en oxygène	Asphyxie
Présence de dioxyde de carbone	Intoxication
Présence de sulfure d'hydrogène	Intoxication
Présence de monoxyde de carbone	Intoxication
Présence de méthane et d'autres hydrocarbures gazeux	Inflammation ou explosion

*Tableau 4. Principaux dangers à considérer, liés à la présence de certains gaz et au déficit en oxygène dans l'atmosphère des réservoirs post miniers.*

- **la quantité (débit) de gaz produits** ou pouvant être produits par le réservoir minier, susceptibles de migrer vers la surface ;

Les conséquences du phénomène seront d'autant plus importantes que la quantité de gaz produite par le réservoir post minier et disponible pour pouvoir potentiellement émaner en surface sera considérable.

En résumé, pour évaluer l'intensité du phénomène, il est nécessaire de prendre en compte en parallèle la composition du gaz de mine et le débit généré, c'est-à-dire l'importance de la production de ce gaz au sein du réservoir post minier. Ces deux facteurs sont déterminés, pour un site donné, par la nature des phénomènes à l'origine de la présence du gaz dans les vides miniers et des mécanismes du transfert de ce gaz vers la surface.

## 4.2 CRITÈRES D'ÉVALUATION

Le tableau 5 propose les classes d'intensité et les principaux critères de leur définition, en fonction de **la composition du gaz et du débit généré** (ou importance de l'émission) **au niveau du réservoir post-minier**. Ce classement et les critères associés constituent une évolution de l'approche proposée dans le guide PPRM général (INERIS, 2006).

Il prend en compte l'expérience acquise dans le cadre des études réalisées depuis la rédaction de ce document. De même, la terminologie a été légèrement modifiée, dans le but de l'harmoniser avec celle utilisée dans l'approche dédiée à l'établissement des Plans de Prévention des Risques Technologiques (Guide PPRT, 2007).

Il est à noter que, d'après l'expérience acquise jusqu'à présent, la configuration correspondant à l'intensité « **très élevée** », prévue pour le gaz de mine dans le guide PPRM général, est peu probable dans la pratique, même si son apparition ne peut être exclue dans un cas très particulier.

Pour homogénéiser les classes d'intensité selon le schéma retenu pour l'élaboration des PPRM (à savoir trois classes : limitée, modérée et élevée, cf. chapitre 3.1 ), nous avons pris le parti de fondre cette catégorie « très élevée » au sein de la cette classe d'intensité « élevée » (tableau 5).

Dans le cas d'une configuration complexe avec différents gaz présents, il faut considérer la situation potentiellement la plus dangereuse en ce qui concerne la nature des gaz et leurs niveaux d'émission respectifs.

Il est important de souligner que la présence d'eau et l'envoyage des vieux travaux miniers influencent fortement l'intensité des phénomènes gazeux, ce qui doit être pris en compte dans l'analyse. Cet aspect est discuté spécifiquement dans le chapitre 4.3.

<b>Classes d'intensité</b> Classement et appellations préconisés pour la qualification de l'aléa (2015)	<b>Classes d'intensité</b> Classement et appellations du Guide PPRM (INERIS, 2006)	<b>Caractéristiques de l'émission de gaz au niveau des vides miniers</b>
<b>Nulle</b>	-	<b>Absence de gaz inflammables.</b> <b>Teneurs en gaz asphyxiants ou toxiques ne dépassent pas les Teneurs Limites définies par la Réglementation en vigueur (TLR).</b>
<b>Limitée</b>	Très faible à faible	Emission contenant : <ul style="list-style-type: none"> <li>• soit des gaz inflammables, à des <b>teneurs inférieures à la Limite Inférieure d'Explosibilité (LIE)</b>,</li> <li>• soit des gaz asphyxiants ou toxiques, à des <b>teneurs dépassant les TLR</b> mais ne pouvant entraîner qu'un <b>effet faible et réversible</b>.</li> </ul>
<b>Modérée</b>	Modérée	<b>Emission faible à moyenne</b> contenant : <ul style="list-style-type: none"> <li>• soit des gaz inflammables, à des <b>teneurs supérieures ou égales à la LIE</b> :</li> <li>• soit des gaz asphyxiants ou toxiques, à des <b>teneurs pouvant entraîner un effet irréversible</b> :</li> </ul> ou : <b>Emission faible</b> contenant des gaz asphyxiants ou toxiques, à des <b>teneurs pouvant entraîner un effet léthal</b> .
<b>Elevée</b>	Elevée	<b>Emission importante</b> contenant des gaz : <ul style="list-style-type: none"> <li>• soit des gaz inflammables, à des <b>teneurs supérieures ou égales à la LIE</b>,</li> <li>• soit asphyxiants ou toxiques, à des <b>teneurs pouvant entraîner un effet irréversible</b>.</li> </ul> ou : <b>Emission moyenne</b> contenant des gaz asphyxiants ou toxiques, à des teneurs pouvant entraîner un <b>effet léthal</b> .
	Très élevée	<b>Emission importante</b> contenant des gaz asphyxiants ou toxiques, à des <b>teneurs élevées pouvant entraîner immédiatement un effet léthal</b>

*Tableau 5. Classes d'intensité du phénomène « émission de gaz de mine » et critères du classement.*

Pour faciliter la détermination de l'intensité, une déclinaison du tableau 5 est faite dans le tableau 6 suivant sous forme d'une combinaison entre les paramètres retenus pour caractériser l'émission de gaz **au niveau des vides miniers** : les teneurs et les différents niveaux de l'émission potentielle.

<b>Teneurs</b>	<b>Emission</b>	Faible	Moyenne	Importante
Gaz inflammables = 0 Gaz toxiques $\leq$ TLR Oxygène $\geq$ TLR		<b>Intensité nulle</b>	<b>Intensité nulle</b>	<b>Intensité nulle</b>
$0 <$ Gaz inflammables $<$ LIE TLR $<$ Gaz toxiques $<$ SEI TLR $>$ Oxygène $>$ SEI		<b>Intensité limitée</b>	<b>Intensité limitée</b>	<b>Intensité limitée</b>
Gaz inflammables $\geq$ LIE SEI $\geq$ Gaz toxiques $>$ SEL SEI $\leq$ Oxygène $<$ SEL		<b>Intensité modérée</b>	<b>Intensité modérée</b>	<b>Intensité élevée</b>
Gaz toxiques $\geq$ SEL Oxygène $\leq$ SEL		<b>Intensité modérée</b>	<b>Intensité élevée</b>	<b>Intensité élevée</b>

TLR : Teneurs Limites définies par la Réglementation en vigueur

SEI : Seuil d'Effets Irréversibles

SEL : Seuil d'Effets Létaux

LIE : Limite Inférieure d'Explosibilité

*Tableau 6. Qualification de l'intensité par la combinaison des teneurs en gaz avec les différents niveaux de leur émission potentielle.*

La définition des teneurs limites TLR, SEI, SEL et LIE pour les gaz est faite dans le chapitre 4.2.1 ci-après. Les termes caractérisant le niveau de l'émission potentielle de gaz au niveau du réservoir sont précisés dans le chapitre 4.2.2.

#### 4.2.1 Définition des teneurs limites pour les gaz émis

Les critères proposés concernant les teneurs limites d'explosibilité des gaz inflammables sont les mêmes que ceux retenus dans le guide méthodologique PPRM précédemment cité (INERIS, 2006). Il en est de même pour les teneurs limites réglementaires (TLR) relatives à l'oxygène et aux gaz nocifs les plus fréquemment rencontrés dans le contexte post- minier (CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>S).

Pour les teneurs seuils relatives aux effets sur l'homme, des simplifications ont été faites en proposant, pour un gaz donné, une seule valeur seuil par nature de l'effet (irréversible ou létaux). De même, certaines valeurs seuils ont été réajustées, pour prendre en compte les évolutions réglementaires et les nouvelles valeurs de référence établies depuis la publication du guide PPRM en 2006.

Il est à préciser que **ces critères s'appliquent à la composition du mélange gazeux constaté ou supposé régner au sein du réservoir post-minier.**

En l'absence de données plus précises, on considère en effet par défaut que le **mélange gazeux contenu dans le sous-sol est susceptible d'être émis en surface sans modification significative** (ni dilution, ni autre forme de modification de la composition initiale présente au sein du réservoir).

Cette hypothèse est sécuritaire, mais elle correspond à une configuration qui est souvent observée dans la pratique, notamment sur les ouvrages miniers non étanches. Seules des informations quantifiées disponibles (résultats de mesures in situ) et représentatives, en termes d'évolution dans le temps et dans l'espace, permettront de statuer différemment et de retenir la nature et la teneur des gaz émis en surface potentiellement différentes de celles identifiées au sein du réservoir.

#### 4.2.1.1 Limite Inférieure d'Explosibilité (LIE)

La Limite Inférieure d'Explosibilité (LIE) est la teneur volumique minimale d'un gaz dans l'air nécessaire pour entretenir une combustion. En dessous de celle-ci, la quantité de gaz est insuffisante pour qu'il y ait propagation de la combustion au sein du mélange.

Les LIE des gaz inflammables susceptibles d'être présents dans le gaz de mine sont :

- pour le méthane : 5% ;
- pour le monoxyde de carbone : 12,5% ;
- pour le sulfure d'hydrogène : 4,3%.

#### 4.2.1.2 Teneurs Limites définies par la Réglementation (TLR)

S'agissant de l'oxygène et des composants nocifs les plus classiques susceptibles d'être présents dans le gaz de mine, la réglementation la plus pertinente pour le domaine concerné stipule que<sup>8</sup> :

- « les teneurs instantanées en substances dangereuses de l'atmosphère respirée par chaque personne soient au plus égales à :
  - 1% pour le dioxyde de carbone ;
  - 50 ppm pour le monoxyde de carbone ;
  - 5 ppm pour le sulfure d'hydrogène.
- la teneur en oxygène de l'atmosphère soit au moins égale à 19% ».

Il est donc proposé de retenir ces limites comme références pour l'analyse de l'aléa « gaz de mine » et de les considérer comme étant des Teneurs Limites définies par la Réglementation (TLR) mentionnés dans les tableaux 5 et 6.

#### 4.2.1.3 Critères pour les teneurs entraînant des impacts sur l'homme

Pour la plupart des gaz toxiques, les effets nocifs dépendent en parallèle de la teneur et de la durée d'exposition. De manière générale, plus le temps d'exposition est long, plus les teneurs entraînant les effets nocifs sont faibles.

<sup>8</sup> Arrêté du 8 juin 1990 relatif à la teneur minimale en oxygène ainsi qu'aux teneurs limites en substances dangereuses admissibles dans l'atmosphère des travaux souterrains.

Pour situer les teneurs entraînant des effets nocifs sur l'homme, tels que mentionnées dans le tableau du classement d'intensité (tableaux 5 et 6), il est proposé d'utiliser les valeurs seuil de référence regroupées dans le tableau 7 suivant.

Les seuils d'entrée définissant la plage des effets faibles et réversibles correspondent aux TLR identifiées au chapitre 4.2.1.2. Les valeurs seuils pour les effets irréversibles (SEI) et létaux (SEL) sont issues pour la plupart du guide méthodologique PPRT (Guide PPRT, 2007) et des fiches de seuils de toxicité aiguë établies par l'INERIS et préconisés par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, pour les études de danger à réaliser dans le cadre de l'établissement des PPRT (MEDDE, 2013)

En cas d'indisponibilité des données, les seuils ont été établis à partir des sources bibliographiques citées dans le chapitre 2.4.

A noter que pour le CO et le H<sub>2</sub>S, les sources d'information utilisées donnent plusieurs seuils dépendant du temps d'exposition. Conformément aux principes de prise en compte d'un risque de type accidentel, évoqués aux chapitres 1 et 4.1, les valeurs seuils retenues dans le tableau 7 correspondent à une exposition d'une heure.

	Effets faibles et réversibles	Effets irréversibles	Effets létaux
Oxygène <sup>9, 10, 11</sup> (%)	19 > Teneur > 16	16 ≥ Teneur > 11	Teneur ≤ 11
Dioxyde de carbone <sup>10, 11</sup> (%)	1 < Teneur < 5	5 ≤ Teneur < 10	Teneur ≥ 10
Monoxyde de carbone <sup>10, 12, 12</sup> (ppm)	50 < Teneur < 800	800 ≤ Teneur < 3200	Teneur ≥ 3200
Sulfure d'hydrogène <sup>10, 12, 13</sup> (ppm)	5 < Teneur < 80	80 ≤ Teneur < 370	Teneur ≥ 370

*Tableau 7. Critères retenus pour quantifier les teneurs limites entraînant des impacts sur l'homme.*

Dans la mesure où plusieurs gaz dangereux seraient susceptibles d'être présents simultanément à des teneurs dangereuses, ces valeurs seuils peuvent être revues selon le cas, pour tenir compte d'un possible effet de synergie des gaz toxiques et/ou asphyxiants.

<sup>9</sup> Arrêté du 8 juin 1990 relatif à la teneur minimale en oxygène ainsi qu'aux teneurs limites en substances dangereuses admissibles dans l'atmosphère des travaux souterrains

<sup>10</sup> Monomakoff, 1978 ; NWOSH, 2009 ; INRS, 2014

<sup>11</sup> Guide PPRT, 2007

<sup>12</sup> <http://www.ineris.fr/fr/fiches-de-seuils-de-toxicite-aigue/fiches-de-seuils-de-toxicite-aigue>

Cependant, vu la complexité du problème et le nombre très important de configurations possibles, il est proposé d'analyser ce type de situations au cas par cas. Dans la pratique, il s'avère suffisant, dans la plupart des cas, de prendre en compte le gaz dont la teneur constatée dans le réservoir minier est susceptible d'entraîner les effets nocifs les plus graves.

#### 4.2.2 Qualification du flux (ou débit) de gaz généré

##### 4.2.2.1 Approche et critères de qualification

La qualification **l'émission de gaz** mentionné dans les tableaux 5 et 6 est faite en fonction du **débit** ou du **flux**<sup>13</sup> de gaz généré (ou pouvant l'être) par les vides miniers. Pour une teneur en gaz nocif donnée au sein du réservoir minier, cette grandeur détermine en effet les conséquences néfastes potentielles en surface.

Pour la caractériser selon les classes adoptées dans les tableaux 5 et 6, nous faisons appel à une situation hypothétique de transfert de gaz depuis le réservoir minier vers un espace d'accumulation en surface ;

Dans ce raisonnement, on considère que la migration du gaz vers la surface se fait **sans aucun obstacle, donc sans la résistance aéraulique qu'exercent les terrains de recouvrement ou les ouvrages miniers débouchant au jour**. La résistance du milieu à la migration de gaz est, rappelons le, prise en compte dans l'analyse de la prédisposition (cf. chapitre 5).

On souligne qu'il s'agit d'une approche purement hypothétique liée à la spécificité de la problématique de gaz de mine. Elle est utilisée uniquement pour évaluer l'intensité de **l'émission de gaz au niveau du réservoir minier** et reste sans aucun lien avec la vulnérabilité réelle des cibles en surface, dont l'analyse ne fait pas partie de l'évaluation de l'aléa (cf. chapitre 3.2).

Ainsi, il est proposé de retenir les critères de qualification suivants :

- **émission faible** : émission avec un débit (flux) qui, en cas d'arrivée directe en surface, ne peut générer d'accumulation de gaz nocif(s) qu'au sein d'espaces confinés ne disposant pas de renouvellement d'air normal et régulier ;
- **émission moyenne** : émission avec un débit (flux) qui, en cas d'arrivée directe en surface, peut créer une accumulation dans des espaces confinés disposant d'un renouvellement d'air régulier, assuré par des échanges gazeux naturels (tirage thermique et diffusion) ;
- **émission importante** : émission avec un débit (flux) pouvant créer une accumulation dans des espaces non confinés ou dans des espaces confinés bénéficiant d'un renouvellement d'air mécanique standard, non dimensionné spécifiquement pour une dilution des gaz dangereux.

##### 4.2.2.2 Démarche à suivre

La classification définie ci-avant présente un caractère qualitatif et permet d'affirmer les principes de la démarche. Il est en effet très difficile de proposer des critères quantitatifs précis et universels, compte tenu de la diversité des gaz (et mélanges) possibles et de la difficulté de quantifier, dans l'espace et le temps, les caractéristiques de l'émission gazeuse envisageable. L'approche proposée pourra

---

<sup>13</sup> débit ramené à l'unité de surface par laquelle le gaz émane

être développée et précisée davantage au cas par cas, en fonction des caractéristiques du site analysé et de la qualité des données disponibles sur la composition du gaz de mine.

On notera aussi que les données collectées dans la phase informative et lors d'éventuelles campagnes de mesures peuvent fournir des indications décisives pour permettre à l'expert de statuer sur le niveau d'émission potentiellement prévisible.

Le flux de gaz de mine évalué à cette étape doit être systématiquement comparé avec le niveau d'émission à la surface du sol de gaz d'origine naturelle. A l'exception des zones particulières d'anomalies géochimiques (à étudier au cas par cas), cette émission naturelle est à considérer comme faible et constitue un niveau plancher de référence. Les données nécessaires peuvent être obtenues à partir de la littérature scientifique et/ou par des mesures directes in situ (cf. chapitre 7.2). Il est à retenir que l'émission naturelle est très différente selon les gaz et se caractérise par des variations géographiques et saisonnières habituellement importantes. Elle concerne principalement le CO<sub>2</sub>, beaucoup plus rarement le méthane et exceptionnellement d'autres gaz.

Dans une grande majorité de cas, les données expérimentales concernant les caractéristiques d'émission de gaz des vieux travaux miniers sont insuffisantes voire inexistantes. Une analyse du contexte du site étudié et des mécanismes potentiels intervenant pourra être très utile : elle peut s'avérer, dans certains cas, suffisante pour la qualification du niveau possible d'émission de gaz par un réservoir post-minier. Elle devra donc être entreprise en premier lieu, avant de décider d'une approche expérimentale plus longue et plus coûteuse.

Si cette analyse n'aboutit pas à une qualification suffisamment claire et fiable, des mesures spécifiques devront être entreprises pour vérifier les résultats obtenus ou pour fournir des données complémentaires nécessaires (cf. chapitres 7.2 et 8).

#### 4.2.3 Prise en compte du volume des vides miniers et de la nature des phénomènes animant la migration de gaz

Comme cela a été dit précédemment, le mode de migration majeur conduisant au transfert du gaz de mine vers la surface est l'écoulement animé par une différence positive des pressions entre le réservoir souterrain et l'atmosphère libre. Dans ce cas, les facteurs principaux déterminant le niveau d'émission possible sont :

- le volume des vides souterrains ;
- la puissance intrinsèque du (des) phénomène(s) conduisant à la mise en pression du réservoir.

##### 4.2.3.1 Volume des vides miniers

Quelle que soit l'origine du gaz de mine, la quantité de gaz susceptible de s'accumuler et de migrer vers la surface est directement liée au volume disponible au sein du réservoir minier. En considérant, dans une première approche, les gaz présents comme parfaits au sens des lois physiques, la quantité de gaz « disponible » pouvant transiter vers la surface est directement proportionnelle au volume du réservoir et à la surpression des gaz en son sein.

Le volume non ennoyé du réservoir souterrain, sa répartition dans l'espace et son évolution dans le temps (effet de l'ennoyage) constitueront donc des éléments importants dans l'évaluation de l'intensité du phénomène redouté.

Par ailleurs, ce volume est toujours à associer avec la surface concernée par la remontée potentielle de gaz : autrement dit, toutes les choses égales par ailleurs (composition du gaz, profondeur, etc.), une remontée de gaz depuis un réservoir de volume limité mais concernant une surface restreinte peut être aussi dangereuse (voire plus) qu'une émission provenant d'un réservoir très volumineux mais s'opérant sur une surface très étendue.

Compte tenu de la complexité du problème, il est difficile d'établir des critères quantitatifs universels. Habituellement, on considérera comme significatifs des volumes de réservoir minier supérieurs à 10 000 m<sup>3</sup> et comme importants ceux dépassant 1 Mm<sup>3</sup>.

Cependant, dans un cas particulier comme un puits ou une galerie vide, un volume souterrain confiné de quelques centaines de m<sup>3</sup> restant en liaison avec la surface peut s'avérer non négligeable. A titre d'exemple, la dilatation d'un vide de 500 m<sup>3</sup> rempli de méthane à 50% peut produire, lors d'une baisse barométrique de 2 hPa/h (arrivée d'un orage, par exemple) environ 10 m<sup>3</sup>/h de mélange directement inflammable. Ce débit de gaz est largement suffisant pour remplir une cave mal ventilée.

#### **4.2.3.2 Puissance des phénomènes conduisant à la mise en pression**

La pression régnant au sein du réservoir post minier ou, plus précisément, la différence des pressions entre le réservoir et la surface, joue un double rôle en ce qui concerne le niveau potentiel d'émission de gaz vers la surface.

D'une part, elle influence directement la quantité de gaz « disponible » dans les parties non ennoyées du réservoir souterrain.

D'autre part, selon la résistance aéraulique des terrains de recouvrement et des anciens ouvrages miniers de liaison fond-jour (cf. chapitre 5), elle détermine le flux de gaz pouvant transiter vers la surface<sup>14</sup>.

Le niveau de surpression possible dépend étroitement de la nature et des caractéristiques propres à chaque phénomène. Il peut se situer dans une fourchette très large, dépendant des conditions locales du gisement exploité, des caractéristiques des vides post-miniers, de la composition du gaz de mine, de l'état de l'ennoyage et de son évolution, etc.

Toutefois, pour la plupart des phénomènes concernés, il est possible de situer les limites hautes des surpressions pouvant être potentiellement rencontrées dans la pratique. Elles peuvent être estimées de manière plus ou moins précise en se basant sur la description des principes physiques des phénomènes concernés et sur leurs plages habituelles de variabilité, telles que présentées dans le chapitre 2.5.1.

Le schéma de la figure 9 ci-après illustre les plages de surpression pouvant être générées par les phénomènes les plus fréquents et les plus pertinents dans le contexte post-minier.

---

<sup>14</sup> l'influence est proportionnelle, dans l'hypothèse d'un écoulement laminaire.

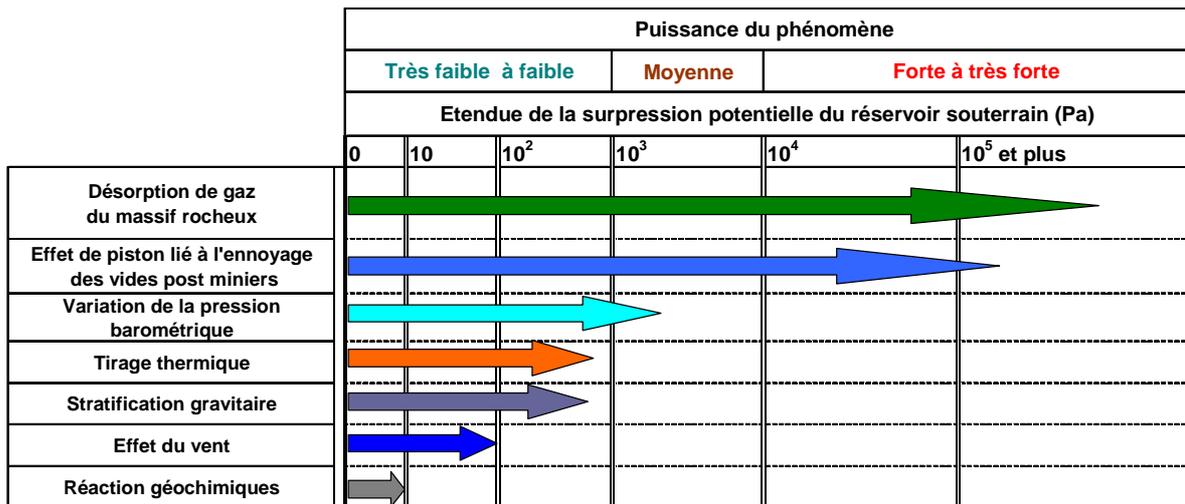


Figure 9. Ordre de grandeur de la surpression de gaz dans les vides post-miniers souterrains pouvant être engendrée par les différents phénomènes.

On peut constater qu'une majorité de phénomènes concernés ne peut engendrer que des surpressions limitées à quelques kPa au maximum et généralement moins. Ces phénomènes, dont la puissance peut être qualifiée de très faible à faible sont les suivants : réactions géochimiques, effet du vent, stratification gravitaire et tirage thermique.

Concernant les variations de pression barométrique, elles peuvent théoriquement entraîner des surpressions maximales plus importantes. Pour cela, il faut considérer une configuration très pénalisante, à savoir : une baisse barométrique d'une ampleur maximale possible dans les conditions climatiques européennes (quelques hPa/h) pendant plusieurs heures et un réservoir souterrain présentant une certaine inertie temporelle de sa réaction en termes d'émission de gaz.

Dans ce cas, il est possible d'imaginer une montée en surpression relative de ce réservoir dépassant 1 kPa. Ceci permet de considérer la puissance de ce phénomène comme moyenne, dans les cas les plus pénalisants.

Seuls les effets de la désorption de gaz du massif rocheux, qui concerne principalement les gisements de charbon, et l'effet de piston lié à l'engorgement des vides post miniers sont susceptibles d'engendrer, dans des cas extrêmes, des surpressions encore plus importantes, atteignant voire dépassant 10<sup>5</sup> Pa (1 bar). En fonction du contexte géochimique et/ou hydrogéologique, leur puissance peut alors se situer entre un niveau très faible et un niveau très fort.

Pour, un site donné, la connaissance de plusieurs paramètres est indispensable à une qualification correcte du niveau potentiel d'émission de gaz de mine sur un site donné : il s'agit de la compréhension du comportement du réservoir, de l'identification des phénomènes prépondérants de production et de transfert de gaz, ainsi que de l'interaction entre ces différents phénomènes.

A titre d'exemple, un réservoir non engorgé alimenté en continu par du gaz dangereux sous pression<sup>15</sup> présentera a priori un niveau d'intensité plus important

<sup>15</sup> par exemple, par la désorption de méthane présent sous pression dans la partie non exploitée d'un gisement de charbon franchement grisouteux.

qu'un réservoir où le gaz est produit par des réactions géochimiques (pression quasi nulle) et, par conséquent, il ne peut être véhiculé vers la surface que par des phénomènes générateurs de surpressions plus faibles (tirage thermique et variation de pression barométrique).

#### 4.2.3.3 Transport sous forme dissoute dans l'eau

Le transfert de gaz de mine vers la surface sous forme dissoute dans l'eau est un cas particulier, souvent complexe en termes de prédiction. En effet, le nombre de configurations possibles est important, notamment en ce qui concerne la nature du gaz, le débit d'eau, le taux de saturation en gaz, la cinétique de dégazage, etc. De plus, sous cette forme, le transfert de gaz en quantité significative ne se présente que rarement et, sauf exception, il ne concerne que des zones très restreintes en surface (cf. chapitre 2.5.2).

De fait, ce type de configuration sera analysé au cas par cas en s'appuyant, lorsque possible, sur le résultat des investigations in situ (cf. chapitre 7.2). Dans des cas très spécifiques où l'importance du problème le justifie, un appel à la modélisation pourra être fait.

### 4.3 INFLUENCE RÉDUCTRICE DE L'ENNOYAGE DES VIDES MINIERS SUR L'INTENSITÉ DES PHÉNOMÈNES GAZEUX

Comme évoqué dans les chapitres 2.5.1 et 4.2.2, l'effet de piston lié à l'augmentation du niveau d'eau au sein des vides post-miniers (phase d'ennoyage ou battement de la nappe après l'ennoyage) est un des mécanismes contribuant au transfert de gaz de mine vers la surface. Cependant, l'ennoyage conduit en parallèle à réduire fortement l'intensité des phénomènes gazeux dans les parties déjà submergées d'un réservoir post-minier. Ceci est lié aux trois effets principaux suivants :

- l'eau qui remplit les vides résiduels supprime l'espace disponible pour l'accumulation de gaz et obstrue ses voies de migration sous forme libre ;
- l'eau empêche la pénétration de l'oxygène atmosphérique vers les vides miniers ennoyés. Tous les mécanismes de production d'atmosphères viciées impliquant l'oxydation de roches sont donc pratiquement inhibés dans ces parties du réservoir ;
- la pression hydrostatique s'oppose à la pression de gaz libre dans le massif rocheux (lorsqu'elle existe) et, par conséquent, à des mises en charge éventuelles de gaz au sein de la partie ennoyée du réservoir post-minier.

L'action inhibitrice de l'ennoyage concerne donc particulièrement tous les mécanismes de production et de transfert de gaz qui agissent à faible pression, qui nécessitent la présence de vides non ennoyés ou encore qui exigent la présence d'oxygène.

Par conséquent, pour des **réservoirs ennoyés** ou leurs parties ennoyées de manière pérenne, **l'intensité des phénomènes gazeux engendrés par les phénomènes de puissance faible à moyenne** (réactions géochimiques, effet du vent, stratification gravitaire, tirage thermique et pompage barométrique) peut être considérée comme **nulle**, quel que soit le niveau de cette intensité avant l'ennoyage ou dans les parties non ennoyées (si elles existent) du site concerné.

Seuls deux cas échappent à cette règle générale :

- le cas spécifique du **transport de gaz sous forme dissoute** (cf. chapitre 4.2.2.4) ;
- le **dégagement des gaz endogènes** contenus dans la roche sous pression, qui pourra être moins influencé par l'ennoyage, dans la mesure où la pression intrinsèque de gaz serait comparable ou supérieure à la pression hydrostatique.

En France, ce deuxième cas ne concerne pratiquement que les anciennes exploitations de charbon dans les bassins réputés grisouteux ou très grisouteux, dans lesquels le gaz s'est trouvé à l'origine sous une pression conséquente, très supérieure à la pression atmosphérique (par exemple, le bassin lorrain ou le bassin du Nord et du Pas-de-Calais).

Dans ces exploitations, en l'absence de toute action externe, notamment en l'absence d'ennoyage, le processus de dégagement (désorption) et de migration de gaz se poursuit très longtemps (plusieurs décennies), jusqu'à l'équilibrage des pressions et des teneurs en gaz entre le massif de charbon restant sur place et le réservoir constitué par les vides post-miniers non-ennoyés (Pokryszka et Krause, 2007).

L'ennoyage de ces vides ralentit et réduit fortement le processus de dégagement de grisou du massif houiller. Toutefois, la désorption de grisou depuis le charbon ne cesse qu'en présence d'une contre-pression hydrostatique suffisante.

Selon les études menées par l'INERIS, une charge hydraulique égale à la pression de grisou au sein du charbon limitera la désorption à un niveau très faible (Pokryszka, 2004). Dans ce cas, les phénomènes de diffusion moléculaire et de transport de gaz par l'eau prennent le relais de la désorption, avec une cinétique bien plus lente (Pokryszka et al., 2005 ; Le Gal, 2012).

L'effet de l'ennoyage est donc à analyser de manière particulière pour les anciennes exploitations de charbon, afin de prendre en compte cette influence progressive du niveau d'eau sur l'intensité des phénomènes gazeux.

Si les données disponibles sont suffisamment étoffées et précises, les critères spécifiques peuvent être établis pour un site donné en fonction de l'estimation de la pression d'équilibre du gaz dans le massif rocheux (voir annexe 1) ou de la quantité de gaz émise par les différentes parties ennoyées de ce site.

Dans le cas contraire, le tableau 8 ci-après propose les critères « génériques » à appliquer pour prendre en compte l'effet d'ennoyage, dans l'évaluation de l'intensité du phénomène d'émission de gaz à partir des vides miniers ennoyés d'anciennes exploitations de charbon.

	<b>Travaux non ennoyés ou considérés comme tels</b>	 <b>Intensité de référence</b>
<b>Hauteur d'eau couvrant les vides post miniers</b>	<b>0 à 5 m +B</b>	<b>Réduction de l'intensité d'une classe</b>
	<b>5 m +B à 50 m +B</b>	<b>Réduction de l'intensité de 2 classes</b>
	<b>&gt; 50 m +B</b>	<b>Intensité négligeable (réduction de l'intensité de 3 classes)</b>

*Tableau 8 : Critères d'évaluation de l'intensité du phénomène d'émission de gaz à partir des vides miniers ennoyés d'anciennes exploitations de charbon (B correspond au battement maximal habituel de la nappe).*

Il s'agit des critères « moyens » établis dans le cadre d'une étude menée par l'INERIS pour les conditions du bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais (Pokryszka, 2007). Cependant, compte tenu des similitudes importantes avec d'autres grands gisements grisouteux exploités en France, leur application peut être étendue sans risque d'imprécision importante. En effet, le raisonnement est basé sur les deux hypothèses suivantes, valables pour l'ensemble des anciennes exploitations de charbon :

- l'ennoyage seul, sans contre-pression hydrostatique significative, conduit à une réduction importante de la désorption de gaz de charbon ;
- une augmentation de la tranche d'eau au-dessus de charbon réduit encore le dégazage ; celui-ci tend vers un niveau plancher quand la pression hydrostatique arrive à l'équilibre avec la pression de gaz dans le charbon.

En utilisant les critères du tableau 8, le point de départ de l'évaluation est l'intensité du dégagement gazeux des vides miniers non ennoyés (ou considérés comme tels), établie précédemment (cf. chapitre 4.2), qui constitue le niveau de référence. A partir de ce niveau, la diminution de l'intensité est progressive, en fonction de la hauteur d'eau couvrant des vides miniers.

L'ennoyage seul, sans contre-pression significative, permet une réduction de l'intensité d'un niveau par rapport à l'intensité de référence établie pour les travaux miniers hors d'eau. Le seuil de 5 m de tranche d'eau au-dessus des vides miniers, pris dans cette partie, correspond à l'incertitude de positionnement cumulée des vieux travaux et du niveau d'ennoyage.

Un ennoyage avec une colonne d'eau de 5 à 50 m au-dessus des vieux travaux permet une réduction de l'intensité de 2 niveaux. Pour un ennoyage supérieur à 50 m, l'intensité peut être réduite à un niveau négligeable, quelle que soit l'intensité de référence.

A noter que le dernier seuil, correspondant à une colonne d'eau de plus de 50 m au-dessus des vides miniers, représente une contre-pression hydrostatique de plus de 0,5 MPa. Combinée aux autres effets minorants mentionnés ci-avant (obturation des voies de migration, réduction de la désorption...), cette contre-pression est considérée comme suffisante pour s'opposer totalement au

dégagement de grisou du massif houiller partiellement dégazé avoisinant les vides post-miniers.

En effet, cette contre-pression hydrostatique de 0,5 MPa est probablement supérieure à la pression résiduelle de gaz encore adsorbé dans le charbon qui peut être rencontrée dans une majorité des cas de gisements houillers influencés par l'exploitation, donc plus ou moins dégazés (cf. estimation de la pression de gaz dans l'annexe 1).

#### 4.4 CAS PARTICULIER DES OUVRAGES MINIERIS ISOLÉS

Souvent, dans l'environnement proche d'une zone d'exploitation minière, on constate la présence d'ouvrages miniers isolés comme les puits borgnes et les galeries de recherche isolées. Ces ouvrages, qui n'ont pas conduit eux-mêmes à une exploitation *stricto sensu*, constituent des espaces souterrains confinés pouvant être affectés par des phénomènes gazeux.

Cependant, ils ne font pas partie du réservoir post-minier voisin proprement dit, du fait de leur séparation physique de ce réservoir et de leur volume habituellement très limité. Par conséquent, la qualification de l'intensité pour ces ouvrages doit être faite distinctement.

Si, pour un ouvrage donné, existent des données gazeuses suffisantes, elles sont à prendre en compte en premier lieu. Toutefois, le plus souvent, on ne dispose d'aucune information précise permettant de statuer sur l'intensité des phénomènes gazeux affectant ou pouvant affecter ces ouvrages.

Il est donc proposé, dans une première approche, de qualifier l'intensité des phénomènes gazeux pour ces ouvrages miniers en fonction de leur position par rapport aux vieux travaux miniers et de l'intensité retenue pour ces travaux :

- pour les ouvrages situés à l'aplomb d'anciennes exploitations ou dans leur zone d'influence<sup>16</sup>, on attribue la même intensité que celle des vides miniers sous-jacents. En effet, même s'il n'y a pas de liaison structurelle entre les vides miniers et l'ouvrage, ce dernier peut se trouver dans une zone fracturée par l'exploitation et être affecté par une migration directe de gaz depuis le réservoir post-minier ;
- pour les ouvrages situés en dehors des secteurs exploités et de leur influence, il est proposé d'attribuer une intensité réduite d'une classe comparativement au niveau de référence des vides miniers voisins. Ces ouvrages sont bien moins sujets à une migration directe de gaz en provenance du réservoir post-minier, mais ils peuvent toujours être affectés par des migrations latérales ou encore par des modifications importantes de l'atmosphère propre du milieu souterrain (déficit en oxygène, enrichissement en CO<sub>2</sub>...).

Ce classement peut être ajusté en fonction des caractéristiques propres de chaque ouvrage. Il s'agit notamment de la distance horizontale des limites de travaux miniers et du volume disponible à l'accumulation de gaz.

---

<sup>16</sup> Voir chapitre 6.2.2.1 pour la définition de la zone d'influence.

## **5. PRÉDISPOSITION À L'ÉMISSION DE GAZ DE MINE EN SURFACE ET PRINCIPES DE SON ÉVALUATION**

### **5.1 COMPLÉMENT DE LA DÉFINITION ET PRINCIPAUX FACTEURS À CONSIDÉRER**

D'après la définition générale donnée dans le chapitre 3.2, la prédisposition d'un site post-minier dans le contexte de l'analyse de l'aléa « gaz de mine » exprime les propriétés du milieu environnant ce site à permettre la migration de gaz depuis les anciens travaux miniers vers la surface ou, au contraire, à s'y opposer.

Du point de vue pratique, la prédisposition sera déterminée, de manière générale, par le niveau de la résistance aéraulique que peuvent avoir les terrains de recouvrement séparant le réservoir post minier de la surface et tous les éléments de l'ancienne infrastructure minière de liaison fond-jour présents dans ces terrains.

Conformément à cette définition et à l'analyse faite dans le chapitre 2.6, l'évaluation de la prédisposition se fera selon les deux voies principales de migration de gaz de mine vers la surface, qui sont :

- la migration de gaz à travers les terrains de recouvrement, incluant les discontinuités éventuelles de ces terrains ;
- la migration par les ouvrages débouchant au jour (ODJ).

La migration sous forme dissoute dans l'eau sera incluse dans la partie traitant des ouvrages débouchant au jour, car sauf rares exceptions (écoulement d'eau vers la surface par un réseau karstique ou par des fractures ouvertes), le dégazage des eaux minières ne se manifeste pratiquement qu'en liaison avec des émergences par les ouvrages miniers.

### **5.2 PRÉDISPOSITION À LA MIGRATION DE GAZ À TRAVERS LES TERRAINS DE RECOUVREMENT**

Le terme « terrains de recouvrement » inclut les terrains proprement dits sus-jacents aux anciennes exploitations, avec les différentes couches ou formations particulières qui les composent, ainsi que les nappes phréatiques contenues dans ces terrains. Dans la plupart des cas, les terrains de recouvrement ont été plus ou moins influencés par l'exploitation, autrement dit, leurs propriétés initiales (perméabilité, porosité...) ont été modifiées (généralement augmentées). De même, ils peuvent faire encore l'objet d'un réajustement géomécanique voire d'instabilités de nature à augmenter la prédisposition à l'émission de gaz en surface.

Les principaux facteurs à prendre en compte sont donc les suivants :

- l'épaisseur et la résistance aéraulique globale des terrains de recouvrement ;
- l'influence de l'exploitation sur les propriétés aérauliques des terrains de recouvrement.
- l'existence de formations géologiques particulières, pouvant augmenter la résistance aéraulique du recouvrement (couches à très faible perméabilité, nappes perchées, etc.) ;
- l'existence de formations géologiques ou de discontinuités très perméables, pouvant constituer des drains préférentiels pour le gaz ;
- les instabilités géomécaniques des terrains de recouvrement.

La géologie des terrains constituant le recouvrement des zones d'anciennes exploitations souterraines est très variable d'un bassin à l'autre. Elle peut aussi varier très significativement au sein d'un bassin minier donné ou même au sein d'un secteur d'exploitation.

De même, les configurations géométriques des exploitations et les modes de traitements des vides après l'extraction ont été extrêmement variables, selon la nature du gisement exploité et les conditions géologiques locales. Or ces facteurs déterminent directement le degré et l'étendue de l'influence géomécanique de l'exploitation sur les terrains sus-jacents (effondrement, fracturation, réduction des contraintes...). Ils déterminent donc en parallèle l'importance et l'étendue de la modification des propriétés aérauliques de ces terrains (augmentation de perméabilité et de porosité).

Par conséquent, il est pratiquement impossible d'établir des critères universels valables pour l'ensemble des sites post-miniers pouvant être concernés par la problématique du gaz de mine. Une démarche plus judicieuse est d'essayer d'établir des critères communs pour un secteur d'exploitation ou une partie d'un bassin minier, dans la mesure où ils constituent des zones suffisamment homogènes en termes de contexte hydrogéologique et de caractéristiques d'exploitation.

Il est à souligner que, dans tous les cas, l'évaluation devrait être précédée par une analyse exhaustive des données géologiques et hydrogéologiques du secteur exploité, ainsi que de celles relatives à l'exploitation elle-même. Ceci permet de bien comprendre le contexte global et le rôle potentiel des terrains dans la circulation des fluides (gaz et eau) ainsi que l'influence de l'exploitation sur les caractéristiques aérauliques de ces terrains.

Les chapitres suivants décrivent les étapes à suivre pour prendre en compte les principaux facteurs déterminant la prédisposition des terrains de recouvrement à la migration de gaz.

### 5.2.1 Prise en compte de l'épaisseur du recouvrement, de sa perméabilité et de l'influence des travaux miniers

La première étape pour évaluer la prédisposition à la migration de gaz par les terrains de recouvrement consiste à apprécier la résistance aéraulique globale que ces terrains peuvent présenter pour empêcher les gaz accumulés sous pression au sein des vides post miniers à transiter vers la surface. Cette résistance est fonction de l'épaisseur totale de ces terrains (profondeur des travaux miniers) et du niveau global de leur perméabilité.

#### 5.2.1.1 Epaisseur globale du recouvrement

De manière générale, plus les terrains de recouvrement seront épais, plus ils constitueront un obstacle à la migration de gaz en diminuant son débit potentiel.

On peut en effet considérer, au travers de l'expérience pratique acquise à l'occasion des différentes études effectuées, que, dans toutes les configurations géologiques couramment rencontrées, une exploitation minière constituant un réservoir de gaz de mine n'induit aucun phénomène gazeux significatif en surface via les terrains de recouvrement, si elle se trouve à une profondeur suffisamment importante. Ceci reste valable quelle que soit l'intensité du

phénomène gazeux au sein du réservoir post-minier, du moins dans le domaine connu jusqu'à présent.

La profondeur des travaux par rapport à la surface, qui traduit l'épaisseur totale des terrains de recouvrement, doit donc être prise en compte en priorité. On distinguera les travaux peu profonds des travaux profonds.

Dans une première approche, on considérera comme travaux profonds ceux situés à plus de 200 m.

La limite de 200 m correspond à l'étendue verticale maximale de l'influence géomécanique pouvant modifier significativement la perméabilité des terrains au toit d'une exploitation de charbon. Il s'agit a priori d'une zone d'influence la plus étendue, comparativement à d'autres types d'exploitations les plus fréquentes (cf. chapitre 5.1.2.3 et annexe 2).

Si le besoin se fait ressentir, ce critère peut être modifié et adapté au contexte des travaux miniers analysés, en s'appuyant sur les résultats des études géotechniques et aérauliques spécifiques.

#### 5.2.1.2 Perméabilité du recouvrement et influence des travaux miniers

Dans l'analyse de la perméabilité globale du recouvrement, il faut en premier lieu tenir compte de la perméabilité initiale des différentes couches géologiques sus-jacentes aux travaux miniers.

Ensuite, il est indispensable de prendre en compte l'influence des exploitations sur cette perméabilité initiale. Celle-ci est en effet modifiée sur une étendue (notamment verticale) qui dépend, entre autres, de la méthode d'exploitation, de l'étendue horizontale des secteurs exploités, de la hauteur cumulée des couches prises et des propriétés géomécaniques du recouvrement (comportement plastique ou cassant).

De très nombreuses méthodes d'exploitation ont été employées et le mode d'exploitation a souvent varié d'une mine à l'autre au sein du même bassin, au sein d'une même mine voire d'une veine, selon l'évolution de la géologie du gisement. Cependant, de façon très globale, on peut différencier les **exploitations avec un défilage total** (par exemple, par longues tailles) des **exploitations partielles** (par exemple, par chambres et piliers). Toutes choses étant égales par ailleurs, les exploitations partielles ont une influence sur le recouvrement moins importante que les exploitations totales. Il en est de même les exploitations de faible étendue, discontinues etc.

Ces différentes caractéristiques doivent se répercuter sur le niveau de prédisposition attribué pour les terrains de recouvrement sur les sites analysés.

Quelle que soit la méthode d'exploitation, son influence sur les terrains sus-jacents diminue progressivement à la verticale depuis le niveau exploité en direction de la surface. Si la profondeur des travaux est suffisante, cette influence devient insignifiante (du point de vue de la problématique du gaz de mine) à partir d'une certaine distance verticale, qui est propre au contexte local.

L'évaluation de cette distance est primordiale, car en croisant avec la profondeur des travaux, elle permettra de déterminer l'**épaisseur de terrains sains** (non influencés par les travaux souterrains) situés au-dessus des vieux travaux miniers.

**Plus cette épaisseur sera importante, plus la prédisposition à la migration de gaz sera réduite.**

L'étendue verticale de la zone d'influence affectant les terrains de recouvrement et le mode de diminution de cette influence avec l'éloignement du niveau exploité peuvent être déterminés par **une étude géotechnique spécifique**, en fonction des moyens et des données disponibles.

**L'établissement des critères de prédisposition à la migration de gaz devra s'appuyer, en premier lieu, sur les résultats de telles études, dans la mesure où elles existent.**

Dans le cas où des modèles généraux de la zone d'influence auraient été établis par le passé pour un bassin minier ou pour un type d'exploitation donné, ils peuvent être utilisés pour établir des critères « génériques » moyens applicables à différents sites de caractère similaire.

Ces critères doivent a priori prendre en compte les configurations les plus pénalisantes pour le secteur étudié, c'est-à-dire une (des) mode(s) d'exploitation conduisant à une étendue verticale de la zone d'influence la plus importante, comparativement à d'autres méthodes qui ont pu être employées dans le secteur.

Les chapitres ci-après présentent des tentatives d'établissement de tels critères « moyens » pour les sites post-miniers les plus fréquents en France : les anciennes exploitations de charbon et celles de fer. Elles sont issues des études antérieures réalisées par l'INERIS.

Les critères proposés permettent de réaliser une première évaluation de la prédisposition, en fonction de l'épaisseur globale des terrains de recouvrement. Ils ne tiennent pas compte des éléments particuliers pouvant être présents dans les terrains, comme les couches à très faible perméabilité ou les drains naturels. Les modalités de la prise en compte de ces éléments sont précisées dans les chapitres 5.2.2 et 5.2.3.

### 5.2.1.3 Exemple des critères proposés pour les exploitations de charbon

Le tableau 9 ci-après présente les critères d'évaluation de la prédisposition proposés pour les exploitations de charbon de taille importante, dans le contexte des couches en plateaux ou peu pentées. Ils sont inspirés par une étude réalisée par l'INERIS pour le compte de Géoderis concernant le bassin du Nord et du Pas-de-Calais (Pokryszka, 2007). Ils sont également cohérents avec l'approche appliquée aux études des risques liés au gaz de mine dans le bassin houiller lorrain réalisées par l'INERIS pour Charbonnages de France, dans le cadre d'établissement des Dossiers d'Arrêt Définitif des Travaux (Pokryszka, 2000).

	Epaisseur des terrains de recouvrement ou profondeur (m)			
	0 à 50	50 à 150	150 à 200	> 200
Prédisposition	Très sensible à sensible	Sensible à peu sensible	Peu sensible	Nulle

*Tableau 9 : Critères d'évaluation de la prédisposition pour les bassins houillers en tenant compte uniquement de l'épaisseur totale des terrains de recouvrement*

Ces critères sont basés sur un modèle empirique d'influence au toit des exploitations par longues tailles en plateures foudroyées, établi par le CERCHAR dans les années 1970 (Jeger et Liabeuf, 1976) et validé sur plusieurs chantiers des principaux bassins français (Jeger, 1980, Pokryszka et Tauziède, 1992).

Il s'agit de l'option la plus pénalisante, car elle détermine une zone d'influence plus étendue comparativement à d'autres types d'exploitation employés dans les bassins houillers français (exploitations pentées, remblayées, chambres et piliers...). Les précisions sur l'établissement de ces critères sont données dans l'annexe 2.

#### 5.2.1.4 Exemple des critères proposés pour les exploitations de fer

Le tableau 10 ci-après synthétise les critères d'évaluation de la prédisposition proposés pour le bassin ferrifère lorrain dans le cadre des études réalisées par l'INERIS pour le compte de Géoderis (Pokryszka, 2006).

Rappelons qu'il s'agit d'un gisement en plateure ou peu penté, exploité principalement par la méthode des chambres et piliers, en une ou plusieurs couches selon le secteur. Les terrains de couverture sont composés principalement de formations marno-calcaires.

	Epaisseur de recouvrement au-dessus de la zone d'influence de l'exploitation (m)		
Zones non dépilées	> 10	10 à 30	> 30 m
Zones dépilées	> 20	20 à 60	> 60 m
<b>Prédisposition</b>	Très sensible à sensible	Peu sensible	Nulle

Tableau 10 : Critères d'évaluation de la prédisposition proposés pour le bassin ferrifère lorrain (Pokryszka, 2006)

Ces critères ont été établis à partir d'une approche expérimentale consistant à mesurer les émissions gazeuses en surface à l'aplomb des zones exploitées. Les résultats obtenus ont été croisés avec une approche analytique concernant l'influence de l'exploitation sur les terrains sus-jacents (Tincelin, 1983). On trouvera plus précisions sur l'établissement et l'application de ces critères dans l'annexe 3.

#### 5.2.2 Prise en compte des formations géologiques particulières à faible perméabilité au gaz

L'influence d'une formation géologique à faible perméabilité (couches isolantes), comme par exemple les couches argileuses ou les couches saturées en eau, contenues dans les terrains de recouvrement, peut être pris en compte de façon particulière dans l'évaluation de la prédisposition, dans la mesure où la présence, la puissance significative et la continuité géologique de cette formation sont avérées à l'aplomb de la zone étudiée.

Pour représenter un obstacle significatif à la migration de gaz, ces couches doivent donc former un écran continu de faible perméabilité et d'épaisseur suffisante : plus ces couches auront une perméabilité faible et une épaisseur importante, plus elles constitueront un obstacle à la migration de gaz (diminution du débit d'écoulement).

La présence d'eau constitue un obstacle supplémentaire : plus ces couches auront une perméabilité faible et une épaisseur saturée importante, plus sera forte la pression de gaz au sein du réservoir post minier nécessaire à la désaturation de la roche permettant un passage continu du gaz.

Pour estimer si la couche est suffisante pour s'opposer à la migration de gaz, il faut prendre en compte sa perméabilité supposée et la pression de gaz que l'on pourrait retrouver au sein des vides miniers. Dans une première approche, on pourra considérer comme « formations à faible perméabilité » toutes les couches saturées en eau de manière permanente et celles non-saturées présentant une perméabilité moyenne intrinsèque égale ou inférieure à  $10^{-16} \text{ m}^2$  (roches argileuses).

Compte tenu de l'incertitude non négligeable et du caractère habituellement ponctuel des données géologiques (logs de forages), on considérera que ces conditions initiales sont remplies quand l'épaisseur d'une formation isolante obtenue par l'interpolation des données disponibles est suffisamment importante, à savoir égale ou supérieure à 25 m.

En outre, par analogie avec l'influence de l'ennoyage présentée dans le chapitre 4.3, une épaisseur de couche à caractère isolant supérieure à 50 m sera considérée comme suffisante pour freiner efficacement toute migration de gaz. S'il existe plusieurs couches à caractère isolant, leurs épaisseurs pourront être cumulées, dans la mesure où elles sont individuellement égales ou supérieures à 25 m.

Par ailleurs, pour les couches situées dans la zone d'influence géomécanique de l'exploitation, il convient de s'assurer que la modification de leurs propriétés aérauliques ou hydrauliques a été négligeable et, en tout cas, qu'elle n'a pas conduit à la rupture de leur caractère isolant initial (comportement plastique permettant un ajustement aux déformations sans rupture, absence de désaturation, etc).

En intégrant le rôle particulier des couches isolantes et les critères liés uniquement à l'épaisseur globale des terrains de recouvrement, le classement de la prédisposition pourra être défini comme suit (cf. tableau 11) :

		Epaisseur des terrains de recouvrement (m)			
		0 - 50	50 - 150	150 - 200	> 200
Puissance des couches isolantes contenues dans les terrains de recouvrement (m)	0 - 25	Très sensible à sensible	Sensible à peu sensible	Peu sensible	nulle
	25 - 50	Sensible à peu sensible	Peu sensible	Nulle	Nulle
	> 50	<i>Configuration impossible</i>	Nulle	Nulle	Nulle

Tableau 11 : Critères d'évaluation de la prédisposition en tenant compte de l'épaisseur totale des terrains de recouvrement et de la présence formation géologique à très faible perméabilité (couches isolantes)

- si la puissance cumulée des couches à caractère isolant est inférieure à 25 m, le niveau de prédisposition défini initialement restera inchangé ;
- si cette puissance est de 25 à 50 m, le niveau de prédisposition de la zone concernée sera diminué d'une classe ;
- si l'épaisseur des couches à caractère isolant est supérieure à 50 m, la prédisposition de la zone concernée sera considérée comme nulle.

Nota : ce classement est basé sur une analyse faite dans le cadre des études concernant l'évaluation des risques de migration de gaz par les terrains de recouvrement, réalisées par l'INERIS pour le bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais (Pokryszka et Lagny, 2002, 2004). Il est proposé à titre indicatif et peut être adapté en fonction des caractéristiques hydrogéologiques propres à un site donné.

### 5.2.3 Prise en compte de drains naturels

Certains éléments naturels particuliers présents dans le recouvrement peuvent constituer des voies préférentielles de migration de gaz vers la surface et sont susceptibles d'influencer de manière défavorable la qualification de la prédisposition. Il s'agit essentiellement :

- de discontinuités tectoniques naturelles de type faille et crevasse ;
- de formations (couches) très perméables sus-jacentes aux travaux miniers (grès très poreux, alluvions, roches naturellement fracturées ou karstifiées).

Dans la mesure où ces éléments ne sont pas saturés en eau et demeurent plus perméables que le terrain encaissant, ils peuvent potentiellement faciliter la migration de gaz vers la surface voire mettre en relation plus directe le réservoir minier et la surface.

### 5.2.3.1 Failles et crevasses naturelles

La prise en compte des failles et des crevasses est complexe. En effet, une faille ou une fracture identifiée en surface n'est pas systématiquement en relation avec les vieux travaux et, dans le cas contraire, elle n'est pas systématiquement ouverte ou plus perméable que les terrains voisins.

Cependant, si tel est le cas, il importe de savoir sur quelle étendue horizontale la faille est ouverte. De même, une faille ou une fracture identifiée au fond, à partir des travaux miniers, n'est pas systématiquement en relation avec la surface. A contrario, des fractures et des failles traversant les terrains de recouvrement mais actuellement fermées, peuvent devenir à terme un chemin préférentiel de migration de gaz.

Malheureusement, dans une très grande majorité des cas, les informations disponibles ne permettent pas de se prononcer d'une manière claire sur le niveau de perméabilité aéraulique des failles, donc sur le rôle qu'elles pourraient jouer dans le cheminement des fluides.

Dans quelques cas isolés, ces caractéristiques peuvent être déduites à partir d'une analyse détaillée du contexte hydrogéologique local (comportement des failles lors du rabattement de nappes dans les terrains de recouvrement) ou encore via des informations sur les venues d'eau vers les travaux souterrains.

A noter aussi que la présence, dans les terrains de recouvrement, de formations peu perméables à comportement plastique (par exemple, argiles ou marnes saturées en eau), constitue a priori un élément réducteur de la probabilité que les failles communiquent directement des vides miniers jusqu'à la surface.

Dans le cas où les caractéristiques aérauliques des discontinuités de type faille ou fracture peuvent être évaluées avec une certitude suffisante, la démarche suivante est proposée sachant que, dans la qualification finale, la prédisposition à la migration de gaz associée à une discontinuité ne peut être inférieure à celle des terrains avoisinants :

- aux discontinuités identifiées comme ouvertes et reliant les vieux travaux à la surface, est associée une prédisposition très sensible à sensible ;
- aux discontinuités reconnues pour leur très faible perméabilité à l'eau<sup>17</sup>, on associera une prédisposition peu sensible à nulle ;
- pour les autres failles ou fractures, on considèrera que leur contribution à la migration verticale de gaz n'est pas significativement différente du rôle joué par les terrains sus-jacents aux travaux miniers superficiels.

Les limites des zones prédisposées à la migration de gaz sont définies à partir du tracé des discontinuités concernées en surface, dans les parties restant en connexion avec les vides miniers. Elles seront élargies autour d'une bande de terrain de largeur forfaitaire égale à 20 m pour prendre en compte la possibilité d'une migration latérale de gaz.

On souligne toutefois que la prise en compte des discontinuités tectoniques exige une très bonne connaissance du massif rocheux. Il ne sera donc possible de

---

<sup>17</sup> cas par exemple de la faille de Fontoy dans le bassin ferrifère lorrain ou encore de la faille de Hombourg dans le bassin houiller lorrain

l'intégrer que dans certains cas particuliers, pour lesquels les données seront disponibles. De plus, le tracé de ces discontinuités en surface est généralement très approximatif : en tout cas, sa précision n'est pas compatible avec les principes d'une étude d'aléa nécessitant un géo-positionnement précis.

Par conséquent, le plus souvent, il n'est pas possible de tenir compte du rôle des failles et des crevasses naturelles dans l'évaluation de l'aléa gaz. On propose néanmoins de les laisser apparaître « pour mémoire » sur la cartographie de l'aléa (cf. chapitre 6.6.2).

#### **5.2.3.2 Formations à forte perméabilité au gaz dans les terrains de recouvrement**

Ce type de formations à forte perméabilité (ou formations drainantes) comprend des formations non saturées en eau et possibles à identifier et à délimiter du point de vue stratigraphique, dont le niveau de perméabilité est très franchement supérieur (d'un ordre de grandeur ou plus) à celui moyen des terrains de recouvrement.

En fonction de leur épaisseur, de leur forme et de leur étendue spatiale, ces formations peuvent être susceptibles de créer un réservoir secondaire permettant une accumulation du gaz de mine, facilitant la migration latérale du gaz voire faciliter sa migration vers la surface (par exemple, quand ces formations sont fortement pentées).

Il s'agit ici d'une situation particulière pouvant exister sur quelques sites<sup>18</sup>. Comme pour les discontinuités, l'évaluation de la prédisposition des formations drainantes est sujette à une très bonne connaissance de la géologie locale.

Compte tenu du nombre limité de sites pouvant être concernés et de la variabilité des contextes géologiques et hydrogéologiques d'un site à l'autre, il semble difficile de proposer ici des critères spécifiques pour analyser le rôle des formations drainantes dans le recouvrement. Si une telle analyse est entreprise, on privilégiera toutefois les principes généraux proposés pour l'évaluation de la prédisposition des discontinuités.

#### **5.2.4 Prise en compte de l'instabilité des terrains**

Dans l'établissement des critères spécifiques concernant l'épaisseur des terrains de recouvrement nécessaires pour s'opposer à la migration de gaz à travers, il est indispensable de prendre en compte l'évaluation de la stabilité géomécanique de ces terrains, faite dans le cadre de l'étude des aléas liés aux mouvements de terrains. Il s'agit principalement de l'aléa d'effondrement (localisé ou généralisé) et dans une moindre mesure de l'aléa d'affaissement progressif.

En effet, tous ces mécanismes redoutés sont liés au moins par un élément commun : l'apparition d'une zone de fracture est autant propice pour le déclenchement d'un mouvement de terrain que pour la migration de gaz. De plus, un effondrement des terrains peut conduire à une émission brutale de gaz en surface (cf. chapitre 2.5.1).

---

<sup>18</sup> on peut les citer pour exemple le réservoir gréseux contenu dans les terrains de recouvrement d'une partie importante du bassin houiller d'Aubin-Decazeville

Par conséquent, l'évaluation de la prédisposition devra être faite en veillant sur une homogénéité entre les critères proposés respectivement pour les domaines « gaz de mine » et « mouvements des terrains ». En l'occurrence, pour le gaz de mine, l'épaisseur des terrains de recouvrement correspondant à une classe de prédisposition donnée ne peut être inférieure à celle définie pour la même classe de prédisposition aux mouvements de terrain de type effondrement ou fontis.

A noter que, sauf des cas très particuliers, les critères généraux proposés dans le chapitre 5.2.1 pour les anciennes exploitations de charbon devraient assurer cette homogénéité d'évaluation des divers aléas.

### **5.3 PRÉDISPOSITION À LA MIGRATION DE GAZ À TRAVERS LES OUVRAGES DÉBOUCHANT AU JOUR**

Les ODJ reliant les vieux travaux miniers à la surface constituent des points singuliers par lesquels une migration de gaz de mine peut être potentiellement facilitée, même s'ils ont été traités et fermés après l'arrêt de l'exploitation.

Il s'agit principalement du transfert gazeux par l'espace interne de ces ouvrages, mais aussi par l'interface entre leur revêtement et les terrains. Ce transfert est animé par les mêmes mécanismes de mise en pression que ceux évoqués pour la migration de gaz par les terrains (cf. chapitre 2.5.1). Dans ce cas, comme pour les terrains de recouvrement, c'est la résistance aéraulique de l'ouvrage qui constitue l'élément déterminant pour la qualification de sa prédisposition à la migration de gaz de mine.

Cependant l'instabilité potentielle des ouvrages est aussi à intégrer, compte tenu de l'incidence que certains phénomènes géomécaniques peuvent avoir sur l'émission de gaz en surface (débouillage du remblai, effondrement...). Pour cela, on s'appuiera sur les résultats des études spécifiques réalisées pour l'évaluation des aléas « mouvements de terrain ». Cet aspect est précisé dans les chapitres suivants.

Concernant la distinction entre les différents types d'ODJ, l'évaluation de la prédisposition à la migration de gaz se fera séparément pour les puits et pour les ouvrages horizontaux ou subhorizontaux de type galerie. Ceci est lié à leur comportement géomécanique distinct et aux modes de fermeture souvent différents pour ces deux groupes d'ouvrages miniers.

Pour les ouvrages fortement inclinés (de type plan incliné, fendue...), dans la mesure où les données disponibles le permettent, leur classement dans l'une ou l'autre catégorie se fera au cas par cas, en fonction de leur géométrie et d'autres facteurs déterminant leurs comportement aéraulique et stabilité géotechnique (type de revêtement, mode d'obturation, tenue géomécanique des terrains, etc.).

Chaque ouvrage doit faire l'objet d'une analyse particulière. Certaines données pourront être identifiées lors de la phase informative, dans les archives ou les dossiers d'arrêt de travaux, d'autres ne pourront être obtenues que sur le terrain, dans la mesure où les ouvrages sont identifiés et accessibles. Les ouvrages pour lesquels on ne possède pas de données devront être considérés a priori comme ayant une prédisposition maximale.

Pour les orifices des ODJ, la pérennité de leur traitement (fermeture) doit également être considérée. Si un risque de vieillissement de l'ouvrage entraînant

la détérioration de sa résistance aéraulique pour le gaz apparaît à court terme, il doit être pris en considération dans l'évaluation de la prédisposition.

### 5.3.1 Prédisposition des puits et des ouvrages sub-verticaux

Pour évaluer la résistance aéraulique des ouvrages de type puits et qualifier leur prédisposition à la migration de gaz depuis le réservoir minier, les éléments principaux à analyser sont le mode de traitement de ces ouvrages en phase de fermeture et leur niveau d'ennoyage.

On note cependant qu'une partie importante des puits, notamment dans les anciennes exploitations de houille, a été traitée par remblayage. Ce traitement présente un inconvénient d'instabilité potentielle de la colonne du remblai pouvant conduire à un débouillage.

En outre, en dehors des conséquences mécaniques, un débouillage rapide provoque localement des effets gazeux plus ou moins brutaux pouvant conduire à une migration non contrôlée de gaz vers la surface par le puits débouillé (cf. chapitre 2.5.1.8). Dans une moindre mesure, ce problème concerne aussi d'autres types de traitement de puits (bouchons autoportants, serrements...).

In fine, la prédisposition des puits sera donc considérée comme une résultante de la prédisposition à la remontée de gaz vers la surface selon ces deux mécanismes distincts : la migration liée à la surpression du réservoir minier et l'émission liée à l'instabilité mécanique de l'ouvrage.

Le schéma directeur pour la qualification de la prédisposition des puits et des ouvrages sub-verticaux est donné dans le tableau 12. Cette approche est issue des principes appliqués dans le cadre des études PPRM pour le bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais (Pokryszka, 2007).

A noter, que ce schéma considère les différentes configurations possibles d'ouvrages, même si certaines seront sans objet pour une partie des bassins miniers concernés par l'aléa « gaz de mine ».

Ainsi, la qualification de la prédisposition est faite en suivant trois étapes (cf. tableau 12) :

- Etape 1 : Evaluation de la prédisposition à la migration de gaz par la colonne du puits, en fonction du mode de fermeture (sous-étape 1.1) et du niveau d'ennoyage de l'ouvrage (sous-étape 1.2) ;
- Etape 2 : Evaluation de la prédisposition à l'émission accidentelle de gaz liée à l'instabilité de l'ouvrage ;
- Etape 3 : Evaluation du niveau résultant de la prédisposition à l'émission de gaz.

ETAPE 1 - Evaluation de la prédisposition à la migration de gaz par la colonne du puits		Prédisposition	Cas types		
		1.1. Ouvrages considérés secs	Très sensible	Puits vides ou remblayés partiellement avec la colonne du remblai au-dessus des recettes insuffisante pour créer un frein significatif à la migration de gaz	
Sensible	Puits remblayés avec un matériau perméable classique Puits non remblayés, fermés par un bouchon ou un serrement installé au-dessus de la recette la plus superficielle et réalisé sans précaution particulière vis-à-vis du gaz				
Peu sensible	Puits remblayés intégralement avec un matériau perméable classique avec une étanchéité renforcée par l'intercalation de matériau à faible perméabilité (béton, cendres volantes, argile) au dessus de la recette la plus superficielle Puits fermés par un bouchon ou un serrement non adapté au gaz, installé au-dessus de la recette la plus superficielle. Remblayage au-dessus du bouchon jusqu'à la surface sur une hauteur significative Puits borgnes vides				
Nulle	Puits fermés par un dispositif spécifique dimensionné pour gérer une migration éventuelle de gaz : un bouchon étanche au gaz et/ou un événement permettant une évacuation de gaz Puits borgnes remblayés ou fermés par un bouchon ou un serrement				
1.2. Prise en compte du niveau d'envoyage		Critères		Prédisposition	
		Niveau d'envoyage au-dessous de la recette la plus superficielle		Prédisposition définie dans l'étape 1 reste sans modification	
		Niveau d'envoyage au-dessus de la recette la plus superficielle	Présence des vides significatifs ( $\geq 500 \text{ m}^3$ ) au dessus du niveau d'eau ou du remblai		Prédisposition définie dans l'étape 1 est réduite d'un niveau
			Absence des vides significatifs ( $< 500 \text{ m}^3$ ) au dessus du niveau d'eau ou du remblai		Prédisposition définie dans l'étape 1 est réduite de deux niveaux
ETAPE 2 - Evaluation de la prédisposition à l'émission de gaz liée à l'instabilité de l'ouvrage, en liaison avec la méthodologie "aléa mouvements de terrain" (SALMON, 2007)		Prédisposition	Cas types		
		Sensible	Puits de plus de 100 m de profondeur remblayés partiellement sur un plancher intermédiaire Puits de plus de 100 m de profondeur remblayés avec un niveau de remontée des eaux non stabilisé et facteurs aggravants supplémentaires (remblais en cendres aux recettes, venues d'eau supplémentaires, incidents connus de remblayage)		
		Peu sensible	Autres puits remblayés avec un niveau de remontée des eaux non stabilisé Puits de moins de 100 m de profondeur.		
			Puits remblayés avec un niveau de remontée des eaux stabilisé (ou puits sec) ou puits dont le traitement n'est pas jugé satisfaisant (ex. : bouchon à stabilité non garantie). Puits borgnes de plus de 30 m de profondeur avec un remblais potentiellement instable		
Nulle	Puits traités selon les règles de l'art (ex. : bouchon autoportant correctement dimensionné au droit de terrains compétents, ...)				
	Autres puits borgnes				
ETAPE 3 Evaluation du niveau définitif de la prédisposition à l'émission de gaz		Pour chaque ouvrage, les prédispositions définies respectivement dans les étapes 1 et 2 sont comparées. La prédisposition la plus importante est retenue pour définir l'aléa.			

Tableau 12 : Critères proposés pour la qualification de la prédisposition à la migration de gaz de mine par les puits

### 5.3.1.1 Ouvrages non envoyés ou considérés comme tels

Dans cette phase de l'évaluation (sous-étape 1.1 dans le tableau 12), tous les ouvrages sont considérés comme non envoyés, quelle que soit leur situation réelle ou supposée. L'influence de l'envoyage sera prise en compte dans une sous-étape suivante.

Le classement de la prédisposition de chaque ouvrage à la migration de gaz est fait en fonction des caractéristiques propres de sa fermeture précisées dans le tableau 12. Les informations complémentaires sur les critères techniques et les modalités d'application de ce classement sont données dans l'annexe 4.

### 5.3.1.2 Prise en compte de l'ennoyage

Dans cette phase (sous-étape 1.2 dans le tableau 12), l'état réel de l'ennoyage des ouvrages est pris en compte. L'ennoyage de la colonne d'un puits constitue en effet un obstacle majeur à la migration de gaz de mine vers la surface. Cependant, cette migration est toujours possible tant que l'ennoyage n'est pas complet et que l'ouvrage reste encore directement relié au réservoir souterrain par au moins une recette non ennoyée.

Pour les ouvrages se trouvant dans cette situation, la prédisposition qualifiée initialement reste inchangée.

L'ennoyage de toutes les recettes réduit fortement la prédisposition d'un ouvrage à la migration de gaz. Il reste cependant à prendre en compte la présence éventuelle d'un volume vide important restant au-dessus du niveau d'eau.

Comme déjà évoqué auparavant, un volume vide important dans la partie sommitale d'un puits peut constituer un siège d'accumulation de gaz de mine et de son transfert vers la surface. Dans le cas de puits partiellement ennoyés, l'alimentation en gaz peut se faire par percolation depuis le réservoir minier. De même, des volumes vides confinés peuvent contenir des atmosphères très modifiées (désoxygénées par exemple) et permettre une migration quasi libre de ces atmosphères vers la surface. Dans la pratique, un volume souterrain confiné de 500 m<sup>3</sup> restant en liaison avec la surface peut être considéré comme significatif (cf. chapitre 4.2.2.3.1).

En prenant en compte ce critère, il est proposé de distinguer deux groupes d'ouvrages ennoyés au-dessus de la recette la plus superficielle :

- les ouvrages avec présence d'un vide de 500 m<sup>3</sup> ou plus<sup>19</sup>, dont la prédisposition qualifiée initialement peut être réduite d'un niveau ;
- les ouvrages sans vides significatifs (inférieurs à 500 m<sup>3</sup>) dont la prédisposition initiale peut être réduite de deux niveaux ou devenir nulle.

### 5.3.1.3 Prédisposition à l'émission de gaz liée à l'instabilité de l'ouvrage

La prédisposition à l'émission de gaz liée à l'instabilité de l'ouvrage ne concerne que les puits contenant du remblai (risque de débouillage) et les ouvrages considérés non stables du point de vue géomécanique. Pour les autres puits, elle est considérée comme négligeable (nulle).

Les principes retenus pour la qualification des différents types d'ouvrages sont donnés dans le tableau 12 (étape 2). Ils sont inspirés par la méthodologie « aléas mouvements de terrain » proposée par l'INERIS pour le bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais (Salmon, 2007).

A noter que la prédisposition retenue pour l'analyse de l'aléa « gaz de mine » a été globalement réduite d'une classe, comparativement au classement initial fait pour les aléas « mouvements de terrain » dans le document de référence. Ceci est justifié par l'ordre d'apparition possible des phénomènes concernés et à leur

---

<sup>19</sup> Il s'agit d'un volume vide de 500 m<sup>3</sup> situé au-dessus du niveau d'eau ou du remblai. Compte tenu du caractère relativement restrictif de ce critère et dans le but de simplifier l'analyse, le volume de gaz libre contenu dans la porosité de la partie non ennoyée (si elle existe) du remblai n'est pas pris en compte.

probabilité d'occurrence. En effet, le mécanisme déclenchant est le mouvement de masse provoqué par l'instabilité de l'ouvrage, les phénomènes gazeux redoutés sont secondaires. De plus, tout phénomène d'instabilité ne provoque pas obligatoirement une émission significative de gaz en surface. Par conséquent, la probabilité d'occurrence de cette émission est, par principe, inférieure à celle du phénomène initiateur (instabilité).

#### 5.3.1.4 Evaluation du niveau résultant de la prédisposition

Dans cette phase (étape 3 dans le tableau 12), les prédispositions définies pour chaque ouvrage aux étapes 1 et 2 sont comparées. La prédisposition la plus importante est alors retenue pour définir l'aléa dans la suite de l'analyse.

#### 5.3.2 Prédisposition des galeries et autres ouvrages subhorizontaux débouchant au jour

Concernant les ouvrages horizontaux et subhorizontaux débouchant au jour (galeries de niveau, galeries d'accès, plans inclinés, etc.), l'analyse de leur prédisposition doit prendre en compte à la fois les critères concernant le mode d'obturation de leurs orifices et les critères relatifs à l'épaisseur de recouvrement, pour les parties courantes des ouvrages proche de surface.

Pour les orifices, les critères suivants sont proposés :

- une prédisposition très sensible, pour les ouvrages ouverts totalement ou partiellement et pour les ouvrages vides dont les orifices sont fermés par un dispositif qui ne constitue pas un obstacle significatif à la migration de gaz (par exemple, un mur en briques ou en parpaings).  
On classera également dans cette catégorie les galeries d'évacuation d'eau par débordement équipées en sortie de dispositifs destinés à l'origine à interdire la sortie de gaz libre (par exemple, cloisons siphonides), mais dont le principe de fonctionnement ne permet pas de garantir une mise en sécurité définitive de l'exutoire. Ainsi, dans la mesure où un désamorçage ou un mauvais fonctionnement permettant des sorties directes de gaz de mine restent toujours techniquement possibles sur ces installations, les orifices concernés seront systématiquement classés comme très sensibles ;
- une prédisposition sensible, dans le cas où un orifice serait obturé par un dispositif pouvant constituer un obstacle significatif à la migration de gaz (par exemple, un bouchon en béton de l'épaisseur de quelques mètres, non ancré dans les terrains, un embouage ou un remblayage en pleine section avec un matériau peu perméable sur une longueur conséquente), sans pour autant appliquer des méthodes de protection particulière vis-à-vis du gaz. On classera aussi dans cette catégorie les orifices fermés par des ouvrages initialement conçus pour être étanches, mais présentant des fuites avérées de gaz, mises en évidence par des mesures ;
- une prédisposition peu sensible, pour les orifices obturés avec des précautions particulières vis-à-vis du gaz, c'est-à-dire par des dispositifs visant à assurer une étanchéité de l'ouvrage lui-même et des terrains voisins, influencés par l'ouvrage (par exemple un bouchon plurimétrique ancré dans les terrains ou

encore un embouage en pleine section sur une longueur conséquente renforcé par une cimentation des terrains autour du bouchon) ;

- une prédisposition nulle, pour les orifices obturés avec des précautions particulières vis-à-vis du gaz et équipés des dispositifs permettant d'évacuer le gaz en surpression de l'ouvrage et de le diriger vers un évent sécurisé. Ce classement est possible, dans la mesure où la pérennité et le bon fonctionnement du dispositif d'évacuation de gaz sont assurés via des contrôles et entretiens adaptés.

Pour définir les critères pour les parties courantes des ouvrages horizontaux et subhorizontaux à faible profondeur et au-delà de la zone de fermeture de leurs orifices, il est proposé de s'appuyer en premier lieu sur les études géotechniques faites dans le cadre de l'évaluation des aléas liés aux mouvements de terrains. En effet, l'épaisseur de terrains influencés au toit d'une galerie et propices à la migration de gaz peut être considérée comme similaire à celle pouvant être affectée par des phénomènes géomécaniques de type effondrement localisé ou fontis.

A défaut d'une étude spécifique disponible pour un site donné, on propose ci-après une démarche inspirée des résultats de certaines études antérieures réalisées par l'INERIS pour évaluer le risque d'instabilité des terrains liée à la présence des galeries de mine (Degas, 2007 ; 2012). Ces études concernant les galeries, dont les dimensions ne dépassent pas 5 m de large et 3,5 m de haut, montrent qu'une remontée de fontis en surface ne peut être exclue pour des épaisseurs de recouvrement inférieures à 50 m. Ainsi, la prédisposition à la migration de gaz des terrains surplombant les parties courantes des ouvrages horizontaux et sub-horizontaux est évaluée comme :

- très sensible à sensible, pour les portions situées à moins de 50 m de profondeur. On considère que, dans cette tranche, les terrains peuvent subir directement une fracturation qui facilite la migration de gaz ;
- peu sensible pour les portions situées entre 50 m et 70 m de profondeur. Ce critère prend en compte une détente mécanique possible des terrains situés au-dessus de la zone d'influence directe, qui est susceptible d'augmenter la perméabilité de ces terrains sans provoquer leur fracturation ;
- nulle, pour les parties situées à plus de 70 m de profondeur.

Il est à noter que le rôle du traitement des parties courantes des galeries horizontales ou peu inclinées par un remblayage à partir du fond ou par un simple remplissage gravitaire à partir de la surface (embouage, béton...) ne peut être pris en compte dans l'évaluation de la prédisposition que dans le cas où l'efficacité (au moins partielle) du traitement est démontrée. En effet, ces types de traitement s'avèrent souvent insuffisants pour empêcher une migration de gaz le long de l'ouvrage (espaces mal remplis en couronne, retrait du béton, fracturation des terrains....).

### 5.3.3 Cas particulier des événements pour le gaz de mine et des sondages de contrôle et de décompression

Les événements pour le gaz de mine installés sur certains puits ainsi que les sondages de contrôle et de décompression, dont le rôle et le fonctionnement sont mentionnés dans le chapitre 2.6, peuvent constituer des points singuliers d'émission de gaz de mine en surface. Selon leur conception, ces ouvrages sont en effet destinés à créer une connexion directe avec le sous-sol, dans le but de pouvoir suivre l'évolution des paramètres physico-chimiques dans les vieux travaux minier (composition de l'atmosphère, pression....) et/ou à véhiculer le gaz de mine vers l'atmosphère afin d'éviter des mises en pression significatives au sein du puits concerné ou de la partie concernée du réservoir minier.

Pour l'évaluation de l'aléa gaz de mine, les points de rejet des événements et des sondages de contrôle et/ou de décompression constituent des endroits où la migration de gaz de mine et sa présence en surface sont facilitées à cause de leur liaison directe avec le réservoir souterrain. Il est donc généralement justifié de conférer à ces ouvrages une prédisposition très sensible.

## 6. QUALIFICATION ET CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA GAZ

### 6.1 CRITÈRES DE QUALIFICATION DE L'ALÉA

La matrice de croisement de la prédisposition avec l'intensité proposée pour la qualification de l'aléa « gaz de mine » est illustrée sur la figure 10. Hormis quelques modifications, elle est inspirée des principes appliqués aux études de l'aléa réalisées pour les principaux bassins miniers cités dans le chapitre 1.

Elle est définie de manière à permettre à l'expert en charge de l'étude une interprétation et des modifications éventuelles, en fonction des configurations ou cas particuliers rencontrés.

<i>Aléa</i> <i>"gaz de mine"</i>		Prédisposition		
		Peu sensible	Sensible	Très sensible
Intensité	Limitée	<i>Faible</i>	<i>Faible</i>	<i>Faible</i>
	Modérée	<i>Faible</i>	<i>Moyen</i>	<i>Moyen</i>
	Elevée	<i>Faible</i>	<i>Moyen</i>	<i>Fort</i>

Figure 10. Principe de croisement de la prédisposition et de l'intensité pour la qualification de l'aléa « gaz de mine »

### 6.2 ALÉA LIÉ À LA MIGRATION DE GAZ PAR LES TERRAINS DE RECOUVREMENT

#### 6.2.1 Evaluation et délimitation initiales

Le niveau de l'aléa est qualifié en suivant les principes donnés ci-avant en prenant en compte la prédisposition définie pour les terrains de recouvrement avec un découpage selon les zones homogènes et le niveau d'intensité évalué pour le réservoir minier ou ses différentes parties.

**Le périmètre des différentes zones d'aléa à la surface est défini tout d'abord par une projection verticale des limites géométriques des vieux travaux miniers concernés.**

#### 6.2.2 Etendue latérale des zones d'aléa

##### 6.2.2.1 Prise en compte de l'influence géomécanique de l'exploitation

Le périmètre des différentes zones homogènes d'aléa défini initialement par une projection verticale à la surface doit être élargi, pour prendre en compte l'influence géomécanique s'étendant vers l'extérieur d'un secteur exploité.

Cette influence géomécanique peut modifier latéralement les caractéristiques aérauliques des terrains de recouvrement et les rendre plus perméables, donc plus propices à permettre une migration de gaz.

L'étendue latérale de la zone d'influence peut varier très significativement selon la nature du gisement exploité, la méthode, la géométrie et la profondeur de l'exploitation, les propriétés géomécaniques des terrains de recouvrement, etc.

La définition des limites de la zone d'influence géomécanique, fait partie intégrale de l'étude des aléas mouvements de terrain. Les résultats de cette étude doivent être pris en compte en priorité pour la délimitation de l'extension latérale de l'aléa gaz de mine.

A défaut de données disponibles pour un site donné, des principes généraux sont proposés ci-après pour les deux types d'exploitation les plus importants en France : mine de fer (bassin lorrain) et mines de charbon

L'extension latérale des zones d'aléa liée à l'influence des travaux miniers d'exploitation se traduira par une bande complémentaire d'aléa du même niveau en surface, située autour des zones homogènes déterminées initialement par projection verticale.

### 6.2.2.2 Exemple pour les exploitations de charbon

Selon un modèle de déformation des terrains au-dessus d'une exploitation totale de veine de charbon en plateure ou peu pentée, l'influence latérale est limitée par un angle d'extension maximale de la cuvette d'affaissement  $\gamma$  (cf. figure 11). Les terrains situés autour et au-delà de cette limite sont considérés comme non modifiés du point de vue de leurs caractéristiques aérauliques<sup>20</sup>.

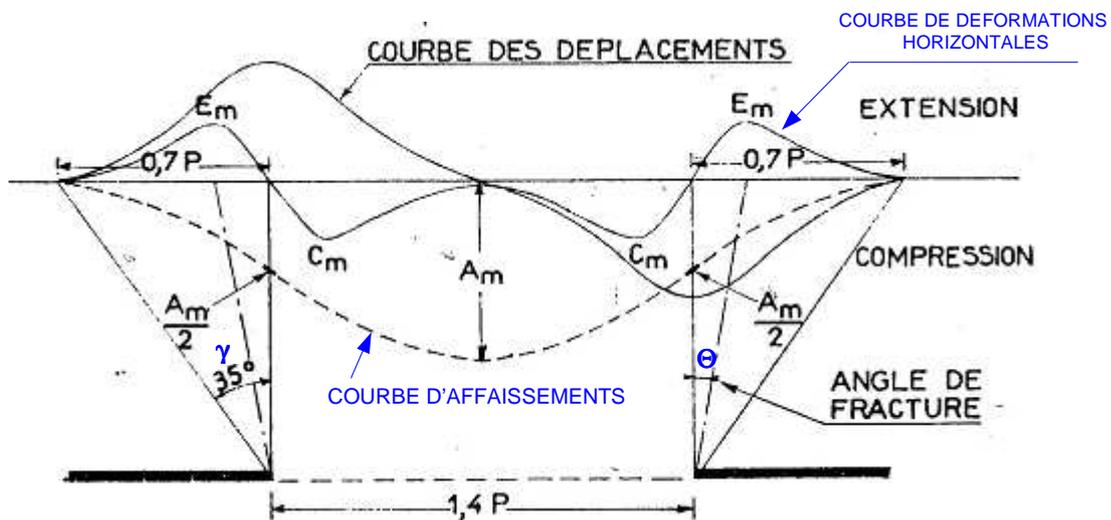


Figure 11 : Déformations et déplacements au toit d'une exploitation totale de charbon en plateure ou en veine peu pentée. Aire exploitée critique. (Proust, 1964, modifié)

<sup>20</sup> Ce modèle concerne les zones exploitées dont l'étendue horizontale est suffisamment grande pour engendrer en surface une cuvette d'affaissement complète (aire exploitée critique). Pour des exploitations de l'étendue plus faible, leur influence latérale est similaire ou moindre.

Les valeurs de l'angle  $\gamma$ , données dans la littérature pour les principaux bassins houillers en Europe, oscillent entre 30 et 40°. Pour le bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais, cet angle est en moyenne égal à 35° (Proust, 1964).

La zone dans laquelle les terrains peuvent présenter une perméabilité augmentée jusqu'au niveau le plus sensible est définie par un angle d'extension maximale  $\Theta$  appelé aussi angle de fracture (cf. figure 11). Son étendue est bien inférieure à l'angle  $\gamma$ .

L'espace défini par l'angle de fracture  $\Theta$  et par l'angle d'influence  $\gamma$  constitue une zone dans laquelle les modifications des propriétés aérauliques du massif rocheux sont moindres et décroissent progressivement vers l'extérieur du secteur exploité. Cependant, cette zone peut encore être considérée comme partiellement influencée, du point de vue de la migration de gaz.

Par conséquent, l'angle d'influence latérale pour la migration de gaz est habituellement défini comme intermédiaire entre les angles  $\Theta$  et  $\gamma$ . Cet angle assure une certaine marge de sécurité comparativement à la position la plus probable de la zone éventuellement fracturée définie par l'angle moyen de fracturation  $\Theta$ . Par cela, il englobe aussi une partie importante d'autres types d'exploitations pouvant être rencontrés dans les bassins houillers (exploitations peu étendues, veines pentées, exploitations partielles, remblayées, etc.).

Le tableau 13 récapitule à titre d'exemple les valeurs des angles  $\Theta$  et  $\gamma$  ainsi que de l'angle d'influence finalement retenu dans le cadre des études des aléas mouvements de terrain et de l'aléa gaz pour le bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais (Proust, 1964, Salmon 2007). Elles peuvent servir de valeurs de référence pour d'autres exploitations de houille.

Bien évidemment, leur utilisation pour d'autres types d'exploitation présentant une moindre influence sur les terrains encaissant n'est que facultative. Des approches particulières peuvent être définies et appliquées à ces cas, dans la mesure où les données suffisantes existent.

Angle d'influence latérale (°)		
angle d'extension maximale de la cuvette d'affaissement $\gamma$	angle de fracture $\Theta$	<b>angle d'influence latérale retenu pour l'aléa gaz</b>
35	10	<b>25</b>

*Tableau 13 : Angles d'influence latérale retenus dans le cadre des études de l'aléa gaz pour le bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais (Proust, 1964, Salmon 2007).*

### 6.2.2.3 Exemple pour les exploitations de fer du bassin lorrain

Le tableau 14 regroupe les valeurs de l'angle d'influence latérale retenues dans le cadre de l'étude de l'aléa gaz pour le bassin houiller ferrifère lorrain. Elles sont issues d'une étude spécifique portant sur l'influence géomécanique des exploitations souterraines de ce bassin (Poulard et Salmon, 2002).

Il s'agit des valeurs moyennes de l'angle d'influence totale des exploitations pris pour la prévision d'affaissements. Elles englobent par principe l'angle de cisaillement et celui de déformation (traction) maximale en bordure d'une exploitation, qui déterminent la position des zones potentiellement fracturées en surface, donc les plus propices à la migration de gaz depuis les vides post-miniers.

Le contexte général du bassin et les méthodes d'exploitation employées ont été mentionnés dans le chapitre 5.2.1.4 et dans l'annexe 3.

Angle moyen d'influence latérale (°)		
Exploitations bordées par une zone vierge ou un pilier barrière suffisamment large	Exploitations bordées par une zone de traçage	Exploitations bordées par un dépilage sur une surface très importante
6	16	30

*Tableau 14 : Angles d'influence latérale retenus pour le bassin houiller ferrifère lorrain (Poulard et Salmon, 2002).*

#### **6.2.2.4 Prise en compte de l'incertitude de positionnement**

L'étendue finale des zones d'aléa est déterminée par un élargissement des zones d'aléa définies précédemment en ajoutant une marge égale à l'incertitude de positionnement des travaux miniers considérés.

Les incertitudes sont définies en fonction de la qualité des données disponibles pour le secteur minier étudié ou ses différentes parties.

Pour situer l'ordre de grandeur, dans les études des aléas du bassin du Nord et du Pas-de-Calais réalisées par l'INERIS, l'incertitude de positionnement des travaux miniers prise en compte était de 20 m.

#### **6.2.3 Homogénéisation des zones d'aléa**

Après la délimitation des zones d'aléa par la prise en compte des extensions latérales et de l'incertitude de positionnement, il peut se produire un recouvrement mutuel d'une partie de la surface par des aléas de niveau différent.

Dans cette situation, c'est le niveau de l'aléa le plus pénalisant qui doit être retenu pour la zone concernée.

### **6.3 ALÉA LIÉ À LA MIGRATION PAR LES OUVRAGES DÉBOUCHANT AU JOUR**

#### **6.3.1 Qualification initiale**

Comme pour la migration par le recouvrement, le niveau de l'aléa lié à la migration de gaz par les ODJ est qualifié initialement en suivant les principes donnés dans le tableau 12. Il est pris en considérant la prédisposition définie auparavant (cf. chapitre 5.3) et le niveau d'intensité évalué pour les travaux miniers ou leurs différentes parties auquel(le)s un ouvrage donné est connecté.

Si un ouvrage est connecté à des parties distinctes d'un réservoir post-minier qualifiées en classes d'intensité différentes, la classe la plus pénalisante doit être retenue pour la suite de l'analyse.

### 6.3.2 Etendue latérale des zones d'aléa

#### 6.3.2.1 Prise en compte de la zone d'influence de l'ouvrage

La présence éventuelle de galeries de subsurface connectées à la tête d'un puits, l'existence de défauts d'étanchéité au droit du dispositif de fermeture d'un ouvrage ou encore la fracturation des terrains autour d'un ODJ obturé peuvent conduire à une migration latérale de gaz de mine depuis l'ouvrage vers les terrains avoisinants puis vers la surface.

Pour prendre en compte ce phénomène, il est nécessaire d'étendre latéralement les limites des zones d'aléa définies précédemment en ajoutant une marge d'influence potentielle de chaque ouvrage.

Si les données existantes le permettent, les dimensions de cette marge d'influence peuvent être évaluées spécifiquement pour le contexte du cas étudié. Ici encore, il est judicieux de prendre en compte les résultats de l'analyse des aléas « mouvements de terrain » et notamment l'extension latérale de l'aléa d'effondrement localisé.

Ci-après, on présente à titre d'exemple les modalités d'une estimation forfaitaire appliquée dans le cadre des études PPRM mouvements de terrain et gaz de mine pour les bassins houillers. Il est à noter qu'à l'échelle cartographique utilisée pour les études de l'aléa - concernant le plus souvent les exploitations d'une étendue dépassant plusieurs km<sup>2</sup>, voire des dizaines km<sup>2</sup> et plus - cette approche s'avère suffisante, en termes de précision, dans une très large majorité de sites.

##### 6.3.2.1.1 Puits et autres ouvrages sub-verticaux

Conformément à la méthodologie appliquée à l'évaluation de l'aléa pour le bassin du Nord et du Pas-de-Calais (Salmon, 2007 ; Pokryszka, 2007) et du bassin d'Aubin-Decazeville (Lagny et Gombert, 2011), les rayons d'influence forfaitaires suivants sont proposés :

- un rayon d'influence égal à 10 m, si les galeries de subsurface sont traitées (comblés) ou inexistantes ;
- un rayon d'influence égal à 20 m, dans les deux situations ci-après :
  - si l'on suppose l'existence de galeries non traitées à faible profondeur autour du puits, sauf cas particuliers de galeries connues non traitées d'une longueur supérieure à 20 m ;
  - lorsque les données sur l'existence ou l'absence de galeries de subsurface ne sont pas disponibles.

Il est à préciser, que les rayons d'influence sont comptés à partir des limites de l'ouvrage lui-même.

Si la présence de galeries de subsurface non traitées d'une longueur supérieure à 20 m est avérée, le rayon d'influence autour de la tête de l'ouvrage sera défini au cas par cas.

#### 6.3.2.1.2 Galeries et ouvrages subhorizontaux

L'extension latérale des aléas de mouvements de terrain autour des parties courantes des galeries et ouvrages subhorizontaux situés à faible profondeur est habituellement évaluée pour les conditions du secteur étudié. Le plus souvent, elle se situe entre 2 et 10 m et est assimilée dans la définition de l'aléa gaz de mine.

Concernant les orifices de ces ouvrages, dans la mesure où les données disponibles le permettent et lorsque l'importance du cas le justifie, le rayon d'extension latérale de l'aléa gaz peut être estimé par des simulations spécifiques (dispersion ou inflammation de gaz), en cherchant la distance nécessaire pour assurer la sécurité autour de l'ouvrage. Il s'agit d'une approche similaire à celle appliquée aux événements (cf. chapitre 6.5).

A défaut, il est proposé d'appliquer une distance forfaitaire de sécurité de 2 à 5 m autour de l'ouvrage, selon l'intensité de l'émission supposée de gaz et les conditions de sa dilution.

#### 6.3.2.2 Prise en compte de l'incertitude de positionnement

Pour chaque ouvrage positionné, une incertitude de localisation doit être évaluée. Elle varie d'un mètre environ pour les ouvrages visibles ou matérialisés en surface et levés au GPS différentiel (DGPS), jusqu'à une centaine de mètres pour les ouvrages n'ayant pu être localisés sur le terrain et positionnés à partir d'un calage d'un ancien plan minier.

Pour les ouvrages impossibles à identifier ou non identifiés en surface, cette incertitude doit être estimée en fonction de la qualité et de l'échelle du plan qui positionne l'ouvrage ainsi que de l'existence de points de repères bien localisés à proximité de l'ouvrage.

#### 6.3.3 Etendue finale de la zone d'aléa

La zone d'aléa établie autour d'un ODJ doit tenir compte de la dimension de l'ouvrage, de celle de la zone d'influence sur les terrains voisins et de l'incertitude de localisation de l'ouvrage.

L'extension latérale de cette zone d'aléa par rapport au contour de l'ouvrage à la surface sera donc définie par la relation suivante :

$$\text{distance de l'aléa autour d'un ODJ} = \text{distance d'influence} + \text{incertitude sur la localisation} \quad [1]$$

Lorsque les dimensions de l'ouvrage sont inconnues, on pourra considérer généralement :

- pour les puits, un diamètre de 2 à 5 m ;
- pour les galeries, une largeur de 1,5 à 4 m et une hauteur de 2 à 3 m.

#### 6.3.4 Ajustement au niveau de l'aléa de migration de gaz par les terrains

L'aléa lié aux ouvrages débouchant au jour est ensuite qualifié en prenant en compte le niveau de l'aléa attribué aux terrains entourant l'ouvrage considéré.

En effet, dans le cas où un ouvrage donné est situé dans une zone sujette à un aléa gaz de mine qualifié non nul, il est évident que le gaz migrant par les terrains de recouvrement à proximité immédiate d'un ODJ peut également affecter cet ouvrage et les terrains situés directement autour de lui.

Par conséquent, si le niveau d'aléa d'un ouvrage débouchant au jour défini initialement est inférieur à celui des terrains avoisinants, il est relevé au même niveau que ce dernier.

Dans le cas contraire, l'aléa initialement défini pour un ouvrage donné est maintenu avec son extension latérale définie au chapitre 6.3.2, qui intègre notamment l'influence potentielle de l'ouvrage sur les terrains avoisinants et l'incertitude du positionnement de l'ouvrage.

#### 6.4 PRISE EN COMPTE DES DISPOSITIFS DE PRÉVENTION OU DE PROTECTION

Comme cela a déjà été mentionné auparavant, dans le but de mieux gérer les risques liés aux gaz de mine, on met en place dans certains cas des dispositifs destinés à canaliser une partie du gaz en lui offrant une voie vers l'atmosphère externe, sensiblement moins résistante que les terrains de recouvrement ou les anciens ouvrages débouchant au jour. Il s'agit principalement d'ouvrages de décompression ou de captages de gaz.

Le rôle de ces ouvrages peut être pris en compte dans l'évaluation de l'aléa, à condition que :

- leur influence sur les phénomènes gazeux au sein du réservoir minier corresponde à celle initialement prévue lors de leur mise en place ;
- leur fonctionnement correct et efficace soit assuré dans le laps de temps visé par l'étude de l'aléa (entretien et suivi des installations, vérification périodique selon des procédures établies...).

La prise en compte de ce rôle peut se faire uniquement dans le périmètre où l'action du dispositif concerné a été démontrée comme suffisamment importante pour réduire significativement l'intensité initiale des phénomènes gazeux.

Compte tenu de la complexité du problème, cet aspect devra faire l'objet d'une étude spécifique au cas par cas

#### 6.5 ALÉA LIÉ AUX SONDAGES DE CONTRÔLE ET DE DÉCOMPRESSION ET AUX ÉVÉNEMENTS

Dans l'évaluation de l'aléa « gaz de mine » lié à la présence des sondages de contrôle et décompression ouverts et des événements, il sera tenu compte de la prédisposition très sensible de ces ouvrages (cf. chapitre 5.3.3) et de l'intensité définie pour le réservoir post-minier (ou sa partie) avec lequel ils communiquent.

L'étendue de la zone d'aléa autour de l'ouvrage considéré devra être définie, en prenant en considération le scénario le plus pénalisant en termes de composition et de débit du mélange gazeux émis ou pouvant être émis, ainsi que de phénomènes dangereux concernés. Pour la définition de la zone d'aléa, les

méthodes de calcul ou de modélisation numérique utilisées dans les études de danger pour les installations industrielles de surface peuvent être mises en œuvre.

Il est à noter qu'en plus des éléments déjà signalés ci-avant, les distances d'effets dépendront aussi de la forme et de la direction du rejet gazeux, du diamètre et de la hauteur de l'événement, de la hauteur de la cible considérée, de la présence d'obstacles, des conditions météorologiques, etc.

Quelques études spécifiques disponibles, réalisées pour les événements miniers, concernent uniquement les rejets du gaz de mine contenant du méthane. Elles ont été faites pour un rejet à la verticale en champ libre d'un événement de 10 cm de diamètre environ et sur une hauteur de 2 à 5 m.

Les calculs ont déterminé les distances d'effet irréversibles pouvant être provoquées par un feu de torche ou une explosion de méthane dans le nuage gazeux formé au droit du point de rejet (effet thermique ou surpression). Ces distances regroupées dans le tableau 15 en fonction du débit et de la composition du rejet gazeux peuvent être utilisées pour la définition de l'étendue de la zone d'aléa.

Débit et composition du rejet gazeux				
	0,01m <sup>3</sup> /min 40% CH <sub>4</sub> 60% air	0,16 m <sup>3</sup> /min 80% CH <sub>4</sub> 20% air	1,6 m <sup>3</sup> /min 80% CH <sub>4</sub> 20% air	18 m <sup>3</sup> /min 100% CH <sub>4</sub>
Distance d'effets irréversibles (m)	1 <sup>21</sup>	3,3 <sup>22</sup>	7 <sup>22</sup>	10 <sup>22</sup>

*Tableau 15. Distances d'effets irréversibles autour du point de rejet de mélanges gazeux contenant du méthane, engendrés par un feu de torche ou une explosion de gaz*

A défaut de disposer de données suffisantes pour classer le cas étudié par rapport aux critères du tableau 15 ou pour réaliser une modélisation spécifique, il est proposé, dans une première approche, de définir une zone d'aléa d'un rayon de 10 m autour des ouvrages de contrôle et/ou de décompression.

Le rayon proposé correspond au scénario potentiellement le plus défavorable, en termes de débit et de composition du rejet, tel qu'identifié pour la partie Est du bassin houiller lorrain, réputée très grisouteuse (Pokryszka et Mouilleau, 2002). Cette solution pénalisante, qui va dans le sens de la sécurité, a déjà été appliquée aux études PPRM « gaz de mine » dans certains cas où les données spécifiques n'ont pas pu être trouvées.

L'aléa lié aux sondages de décompression ouverts et aux événements sera cartographié en appliquant les mêmes marges d'incertitude que celles prises en compte pour les ODJ.

<sup>21</sup> Antoine, 2010

<sup>22</sup> à hauteur d'homme (Pokryszka et Mouilleau, 2002)

## 6.6 CARTOGRAPHIE DE L'ALEA

La cartographie de l'aléa « gaz de mine » ne présente pas de spécificité particulière, comparativement à d'autres types d'aléa analysés et évalués dans le cadre de l'établissement des PPRM. L'annexe 5 présente, à titre d'exemple, une cartographie de l'aléa « gaz de mine » établie pour une ancienne mine de charbon peu profonde s'étendant sur une surface de 2 km<sup>2</sup> environ.

### 6.6.1 Prise en compte de l'incertitude cartographique

Les modalités de la prise en compte de l'incertitude cartographique pour l'aléa « gaz de mine » sont les mêmes que pour tous les autres aléas. Ainsi, l'incertitude cartographique sur la localisation des travaux miniers se subdivise en plusieurs niveaux d'incertitude :

- incertitude intrinsèque du plan,
- incertitude liée à la reproduction du plan,
- incertitude liée à l'opération de géo-référencement.

L'incertitude intrinsèque du plan (c'est-à-dire l'incertitude liée au contour ou à la représentation des zones de travaux qui le composent) est fonction le plus souvent de la répartition des ouvrages sur les travaux miniers. De manière générale, un plan comprenant un ouvrage unique ou un ensemble d'ouvrages alignés aura une incertitude plus grande qu'un plan avec des ouvrages répartis uniformément. D'autres paramètres, plus subjectifs, comme la date d'établissement du plan, peuvent également entrer en jeu dans l'appréciation de l'incertitude.

L'incertitude liée à la reproduction du plan minier est quant à elle fonction du moyen de reproduction. Elle doit être estimée en fonction de la technique mis en œuvre (scanner, photographie, copie manuelle...).

Enfin, l'incertitude liée au géo-référencement du plan dépend, dans sa plus grande partie, de l'incertitude des points de repère utilisés pour le calage. On peut estimer cette incertitude en comparant la superposition des points communs entre le plan minier et la carte de référence pour le positionnement géographique en surface. Cette dernière est issue de la base de données orthophotographiques de l'IGN (BD ORTHO<sup>®</sup>), sachant que l'incertitude de la BD ORTHO<sup>®</sup> est considérée comme très faible par rapport à celle du plan minier.

La qualité des plans étant variable et la position des ouvrages plus ou moins bien connue, il faut déterminer une incertitude finale (fonction de l'incertitude de géo-référencement + incertitude de reproduction + incertitude intrinsèque du plan) adaptée à chaque secteur exploité. La valeur obtenue pourra être fréquemment de l'ordre de  $\pm 10$  à 20 m.

### 6.6.2 Cartographie des failles et d'autres drains potentiels

Dans la plupart des cas, il peut s'avérer utile de cartographier certains éléments d'informations analysés dans le processus d'évaluation de l'aléa « gaz de mine » qui n'ont finalement pas pu être intégrés dans la définition de l'aléa, faute de données suffisantes ou à cause de l'impossibilité de qualifier le rôle de ces éléments vis-à-vis de la migration de gaz.

Il s'agit principalement de formations géologiques à perméabilité élevée et de failles qui peuvent constituer potentiellement des lieux de passage privilégié pour le gaz de mine (cf. chapitre 5.2.3). Même si leur localisation n'est généralement pas très précise (pour les failles,  $\pm 10$  à  $20$  m, dans le meilleur des cas, sur les cartes géologiques), on propose néanmoins de les laisser apparaître « pour mémoire » sur la cartographie de l'aléa.

Les cas échéant, cette information sera à prendre en compte pour réaliser des mesures gazeuses de vérification in situ pour valider l'évaluation de l'aléa ou, dans le futur, pour les mesures de reconnaissance, dans le cas de l'apparition éventuelle de manifestations gazeuses en surface. Elle peut être aussi utile dans la prise de décision sur l'aménagement de la surface.

## **7. RECUEIL DES DONNÉES NÉCESSAIRES**

### **7.1 PHASE INFORMATIVE**

La phase informative préalable à l'évaluation de l'aléa est cruciale pour apprécier le degré de connaissance du site. Elle a pour objectif principal de collecter l'ensemble des informations disponibles. Elle exige tout d'abord une consultation attentive des Dossiers d'Arrêt Définitif des Travaux (DADT), des archives d'exploitation et d'autres documents pouvant donner des informations utiles à la caractérisation du contexte étudié : synthèses géologiques et hydrogéologiques, ouvrages sur l'histoire de l'exploitation, etc.

#### **7.1.1 Données générales**

Une grande partie des données générales requise lors de la phase informative est en principe la même que celles recueillies pour les besoins de l'analyse des autres aléas post-miniers et notamment des aléas liés aux mouvements de terrains.

Il s'agit en premier lieu des données relatives aux travaux miniers, c'est-à-dire les contours des zones exploitées, leur géométrie, leur position dans l'espace et leur profondeur, ainsi que celles relatives aux méthodes d'exploitation employées. Elles seront complétées par les données concernant la position des ouvrages débouchant au jour, leur nature et leur mode de traitement.

La connaissance de la géologie de la zone exploitée et, plus généralement, du bassin minier concerné sont également des données essentielles conditionnant très fortement l'évaluation l'aléa, tout comme les données relatives à l'hydrogéologie du site traité et à sa dynamique.

#### **7.1.2 Recherche de données spécifiques à la problématique de gaz de mine**

Certaines données accessibles dans la phase informative, mêmes si elles sont moins pertinentes et recherchées pour d'autres types d'aléas, peuvent s'avérer fondamentales pour permettre une analyse de l'aléa « gaz de mine »

On s'attachera notamment à *analyser le réservoir minier* dans son ensemble, y compris son environnement géologique, en identifiant notamment les interconnexions entre ses différentes parties, les points hauts et les zones susceptibles de piéger du gaz de mine (y compris les structures géologiques particulières), sans négliger pour autant la possibilité d'une migration latérale du gaz.

Le *niveau d'ennoyage* des différentes parties du réservoir post-minier et son évolution possible dans le temps devront être appréciés et quantifiés aussi bien que possible, compte tenu de l'influence très forte de l'eau sur les phénomènes gazeux.

De même, les données sur la nature, la composition et les caractéristiques de perméabilité des *terrains de recouvrement* devront être recherchées attentivement, afin de bien comprendre leur rôle dans les migrations éventuelles de gaz de mine.

Enfin, les *données spécifiques aux gaz* présents pendant ou après l'exploitation doivent également être soigneusement recherchées. Ces données, aussi bien qualitatives que quantitatives, peuvent être très utiles dans l'identification des mécanismes animant les phénomènes gazeux et dans l'évaluation de leur intensité. Il s'agit de :

- la nature du gisement exploité et des roches encaissantes ;
- la mention des manifestations gazeuses dans les chantiers souterrains, faite dans des ouvrages divers, ou encore les rapports établis par les exploitants ou les ingénieurs chargés de la surveillance et du contrôle des mines ;
- le classement administratif des chantiers vis-à-vis du grisou, apparu en France vers la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, lors de la mise en place de la réglementation relative à la sécurité ;
- la mise en place de moyens de prévention contre le gaz : explosifs de sûreté, lampes de sûreté, ventilation mécanique, grisoumètres, etc.
- les rapports d'accidents liés au gaz, allant de la simple flambée sans conséquence pour les personnes jusqu'à la véritable catastrophe ;
- les résultats des mesures diverses du dégagement gazeux : mesure de la teneur en gaz dans les voies de retour d'air, mesure de la présence et de la quantité de gaz dans la roche, détermination du dégagement spécifique ;
- les mentions, dans les archives, de remontées de gaz en surface et de leur manifestation, informations malheureusement très rares ;
- la chronologie de l'exploitation et notamment le temps écoulé depuis l'arrêt des travaux miniers dans les différentes parties du secteur analysé.

Dans certains cas, l'analyse des données peut permettre d'identifier des régularités dans la répartition des caractéristiques des travaux miniers dans l'espace et mettre en évidence l'existence d'une ou plusieurs zones plus ou moins homogènes que l'on peut différencier en vu des analyses ultérieures.

Dans la mesure du possible, des typologies pourront être aussi déterminées, en ce qui concerne les travaux miniers, les terrains de recouvrement, les ODJ, etc. Les éléments identifiés lors de la phase informative pourront alors être rangés dans les classes prédéfinies, afin d'essayer de mieux systématiser et faciliter les futures évaluations.

### 7.1.3 Données et informations à rechercher ou à confirmer sur le site

En fonction de la quantité, de l'actualité et du niveau de fiabilité des données disponibles et identifiées dans la phase informative documentaire, il peut s'avérer utile voire indispensable de compléter les informations recueillies ou de confirmer les données existantes au moyen d'une inspection du site. Pour la problématique du gaz de mine, les informations spécifiques les plus pertinentes sont :

- la position des ODJ et l'état actuel de leur fermeture ;
- la position des émergences minières (aménagées ou spontanées) et leurs caractéristiques ;

- les dégâts miniers éventuels, visibles en surface, pouvant avoir trait à la remonté de gaz ;
- la topographie de la surface et ses caractéristiques vis-à-vis du réservoir post-minier et des ODJ.

Si une opportunité se présente au cours de la visite du site, des mesures gazeuses simples (composition de l'atmosphère, sens et intensité d'écoulement...) peuvent être faites dans les lieux accessibles, où une présence de gaz de mine peut être suspectée ou attendue, par exemple au droit des ODJ et des résurgences ou dans les locaux confinés restant en contact avec le sol (cf. chapitre suivant).

## 7.2 INVESTIGATIONS SPÉCIFIQUES OU COMPLÉMENTAIRES IN SITU

De manière générale, dans la caractérisation d'un site il faut privilégier les données actuelles ou actualisées, obtenues notamment par les mesures in situ, par rapport aux données anciennes. Les mesures actuelles permettent en effet d'avoir une meilleure approche des vieux travaux miniers et de leur faculté à émettre des gaz dangereux dans la configuration d'aujourd'hui.

Parmi les paramètres caractérisant les émissions gazeuses, la nature et la composition de l'atmosphère au sein des vides miniers les plus proches de la surface ou encore la nature et la puissance des mécanismes animant localement les transferts de gaz constituent un élément essentiel pour pouvoir apprécier l'importance des aléas liés au gaz de mine.

Malheureusement dans l'évaluation de l'aléa « gaz de mine », les données disponibles sont très souvent insuffisantes et le retour d'expérience est très limité.

Par conséquent, un programme de mesures en surface doit être mis en place, avant d'entreprendre une analyse de l'aléa « gaz de mine », lorsque les données disponibles sur la zone d'étude ne sont pas suffisantes et lorsqu'il n'est pas possible de raisonner par analogie avec une zone exploitée à proximité pour laquelle les données sont plus complètes.

D'autres mesures pourront être entreprises ultérieurement, après une première analyse des données disponibles aboutissant à une pré-définition des zones d'aléas. Elles pourront permettre une vérification de la présence et de l'importance d'un éventuel dégagement gazeux à la surface.

La décision sur la nature, le plan, la répartition spatiale et la durée des mesures, ainsi que sur les paramètres à suivre, ne pourra se faire qu'au cas par cas, après une première analyse des données recueillies dans la phase informative. Elle devra permettre d'évaluer le degré de compréhension des phénomènes gazeux qu'il est possible d'atteindre dans le secteur étudié à partir des données existantes. Il s'agira ensuite d'identifier les lacunes indispensables à combler pour pouvoir assurer un degré suffisant de qualité d'évaluation de l'aléa. Cette étape est indispensable, afin de pouvoir bâtir un plan de mesures adapté au contexte du site étudié et à la nature des données recherchées.

En fonction des lacunes existantes dans les données disponibles et de la nature des informations recherchées, il peut s'agir de mesures simples et ponctuelles visant à confirmer ou à acquérir quelques données particulières, jusqu'à une

instrumentation multiparamètres durable du site et son suivi sur une année ou plus, si la bonne compréhension des phénomènes gazeux l'exige.

Le rôle des mesures in situ et des données expérimentales ainsi que leur positionnement lors des différentes étapes de l'étude d'aléa « gaz de mine » sont illustrés sur la figure 12 et discutés dans les chapitres suivants.

Les mesures réalisées classiquement concernent les paramètres indiqués ci-après, en incluant souvent leur évolution dans le temps, sur des périodes plus ou moins longues :

- composition de gaz au sein des travaux miniers (si un accès possible), sur les orifices des ODJ et au droit des émergences de l'eau de mine ;
- pression absolue au sein du réservoir souterrain ou pression différentielle par rapport à l'atmosphère en surface ;
- sens et débit d'échanges gazeux entre les travaux post-miniers et la surface, sur les ODJ ou les forages ;
- flux gazeux à la surface du sol ou en tête des dispositifs de fermeture des ODJ ;
- composition de l'atmosphère dans les lieux propices à une accumulation de gaz de mine en surface ;
- nature et quantité des gaz dissous dans les émergences d'eau de mine.

Les annexes 6 et 7 illustrent quelques méthodes spécifiques mises en œuvre in situ par l'INERIS. De même, plusieurs publications décrivent et caractérisent les différentes techniques de mesures gazeuses disponibles et applicables dans le contexte post-minier : Pokryszka et Tauziède, 2000 ; Besnard et Pokryszka, 2005 ; Pokryszka et Charmoille, 2008 ; Pokryszka et al. 2010 ; Lafortune et al 2013 ; Lagny et al. 2013.

Dans des cas particuliers, les mesures décrites ci-avant peuvent être complétées par des investigations spécifiques en laboratoire ou in situ visant à caractériser les propriétés géochimiques des roches ou les propriétés aérauliques du milieu (perméabilité, porosité, fracturation, saturation en eau...). Ces investigations, réalisées beaucoup plus rarement que les mesures gazeuses classiques, peuvent s'avérer indispensables pour évaluer le rôle de certaines formations géologiques spécifiques dans la production de gaz ou encore dans la migration du gaz de mine.

### 7.2.1 Apport des mesures in situ dans l'évaluation de l'intensité

Dans le cas où les données recueillies dans la phase informative s'avèreraient insuffisantes, certaines mesures in situ peuvent fournir des informations permettant de mieux apprécier (voire de statuer sur) l'intensité des phénomènes gazeux au sein d'un réservoir post-minier ou d'une partie donnée de ce réservoir.

Ces mesures sont à réaliser par principe sur les ouvrages reliés directement aux vides souterrains. Deux configurations sont a priori possibles :

- mesures sur les ouvrages débouchant au jour accessibles sur le terrain, lorsqu'ils ne sont pas comblés et que des ouvertures adaptées existent dans le dispositif obturant leur orifice ;

- mesures sur les forages reliant la surface et les travaux miniers, existants ou réalisés pour le besoin de l'étude.

Les investigations in situ peuvent fournir des informations essentielles concernant les principales composantes de l'évaluation de l'intensité, à savoir :

- la composition du gaz de mine ;
- le niveau de la pression dans le réservoir et son évolution ;
- le débit de gaz par les ouvrages ;
- le comportement général du réservoir en fonction des conditions extérieures (topographiques, météorologiques...) et son évolution dans le temps.

Selon la nature des données recherchées, il peut s'agir ici de mesures simples composition du mélange gaz jusqu'à un suivi sur une année ou plus, si les mécanismes animant les échanges gazeux et leur intensité ne sont pas connus et doivent être établis avec certitude. Un avis d'expert est ici indispensable.

### 7.2.2 Apport des mesures in situ dans l'évaluation de la prédisposition

Dans la mesure où les mécanismes animant les échanges gazeux et leur intensité sont suffisamment connus, certaines mesures en surface peuvent aider à évaluer la prédisposition du milieu à la migration de gaz.

Ces mesures doivent être réalisées en s'assurant que le comportement global du réservoir minier étudié ou de sa partie visée, ainsi que les conditions extérieures (météorologiques ou/et climatiques) correspondent à la configuration cherchée pour les investigations.

Les investigations peuvent concerner :

- les ouvrages débouchant au jour.

Il s'agit des mesures réalisées sur les orifices de ces ouvrages visant à vérifier leur niveau d'étanchéité (présence de gaz de mine ou d'entrées d'air, débit d'échanges gazeux...). Les informations obtenues peuvent permettre de classer ou de vérifier le classement de) un ouvrage ou un type d'ouvrages dans l'une ou l'autre catégorie de prédisposition ;

- le sol, la surface du sol et les différents locaux à la surface.

Ces mesures viseront principalement à vérifier ou à permettre d'établir les critères concernant la résistance aéraulique des terrains de recouvrement (épaisseur, nature, perméabilité...). Elles consisteront à chercher la présence de gaz de mine à la surface dans les différentes zones représentatives choisies en fonctions des données manquantes et des caractéristiques de différents secteurs d'exploitation (hydrogéologie locale, profondeur des travaux miniers...). Selon l'aménagement et l'accessibilité de la surface, la présence de gaz de mine peut être classiquement recherchée :

- dans des endroits ou locaux confinés restant en contact avec le sol (caves, sous-sols, égouts, réseaux enterrés, puits d'eau, etc.) ;
- dans le flux gazeux à la surface du sol ;
- dans le sol, via de petits sondages réalisés pour les besoins de la mesure.

A noter que dans certaines configurations, ces mesures peuvent fournir en parallèle des informations sur l'intensité des phénomènes gazeux au sein du réservoir post-minier.

Par exemple, une absence avérée et systématique de gaz de mine en surface ou dans le sol au droit des travaux miniers très peu profonds, quelles que soient les conditions extérieures influentes, indiquera plutôt une intensité gazeuse faible. A contrario, une présence de gaz dans le sol et en surface à l'aplomb des travaux miniers couverts par une frange conséquente de terrains peu perméables peut signaler une surpression et des teneurs en gaz importantes dans le réservoir post-minier.

### 7.2.3 Apport des mesures dans l'évaluation de la pertinence du niveau de l'aléa pré-établi.

Dans la phase finale de l'établissement de l'aléa, une vérification du niveau de l'aléa « gaz de mine » attribué aux différents secteurs d'exploitation et aux ODJ devra être réalisée (cf. chapitre 8).

Dans le cas où des doutes apparaîtraient sur la pertinence des évaluations réalisées, doute lié plus particulièrement à une insuffisance ou à une imprécision des données disponibles, des mesures de vérification in situ pourront être entreprises, visant à fournir des données complémentaires ou à lever le doute.

En fonction de la nature du problème et du type de données recherchées, les mesures peuvent concerner les paramètres nécessaires à la réévaluation de l'intensité des phénomènes gazeux, de la prédisposition ou simultanément de deux composants de l'aléa. Par conséquent, toutes les variantes des mesures évoquées précédemment peuvent être employées.

### 7.2.4 Prise en compte de la présence naturelle des gaz dans le sol

Certains composants caractéristiques du gaz de mine peuvent être présents naturellement à la surface du sol et/ou dans le sol. Leur présence doit donc être vérifiée et être prise en compte (comme bruit de fond) lors des mesures effectuées au droit des travaux miniers.

Il s'agit classiquement de la présence du CO<sub>2</sub> et d'un déficit plus ou moins important en O<sub>2</sub> qui sont liés à une activité biologique permanente dans les couches peu profondes du sol.

A l'état naturel, le CH<sub>4</sub> n'est que très rarement observé en quantité significative dans le sol et à sa surface, sauf dans certains environnements particuliers (marécages et tourbières).

Pour les autres composants classiques du gaz de mine (CO et H<sub>2</sub>S), ils sont absents dans le gaz du sol (<1 ppm), hormis dans les zones d'anomalies géochimiques, dans les zones en combustion ou au droit des zones d'activité hydrothermale, où par ailleurs toutes les autres composants du gaz de mine peuvent également se trouver en quantité plus ou moins importante.

Si des doutes existent sur la composition des gaz du sol et/ou le niveau des teneurs ou des flux observés, il peut être utile de réaliser des mesures comparatives entre les secteurs influencés par l'exploitation minière et des zones

« témoins » situées dans l'environnement proche, dans le même contexte géologique, mais en dehors de toute exploitation. Ceci doit être fait en veillant également sur l'équivalence des caractéristiques pédologiques et géochimiques du sol ainsi que des conditions météorologiques et climatiques.

### 7.2.5 Représentativité des mesures

Les mesures doivent être réalisées dans des conditions optimales et, en dehors des exigences métrologiques propres à un gaz ou un paramètre physique donné (résolution, précision et étendue de mesure nécessaire), elles devront être représentatives en termes de nombre, de répartition spatiale, de durée, de périodicité...

Leur mise œuvre nécessite l'établissement d'un protocole spécifique adapté au lieu investigué, à la nature du (des) phénomène(s) gazeux à caractériser ainsi qu'aux paramètres mesurés et à leur sensibilité aux conditions extérieures (notamment météorologiques ou climatiques).

Cet aspect est particulièrement important pour la problématique du gaz de mine car les phénomènes à analyser sont souvent éminemment complexes et dépendent d'un nombre de facteurs très important. Par conséquent les résultats des mesures et l'évaluation des phénomènes qui en découle par la suite peuvent être très facilement biaisés par le choix d'un plan d'investigation ou de techniques mal adaptés au contexte étudié.

### 7.2.6 Interpolation des données

Dans certain cas, il peut s'avérer nécessaire de réaliser une interpolation des données, par exemple dans le but de délimiter la zone d'aléa qui leur est associée. Dans ce cas, la représentativité statistique des mesures disponibles pour la surface concernée doit être préalablement étudiée, ceci d'autant plus que la répartition spatiale des mesures de terrain et des informations disponibles est souvent très hétérogène.

On vérifiera en premier lieu que la variable mesurée (flux de gaz à l'interface sol-air, teneur en gaz dans le sol ou dans les locaux confinés) possède une distribution normale ou log-normale et que ses paramètres de tendance centrale (moyenne, médiane) et de dispersion (écart-type) sont représentatifs<sup>23</sup>.

En fonction de la précision attendue pour le résultat final, cette analyse statistique simple doit permettre de confirmer que la densité de mesures est suffisante dans le contexte étudié. Par la suite, les méthodes d'interpolation devront être judicieusement choisies et ce choix justifié.

---

<sup>23</sup> on pourra par exemple calculer son coefficient de variation, rapport de l'écart-type à la moyenne, et vérifier qu'il n'est pas trop élevé (généralement  $\leq 0,50$ ) et tracer l'histogramme des valeurs pour constater qu'il est bien unimodal.

D'après l'expérience déjà acquise pour l'émission de gaz en surface par les terrains de recouvrement, une densité d'échantillonnage de 1 point/0,5 ha semble être un minimum pour apporter de bons résultats en termes d'homogénéité des paramètres gazeux observés à la surface du sol. Cependant, il est difficile de généraliser cette règle, sachant que les caractéristiques et le mode de fonctionnement peuvent être différents d'un site à l'autre voire d'une partie à l'autre d'un même site.

Il sera alors nécessaire de faire appel à l'expertise d'un opérateur confirmé qui devra analyser les données et proposer un plan d'échantillonnage adapté au cas étudié.

## 8. ORGANISATION ET RÔLE DES DIFFÉRENTES ÉTAPES D'ÉVALUATION DE L'ALÉA GAZ DE MINE

En conclusion, le logigramme proposé ci-après en figure 12 illustre les différentes étapes de l'étude d'aléa « gaz de mine » d'un site minier, leur organisation et leur enchaînement optimal.

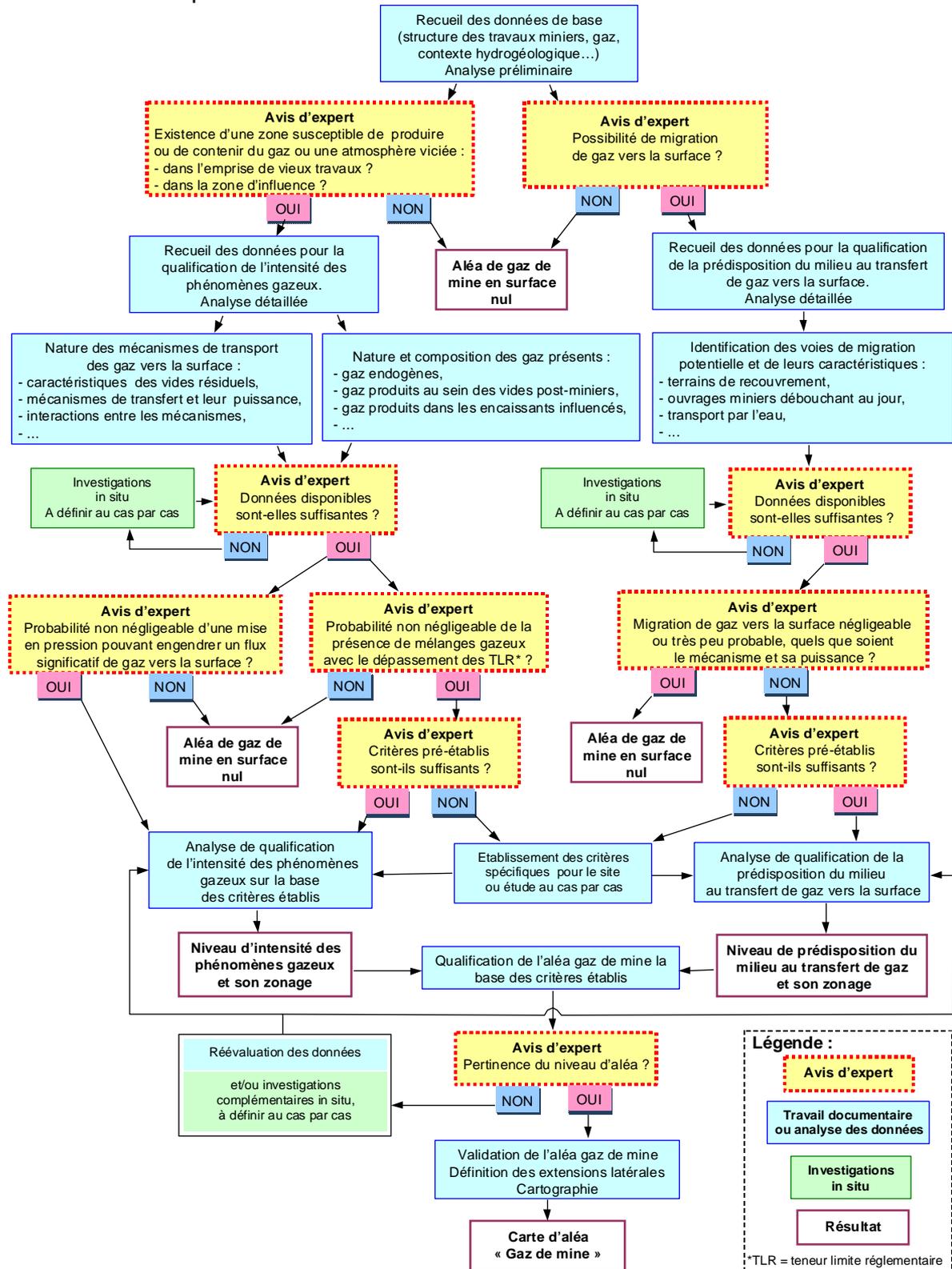


Figure 12. Organisation des différentes étapes d'évaluation de l'aléa « gaz de mine »

Ce logigramme formalise aussi le schéma décisionnel en ce qui concerne la suite des opérations à réaliser après chaque étape.

Ainsi, compte tenu du caractère souvent qualitatif ou semi-quantitatif des données et/ou des critères disponibles ou encore de la nécessité d'étudier les sites miniers au cas par cas, un rôle plus ou moins important sera accordé à l'expert. Son avis sera souvent décisif dans l'analyse des données et dans la qualification des différents composants nécessaires pour atteindre une évaluation correcte de l'aléa.

Enfin, ce logigramme montre également le rôle et la position, dans le schéma décisionnel, des mesures in situ visant à compléter les données au cours de l'étude, ainsi que celles destinées, le cas échéant, à vérifier en conclusion de l'étude la pertinence de l'aléa proposé.

## **9. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- AIRUNI A. T., 1981 : Théorie et pratique de la lutte contre le grisou dans les mines à grande profondeur. Nedra eds. Moscou, 1981.
- ANTOINE F., 2010 : Modélisation de scénarios accidentels de rejet de gaz inflammable au droit des événements du bassin du Nord Pas de Calais. Rapport INERIS pour le compte de Géoderis référencé INERIS-DRA-10-113798-07530C du 25/08/2010.
- BESNARD K, POKRYSZKA Z., 2005 : Gases emission monitoring in a post-mining context. International Conference Post-Mining 2005, Nancy, 16- 17 November.
- CERCHAR, 1978 : Grisou, grisoumétrie et anémométrie. Centre d'Etudes et Recherches de Charbonnages de France. Edition août 1978.
- de CONNINCK L., 1963 : Effet sur l'organisme humain de l'inhalation dans l'air contenant de l'anhydride carbonique (CO<sub>2</sub>). Annales des Mines de Belgique n°5, 1963.
- DEGAS M., 2007 : Bassin minier d'Aubin-Decazeville (Aveyron). Contribution à la réalisation d'un Plan de Prévention des Risques Miniers. Evaluation et cartographie des aléas liés aux mouvements de terrain. Rapport d'étude INERIS référencé DRS-07-78273-04592A du 20/12/2007.
- DEGAS M., 2012 : Bassin minier d'Aubin-Decazeville (12). Complément à l'étude d'analyse et de cartographie des aléas « mouvement de terrain » relatif aux mines de fer. Rapport d'étude INERIS référencé DRS-12-129828-07804A du 13/12/2012.
- DIDIER C., 2001 : Guide méthodologique pour l'arrêt des exploitations minières souterraines. Rapport d'étude INERIS référencé DRS-01-25750/R01, avril 2001.
- Guide PPRT, 2007 : Le plan de prévention des risques technologiques (PPRT). Guide méthodologique. Ministère de l'Ecologie du Développement de l'Aménagement Durables, 2007, <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Maitrise-de-l-urbanisation-PPRT,12775.html>
- INERIS, 2006 : L'élaboration des Plans de Prévention des 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 d'étude INERIS référencé DRS-06-51198/R01 du 04/05/2006. Contribution de différents organismes.
- INRS, 2008 : Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France. Aide-mémoire technique, ed. 984, 2008.
- JEGER C, LIABEUJ J., 1976 : Gisement et dégagement de grisou. Industrie Minérale-Mine 2-76, pp. 25-53.
- JEGER C., 1980 : Eléments nouveaux dans la prévision du dégagement de grisou dans les tailles en plateaux et dans les traçages situés dans des zones détendues dans ces tailles. Recueil de communications des Journées d'Information " Grisou, Climat et Aérage dans les Charbonnages de la Communauté Européenne , Luxembourg, 1980.
- KOZLOWSKI B., 1972 : Prévision du risque lié aux gaz dans les mines de charbon. Slask eds., Katowice, 1972.
- KRAUSE E. POKRYSZKA Z., 2013 : Investigations on methane emission from flooded workings of closed coal mines Journal of Sustainable Mining. ISSN 2300-3960, Vol. 12 (2013), No. 2, pp. 40-45.
- LAFORTUNE S., POKRYSZKA Z., BENTIVEGNA G., RÉGIS FARRET R., 2013 : From geochemical baseline studies to characterization and remediation of gas leaks: experiences and case studies of the French institute for risk management (INERIS). Energy Procedia, Volume 37, 2013, Pages 4391-4399.

- LAGNY C., 2005 : Modélisation de la pression du réservoir post-minier et des débits de gaz passant par les exutoires du secteur Est du bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais. Rapport INERIS DRS-05-45883/R05 du 29/09/2005.
- LAGNY C. et GOMBERT P., 2011 : Evaluation de l'aléa « gaz de mine » pour l'ensemble des concessions du bassin minier d'Aubin-Decazeville (12). Rapport INERIS référencé DRS-11-121517-04850A du 17/10/2011.
- LAGNY C., POKRYSZKA, Z., CHARMOILLE, A., 2013 : Rôle de la pression et de la température dans les échanges gazeux entre les mines souterraines abandonnées et la surface. *Mines & Carrières*, 2013 (199), p. 22-28.
- 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. Thèse, INERIS-Paris ENMP.
- MEDDE, 2013 : Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie. Prévention des risques. Seuils de toxicité. 13 février 2013, <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Seuils-de-toxicite,12753.html>
- MONOMAKOFF A., 1978 : Dangers résultant de la présence du grisou dans l'atmosphère de la mine. Rapport CERCHAR "Grisou – Grisométrie – Anémométrie", CTO-JLi/MB 72-76-38, 1978.
- NOACK K., 1970 : Recherches sur la forme et la grandeur de la zone de dégazage autour des chantiers en gisement plat ou peu incliné de la Ruhr. *Gluckauf- Forschungshefte* n° 3/1970.
- POKRYSZKA Z., TAUZIEDE C., 1992 : Gaining a better knowledge of firedamp emission for rapid mining operations. Final Report on ECSC Research Project 7220-AC/319, INERIS, Verneuil-en-Halatte, 1992.
- POKRYSZKA Z., 1999 : Essai d'évaluation du rôle potentiel du tirage naturel dans le phénomène des émissions gazeuses à Moyeuve-Grande. Rapport INERIS référencé DRS-99-21476/R06 du 20 septembre 1999.
- POKRYSZKA Z., 2000 : Emission de grisou à la surface de la concession De Wendel après l'arrêt des exhaures minières. Analyse du problème et moyens de prévention. Rapport INERIS référencé INERIS-DRS-00-26095/R01 du 28 juillet 2000.
- POKRYSZKA Z. TAUZIÈDE C., 2000 : Evaluation of gas emission from closed mines surface to atmosphere. *Environmental Issues and Management Waste in Energy and Mineral Production*, Balkema eds., Rotterdam, ISBN 9789058090850, 327-329.
- POKRYSZKA Z. et VELLY N., 2001 : Etude des réservoirs de Méthamine Désirée-La-Naville. Composition du grisou originel, évolution de la pression après l'arrêt de captage et migration de gaz par un puits remblayé. Rapport INERIS-DRS-01-23751/R02bis, 2001.
- POKRYSZKA Z. et LAGNY C., 2002 : Emission de gaz de mine vers la surface dans le Bassin du Nord et du Pas-de-Calais. Approche méthodologique pour l'évaluation du risque et la définition des moyens de prévention. Rapport INERIS-DRS-02-20815/R09 daté du 23 mai 2002.
- POKRYSZKA Z. et MOUILLEAU Y., 2002 : Sondages de décompression pour la concession De Wendel. Préconisations pour leur réalisation, définition de leur équipement en surface et étude du risque pour la phase de fonctionnement. Rapport INERIS-DRS-02-27667/R01bis du 30 janvier 2002.

- POKRYSZKA Z., 2004 : Dégagement gazeux de charbon ennoyé. Journée technique des Charbonnages de France. Freming-Merlebach, 23 juin 2004.
- POKRYSZKA Z. et LAGNY C., 2004 : Emission de gaz de mine vers la surface dans la partie est du Bassin du Nord et du Pas-de-Calais. Analyse du risque et définition des moyens de prévention. Rapport INERIS-DRS-02-28056/R01ter du 10 juin 2004.
- POKRYSZKA Z., TAUZIEDE C., LAGNY C. et Guise Y., 2005 : Gas Migration from Closed Coal Mines to the Surface. Risk assessment Methodology and Prevention Means, Symposium Post-Mining 2005, November 16-17, Nancy.
- POKRYSZKA Z. 2006 : Synthèse des mesures de gaz sur le réservoir de Moyeuve-Grande depuis 2000. Colloque Gisos, novembre 2006. Nancy.
- POKRYSZKA Z., 2006a : Evaluation des risques liés aux gaz dans le cadre de l'établissement des PPRM du bassin ferrifère lorrain. Approche méthodologique. Rapport INERIS référencé DRS-06-82223/R01 du 22 décembre 2006.
- POKRYSZKA Z., 2007 : Bassin houiller du Nord Pas-de-Calais. Définition de l'aléa « gaz de mine » en vue de la réalisation d'un Plan de Prévention des Risques Miniers. Rapport méthodologique. Rapport référencé INERIS DRS-08-90082-08361A du 22 décembre 2007.
- POKRYSZKA Z., KRAUSE E., 2007 : Methane emissions from flooded coal seams in abandoned mines in the light of laboratory investigations. Mining and Environment N° IV/2007, ISSN 1643-7608, Central Mining Institute eds., Katowice. pp. 205-212.
- POKRYSZKA Z., 2008 : Suivi et évaluation des échanges gazeux en liaison avec des anciens travaux souterrains de la mine de fer de May-sur-Orne (14). Bilan des travaux. Synthèse et interprétation des résultats. Rapport INERIS DRS-08-94432-15456A du 23/12/2008
- POKRYSZKA Z. ET CHARMOILLE A., 2008 : Programme Géocarbone Monitoring. Convention ANR-05-CO2-008-05. Monitoring géochimique en phase gazeuse à la surface et dans la couverture intermédiaire des sites de stockage. Synthèse des travaux de l'INERIS. Rapport INERIS DRS-08-71082-09108A, juin 2008, en ligne : [http://www.ineris.fr/centredoc/ANR-Monit\\_RappFin\\_INERIS-DRS-08-71082-09108B.pdf](http://www.ineris.fr/centredoc/ANR-Monit_RappFin_INERIS-DRS-08-71082-09108B.pdf)
- 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.
- POKRYSZKA Z., 2012 : Bassin houiller du Dauphiné. Caractérisation des émissions de gaz de mine et révision de l'aléa pour le champ d'exploitation de La Motte d'Aveillans (38). Rapport INERIS DRS-12-129516-12267A du 21 décembre 2012.
- POULARD, F. ET SALMON, R., 2002 : Proposition d'une méthode d'analyse et de hiérarchisation des risques résiduels liés à l'exploitation d'un ancien bassin minier. Rapport INERIS DRS-02-25304/R02 du 24 décembre 2002.
- PROUST A., (1964) : Etude sur les affaissements miniers dans le bassin du Nord et du Pas-de Calais. Revue de l'Industrie Minérale, Juin-Juillet 1964, 46 n° 6 et 7.
- SALMON R., 2007 : Bassin houiller du Nord Pas-de-Calais – Zone 1. Concessions de Bruille-Saint-Amand, Château l'Abbaye, Crespin, Escaupont, Fresnes, Odomez, Raismes, Saint-Aybert, Saint-Saulve, Thivencelle, Vicoigne et Vieux Condé. Définition et cartographie de l'aléa « mouvements de terrain » en vue de la réalisation d'un Plan

de Prévention des Risques Miniers. Rapport INERIS DRS-07-90083-17657A PROJET du 22/12/2007.

SÉNAT, 1987 : Bassin minier du Nord-Pas-de-Calais : fuites de gaz dans d'anciens puits de mine. JO Sénat du 23/04/1987, p. 617 et 1515.

TINCELIN E., 1983 : La mécanique du foudroyage dans l'exploitation des couches en plateure. Annales des mines. Avril 1983.

TAUZIEDE C., POKRYSZKA Z., 1998 : Evaluation du risque lié à l'émission de gaz de mine à la surface après l'exploitation et analyse de mesures palliatives appropriées. Approche méthodologique. Rapport d'étude INERIS réf. SSE-98-26EH88/R01 du 17 novembre 1998.

TAUZIEDE C., POKRYSZKA Z., 2002 : Evaluation 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, 8-9 octobre 2002, Nancy.

TAUZIEDE C., POKRYSZKA Z. et BARRIERE J.P., 2002 : Risk assessment of gas emission at the surface of French abandoned coal mines and prevention techniques. Mining technology - Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy : Section A, 2002, vol. 111, pp. A192-A196.

ULLMAN, 1989 : Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry ». Vol. A13, 5ème édition. 1989.

## 10. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe 1	Exemple d'évaluation de la surpression possible au sein d'anciens travaux d'une mine de charbon	2 A4
Annexe 2	Principes d'établissement des critères de prédisposition à la migration de gaz de mine à travers les terrains de recouvrement proposés pour les anciennes exploitations de charbon	3 A4
Annexe 3	Principes d'établissement des critères de prédisposition à la migration de gaz de mine proposés pour les anciennes exploitations du bassin ferrifère lorrain	2 A4
Annexe 4	Précisions sur la qualification de la prédisposition à la migration de gaz à partir des puits et des ouvrages sub-verticaux	3 A4
Annexe 5	Exemple de carte d'aléa « gaz de mine »	2 A4
Annexe 6	Exemple des mesures gazeuses en surface et sur les ouvrages	7 A4
Annexe 7	Exemples d'aménagement des ouvrages et d'instrumentation des sites post-miniers destinés à des mesures gazeuses continues prolongées	6 A4



## **Annexe 1**

Exemple d'évaluation de la surpression possible  
au sein d'anciens travaux d'une mine de charbon



## Exemple d'évaluation de la surpression possible au sein d'anciens travaux d'une mine de charbon

Cette évaluation est issue d'une étude réalisée pour le bassin du Nord et du Pas-de-Calais (Pokryszka, 2007). Elle a été faite à partir d'une base de données de l'INERIS concernant les capacités d'adsorption de gaz par les charbons de ce bassin, en fonction de leur maturité pétrographique (taux en matières volatiles) et de leur pression d'équilibre. Pour le méthane, le gaz largement majoritaire du gisement, la relation entre ces différents paramètres est illustrée sur la figure A1.

Pour les conditions initiales avant l'exploitation (concentrations moyennes en méthane du charbon vierge de 11 à 15 m<sup>3</sup>/t), la **pression moyenne absolue** du gisement peut être estimée à environ 1 MPa.

L'exploitation minière a conduit à un dégazage plus ou moins important des terrains voisins. On sait par l'expérience et par de nombreuses mesures in situ que la concentration totale en méthane du charbon dans les veines partiellement dégazées, situées dans le voisinage des zones exploitées, dépasse très rarement une fourchette de 2 à 8 m<sup>3</sup>/t.

En retenant ces valeurs, les courbes moyennes de la capacité d'adsorption donnent une pression absolue de gaz dans le gisement influencé par l'exploitation, donc a fortiori celle attendue dans le réservoir post minier, comprise entre 0,1 et 0,5 MPa. La valeur moyenne théorique de cette pression absolue se situe probablement entre 0,2 et 0,3 MPa (figure A1). La surpression moyenne attendue au sein du réservoir post-minier serait donc de 0,1 à 0,2 MPa.

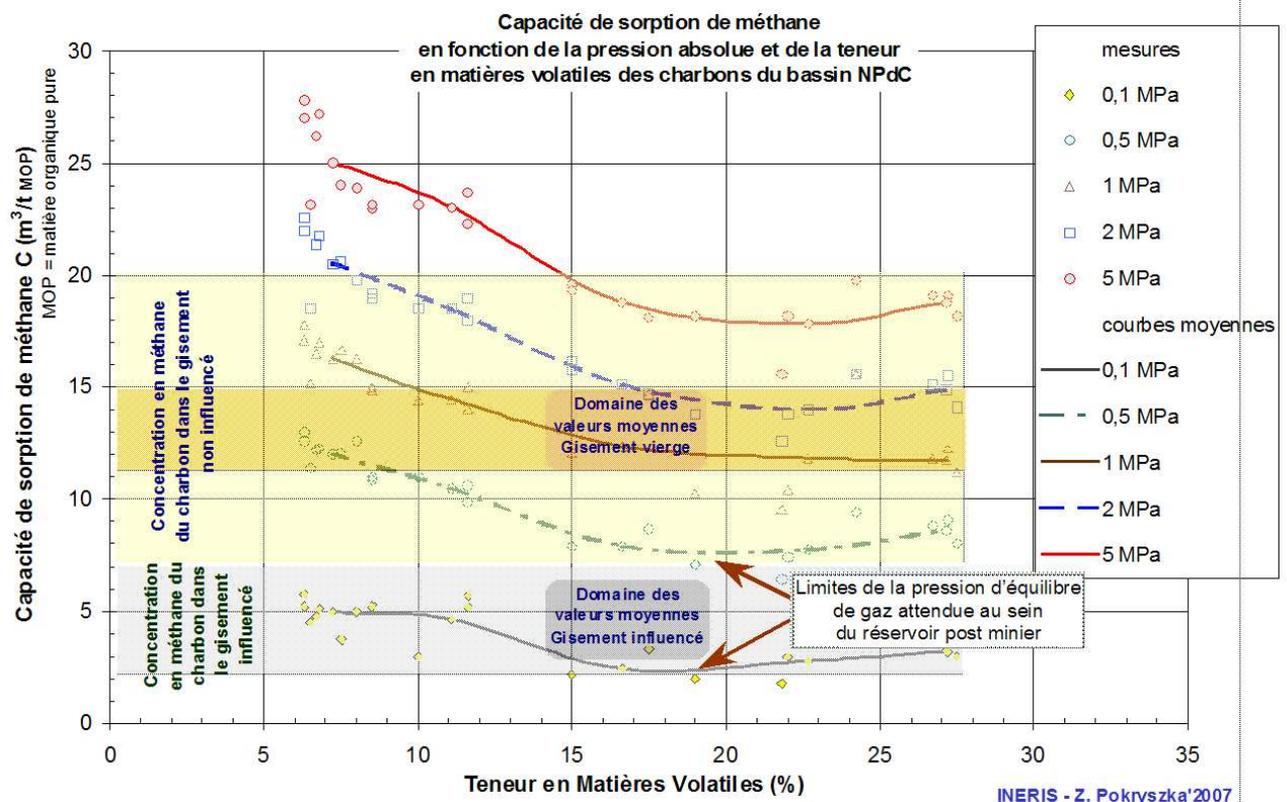


Figure A1 : Estimation de la pression d'équilibre de gaz dans les parties influencés et vierges du gisement du bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais



## **Annexe 2**

Principes d'établissement des critères de prédisposition  
à la migration de gaz de mine à travers les terrains de recouvrement,  
proposés pour les anciennes exploitations de charbon



## **Principes d'établissement des critères de prédisposition à la migration de gaz de mine à travers les terrains de recouvrement, proposés pour les anciennes exploitations de charbon**

Par principe, les terrains sus-jacents à un gisement houiller demeurant grisouteux de nos jours<sup>1</sup> formaient, avant l'exploitation, un obstacle important à la migration de gaz vers la surface. Ils présentaient en effet une résistance aéraulique suffisante pour empêcher une libération totale des gaz produits lors de la formation du charbon.

Cependant, il est démontré que l'exploitation minière provoque une fracturation, une fissuration et une détente mécanique des terrains houillers encaissants, en augmentant fortement leur perméabilité initiale et en asséchant éventuellement les aquifères sus-jacents. Après l'arrêt de l'exploitation, les terrains influencés au toit des secteurs exploités se recomparent progressivement mais retrouvent rarement leurs propriétés aérauliques initiales. Ils constituent donc potentiellement des lieux privilégiés de migration de gaz de mine vers la surface.

L'étendue de la zone d'influence autour d'une extraction minière souterraine dépend de plusieurs facteurs, notamment de la géométrie des couches exploitées et des propriétés mécaniques des terrains encaissants mais aussi de la méthode et de la géométrie d'exploitation.

Dans le contexte des gisements houillers, il est proposé d'appliquer le modèle d'influence concernant des longues tailles en plateures foudroyées. Cette méthode d'exploitation a été en effet largement utilisée dans les différents bassins. De même, ce modèle d'influence, établi par le CERCHAR dans les années 1970 (Jeger et Liabeuf, 1976), a été validé, entre autres, sur plusieurs chantiers des bassins mentionnés ci-avant (Jeger, 1980 ; Pokryszka et Tauziède, 1992).

Il s'agit de l'option la plus pénalisante, car elle détermine une zone d'influence plus étendue comparativement à d'autres types d'exploitation présents dans les bassins houillers français (exploitations pentées, remblayées, chambres et piliers...).

Selon le modèle proposé, l'influence est mesurée par le taux de dégazage des veines satellites représentant indirectement le degré d'augmentation de la perméabilité du massif (cf. figure A2).

Ainsi, l'extraction d'une couche de charbon provoque une influence maximale jusqu'à 30 m en moyenne au toit (foudroyage et forte fracturation), une influence importante et uniforme dans une tranche de 30 à 120 m en moyenne du plan de la veine, puis une influence dégressive jusqu'à 170 m au toit. L'influence devient négligeable au-delà de cette dernière limite.

Il est à remarquer que les modèles similaires de la zone d'influence autour d'une exploitation de charbon ont été développés et validés dans les principaux pays charbonniers en Europe (Noack, 1970 ; Kozlowski, 1972 ; Airuni, 1981).

Dans le cas des bassins houillers français les plus importants, l'extraction du charbon avait le plus souvent un caractère très étendu horizontalement et verticalement, avec une exploitation de plusieurs couches superposées.

---

<sup>1</sup> ce qui est par exemple le cas du gisement lorrain, de celui du Nord et du Pas-de-Calais ou encore d'une partie importante du bassin stéphanais.

MODELE DE PREVISION DU DEGAGEMENT MOYEN DE CH<sub>4</sub> EN TAILLE

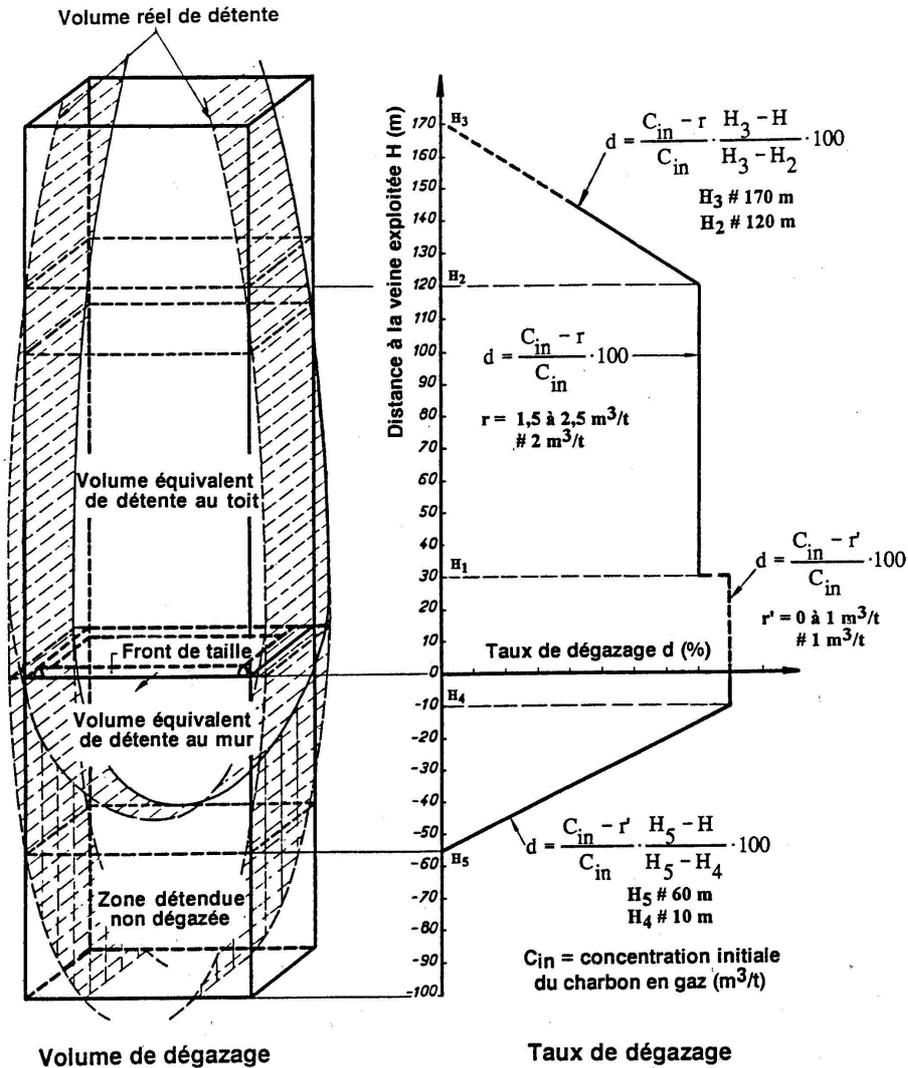


Figure A2 : Modèle de la zone d'influence autour d'un chantier d'exploitation de charbon de type longue taille en plateure foudroyée, pour les bassins houillers français (Jeger et Liabeuf, 1976, modifié Pokryszka et Tauziède, 1992)

La zone d'influence au toit de cet ensemble d'exploitation peut se trouver, par effet cumulatif, plus étendue que celle décrite ci-avant.

Ceci nous amène à proposer les limites d'influence suivantes :

- 30 à 50 m au toit des exploitations, comme étendue de l'influence directe d'une exploitation (fracturation et déplacement du massif) ;
- 150 m au toit, comme distance limitant une modification importante possible des propriétés aérauliques du massif (fracturation ou ouverture des fractures préexistantes) ;
- 200 m au toit comme enveloppe maximale limitant le volume influencé par l'exploitation (limite de la détente mécanique des terrains). Au-delà de cette distance, les terrains sont considérés comme peu ou non modifiés du point de vue de leurs propriétés aérauliques ou hydrauliques.

### **Annexe 3**

Principes d'établissement des critères de prédisposition  
à la migration de gaz de mine à travers les terrains de recouvrement,  
proposés pour les anciennes exploitations du bassin ferrifère lorrain



**Principes d'établissement des critères de prédisposition  
à la migration de gaz de mine à travers les terrains de recouvrement,  
proposés pour les anciennes exploitations du bassin ferrifère lorrain**

Le tableau A3 ci-après synthétise les critères d'évaluation de la prédisposition proposés pour le bassin ferrifère lorrain dans le cadre des études réalisées par l'INERIS pour le compte de Géoderis (Pokryszka, 2006). Il s'agit d'un gisement en plateaux ou peu penté, exploité principalement par la méthode des chambres et piliers, en une ou plusieurs couches selon le secteur. Les terrains de couverture sont composés principalement de formations marno-calcaires.

		Epaisseur de recouvrement au-dessus de la zone d'influence de l'exploitation (m)		
	Zones non dépilées	< 10	10 à 30	> 30 m
	Zones dépilées	< 20	20 à 60	> 60 m
<b>Prédisposition</b>		Très sensible à sensible	Peu sensible	Nulle

*Tableau A3. Critères d'évaluation de la prédisposition proposés pour le bassin ferrifère lorrain (Pokryszka, 2006)*

Ces critères ont été établis à partir d'une approche expérimentale consistant à mesurer les émissions gazeuses en surface à l'aplomb des zones exploitées. Les résultats obtenus ont été croisés avec une approche analytique concernant l'influence de l'exploitation sur les terrains sus-jacents (Tincelin, 1983).

Ainsi les critères définissent le niveau de la prédisposition en fonction de l'épaisseur de la frange des terrains situés au-dessus de la zone d'influence des travaux miniers, donc a priori non influencés du point de vue de leurs propriétés aérauliques. Une distinction entre les différents secteurs exploités est faite selon le taux de défrètement. Les vieux travaux miniers sont classés en deux catégories :

- **les zones non dépilées** qui correspondent aux secteurs d'exploitation partielle dans lesquels le taux de défrètement n'a pas été suffisamment important pour conduire à un effondrement (foudroyage) des terrains de recouvrement ou encore aux secteurs découpés par les galeries (tracés), mais non exploités :
- **les zones dépilées** correspondant à un chantier d'exploitation défrété à plus de 80% et les secteurs où les piliers ont été désintégrés (torpillés), entraînant la chute (foudroyage) du toit direct et la déstructuration plus ou moins importante des couches du recouvrement direct.

L'étendue verticale de la zone d'influence au toit de ces exploitations est déterminée par ailleurs par un calcul spécifique, basé sur le modèle de l'influence géomécanique établi par le passé pour ce bassin (Tincelin, 1983), avec la prise en compte du nombre de couches exploitées dans un secteur donné (Pokryszka, 2006).

La différence entre la profondeur des exploitations et l'étendue verticale de la zone d'influence permet de déduire l'épaisseur de recouvrement considéré comme non influencé, pouvant s'opposer à la migration de gaz. Cette information constitue la donnée d'entrée pour l'évaluation de la prédisposition.



## **Annexe 4**

Précisions sur la qualification de la prédisposition à la migration de gaz  
à partir des puits et des ouvrages sub-verticaux



### **Précisions sur la qualification de la prédisposition à la migration de gaz à partir des puits et des ouvrages sub-verticaux (chapitre 5.3.1).**

Dans une première phase de l'évaluation décrite dans le sous-chapitre 5.3.1.1 et dans le tableau 12 (sous-étape 1.1), tous les ouvrages sont considérés comme non ennoyés ou considérés comme tels, quelle que soit leur situation réelle ou supposée. L'influence de l'ennoyage sera prise en compte dans la phase suivante.

En fonction des caractéristiques propres à chaque ouvrage, le classement suivant est proposé :

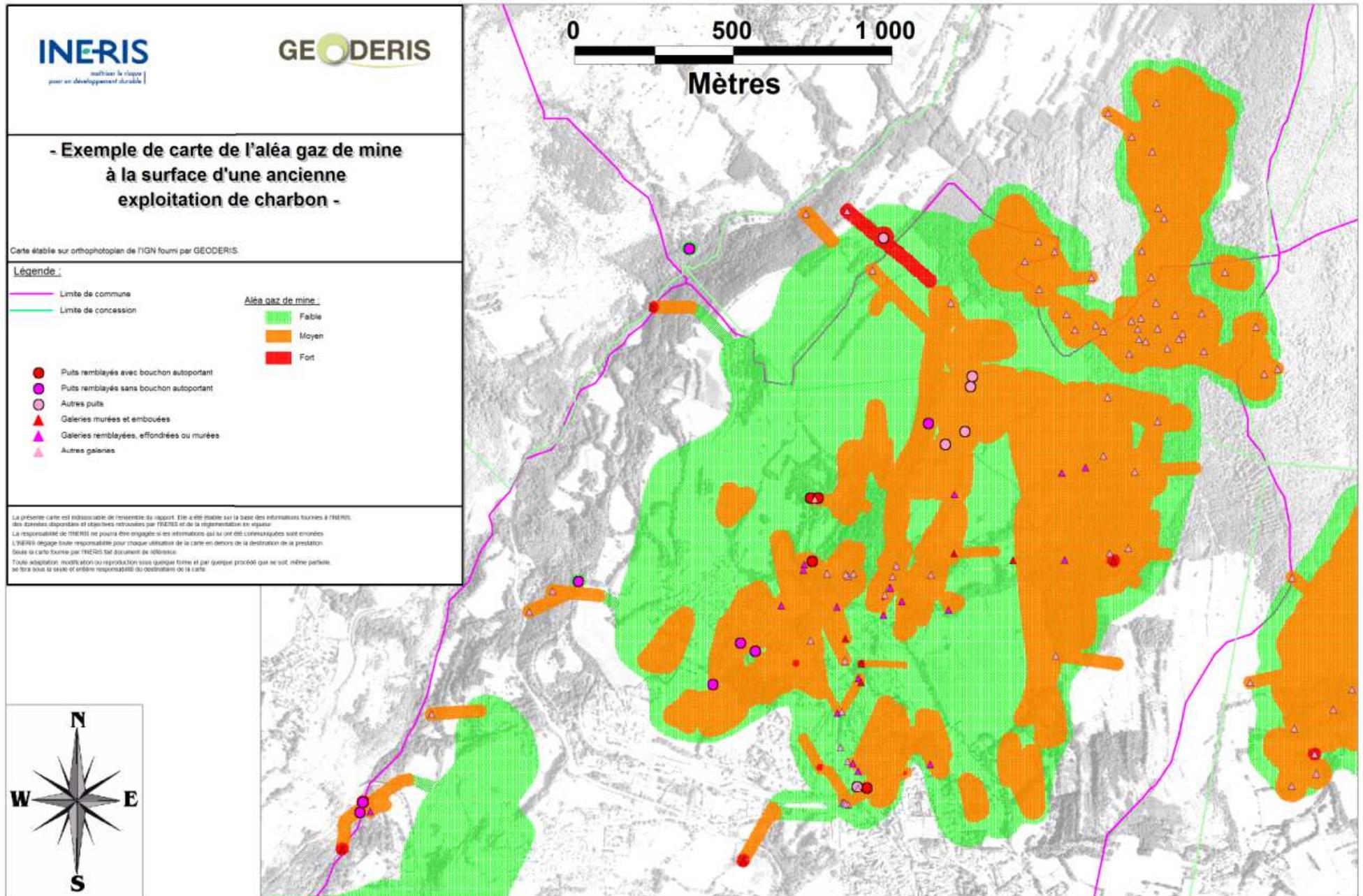
- dans la classe de **prédisposition très sensible** sont qualifiés les puits présentant une résistance négligeable à la migration de gaz, à savoir :
  - les puits vides ;
  - les puits partiellement remblayés avec une colonne de remblai au-dessus des recettes insuffisante pour créer un frein à la migration de gaz. La hauteur minimale de la colonne de remblai, mentionnée dans le tableau 12, peut être définie en fonction de la nature du matériau (si elle est connue) et de sa perméabilité potentielle. En première estimation, il est proposé de retenir 50 m comme hauteur minimale de la colonne du remblai, dans le cas le plus fréquent d'un puits remblayé avec un matériau classique de type schistes houillers (Pokryszka, 2007) ;
  - les ouvrages mentionnés ci-avant couverts d'une dalle de propreté en tête ne pouvant pas être considérée comme un bouchon et n'assurant pas un niveau d'étanchéité significative au gaz.
- dans la catégorie de **prédisposition sensible** sont qualifiés les puits présentant une certaine résistance à la migration de gaz, à savoir :
  - les puits remblayés intégralement avec un matériau perméable classique. Par principe, le remblayage d'un puits augmente de manière importante sa résistance aéraulique. Cependant une étude de l'INERIS menée sur un échantillon représentatif des puits du bassin du Nord et du Pas-de-Calais a démontré qu'un puits remblayé « moyen » présente une perméabilité équivalente relativement élevée de l'ordre de  $10^{-10}$  à  $10^{-11}$  m<sup>2</sup> (Pokryszka et Velly, 2001). Avec ce niveau de perméabilité, une migration significative de gaz est possible, même si la surpression au sein du réservoir n'est pas très importante ;
  - les puits non remblayés, fermés par un bouchon ou un serrement installé au-dessus de la recette la plus superficielle, réalisé sans précaution particulière vis-à-vis du gaz. On considère qu'un ouvrage de fermeture seul, dont la construction n'a pas été dimensionnée pour s'opposer au gaz (voir ci-après), ne constitue pas un obstacle suffisant à la migration de gaz ;
  - les puits fermés par des ouvrages initialement conçus pour être étanches, mais présentant des fuites avérées de gaz, mises en évidence par les mesures.
- dans la classe de **prédisposition peu sensible** sont retenus les puits présentant une résistance importante à la migration de gaz, car cumulant différents modes de traitement, à savoir :
  - les puits remblayés intégralement avec un matériau perméable classiquement utilisé (tout venant de terrils miniers), mais avec une étanchéité renforcée par l'intercalation de matériau à faible perméabilité (béton, cendres volantes, argile) au-dessus de la recette la plus superficielle ;

- les puits fermés au-dessus de la recette la plus superficielle par un bouchon ou un serrement non dimensionné pour s'opposer au gaz, mais avec un renforcement de l'étanchéité par un remblayage au-dessus du bouchon jusqu'à la surface ;
  - dans la catégorie de **prédisposition nulle** sont qualifiés les puits bénéficiant d'un traitement spécifique dimensionné pour éviter une migration non contrôlée de gaz, à savoir :
    - les puits fermés par un ouvrage étanche dimensionné pour s'opposer au gaz, c'est-à-dire par un bouchon ou un serrement intrinsèquement quasi-imperméable assurant une étanchéité au gaz entre l'ouvrage lui-même, le revêtement du puits et les terrains situés à l'extrados du revêtement du puits ;
    - les puits équipés d'un dispositif permettant d'éviter des émissions gazeuses en tête de l'ouvrage, en canalisant le gaz arrivant du sous-sol vers un évent sécurisé. Ce classement est possible, dans la mesure où la pérennité et le bon fonctionnement du dispositif d'évacuation de gaz sont assurés via des contrôles et entretiens adaptés.
- Il est à noter qu'une prédisposition « très sensible » liée à la présence de l'évent lui-même doit être retenue autour du point de rejet de gaz (cf. chapitre 5.3.3).

## **Annexe 5**

### **Exemple de carte d'aléa « gaz de mine »**





Annexe 5. Exemple de carte d'aléa « gaz de mine »



## **Annexe 6**

### **Exemple de mesures gazeuses en surface et sur les ouvrages**





Photos A6-1 et A6-2. Détermination au fumigène du sens d'écoulement à l'orifice d'une galerie non obturée.



Photo A6-3. Contrôle de l'atmosphère derrière un mur de soutènement à proximité d'une galerie de mine fermée.



Photo A6-4. Détermination au fumigène du sens d'écoulement à l'orifice d'un forage débouchant vers des vieux travaux miniers.

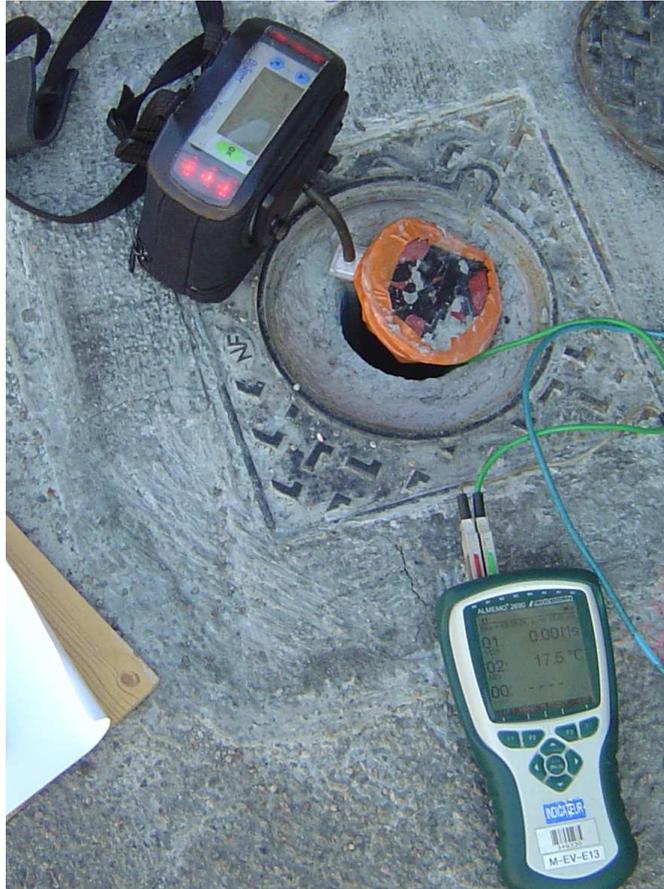


Photo A6-5. Mesure de la température et de la composition de gaz dans un forage soufflant débouchant vers des vieux travaux miniers.

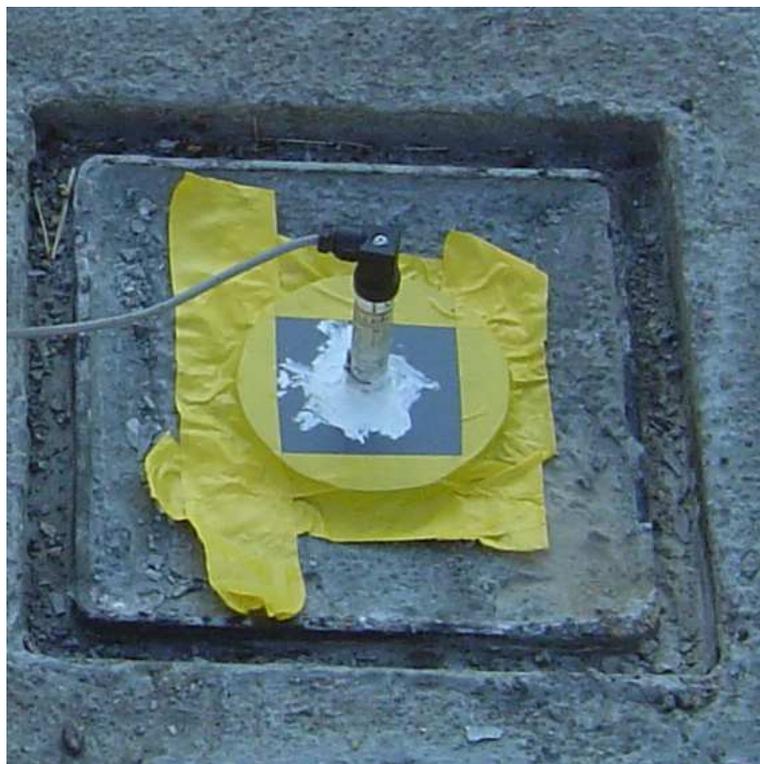


Photo A6-6. Aménagement provisoire pour mesurer la surpression en tête d'un forage soufflant débouchant vers des vieux travaux miniers.



Photo A6-7. Mesure de la surpression et de la composition de gaz en tête d'un sondage de contrôle fermé débouchant vers des vieux travaux miniers.



Photo A6-8. Mesure de la surpression dans les vieux travaux miniers via un sondage évent.



Photo A6-9. Mesure de la composition des gaz dans le sol via un petit forage tubé.



Photo A6-10. Mesure du flux gazeux du sol avec une chambre à accumulation.



Photo A6-11. Contrôle de la présence de gaz de mine au droit des crevasses dans la dalle du sol et dans les murs des locaux affectés par des dégâts miniers.



Photo A6-12. Contrôle de la présence de gaz de mine dans un réseau enterré situé dans le secteur d'une ancienne exploitation souterraine de charbon

## **Annexe 7**

### **Exemples d'aménagement des ouvrages et d'instrumentation des sites post-miniers destinés à des mesures gazeuses continues prolongées**



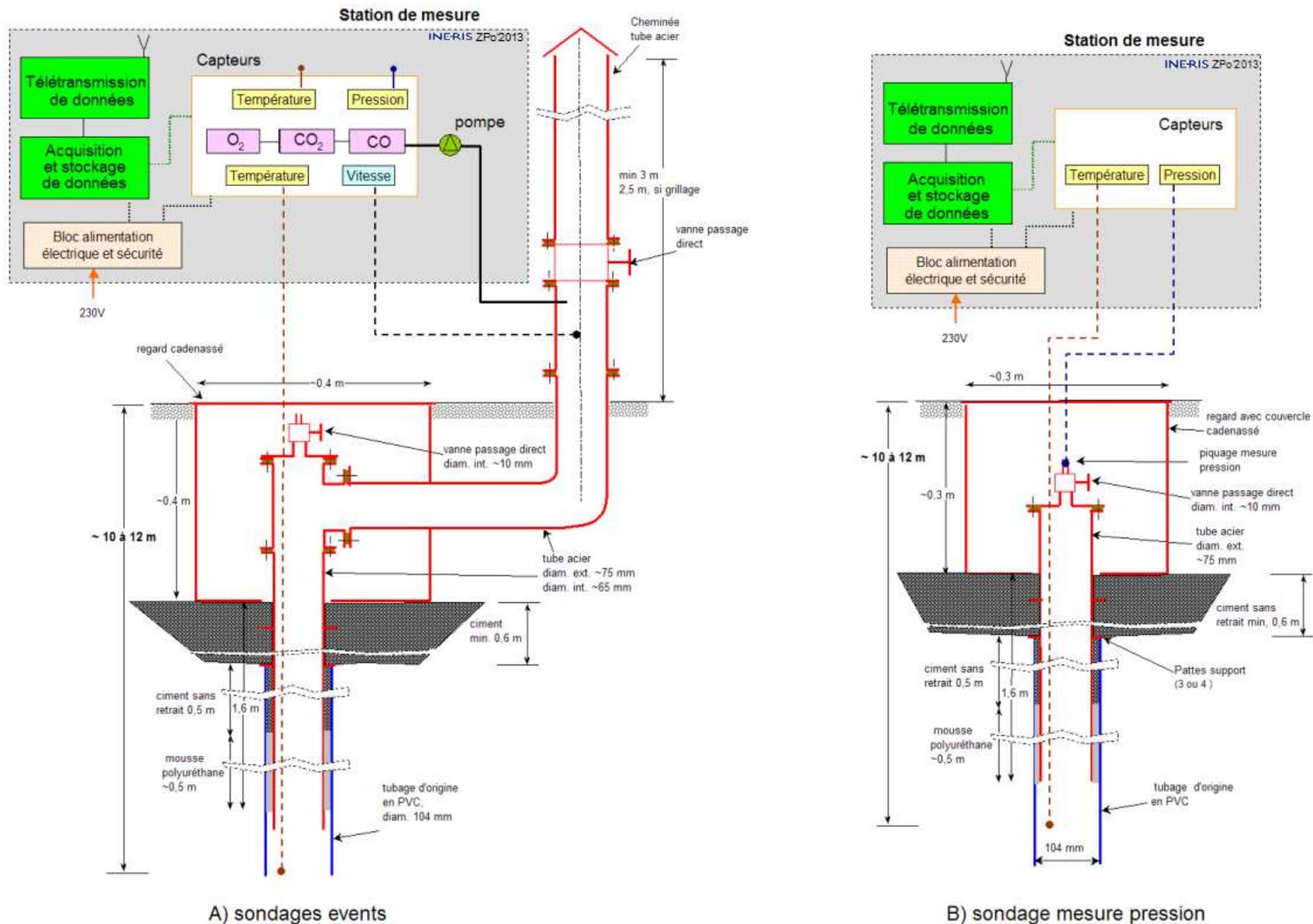


Figure A7. Exemple de plan d'aménagement des forages pour les mesures gazeuses et principe de construction des stations de mesure en continu



Photo A7-1. Tête de sondage fermée, équipé d'un piquage pour les mesures gazeuses.



Photo A7-2. Tête de sondage avec une dérivation vers un évent, équipé d'un piquage pour les mesures gazeuses.



Photos A7-3 et A7-4. Event et station de mesure en continu des paramètres gazeux sur un sondage de contrôle débouchant vers un réservoir post-minier non ennoyé.



Photo A7-5. Tête d'un sondage fermé instrumenté pour les mesures en continu de pression différentielle et de température dans les vides post miniers.



Photo A7-6. Exemple de station de mesure en continu des paramètres gazeux.



Photo A7-7. Instrumentation pour les mesures gazeuses en continu sur un événement de décompression installé en tête d'un puits dans une mine de charbon fermée.



Photo A7-8. Instrumentation simplifiée pour les mesures en continu de la pression différentielle en tête d'un puits.