

RAPPORT D'ÉTUDE
DRS-06-75685/R01

25/08/2006

**Synthèse des études et travaux menés dans le
contexte du bassin ferrifère lorrain**

Programme EAT-DRS-03

INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable |

Synthèse des études et travaux menés dans le contexte du bassin ferrifère lorrain

Programme EAT-DRS-03

Direction des Risques du Sol et du Sous-Sol

MINEFI

Liste des personnes ayant participé à l'étude :

Katia Besnard, ingénieur à l'Unité Evaluation des Risques liés aux Emissions de Gaz de la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol

Gloria SENFAUTE, chargée de mission Recherches à la Direction Scientifique

Alain THORAVAL, ingénieur à l'unité Risques Naturels, Ouvrages et Stockages 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
NOM	R. SALMON	M. GHOREYCHI	C. DIDIER
Qualité	Ingénieur à l'unité Risques Géotechniques liés à l'Exploitation du sous-sol de la Direction des Risques du Sol et du Sous-Sol	Directeur des Risques du Sol et du Sous-sol	Directeur adjoint de la Direction des Risques du Sol et du Sous-Sol
Visa			

TABLE DES MATIÈRES

1. RESUME.....	7
2. INTRODUCTION	9
3. PRÉSENTATION DU BASSIN FERRIFÈRE LORRAIN.....	11
3.1 Coupe Sud-Ouest / Nord-Est du bassin ferrifère lorrain	12
3.2 Coupe de la formation ferrifère.....	13
3.3 Production du minerai de fer lorrain	13
3.4 Schémas des premières exploitations (XIX ^{ème} siècle).....	14
3.5 Exploitation par dépilage	14
3.6 Exploitations par chambres et piliers.....	15
4. LES PHÉNOMÈNES DE MOUVEMENT DE TERRAIN REDOUTÉS EN SURFACE ET LEURS CONDITIONS D'APPARITION.....	17
4.1 Typologie.....	17
4.1.1 Le fontis	17
4.1.2 L'affaissement progressif.....	18
4.1.3 L'effondrement brutal.....	19
4.2 Conditions d'apparition d'un fontis, d'un affaissement et d'un effondrement (méthodes et outils développés dans le cadre du programme EAT DRS03).....	20
4.2.1 Conditions d'apparition d'un fontis (outils développés)	20
4.2.2 Conditions d'apparition d'un affaissement/effondrement	23
4.2.2.1 Evaluation des caractéristiques de résistance des terrains : en laboratoire (essais) et in-situ (mesure dilatométrique).....	23
4.2.2.2 Evaluation des sollicitations auxquelles sont soumis les anciens travaux (mesure de contrainte) et analyse des facteurs aggravants (mauvaise superposition de piliers, effet du dépilage).....	25
4.2.2.3 Retour d'expérience sur des effondrements passés	26
4.2.2.4 Prédiction des affaissements induits par l'effondrement des anciens travaux.....	27
4.2.2.5 Cinétique des instabilités (affaissement souple ou effondrement brutal) 27	
4.3 Résultats : conditions d'apparition des différents phénomènes.....	29
5. QUELS SONT LA NATURE, L'ORIGINE ET LES MÉCANISMES DU RISQUE D'ÉMISSION DE GAZ ?	31
5.1 Identification des réservoirs d'air dans le bassin de Briey-Longwy.....	31

5.2	Nature du gaz dans les réservoirs d'air de mine	33
5.2.1	Mesures effectuées	33
5.2.2	Nature du gaz dans les réservoirs de Moyeuivre-Grande et ses voisins ..	33
5.2.3	Nature du gaz dans les réservoirs de Lexy, Mexy et Godbrange	34
5.2.4	Nature du gaz dans les autres réservoirs	34
5.3	Origine de la production d'air vicié	34
5.3.1	Site expérimental de Tressange	34
5.3.2	Expériences complémentaires en laboratoire	36
5.3.3	Résultats.....	37
5.4	Mécanismes de circulation des gaz.....	38
5.4.1	Expérimentation au gaz traceur.....	38
5.4.2	Mesures en continu de paramètres météorologiques et aérauliques.....	39
5.4.3	Résultats.....	39
5.5	Risques associés aux émanations de gaz dans le Bassin Ferrifère lorrain.	40
5.6	Cas particulier du radon	41
5.6.1	Mesures effectuées sur le bassin ferrifère lorrain	42
5.6.1.1	Mesures ponctuelles	42
5.6.1.2	Mesures en continu sur un an dans deux habitations et une galerie de mine	43
5.6.2	Suivi dans deux galeries du réservoir de Moyeuivre-Grande depuis avril 2000.....	44
5.7	Bilan des risques liés au radon dans le contexte étudié.....	44
6.	IMPACT DE L'ENNOYAGE SUR LA STABILITÉ DES OUVRAGES MINIERS ET SUR LES ÉMISSIONS DE GAZ.....	47
6.1	Caractérisation en laboratoire des effets de l'eau	47
6.2	Apport des expérimentations in situ (Tressange) : mesure de déplacements, tomographie, surveillance microsismique.....	48
6.3	Retour d'expérience sur des effondrements passés	51
6.4	Modélisation de l'expérimentation de Tressange et prédiction des effets d'un ennoyage réel	52
6.5	Impact de l'ennoyage	54
7.	MÉTHODE D'ÉVALUATION ET DE GESTION DU RISQUE « MOUVEMENT DE TERRAIN » DANS LE BASSIN FERRIFÈRE LORRAIN	55
7.1	Problématique	55
7.2	Méthode développée.....	55
7.3	Résultats	57

8. SURVEILLANCE DES RISQUES D'EFFONDREMENT DANS LE BASSIN FERRIFÈRE LORRAIN	59
8.1 Positionnement du problème.....	59
8.2 Etudes de qualification / validation de la méthode microsismique.....	60
8.2.1 Approches expérimentales	61
8.2.2 Approches application / études.....	61
9. CONCLUSION.....	65
10. BIBLIOGRAPHIE	67
11. LISTE DES ANNEXES	69

1. RESUME

A la demande de la DARQSI, l'INERIS a rédigé un document de synthèse à partir de l'ensemble des travaux menés par l'INERIS dans le cadre du programme EAT-DRS03 depuis l'origine. Ce document se fixe pour objectif d'être opérationnel et compréhensible par les services et parties concernés par l'après-mine, notamment dans le bassin ferrifère lorrain (contexte qui a motivé l'essentiel de ce programme) ou éventuellement dans d'autres bassins.

Etant donné l'importance de l'ennoyage dans le contexte de l'après-mine, notamment dans le bassin ferrifère lorrain, un chapitre important de ce document est consacré à la synthèse de l'expérimentation de l'ennoyage partiel, réalisée dans le stot de Tressange appartenant aux mines de fer de Lorraine. Cette expérimentation de grande ampleur fut effectuée dans le cadre du Groupement GISOS avec la participation de l'INERIS, du BRGM et de l'INPL. Elle avait pour objectif d'étudier, d'une part, l'action de l'eau sur le comportement et les propriétés mécaniques du minerai de fer et des intercalaires et, d'autre part, l'impact de l'ennoyage sur la qualité des eaux souterraines et plus généralement la composition de fluides (eau et gaz).

Dans ce but, grâce au soutien financier de la Région Lorraine accordé au GISOS pour son besoin d'équipement, de nombreux instruments de mesure géotechniques, géophysiques, hydrauliques et de gaz ont été placés sur le site pour l'auscultation et la surveillance de celui-ci aussi bien avant et pendant l'ennoyage qu'après le dénoyage.

En dehors de résultats scientifiques significatifs obtenus dans le cadre de cette expérimentation, des enseignements opérationnels et pratiques se dégagent de cette expérience, dans l'optique de l'ennoyage futur du bassin ferrifère lorrain et plus généralement, dans le contexte de la fermeture d'autres exploitations minières. C'est en particulier à ce type d'enseignements que s'attache le document de synthèse.

En plus de l'expérience pilote de Tressange, le document synthétise les outils méthodologiques, les modèles et les données rassemblés, développés ou employés dans le cadre de ce programme. En reportant les aspects techniques en annexe, nous avons veillé à expliquer, d'une manière simple, l'objectif, l'intérêt, le champ d'application et les limitations de chaque outil (méthodologie, technique de surveillance ou d'auscultation, code de calcul, loi de comportement, données...).

Parmi les méthodologies développées dans le cadre de ce programme, figure la méthode d'analyse et de hiérarchisation des zones à risque d'effondrement au-dessus des exploitations partielles des anciennes mines de fer de Lorraine. Développée et mise en œuvre régulièrement par l'INERIS et GEODERIS, cette méthode est basée sur une analyse multicritère du type ELECTRE III et/ou ELECTRE Tri, mettant en œuvre une dizaine de critères pondérés.

Un autre aspect développé dans le cadre de ce programme concerne les mécanismes d'émissions gazeuses et l'évaluation et la maîtrise des risques associés.

Enfin, les travaux de recherche et développement réalisés dans le cadre de ce programme ont permis de mettre au point les techniques de surveillance notamment microsismiques, mises en œuvre aujourd'hui dans de nombreuses

zones du bassin ferrifère ainsi que dans d'autres sites d'anciennes exploitations minières (CdF à Gardanne, mine de sel d'Einville...).

Les résultats majeurs, les méthodes et les outils relatifs à tous ces aspects sont présentés brièvement dans le rapport de synthèse. Pour être clair et compréhensible, une présentation synthétique indiquant les objectifs, les moyens et les conclusions des différentes opérations a été privilégiée.

Les interrogations sur les aspects majeurs et les perspectives en R&D sont également présentées. Le document se termine par une conclusion générale et des recommandations dans le contexte du bassin ferrifère lorrain et plus généralement dans celui de l'après-mine.

2. INTRODUCTION

Le programme EAT-DRS-03 d'appui technique de l'INERIS au Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie (MinEFI) est motivé par la problématique de l'après-mine. Il a pour objectif de mettre au point des méthodes et moyens destinés à la prévention et la gestion des risques liés à l'abandon des exploitations minières, vis-à-vis de la sécurité des personnes et des biens et de la protection de l'environnement.

Les affaissements miniers survenus ces dix dernières années dans le bassin ferrifère lorrain (Auboué 1996, Moutiers 1997, Moyeuvre-Grande 1998, Roncourt 1999), longtemps après l'arrêt définitif des travaux d'extraction, ont conduit à une prise de conscience de la gravité des problèmes liés à la phase de post-abandon des exploitations minières. Cette prise de conscience a conduit, il y a quelques années, à la création par l'INERIS, le BRGM et l'INPL du GISOS : Groupement d'Intérêt Scientifique de recherche sur l'impact et la sécurité des Ouvrages Souterrains. Ce groupement auquel s'est ensuite associée l'Ecole des Mines de Paris, fédère les recherches et développements visant à répondre aux problèmes de la sécurité publique et de l'aménagement du territoire, dans le contexte des sites d'exploitations minières abandonnées. La participation de l'INERIS aux recherches réalisées au sein du GISOS est assurée dans le cadre de ce programme.

Après une courte présentation du bassin ferrifère lorrain, la présente synthèse s'articule autour des questions principales soulevées par la problématique de l'après-mine, notamment dans le contexte du bassin ferrifère lorrain :

- Quels sont les types de mouvements de terrains susceptibles d'affecter la surface, au droit des anciens travaux miniers, et quelles sont leurs conditions d'apparition respectives ?
- Quel est l'impact de l'ennoyage sur la stabilité des ouvrages miniers et sur le risque d'émission de gaz ?
- Quelle méthode doit être mise en place pour évaluer et gérer le risque « mouvements de terrain », dans le bassin ferrifère lorrain ?
- Quels outils de surveillance des risques d'effondrement sont adaptés au contexte du bassin ferrifère lorrain ?
- Quels sont la nature, l'origine et les mécanismes du risque d'émission de gaz de mine ?

3. PRÉSENTATION DU BASSIN FERRIFÈRE LORRAIN

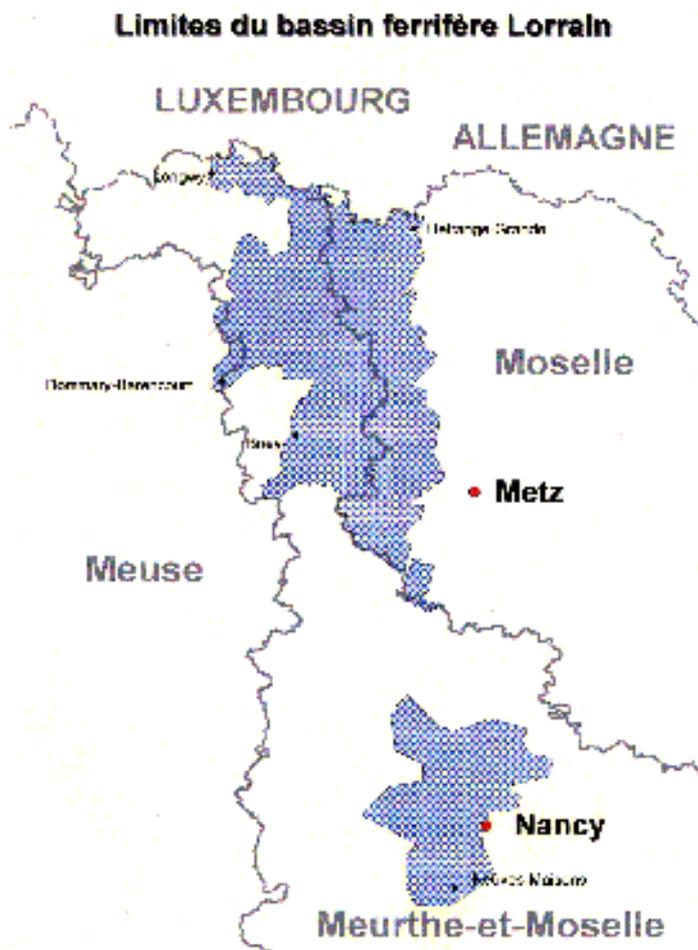


Figure 1 : Limites du bassin ferrifère lorrain.

Le bassin ferrifère lorrain s'étend sur 120 km de long, entre la frontière luxembourgeoise au Nord et la commune de Neufes-Maisons au Sud de Nancy, et sur 30 km de large entre Hettange-Grande à l'Est et Dommary Barancourt à l'Ouest.

Il est divisé en deux parties principales (Figure 1) :

- le bassin de Briey-Longwy au Nord, couvrant 1300 km² ;
- le bassin de Nancy au Sud, couvrant 380 km².

3.1 COUPE SUD-OUEST / NORD-EST DU BASSIN FERRIFÈRE LORRAIN

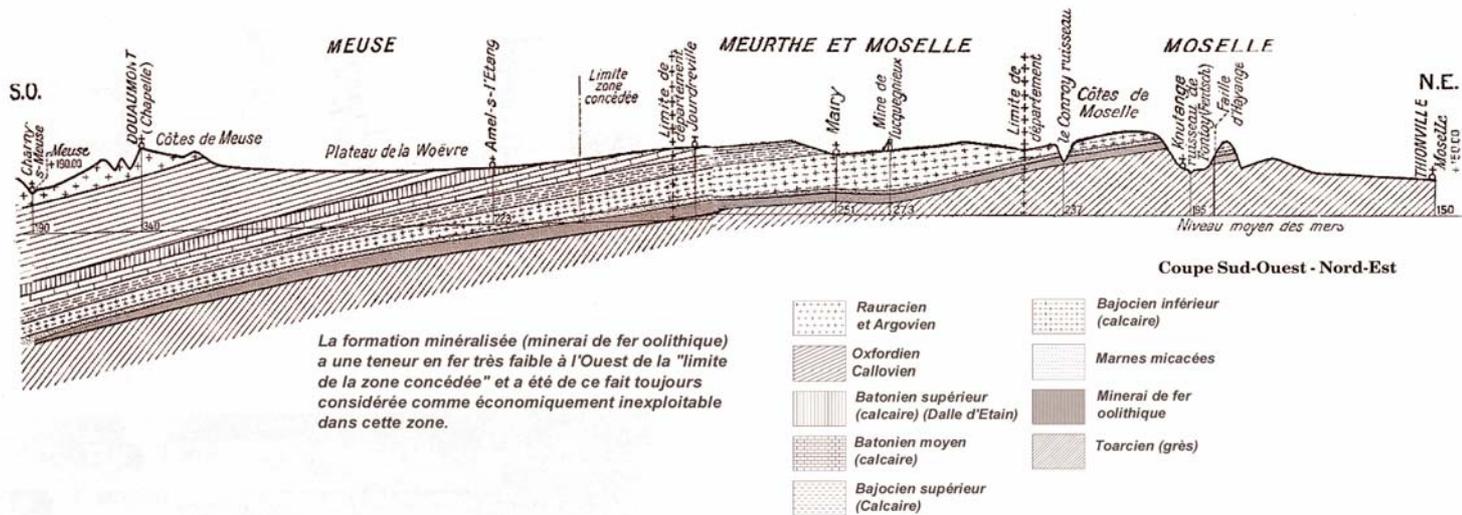


Figure 2 : Coupe sud-ouest / nord-est du bassin ferrifère lorrain

Le gisement de fer affleure au nord dans les vallées de la Chiers et de l'Alzette et à l'est dans les vallées de la Fensch et de l'Orne. Il s'enfonce avec un pendage de l'ordre de 3 % vers l'ouest. La mine d'Amermont-Dommary située à l'ouest près de Dommary-Barancourt était la plus profonde car exploitée à une profondeur de 260 m.

3.2 COUPE DE LA FORMATION FERRIFÈRE

Le gisement de fer d'âge aalénien a une épaisseur variant de quelques mètres seulement à près d'une soixantaine de mètres. Il est composé d'une alternance d'horizons plus riches en fer (30 à 35 %) appelés couches et d'horizons moins riches, appelés intercalaires.

On retrouve, sur l'ensemble du gisement, les différentes couches désignées par une couleur mais avec des teneurs et des épaisseurs très variables. Selon les mines, une ou plusieurs couches (jusqu'à 6) ont été exploitées au même endroit.

3.3 PRODUCTION DU MINERAI DE FER LORRAIN

Du gisement lorrain, ont été extraites plus de 3 milliards de tonnes de minerai. Si des vestiges attestent d'une exploitation dès le haut Moyen-Age, l'exploitation industrielle ne commence qu'après l'invention, en 1877, du procédé Thomas Gilchrist qui permet de déphosphorer la minette lorraine.

La production annuelle augmente alors malgré les chutes de production et de productivité liées aux événements mondiaux pour atteindre un maximum de près de 63 millions de tonnes en 1960. La production baisse ensuite du fait de la concurrence des minerais riches importés et de l'évolution de la sidérurgie. La dernière mine, celle des Terres Rouges, exploitée par la société luxembourgeoise ARBED, a arrêté sa production en juillet 1997.

3.4 SCHÉMAS DES PREMIÈRES EXPLOITATIONS (XIX^{ÈME} SIÈCLE)

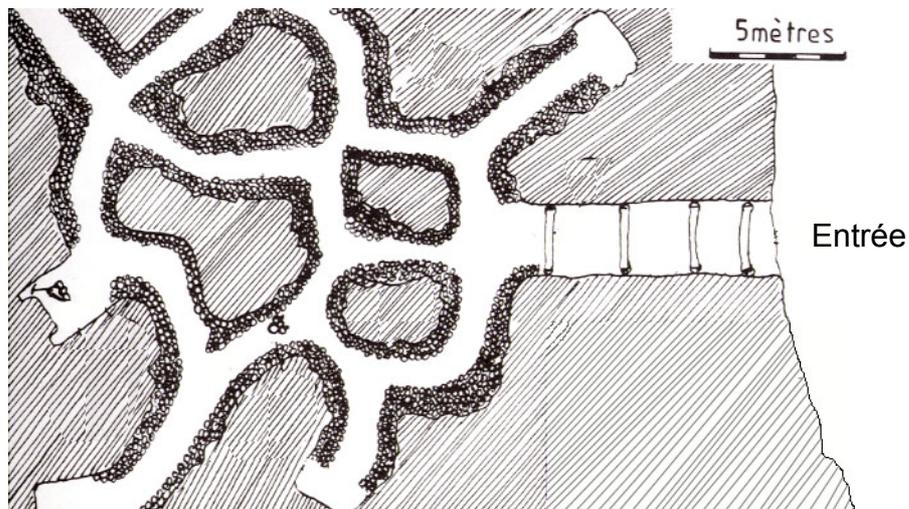


Figure 3 : Schéma d'une ancienne exploitation

Les premières exploitations étaient menées à partir de l'affleurement de la couche en s'enfonçant progressivement et en laissant des piliers de soutien, de forme et de taille très diverses. Les galeries sont partiellement remblayées avec des blocs de stérile empilés pour soutenir le toit.

Ces travaux miniers sont généralement mal connus du fait de leur caractère artisanal et de leur ancienneté.

3.5 EXPLOITATION PAR DÉPILAGE

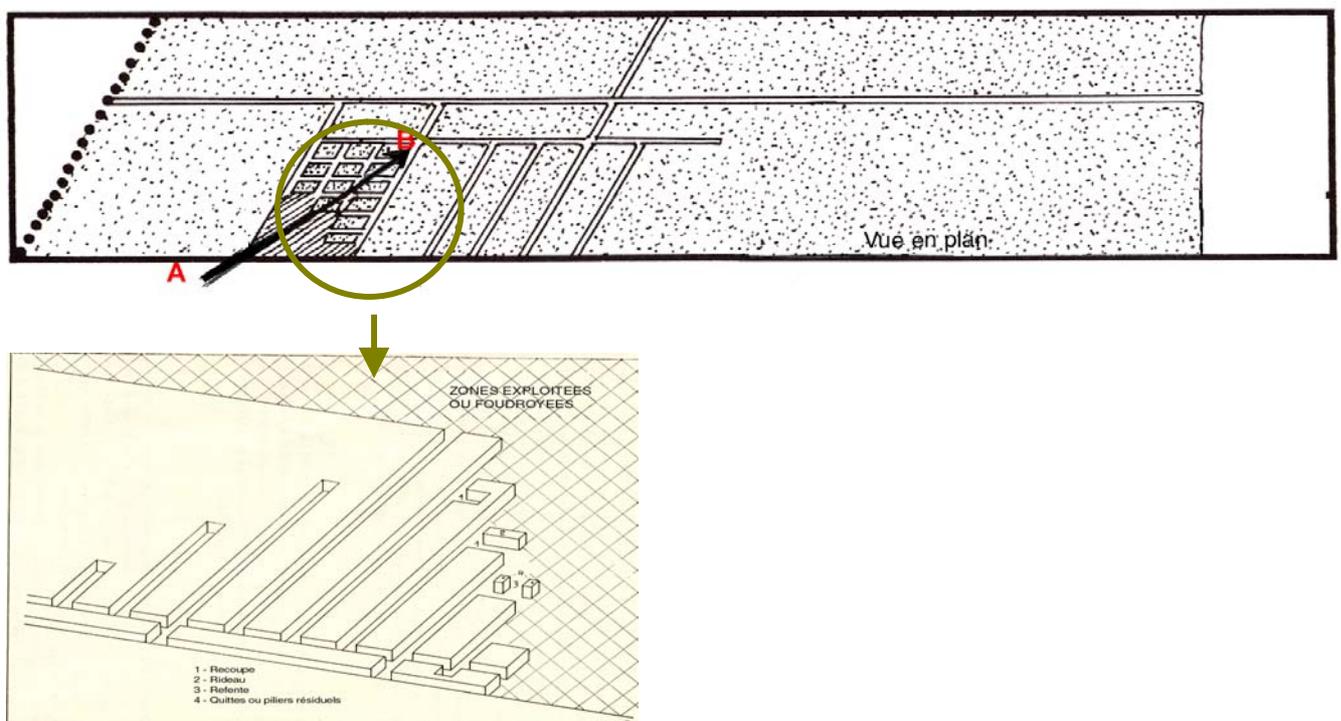


Figure 4 : Schéma d'exploitation par dépilage

Après la première guerre mondiale, les méthodes d'exploitation modernes peuvent être classées en 2 catégories selon qu'elles laissent ou non subsister des vides souterrains importants.

Les exploitations par dépilage intégral consistent à découper le gisement en panneaux, à partir des voies d'infrastructure. Dans les panneaux sont tracées des chambres, de l'ordre de 5 m de large, découpant des piliers longs de 15 à 20 m.

Ces piliers sont repris dans l'opération de dépilage pour ne laisser subsister que des "quilles". Ces piliers résiduels sont finalement abattus à l'explosif (torpillage) pour faire effondrer le toit immédiat de la couche.

La hauteur des terrains foudroyés au toit est de l'ordre de 2 fois l'ouverture de la couche exploitée. Au-dessus, les terrains fléchissent et viennent s'appuyer progressivement sur le foudroyage. L'affaissement remonte jusqu'en surface où apparaît une cuvette dont la surface est plus importante que celle du panneau dépilé au fond.

Dans les cinq ans qui suivent l'arrêt de l'exploitation à l'aplomb de la zone considérée, les terrains se compactent naturellement et on n'observe plus d'affaissement en surface discernable des mouvements naturels de la surface du sol.

3.6 EXPLOITATIONS PAR CHAMBRES ET PILIERS

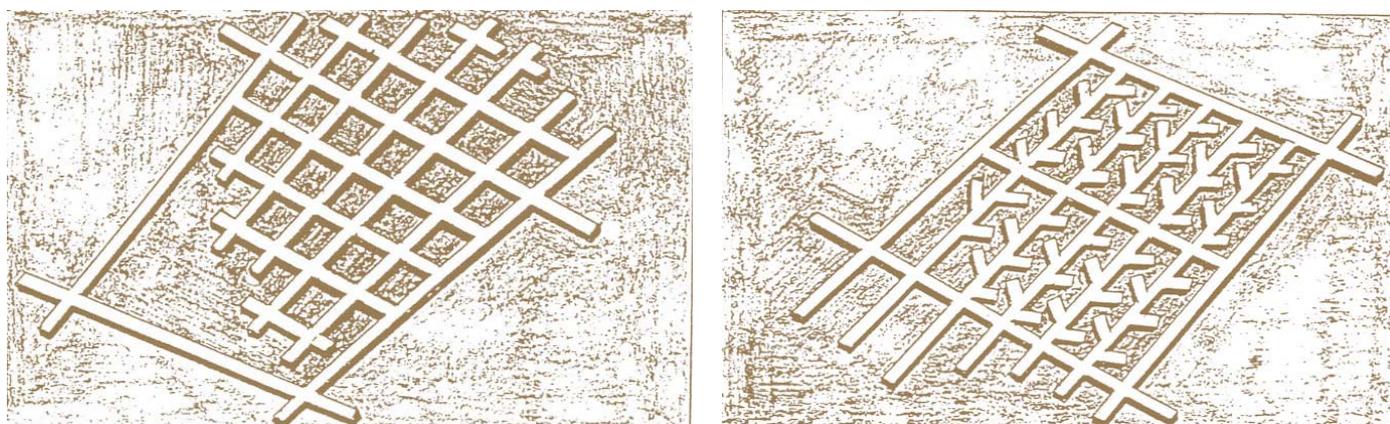


Figure 5 : Exploitation par chambres et piliers carrés (à gauche) et en épis (à droite)

Les méthodes d'exploitation par chambres et piliers abandonnés laissent subsister des vides souterrains après l'arrêt de l'exploitation. Les panneaux sont découpés par des chambres de largeur comprise entre 4 et 7 m. Les piliers sont de forme variable (carrée, rectangulaire, trapézoïdale). Leur hauteur, égale à l'ouverture de la couche exploitée, est comprise entre 3 et 7 m (exceptionnellement 8 m) et leur largeur varie de 10 à 25 m (exceptionnellement 5 m dans les anciennes exploitations proches de la surface).

Dans le cas d'élargissement, les galeries peuvent atteindre 8 m de large et les largeurs de pilier sont réduites.

4. LES PHÉNOMÈNES DE MOUVEMENT DE TERRAIN REDOUTÉS EN SURFACE ET LEURS CONDITIONS D'APPARITION

4.1 TYPOLOGIE

Plusieurs types d'effets en surface ont déjà été ressentis ou peuvent encore se manifester à la suite de la ruine d'édifices souterrains dans les mines de fer de Lorraine.

4.1.1 LE FONTIS

Le fontis est l'apparition soudaine en surface d'un entonnoir de quelques mètres de rayon et quelques mètres de profondeur. Les dimensions du fontis dépendent de l'importance du vide et de la nature des terrains qui le séparent de la surface. Ce phénomène a affecté, par exemple, les communes de Moyeuvre-Grande (cité Curel) et d'Hussigny-Godbrange (abords de la route de la décharge).

Le fontis fait suite à une dégradation progressive de la voûte d'une galerie qui remonte peu à peu dans le recouvrement jusqu'à percer au jour.

Le fontis ne se produira pas si la galerie est suffisamment profonde car le foisonnement des blocs du toit vient combler le vide avant qu'il n'atteigne la surface. Le risque de fontis peut également être écarté si un banc épais et résistant arrête la dégradation progressive.

Dans les conditions du bassin ferrifère lorrain, les fontis ne peuvent pas apparaître pour des vides de profondeur supérieure à 50 m hormis contexte particulier (hauteurs de vides très importantes, superposition de plusieurs niveaux de vides). Dans certains cas, une étude particulière de la zone peut conclure à une hauteur limite plus faible (présence de bancs massifs par exemple).

Si le développement d'une montée de voûte est un phénomène très lent qui peut prendre plusieurs années ou décennies, l'apparition du fontis en surface se fait, quant à elle, de manière soudaine, ce qui rend le phénomène potentiellement dangereux pour les personnes et les biens situés dans son emprise.

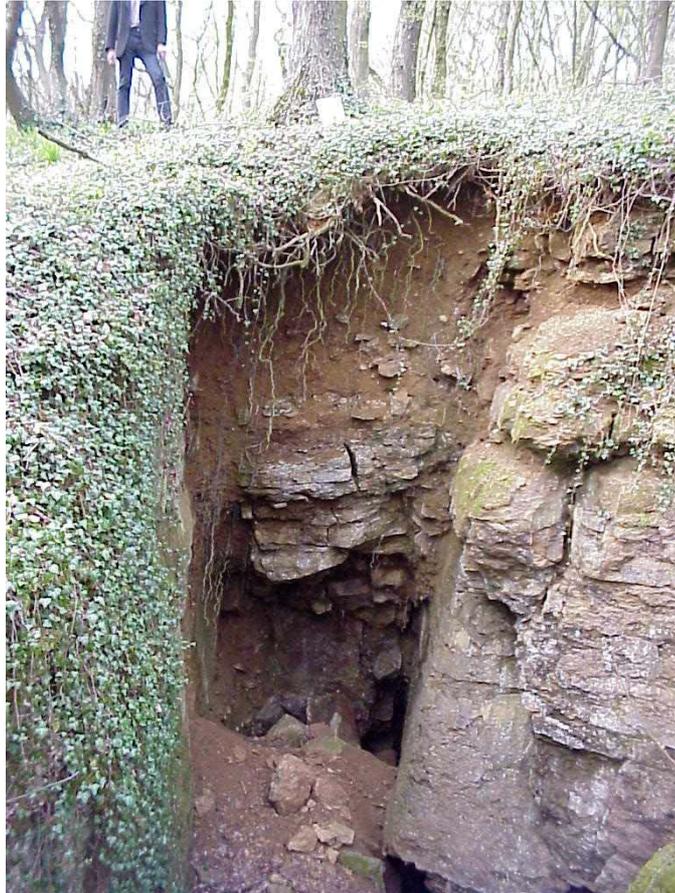


Figure 6 : Fontis à Hayange. Source GEODERIS (2000)

4.1.2 L'AFFAISSEMENT PROGRESSIF

L'affaissement est un autre type d'instabilité pouvant survenir au-dessus d'une exploitation minière. Il se traduit par la formation en surface d'une cuvette de quelques dizaines à quelques centaines de mètres de diamètre. Au centre de la cuvette, les terrains descendent verticalement. Sur les bords, les terrains se mettent en pente avec un étirement sur les bords extérieurs (ouverture de fractures) et un raccourcissement sur les bords intérieurs (apparition de bourrelets).

Ce phénomène a affecté, par exemple, les communes d'Auboué, Moutiers et Roncourt.

L'affaissement de surface est analogue à celui qui est volontairement produit par un dépilage intégral. Il fait suite à la ruine de travaux miniers souterrains suffisamment étendus pour que les effets remontent jusqu'en surface.

Les bords de la cuvette d'affaissement débordent la verticale des travaux effondrés au fond. L'angle d'influence¹ varie entre 10° et 35° selon l'environnement de la zone au fond. Plus les travaux sont profonds, plus la cuvette d'affaissement est étendue (voir chapitre 4.2.2).

L'affaissement de la surface se produit généralement progressivement en quelques jours ou en quelques mois selon une dynamique propre au contexte minier et géologique.

Les bâtiments en surface sont affectés par la mise en pente des terrains ainsi que par les effets d'extension dans la zone d'étirement et de compression dans la zone de raccourcissement.

Les effets sont d'autant plus élevés que l'amplitude de l'affaissement au centre de la cuvette et la pente de la déformation horizontale sur les bords de cuvette sont grandes.

En général, les bâtiments sont d'autant plus vulnérables qu'ils sont longs et élancés.

4.1.3 L'EFFONDREMENT BRUTAL

Dans certains cas, la ruine de l'édifice minier ne se fait pas progressivement mais on observe l'effondrement en bloc de l'ensemble des terrains compris entre le fond et la surface. L'effondrement de la surface se produit alors de manière soudaine et brutale, en quelques secondes. Une secousse sismique est ressentie. Les bords de la zone affectée sont plus abrupts que dans le cas de la cuvette d'affaissement, des crevasses ouvertes y apparaissent.

Les affaissements et effondrements qui ont affecté le bassin ferrifère lorrain sont recensés dans le tableau 1. Leur rétro-analyse a fait l'objet d'études approfondies (Al Heib & Kouniali, 2001, « Prévision des conséquences des affaissements miniers dans les mines de fer de Lorraine. Evaluation du type d'effondrement sur 21 zones hiérarchisées du bassin ferrifère lorrain » et Al Heib, 2002, « Prévision des conséquences des affaissements miniers dans le bassin ferrifère lorrain. Etude méthodologique pour la prévision de la cuvette d'affaissement »).

¹ On appelle « angle d'influence », l'angle défini entre la verticale et la droite joignant la bordure souterraine de l'exploitation et la limite extérieure de la cuvette d'affaissement en surface. En fonction de la nature et de l'épaisseur des terrains constituant le recouvrement, l'angle d'influence varie classiquement entre une dizaine et une quarantaine de degrés en plateau.

N°	Concession	Site / Mine	Type de phénomène
1	Joeuf	Joeuf	Affaissement après dépilage
2	De Wendel (156)	Moyeuivre	Affaissement après dépilage
3	Moutiers	Moutiers	Affaissement dû au dépilage en 2e couche (grise)
4	Joudreville	Joudreville	Affaissement après dépilage
5	Hettange-Grande	Hettange-Grande	Affaissement après dépilage
6	François	Pierreuse	Affaissement dû au dépilage en deuxième couche (Brune)
7	Montrouge	CD15	Affaissement dû au dépilage en première et deuxième couches
8	Auboué - Moineville	Cité de Gorcy	Affaissement dû au dépilage en deuxième couche (grise)
9	Piennes	Piennes	Affaissement après dépilage
10	Saint-Pierremont	Saint-Pierremont	Affaissement après dépilage
11	Droitaumont	Jarny	Affaissement
12	Aumetz	Errouville	Affaissement
13	Auboué - Moineville	Cité de Coinville	Affaissement
14	Auboué - Moineville	Rue de Metz	Affaissement
15	Auboué - Moineville	Moutiers haut	Affaissement
16	Roncourt	Cité St-Joseph	Affaissement
17	Sainte-Marie aux Chênes	Ida	Effondrement brutal
18	Rochonvillers	Rochonvillers	Effondrement brutal

Tableau 1 : 18 cas d'affaissement et d'effondrement dans le bassin ferrifère lorrain

Les rétro-analyses menées sur ces cas d'affaissement ou d'effondrement ont permis d'identifier les mécanismes et les risques « mouvements de terrain » dans le bassin ferrifère lorrain.

4.2 CONDITIONS D'APPARITION D'UN FONTIS, D'UN AFFAISSEMENT ET D'UN EFFONDREMENT (MÉTHODES ET OUTILS DÉVELOPPÉS DANS LE CADRE DU PROGRAMME EAT DRS03)

4.2.1 CONDITIONS D'APPARITION D'UN FONTIS (OUTILS DÉVELOPPÉS)

Dans une première approche rapide, toutes les zones comportant des travaux souterrains situés à moins de 50 de profondeur, ont été considérées comme susceptibles de présenter un aléa fontis.

Dans le cadre de ses activités d'appui technique aux Pouvoirs Publics, l'INERIS a développé une modélisation analytique du phénomène de remontée de fontis en surface, basée sur une approche volumétrique en trois dimensions pour le développement d'un cône d'éboulis (outil sous format Excel). Celle-ci est

employée afin d'affiner le zonage du risque fontis à l'intérieur des zones de travaux à moins de 50 m.

Le calcul est établi avec les notations suivantes :

- a : largeur de galerie ;
- H_G : hauteur de galerie;
- h_r : hauteur du remblayage partiel ;
- β : angle des piliers avec la verticale (cas de galeries trapézoïdales) ;
- r : rayon de chute de toit initiant la montée de voûte ;
- α et f : respectivement angle de dépôt et coefficient de foisonnement des éboulis.

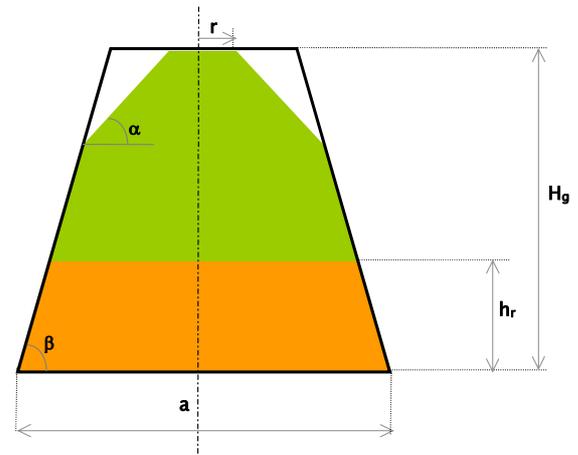


Figure 7 : Notations du modèle d'évaluation de la hauteur de remontée prévisible d'un fontis

On considèrera, dans ce qui suit, une exploitation souterraine menée par chambres et piliers abandonnés². A un carrefour de galerie, une chute de toit que l'on supposera circulaire se développe progressivement sous forme d'une montée de voûte. Nous prendrons l'hypothèse qu'aucun banc rocheux, présent au sein du recouvrement, n'est susceptible de bloquer le mécanisme dans sa propagation vers la surface. D'autres approches sont développées parallèlement pour intégrer ce mécanisme [Abbass, 2003].

Les éboulis se répandent dans la galerie, en formant un tas qu'on assimilera à un cône dont la taille augmente progressivement. En fonction de la géométrie de l'exploitation, ce cône peut, dans certains cas, intercepter les angles des piliers adjacents ; il convient d'intégrer ce paramètre dans le calcul. Pour qu'un phénomène d'auto-comblement soit possible, il faut déjà que les matériaux éboulés parviennent à combler à la fois le volume disponible en galerie mais aussi le vide résultant de la montée de voûte.

Il vient alors l'équation qui traduit l'auto-comblement :

$$f \cdot V_{cloche} = V_{c\hat{one}\text{-galerie}} + V_{cloche}$$

Il est alors possible de calculer chacun des termes de l'équation, puis de la résoudre de manière à déterminer la hauteur de remontée nécessaire de la cheminée afin d'atteindre la condition d'auto-comblement.

² L'outil de diagnostic développé permet également de traiter le cas des galeries isolées, quelle que soit leur forme (circulaire, rectangulaire, avec piedroits...), mais le calcul ne sera pas développé ici.



Photo 1 : Cône d'éboulis : à gauche, marnes sèche, à droite le même matériau sous l'effet de l'eau.

Estimation de la hauteur prévisible de remontée de voûte

L'utilisation la plus classique et la plus fréquente du modèle proposé consiste à évaluer la hauteur prévisionnelle de remontée de cheminée capable de garantir un auto-comblement de celle-ci. Les différents termes de l'équation (1) sont ainsi paramétrés à l'aide de la variable z caractérisant la hauteur de cheminée.

Pour des caractéristiques de galeries et un rayon de remontée de cheminée donnés, il est alors possible de résoudre l'équation (1) en z , de manière à déterminer la hauteur de remontée de cheminée pour laquelle il est possible d'aboutir à un auto-comblement du processus.

Une fois le calcul réalisé, il est possible de comparer la valeur théorique de remontée de voûte avec l'épaisseur des terrains de recouvrement. Plusieurs scénarios sont alors envisageables :

- la hauteur calculée est supérieure à l'épaisseur de recouvrement : le mécanisme d'auto-comblement n'est pas possible et la montée de voûte est susceptible de déboucher en surface, donnant naissance à un fontis ;
- la hauteur calculée est nettement inférieure à l'épaisseur de recouvrement : le mécanisme de montée de voûte s'arrêtera par auto-comblement sans affecter la stabilité des terrains de surface ;
- la hauteur calculée est inférieure de quelques mètres à l'épaisseur de recouvrement : des phénomènes d'affaissements localisés sont possibles à terme en surface, notamment en présence de terrains superficiels peu cohérents.

Le modèle est alors utilisé comme un outil de diagnostic permettant d'identifier les secteurs d'une exploitation les plus exposés au risque d'apparition de fontis en surface. En fonction des caractéristiques de l'exploitation et des terrains de recouvrement, il est en effet possible de définir une épaisseur de recouvrement critique en deçà de laquelle le risque d'apparition de fontis en surface doit être jugé préoccupant. Cette approche est régulièrement utilisée lors de l'élaboration

de Plans de Prévention des Risques, qu'ils soient Miniers (PPRM) ou Naturels (PPRN « carrières souterraines »).

Outre l'épaisseur minimale de recouvrement requise pour éviter le risque de fontis, la modélisation permet également d'estimer les dimensions prévisionnelles de l'éventuel fontis en surface, sous réserve d'introduire, dans le calcul, l'angle de talus de l'entonnoir.

Afin d'apprécier l'incidence de variations et d'incertitudes associées aux différents paramètres intervenant dans cette analyse, une approche probabiliste basée sur les simulations de Monte Carlo a été développée et mise en œuvre récemment (Didier C., Salmon R., 2004).

4.2.2 CONDITIONS D'APPARITION D'UN AFFAISSEMENT/EFFONDREMENT

L'affaissement progressif ou l'effondrement brutal des terrains de surface (hormis les phénomènes de fontis décrits précédemment) sont liés à une rupture préalable de piliers abandonnés et des intercalaires inter-couche dans les anciennes exploitations. La rupture des piliers s'explique par le fait que la résistance à long terme³ du matériau diminue progressivement avec le vieillissement et finit par devenir inférieure à la contrainte verticale régnant en moyenne dans le pilier.

Afin d'estimer correctement l'aléa « affaissement » ou « effondrement », la démarche globale suivie dans le cadre du programme EAT-DRS-03 fut la suivante :

- mieux évaluer les caractéristiques de résistance des terrains ;
- mieux évaluer la sollicitation s'exerçant sur les piliers et les intercalaires (en tenant compte de la présence ou non de piliers bien ou mal superposés, de l'effet du défilage, du contexte d'exploitation de la zone étudiée, etc.).

4.2.2.1 EVALUATION DES CARACTÉRISTIQUES DE RÉSISTANCE DES TERRAINS : EN LABORATOIRE (ESSAIS) ET IN-SITU (MESURE DILATOMÉTRIQUE)

Des essais mécaniques classiques réalisés notamment par l'ENSMP pendant l'exploitation sur les différentes couches et intercalaires du bassin ferrifère lorrain ont montré une faible variation de la valeur moyenne de la résistance à la compression uniaxiale (R_c) du minerai de fer d'une couche à l'autre.

A l'intérieur d'une même couche, la variabilité spatiale est toutefois importante. Les valeurs de résistance pour les couches Rouge, Grise et Brune sont les suivantes : R_c (R) = 20 ± 5 MPa ; R_c (G) = 21 ± 3 MPa ; R_c (B) = 18 ± 1 MPa. On note, par contre, une forte variation du module de Young moyen du minerai suivant la couche : $E = 9$ GPa (B) à 17 GPa (R). On observe une plus forte variabilité des valeurs de résistance R_c des intercalaires entre les couches exploitées : R_c (Toit grise) = 22 ± 5 MPa ; R_c (Haut Toit Brune) = 40 ± 17 MPa, ainsi qu'une variation plus importante du module de Young : $E = 5$ GPa (B) à 27 GPa (R).

³ Compte tenu de la grande sensibilité du minerai de fer de Lorraine au phénomène de vieillissement, des recherches spécifiques ont été menées sur ce sujet dans le cadre du GISOS (contribution de l'INPL).

Des caractérisations plus fines et plus complètes (essais de laboratoire de compression uniaxiale et triaxiale, instantanés et différés (fluage), sous conditions hydriques contrôlées) ont été réalisées récemment (par l'INPL/ENSG) sur la couche grise et sur l'intercalaire entre les couches brune et grise. On note que la résistance à long terme du minerai de fer saturé (essais uniaxiaux de fluage d'une durée d'environ 30 jours) est au moins 30 à 40 % plus faible que la résistance instantanée.

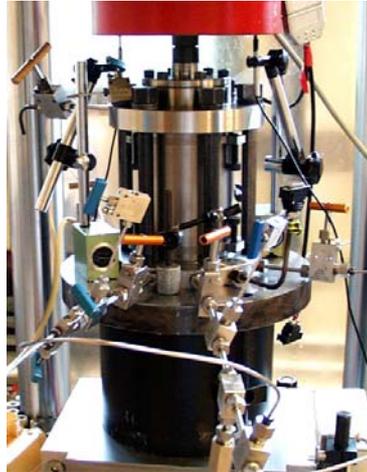


Figure 8 : Cellule triaxiale sous presse (essai réalisé au laboratoire LAEGO).

L'analyse de carotte provenant de sondages horizontaux réalisés dans des piliers exposés à l'atmosphère minière depuis 1930 a mis en évidence un **vieillessement** du minerai sur une épaisseur d'au moins 10 m. Il se traduit, au niveau macroscopique, par une diminution des résistances instantanées du minerai de fer d'environ 30 %. Le vieillissement est moindre pour un faciès plus carbonaté.

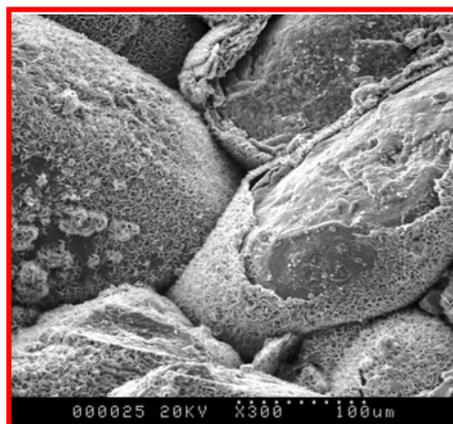


Figure 9 : Conséquence du vieillissement du minerai de fer (faciès ferrifère) : perte de cohésion des grains (photo MEB⁴)

⁴ Microscope Electronique à Balayage.

On observe une fracturation et une hétérogénéité importante du minerai et des intercalaires. Ceci est confirmé par les essais dilatométriques *in situ* par l'INERIS (voir annexe 3, qui montrent que les modules de déformabilité déterminés *in situ* ($E = 9$ à $12,5$ GPa) sont plus faibles que ceux déterminés en laboratoire ($8,4$ à $27,4$ GPa). Une interprétation fine des essais dilatométriques montre également une cohésion plus faible du minerai *in situ* (valeur 2 à 3 fois plus faibles qu'en laboratoire).

Les essais de laboratoire ont conduit à la détermination de lois de comportement à court et à long terme pour le minerai de fer et à leur implantation notamment dans le code de calcul FLAC (versions en 2 et 3 dimensions). Le comportement différé du minerai de fer est modélisé par une loi adaptée au cas des roches tenant compte de la diminution progressive de la résistance (radoucissement) et l'augmentation de volume (dilatance liée à la fissuration). Les lois de comportement (et les paramètres associés) sont déterminées sur des éprouvettes de laboratoire. Leur validité à l'échelle du site peut nécessiter certains ajustements.

Ces différentes études réalisées en laboratoire et *in situ* mettent en évidence clairement que, sous l'effet conjugué du vieillissement, du fluage et d'interactions hydrochimiques, la résistance à long terme du minerai de fer est bien plus faible que celle mesurée par des essais conventionnels de laboratoire.

Ce fait est tout à fait conforme aux retours d'expérience des effondrements survenus dans le bassin ferrifère lorrain.

4.2.2.2 EVALUATION DES SOLLICITATIONS AUXQUELLES SONT SOUMIS LES ANCIENS TRAVAUX (MESURE DE CONTRAINTE) ET ANALYSE DES FACTEURS AGGRAVANTS (MAUVAISE SUPERPOSITION DE PILIERS, EFFET DU DÉPILAGE)

Les mesures obtenues (à l'aide de cellules CSIRO, dispositif développé par l'INERIS, pour la mesure de contrainte par surcarottage) le long d'un profil horizontal traversant un pilier abandonné du site de Tressange (voir annexe 3) ont montré que la contrainte principale majeure est sub-verticale dans le pilier et que son module varie considérablement d'un point à l'autre du pilier, allant de 12 MPa dans certaines zones pour chuter à 2 MPa dans d'autres zones, probablement très fracturées et déconfinées. La contrainte verticale moyenne mesurée (de l'ordre de $8,1$ MPa) est cohérente avec la valeur prédite par la méthode de l'aire tributaire ($7,7$ MPa). Les contraintes horizontales, bien que nulles sur les bords des piliers (logique car les piliers ne sont pas soumis à un confinement), atteignent des valeurs non négligeables en cœur de pilier. Ce phénomène est toutefois particulièrement vrai dans les piliers à faible élancement (site de Tressange). Les contraintes horizontales dans le pilier sont alors relativement isotropes et se situent en moyenne autour de $3,5$ MPa. La contrainte verticale tend à diminuer de la paroi vers le cœur du pilier alors que les contraintes horizontales tendent à augmenter. Ce résultat est conforme aux prédictions des modèles numériques.



Figure 4 : Cellule CSIRO et déformation mesurée en fonction de l'avancement du surcarottage

Les mesures de contraintes faites dans l'intercalaire sont de mauvaise qualité du fait d'une grande fissuration et forte hétérogénéité des terrains rencontrés. L'interprétation classique dans le cadre de l'élasticité linéaire n'est plus acceptable. Les modélisations effectuées (avec FLAC3D) montrent que la prise en compte de la plasticité et de l'anisotropie du comportement du matériau permet de rationaliser, dans une certaine mesure, les mesures de contraintes réalisées.

Des simulations numériques (avec les logiciels SUIT3D et FLAC) ont montré que les effets d'une mauvaise superposition des piliers se traduisent par une augmentation de la contrainte verticale sur la surface commune. L'influence de l'épaisseur de l'intercalaire sur la stabilité d'une exploitation par chambres et piliers s'arrête à 5 m à 7 m.

Nous avons pu également mettre en évidence (à l'aide du code de calcul SUIT3D) que la présence d'un dépilage induit des surcontraintes dans les zones non-exploitées situées à proximité (bande ferme) et dans les piliers de la zone exploitée. L'influence sur tous les piliers est en moyenne égale à 20% même si elle peut être localement plus forte en bordure de dépilage. La qualité du foudroyage joue également un rôle important sur l'influence de la zone dépilée sur les piliers voisins. Cette dernière dépend principalement de la largeur de la zone dépilée.

4.2.2.3 RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR DES EFFONDEMENTS PASSÉS

L'analyse de cas d'affaissements et d'effondrements survenus dans le bassin ferrifère lorrain, effectuée par modélisation numérique (FLAC2D) a permis de retrouver⁵ les caractéristiques in situ des matériaux du bassin ferrifère lorrain, ainsi que la réduction de ces caractéristiques au cours du temps.

L'analyse de l'effondrement d'Audun-le-Tiche, survenu au cours de l'exploitation, a permis d'estimer le facteur de réduction de 0,5 entre les caractéristiques déterminées en laboratoire et celles qui devraient être utilisées dans un modèle de calcul considérant les matériaux comme un milieu continu équivalent (réduction liée à un ensemble de facteurs dont le vieillissement et l'effet d'échelle).

Les effondrements de Moutiers et de Crusnes sont survenus respectivement 4 ans et plusieurs dizaines d'années après l'exploitation. Ces effondrements étant

⁵ Le nombre des cas analysés étant très réduit, les résultats obtenus ne prétendent aucunement se généraliser à tous les cas. Ils n'ont d'autre but que fixer un ordre de grandeur.

apparus sans que l'on puisse les rattacher à la présence de nouvelles exploitations à proximité, ou à un ennoyage des chantiers, nous avons supposé que la cause de ces deux effondrements était uniquement liée à une réduction des caractéristiques de résistance au cours du temps (traduisant les effets cumulés du vieillissement et du comportement différé des matériaux). Cette diminution de la résistance n'est vraisemblablement pas linéaire dans le temps : elle semble importante les premières années ($0,7 < \lambda t_{4 \text{ ans}} < 0,8$ d'après l'effondrement de Moutiers -1940) et ralentit ensuite ($0,6 < \lambda t_{50 \text{ ans}} < 0,7$ d'après l'affaissement de Crusnes-1977).

4.2.2.4 PRÉDICTION DES AFFAISSEMENTS INDUITS PAR L'EFFONDREMENT DES ANCIENS TRAVAUX

Nous avons déterminé, par rétro-analyse de cas d'affaissements à l'aide du logiciel SUBSID, les paramètres de la cuvette d'affaissement (amplitude, déformation horizontale...) propres au bassin ferrifère lorrain à utiliser pour la prédiction des affaissements dans des zones à risque d'effondrement progressif.

Les analyses réalisées montrent que :

- l'affaissement maximal pour une zone critique ou sur-critique⁶ et pour une seule couche exploitée est de $0,5 (w \cdot \tau)$, w étant l'ouverture de la couche exploitée et τ le taux de défrètement (le coefficient, ici égal à 0,5, peut être plus important lorsque le nombre de couches augmente) ;
- l'angle d'influence γ (angle formé avec la verticale et la droite qui relie le bord de la cuvette au bord des travaux miniers) prend trois valeurs : 10° pour un bord vierge ou faiblement tracé, 20° pour un bord avec un traçage ou une exploitation par chambres et piliers abandonnés, 35° pour des zones bordées par des dépilages ;
- la valeur du coefficient (β) de la pente maximale (P_{\max}) dans la formule $P_{\max} = \beta A_m/H$ (A_m est l'affaissement maximal et H la profondeur de l'exploitation) est égale à 5 pour une zone de traçage ou une zone vierge, et à 3 pour une zone à proximité d'une zone dépilée ;
- le coefficient (α) de déformation horizontale, dans la formule $\varepsilon_{\max} = \alpha A_m/H$, peut être pris égal à 1,5.

4.2.2.5 CINÉTIQUE DES INSTABILITÉS (AFFAISSEMENT SOUPLE OU EFFONDREMENT BRUTAL)

Les premiers travaux visaient à discriminer, par analyse de données, les affaissements (phénomène progressif) des effondrements (phénomène brutal) à partir de critères de fond (critères géométriques et d'exploitation minière). S'appuyant sur les 16 cas d'affaissements et d'effondrements recensés et documentés en Lorraine, une fonction discriminante a été élaborée à partir des

⁶ Pour une profondeur donnée, il existe une largeur de cavité minée, qualifiée de « critique » pour laquelle un point de la surface, et un seul, subit l'affaissement maximal. Au-delà de cette largeur critique, la cuvette présente un fond plat, constitué par tous les points dont l'affaissement est la valeur maximale (largeur sur-critique).

caractéristiques au fond (taux de défrètement, dimensions des piliers...) : cette fonction constitue un critère **géométrique** qui permet, dans une certaine mesure, de distinguer les affaissements des effondrements.

Parallèlement, des simulations numériques (faites avec le logiciel UDEC) ont permis également de proposer un critère basé sur la comparaison d'un indice géométrique I (qui dépend de la géométrie d'exploitation) à un seuil I_s (dépendant de la profondeur et des caractéristiques de résistance de la couche exploitée). Ce critère fonctionne sur les 16 cas recensés sur le bassin ferrifère lorrain. Cependant, ces simulations ne restituant pas l'impact supposé de la rigidité du recouvrement, les experts internationaux saisis dans le contexte du bassin ferrifère de Lorraine ont recommandé des études complémentaires : il s'agissait d'étudier **l'impact des caractéristiques géomécaniques et géomorphologiques du recouvrement sur la cinétique des instabilités**.

Une étude méthodologique basée sur les caractérisations géomécaniques récemment réalisées par le LAEGO à la demande de GEODERIS et dans le cadre du GISOS à partir des sondages au droit des zones d'effondrement et d'affaissement a conduit le LAEGO à proposer un indice nouveau (validé par le groupe d'experts mines de fer de Lorraine) dit « indice de massivité » qui intègre le critère de fond (valeur de la fonction discriminante), les paramètres géomécaniques liés à la géologie au droit de la zone et les critères géomorphologiques (vallées, promontoires, reculées de vallée et plateaux).

Le rôle que pourrait jouer le recouvrement dans la cinétique d'effondrement et d'affaissement a été évalué par modélisation numérique⁷ en étudiant l'influence de nombreux facteurs (état initial de contrainte à l'échelle du bassin, rigidité des couches de recouvrement, largeur de la vallée, pendage des couches ou fracturation verticale au droit des zones d'effondrement).

Outre le rôle de la géomorphologie, l'examen de la cinétique d'effondrement est en cours à travers deux cas d'effondrement : l'un progressif (Crusnes, 1977) survenu 50 ans après le traçage et l'autre brutal (Sainte Marie, 1932) survenu suite à un dépilage adjacent. Ces deux cas se différencient notamment par la présence ou non de bancs dits raides de calcaires de Jaumont et de calcaires à polypiers, et des taux de défrètement de 43% et 65%. Les résultats de la modélisation sont cohérents avec les observations. En effet, dans le cas de Ste-Marie, la rupture généralisée du recouvrement est obtenue suite à une réduction d'environ 40 % de la résistance initiale des piliers (cette rupture s'initie d'abord dans le bord ferme, puis progresse vers le jour). Par contre, dans le cas de Crusnes, ce mécanisme n'est pas retrouvé par le modèle, même pour une réduction de très importante (75%) de la résistance des piliers. Le modèle montre dans ce cas que la rupture des intercalaires s'accompagne d'un affaissement souple du recouvrement.

⁷ Objet d'un cofinancement FEDER de la Région lorraine.

4.3 RÉSULTATS : CONDITIONS D'APPARITION DES DIFFÉRENTS PHÉNOMÈNES

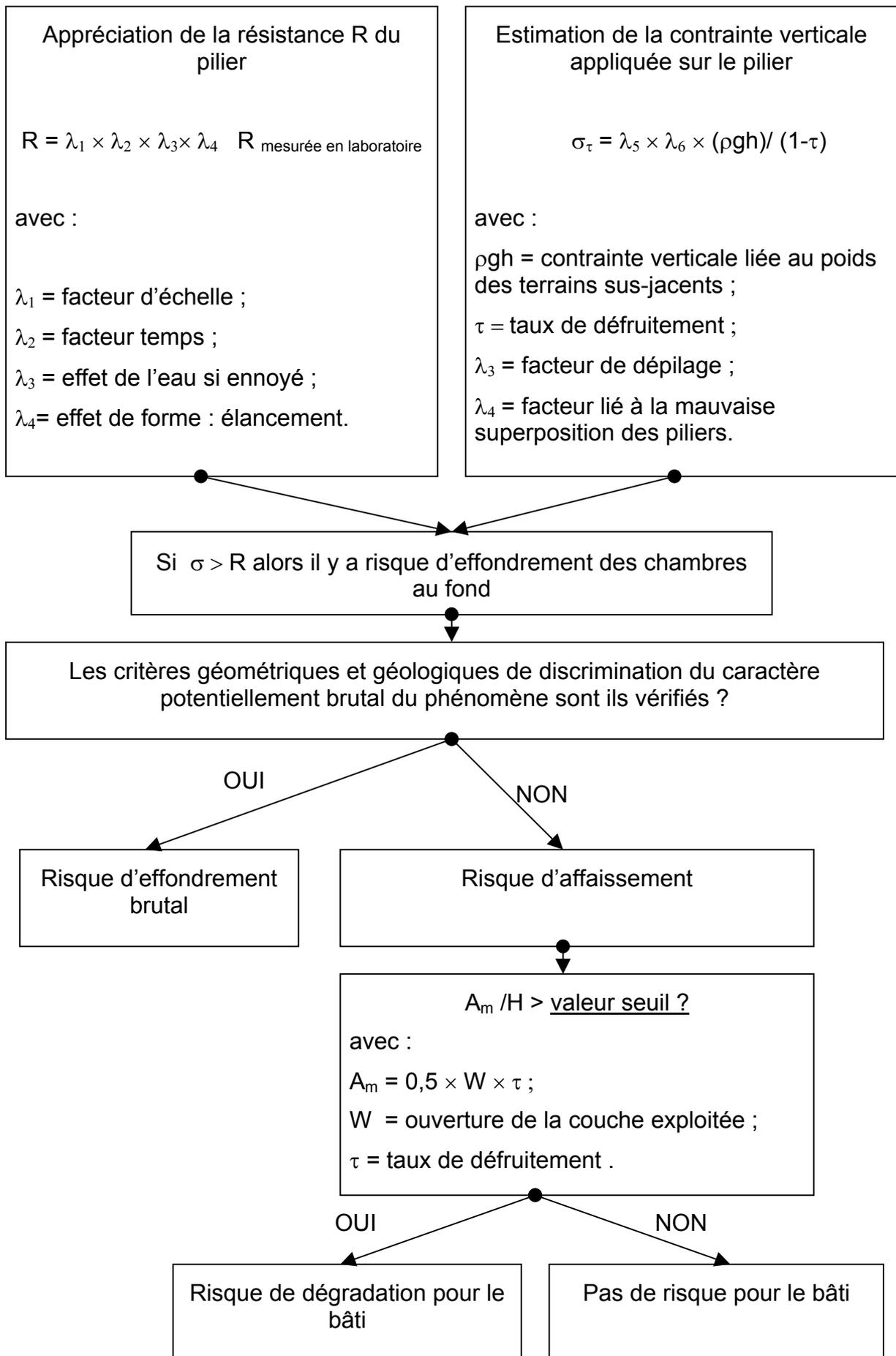
L'étude des conditions d'apparition du fontis, de l'affaissement et de l'effondrement brutal dans le bassin ferrifère lorrain a permis de valider un certain nombre des résultats couramment employés par GEODERIS dans le cadre de la hiérarchisation des zones du bassin ferrifère lorrain :

- il a été démontré que l'influence de l'épaisseur de l'intercalaire sur la stabilité d'une exploitation par chambres et piliers s'estompe pour un intercalaire épais de plus de 7 m d'épaisseur ;
- l'existence d'un défilage à proximité de piliers induit une surcharge sensible sur ces derniers qu'il convient de prendre en compte pour évaluer la sollicitation totale qui s'exerce sur les piliers ;
- les résultats des essais de fluage, des analyses au MEB et des expériences sur le vieillissement du minerai de fer sont en accord avec les retours d'expérience des cas d'affaissement et d'effondrement rencontrés dans le bassin ferrifère lorrain. L'ensemble de ces résultats ainsi que l'interprétation fine des essais dilatométriques in situ mettent en évidence que la résistance à long terme du minerai de fer est bien plus faible que celle déterminée par des essais conventionnels. Le facteur de réduction peut dépasser 2 dans certains cas. De même la déformabilité des roches in situ est plus grande que celle mesurée en laboratoire. Ce fait tient en particulier à la fissuration des matériaux (bords des piliers et intercalaires).

Outre ces résultats à caractère général, dont la vocation est de consolider la hiérarchisation des zones à l'échelle de l'ensemble du bassin ferrifère lorrain, un certain nombre d'outils et de résultats disponibles pour des études particulières ont été obtenus :

- l'outil d'évaluation de la hauteur prévisible de remontée d'un fontis au droit de travaux souterrains ;
- la compréhension et l'appréciation de la diminution des caractéristiques de résistances des principaux matériaux (effet d'échelle, effet du temps) ;

L'organigramme suivant présente la démarche générale d'identification du type de phénomène redouté développée pour le bassin ferrifère lorrain. Les zones à risque de fontis (moins de 50 m de profondeur) font l'objet d'un autre type d'analyse qui s'appuie, essentiellement, sur l'outil présenté précédemment.



5. QUELS SONT LA NATURE, L'ORIGINE ET LES MÉCANISMES DU RISQUE D'ÉMISSION DE GAZ ?

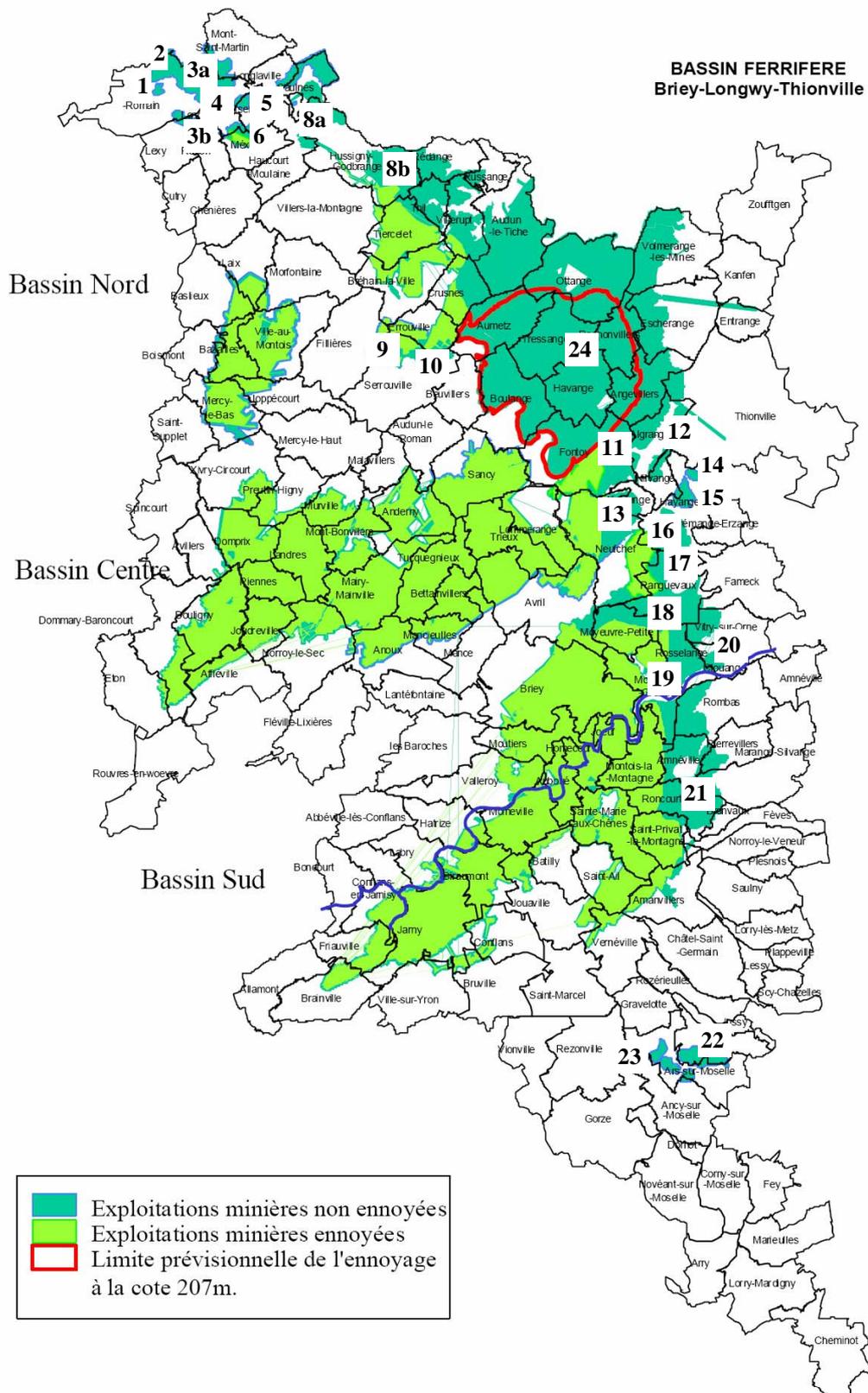
Certaines zones urbanisées du bassin ferrifère lorrain sont affectées par des émanations d'air vicié (mélanges gazeux sous-oxygénés et chargés en certains gaz nocifs). Ces émanations se sont manifestées de manière très spectaculaire dans l'agglomération de Moyeuvre-Grande et plus précisément dans certains quartiers situés à l'aplomb ou à proximité immédiate d'anciens travaux miniers souterrains. Elles se sont notamment traduites par des dysfonctionnements de gazinières et de chaudières dans les habitations.

Différentes mesures et expérimentations ont été effectuées dans le bassin ferrifère lorrain ces six dernières années afin de définir la nature des gaz présents dans les réservoirs d'air de mine, l'origine de la production d'air vicié et les mécanismes favorisant les émissions en surface. La nature des gaz a été identifiée principalement à partir de mesures in situ, l'origine de la production d'air vicié à partir d'expérimentations in situ et en laboratoire et les mécanismes de migration du gaz par des mesures en continu de paramètres aérauliques et météorologiques et un test au gaz traceur. Nous présentons les principaux résultats obtenus.

5.1 IDENTIFICATION DES RÉSERVOIRS D'AIR DANS LE BASSIN DE BRIEY-LONGWY

Les parties non ennoyées des anciennes exploitations constituent des réservoirs d'air de mine. Ils sont limités par les fronts d'ennoyage, les affleurements des couches exploitées ou des barrières naturelles (failles, horizons imperméables...). GEODERIS a mené une campagne générale de cartographie des réservoirs d'air dans le bassin de Briey-Longwy et a ainsi défini 24 réservoirs, dont deux subdivisés (Figure 10). Ils sont recensés ci-dessous.

- | | |
|--|--------------------------------------|
| 1 – réservoir Romain | 12 – réservoir Algrange |
| 2 – réservoir Warnimont | 13 – réservoir Neufchef |
| 3a – réservoir Mont St Martin – Moulaine | 14 – réservoir Victor Nord |
| 3b – réservoir Lexy | 15 – réservoir Victor Sud |
| 4 – réservoir Mont de Chat Ouest | 16 – réservoir Hayange Nord |
| 5 – réservoir Mont de Chat Est | 17 – réservoir Hayange Sud |
| 6 – réservoir Mexy | 18 – réservoir Moyeuvre-Grande |
| 7 – réservoir Longlaville | 19 – réservoir Franche-Pré |
| 8a – réservoir Herserange-Moulaine | 20 – réservoir Rosselange |
| 8b – réservoir Hussigny-Godbrange | 21 – réservoir Rombas (ou Mine-Orne) |
| 9 – réservoir Serrouville | 22 – réservoir Vaux |
| 10 – réservoir Errouville | 23 – réservoir Ars-sur-Moselle |
| 11 – réservoir Burbach | 24 – bassin ARBED ventilé |



*Figure 10 :
Réservoirs d'air correspondant aux anciens travaux miniers non envoyés,
dans le bassin ferrifère de Briey-Longwy-Thionville – Décembre 2005 –
(d'après GEODERIS)*

5.2 NATURE DU GAZ DANS LES RÉSERVOIRS D'AIR DE MINE

5.2.1 MESURES EFFECTUÉES

A la demande de la DRIRE Lorraine, l'INERIS a effectué de juin à août 1999, une série d'investigations dans le secteur du réservoir souterrain constitué par les anciens travaux miniers de Moyeuve-Grande et partiellement les réservoirs voisins de Rosselange, de Franchepré et de Mine-Orne/Rombas. Cette investigation a consisté à contrôler la composition de l'atmosphère (O_2 , CO_2 , CH_4 , CO et H_2S) aux sorties d'orifices miniers ainsi que dans quelques habitations, en particulier dans les caves et les sous-sols. Pour certains points d'observation, les mesures se sont poursuivies jusqu'en janvier 2000.

Une campagne de mesure a été effectuée dans l'ensemble du bassin de Briey-Longwy d'août à septembre 2000 afin de caractériser l'air émanant des réservoirs pendant la période estivale. La première partie de la campagne a consisté en une reconnaissance des orifices. Sur les orifices identifiés et, de surcroît accessibles et soufflants, une mesure de la composition de l'atmosphère a été effectuée.

Les réservoirs d'airs de Mexy, Lexy et Hussigny-Godbrange, situés au nord du bassin à proximité de la frontière franco-luxembourgeoise, présentent des caractéristiques topographiques similaires à celles du réservoir de Moyeuve-Grande. C'est pourquoi ils ont fait l'objet de plusieurs séries de mesures de février à juillet 2001. Après une reconnaissance des réservoirs et de leurs ouvertures, le travail a consisté à suivre le comportement de tous les orifices identifiés, accessibles et susceptibles de rester en liaison plus ou moins directe avec les réservoirs à étudier.

5.2.2 NATURE DU GAZ DANS LES RÉSERVOIRS DE MOYEUVE-GRANDE ET SES VOISINS

Les mesures effectuées dans la zone de Moyeuve-Grande ont confirmé une liaison entre les émanations gazeuses constatées dans certains quartiers de la ville et les vieux travaux des anciennes exploitations des mines de fer, existant dans le sous-sol de la ville et autour de l'agglomération urbaine. Pour les quatre entités délimitées au sein des anciennes exploitations (Moyeuve-Grande, Rosselange, Franchepré et Orne/Rombas), deux parmi elles, le réservoir de Moyeuve-Grande et le réservoir de Rombas, présentaient une activité très franche sur le plan des émanations gazeuses.

Le mélange gazeux émis par les différents orifices débouchant vers les vieux travaux miniers était, pratiquement dans tous les cas, franchement déficient en oxygène et très enrichi en dioxyde de carbone. Pour l'ensemble des points franchement soufflants observés, les teneurs de ces deux gaz présentaient une certaine homogénéité, avec les valeurs allant de 12,5 % à 16 % pour l'oxygène et de 2,5 à 6 % pour le CO_2 . Pour la plupart des points observés, le déficit en oxygène n'est pas totalement compensé par la présence du dioxyde de carbone. Le gaz de complément est constitué principalement d'azote.

Le réservoir de Rosselange semblait présenter une certaine activité, mais d'une ampleur bien moindre, comparativement aux deux sites précédents. Enfin, aucune activité significative en terme d'émissions gazeuses n'a été constatée sur les différents orifices débouchant vers le réservoir Franchepré.

5.2.3 NATURE DU GAZ DANS LES RÉSERVOIRS DE LEXY, MEXY ET GODBRANGE

Les observations effectuées, notamment le suivi du comportement d'orifices accessibles à caractère soufflant et restant en liaison avec les vieux travaux miniers ont montré l'existence d'échanges gazeux persistants entre ces réservoirs et l'atmosphère extérieure.

Comme pour le réservoir de Moyeuve-Grande, les émanations de gaz depuis les réservoirs de Lexy, Mexy et Godbrange étaient déficitaires en oxygène et enrichies en dioxyde de carbone, mais en des proportions bien moindres que pour le premier réservoir. En effet, les teneurs en O₂ étaient situées à un niveau allant de 18,6 à 20,4 % et celles en CO₂ de 0,2 à 0,9 %.

Pour les mesures montrant une modification sensible de l'atmosphère, le déficit en oxygène n'était pas totalement compensé par la présence du dioxyde de carbone, la somme de la concentration volumique en oxygène et de celle en dioxyde de carbone étant, pour une majorité des cas, inférieure à 20,9 % (concentration en oxygène dans l'air atmosphérique).

5.2.4 NATURE DU GAZ DANS LES AUTRES RÉSERVOIRS

La campagne de mesure sur l'ensemble du bassin de Briey-Longwy, a mis en évidence deux types d'air émané des orifices miniers :

- air similaire à l'air atmosphérique ;
- air présentant un léger déficit en O₂ et léger excès de CO₂ (l'un ne compensant pas l'autre) mais en des proportions bien moindres que pour le réservoir de Moyeuve.

5.3 ORIGINE DE LA PRODUCTION D'AIR VICIÉ

5.3.1 SITE EXPÉRIMENTAL DE TRESSANGE

Afin de mieux comprendre la cause de l'apparition des atmosphères modifiées et l'origine des gaz émis, l'INERIS a profité de la création du site expérimental de Tressange (dans le bassin nord, alors en attente d'ennoyage) pour suivre la modification de la composition de l'atmosphère au sein du massif rocheux et la production éventuelle de gaz lors de l'ennoyage du massif.

Pour les besoins de l'expérimentation, une partie du site a été isolée, instrumentée et préparée pour effectuer son ennoyage contrôlé. Un schéma de principe du site expérimental est présenté sur la Figure 11.

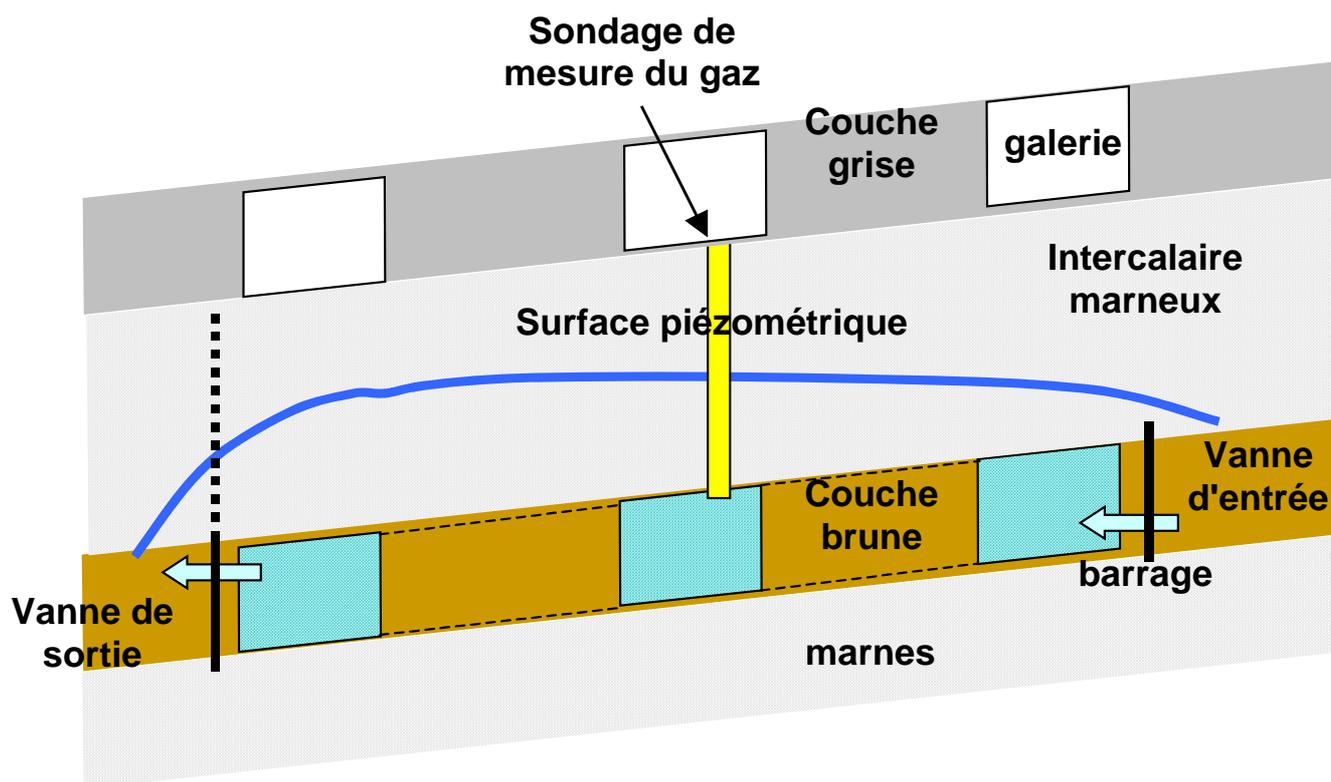


Figure 11 : Coupe schématique du site pilote de Tressange

De façon très simplifiée, le contexte géologique du site se présente sous la forme d'une superposition de trois couches :

- à la base, la couche brune, couche exploitée, comportant essentiellement un niveau calcaire coquillier grossier et le minerai constitué principalement d'une ferri-arénite ;
- au toit de ce niveau, des intercalaires marneux riches en carbonates et en pyrite ;
- la couche grise riche en minerai de fer.

Durant l'ensemble de l'expérimentation, seule la couche la plus profonde (couche brune) ainsi que la partie inférieure de l'intercalaire marneux ont été ennoyées.

Le suivi de l'évolution de la composition gazeuse (teneurs en oxygène et en dioxyde de carbone) dans les vides miniers et dans le massif au cours de l'ennoyage du site a été réalisé au moyen de deux sondages aménagés à partir du niveau de la couche grise, traversant l'intercalaire marneux et débouchant dans les vides d'exploitation de la couche inférieure (couche brune). Dans leurs parties supérieures, ces sondages ont été tubés en plein et fermés. De ce fait, les gaz susceptibles d'être produits par des réactions chimiques lors de l'ennoyage de la couche brune et d'une partie inférieure de l'intercalaire marneux pouvaient s'accumuler à l'intérieur des sondages. Un dispositif de prélèvement gazeux et de mesure en continu, installé en boucle fermée, a permis de prélever le mélange à analyser, de réaliser les mesures des teneurs en différents gaz, puis de réinjecter le mélange analysé dans le sondage sans modification significative de sa composition.

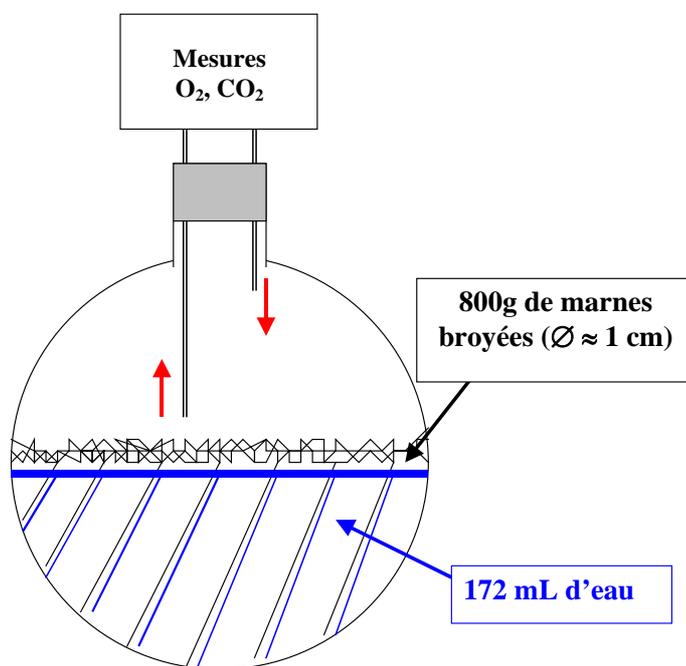
Un suivi de gaz dissous dans l'eau a été effectué afin de détecter un enrichissement éventuel de l'eau en gaz provenant des réactions chimiques au sein du massif rocheux, lors de son ennoyage. Il était réalisé périodiquement par le biais de prélèvements manuels sur le site pilote.

5.3.2 EXPÉRIENCES COMPLÉMENTAIRES EN LABORATOIRE

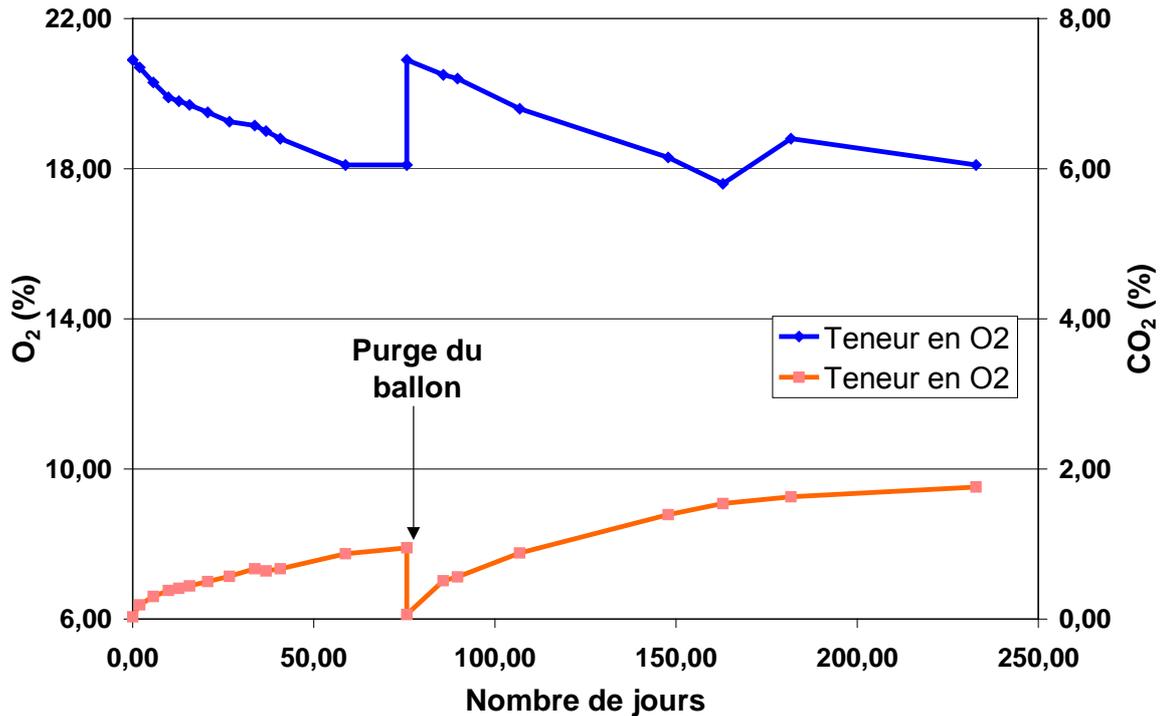
Des expérimentations complémentaires en laboratoire ont été effectuées en laboratoire afin de vérifier les hypothèses émises suite à l'expérimentation sur le site de Tressange. Nous avons essayé de reproduire en laboratoire la réaction chimique pouvant se produire lors de la pénétration d'eau au sein de l'intercalaire marneux.

Pour cela, nous avons prélevé, sur le site expérimental de Tressange, des marnes de l'intercalaire. Afin d'augmenter la surface réactive de la roche et de mettre à nu des parties moins oxydées, les échantillons ont été broyés jusqu'à obtenir une granulométrie centimétrique.

Ils ont ensuite été placés dans un récipient (ballon), en présence d'air (oxygène) et d'eau (Figure 12). Deux types d'eau ont été utilisés : de l'eau déminéralisée et de l'eau du Dogger, moins acide que l'eau utilisée pour effectuer l'ennoyage du site pilote. Pour reproduire le mieux possible les conditions d'ennoyage in situ, les roches n'ont pas été ennoyées entièrement : une épaisseur de 1,5 à 2,5 cm de roche est restée au contact de l'air libre, ce qui pouvait permettre, le cas échéant, des réactions entre la roche, l'eau et l'oxygène, au niveau de la frange capillaire. Puis nous avons fermé le ballon et suivi l'évolution de l'atmosphère contenue en effectuant des mesures périodiques.



Mode opératoire



Résultats

Figure 12 : Essai d'oxydation des marnes pyriteuses en laboratoire.

5.3.3 RÉSULTATS

L'hypothèse retenue pour expliquer l'appauvrissement en O₂ et enrichissement en CO₂ observés dans l'atmosphère de certains orifices est celle d'une réaction de neutralisation par les carbonates d'un drainage acide issu de l'oxydation de la pyrite.

A Tressange, la modification de l'atmosphère a coïncidé avec l'ennoyage de l'intercalaire marneux, ce qui a nécessité de chercher l'origine de ce phénomène dans une série de réactions chimiques impliquant les minéraux de l'intercalaire marneux, l'eau et de l'air.

La simulation de l'expérimentation du site de Tressange en laboratoire a apporté des résultats similaires à ceux observés in situ. En effet, la mise en contact de l'intercalaire marneux avec de l'eau a provoqué une production de CO₂ accompagnée d'une consommation d'oxygène. Cette expérience de laboratoire a permis de lever le doute relatif à l'origine de ces émanations qui sont, selon toute vraisemblance, liées à des réactions chimiques faisant intervenir les minéraux en place, notamment la pyrite (et sidérite) et les carbonates, l'eau d'ennoyage (et/ou l'humidité du massif) ainsi que l'oxygène atmosphérique. Tous ces éléments sont en faveur d'une réaction de neutralisation par les carbonates d'un drainage acide issu de l'oxydation de la pyrite.

L'évolution des teneurs en O₂ et CO₂, observée dans une première phase de l'expérimentation, est représentée sur la figure 13. L'analyse de ce graphique fait clairement apparaître trois phases :

- dans un premier temps, après le début de la mise en eau du site, la composition de l'atmosphère au sein du massif n'évolue pas et reste identique à celle de l'atmosphère extérieure ;
- le changement de composition de l'atmosphère coïncide avec le moment où le niveau d'eau atteint le mur de l'intercalaire marneux : l'atmosphère des sondages s'appauvrit en O₂ et s'enrichit en CO₂ ;
- les teneurs en O₂ et en CO₂ évoluent très rapidement et se stabilisent à des valeurs de 17 % et 7% respectivement. La stabilisation des teneurs correspond à la fin de la remontée d'eau sur le site pilote et à sa stabilisation à l'intérieur de l'intercalaire marneux.

La modification de l'atmosphère sur le site de Tressange est similaire à celle rencontrée dans les autres réservoirs miniers affectés par des émissions gazeuses. D'autre part, elle a coïncidé avec l'envoyage de l'intercalaire marneux, ce qui conduit à chercher l'origine de ce phénomène dans une série de réactions chimiques impliquant les minéraux de l'intercalaire marneux, l'eau et de l'air.

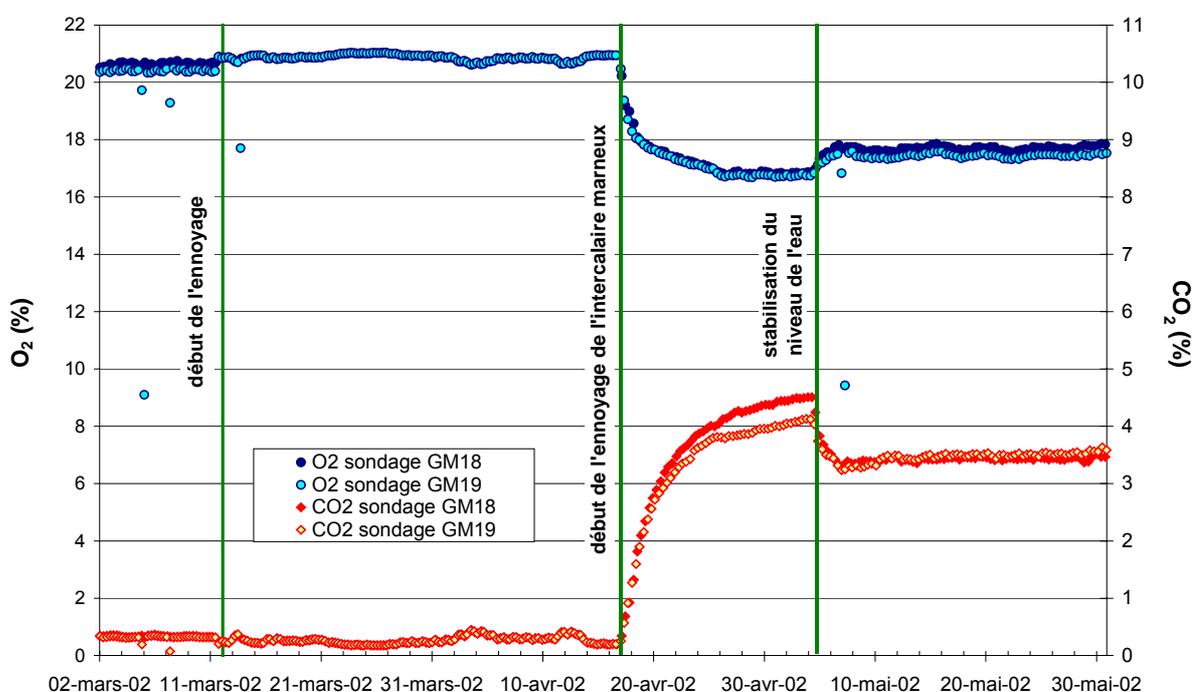


Figure 13 : Evolution des mesures en O₂ et CO₂

5.4 MÉCANISMES DE CIRCULATION DES GAZ

5.4.1 EXPÉRIMENTATION AU GAZ TRACEUR

Une expérimentation au gaz traceur⁸ a été réalisée entre août et septembre 2000 (TAUZIEDE C., 2000). Elle a pour objectif d'étudier l'étendue des zones balayées par les écoulements gazeux au sein du réservoir souterrain et leur importance.

⁸ Gaz inerte et absent de l'environnement (hexafluorure de soufre, SF₆)

Le gaz traceur a été injecté dans un sondage débouchant dans les vieux travaux, fortement aspirants. Sa présence a été recherchée en divers points du bassin (par prélèvement d'échantillons d'air et dosage du traceur) plus ou moins éloignés de l'émission.

5.4.2 MESURES EN CONTINU DE PARAMÈTRES MÉTÉOROLOGIQUES ET AÉRAULIQUES

Deux stations de mesure en continu des paramètres météorologiques et aérauliques ont été mises en place à l'exutoire de deux galeries d'accès à l'ancienne mine de Moyeuve. Ces galeries débouchent dans la ville de Moyeuve-Grande, dans une partie basse de la vallée de l'Orne.

La sortie de la galerie G37 débouchant dans la cave de la pharmacie Klehr, au 36 rue Fabert, est équipée depuis le 12 avril 2000 d'un dispositif mesurant [8] la pression atmosphérique, la température extérieure, la vitesse du flux, le sens de l'écoulement, la teneur en oxygène, la teneur en dioxyde de carbone, la teneur en radon et la température du gaz.

L'extrémité sud de la galerie d'Hayange (G7), débouchant rue de Rosselange, est, elle, équipée d'un dispositif mesurant la température du gaz, la teneur en oxygène et la teneur en radon. Et depuis le 17 février 2004, ont été ajoutés des capteurs de mesure de la pression atmosphérique et de la pression différentielle entre l'intérieur de la galerie et l'extérieur.

5.4.3 RÉSULTATS

Plusieurs éléments observés in situ dans la région de Moyeuve-grande sont similaires aux différents réservoirs et peuvent indiquer le tirage thermique naturel comme la force motrice principale des écoulements (POKRYSZKA Z., 1999, GRABOWSKI D., 2002, POKRYSZKA Z., GRABOWSKI D., 2003)]. Le fonctionnement du réservoir selon ce modèle se caractérise par deux périodes particulières et distinctes (GRABOWSKI D., 2002, POKRYSZKA Z., GRABOWSKI D., 2003) :

- une période de régime "estival" pendant laquelle les orifices situés aux points topographiquement bas des travaux miniers restent globalement soufflants. Cette période correspond à une température extérieure supérieure à 14°C;
- une période de régime d'écoulement "hivernal", pendant laquelle, à l'inverse, l'air entre par les orifices miniers situés aux points topographiquement bas des vieux travaux. Ce régime s'installe d'une manière franche lorsque la température extérieure est inférieure à 12°C.

Des fluctuations du sens d'écoulement sont systématiquement observées dans les périodes pendant lesquelles la température extérieure se situe dans la fourchette de 12 à 14°C.

La comparaison des courbes montrant l'évolution temporelle des teneurs en O₂, en CO₂ et en radon avec celle de la température à un point bas des vieux travaux va bien dans ce sens : l'atmosphère appauvrie en O₂ et enrichie en radon et CO₂ apparaît pour des températures supérieures à 12-14°C, ce qui correspond au régime "estival".

Il y a donc une variation saisonnière des émissions gazeuses, tant en terme de composition du mélange gazeux qu'en terme d'intensité. Cet effet du tirage thermique est plus ou moins marqué selon la configuration des sites.

Nous pouvons également mentionner l'effet des variations de la pression barométrique sur les écoulements gazeux au sein des anciens travaux miniers qui peut légèrement modifier la circulation due au tirage thermique.

Les voies de migration du gaz des anciens travaux miniers vers l'atmosphère extérieure sont multiples :

- par les différents orifices miniers (galeries ou puits). Il existe en effet de nombreux orifices miniers sur le bassin ferrifère lorrain dont une partie importante reste ouverte ou est fermée sans précautions particulières vis-à-vis du gaz ;
- au travers des terrains de recouvrement. Dans ce cas, les échanges gazeux entre les travaux miniers et l'atmosphère peuvent se faire via la matrice poreuse mais surtout via les fractures et fissures des terrains ;
- par l'eau. Le dioxyde de carbone, en particulier, est un gaz relativement soluble dans l'eau et nous ne pouvons donc exclure ce mode de transfert du gaz depuis les travaux miniers vers l'extérieur, même si nous n'avons pas beaucoup de données pour appuyer cette hypothèse.

5.5 RISQUES ASSOCIÉS AUX ÉMANATIONS DE GAZ DANS LE BASSIN FERRIFÈRE LORRAIN

Dans le bassin ferrifère lorrain, il peut exister des atmosphères appauvries en O₂ et, parfois, enrichies en CO₂.

Les effets d'un déficit d'oxygène de l'air respiré sur la santé et la physiologie sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Teneur en O ₂ (%)	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 commencent à se développer
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 1 : Effet d'un déficit d'oxygène de l'air respiré sur la santé et la physiologie.

Le tableau qui suit résume les principaux troubles constatés sur l'organisme humain en fonction de la teneur en CO₂.

Teneur en CO₂ (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%	Maux de tête, augmentation de la pression artérielle, éventuellement syncope
4-5%	Doublement du rythme respiratoire
6%	L'accélération de la respiration augmente fortement et devient subjective, c'est à dire que le sujet en a conscience
8%	Difficulté respiratoire élevée
8-10%	Syncope, la mort intervient en une dizaine de minutes
A partir de 20%	Syncope et mort presque immédiate, en quelques secondes

Tableau 2 : Principaux troubles constatés sur l'organisme humain en fonction de la teneur en CO₂.

Les principaux risques associés à un appauvrissement en O₂ et enrichissement en CO₂ sont donc :

- un risque d'asphyxie dans une atmosphère déficitaire en oxygène ;
- un risque d'intoxication et d'asphyxie dans une atmosphère enrichie en dioxyde de carbone.

Les valeurs extrêmes relevées dans le bassin ferrifère lorrain correspondent à une atmosphère composée de 13% d'O₂ et 4% de CO₂. D'après les tableaux précédents, chaque valeur prise séparément ne représente pas une situation trop alarmante pour l'être humain. Il faut cependant souligner l'effet cumulé de l'enrichissement en CO₂ et appauvrissement en O₂ qui peut conduire, dans le cas d'une exposition prolongée, à des troubles importants sur l'organisme humain.

Par ailleurs, la présence, dans les habitations, des atmosphères partiellement désoxygénées et chargées en dioxyde de carbone entraîne un mauvais fonctionnement des chaudières au gaz et au fioul, pouvant conduire à l'apparition des risques secondaires induits liés aux arrêts intempestifs de la flamme ou encore à l'émission des fumées surchargées en CO (explosion, intoxication...).

5.6 CAS PARTICULIER DU RADON

Du radon a été mesuré dans des proportions non négligeables dans le bassin ferrifère lorrain. Une synthèse des données disponibles à ce sujet est présentée ici.

5.6.1 MESURES EFFECTUÉES SUR LE BASSIN FERRIFÈRE LORRAIN

5.6.1.1 MESURES PONCTUELLES

Au cours des étés 1999 et 2000, des mesures ponctuelles de l'activité du radon émanant des orifices miniers ont été réalisées (GEODERIS, 2000 (R-2000/005, DRIRE Lorraine, 2000). Les résultats, en valeurs moyennes, obtenus pour chaque réservoir figurent sur le Tableau 3. Ils indiquent une grande dispersion des mesures allant de 120 Bq/m³ à plus de 19000 Bq/m³ mais 70% d'entre elles dépassent 1000 Bq/m³. Ainsi, ces mesures montrent des teneurs en radon globalement importantes.

Réservoir de gaz (orifice)	Teneur en radon mesurée (Bq/m ³)	Réservoir de gaz (orifice)	Teneur en radon mesurée (Bq/m ³)
Mt St Martin (G5)	205	Neufchef (G19)	3955
Mt St Martin (G15)	7830	Victor Nord (G3)	6740
Lexy (G3)	14420	Victor Sud (G10)	7495
Mexy (B)	1670	Victor Sud (G13)	211
Mexy (A)	19045	Victor Sud (G2)	345
Herserange-Moulaine (S4)	128	Hayange Nord (G16)	6160
Herserange-Moulaine (S1)	4460	Hayange Nord (G52)	380
Herserange-Moulaine (C11)	7680	Hayange Sud (G7)	7685
Hussigny-Godbrange (J2)	4375	Hayange Sud (G9)	9815
Hussigny-Godbrange (J1)	270	Moyeuvre-Grande (G7)	6519
Hussigny-Godbrange (J6)	4310	Moyeuvre-Grande (G6)	6350
Hussigny-Godbrange (T1)	2435	Moyeuvre-Grande (G37)	13000
Hussigny-Godbrange (J5)	5910	Franche-Pré (G3)	4900
Errouville (G exhaure)	2855	Franche-Pré (G4)	7000
Burbach (G8)	3330	Rosselange (G6)	145
Algrange (G6)	170	Rombas (G46)	545
Neufchef (G45)	285	Rombas (G49)	165
Neufchef (G46)	3420	Rombas (G1)	12000
Neufchef (G28)	8880	Rombas (G4)	13490
Neufchef (G20)	160	Rombas (G3)	13490
Neufchef (G24)	2920	Vaux (G6)	7060
Neufchef (G26)	640	ARBED	4450
Neufchef (G18)	10140		

Tableau 3 : Mesures des teneurs en radon dans des orifices du bassin ferrifère lorrain, au cours des étés 1999 et 2000.

5.6.1.2 MESURES EN CONTINU SUR UN AN DANS DEUX HABITATIONS ET UNE GALERIE DE MINE

Dans le cadre d'une étude ayant pour objectif de caractériser l'origine et les mécanismes de transfert du radon depuis le sol vers les bâtiments dans le contexte des mines de fer en Lorraine, des mesures en continu ont été effectuées sur plusieurs sites par le BRGM (Baubron, J-C., Hamm, V., Pinault, J-L., 2004). Un suivi des concentrations en radon a été réalisé dans deux habitations de Moyeuvre-Grande, ayant le même contexte géologique : une située dans la cité de Froidcul, dans une zone affectée par la fracturation liée aux exploitations, et la deuxième dans la cité de Wendel, dans une zone exploitée mais sans affaissement. Des sondes ont été placées dans les maisons ainsi que dans le sol à l'extérieur immédiat. En parallèle, la concentration en radon de l'atmosphère de la galerie de Franchepré a été mesurée.

Il ressort de cette étude que l'air de la galerie de Franchepré est globalement peu chargé en radon. Plus précisément, il n'y a pas de radon en hiver et la teneur augmente en été. Il est à signaler que la galerie constitue un cul-de-sac, car elle est obstruée par l'eau et communique avec les vieux travaux miniers dans la partie totalement ennoyée du réservoir. Malgré cela, des pics éphémères de radon pouvant monter jusqu'à 50 000 Bq/m³ ont été observés.

Les tableaux ci-dessous présentent les concentrations moyennes relevées sur les deux sites suivis en continu.

Froidcul	
Localisation de la mesure	Teneur en radon (Bq/m ³)
sol 1	4062
sol 2	3476
sol de la cave (hiver)	25000
sol de la cave (été)	16000
sous-sol (hiver)	6182
sous-sol (été)	2524
RDC (hiver)	1614
RDC (été)	1015
1 ^{er} étage (été)	1320
1 ^{er} étage (hiver)	530

Wendel	
Localisation de la mesure	Teneur en radon (Bq/m ³)
sol (hiver)	8789
sol (été)	8745
sol de la cave (hiver)	11007
sol de la cave (été)	20034
sous-sol (hiver)	1827
sous-sol (été)	3823
RDC (hiver)	195
RDC (été)	174

Tableau 4 : Concentrations moyennes relevées sur les deux sites suivis en continu (Froidcul et Wendel).

Cette étude a permis de mettre en évidence une corrélation entre l'évolution de la concentration en radon dans le sol et l'évolution de la température du sol, d'une part, et de la pression atmosphérique, d'autre part, ainsi qu'un effet du tirage thermique dans les habitations.

5.6.2 SUIVI DANS DEUX GALERIES DU RÉSERVOIR DE MOYEUUVRE-GRANDE DEPUIS AVRIL 2000

Comme nous l'avons mentionné précédemment, deux stations de mesure en continu des paramètres météorologiques et aérauliques ont été mises en place en avril 2000 à l'exutoire de deux galeries d'accès à l'ancienne mine de Moyeuivre : à la sortie de la galerie G37 débouchant dans la cave de la pharmacie Klehr au 36 rue Fabert et à l'extrémité sud de la galerie d'Hayange (G7), débouchant rue de Rosselange. Ces deux stations sont équipées de sondes Barasol permettant de mesurer la teneur en radon.

Les teneurs en radon mesurées dans les galeries sont importantes. La Figure 14 présente l'évolution de la teneur en radon à l'entrée de la galerie G7 de septembre 2002 à juillet 2005. La moyenne sur les 4 années est de 4514 Bq/m^3 . Nous pouvons observer une périodicité de l'évolution des teneurs, avec des variations saisonnières de celles-ci : fortes teneurs en été (de l'ordre de 10000 Bq/m^3) et faibles teneurs en hiver. Cette évolution suit le même régime saisonnier que celui décrit au paragraphe 5.2 animant l'ensemble des échanges gazeux de ce réservoir post-minier.

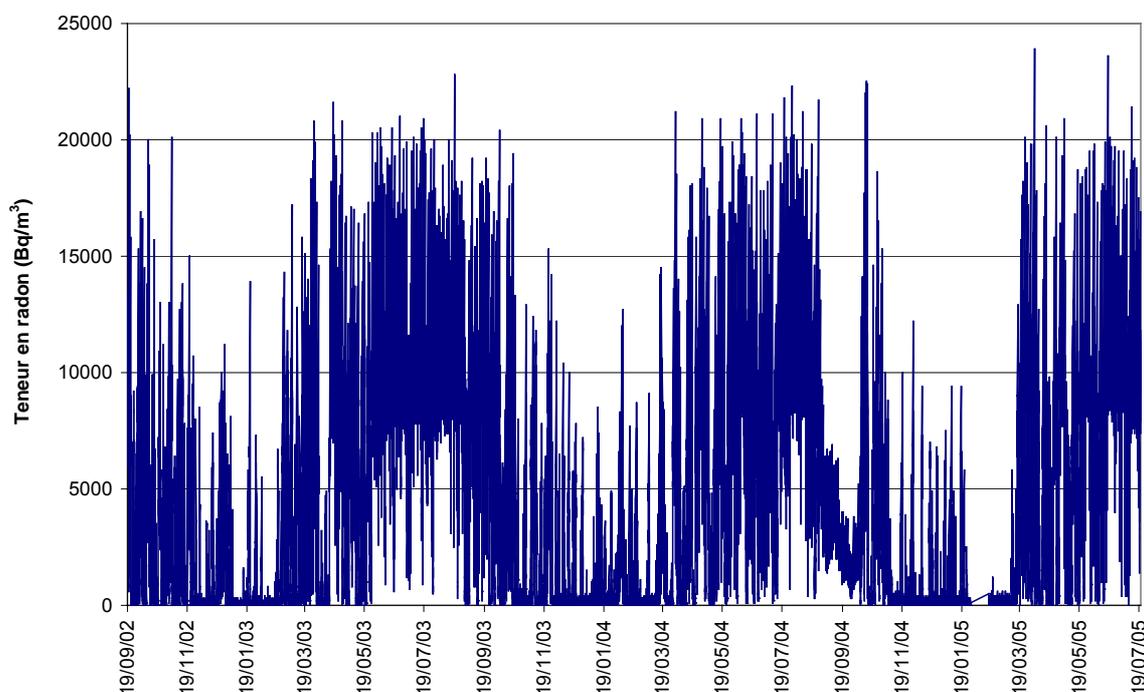


Figure 14 : Evolution de la teneur en radon dans la galerie G7 entre septembre 2002 et juillet 2005.

5.7 BILAN DES RISQUES LIÉS AU RADON DANS LE CONTEXTE ÉTUDIÉ

En ce qui concerne le radon, les pouvoirs publics français ont distingué trois niveaux d'activité volumique du radon 222 concernant les bâtiments recevant du public (Circulaire conjointe DGS n°99-46 et DGUHC UHC/QC/10 n°99-32 du 27 janvier 1999). Ces niveaux peuvent être extrapolés, à titre de recommandation, pour tout type de bâtiment dans lequel sont présents des personnes (habitation, lieu de travail, etc.).

Ces valeurs d'activité volumique sont :

- 400 Bq/m³, en dessous de laquelle *"la situation ne justifie pas d'action correctrice particulière"* ;
- 400 à 1000 Bq/m³, pour lesquelles *"il est souhaitable d'entreprendre des actions correctrices simples"* ;
- au-delà de 1000 Bq/m³, *"des actions correctrices, éventuellement d'envergure, doivent être impérativement conduites à bref délai..."*.

L'étude du BRGM (Baubron et al, 2004) montre qu'il existe, en moyenne, un facteur de dilution du radon par niveau de bâtiment voisin de 10, lors du transfert depuis l'atmosphère libre du sol jusque dans les étages. La géométrie du bâtiment (hauteur en particulier), sa perméabilité latérale et vis-à-vis du sous-sol, l'intensité du chauffage, l'existence d'une ventilation mécanique permanente sont des facteurs primordiaux facilitant l'aspiration du radon issu de l'atmosphère libre du sol situé sous la construction. A l'inverse, toute isolation soignée du bâtiment vis-à-vis du sous-sol suffit à se prémunir totalement du radon, quelle que soit sa concentration ou son flux dans le sol.

Ces éléments ont justifié le choix des valeurs indicatives proposées pour qualifier l'intensité du phénomène lors de l'évaluation de l'aléa d'une exposition au radon en surface, en provenance des travaux miniers souterrains dans le cadre de l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers, c'est à dire :

- Intensité très limitée à limitée pour des teneurs en radon supérieures 1000 Bq/m³ mais inférieures à 10 000 Bq/m³ ;
- Intensité moyenne pour une émission de radon à des teneurs supérieures à 10 000 Bq/m³.

Dans le bassin ferrifère lorrain, plusieurs mesures effectuées jusqu'à présent montrent des teneurs en radon largement supérieures à 10 000 Bq/m³. Ceci peut conduire à des teneurs largement supérieures à 1000 Bq/m³ dans les sous-sols et les habitations (cf. 1.6.2).

Même si les vides miniers ne sont pas en soi producteurs de radon, leur présence et la fracturation des terrains induite par l'exploitation facilitent sa migration et peuvent alors conduire à un dépassement des teneurs limites dans certaines zones du bassin.

6. IMPACT DE L'ENNOYAGE SUR LA STABILITÉ DES OUVRAGES MINIERS ET SUR LES ÉMISSIONS DE GAZ

Nous avons décrit au chapitre 4 quelles étaient les conditions d'apparition des instabilités des anciens travaux miniers. Compte tenu des effondrements qui ont affecté le bassin sud, quelques mois après son ennoyage consécutif à l'arrêt des pompes d'exhaure minière (affaissements d'Auboué en 1996, de Moutier en 1997, de Moyeuve Grande en 1998, affaissement de Roncourt en 1999), l'eau apparaissait comme un facteur aggravant possible. Des études spécifiques ont alors été engagées au sein du GISOS pour préciser l'impact de l'eau sur la stabilité des ouvrages miniers. Ces études ont consisté :

- à étudier *en laboratoire* l'effet d'une variation du degré de saturation sur le comportement à court et long terme du minerai de fer et des marnes intercalaires (contribution du LAEGO, ENSG) ;
- à mesurer *in situ* les effets d'un ennoyage partiel (et sous faible pression) d'une zone exploitée par chambre et piliers (site pilote de Tressange) ;
- à préciser par une rétro-analyse, des cas affaissements ayant affecté le bassin Sud, les conditions d'apparition des effondrements et les pertes de résistance induites par l'ennoyage ;
- à mettre au point, sur la base des travaux précédents, un modèle explicatif et prédictif des effets de l'ennoyage sur la stabilité des ouvrages miniers.

Parallèlement, les travaux ont porté sur l'étude des mécanismes physico-chimiques et d'échanges gazeux au sein du milieu constitué par l'ensemble eau-roche-gaz. Ainsi, il apparaît que sous l'effet de la remontée des eaux ou d'un différentiel de pression barométrique entre les cavités souterraines et la surface du sol, les gaz de mine qui se sont accumulés dans les vides souterrains ou les terrains environnants peuvent migrer vers la surface et conduire à un risque d'explosion (grisou), d'intoxication (radon) ou d'asphyxie (CO₂) pour les personnes exposées.

6.1 CARACTÉRISATION EN LABORATOIRE DES EFFETS DE L'EAU

L'étude de la porosité du minerai de fer de la couche grise a montré qu'il s'agit d'une roche très poreuse, (porosité de plus de 30 % pour le faciès le plus ferrifère, 20 % pour le faciès carbonaté).

Des mesures de perméabilité montrent que le faciès très ferrifère du minerai de fer est plus perméable (perméabilité intrinsèque de $3 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ environ, soit $3 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$) que le faciès carbonaté et que les intercalaires marneux non fracturés. Le rapport est d'environ un ordre de grandeur. Des essais de perméabilité réalisés dans le site pilote ont montré que la perméabilité *in situ* était sensiblement identique à la perméabilité mesurée en laboratoire sur échantillons dans les zones non fracturées. En revanche, les zones fracturées sont beaucoup plus perméables (10^{-13} m^2 environ soit 10^{-6} m/s).

On a pu vérifier que, dans les conditions *in situ* (humidité relative de l'air de 90 %), les matériaux à proximité des vides miniers se désaturent de façon importante (baisse très significative du degré de saturation bien que l'air soit presque saturé). Cela indique que les pressions capillaires sont élevées et qu'il est nécessaire de

tenir compte de l'état non saturé du minerai de fer et son impact sur l'analyse de stabilité.

On constate en laboratoire que la résistance à la compression uniaxiale (instantanée) diminue fortement avec l'augmentation de l'humidité relative. D'autre part, des essais de fluage à humidité relative contrôlée ont montré qu'une saturation brutale des échantillons (immersion dans l'eau) induisait une augmentation de la vitesse de fluage et une diminution de la résistance à long terme (D. GRGIC, F. HOMAND, 1999 et 2002).

On note également que des pressions de gonflement assez importantes et de faibles déformations se développent au contact de l'eau dans certains intercalaires (en particulier celui localisé au toit de la couche Grise).

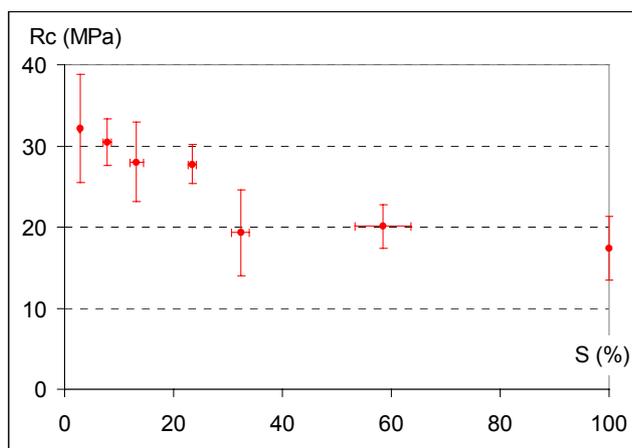


Figure 15 : Résistance à la compression uniaxiale du minerai de fer en fonction du degré de saturation.



Figure 16 : Cellule de fluage et mesure de déformation en fonction du temps (dispositif de LAEGO).

6.2 APPORT DES EXPÉRIMENTATIONS IN SITU (TRESSANGE) : MESURE DE DÉPLACEMENTS, TOMOGRAPHIE, SURVEILLANCE MICROSISMIQUE

Comme nous l'avons déjà précisé, l'objectif principal des expérimentations réalisées sur le site pilote de Tressange était d'étudier les conséquences d'un ennoyage (ici de courte durée et sous faible pression) sur la stabilité des

anciennes mines et sur le comportement hydro-géo-chimique du massif rocheux, en particulier pendant la phase transitoire de montée du niveau de l'eau. Les effets de l'ennoyage ont pu être mis en évidence par mesure de déplacement, mesure tomographique, diagraphie ultrasonique et interférométrie, surveillance microsismique et mesure de gaz :

- on a mesuré des variations de déplacement plus importantes dans la zone ennoyée qu'à l'extérieur de cette zone⁹. Ces variations sont d'autant plus importantes que la roche de la zone de mesure est initialement dégradée. Ces mesures ont été interprétées par modélisation numérique. La Figure 17 montre que l'ennoyage et le dénoyage du site se traduisent, tous deux, par un saut de convergence. Ce phénomène, bien expliqué par le modèle, tient au comportement hydromécanique des roches en ce qui concerne l'ennoyage et à la fracturation intense de l'intercalaire pour le dénoyage. ;

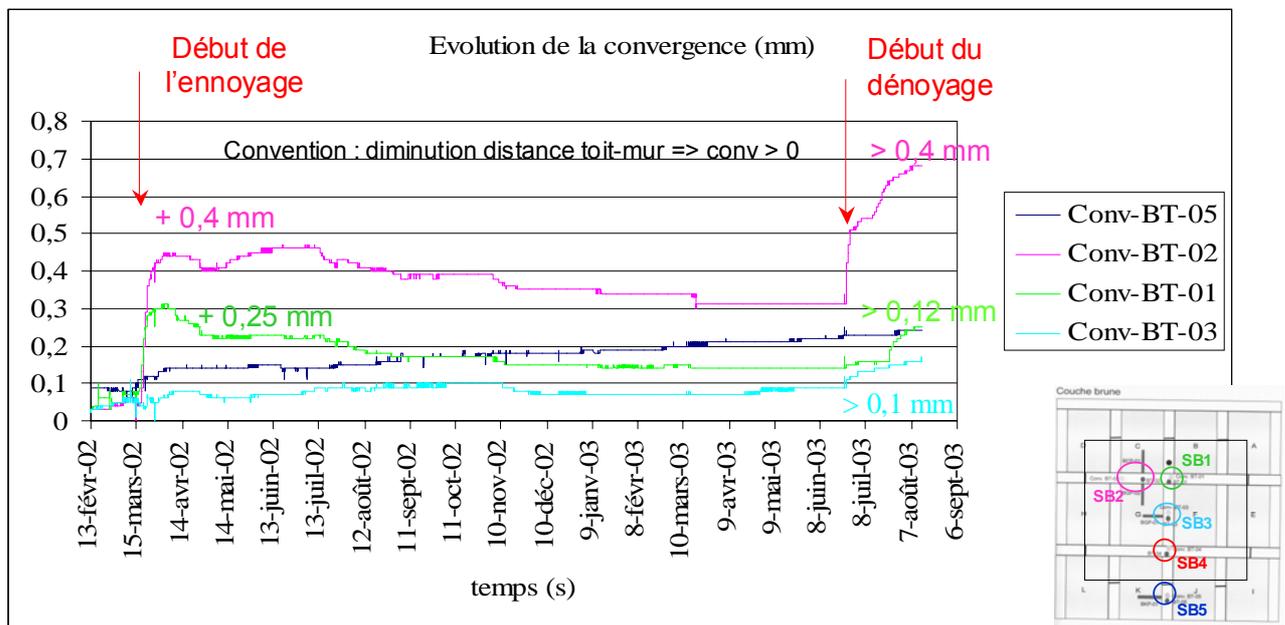


Figure 17 : Suivi de la convergence avant, pendant et après l'ennoyage.

- la tomographie sismique réalisée par l'INERIS met en évidence des vitesses faibles des ondes élastiques de compression (P) en bordure du pilier (sur environ 2 m d'épaisseur) et des vitesses plus élevées vers le centre. Cette couronne de faible vitesse peut s'expliquer par la décompression des terrains endommagés et par l'état désaturé des roches. Après dénoyage du site pilote, la tomographie sismique met en évidence une augmentation globale de la vitesse des ondes P. Cette augmentation est un indicateur de l'augmentation de saturation du pilier¹⁰. La méthode d'interférométrie de vitesse montre une augmentation sensible de vitesse des ondes P pendant toute la durée de

⁹ La sensibilité des appareils de mesure était suffisante pour détecter les variations induites au cours de l'expérimentation (les variations mesurées, bien qu'inférieures au millimètre, restent très supérieures à l'incertitude sur les mesures de convergence et d'expansion $\pm 0,02$ mm).

¹⁰ Les vitesses des ondes P mesurées sur éprouvettes au laboratoire augmentent également de 4 % lorsque l'humidité relative passe de 90 % (atmosphère minière) à 100 %.

l'ennoyage. Cette augmentation est significative vers la fin de l'ennoyage et juste avant le dénoyage, ce qui suggère qu'elle soit liée à la saturation de l'intercalaire. Dès le dénoyage, il se produit une diminution brusque de la vitesse des ondes P associée à la désaturation de la roche. Ce phénomène peut également être associé à une dégradation des propriétés élastiques de la roche endommagée (ouverture des joints, fissuration, endommagement de la matrice rocheuse) ;

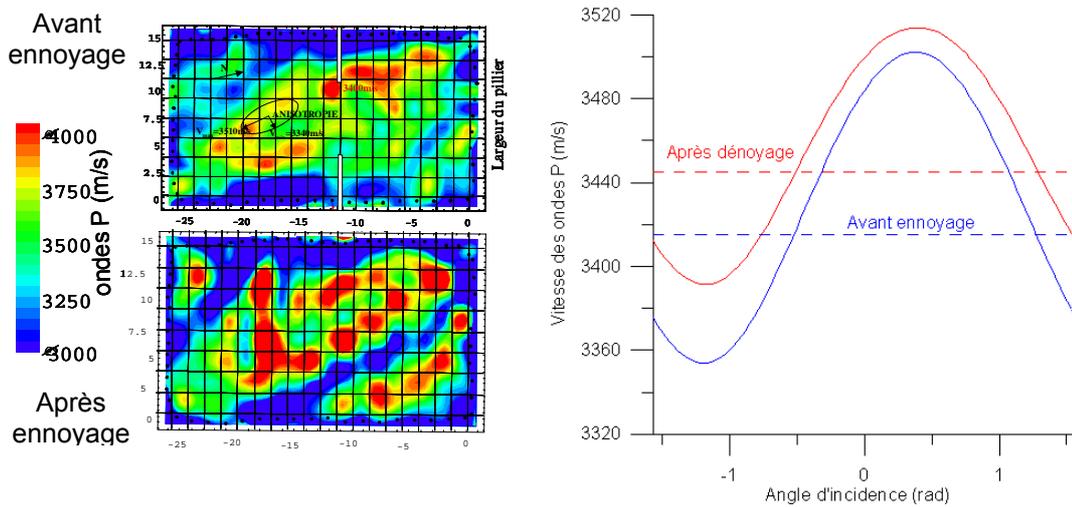


Figure 18 : Représentation des mesures tomographiques dans le pilier

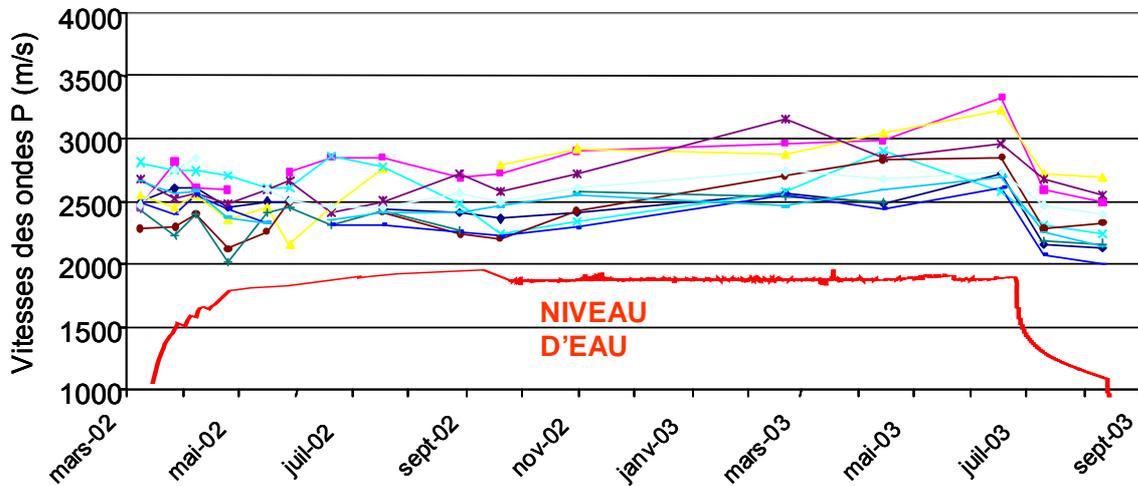


Figure 19 : Représentation des mesures d'interférométrie de vitesse

- la surveillance microsismique du site a permis d'enregistrer des signaux liés à des ruptures de haut niveau énergétique pendant la phase transitoire de l'ennoyage. Lors de la stabilisation de l'eau dans la cavité et pendant le dénoyage, des événements nombreux mais moins énergétiques sont également enregistrés.

6.3 RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR DES EFFONDREMENTS PASSÉS

L'analyse de cas d'affaissements et d'effondrements survenus dans le bassin ferrifère lorrain par modélisation numérique (FLAC^{2D}) a permis d'estimer les caractéristiques *in situ* des matériaux du bassin ferrifère lorrain, ainsi que la réduction de ces caractéristiques suite à l'ennoyage des anciennes exploitations.

Comme nous l'avons déjà précisé, la modélisation des affaissements d'Auboué (1996) et de Moutiers (1997), survenus après l'ennoyage du bassin sud, a montré que l'on ne pouvait expliquer l'effondrement des piliers sans supposer une dégradation préalable du toit de la couche exploitée. Cette dégradation conduit à la formation d'une cloche d'éboulement et à une augmentation de l'élancement des piliers. La ruine des piliers est obtenue dans les deux cas alors que la hauteur d'eau était relativement faible au-dessus du toit de la couche exploitée (13 m dans le cas de l'effondrement d'Auboué et 7 m dans le cas de l'effondrement de Moutiers).

Compte tenu de la faible hauteur d'eau dans l'essai de Tressange, l'effet négatif lié à l'augmentation de la pression interstitielle reste donc limité. L'effet de l'eau se traduit donc plutôt par une réduction supplémentaire de la résistance des matériaux qui induit tout d'abord des chutes de toit (phénomène produit pendant l'expérimentation de Tressange, voir Photographie 1). puis la ruine des piliers. Cette ruine n'est reproduite par le modèle pour l'effondrement d'Auboué (1996) que pour un facteur de réduction de résistance lié à l'eau (λ_w) compris entre 0,5 et 0,6.



Photographie 1 : Chutes de toit après ennoyage puis dénoyage sur site pilote

Les résultats de ces rétro-analyses doivent être considérés avec prudence, car il reste possible que l'origine de la ruine se trouve dans la phase transitoire de l'ennoyage sachant que les phénomènes liés à cette phase n'ont pas été pris en compte de façon totalement satisfaisante dans la modélisation présentée ici.

6.4 MODÉLISATION DE L'EXPÉRIMENTATION DE TRESSANGE ET PRÉDICTION DES EFFETS D'UN ENNOYAGE RÉEL

Ce travail a consisté à mettre au point des modèles cohérents avec les observations et les mesures réalisées. Nous avons simulé les différentes phases de l'histoire hydrique du site pilote : exploitation pendant 10 ans, arrêt de l'exploitation pendant 30 ans, suivi d'un ennoyage du site pilote pendant 18 mois, puis dénoyage de celui-ci pendant 3 mois. Les résultats du modèle montrent que :

- la non prise en compte des phénomènes liés aux variations du degré de saturation dans le modèle a pour conséquence de sous-estimer, de façon très importante, les effets (endommagement, déplacements) induits par l'ennoyage du site pilote. Il est donc nécessaire de prendre en compte l'histoire hydrique du site. Si l'on se base sur les courbes de rétention (évolution de la pression capillaire (suction) en fonction du degré de saturation) déterminées en laboratoire, l'humidité relative de l'air du site en phase d'abandon (90%) correspond à un degré de saturation de la roche de l'ordre de 35 % ;
- les modèles hydromécaniques en milieu non saturé (avec prise en compte de l'historique hydrique du site : rabattement de la nappe ; exploitation ; ventilation ; abandon du stot en atmosphère ambiante ; ennoyage et dénoyage) prédisent une étendue de la zone désaturée des piliers proche de celle de la zone de faible vitesse trouvée par tomographie. Si on suppose que la résistance de la roche reste égale à celle des échantillons sains, aucun endommagement de roche n'est prédit. Même en réduisant les valeurs de résistance des roches d'environ 30%, pour tenir compte de leur vieillissement de la roche, l'endommagement des piliers reste très limité¹¹ ;
- le modèle, ainsi calibré, prédit convenablement les déplacements induits par l'ennoyage. La convergence supplémentaire mesurée au moment du dénoyage n'est pas simulée de façon satisfaisante (l'intercalaire trop fracturé ne peut être assimilé à un milieu continu comme c'est le cas du modèle)..

Compte-tenu de ces résultats, le modèle développé a été utilisé pour prédire les effets induits par un ennoyage plus proche d'un ennoyage réel du bassin ferrifère. Les simulations montrent que des ruptures en traction peuvent avoir lieu jusqu'à 1,5 m dans les intercalaires au toit et au mur des couches exploitées.

¹¹ Ce faible endommagement peut s'expliquer par le fait que le modèle ne reproduit pas l'endommagement occasionné par le creusement à l'explosif des galeries. Ce mode de creusement provoque, en effet, une réduction de la résistance du minerai en périphérie de pilier par la création d'une fracturation qui n'est pas modélisée ici.

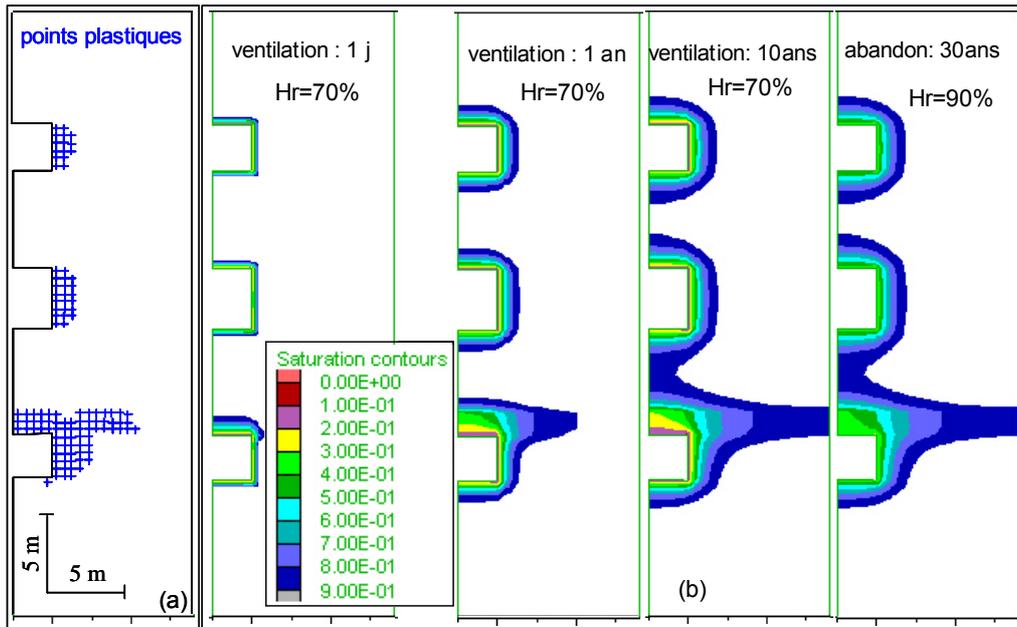


Figure 6 : Simulation de l'endommagement des piliers et historique de désaturation avant ennoyage (modèle tenant compte du milieu non saturé)

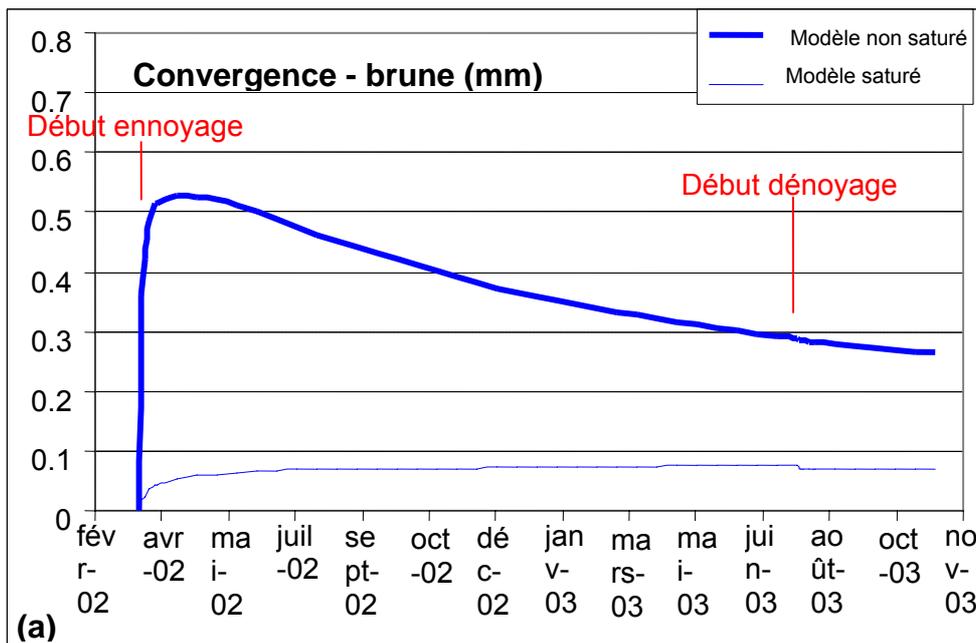


Figure 7: Impact des hypothèses de modélisation (milieu saturé ou non) sur évolution de la convergence calculée (on voit que seul le modèle du milieu non saturé reproduit les mesures in situ).

6.5 IMPACT DE L'ENNOYAGE

Il s'agit de préciser en quoi les travaux liés à l'expérience de Tressange ont permis d'évaluer l'influence de l'eau sur la stabilité des édifices miniers et la composition de l'atmosphère.

Effet de l'influence de l'eau sur la stabilité des édifices miniers

Ces effets ont été clairement mis en évidence en laboratoire, in situ et par modélisation numérique :

- en laboratoire, l'augmentation du degré de saturation des échantillons induit une diminution des valeurs des résistances instantanées. L'impact de l'ennoyage sur le phénomène de vieillissement n'a toutefois pas encore été étudié ;
- *in situ*, l'ennoyage partiel simulé par l'expérimentation de Tressange induit une convergence de la galerie et une expansion faible mais significative du massif. On a observé une chute de blocs du toit à l'intérieur de la zone ennoyée du site pilote ;
- la modélisation numérique met en évidence un effet négatif de l'eau dû au phénomène de succion (pressions capillaires induisant des ruptures en traction). On constate une augmentation importante de cet effet négatif lorsque l'on simule un ennoyage avec une hauteur d'eau importante.

Effet de l'influence de l'eau sur la composition de l'atmosphère :

Les mesures effectuées dans le site pilote ont montré un appauvrissement en O₂ et un enrichissement en CO₂ lors de l'ennoyage de l'intercalaire marneux. Les résultats obtenus sur le site expérimental permettent de confirmer que l'ennoyage de vides miniers du bassin ferrifère peut constituer un élément déclenchant une transformation notable de l'atmosphère, observée dans certaines zones du bassin, comme c'est le cas à Moyeuve-Grande.

Les résultats des travaux concernant les émanations de gaz dans le bassin ferrifère lorrain montrent que l'ennoyage favorise la création d'atmosphères viciées, partiellement désoxygénées et chargées en CO₂, dans les anciens travaux miniers. L'ennoyage met en effet en contact l'intercalaire marneux, riche en pyrite, avec de l'eau ce qui entraîne un drainage acide issu de l'oxydation de la pyrite et donc une consommation importante d'oxygène. L'attaque des carbonates éventuellement présents dans les roches encaissantes par ce fluide acide conduit à la production de CO₂.

7. MÉTHODE D'ÉVALUATION ET DE GESTION DU RISQUE « MOUVEMENT DE TERRAIN » DANS LE BASSIN FERRIFÈRE LORRAIN

7.1 PROBLÉMATIQUE

S'appuyant sur son expérience en matière de méthodes d'évaluation des risques liés aux cavités souterraines, l'INERIS a établi une méthode d'analyse et de hiérarchisation des risques résiduels liés à l'exploitation d'un ancien bassin minier. Cette méthode a été développée et appliquée dans le cadre de la hiérarchisation des risques géotechniques liés au bassin ferrifère lorrain.

L'étude des risques d'un bassin minier soulève deux problématiques principales qui ont nécessité d'élaborer une méthode d'analyse nouvelle :

- la première problématique tient à ce que l'évaluation, la hiérarchisation et la cartographie portent sur un site très étendu (la superficie du bassin ferrifère lorrain est de l'ordre de 1500 km²) tout en conservant un niveau de précision adapté à sa lecture et à son utilisation en terme de gestion de risque ;
- la seconde problématique tient à la quantité importante d'informations qu'un tel projet oblige à traiter. La méthode mise au point doit tirer parti de cette quantité d'informations tout en garantissant la multiplicité des disciplines concernées.

Concrètement, la méthode proposée répond à une exigence de transparence et d'adaptabilité.

L'exigence de transparence implique une méthode explicite et une **formalisation des expertises**. Elle correspond à une demande de la société moderne et s'impose compte tenu de l'importance des enjeux (présents et futurs) et de l'étendue des études.

L'exigence d'adaptabilité en découle : les études concernées sont susceptibles de durer plusieurs années pendant lesquelles **la connaissance augmente**. La méthode doit pouvoir intégrer de nouveaux critères d'évaluation du risque et s'adapter aux acteurs de sa réalisation (ajout de compétences, transmission de compétences...).

7.2 MÉTHODE DÉVELOPPÉE

Une méthode de hiérarchisation a été développée et appliquée dans le seul cadre du risque lié aux « mouvements de terrain ».

Ce risque en surface est d'autant plus fort que :

- la stabilité de l'édifice minier est susceptible d'être mise en défaut (predisposition à la rupture « au fond ») ;
- les effets en surface d'une éventuelle rupture de l'édifice minier seront importants (conséquences de l'instabilité).

Conformément aux éléments présentés en chapitre 4, trois types de phénomène ont été considérés dans ces études :

1. la rupture du toit des vides miniers situés à faible profondeur se répercutant en surface sous forme de **fontis**. L'analyse des conditions d'apparition de fontis a été abordée dans le chapitre 4 de la présente synthèse ;

2. les **éboulements de fronts de mines à ciel ouvert** sont situés dans les zones exploitées à ciel ouvert. En raison de leur spécificité, ces zones de front n'ont pas été incluses dans la hiérarchisation des zones présentant un risque « mouvements de terrain » ;
3. l'effondrement des édifices miniers se répercutant en surface par un **affaissement**. La sélection des zones susceptibles de présenter un risque d'affaissement s'appuie sur des analyses présentées en chapitre 4 (effondrement des piliers au fond, répercussion sensible en surface, présence d'un enjeu) ;
4. les **effondrements généralisés** se caractérisent par une descente brutale des terrains en surface marquée par des crevasses d'ouverture parfois métrique au jour. Compte tenu des spécificités de ce phénomène, les zones susceptibles de présenter un risque d'effondrement ont été identifiées à l'aide de critères établis grâce aux rétro-analyses menées sur des cas d'effondrement survenus dans le bassin ferrifère (chapitre 4).

Les zones faisant l'objet d'études particulières (fontis, mines à ciel ouvert, effondrement généralisé) sont écartées de la hiérarchisation des zones à risque d'affaissement.

La méthode de hiérarchisation consiste à comparer toutes les zones deux à deux sur la base d'un certain nombre de critères, affectés de poids représentant l'importance que chacun revêt dans l'explication du risque.

Le tableau ci-dessous donne les critères et pondérations retenues.

Critères	zones à surveiller sous le bâti	zones à surveiller sous les infrastructures
Critères de prédisposition		
<i>sollicitation totale</i>	5	5
<i>présence de faille</i>	1	1
<i>superposition des piliers</i>	1	1
<i>taille et régularité des piliers</i>	1	1
<i>sensibilité à l'ennoyage</i>	5	5
Critères d'intensité		
<i>profondeur</i>	1	1
<i>affaissement maximum attendu</i>	1	1
<i>déformation (1.5*Am/Hmin)</i>	20	20
Critères de vulnérabilité		
<i>étendue de la zone</i>	1	4
<i>vulnérabilité du bâti</i>	10	sans objet
<i>vulnérabilité des routes</i>	sans objet	4
<i>vulnérabilité des voies ferrées</i>	sans objet	4
<i>vulnérabilité des ouvrages d'art</i>	sans objet	4
<i>vulnérabilité des réseaux divers</i>	sans objet	2

Tableau 5 : Pondération des critères pour chaque calcul de hiérarchisation

La hiérarchisation systématique des zones « à surveiller » (sous bâti et ouvrages d'infrastructure) a permis d'obtenir une hiérarchisation de l'ensemble des zones.

Quatre classes ordonnées vis-à-vis du risque ont été définies. Cette définition a été réalisée en tenant compte des meilleures méthodes de surveillance disponibles à la date de réalisation des études (BAT : Best Available Technology).

- **Classe 1** : zones nécessitant l'application de méthodes de surveillance continue.

Surveillance continue du site : dispositif capable de déclencher une alarme avant que les effets ne se manifestent en surface.

- **Classe 2** : pour ces zones, des méthodes de surveillance périodique suffisent à assurer la sécurité des personnes et des biens. En cas d'apparition du moindre signe précurseur d'un désordre en surface, on passera d'une surveillance périodique à une surveillance continue.

Surveillance périodique du site : il s'agit du suivi du comportement du site au cours du temps. En cas d'évolution défavorable mise en évidence par l'auscultation, la surveillance continue peut être mise en place.

- **Classe 3** : zones pour lesquelles des mesures visant à préciser le risque doivent être prises. A la lumière de ces résultats, il sera décidé s'il convient de surveiller cette zone ou non si le risque n'existe plus (zone déjà effondrée par exemple).

Précision du risque : il s'agit de préciser le risque d'effondrement par une reconnaissance de l'édifice minier. Pour les sites ayant un fort taux de sollicitation, il faut déterminer s'ils ne sont pas déjà affaissés.

- **Classe 4** : pour ces zones, un nivellement de référence en surface suffira, compte tenu du faible niveau de risque.

La méthode de hiérarchisation s'appuie sur les travaux d'un Comité d'Experts qui doit :

- définir et pondérer les critères ;
- établir les limites de classes afin de pouvoir répartir les zones hiérarchisées dans chacune d'elles ;
- valider les résultats.

La méthode de hiérarchisation retenue dans le cas du bassin ferrifère lorrain est une méthode de hiérarchisation multicritère (ELECTRE).

La méthode est d'ores et déjà employée également afin d'établir une hiérarchisation des zones en terme d'aléa (c'est-à-dire indépendamment des enjeux en surface, dans une perspective d'aménagement du territoire (PPRM)). Elle permettra d'aboutir, à terme, à une carte d'aléa sur l'ensemble du bassin ferrifère lorrain.

7.3 RÉSULTATS

La méthode de hiérarchisation développée (entre autres, objet d'une thèse de doctorat, et complétée depuis par de nombreux rapports) et appliquée au bassin ferrifère lorrain a permis :

- d'identifier les zones à risque et proposer un système de surveillance adapté compte tenu des enjeux et de la nature du phénomène redouté pour chacune ;

- d'évaluer les niveaux d'aléa des zones du bassin ferrifère dans une perspective d'aménagement du territoire.

Les principaux apports de la méthodologie développée sont les suivants :

- mise à jour de l'identification et l'évaluation des risques par rapport aux documents disponibles (R111-3) ;
- exhaustivité des zones à risques étudiées ;
- approche systématique et homogène pour l'ensemble du bassin ferrifère lorrain ;
- établissement d'une base de données centralisée, suggérant les informations complémentaires à acquérir pour chaque zone ;
- formalisation et traçabilité de l'approche d'expertise permettant une mise à jour des analyses en fonction d'informations complémentaires acquises.

8. SURVEILLANCE DES RISQUES D'EFFONDREMENT DANS LE BASSIN FERRIFÈRE LORRAIN

8.1 POSITIONNEMENT DU PROBLÈME

L'utilisation des méthodes d'auscultation et de surveillance pour comprendre et prévoir des risques d'effondrements avant que des dommages n'atteignent la surface du sol est une pratique très répandue par les exploitants miniers et les responsables de la sécurité publique. Les méthodes sont classées suivant deux catégories : les méthodes de mesure directe (déformation, nivellement de surface, inclinométrie, mesure de contrainte in-situ, variation de contrainte) et les méthodes de mesure indirecte, particulièrement des techniques géophysiques (microsismique, hydro-acoustique, télédétection, tomographie...). Les mesures directes sont utilisées comme moyen d'auscultation permettant une meilleure compréhension des mécanismes de déformation et d'endommagement affectant le massif rocheux. En termes de surveillance, ces mesures constituent un important complément d'information pour qualifier les méthodes de surveillance, mais elles sont difficilement exploitables dans un cadre de surveillance de zones étendues et/ou inaccessibles. Les mesures indirectes sont destinées à détecter et suivre à distance l'évolution du phénomène redouté. Ces dernières méthodes sont particulièrement intéressantes pour tout projet ayant pour objectif la surveillance des instabilités du massif rocheux et la prévision des désordres en surface.

Dans le cas des mines de fer abandonnées, soumises à des risques d'effondrement brutaux affectant la surface, les méthodes en usage reposent sur des mesures ponctuelles de déformation (convergence, expansion des terrains) et la détection de leurs accélérations comme indicateur prémonitoire d'un risque. Des zones à risque de fontis, dangereuses d'accès, sont suivies par video-surveillance. Dans le cas des zones à risque très étendues et des galeries ennoyées, la surveillance ponctuelle et directe n'est plus suffisante. Il est indispensable de mettre en œuvre des moyens de surveillance performants et capables de détecter des signaux prémonitoires d'un effondrement avant que des dommages n'arrivent à la surface du sol.

Depuis 1995, l'INERIS a mené des études visant à qualifier des méthodes de surveillance adaptées au contexte et à la problématique du bassin ferrifère lorrain. L'état de l'art a rapidement montré que la méthode microsismique pouvait être une méthode adaptée à la détection des prémices d'un processus d'effondrement (ruptures des piliers au fond, puis du toit immédiat, et enfin du recouvrement) des zones assez étendues et inaccessibles.

Les applications de la méthode microsismique dans le monde sont très nombreuses et des résultats tout à fait concluants ont été publiés. C'est dans les mines de charbon en cours d'exploitation que les expérimentations et les applications opérationnelles ont été les plus nombreuses. Les mines d'or d'Afrique du sud et du Canada ont effectué des applications opérationnelles et ont mis en évidence les capacités de la méthode microsismique pour la détection des zones à risque d'instabilités. Enfin, plusieurs applications pour le creusement des tunnels, la surveillance de falaises instables et les cavités de stockage ont aussi été effectuées. En ce qui concerne la surveillance des cavités minières abandonnées, très peu d'applications ont été effectuées et celles qui existent sont très récentes.

Basé sur l'état de l'art et une expérience significative sur l'application de la méthode microsismique en mine en cours d'exploitation¹², l'INERIS a mené une série d'études permettant de déterminer l'apport de cette méthode pour la détection des signes précurseurs des effondrements dans le contexte des cavités minières abandonnées du bassin ferrifère lorrain. D'autres méthodes de suivi ont aussi été développées. La synthèse de l'ensemble de ces travaux est présentée ci-après.

8.2 ETUDES DE QUALIFICATION / VALIDATION DE LA MÉTHODE MICROSISMIQUE

La Figure 20 illustre l'ensemble des expérimentations in situ et des études des cas effectuées depuis 1995 ayant permis de qualifier la méthode microsismique dans le contexte du bassin ferrifère lorrain. La problématique a été abordée suivant plusieurs d'approches (Figure 20) : une approche expérimentale concernant des essais in situ à grande échelle, ponctuels et limités dans le temps, une approche application/étude concernant des suivis de longue durée sur des réseaux permanents et enfin des essais en laboratoire pour approfondir les connaissances sur les phénomènes de rupture.

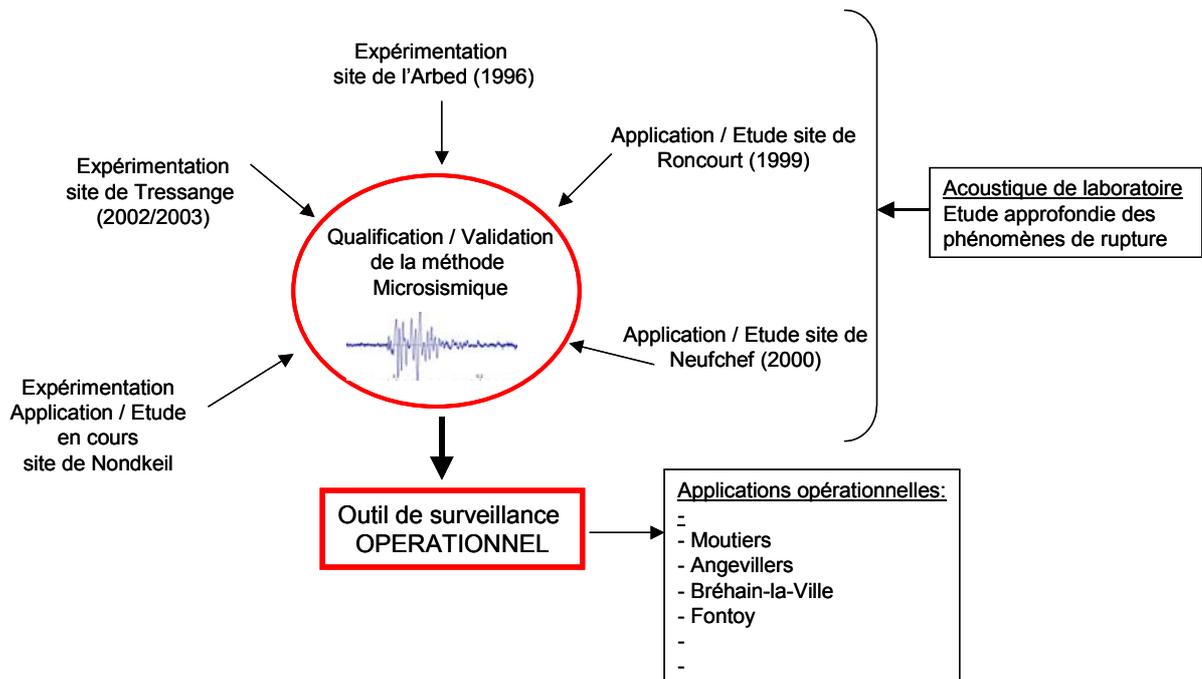


Figure 20 : Synthèse des approches expérimentales et application / études effectuées dans le bassin ferrifère lorrain pour qualifier et valider la méthode de surveillance microsismique. (l'approche expérimentale est ponctuelle et limitée dans le temps ; l'approche Application / Etude est de longue durée sur un réseau de surveillance permanent)

¹² L'INERIS a mis en œuvre, pendant plus des 10 ans, la méthode d'écoute microsismique comme méthode de surveillance de mines de charbon exploitées dans les Bassins Houillers Lorrain (HBL) et du Centre et Midi (HBCM).

8.2.1 APPROCHES EXPÉRIMENTALES

La première expérimentation de surveillance à grande échelle a été effectuée en 1996, dans la dernière mine de fer en activité (mine de Terres Rouges de l'Arbed). Cette expérimentation a consisté à détecter et enregistrer en surface les signaux microsismiques correspondant à des événements apparaissant en profondeur concomitants aux ruptures et effondrements locaux provoqués volontairement dans la mine par la destruction à l'explosif (torpillage) de certains piliers.

Cette expérimentation a montré que les opérations de dépilage effectuées au fond de la mine et, en particulier, les ruptures du foudroyage du toit ont été corrélées sans ambiguïté à une série caractéristique d'événements microsismiques enregistrés par une station sismique placée en surface. L'apport principal de cet essai était de déterminer les paramètres principaux d'un dispositif d'écoute adapté au contexte des mines de fer et le rayon de sensibilité du système de surveillance. L'expérimentation a permis de montrer les capacités de la méthode comme moyen de détection des signes plus au moins précurseurs d'un processus d'effondrement limité au toit (Senfaute et al. 2000, Senfaute et al. 2005).

Cette expérimentation conclut qu'une station de mesure de type tri-directionnelle est capable de surveiller **un rayon d'environ 300 mètres**. Ces premiers résultats ont guidé l'installation des réseaux permanents dont l'objectif essentiel était d'étudier les phénomènes sur le long terme. Le résultat de ces applications est présenté ci-après.

8.2.2 APPROCHES APPLICATION / ÉTUDES

La première expérimentation sur le site de Terres Rouges de l'Arbed a permis d'avancer dans la conception d'un outil opérationnel de surveillance. Néanmoins, des applications de validation sur le long terme étaient indispensables. Par ailleurs, des outils adaptés au traitement des signaux enregistrés dans le contexte du bassin ferrifère devaient être développés et validés.

En 1999, une station de mesure est installée sur le site de la commune de Roncourt, le sous-sol de cette commune a été le siège d'exploitation des mines de fer aujourd'hui abandonnées. En 2000, deux stations sont installées sur le site de Neufchef où des manifestations d'effondrements des mines abandonnées ont été observées. Ces deux sites ont fait l'objet d'un suivi permanent et ont permis de tester et de valider des outils de traitement des données adaptés au contexte du bassin ferrifère. Le tableau ci-après présente les résultats essentiels des cas d'étudiés.

Site	Type de station	Résultats essentiels
Commune de Roncourt 1999	Installation d'une station de mesure 3D.	-Une population significative des événements associés aux tirs des carrières proches de la ville de Roncourt a été enregistrée. -Un outil de localisation des sources sismiques « méthode de localisation par rotation d'onde » a été développé et appliqué aux événements associés aux tirs (Senfaute 1999, Abdul Wahed 2001). Cette première application a montré les capacités de la méthode à estimer la position de la source à l'origine de l'événement à partir de l'azimut et du pendage du rai sismique.
Neufchef 2000	Installation de deux stations de mesure 3D	-Deux méthodes de localisation par rotation d'onde ont été optimisées et testées (méthodes de type déterministe et probabiliste). Application des méthodes sur des signaux synthétiques (études de sensibilités) et signaux réels. Sélection de la méthode la plus adaptée pour l'étude des microséismes (Abdul-Wahed 2001). -enregistrement des microséismes associés aux ruptures avec des désordres observés en surface (Senfaute 2000).
<p>Conclusions : l'expérimentation du site de l'Arbed et les études de suivi / développement d'outil ont fourni les premières bases pour la conception d'un outil opérationnel de surveillance. D'autres expérimentations / études ont suivi ou sont en cours (site de Nondkeil, réseaux opérationnels de surveillance, site de Tressange) permettant de compléter et d'améliorer en permanence les connaissances et la maîtrise de l'outil de surveillance.</p>		

Un cas d'étude particulier : le site de Tressange

Les applications présentées ont été effectuées à partir des capteurs installés en surface dans des sondages. Les phénomènes de foisonnement et de rupture surveillés se localisent dans un rayon d'environ 300 mètres autour de la station de mesure.

Une nouvelle expérience est mise en œuvre sur le site de Tressange. Il s'agit de placer les stations de mesure au niveau même des piliers et d'étudier les processus d'endommagement susceptibles de se produire lors de l'envoyage des piliers. Comme cela a été déjà présenté, ce site a été instrumenté par une large gamme des méthodes de caractérisation et de surveillance. Des méthodes géophysiques de caractérisation (tomographie sismique, diaggraphie ultrasonique, interférométrie des vitesses) complétaient le suivi par écoute microsismique. Des mesures mécaniques (déformation, mesures de contraintes, dilatométrie ...) ont aussi été mises en œuvre et des corrélations très intéressantes avec les méthodes géophysiques ont été observées.

Le tableau de l'annexe 3 présente une synthèse sur l'apport des différentes méthodes utilisées. La méthode de surveillance microsismique a permis de détecter des ruptures du massif pendant l'envoyage. L'étude montre que c'est particulièrement pendant la montée de l'eau dans la cavité que la microfissuration la plus importante se produit (Wassermann 2003, Wasserman et al 2004). Ainsi, lors de l'envoyage des galeries, une vigilance particulière s'impose dès le démarrage de l'envoyage et pendant toute la phase transitoire.

Essais acoustiques de laboratoire

Les expérimentations et études de terrains ont été complétées par des essais acoustiques en laboratoire. L'observation de l'émission acoustique au cours d'une sollicitation mécanique constitue une source d'information complémentaire pour la compréhension du processus de ruptures des roches. Les essais et analyses en laboratoire effectués sur des échantillons du bassin ferrifère lorrain ont mis en évidence les liens entre les ruptures des différents matériaux (piliers, intercalaires, recouvrement) et les signatures sismiques (Wassermann et al 2003). Ces études constituent une aide pour mieux comprendre les mécanismes de ruptures à l'origine des signatures sismiques.

9. CONCLUSION

Une synthèse des travaux réalisés dans le contexte de la fermeture et de l'après-fermeture des mines de fer de Lorraine a été présentée. Ce travail s'inscrit dans le cadre du programme d'appui technique de l'INERIS (EAT-DRS-03) au Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie (MinEFI/DARQSI). Destiné aux développements méthodologiques dans le domaine de l'après-mine, ce programme constitue la contribution de l'INERIS au groupement d'Intérêt Scientifique GISOS (INERIS – BRGM – INPL – ENSMP).

L'essentiel des travaux réalisés jusqu'à présent concerne le bassin ferrifère lorrain. Cela tient d'abord aux nombreux effondrements et affaissements survenus dans ce bassin. Ceci s'explique aussi par la superficie importante de ce bassin où le risque d'instabilité à long terme de la surface du sol est réel, dans certaines zones exploitées par la méthode des chambres et piliers abandonnés (à plusieurs niveaux proches et mal superposés). Enfin, les accidents survenus à la suite de l'ennoyage du bassin sud soulèvent des interrogations quant à l'ennoyage du bassin nord, commencé récemment, après une longue période de réflexion.

Dans ce contexte l'INERIS a entrepris de nombreuses études et recherches pour développer des méthodes et moyens d'évaluation des différents aléas : fontis, effondrement, affaissement, gaz. Il a également développé une méthode d'analyse multicritère de hiérarchisation des risques. Cette méthode est largement mise en œuvre par l'INERIS et GEODERIS sur l'ensemble des zones du bassin ferrifère lorrain.

Enfin, des techniques de surveillance opérationnelles des zones à risque d'effondrement ont été mises au point à partir d'une méthode géophysique la mieux adaptée, celle de surveillance microsismique.

Ces différents travaux ont nécessité le développement de modèles numériques pour la prédiction de la stabilité à long terme des sites. Des lois de comportement tenant compte de l'endommagement et des interactions entre l'eau, l'air et la roche ont dû être mises au point avant d'être implantées dans les codes de calcul destinés à la modélisation du site.

Le recours aux expérimentations in situ correspond à une autre activité importante menée dans le contexte du bassin ferrifère lorrain. Ce travail a été réalisé dans le double objectif de comprendre le comportement réel des ouvrages et du massif rocheux et de valider, par ailleurs, les modèles développés pour la prédiction du comportement à long terme.

L'expérimentation in situ réalisée sur le site pilote du stot de Tressange s'inscrivait dans ce contexte. Cette expérimentation, à grande échelle, unique en son genre, a permis d'étudier l'impact de l'ennoyage sur le comportement mécanique, la qualité des eaux et les émissions de gaz. Un nombre important de capteurs de déplacement, de pression, de composition de gaz et de surveillance géophysique (tomographie et diagraphe sismiques, surveillance microsismique...) a été mis en place. Ce dispositif a permis de suivre le comportement du site avant et pendant l'ennoyage de même qu'après le dénoyage. Les résultats obtenus ont mis en évidence l'état très fracturé de l'intercalaire marno-calcaire, doté de propriétés mécaniques médiocres. Ce banc constitue un élément critique du point de vue de la stabilité à long terme, dans la mesure où ses propriétés se dégradent au contact de l'eau et donc sous l'effet de l'ennoyage.

Par ailleurs, les mesures tomographiques ont indiqué que la périphérie des piliers se trouve dans un état décomprimé. Ce résultat, confirmé par la mesure de contrainte, laisse penser que le taux de défruitement effectif est bien plus grand que le taux apparent.

Enfin un saut de convergence de la galerie a été mis en évidence dès l'ennoyage du site. Expliqué par le modèle, ce phénomène tient au comportement hydromécanique des roches mises au contact de l'eau alors qu'elles se trouvaient préalablement dans un état non saturé (du fait de l'aérage et du rabattement de la nappe).

Grâce à l'ensemble des outils et méthodologies ainsi développés, on dispose aujourd'hui d'une cartographie précise des zones à risque à l'échelle de l'ensemble du bassin ferrifère lorrain. De nombreux réseaux de surveillance sont en place et se complètent encore. Le savoir-faire, les méthodes et les moyens développés peuvent désormais servir à d'autres exploitations minières abandonnées qu'il s'agisse de mines de fer ou d'autres mines (sel, charbon, mines métalliques...).

Quant à la poursuite des travaux sur le bassin ferrifère lorrain, l'arrêt récent du pompage de l'eau entraînant l'ennoyage progressif du bassin nord implique un suivi de près de l'ennoyage et de ses divers effets sur la stabilité des terrains, la qualité des eaux, les émissions gazeuses... Cela exige de poursuivre, parallèlement à la surveillance opérationnelle du bassin, les travaux en amont sur l'interaction eau-roche, le comportement à long terme des ouvrages et le vieillissement des roches.

Une autre perspective importante est le développement des techniques de surveillance et de traitement des terrains vis-à-vis du risque de formation des fontis.

10. BIBLIOGRAPHIE

(Remarque : nous listons ici les références bibliographiques qui n'ont pas été produites par l'INERIS dans le cadre du programme EAT-DRS-03. L'ensemble des autres références est situé en annexe 1 et 2).

GEODERIS, 2000, Synthèse des connaissances sur les réservoirs d'air de mine et des émanations de radon dans le bassin ferrifère de Briey-Longwy; Rapport GEODERIS référencé R-2000/005 du 5 juin 2002.

DRIRE Lorraine, Compte-rendu de la réunion "GT3-air vicié" du 25 octobre 2000.

Monomakoff. Dangers résultant de la présence du grisou dans l'atmosphère de la mine. Rapport CERCHAR "Grisou – Grisoumétrie – Anémométrie", référencé CTO-Jli/MB 72-76-38, 1978.

Baubron, J-C., Hamm, V., Pinault, J-L., 2004, Elaboration de la méthodologie de mesurage et d'interprétation de la concentration en radon dans les habitations situées dans l'emprise de travaux miniers souterrains. Rapport BRGM référencé RP-53886-FR de décembre 2004.

Circulaire conjointe DGS n°99-46 et DGUHC UHC/QC/10 n°99-32 du 27 janvier 1999 relative à l'organisation de la gestion du risque lié au radon (BO min. équip. N°99/9 du 25 mai 1999).

D. GRGIC, F. HOMAND, A. GIRAUD, Etude du comportement partiellement saturé du minerai de fer : caractérisation mécanique et modélisation. Rapport GISOS n°62. Décembre 2002.

D. GRGIC, F. HOMAND: Etude expérimentale du comportement hydromécanique du minerai de fer de la couche grise (sondage de Joeuf). LAEGO-ENSG Rapport GISOS n°2 Septembre 1999

11. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe 1	Liste des rapports INERIS produits dans le cadre du programme EAT-DRS-03	6 A4
Annexe 2	Liste des publications INERIS produites dans le cadre du programme EAT-DRS-03	7 A4
Annexe 3	Description de l'expérimentation de Tressange	4 A4