

RAPPORT D'ÉTUDE
DRS-13-135992-01259B

04/11/2013

Méthodologie de surveillance du risque de fontis en cavité souterraine par méthode acoustique.

Programme EAT-DRS-06 « Centre National de Surveillance des Risques du Sol et du Sous-sol ».

Méthodologie de surveillance du risque de fontis en cavité souterraine par méthode acoustique.

Programme EAT-DRS-06 « Centre National de Surveillance des Risques du Sol et du Sous-sol ».

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.

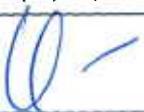
REMERCIEMENTS

Cette opération de recherche a été réalisée dans le cadre du programme d'Étude et d'Appui Technique DRS06 financé par le Ministère de l'Environnement, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE), la région Lorraine via le Groupement d'Intérêt Scientifique sur l'Impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains (GISOS) ainsi que par le Fond Européen de Développement Régional (FEDER).

Les expérimentations *in situ* ont été rendues possibles grâce au concours de GEODERIS, du BRGM-DPSM et de l'Inspection Générale des Carrières de Paris.

Enfin ce rapport a fait l'objet d'une relecture intégrale par deux évaluateurs, que nous remercions vivement pour leur lecture avisée et leurs conseils pertinents qui ont permis d'améliorer significativement le présent document :

- Prof. Arnaud Tourin, acousticien, directeur de l'Institut Langevin – Ondes et images – ESPCI ParisTech ;
- M. Albin Guyon, ingénieur, adjoint à l'Inspecteur Général des Carrières, Inspection Générales des Carrières de Paris, et membre de la commission scientifique de la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol de l'INERIS.

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	C. NADIM	E. KLEIN	P. BIGARRE
Qualité	Ingénieur à l'Unité Auscultation et Surveillance Géotechnique et Géophysique	Ingénieur à l'Unité Auscultation et Surveillance Géotechnique et Géophysique	Directeur délégué des Risques du Sol et du Sous-sol
Visa			

Résumé

Les cavités souterraines de faible profondeur, naturelle ou anthropique, peuvent être à l'origine de risques de mouvements de terrains par fontis ou par effondrement localisé. Ce risque touche l'ensemble du territoire national.

Dans l'attente d'un traitement, une surveillance peut permettre de gérer le risque. Aujourd'hui, cette surveillance est essentiellement réalisée par inspection visuelle et par instrumentation géotechnique conventionnelle. Cette démarche présente plusieurs limites d'appréciation de la cinétique des phénomènes et d'exposition des équipes intervenantes. Il apparaît donc que la surveillance du risque fontis peut bénéficier largement d'un apport instrumental.

Dans le cadre d'une opération de recherche financée par le Ministère de l'Environnement, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE) ainsi que par le Fond Européen de Développement Régional (FEDER), l'INERIS a testé et évalué **L'écoute acoustique** en tant que technique instrumentale innovante pour la surveillance du risque fontis. .

L'opération de recherche a consisté à :

- Concevoir les équipements nécessaires à la mesure en cavité souterraine : conception de capteurs et des éléments spécifiques de la chaîne d'acquisition ;
- Tester en grand sur site pilote et retour d'expérience opérationnel pour validation de principe, métrologique et technique ;
- Synthétiser les résultats pour identifier les avantages et les limites de la technique.

L'écoute acoustique s'est avérée capable de caractériser les chutes de blocs qui marquent l'évolution d'un fontis, d'avoir un rapport coût/bénéfice acceptable et d'être suffisamment robuste pour offrir une qualité métrologique pérenne dans le temps et de limiter les besoins de maintenance.

Une méthodologie d'instrumentation par écoute acoustique d'une cavité nouvelle pour la surveillance du risque de fontis est donc proposée sur la base des retours d'expérience obtenus par l'INERIS sur sites instrumentés au cours de l'opération. Cette méthodologie décrit les étapes principales proposées pour valider le principe d'une surveillance acoustique, dimensionner et caler un dispositif d'écoute et enfin le tester après installation.

Le cas d'une instrumentation depuis la surface, sans aucun accès au fond, est abordé en fin de document et permet d'ouvrir la méthode aux cavités très dégradées ou inaccessibles.

Mots clés : fontis, acoustique, surveillance, risque.

Table des matières

1. INTRODUCTION – CONTEXTE	11
1.1 Le risque fontis	11
1.2 Surveillance du risque fontis	13
1.3 Opération de recherche INERIS.....	14
1.4 Sites instrumentés.....	15
1.4.1 Mine de Franchepré, Moyeuve-Grande (57)	15
1.4.2 Mine Côte d’Hayange, Hayange (57).....	17
1.4.3 Autres sites.....	19
1.5 Plan du rapport.....	19
2. NOTIONS D’ACOUSTIQUE FONDAMENTALES.....	21
2.1 Pression acoustique	21
2.2 Niveau de pression.....	21
2.3 Densité d’énergie acoustique	22
2.4 Spectre fréquentiel et pondération	23
2.5 Propagation et atténuation	24
2.5.1 Propagation par réflexions.....	24
2.5.2 Atténuation d’une onde acoustique.....	25
2.5.3 Atténuation dans le cas des cavités souterraines.....	26
2.6 Réverbération.....	27
2.7 Bruit de fond et activité sonore d’une cavité.....	29
2.7.1 Bruit de fond	29
2.7.2 Activité sonore	29
3. PRINCIPE DE LA SURVEILLANCE ACOUSTIQUE DES CAVITES.....	31
3.1 La mesure	31
3.2 Principe de détection.....	32
3.3 Enregistrement de chute de bloc.....	33
4. EQUIPEMENTS ASSOCIES	37
4.1 Microphones.....	37
4.2 Sonomètre.....	38
4.3 Unité d’acquisition	40
4.4 Source acoustique omnidirectionnelle.....	41

5. ÉTUDE DE LA FAISABILITE DE LA SURVEILLANCE ACOUSTIQUE.....	45
5.1 Reconnaissance des mécanismes de dégradation de la cavité	45
5.2 Reconnaissance de la géométrie de la cavité	46
5.3 Évaluation de l'activité sonore de la cavité.....	47
5.3.1 Objectif de l'évaluation de l'activité sonore	47
5.3.2 Mesure du bruit de fond.....	48
5.3.3 Evaluation de l'activité sonore	50
5.4 Évaluation de la susceptibilité acoustique.....	53
5.5 Bilan de l'étude de faisabilité.....	55
6. DIMENSIONNEMENT D'UN RESEAU DE CAPTEURS	59
6.1 Caractérisation de l'événement minimal.....	59
6.2 Evaluation de l'atténuation des ondes acoustiques.....	60
6.2.1 Objectifs.....	60
6.2.2 Difficultés de l'évaluation	61
6.2.3 Méthode d'évaluation de l'atténuation	62
6.2.4 Illustrations de la méthode.....	63
6.3 Bilan de la méthode de dimensionnement	67
7. CALAGE DU DISPOSITIF DE TELESURVEILLANCE	69
7.1 Validation de la sensibilité du système et de la détectabilité des phénomènes	69
7.2 Localisation des événements acoustiques	72
7.2.1 Localisation par cartographie.....	72
7.2.2 Localisation par calcul des temps de trajet, en rais droits.....	75
7.2.3 Localisation par calcul des temps de trajet, en rais courbes.....	82
7.3 Caractérisation d'un événement.....	86
7.4 Définition du protocole de surveillance.....	87
7.4.1 Récupération des données.....	87
7.4.2 Traitement des événements	88
7.4.3 Mise en œuvre d'une procédure de surveillance	88
7.5 Bilan du calage du réseau.....	91
8. MISE EN TEST DU DISPOSITIF DE TELESURVEILLANCE	93
8. MISE EN TEST DU DISPOSITIF DE TELESURVEILLANCE	93
8.1 Approfondissement de la connaissance de l'activité sonore	93
8.2 Création d'un catalogue de signaux de référence	93

8.3	Validation du fonctionnement technique et opérationnel / Retour d'expérience.....	94
8.4	Bilan de la mise en test du dispositif	96
9.	BILAN GLOBAL DE LA METHODOLOGIE.....	97
10.	CAS DE L'INSTRUMENTATION DEPUIS LA SURFACE	99
10.1	Principe	99
10.2	Isolation acoustique du forage	101
10.3	Métrologie	101
11.	ELEMENTS DE COUT	103
12.	CONCLUSIONS	105
13.	GLOSSAIRE ET UNITES	109
14.	REFERENCES	111

SECTIONS 1 à 4 :

Présentation de la surveillance acoustique du risque fontis

Les sections 1 à 4 présentent le principe de la surveillance acoustique du risque fontis.

Tout d'abord un bref rappel du phénomène et des moyens actuels de surveillance est donné en section 1. Compte-tenu des limites constatées de cette surveillance, principalement par contrôle visuel, une opération de recherche a été engagée afin de proposer une alternative instrumentale. L'écoute acoustique s'est avérée être la méthode la plus en adéquation avec le cahier des charges défini. L'opération ayant pour but de valider la méthode *ipso facto*, dans des conditions réelles de terrain, des dispositifs de surveillance ont été installés en sites à risque de fontis. Ces sites sont donc décrits brièvement, puis seront évoqués très régulièrement dans la seconde partie de ce rapport.

La section 2 revient sur certains principes simples et fondamentaux en acoustique. Ces notions permettent d'aborder les problématiques de mesure acoustique, de propagation et d'atténuation des ondes au sein d'une cavité souterraine. La notion d'« activité acoustique » propre à la surveillance du risque fontis par écoute acoustique est également introduite.

La méthode de l'écoute acoustique est en suite explicitée en sections 3 et 4 : le principe général est décrit ainsi que les équipements techniques associés (équipements de surveillance, de mesure et de contrôle). La démarche complète d'instrumentation d'une cavité nouvelle sera ensuite détaillée dans les sections 5 à 8.

1. INTRODUCTION – CONTEXTE

1.1 LE RISQUE FONTIS

Les cavités souterraines sont à l'origine de différents risques de mouvements de terrains tels que les effondrements et les affaissements. Le fontis est un effondrement dit « localisé », généralement de petite dimension, initié par un éboulement du toit et qui ne peut se stabiliser dans la configuration d'une cloche stable par effet de voûte. Il s'agit d'un phénomène propre aux cavités situées à faible profondeur, situation qui empêche l'arrêt de l'évolution du phénomène par foisonnement. A terme, le fontis débouche brusquement en surface, créant un « entonnoir » [1], voir Figure 1 et Figure 2.

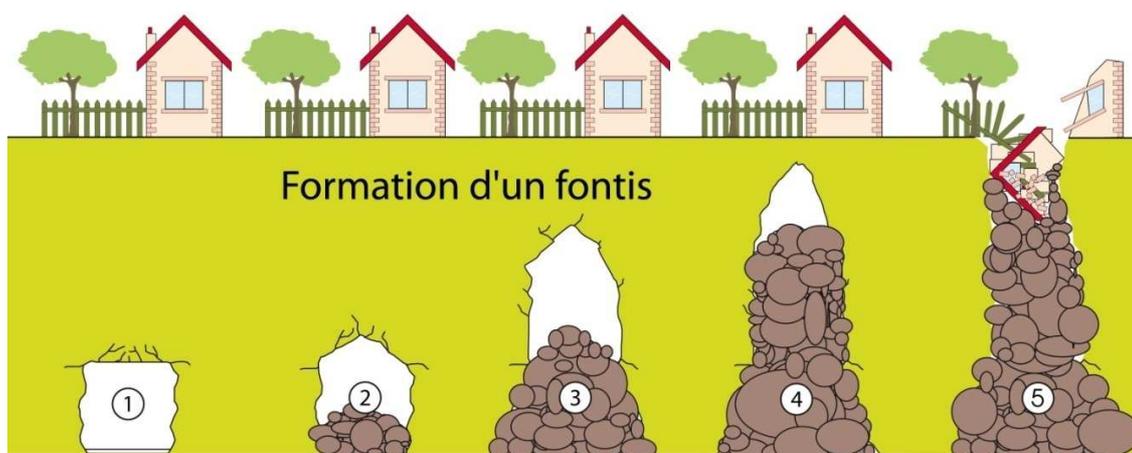


Figure 1 : Mécanisme de formation d'un fontis : éboulement initial se propageant de proche en proche vers la surface sous la forme d'une cloche.



Figure 2 : Fontis débouchant sur une route, dans le massif de l'Hautil (Véxin), depuis une carrière de gypse sous-jacente (source photo : Mediaseine).

Ce type de risque, qui touche largement la plupart des régions sur le territoire national, couvre l'essentiel des cavités naturelles ou anthropiques : après-mine, carrières abandonnées, marnières, karsts, tunnels et ouvrages civils abandonnés, etc.

N.B : Ce document traitera essentiellement des cavités anthropiques, les zones de dissolution et cavités karstiques n'ayant pas fait l'objet de tests spécifiques.

La prédisposition à voir un site développer un fontis à l'aplomb d'anciennes exploitations dépend de la combinaison de deux facteurs [2] :

- L'instabilité de l'ouvrage souterrain : celle-ci dépend de la largeur, ou portée, du toit des chambres ou des galeries concernées. Les fontis se développent préférentiellement dans des zones où le toit présente de larges portées non soutenues. En général, la largeur est de plusieurs mètres et peut correspondre à un carrefour de galeries, à un pilier ruiné, voire à une chambre vide ou partiellement remblayée.
- La nature des terrains de recouvrement : la présence de bancs massifs, épais et résistants au sein du recouvrement contribue, à largeur de galerie égale, à diminuer la prédisposition d'un site à voir se développer des fontis en surface. Dans ce cas, il y a une stabilisation du phénomène par la formation d'une voûte stable. En revanche, la présence d'un recouvrement peu épais constitué de matériaux peu cohésifs et faiblement résistants comme des limons, des marnes, ou des bancs très fracturés, facilite la propagation de l'instabilité vers la surface et donc son apparition.

Les manifestations en surface varient d'un simple tassement accompagné de fissures jusqu'à la formation d'un cratère aux bords francs et dont le diamètre peut atteindre plusieurs mètres.

Les dimensions du désordre et le caractère souvent brutal de sa manifestation en surface font du fontis un phénomène dangereux, notamment lorsqu'il se développe au droit ou à proximité de secteurs urbanisés. Les conséquences sur la sécurité des personnes et des biens dépendront naturellement du diamètre de l'effondrement en surface et de la profondeur du cratère. En particulier, cette profondeur peut atteindre celle de l'ouverture de la cavité sous-jacente, provoquant dans certains cas un phénomène de grande envergure. Par l'exemple, on peut illustrer le propos du fontis survenu en 2005 sur la commune de Roquevaire (13), au-dessus d'une ancienne carrière de gypse, en Figure 3.



Figure 3 : Fontis de grands diamètre et profondeur survenu sur la commune de Roquevaire (13) dans la zone des « Plâtrières », au-dessus des anciennes carrières de gypse.

1.2 SURVEILLANCE DU RISQUE FONTIS

Face à un risque avéré de fontis ([2]), différentes approches de mitigation visant à diminuer le risque jusqu'à un niveau acceptable sont envisageables :

- Suppression ou diminution de l'intensité de l'aléa par traitement de la cavité (comblement ou confortement de la cavité ou d'une cloche de fontis) ;
- Réduction de la vulnérabilité des enjeux par surveillance, déplacement des enjeux, etc.

Le choix entre ces différentes approches se fera selon différents critères : faisabilité technique, coût d'investissement et d'entretien, impact social ou environnemental, pérennité de la solution choisie, etc.

En particulier, la surveillance ne réduit pas l'aléa mais réduit la vulnérabilité des enjeux de sécurité publique, rendant ainsi le risque acceptable. Une surveillance peut ainsi permettre de maintenir les populations en place, pour un coût d'investissement souvent très inférieur à celui d'un traitement. Cependant dans l'attente de la mise en œuvre d'une solution définitive, son coût constant et le fait que la surveillance ne supprime pas le risque sur les biens font qu'il s'agira plutôt d'une solution temporaire.

Aujourd'hui, la surveillance du risque fontis est essentiellement réalisée par inspection visuelle. Cette démarche offre l'avantage d'une appréciation directe des phénomènes en évolution. Cependant, elle présente plusieurs limites :

- il est nécessaire que la zone à risque et la totalité du cheminement d'accès soient praticables. Certaines zones pouvant être éloignées de plusieurs kilomètres du plus proche point d'accès, cela peut parfois représenter un point bloquant important ;
- aucune information n'est connue *a priori* entre les visites. Les phénomènes très rapides (chute de bloc) seront difficilement détectés et/ou anticipés ;
- les informations récoltées ne concernent que les surfaces libres et les zones accessibles visuellement dans de bonnes conditions d'inspection ;
- la sécurité des intervenants ne peut pas être garantie. Certaines cavités étant fortement dégradées, une exposition régulière d'équipes, même expérimentées, peut s'avérer délicate.

Une surveillance instrumentale est parfois employée en complément. On peut retenir notamment l'emploi de techniques d'auscultation par forage pour le suivi du risque fontis : laser, vidéo, photographie. Évidemment, cela suppose que des forages débouchant en galerie (non ennoyées) soient disponibles.

Des capteurs de déformation et de pression sont également utilisés, lorsque les travaux sont accessibles, pour suivre des phénomènes spécifiques, de type fracture, décollement, convergence, etc. Cependant, ces capteurs apportent une information très localisée qui ne permet pas de préjuger de l'évolution en grand de galeries et zones adjacentes. Or ils ne peuvent pas être multipliés à l'envie sur l'ensemble d'une cavité de grande étendue, pour des raisons évidentes de faisabilité technique et de coût d'installation. Or une zone à fontis présente souvent de nombreux départs de fontis. Il est également très compliqué, voire impossible, d'instrumenter de manière classique de grandes chambres ou des carrefours de galeries. Enfin, le risque de perdre les instruments à chaque évolution du fontis est élevé si ceux-ci sont placés directement dedans.

Aussi, cette instrumentation est généralement mise en œuvre en complément d'une surveillance visuelle et dans des zones pour lesquelles soit l'aléa soit l'enjeu est particulièrement important et nécessite un suivi continu.

1.3 OPERATION DE RECHERCHE INERIS

Compte-tenu des limites des méthodes actuelles de la surveillance du risque de fontis évoquées ci-dessus, l'INERIS a démarré en 2007 une opération de recherche visant à concevoir et valider des méthodes innovantes de surveillance du risque fontis. Cette opération a été réalisée dans le cadre du programme d'Étude et d'Appui Technique DRS06 financé par le Ministère de l'Environnement, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE), la région Lorraine (GISOS) ainsi que par le Fond Européen de Développement Régional (FEDER).

Les méthodes étudiées doivent *in fine* permettre de pallier tout ou partie des limites évoquées. En particulier, les critères ci-dessous ont été considérés comme essentiels :

- la mesure doit évidemment pouvoir suivre un phénomène caractérisant clairement l'évolution de fontis. Pour simplifier l'interprétation des mesures, la relation entre le phénomène mesuré et l'évolution effective du fontis doit être la plus directe et la mieux connue possible ;
- La mesure doit permettre de détecter les précurseurs du phénomène surveillé afin de permettre la meilleure anticipation possible. Ceci implique notamment la présence de capteurs au fond plutôt qu'en surface ;
- la méthode doit permettre de surveiller une cavité étendue et/ou à géométrie complexe pour un coût acceptable. Par conséquent, cela signifie que le nombre de capteurs à mettre en œuvre et leur coût d'installation doivent être aussi faibles que possible pour une cavité donnée ;
- enfin les cavités à risque de fontis ou leur cheminement d'accès depuis la surface peuvent être fortement dégradés, voire impraticables. Il est donc essentiel que les travaux d'installation soient aussi légers que possible, afin de faciliter la mise en œuvre en contexte délicat et surtout de perturber au minimum la cavité et ainsi de limiter l'exposition des équipes d'installation.

L'opération menée par l'INERIS a consisté à :

- Rechercher des méthodes de mesure répondant *a priori* aux critères évoqués ci-dessus ;
- Concevoir les équipements nécessaires à la mesure en cavité souterraine : conception de capteurs et des éléments spécifiques de la chaîne d'acquisition ;
- Tester en grand sur site pilote pour validation de principe, métrologique et technique. Les sites pilotes exploités sont décrits dans la section suivante ;
- Synthétiser les résultats, identifier des limites restantes et décrire une méthodologie de mise en œuvre dans une cavité nouvelle à instrumenter.

Au cours de cette opération de recherche, la méthode d'**écoute acoustique** est apparue comme un bon compromis vis-à-vis des critères décrits ci-dessus. Les raisons techniques de ce choix sont explicitées en section 3.1. En conséquence, le présent rapport fait essentiellement état des résultats obtenus concernant cette méthode.

Une méthodologie de surveillance, par écoute acoustique du risque de fontis dans une cavité nouvelle, est proposée sur la base des retours d'expérience obtenus par l'INERIS sur sites instrumentés au cours de l'opération (cf. section 1.4). Cette méthodologie décrit les étapes principales proposées pour valider le principe d'une surveillance acoustique, dimensionner et caler un dispositif d'écoute et enfin le tester après installation.

1.4 SITES INSTRUMENTES

1.4.1 MINE DE FRANCHEPRE, MOYEUVE-GRANDE (57)

La mine de Franchepré est située sur la commune de Moyeuve-Grande (57). L'exploitation, en chambres et piliers, est relativement ancienne (fin d'exploitation

au début du XXème siècle). Les galeries sont étroites (largeur typiquement inférieure à 2 m, hauteur variant entre 1,8 et 2,2 m) et parfois irrégulières. La profondeur de la mine peut-être localement assez faible (entre 15 et 20 m), la surface étant en dénivelée.

Compte-tenu de cette faible profondeur, de l'état passablement dégradé du toit en de nombreux endroits ainsi que d'enjeux en surface une zone à risque de fontis (référéncée R158J1(1)) a été identifiée par GEODERIS, cf. Figure 4.

Du fait de son ancienneté, la mine présente une géométrie très irrégulière, avec de nombreuses interconnexions entre les chambres. Les parois sont très accidentées : présence de nombreux blocs rocheux au sol, parois rugueuses ou reconstituées, toit fracturé.

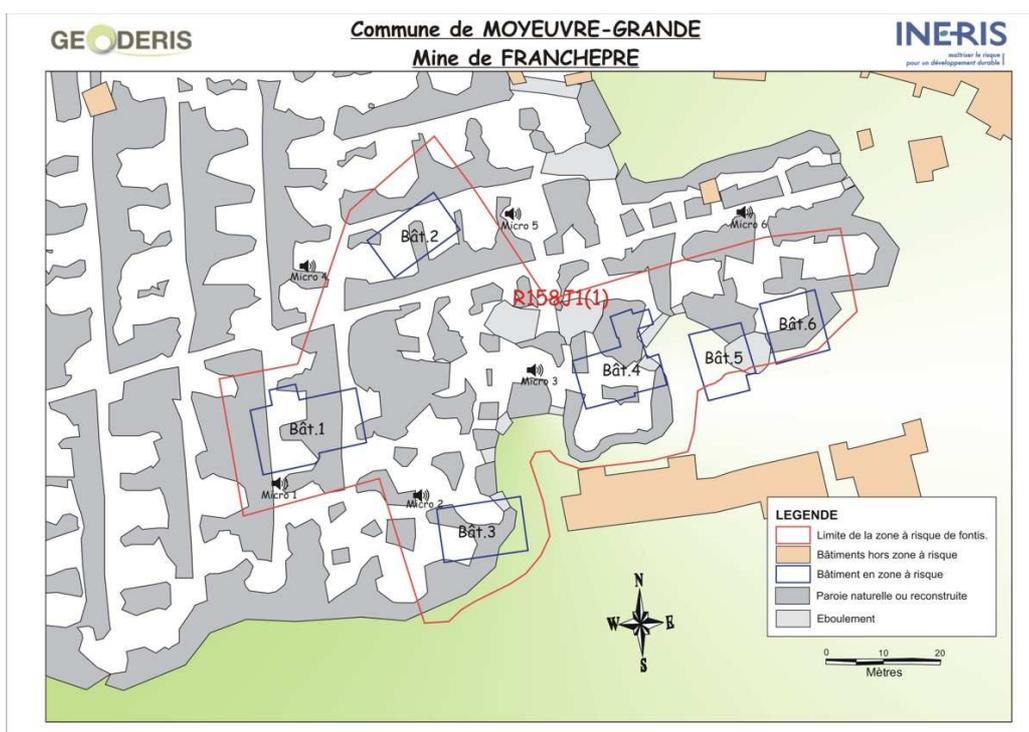


Figure 4 : Plan de la mine de Moyeuivre-Grande, quartier de Franchepré. La zone à risque est délimitée en rouge. Le contour des bâtiments sus-jacents apparaît en bleu. Les microphones sont figurés en noir.

Cette zone se situe à environ 300 m de l'entrée de la mine, depuis la route départementale D9 (route de Franchepré) et peut être circonscrite à un rectangle de 120 m par 100 m. Six bâtiments (habitations) se trouvent au-dessus de la zone R158J1(1) [3].

L'état actuel de l'ancienne mine montre une activité significative de chutes de blocs : de nouvelles chutes de toit ont régulièrement été recensées par GEODERIS.

La zone à risque de fontis a été surveillée par un réseau de 6 microphones entre juin 2007 et juillet 2012, date à laquelle la zone a été comblée par injection. Plusieurs expérimentations ont été menées au sein de la zone, dont certains résultats sont détaillés dans ce rapport.

1.4.2 MINE COTE D'HAYANGE, HAYANGE (57)

Dans le cadre de cette opération de recherche une seconde mine de fer a été instrumentée fin 2009 : la mine Côte d'Hayange, commune d'Hayange (57). La mine présente une géométrie radicalement différente de celle de la mine de Franchepré : il s'agit ici de galeries filantes avec très peu de connexions entre elles. Dans l'ensemble, les parois sont beaucoup plus régulières, à l'exception de quelques galeries annexes dans lesquelles de nombreuses chutes de blocs sont constatées.

Différentes zones à risque de fontis y ont été identifiées par GEODERIS, le présent projet s'étant intéressé aux zones à risque situées dans ou aux alentours de la galerie G7 (zones référencée R156QB1, R156QB2, R156QC1, R156QD2 et R156QD3, concernant directement une dizaine d'habitations [4]). Le relief en surface étant très pentu, les zones à risque de fontis disparaissent lorsque l'on s'éloigne de l'entrée de la mine.

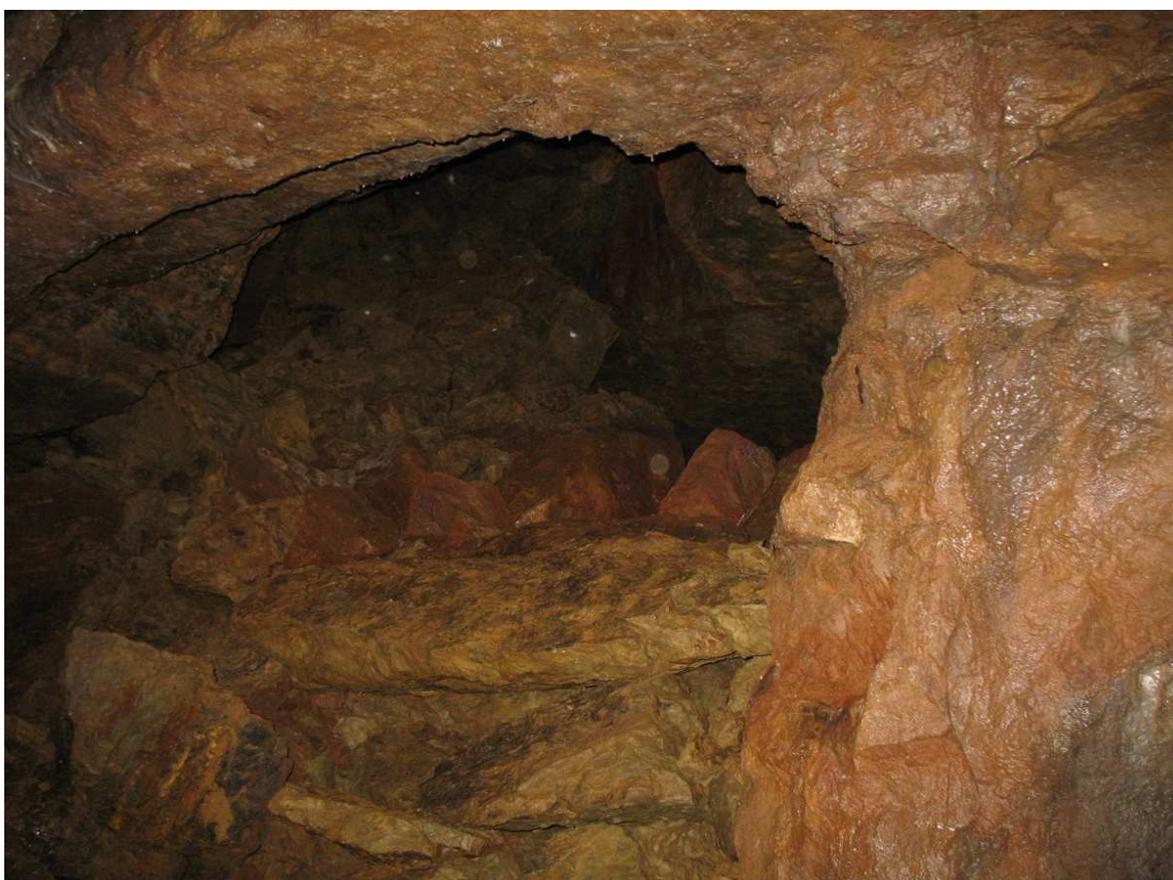


Figure 5 : Remontée de fontis dans la mine Côte d'Hayange.

Commune de Hayange (57700)

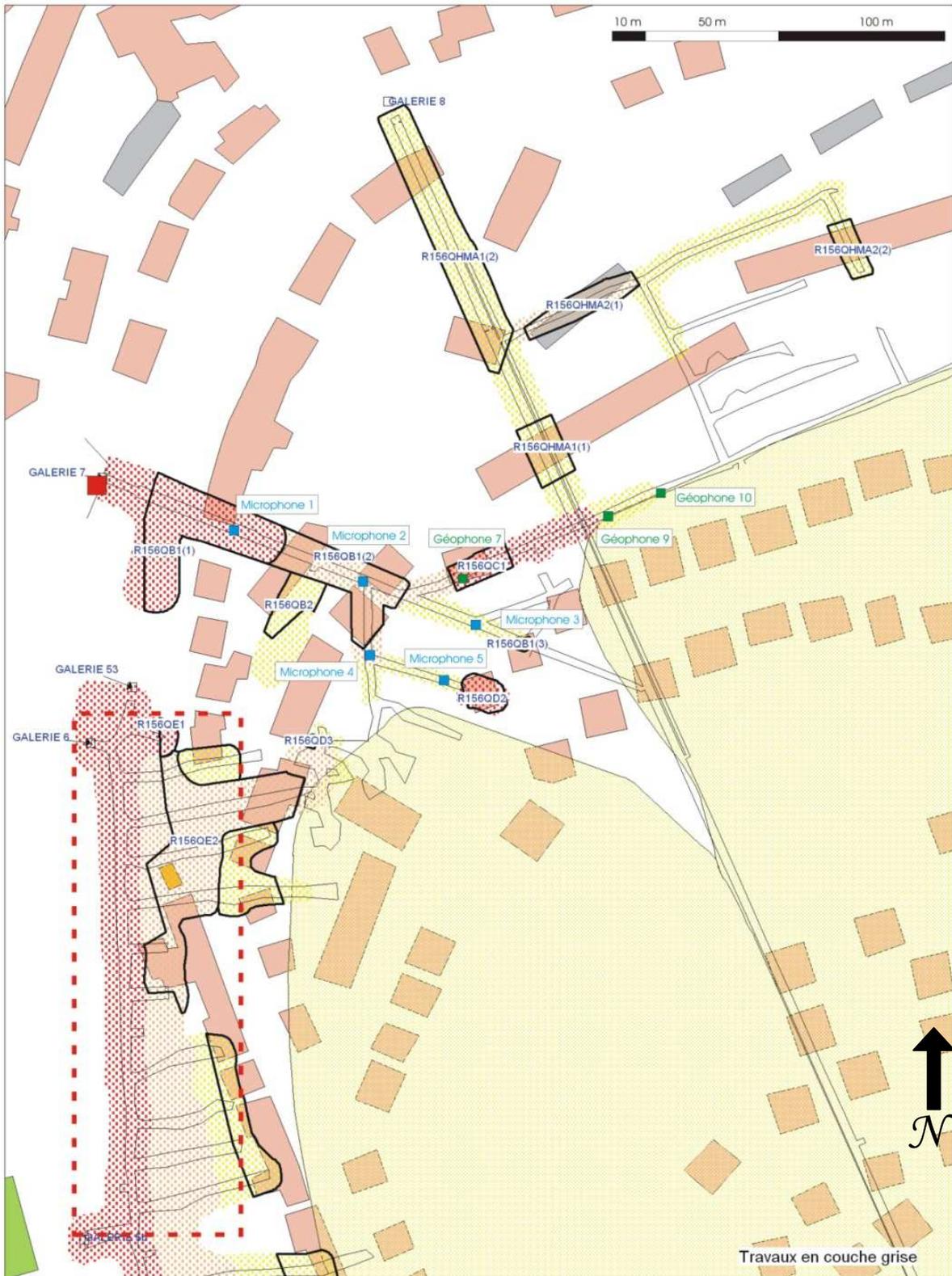


Figure 6 : Carte de risque fontis de la mine Côte d'Hayange (source GEODERIS) : l'aléa fort est figuré en transparence rouge, le moyen en orange et le faible en jaune. Les zones de risque (prise en compte de l'aléa et des enjeux en surface) sont figurées en contours noirs.

Entre 2009 et 2011, le secteur a été surveillé par un réseau de 5 microphones et de trois géophones répartis le long de la galerie principale (G7) et dans deux galeries annexes.

1.4.3 AUTRES SITES

Le retour d'expérience de l'INERIS sur d'autres sites, non instrumentés spécifiquement dans le cadre de cette opération de recherche, a été exploité et intégré dans ce rapport. Il s'agit :

- d'une ancienne mine de sel en chambres et piliers (site C) à grande profondeur. Bien qu'une cavité profonde ne soit pas strictement concernée par le risque de fontis (le foisonnement au sein de la cloche empêchant la progression jusqu'à la surface), les chutes de toits constatées dans cette mine sont très comparables à celles d'un fontis ;
- d'une ancienne mine de fer partiellement ennoyée (site D). En particulier, une expérimentation de chutes de blocs contrôlées a pu y être menée (voir la section 6.1) ;
- d'une ancienne carrière de calcaire grossier (site E) exploitée par piliers tournés à faible profondeur.

1.5 PLAN DU RAPPORT

Comme cité en fin de section 1.3, l'objectif de ce rapport est de décrire une méthodologie d'instrumentation par méthode acoustique d'une cavité pour la surveillance du risque de fontis. Le rapport suit la structure suivante :

- La section 2 rappelle certains concepts simples d'acoustique essentiels à la compréhension de la méthode proposée ;
- La section 3 précise le principe de l'écoute acoustique appliqué à la surveillance du risque fontis en cavité souterraine peu profonde ;
- La section 4 indique les équipements spécifiques de l'écoute acoustique ;
- La méthodologie d'instrumentation d'une cavité nouvelle est ensuite décrite en détails et illustrée dans les sections 5, 6, 7 et 8. Celles-ci décrivent respectivement :
 - L'étude de la faisabilité d'une surveillance acoustique ;
 - Le dimensionnement d'un réseau de microphones ;
 - Le calage du dispositif ;
 - La mise en test du réseau après installation ;
- La section 9 propose un bilan global de la méthodologie ;
- Enfin, un glossaire des termes et unités employés est donné en section 13.

2. NOTIONS D'ACOUSTIQUE FONDAMENTALES

2.1 PRESSION ACOUSTIQUE

L'onde acoustique, ou « son », est produite par la vibration d'une source (un haut-parleur par exemple) et se propage sous forme d'une onde de pression dans le milieu élastique (air, eau, béton, etc.). En l'absence d'obstacle, les ondes acoustiques se propagent dans le milieu aérien sur de grandes distances, leur atténuation étant essentiellement d'origine géométrique (c'est-à-dire liée à la divergence du faisceau), comme chacun en fait l'expérience quotidiennement. Une onde acoustique peut également se propager dans un matériau solide, au travers d'un mur par exemple. Cependant, dans le champ d'application qui nous concerne (onde acoustique audible ou proche de l'audible, mur rocheux), elle y sera généralement très fortement atténuée, en particulier dans les hautes fréquences (loi de masse [5]).

L'onde acoustique est de ce fait caractérisée par sa pression acoustique, c'est-à-dire la surpression provoquée par le déplacement de couches d'air. Ainsi, cette surpression s'ajoute à la pression de l'air, généralement la pression atmosphérique. Plus un son est « fort », plus la pression acoustique est élevée. La pression acoustique s'exprime en Pascal (Pa).

L'oreille humaine permet naturellement d'apprécier cette pression acoustique : le seuil d'audibilité se situe aux environs de $2 \cdot 10^{-5}$ Pa, le bruit d'une conversation autour de 0,1 Pa et le seuil de la douleur autour de 200 Pa.

2.2 NIVEAU DE PRESSION

Compte tenu de la dynamique élevée de l'oreille humaine (i.e. sa capacité à mesurer des écarts de plusieurs ordres de grandeurs en niveau sonore), cette grandeur n'est pas simple à manipuler. Une échelle logarithmique a dès lors été introduite pour définir le niveau de pression acoustique L_p :

$$L_p = 20 \cdot \log\left(\frac{P}{P_0}\right)$$

où $P_0 = 20 \mu\text{Pa}$, soit aux environs du seuil d'audibilité. Le niveau de pression s'exprime en décibels (dB). Par conséquent, il permet d'exprimer l'intensité des sons audibles sur une échelle de valeurs plus simple à utiliser. La Figure 7 indique quelques repères.

Phénomène	Niveau de pression (dB)	Pression acoustique (Pa)
Seuil de la douleur	140	200
Moteur d'avion	120	20
Moteur de voiture	100	2
Travail de bureau	60	$2 \cdot 10^{-2}$
Chuchotement à l'oreille	40	$2 \cdot 10^{-3}$
Chant d'oiseau	20	$2 \cdot 10^{-4}$
Seuil d'audibilité	0	$2 \cdot 10^{-5}$

Figure 7 : Correspondance entre phénomènes audibles et niveaux de pression acoustique, selon la sensibilité moyenne de l'oreille humaine (pondération A, cf. section 2.4) - d'après Bruel & Kjaer [6].

On pourra distinguer un niveau de pression acoustique instantanée, d'un niveau de pression efficace, c'est-à-dire moyenné sur un certain pas de temps.

2.3 DENSITE D'ENERGIE ACOUSTIQUE

Par nature, l'onde acoustique, comme toute onde, se diffuse dans le milieu. Il est impossible de mesurer son énergie totale à l'aide d'un capteur ponctuel. Il est donc plus pertinent de s'intéresser à la densité d'énergie acoustique en un point, dont la mesure est indépendante du capteur. En général, la densité d'énergie (par unité de surface) d'une onde acoustique est la somme d'une énergie cinétique et d'une énergie potentielle [7].

Dans le cas d'une onde plane, la densité d'énergie acoustique d'un événement peut être exprimée comme le carré de la pression sur l'impédance acoustique, intégrée sur la durée de l'événement. Celle-ci s'exprime en J/m^2 .

$$\text{Densité d'énergie acoustique} = \int_{\text{durée de l'événement}} \frac{L_p(t)}{Z} \cdot dt$$

où Z est l'impédance acoustique de l'air. Ce paramètre, égal au produit de la masse volumique de l'air par la vitesse de propagation de l'onde, dépend essentiellement de la température et de la pression. Pour une pression atmosphérique, il vaut 417 Pa.s.m^{-1} à 15°C (428 Pa.s.m^{-1} à 0°C , et 406 Pa.s.m^{-1} à 30°C).

2.4 SPECTRE FREQUENTIEL ET PONDERATION

Par nature, l'onde acoustique se caractérise également par sa fréquence, c'est-à-dire le nombre de vibrations du milieu de propagation par seconde, qui s'exprime en Hertz (Hz). Généralement, un son n'est pas mono-fréquentiel mais au contraire constitué de la superposition d'une multitude de fréquences, d'une importance variable. Ce qui définit le spectre fréquentiel. Durant un cycle complet de vibration, la distance parcourue par l'onde acoustique est appelée longueur d'onde et s'exprime en mètre (m).

Les êtres vivants dotés d'une ouïe sont capables d'entendre des gammes de fréquences variées, y compris au sein d'une même espèce. L'oreille humaine moyenne est sensible aux fréquences comprises entre 20 Hz et 20 kHz, avec une forte atténuation aux extrémités de cette plage.

En médecine du travail ou lors d'études environnementales, une pondération est communément appliquée sur les mesures acoustiques afin de pouvoir évaluer l'intensité du son réellement perçue par l'oreille humaine. La pondération la plus commune est la pondération A, illustrée sur la Figure 8 :

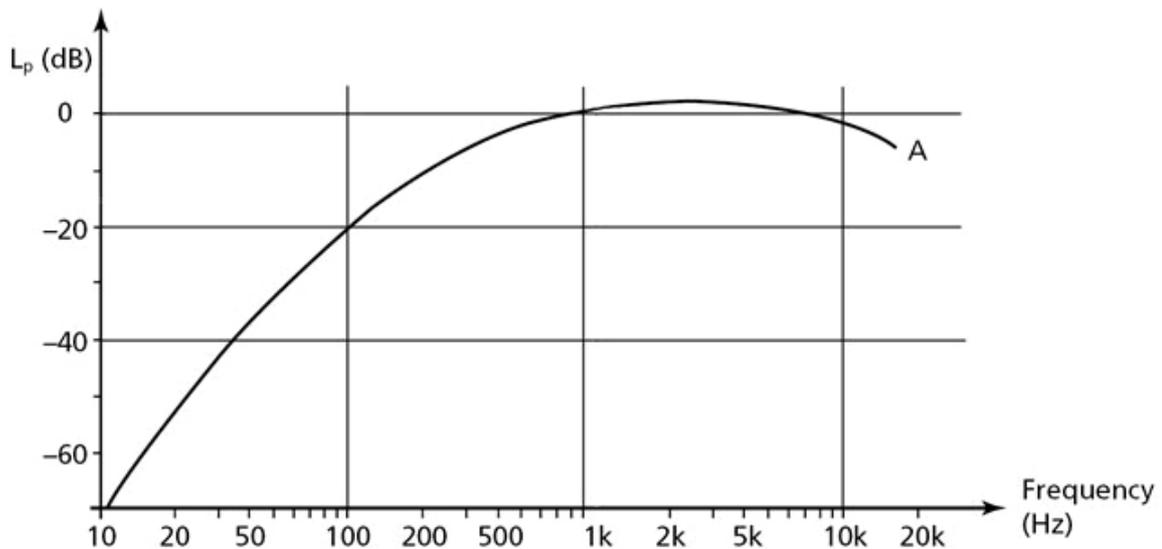


Figure 8 : Pondération A modélisant la sensibilité de l'oreille humaine en fonction de la fréquence acoustique : si une onde de 1000 Hz est parfaitement mesurée par l'oreille (0 dB d'atténuation et de pondération), une onde de 40 Hz est atténuée d'un facteur 100 (-40 dB).

La pondération est une notion importante en mesure acoustique ; des mesures de niveau de pression pouvant varier fortement selon la pondération utilisée. Dans la suite de ce rapport, toutes les mesures seront exprimées en pondération Z (zéro). C'est-à-dire sans aucune pondération puisque l'on s'intéressera à des mesures instrumentales et non pas au ressenti par l'oreille humaine.

2.5 PROPAGATION ET ATTENUATION

2.5.1 PROPAGATION PAR REFLEXIONS

L'onde acoustique au contact d'une interface séparant deux milieux distincts (paroi rocheuse par exemple) va être en partie réfléchiée de façon spéculaire et diffusée par les aspérités et en partie réfractée par cette paroi (l'onde pénètre la roche et se propage). Selon la nature de la paroi, une partie plus ou moins importante sera réfléchiée et donc disponible pour continuer à se propager dans le milieu aérien. Une paroi rocheuse plane ne réfractera qu'une très petite partie de l'onde acoustique incidente (quelques % dans le cas d'une paroi parfaitement plane), alors qu'une paroi rugueuse, allongeant le temps de présence de l'onde aux abords de la paroi, en piègera davantage (dans le cas extrême d'une chambre anéchoïque, l'absorption est totale).

Dans le cas d'une onde acoustique émise en milieu souterrain, et pour des longueurs d'ondes plus petites que les obstacles rencontrés, ce sont ces réflexions sur les parois qui lui permettent d'évoluer au sein des galeries, cf. Figure 9.

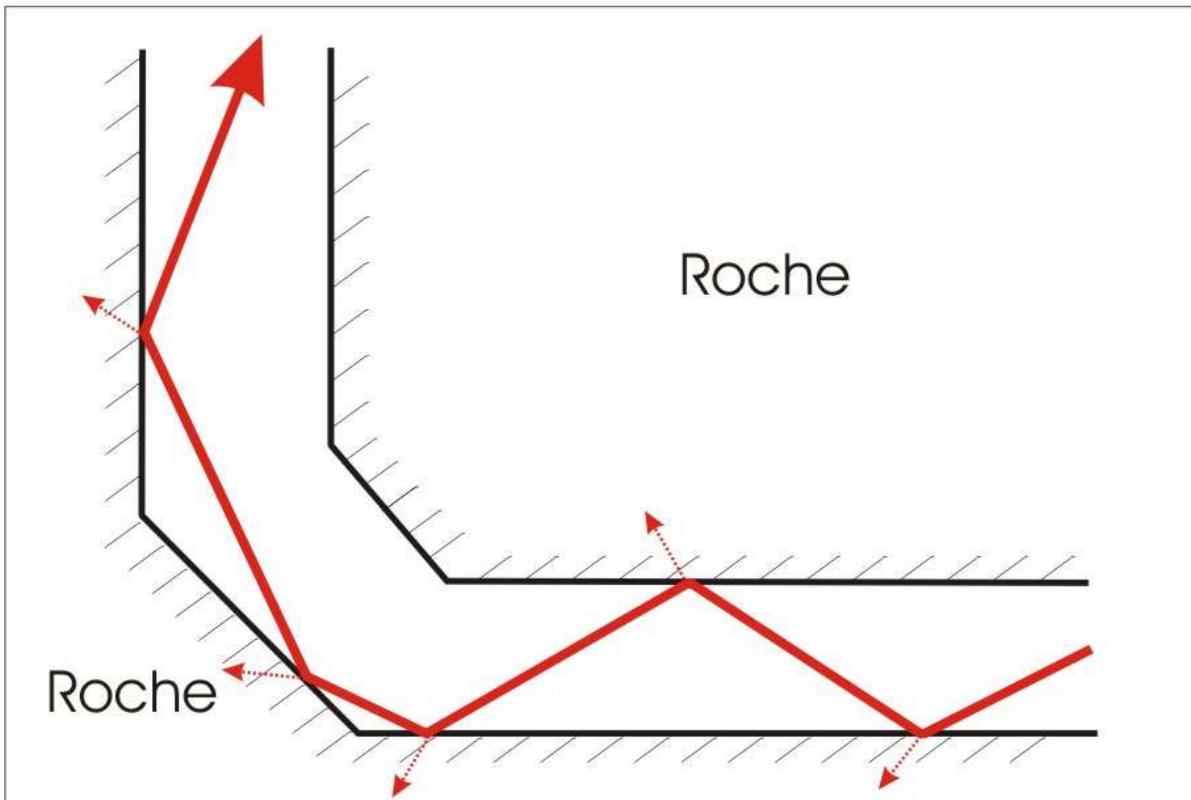


Figure 9 : Schéma de principe de propagation d'une onde acoustique en milieu confiné avec des parois réfléchissantes. Cette vision du chemin de l'onde, dite « aux rayons », n'est valable que dans l'approximation des hautes fréquences (longueur d'onde inférieure à la taille du conduit). L'onde (rouge pleine) est en grande partie réfléchiée par les parois (noires) mais également légèrement réfractée à chaque point d'incidence (rouge pointillé). La partie réfractée est très rapidement atténuée dans la roche.

La vitesse de propagation du son dans un milieu donné est essentiellement fonction des propriétés (densité et élasticité) de ce milieu. Marginalement, elle augmente avec la température et la pression. Cependant en cavité, c'est-à-dire en conditions de température et de pression stables, la vitesse du son dans l'air peut être considérée comme constante et vaut environ 340 m.s^{-1} à 15°C ($\sim 330 \text{ m.s}^{-1}$ à 0°C et $\sim 350 \text{ m.s}^{-1}$ à 30°C).

2.5.2 ATTENUATION D'UNE ONDE ACOUSTIQUE

Une onde acoustique subit essentiellement trois types d'atténuations :

- L'atténuation géométrique : c'est-à-dire la dilution de son énergie par la propagation de l'onde sur une surface de plus en plus importante. Naturellement, ceci est d'autant plus important que le milieu de propagation est ouvert : elle est maximale en champ libre et varie comme l'inverse du carré de la distance (cf. Figure 10), minimale en galerie de petite dimension.

On peut définir le facteur de directivité Q en un point éloigné d'une distance r de la source comme étant le rapport entre la surface de la sphère S_r de rayon r sur la surface S dans laquelle rayonne effectivement la source à cette distance ;

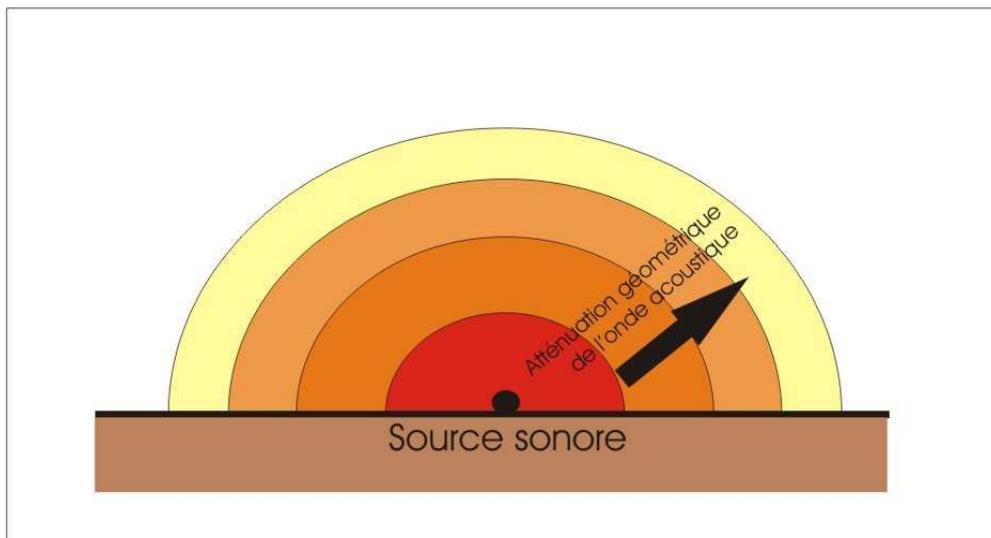


Figure 10 : Atténuation géométrique en champ libre. L'onde dispose d'un demi-espace infini pour se propager et y disperse son énergie. La densité d'énergie en un point devient ainsi de plus en plus faible à mesure que l'on s'éloigne de la source. A toute distance de la source, le facteur de directivité vaut 2.

- L'absorption intrinsèque par le milieu de propagation : l'atténuation par absorption est dépendante de la longueur d'onde considérée. De manière générale, les hautes fréquences, c'est-à-dire les petites longueurs d'onde, s'atténuent (par absorption) plus rapidement que les basses fréquences. Ainsi, le spectre d'un signal acoustique sera amené à évoluer de manière importante au cours de sa propagation dans une cavité, ne conservant en fin de course que les basses fréquences ;

- Enfin, l'atténuation par diffusion, réflexion et réfraction par les obstacles rencontrés : si la longueur d'onde est grande par rapport à l'obstacle rencontré, l'énergie est redistribuée, on parle de diffusion (ou diffraction).

Si la longueur d'onde est petite, une partie de l'onde pénètre l'obstacle (réfraction), une autre est réfléchi (réflexion). Si l'obstacle s'avère être très absorbant (roche par exemple), la portion réfractée disparaît très rapidement.

L'atténuation d'un signal acoustique se traduira par une baisse de la pression acoustique, et donc du niveau de pression acoustique. Ainsi, l'atténuation peut être exprimée en décibels :

$$\text{Atténuation} = L_p - L_{p0} \text{ (dB)}$$

2.5.3 ATTENUATION DANS LE CAS DES CAVITES SOUTERRAINES

2.5.3.1 ATTENUATION GEOMETRIQUE

L'atténuation géométrique est liée à l'espace dont dispose l'onde acoustique pour s'étendre. Quelques cas simples peuvent être envisagés dans le cadre des cavités souterraines, pour lesquels le facteur de directivité peut être évalué et comparé (à une distance donnée r) :

- La galerie filante. Pour une galerie de hauteur h et de largeur l :

$$Q_1 = \frac{4\pi r^2}{l \cdot h}$$

- Dans le cas d'une exploitation tabulaire exploitée par chambres et piliers, de hauteur h et de taux de défrètement moyen T :

$$Q_2 = \frac{2r}{(1 - \sqrt{1 - T}) \cdot h}$$

Pour un taux de défrètement T de 50% et une largeur de galerie filante l de 2 m, le rapport de ces deux coefficients de directivité donne :

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{2\pi r}{l} (1 - \sqrt{1 - T}) = 0,92 \cdot r$$

Dès les premiers mètres, ce résultat permet de comprendre que l'énergie sera beaucoup plus rapidement diluée dans le cas de la mine en chambre et pilier que dans le cas de la galerie filante.

2.5.3.2 ABSORPTION PAR L'AIR

L'absorption par l'air peut-être évaluée par la formule de Stokes [8] : elle s'avère comparativement négligeable à l'atténuation géométrique pour des distances de quelques centaines de mètres et pour des fréquences inférieures à 1 kHz (0,003 dB à 1kHz et à 500 m de la source). A contrario, les ondes acoustiques, audibles ou proches, considérées dans le contexte qui nous intéresse ici, subiront une forte absorption au sein des piliers et massifs rocheux.

2.5.3.3 REFLEXION/REFRACTION ET ABSORPTION PAR LA ROCHE

L'atténuation par réflexion/réfraction aux parois rocheuses sera fonction de la rugosité de ces parois. Comme cité précédemment, une paroi rocheuse plane limitera la durée de présence de l'onde à son contact et donc l'atténuation. Au contraire plus la paroi sera rugueuse, plus l'onde sera « piégée » à proximité de la paroi, subissant davantage de réflexions et de réfractions. La partie de l'onde réfractée étant immédiatement absorbée par la roche, l'atténuation finale augmente de manière importante avec la rugosité des parois.

2.5.3.4 BILAN DU CAS DES CAVITES SOUTERRAINES

Dans ce rapport seront uniquement considérées :

- L'atténuation géométrique ;
- L'atténuation par réflexion/réfraction puis absorption par les obstacles (parois, piliers, éboulements, etc.), fonction de la rugosité de ces obstacles.

Une illustration concrète est donnée en section 6.2.2.

Enfin, compte-tenu du fait que l'atténuation des ondes acoustiques dans un massif rocheux est très forte et rapide, on ne considérera que la propagation dans les vides souterrains (milieu aérien), c'est-à-dire dans les chambres et le long des galeries.

2.6 REVERBERATION

Une onde acoustique se réfléchit sur les obstacles rencontrés. Ainsi si les parois sont peu absorbantes, une onde « piégée » dans une chambre ou en fond de galerie peut s'y réverbérer (parois rocheuse peu rugueuse par exemple), cf. Figure 11.

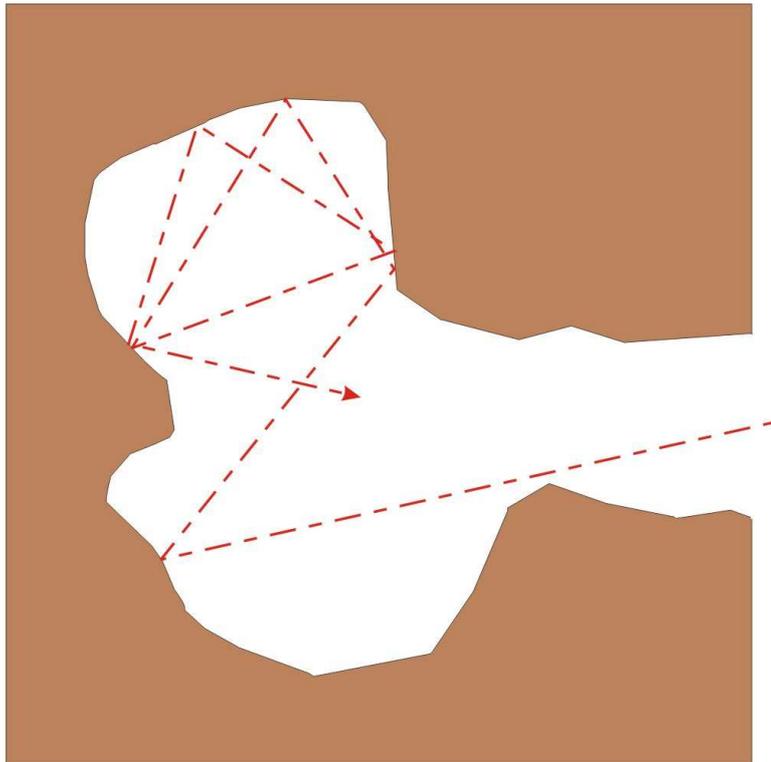


Figure 11 : Illustration de la réverbération d'une onde acoustique dans une chambre. L'approximation du cheminement de l'onde « aux rayons » est de nouveau employée. L'onde pénètre la chambre et s'y trouve piégée par les réflexions qu'elle y subit. La réfraction n'est pas figurée.

Bien qu'à chaque réflexion l'onde acoustique soit en partie réfractée par les parois, la pression acoustique augmente néanmoins localement (dans le cas d'une émission continue), pouvant provoquer, en cas de mesure, une surestimation de l'intensité du son.

Dans des anciennes carrières ou mines souterraines, compte-tenu du milieu confiné dans lequel se propagent les ondes, le phénomène de réverbération est couramment observé. Ce phénomène se produit de manière notable à plus grande échelle pour des événements source importants en intensité. Suite à une chute de toit importante (>500 tonnes de roche), un signal acoustique basse fréquence (de quelques hertz) a été enregistré durant plusieurs minutes.

2.7 BRUIT DE FOND ET ACTIVITE SONORE D'UNE CAVITE

Ces deux notions sont nécessaires à l'évaluation la faisabilité d'une surveillance acoustique (section 5.3).

2.7.1 BRUIT DE FOND

Le bruit de fond sonore d'une cavité est composé de bruits quasi continus, d'origine naturelle (écoulement d'eau, circulation d'air liée à l'aération naturelle), d'origine anthropique (bruits urbains,) et des événements ponctuels mais récurrents (chute de gouttes d'eau régulières par exemple) que l'on peut constater dans ladite cavité. La mesure de bruit de fond se fera typiquement au sonomètre, sans pondération, de manière répétée et pendant un temps suffisamment long pour que la mesure puisse être considérée comme caractéristique de la cavité (de quelques dizaines de secondes à quelques minutes). Elle permet de quantifier à quel point une cavité est « silencieuse » ou « bruitée ».

Des mesures de bruit de fond (~ 30 s) ont été réalisées sur les sites de Moyeuivre et Hayange, répétées en de nombreux points des zones d'étude :

- Moyeuivre : niveau de bruit moyen d'environ 15 à 20 dB (LAeq, cf. section 5.3.2). La mine peut être considérée globalement comme une cavité très silencieuse (15 à 20 m de profondeur, accès extérieur le plus proche situé à 300 m), le niveau augmente néanmoins localement dans les zones les plus humides, des gouttes d'eau chutant du toit plusieurs fois par minute ;
- Hayange : niveau de bruit moyen de 25 à 30 dB. La mine est plus bruitée dans son ensemble, en particulier, à proximité de l'entrée qui donne sur une voie de circulation et surtout à proximité d'un fort écoulement d'eau dans une galerie secondaire, cf. Figure 25.
- Ancienne carrière de calcaire E : niveau de bruit moyen de 20 à 25 dB. La carrière ne présente pas de source de bruits comparable aux infiltrations d'eau d'Hayange mais reste influencée par l'environnement urbain parisien.

2.7.2 ACTIVITE SONORE

L'activité sonore d'une cavité inclut le bruit de fond sonore mais également les événements sonores ponctuels, imprévisibles et irréguliers (visite de la cavité par exemple). L'évaluation de l'activité sonore d'une cavité passe nécessairement par une étude de longue durée, idéalement de plusieurs semaines.

Le retour d'expérience sur les sites pilotes sur plusieurs mois est le suivant :

- Moyeuivre : enregistrement de quelques bruits de surface basse fréquence (jusqu'à une dizaine par semaine) en heures et jours ouvrés, nombreuses chutes de gouttes d'eau (plusieurs par jour, essentiellement sur deux microphones), quelques visites techniques (moins de 10 par an) ;
- Hayange : nombreux bruits urbains transmis depuis la galerie d'accès (sortie d'école, plusieurs déclenchements par jour), bruits de surface enregistrés essentiellement pas les microphones les plus proches de l'entrée (venant très probablement de la route surplombant directement le microphone 2), gouttes d'eau sur le microphone 5.

Ces événements extérieurs sont davantage détaillés en section 5.3, ainsi que les mesures prises pour limiter leur nombre.

3. PRINCIPE DE LA SURVEILLANCE ACOUSTIQUE DES CAVITES

3.1 LA MESURE

La surveillance acoustique du risque fontis est basée sur l'écoute permanente d'une cavité donnée par un réseau de microphones (cf. description du matériel en section 4.1) pour détecter, enregistrer et caractériser les bruits liés à l'évolution du phénomène, typiquement des chutes de blocs. D'autres désordres peuvent également être détectés : les phénomènes d'écaillage, de fracturation et craquements, d'infiltration d'eau, etc. Ces phénomènes sont irréguliers en temps et en importance.

Les raisons du choix de la méthode acoustique pour détecter les chutes de blocs rocheux sont multiples :

- les chutes de blocs rocheux sont généralement des événements sonores. La méthode est cependant moins pertinente si les fontis évoluent par très petites chutes de matériau ;
- beaucoup de cavités souterraines peuvent être qualifiées de milieu à « bas bruit », ou très peu perturbées, ce qui permet d'identifier facilement une chute de blocs, de limiter les enregistrements parasites et d'obtenir de bons rapports signal sur bruit lors d'un enregistrement ;
- la scrutation est continue dans le temps. De cette écoute continue peuvent être extraits et conservés les événements d'une certaine amplitude (principe de mesure passive, cf. section 3.2) ;
- la mesure est « volumétrique » : contrairement à des mesures géotechniques ponctuelles, elle permet de détecter des phénomènes sur une étendue de cavité, plus ou moins importante selon les conditions.

En termes de performance, un réseau de microphones correctement dimensionné doit au strict minimum permettre d'enregistrer les chutes de blocs sur toute la zone considérée, généralement le croisement entre zone d'aléa et zone d'enjeux en surface. Dans le cas de cavités peu évolutives, un simple comptage peut suffire à s'assurer que les fontis surveillés n'évoluent pas de manière inhabituelle. Mais on peut également attendre de la surveillance acoustique qu'elle permette une localisation des sources ainsi que leur caractérisation, c'est-à-dire une évaluation de la taille des blocs tombés.

Cette méthode présente naturellement des limites de fonctionnement et métrologique :

- si la cavité est composée de plusieurs zones distinctes avec peu ou pas de connexions entre elles, au moins un capteur devrait être placé dans chacune. Par exemple, il n'est pas envisageable de surveiller un réseau karstique à risque de fontis constitué de multiples petites cavités puisqu'il s'agirait d'instrumenter chacune d'elles ;
- la qualité de la mesure peut être rapidement dégradée en cas de bruit de fond sonore trop important (cf. section 2.7.1). Une infiltration d'eau

importante ou la proximité de la zone à un accès vers la surface peuvent dégrader l'efficacité de la méthode voire rendre la méthode inopérante ;

- La mise en œuvre de la méthode implique que l'on connaisse bien la géométrie de la cavité à instrumenter, qu'il s'agisse de placer les équipements ou de localiser et caractériser les événements (voir sections 7.2 et 7.3). Cette problématique deviendra notamment cruciale dans le cas d'une instrumentation depuis la surface (cf. section 10).

3.2 PRINCIPE DE DETECTION

La mesure acoustique est une mesure passive et continue, par opposition à des mesures séquentielles déclenchées périodiquement (actives) type géotechnique. Pour autant, il n'est pas utile d'enregistrer en continu l'activité sonore d'une cavité, les données devenant alors très volumineuses pour être gérées efficacement en adéquation avec une gestion d'alarme.

La stratégie d'acquisition la plus naturelle est alors le déclenchement automatique sur vérification d'un critère préétabli : la scrutation est permanente et les enregistrements sont placés en mémoire de manière temporaire. En cas de vérification du critère, la mesure transitoire est enregistrée par le système.

Les critères de déclenchements peuvent être variés. Un critère simple mais efficace est le dépassement d'une certaine amplitude du signal (c'est-à-dire de niveau de pression acoustique) sur une durée minimale (cf. Figure 12). La durée de dépassement du seuil d'amplitude et le seuil lui-même doivent évidemment être paramétrables pour permettre d'ajuster la stratégie d'acquisition au phénomène surveillé. Ce principe simple permet de ne garder que des événements d'une certaine importance.

Il existe naturellement des critères de déclenchement plus complexes. Une stratégie classique, dites STA/LTA, est de comparer les moyennes d'amplitudes du signal à court et long termes. Au-delà d'un certain ratio, l'enregistrement est conservé [9].

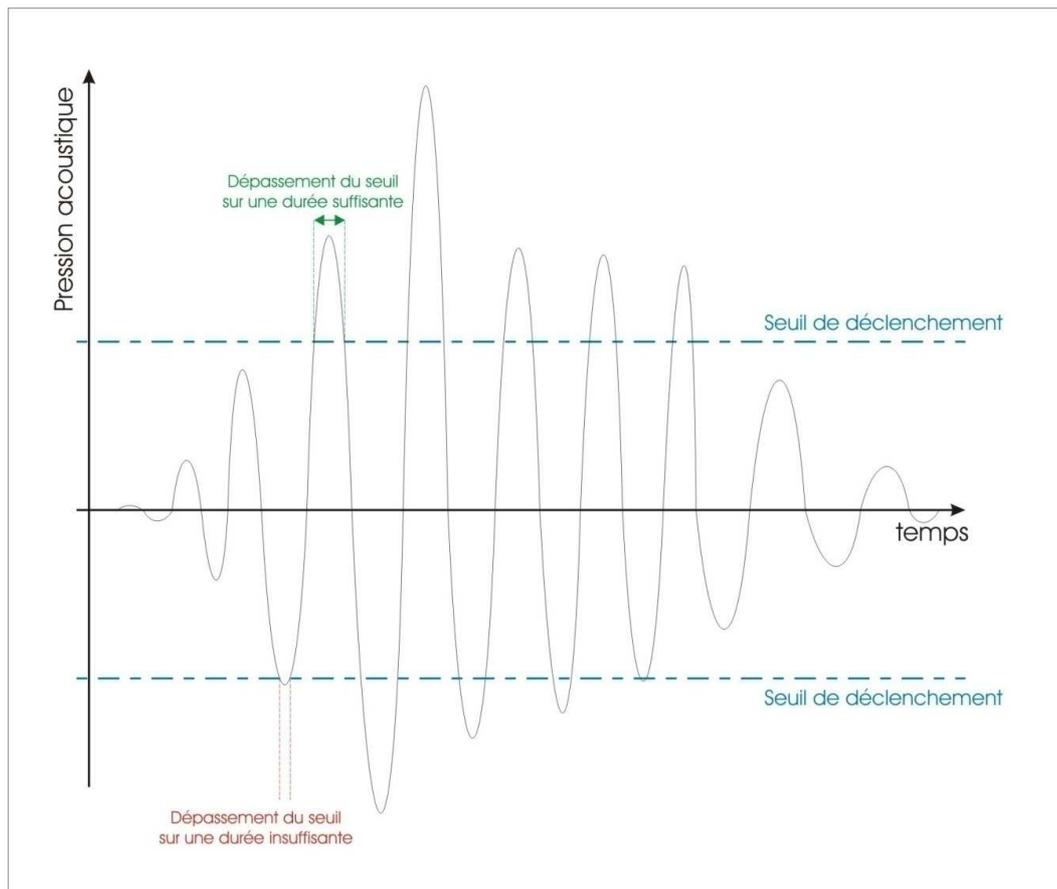


Figure 12 : Stratégie simple d'acquisition de données acoustiques par dépassement de seuil d'amplitude.

En cas d'un réseau dense de microphones, il peut être utile de vérifier le critère sur plusieurs voies de mesures, ou obligatoirement sur une voie spécifique, de manière à filtrer des artefacts n'affectant que certains capteurs, à n'enregistrer que les événements les plus significatifs ou ceux situés au cœur de la zone d'étude. Enfin, l'utilisation de filtres analogiques peut permettre de restreindre l'acquisition à des phénomènes, dont le spectre fréquentiel se situe dans une gamme prédéfinie, correspondant à celle du phénomène étudié, en l'occurrence les chutes de blocs.

3.3 ENREGISTREMENT DE CHUTE DE BLOC

Un événement acoustique enregistré par un réseau de microphones peut être caractérisé selon différents paramètres :

- la signature (forme) du signal : elle est un élément essentiel pour déterminer l'origine d'un événement acoustique ;
- l'amplitude du signal aux différents microphones, c'est-à-dire sa pression acoustique. De manière générale, plus le microphone est éloigné de la source, plus l'amplitude enregistrée au microphone sera faible. On s'intéressera davantage à l'amplitude maximale qu'à l'amplitude moyenne, plus représentative de l'impact au sol ;

- le spectre fréquentiel du signal aux différents microphones. De nouveau, la distance source/capteur joue un rôle prépondérant dans l'évolution du contenu fréquentiel ;
- la durée totale du signal. Compte tenu de la réverbération qui produit, derrière le signal balistique, un signal long appelé « coda », la fin d'un événement acoustique est plus délicate à définir que le démarrage. On pourra estimer que le signal est achevé quand la pression acoustique a retrouvé un niveau proche du bruit de fond ou, de manière plus pratique, lorsqu'un seuil d'énergie du signal est passé. Si on observe une décroissance exponentielle, on peut aussi définir la durée de la coda comme son temps d'atténuation caractéristique (classique en acoustique des salles) ;
- la différence de temps d'arrivée du signal aux différents microphones. Selon le rapport signal sur bruit, le front d'onde du signal sera plus ou moins simple à pointer. Un signal impulsif et fort aura un démarrage franc, facile à pointer avec précision, alors qu'un signal émergent sera difficile à distinguer du bruit de fond de la mesure et délicat à pointer en temps de première arrivée.

Au cours du suivi de la mine de Moyeuve-Grande, plus d'une vingtaine de chutes de bloc a été enregistrée. Un exemple est donné en Figure 13 et en Figure 14. On peut remarquer :

- la différence des temps d'arrivée (axe du temps en abscisse) selon chaque microphone. L'événement est d'abord enregistré par le microphone 3, puis le 5 et le 4. En première approche, on peut donc estimer que la chute de bloc s'est produite à proximité du microphone 3 et probablement au nord de celui-ci ;
- le niveau de pression acoustique (axe des ordonnées) est maximale sur le microphone 3, décroît très rapidement sur le 5 et est quasi nul sur les autres microphones. Ce qui confirme l'idée de la localisation à proximité et au nord du microphone 3 ;
- le signal dure un petit peu plus de 3 dixième de secondes sur les microphones les plus proches, la réverbération tend à prolonger le signal d'un dixième de seconde supplémentaire. Cette durée d'événement est tout à fait caractéristique des chutes de bloc enregistrées sur le site de Moyeuve-Grande ;
- le spectre fréquentiel s'étale de 20 à environ 100 Hz, la majeure partie de l'énergie étant concentrée dans les basses fréquences, inférieures à 50 Hz. Ce spectre est également caractéristique de la plupart des chutes de bloc enregistrées sur ce site. Cependant, l'absence de fréquences supérieures à 100 Hz tend à indiquer que la chute ne s'est pas produite à proximité immédiate du microphone 3.

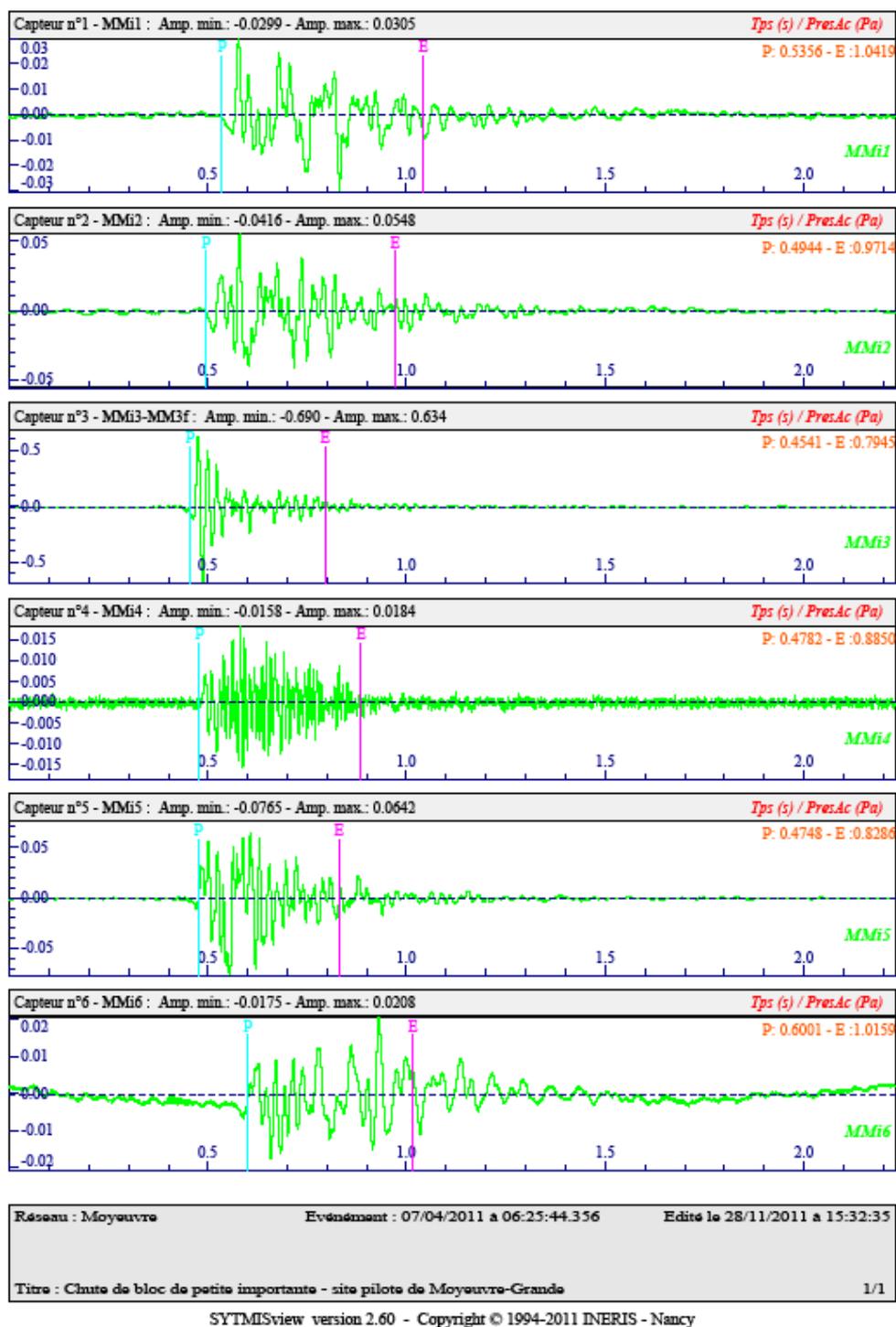


Figure 13 : Exemple de petite chute de bloc enregistrée sur le site pilote de Moyeuivre-Grande (07/04/2011) : pression acoustique en fonction du temps à chaque microphone. Le pointé P marque la première arrivée d'onde ; le pointé E la fin de l'événement.

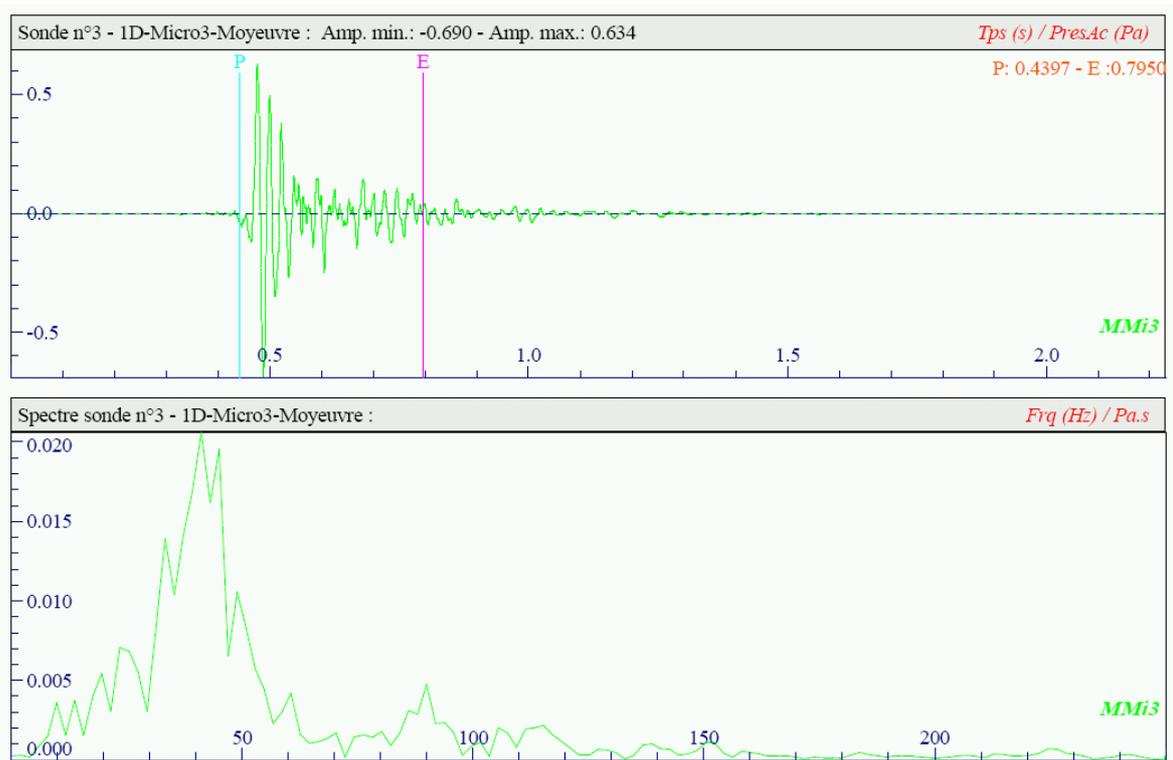


Figure 14 : Pression acoustique (en haut) et spectre fréquentiel (en bas) au microphone 3 lors de la chute de toit de Moyeuvre-Grande du 07/04/2011.



Figure 15 : Chutes de toit dans la zone à risque de fontis de la mine de Moyeuvre.

4. EQUIPEMENTS ASSOCIES

Différents matériels spécifiques sont utilisés dans le cadre de la surveillance acoustique du risque fontis et sont décrits ci-dessous :

4.1 MICROPHONES

Le microphone est l'élément clé d'un réseau d'écoute acoustique, puisqu'il a en charge la mesure dynamique de la pression acoustique, dont découlera la totalité des informations sur l'évolution du phénomène. A ce titre, des microphones de qualité industrielle doivent être employés. Les microphones (voir illustration en Figure 16) utilisés doivent en effet répondre à diverses exigences :

- avoir une excellente qualité métrologique caractérisée notamment par sa sensibilité et sa dynamique afin de permettre la détection d'événements de très faible amplitude. En effet, même si un réseau est suffisamment dense pour qu'un microphone soit à proximité de chacune des zones à risque de fontis actives, il est souhaitable que la chute soit enregistrée par plusieurs capteurs si l'on souhaite pouvoir localiser et caractériser l'événement. A cet effet, les microphones seront très souvent associés à une carte de pré-amplification afin d'augmenter le rapport signal sur bruit avant transmission du signal analogique sur le câble de mesure ;
- disposer d'une courbe de réponse (ou sensibilité en fonction de la fréquence) adaptée aux phénomènes que l'on souhaite enregistrer. En particulier, l'enregistrement des basses fréquences provoquées par des chutes de bloc (10 à 40 Hz) nécessite un matériel de qualité ;
- avoir une dynamique large, de manière à ne pas saturer trop rapidement en cas d'événement important ou très proche du microphone ;
- une bonne résistance aux environnements difficiles, en particulier vis-à-vis de l'humidité, beaucoup de cavités présentant une hygrométrie élevée.

Les caractéristiques métrologiques essentielles d'un microphone sont :

- Sa sensibilité : usuellement mentionnée en mV/Pa, elle peut être aussi fournie, par convention, en dB négatifs par rapport à une sensibilité dite de référence de 1V/Pa. Une sensibilité 50 mV/Pa correspondra à -26 dB puisque $20 \cdot \log\left(\frac{0,050}{1}\right) = -26$, voir la section 2.2 ;
- Sa bande passante : il s'agit de la plage de fréquence sur laquelle la sensibilité du capteur est homogène à une précision de ± 3 ou ± 1 dB selon les mentions du fabricant.

Deux exemples de microphones professionnels sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Constructeur	Référence	Application	Sensibilité	Gamme ± 1 dB	Bruit thermique
Bruel & Kjaer	4188	Champs libre et diffus	31,6 mV/Pa	8Hz – 12,5 kHz	14,2 dB (A)
Endevco	EM46AE	Champs libre	50 mV/Pa	5Hz – 10 kHz	14.5 dBA



Figure 16 : Photographie d'une sonde microphonique INERIS. Le capteur se trouve à l'extrémité (basse sur la photographie) du corps de sonde qui renferme également un amplificateur.

Par ailleurs, les microphones ne nécessitent pas d'être couplés au massif. Ils doivent simplement être posés de manière stable, en évitant tout obstacle à proximité du capteur afin de limiter d'éventuels effets de réverbération. Ce principe de pose simple et rapide présente deux avantages importants :

- les capteurs sont *a priori* mobiles et récupérables (pas d'ancrage au rocher) permettant de modifier simplement un réseau de microphones selon une éventuelle évolution du besoin de la surveillance et le retour d'expérience ;
- la pose simple permet à la fois de réduire fortement le coût d'installation et le temps de présence en cavité ainsi que les perturbations sur un environnement souterrain parfois très dégradé, l'objectif étant de limiter au maximum l'exposition des équipes techniques en charge de l'installation.

4.2 SONOMETRE

Un sonomètre (illustration en Figure 17) est un appareil de mesure portatif permettant d'enregistrer et d'analyser les ondes acoustiques. Il est notamment utilisé en tant qu'appareil de contrôle en médecine du travail ou dans le cadre d'études environnementales. A ces fins, le sonomètre est idéalement calibré à intervalles réguliers afin de fournir une mesure fiable et précise.

Le sonomètre peut au minimum fournir les niveaux de pression acoustique minimal, moyen (ou équivalent) et maximal d'un enregistrement, selon différentes pondérations (cf. section 2.4). Les niveaux de pression sont des niveaux « efficaces », c'est-à-dire mesurés sur des pas de temps donnés, de quelques secondes à quelques millisecondes. Plus la constante de temps est petite, plus la mesure se rapproche d'une mesure « instantanée ».

Les niveaux de pression mesurés seront ainsi décrits sous la forme :

<p>Level (niveau) ↘ ↙ Type de calcul</p> <p style="margin-left: 100px;">LAFmax</p> <p>Pondération ↗ ↖ Constante de temps</p>	
Type de calcul :	<ul style="list-style-type: none"> • Equivalent : moyenne sur le signal ; • Min : calcul du minimum (à 10% près par exemple) ; • Max : calcul du maximum (à 10% près par exemple).
Pondération	<ul style="list-style-type: none"> • A • B • Z
Constante de temps pour le calcul des extremums	<ul style="list-style-type: none"> • S: Slow (1 s) • F: Fast (125 ms) • I: Impulse (35 ms)

L'analyse spectrale de l'enregistrement peut également être réalisée en quasi temps réel par le sonomètre.



Figure 17 : Sonomètre (handheld 2250 Bruel &Kjaer).

4.3 UNITE D'ACQUISITION

Une unité d'acquisition (cf. illustration en Figure 18) est nécessaire pour scruter, détecter, numériser, enregistrer et éventuellement transmettre vers un site distant les événements acoustiques. Elle doit présenter les caractéristiques minimales suivantes :

- le fonctionnement continu pour permettre la scrutation et la mise en œuvre d'un moteur de détection (cf. section 3.2) et l'enregistrement des événements acoustiques répondant aux critères choisis ;
- le stockage local des données et/ou le transfert vers un site de supervision ;
- la robustesse en rapport avec la zone d'étude. Les cavités souterraines peuvent être extrêmement humides, voir partiellement ennoyées ;
- l'autonomie adaptée et la consommation réduite au maximum, selon la configuration du site, de l'installation du système et de l'accès aux réseaux de puissance et de communication. Ce point est d'autant plus important que les microphones sont des capteurs alimentés en continu. A titre indicatif, le matériel employé par l'INERIS présente la consommation suivante :
 - microphone + carte d'amplification : < 14 mW ;
 - unité d'acquisition pour 8 voies de mesures déclenchant en continu : < 675 mW.

ce qui a donné environ 3 mois d'autonomie avec 4 batteries Plomb de 100 Ah pour un réseau de 8 capteurs.



Figure 18 : Unité d'acquisition (type SYTGEM VLP, INERIS) installée sur le site pilote d'Hayange.

4.4 SOURCE ACOUSTIQUE OMNIDIRECTIONNELLE

Une source acoustique (illustration en Figure 19) peut être utilisée à des fins d'expérimentation ou de validation de fonctionnement d'un réseau de microphones. Une source acoustique pourra émettre des ondes acoustiques au sein d'une gamme de fréquences donnée, plus ou moins étendue selon la bande passante de la source (plus un haut-parleur est grand, plus il pourra descendre en fréquence).

Par ailleurs, la directivité d'une source caractérise sa capacité à émettre une onde dans une direction donnée. Ainsi, une source omnidirectionnelle permet d'émettre la même onde acoustique dans toutes les directions. Pour cela, elle doit être petite par rapport aux longueurs d'ondes émises.

Pour simuler une chute de blocs, il est suffisant de s'assurer que l'émission de l'onde acoustique est isotrope dans une demi-sphère supérieure, ou tout du moins dans le plan horizontal.

Dans tous les cas, il conviendra d'adapter la source acoustique à l'usage que l'on souhaite en faire.



Figure 19 : Utilisation d'une source acoustique (Sound source 4224, Bruel & Kjaer) pour la simulation de chute de blocs sur le site de Moyeuve-Grande. La source est couchée pour créer une onde acoustique homogène dans le plan horizontal.

SECTIONS 5 à 8 :

Protocole d'instrumentation d'une cavité souterraine par méthode acoustique

Les sections 5 à 8 ont pour objectif de décrire étape par étape le protocole proposé d'instrumentation d'une cavité souterraine complexe à risque de fontis.

Ce protocole cherche à répondre aux questions fondamentales suivantes :

- *La méthode acoustique est-elle pertinente pour surveiller le risque de fontis dans la cavité étudiée ?*
- *Comment concevoir le réseau de microphones (dimensionnement) ?*
- *Comment valider l'efficacité du réseau mis en place ?*
- *Comment exploiter les données de mesure ?*

Ces questions peuvent être abordées en traitant successivement les aspects suivants :

- **Étude de la faisabilité de la surveillance**
 - Reconnaissance des mécanismes de dégradation de la cavité
 - Reconnaissance de la géométrie de la cavité
 - Évaluation de l'activité sonore de la cavité
 - Évaluation de la susceptibilité acoustique
- **Dimensionnement d'un réseau de microphones**
 - Définition des objectifs de surveillance
 - Évaluation de l'atténuation des ondes acoustiques
- **Calage du dispositif de télésurveillance**
 - Validation de la sensibilité du système et de la détectabilité des phénomènes
 - Localisation des événements
 - Caractérisation d'un événement
 - Définition du protocole de surveillance
- **Mise en test du dispositif de surveillance**
 - Approfondissement de la connaissance de l'activité sonore
 - Création d'un catalogue de signaux de référence

- Validation du fonctionnement technique et opérationnel et retour d'expérience

Ces aspects sont abordés et illustrés le cas échéant par un retour d'expérience issu des sites pilotes ou d'expérimentations réalisées dans le cadre des travaux de l'INERIS. Un bilan résume chaque aspect en fin de section.



Figure 20 : Effondrement par fontis d'une marnière en Normandie (Source : CETE Normandie-Centre)

5. ÉTUDE DE LA FAISABILITE DE LA SURVEILLANCE ACOUSTIQUE

5.1 RECONNAISSANCE DES MECANISMES DE DEGRADATION DE LA CAVITE

Le choix de la méthode acoustique suppose naturellement que les manifestations d'évolutions du fontis que l'on souhaite surveiller soient mesurables par un microphone, si ce n'est par l'oreille humaine. Subséquemment, ces manifestations doivent être suffisamment sonores pour être détectées et identifiées.

Dans le cas des carrières abandonnées, il s'agira essentiellement des ruptures fragiles dans le recouvrement, des éventuels mouvements lents de réorganisation et des chutes de blocs rocheux qui en découlent depuis le toit ou le sommet de la cloche.

Ruptures fragiles : Ces ruptures précèdent les chutes de bloc et autres phénomènes d'écaillage mais sont peu sonores, notamment du fait qu'elles peuvent se produire dans le recouvrement. Seules les ruptures se produisant aux surfaces libres de la cavité : dans le toit immédiat, au parement de pilier, au mur d'une galerie, sont susceptibles d'être mesurables ;

Propagation des désordres : Dans le cas d'une cavité localement déjà dégradée, par exemple dans la voute du fontis, certains blocs rocheux instables sont susceptibles de se réorganiser lentement au cours du temps. Ces mouvement sont peu susceptibles d'être sonores ;

Chutes de bloc : Principal mécanisme d'évolution d'un fontis, elles seront plus ou moins sonores selon la taille caractéristique des blocs, la hauteur de chute, la nature de la roche. Ainsi, un fontis karstique, évoluant par chutes de petits blocs d'argile (cf. illustration en Figure 21), sera beaucoup moins susceptible de produire des événements sonores qu'un fontis de terrains rigides évoluant par gros blocs. Il en sera de même dans des terrains peu cohésifs, sableux. D'autres techniques, sortant du cadre de cette étude, peuvent alors être utilisées.



Figure 21 : Fontis en cavité karstique évoluant par fines et petits blocs argileux – Grotte de la Fuie, Chasseneuil. (Source : CETE Sud-ouest).

Par ailleurs, une fois la cloche de fontis suffisamment avancée, les chutes se produisent au sein même du recouvrement et depuis des hauteurs théoriquement de plus en plus petites du fait du foisonnement. Ainsi, les événements les plus sonores vis-à-vis de capteurs situés dans la cavité sont plus susceptibles d'intervenir au démarrage du fontis (phases 1 et 2, Figure 1 et Figure 22) qu'en fin de progression (phases 3 et 4).



Figure 22 : Démarrage de fontis dans la carrière de calcaire grossier (site E).

5.2 RECONNAISSANCE DE LA GEOMETRIE DE LA CAVITE

La géométrie de la cavité est un critère déterminant dans l'évaluation de l'applicabilité de la méthode acoustique à la surveillance des fontis.

En effet, une cavité ouverte, c'est-à-dire présentant de nombreux passages entre les chambres ou les galeries, permet aux ondes acoustiques de se propager facilement, rendant possible la surveillance de grandes surfaces avec un nombre limité de capteurs.

Une mine en chambres et piliers à fort taux de défrèvement sera particulièrement propice à une bonne propagation des ondes acoustiques. Un événement significatif pourra être détecté par un microphone éloigné. Une chute de blocs de quelques dizaines de mètres cubes est détectée à plusieurs centaines de mètres au sein de la mine C (taux de défrèvement ~75%). Au contraire, une cavité fermée, constituée de chambres ou de galeries de petites dimensions et avec peu d'interconnexions entre elles, est beaucoup moins propice à la propagation des ondes acoustiques. Pour être correctement surveillée, ce type de géométrie exigera un nombre plus important de capteurs.

5.3 ÉVALUATION DE L'ACTIVITE SONORE DE LA CAVITE

NB : Les notions de bruits de fond acoustiques et d'activité sonore sont décrites dans la section 2.7.

5.3.1 OBJECTIF DE L'EVALUATION DE L'ACTIVITE SONORE

Si les mécanismes d'évolution de la cavité considérée sont jugés comme sonores, ils doivent également être d'un niveau supérieur au bruit de fond. Dans le cas contraire, le faible rapport signal sur bruit rendrait les signaux peu exploitables : les événements seraient difficiles à identifier, localiser, estimer, etc. Au contraire, si la cavité est particulièrement silencieuse, il sera d'autant plus aisé de détecter un événement inhabituel.

De la même manière, une forte activité sonore, provoquée par exemple par des bruits urbains transitoires récurrents comme des passages quotidiens de poids lourds à proximité de l'entrée à flanc de coteau d'une ancienne mine, peut poser problème, même si le bruit de fond de la cavité est suffisamment faible. La génération de nombreux événements à analyser par un système automatique ou par un opérateur conduit à deux situations à éviter :

- que des événements d'intérêt soient considérés comme des artefacts et écartés, avec le risque de ne pas déclencher une alarme pourtant légitime ;
- que des artefacts soient considérés comme des désordres géotechniques et conduisent à une fausse alarme.

De plus, cela implique une quantité de travail d'analyse plus importante, l'analyse automatique étant souvent doublée d'une vérification par un opérateur spécialiste.

Afin de garantir un bruit de fond et une activité sonore les plus faibles possibles, il est évident que la mesure acoustique ne peut être envisagée que dans des cavités suffisamment silencieuses sinon complètement isolées des perturbations extérieures. Dans le cas contraire des travaux d'isolation acoustique peuvent être envisagés.

Un rapport signal sur bruit peut être jugé « bon » au-delà de 10 [10]. On peut étendre ce principe à la mesure acoustique : on souhaitera avoir un rapport minimal de 10 entre la pression acoustique des événements à surveiller et celle du bruit de fond P_0 . En termes de différence de niveau de pression, cela donne :

$$L_{P\text{ évé.}} - L_{P\text{ bruit}} = 20 \cdot \log\left(\frac{10 \cdot P_{\text{événement}}}{P_0}\right) - 20 \cdot \log\left(\frac{P_{\text{bruit}}}{P_0}\right) = 20 \cdot \log(10) = 20 \text{ dB}$$

Une différence de 20 dB est donc souhaitable entre le niveau de pression acoustique moyen du bruit de fond et le niveau de pression acoustique instantanée maximal des événements transitoires que l'on souhaite détecter. Selon les exigences de la surveillance, cette valeur est naturellement indicative et pourra être pondérée. Si un simple comptage de chutes de blocs suffit, un rapport signal sur bruit inférieur pourra être accepté, pour peu que l'identification des dites chutes de blocs soit univoque.

Un exemple de différents rapports signal/bruit est donné en Figure 23 :

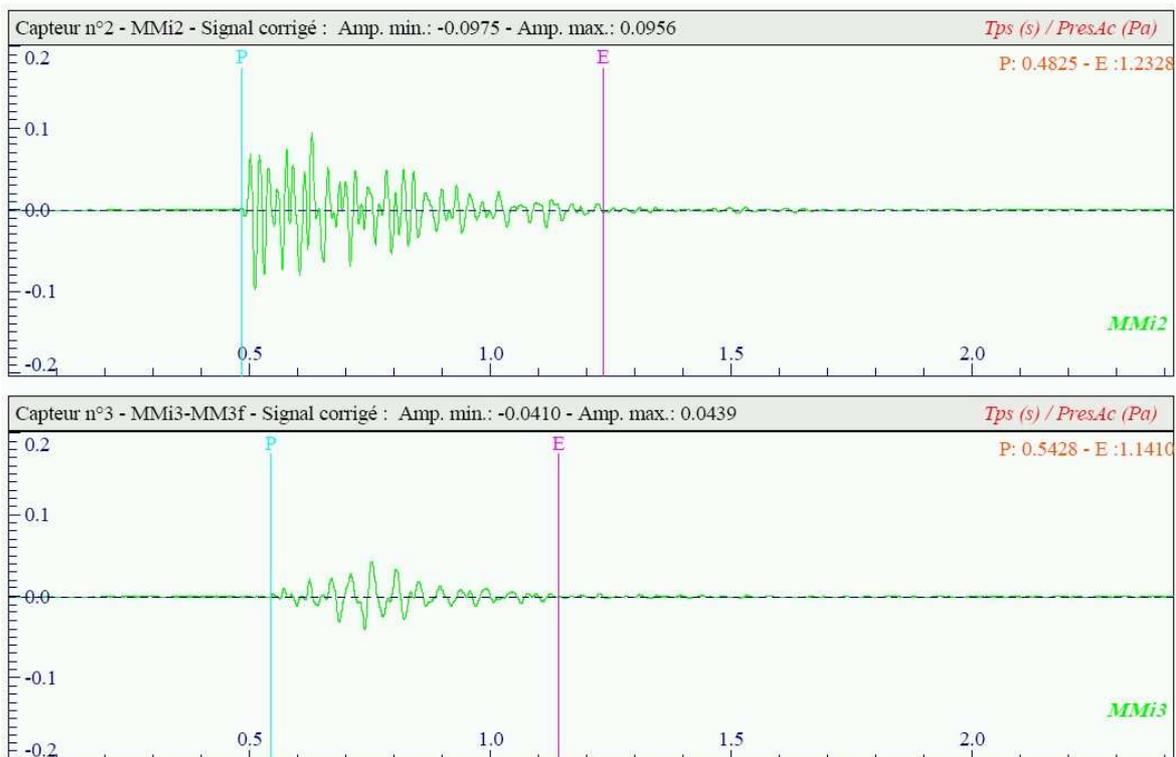


Figure 23 : Deux exemples d'enregistrement d'un même événement. Le premier microphone (Mi2) présente un signal environ 25 fois plus important que le bruit. Le second microphone (Mi7), plus éloigné de la source, n'a un rapport S/B que de 5 (~14 dB) et le temps de première arrivée est plus délicat à pointer avec précision.

5.3.2 MESURE DU BRUIT DE FOND

La mesure du bruit de fond pourra être réalisée à l'aide d'un sonomètre tel que décrit ci-avant. Une évaluation qualitative peut naturellement être faite à l'oreille. Cependant, les basses fréquences, inaudibles ou nettement sous-estimées à l'oreille humaine, peuvent être enregistrées par un microphone. Une mesure d'une dizaine de secondes est *a priori* suffisante pour caractériser le bruit de fond. Comme lors de toute utilisation d'un sonomètre, l'appareil sera tenu à bout de bras ou, mieux, installé sur un support.

L'appareil doit être éloigné au maximum des parois et de toute surface en général, y compris du corps de l'opérateur. Le silence total doit être fait, la simple respiration de l'opérateur à proximité du capteur augmente sensiblement les mesures. Moyennant les précautions d'usage, le degré de précision obtenu est acceptable.

Le maillage de mesure sera adapté à la taille de la cavité et à l'hétérogénéité de bruit de fond qu'*a priori* elle présente. L'objectif est uniquement de caractériser globalement la cavité. Les Figure 24 et Figure 25 donnent l'exemple de la mesure de bruit de fond réalisée sur le site d'Hayange :

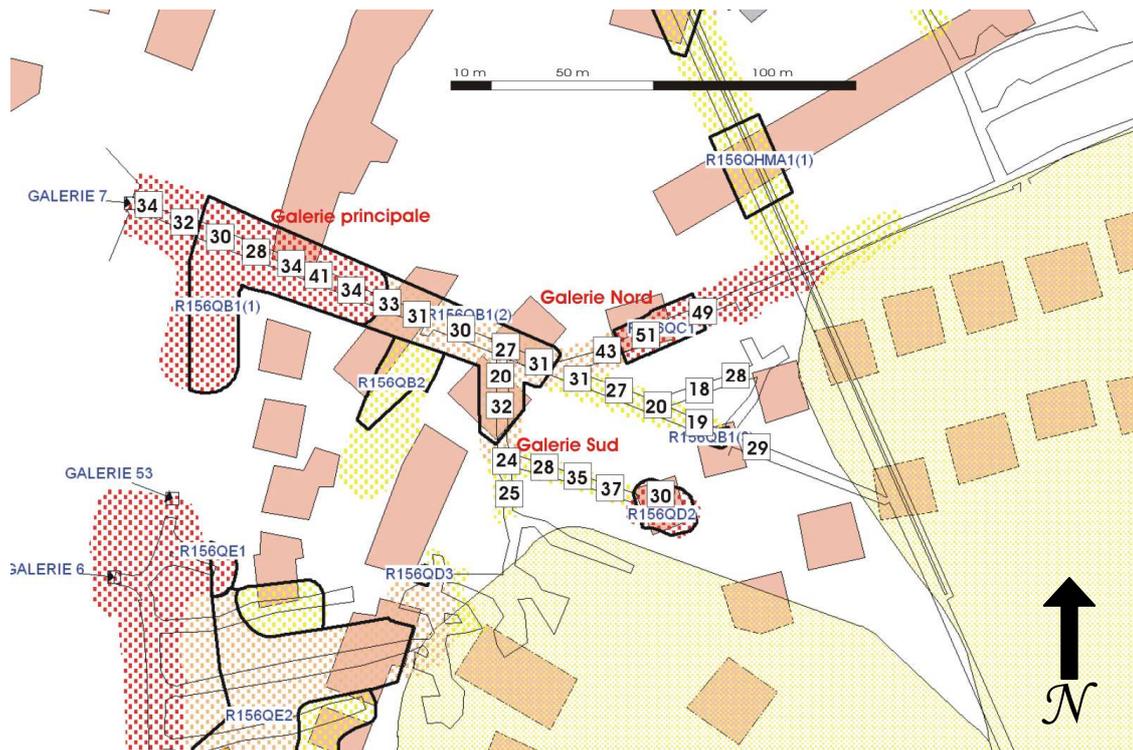


Figure 24 : Carte du bruit de fond de la mine d'Hayange : Les niveaux de pression acoustique en **LAeq** (dB) mesurés en différents points sont reportés sur la carte.



Figure 25 : Carte du bruit de fond de la mine d'Hayange (niveaux de pression acoustique en **LZeq** (dB)).

La mesure a été réalisée avec un maillage volontairement serré : une demi-douzaine de mesures réparties aurait été suffisante en galerie principale, complétée par 2 à 3 mesures dans chacune des galeries annexes (Nord et Sud). Le niveau de bruit moyen enregistré sur le site de Moyeuivre est de 55 à 65 dB (LZeq) ou 25 à 30 dB (LAeq), sans zone singulière notable. Ce niveau de bruit peut tout à fait être considéré comme très faible, le silence de la cavité n'étant perturbé que par quelques chutes de gouttes d'eau. Sur le site d'Hayange :

- la galerie principale présente un niveau de bruit de fond supérieur à celui de Moyeuivre en LAeq ou LZeq, son entrée débouchant directement sur une rue en milieu résidentiel urbain. Le bruit de fond s'atténue cependant en fond de galerie, surtout dans l'audible (LAeq) ;
- la galerie Sud est plus silencieuse que la galerie principale ;
- la galerie Nord est beaucoup plus bruyante dans l'audible, en raison d'un écoulement d'eau important et continu. Les niveaux de pression acoustique enregistrés (40 à 50 dB) excluent une surveillance acoustique à proximité de la source.

La zone d'étude est globalement plus bruyante que celle de Moyeuivre. Le fort écoulement d'eau en galerie Nord ne permet pas d'y utiliser des microphones, mais le bruit de cet écoulement s'atténue très vite dans l'audible en dehors de cette galerie. Cependant, le niveau de bruit de fond en galerie principale traduit l'influence non négligeable en pondération nulle (LZeq) de l'écoulement et de l'environnement urbain, laissant présager une activité sonore importante. Le cas d'Hayange illustre le besoin de prendre en compte la plage de fréquence des microphones que l'on souhaite utiliser. Dans l'audible, l'influence de la circulation d'eau s'atténue très vite néanmoins elle reste persistante en pondération nulle, plus proche de ce qu'enregistrera un microphone.

5.3.3 EVALUATION DE L'ACTIVITE SONORE

L'activité sonore peut être évaluée en observant les alentours de la cavité, les zones les plus critiques étant naturellement les terrains surplombant, les accès depuis la surface, ouvragés ou naturels tels que des fontis déjà apparus en surface. Peuvent notamment avoir une influence importante :

- Les axes routiers, notamment si des poids-lourds y circulent ;
- Les industries déplaçant des objets lourds (ferrailleur, coupe d'arbres, etc.) ;
- Les travaux de génie civil ou de voirie ;
- Les rassemblements de personnes (écoles, etc.).

Une attention sera évidemment portée sur la fréquentation de la cavité elle-même : intrusions non déclarées, visites, passages d'animaux, circulation d'eau saisonnière, etc.

L'évaluation de l'activité sonore d'une cavité repose essentiellement sur la connaissance de la vie de cette cavité et de son environnement. Les sites pilotes ont fait apparaître l'activité suivante :

Moyeuivre

- enregistrement de quelques bruits de surface basse fréquence (fréquence maximale inférieure à 30 Hz), jusqu'à une dizaine par semaine en heures et jours ouvrés (cf. Figure 26). Ces événements se distinguent clairement par des amplitudes et des temps d'arrivée comparables sur tous les microphones, marquant ainsi clairement leur origine hors de la cavité ;
- visites techniques (moins de 10 par an). Par la richesse de son spectre aux alentours de 100 à 500 Hz (cf. Figure 27), un spectre de voix est clairement identifiable. Afin de lever toute ambiguïté, il a été demandé de déclarer toute visite en amont.

Hayange

- de très nombreux bruits urbains sont transmis depuis la galerie d'accès (sortie d'école, plusieurs déclenchements par jour. Exemple en Figure 28). Le microphone 1 saturant régulièrement, il a été placé hors déclenchement : il ne peut plus déclencher d'enregistrement mais reste exploité en cas d'enregistrement déclenché par les autres capteurs. Le seuil du deuxième microphone, éloigné d'environ 100 m de l'entrée a également du être relevé ;
- de nombreux bruits de surface sont enregistrés essentiellement par les microphones les plus proches de l'entrée. L'origine est très probablement la route surplombant directement le microphone 2. Les basses fréquences (<30Hz) peuvent aller jusqu'à saturer le microphone 2 (>118 dB).

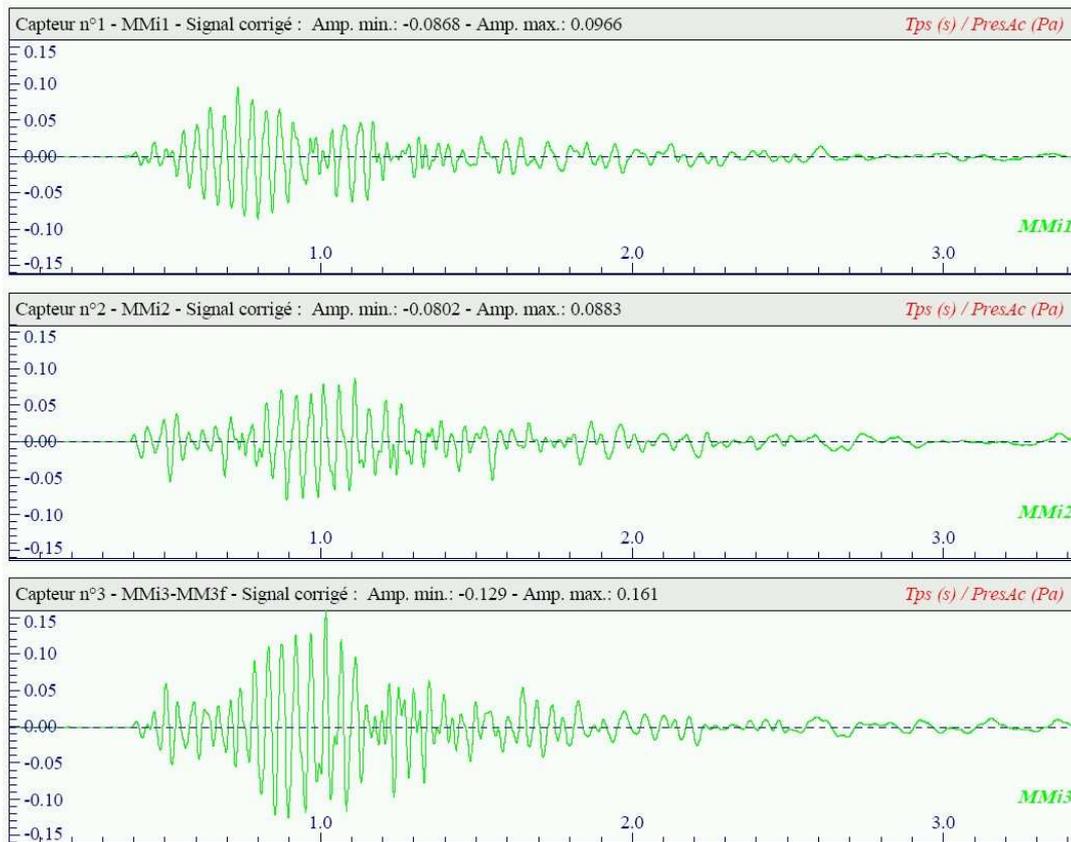


Figure 26 : Bruit de surface enregistré à Moyeuivre (illustration sur les trois premiers microphones). L'amplitude est du même ordre de grandeur sur tous les microphones et les temps d'arrivée sont également proches.

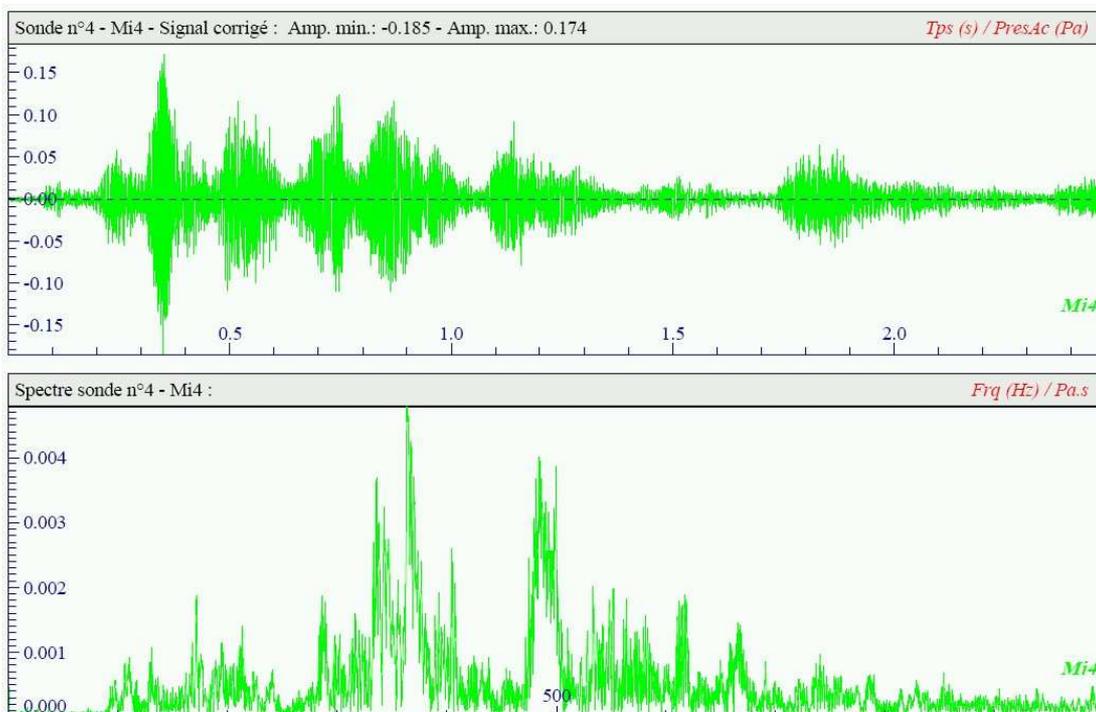


Figure 27 : Exemple de voix humaine enregistrée à Moyeuivre (signal et spectre). La signature du signal est tout à fait caractéristique et aisément reconnaissable.

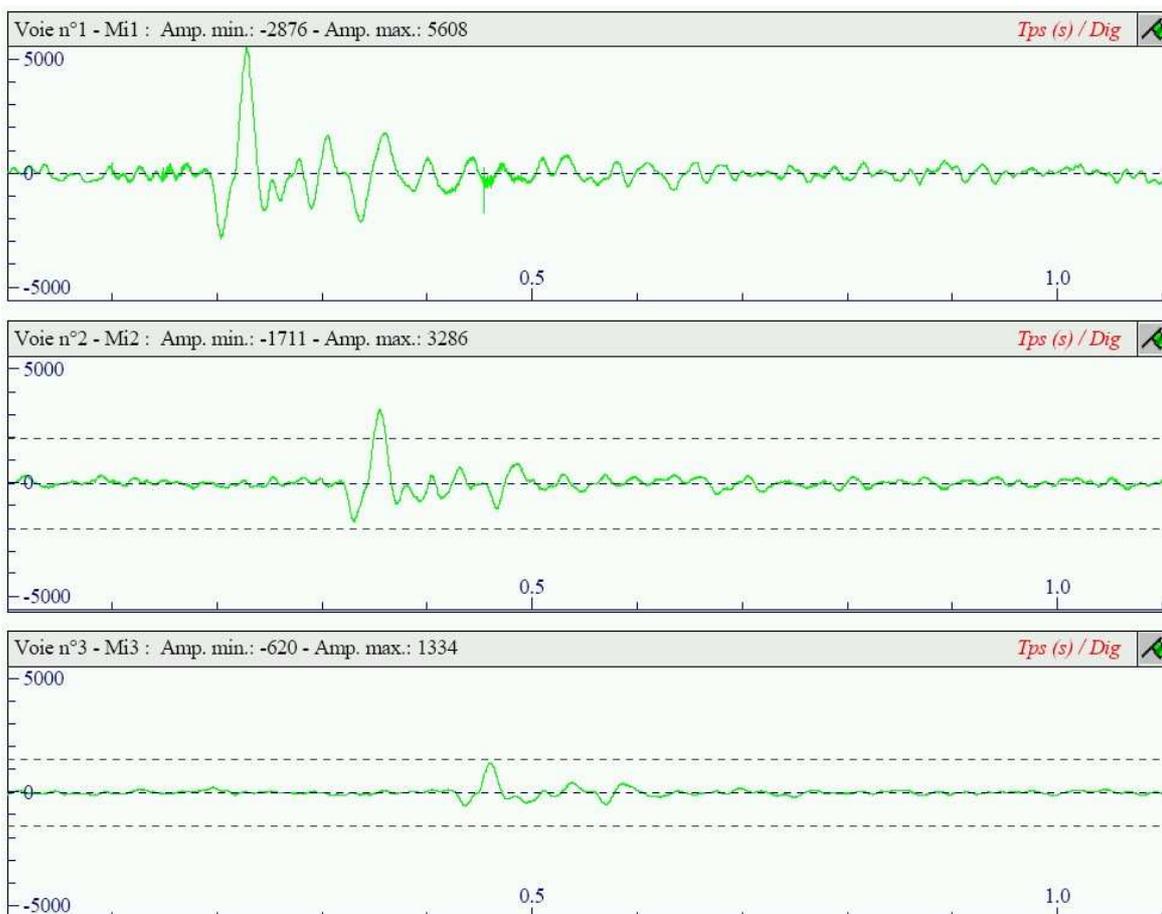


Figure 28 : Exemple de bruit urbain enregistré en entrée de galerie (microphone 1) s'atténuant au fur et à mesure de son avancée (microphones 2 puis 3).

5.4 ÉVALUATION DE LA SUSCEPTIBILITE ACOUSTIQUE

Un même mécanisme de chute de blocs créera une onde acoustique plus ou moins forte selon la cavité dans laquelle elle se produit. Plusieurs facteurs à la source entrent en ligne de compte : nature de la roche au sol (remblai, massif), présence de blocs rocheux au sol, présence d'eau, géométrie favorisant la réverbération, etc. La capacité d'une rupture locale ou d'une chute de matériaux à produire une onde acoustique importante est appelée dans ce rapport « susceptibilité acoustique ». Plus cette susceptibilité acoustique est importante, plus il sera facile de détecter et de caractériser une chute de blocs, toutes choses étant égales par ailleurs.

Concernant les chutes de blocs, la susceptibilité acoustique peut être qualifiée au premier ordre en réalisant une chute manuelle d'un petit bloc (20 kg par exemple) depuis la hauteur de la cavité et en s'assurant que le son n'est pas particulièrement étouffé. L'objectif est de s'assurer que le sol de la cavité n'absorbe pas l'essentiel du choc de déformation et de l'onde acoustique.

De plus, de gros blocs peuvent également être lâchés depuis une certaine hauteur en utilisant une chèvre et un système de poulie, voir illustration en Figure 29. La simplicité de mise en œuvre d'un tel test dépendra surtout des conditions d'amenée du matériel. Dans le cas d'une cavité facilement accessible, quelques heures suffisent à faire chuter une dizaine de blocs. Plus les chutes de bloc simulées seront représentatives de celles effectivement redoutées, plus le test sera probant.



Figure 29 : Simulation de chutes de blocs de calcaire de 50 kg. La chèvre permet de lever le bloc jusqu'à 2,50 m, les poulies divisent l'effort par 5. Une ficelle permet d'ouvrir un largueur à distance.

Les indices visuels laissant présager d'une susceptibilité acoustique faible à élevée sont listés dans le tableau ci-dessous. Il s'agit du retour d'expérience de l'INERIS sur quelques sites. Leur influence pourrait être différente dans d'autres contextes :

Critère	Susceptibilité acoustique élevée	Susceptibilité acoustique faible
Nature du sol	Banc de roche dure, homogène	Roche tendre, sable, mur très altéré (fracturé, soufflé)
Nature des parois environnantes	Parois lisses	Parois rugueuses, absorbantes
Présence au sol	Eau	Remblais poreux, amas de blocs
Taille et ouverture des chambres	Chambres isolées de petite taille, galeries filantes	Grandes chambres, très ouvertes

Pour une chute de blocs, le terme source sera la somme de plusieurs termes acoustiques :

- La fracturation liée au détachement du bloc (en cas de persistance ultime d'un pont rocheux retenant le bloc avant la rupture provoquant sa chute) ;
- L'impact au sol du ou des blocs ;
- La fragmentation éventuelle au moment de l'impact, compte-tenu de l'énergie cinétique accumulée lors de la chute.

5.5 BILAN DE L'ETUDE DE FAISABILITE

L'étude de faisabilité d'une surveillance acoustique vis-à-vis du risque de fontis et dans une cavité donnée peut être résumée par les étapes suivantes :

- le mécanisme de dégradation de la cavité est-il sonore ?
- le risque est-il réparti dans un grand nombre de cavités avec peu ou pas d'interconnexions ?
- la cavité présente-elle un bruit de fond favorable pour une surveillance acoustique ?
- la cavité présente-elle *a priori* une activité sonore suffisamment faible et caractéristique pour ne pas gêner la détection et le traitement des phénomènes surveillés ?
- selon l'extension et la complexité géométrique des vides à surveiller, la « susceptibilité acoustique » est-elle suffisante pour une surveillance acoustique efficace ?

Les réponses à ces questions ne permettent cependant qu'une première approche, à partir de laquelle un dimensionnement *a priori* du réseau de microphones peut être fait. Des critères de dimensionnement plus fins sont décrits dans la section suivante.

D'autres aspects, strictement techniques, sont évoqués en section 8.3.

Plusieurs aspects ont été évoqués pour répondre de manière strictement qualitative à ces questions. Un tableau résumant ces aspects est proposé ci-après :

<i>Avancement du phénomène</i>	
Fontis peu avancé	Favorable. Chutes de bloc sonores. Bonne anticipation.
Fontis avancé dans le recouvrement	Défavorable. Chutes de blocs étouffées. Anticipation médiocre.
Fontis proche de la surface	Très défavorable. Aucune anticipation possible.
<i>Géométrie de la zone à risque</i>	
Vides bien connectés	Favorable. Bonne propagation des ondes acoustiques. Possibilité d'entendre un événement par plusieurs capteurs pour localisation.
Galeries linéaires	Favorable. Excellente propagation. Localisation très simple.
Plusieurs vides isolés	Défavorable. Propagation limitée. Nécessité d'instrumenter chaque secteur. Localisation précise plus difficile.
<i>Présence d'eau</i>	
Cavité sèche ou légèrement humide	Favorable. Peu de perturbation liée à l'eau.
Cavité très humide	Plutôt défavorable. Microphones sensibles à l'humidité. Possibilité d'enregistrer des chutes de gouttes d'eau. Augmentation possible de la susceptibilité acoustique.
Ecoulements d'eau	Très défavorable. Augmentation significative du bruit de fond sonore.
<i>Activité sonore</i>	
Cavité silencieuse	Très favorable.
Activité sonore légère	Plutôt défavorable. Les enregistrements parasites peuvent être écartés facilement.
Activité sonore importante	Défavorable. Nécessité de monter les seuils de détection, de filtrer ou d'utiliser une mesure complémentaire.
<i>Nature du sol et des parois</i>	
Sol dur, parois lisses	Favorable. Susceptibilité acoustique accrue.
Sol tendre, présence de sable, de remblai, parois	Défavorable. Susceptibilité acoustique diminuée.

fracturées ou reconstituées	
<i>Taille des chutes de bloc</i>	
Chute de gros blocs (> 500 kg)	Favorable. Chute sonores et énergétiques.
Chutes de petits blocs (< 200 kg)	Défavorable. Rayon d'écoute diminué et localisation plus difficile.
<i>Hauteur de la cavité</i>	
Grande ouverture	Favorable. Les chutes sont d'autant plus sonores.
Petite ouverture	Peu défavorable. Les chutes sont d'autant moins sonores.

6. DIMENSIONNEMENT D'UN RESEAU DE CAPTEURS

6.1 CARACTERISATION DE L'EVENEMENT MINIMAL

Pour concevoir un dispositif d'écoute acoustique adapté à l'événement minimal que l'on souhaite enregistrer, il est nécessaire de connaître le niveau de pression acoustique provoqué par cet événement. Cela permet notamment d'ajuster au mieux les paramètres de la chaîne d'acquisition (dynamique du capteur et de la chaîne d'acquisition, gains d'amplification, seuils de détection, etc.). L'objectif est d'avoir une dynamique permettant à la fois de détecter des événements mineurs mais significatifs ainsi que des événements de plus forte amplitude, sans saturation.

Une simulation d'événement sera mise en œuvre autant que possible, puisqu'elle permettra au dimensionnement de prendre en compte quantitativement les effets évoqués en section 5 (géométrie, susceptibilité acoustique, hauteur de chute, etc.), difficilement quantifiables. Il s'agira :

- de réaliser une chute maîtrisée d'un bloc (naturel ou fabriqué) de taille raisonnable, depuis la hauteur de la cavité, si possible, et en évitant au maximum toute activité sonore temporaire liée à l'essai ;
- d'enregistrer le niveau de pression acoustique à la source de cet événement avec un sonomètre, la mesure étant réalisée aussi près de ce que permet la parfaite sécurité de l'opérateur, soit à quelques mètres de distance ;
- de réaliser cet essai dans un environnement représentatif de la cavité (nature du sol, ouverture) afin de prendre en compte une susceptibilité acoustique caractéristique. Si la cavité présente des environnements très hétérogènes plusieurs essais pourront être menés dans différentes zones.

Avec cet objectif, des chutes contrôlées ont été réalisées dans l'ancienne mine de fer D. Un bloc de béton de 500 kg, soit environ 0,2 m³, a été monté et lâché d'une hauteur de 2 mètres environ à l'aide d'un engin de chantier (cf. Figure 30). Le test a été réalisé à une dizaine d'emplacements de la galerie principale (longiligne, plusieurs kilomètres, peu de ramifications), et notamment dans une petite hauteur d'eau en fin de galerie. Le niveau de pression acoustique à la source a été systématiquement mesuré à l'aide d'un sonomètre, tenu par un opérateur placé à environ 5 mètres de la zone d'impact (distance minimale pour assurer la sécurité de l'opérateur).

Les niveaux de pression enregistrés sont globalement homogènes et donnent donc une indication fiable de la pression acoustique provoquée par la chute d'un bloc « moyen » de 500 kg de la hauteur de galerie. Les chutes en petite hauteur d'eau se sont avérées sensiblement plus bruyantes (~114 dB ± 2 LZI_{max}) que celles en galerie sèche (~109 dB ± 4 LZI_{max}) et présentent davantage de hautes fréquences.



Figure 30 : Chutes contrôlées d'un bloc de béton (500 kg) dans une ancienne galerie de la mine de fer D. Le bloc de béton est monté à l'aide d'une machine-outil. Une fois en place la corde le retenant est lâchée.

Selon la cavité, une telle expérimentation ne sera pas toujours faisable techniquement. Une série de chutes de plus petite importance peut alors être envisagée, comme celle décrite en section 5.4 pour l'évaluation de la susceptibilité acoustique. Dans les anciennes mines d'Hayange et Moyeuvre, des chutes manuelles de simples petits blocs de 15 à 20 kg ont été réalisées. A titre d'illustration, la chute d'un bloc de 15 kg ($\sim 6 \text{ dm}^3$) depuis 2 mètres de hauteur et sans fracturation au sein de la galerie Sud d'Hayange a provoqué une onde acoustique de 94 dB (LZlmax), soit environ 20 dB de plus que le bruit de fond (en LZeq, cf. section 5.3). L'enregistrement d'événements aussi mineurs n'est envisageable que si le réseau de microphones est suffisamment dense pour que la chute se produise à proximité d'un microphone (cf. section 6.2).

6.2 EVALUATION DE L'ATTENUATION DES ONDES ACOUSTIQUES

6.2.1 OBJECTIFS

La surveillance en grand d'une cavité souterraine peu profonde par méthode acoustique reste une approche peu documentée dans la littérature technique et scientifique. Par conséquent, la propagation des ondes acoustiques en cavité complexe n'est pas bien connue. Pourtant, la compréhension de cette propagation est essentielle pour permettre de caractériser les signaux acoustiques enregistrés.

Notamment pour deux aspects importants : la localisation de l'événement et son intensité à la source. La localisation sera envisagée de préférence une fois le réseau de capteurs mis en place et sera abordée en section 7.2.

L'atténuation acoustique (définie en section 2.5) peut, elle, être mesurée en amont de l'installation. Son évaluation doit être faite à deux titres :

- L'objectif est, au moins, de mesurer les événements significatifs choisis (cf. section 6.1). Pour être correctement mesuré par les microphones à une distance donnée, il s'agit de s'assurer que le signal acoustique n'est pas trop atténué, quel que soit la localisation de l'événement source au sein de la zone à risques. Considérons, par exemple, une chambre simple et de petite dimension reliée au reste de la carrière par une unique galerie. Il peut s'avérer coûteux de mettre en place un microphone pour cette seule chambre. Un microphone peut être déployé au sein de la cavité principale et à proximité de l'entrée de la galerie de liaison, pour autant que l'on se soit assuré que l'onde acoustique provoquée par un événement mineur reste suffisamment énergétique en sortie de galerie pour être correctement enregistrée par le microphone ;
- Si la localisation de l'événement source est connue, la connaissance de l'atténuation permettra l'estimation du niveau de pression acoustique à la source, et donc de l'intensité du phénomène à l'origine du bruit.

6.2.2 DIFFICULTES DE L'EVALUATION

L'atténuation peut difficilement être évaluée par une simple observation de la cavité. En effet, la rugosité des parois joue un rôle important dans l'atténuation (cf. section 2.5), ainsi que la géométrie de la cavité. A titre d'exemple, en utilisant le même événement source, différents contextes ont été étudiés (reproduction d'une chute de bloc manuelle - 0,2 s, fréquences dominantes entre 300 et 500Hz, amplifiée à environ 108dB (LZlmax)) :

- Site d'Hayange : trajet d'onde en longue galerie filante aux parois peu rugueuses, peu de départs de galeries secondaires : perte d'environ 13 dB sur 50 mètres ;
- Site de Moyeuivre : trajet d'onde en longue galerie filante aux parois extrêmement rugueuses (murs reconstitués de petits blocs de stérile piégeant les ondes acoustiques), nombreux départs de galeries secondaires : perte d'environ 22 dB sur 50 mètres ;
- Site de Moyeuivre : trajet d'onde dans le même contexte mais en empruntant une galerie secondaire (cf. Figure 31) : perte d'environ 43 dB sur 50 mètres, soit plus de 20 dB perdues en ajoutant une unique bifurcation.

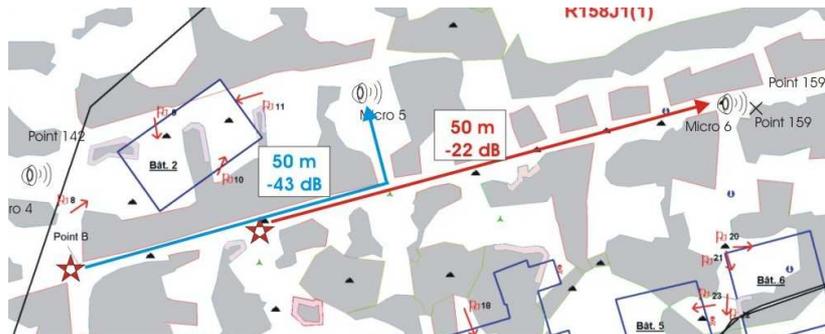


Figure 31 : Comparaison de l'atténuation suivant 2 trajets différents dans la mine de Moyeuve. Les étoiles symbolisent les événements sources, strictement identiques d'un point de vue acoustique.

Ces mesures démontrent l'influence importante des caractéristiques physiques de la cavité (géométrie, état des parois, etc.), influence difficile à évaluer par simple observation. En conséquence, il est nécessaire de mettre en œuvre une expérimentation pour quantifier objectivement l'atténuation de la cavité.

6.2.3 METHODE D'ÉVALUATION DE L'ATTENUATION

Une méthode d'évaluation de l'atténuation avec la distance basée sur l'utilisation d'une source sonore et d'un sonomètre est décrite ci-dessous. Afin de proposer une méthode opérationnelle, nous ne considérons pas ici l'atténuation selon la distance réellement parcourue par l'onde acoustique (distance aérienne) mais l'atténuation selon la distance en ligne droite entre source et capteur (distance directe). Ceci permettra d'établir une atténuation empirique ou équivalente en fonction de la distance directe. En effet, de nombreux facteurs interviennent dans l'atténuation, il est donc compliqué d'évaluer l'atténuation sur un trajet donné au sein d'une cavité réelle sans modélisation numérique (et sans recourir à une méthode empirique du type source fixe et mesure du niveau de pression en tous points de la cavité).

L'établissement, sous certaines hypothèses raisonnables, d'une relation atténuation équivalente / distance directe permet, cependant, une approche par défaut d'évaluation du système de surveillance, de sa conception à son fonctionnement.

La démarche décrite ci-dessous propose de mesurer l'atténuation de l'onde acoustique d'une chute de bloc ou de sa reproduction via une source acoustique. Elle présente donc l'avantage de tenir implicitement compte du spectre réel d'une chute de bloc. L'atténuation d'une onde acoustique est en effet fonction des fréquences qui la composent. De manière générale, plus les fréquences sont élevées (plus les longueurs d'onde sont petites) plus l'onde sera atténuée rapidement, par réflexion aux parois et par absorption par le milieu de diffusion (air, roche) [8]. Il est donc important de réaliser la mesure d'atténuation avec des signaux représentatifs des futurs événements que l'on souhaite caractériser.

Les étapes suivantes sont proposées :

- La source sonore est programmée et calibrée pour reproduire au mieux l'événement acoustique d'un événement caractéristique en termes de

signature, fréquence, amplitude, durée, etc. Malheureusement, une source sonore pourra très difficilement reproduire fidèlement les basses fréquences provoquées par une chute de blocs réelle d'une certaine importance (la source utilisée par l'INERIS descend jusqu'à 60 Hz, les chutes réelles enregistrées présentent de l'énergie jusqu'à 20 ou 40 Hz). A défaut, on cherchera tout de même à avoir une source capable de descendre le plus possible. Si l'enregistrement d'un événement minimal a pu être réalisé lors d'une expérimentation de chute artificielle (cf. section 6.1), on pourra tout à fait l'exploiter ici ;

- Le niveau de pression acoustique (LZI_{max}) de l'événement calibré est mesuré à proximité immédiate de la source acoustique. Puis, le même événement est provoqué en une zone distante, la mesure du niveau de pression acoustique permettant de déduire immédiatement l'atténuation totale sur le trajet considéré ;
- Le choix des trajets à étudier sera fonction de la cavité :
 - Si la cavité est globalement homogène, une série de trajets sur des longueurs différentes et caractéristiques sera suffisante pour construire une relation simple entre distance parcourue et atténuation. Ces trajets devront être représentatifs des trajets directs source / capteurs envisagés. Il ne s'agira pas de ne considérer que des trajets dans une galerie rectiligne par exemple ;
 - En cas de cavité présentant clairement des zones différentes d'un point de vue géométrie (taux de défrètement différent, surlargeur, surhauteur, etc.) ou de rugosité des parois (méthode d'excavation différente, présence de nombreux blocs au sol, murs ou piliers reconstitués, etc.), ce travail sera réalisé dans chacune des zones ;
 - Enfin l'atténuation provoquée par une singularité ponctuelle (chambre isolée, longue galerie, présence d'un puits, zone éboulée, etc.) pourra être estimée spécifiquement.

Un exemple de choix de trajets est fourni en Figure 32.

- Une relation atténuation équivalente / distance directe peut alors être construite. Des résultats dispersés seront le signe que la cavité est moins homogène qu'elle n'y paraît ou qu'une singularité importante n'a pas été identifiée. Aussi, on prendra soin de vérifier que les résultats sont proches les uns des autres pour des distances similaires (une certaine variabilité des mesures étant cependant inévitable) afin de repérer au plus tôt la ou les zones particulières ou les singularités majeures.

6.2.4 ILLUSTRATIONS DE LA METHODE

Un exemple de campagne de test au sein de la carrière E est proposé ci-dessous. On considère que seule la géométrie évolue, les autres paramètres régissant l'atténuation étant homogène sur toute la carrière (hauteur de galerie, rugosité des parois, etc.).

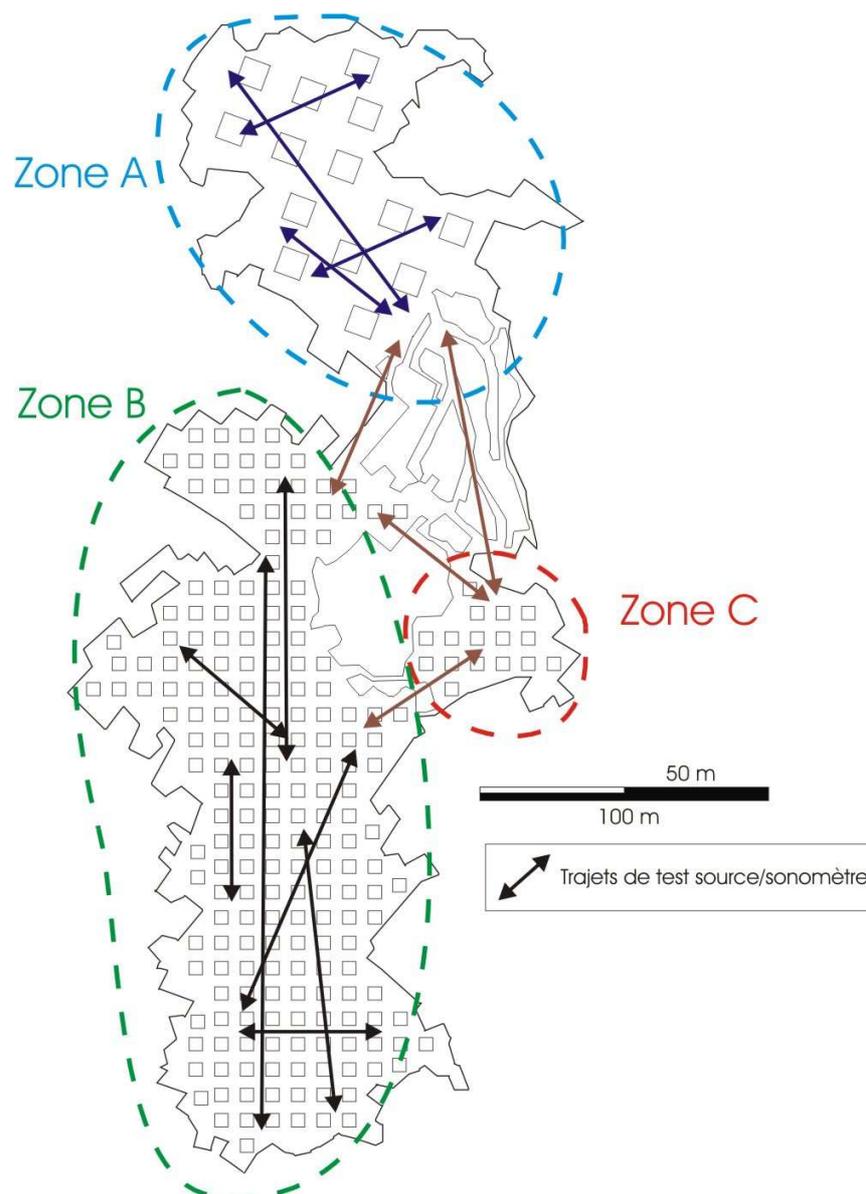


Figure 32 : Proposition de trajets de test source/sonomètre pour l'évaluation de l'atténuation dans la carrière souterraine E. Les trajets caractérisent à la fois chacune des zones ainsi que leurs interfaces.

Trois zones sont identifiées (A, B et C). Les zones B et C présentent un taux de défrètement identique tandis que celui de la zone A est plus important. Une dizaine de trajets peuvent être réalisés en zone B, en exploitant des orientations et longueurs différentes (20 à 200 mètres). L'atténuation sur de petites distances sera appliquée à la zone C. Une demi-douzaine d'essais sera réalisée en zone A (20 à 100 mètres). Enfin selon les principaux chemins reliant les zones (1 entre A et B, 1 entre A et C, 2 entre B et C), l'atténuation sera évaluée par 2 à 3 tests supplémentaires.

Une telle campagne de mesure a été réalisée sur le site de Moyeuivre, l'unique différence étant que les microphones en place ont été exploités au même titre que le sonomètre, multipliant ainsi le nombre de trajets testés.

Le signal source a consisté en une reproduction sonore d'une chute de blocs contrôlée et amplifiée à l'émission, telle que décrite précédemment (0,2 s, 300-500Hz, 108dB (LZI_{max})). Le résultat est donné en Figure 33 :

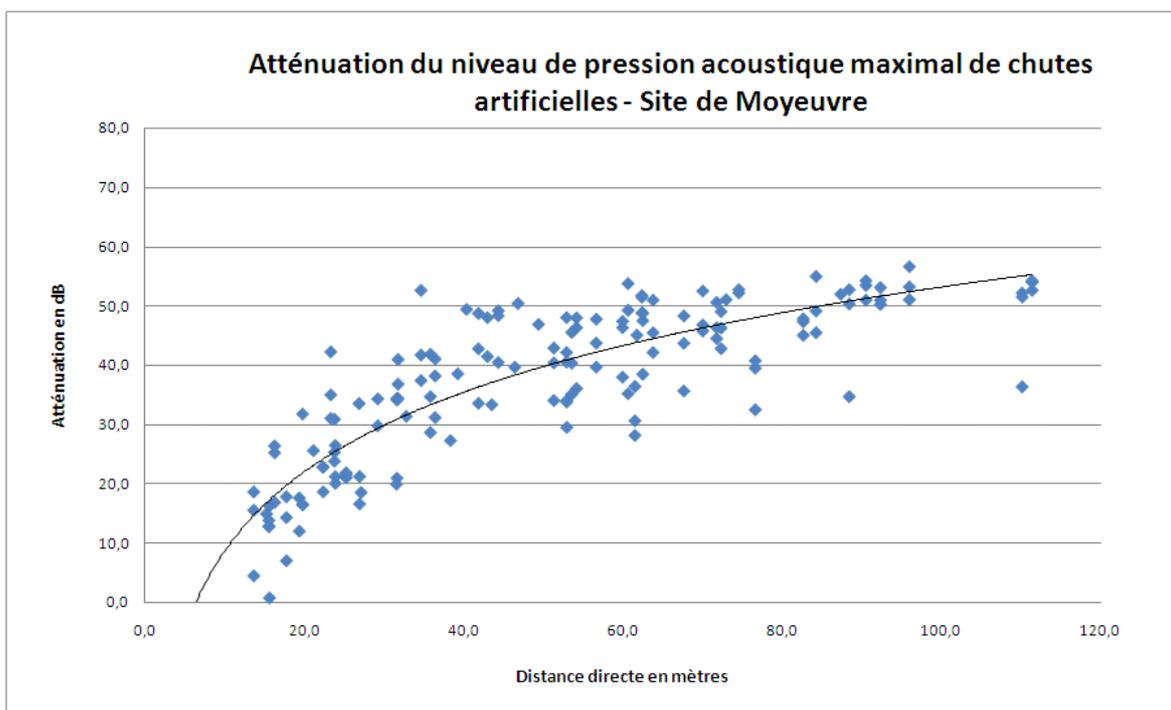


Figure 33 : Atténuation équivalente en fonction de la distance directe mesurée sur le site de Moyeuivre. L'atténuation augmente naturellement avec la distance selon une tendance logarithmique. L'écart-type moyen des mesures avec cette tendance est de 10 dB.

On observe une certaine variabilité sur ces mesures d'atténuation mais la tendance générale permet de l'apprécier au premier ordre. La zone d'étude de Moyeuivre étant considérée comme globalement homogène, on peut utiliser cette évaluation pour calculer un rayon d'écoute moyen des microphones vis-à-vis d'un événement « moyen » de 500 kg (dont le niveau de pression acoustique est tiré de l'expérimentation réalisée dans la mine d'Angevillers).

Pour rappel, le niveau de pression acoustique du bruit de fond moyen sur Moyeuivre (LZI_{leq}) est de 60 dB. La moyenne des niveaux de pression acoustique à la source d'une chute de 500 kg est de 109 dB (LZI_{max}).

Pour enregistrer un événement de cette amplitude avec un rapport signal/bruit supérieur à 10, le niveau de pression acoustique au microphone doit être d'au moins 80 dB (soit 20 dB de plus que le bruit de fond, cf. section 5.3), ce qui représente une atténuation de 29 dB par rapport au signal source.

Un tel événement serait donc correctement enregistré s'il se produisait dans un rayon d'environ 30 m autour d'un microphone. Il resterait évidemment visible pour des rapports signal/bruit inférieurs : un rapport de 5 serait atteint jusqu'à environ 40 m et l'événement serait encore visible jusqu'à environ 80 m au mieux. Pour un événement de 20 kg (94 dB) ces distances deviennent respectivement : 20 m, 30 m et 60 m.

Pour illustrer l'importance du spectre de la source, une série d'expérimentations a été menée au sein de la carrière de calcaire E. Des signaux monofréquentiels ont été émis grâce à la source acoustique et enregistrés aux différents microphones présents dans la carrière. Le tableau ci-dessous indique l'atténuation moyenne dans deux zones homogènes de la carrière, à une distance de 100 m et pour différentes fréquences :

	Atténuation en zone Nord et écart-type (dB)	Atténuation en zone Sud et écart-type (dB)
Tirs au pistolet	52 ± 4	44 ± 4
80 Hz	52 ± 3	43 ± 5
100 Hz	57 ± 1	48 ± 5
200 Hz	80 ± 1	51 ± 5
500 Hz	89 ± 5	58 ± 4
1000 Hz	92 ± 5	65 ± 4

In fine cette démarche, bien que qualitative, donne des éléments tangibles de dimensionnement. Le réseau pourra être adapté par la suite en profitant de la facilité d'installation de ces capteurs. Un développement de cette approche devrait être de distinguer l'atténuation selon des gammes de fréquences, le terme source étant différent selon l'importance de la chute de blocs.

6.3 BILAN DE LA METHODE DE DIMENSIONNEMENT

La méthode de dimensionnement décrite en détails ci-dessus peut être résumée par les étapes ci-dessous :

- Définition des objectifs de surveillance ;
- Reproduction volontaire de l'événement minimal afin de mesurer le niveau de pression acoustique de référence dans le contexte de la cavité ;
- Essais de mesure de l'atténuation équivalente à l'échelle de la cavité. Un zonage de la cavité peut être fait si elle présente des caractéristiques géométriques et/ou géologiques hétérogènes ;
- Détermination d'un rayon d'action moyen pour les microphones vis-à-vis de l'événement minimal à enregistrer.

Une fois ces éléments en main, il est alors possible de concevoir le futur réseau de surveillance acoustique, qui tiendra compte évidemment du rayon d'action moyen estimé mais également des éventuelles hétérogénéités de propagation identifiées lors de l'expérimentation de mesure de l'atténuation (galerie étroite, chambre isolée, etc.)

Les sections 7 et 8 décrivent les étapes préliminaires à l'installation. Une fois la faisabilité établie et le dimensionnement réalisé, le réseau de microphones peut être installé.

7. CALAGE DU DISPOSITIF DE TELESURVEILLANCE

Comme dit au paragraphe précédent, nous considérons pour la suite que le réseau de microphone et le système d'acquisition sont en place au sein de la cavité surveillée.

7.1 VALIDATION DE LA SENSIBILITE DU SYSTEME ET DE LA DETECTABILITE DES PHENOMENES

Une validation simple et essentielle du dispositif installé est de s'assurer qu'un événement minimal est bien détecté quel que soit l'endroit où il survient au sein de la zone étudiée.

Une nouvelle série de simulations d'un événement minimal (similaire à ce qui a été décrit en section 6.1) sera réalisée, en choisissant les emplacements les moins bien couverts par le réseau de microphones en place. Il s'agira typiquement des zones les plus éloignées de tout microphone. Cette série de nouvelles simulations n'a pas d'autre but que celui de valider l'implantation du réseau de microphones. Si les événements simulés dans un secteur donné sont enregistrés avec un rapport signal sur bruit médiocre, ou simplement non détectés, il s'agira alors de modifier le réseau de microphones en conséquence, voire de le densifier.

Si l'événement minimal est important (par exemple, chute d'un bloc de 500 kg depuis 2 mètres), on pourra tout à fait simuler cette chute à l'aide d'une source acoustique pour autant que le niveau de pression acoustique provoqué par une telle chute dans le contexte de la cavité soit effectivement connu.

Une série de chutes manuelles de petits blocs de 20 kg a été réalisée sur le site de Moyeuve aux emplacements les plus éloignés des microphones (cf. Figure 34) ou en apparence les plus isolés (par exemple, au sein de la chambre au nord de la zone). Les blocs ont été lâchés depuis la hauteur de la galerie.

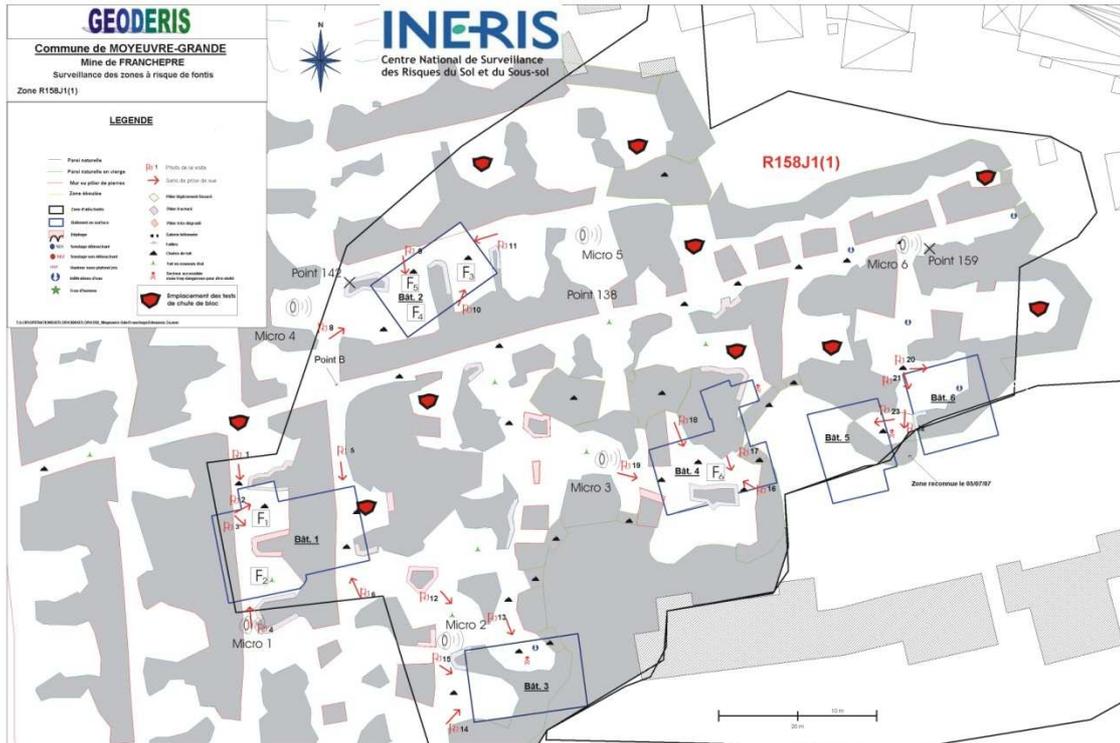
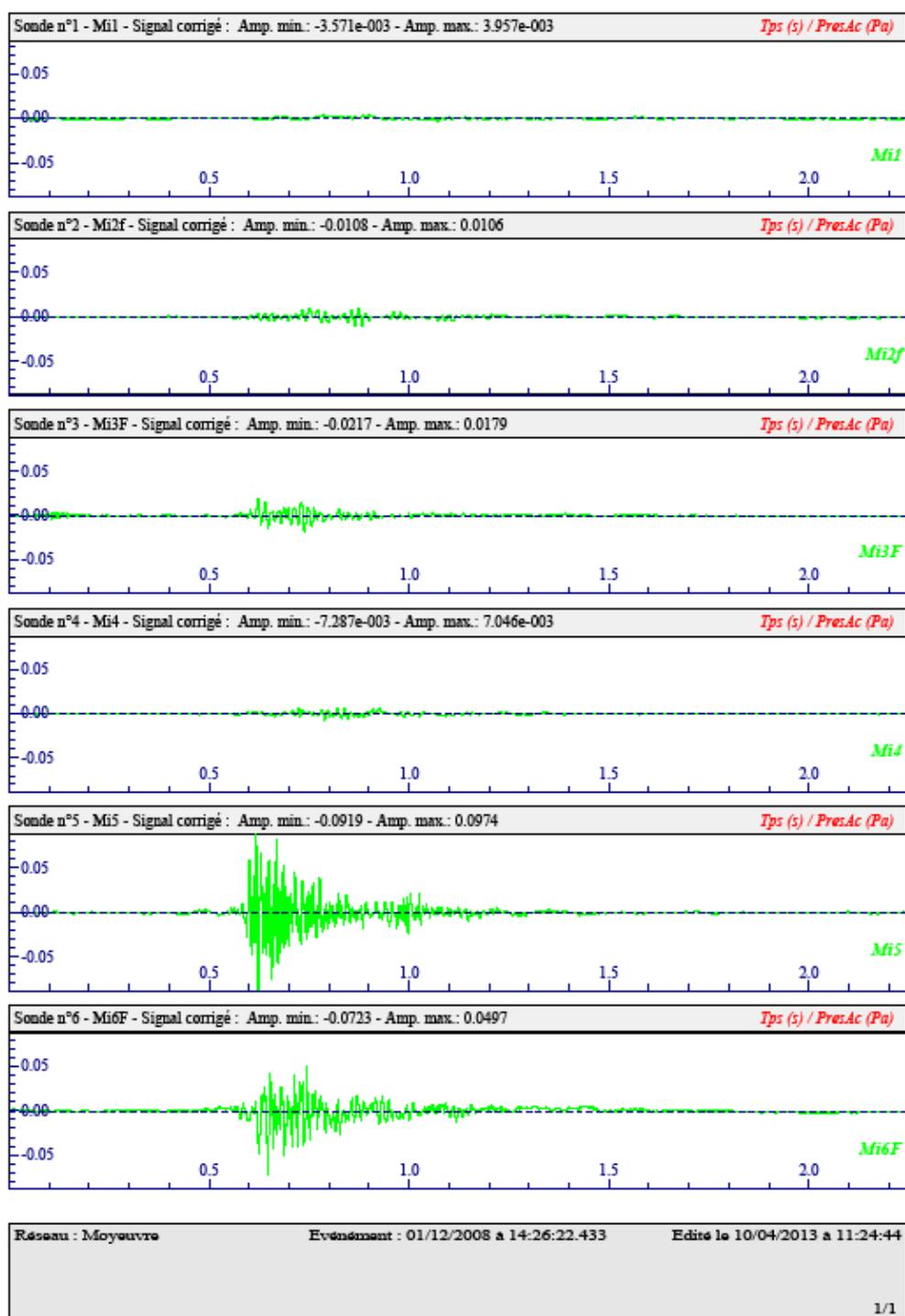


Figure 34 : Chutes manuelles de petits blocs rocheux (20 kg) au sein de la zone à risque de fontis de Moyeuve R156J1(1). Les emplacements des chutes sont signalés par un marqueur rouge, il s'agit des zones jugées les plus éloignées du réseau de microphones

A chaque emplacement trois chutes manuelles ont été réalisées. Toutes ont été détectées dont environ un tiers par un seul microphone. Les niveaux de pression enregistrés sont très faibles. Un exemple de signal enregistré est donné en Figure 35. Ce type de signal très faible ne permettra qu'une caractérisation qualitative de la source, c'est-à-dire la chute de blocs (cf. sections suivantes).



SYTMISview version 3.00 - Copyright © 1994-2012 INERIS - Nancy

Figure 35 : Exemple de signal d'une chute manuelle d'un bloc de 20 kg. Le bloc a été lâché à l'emplacement situé immédiatement à l'est du microphone 5, où le niveau de pression enregistré est maximal. Il est ensuite très fortement atténué, seul le microphone 6 présente encore un rapport signal/bruit acceptable.

7.2 LOCALISATION DES EVENEMENTS ACOUSTIQUES

Le fontis est un phénomène ponctuel. Le lieu d'occurrence précis d'un démarrage de fontis ne peut pas être prédit, même au sein d'une zone caractérisée comme à risque. De la même manière, il est difficile de prédire le rythme d'évolution d'un fontis déjà initié autrement que par le retour d'expérience sur la zone considérée. Ainsi, il est important pour le suivi d'un aléa fontis de pouvoir localiser les zones d'évolution. La précision nécessaire pour cette localisation sera fonction de la taille de la cavité, des enjeux en surface, d'éventuels effets dominos redoutés, de la possibilité ou de l'impossibilité de constater l'évolution au fond, etc. Il pourra s'agir de localiser un événement à l'échelle d'une chambre de mine, d'un quartier ou simplement de valider que cet événement est bien issu de la zone surveillée. Cependant nous pouvons préciser que la capacité de localisation de chutes de blocs d'un réseau sera fonction de sa densité de microphones.

Par ordre croissant de complexité, trois approches de la localisation de sources sont proposées ci-dessous.

7.2.1 LOCALISATION PAR CARTOGRAPHIE

Une première approche extrêmement simple et fiable de la localisation peut être facilement mise en œuvre.

Considérons une cavité instrumentée par un réseau de microphones et un événement quelconque enregistré. Quelles que soient la géométrie et les propriétés acoustiques de cette cavité, l'ordre de première arrivée de l'onde acoustique aux microphones sera indépendant des caractéristiques de l'événement considéré. Cet ordre est essentiellement lié aux distances qui séparent le point d'occurrence de cet événement des différents microphones.

Une série de mesures peut donc être réalisée pour déterminer en différents points de la cavité l'ordre d'arrivée de l'onde acoustique aux capteurs. Un zonage de l'ordre d'arrivée en est tiré. Ce zonage sera d'autant plus discrétisé que le nombre de capteurs sera important. Une fois qu'il est disponible, il suffit de déterminer l'ordre d'arrivée pour tout nouvel événement pour déterminer dans quelle zone sa source se situe.

Pour réaliser la série de mesures, il faut disposer d'une source acoustique :

- énergétique, afin de solliciter un maximum de microphones ;
- impulsive, de manière à ce que les temps de première arrivée soit univoques ;
- simple à mettre en œuvre.

Une option simple est l'utilisation d'un pistolet d'alarme, qui répond pleinement à ces critères. Un tel pistolet a été utilisé lors d'une campagne de mesure sur le site de Moyeuve (cf. Figure 36). Un tir a été réalisé dans chaque chambre de la zone d'étude ainsi que dans les galeries, pour environ 50 tirs au total (représentés par des étoiles rouges sur la Figure 37). Un découpage simple a été dessiné autour de ces positions de tirs, les frontières ayant été placées globalement à mi-distance des tirs. Le découpage est présenté en Figure 37.



Figure 36 : Utilisation d'un pistolet d'alarme pour la réalisation d'un zonage des temps d'arrivée des ondes acoustiques au sein de la mine de Moyeuve. Le pistolet est tenu à bout de bras pour limiter l'influence de l'opérateur.

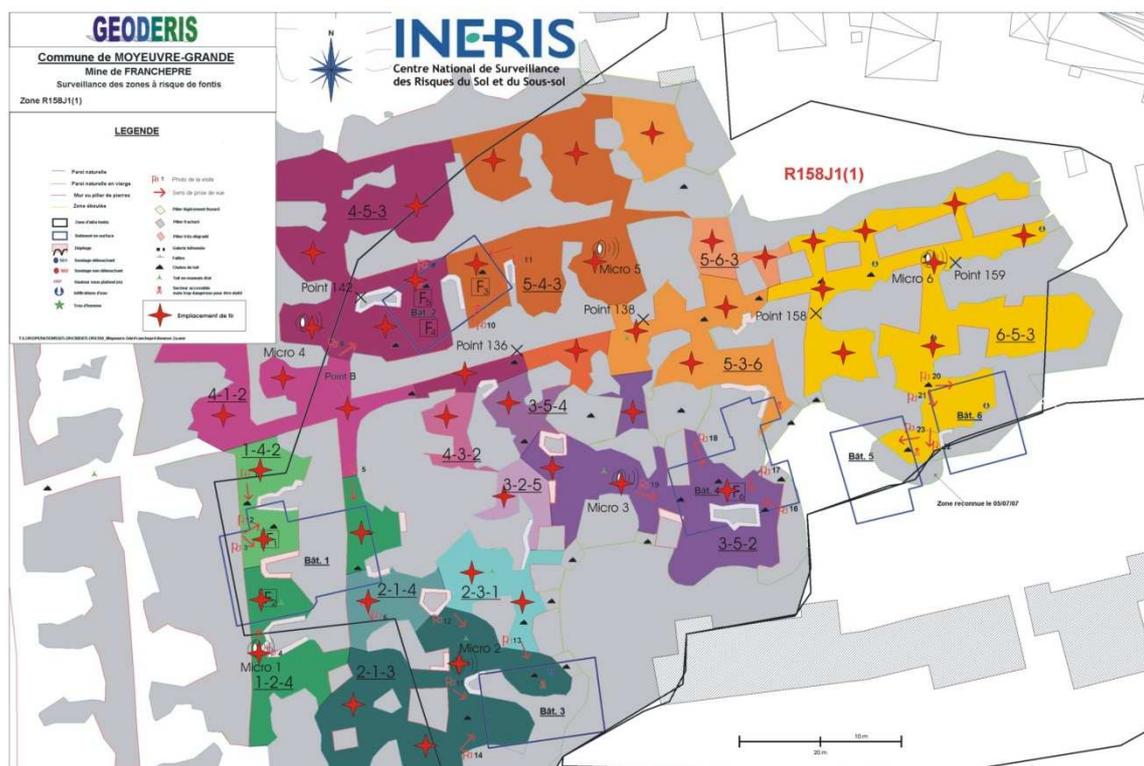


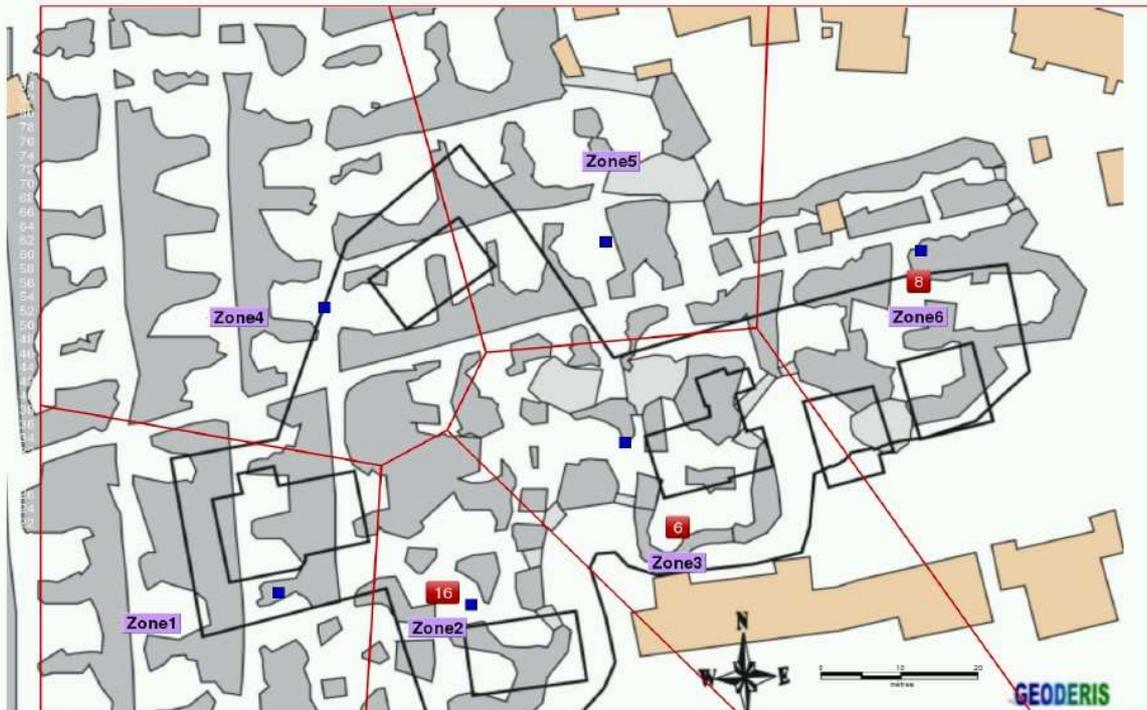
Figure 37 : Zonage des ordres d'arrivée aux trois premiers microphones lors d'une campagne de tirs au pistolet d'alarme dans la mine de Moyeuve. Par souci de lisibilité, à chaque triplet de microphones est affectée une couleur.

Nous constatons que le zonage est assez bien discrétisé, en particulier au centre et au sud de la zone. La partie Est de la zone étant plus isolée, et essentiellement desservie par le microphone 6, il n'est pas surprenant que les mêmes microphones y soient sollicités dans le même ordre.

Cette carte illustre bien l'intérêt de cette campagne simple à réaliser et à analyser : le simple pointage des temps d'arrivée, pour autant qu'il soit possible, permet instantanément et sans ambiguïtés de déterminer si un événement se situe à proximité d'un des 6 bâtiments en surface.

En définitive cette méthode de localisation, simple et efficace, est bien adaptée à des événements suffisamment énergétiques pour être enregistrés par plusieurs capteurs.

Elle peut aussi être envisagée avec un découpage moins discrétisé basé sur la première sonde déclenchante, pour visualiser l'évolution à l'échelle des enjeux (cf. Figure 38)



Localisation des événements acoustiques par zones

Edité le 16/02/2012

— Limite de zones ■ Sonde de mesure x Nombre d'événement(s) qualifié(s)

Figure 38 : Découpage par microphone de la zone d'étude de Moyeuve. En rouge, est indiqué le nombre de chutes recensées dans chaque zone sur la période d'étude, la localisation étant basée sur le premier microphone déclenchant

7.2.2 LOCALISATION PAR CALCUL DES TEMPS DE TRAJET, EN RAIS DROITS

7.2.2.1 PRINCIPE

Connaissant les temps d'arrivée de l'onde acoustique aux différents capteurs d'un réseau, ainsi que la position de ces capteurs dans la mine, il est possible de localiser la source acoustique par une méthode d'inversion.

Cette méthode nécessite de calculer le temps de trajet de l'onde en tout point de l'espace à partir d'un modèle de vitesse de propagation des ondes acoustiques représentatif du milieu considéré. Il s'agit ensuite de trouver le point de l'espace qui minimise au mieux l'écart entre les temps d'arrivée mesurés et calculés pour localiser la source.

A titre indicatif, l'INERIS utilise selon les applications deux approches différentes complémentaires pour minimiser cet écart : une méthode globale non-linéaire type Oct-tree [11] et la méthode linéaire C.H.E.A.P. [12]. Précisément, ce calcul se fait à l'aide d'un logiciel adapté (le logiciel SYTMISauto est utilisé par l'INERIS).

Si la zone d'étude au sein de la cavité présente une géométrie homogène, comme celle d'une carrière en chambre et pilier à structure régulière par exemple, on pourra la considérer comme un milieu homogène équivalent. On considère ainsi des trajets rectilignes fictifs entre la source et les capteurs.

7.2.2.2 DETERMINATION D'UNE VITESSE EQUIVALENTE

Considérons une zone d'étude homogène. Puisque l'on ne prend pas en considération des trajets réels au sein des vides, mais des trajets rectilignes fictifs, il faut déterminer la vitesse « équivalente » correspondante de propagation des ondes acoustiques. Il s'agit donc de mesurer le temps de propagation d'un front d'ondes clairement identifiable d'un point donnée à un autre, sur des trajets représentatifs de la cavité.

Dans cette optique, les mesures proposées en section 7.2.1 sont tout à fait applicables : une série de tirs, réalisés en différents points de la zone et enregistrés aux capteurs aux positions connues, permet de mesurer facilement le temps de propagation sur un nombre important de trajets.

Outre la datation précise du temps d'arrivée aux microphones, il faut ici disposer également d'une datation précise du temps de départ du tir. Pour ce faire, lors du tir, un microphone supplémentaire pourra être placé à proximité. S'il est difficile de mettre en place un microphone supplémentaire, on pourra envisager de réaliser l'ensemble des tirs à proximité immédiate des microphones en place. Cette option ne sera pertinente que si le réseau est suffisamment dense pour que des trajets représentatifs de la cavité soient testés.

La distance directe tir/capteur étant connue, la vitesse de propagation pour chaque trajet est immédiatement déduite. Une simple régression linéaire permet d'en déduire la vitesse de propagation équivalente. La qualité de cette régression indiquera par ailleurs si une vitesse équivalente peut effectivement être considérée : si les mesures sont trop dispersées, il faudra au mieux identifier les points singuliers ou envisager une approche différente.

La campagne de tirs réalisée à Moyeuivre (cf. section 7.2.1) a permis de tester un grand nombre de trajets (~50 tirs enregistrés par 6 microphones, soit environ 300 trajets testés). La zone à risque de fontis étant peu étendue (100x120m), un 7^{ème} microphone a pu être installé et placé à proximité de chacun des tirs. Les rapports temps de parcours / distance directe sont indiqués en Figure 39 :

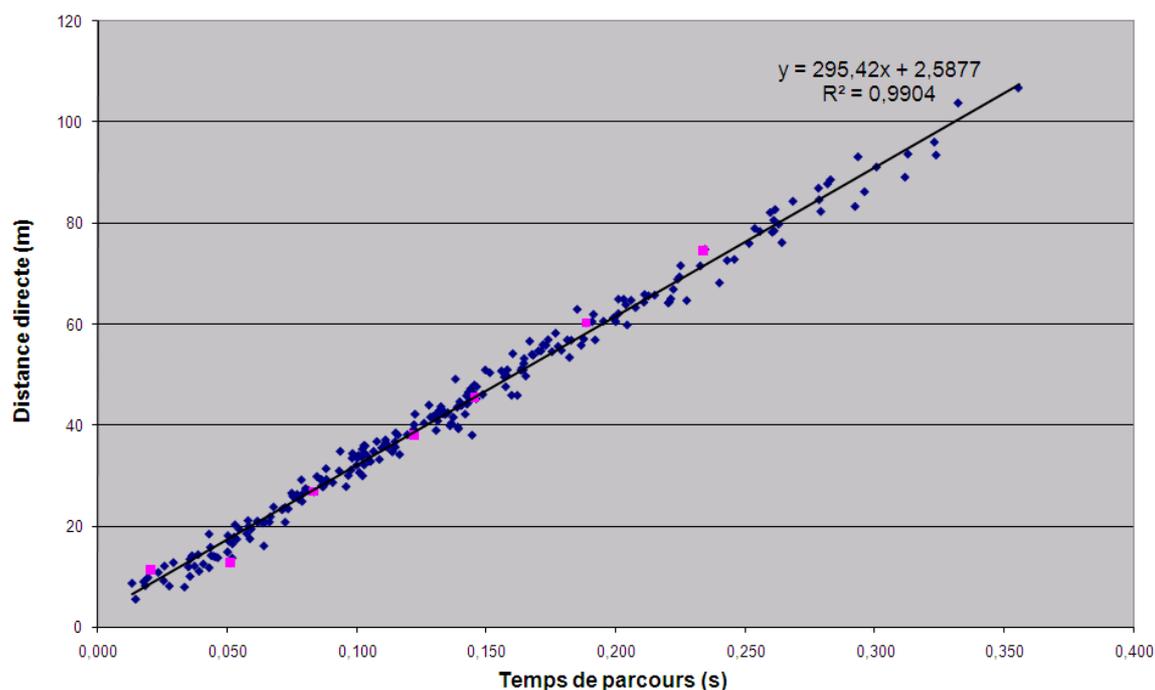


Figure 39 : Distance directe parcourue par l'onde acoustique en fonction du temps de parcours (expérimentation de tirs au pistolet réalisée à Moyeuivre). Les tirs réalisés dans la galerie principale sont en violet.

Les mesures sont peu dispersées, la vitesse équivalente est très bien déterminée : 295 m.s^{-1} . Cette vitesse équivalente constante sur l'ensemble de la zone d'étude peut s'expliquer par la présence de nombreuses interconnexions entre les chambres et les galeries et par l'absence de singularité marquante dans le schéma d'exploitation de la mine (bien que localement irrégulier). La régression linéaire ne passe pas strictement par l'origine, ce qui traduit une légère surestimation des distances source/microphones. La vitesse obtenue est inférieure à la vitesse réelle des ondes acoustiques puisque pour un temps de parcours identique, on considère des trajets rectilignes nécessairement égaux ou inférieurs aux trajets réels.

7.2.2.3 EXEMPLE DE LOCALISATION : APPLICATION AU SITE DE MOYEUVRE

La vitesse étant très bien déterminée, il est tout à fait légitime de l'utiliser pour localiser en rais droits. La localisation a été testée sur deux séries de données :

- les tirs au pistolet, précédemment décrits. Cependant, ces événements sont très énergétiques et présentent un démarrage extrêmement franc ; caractéristiques que l'on risque de ne pas retrouver sur des chutes de toit réelle ;

- des chutes artificielles. Il s'agit de l'enregistrement au sonomètre d'une chute manuelle réalisée à Moyeuve, amplifiée jusqu'à atteindre le niveau de pression acoustique maximal équivalent à une chute de 500 kg de 2 mètres (~ 109 dB LZl_{max} , cf. section 6.1). Ces « chutes artificielles » présentent une enveloppe, un spectre et une énergie proches d'une chute réelle, à l'exception des très basses fréquences impossibles à recréer avec un haut-parleur.

Les résultats de localisation sont illustrés en Figure 40 et Figure 42 :

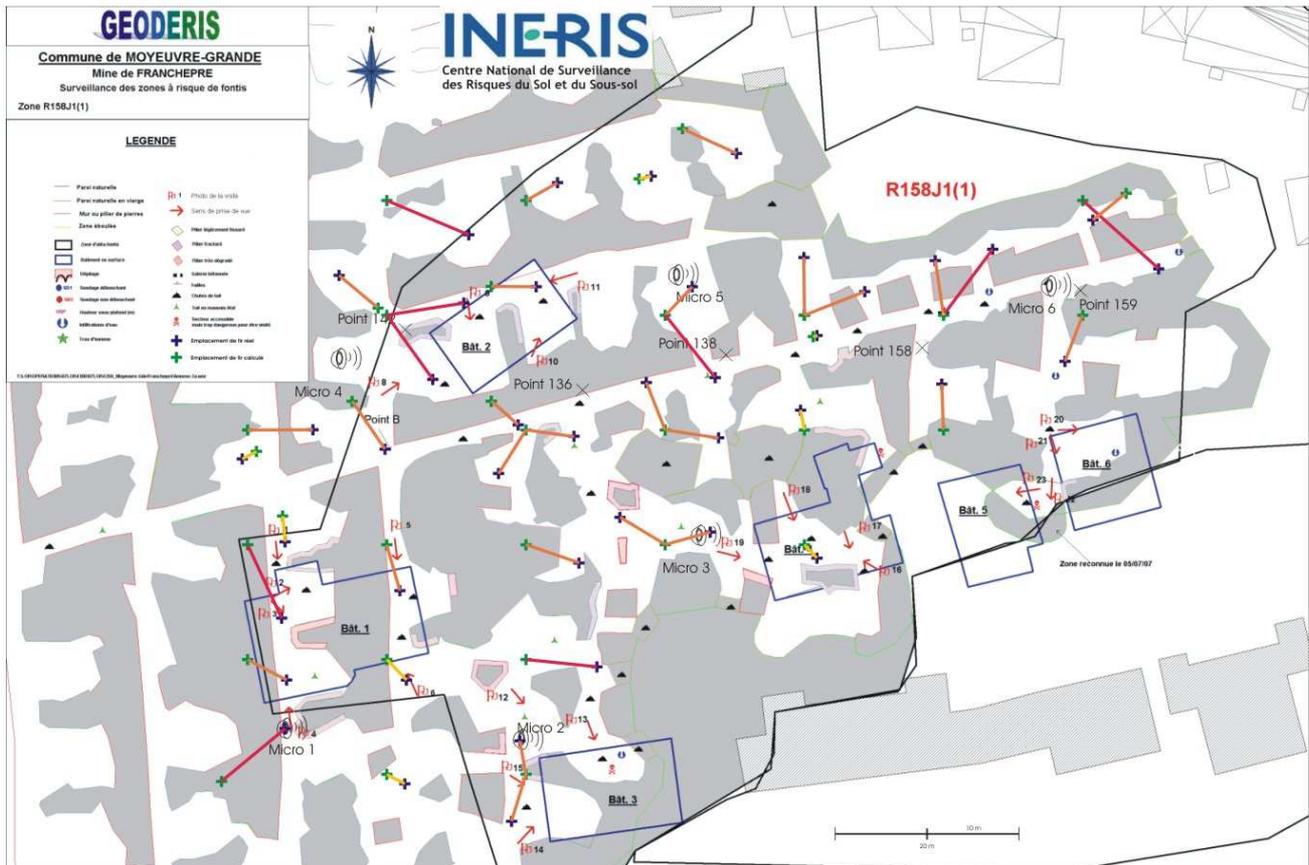


Figure 40 : Expérimentation de localisation de tirs au pistolet à Moyeuve : comparaison entre les emplacements des tirs (croix bleues) et les emplacements calculés (croix vertes).

Les localisations des tirs s'avèrent très satisfaisantes en termes d'erreur relative, puisque la moyenne est de 5,4 m avec un écart-type moyen de 2,5 m. On observe aussi que les erreurs sont plus importantes en périphérie du site d'étude. Ce qui était un résultat attendu puisque les événements en milieu de zone sont enregistrés par davantage de capteurs et avec un meilleur rapport signal/bruit moyen. Quoi qu'il en soit, la précision obtenue est suffisante pour déterminer quelle chambre et quel enjeu sus-jacent sont concernés.

Cependant, comme expliqué ci-dessus, les tirs ne sont pas tout à fait représentatifs de chutes de blocs, les pointés sont notamment grandement facilités. Pour valider tout à fait la localisation par rais droits, il faut s'intéresser à la campagne de chutes artificielles. Un signal typique est donné en Figure 41.

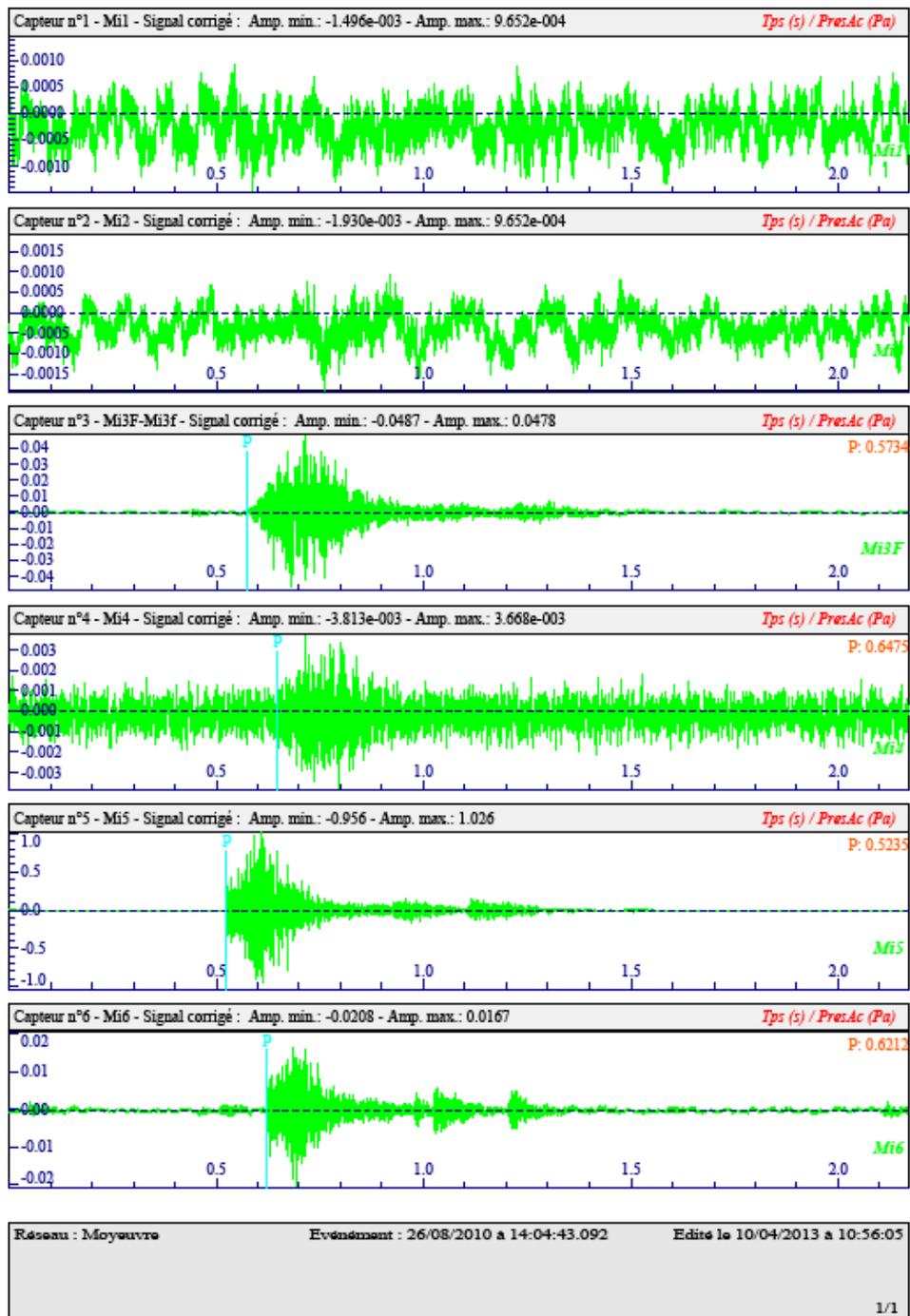


Figure 41 : Signal d'une chute artificielle réalisée sur le site de Moyeuve.

L'onde acoustique étant très atténuée avec la distance de parcours, le démarrage de l'événement acoustique est masqué par le bruit de fond au niveau des microphones lointains. Une incertitude sur les pointés doit alors être prise en compte, d'autant plus forte que le signal est faible.

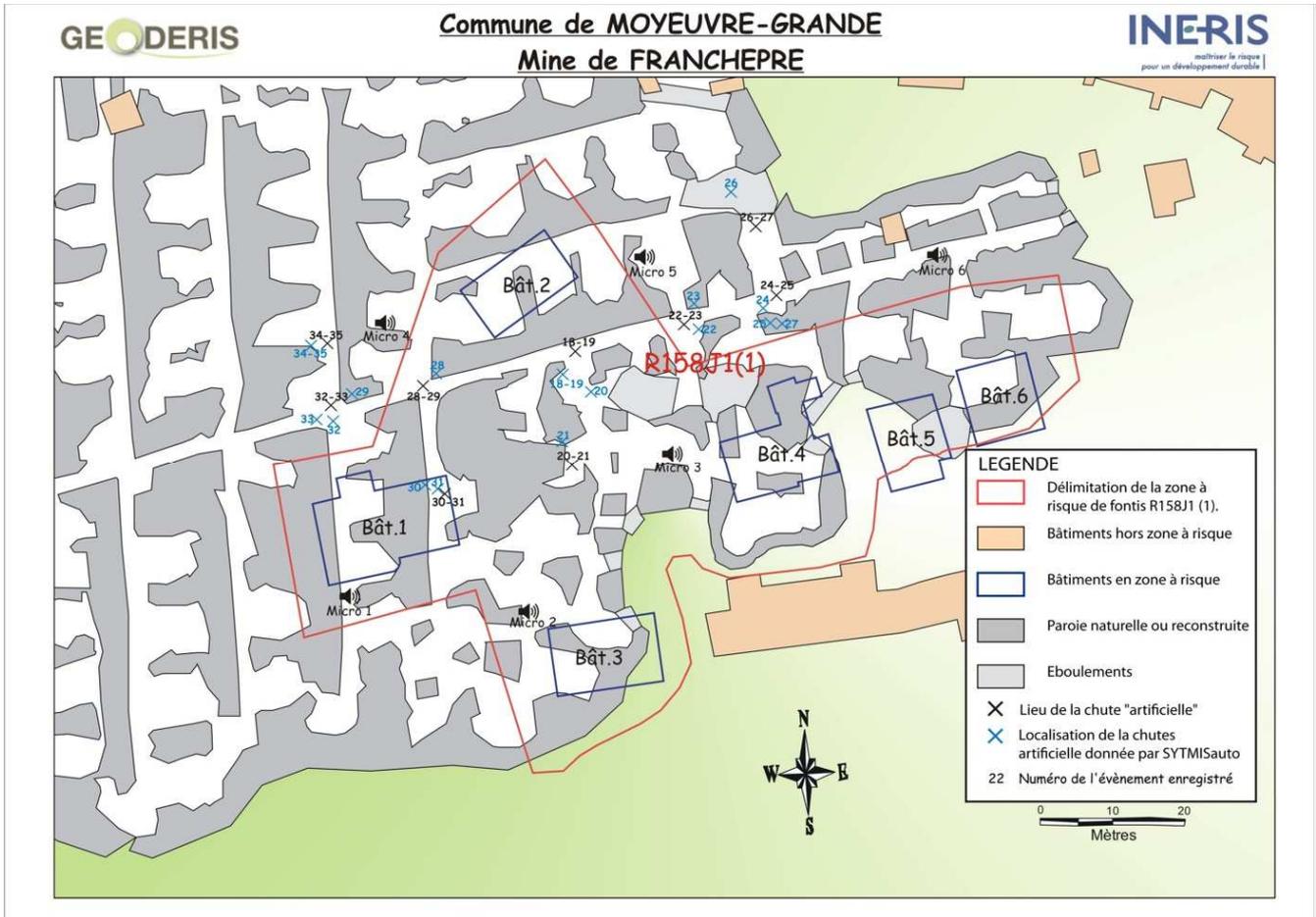


Figure 42 : Expérimentation de chutes de blocs artificielles à Moyeuve : comparaison entre les emplacements des tirs (croix noires) et les emplacements calculés (croix bleues).

Le constat est très similaire à celui des tirs au pistolet : les chutes artificielles sont localisées avec une grande précision, en moyenne inférieure à 5 mètres. Le dispositif de surveillance mis en place permet une localisation des chutes de blocs d'une masse minimale de 500 kg à quelques mètres près. La localisation de blocs plus faibles se fera probablement avec une précision moindre. Néanmoins, le zonage des temps d'arrivée (cf. section 7.2.1) permet d'assurer au minimum la localisation à l'échelle d'une chambre.

7.2.2.4 INFLUENCE DE LA DENSITE DU RESEAU SUR LA LOCALISATION

Afin d'optimiser le dimensionnement du réseau, il est intéressant de tester cette localisation numérique avec un nombre réduit de microphones.

Le test a été réalisé avec les tirs au pistolet d'alarme : les tirs ont été localisés en exploitant toutes les combinaisons pertinentes possibles de réseaux à 3, 4, 5 et 6 microphones. Par pertinent, il est entendu que les microphones doivent malgré tout être répartis dans la zone. Par exemple, une configuration où tous les microphones sont à l'Est de la zone présenterait des performances très hétérogènes selon l'emplacement de la source. Ce qui n'a pas de sens d'un point de vue d'une surveillance globale. Elle n'a pas été incluse dans le test. L'erreur moyenne selon le nombre de capteurs exploités est indiquée en Figure 43.

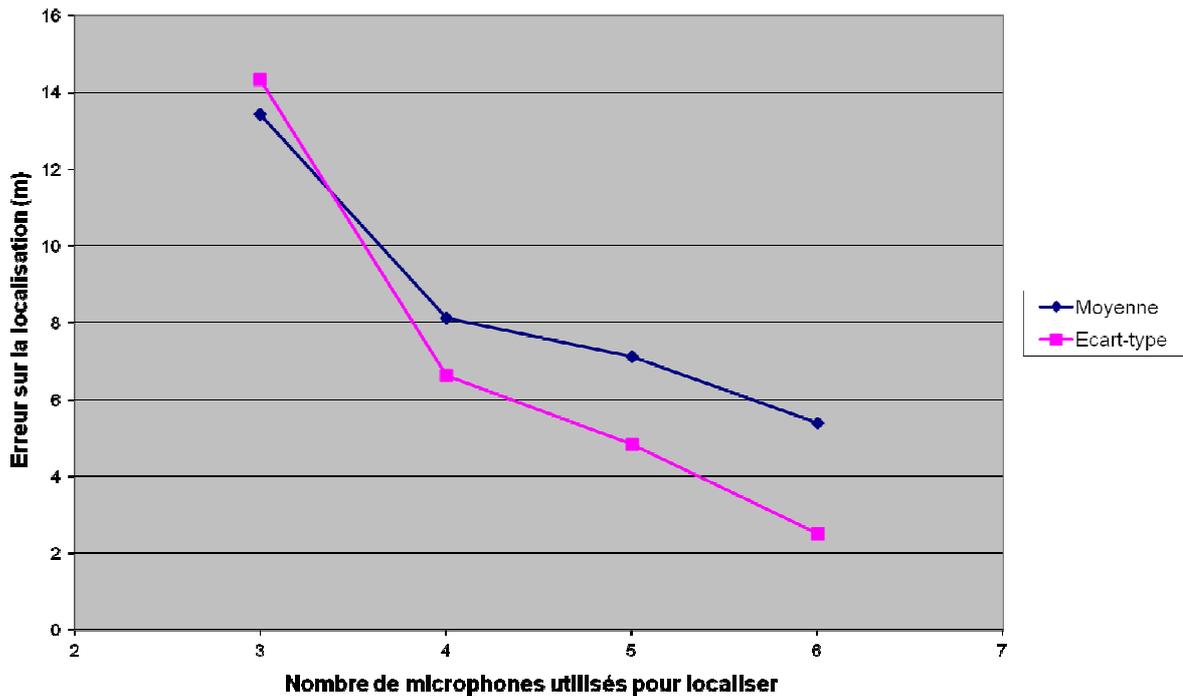


Figure 43 : Erreur moyenne de localisation selon le nombre de microphones exploités. Expérimentations de tirs au pistolet d'alarme, mine de Moyeuve.

Le gain de précision est important en passant de 3 à 4 microphones (13 à 8 m d'erreur moyenne) mais que celui-ci devient moins flagrant au-delà (7 et 5 m pour 5 et 6 microphones). Ainsi, un réseau à 4 microphones est capable de localiser un événement avec une erreur moyenne de 8 mètres, soit à l'échelle d'une chambre. Cette conclusion pour le cas de la mine de Moyeuve n'est valable que si les temps d'arrivée peuvent être effectivement pointés avec précision. Ce qui rappelle que le dimensionnement doit également tenir compte de l'importance des événements que l'on souhaite enregistrer et caractériser.

7.2.3 LOCALISATION PAR CALCUL DES TEMPS DE TRAJET, EN RAIS COURBES

7.2.3.1 PRINCIPE

La localisation par calcul des temps de trajet en rais droits ne sera *a priori* pertinente que si la cavité est suffisamment homogène pour présenter une vitesse équivalente constante, quel que soit le trajet source-capteur considéré.

Une géométrie globalement hétérogène ou la présence de singularités ponctuelles peuvent faire varier significativement et localement cette vitesse équivalente. Les localisations calculées d'événements présenteront donc des erreurs variables, s'ajoutant aux sources d'erreurs déjà évoquées (difficultés de pointés les temps d'arrivée, enregistrement par plusieurs microphones, etc.)

Il peut être pertinent de considérer des rais empruntant alors le trajet réellement suivi par l'onde acoustique. Une bonne approximation sera donc le trajet aérien – dans les vides : chambres, galeries – le plus court entre source et capteurs.

Un modèle numérique simple de la géométrie de la cavité est alors nécessaire, permettant de différencier vides et roche. Puis, le principe de la localisation reste le même que pour la méthode précédente (le calcul est basé sur les pointés des temps d'arrivés aux différents capteurs, voir section 7.2.2.1), l'algorithme de localisation maintenant le rai au sein des vides du modèle. Ce calcul complexe peut être réalisé par différentes méthodes. A titre indicatif, l'INERIS utilise une méthode de « fast marching » [13]. Une illustration de modèle simple et de localisation d'un événement est donnée en Figure 44.

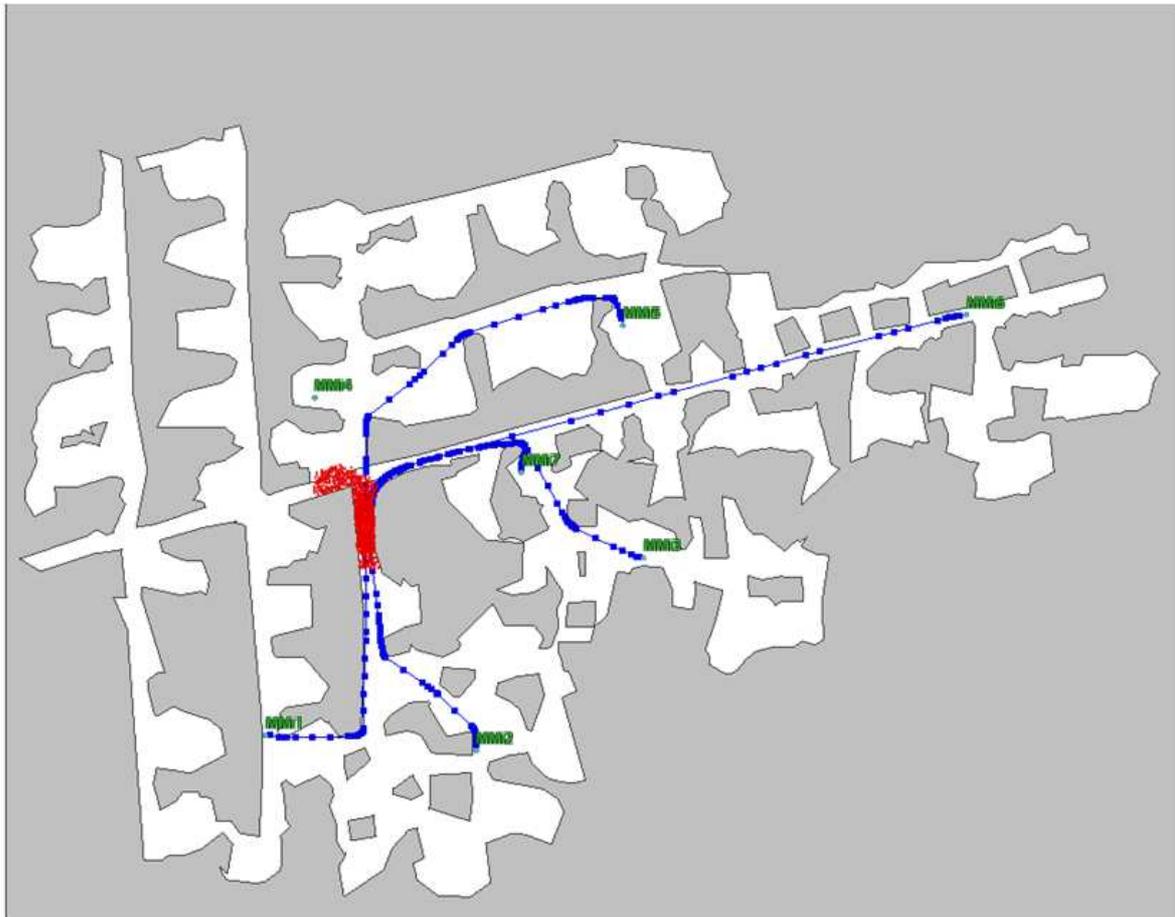


Figure 44 : Modèle numérique simplifié de la zone à risque de fontis de Moyeuve-Grande. Seule les zones d'intérêt et ses alentours immédiats sont modélisés. Les rais (bleus) entre capteurs (verts) et simulations de localisation (rouge) n'empruntent que les vides.

7.2.3.2 EXEMPLE COMPARATIF

Afin de comparer l'efficacité de ces méthodes, une série de tirs au pistolet a été réalisée dans la mine Côte d'Hayange, dans la galerie principale et dans la galerie « sud » (cf. carte en Figure 45).

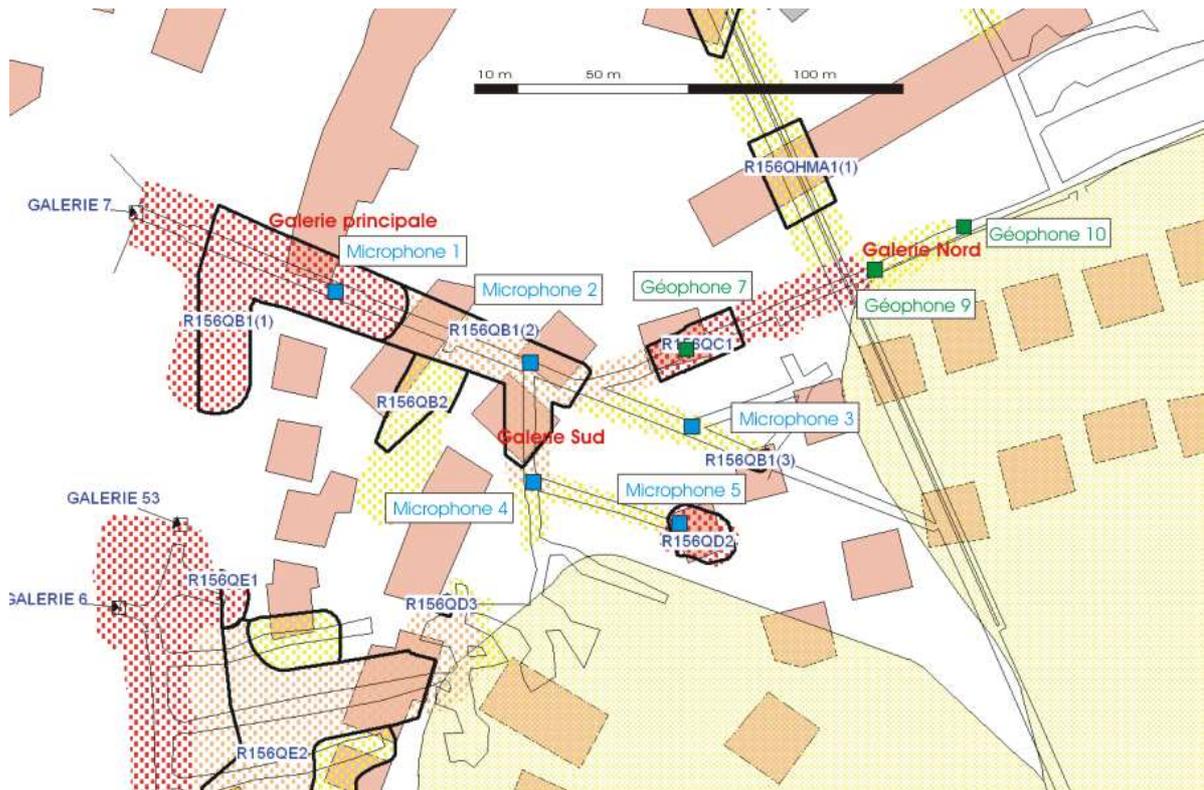


Figure 45 : Carte de la mine Côte d'Hayange. Les tirs ont été réalisés en galerie « principale » et « sud »

La vitesse équivalente a été déterminée de la même manière qu'à Moyeuivre. La vitesse obtenue (305 m/s) est plus élevée qu'à Moyeuivre (295 m/s) puisque le parcours réel est, dans cette mine, plus proche de la ligne droite (tirs et microphones en galeries filantes) qu'à Moyeuivre (trajets plus éloignés de la ligne droite, cf. Figure 44). Cette vitesse est cependant moins bien déterminée (mesures plus dispersées) : les tirs dans une galerie donnée seront vus avec une vitesse directe égale à la vitesse réelle de propagation du son par les microphones dans cette même galerie. *A contrario* ils seront vus avec une vitesse directe bien inférieure par les microphones de l'autre galerie.

Ces tirs ont été localisés par la méthode classique en rais droits, cf. Figure 46. L'erreur moyenne évolue clairement selon l'origine des tirs : elle est excellente en galerie « sud » (4 m) puis augmente à mesure que l'on s'éloigne du centre du dispositif le long de la galerie principale (17 m en moyenne). En effet les tirs aux extrémités de la galerie principale n'ont été enregistrés que par les microphones de cette même galerie. L'utilisation de la vitesse équivalente (et non pas réelle) est donc une source d'erreur systématique, non compensée. Au contraire pour les tirs détectés par l'ensemble des microphones, la vitesse équivalente, c'est-à-dire moyenne, est donc moins pénalisante. L'erreur moyenne sur l'ensemble des tirs est de 13 mètres environ.



Figure 46 : Localisation des tirs dans la mine Côte d'Hayange en exploitant une vitesse équivalente, en rais droits. Les croix vertes marquent l'origine du tir, les croix rouges la localisation.

La localisation de la même série de tirs a ensuite été réalisée en exploitant un modèle numérique des galeries et une localisation en rais courbes, avec une vitesse égale à la celle de la propagation des ondes acoustique dans ces conditions (1 Atm, 10°C : ~337 m/s). La localisation devient alors excellente pour l'ensemble des tirs (erreur moyenne de 3,6 m), quelle que soit l'origine géographique des tirs, cf. Figure 47 :

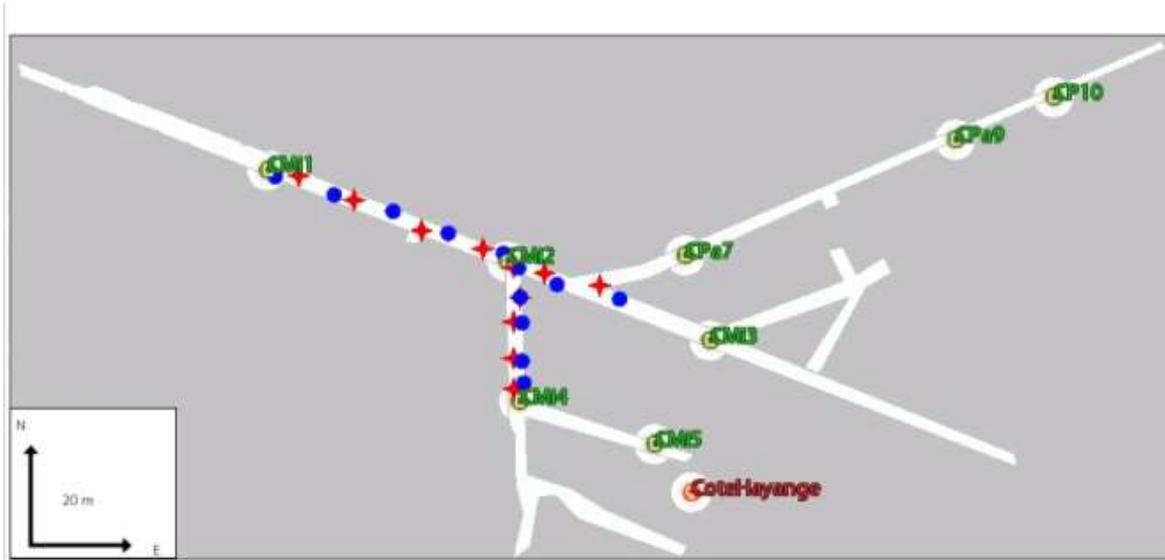


Figure 47 : Localisation en rais courbes des tirs dans la mine Côte d'Hayange.
L'origine des tirs est figurée en rouge, les localisations en bleu.

Le bénéfice de la méthode par rais courbes apparaît très nettement ici, prouvant par là-même que la méthode de localisation doit être adaptée au besoin et également aux géométries de la cavité et du réseau de microphones.

7.3 CARACTERISATION D'UN EVENEMENT

Selon le site, notamment selon son accessibilité, il sera parfois possible de constater sur site l'évolution d'un fontis après détection d'une activité inhabituelle par le dispositif de télésurveillance. Cependant, dans de nombreux cas de figure, il sera délicat ou impossible de se rendre sur site. Le dispositif instrumental doit alors pouvoir permettre seul une estimation de l'importance des événements enregistrés.

Pour ce faire, une démarche simple est proposée ci-dessous, qui reprend en partie des étapes décrites dans les sections précédentes :

- localiser la source avec la précision nécessaire comme évoqué précédemment. Ceci nécessite évidemment de disposer d'un réseau suffisamment dense pour permettre une localisation précise (rapportée à la taille de la cavité), soit par calcul numérique, soit par zonage. Cette localisation permet alors de calculer la distance source/capteurs ;
- le niveau de pression acoustique étant connu aux microphones, on peut estimer le niveau de pression à l'origine en exploitant la relation atténuation en fonction de la distance (voir section 6.2). Cette relation présentant probablement une disparité non négligeable, un calcul de la marge d'erreur est fortement recommandé pour évaluer la pertinence du résultat. Le calcul pouvant être effectué pour chaque microphone ayant enregistré l'événement (avec un rapport signal/bruit suffisant mais non-saturé). L'estimation sera d'autant plus fiable que l'événement sera important et aura été enregistré par un nombre important de capteurs ;

- le niveau de pression acoustique à l'origine étant estimé, on peut le relier à une masse de blocs en exploitant les simulations d'événements (cf. section 6.1). La susceptibilité acoustique pouvant être très différente d'une cavité à une autre, l'extrapolation à partir de mesures réalisées dans une autre cavité doit être réalisée avec prudence. Naturellement plus les masses d'événements simulées seront nombreuses et variées, meilleure sera l'estimation.

Compte-tenu des incertitudes successivement introduites à chaque étape de ce raisonnement, il doit être considéré comme une stricte indication de premier ordre quant à l'importance de l'événement. Pour permettre une évaluation plus fine, une très bonne connaissance de la cavité doit être acquise :

- évaluation de l'influence des obstacles sur l'atténuation et prise en compte de cette influence une fois le trajet emprunté connu ;
- prise en compte du spectre fréquentiel des signaux enregistrés, l'atténuation pouvant différer selon les longueurs d'onde considérées ;
- panel de chutes simulées varié en termes de masses et d'emplacement de chutes : création d'un abaque de référence pour la cavité étudiée ;
- test de différents mécanismes à la source (chute de blocs intacts, chute de blocs fracturés).

7.4 DEFINITION DU PROTOCOLE DE SURVEILLANCE

L'enregistrement et la caractérisation des chutes de bloc permettent d'apprécier l'évolution du phénomène surveillé. Cependant, l'efficacité de la surveillance repose également sur une remontée d'informations et sur une intégration au sein d'une procédure de suivi (et éventuellement d'alarme) adaptée.

L'objet de ce rapport n'étant pas de traiter des généralités des stratégies de surveillance d'aléas de mouvements de terrains, seuls les spécificités liées à l'aléa fontis sont relevées.

7.4.1 RECUPERATION DES DONNEES

La vitesse d'évolution d'un fontis dépend de son état d'avancement : le phénomène est généralement lent (typiquement quelques années à quelques décennies) mais les derniers mètres peuvent s'effondrer brutalement (quelques minutes à quelques jours). Ainsi, le rythme de récupération des données devra être adapté à l'état d'avancement constaté ou estimé. Par exemple, il pourra s'agir d'une récupération hebdomadaire à trimestrielle dans le cas d'une cavité présentant des fontis peu avancés, d'une récupération quasi-temps réel à quotidienne dans le cas d'une cavité plus sensible.

Une récupération manuelle des données stockées localement peut être envisagée mais elle nécessite une main d'œuvre importante. En particulier, si l'on souhaite suivre les mesures régulièrement. Dans une grande majorité de cas, la mise en place d'une télécommunication automatisée sera donc un atout technique et économique. Les cavités à risque de fontis étant parfois éloignées des réseaux de communication terrestres usuels, le recours à un dispositif type connexion par modem sur réseau mobile en entrée de cavité pourra être une alternative pertinente (mise en place rapide), pour autant que la couverture réseau présente des caractéristiques suffisantes en termes de débit et de stabilité.

7.4.2 TRAITEMENT DES EVENEMENTS

Un traitement des données doit être mis en place, afin de permettre l'interprétation des sismogrammes en termes d'évolution du phénomène surveillé. On peut citer les traitements suivants :

- Caractérisation de l'événement enregistré aux capteurs : calcul du niveau de pression acoustique maximal, calcul de la durée du signal, calcul du spectre fréquentiel de l'événement, calcul de la densité d'énergie ;
- Localisation de la source. Si le système le permet on privilégiera une localisation par calcul des temps de trajet, à défaut une localisation par zones, basée sur les premiers temps d'arrivée ;
- Le calcul par zone et sur un laps de temps prédéfini (de quelques heures à plusieurs jours) : du nombre d'événements survenus (comptage), de la densité d'énergie cumulée, des niveaux de pression acoustiques moyen/maximaux atteints, etc. Ces indicateurs intégrant les mesures par zone et sur une durée définie seront exploités au sein de la procédure de suivi et/ou d'alarme.

Les logiciels employés peuvent être automatiques ou semi-automatiques, l'un des objectifs étant de faciliter au maximum l'analyse de routine des données et leur interprétation en période de crise.

7.4.3 MISE EN ŒUVRE D'UNE PROCEDURE DE SURVEILLANCE

L'un des objectifs de la surveillance est d'identifier une évolution inhabituelle des fontis surveillés. Or au sein d'une cavité à risque, de nombreuses chutes de toit sont susceptibles de se produire sans que pour autant le risque de remontée de voute jusqu'à la surface ne croisse drastiquement. Ainsi, il est essentiel d'évaluer l'activité habituelle de la cavité en termes de chute de blocs durant une période de test après installation. Si c'est techniquement possible, on constatera sur site l'impact de ces chutes de blocs sur l'évolution des fontis. *In fine*, l'objectif est d'évaluer les critères marquant une activité inhabituelle, potentiellement une évolution significative d'un ou plusieurs fontis. Ces critères, évoqués à la section précédente, pourront être un nombre d'événements sur une période de temps, un niveau de pression acoustique capteur ou à la source, etc.

Illustration : cas de la cavité de Moyeuvre.

L'activité de la zone d'étude de Moyeuvre a été évaluée sur plus de 3 ans. Une dizaine de chutes de blocs a été enregistrée chaque année (cf. Figure 48), répartie sur 3 sous-zones (cf. Figure 38). Durant cette période, un maximum de 4 chutes de blocs a été enregistré sur une durée glissante d'une semaine. Après visites sur site, il a été constaté que les démarrages de fontis n'ont pas évolué de manière significative suite à ces chutes de blocs.

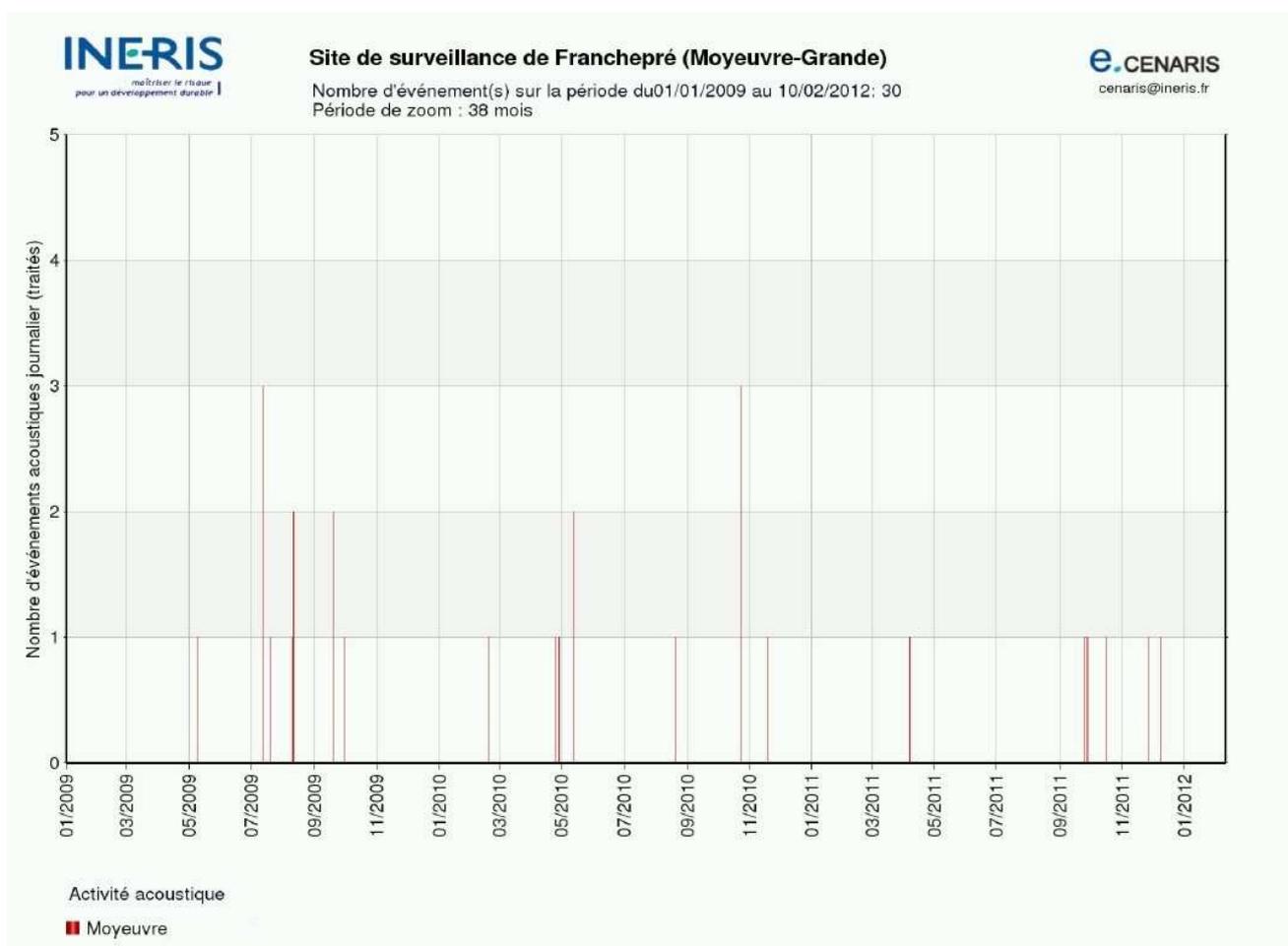


Figure 48 : Comptage journalier des chutes de blocs enregistrées sur le site de Moyeuvre.

Par ailleurs, la distance moyenne de tout point de la cavité aux deux plus proches microphones a été estimée (à partir de l'expérience de tirs au pistolet d'alarme). Connaissant l'atténuation moyenne avec la distance ainsi que le niveau de pression acoustique provoqué par une chute de 500 kg de 2 mètres de hauteur, le niveau de pression acoustique moyen d'une chute a été évalué à 94 dB (LZI_{max}) sur le deuxième microphone le plus proche.

Compte-tenu de l'historique de l'activité de la cavité et de l'estimation ci-dessus, les critères suivants ont été établis pour déclencher un premier niveau d'alarme, provoquant une réunion d'experts sous 24 heures :

- Enregistrement de 10 chutes de blocs sur une semaine glissante ;
et/ou
- Enregistrement d'un événement présentant un niveau de pression acoustique supérieur à 90 dB sur au moins deux microphones.

Comme dit précédemment, le premier critère n'a jamais été vérifié à ce jour. Le second critère n'a pas non plus été atteint, aucun événement n'ayant même atteint ce seuil sur un seul microphone. La Figure 49 indique les niveaux de pression mesurés sur le site de Moyeuivre durant la période d'étude :

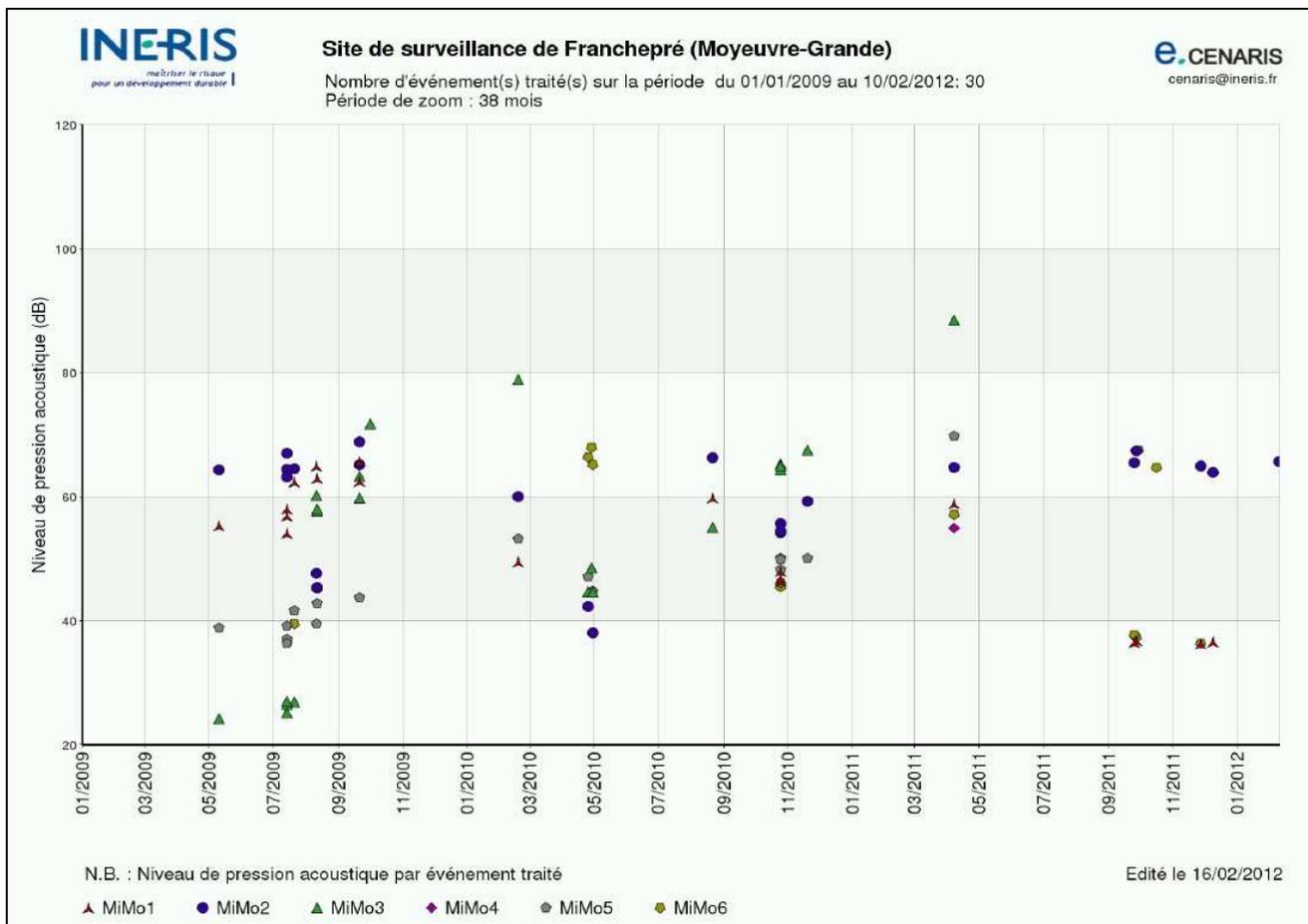


Figure 49 : Niveaux de pression acoustique (LZI_{max}) des chutes de blocs enregistrées sur le site de Moyeuivre. Pour chaque événement, le niveau enregistré à chaque microphone ayant détecté la chute est représentée.

7.5 BILAN DU CALAGE DU RESEAU

Le calage du réseau de surveillance en place peut être résumé par les étapes suivantes :

- Vérification de la sensibilité du réseau en simulant l'événement minimal dans toute la zone d'étude ou a minima dans les zones jugées les plus éloignées (acoustiquement) de tout microphone ;
- Si la localisation des sources est un objectif de la surveillance, réalisation d'une série de tests pour :
 - établir une carte de localisation empirique. Cette première étape est à la fois simple et efficace ;
 - déterminer une vitesse équivalente pour mettre en œuvre une localisation par calcul de temps de trajet en rais droits.
- Si la caractérisation des sources est un objectif de la surveillance, mettre en œuvre une série de tests pour évaluer l'atténuation des ondes acoustiques au sein de la cavité. Selon le cas, cette approche sera globale ou tiendra compte des éventuelles singularités de la cavité ;
- Définition d'un protocole de surveillance, y compris critères de surveillance (sur comptage, niveau de pression mesuré au capteur, évalué à la source, etc.)

Ces étapes peuvent être mises en œuvre peu après l'installation du réseau. Plus elles seront anticipées, plus rapidement le réseau pourra être considéré comme pleinement opérationnel. En parallèle de ces tests, le simple fonctionnement du réseau permettra un retour d'expérience technique et métrologique. Ces aspects sont décrits dans la section 8 suivante.

8. MISE EN TEST DU DISPOSITIF DE TELESURVEILLANCE

8.1 APPROFONDISSEMENT DE LA CONNAISSANCE DE L'ACTIVITE SONORE

Les seuils de détection, et d'enregistrement, définis pour les microphones ont été établis à partir de l'évaluation préalable de l'activité sonore de la cavité ainsi que de l'atténuation des ondes acoustiques. Ils doivent être suffisamment bas pour permettre l'enregistrement de l'événement minimal (cf. section 6.1) mais suffisamment hauts pour limiter l'enregistrement d'événements parasites. En effet, comme décrit en section 5.3, l'enregistrement de nombreux parasites est coûteux en temps d'analyse, et susceptible de saturer le dispositif pouvant masquer un enregistrement pertinent. Cependant, la connaissance de l'activité acoustique d'une cavité nouvellement investie est nécessairement limitée dans un premier temps.

Au long des semaines qui suivent la mise en route du dispositif d'écoute, les enregistrements seront étudiés et classés notamment dans le but d'isoler les fichiers parasites (bruits anthropiques, écoulement d'eau, etc.) Les seuils et stratégies de détection pourront être ajustés de manière à réduire ces enregistrements indésirables. Naturellement, les nouvelles configurations devront toujours permettre l'enregistrement des événements minimaux. Dans certains cas défavorables il n'est pas possible de filtrer à la détection les enregistrements parasites sans dégrader la sensibilité du système. Il sera alors nécessaire d'envisager :

- Une reconfiguration du réseau de microphones (déplacement et/ou ajout de capteurs) et de la stratégie d'acquisition ;
 - Des travaux d'isolation acoustique de la cavité ;
- Une révision des objectifs de surveillance.

Suite à l'instrumentation de la mine d'Hayange, il s'est avéré que le seuil de détection, déjà élevé, du microphone 1, placé à proximité de l'entrée de galerie, n'a pas permis de limiter efficacement les enregistrements de bruits urbains. Ainsi, plusieurs dizaines d'événements étaient enregistrées quotidiennement, principalement en raison des entrées/sorties de l'école maternelle à proximité et de la circulation. Ce microphone a été placé « hors déclenchement » mais reste sollicité en cas de détection d'une chute de blocs par un autre microphone. La détection restant assurée par les autres microphones, il reste donc exploité pour la localisation et la caractérisation des chutes de blocs.

8.2 CREATION D'UN CATALOGUE DE SIGNAUX DE REFERENCE

Pour identifier une chute de blocs à partir d'un sonogramme, plusieurs aspects seront étudiés : durée du signal, fréquences, enveloppe, répartition sur les différents microphones, etc.

Afin de faciliter également la discrimination des événements parasites des chutes de blocs, il est essentiel de disposer d'un catalogue de signaux de référence pour chacun des types de signaux susceptibles d'être enregistrés. Si les signaux n'ont pas pu être enregistrés par un opérateur sur place et parfaitement identifiés, il

s'agira de déterminer l'origine des signaux parasite enregistrés, afin que des chutes de toit ne soient pas écartées par erreur.

En cas de signaux similaires récurrents, une analyse des dates et horaires d'occurrence peut permettre de les écarter. En particulier, les heures et jours d'activité ne représentent qu'environ 12 h par jour, éventuellement durant 5 à 6 jours par semaine, soit 35 à 43% du temps. Des événements enregistrés systématiquement dans ces périodes seront particulièrement suspects.

Par ailleurs, l'écoute directement à l'oreille humaine des signaux enregistrés peut naturellement aider à lever une ambiguïté. A ce titre, il est incontournable de disposer d'un module d'écoute des enregistrements audio. Cependant l'écoute directe ne permettra pas d'identifier toutes les origines des événements : une chute de blocs lointaine peut avoir perdu ses hautes fréquences et devenir inaudible à l'oreille humaine au niveau des microphones.

Sur les sites de Moyeuve et Hayange, les catalogues sont constitués des rubriques suivantes. Certains sont illustrés en section 5.3.3 :

- Chutes de blocs ;
- Ecoulements ou gouttes d'eau ;
- Parasites électriques ;
- Foudre/orage
- Bruits de surface, c'est-à-dire une onde acoustique issue de la surface et transmise par le recouvrement. Ces signaux de faible fréquence présentent des temps d'arrivée et des niveaux de pression maximaux similaires sur chacun des microphones ;
- Bruits urbains conduits par les galeries ;
- Interventions/visites sur site, conversations.

8.3 VALIDATION DU FONCTIONNEMENT TECHNIQUE ET OPERATIONNEL / RETOUR D'EXPERIENCE

Le fonctionnement technique sera évalué au cours de la vie du dispositif de surveillance. L'objectif est de repérer les éventuelles faiblesses du dispositif et de les corriger. Outre les précautions génériques liées aux instrumentations sur sites, certains aspects s'avèrent plus spécifiques à l'instrumentation acoustique. Le retour d'expérience est décrit ci-dessous.

La résistance des matériels vis-à-vis des conditions environnementales agressives. En particulier, la robustesse des microphones face à l'humidité devra être validée. Dans la mine de Moyeuve, en 36 mois deux sondes microphoniques ont été mises hors service en raison de l'humidité (plus de signal enregistré). Les sondes ont fonctionné de nouveau après séchage mais n'ont pas été réinstallées sur site. La génération périodique de signaux calibrés peut aider à identifier ce type de dysfonctionnements.

La consommation électrique des matériels (chaîne d'acquisition et capteurs) a été abordée en section 4.3. Il s'agit en effet d'un paramètre essentiel puisqu'il n'est pas toujours évident de disposer d'un accès à un réseau électrique depuis une cavité souterraine. Des équipements très basse consommation permettront une autonomie de plusieurs mois, y compris transfert des données de mesure, ce qui peut s'avérer acceptable si l'accès au site n'est pas trop contraignant. L'utilisation de panneaux solaire est devenue relativement courante et peut permettre d'augmenter largement l'autonomie, si ce n'est de satisfaire totalement les besoins en énergie.

La sécurité des matériels installés en fond de mine, y compris le câblage, face au risque de chute de blocs, normalement avéré dans les cavités instrumentées. A ce titre, une attention particulière doit être portée aux chemins de câble (alimentation électrique, communication) en amont de l'unité d'acquisition puisqu'une coupure à ce niveau met en défaut l'ensemble du dispositif et non pas un seul capteur. Les câbles seront placés le long des parois et correctement protégés lors de la traversées de carrefour, par exemple (cornières métalliques, amas de petits blocs de roche, etc.). Les équipements clés (unité d'acquisition, coffrets concentrateurs, etc.) seront placés dans des zones les plus sûres possible, que ce soit pour leur protection mais également pour celle des intervenants. Les unités d'acquisition de tous les sites instrumentés par l'INERIS ont été placées hors et en amont des zones à risque. Une transmission périodique d'un message de bon fonctionnement permet une bonne réactivité en cas de dysfonctionnement.

Les performances de la transmission des données de mesures notamment en cas de nombreux déclenchements. De manière générale, les fichiers sismiques sont des fichiers « volumineux » puisqu'ils ne contiennent pas seulement une simple valeur (mesure géotechnique par exemple) mais un signal complet. Par exemple, les fichiers issus de Moyeuve pèsent environ 250 Ko pour un signal de 2 secondes échantillonné à 8 kHz. Ces volumes sont *a priori* acceptables pour une liaison type ADSL mais deviennent importants pour une liaison sur réseau mobile, surtout hors 3G. Il est important de s'assurer que le débit de liaison est suffisant pour assurer le rapatriement des données de mesures au rythme attendu. Il est évidemment essentiel d'envisager le cas de « crise » avec des données plus nombreuses et/ou attendues plus rapidement. A titre d'exemple, une liaison provisoire par modem 3G a été mise en place à la carrière de calcaire E, avec une connexion toutes les 3 heures. La communication s'est avérée instable (couverture médiocre, perte régulière de la communication) et incapable de transmettre l'ensemble de la dizaine de fichiers enregistrés quotidiennement. En conséquence, un retard de transmission s'est créé, augmentant chaque jour. La mise en place d'une liaison ADSL a totalement résolu le problème .

Le risque de vol ou de dégradation des matériels placés en zones accessibles/visibles. Par exemple, les grandes longueurs de câbles peuvent être particulièrement sujettes aux vols, ainsi que les éventuels panneaux solaires. Une effraction a été constatée sur le réseau d'Hayange, plusieurs centaines de mètres de câbles ont été dérobés et la centrale d'acquisition a été endommagée par un court-circuit. La banalisation des équipements est toujours souhaitable.

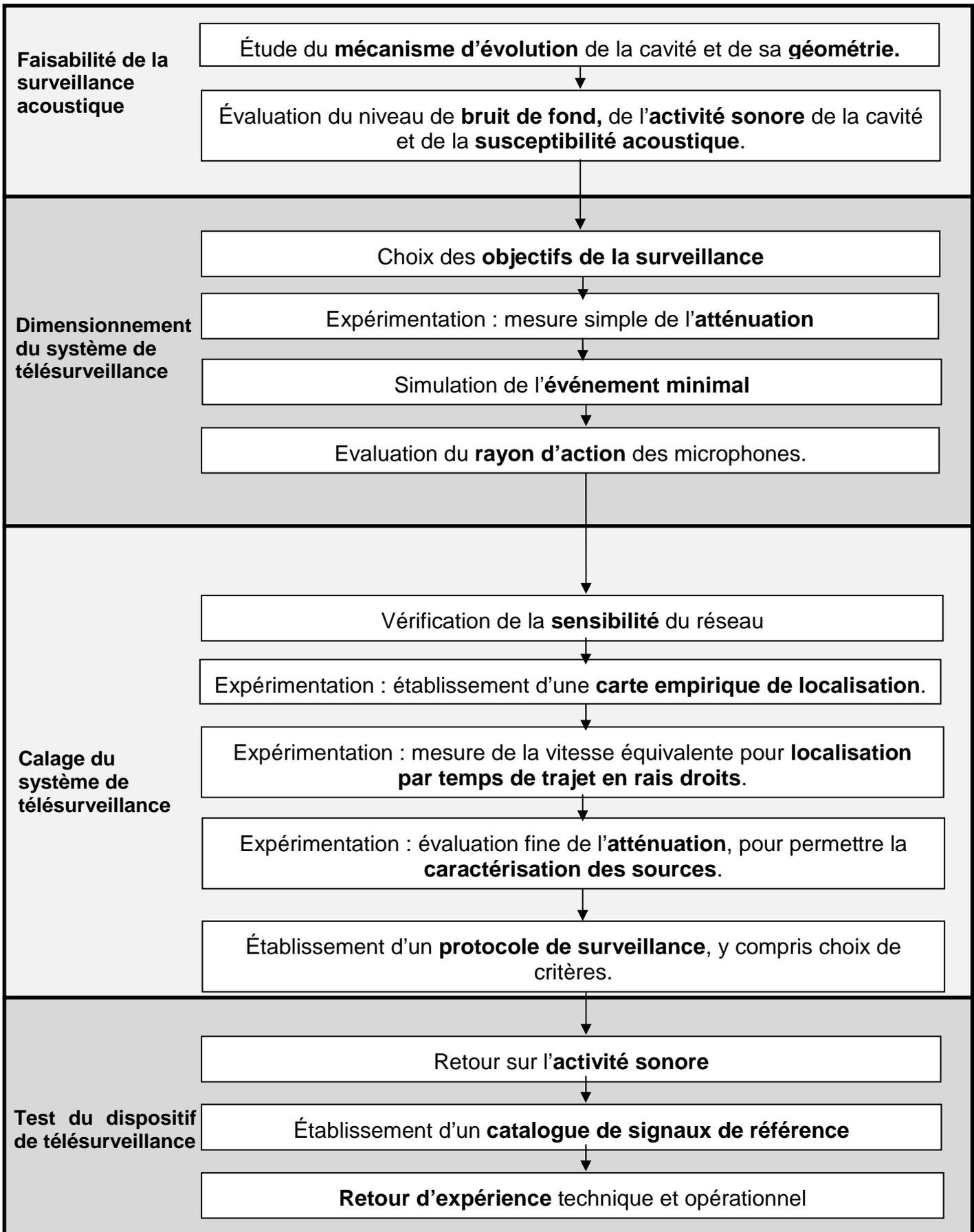
8.4 BILAN DE LA MISE EN TEST DU DISPOSITIF

Suite à une période de test de plusieurs semaines à quelques mois, un bilan peut être dressé :

- L'activité sonore de la cavité est réévaluée : si le réseau enregistre de trop nombreux événements parasites, il peut être nécessaire de modifier la stratégie d'acquisition, tout en s'assurant que le changement ne risque pas d'altérer la sensibilité du réseau ;
- Un catalogue des signaux caractéristiques est dressé. Il permettra une meilleure analyse des futurs enregistrements. Il est particulièrement pertinent dans le cas d'un réseau suivi par de multiples opérateurs ;
- Le fonctionnement technique est contrôlé périodiquement. Une attention particulière doit être portée sur le fonctionnement en cas de « crise », généralement différent du fonctionnement habituel.

Les changements souhaitables ou nécessaires seront naturellement apportés au fur-et-à-mesure de l'exploitation du dispositif.

9. BILAN GLOBAL DE LA METHODOLOGIE



10. CAS DE L'INSTRUMENTATION DEPUIS LA SURFACE

10.1 PRINCIPE

Pour permettre l'enregistrement d'une onde acoustique aérienne, la sonde microphonique doit évidemment être placée en chambre ou en galerie, avec un maximum de trajets aériens ouverts entre la sonde et les zones à surveiller.

Dans ce rapport l'instrumentation a été considérée depuis le fond. Cependant certains contextes peuvent rendre l'accès au fond indésirable ou tout simplement impossible :

- cheminement vers la zone effondré/ennoyé ;
- mine ancienne aux accès mal connus ;
- zone à risque de fontis très dégradée et présentant un danger important pour les intervenants au fond.

Dans ces conditions il devient intéressant de pouvoir instrumenter directement depuis la surface, sans aucune intervention au niveau des travaux miniers. Puisqu'aucun couplage avec la roche n'est nécessaire, il est envisageable de placer une sonde microphonique en chambre ou en galerie au travers d'un forage tubé depuis la surface. Cette opération est notamment facilitée par le faible encombrement d'une sonde microphonique ainsi que par la faible profondeur typique des travaux minier à risque de fontis (<50m).

Dans cette configuration il est indispensable de connaître de manière sûre la géométrie de la cavité, puisque la connaissance du réseau de galeries souterraines permet de localiser et d'évaluer l'importance des chutes de blocs. De plus la présence d'obstacles majeurs (chute de toit importante obstruant une galerie par exemple) non connus peut fausser significativement certains résultats ou pire masquer d'éventuelles chutes de bloc au-delà de l'obstacle. À défaut d'une connaissance préalable, une visualisation peut être réalisée par descente de caméra ou de robots d'exploration, couplé aux cartes de souterrains disponibles ou éventuellement à des études de reconnaissance des vides menées depuis la surface (radar, gravimétrie par exemple).

Afin de valider la faisabilité technique et la pertinence de l'écoute acoustique des chutes de bloc depuis le jour l'INERIS a instrumenté un site pilote, l'ancienne mine de fer de Thil. Les objectifs de l'instrumentation étaient de :

- Tester des systèmes d'isolation sonore du forage. En effet, un forage nu permet une excellente propagation des ondes acoustiques hautes et moyennes fréquences et donc des bruits de surface. Le forage doit être impérativement isolé avant d'envisager toute écoute acoustique au fond ;
- Evaluer l'influence de cette configuration sur les mesures : dégradation éventuelle des mesures, augmentation potentielle des enregistrements de ruissellement provoqué par le forage, etc.

Le montage employé est le suivant :

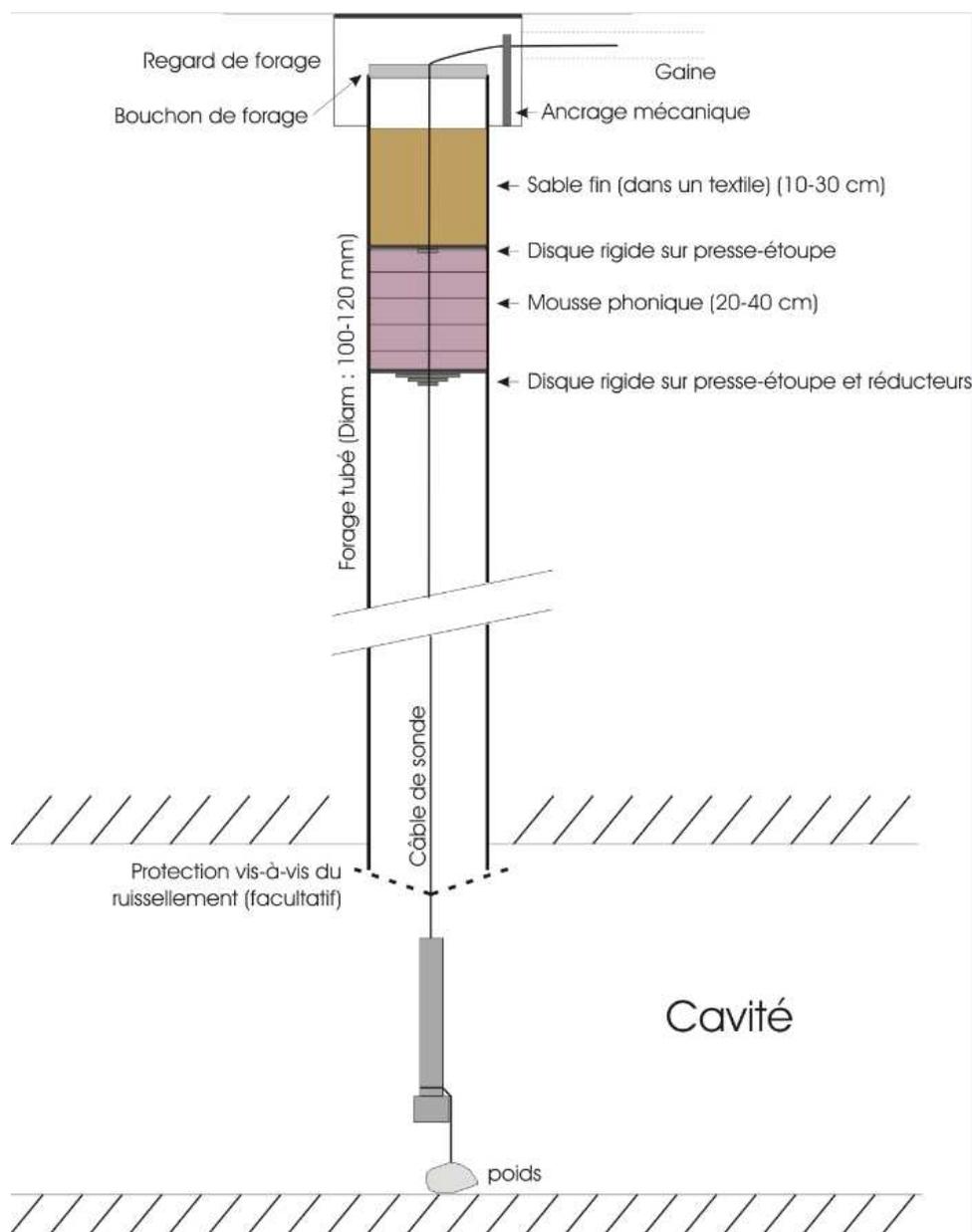


Figure 50 : Schéma du montage pour la pose d'un microphone depuis la surface, y compris bouchon acoustique du forage. Le poids n'a pas été mis en œuvre lors de nos expérimentations in situ.

Le microphone est simplement pendu par son câble de mesure (pour cette profondeur un câble autoporteur n'est pas nécessaire), lesté par un poids afin de le stabiliser. La pose/retrait du microphone se fait en une quinzaine de minutes. Le retrait aisé de la sonde est important afin de permettre l'utilisation ponctuelle du forage pour d'autres actions, une inspection de la cavité par caméra vidéo par exemple.

10.2 ISOLATION ACOUSTIQUE DU FORAGE

Un bouchon acoustique constitué d'une épaisseur de 40 cm de mousse phonique doublée par une épaisseur de sable a été placé en tête de forage. Son intérêt a été démontré par deux retours d'expérience :

- Le forage débouche sur une rue résidentielle au trafic moyen (>100 véhicules par jours). Dans un premier temps le bouchon n'a pas été installé, sur une période de deux mois, puis il a été mis en place. Le nombre de déclenchements pour des bruits issus de la surface est passé de 8 par jour à 1,2 en moyenne, soit 6 à 7 fois moins ;
- L'atténuation apportée par le bouchon a été quantifiée sur site. Des signaux mono-fréquentiels ont été émis en tête de forage et enregistré par le microphone au fond. Les mêmes signaux ont émis deux fois : d'abord sans puis avec le bouchon acoustique. L'écart d'amplitude au fond et au jour est tel qu'il n'a pas été possible de mesurer l'atténuation effective mais seulement un minimum : l'atténuation supplémentaire apportée par le bouchon acoustique est au moins égale à 60 dB quelle que soit la fréquence considérée (entre 80 et 1000 Hz). Le bouchon acoustique s'avère tout à fait pertinent pour limiter leur amplitude au fond.

Au final le bouchon acoustique mis en œuvre s'est avéré efficace pour limiter les bruits parasites issus de la surface et véhiculés par le forage. Son installation est relativement aisée et permet un retrait rapide pour disposer du forage pour une opération ponctuelle, comme une inspection par caméra vidéo par exemple.

10.3 METROLOGIE

Une série de simulation de chutes de bloc et de petites chutes réelles a été réalisée en fond de mine, à égale distance (<10 mètres) d'un microphone installé en forage et un autre installé de manière « classique » sur un trépied. L'objectif a été de comparer les enregistrements afin de valider les performances métrologiques d'un microphone installé depuis la surface.

Les enregistrements se sont avérés tout à fait comparable dans leur signature et leur spectre relatif mais avec une amplification non négligeable des basses fréquences (+ 8 dB en moyenne). Il a été suspecté qu'un balancement du câble du microphone pouvait être à l'origine de cette amplification.

Une seconde expérimentation a été réalisée en laboratoire en comparant les enregistrements de deux microphones pendus à leur câble, l'un lesté d'un poids, l'autre non. La différence d'amplitude des signaux a de nouveau été constatée, sans toutefois noter d'influence du spectre du signal émis. La signature des signaux est, elle, tout à fait similaire sur les deux enregistrements.

Il apparaît donc que l'installation en forage ne modifie pas la signature des signaux enregistrés mais qu'une amplification est provoquée par un balancement du microphone. Il est donc important d'assurer sa stabilité, en prévoyant un lesté en bout de dispositif, qui servira également à contrôler la hauteur du microphone dans la cavité.

11. ELEMENTS DE COUT

L'instrumentation d'une cavité nouvelle implique des coûts d'étude, de fourniture d'équipements et de leur installation. Les coûts finaux seront naturellement fonction, notamment, de la taille de la zone à surveiller et donc du nombre de capteurs que l'on souhaite installer.

Le coût d'une centrale d'acquisition se situe entre 5 et 20 k€ HT, en fonction du nombre de voies disponibles, de la fréquence d'acquisition, des options d'ergonomie (Interface Homme-Machine, récupération/envoi des données, autodiagnostic, autonomie, etc.)

Les microphones coûteront de quelques centaines d'euros à plusieurs milliers selon leur gamme de fréquences, leur sensibilité, leur courbe de réponse (fidélité) et leur robustesse notamment. L'emploi de capteurs bas de gamme devra impérativement être validé rigoureusement sur le terrain et à long terme, une dégradation des caractéristiques météorologiques pouvant se produire.

L'installation de la chaîne de mesure pourra être relativement peu coûteuse si les conditions d'accès au site sont favorables. En effet l'installation de l'unité d'acquisition en cavité souterraine ne pose généralement aucun souci, tout comme la pose des capteurs au fond, très simple techniquement. Les éventuels travaux de mise en sécurité de l'accès à la zone d'étude pourront cependant augmenter significativement le coût général de l'opération. Les travaux d'aménage du réseau électrique pourront être évités si l'autonomie du système de mesure est suffisante, mais seront remplacés par l'intervention régulière d'un opérateur pour changement des batteries.

Dans le cas d'une installation depuis le jour, le coût des forages s'additionnera et représentera une part très importante du budget de l'opération. Pour un forage tubé de diamètre supérieur à 100 mm, un budget de 200 à 500 € par mètre linéaire peut être considéré.

Le coût de la gestion et du suivi d'expertise des données (contrôle régulier des conditions de fonctionnement, traitement et interprétation au regard du phénomène surveillé et archivage des signaux enregistrés) dépendra de la complexité du site, du volume des données ainsi que du niveau d'exigence attendu (rythme des vérifications, délais de réaction, mise en œuvre éventuelle d'une procédure d'alerte, etc.) La mise en place d'alarmes automatiques, basées sur des seuils (voir section 7.4.3) permettra de réduire les coûts liés aux vérifications de routine tout en garantissant une bonne réactivité. Une fourchette de 15 à 25 k€ HT annuels peut être considérée pour un réseau de moyenne complexité (moins de 10 capteurs).

12. CONCLUSIONS

La surveillance du risque fontis peut bénéficier largement d'un apport instrumental. Le suivi en continu d'une cavité permet de réduire drastiquement le risque pour les enjeux sous-jacents et donc de maintenir plus facilement des populations en place dans l'attente d'un traitement.

En premier lieu, ceci suppose que la méthode de surveillance employée est en mesure de caractériser l'évolution du fontis le plus précisément possible et surtout de manière fiable (pas d'événement ignoré, pas de fausse alerte).

Le grand rendement de la méthode doit également être assuré afin de garantir un rapport coût/bénéfice acceptable. Ce qui est d'autant plus critique pour une solution à vocation temporaire.

Enfin, la robustesse technique de la méthode doit permettre une installation simple, une qualité métrologique pérenne dans le temps et surtout de limiter impérativement les opérations de maintenance. Un des objectifs est de réduire l'exposition des équipes sur le terrain.

La méthode de suivi des chutes de blocs par écoute acoustique a été développée et testée par l'INERIS et considérée comme une réponse à ce cahier des charges.

Tout d'abord, l'écoute acoustique s'impose comme un moyen simple et efficace de détection de chute de blocs au sein d'une cavité peu profonde. Une cavité souterraine étant souvent silencieuse, l'impact au sol d'une chute de blocs se distingue aisément. La capacité de détection sera fonction du niveau de bruit de fond et de l'activité sonore de la cavité. Le mécanisme d'évolution attendu des fontis doit également être étudié : plus les chutes de blocs seront importantes et plus le phénomène est à un stade précoce et plus la surveillance sera performante.

Ensuite, la mesure est volumétrique : elle permet de surveiller un grand volume de cavité avec un nombre restreint de capteurs. Outre l'avantage économique flagrant, qui élimine *de facto* les méthodes géotechniques classiques pour la surveillance grande ou complexe de cavités, la détection d'un événement par plusieurs capteurs permet également une localisation de la source. Différentes méthodes sont décrites dans ce rapport : zonage simple des temps d'arrivée, localisation en rais droits, localisation en rais courbes. Le choix de ces méthodes dépendra de la précision attendue, de la configuration de la cavité et du dispositif d'écoute. Une constante étant que plus le réseau de microphones est dense, plus la localisation s'avérera précise.

Enfin, si l'on connaît la loi d'atténuation des ondes acoustiques au sein de la cavité considérée, il est possible d'évaluer au premier ordre l'importance (masse tombée) d'un événement acoustique. Une méthode simple d'évaluation de cette atténuation est décrite. Cette méthode pourra être développée en intégrant le spectre fréquentiel de l'événement source dans l'évaluation de l'atténuation et donc dans l'estimation du niveau de pression acoustique initial.

Au-delà des aspects métrologiques, l'écoute acoustique présente différents avantages techniques.

La simplicité de la chaîne de mesure assure une pose rapide, nécessitant des travaux extrêmement légers. Le réseau de microphones est à la fois mobile et récupérable. De plus, l'exposition des équipes de terrain est de ce fait réduite. La cavité est peu perturbée par l'installation et le temps d'intervention est limité à quelques heures.

Le présent rapport aborde principalement le cas d'une installation depuis le fond. Cependant, certains contextes peuvent rendre l'accès au fond indésirable ou tout simplement impossible, où il devient essentiel de pouvoir instrumenter directement depuis la surface. La pose d'une sonde microphonique en chambre ou en galerie au travers d'un forage tubé depuis la surface a été testée avec succès, moyennant quelques précautions d'installation et une bonne connaissance de la géométrie de la cavité.

La robustesse des équipements (notamment vis-à-vis de l'humidité), une très faible consommation et une communication sans fil, tous testés avec succès, permettront de déployer un réseau dans des environnements isolés et/ou « agressifs », typiques des cavités souterraines abandonnées.



Figure 51 : filet capteur de chute de blocs installé dans la mine de Moyeuve-Grande, au droit d'une habitation. Un capteur de traction à l'une des extrémités indique le poids accumulé dans le filet.

Basée sur le retour d'expérience de l'INERIS obtenu sur plusieurs sites expérimentaux ou opérationnels, une démarche complète d'instrumentation d'une

cavité nouvelle est décrite dans ce rapport. Cette démarche, synthétisée en section 9, décrit les moyens de validation du choix de la méthode, de dimensionnement d'un réseau de microphones, de calage et de test du dispositif.

Pour autant, l'emploi de la méthode acoustique pour la surveillance des fontis peut tout à fait être complété de manière pertinente par d'autres types de surveillance.

La microsismique peut s'avérer localement un complément pertinent lorsque le bruit de fond sonore ne permet plus un bon rapport signal/bruit acoustique. L'emploi de la microsismique pour détecter des chutes de bloc implique cependant des rayons d'écoute bien inférieurs à ceux exploités pour la détection de fracturation dans le recouvrement ou un pilier, peu d'énergie cinétique étant transmise dans le sol [14]. L'emploi d'hydrophone a également été testé avec succès démontrant une excellente sensibilité de ce type de capteurs installés dans une zone ennoyée stagnante.

L'instrumentation géotechnique classique (mesures de déplacement, de déformation, filets capteurs de chutes de blocs, etc.), bien que précise et fiable, ne peut pas être étendue à de grandes cavités. Cependant, elle pourra ponctuellement être exploitée en mesure complémentaire pour obtenir une information très précise sur l'évolution d'une zone réduite présentant soit un risque, soit des enjeux particuliers.

Enfin, et même si la surveillance instrumentale a notamment pour objectif de limiter les interventions de terrain, on peut tout à fait concevoir de déclencher une visite d'inspection exceptionnelle à la suite de l'enregistrement d'une activité inhabituelle. Non seulement si le système est correctement établi, ces visites seront *a priori* rares mais les équipes auront connaissance en amont des zones en évolution, permettant d'adapter le cheminement et les consignes de sécurité.

13. GLOSSAIRE ET UNITES

Activité sonore : Au sein d'une cavité, cumul du bruit de fond sonore et des événements acoustiques imprévisibles et irréguliers. Il s'agit d'une évaluation qualitative, sans dimension.

Bruit de fond sonore : Au sein d'une cavité, somme des bruits continus et récurrents, mesurables sur une courte période, exprimée en décibel (dB). En pratique pour une cavité jugée en première approche comme « silencieuse », le bruit de fond peut varier typiquement entre 15 dB et 30 dB (LAeq) selon que la zone de cavité est profonde et éloignée de tout accès vers l'extérieur ou que la zone souterraine est à la fois peu profonde et très proche d'ouvertures vers l'extérieur.

Fréquence : Nombre de vibrations du milieu de propagation par seconde. S'exprime en Hertz (Hz).

Longueur d'onde (λ) : Distance parcourue par une onde acoustique à une fréquence donnée durant une période. S'exprime en mètre (m).

On a la relation $\lambda = \frac{c}{f}$, où c est la célérité de l'onde acoustique et f la fréquence.

Niveau de pression acoustique L_p : Expression sous forme logarithmique de la pression acoustique, introduite par commodité d'usage et exprimée en décibel (dB).

On a la relation $L_p = 20 \cdot \text{Log}_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right)$ où P_0 est la pression de référence.

Onde acoustique, ou « son » : L'onde sonore consiste en une propagation de proche en proche d'une déformation qui provoque localement des variations de pressions et des oscillations des particules fluides autour de leur position d'équilibre (une particule fluide est définie comme un petit volume de l'espace contenant un grand nombre de molécules mais qui reste petit par au volume du fluide considéré).

Pondération : Correction de la mesure brute de pression par un coefficient de fonction de la fréquence, par exemple pour reproduire ce qui est perçu réellement par une oreille humaine (pondération A). S'exprime en décibel (dB).

Pression acoustique : Surpression vis-à-vis de la pression atmosphérique provoquée par une onde acoustique, exprimée en pascal (Pa).

Réverbération : Superposition d'ondes directes et réfléchies, typiquement dans un milieu confiné.

Spectre fréquentiel : Description des fréquences superposées qui constituent une onde acoustique. Les fréquences s'expriment en Hertz (Hz). Le spectre de fréquence caractérisant une source de bruit est défini en général par une fréquence minimale, une maximale et éventuellement une fréquence dominante.

Susceptibilité acoustique : Caractérisation de la capacité d'une cavité à produire une onde acoustique importante lors d'une chute de blocs. Il s'agit d'une évaluation qualitative, sans dimension.

14. REFERENCES

- [1] Vachat, 1982. *Les désordres survenant dans les carrières de la région parisienne. Étude théorique et pratique de l'évolution des fontis*. Thèse du CNAM, 115-126.
- [2] Lambert et al., 2007. *Évaluation et traitement du risque de fontis lié à l'exploitation minière*. Rapport INERIS réf. DRS-07-86090-05803A.
- [3] Site web de la DREAL Lorraine – Cartes d'aléas sur le bassin ferrifère de Briey-Longwy, commune de Moyeuve-Grande.
<http://217.167.195.132/webdrire/mines/listeCommunes.asp?PAGE=3>
http://217.167.195.132/webdrire/mines/cartes/Moyeuve_Grande_cartealeamt.pdf
- [4] Site web de la DREAL Lorraine – Cartes d'aléas sur le bassin ferrifère de Briey-Longwy, commune d'Hayange.
<http://217.167.195.132/webdrire/mines/listeCommunes.asp?PAGE=6>
http://217.167.195.132/webdrire/mines/cartes/Hayange_cartealeamt.zip
- [5] Brekhovskikh, 1980. *Waves in layered media*. Academic Press édition 2, New York.
- [6] Bruel & Kjaer, 2007. *Initiation aux mesures de bruit et Mesures acoustiques*. Supports de formation, Bruel & Kjaer.
- [7] Fink, 2007. *Ondes et acoustique*. Cours d'acoustique de l'École de Physique et de Chimie de Paris.
- [8] Stokes, 1845. *On the theories of the internal friction in fluids in motion and of the equilibrium and motion of elastic solids*. Transaction of the Cambridge Philosophical Society - Vols. vol.8, 22, pp. 287-342.
- [9] Cuenot. *Les algorithmes de détection automatique des ondes sismiques*. CNAM.
- [10] Contrucci et al., 2010. *Management of post-mining large-scale ground failures: blast swarms field experiment for calibration of permanent microseismic early-warning systems*. Pure Appl. Geophys., 167, 43-62.
- [11] Lomax, A., A. Michelini, A. Curtis (2009), Earthquake Location, Direct, Global-Search Methods, in Complexity In Encyclopedia of Complexity and System Science, Part 5, Springer, New York, pp. 2449-2473, doi:10.1007/978-0-387-30440-3
- [12] Tarantola, A. and Valette, B. (1982). *Generalized Nonlinear Inverse Problems Solved using the Least Squares Criterion*. Reviews of Geophysics and Space Physics, 20(2), 219-232.
- [13] Sethian J.A. (1999) Level set methods and fast marching methods. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [14] Iannacchione et al., 2005. *Characterising roof falls signatures from underground mines*, 6th International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines Proceedings, March 9-11, 2005, Perth, Australia, pp. 619-629.