

RS

Rp-50220

**Site pilote : projet de surveillance
hydroacoustique et optique du bassin ferrifère
lorrain – Rapport d’avancement**

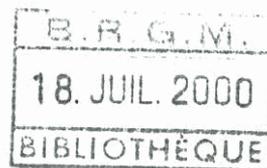
S. Bernardie (BRGM)

Mai 2000

GISOS

Ecole des Mines
Parc Saurupt 54042 Nancy Cedex
tél : 03 83 58 42 81 / fax : 03 83 57 97 94
email : gisos@mines.u-nancy.fr
<http://www.mines.u-nancy.fr/gisos>

Rapport BRGM-RP-50220-FR



*Site pilote : projet de surveillance
hydroacoustique et optique du bassin ferrifère
lorrain - Rapport d'avancement*

Etude réalisée dans le cadre des opérations de Recherche du GISOS
(contrat de recherche entre l'INPL et le BRGM du 17 mai 2000)

Mai 2000
BRGM/RP-50220-FR



Mots clés : GISOS, site pilote, surveillance hydro-acoustique, hydrophone, surveillance optique, vidéo, photo, système d'acquisition

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

S. Bernardie (2000) – Site pilote : projet de surveillance hydroacoustique et optique du bassin ferrifère lorrain – Rapport d'avancement. Rapport BRGM/RP-50220-FR, xx pages, x figures, x tableaux, x annexes.

© BRGM, 2000. Ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Ce rapport présente l'état d'avancement des travaux réalisés en vue de deux expérimentations sur un site pilote dans une ancienne mine du bassin ferrifère lorrain. Ces travaux se situent dans le cadre du GISOS (Groupement de recherche sur l'Impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains).

L'objectif du site pilote est l'étude de l'action de l'eau sur les caractéristiques mécaniques de la roches des piliers, du toit et du mur des couches exploitées. Une zone de 12 piliers sera noyée pendant un an durant lequel seront suivis l'évolution des paramètres physiques et chimiques de la roche et de l'eau.

Dans le présent rapport, nous détaillons deux des expériences qui seront proposées pour surveiller le site :

- surveillance hydroacoustique sur une bande de fréquences 0.1 Hz – 200 KHz ;
- surveillance optique par caméras numériques disposées à l'intérieur du pilote.

Sommaire

Synthèse	3
Sommaire	5
Liste des figures	6
Liste des tableaux	6
Liste des annexes	6
1. Introduction	7
1.1 Gisos	7
1.2 Site pilote	7
2. Surveillance hydroacoustique	9
2.1 Introduction.....	9
2.1.1 Surveillance hydroacoustique.....	9
2.1.2 Objectifs de cette expérimentation	10
2.2 Instrumentation	10
2.2.1 Objectifs de cette manipulation en terme de signal.....	10
2.2.2 Conditions nécessaires à la réalisation optimale de ces mesures	11
2.2.3 Dispositif proposé.....	12
2.2.4 Remarques	15
2.3 Bilan.....	16
3. Surveillance optique	17
3.1 Introduction.....	17
3.1.1 Surveillance visuelle.....	17
3.1.2 Objectifs de cette expérimentation	18
3.2 Instrumentation	18
3.2.1 Objectifs de cette manipulation en terme de signal.....	18
3.2.2 Conditions nécessaires à la réalisation optimale de ces mesures	18
3.2.3 Dispositifs envisagés	19
3.3 Bilan.....	21
Bibliographie	23

Liste des figures

<u>Figure 1</u> : Schéma prévisionnel du positionnement des hydrophones (vue en plan) ...	12
<u>Figure 2</u> : Schéma de câblage :	15
<u>Figure 3</u> : Schéma prévisionnel du positionnement des appareils photo (vue en plan)	20

Liste des annexes

Annexe 1 : Halbwachs M., Sabroux J.-C., nov. 1994 - Capteurs d'ultrasons destiné à la prévision des tremblements de Terre.	
---	--

1. Introduction

1.1 GISOS

Le GISOS (Groupement de recherche sur l'Impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains) est un Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS) qui associe le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS) et le Laboratoire Environnement-Géomécanique-Ouvrages (LAEGO) commun à l'École des Mines de Nancy, à l'École de Géologie de Nancy et à l'INERIS. Le LAEGO fait partie de l'Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL).

Le GISOS a été créé dans le but de répondre scientifiquement à des questions dont certaines se rapportent aux conséquences de l'exploitation et de l'arrêt de l'exploitation minière dans le bassin ferrifère lorrain. Son travail de recherche consiste donc à comprendre, à quantifier et à prévoir des phénomènes susceptibles de se produire du fait de la présence d'ouvrages souterrains.

Un des paramètres qui jouent un rôle important sur la stabilité des ouvrages souterrains est l'eau. En effet, l'arrêt des exploitations implique l'arrêt de l'exhaure, ce qui permet à l'eau de retrouver un niveau proche de l'état initial. Il est donc nécessaire d'étudier l'influence de l'eau sur le comportement des piliers, des couches et des intercalaires.

1.2 SITE PILOTE

Les recherches du GISOS se doivent de profiter de certains sites réels pour les utiliser au développement et à la promotion de diverses techniques qui mettent en évidence ou expliquent les phénomènes liés à l'exploitation et à l'arrêt des mines : c'est le but de l'opération « site pilote », qui a pour vocation d'une part d'évaluer l'influence du temps et de l'eau sur les ouvrages souterrains, ainsi que les conséquences à la surface du sol, et d'autre part de traiter des conséquences d'une rupture brutale et accidentelle de certains piliers.

Ainsi l'un des objectifs de ce site pilote est d'étudier l'influence de l'eau sur le comportement des piliers et des intercalaires en s'intéressant à leur stabilité locale.

Pour ce faire, il est prévu d'envoyer un quartier de mine (de dimension d'environ 50 m x 50 m) pendant un an et de surveiller l'évolution de différents paramètres (chimiques, hydrauliques, hydromécaniques...), et l'arrivée d'événements (microsismiques...). Parmi les expérimentations qui sont envisagées, nous en proposons ici deux : une surveillance hydroacoustique et une surveillance optique.

2. Surveillance hydroacoustique

2.1 INTRODUCTION

Ce rapport constitue une première présentation de cette expérimentation qui sera effectuée dans le cadre de GISOS, inscrite dans le « Champ d'expérimentation in situ dans un ancien site minier du bassin ferrifère lorrain » (site pilote). Cette étude propose de tester une nouvelle technique de surveillance des bassins miniers ennoyés, par mesures hydroacoustiques. Elle s'est amorcée par la rencontre de Michel Halbwachs (Université de Savoie, France) dont ses travaux sur l'écoute hydroacoustique dans les lacs de volcans peuvent être appréciés dans l'article en annexes.

2.1.1 Surveillance hydroacoustique

Ce projet s'appuie sur les travaux effectués par M. Michel Halbwachs sur les volcans KELUT et TAAL (cf. articles de M. Halbwachs et al (1994) et J. Vandemeulebrouck et al (2000) en annexes). Des mesures de vibrations acoustiques ont été effectuées dans deux lacs de cratère sur une très large bande de fréquence (0,1 Hz – 200 kHz), montrant des émissions dans le spectre ultrasonore durant la phase précédant la reprise de l'activité volcanique.

Cette manipulation partait elle-même des résultats de certaines expériences en laboratoire qui ont mis en évidence des émissions de pulses acoustiques précédant la rupture lors de la mise sous contraintes de matériaux ; les événements qui surviennent alors sont situés dans le domaine ultrasonore (100 kHz-1 MHz). Nous pouvons trouver l'origine de cette émission dans les déformations irréversibles du matériau, à différentes échelles.

Le seul mécanisme susceptible d'expliquer l'émission ultrasonore parmi d'autres possibles (cavitation, bruit de bullage et bruit thermique) est le phénomène de l'émission acoustique liée à la micro-fracturation des roches.

C'est donc cette bande de fréquence qui nous intéresse ici particulièrement.

La question essentielle que l'on se pose est bien la faisabilité de cette expérience :

Aurons-nous des signaux d'amplitude suffisamment grande pour être perçus dans les hautes fréquences? L'atténuation ne sera-t-elle pas trop grande ? C'est le but de cette manipulation, et il paraît impossible d'affirmer que l'on aura bien les signaux attendus. Toutefois, si l'on se réfère à l'article de Baxter H. Armstrong (1969), il apparaît que pour les hautes fréquences, l'eau conduit beaucoup mieux une émission acoustique que la roche, et ce pour une distance entre la source et le capteur de l'ordre de la centaine de mètres ; le dispositif proposé dans le cadre de ce projet offre une distance source - capteur de moins de 10 m, ce qui est très rassurant quand on sait que l'atténuation est exponentielle.

2.1.2 Objectifs de cette expérimentation

Le but de cette manipulation, en identifiant l'ensemble des événements acoustiques sur une bande de fréquence de 0,1 Hz à 200 kHz, est de détecter le changement de comportement et l'état de la roche, en observant en particulier l'émission acoustique qui rend compte des micro-fracturations survenant au niveau des piliers et du toit de la couche ennoyée.

Ainsi dans ce cadre, cette expérience possède toutes les conditions optimales à sa réalisation, ce qui permettra de valider ou non cette technique ; et si effectivement cette première expérience en surveillance hydroacoustique des mines fournit des résultats probants, nous pourrions alors envisager le développement de cette nouvelle technique de surveillance sur d'autres sites ennoyés.

2.2 INSTRUMENTATION

2.2.1 Objectifs de cette manipulation en terme de signal

L'objectif de cette manipulation, comme cela a été dit précédemment, est d'analyser le signal reçu sur une large bande de fréquence (0.1 Hz-200 kHz).

On cherche trois types de renseignements :

1) L'évolution dans le temps de la puissance RMS (puissance moyenne quadratique) dans plusieurs bandes de fréquence : c'est cette information qui nous intéresse particulièrement dans cette manipulation ;

2) Des spectres lissés dans la gamme Hautes Fréquences allant jusqu'à 200 kHz à intervalles de temps espacés ;

3) Une surveillance temporelle du signal avec un critère de reconnaissance de l'arrivée de pulses ultra-sonores ; on applique le test de reconnaissance d'événement en comparant le rapport STA/LTA (cf. paragraphe 2.2.3.) à une valeur seuil, puis on stocke l'allure des pulses dans le domaine temporel.

2.2.2 Conditions nécessaires à la réalisation optimale de ces mesures

Du fait que la propagation des ondes acoustiques est fortement atténuée par le milieu, et cela d'autant plus que la fréquence est grande, la mesure des vibrations acoustiques dans la bande ultra-sonore (30 kHz – 200 kHz) nécessite un certain nombre de conditions :

1. Il faut effectuer la surveillance dans le voisinage de la source des événements, ce qui est le cas dans ce projet (cf. Figure 1) où la distance source-capteur n'excède pas 5 m.
2. Un excellent couplage mécanique du capteur avec le milieu est indispensable, ce qui est le cas avec l'utilisation d'un hydrophone plongé dans un milieu liquide.
3. Nous prendrons 4 ou 5 hydrophones de type piézo-électrique et qui présentent un bruit propre extrêmement faible dans la bande utile (de l'ordre de 10 dB ref $1\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$). Leur réponse est plate entre 0,1 et 200 kHz. Ils sont omni-directionnels.
4. Il faut une chaîne de conditionnement analogique permettant une amplification dépassant 120 dB et une unité de traitement du signal travaillant dans la gamme de quelques centaines de kHz en analyse fréquentielle (au minimum 500 kHz pour satisfaire le théorème de Shannon pour une gamme de fréquence utile de 0-200 kHz).

2.2.3 Dispositif proposé

Les hydrophones seront installés selon le schéma suivant :

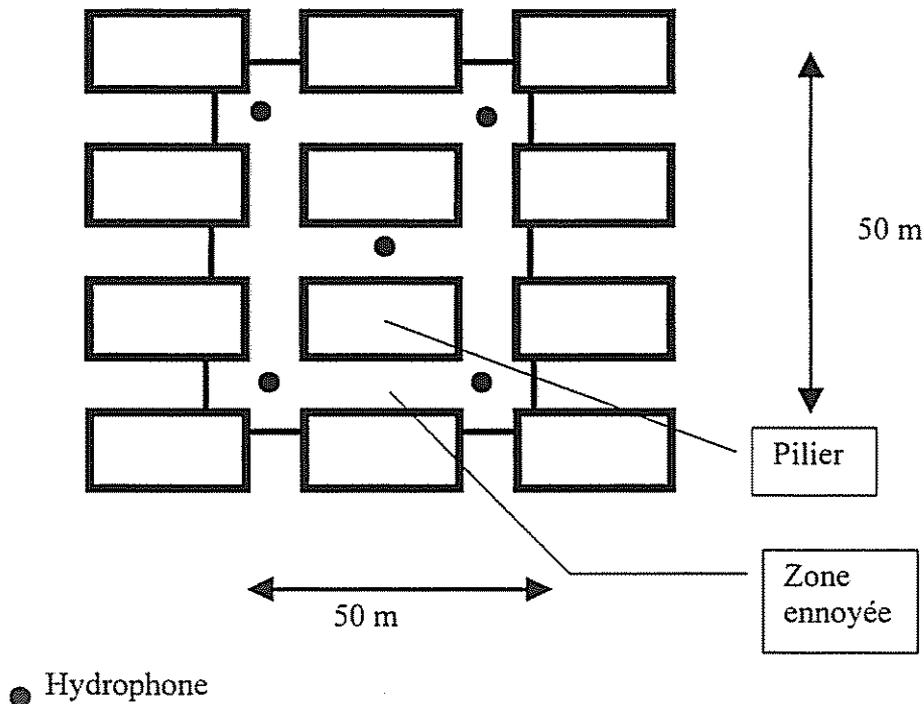


Figure 1 : Schéma prévisionnel du positionnement des hydrophones (vue en plan)

Toutefois, la position des hydrophones n'est pas définitive, car il pourrait être intéressant de placer un capteur dans un pilier (par carottage) de manière à être encore plus proche de la source, ou bien de disposer les hydrophones de manière non symétrique afin d'obtenir plus d'information.

Le câblage sera fait de la manière suivante (voir Figure 2) :

- Puissance RMS : après une préamplification du signal de 40 dB (*100), un filtrage analogique est appliqué : acquisition du signal découpé de manière analogique par bandes spectrales (suivant 7 bandes spectrales) :
 - < 30 Hz
 - 30 Hz – 200 Hz
 - 200 Hz – 3000 Hz
 - 3000 Hz – 30 kHz
 - 30 kHz – 70 kHz
 - 70 kHz – 110 kHz
 - > 110 kHz

Ce filtrage analogique permet une plus grande précision du signal qu'une analyse en Fourier puisqu'il y a intégration de la puissance du signal sur une bande de fréquence importante.

A ceci s'additionne une amplification de gain 10^4 – 10^5 de chaque bande, qui ne rajoute aucun bruit.

Puis on redresse les sinusoïdes (on multiplie par le signal conjugué) et on obtient la puissance RMS.

La valeur analogique obtenue est ensuite convertie en numérique par le convertisseur.

Pour l'enregistrement lent des niveaux RMS, on prévoit d'échantillonner à basse fréquence (de l'ordre du Hz) chaque voie, soit 7 bandes x 5 capteurs = 35 voies. Pour cela, il existe des coffrets d'acquisition 40 voies, 16 bits, que l'on connecte directement sur le port USB d'un PC.

N.B. Nous pouvons utiliser les 5 voies restantes pour la visualisation des paramètres suivants :

Température, pression hydrostatique...

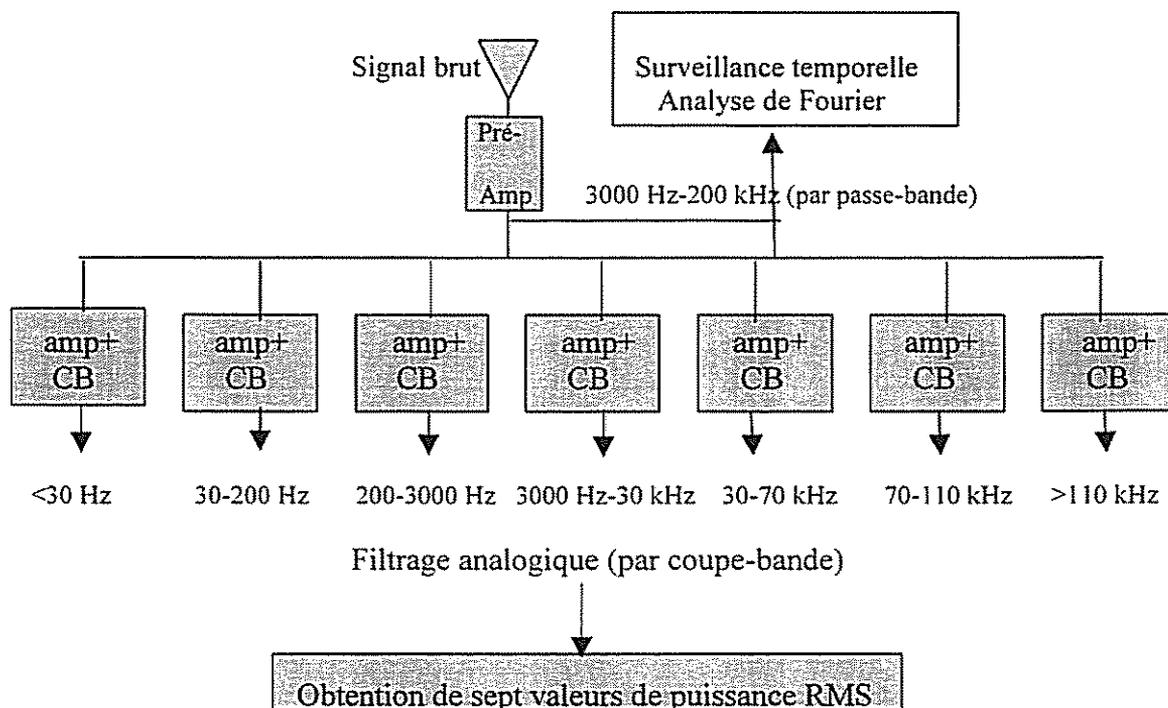
- Surveillance temporelle et analyse fréquentielle : étant donné que l'intérêt principal de cette étude se situe dans la gamme des hautes fréquences, la surveillance temporelle et l'analyse fréquentielle seront effectuées dans la bande de fréquence 30 kHz-200 kHz ; l'utilisation d'une carte d'échantillonnage 5 ou 10 voies, 16 bits – 500 kHz semble adaptée à cette tâche. Ainsi, nous pouvons échantillonner en permanence le signal sans les Basses Fréquences sur les 5 coffrets.
 - ❖ Une surveillance temporelle du signal avec un critère de reconnaissance de l'arrivée de pulses ultra-sonores (sur la bande de fréquence 3000 Hz-150 kHz ou 30 kHz-150 kHz) est envisagée ; ce critère pourrait être paramétrable suivant les 3 paramètres suivants :
 - Short Time Average (ex 5 s) ;
 - Long Time Average (ex 1-2 min) ;
 - La valeur seuil (ex 8-12 dB).

Lorsque la valeur seuil du critère STA/LTA est atteinte, la portion du signal temporel est stockée pour examen ultérieur.

- Une analyse de l'évolution spectrale du signal sera également effectuée. Pour cela, on utilisera probablement une sortie du signal avant redressement dans une gamme allant jusqu'à 200 kHz. Le spectre de puissance sera moyenné sur un certain nombre d'échantillons (de 20 à 50, par exemple) afin d'obtenir une allure lissée du spectre.

Nous avons deux solutions pour analyser les spectres :

- utiliser des logiciels qui permettent une analyse fréquentielle en temps différé en effectuant eux-mêmes la Transformée de Fourier : les logiciels d'analyse du type MATLAB ou MUSTIG peuvent réaliser des spectres de puissance en temps différé. Mais il faudra peut-être rajouter un filtre anti-repliement à 200 kHz sur chaque voie.
- employer un analyseur de spectre qui a l'avantage de fournir directement des spectres de puissance, tout en comportant des filtres anti-repliement et des fenêtres de pondération.



CB : coupe-bande

Figure 2 : Schéma de câblage :

2.2.4 Remarques

- Des précautions sont à prendre au niveau de l'acquisition du fait de cette large bande de fréquence (0,1 Hz-200 kHz). Des dispositions particulières sont nécessaires afin d'obtenir une parfaite immunité électro-magnétique (éliminer tout parasite).
- Il serait intéressant de pouvoir corrélérer spatialement et temporellement les résultats obtenus avec les autres manipulations in situ, comme la surveillance microsismique et la surveillance optique décrite ci-dessous.

2.3 BILAN

Le dispositif de cette expérimentation n'est à ce jour toujours pas définitif : en effet, le choix sur les capteurs n'est à ce jour pas déterminé puisqu'une autre solution technique non développée dans ce rapport par manque d'informations précises est envisagée. Ce qui implique que le choix du système d'acquisition et du type d'analyse du signal lui non plus n'est pas arrêté.

Mais de ce rapport d'avancement, il résulte que cette nouvelle expérimentation est d'une part très attractive quant au type de signal que l'on veut acquérir et quant à ses répercussions, i.e. de prévoir un effondrement suite à l'arrivée d'événements liés à la micro-fracturation ; d'autre part la théorie et l'expérience acquises dans le cadre de la surveillance de lacs de volcans permet de renforcer nos convictions actuelles quant à la faisabilité d'une telle expérience.

3. Surveillance optique

3.1 INTRODUCTION

L'idée de cette étude est de profiter de ce champ d'expérimentation pour tester une autre technique de surveillance des mines ennoyées, par observation optique, le but étant, comme pour la surveillance hydroacoustique, de valider une technique qui pourrait alors être largement développée sur d'autres sites.

La rencontre avec MM. Hirsch et Graebeling du Laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique et de la Télédétection (LSIIT) de l'ENSPS à Strasbourg, nous a permis de mieux évaluer les obstacles techniques que nous pouvons rencontrer dans ce type de projet.

Le choix actuel se fait sur le dispositif utilisé pour cette surveillance, soit par vidéo en continu, soit par prise de photos de manière cyclique.

3.1.1 Surveillance visuelle

Lors de la mise en eau de la mine, des phénomènes sont susceptibles d'apparaître, telles les chutes d'éléments de roche du toit de la mine ennoyée ou des piliers. Ces morceaux de roche peuvent avoir des tailles différentes, de la taille de particules à des blocs de quelques dizaines de cm de diamètre. L'idée est alors de visualiser les chutes d'éléments de roche, afin d'en évaluer leur fréquence et la variation de leur fréquence : une augmentation sensible de ces événements peut nous indiquer l'arrivée prochaine d'un événement plus important (tel un effondrement).

Les événements créés par ces chutes seront de plus enregistrés sur les réseaux d'écoute microsismique et hydroacoustique.

Il serait alors intéressant d'installer un système d'observation optique du site pilote ennoyé pour plusieurs raisons :

- tester si effectivement cette technique nous permet de surveiller de manière efficace une mine ennoyée, c'est-à-dire si elle peut nous rendre compte des phénomènes qui s'y produisent et nous prévenir de l'arrivée d'événements conséquents ;
- relier temporellement d'une part les événements obtenus par écoute microsismique et hydroacoustique à ceux visualisés par surveillance optique, et relier spatialement d'autre part, de manière plus succincte, les événements obtenus par écoute microsismique à ceux obtenus par surveillance optique.

3.1.2 Objectifs de cette expérimentation

L'objectif de cette manipulation est de valider cette méthode de surveillance, en développant une technique de détection de l'arrivée des événements souhaités (chute de blocs de taille minimum (10 cm)) représentatifs du phénomène. Il serait ainsi intéressant de mettre en place un traitement d'image adapté et paramétrable par rapport au type d'événement (taille du bloc), en nous alertant de l'arrivée d'un événement remarquable et en déclenchant alors le stockage de l'image relative à cet événement.

3.2 INSTRUMENTATION

3.2.1 Objectifs de cette manipulation en terme de signal

Nous voulons un système d'observation optique qui rende compte des événements qui se produisent dans la mine ennoyée, tant sur leur localisation temporelle que spatiale ; il doit être capable de surveiller toute la zone ennoyée, en s'attachant à la visualisation, d'une part du toit de la couche ennoyée et des piliers d'où il est possible que des blocs tombent, et d'autre part du sol de la galerie afin de savoir quel bloc s'est détaché de quel endroit.

Une prise de vue permet alors de relier directement un événement temporel sismique et hydroacoustique à une chute de bloc dont on connaîtra l'emplacement d'origine et la position finale par terre. Elle permettra ainsi de corréler spatialement les événements visualisés par caméra (blocs tombés sur le sol) à ceux localisés avec les mesures microsismiques.

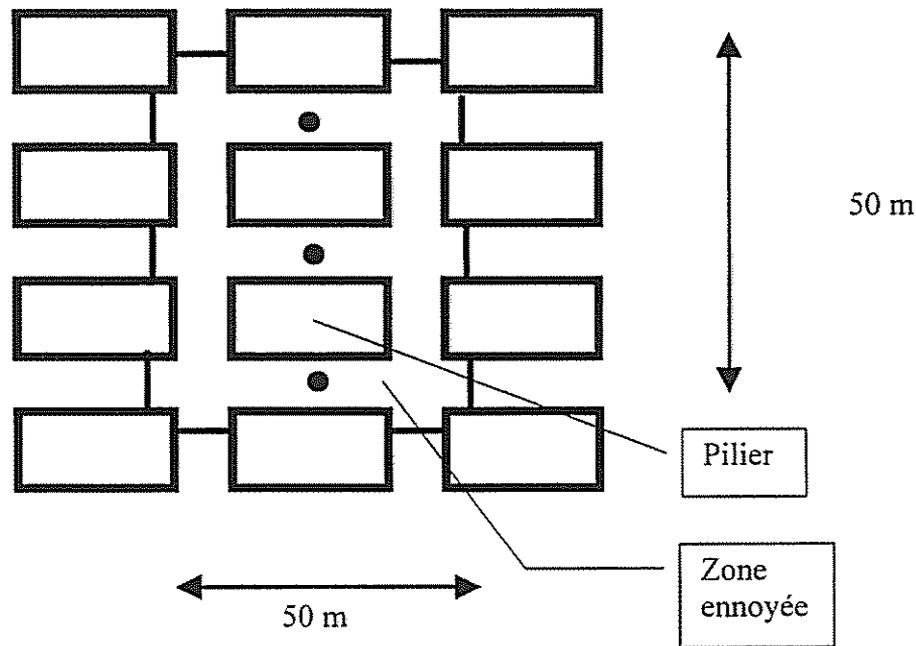
3.2.2 Conditions nécessaires à la réalisation optimale de ces mesures

- Nous voulons un dispositif qui puisse être appliqué dans un cas réel : nous voulons donc éviter les techniques utilisables uniquement dans le contexte de ce site pilote.
- Eclairage de la mine : nous proposons l'installation de projecteurs dans la mine ;
- Il faut s'assurer que le système optique offrira une image suffisamment précise pour que l'on puisse discerner sans ambiguïté les événements qui nous intéressent ;
- Nous voulons également un dispositif qui couvre la majeure partie de la mine ennoyée.

3.2.3 Dispositifs envisagés

Deux dispositifs sont à ce jour envisagés, même si l'un paraît mieux réalisable que l'autre.

- Une première idée est d'effectuer une prise de vue cyclique (toutes les minutes par exemple), selon les conditions suivantes :
 - trois caméras rotatives étanches accrochées au toit de la mine (cf. Figure 3) ; elles sont installées par des sondages verticaux réalisés à partir du mur de la couche supérieure ;
 - l'utilisation d'appareils photographiques numériques paraît être suffisante, en effectuant une photo de manière cyclique, toutes les minutes par exemple, avec des positions des caméras qui évoluent dans le temps (une photo vers le toit, une sur le sol dans différentes directions) ;
 - l'appareil photographique est de courte focale, ce qui permet une profondeur de champ très grande avec un grand angle ;
 - les projecteurs mis en place s'allument cycliquement (à la même fréquence que les prises de vue) quelques secondes avant la prise de vue ;
 - une analyse de l'image en vue de son traitement est effectuée ; l'idée est de créer un traitement automatique de l'image en comparant 2 consécutives, permettant ainsi de conserver ou non l'image suivante. Il s'agit alors de trouver quel type d'événement serait susceptible de fournir le critère de conserver ou non une image C'est un problème de sensibilité auquel il faut réfléchir, afin de limiter le bruit qu'occasionnerait une sensibilité trop forte. (ex : pas d'enregistrement sur les mouvements de l'eau) ;
 - il faut des points de repère fixes à l'intérieur de l'enceinte pour pouvoir recalibrer les images, d'autant plus que la caméra risque de bouger pendant le déroulement de la manipulation qui durera 1 an ;



- Appareil photo

Figure 3 : Schéma prévisionnel du positionnement des appareils photo (vue en plan)

L'inconvénient principal est que d'après MM. Hirsch et Graebing (précédemment cités) il paraît difficile techniquement de pouvoir différencier deux images sur un élément de 10 cm : dans le cas où nous aurions des images du toit d'où un morceau de roche de 10 cm s'est détaché, nous sommes loin de garantir qu'un traitement de l'image va nous permettre de différencier l'image avec le bloc de l'image sans.

- La seconde idée qui paraît à ce jour la plus réalisable serait d'installer des caméras vidéo, permettant ainsi une surveillance en continu, selon le dispositif suivant :
 - plusieurs caméras fixes (nombre non défini, il dépend de la géométrie du site) accrochées au toit de la mine ; elles sont installées par des sondages verticaux réalisés à partir du mur de la couche supérieure ;
 - la caméra vidéo a une focale courte, ce qui permet une profondeur de champ très grande avec un grand angle ;
 - les projecteurs sont allumés en continu ;

- le traitement d'images développé par le LSIIT permet de détecter les chutes de blocs, et de stocker les événements qui nous intéressent. On peut également envisager un système permettant de signaler que pour un événement donné, le programme de traitement de l'image ne permet pas une analyse fiable, ce qui nécessite alors l'intervention d'une personne pour analyser finement la situation.

L'intérêt de la surveillance en continu est d'ordre technique : toujours selon MM. Hirsch et Graebler, la détection d'événements et le traitement de l'image peuvent se réaliser plus facilement à partir de mouvements (chute de blocs) qu'à partir de la comparaison de deux images (statique) ; il paraît ainsi réalisable de détecter des chutes de blocs de la dimension envisagée, ce qui permettrait alors de détecter les événements ; la prise de photos cyclique ne permet pas la visualisation de la chute des blocs.

3.3 BILAN

La conclusion de cette première étude de faisabilité est positive, puisque différents avis nous amènent à penser que ce projet nouveau en son genre a des capacités techniques pour réussir, et que ses répercussions peuvent être prometteuses.

Des questions et remarques actuelles sont à éclaircir :

- quels sont les moyens mis à notre disposition pour tester et calibrer, avant le début de l'envoyage de la mine, l'acquisition et le traitement de l'image ?
- le choix du système d'éclairage dépend de plusieurs paramètres tels la durée de vie de la lampe (un an ?), la puissance d'éclairage nécessaire à cette manipulation, le coût ;
- le choix de la caméra, du nombre de caméras dont on a besoin pour couvrir toute la zone envoyée, ainsi que de leur disposition n'est à ce jour pas fixée ; paramètres en jeu : la résolution, la précision d'angle de la caméra (si rotative), la distance caméra-objet, la taille minimale de l'objet que l'on veut visualiser (10 cm), la distance focale de l'objectif, le coût ;
- dans quelle mesure ce dispositif pourra-t-il s'appliquer facilement dans un cas réel ? (l'accès aux mines déjà envoyées sera-t-il toujours aisé, la durée de la surveillance ne sera-t-elle pas limitée par des problèmes techniques comme la durée de vie des projecteurs et des caméras dans l'eau, ou comme la longueur des câbles nécessaire pour atteindre les mines ?)
- cette technique (par visualisation vidéo en continu), si elle est réalisable techniquement dans un cas réel, ne sera-t-elle pas limitée par son coût ? Car il s'agit bien de trouver une technique de surveillance qui puisse remplacer ou compléter d'autres systèmes de surveillance.

- on peut penser que plusieurs phénomènes sont susceptibles d'être à l'origine de l'instabilité (la fissuration, la chute de certains blocs, la resaturation des piliers qui crée une baisse de la résistance des piliers) : alors, suivant ce que l'on cherche à détecter, la technique la mieux adaptée peut être différente (respectivement détecter et quantifier la fissuration, surveiller la chute de blocs, et mesurer la déformation des piliers).

Nous en sommes donc actuellement à définir un dispositif adéquat (géométrie, caractéristiques des systèmes optiques, nombre de caméras), afin de confirmer la faisabilité de cette expérimentation, et d'établir une première estimation de son coût.

Bibliographie

- Baxter H. Armstrong, june 1969 - Acoustic emission prior to rockbursts and earthquakes. *Bulletin of Seismological Society of America*. Vol.59, No. 3, pp. 1259-1279.
- Halbwachs M., Sabroux J.-C., nov. 1994 - Capteurs d'ultrasons destiné à la prévision des tremblements de Terre.
- Al Heib M., 6 janvier 2000 - Proposition pour un champ d'expérimentation in situ dans un ancien site minier du bassin ferrifère lorrain. *Rapport INERIS/Unité Modélisation et Evaluation des Risques Géotechniques. Direction des Risques du Sol et du Sous-Sol*.
- Vandemeulebrouck J., Sabroux J.-C., Halbwachs M., Surono, Poussielgue N., Grangeon J., Tabbagh J., 1999 - Hydroacoustic noise precursors of the 1990 eruption of Kelut Volcano, Indonesia. A paraître en 2000 dans *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.

Annexes

Annexe 1 :

*Halbwachs M., Sabroux J.-C., nov. 1994 –
Capteurs d'ultrasons destiné à la prévision des
tremblements de Terre.*

CAPTEUR D'ULTRASONS DESTINE A LA PREVISION DES TREMBLEMENTS DE TERRE

M. HALBWACHS - J.C. SABROUX , Novembre 1994

HISTORIQUE: SIGNAUX ACOUSTIQUES PRECURSEURS DES ERUPTIONS VOLCANIQUES

Les mesures acoustiques dans les lacs de cratères volcaniques avaient initialement pour objet d'évaluer le niveau de bruit provoqué par l'activité de bullage des fumerolles sublacustres*. Ce signal se limite à la bande audiométrique - entre 50 Hz et 5.000 Hz - et représente une bonne estimation du flux gazeux dans le cratère du volcan.

Plus généralement, les mesures hydro-acoustiques présentent l'avantage d'intégrer les vibrations élastiques sur une grande surface de l'édifice volcanique, de permettre un excellent couplage d'impédance entre l'hydrophone et le milieu environnant et de détecter le signal sur une bande spectrale dépassant trois décades, entre 0,1 Hz et 200 kHz (cf. figure en annexe).

L'idée de mesurer le signal acoustique dans la bande ultrasonore a été plus ou moins suggérée par le comportement anormal de certains animaux dans les périodes précédant les tremblements de terre ou les éruptions volcaniques. Il est certain que ces animaux possèdent une sensibilité de perception audiométrique supérieure à l'homme (exemple du poisson chat utilisé dans les méthodes chinoises pour la prévision des séismes). Il est possible aussi qu'ils réagissent en raison d'une bande auditive plus élevée en fréquence (ce qui est le cas par exemple pour le chat et le chien).

La mesure des vibrations acoustiques dans la bande ultrasonore (20 kHz - 200 kHz) a nécessité la mise au point d'un capteur spécifique de type piézo-électrique présentant un bruit propre extrêmement faible dans la bande utile (de l'ordre de 10 dB ref $1\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$). La propagation des ondes acoustiques étant fortement atténuée par le milieu et le facteur d'atténuation augmentant avec la fréquence, il est indispensable de plonger le capteur dans un liquide (lac, puits de forage, puits à usage domestique)

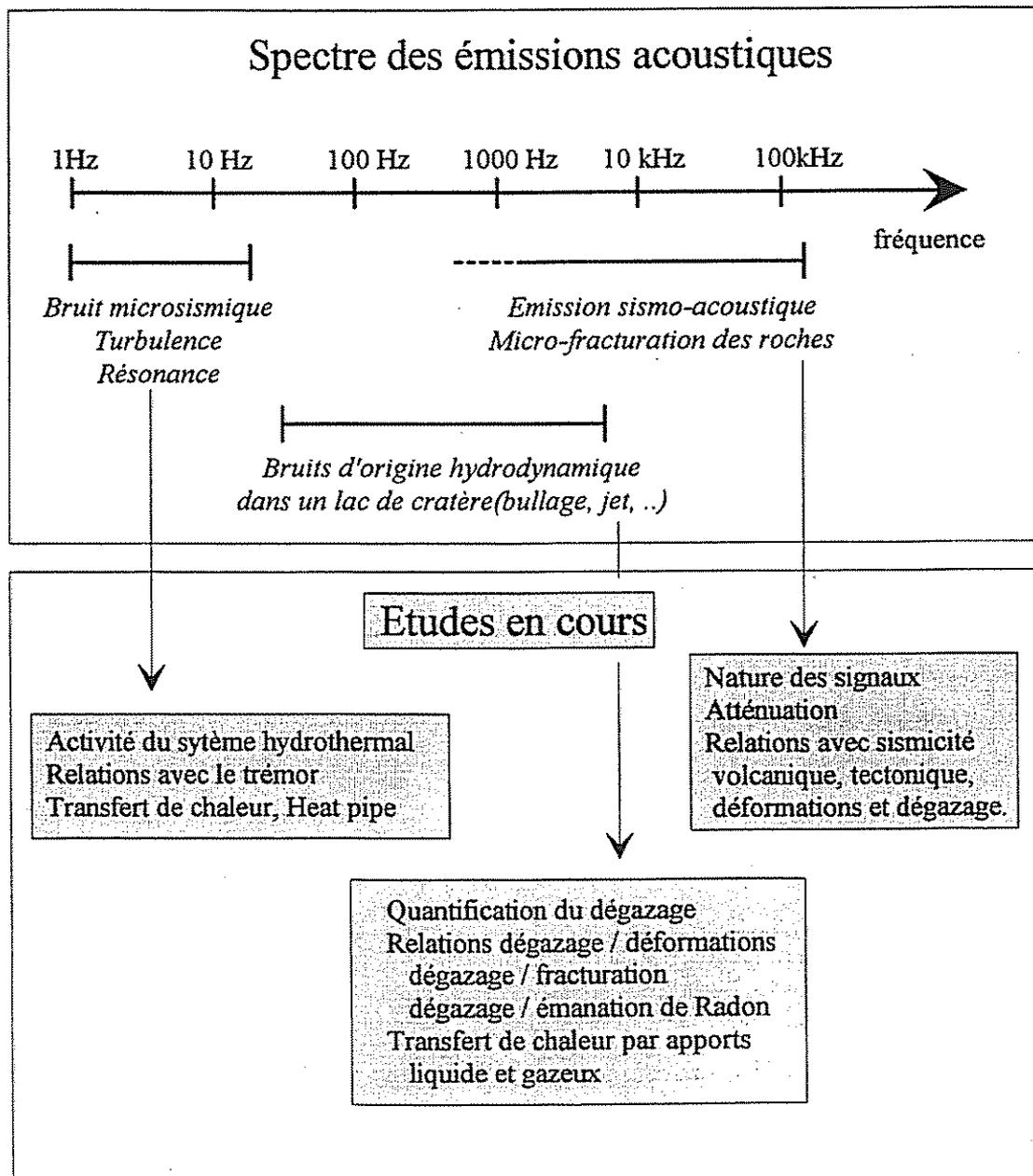
Deux lacs de cratères ont été instrumentés et ont donné lieu à des émissions dans le spectre ultrasonore, émissions qui sont apparues durant la phase précédant la reprise de l'activité:

- le volcan Kelut à Java (Indonésie) a été équipé en juillet 1988 d'une station hydro-acoustique utilisant le système de transmission satellitaire Argos. Le volcan a fait éruption le 10 février 1990: un signal est apparu sur la voie ultrasonore dès le mois de décembre 1989,
- le volcan Taal aux Philippines a été instrumenté en juin 1991 par une station du même type que celle du Kelut. Une crise majeure est intervenue le 11 Mars 1994 : elle a été précédée, environ un mois plus tôt, d'une augmentation notable du signal ultrasonore.

Quelques indications sur les données recueillies durant ces crises et les interprétations associées sont fournies en annexe.

* C. BERCY, J. C. SABROUX and G. SUPARWOTO

Underwater noise survey in the crater lake of Kelut volcano (Indonesia), p. 529-543
In Forecasting Volcanic Events, H. Tazieff and J. C. Sabroux Eds., Elsevier, 1983



INTERPRETATION DU PHENOMENE ET EXTRAPOLATION A LA PREVISION DES SEISMES TECTONIQUES

Nous ne détaillerons pas les différentes hypothèses qui ont été envisagées pour tenter d'expliquer ce phénomène d'émission ultrasonore: cavitation, bruit thermique, bruit de bullage, Après un examen approfondi, le seul mécanisme qui a été reconnu comme susceptible d'expliquer les résultats de nos expériences reste le phénomène bien connu de l'émission acoustique.

Des expériences de mise sous contrainte des matériaux, réalisées en laboratoire, mettent en évidence des émissions de pulses acoustiques précédant la rupture, le spectre en fréquence de ces ondes étant situé dans le domaine ultrasonore (100 kHz - 1 MHz). Le mécanisme responsable de cette émission est à rechercher dans les déformations irréversibles du matériau intervenant dans la phase finale du domaine de la plasticité. L'échelle de dimension de ces déformations est extrêmement variable, depuis le décrochement des

dislocations de leurs points d'ancrage (échelle atomique), jusqu'aux micro-fissurations intergranulaires (échelle du grain cristallin), aux amorces de fissurations, à échelle millimétrique voire centimétrique.

Les ultrasons émis dans le stade de contraintes précédant la rupture se situent dans un domaine de fréquence qui décroît lorsque la taille de la source augmente. Un séisme tectonique constitue l'extrapolation de ce mécanisme de rupture à l'échelle beaucoup plus étendue de la croûte lithosphérique. Les ondes émises ont alors des fréquences situées dans le domaine infrasonore (0.1 Hz - 50 Hz).

Ce mécanisme d'émission acoustique est largement utilisé en contrôle des matériaux pour prévoir les amorces de rupture dans les structures (principalement métalliques). Il était donc tentant d'appliquer ces techniques pour essayer de détecter les signaux acoustiques précurseurs des séismes. Des études ont déjà été entreprises et des résultats obtenus dans le domaine des fréquences audiométriques (détection de *nano earthquakes* sur la faille de San Andreas). Aucune expérience ne semble avoir été tentée dans le domaine ultrasonore. En effet l'application pratique de ces techniques se trouve confrontée au problème principal de l'atténuation des ondes élastiques dans le sol. Cette atténuation augmente de manière drastique avec la fréquence. Il est donc indispensable de réunir un certain nombre de conditions pour assurer l'efficacité de cette méthode:

- il a été nécessaire de concevoir un capteur présentant une sensibilité exceptionnelle associée à une bonne directivité hémisphérique,
- il faut, autant que possible, effectuer la surveillance dans le voisinage de la source des contraintes,
- un excellent couplage mécanique du capteur avec le sol est indispensable: utilisation d'un hydrophone plongé dans un milieu liquide,
- enfin il faudra disposer d'une chaîne de conditionnement analogique permettant une amplification dépassant 120 dB et, si une analyse fréquentielle est envisagée, d'une unité de traitement du signal travaillant dans la gamme de quelques centaines de kHz.

INSTRUMENTATION D'UNE ZONE A RISQUES: ASPECTS PRATIQUES

Localisation

Le choix de l'emplacement d'un dispositif destiné à la surveillance d'un volcan ne présente pas de problème puisque la localisation des sources de contraintes est assez bien délimitée. Il suffit donc de chercher un plan d'eau à proximité (lac de cratère, puits, forage) afin d'y plonger le capteur.

La surveillance de zones sismiques devra s'effectuer sur un des sites expérimentaux les mieux instrumentés et où la localisation des tremblements de terre est bien connue. Actuellement deux importantes expériences sont en cours sur la faille de San Andreas (Californie):

- dans le village de Parkfield où la récurrence des séismes de magnitudes supérieures à 6 est de l'ordre de la vingtaine d'années,
- sur le site de San Jacinto, dans la Garney Valley, où l'on attend un séisme de très forte amplitude (supérieure à 7).

Sur ces deux sites, les épicentres des séismes sont concentrés sur une zone très localisée ce qui devrait limiter les problèmes d'atténuation ultrasonore.

Il faut remarquer à ce sujet que l'atténuation des ondes acoustiques dépend non seulement de la distance du capteur par rapport à la source de contrainte (absorption par le milieu), mais bien évidemment aussi de la géométrie de cette source. Dans le cas de l'auscultation d'un volcan, il est possible que la source de contrainte puisse être considérée comme quasi ponctuelle (cas d'une intrusion magmatique de faible volume). L'atténuation de l'onde ultrasonore par dissipation de l'énergie élastique dans le milieu se trouve alors amplifiée

par le facteur géométrique de répartition sphérique de l'onde (en $1/r^2$). Le cas de l'étude d'une zone sismique n'est donc pas si défavorable étant donné que la région sous contrainte se trouve bien évidemment répartie sur un volume très important. Il se pourrait même que l'on puisse considérer ce volume comme infini par rapport à la position du capteur ce qui ferait disparaître le facteur géométrique pour ne laisser que le phénomène d'absorption par le milieu.

Enfin, l'immersion du capteur au sein même du terrain sous contrainte ferait disparaître l'effet de ce coefficient d'absorption. Une expérience conduite en profondeur dans un puits de forage réalisé dans le terrain sous contrainte devrait réunir les conditions les plus favorables pour mesurer le niveau ultrasonore du signal acoustique en connexion directe avec le développement des phénomènes de fracturation.

L'émission acoustique en laboratoire est utilisée comme phénomène précurseur immédiat précédant la rupture d'un matériau soumis à une contrainte croissante: on peut penser que le suivi de ce même paramètre à l'échelle de la croûte lithosphérique représenterait une méthode très prometteuse pour la prévision à cours terme des séismes tectoniques.

Dispositif de surveillance proposé

La conception du dispositif de traitement du signal dépendra essentiellement de deux facteurs:

- Est-ce que le site instrumenté se trouve en milieu naturel isolé (en particulier, absence de source de courant électrique, de local, de personnel de maintenance et d'exploitation)?
- Une considération totalement prosaïque: quel est le budget disponible?

A partir de ces deux considérations objectives, l'éventail des solutions techniques proposées est très largement ouvert. Nous décrivons ci-dessous deux solutions réalistes, totalement différentes dans leurs conceptions et leurs coûts et largement différenciées dans leurs finalités.

1) Station énergiquement autonome, budget limité:

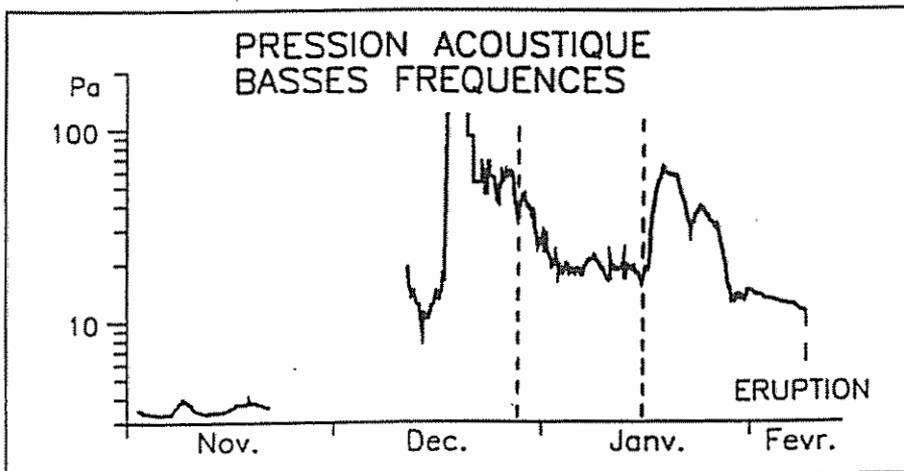
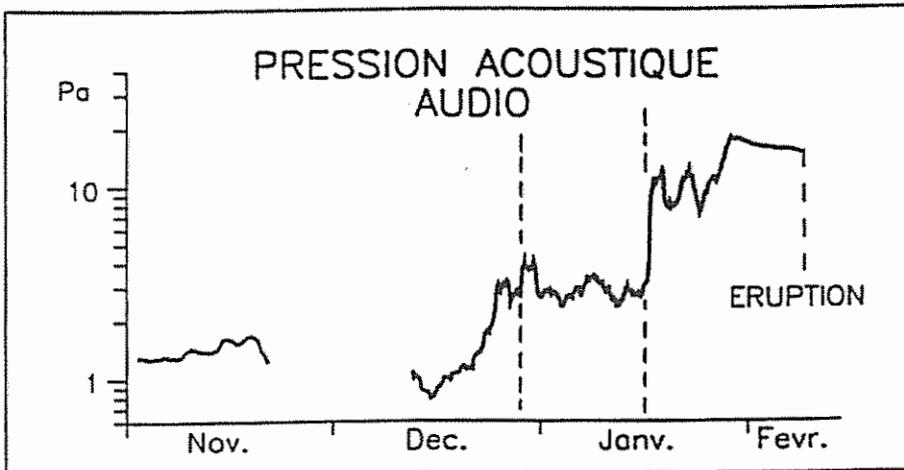
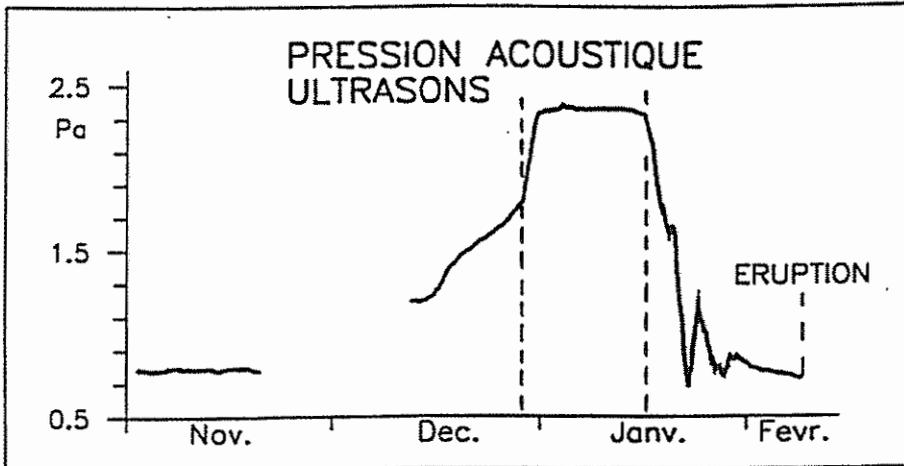
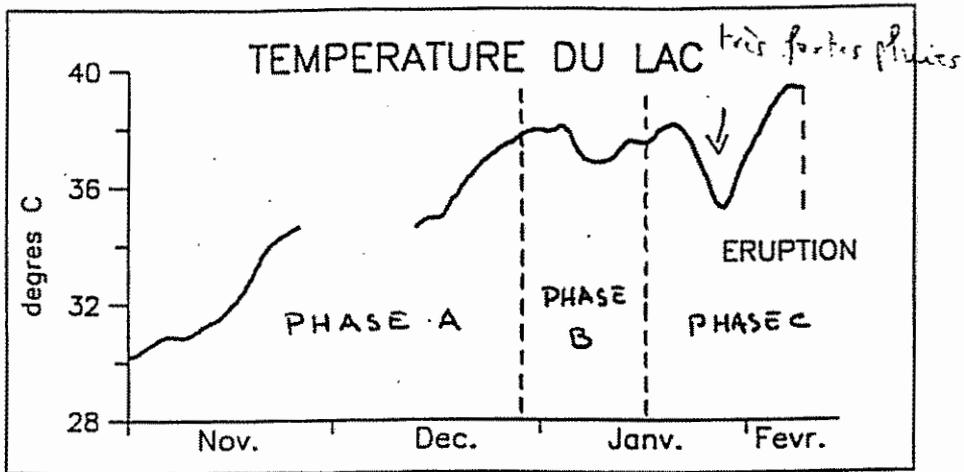
Cette station ne permet pas d'effectuer d'analyse fréquentielle de l'évolution spectrale du signal. Elle est basée sur l'acquisition du signal découpé de manière analogique par bandes spectrales. La tâche logicielle de la station se limite à une acquisition séquentielle des puissances RMS du signal filtré dans diverses bandes sélectionnées.

Suivant le mode d'exploitation des signaux, on sera amené à découper la bande de fréquence utile en plusieurs parties qui peuvent, soit provenir de diverses sources physiques, soit présenter des dynamiques très différentes. A titre indicatif, on peut proposer les bandes de fréquences suivantes:

- < 50 Hz,
- 50 Hz - 200 Hz,
- 200 Hz - 3000 Hz,
- 3000 Hz - 20 kHz,
- 20 KHz - 60 kHz,
- 60 KHz - 100 kHz,
- > 100 kHz

Nous avons mis au point une station prototype construite autour d'un micro ordinateur à faible coût et faible consommation qui gère une carte d'acquisition (16 voies multiplexées, 12 bits, période d'acquisition de l'ordre de 0.01 secondes). Les données RMS recueillies peuvent être mises à disposition de l'utilisateur suivant différents vecteurs:

- transmission numérique radio ou filaire,
- transmission par satellite (système Argos: 32 octets par message, d'environ 4 à 10 messages par jours),



VOLCAN KELUT (EST JAVA, INDONESIE)
 ERUPTION LE 10 FEVRIER 1990

- stockage des données sur mémoires statiques ou sur disque dur; récupération à intervalles de temps réguliers.

Une telle station pourrait être très utile pour procéder à une étape exploratoire de mise en évidence du phénomène d'émission acoustique sur un site donné.

2) Le signal délivré par le capteur est disponible dans un PC d'analyse disposant de moyens informatiques suffisants. Ce sera probablement le cas sur les sites expérimentaux d'étude des tremblements de terre. Dans cette hypothèse, il est évident qu'il faut développer un logiciel d'analyse fréquentiel spécifique de manière à accéder aux modifications quantitatives des spectres ultrasonores en relation avec les autres paramètres caractérisant l'approche des secousses sismiques.

Le matériel nécessaire s'articule autour d'un micro-ordinateur (ou d'une station de travail multitâches) assurant la gestion d'une carte d'échantillonnage travaillant sur plusieurs voies à des fréquences de l'ordre du MHz. Le programme de base calculera en temps réel les autospectres de puissance dans plusieurs bandes fréquentielles d'intérêt.

En conclusion, nous rappellerons qu'à ce jour nous ne disposons que d'une mise en évidence expérimentale d'un phénomène original d'émission ultrasonore précédant les éruptions volcaniques. Nous n'avons aucune indication sur la bande de fréquence affectée (au-dessus de 20 KHz) ni sur la forme de la modification spectrale. Il nous semble donc judicieux d'aborder la poursuite de cet axe de recherche par la réalisation des deux types de dispositifs proposés ci-dessus. La station d'acquisition de données permettra, pour un moindre coût, de vérifier l'existence de tels phénomènes sur différents sites et d'en préciser grossièrement le contenu spectral. La station d'analyse fréquentielle devrait constituer l'outil de recherche fondamentale permettant la mise au point de logiciels évolutifs performants adaptés au signal rencontré et destinés à tenter de remonter à la description de la source géophysique du phénomène.

CRISE DU VOLCAN KELUT (Octobre 1989 - 10 Février 1990)

DEROULEMENT DE LA CRISE

Les interprétations données ci-dessous peuvent sembler quelque peu simplistes. Il apparaît cependant qu'un modèle cohérent de la crise pré-éruptive se dégage des mesures des quatre paramètres représentés sur la figure de synthèse ci-jointe.

La phase notée A correspond à une montée en pression dans l'édifice accompagnée d'une progression difficile de l'intrusion magmatique. La phase B représente un blocage du processus de progression du magma dû à un maintien en plateau de la pression. Cette phase se termine par un épisode de rupture et la phase C correspond à une baisse de la pression et à une reprise lente mais libre de la progression du magma vers la surface. Cette phase se termine par la prise de contact du magma avec l'eau et par le déclenchement de l'éruption phréatique, suivie aussitôt par l'épisode magmatique (nuées ardentes).

JUSTIFICATIONS

TEMPERATURE DU LAC:

La montée en température des eaux du lac débute au mois d'Octobre 1989 et se développe jusqu'à la fin du mois de Décembre (fin de la phase A). A cette date la température atteint un palier qu'elle conservera sensiblement jusqu'à la date de l'éruption du 10 février. Ce palier correspond à un équilibre entre, d'une part l'échauffement dû à la présence à faible profondeur de l'intrusion magmatique et au dégazage associé, et d'autre part le refroidissement dû aux déperditions dans l'atmosphère et par écoulement des eaux dans le tunnel déversoir du lac. Une analyse plus fine semble indiquer une reprise de l'échauffement en fin de phase B, reprise qui a été totalement masquée par de très fortes pluies causant le cycle de refroidissement observé fin Janvier.

EMISSION ULTRASONORE:

Le niveau ultrasonore augmente graduellement durant la phase A en présentant un accroissement notable de la pente à la fin du mois de Décembre. Cette augmentation est alors brusquement stoppée ce qui traduit la fin de l'augmentation de la pression. Un palier remarquablement stable se maintient ensuite jusque vers la mi-Janvier (fin de la phase B). A cette date, un phénomène brutal de rupture se produit dans le bouchon qui bloque le conduit magmatique. Cet épisode provoque une chute rapide de la pression accompagnant la progression libre du magma vers la surface. L'éruption se produira alors que le niveau ultrasonore aura pratiquement retrouvé son niveau d'origine, c'est à dire lorsque la pression magmatique sera pratiquement égale à la pression hydrostatique.

SIGNAL AUDIOMETRIQUE:

Ce signal est provoqué par le bruit des bulles s'échappant des fumerolles sublacustres. Son augmentation est donc liée au flux gazeux moyenné grossièrement sur l'ensemble de la surface du fond du lac. Une augmentation de ce flux peut, soit traduire une croissance de la pression, sans modification des conduits gazeux, soit résulter d'une fissuration du plancher du lac facilitant le débit gazeux.

En phase A, la montée de la pression signalée précédemment provoque une augmentation du débit gazeux sans modification de la géométrie des fumerolles sources. La phase B se traduit par une activité de bullage constante, ce qui est cohérent avec une pression constante. Le phénomène de rupture brutale déjà évoqué et qui marque la fin de la

phase B, va provoquer une fissuration dans le plancher du lac. Le niveau audiométrique augmente alors très sensiblement (par un facteur cinq environ). La phase C verra une augmentation plus modérée du débit gazeux qui traduit l'approche du magma à l'intérieur du réseau de fractures crée en fin de phase B. Ce niveau devient très stable juste avant l'éruption, le magma étant alors pratiquement affleurant.

SIGNAL BASSES FREQUENCES:

Ce signal intègre sans différenciation les activités sismiques, micro-sismiques et les trémors dans la gamme des vibrations de fréquences inférieures à 50 Hz. En pratique, cette intégration conduit à un niveau moyen (ou bruit de fond) micro-sismique et les événements discrets, de courtes durées, n'auront que peu d'influence sur ce signal.

La phase A s'accompagne d'une activité micro-sismique extrêmement intense puisque l'électronique analogique de la station se trouve saturée. La puissance du signal dépasse par deux ordres de grandeur le niveau d'activité normal. Cet épisode est étalé sur environ 5 jours et n'est pas accompagné de secousses sismiques discrètes. Il y a donc eu une période de mise en vibrations de l'édifice probablement caractérisée par la présence de trémors continus accompagnant la progression du magma sous l'action d'une pression croissante dans l'édifice

La phase B indique bien une période de répit dans l'activité micro-sismique qui se maintient à un niveau constant et relativement modéré. Un accroissement brutal de l'activité sismique discrète intervient quelque 2 à 3 jours avant la fin de la phase B et n'est suivi que par une augmentation modérée du signal BF. Cet épisode sismique marque la fracture ultime du bouchon de la colonne magmatique. La micro-sismicité va ensuite décroître graduellement durant la phase C jusqu'à l'explosion paroxysmale.

SISMICITE DISCRETE:

La courbe d'énergie cumulée de la sismicité est calculée à partir des événements recueillis sur les sismomètres du Volcanological Survey of Indonesia. Cette courbe montre bien:

- une phase A de croissance régulière de la sismicité,
- un plateau en phase B qui se termine par une crise violente 2 à 3 jours avant la fin de la phase B: il y a eu probablement un décalage temporel entre la fracturation marquée par cette crise et le phénomène de dégazage brutal en fin de phase B,
- enfin la phase C est pratiquement asismique jusqu'à l'apparition du trémor qui a précédé l'éruption de quelques heures.

La comparaison de cette courbe avec l'évolution du signal acoustique BF permet de tirer deux observations:

- la très forte augmentation du signal BF relevé en phase A intervient alors que l'énergie sismique libérée est en croissance régulière. Il n'y a donc pas eu de crise sismique associée à l'excursion du signal BF. On peut en déduire que cet épisode BF est uniquement relié à un phénomène du type trémor ce qui est cohérent avec le mécanisme de progression du fluide magmatique sous l'édifice.

- La crise sismique brutale apparue 2 ou 3 jours avant la fin de la phase B est peu marquée sur le signal BF: il s'agit bien d'un phénomène de fracturation qui agit donc sur le paramètre sismicité discrète. L'augmentation modérée et étalée dans le temps que l'on peut observer en début de phase C est encore en cohérence avec la reprise lente et libre de la progression magmatique.

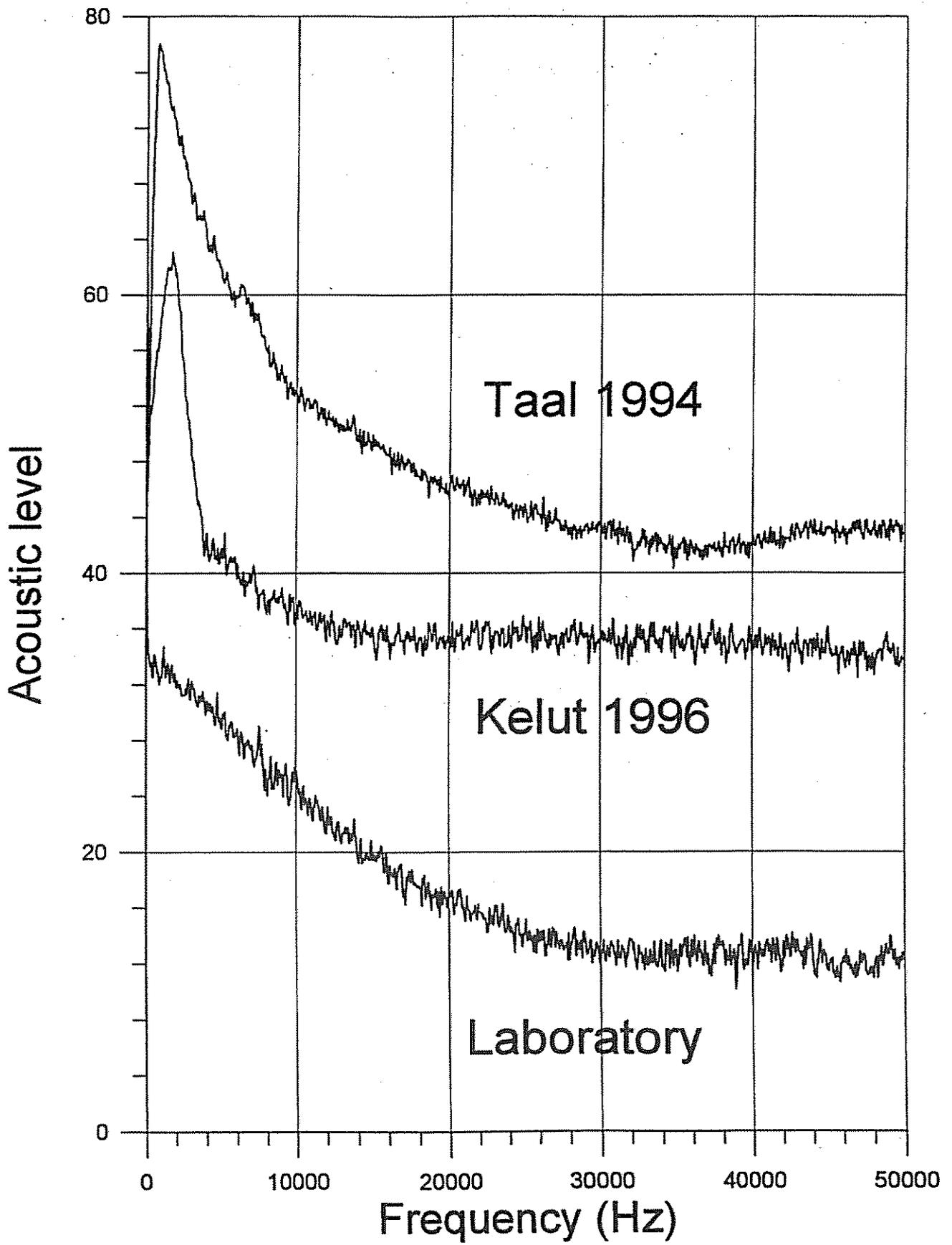


Figure 1 - Spectres hydro-acoustiques sur les lacs du Taal et du Kelut

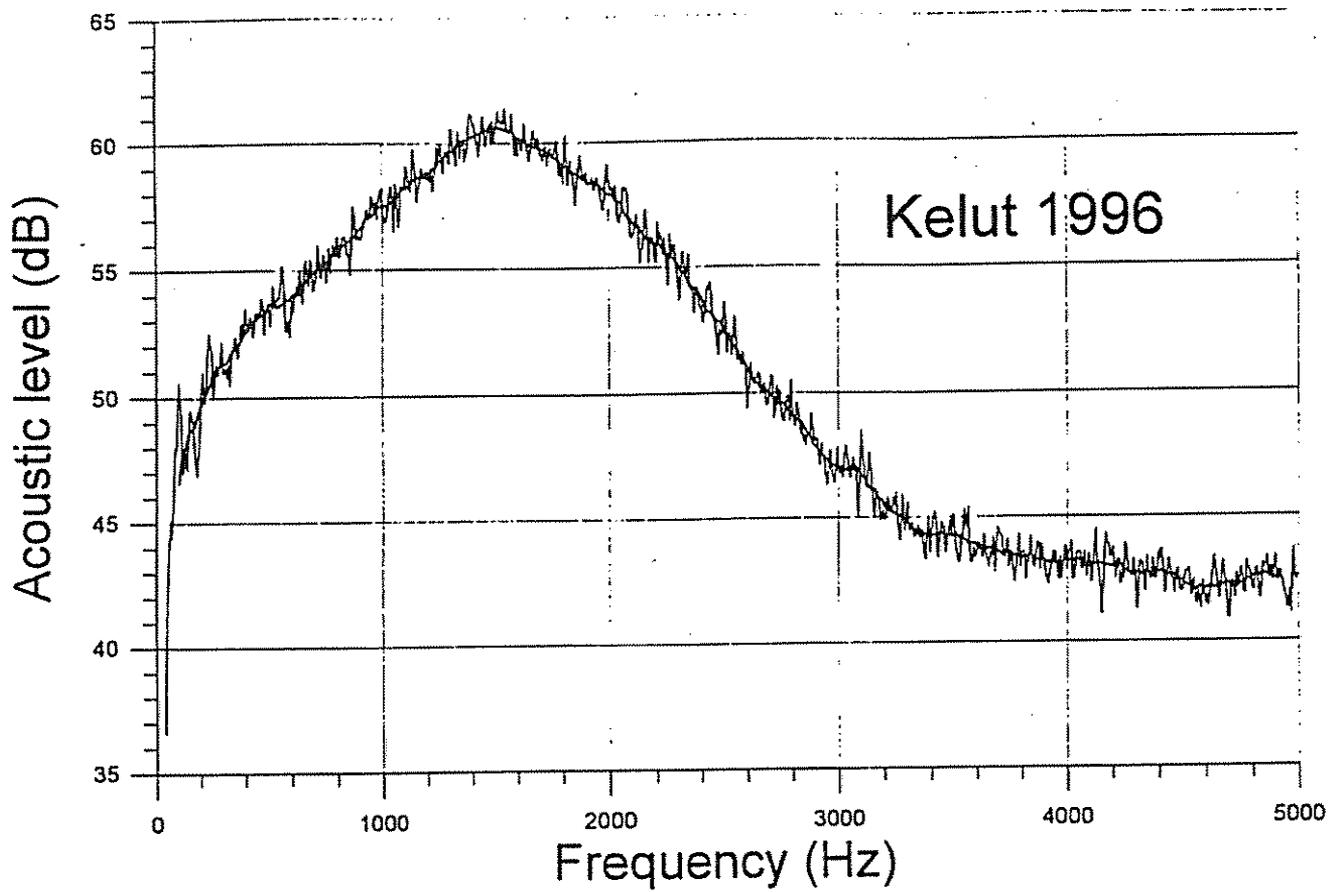


Figure 2-a - Activité de bullage dans les fréquences audiométriques

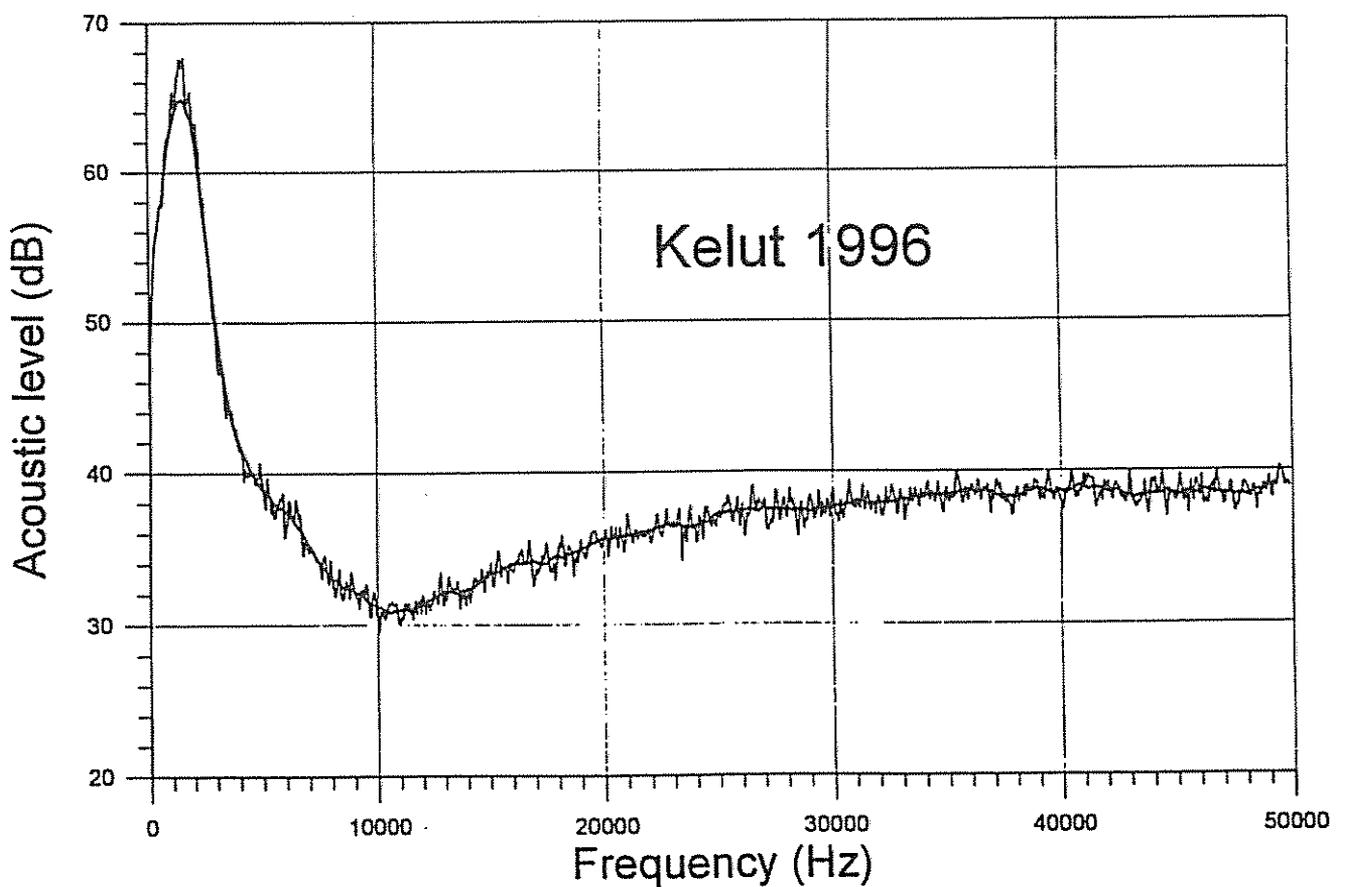
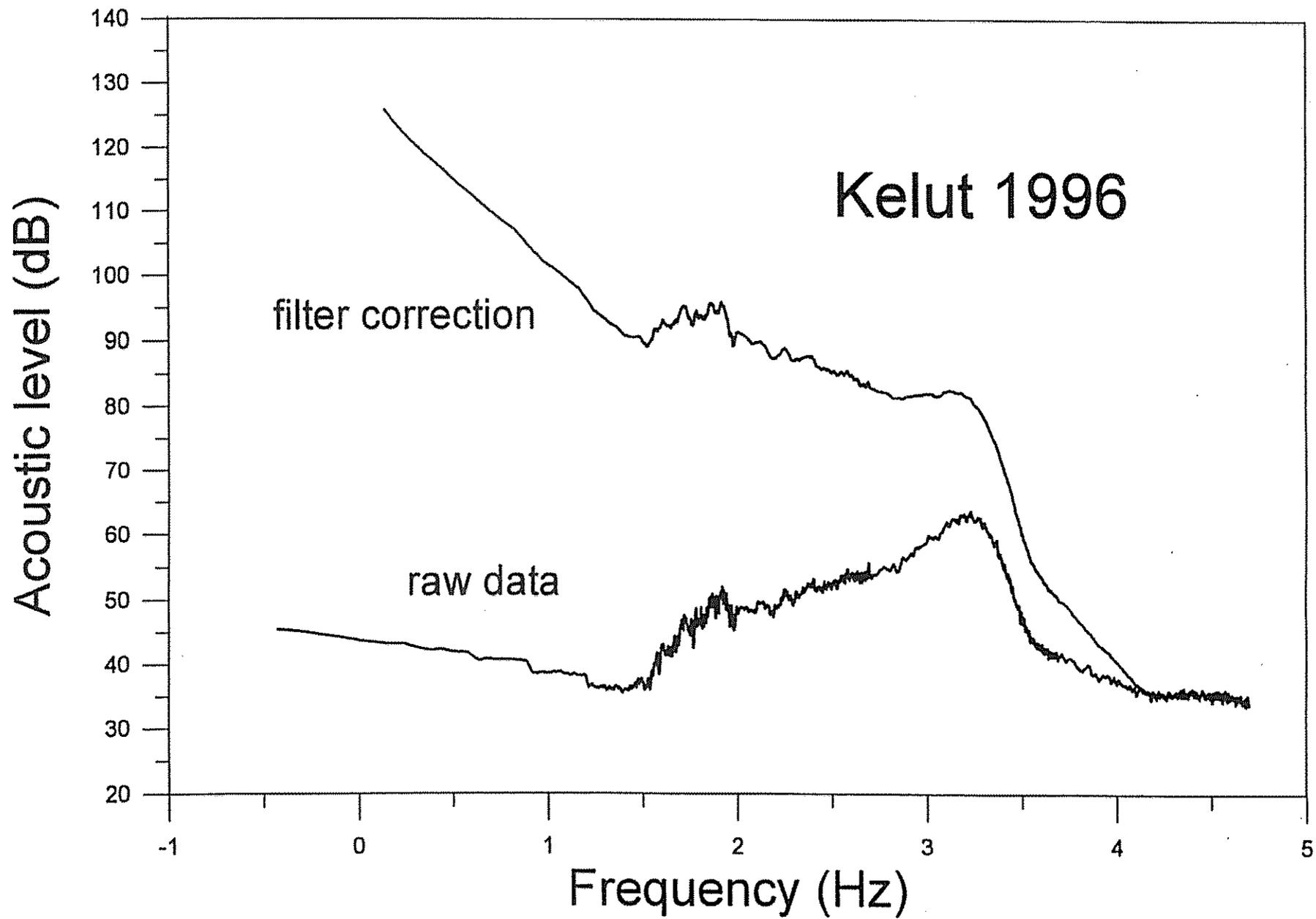


Figure 2-b - Spectre hydro-acoustique dans les fréquences ultrasonores

Figure 3 - Spectre acoustique du Kelut (en coordonnées bi-logarithmiques)



BRGM/Service Aménagement Risques Naturels

3, avenue Claude Guillemin

B.P. 6009

45060 ORLEANS Cedex 2