

(ID Modèle = 454913)

Ineris-204391-2726064-v1.0

28/01/2022

28/01/2022

Utilisation de kits microphoniques à bas coût pour la surveillance de cavités souterraines

PRÉAMBULE

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

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

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

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

Nom de la Direction en charge du rapport : Direction Sites et Territoires

Rédaction : COCCIA Stella

Vérification : CONIL NATHALIE; KLEIN EMMANUELLE

Approbation : Document approuvé le 28/01/2022 par BAROUDI HAFID

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Régis PACOT et Romain CARTIER

Table des matières

1	Introduction.....	6
1.1	Contexte et objectifs	6
1.2	Rappels sur la surveillance acoustique	6
2	Les capteurs acoustiques à bas coût	7
2.1	Les critères de recherche des capteurs à bas coût.....	7
2.2	L'étude de marché et capteurs retenus pour les tests.....	8
3	Tests des nouveaux capteurs en laboratoire.....	9
3.1	Préparation des tests.....	9
3.1.1	Liste du matériel utilisé	9
3.1.2	Analyse modale analytique de la halle du Cenaris.....	10
3.1.3	Etalonnage de l'humidificateur avec un hygromètre.....	13
3.2	Description des tests	14
3.2.1	Ensemble des tests réalisés	14
3.2.2	Test n°1 « analyse de la directivité ».....	15
3.2.3	Test n°2 « réponse en fréquence »	15
3.2.4	Test n°3 « intensités limites »	16
3.2.5	Test n°4 « captation d'un événement avec bruit de fond ».....	17
3.2.6	Test n°5 de l'humidité à court terme.....	17
3.3	Résultats des tests	18
3.3.1	L'étude de la directivité	18
3.3.2	La réponse en fréquence.....	20
3.3.3	Les intensités limites.....	21
3.3.4	La détection d'événements avec bruit de fond	21
3.3.5	L'influence de l'humidité	24
3.4	Discussion sur les résultats	26
4	Tests <i>in situ</i> du kit microphonique PCB.....	27
4.1	Plan des tests	27
4.1.1	Calage par campagne de chute de bloc artificielle	28
4.1.2	Tests de la directivité, de la réponse en fréquence et des intensités limites	29
4.2	Perspectives sur les résultats	29
5	Evolution du protocole de calage de la méthode acoustique	29
6	Conclusions	31
7	Glossaire	32
8	Références	32
9	Annexes.....	32

Résumé

La surveillance acoustique est une méthode pertinente pour le suivi des dégradations des cavités souterraines de grandes étendues, dites à bas bruit. Pourtant, malgré un coût/bénéfice intéressant, elle peine à se développer en raison notamment du coût des capteurs et du niveau d'expertise nécessaire pour suivre les données. En effet, les réseaux de surveillance comportent généralement un nombre très limité de capteurs haute-résolution, ce qui impose la mise en œuvre d'outils complexes de traitement et d'analyse de données.

L'intégration de capteurs à bas-coûts dans les réseaux de surveillance présente de ce fait un intérêt certain. Il a conduit à mener une étude de marché de différents types de capteurs, mais la plupart ne se sont pas révélés assez résistants pour être mis en œuvre en milieu souterrain, par nature très agressive. Toutefois deux capteurs industriels, dits kits microphoniques, à la limite du bas-coût ont été identifiés et testés en conditions de laboratoire.

Les tests réalisés ont porté sur l'étude de la directivité, de la réponse en fréquence et des intensités limites. Ils montrent que les deux kits microphoniques présentent, tout au moins en laboratoire, à sec et avec une forte hygrométrie, à court terme, des performances compatibles avec les enjeux de surveillance acoustique de cavités. Il reste à valider ces bons résultats lors de tests *in situ*, en conditions réelles, et sur une longue durée. Un protocole de tests *in situ* a été proposé en ce sens, il sera prochainement mis en œuvre dans une carrière étendue, peu profonde et avec une géométrie complexe.

Par ailleurs, à partir des premiers résultats obtenus, il a été proposé de faire évoluer le protocole de calage d'un réseau de surveillance acoustique, en ajoutant si cela est possible la réalisation d'une analyse modale, afin de s'assurer que les emplacements des capteurs acoustiques dans la carrière ne sont pas sujets à des perturbations sonores intrinsèques à l'ouvrage à surveiller. Il apparaît également utile d'estimer au démarrage de la surveillance, de manière relativement précise, le bruit de fond de la carrière à partir d'une acquisition en continue du bruit durant quelques semaines. Cette estimation du bruit de fond permettra d'améliorer le traitement et la caractérisation des sources acoustiques.

A terme, le recours à des réseaux denses de capteurs à bas-coût devrait se traduire par un gain important dans le processus de localisation d'événements acoustiques, et de ce fait conduire à mieux identifier et anticiper les instabilités dans les carrières étendues à géométrie complexe.

Abstract

Acoustic monitoring is a relevant method for monitoring of the deteriorations of large underground cavities known as low noise. However, despite an attractive cost/benefit, this monitoring method is struggling to develop in particular due to the cost of the sensors and the level of expertise required to inspect the data. Indeed, monitoring networks generally include a very limited number of high-resolution sensors, which requires the implementation of complex data processing and analysis tools.

The integration of low-cost sensors in monitoring networks is therefore of interest. This led to a market study of different types of sensors, where most of them did not prove to be resistant enough to be used in an underground environment, which is very aggressive by nature. However, two industrial sensors, called microphone kits, at the low cost limit, have been identified and tested in laboratory conditions.

The carried out tests focused on the study of the directivity, of the frequency response and on the limiting intensities. Results show that the two microphone kits present, at least in the laboratory, in dry and high humidity conditions, in the short term, performances compatible with the challenges of acoustic monitoring of cavities. It remains to validate these good results during *in situ* tests, in real conditions, and over a long period. An *in situ* test protocol has been proposed in this sense, it will soon be implemented in an extensive, shallow quarry with a complex geometry.

Furthermore, based on the first obtained results, modification of the calibration protocol for an acoustic monitoring network was proposed, adding, if possible, the performance of a modal analysis, in order to ensure that the locations of the acoustic sensors in the quarry are not subject to noise disturbances intrinsic to the structure to be monitored. It also appears useful to estimate at the start of the monitoring, in a relatively precise way, the background noise of the quarry from a continuous acquisition of the noise for a few weeks. This estimate of the background noise will improve the processing and characterization of acoustic sources.

Ultimately, the use of dense networks of low-cost sensors should result in a significant gain in the process of locating acoustic events, and therefore lead to better identification and anticipation of instabilities in extended quarries with complex geometry.

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

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 204391 - 2726064 - v1.0, 28/01/2022.

Mots-clés :

Surveillance acoustique, capteurs à bas-coût, carrière souterraine, analyse modale, bruit de fond

1 Introduction

1.1 Contexte et objectifs

Entre 2010 et 2013, l'Ineris a développé une méthode de surveillance basée sur l'écoute acoustique pour les cavités abandonnées de grandes dimensions, dites « à bas bruit ». Cette méthode, consiste à déployer des microphones (ou des hydrophones dans le cas des cavités ennoyées) pour détecter et caractériser des phénomènes de dégradation géotechnique, tels que les chutes de blocs.

La mise en point de cette méthode s'est accompagnée du développement de sondes microphoniques haute sensibilité (SYTMIS-1DM), résistantes aux conditions environnementales humides et agressives, pour détecter et enregistrer les bruits acoustiques (ondes de pression aériennes) émis lors de la chute de blocs et de la fracturation dans le toit ou dans les piliers. En complément, les outils de traitement du signal pour localiser et caractériser les sources ont été adaptés (à partir d'outils de traitement de données microsismiques) pour prendre en compte les propriétés de propagation des ondes acoustiques dans les cavités et tenir compte de la géométrie souvent complexe des vides surveillés (Ineris, 2013). Ces outils ont été testés à l'occasion de plusieurs expérimentations de calage en grand avant d'être utilisés à des fins opérationnelles.

Il a ainsi été confirmé la pertinence de la méthode acoustique pour la surveillance géotechnique de cavités étendues et complexes. Toutefois, ce type de surveillance reste encore une approche complexe et coûteuse, qui est peu déployée et donc peu documentée dans la littérature technique et scientifique.

Dans le cadre de sa mission d'appui aux pouvoirs publics, l'Ineris conduit des actions de veille sur les capteurs et les technologies en matière de surveillance des cavités peu profondes. Une action a été menée concernant la surveillance acoustique dans les carrières ayant les objectifs suivants :

- La recherche de capteurs acoustiques, dits à « bas-coût », et l'évaluation de leurs caractéristiques techniques et métrologiques en laboratoire et dans des conditions réelles de carrière peu profonde et étendue. En effet, dans certains cas il pourrait être intéressant de densifier à coût réduit les réseaux de microphones haute-résolution avec des capteurs à bas-coûts.
- Une réévaluation du protocole de calage d'un dispositif de surveillance acoustique déployé *in situ*, proposé en 2013 (Ineris, 2013), sur la base des résultats de cette nouvelle étude.

Pour atteindre ces objectifs, une étude de marché des capteurs à bas coûts a d'abord été réalisée suivant des critères de recherche définis en amont, à savoir : le prix, des caractéristiques techniques *a priori* en adéquation avec les conditions environnementales des carrières et le type de signaux acoustiques à enregistrer.

Ensuite, les capteurs (dits dans la suite « kits microphoniques » car ils intègrent également un préamplificateur) identifiés sur le marché ont été testés en laboratoire afin de vérifier si les performances affichées par les fournisseurs étaient bien adéquates à la surveillance de cavité.

Ce rapport démarre avec la présentation des kits microphoniques retenus pour cette étude, ainsi que les tests réalisés dans la halle d'essai du Cenaris, selon un protocole permettant d'évaluer la directivité, la réponse en fréquence et les intensités limites. Ce rapport propose également un protocole de tests *in situ* de kits microphoniques, ainsi qu'une proposition pour faire évoluer le protocole de surveillance de cavité souterraine par méthode acoustique sur la base des résultats de cette étude.

1.2 Rappels sur la surveillance acoustique

La surveillance acoustique des carrières est une méthode passive basée sur l'écoute permanente de la carrière par un réseau de capteurs acoustiques pour détecter, enregistrer et caractériser les bruits liés aux chutes de blocs ou autres désordres, comme des phénomènes d'écaillage, de fracturation, de craquement, etc. (Ineris, 2013).

Cette méthode est basée sur une scrutation continue dans le temps et présente l'avantage de fournir des mesures « volumétriques » contrairement à des mesures géotechniques ponctuelles. Elle est

particulièrement adaptée aux cavités dites à « bas-bruit¹ » avec une géométrie propice à la propagation des ondes acoustiques et permet, si le réseau est bien dimensionné par rapport à la géométrie de la carrière, de détecter des phénomènes d'instabilité sur une étendue plus ou moins importante.

Son coût-bénéfice s'avère particulièrement intéressant et sa mise en œuvre plutôt sécuritaire, puisque les capteurs acoustiques restent distants des zones à forts désordres. L'écoute des signaux enregistrés donne une information perceptible permettant de discriminer les déclenchements parasites des déclenchements provoqués par une dégradation géotechnique.

Quatre grandes familles de capteurs peuvent être employés pour la surveillance acoustique (Hopwood, 1987) : 1) les accéléromètres, 2) les capteurs piézoélectriques, 3) les géophones et 4) les microphones/hydrophones. Dans la pratique, les accéléromètres sont plutôt adaptés à l'enregistrement des hautes fréquences et les capteurs piézoélectriques plutôt utilisés pour l'ultrasonique (enregistrement de micro-fractures).

Pour ce qui concerne la surveillance dans les carrières (milieu humide et agressif) basée sur l'enregistrement de signaux dans le champ de l'audible ou proche de l'audible (de 30 Hz à 3 kHz ; Ineris, 2013) et caractérisés par des basses fréquences, les géophones et les microphones sont les capteurs les mieux adaptés (Hopwood, 1987). L'avantage des microphones est qu'ils sont mobiles, facilement déplaçables et récupérables, car ils n'ont pas besoin d'être couplés au massif, contrairement aux géophones. Ils sont de plus mieux adaptés pour la surveillance de sites où le recouvrement est de faible épaisseur. Un microphone correctement implanté dans une cavité permet de surveiller un périmètre d'un rayon allant de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres selon le contexte (Ineris, 2013).

Il est néanmoins souvent intéressant de coupler les microphones avec des géophones. En effet, les microphones sont sensibles aux bruits sonores, et ils doivent être disposés de manière stable sans obstacle à proximité pour éviter les effets de réverbérations, ce qui peut être problématique pour certaines géométries de cavités.

2 Les capteurs acoustiques à bas coût

2.1 Les critères de recherche des capteurs à bas coût

Rappelons que les caractéristiques techniques qui ont conduit l'Ineris à la conception de la sonde microphonique SYTMIS-1DM (cf. fiche technique en annexe) pour la surveillance acoustique des carrières souterraines (Ineris, 2013) étaient les suivantes :

- Une bonne résistance à l'humidité, la plupart des cavités présentent une hygrométrie élevée.
- Une excellente qualité métrologique, c'est-à-dire une sensibilité permettant la détection des signaux de faible amplitude. La valeur de sensibilité indique avec quelle efficacité le microphone convertit la pression acoustique en un signal électrique. Pour améliorer la qualité du rapport/signal sur bruit en général les microphones sont associés à un préamplificateur afin d'augmenter le rapport signal sur bruit avant transmission du signal analogique sur le câble de mesure. Néanmoins plus la sensibilité est élevée, mieux c'est, car le signal de sortie du microphone a moins besoin d'être amplifié, ce qui réduit le bruit de fond généré par la préamplification.
- Une courbe de réponse (ou sensibilité en fonction de la fréquence) adaptée aux phénomènes à enregistrer. Par exemple les mécanismes de dégradation plus diffus dans les carrières, comme les chutes de bloc, sont caractérisés par des basses fréquences (10 à 40 Hz) et leur enregistrement nécessite donc un matériel de qualité.
- Une dynamique large pour éviter de rapidement saturer en cas d'événement énergétique ou très proche du microphone.

Pour les nouveaux capteurs le critère de la qualité métrologique a été volontairement assoupli et ainsi les critères de recherche suivants ont été définis :

- Un prix plus avantageux par rapport à la sonde SYTMIS-1DM afin de pouvoir installer un plus grand nombre de microphones et avoir un réseau plus dense permettant une meilleure localisation des sources acoustiques (chutes de blocs, etc.).

¹ Carrière très peu perturbée d'un point de vue sonore permettant d'identifier facilement une chute de bloc, de limiter les enregistrements parasites et d'obtenir un bon rapport signal sur bruit lors d'un enregistrement (cf. Ineris, 2013).

- Des caractéristiques techniques compatibles avec la carte d'acquisition SYTMIS de nouvelle génération (carte SYTMIS-v2, cf. fiche technique en annexe) qui permet entre autres de s'affranchir d'amplificateur (après la transmission du signal analogique au câble de mesure).

2.2 L'étude de marché et capteurs retenus pour les tests

Comme indiqué précédemment l'étude de marché a donc été menée en suivant le critère du prix, et le critère de compatibilité avec la carte d'acquisition SYTMIS-v2. Aujourd'hui sur le marché il existe différents types de microphones pour un large éventail de prix, selon les applications et les performances recherchées. Malheureusement, la plupart de ces microphones à bas coûts ne sont pas assez résistants pour être mis en œuvre en milieu souterrain, par nature très agressif. Même encapsulés dans des corps de sonde pour les protéger de la poussière mais surtout de l'eau, leur résistance à l'humidité resterait toujours trop faible ce qui nécessiterait de remplacer fréquemment les microphones (jusqu'à en moyenne une fois par semaine pour les situations les plus agressives d'après certains fournisseurs).

Il a donc été nécessaire de se focaliser sur des microphones d'extérieur, ce qui a sensiblement diminué les choix possibles de capteurs. La compatibilité avec la carte d'acquisition SYTMIS-v2 a également réduit les possibilités. Ainsi, compte tenu de ces éléments, trois capteurs ont été sélectionnés. Leurs caractéristiques techniques montrent qu'ils peuvent détecter les signaux générés par les chutes de blocs et autres types de dégradations typiques d'une carrière peu profonde (Tableau 1).

Le type de capteur qui a été sélectionné est appelé par la suite « kit microphonique ». C'est un capteur de type industriel (c'est-à-dire résistant à la poussière et à l'eau) qui est constitué d'un microphone et d'un préamplificateur. Le kit est prêt à l'emploi, il s'installe sur un trépied et il peut être relié à une unité d'acquisition et une alimentation électrique.

Des trois kits sélectionnés, après discussion avec les fournisseurs, seuls deux sont réellement utilisables en milieux agressifs. Leurs principales caractéristiques techniques (la sensibilité, la gamme de fréquence et les plages de fonctionnement en température et humidité relative) sont présentées dans le tableau ci-dessous. Les fiches techniques détaillées sont fournies en annexe. Les coûts sont comparés sur la base d'un système de notation selon lequel la sonde actuelle est considérée comme onéreuse, elle obtient donc une note de ++++++.

Tableau 1 : comparaison des principales caractéristiques techniques des capteurs retenus mises en regard du coût. Tous sont compatibles avec une application en champ libre

Fournisseur	Référence	Sensibilité (mV/Pa)	Gamme de Freq. (Hz)	Gamme de T° (°C)	Résistant à l'humidité (% humidité relative)	Prix (€)
Sonde SYTMIS-1DM	Ineris + Bruel&Kjaer	31,6	8-12,5k	-30 à 125	oui	++++++
GRAS	Kit 146AE	50	3,15-20k	-40 à 125	10 à 90	+++
PCB Piezotronics	Kit micro 130A24 + préampli	10	20-16k	-10 à 50	oui	+

Le kit PCB Piezotronics répond au critère « prix », mais moins bien aux critères « sensibilité » et « fréquence d'acquisition » par rapport au kit GRAS.

En effet, les signaux générés par les chutes de blocs sont caractérisés par des basses fréquences (entre 10 à 40 Hz), or la gamme de fréquence du kit PCB démarre à des fréquences plus hautes (20 Hz). De ce fait, il a été décidé de le tester en produisant des signaux acoustiques à basse fréquence.

Tous les tests réalisés sur ces deux kits sont présentés dans le chapitre qui suit.

3 Tests des nouveaux capteurs en laboratoire

Cette section détaille :

- La préparation des différents tests menés afin de vérifier les caractéristiques techniques des deux kits microphoniques sélectionnés en conditions de laboratoire et en conditions presque réelles ;
- Le déroulement des tests ;
- Leurs résultats ;
- Les conclusions qui ont pu être tirées de ces tests.

Pour pouvoir comparer les résultats les mêmes tests ont été réalisés avec la sonde SYTMIS-1DM, dont la réponse est parfaitement maîtrisée. Pour chaque prise de mesure, un sonomètre a été utilisé afin de catégoriser avec précision les signaux émis par la source, à savoir leur niveau de pression acoustique (NPA, ou SPL-Sonde Pression Level, en dB) ainsi que leur spectre de fréquences (à l'aide de la fonctionnalité d'analyse fréquentielle du sonomètre). Dans cette étude les signaux acoustiques seront enregistrés selon la pondération Z (Zéro weighting), car elle ne présente aucun filtre sur toute la plage des fréquences.

Avant la réalisation des tests un protocole a été rédigé. Par la suite, le matériel pour la réalisation des tests et les analyses nécessaires au bon déroulement des tests sont présentés.

3.1 Préparation des tests

Afin d'assurer la répétabilité de ces tests, il est important de bien définir les conditions de déroulement des tests, ainsi que le matériel utilisé.

Les tests ont pour but de caractériser les capteurs au mieux dans des conditions de laboratoire, puis d'étudier leur comportement dans des conditions se rapprochant le plus possible de la réalité.

Dans le cadre de tests visant à caractériser un microphone en laboratoire, ou tout autre appareil/objet appartenant au domaine de l'acoustique, il est préférable d'utiliser une chambre anéchoïque afin de réduire au mieux les bruits parasites pouvant influencer les mesures. Ne disposant pas d'une telle salle pour la réalisation des tests, les deux kits microphoniques ont été testés dans la halle du Cenaris. Une analyse modale de la halle a été réalisée au préalable pour maîtriser l'influence de son bruit sur les mesures, les résultats sont présentés au paragraphe suivant.

Quant aux tests dans la halle en simulant des conditions réelles, il est connu qu'en cavité le réseau de capteurs est soumis à une forte humidité (plus de 90% d'humidité en moyenne), à une température plus faible que celle présente en extérieur et à une forte concentration de poussières. A cela vient s'ajouter un bruit de fond qui dépend de la localisation de la carrière (proche ou non des zones anthropiques) et de la présence d'écoulement d'eau ou non. Pour reproduire la forte humidité dans la halle un humidificateur a été utilisé et son étalonnage avec un hygromètre a été nécessaire afin d'assurer que les conditions dans lesquelles ces tests étaient réalisés étaient proches des conditions réelles des cavités peu profondes.

3.1.1 Liste du matériel utilisé

La liste du matériel utilisé est détaillée ci-après.

Matériel pour les tests		Usage
Capteurs testés	Microphone GRAS champ libre 146AE Microphone PCB champ libre 130A24 Sonde champ libre SYTMIS-1DM	Convertir le signal acoustique (son) en signal électrique
Sources et Matériels d'acquisition	Sound source omnidirectionnelle Brüel & Kjaer type 4224 Générateur de fréquences de poche (Velleman Instruments HPG)1 Carte d'acquisition SYTMISv2	Générer des sons Générer des sons Numérisation des données

Matériel pour les tests		Usage
Matériels connexes	Sonomètre 2250 Brüel & Kjaer et son microphone	Instrument pour mesurer l'intensité du bruit en décibels
	Calibreur 94-114 dB classe 1 type CAL 300	Instrument pour calibrer le sonomètre
	Humidificateur ELEHOT ZH-019S	Instrument pour humidifier l'air
	Hygromètre PCE P18	Instrument pour mesurer l'humidité de l'air
	Boussole (outil smartphone) + fil	Pour mesurer la direction pour l'analyse de la réponse en directivité des microphones

3.1.2 Analyse modale analytique de la halle du Cenaris

L'analyse modale est l'étude des propriétés dynamiques des structures linéaires, basée sur des tests structuraux (analyse modale expérimentale) ou sur la simulation basée sur une analyse par éléments finis (analyse modale analytique). Un modèle aux éléments finis est défini par les propriétés des matériaux.

Les propriétés dynamiques de cette analyse incluent les fréquences de résonance (également appelées "fréquences naturelles" ou "fréquences propres") et les modes structuraux (ou "modes propres"). Les propriétés dynamiques dépendent de la masse, de la rigidité et de la répartition de l'amortissement sur la structure et déterminent le comportement vibratoire des structures lors d'une exposition à des charges opérationnelles. Toute déformation d'un système structurel linéaire peut être exprimée sous forme de combinaison linéaire des modes structuraux, qui forment une base de vecteur orthonormée.

L'analyse modale analytique de la halle d'essai a été réalisée sur un logiciel de modélisation 3D, en étudiant la géométrie de la salle, les propriétés des murs (béton) et en prenant en compte l'emplacement supposé des tests ainsi que les fréquences ciblées par ces tests. La halle a une forme de trapèze de 11 m de long, 9 m de grande base et 7,5 m de petite base, avec une hauteur sous plafond d'environ 4,6 m. Au préalable, une mesure du bruit de fond moyen de la halle a été effectuée à l'aide du sonomètre. Le bruit de fond de la halle d'essai est de l'ordre de 48 dB(Z) NPA. Cela signifie qu'en ce qui concerne les tests mettant en scène des bruits de fond, le minimum réalisable sera le niveau de pression sonore de la halle d'essai.

La Figure 1 montre la représentation géométrique de la halle d'essai du Cenaris.

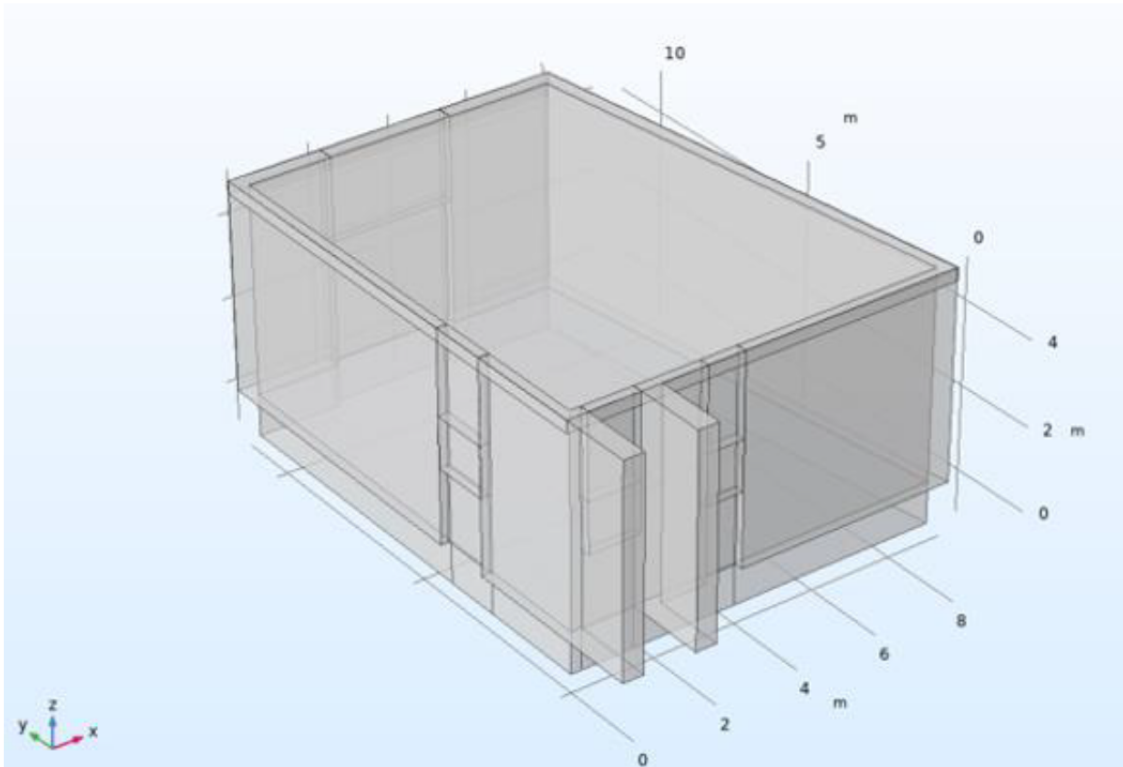


Figure 1 : Représentation 3D de la halle d'essai du Cenaris

Dans l'optique de réaliser les tests dans les meilleures conditions possibles, cette simulation avait également pour but de déterminer la présence ou non de modes de résonance avoisinant les fréquences choisies pour le test de directivité des microphones.

Les différents modes qui ont été sujets à cette simulation correspondent aux fréquences retenues pour la réalisation du test de directivité des kits microphoniques, à savoir 900 Hz, 500 Hz, 200 Hz, 100 Hz, 50 Hz et 35 Hz. Ce choix de fréquences est principalement lié au domaine fréquentiel usuel de la surveillance acoustique de cavités, ainsi qu'à la fréquence minimale délivrée par la source sonore utilisée pendant les tests (de type 4224 de Brüel & Kjaer).

Sur chacune des images de la Figure 2, les zones rouges et bleue correspondent à la valeur de l'intensité du champ de pression acoustique en Pascal. Elles représentent des ventres d'excitation du champ de pression acoustique à la fréquence étudiée, ce qui signifie qu'une source sonore délivrant un signal dans un ventre d'un mode de résonance verra son intensité sonore amplifiée. Les nœuds sont représentés par les zones blanches. *A contrario* des ventres, les nœuds sont des zones qui ne présentent pas d'excitations à une fréquence donnée. Pour une fréquence f , s'il existe un mode de résonance correspondant, alors ce mode présentera X nœuds et Y ventres. Plus la fréquence f augmente, plus le mode de résonance (s'il existe) présentera de nœuds et ventres.

Dans le cadre de la réalisation de nos tests, un emplacement optimal revient à trouver une zone dans laquelle pour chaque fréquence étudiée, la valeur de l'intensité du champ acoustique des ventres d'excitations est identique en tout point, mais pas nulle comme dans un nœud.

Cette simulation révèle que pour chacune des fréquences choisies (avec une précision inférieure à 0,3 Hz), il existe dans la halle d'essai des modes de résonance. Ce qui signifie que peu importe l'emplacement qui sera choisi pour les tests, des perturbations seront observées. L'emplacement des microphones a donc été retenu en fonction de l'espace dans la halle, ainsi qu'aux résultats obtenus par l'analyse modale (cf. Figure 2).

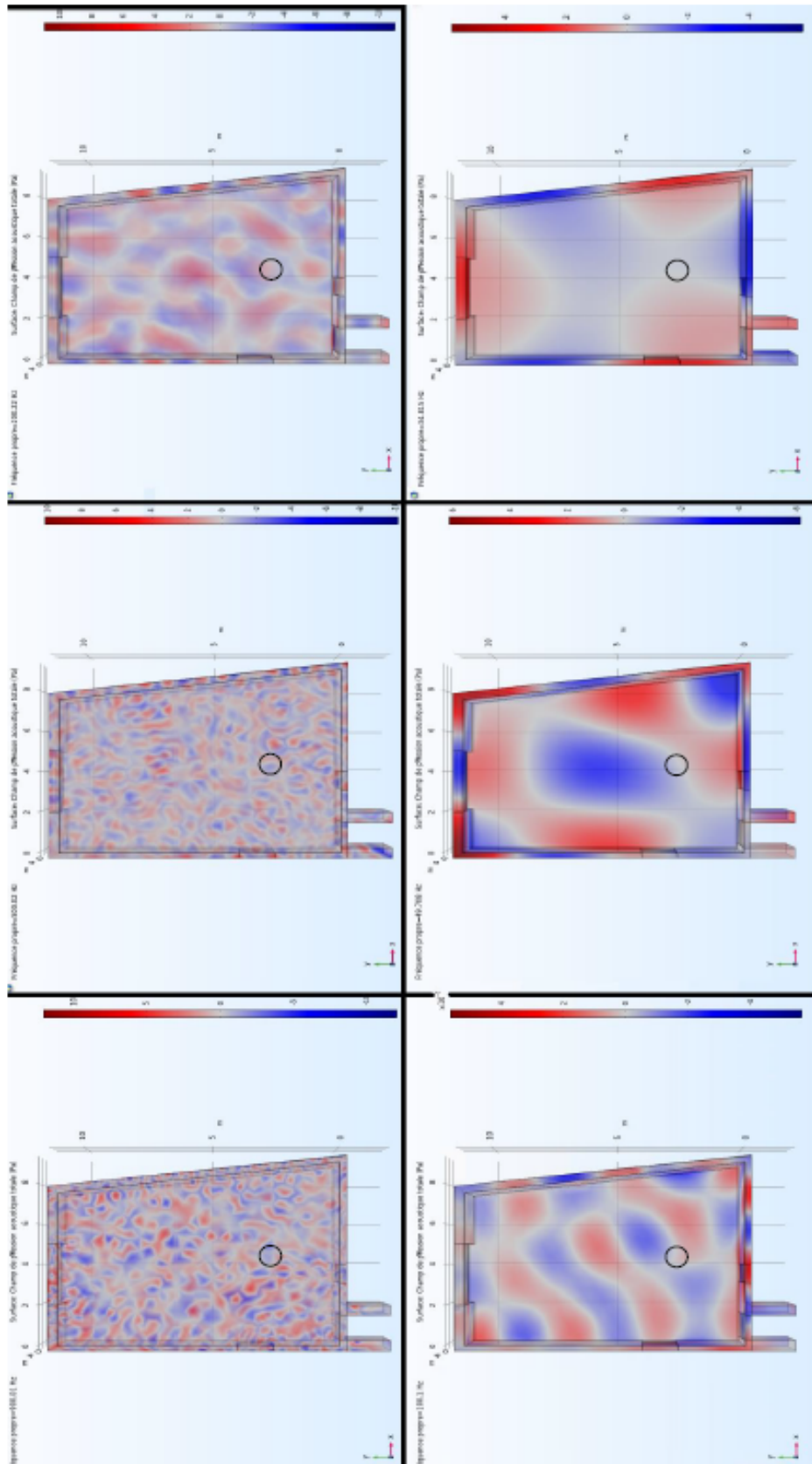


Figure 2 : Résultats de la simulation pour des fréquences avoisinant les fréquences choisies pour les tests (de bas en haut et de gauche à droite : 900Hz, 500Hz, 200Hz, 100Hz, 50Hz et 35Hz). Le cercle noir représente l'emplacement choisi pour les tests. Les zones rouges et bleus sont ventres d'excitation du champ de pression acoustique à la fréquence étudiée et les zones blanches sont les nœuds qui ne présentent pas d'excitations à une fréquence donnée

3.1.3 Etalonnage de l'humidificateur avec un hygromètre

Pour étalonner l'humidificateur, il a été placé sur une table et l'hygromètre (de type PCE P18) a été placé au plus près du brouillard diffusé par l'humidificateur (plus précisément à 15 cm de la bouche diffusant le brouillard). Pour une utilisation de 10 minutes l'intensité affichée par le multimètre a été récupérée toutes les 10 secondes.

L'équation décrivant la relation intensité (mA) – Humidité relative (HR%) est : $y = 6,25x - 25$ a été déterminée à l'aide des bornes min-max (4-20 mA et 0%-100%). L'hygromètre utilisé est calibré pour être fiable à $\pm 2\%$ entre 0 % et 90 % $\pm 3\%$ à 100 % d'humidité relative. La température ambiante de la salle d'essai était de 23°C au début du test d'étalonnage et est de 21°C au terme des 10 minutes de ce test.

Sur la Figure 3 les résultats des 5 tests sont reportés dans un même graphique afin de mieux se rendre compte du fonctionnement du système hygromètre-humidificateur.

Au terme de ces tests, il semble concluant que l'humidificateur était utile dans la réalisation des tests et représentatif de l'aspect humide des cavités.

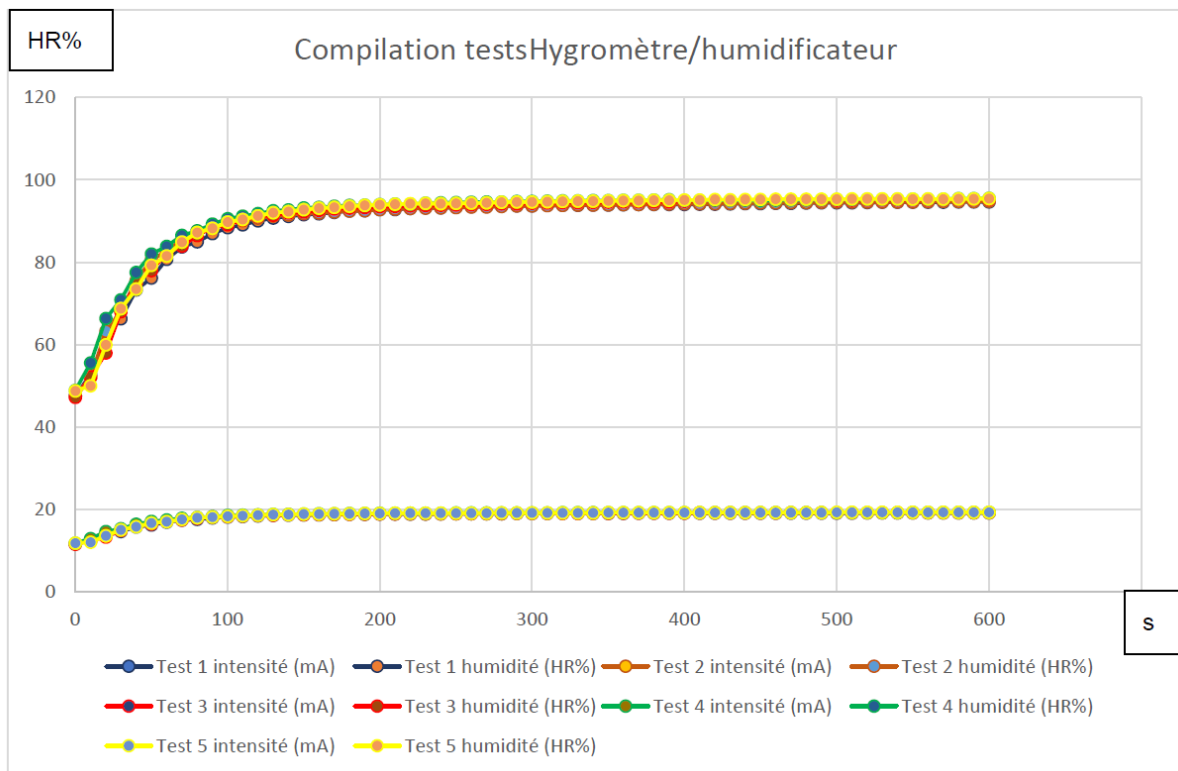


Figure 3 : Résultats des tests sur les performances de l'humidificateur sur des durées de 10 minutes

3.2 Description des tests

3.2.1 Ensemble des tests réalisés

Les tests proposés (cf. Figure 4) ont été réalisés dans l'objectif de comprendre et maîtriser le fonctionnement des kits microphoniques utilisables pour la surveillance acoustique de cavités dites "à bas bruit" dans des conditions de laboratoire (pour les tests de 1 à 4), puis dans des conditions se rapprochant le plus possible des conditions réelles (test 5).

L'organisation des tests selon l'ordre présenté dans la Figure 4 permet de faciliter les interprétations et observations sur l'ensemble des tests.

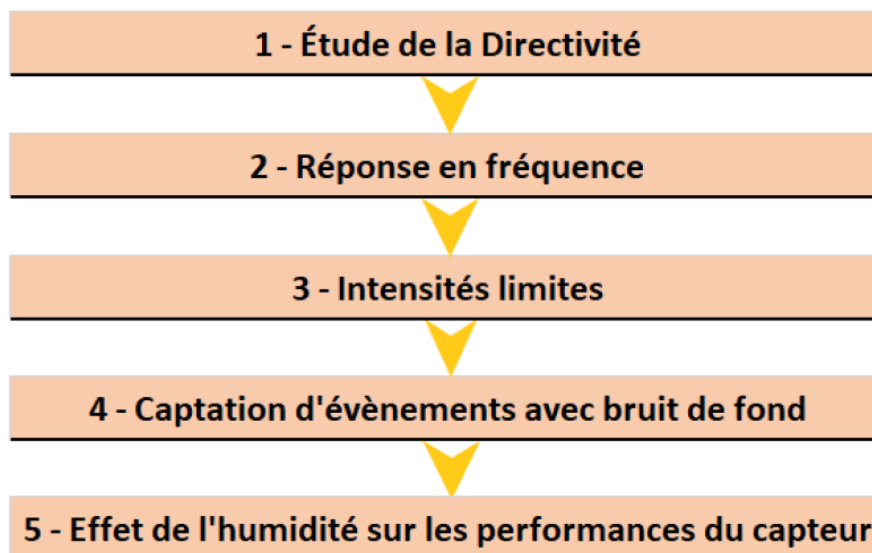


Figure 4 : ordre de réalisation des tests

Le fait de commencer par l'étude de la directivité (test 1) et de poursuivre en testant la réponse en fréquence (test 2) du microphone permet de se faire une idée du facteur d'atténuation du capteur selon l'angle d'incidence étudié.

Dans le cadre du second test, il semble plus juste d'étudier cette réponse en fréquence selon un angle d'incidence de 90° par rapport au capteur. En effet sur site, les microphones sont installés sur des trépieds posés au sol, et sont orientés à la verticale. De plus, les fiches techniques des microphones ne fournissent que les courbes de réponse en fréquence selon un angle d'incidence de 0° par rapport au capteur. La réalisation du test 2 et la comparaison des résultats obtenus avec les fiches techniques après interprétation des résultats du test 1 paraissent plus cohérents et permettent d'apporter plus de précision quant à la caractérisation du microphone.

En ce qui concerne les tests traitant des limites du capteur (test 3), les réaliser *a posteriori* des tests de directivité et de réponse en fréquence permet de définir la zone de bon fonctionnement du capteur, qu'il s'agisse de la distance, du niveau de pression acoustique, de l'angle d'incidence ou bien de la fréquence perçue par le microphone.

Une fois la zone de travail du capteur définie, le test 4 a été réalisé afin de caractériser la capacité du capteur à dissocier un bruit de fond d'un événement représentatif de la surveillance de la cavité. Le test 5 a été mis en œuvre en dernier, dans une optique de réaliser et d'enchaîner le plus de tests possibles pour parfaire l'interprétation des résultats et ainsi connaître au mieux le capteur. Le capteur a, dans ce test, été soumis à une forte humidité, pour essayer de perturber les résultats des tests précédents qui se déroulent à humidité ambiante.

La Figure 5 ci-après présente le matériel utilisé pour la réalisation des différents tests présentés dans cette section.

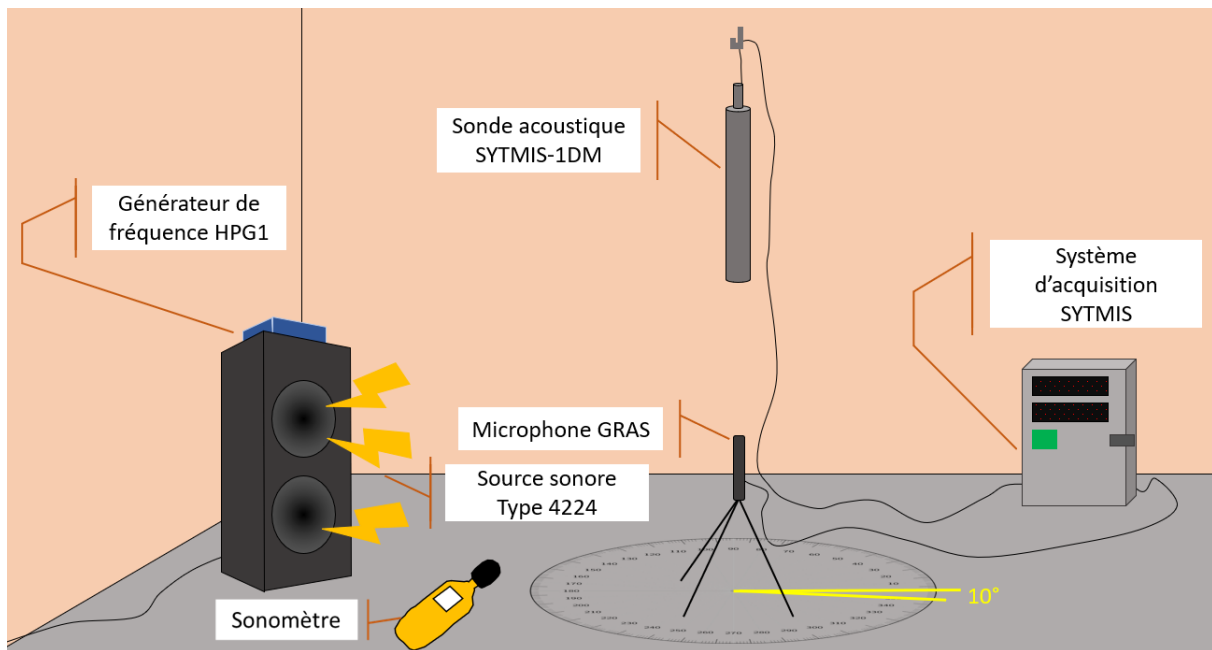


Figure 5 : croquis du dispositif de tests (sonde SYTMIS-1DM, source sonore Brüel & Kjaer Type 4224, microphone GRAS, générateur de fréquence HPG1, sonomètre et carte d'acquisition SYTMIS v2). Le cercle sur le sol a été utilisé pour le test de directivité

La partie suivante décrit plus en détails les objectifs de chaque test ainsi que les procédés de réalisation de ces derniers.

3.2.2 Test n°1 « analyse de la directivité »

Ce test a pour but d'étudier la caractéristique de directivité du kit microphonique. Cela revient à chercher les variations de NPA de la source sonore type 4224 de Brüel & Kjaer captées par le microphone en fonction de l'angle d'incidence de la source.

Le capteur a été disposé sur un trépied, et orienté à l'horizontal. En partant de l'axe du microphone, et à l'aide d'une boussole et d'un fil, le sol a été marqué tous les 10° sur un cercle d'un mètre de rayon. La source sonore omnidirectionnelle type 4224 ne pouvant pas générer un signal d'une fréquence unique, elle a été couplée avec le générateur de fréquence HPG1, ce qui revient à utiliser la source sonore comme un haut-parleur.

Ce test a été répété pour des fréquences de 500 Hz, 200 Hz, 100 Hz, 50 Hz et 35 Hz. Cette répartition des fréquences sur l'intervalle [35 Hz ; 900 Hz] permet de caractériser plus globalement la directivité des capteurs. Chaque série de tests s'effectue pour une NPA de 80 dB, puis 70 dB et enfin 90 dB.

Pour chaque déplacement de la source tous les 10° autour du capteur, le NPA au niveau du capteur a été relevé et visualisé grâce au logiciel de visualisation de l'Ineris (cf. Annexe 3). Le NPA au niveau de la source a été mesuré avec le sonomètre.

3.2.3 Test n°2 « réponse en fréquence »

La courbe de réponse en fréquence disponible sur les fiches techniques des microphones est réalisée pour un angle d'incidence de 0° par rapport au microphone. Or dans le cadre de la surveillance, les capteurs acoustiques composant le réseau sont orientés à la verticale. L'objectif de ce test est de reconduire une étude de réponse en fréquence du capteur, en la réalisant cette fois avec un angle d'incidence de 90° par rapport au microphone posé à la verticale.

Ce test permet donc de mieux caractériser la réponse en fréquence des kits microphoniques par rapport à leur utilisation/disposition dans le cadre de surveillance acoustique. L'étalon est le microphone du sonomètre afin de pouvoir comparer avec le plus de précision possible la réponse en fréquence de chaque microphone par rapport aux fréquences de tiers d'octave.

Dans la Figure 6 sont montrées les bornes de tiers d'octave de chaque intervalle de fréquence qui a été étudié. Le microphone a été excité à l'aide d'un *sweep* (balayage) de fréquences comprises dans chaque bande.

<i>bandes de tiers d'octave</i>		
<i>Fréquence centrale (Hz)</i>	<i>Limite basse (Hz)</i>	<i>Limite haute (Hz)</i>
31,5	26	35
40	35	44+
50	44+	57
63+	57	71
80	71	88+
100	88+	113
125+	113	141
160	141	176+
200	176+	225
250+	225	283
315	283	353+
400	353+	440
500+	440	565
630	565	707+
800	707+	880
1000+	880	1130

Figure 6 : les bornes supérieures et inférieures correspondant à chaque fréquence centrale de la répartition par bandes en tiers d'octave

De ce fait, l'étude de la réponse en fréquence concerne la plage de fréquence 26 Hz – 1130 Hz. Ce test est dépendant de la plage dynamique de la source acoustique.

La source sonore a été placée à 1 m du microphone à 90° de l'axe du capteur (l'angle d'incidence a été précisé grâce au test précédent en fonction de la directivité du microphone). Cette source ne pouvant pas générer un bruit blanc (signal qui comprend toutes les fréquences du spectre et dont la densité spectrale de puissance est constante sur toute la bande-passante) ou bien un *sweep*, elle a été couplée à un générateur externe capable de générer de tels signaux (dans ce cas le générateur de fréquence HPG1), ce qui revient à utiliser la source sonore type 4224 comme un haut-parleur. Le NPA de ces signaux a été vérifié à l'aide d'un sonomètre afin de pouvoir comparer les résultats obtenus. La résolution du sonomètre se basant sur les fréquences de l'échelle des bandes de tiers d'octave, les capteurs ont été testés de la même manière. Des signaux de balayage compris entre chaque borne de l'échelle des bandes de fréquences de tiers d'octave ont été émis, en ayant réglé au préalable la source sur -20 dB et *level* 2 (sur 10 niveaux possibles). Ces réglages permettent d'éviter que les plus basses fréquences soient perçues comme du bruit de fond.

3.2.4 Test n°3 « intensités limites »

Dans la continuité du test précédent, le test des intensités limites a pour but de vérifier les bornes de la plage dynamique du microphone. L'étude de cette limite permet de caractériser des événements qui pourraient faire saturer le microphone, ou au contraire ne pas être détectés à cause d'un mauvais rapport signal sur bruit (R/B). Pour avoir un signal acoustique de bonne qualité il faut envisager un rapport signal sur bruit au moins supérieur à 5.

Pour ce test, le microphone a été disposé sur trépied et orienté à l'horizontal. La source sonore a été placée à proximité (le plus près possible) du microphone. Avec la fonction *Wideband* (large bande) de

cette source, on a émis un bruit blanc du niveau le plus fort disponible sur la source (118 dB) et observé si le microphone perçoit le niveau le plus élevé sans saturer. En ce qui concerne le niveau le plus faible possiblement observable, le bruit de fond de la halle d'essai bride ce dernier, ce qui empêche toute observation concrète sur la borne inférieure des deux kits microphoniques.

3.2.5 Test n°4 « captation d'un événement avec bruit de fond »

Ce test permet de s'assurer de l'adaptabilité du capteur dans les différents types de cavité où il sera déployé. A savoir (cf. Ineris,2013) pour des raisons de faisabilité de surveillance, une cavité est considérée comme silencieuse si son bruit de fond oscille entre 15 et 30 dB, ou bien elle est considérée comme bruitée quand son bruit de fond peut aller jusqu'à 80 dB maximum. En effet, pour surveiller il faut être en mesure de détecter un événement noyé dans le bruit de fond, donc des événements +20 dB par rapport au bruit de fond.

Ce test avec la simulation d'un bruit de fond et le déclenchement des événements par-dessus permet de s'assurer que le microphone soit en mesure d'enregistrer ces événements. Après visualisation des signaux acoustiques enregistrés on retrouvera ou pas les pics de fréquences relatives aux événements déclenchés. Cela va permettre également de vérifier le bon R/B nécessaire à la différenciation entre artefact (enregistrement de bruit d'origine anthropique ou naturel, comme les gouttes de pluie) et événement (par exemple une chute de bloc).

Le microphone a été disposé à la verticale sur un trépied. La source sonore type 4224 est au sol à quelques mètres du microphone, ce qui permet de créer une onde acoustique homogène dans le plan horizontal et ainsi un bruit de fond plus "réaliste".

On a émis un bruit blanc grâce à la source sonore de 50 dB(Z) NPA (50 dB étant le bruit moyen déjà présent dans la halle d'essai, et par conséquent le bruit de fond le plus faible réalisable durant ces tests). Des événements tels que des clappements de mains, claquements de doigts, chutes d'objets, ou les fichiers de vrais signaux ont été réalisés à différentes distances et à différentes intensités. Concernant les vrais signaux, la source a été passée en mode haut-parleur afin de lire l'audio d'un événement correspondant à une chute de blocs (on a considéré que le bruit de fond de la halle d'essai était suffisant pour ce test).

Ce test a été répété pour différentes valeurs de bruit de fond plus importantes afin de caractériser l'utilisation du microphone dans des cavités bruitées (comme indiqué précédemment il n'était pas possible de reproduire les conditions présentes en cavités silencieuses).

3.2.6 Test n°5 de l'humidité à court terme

L'objectif de ce test est de constater ou non des différences de fonctionnement du microphone dans des conditions d'humidité proche de celles rencontrées *in situ*. Tous les tests précédents ont été à nouveau mis en œuvre, mais sous atmosphère humide afin de comparer les performances du capteur dans ces conditions.

Pour ce faire, les tests précédents ont été reproduits en ajoutant un humidificateur au niveau du microphone (cf. Figure 7). Le but n'est pas d'encapsuler le microphone, mais bien de faire correspondre l'humidité locale (capteur + proximité) durant les tests à l'humidité réelle présente en cavité. En ce qui concerne le test de captation d'événement sous humidité, la présence de l'humidificateur au voisinage des microphones perturbe le bruit de fond perçu par les microphones, ce qui limite le nombre de valeurs de bruit de fond à reproduire (60, 70 et 80 dB).

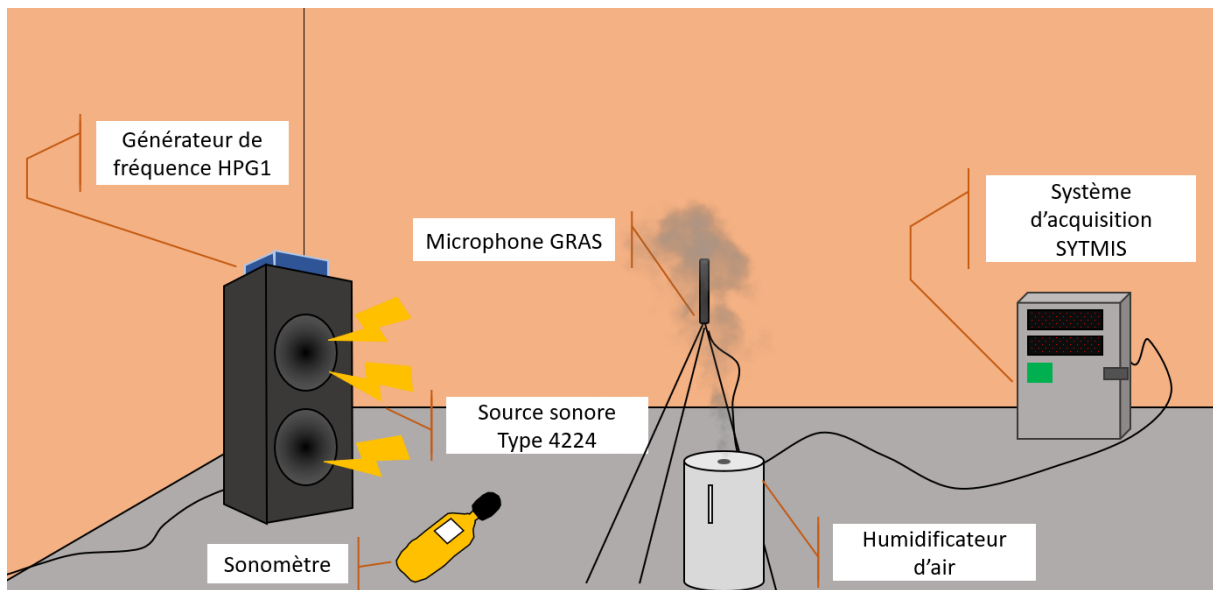


Figure 7 : Croquis illustrant le test de réponse en fréquence en présence d'humidité

3.3 Résultats des tests

3.3.1 L'étude de la directivité

En faisant le lien avec les résultats obtenus lors de l'analyse modale de la halle d'essai, les variations du NPA observées sur la Figure 8 ne traduisent pas un dysfonctionnement quelconque du microphone GRAS.

On constate que pour des hautes fréquences telles que 900 Hz et 500 Hz, les variations de NPA sont importantes d'un point à l'autre. Cela peut s'expliquer par la nature plus chaotique des modes de résonance présents dans la halle d'essai à ces fréquences. A l'inverse, on remarque une transition plus lisse d'un point à l'autre en ce qui concerne la directivité du kit microphonique aux basses fréquences.

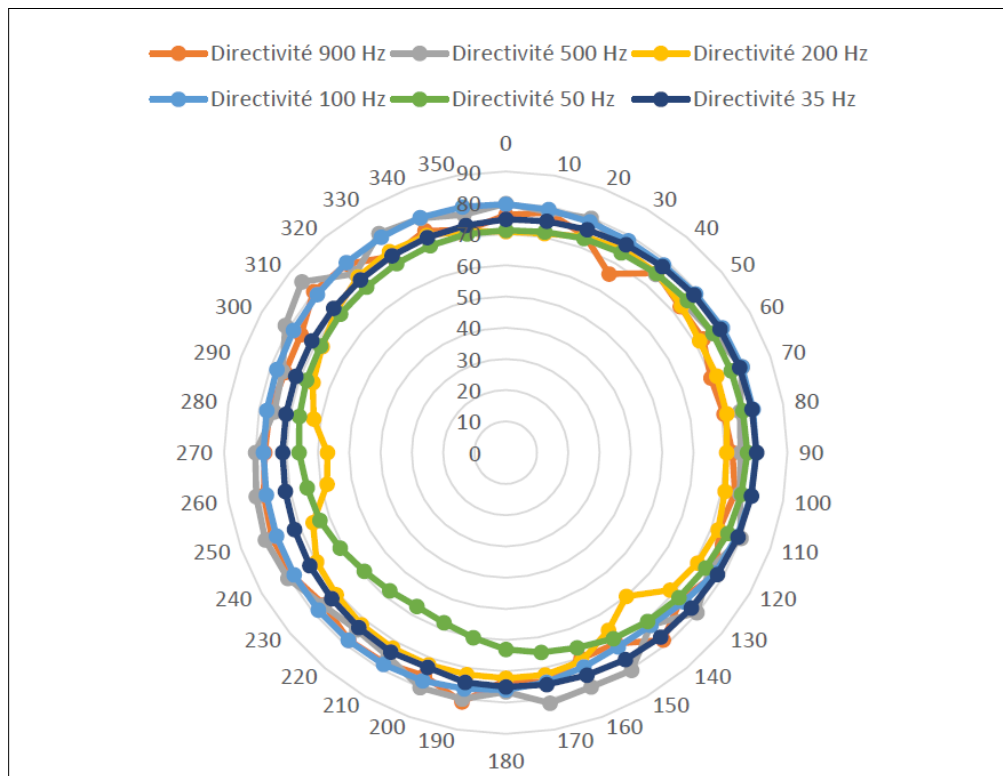


Figure 8 : diagramme polaire de directivité du kit microphonique GRAS à 80 dB

Concernant la directivité du kit microphonique PCB, les données présentées sur la Figure 9 pour les basses fréquences sont très similaires à celles du kit microphonique GRAS. Le cercle de directivité à 50 Hz et 35 Hz sont quasiment identiques à ceux du kit microphonique GRAS. En revanche, pour les hautes fréquences (à savoir 900 Hz et 500 Hz ici), le microphone PCB semble moins stable que le microphone GRAS, les variations observées d'un point à l'autre sont également plus conséquentes.

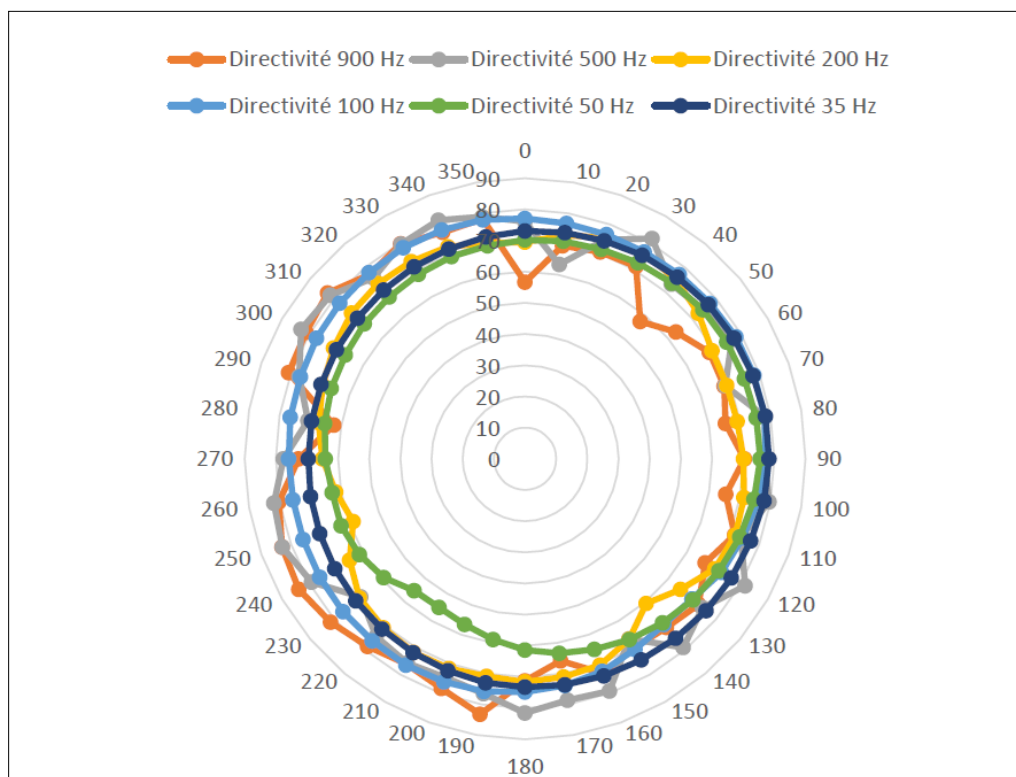


Figure 9 : diagramme polaire de directivité du kit microphonique PCB à 80 dB

La Figure 10 montre la réponse de la sonde SYTMIS-1DM. Elle présente nettement plus de stabilité en haute fréquence que les kits à « bas-coût ». En basses fréquences, la sonde ne présente pas de variations significatives du niveau de pression acoustique contrairement aux deux autres kits testés.

Ce premier test permet de constater que la sonde SYTMIS-1DM est plus performante que les deux kits microphoniques sur l'ensemble de fréquences étudiées. Par ailleurs, le cercle de directivité à 900Hz de cette sonde présente très peu de variations « brutales » entre deux points.

Si l'on s'en tient à la détection de chutes de bocs, dont la signature est plutôt basse fréquence, ce premier test met plutôt en question les performances du kit microphonique PCB.

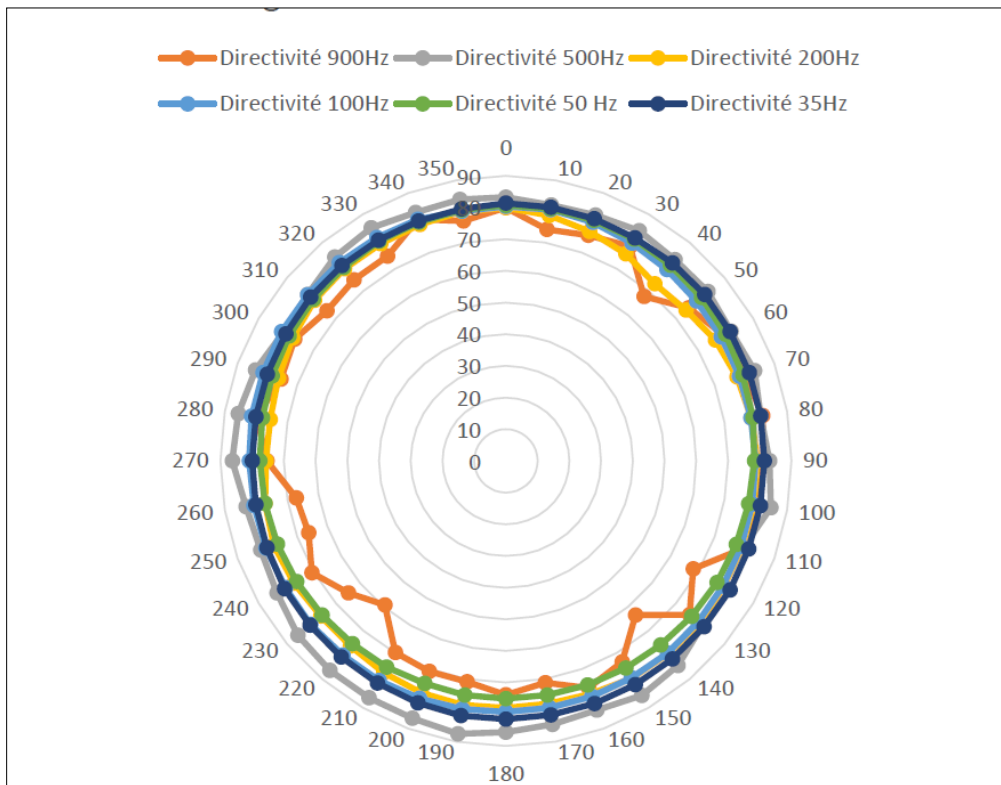


Figure 10 : diagramme polaire de directivité de la sonde SYTMIS-1DM à 80 dB

3.3.2 La réponse en fréquence

Pour ce test, le sonomètre calibré sert de référence pour comparaison avec les différentes réponses de deux kits microphoniques. Comme constaté sur la Figure 11, en basses fréquences les réponses observées sont très similaires, à moins de 5 dB d'écart entre les kits et le sonomètre. A partir de 160 - 200 Hz, une certaine divergence s'installe entre les deux kits. Si l'on se concentre sur le kit microphonique PCB, on remarque un écart de près de 10 dB avec le sonomètre à partir de 300 Hz, qui se poursuit dans les hautes fréquences, jusqu'à atteindre un écart de 20 dB vers 800 Hz. Le GRAS en revanche, malgré un léger écart à partir de 300 Hz, maintient un écart relativement faible avec le sonomètre. La sonde SYTMIS-1DM quant à elle, a une réponse en fréquence proche de celle du sonomètre en basses fréquences, mais en haute fréquence se rapproche de la réponse du microphone GRAS.

Ce test ayant été réalisé dans les mêmes conditions pour chaque kit, le test de directivité en hautes fréquences peut compléter cette observation.

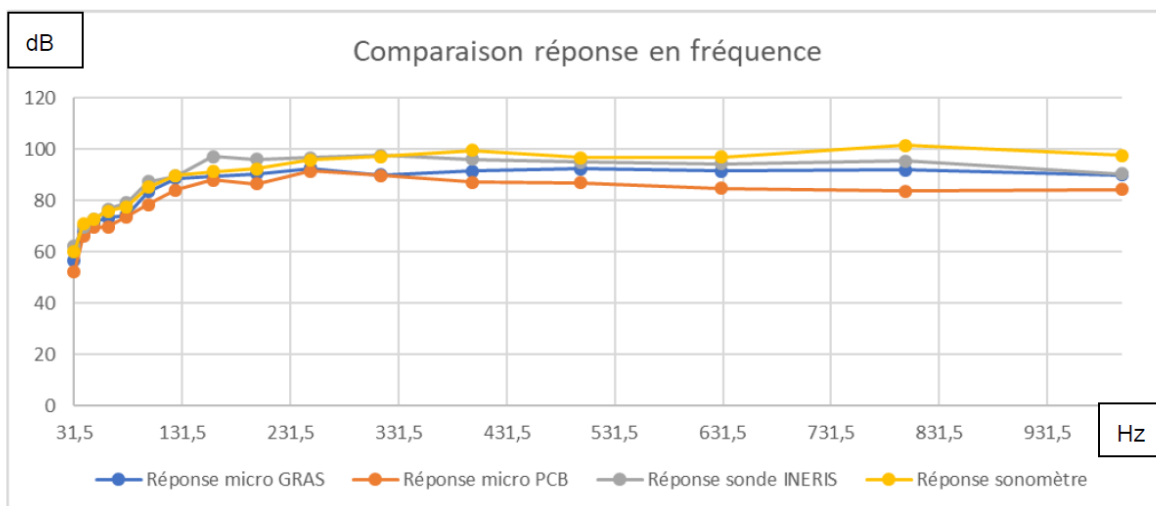


Figure 11 : fréquences des kits microphoniques PCB et GRAS, de la sonde SYTMIS-1DM et du sonomètre

3.3.3 Les intensités limites

La Figure 12 rassemble les résultats de ce test.



Figure 12 : niveaux de pression sonore en dB minimum et maximum perçus pour chaque kit microphonique, la sonde SYTMIS-1DM et le sonomètre

Le seuil minimum est bridé par le bruit de fond de la halle d'essai, et le seuil maximum est bridé par l'intensité maximale délivrée par la sonde acoustique. Les seuils minimums sont quasi-identiques pour les 3 microphones et le microphone du sonomètre. Les seuils maximums diffèrent peu entre les 3 microphones (8 dB entre la sonde SYTMIS-1DM et le PCB).

Cependant, aucune conclusion ne peut être tirée de cette simple mesure. Ce test sera par ailleurs repris dans le protocole de test *in situ* afin d'essayer de récolter des informations dans des conditions réelles.

3.3.4 La détection d'événements avec bruit de fond

Ce test a été réalisé avec un bruit de fond à 60 dB, 70 dB et 80 dB. Les Figure 13 et Figure 14 montrent une bonne capacité de détection des événements avec un bruit de fond à 60 dB et 70 dB pour les 2 kits microphoniques et la sonde SYTMIS-1DM.

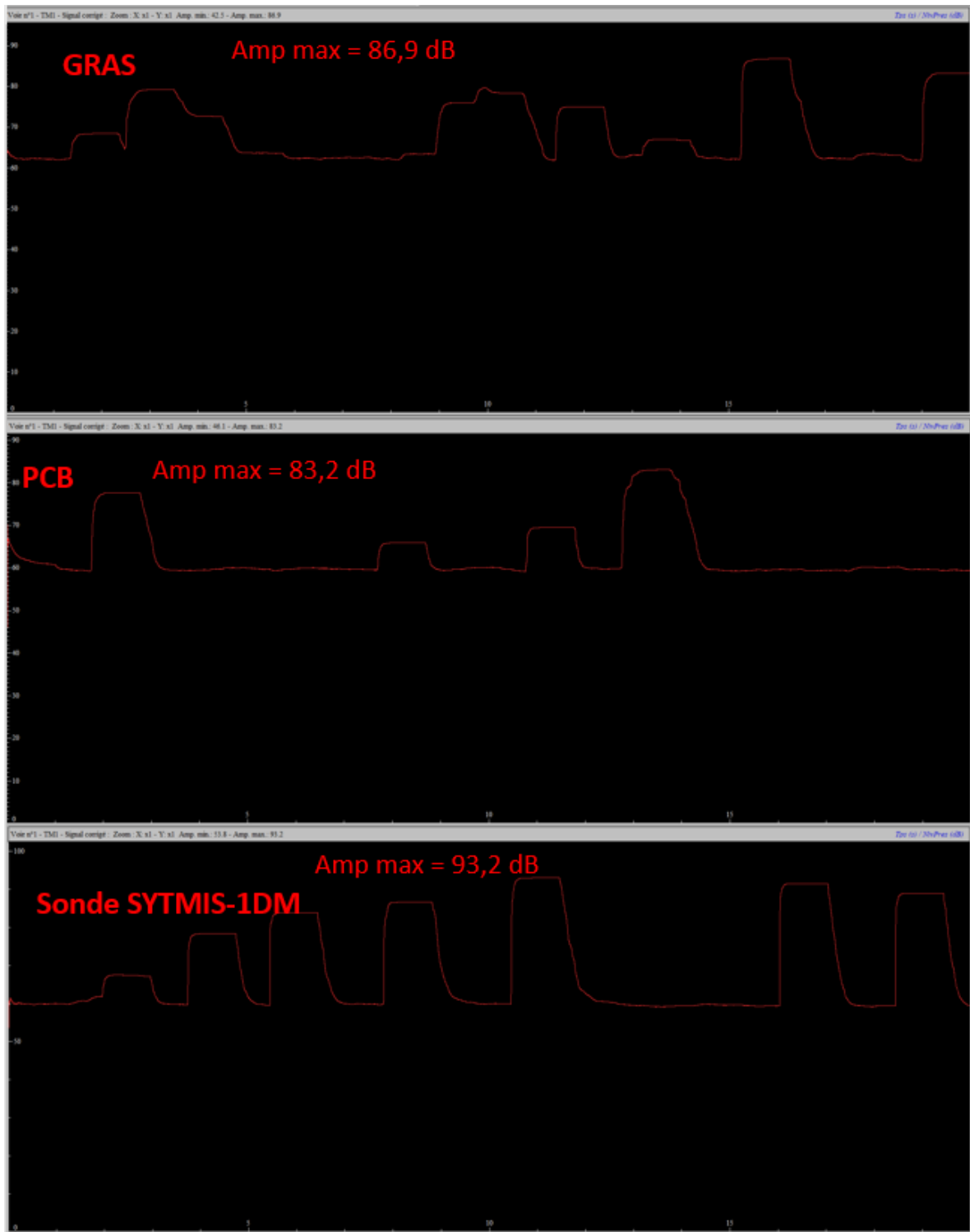


Figure 13 : Signaux (pression acoustique en fonction du temps) enregistrés à la suite de la détection de différents événements d'intensités aléatoires avec un bruit de fond de 60 dB pour les kits microphoniques GRAS, PCB et la sonde SYTMIS-1DM

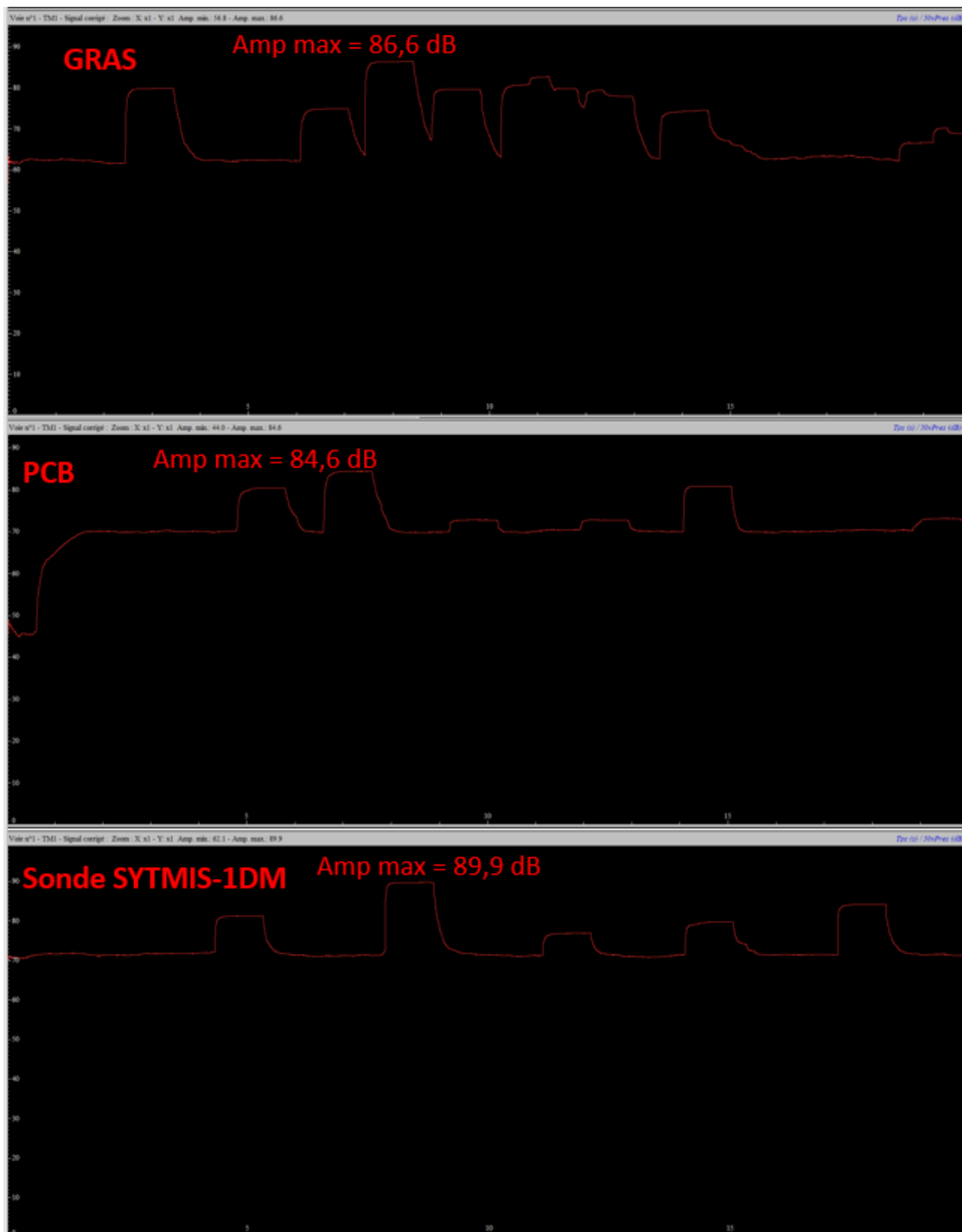


Figure 14 : Signaux (pression acoustique en fonction du temps) enregistrés à la suite de la détection de différents événements d'intensités aléatoires avec un bruit de fond de 70 dB pour les kits microphoniques GRAS, PCB et la sonde SYTMIS-1DM

Les signaux enregistrés sont présentés sur une fenêtre de 20 secondes. Il s'agit d'enregistrements non simultanés, de différente durée et de différente origine (claquement de main, chute d'objets, etc.), cela explique les différences de forme d'onde. En plus, chaque prise ne démarre pas exactement au même moment, ce qui explique les différences du début de signal entre les fichiers sur les Figure 13 et Figure 14.

Le fait que les trois microphones n'enregistrent pas en simultanément le même signal n'est pas une limite, car dans ce test on n'était intéressé qu'à voir la capacité de chaque microphone à enregistrer un événement en partant d'un bruit de fond connu (60, 70 et 80 dB). On ne s'intéresse pas à la comparaison

de la réponse sur le même enregistrement des trois microphones. Tous les trois microphones arrivent à détecter les événements produits avec un R/B d'environ 2.

3.3.5 L'influence de l'humidité

L'étalonnage à l'hygromètre réalisé dans la section 3.1.3 a permis de s'assurer que l'humidificateur était en capacité d'augmenter le taux d'humidité relative de plus de 90%, qui correspond aux conditions présentes dans les cavités peu profondes.

En ce qui concerne le test de directivité, les Figure 15, Figure 16 et Figure 17 présentent la comparaison entre les résultats des tests réalisés sous un taux d'humidité relative de 54% et ceux réalisés à 93%. Ce que l'on peut retenir de ces résultats, est que mises à part quelques variations observées pour les trois kits pour les fréquences de 900 Hz et 500 Hz, il semble que l'humidité n'ait pas d'effets sur les performances de directivité des capteurs.

Cependant, les conditions de ce test ne prennent pas en compte une exposition sur le long terme, ni l'aspect poussiéreux des cavités. On ne peut donc pas exclure un impact sur les performances en termes de directivité pour les kits PCB et GRAS (pour la sonde SYTMIS-1DM, le retour d'expérience à long terme est positif).

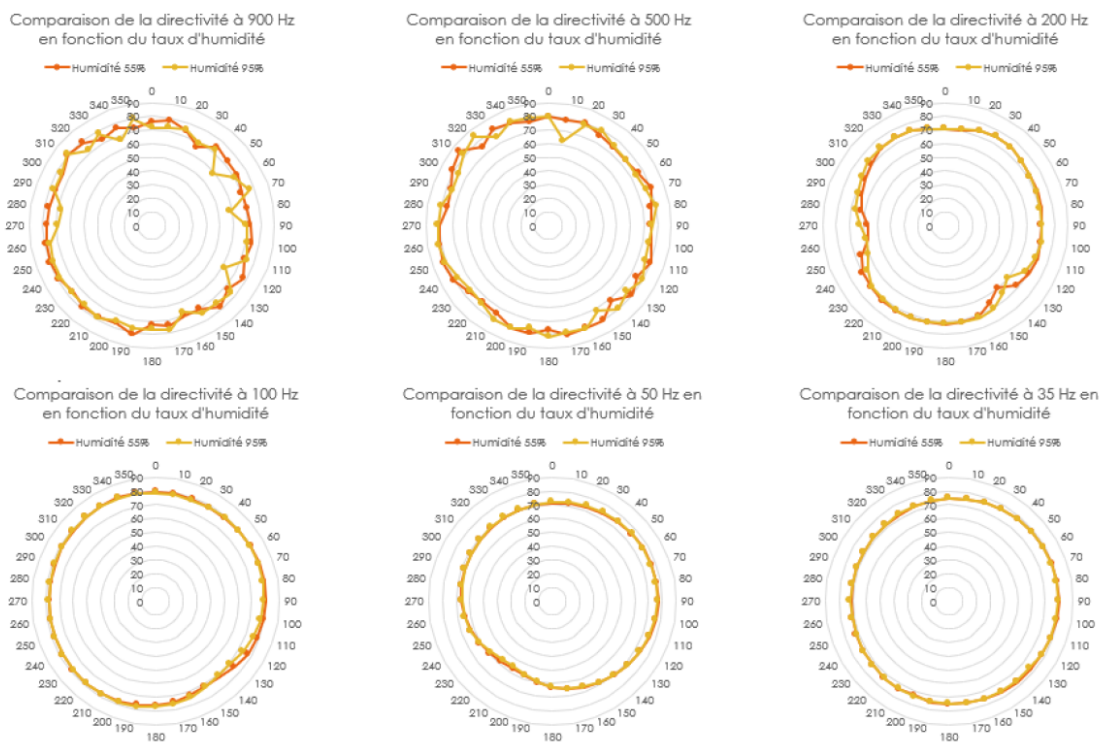


Figure 15 : comparaison des tests de directivité à humidité relative ambiante et sous conditions humides pour le kit microphonique GRAS

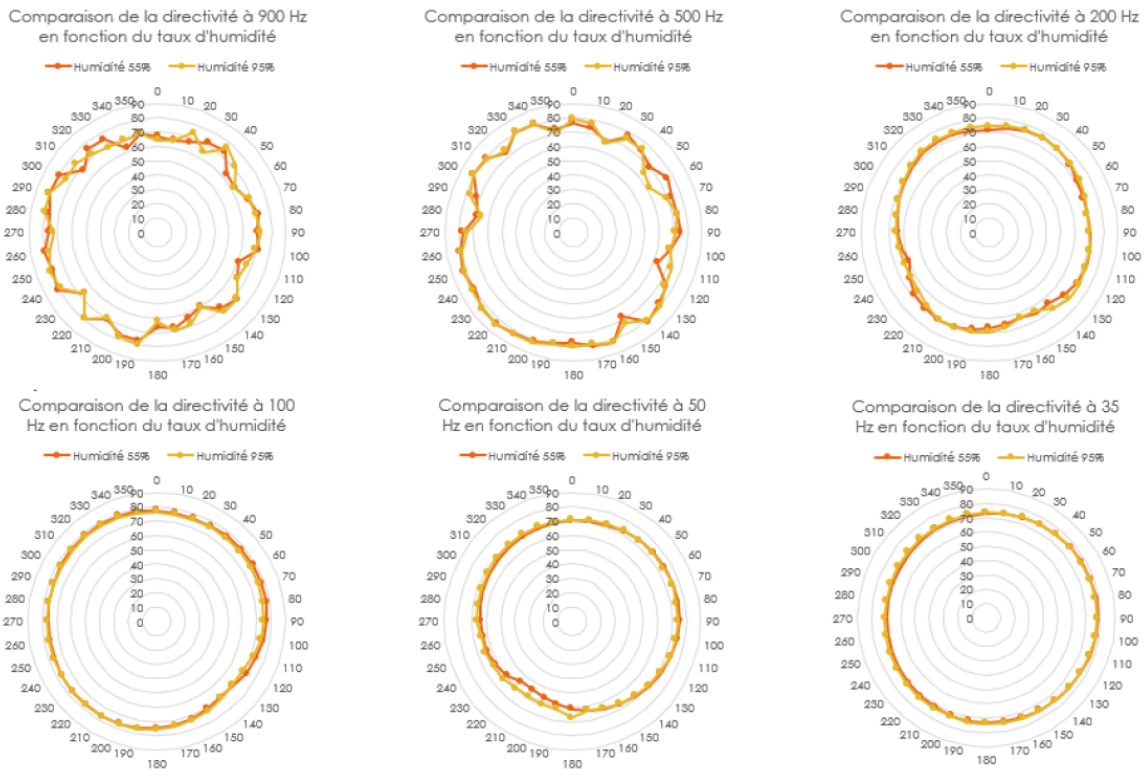


Figure 16 : comparaison des tests de directivité à humidité relative ambiante et sous conditions humides pour le kit microphonique PCB

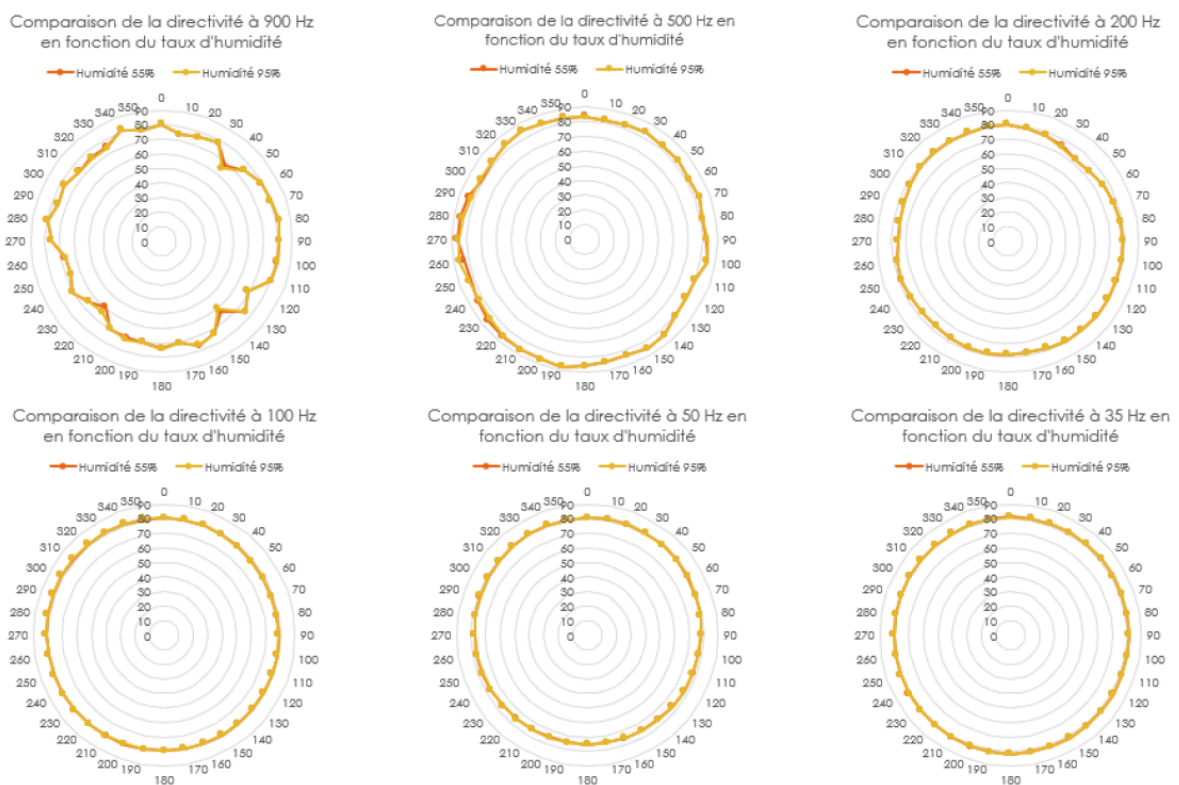


Figure 17 : comparaison des tests de directivité à humidité relative ambiante et sous conditions humides pour la sonde SYTMIS-1DM

Concernant le test de réponse en fréquence, en basses fréquences les réponses des deux kits sont similaires (cf. Figure 18), du même ordre que pour le test précédent sans humidificateur, et en hautes

fréquences la divergence des réponses mise en évidence sous humidité relative ambiante est la même, elle n'est ni atténuée, ni amplifiée.

On remarque sur la Figure 18 que l'écart de NPA entre les séries est très faible, l'écart le plus important se situant à près de 4 dB pour le kit microphonique GRAS. Pour des écarts de NPA tels, on peut en conclure que l'humidité n'influe pas sur les performances des capteurs.

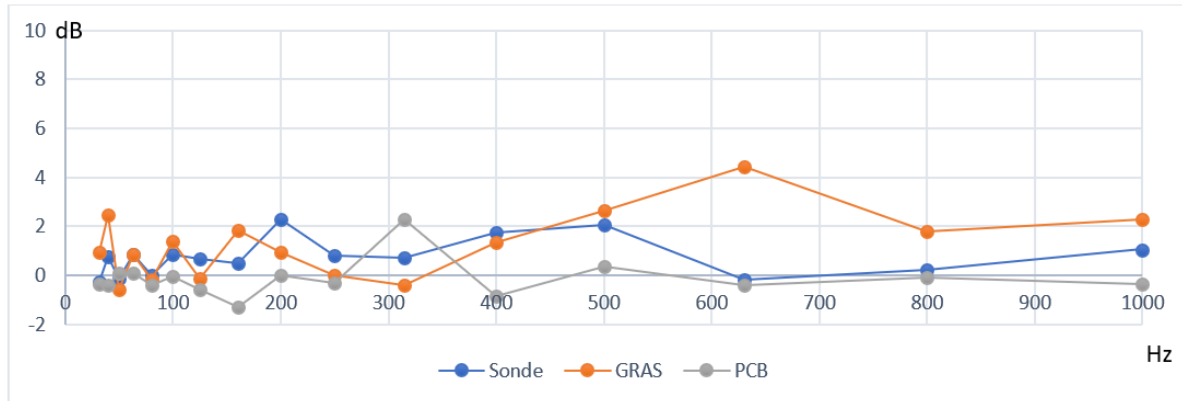


Figure 18 : Différence entre les niveaux de pression acoustique de la réponse en fréquence des deux kits et de la sonde SYTMIS-1DM entre les séries dites « sèches » et celles dites « humides »

Le troisième test concerne les intensités limites, concernant ces résultats sous des conditions humides on a constaté des différences de 1 à 3 dB entre les deux tests pour les deux kits, néanmoins ces différences ne sont pas assez significatives pour en déduire une quelconque influence de l'humidité sur les performances des capteurs.

Le test de détection d'événements dans des conditions humides ne présente lui non plus aucune différence dans la façon à laquelle les événements sont détectés. Seule la série avec un bruit de fond de 60 dB n'a pas pu être réalisée, car l'humidificateur semblait perturber les microphones par rapport au bruit qu'il engendrait.

Une nouvelle fois, ces données semblent confirmer, au moins à court terme, que l'humidité n'a pas d'influence sur les performances des kits microphoniques.

3.4 Discussion sur les résultats

Sur la base des résultats de ces tests réalisés dans la halle du Cenaris, plusieurs conclusions peuvent être tirées.

Tout d'abord, en ce qui concerne les performances des kits microphoniques GRAS et PCB, malgré leur différence de coût, leurs performances semblent être relativement similaires. La sonde SYTMIS-1DM quant à elle, se présente comme plus stable en termes de directivité ainsi que de réponse en fréquence.

La Figure 19 ci-dessous récapitule les principales conclusions sur les caractéristiques des deux kits microphoniques en les comparant à celles de la sonde SYTMIS-1DM.

	Kit GRAS	Kit PCB	SYTMIS-1DM
Directivité	Fiable en basses fréquences, attention à une certaine atténuation pour 50 Hz voire 35 Hz (de 10 à 20 dB)	Même réponse en basses fréquences que le microphone GRAS, attention à l'atténuation pour 50 Hz voire 35 Hz	Très fiable en basses fréquences, aucune atténuation, directivité quasi-parfaite
Réponse en fréquence	Moins de 5dB de différence avec le microphone calibré du sonomètre en basses fréquences, fiable, pas de traitement particulier à appliquer	Près de 8dB de différence avec le microphone calibré du sonomètre en basses fréquences, néanmoins stable dans cette variation, peut être traité	Réponse identique au microphone calibré du sonomètre (à 1 dB près)
Intensités limites	Intensité maximale perçue à 114 dB, importante atténuation comparée au micro du sonomètre (20dB) sans pour autant constater de la saturation	Même réponse en intensité que le microphone GRAS	Intensité maximale perçue à 120 dB, atténuation observée comparée au micro du sonomètre (8 dB) sans pour autant constater de la saturation
Captations événements	Très bonne distinction des événements avec bruit de fond séparation possible dès 5dB au-dessus du seuil de bruit de fond	Très bonne distinction des événements avec bruit de fond, séparation possible dès 5dB au-dessus du seuil de bruit de fond	Très bonne distinction des événements avec bruit de fond, séparation possible dès 5dB au-dessus du seuil de bruit de fond
Directivité + humidité	Directivité à 900Hz et 500Hz chaotique mais aucune différence notable en basses fréquences	Directivité à 900Hz et 500Hz chaotique mais aucune différence notable en basses fréquences	Aucune différence en termes de directivité malgré le changement de température et d'humidité
Réponse en fréquence + humidité	Variations inférieures à 5dB en basses fréquences, pas d'influence de l'humidité	Variations inférieures à 5dB en basses fréquences, pas d'influence de l'humidité	Variations inférieures à 2dB sur toute la plage des fréquences, pas d'influence de l'humidité
Intensités limites + humidité	Aucune différence pour l'intensité maximale perçue	Aucune différence pour l'intensité maximale perçue	Aucune différence pour l'intensité maximale perçue
Captation événements + humidité	Très bonne distinction des événements avec bruit de fond, aucune perturbation liée à l'humidité	Très bonne distinction des événements avec bruit de fond, aucune perturbation liée à l'humidité	Très bonne distinction des événements avec bruit de fond, aucune perturbation liée à l'humidité

Figure 19 : synthèse des résultats des différents tests. En jaune les points sur lesquels il faut être vigilants

Par rapport à la problématique d'origine, il est certain que la sonde SYTMIS-1DM est plus performante que les kits GRAS et PCB. Cependant, ils sont suffisamment performants en laboratoire, pour envisager des tests *in situ*. En effet, les atouts identifiés pour les deux kits microphoniques sont les suivants :

- Ils sont moins intrusifs par rapport à la sonde SYTMIS-1DM,
- Ils sont fiables sous basses fréquences, et donc avec la détection de signaux basses fréquences,
- Ils sont moins chers que la sonde SYTMIS-1DM.

Des tests sur site vont être effectués sur le long terme afin de vérifier si oui ou non ces kits microphoniques sont durables dans des conditions réelles (humidité, poussière, température, etc.) de surveillance acoustique en cavités peu profondes. Le protocole de ces tests est détaillé au chapitre suivant. Les performances des deux kits étant très similaires les tests seront réalisés sur le kit microphonique PCB dont le coût est moins important que celui du kit GRAS.

4 Tests *in situ* du kit microphonique PCB

Ce chapitre est consacré au protocole de tests *in situ*, sur une longue durée, du kit microphonique PCB. Il est conçu pour être réalisé dans une carrière peu profonde, silencieuse, avec une géométrie complexe et faisant déjà l'objet d'une surveillance par méthode acoustique. Il consiste à ajouter des capteurs à bas-coût au réseau acoustique existant. Dans la suite on parlera de réseau hybride pour comparer les performances en conditions réelles de ces capteurs avec celles bien maîtrisées des sondes SYTMIS. Le nombre total des capteurs à ajouter et leur emplacement seront définis en fonction de la carrière choisie. Dans un premier temps, on doublera un point de mesure avec kit PCB plus une sonde SYTMIS. Ensuite, si faisable certains emplacements seront validés par une analyse modale prenant en compte la géométrie de la partie de la carrière en objet, comme ça a été fait pour la halle d'essai du Cenaris (cf. 3.1.2), afin d'installer les capteurs dans des zones présentant le moins de perturbations sonores possibles.

4.1 Plan des tests

Afin d'étudier au mieux l'évolution à long terme des performances du kit PCB en cavité souterraine, le plan de tests (cf. Figure 20) est calé sur une période de 12 mois afin de couvrir l'ensemble des saisons, ce qui implique un plus grand panel de jeu de température/humidité.

Les étapes qui composent ce plan de tests sont décrites de manière plus précise ci-après ; il consiste notamment à valider le fonctionnement du réseau hybride de surveillance (cf. 4.1.1) puis à reproduire *in situ*, à intervalles réguliers (sur le diagramme Figure 20 il est indiqué tous les 6 mois, et si c'est possible tous les 3 mois) les tests réalisés dans la halle Cenaris (cf. 4.1.2). A noter que si les performances des kits PCB se dégradent au fil de temps, le plan de tests et plus largement l'essai pourra être interrompu.

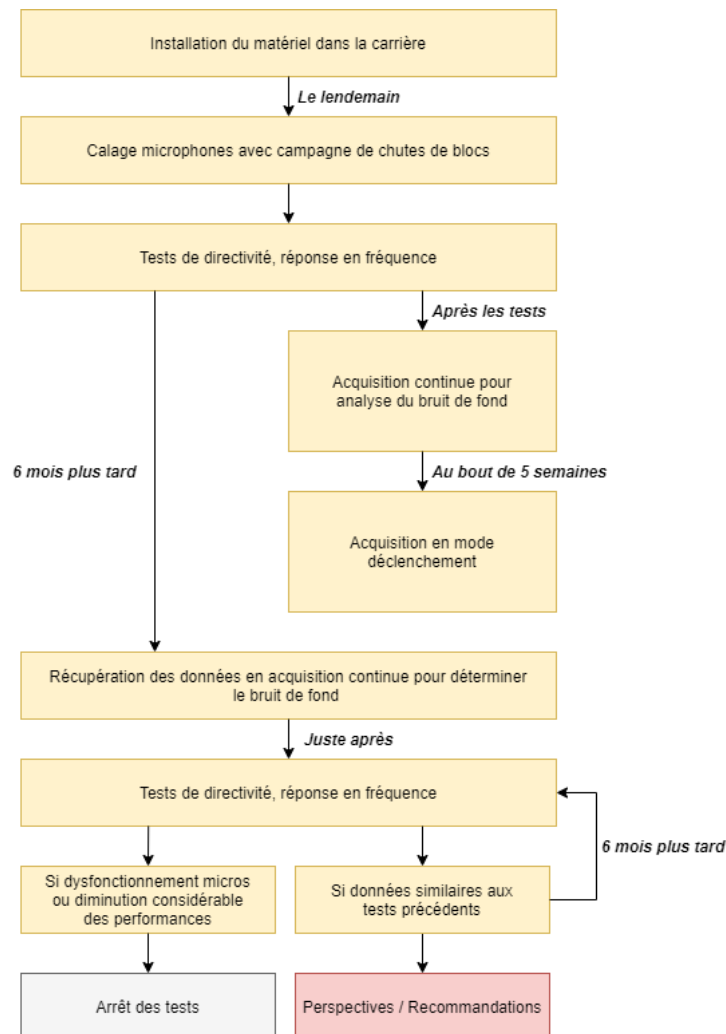


Figure 20 : Représentation schématique du protocole de la réalisation des tests du kit PCB *in situ*

4.1.1 Calage par campagne de chute de bloc artificielle

Le test « chute de bloc » (cf. Figure 20 et Ineris, 2013) consiste à faire tomber un bloc de poids variable depuis la hauteur de la carrière à l'aide d'engins de chantier.

L'objectif de ce test est d'abord de voir si les nouveaux kits installés sont capables de détecter un événement type chute de bloc connu dans la carrière, sur le modèle du test n°4 réalisés dans la halle (cf. 3.2.5).

Ensuite, ces signaux permettront de vérifier l'erreur de localisation. Les coordonnées des chutes sont connues en les relocalisant il est possible de voir quelle est l'erreur de localisation.

Le nombre des chutes, leurs emplacements, et la distance à laquelle seront réalisées par rapport aux capteurs seront définis en fonction de la géométrie des galeries et du positionnement des capteurs. Le sonomètre sera positionné à proximité de chaque chute. Donc, pour chaque chute de bloc, les niveaux de pression sonores mesurés par le sonomètre et par le capteur seront analysés, puis comparés avec les résultats des campagnes successives (cf. Figure 20) pour évaluer : 1) la réponse instrumentale des capteurs et 2) d'optimiser la localisation des sources acoustiques.

4.1.2 Tests de la directivité, de la réponse en fréquence et des intensités limites

Les trois premiers tests correspondent aux trois premiers tests réalisés en laboratoire, à savoir les tests de directivité, réponse en fréquence et intensités limites. Ils seront néanmoins différents puisqu'il s'agira ici de vérifier les bornes de la plage dynamique en conditions réelles, c'est à dire en prenant en compte le niveau sonore minimal de la cavité surveillée.

Pour compléter l'analyse, le bruit de fond sera mesuré durant une période longue pour déterminer la valeur moyenne du bruit de fond de la cavité. La valeur moyenne du bruit de fond sera ensuite soustraite du niveau de pression acoustique mesuré pour chaque capteur. Cela va permettre de pouvoir mieux comparer la réponse de chaque capteur afin de comparer les résultats et d'optimiser la stratégie d'acquisition.

Pour obtenir la valeur moyenne du bruit de fond de la carrière, le dispositif d'acquisition sera placé en mode d'acquisition continue sur une période de 4 à 5 semaines. A noter, que selon la fréquence d'échantillonnage, ce test pourra engendrer un volume important de données. La capacité de stockage des données locales devra être vérifiée et si nécessaire des interventions de déchargement manuel des données devront être réalisées.

Après cette phase d'acquisition continue, le système pourra être replacé en acquisition sur déclenchement en veillant à utiliser les mêmes critères et seuils de déclenchement sur l'ensemble des capteurs (kits PCB et sondes SYTMIS-1DM). Cela permettra de comparer, en cas d'événements, la réponse des capteurs à la détection de sources acoustiques naturelles et d'évaluer leur apport dans la localisation des sources.

4.2 Perspectives sur les résultats

Le bilan des tests doit permettre de vérifier si le kit PCB est suffisamment robuste et performant dans des conditions réelles d'une carrière naturelle peu profonde et si sa réponse instrumentale est stable sur une période de 12 mois au moins.

Dans le cas favorable, selon les résultats obtenus, il s'agira d'émettre des recommandations techniques pour le choix de capteurs dans le dimensionnement de réseaux de surveillance acoustique. Typiquement, il sera discuté des conditions d'installation de réseau hybride, voire, à plus long terme sur la base d'essais sur des périodes de temps de plusieurs années, de réseau composé exclusivement de capteurs à bas coût. Tous les cas, les paramètres clés qui guideront les choix seront les objectifs et les exigences du projet de surveillance (pourquoi on surveille, dans quel objectif), ainsi que l'analyse modale pour optimiser l'implantation des capteurs de manière à limiter les perturbations sonores.

5 Evolution du protocole de calage de la méthode acoustique

Dans le rapport de l'Ineris de 2013 la méthodologie d'instrumentation par méthode acoustique d'une cavité a été décrite, en partant du rappel des concepts simples d'acoustique et en précisant les principes de l'écoute acoustique en carrière souterraine peu profonde.

Cette méthodologie repose sur quatre étapes fondamentales à conduire dans l'ordre suivant : d'abord l'étude de la faisabilité de la surveillance, puis le dimensionnement d'un réseau de microphones, ensuite le calage du dispositif et pour finir la mise en test du réseau après installation. La méthodologie proposée a été testée en grand sur plusieurs sites et à la suite de ces tests un protocole de calage de la méthode acoustique pour les carrières peu profondes a été proposé. Cette nouvelle étude permet de valider ce protocole et de proposer l'ajout de deux nouvelles étapes identifiées, en orange, sur la Figure 21.

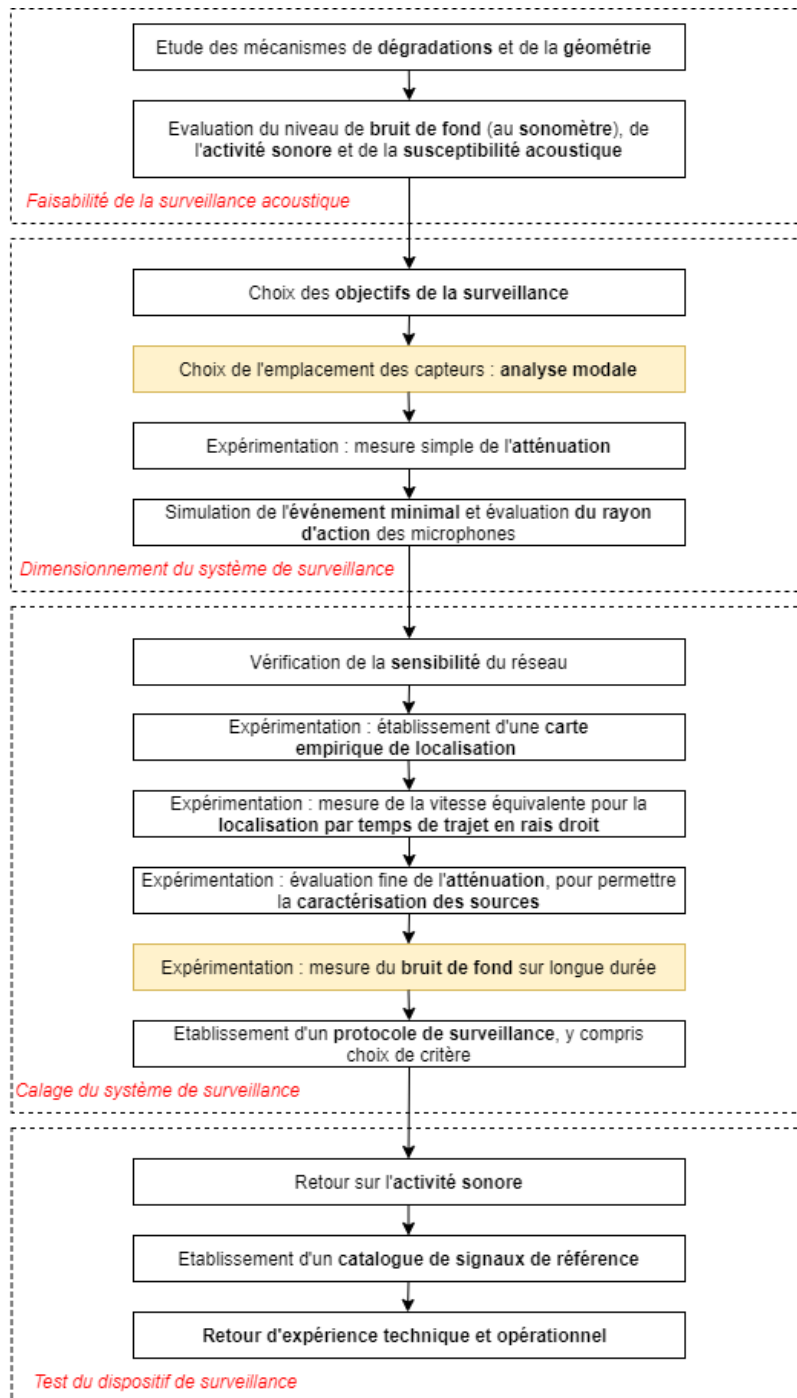


Figure 21 : bilan global de la méthodologie acoustique pour la surveillance des carrières peu profondes (modifié à partir du rapport Ineris, 2013), en orange les nouvelles étapes proposées

Elles concernent :

1. Le choix de l'emplacement des capteurs. Il est conditionné par les objectifs de la surveillance, par la géométrie de la carrière et son (ses) accès et par les perturbations sonores liées à la résonance structurelle naturelle de la cavité. Pour limiter leur impact, il pourra être utile de réaliser une analyse modale par une approche analytique par éléments finis. En effet, comme vu précédemment si les capteurs sont installés dans des « nœuds » (cf. 3.1.2) certaines fréquences peuvent ne pas être captées ou très atténuées. Inversement s'ils sont installés dans des « ventres » certaines fréquences peuvent être amplifiées.
2. La mesure du bruit de fond de la carrière sur une longue durée. Actuellement, pour définir si la carrière est silencieuse ou pas une première étude au sonomètre est réalisée (cf. Ineris, 2013). Il s'agit maintenant, lorsque le réseau est installé, de faire une mesure de bruit de fond en

adoptant une stratégie d'acquisition continue durant quelques semaines. Cette mesure est utile pour avoir une connaissance plus précise du bruit dans la carrière et pour traiter les données : en soustrayant la valeur moyenne du bruit de fond aux données associées des événements acoustiques, les signaux sont nettoyés ce qui peut dans certaines configurations faciliter les traitements à effectuer, comme le pointé des arrivées d'onde, etc. pour mieux caractériser la source.

Rappelons ici l'importance de bien connaître la géométrie de la carrière (cf. Ineris, 2013), pour le dimensionnement et l'optimisation de l'implantation des capteurs et pour la localisation des sources acoustiques. En effet, ce travail sur l'intégration de capteurs à bas coût est entre autres motivé par l'objectif de localiser aussi précisément que possible des sources au moyen de réseaux hybrides ou à bas-coûts plus denses que les réseaux composés uniquement de quelques sondes haute-résolution. Pour les réseaux denses et en présence d'événements énergétiques, la localisation des sources pourra être basée sur une approche empirique par zones, plutôt que par l'approche plus complexe par inversion des temps de trajets des ondes entre la source et les différents capteurs utilisée pour les réseaux à faible nombre de capteurs.

6 Conclusions

L'écoute acoustique présente de nombreux avantages dans le cadre de surveillance d'ouvrages étendus abandonnés et en proche surface, pour lesquels les autres types de surveillance présentent des limites sécuritaires (visites d'inspection), économiques (nombreux capteurs géotechniques) et opérationnels (traitement microsismique). Pour ces raisons, dans le cadre de son action d'appui aux pouvoirs publics, l'Ineris conduit une action de veille sur les outils et méthodes permettant d'améliorer les connaissances, les outils et les méthodes de surveillance.

Cette veille a permis de s'intéresser aux microphones, à la base de l'écoute acoustique. Il en existe de nombreux types dont des capteurs classiques, pour un large éventail de prix, compatibles avec de nombreux systèmes d'acquisition. Malheureusement, la plupart de ces microphones notamment ceux à bas coûts ne sont pas assez résistants pour être mis en œuvre en milieu souterrain, par nature très agressif. Deux capteurs industriels, dits kits microphoniques, à la limite du « bas-coût » ont néanmoins été identifiés et testés en conditions de laboratoire.

Ces tests basés sur l'étude de la directivité, de la réponse en fréquence et des intensités limites montrent qu'ils présentent, tout au moins en laboratoire, à sec et avec une forte hygrométrie à court terme, des performances compatibles avec la surveillance acoustique, notamment dans les basses fréquences. Ils constituent des candidats intéressants pour des tests *in situ*, pour qualifier leurs performances et tester leur robustesse en conditions réelles.

Un protocole de tests *in situ* a été élaboré, il vise à compléter un réseau de surveillance existant composé de quelques sondes acoustiques haute-résolution avec quelques kits microphoniques. Ce protocole sera affiné une fois que le choix de la carrière de tests aura été arrêté. Il s'agira en particulier de définir l'emplacement des capteurs à ajouter avant de dérouler les tests et d'analyser les données. Selon la qualité des résultats obtenus, ces tests pourront permettre l'élaboration de recommandations techniques pour le choix de capteurs dans le dimensionnement de réseaux de surveillance acoustique (réseau hybride, voire, à plus long terme sur la base d'essais sur des périodes de temps de plusieurs années, de réseau composé exclusivement de capteurs à bas coût).

Ce travail sur les capteurs a également conduit à réviser à la marge le protocole de calage d'un dispositif de surveillance acoustique déployé *in situ* proposé en 2013 (cf. Ineris, 2013). La première suggestion concerne l'ajout, en phase de dimensionnement du réseau d'une analyse modale de la carrière afin d'optimiser l'implantation des capteurs par rapport à la réponse dynamique intrinsèque du site (pour éviter les perturbations liées à la résonance structurelle naturelle de la cavité). A noter que cette analyse suppose de bien maîtriser la géométrie de la cavité. La deuxième suggestion concerne l'évaluation du bruit de fond de la carrière. Il s'agit de l'évaluer en mettant en place pour une période prolongée de quelques semaines, une acquisition acoustique continue, à partir de laquelle la valeur moyenne du bruit de fond peut être déduite. Cette valeur moyenne du bruit de fond calculée pour chaque capteur, pourrait être soustraite, en phase de traitement, à la mesure de la pression mesurée pour un événement donné. Cette mesure relative, voie par voie, pourrait conduire à mieux caractériser les sources acoustiques en termes de localisation et énergie.

7 Glossaire

Accéléromètre : capteur fixé à un mobile ou tout autre objet permettant de mesurer l'accélération non gravitationnelle linéaire.

Analyse modale : est l'étude des propriétés dynamiques (résonance structurelle) d'un système qui est défini indépendamment des charges qui lui sont appliquées et des réponses qu'il fournit. Les propriétés dynamiques (ou caractéristiques modales) d'une structure ou d'un système sont constituées de ce qu'on appelle les modes propres (ou naturels) : un mode est défini par sa fréquence naturelle (ou sa fréquence de résonance), son amortissement et sa déformée modale. Très souvent, on utilise les caractéristiques modales de la structure pour déterminer la réponse du système. Il existe deux méthodes différentes pour réaliser une analyse modale. La première, l'analyse modale expérimentale, se base sur les données mesurées lors d'un essai modal. La seconde méthode, l'analyse modale analytique, est basée sur la modélisation par éléments finis. Un modèle aux éléments finis est défini par les propriétés des matériaux et la géométrie.

Bruit blanc : signal qui comprend toutes les fréquences du spectre et dont la densité spectrale de puissance est constante sur toute la bande-passante.

Capteur piézoélectrique : capteur utilisant l'effet piézoélectrique afin de mesurer des grandeurs physiques telles que la pression, l'accélération ou tout autre grandeur physique engendrant des contraintes ou des déformations mécaniques par le biais de matériaux actifs.

Chambre anéchoïque : une salle d'expérimentation dont les parois absorbent les ondes sonores ou électromagnétiques, en reproduisant des conditions de champ libre et ne provoquant donc pas d'écho pouvant perturber les mesures.

Champ libre : champ acoustique au sein duquel les ondes sonores se propagent librement sans objet perturbateur. Ce qui signifie un espace sans éléments réverbérant - le microphone est le seul facteur susceptible de modifier le champ sonore.

Directivité du microphone : est la sensibilité du microphone aux sons en fonction de la direction dont ils proviennent.

Géophone : capteur permettant l'enregistrement et/ou la mesure du vecteur vitesse des vibrations sismiques au travers du sol.

Microphone : transducteur électroacoustique, appareil capable de convertir un signal acoustique en signal électrique.

NPA : niveau de pression acoustique.

8 Références

Hopwood, T. and McGogney, C. (1987). Acoustic emission applications in civil engineering. Nondestructive testing handbook, 5, 325-345.

Ineris (2013). Méthodologie de surveillance du risque de fontis en cavité souterraine par méthode acoustique. DRS-13-135992-01259B.

9 Annexes

Liste des annexes :

- Annexe 1 : Fiches techniques
- Annexe 2 : Liste des ECME utilisés
- Annexe 3 : Liste des Logiciels utilisés

