

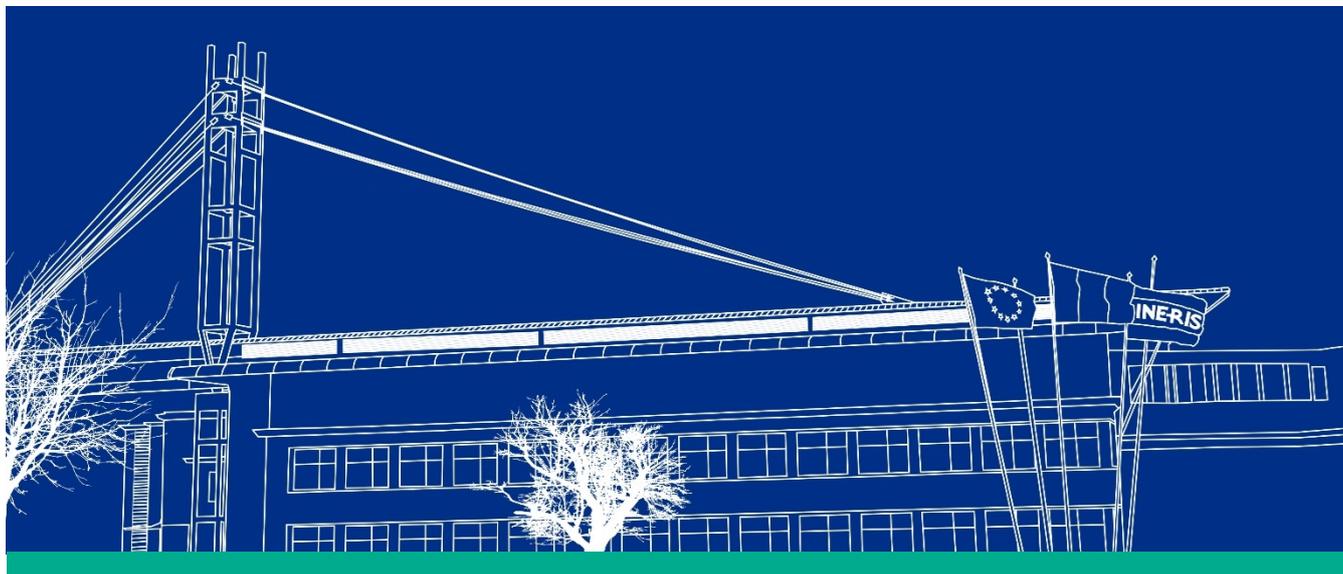


RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

INERIS

maîtriser le risque |  
pour un développement durable |



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 227489 - 2821311 - v1.0

24/02/2025

**Capteurs acoustiques à bas coûts : retour  
d'expérience sur leur utilisation pour la  
surveillance de cavités souterraines à bas  
bruit**

## **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 : S. COCCIA

Vérification : K. DRIF

Approbation : E. KLEIN - le 24/02/2025

Liste des personnes ayant participé à l'étude : R. PACOT, A. LIZEUR

## Table des matières

1	Introduction.....	6
2	Plan de tests.....	6
2.1	Principes généraux.....	6
2.2	La mesure du bruit de fond de la carrière.....	7
2.3	La captation d'un événement avec bruit de fond.....	9
3	Résultats des mesures de bruit de fond et des tests.....	11
3.1	Mesures du bruit de fond sonore de la carrière.....	11
3.2	Test 1 : Détection des événements acoustiques avec bruit de fond.....	11
3.2.1	Résultats des tests de la campagne 2024.....	11
3.2.2	Comparaison des résultats des deux campagnes de chute de poids.....	17
3.3	Test 2 : Evaluation de la résistance du kit PCB à l'humidité sur le long terme.....	20
4	Conclusions.....	22
5	Références.....	24
6	Annexes.....	25

## Résumé

Dans le cadre de sa mission d'appui aux pouvoirs publics, l'Ineris assure une veille technique sur les outils et moyens de surveillance appliqués à la maîtrise des risques géologiques et géotechniques. C'est dans ce contexte qu'en 2021, une étude a été lancée sur les capteurs acoustiques à bas coût (appelés aussi kit microphoniques) pour évaluer la possibilité de les intégrer à un réseau de surveillance acoustique de cavités souterraines.

Une étude de marché a permis d'identifier deux capteurs d'intérêt, notamment le kit microphonique PCB, qui ont ensuite fait l'objet de tests en laboratoire (cf. Coccia et al., 2022b). Ces tests avaient démontré qu'en conditions maîtrisées, le kit PCB avait des performances compatibles avec les enjeux de surveillance acoustique opérationnelle du risque cavités. Ses performances étaient alors comparables à celles de la sonde acoustique SYTMIS-1DM haute résolution développée par l'Ineris entre 2010 et 2013 (cf. Nadim et al., 2013) et pour laquelle le retour d'expérience opérationnel est excellent.

Fort de ces résultats prometteurs, des tests in situ ont été réalisés dans la plateforme expérimentale de la carrière de Saint Maximin (Oise), selon un protocole garantissant la répétabilité des tests (cf. Coccia et al., 2022a), notamment à travers l'enregistrement de chutes de poids. Les résultats de ces tests menés en décembre 2022 ont montré que le kit PCB présentait in situ des performances comparables à celles de la sonde SYTMIS-1DM (cf. Coccia et al., 2023).

L'objectif de ce rapport est d'évaluer la stabilité de la réponse métrologique de ce kit dans le temps et dans les conditions de terrain en reproduisant, en décembre 2024, la campagne de chute de poids et en analysant les signaux d'acquisition continue sur les 24 mois séparant les deux campagnes de tests. Les résultats montrent qu'il n'y a pas eu de perte de performance due à l'humidité sur le long terme.

Tous ces résultats indiquent que le kit PCB pourrait être employé lors d'un projet de surveillance opérationnelle dans une cavité souterraine peu profonde, et peu à moyennement bruitée. Ainsi, par sa taille réduite, il reste discret et facilement mobilisable. En raison de son faible coût, il est envisageable de l'intégrer dans un réseau de surveillance acoustique (à installer dans les endroits plus critiques avec une tolérance à la perte économique), couplé avec des sondes acoustiques à haute résolution et des sondes microsismiques. Ces dernières peuvent palier à des signaux acoustiques de mauvaise qualité en cas de cavité moyennement bruitée. Le nombre de capteurs à installer dépendra de la taille et de la géométrie de la carrière à surveiller et des objectifs de la surveillance.

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

Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, Capteurs acoustiques à bas coûts : retour d'expérience sur leur utilisation pour la surveillance de cavités souterraines à bas bruit, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 227489 - 2821311 - v1.0, 24/02/2025.

### **Mots-clés :**

Kit microphoniques, sondes acoustiques à bas coût, bruit de fond sonore, sonomètre, cavités souterraines

## **Abstract**

As part of its mission to support public authorities, Ineris keeps a technical watch on monitoring tools and resources applied to the control of geological and geotechnical risks. In this context, a study was carried out in 2021 on low-cost acoustic sensors (also known as microphonic kits) to assess the possibility of integrating them into an acoustic monitoring network of underground cavities.

A market study identified two sensors of interest, in particular the PCB microphone kit, which were then tested in the laboratory (see Coccia et al., 2022b). These tests demonstrated that, under controlled conditions, the PCB kit's performance was compatible with the challenges of operational acoustic monitoring of the risk of cavities. Its performance was comparable to that of the high-resolution SYTMIS-1DM acoustic probe developed by Ineris between 2010 and 2013 (see Nadim et al., 2013), for which the operational feedback is excellent.

On the strength of these promising results, in situ tests were carried out on the experimental platform at the Saint Maximin quarry (Oise), using a protocol guaranteeing the repeatability of the tests (see Coccia et al., 2022a), through the recording of weight drops. The results of these tests, carried out in December 2022, showed that the PCB kit performance in situ was comparable to that of the SYTMIS-1DM probe (see Coccia et al., 2023).

The aim of this report is to assess the stability of the metrological response of this kit over time and under field conditions by reproducing the weight loss campaign in December 2024 and analysing the continuous acquisition signals over the 24 months separating the two test campaigns. The results show that there was no loss of performance due to humidity over the long term.

All these results indicate that the PCB kit could be used for an operational monitoring project in a shallow underground cavity with low to medium noise levels. Its small size means that it is discreet and easy to mobilise. Because of its low cost, it can be integrated into an acoustic monitoring network (to be installed in the most critical locations with economic loss tolerance), coupled with high-resolution acoustic probes and microseismic probes. The latter can compensate for poor-quality acoustic signals in medium-noise cavities. The number of sensors to be installed will depend on the size and geometry of the quarry to be monitored and to the monitoring objectives.

### **To cite this document, use the text below:**

Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, Capteurs acoustiques à bas coûts : retour d'expérience sur leur utilisation pour la surveillance de cavités souterraines à bas bruit, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 227489 - 2821311 - v1.0, 24/02/2025.

### **Keywords:**

Microphone kit, low-cost acoustic probes, background noise, sound level meter, underground cavities

# 1 Introduction

Depuis 2021, l'Ineris explore les performances de capteurs acoustiques, dits à bas coût (kits microphoniques), dans le but de les intégrer à des réseaux de surveillance acoustique appliqués à la gestion du risque cavité. Nous rappelons que 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).

Dans ce but, une étude de marché a d'abord été réalisée sur la base de critères définis en amont, pour identifier les kits microphoniques les mieux adaptés. Cette étude a été suivie ensuite de tests en laboratoire sur deux kits sélectionnés (Coccia et al., 2022b). Ces tests, basés sur l'étude de la directivité, de la réponse en fréquence et des intensités limites, ont montré que les deux kits présentaient, 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. A la suite de ces résultats, une première série de tests in situ a été réalisée en 2022 pour l'un des kits : le kit PCB (cf. Coccia et al., 2023). Ces tests ont porté sur la directivité et la captation d'événements en présence de bruit de fond, et ont été effectués sous forme de chute de poids. L'objectif était d'évaluer les conditions de fonctionnement et les performances métrologiques du kit PCB en conditions de terrain. Les tests ont été exécutés dans la plateforme expérimentale de Saint Maximin (carrière Parrain) dans l'Oise (60), i.e. une zone d'instrumentation pédagogique comprenant notamment deux sondes microsismiques (1D et 3D) ainsi que des capteurs météorologiques mesurant l'humidité relative et la température de l'air.

Les résultats obtenus lors de la première campagne de chutes de poids ont permis de confirmer, dans un premier temps, la bonne réponse métrologique du kit PCB. Il restait à vérifier que les performances se maintenaient dans le temps, dans des conditions environnementales difficiles de terrain. Ainsi, le kit a été laissé en acquisition dans la carrière pour une période d'environ 24 mois. En 2024, dans le cadre de notre mission d'appui aux pouvoirs publics, une nouvelle campagne de chutes de poids a été réalisée afin de comparer les résultats obtenus lors de la première campagne et vérifier si une dégradation des performances du kit PCB était survenue. Cette campagne a été réalisée avec les mêmes modalités que la première, selon un protocole rédigé en amont de sa réalisation (cf. Coccia et al., 2022a), elle a été précédée, comme en 2022, d'une mesure du bruit de fond sonore de la carrière à l'aide d'un sonomètre.

Ce rapport présente d'abord des rappels sur le plan de tests mis en œuvre. Il se poursuit par une présentation des résultats de la deuxième campagne de chute de poids. Une comparaison des résultats des deux campagnes de chutes de poids est ensuite proposée. Enfin, ce rapport se termine par les conclusions tirées des résultats obtenus, ainsi que par des recommandations pour dimensionner les réseaux de surveillance acoustique en cavités souterraines.

## 2 Plan de tests

### 2.1 Principes généraux

Avant la réalisation de la campagne de chute de poids en 2022, un protocole a été rédigé (cf. Coccia et al., 2022a). Ce protocole décrit les tests à réaliser, le matériel à utiliser ainsi que les conditions de déroulement des tests afin d'en assurer leur répétabilité, de façon à caractériser la réponse du kit PCB en conditions de terrain (cf. Coccia et al., 2022b et 2022a).

Pour pouvoir comparer la réponse du capteur PCB à celle de la sonde SYTMIS-1DM, dont on maîtrise parfaitement la réponse, une sonde SYTMYS-1DM avait été installée à côté du capteur PCB (cf. Photo 1) à l'emplacement « 1 » (cf. Coccia et al., 2022a) noté « M » dans la Figure 1. Les résultats des tests avaient été enregistrés en simultanément par les deux capteurs acoustiques et un sonomètre, utilisé comme étalon afin de pouvoir comparer avec le plus de précision possible la réponse des deux capteurs acoustiques.

Les paramètres choisis pour l'acquisition sont rappelés dans le Tableau 1.

Les tests ont compris les mesures suivantes :

- ✓ Mesures du bruit de fond de la carrière avec un sonomètre ;
- ✓ Captation d'événements de type chute de poids avec bruit sonore de fond (*test 1*) ;
- ✓ Evaluation de la résistance à l'humidité sur une longue durée (*test 2*) du kit PCB.

Tableau 1 : paramètres d'acquisition pour les deux capteurs acoustiques.

Voies de mesure	Sonde	Microphone	Sensibilité (V/Pa)	Gain de la voie (dB)	Fréquence d'échantillonnage (Hz)
SMM1	SYTMIS-1DM	Bruel&Kjaer micro BK4188	0,0316	10	2000
SMM2	PCB Piezotronics	Kit micro 130A24	0,0124	10	2000



Photo 1 : installation des deux capteurs acoustiques : kit microphonique PCB et sonde SYTMIS-1DM l'un à côté de l'autre sur le même trépied.

## 2.2 La mesure du bruit de fond de la carrière

Le bruit de fond sonore d'une carrière est composé de bruits quasi continus : d'origine naturelle (écoulement d'eau, circulation d'air liée à l'aération naturelle), d'origine anthropique (exploitation, ventilation, passage de camions et autres engins de chantier et bruits urbains) et d'événements ponctuels mais récurrents (chute de gouttes d'eau régulière, par exemple).

Cette mesure se réalise à l'aide d'un sonomètre, sans pondération<sup>1</sup> (appelée également pondération Z), de manière répétée et pendant un temps suffisamment long pour que la mesure puisse être considérée comme caractéristique de la carrière (de quelques dizaines de secondes à quelques minutes). La pondération est une notion importante en mesure acoustique ; les mesures de niveau de pression pouvant varier fortement selon la pondération utilisée. Le sonomètre fournit les niveaux de pression acoustique minimal, moyen (ou équivalent) et maximal d'un enregistrement et les affiche en décibel (dB). Les niveaux de pression sont des « niveaux efficaces » c'est-à-dire mesurés par pas de temps donnés. Plus les pas de temps sont petits plus la mesure se rapproche d'une mesure « instantanée ».

<sup>1</sup> La pondération est une correction de la mesure brute de pression par un coefficient de fonction de la fréquence. Par exemple, pour reproduire ce qui est perçu réellement par une oreille humaine on utilise la pondération « A ». On parle de pondération Z (zéro) quand il n'y a pas de pondération car on s'intéresse à des mesures instrumentales et pas au ressenti par l'oreille humaine. La pondération s'exprime en décibel (dB).

L'analyse spectrale de l'enregistrement peut également être réalisée en quasi-temps réel par cet appareil. Le tableau ci-dessous (cf. Coccia et al., 2023) explique les sigles qui sont utilisés dans ce rapport.

Tableau 2 : terminologie acoustique.

Sigles	Définitions
SPL NPA	Sound Pressure Level ou Niveau de Pression Acoustique en dB
LZeq	Niveau (L-level) de pression acoustique continue équivalent (eq). Mesure au cours d'une durée t, en dB avec pondération « Z »
LZFmin	Niveau de pression minimal avec pondération fréquentielle « Z »
LZFmax	Niveau de pression maximal avec pondération fréquentielle « Z »
LAeq	Niveau de pression acoustique continue équivalent. Mesure au cours d'une durée t, en dB avec pondération « A »

Avant de faire les mesures de bruit de fond sonore dans la carrière Parrain, le sonomètre (de type 2250 Brüel & Kjaer) a été calibré à l'aide d'un calibreur 94-114 dB classe 1 (de type CAL 300). Pendant les mesures, afin de réduire au minimum les réflexions indésirables, le microphone du sonomètre a été déporté de l'appareil avec un câble de 10 m de longueur et positionné sur un trépied (cf. Photo 2). En effet, la seule respiration de l'opérateur peut perturber/influencer la mesure quand le microphone est branché directement au sonomètre.

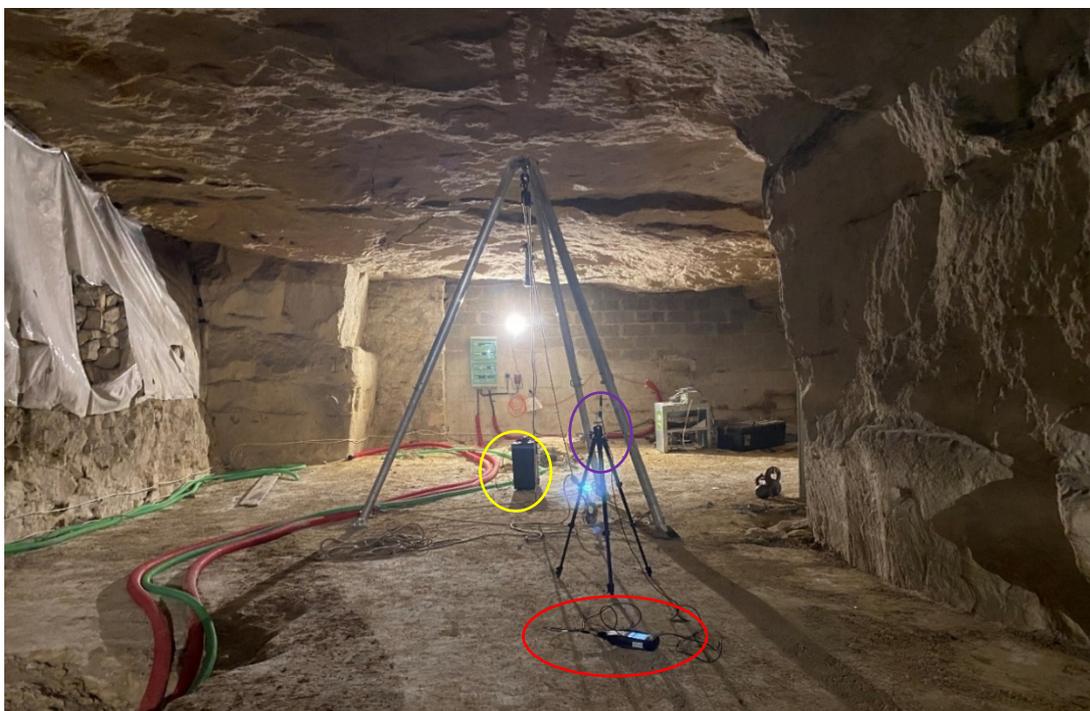


Photo 2 : entouré en rouge le sonomètre avec le câble permettant de déporter son microphone jusqu'à 10 m de distance. Le microphone est positionné sur le trépied (entouré en violet) et à côté du trépied se trouve (entouré en jaune) une source sonore de type 4224 (Sound source 4224, Bruel & Kjaer).

Sur la base de mesures de bruit réalisées par l'Ineris dans d'autres carrières (Ineris, 2013), une carrière peut se définir comme « très silencieuse » quand le niveau de bruit moyen est d'environ 15 à 20 dB (LAeq). Une carrière est « moyennement bruitée » quand le niveau de bruit moyen est de 25 à 40 dB (LAeq) et « très bruitée » quand cette valeur est supérieure à 40 dB (LAeq).

### 2.3 La captation d'un événement avec bruit de fond

Ce test permet de s'assurer que le microphone est en mesure de détecter et enregistrer des événements sonores dus à des mécanismes de dégradation, comme des craquements, chutes de blocs, etc....dans une carrière silencieuse ou à bas bruit. Le test a été réalisé sous forme de chutes de poids.

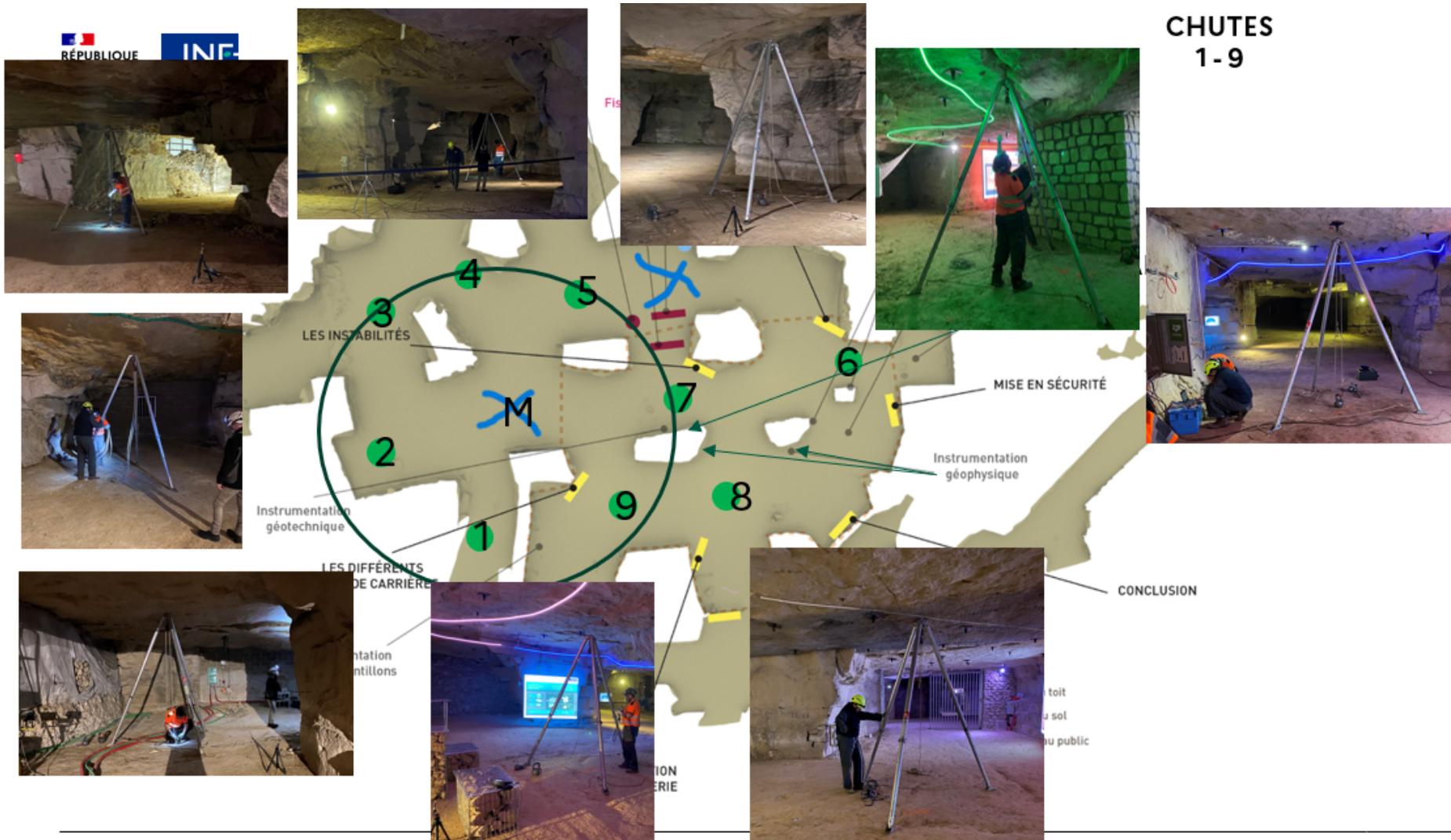
En 2022, lors de la première journée sur site, neuf *points de chutes* avaient été repérés et marqués au sol afin de garantir la reproductibilité du test. Ces emplacements avaient été identifiés préalablement à la mission sur site, choisis dans la zone pédagogique et ses environs (cf. Coccia et al., 2022a et Figure 1). L'objectif était de réaliser les tests autour des deux capteurs afin d'étudier si leur réponse varie en fonction de la distance et de l'angle d'incidence des événements acoustiques (réponse en directivité, cf. Figure 1 et Coccia et al., 2022b).

En 2024, les tests ont été répétés aux neuf points de chute, en suivant le même protocole que celui appliqué en 2022. Pour rappel, en chaque point de mesure trois chutes de poids (poids métalliques de type kettlebell) différents ont été réalisés de 4, 10 et 20 kg, depuis le toit de la carrière à l'aide d'une chèvre. Ce type de poids a été choisi afin de garantir autant que possible la reproductibilité du test. En outre, chaque chute du même poids a été réalisée avec trois différents niveaux de bruit de fond sonore :

1. La première chute en ne prenant en compte que le bruit de fond sonore de la carrière (cf. §2.2).
2. La deuxième chute en ajoutant une source acoustique (de type 4224) en modalité « wideband » pour produire un « bruit rose » qui diffuse des ondes de basses fréquences. Une mesure au sonomètre a été réalisée en correspondance de la chute 7 pour avoir une estimation de la nouvelle valeur de bruit de fond de la carrière. Elle est de 66,6 dB (LAeq).
3. La troisième chute en ajoutant une source acoustique (utilisée comme un hautparleur) et un générateur de fréquence. En effet, cette source ne permettant pas de générer un signal d'une fréquence unique, l'ajout du générateur permet de choisir les fréquences à reproduire. Plusieurs hautes fréquences ont été testées pour augmenter le bruit de fond sonore. La fréquence de 500 Hz a été choisie, car le sifflement produit gêne le moins l'oreille humaine. Elle a été paramétrée afin d'augmenter le bruit de fond sonore de la carrière et la rendre très bruitée et donc encore moins appropriée pour la surveillance acoustique. La source sonore a été réglée au préalable à -20dB et niveau 2 (sur 10 niveaux possibles). Ces réglages ont été effectués afin d'éviter que les fréquences les plus basses ne soient pas détectées. Une mesure au sonomètre a été faite en correspondance de la chute 7 pour avoir une estimation de la nouvelle valeur de bruit de fond de la carrière. Elle est de 80,2 dB (LAeq).

Le choix de faire les chutes en faisant varier le bruit de fond de la carrière permet de tester la capacité de détection des deux capteurs dans une carrière qu'on sait déjà être moyennement bruitée (cf. Coccia et al., 2023).

Afin de caractériser au mieux chaque chute artificielle par les mesures faites par les deux capteurs, une mesure du SPL a également été réalisée en positionnant le microphone du sonomètre à proximité de la chute (cf. Photo 2). Cela signifie que le microphone du sonomètre a été déplacé au fur et à mesure des tests afin qu'il soit toujours près du point de chute des poids.



Institut national de l'environnement industriel et des risques

Figure 1 : emplacement des 9 chutes de poids et photos lors de la chute. La lettre « M » indique l'emplacement des deux capteurs acoustiques.

### 3 Résultats des mesures de bruit de fond et des tests

Cette section présente les résultats des tests de détection d'événements acoustiques réalisés en décembre 2024 sur le kit PCB, ainsi qu'une comparaison avec les résultats des tests similaires effectués en 2022. Avant de procéder à ces tests, une mesure préalable du bruit de fond a été réalisée, et les résultats seront exposés dans une première sous-partie. Enfin, les résultats du test de résistance à l'humidité à long terme du kit PCB seront présentés dans une troisième et dernière sous-partie.

#### 3.1 Mesures du bruit de fond sonore de la carrière

Lors des deux campagnes, un total de 10 mesures de bruit de fond sonore a été réalisé dans la carrière d'une durée chacune de 30 secondes pour que la mesure puisse être considérée comme caractéristique. Une mesure a été faite à chaque point de chute (pour un total de 9 mesures) et une à l'entrée de la carrière (cf. Tableau 3).

Tableau 3 : mesures de bruit de fond au sonomètre. Les résultats sont présentés en termes de niveau de pression acoustique (ou SPL - Sound Pressure Level) équivalent (moyen) en pondération Z et A (LZeq et LAeq).

Emplacement des mesures de bruit de fond	2024		2022	
	LZeq (dB)	LAeq (dB)	LZeq (dB)	LAeq (dB)
CHUTE 1	40,2	27,5	44,3	32,0
CHUTE 2	45,5	35,8	41,1	29,0
CHUTE 3	41,1	32,8	48,5	38,4
CHUTE 4	43,3	24,6	45,1	33,0
CHUTE 5	43,1	28,0	47,7	40,4
CHUTE 6	40,1	28,2	44,0	26,2
CHUTE 7	52,7	28,1	40,5	26,8
CHUTE 8	42,4	32,8	41,0	27,7
CHUTE 9	40,7	24,4	35,3	22,2
ENTREE	42,0	28,6	56,8	35,0

Les mesures pour les deux campagnes ne sont pas trop différentes : pour 5 mesures, les valeurs (LAeq) de 2024 sont supérieures à celles de 2022.

Cette variabilité de mesure vient confirmer le diagnostic établi en 2022 : la carrière de Saint Maximin est dite « **moyennement bruitée** » selon le référentiel établi en 2013 par l'Ineris (cf. section 2.2) ; le bruit de fond sonore dans la carrière est surtout d'origine anthropique (électricité, éclairage, passage humain, accès proche de la route, ...).

#### 3.2 Test 1 : Détection des événements acoustiques avec bruit de fond

##### 3.2.1 Résultats des tests de la campagne 2024

Comme indiqué dans la section 2.3, le test a été réalisé au travers d'une campagne de chutes de poids (cf. Coccia et al., 2022a et 2023). Les résultats sont présentés en termes de niveau de bruit maximal en pondération Z (LZF max en dB) pour le sonomètre et pour les deux capteurs acoustiques (données obtenues avec le logiciel SYTMISview) et ils sont synthétisés dans le Tableau 4 en annexe 1. Nous rappelons que la mesure de SPL faite avec le sonomètre sert d'étalon, pour vérifier la fiabilité des mesures de SPL obtenues avec le kit PCB et la sonde SYTMIS-1DM.

A partir des résultats des chutes, nous constatons que les mesures de SPL max de la sonde SYTMIS-1DM sont en moyenne 7% inférieures à celles du sonomètre (annexe 1). Les mesures de SPL max du kit PCB sont en moyenne 5% inférieures à celles du sonomètre. Ces mêmes résultats avaient été

obtenus lors de la première campagne de 2022 (cf. Coccia et al., 2023). Cela confirme qu'il n'y a pas eu de perte de performances du kit PCB.

Pour rappel, le microphone du sonomètre a été installé à côté de chaque chute, les deux capteurs acoustiques étaient éloignés (distance variable, cf. Figure 1) par rapport à l'emplacement de la chute, ce qui expliquerait leurs valeurs de SPL plus basses (atténuation avec la distance) par rapport à celles enregistrées par le microphone du sonomètre. *13 mesures anormales* sont par ailleurs identifiées pour le SPL du sonomètre (valeurs LZF max en rouge dans le Tableau 4 en annexe 1). Ces mesures sont inférieures à celles des deux capteurs acoustiques. Ces valeurs plus faibles par rapport à celles mesurées par les deux capteurs acoustiques pourraient être expliquées par :

1. la présence de visiteurs lors de la réalisation de certaines chutes étant les capteurs acoustiques plus proches de l'entrée par rapport au micro du sonomètre,
2. la présence d'écoulement d'eau et de gouttelettes près des capteurs acoustiques.

En outre, les mesures des chutes au sonomètre en LZF max de 2024 sont supérieures à celles de 2022. Sur les 81 mesures faites durant la campagne de 2022, seulement 24 mesures sont égales ou légèrement supérieures à celles de 2024 (avec une valeur moyenne de LZFmax de 92,0 dB en 2024 contre 89,6 dB en 2022). Lors de la réalisation des chutes de poids de 2024, la carrière était globalement plus bruitée qu'en 2022 : elle était plus humide avec des chutes de gouttelettes d'eau et des passages assez fréquents de visiteurs à côté de la zone pédagogique de l'Ineris dans la carrière.

Les rapports signal sur bruit (S/B) en termes de niveau de pression (SPL) des deux capteurs pour toutes les chutes sont presque équivalents, en moyenne égale à 3, donc de bonne qualité (Coccia et al., 2023) si l'on considère que parmi les chutes, peu de signaux présentent un S/B (en SPL) égal ou supérieur à 3 (cf. annexe 1 et Figure 2). Il est important de rappeler que la carrière Parrain est moyennement bruitée, et les faibles valeurs de S/B (en SPL) le confirment. Cela dit, si l'on regarde les signaux en digit (avant conversion en SPL), le rapport signal sur bruit est excellent (cf. Figure 2b), ce qui confirme la capacité de détection de chutes de blocs de petits poids par les sonde et kit microphoniques.

Les chutes pour lesquelles le S/B (en SPL) est égal à 1 correspondent généralement à des signaux saturés et de mauvaise qualité, comme c'est le cas pour les chutes avec source et générateur à 500 Hz (cf. Figure 3 et annexe 1). Le S/B est alors également mauvais pour les signaux en digit (cf. Figure 3b). Dans ce cas, l'identification de l'arrivée de l'onde acoustique et le calcul de la SPL ne sont faisables qu'en examinant en parallèle les signaux enregistrés par la sonde sismique installée dans la carrière, et en filtrant éventuellement les signaux acoustiques.

Comme pour la première campagne, une analyse des mesures obtenues pour toutes les chutes (cf. annexe 1) montre que les valeurs de SPL max enregistrées par les deux capteurs acoustiques ne sont pas significativement différentes, que la chute soit effectuée en tenant compte du bruit de fond de la carrière, ou en ajoutant la source sonore et le générateur de fréquence (cf. 2.2.1). Pour cette raison, nous nous concentrerons par la suite uniquement sur les mesures de SPL max obtenues avec le bruit de fond sonore propre à la carrière.

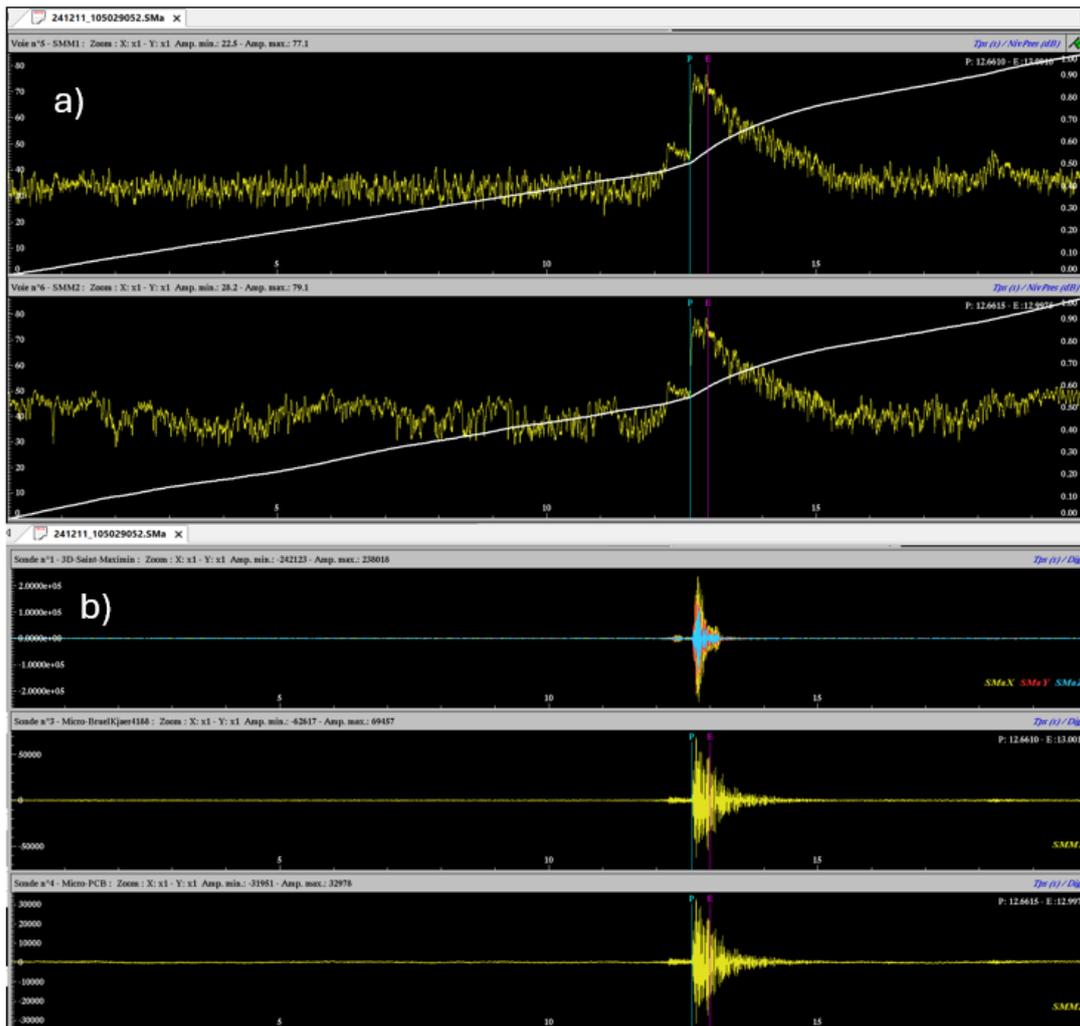


Figure 2 : exemple de signaux de bonne qualité avec un  $S/B = 3$  (chute1 à 4Kg sans source sonore avec le seul bruit de fond sonore de la carrière). a) les signaux en niveau de pression acoustique (SPL max et SPL min). La voie SMM1 correspond à la sonde SYTMIS-1DM et la voie SMM2 correspond au kit PCB. b) les signaux en digits pour la sonde microsismique 3D (Sonde n°1) et pour les deux microphones (Sondes n°3 et 4).

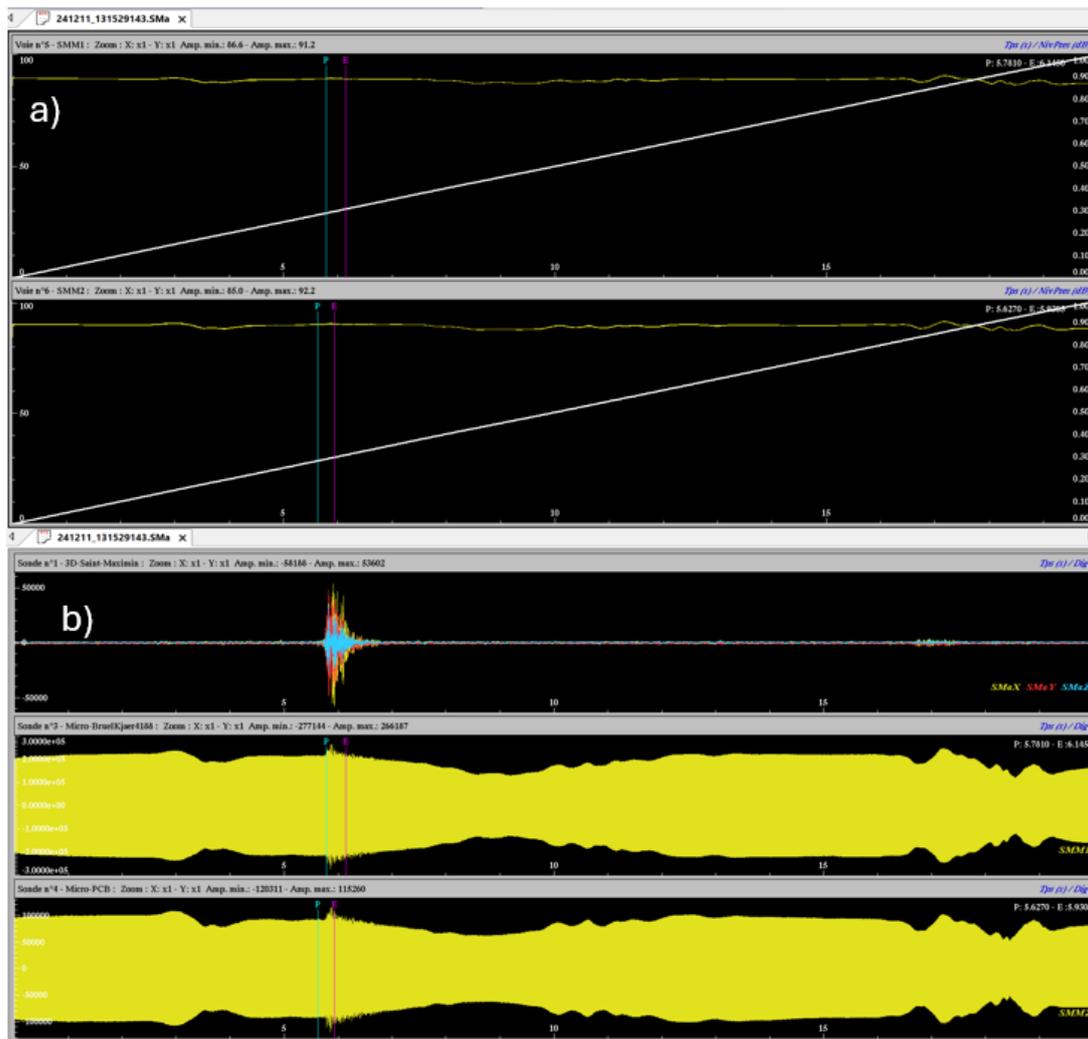


Figure 3 : exemple de signaux de mauvaise qualité avec un  $S/B = 1$  (chute3 à 4 Kg avec source sonore et générateur de fréquence). a) les signaux en niveau de pression acoustique (SPL max et SPL min). La voie SMM1 correspond à la sonde Sytmis-1DM et la voie SMM2 correspond au kit PCB. b) les signaux en digits pour la sonde microsismique 3D (Sonde n°1) et pour les deux microphones (Sondes n°3 et 4).

En représentant les mesures en termes de SPL max en fonction du poids de la chute (cf. Figure 4), on observe une tendance à l'augmentation du SPL en fonction du poids de la chute, ce qui confirme les résultats de la première campagne. Ce résultat reste tout à fait logique : les chutes plus lourdes sont les plus énergétiques. Des anomalies par rapport à cette tendance sont dues à la distance accrue par rapport aux capteurs acoustiques, à l'obstacle entre les capteurs et la source, ou à l'absorption de l'impact du poids au sol. Le résultat reste invariable si l'on prend en compte les tests avec différents bruits de fond sonore de la carrière (cf. § 3.2 et en annexe 1).

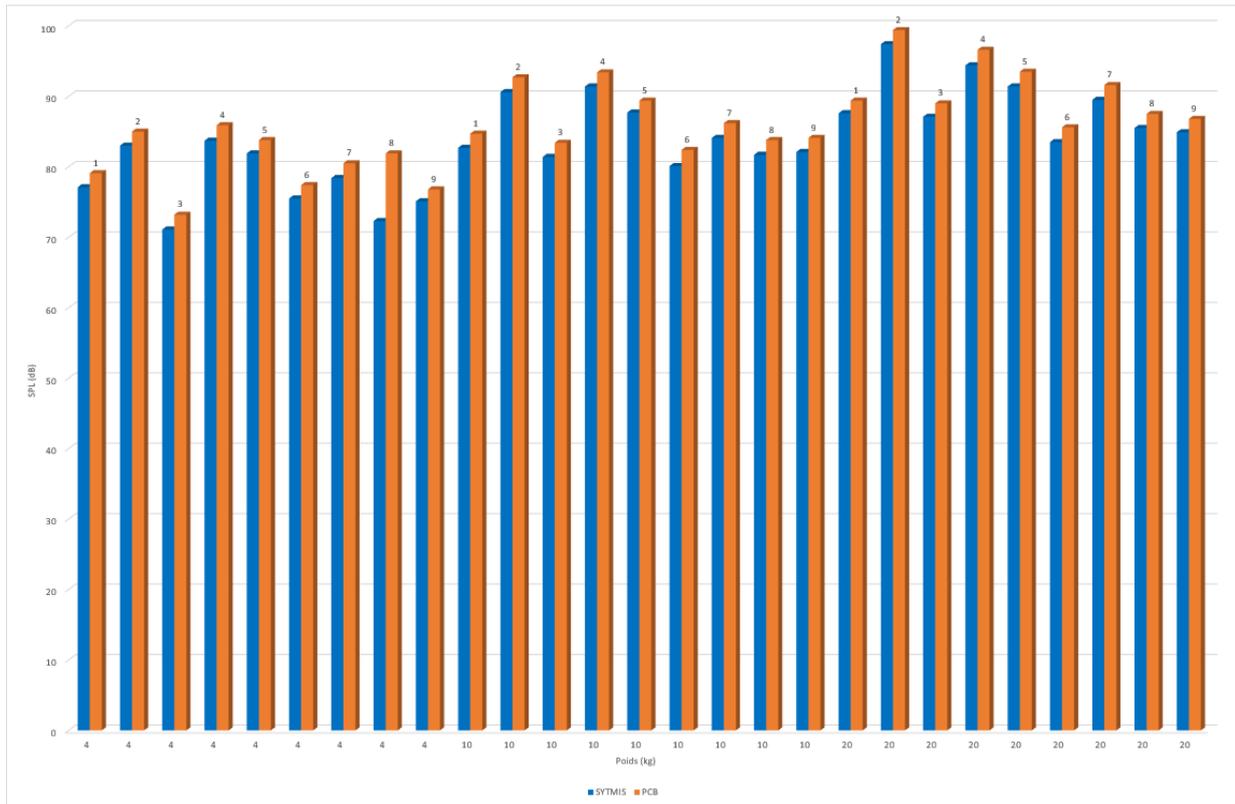
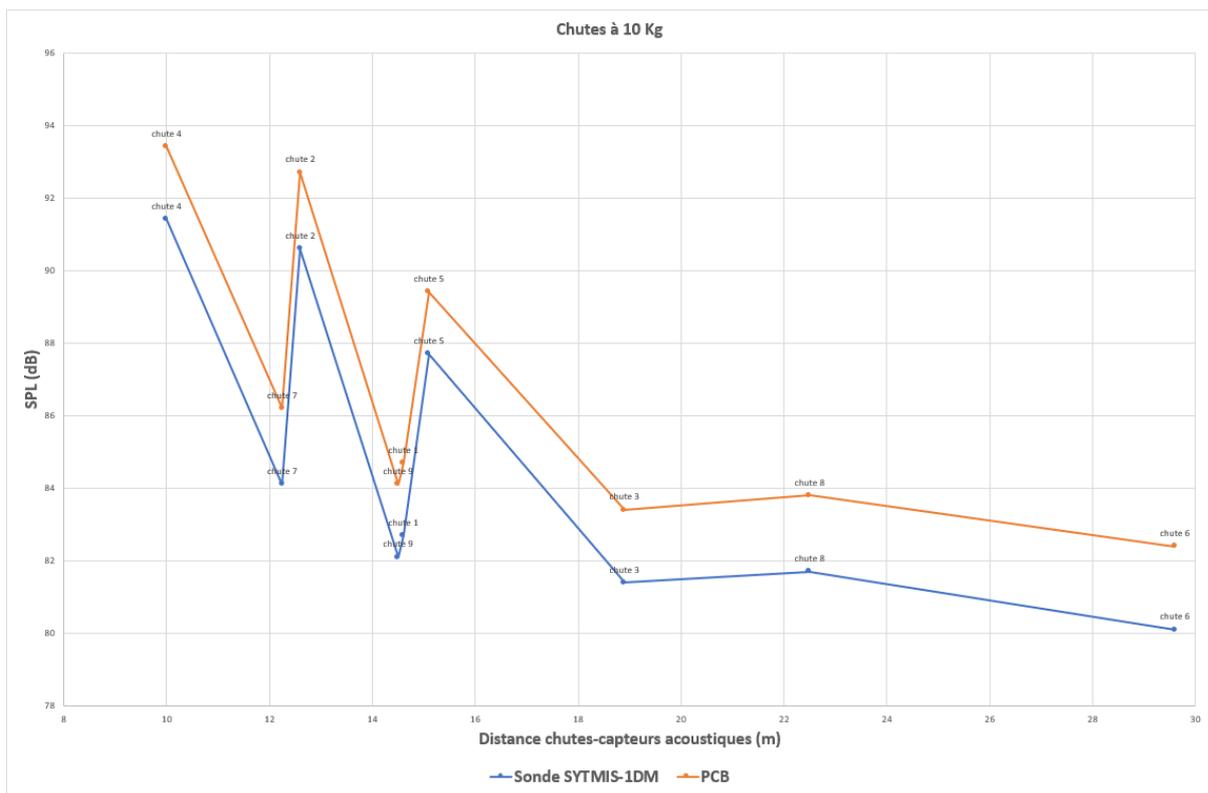
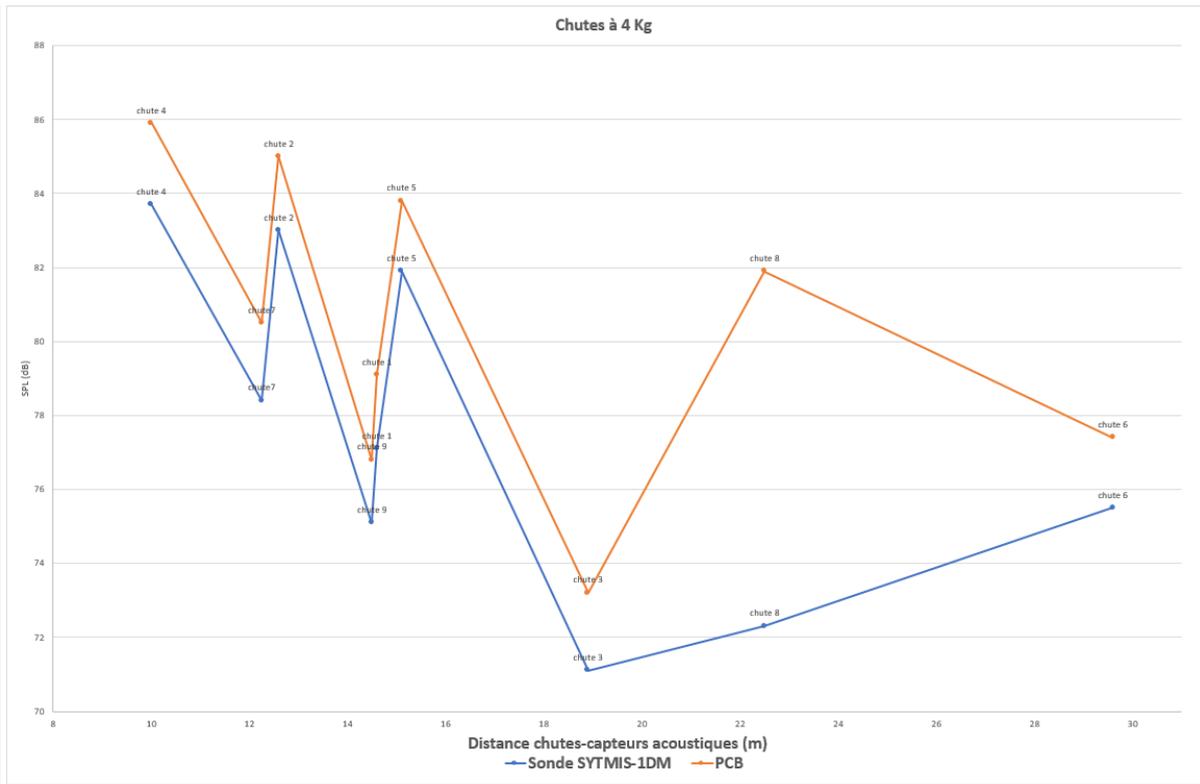


Figure 4 : valeurs de SPL max (en dB) des chutes avec le bruit de fond propre de la carrière en fonction du poids (kg) de la chute. Les histogrammes sont dans l'ordre de réalisation des chutes, i.e. le premier correspond à la première chute faite à 4 Kg et ainsi de suite.

Lorsque les mesures des chutes sont représentées en termes de SPL max en fonction de la distance chute-captteurs acoustiques, on observe que les valeurs de SPL max ont une tendance à diminuer avec la distance (cf. Figure 5). Cependant, certaines exceptions à cette tendance existent. Par exemple, la valeur de SPL de la chute 8 à 4 kg, pour le PCB, où le signal est de très mauvaise qualité (cf. Figure 11 en annexe 2), ce qui rend la valeur de SPL moins fiable.

Toutefois pour les 3 poids, deux mesures ne respectent pas cette tendance : celle de la chute 2 (à 12,6 m de distance) et celle de la chute 5 (à 15,1 m de distance) où il y a une augmentation. La chute 2 est diamétralement à l'opposé de la chute 5 (cf. Figure 1) et les microphones sont presque au milieu entre les deux chutes. Cette variation par rapport à la tendance pourrait être due à une sorte de réponse en directivité liée à la provenance des événements acoustiques. En outre, la chute 9 présente une valeur plus basse de SPL par rapport à la chute 1 caractérisée par la même distance source-micros. Ces deux chutes sont séparées par un pilier. La présence de cet obstacle pourrait être à l'origine de cette valeur de SPL plus faible.



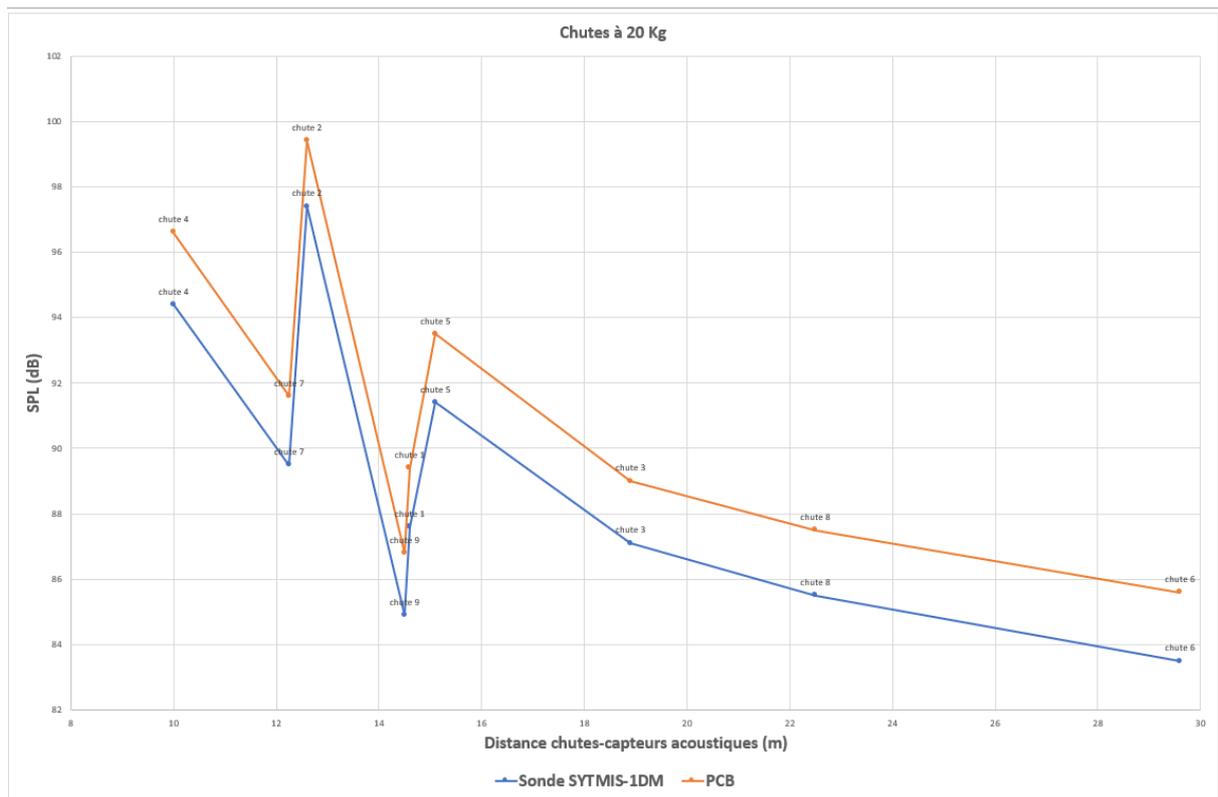


Figure 5 : valeurs de SPL max (en dB) avec le bruit de fond propre de la carrière des chutes à 4, 10 et 20 kg en fonction de la distance chute-captteurs acoustiques (en m).

### 3.2.2 Comparaison des résultats des deux campagnes de chute de poids

Lorsque l'on représente les mesures en termes de SPL max des deux campagnes en fonction du poids de la chute (cf. Figure 6), on observe que la tendance à l'augmentation du SPL en fonction du poids de la chute est confirmée. En comparant les valeurs de SPL max des deux campagnes, on constate que plus de la moitié des mesures de 2022 sont inférieures à celles de 2024. Si l'on fait la même comparaison en termes de SPL min, le constat ne change pas (cf. Figure 12 en annexe). Cela est dû à la présence d'un bruit de fond plus important lors de la réalisation des chutes. La carrière était plus humide par rapport à décembre 2022 et en plus il y a eu pendant la réalisation des chutes du matin et du début de l'après-midi la présence en continu de voix humaines et leur résonance.

La représentation des mesures des chutes en termes de SPL max des deux campagnes en fonction de la distance chute-captteurs acoustiques montre que la tendance identifiée pour la première campagne est confirmée : les valeurs de SPL max diminuent avec la distance (cf. Figure 7). On a également la confirmation de la directivité pour les chutes 2 et 5 et de la valeur de SPL max plus faible pour la chute 9 en raison de la présence d'un pilier (cf. 3.2.1).

Pour les chutes à 10 kg et 20 kg réalisées en 2022, on retrouve une autre variation par rapport à la tendance identifiée : en correspondance de la chute 6 (à 29,6 m de distance), les valeurs de SPL remontaient à nouveau, mais on ne retrouve plus le même comportement pour les chutes réalisées en 2024. La chute 6 est la plus éloignée des capteurs acoustiques, mais il n'y a aucun obstacle (pilier ou autre) entre elle et les capteurs. Aucune explication n'a pu être trouvée pour cette différence de comportement entre les deux campagnes, étant donné que les modalités d'exécution ont été les mêmes.

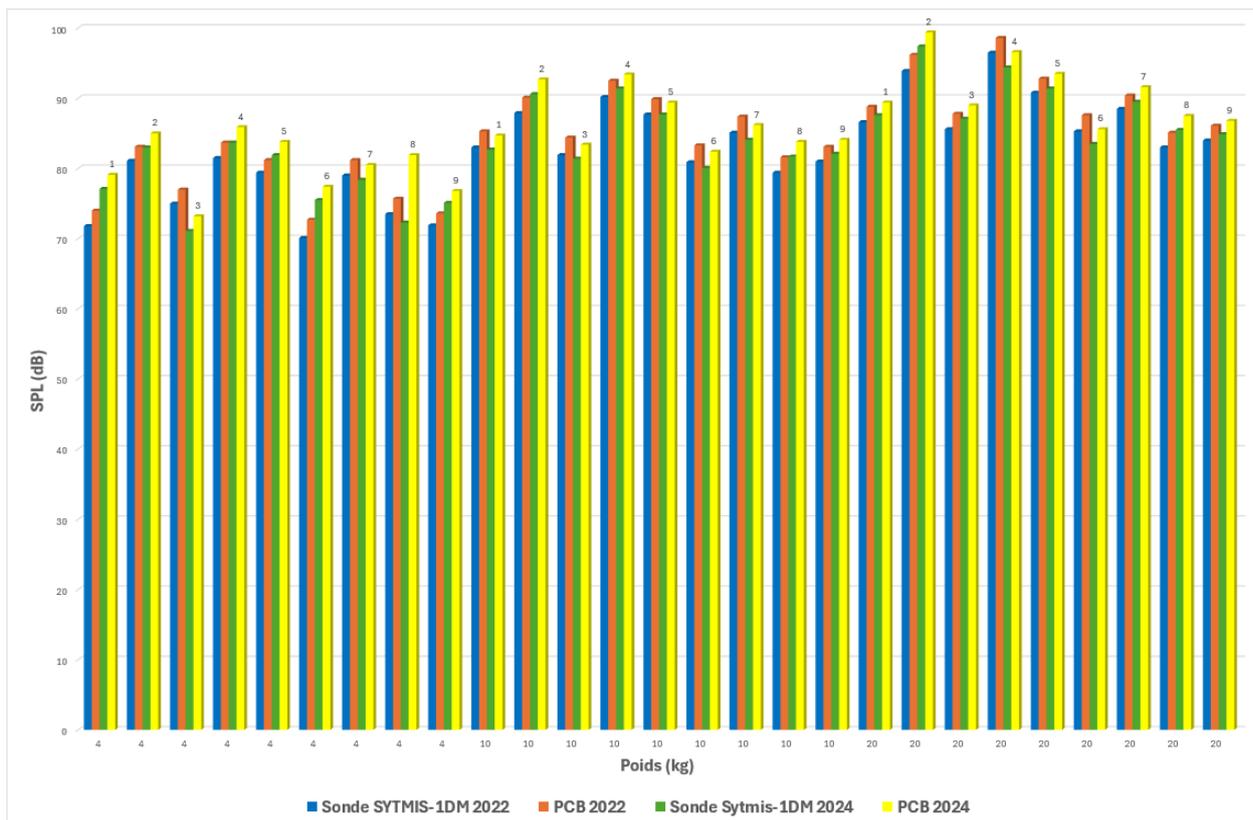
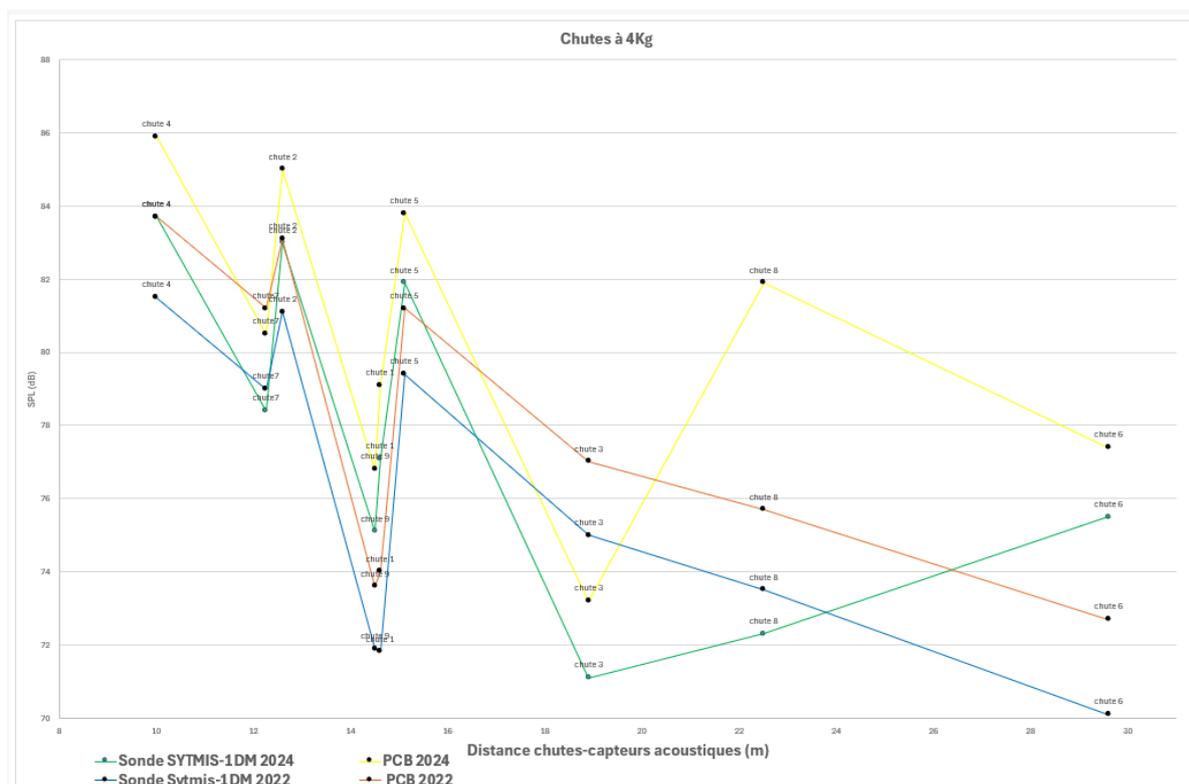


Figure 6 : valeurs de SPL max (en dB) des chutes avec le bruit de fond propre de la carrière en fonction du poids (kg) de la chute pour les deux campagnes de 2022 et 2024. Les histogrammes sont dans l'ordre de réalisation des chutes, i.e. le premier correspond à la première chute faite à 4 Kg et ainsi de suite.



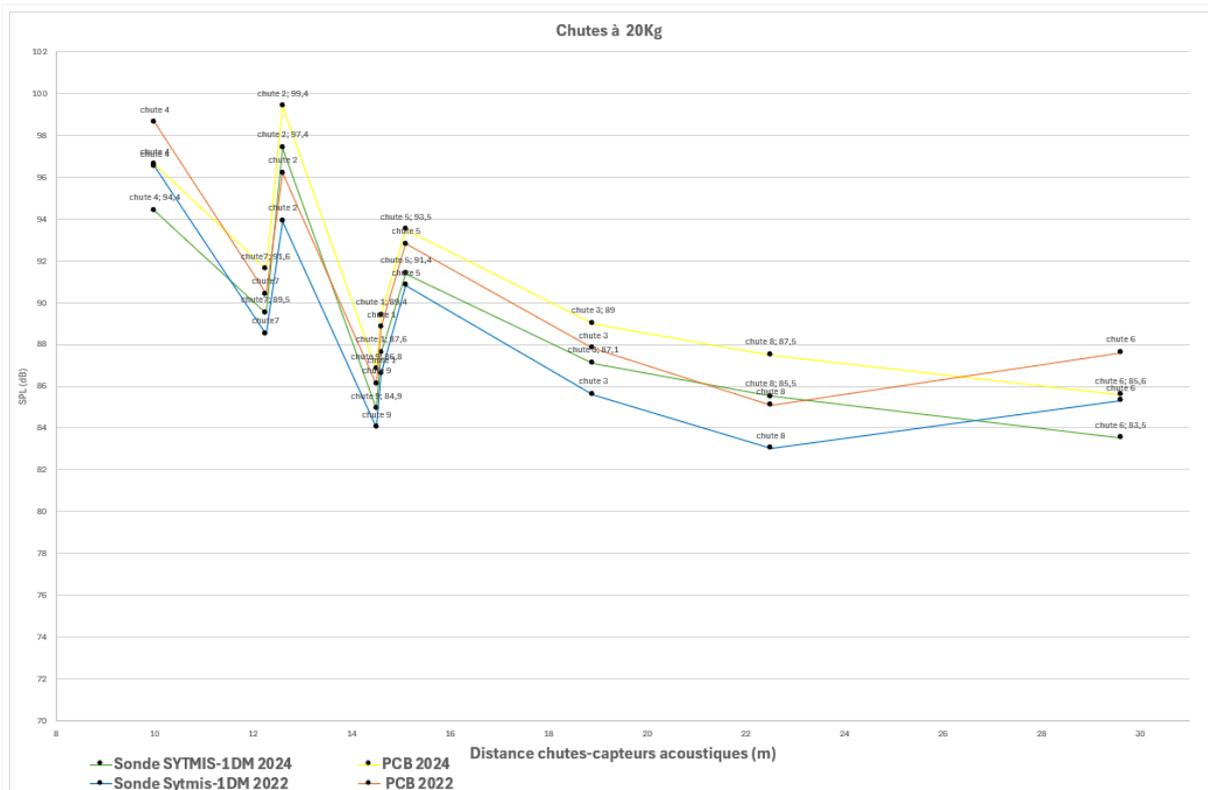
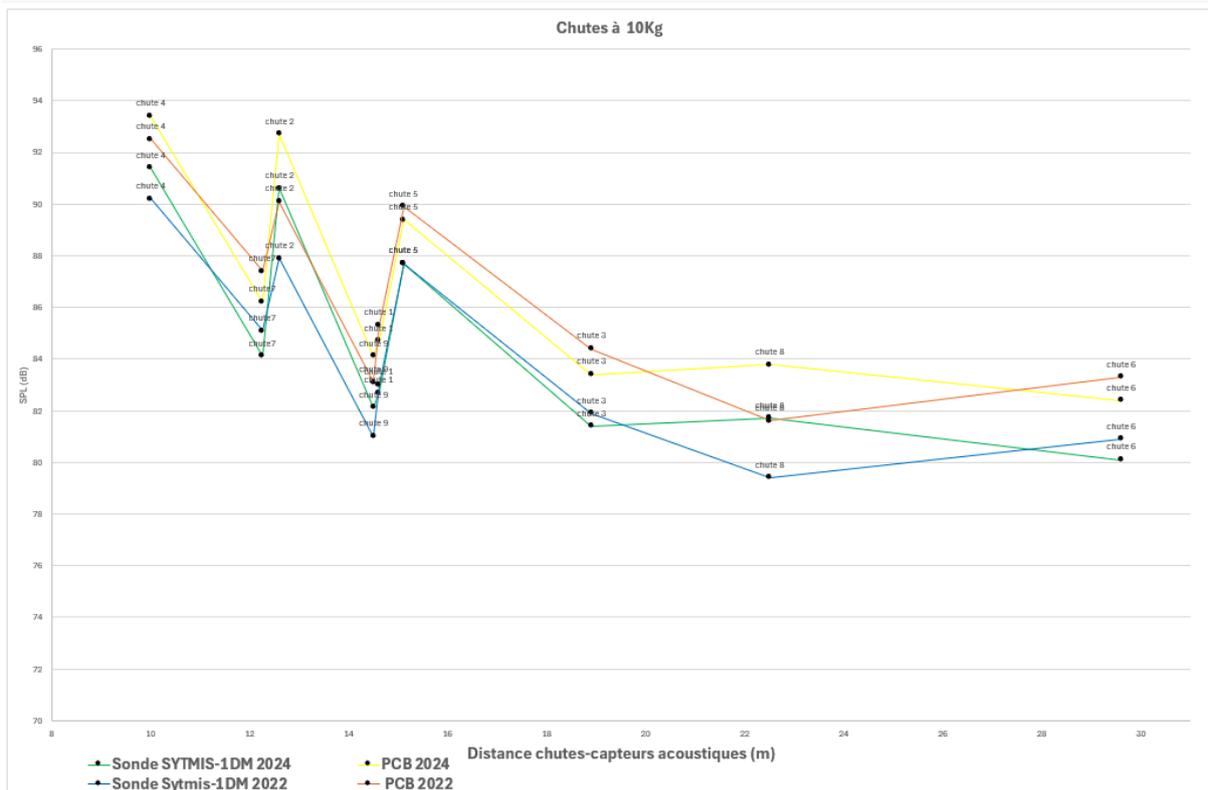


Figure 7 : valeurs de SPL max (en dB) avec le bruit de fond propre de la carrière des chutes à 4, 10 et 20 kg en fonction de la distance chute-captteurs acoustiques (en m).

En réalisant le même graphe et en prenant en compte les autres tests avec différents bruits de fond sonore de la carrière, la tendance identifiée reste inchangée.

### 3.3 Test 2 : Evaluation de la résistance du kit PCB à l'humidité sur le long terme

Le dernier test a consisté à laisser le kit PCB et la sonde SYTMIS-1DM en acquisition continue sur place dans la carrière après la réalisation de la campagne de chutes de poids de 2022 afin d'évaluer à long-terme les performances du kit PCB. Ci-dessous, la Figure 8 montre les variations d'humidité relative et de température de la carrière sur toute la période du test. Le taux d'humidité relative est presque constant, de l'ordre de 88%, et les fluctuations saisonnières de température restent faibles, la température oscille entre 10 et 12°C.

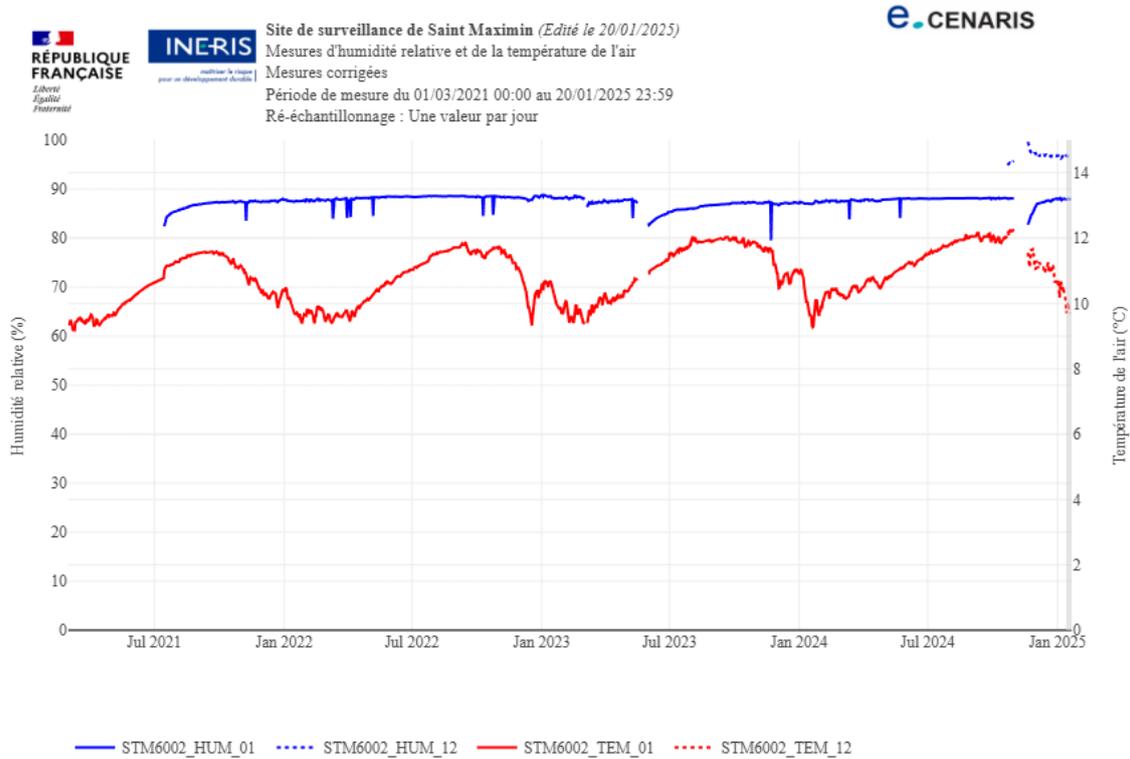


Figure 8 : courbes d'humidité relative et température de la carrière de Saint Maximin obtenues à partir des capteurs installés dans le cadre de l'instrumentation pédagogique (source e.cenaris).

Lors de la campagne de chute de poids de 2024 les signaux enregistrés ont été récupérés et analysés. Ci-dessous quelques exemples d'enregistrements de signaux acoustiques (cf. Figure 9 et Figure 10) causés probablement par des petites chutes de pierres ou des craquements. On peut noter dans les deux cas que les valeurs de SPL max sont équivalentes pour les deux capteurs, le kit PCB ayant une valeur légèrement plus élevée de SPL max. Quant aux valeurs de SPL min, elles sont plus importantes pour le kit PCB, cela est dû très probablement à la sensibilité différente des deux capteurs (cf. Tableau 1).

Ces signaux et les résultats des chutes démontrent qu'il n'y a pas eu de perte de performances du kit PCB dans le temps en dépit des conditions environnementales agressives de la carrière.

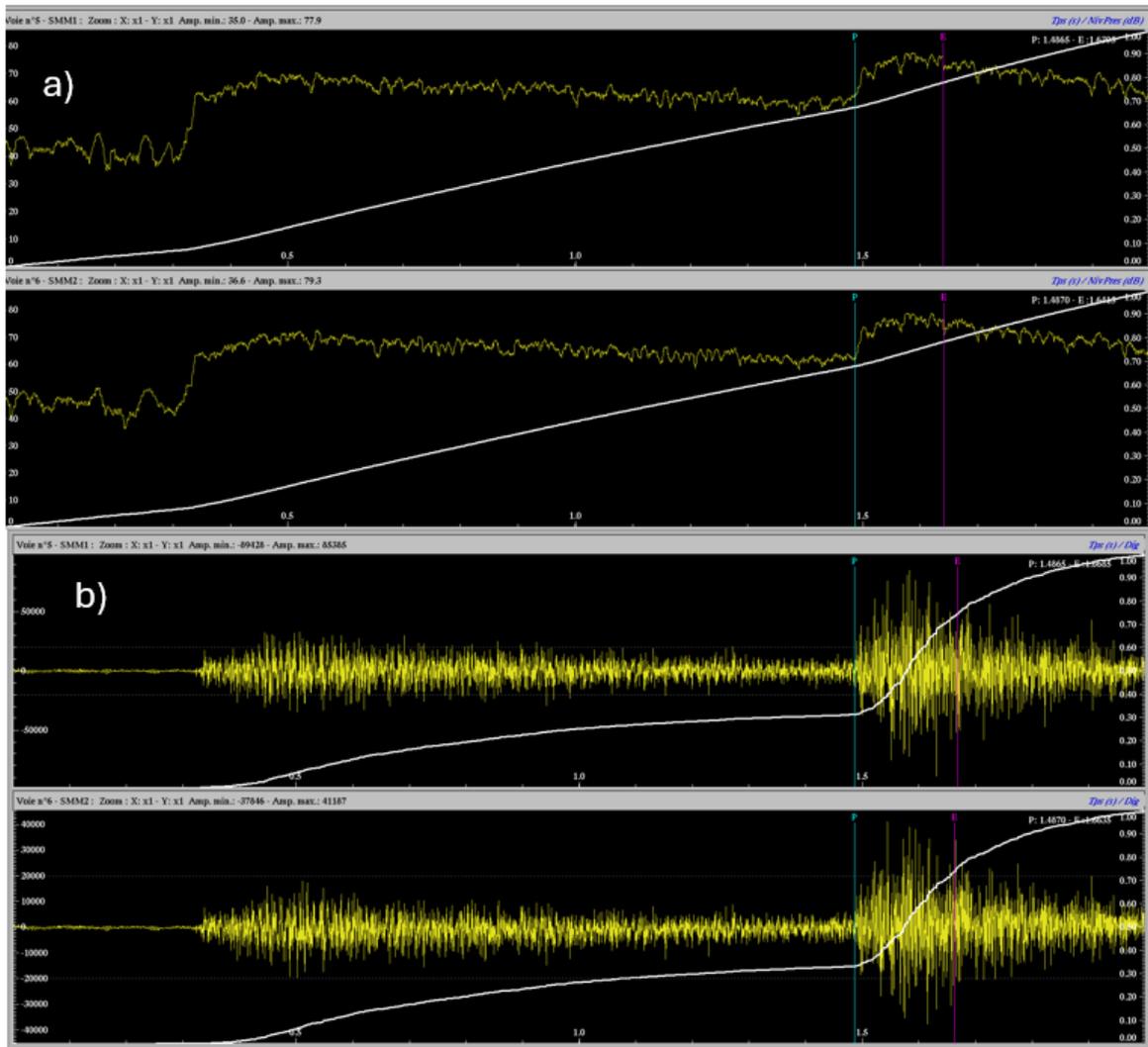


Figure 9 : enregistrement acoustique du 02/01/2023 à 14h46. a) les signaux en niveau de pression acoustique (SPL max et SPL min). La voie SMM1 correspond à la sonde SYTMIS-1DM et la voie SMM2 correspond au kit PCB. b) les signaux en digits

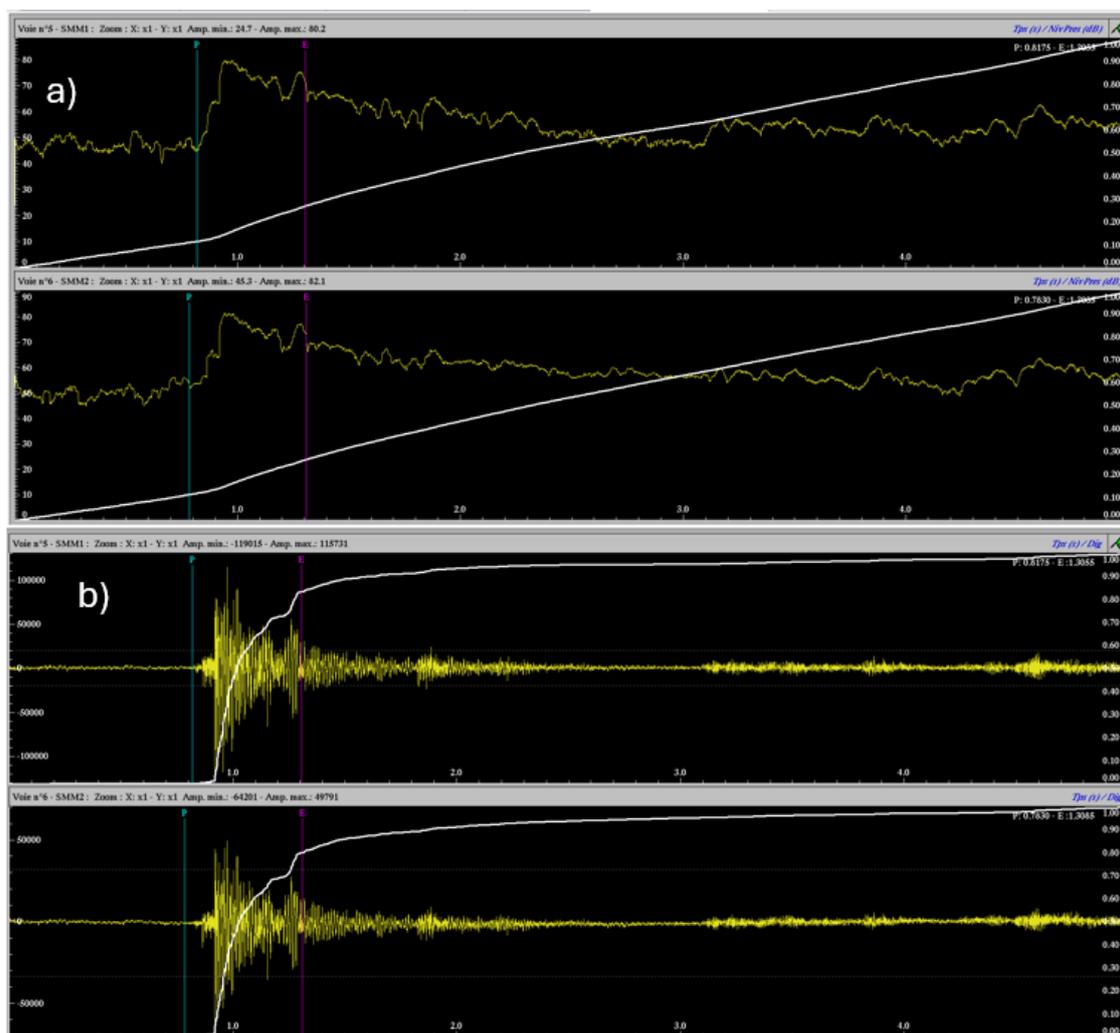


Figure 10 : enregistrement acoustique du 28/11/2024 à 10h14 TU. a) les signaux en niveau de pression acoustique (SPL max et SPL min). La voie SMM1 correspond à la sonde SYTMIS-1DM et la voie SMM2 correspond au kit PCB. b) les signaux en digits

## 4 Conclusions

Ce rapport vient conclure les travaux engagés en 2021 pour étendre la plage d'instruments de surveillance acoustique de cavités souterraines. Il fait suite à une étude de marché qui avait permis d'identifier deux kits microphoniques à bas coût d'intérêt, dont les performances avaient d'abord été étudiées en laboratoire en conditions contrôlées. Seul l'un des deux, le kit microphonique PCB, avait alors présenté des performances compatibles avec les enjeux de surveillance, et il restait à vérifier le maintien de ses performances en conditions de terrain et dans la durée.

Ce rapport présente les résultats de deux campagnes de chutes de poids réalisées dans la carrière Parrain à Saint Maximin en décembre 2022 puis en décembre 2024. Les résultats de la deuxième campagne, comparés à ceux de la première démontrent que le kit PCB est parfaitement adapté aux enjeux d'une surveillance du risque cavité. Ses performances demeurent constantes dans le temps, même dans l'environnement humide et agressif de la carrière.

Pour valider la réponse métrologique du kit PCB, une sonde haute résolution SYTMIS-1DM, a été installée à côté du kit PCB. Un sonomètre a été également utilisé comme étalon afin d'évaluer le plus précisément possible la réponse du kit PCB. Les résultats obtenus montrent que les mesures de SPL max de la sonde SYTMIS-1DM sont en moyenne 7% inférieures à celles du sonomètre, et celles du kit PCB sont en moyenne 5% inférieures aux mesures du sonomètre. Les mêmes résultats ont été obtenus

lors de la première campagne de 2022 (cf. Coccia et al., 2023), ce qui confirme l'absence de perte de performances du kit PCB. Il est à noter que le microphone du sonomètre est plus précis et extrêmement sensible. Plus généralement, les légers écarts de mesure entre les différents instruments (kit PCB, sonde SYTMIS-1DM et sonomètre) peuvent s'expliquer par le fait que leur sensibilité intrinsèque n'est pas parfaitement identique.

Les tests ont également révélé une relation logique entre le SPL et le poids des chutes, ainsi qu'une diminution du SPL avec la distance chutes-capteurs acoustiques, en cohérence avec d'autres études (Nadim et al., 2013). Les rapports signal/bruit en SPL sont relativement faibles, ce qui pourrait être attribué au fait que la carrière est « moyennement bruitée ». Cela dit, si l'on regarde les signaux en digits, le rapport signal/bruit est dans l'ensemble excellent, sauf lorsque l'on génère un bruit de fond supplémentaire de fréquence élevée, à l'aide d'une source dédiée. Dans ces cas de figure, il est essentiel d'avoir une sonde sismique ancrée dans le massif : l'examen en parallèle des traces sismiques et acoustiques, en digit, permet alors de bien identifier dans le bruit, l'arrivée d'ondes acoustiques.

Par ailleurs, les données collectées sur la durée (près de 24 mois), permettent de confirmer que l'humidité de la carrière n'influe pas ou très peu sur les performances métrologiques du kit PCB : les analyses des signaux d'acquisition continue ont montré que les SPL max sont quasi identiques entre les deux capteurs (kit PCB, sonde SYTMIS-1DM).

Au vu de l'ensemble des résultats acquis, il apparaît tout à fait opportun de combiner des sondes SYTMIS-1DM haute résolution et des kits PCB dans les dispositifs de surveillance, de manière à densifier les réseaux de capteurs à coûts maîtrisés. L'idée serait de déployer les kits PCB préférentiellement dans les zones où des chutes de blocs pourraient se produire et endommager le matériel, afin de minimiser les pertes économiques. Bien sûr, le nombre de capteurs dépendra de la taille et de la géométrie de la carrière et des besoins de localisation / caractérisation des événements acoustiques. Comme vu aussi dans ce rapport, l'ajout de sondes microsismiques peut présenter un avantage certains dans le cas de carrières moyennement bruitées, car elles peuvent faciliter l'identification des arrivées d'ondes. Enfin, pour rappel, comme préconisé en 2022 (Coccia et al., 2022b) la phase de dimensionnement du réseau acoustique devra autant que possible s'appuyer sur une analyse modale<sup>2</sup> de la carrière.

---

<sup>2</sup> 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).

## 5 Références

**Coccia S.**, DEGAS M. et Poulard F., Klein, 2022a. Protocole de tests acoustiques de la carrière de Saint Maximin. Note interne, réf. Ineris : Ineris-206835-2756477-v1.

**Coccia S.**, Conil N. et Klein E., 2022b. E. Utilisation de kits microphoniques à bas coût pour la surveillance de cavités souterraines. Rapport Ineris, réf. Ineris : Ineris-2043912726064-Rap-v1 (<https://www.ineris.fr/fr/utilisation-kits-microphoniques-bas-cout-surveillance-cavites-souterraines>).

**Coccia S.**, Contrucci I. et Klein E., 2023. Resultats des chutes de poids obtenus avec le KIt microphonique PCB et la sonde sYtmis-1d dans la plateforme saint maximin – Carriere parrain. Note technique Ineris, réf. Ineris- 212805-2767165-NTE-v1.

**Nadim C.**, Klein E. et Bigarré P., 2013. Méthodologie de surveillance du risque de fontis en cavité souterraine par méthode acoustique. Rapport Ineris, réf. Ineris : DRS-13-135992-01259B (<https://www.ineris.fr/fr/methodologie-surveillance-risque-fontis-cavite-souterraine-methode-acoustique>).

## 6 Annexes

Liste des annexes :

- **Annexe 1** : tableau avec les résultats du test : chutes de poids.
- **Annexe 2** : signaux de la chute 8 à 4Kg.
- **Annexe 3** : valeurs de SPL min (en dB) des chutes avec le bruit de fond propre de la carrière en fonction du poids (kg) de la chute pour les deux campagnes de 2022 et 2024.
- **Annexe 4** : logiciels utilisés.
- **Annexe 5** : ECME utilisés.

## ANNEXE 1

*Tableau 4 : résultats détaillés des chutes de poids en termes de SPL, obtenus à partir du sonomètre, et deux capteurs acoustiques. Le rapport signal sur bruit (S/B) est calculé à partir des résultats obtenus sur le logiciel SYTMISauto en termes de SPL max et min (pondération Z). LZF max indique le niveau de pression (SPL) max en pondération Z (LZF max) : « L » indique le niveau, level en anglais, et « F » est une constante de temps. En jaune des valeurs de SPL du sonomètre assez basses et en rouge des valeurs S/B plus basses par rapport aux autres enregistrements.*

CHUTES	HEURE	POIDS (Kg)	Distance chute/Micros (m)	SOURCE SONORE	LZF max (dB) Sonomètre	SPLmax (dB) Sonde Sytmis-1DM	SPLmin (dB) Sonde Sytmis-1DM	S/B Sonde Sytmis-1DM	SPLmax (dB) PCB	SPLmin (dB) PCB	S/B PCB
1	11:50:18	4	14,6	NON	82,9	77,1	22,5	3	79,1	28,2	3
	11:51:10			OUI BB	81,4	76,6	29,8	3	78,4	29,5	3
	11:51:45			OUI 500HZ	89,1	82	50,6	2	83,9	53,4	2
	11:52:12	10		NON	86,2	82,7	29,7	3	84,7	30,6	3
	11:53:21			OUI BB	88,5	83,0	51,5	2	85,0	54,4	2
	11:53:53			OUI 500HZ	90,2	84,1	23,0	4	86,9	29,3	3
	11:55:00	20		NON	77,9	87,6	28,3	3	89,4	30,8	3
	11:55:39			OUI BB	94,6	87,1	51,1	2	89,0	51,9	2
	11:56:50			OUI 500HZ	95,3	89,5	21,5	4	91,9	26,7	3
2	12:06:53	4	12,6	NON	87,0	83,0	15,5	5	85,0	31,3	3
	12:07:25			OUI BB	88,1	84,0	32,7	3	85,9	43,7	2
	12:07:50			OUI 500HZ	89,0	87,9	27,4	3	89,5	31,5	3
	12:10:11	10		NON	91,6	90,6	27,3	3	92,7	32,3	3
	12:10:47			OUI BB	92,0	90,9	51,4	2	92,9	48,8	2
	12:11:13			OUI 500HZ	93,0	91,9	30,4	3	93,8	36,0	3
	12:13:09	20		NON	98,0	97,4	27,7	4	99,4	31,5	3
	12:13:36			OUI BB	96,8	96,2	38,4	3	99,8	41,4	2
	12:14:07			OUI 500HZ	96,1	97,9	31,9	3	99,7	36,7	3
3	14:13:58	4	18,9	NON	81,8	71,1	41,0	2	73,2	43,1	2
	14:14:36			OUI BB	82,1	76,7	48,2	2	78,8	49,9	2
	14:15:09			OUI 500HZ	99,1	91,2	86,6	1	92,2	85,0	1
	14:16:19	10		NON	88,1	81,4	39,8	2	83,4	41,2	2

CHUTES	HEURE	POIDS (Kg)	Distance chute/Micros (m)	SOURCE SONORE	LZF max (dB) Sonomètre	SPLmax (dB) Sonde Sytmis-1DM	SPLmin (dB) Sonde Sytmis-1DM	S/B Sonde Sytmis-1DM	SPLmax (dB) PCB	SPLmin (dB) PCB	S/B PCB
	14:16:45	20		OUI BB	88,3	81,4	39,4	2	83,5	46,2	2
	14:17:10			OUI 500HZ	98,6	90,0	37,2	2	91,0	37,1	2
	14:18:06			NON	9,05	87,1	10,6	8	89,0	38,3	2
	14:18:36			OUI BB	95,1	88,0	31,8	3	89,4	40,7	2
	14:19:08			OUI 500HZ	99,7	91,3	36,0	3	92,6	40,1	2
4	14:26:07	4	10	NON	84,6	83,7	29,6	3	85,9	33,5	3
	14:26:33			OUI BB	83,4	81,5	31,4	3	84	33,2	3
	14:27:01			OUI 500HZ	92,0	87,9	26,6	3	89,4	31,6	3
	14:28:01	10		NON	91,3	91,4	26,1	4	93,4	29,7	3
	14:28:26			OUI BB	93,0	92,0	54,9	2	93,1	56,1	2
	14:28:56			OUI 500HZ	95,5	92,7	30,8	3	94,4	32,4	3
	14:30:08	20		NON	96,5	94,4	30,3	3	96,6	34,0	3
	14:30:38			OUI BB	96,5	95,3	29,3	3	97,4	34,2	3
	14:31:02			OUI 500HZ	95,4	95,3	30,2	3	97,2	33,1	3
	5	14:37:07		4	15,1	NON	86,6	81,9	26,1	3	83,8
14:37:44		OUI BB	86,3			81,4	44,9	2	83,3	52,3	2
14:38:12		OUI 500HZ	92,6			81,0	28,0	3	83,2	31,3	3
14:39:01		10	NON	93,5		87,7	27,4	3	89,4	32,6	3
14:39:26			OUI BB	93,5		88,0	33,9	3	89,9	44,9	2
14:39:49			OUI 500HZ	95,8		89,0	26,8	3	91,1	31,9	3
14:40:56		20	NON	98		91,4	24,2	4	93,5	30,5	3
14:41:23			OUI BB	97,4		91,1	52,1	2	93,2	47,4	2
14:41:51			OUI 500HZ	97,1		89,1	31,8	3	92,4	31,3	3
6	14:53:38	4	29,6	NON	84,7	75,5	31,1	2	77,4	33,5	2
	14:54:03			OUI BB	84,7	76,0	33,4	2	78,0	49,6	2
	14:54:43			OUI 500HZ	97,6	83,4	78,9	1	84,7	80,2	1

CHUTES	HEURE	POIDS (Kg)	Distance chute/Micros (m)	SOURCE SONORE	LZF max (dB) Sonomètre	SPLmax (dB) Sonde Sytmis-1DM	SPLmin (dB) Sonde Sytmis-1DM	S/B Sonde Sytmis-1DM	SPLmax (dB) PCB	SPLmin (dB) PCB	S/B PCB
	14:55:43	10		NON	88,2	80,1	25,3	3	82,4	35,9	2
	14:56:11			OUI BB	87,1	81,9	31,8	3	82,8	36,3	2
	14:56:47			OUI 500HZ	97,8	83,7	30,9	3	85,8	35,3	2
	14:57:53	20		NON	90,8	83,5	32,5	3	85,6	33,9	3
	14:58:24			OUI BB	88,8	82,6	49,9	2	84,6	51,8	2
	14:59:03			OUI 500HZ	98,2	85,8	75,5	1	87,4	77,0	1
7	15:15:55	4	12,25	NON	82,7	78,4	30,2	3	80,5	13,6	6
	15:16:25			OUI BB	84,7	80,1	52,1	2	82,7	54,9	2
	15:16:49			OUI 500HZ	95,5	87,0	28,6	3	87,8	34,5	3
	15:17:41	10		NON	93,1	84,1	25,7	3	86,2	34,2	3
	15:18:06			OUI BB	93,0	83,4	46,9	2	85,5	47,2	2
	15:18:29			OUI 500HZ	97,0	88,1	34,7	3	88,8	40,9	2
	15:19:27	20		NON	97,9	89,5	28,3	3	91,6	31,8	3
	15:19:54			OUI BB	97,8	88,2	29,4	3	90,4	36,0	3
	15:20:28			OUI 500HZ	99,5	90,9	75,7	1	92,5	72,5	1
8	15:29:11	4	22,5	NON	84,2	72,3	32,9	2	81,9	39,5	2
	15:29:38			OUI BB	85,6	72,6	31,3	2	74,6	34,7	2
	15:30:08			OUI 500HZ	95,2	82,6	27,4	3	83,6	30,5	3
	15:31:13	10		NON	92,9	81,7	27	3	83,8	30,0	3
	15:31:41			OUI BB	93,8	82,4	30,8	3	84,3	34,2	2
	15:32:02			OUI 500HZ	96,4	85,5	25,5	3	87,1	28,6	3
	15:32:55	20		NON	95,4	85,5	31,4	3	87,5	34,5	3
	15:33:23			OUI BB	94,7	85,3	49,3	2	87,3	48,4	2
	15:34:06			OUI 500HZ	96,4	88,4	80,0	1	90,4	80,2	1
9	15:43:28	4	14,5	NON	84,3	75,1	28,2	3	76,8	32,3	2
	15:43:51			OUI BB	83,6	83,1	18,9	4	85,6	21,0	4

CHUTES	HEURE	POIDS (Kg)	Distance chute/Micros (m)	SOURCE SONORE	LZF max (dB) Sonomètre	SPLmax (dB) Sonde Sytmis-1DM	SPLmin (dB) Sonde Sytmis-1DM	S/B Sonde Sytmis-1DM	SPLmax (dB) PCB	SPLmin (dB) PCB	S/B PCB
	15:44:11	10		OUI 500HZ	97,8	82,6	10,3	8	85,5	10,3	8
	15:44:57			NON	91,2	82,1	28,1	3	84,1	32,6	3
	15:45:18			OUI BB	90,9	83,6	23,0	4	86,0	24,6	3
	15:45:44			OUI 500HZ	98,5	84,4	49,2	2	87,3	66,5	1
	15:46:29	20		NON	96,2	84,9	28,2	3	86,8	30,1	3
	15:46:56			OUI BB	98,5	86,9	20,2	4	88,7	28,9	3
	15:47:18			OUI 500HZ	99,3	88,2	18,4	5	90,4	25,6	4

## ANNEXE 2

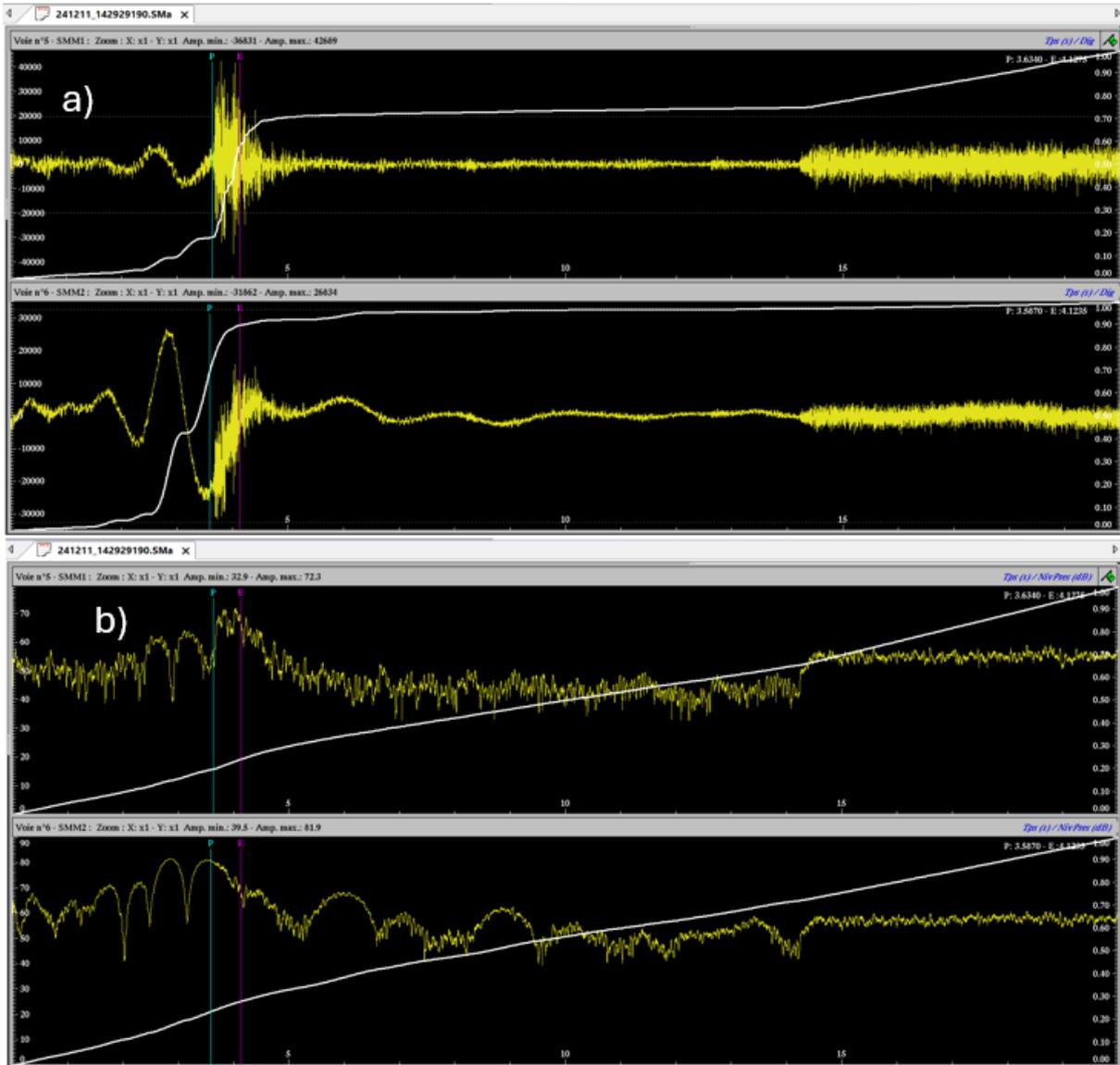


Figure 11 : signaux de la chute 8 à 4Kg : a) les signaux en digits et b) les signaux en niveau de pression acoustique (SPL max et SPL min). La voie SMM1 correspond à la sonde Sytmsis-1DM et la voie SMM2 correspond au kit PCB.

### ANNEXE 3

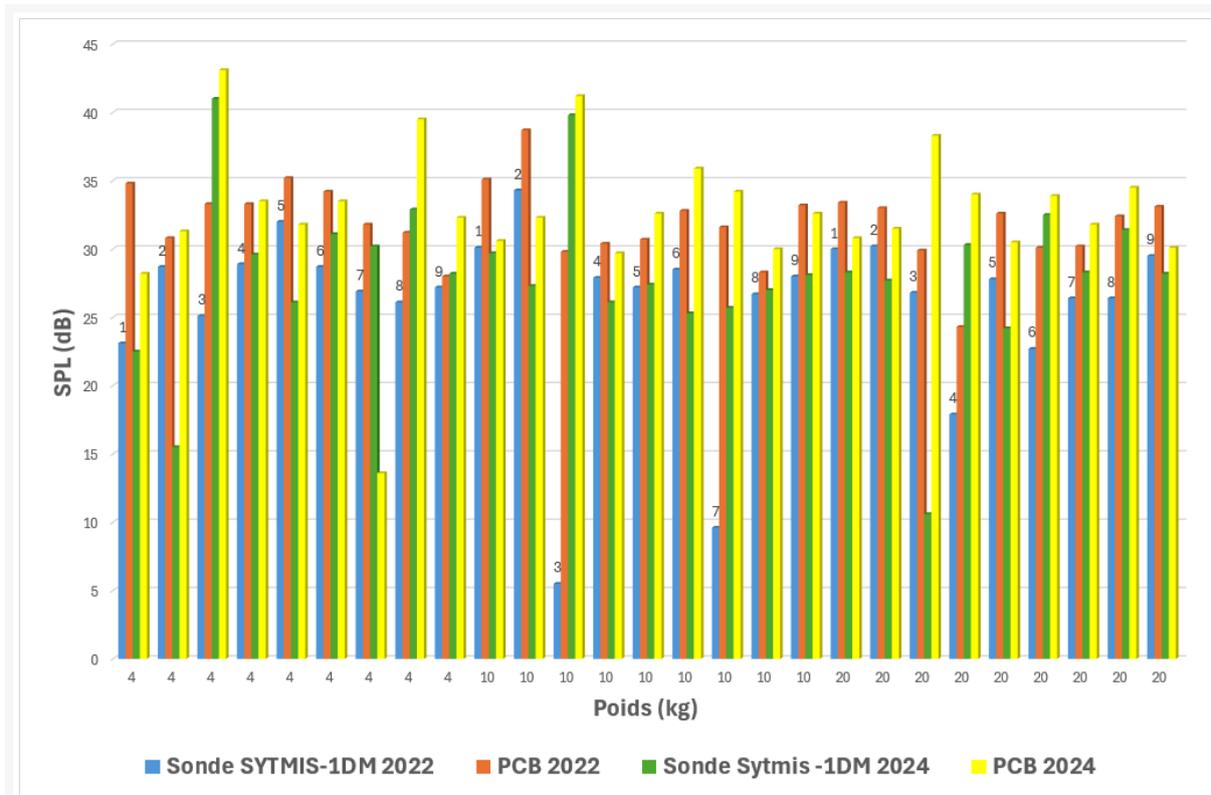


Figure 12 : valeurs de SPL min (en dB) des chutes avec le bruit de fond propre de la carrière en fonction du poids (kg) de la chute pour les deux campagnes de 2022 et 2024. Les histogrammes sont dans l'ordre de réalisation des chutes, i.e. le premier correspond à la première chute faite à 4 Kg et ainsi de suite

**INERIS****Logiciels utilisés  
pour une étude****Nota** : imprimé émis et géré par *DSE**Cette fiche est annexée au rapport.***Direction opérationnelle** : SIT    **Unité** : AS2G**Référence étude / CGR** : 227489

LOGICIEL	VERSION	FICHIER DE CONFIGURATION	DONNEES DE SORTIE / RESULTATS
<b>SYTMISview</b>	<b>V 5.00</b>	-	<b>Visualisation des données acoustiques</b>

## Equipements de Contrôle, de Mesure et d'Essai (ECME) utilisés

*Attention : vérifier à l'aide du réseau, la validité du présent document papier.*

*Nota : ce document a été émis et est géré par [DRS-Nancy](#).*

**Direction opérationnelle : SIT    Unité : AS2G**

**Référence étude / CGR : 227489**

DESIGNATION	TYPE N°IDENT.	DONNEES DE SORTIE/RESULTATS/UNITES
<b>Générateur Basses Fréquences</b>	<b>Indicateur  M-EA-061</b>	<b>INJECTION DE SIGNAUX  Fréquence (Hertz)</b>

