

CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018
14^{ème} Congrès Français d'Acoustique



**Calibrage Acoustique de Smartphones pour la Mesure du Bruit dans
l'Environnement**

J. Picaut, N. Fortin et P. Aumond
IFSTTAR, CEREMA, UMRAE, Route de Bouaye, F-44344 Bouguenais, France
judicael.picaut@ifsttar.fr

L'utilisation de smartphones pour la mesure du bruit dans l'environnement tend à se démocratiser progressivement, notamment en raison de la diffusion récente d'applications spécifiques. Une des principales critiques, régulièrement mise en avant par la communauté et autres spécialistes, est l'absence quasi-systématique de calibrage des smartphones par leurs utilisateurs et qui tendrait à amplifier la moindre qualité métrologique de ce type de dispositif. Si, par exemple dans les approches de mesure collaborative du bruit (comme le projet NoiseCapture), cette absence de calibrage peut être compensée *a posteriori*, un calibrage préalable des smartphones contribuerait à apporter une plus grande confiance aux mesures réalisées. Pour les besoins de l'application NoiseCapture, une méthode de calibrage a donc été spécifiquement développée, et fait l'objet de la présente communication. Le principe repose sur l'utilisation d'un smartphone de référence, préalablement calibré, réalisant une mesure de manière synchronisée avec le smartphone à calibrer. Le calibrage est prioritairement réalisé dans un dispositif fermé, générant un champ sonore diffus et de référence, ce qui permet de calibrer plusieurs appareils simultanément. Dans le cadre de cette communication, nous abordons également les problèmes de linéarité, en niveau et en fréquence, lors de la phase de calibrage.

1 Introduction

L'utilisation de smartphones pour la mesure du bruit dans l'environnement a connu un engouement important et a déjà donné lieu à plusieurs articles scientifiques [1]-[2]. Les plus récents ont montré la capacité réelle de ce type d'approche pour réaliser des mesures potentiellement pertinentes, à condition que le smartphone ait été calibré dans de bonnes conditions. À défaut de calibrage adéquat, la variabilité des résultats de mesure, d'une application à une autre, et d'un téléphone à un autre, peuvent être importants, jusqu'à 10 dB [3]. Le calibrage des smartphones constitue un enjeu important pour améliorer la pertinence des données produites.

Dans le cas le plus simple, où le smartphone est équipé d'un microphone externe (par exemple de type ¼ de pouce) et que l'application utilisée autorise le calibrage avec un calibre acoustique (par exemple 94dB@1kHz), il est possible de corriger les mesures réalisées, en supposant néanmoins la linéarité en niveau et en fréquence du smartphone en question. En pratique, en raison de la disparité des performances acoustiques des smartphones, et de leurs spécificités techniques et logiciels, cette condition est discutable. Il faudrait alors répéter la même opération avec un calibre acoustique multi-fréquences et pour plusieurs niveaux sonores afin d'obtenir plusieurs facteurs correctifs. Cette procédure étant toutefois laborieuse et limitée à des microphones adaptés, le développement d'une approche de calibrage automatique et « universelle » est donc intéressante.

Dans la présente communication, nous proposons le principe d'un système de calibrage, à « bas coût », d'un smartphone « utilisateur », basé sur une mesure acoustique dans une enceinte acoustique fermée (Section 2). Le signal sonore est généré par un smartphone « de référence », lequel réalise également une mesure acoustique dans les mêmes conditions que pour le smartphone « utilisateur ». Une correction du smartphone « utilisateur » est ensuite obtenue par comparaison avec les données de référence, en niveau et en fréquence (Section 0). La Section 4 conclut sur la méthode proposée et sur son implémentation dans l'application NoiseCapture développée dans le cadre du projet Noise-Planet, sous la coordination de l'Ifsttar et du CNRS [4].

2 Calibrage dans une enceinte

2.1 Description de la boîte de calibrage

Afin d'évaluer au mieux les facteurs de correction d'un smartphone, il est nécessaire d'avoir la plus grande maîtrise de la source sonore. Dans notre approche, nous proposons l'utilisation d'une enceinte fermée, avec l'objectif de mettre en place un champ sonore diffus (dans l'esprit d'une salle réverbérante). Une fois placé dans la boîte à calibrer, un smartphone est donc en situation de mesurer un niveau sonore en incidence aléatoire. Par ailleurs, si la taille de l'enceinte est suffisamment grande, cela permet, potentiellement, de calibrer plusieurs smartphones « utilisateur » simultanément.

La boîte testée (Figure 1) est de dimension parallélépipédique (L40 x P40 x H30) cm (ce qui permet de la déplacer aisément), et est constituée de surface en plexiglass de 3.7 mm d'épaisseur (surface *a priori* acoustiquement réfléchissante). Une trappe sur charnière permet de disposer les smartphones puis de fermer la boîte.

La source sonore est une enceinte SoundLink Revolve de marque Bose, fixée sur le dessus de la boîte. Le choix d'une source sonore « grand public » (mais plutôt haut de gamme) est volontaire, de manière à pouvoir dupliquer le système, avec un coût réduit.

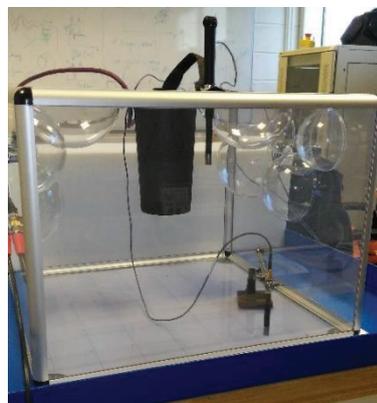


Figure 1. Photo de la boîte de calibrage. Deux microphones de mesure sont localisés dans la boîte pour les besoins de l'étude, mais ne sont pas utiles pour le calibrage.

2.2 Test des propriétés de la boîte

L'hypothèse de champ diffus est une condition importante dans la procédure proposée, puisqu'il est impératif que plusieurs smartphones (*a minima*, un smartphone « utilisateur » et un « smartphone » de référence) mesurent simultanément le même champ acoustique. Par ailleurs, compte-tenu de la taille de la boîte et des fréquences mises en jeu, la présence de modes propres est attendue, ce qui aurait pour effet de rendre le champ sonore inhomogène. Pour limiter l'impact de ces fréquences propres, des diffuseurs (demi-sphères en plexiglass de différents diamètres ; 6 cm (C), 8 cm (D), 10 cm (B), 12 cm (A)) ont été disposés sur deux faces intérieures latérales en vis-à-vis, ainsi que sur le dessous de la trappe (Figure 2).

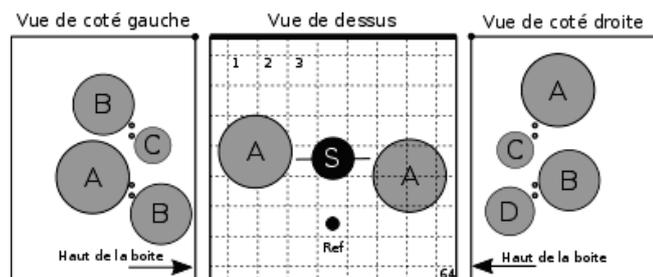


Figure 2. Placement des 10 diffuseurs dans la boîte (A, B, C, D). Position de la source S, du microphone de référence (Ref) et de la grille (8x8=64) des points de mesure.

Pour tester l'uniformité du champ sonore dans la boîte, un microphone de mesure (de type B&K 4931 multi-champs) a été déplacé sur une grille régulière (8x8, soit 64 points) à 1 cm du fond de la boîte, par pas de 5 cm, avec une origine située en (2.5 cm, 2.5 cm) d'un coin de la boîte. Un second microphone (référence), immobile, du même type, a été positionné à 6.6 cm de la paroi supérieure, afin de tester la répétabilité des mesures (Figure 1). L'acquisition a été réalisée avec un système B&K Pulse, sur un module type 3039. Un bruit rose est généré par le système, à travers la source Bose. Le spectre acoustique, en bandes de tiers d'octave entre 100 Hz et 16k Hz, a été enregistré pour chaque microphone, à chaque emplacement, sur une durée de 8 secondes (suffisante pour avoir un régime établi dans la boîte)

Les mesures ont été reproduites pour 3 configurations de diffuseurs : (C1) sans diffuseur, (C2) diffuseur sur la face supérieure uniquement, (C3) diffuseurs sur la face supérieure et sur les deux faces latérales.

La Figure 3 présente l'écart-type des niveaux sonores sur l'ensemble des points de la grille pour le microphone de mesure (figure du bas), ainsi que pour le microphone de référence (figure du haut). Les mesures pour le microphone de référence illustrent la répétabilité des mesures, avec un écart-type inférieur à 1 dB pour toutes les bandes de fréquence. En dehors des bandes de fréquence 100 Hz, 400 Hz et 1 kHz, qui peuvent présenter des effets de mode, l'écart-type est globalement inférieure à 0.3 dB, ce qui illustre une assez bonne répétabilité des mesures. Concernant le microphone de mesure, on constate une variabilité plus importante des niveaux sonores (*i.e.* un écart-type plus important) à partir de 400 Hz (*i.e.* premiers modes de la boîte vide), mais surtout pour les bandes comprises entre 800 Hz et 1600 Hz, pour lesquelles l'écart-type peut dépasser 2 dB, jusqu'à atteindre 5 dB pour certaines configurations. Ces écart-types importants sont le résultat de l'installation de

modes dans la boîte (modes de la boîte vide, perturbée par la forme de la source sonore) qui se traduisent par un champ sonore non-uniforme (Figure 4). Globalement, le meilleur compromis semble être obtenu pour la configuration (C2) – qui sera retenue par la suite –, présentant deux diffuseurs hémisphériques de 12 cm de diamètre, tout en notant un écart-type compris autour de 2-3 dB pour les bandes de fréquence entre 800 et 1600 Hz.

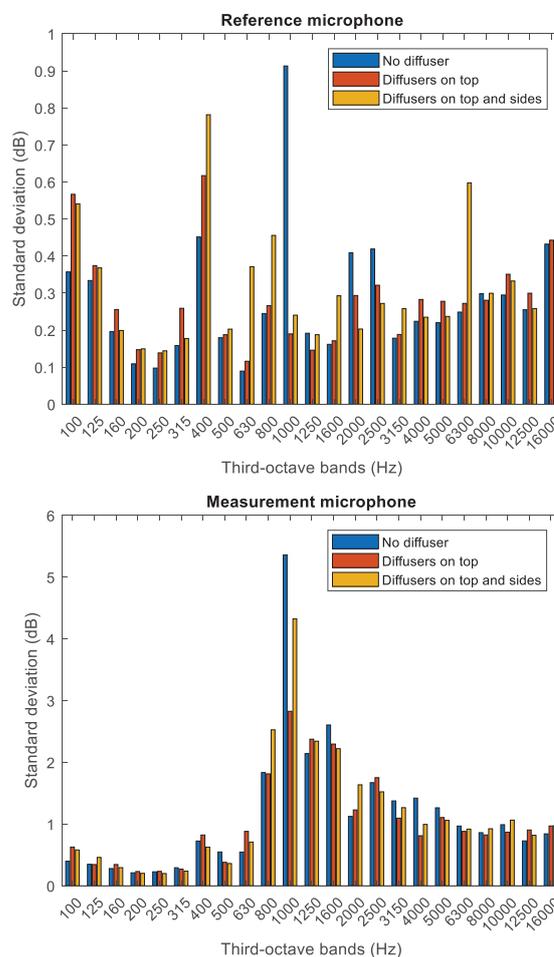


Figure 3. Écart-type des mesures au niveau du microphone de mesure (positions sur la grille) (en bas) et de référence (position fixe) (en haut).

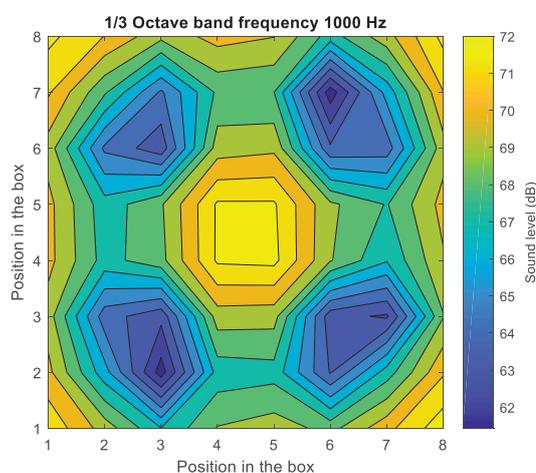


Figure 4. Champ sonore à 1 cm du sol de la boîte pour la bande de tiers d'octave 1000 Hz, interpolé sur une grille de points (8x8) par pas de 5 cm (Figure 2).

Comme illustré par la Figure 4, certaines zones de la surface du sol présentent des niveaux sonores relativement homogènes, notamment si l'on écarte les points de mesure situés les plus près des parois (ce n'est pas forcément le cas pour d'autres bandes de fréquences). Pour limiter l'impact de la variabilité des niveaux sonores sur la surface, il peut être intéressant de rechercher les zones de la surface de la boîte qui, en moyenne sur toutes les bandes de fréquences, présentent des niveaux sonores relativement homogènes. Ces zones seraient celles à privilégier pour le placement des smartphones.

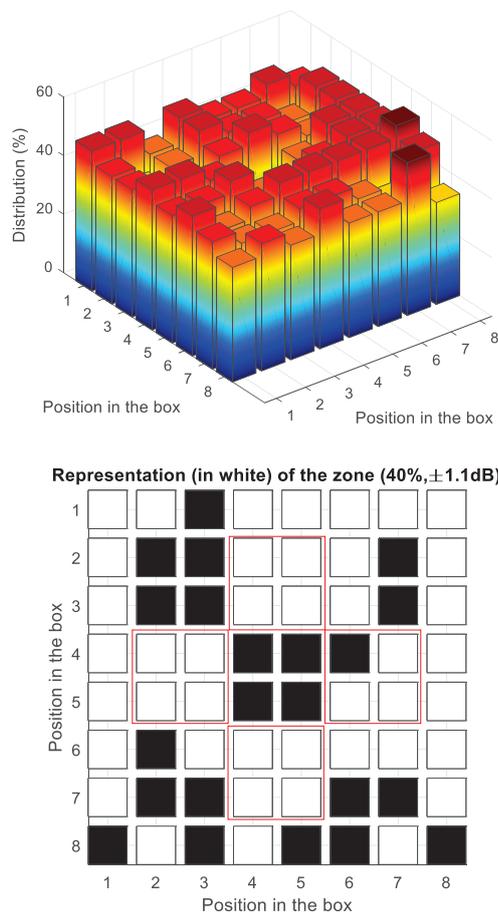


Figure 5. Recherche des zones (en rouge) de la surface de la boîte, présentant des niveaux sonores, en moyenne, homogènes sur toutes les bandes de fréquence considérées.

Ainsi, la procédure a consisté à rechercher pour chaque bande de fréquence, les points de la grille dont le niveau sonore était situé autour de la valeur médiane à ± 1.1 dB (paramètre pouvant donner lieu à un ajustement), puis de comptabiliser le nombre d'occurrences de chaque point de mesure sur toutes les bandes de fréquence (*i.e.* le nombre de fois qu'un même point est situé dans l'intervalle retenu). La Figure 5 (haut) illustre le résultat de cette procédure et montre pour chaque point de la grille de mesure, le nombre de fois (en pourcentage sur le nombre total de bandes de fréquence, 23 dans notre cas) que le point respect le critère fixé. En pratique, on constate que ce taux ne dépasse pas 50%, ce qui signifie qu'un même point ne peut être retenu que pour la moitié des bandes de fréquence. En allant, plus loin dans la démarche (Figure 5, en bas), en fixant un seuil (par exemple 40% dans le cas présent), on peut représenter les zones les plus homogènes, en moyenne, pour toutes les bandes de fréquence. Dans ce cas précis, on observe, qu'il

faut éviter le centre de la surface (position située juste en dessous de la source), et qu'il est possible de distinguer des zones autour de la source (en rouge), qui respectent les critères fixés. Interprété autrement, les rectangles rouges illustrent les zones de la surface de la boîte, pour lesquelles le niveau sonore se situe à ± 1.1 dB de la valeur médiane de l'ensemble des mesures, pour 40% des bandes de fréquence.

À ce stade de l'étude, il conviendrait d'optimiser la boîte pour réduire l'impact des modes, et donc pour favoriser la présence de zones homogènes sur lesquelles pourront être disposés les smartphones à calibrer.

3 Détermination de la correction d'un smartphone

3.1 Principe

Comme indiqué plus haut, la détermination de la correction en niveau et en fréquence, repose sur la comparaison entre un smartphone de référence et un smartphone « utilisateur », sur la base d'un signal de référence contrôlé par le smartphone de référence.

Les deux smartphones étant disposés dans la boîte de calibrage, le smartphone de référence génère un bruit rose par l'intermédiaire de la source externe (connectée en filaire pour limiter les biais introduit par la compression nécessaire à la transmission *Bluetooth*). Chacun des deux smartphones réalisent alors simultanément une analyse par bande de tiers d'octave entre 100 Hz et 16 kHz, puis sauvegardent le spectre obtenu dans un fichier qui sera analysé par la suite pour établir les facteurs de correction. Cette opération est répétée plusieurs fois, en faisant décroître le niveau sonore du signal source, par pas de 3 dB depuis le niveau sonore maximal d'émission (0 dB), jusqu'à un niveau sonore proche du bruit de fond dans la boîte. L'ensemble de cette opération est réalisée grâce à une version modifiée de l'application NoiseCapture. Hormis la synchronisation des deux smartphones, l'ensemble de la mesure est réalisé de manière automatique.

Afin de tester différentes méthodes pour la détermination des facteurs de correction, cette opération a été réalisée pour plusieurs smartphones « utilisateur », ainsi que pour différentes « valeurs de réglage » du niveau sonore initial à l'émission. Les données et résultats présentés par la suite, sont extraites d'un ensemble de 4 jeux de mesure entre un smartphone de référence (Google Nexus 6P), pour lequel des tests préliminaires ont montré un excellent comportement en niveau (avec une forte dynamique) et en fréquence, et un smartphone « utilisateur » (Motorola E 2^{ème} génération) d'entrée de gamme. Les 5 jeux de mesure ont été réalisés dans les mêmes conditions afin de tester la répétabilité de la méthode proposée. Des mesures ont également été réalisées avec d'autres smartphones et présentent des conclusions similaires.

L'ensemble des fichiers (spectres de tiers d'octave) obtenus lors de l'étape précédente a été traité avec le langage MATLAB®.

3.2 Analyse des signaux enregistrés

La Figure 6 représente le niveau sonore mesuré par le smartphone de référence et le smartphone « utilisateur » (jeu N°1), pour la bande 2 kHz, en faisant décroître le niveau

sonore du signal source par pas de 3 dB. Cette figure illustre une allure de type « sigmoïde », observée quelle que soit la bande de fréquence, et qui est plus ou moins marquée, dès lors que le smartphone présente une dynamique faible, avec un niveau de bruit fond élevé et un niveau de saturation faible. Dans le cas présent, le smartphone de référence montre comme attendu un meilleur comportement que le smartphone utilisateur.

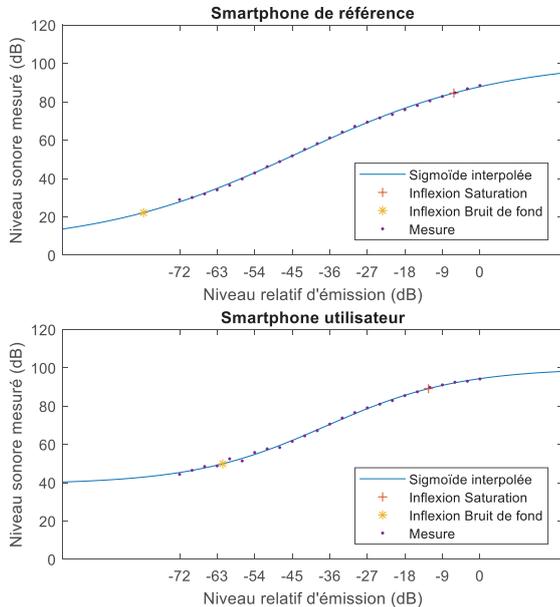


Figure 6. Réponse en niveau d'un smartphone de référence et d'un smartphone « utilisateur » (jeu N°1), à un signal source dont le niveau sonore décroît par pas de 3 dB, pour la bande de tiers d'octave 2 kHz. Représentation des niveaux sonores mesurés (•), de l'interpolation de la sigmoïde (ligne continue) et des points d'inflexion inférieur et supérieur.

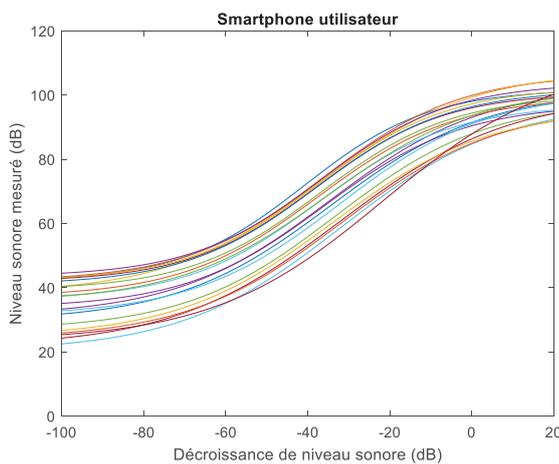


Figure 7. Allure des réponses en niveau sonore pour le smartphone « utilisateur », pour les 23 bandes de tiers d'octave, après interpolation avec une fonction « sigmoïde ».

Ainsi, le comportement en niveau peut être décomposé en 3 zones : (Z2) une zone intermédiaire linéaire, pour laquelle la réponse en niveau sonore est linéaire (résultat recherché) ; (Z1) une zone pour laquelle le niveau sonore mesuré par le smartphone « utilisateur » tend à se stabiliser, et qui correspond au niveau de bruit de fond du smartphone en question ; (Z3) une zone correspondant à la saturation du

niveau sonore en entrée du microphone du smartphone « utilisateur ».

3.3 Méthode de calibrage

La plupart du temps, les applications sur smartphone proposent à l'utilisateur de calibrer son smartphone à partir d'une mesure unique d'un signal de référence pour un niveau sonore donné (soit en niveau global, soit éventuellement pour une fréquence donnée). S'il paraît judicieux de choisir ce niveau de référence dans une zone où l'on présuppose que le smartphone présente, *a priori*, la plus grande linéarité, la plupart du temps, il est choisi arbitrairement par l'opérateur, avec le risque qu'il soit finalement hors de la zone de linéarité du téléphone (*i.e.* dans les zones de bruit de fond ou de saturation présentées à la Figure 6), ce qui risque d'introduire un biais important.

La méthode de calibrage que nous développons dans cette communication se propose d'exploiter au mieux le comportement présenté à la Figure 6, et se déroule en deux étapes : (1) la détermination des zones de linéarité du smartphone, par bande de fréquence, afin de s'assurer d'effectuer le calibrage dans cette zone ; (2) la détermination de la fonction de transfert entre le smartphone de référence et le smartphone « utilisateur » sur ces zones.

L'enjeu de l'étape (1) est de déterminer avec précision la zone (Z2) pour laquelle la réponse du smartphone est linéaire, et de manière complémentaire, les niveaux de bruit de fond et de saturation. Cette opération peut être réalisée en recherchant le « meilleur » jeu de coefficients (a, b, c, d) de la fonction sigmoïde $Y(X)$ [5] :

$$Y = \frac{a-d}{1+(X/c)^b} + d, \quad (1)$$

qui minimise la distance entre les points de mesures et cette fonction, pour une bande de fréquence donnée. Il est ensuite possible de déterminer les deux points d'inflexion Y_{inf} et Y_{sup} de la courbe (ainsi que les valeurs X_{inf} et X_{sup} associées, en utilisant (1)), de part et d'autre de la zone linéaire (*i.e.* les zones de bruit de fond et de saturation). D'après [5], ils peuvent être estimés à partir des équations (2), en considérant la constante la valeur $k=4.6805$:

$$Y_{\text{inf}} = \frac{a-d}{1+1/k} + d \text{ et } Y_{\text{sup}} = \frac{a-d}{1+k} + d. \quad (2)$$

À titre d'illustration, la Figure 7 montre l'allure des fonctions « sigmoïde » interpolées pour le jeu de mesure N°1.

Une fois les points d'inflexion déterminés, il est possible de réaliser une interpolation linéaire des points de mesure sur la zone (Z2) supposée linéaire. Dans l'idéal (*i.e.* le comportement attendu d'un smartphone de qualité métrologique « absolue »), la pente de la décroissance de niveau sonore doit être égale à 1, puisque qu'une décroissance du niveau sonore d'émission de x dB (3 dB dans notre cas) devrait se traduire par une décroissance du niveau sonore mesuré de la même valeur.

La Figure 8 illustre les valeurs de la pente obtenue pour les jeux de mesure N°1 et N°4, pour chaque bande de fréquence, ainsi qu'en niveau global en dB et en dBA. On observe globalement que les valeurs obtenues sont inférieures à la valeur théorique de 1.0, notamment pour le smartphone « utilisateur ». Ce biais est introduit par la méthode de détermination de la zone de linéarité, et de manière liée, au paramétrage d'amplitude de la source

sonore. La réponse en niveau sonore de la source, ainsi que les incertitudes de mesure peuvent également expliquer une part de ce biais. Enfin, ce biais traduit aussi la limite en « linéarité de niveau sonore » des smartphones utilisés.

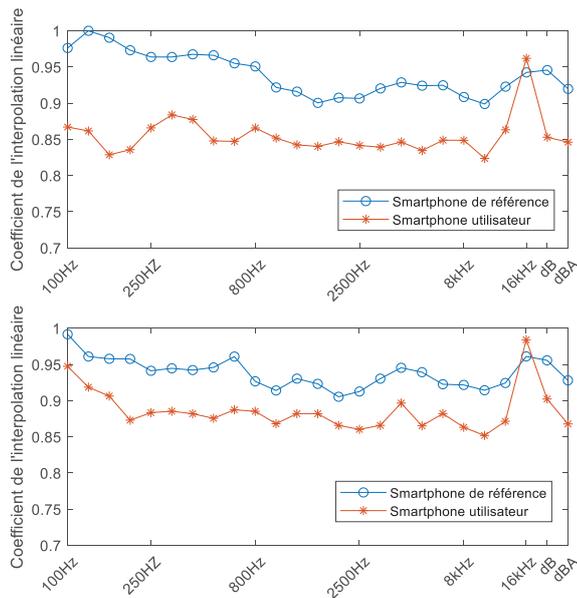


Figure 8. Valeur de la pente de l'interpolation linéaire, calculée pour chacun des smartphones de référence et « utilisateur », pour les 23 bandes de tiers d'octave, en niveau global (dB et dBA). Jeux N°1 (en haut) et N°4 (en bas).

3.4 Calibrage du smartphone

« utilisateur »

Une fois toutes les zones de linéarité déterminées pour chacun des deux smartphones, par bande de fréquence, ainsi qu'en global et global pondéré A, il existe plusieurs possibilités de calibrage :

- C1. Correction du niveau global en dBA : pour un niveau sonore spécifié en global (dBA), l'offset avec le smartphone de référence (à partir des pentes interpolées) est calculé puis appliqué sur toutes les bandes de fréquence ;
- C2. Correction du niveau global en dB : idem C1 mais à partir de la valeur globale en dB ;
- C3. Correction par bande de fréquence : pour un niveau sonore spécifié, l'offset avec le smartphone de référence (à partir des valeurs interpolées) est calculé puis appliqué pour chaque bande de fréquence ;
- C4. Correction de la linéarité en niveau : pour chaque bande de fréquence, la pente en niveau du smartphone « utilisateur » est corrigée à partir de celle du smartphone de référence.

Les deux méthodes C1 et C2 sont très similaires à celles utilisées en pratique pour calibrer des smartphones (correction à partir d'un niveau sonore de référence en global, voire pour une bande de fréquence, appliquée à toutes les bandes de fréquence), sauf que dans notre cas le choix du niveau sonore de référence est choisi dans la zone de linéarité, et que la correction est calculée à partir des pentes interpolées. Le calibrage C3 est déjà plus élaborée, puisqu'il propose une correction par bande de fréquence. La performance de ces trois méthodes de calibrage dépend du choix de la valeur du niveau sonore d'émission. En effet, les pentes de linéarité des smartphones de référence et « utilisateur » pouvant être différentes, tout en restant dans

la zone de linéarité, le choix (arbitraire) d'un niveau sonore d'émission définit la valeur de l'offset appliquée sur l'ensemble des mesures. Toutefois, les mesures réalisées semblent montrer que tant que la référence est choisie dans la partie linéaire, le calibrage est peu sensible à cette valeur.

Le calibrage C4 permet de s'affranchir du biais introduit par le choix du niveau sonore de correction, et utilise les pentes de niveau sonore pour corriger les réponses en niveau sonore par bande de fréquence. C'est, *a priori*, la méthode la plus optimale. On pourrait également envisager une correction de la pente en niveau par rapport à la valeur attendue (3 dB dans notre cas), mais cela pose le problème du choix d'un niveau sonore pour définir le centre de « rotation » de la pente. Si le smartphone de référence est « de qualité », la pente est proche de celle attendue ; par conséquent cette correction supplémentaire de calibrage ne semble pas nécessaire.

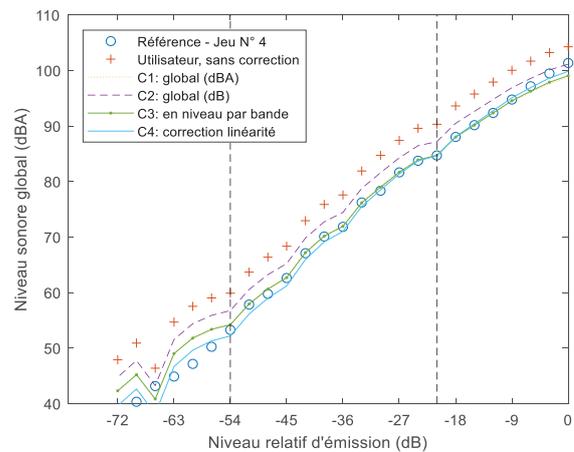


Figure 9. Illustration des méthodes de calibrage sur les données du jeu N°4. La zone encadrée par les traits verticaux pointillés correspond à la partie linéaire utilisée pour l'interpolation.

La Figure 9 illustre les 4 méthodes de calibrage sur un jeu de données, à travers le niveau sonore global en dBA du smartphone « utilisateur » comparé au smartphone de référence. Pour les méthodes C1, C2 et C3, le niveau de référence pour le calcul de la correction correspond à la valeur maximale (-21 dB) de la partie linéaire de la décroissance. Comme attendu, les calibrages par bande de fréquence (C3 et C4) apportent une correction visible sur les niveaux sonores mesurés par le smartphone « utilisateur ».

La Figure 10 présente les valeurs moyennes de l'erreur entre les smartphones « utilisateur » et de référence, avec/sans calibrage. La méthode C1 étant « calibrée » pour en dBA, elle apporte un meilleur résultat que la méthode C2 pour l'estimation du niveau sonore global en dBA (et inversement pour la méthode C2, en global non pondéré A). Par contre, les erreurs sur les corrections par bande de fréquence restent élevées.

Comme attendu, un calibrage par bande de fréquence (C3 et C4) apporte un meilleur résultat par rapport au calibrage sur la base d'un calcul de correction en niveau global en dB (C2) ou dBA (C1). Par ailleurs, l'erreur obtenue est globalement uniforme pour les estimations du niveau global (dB et dBA) et du niveau par bande de fréquence, en dessous de 1 dB. Comme le montre les résultats pour les deux courbes de la Figure 10, les calibrages C1, C2 et C3 sont dépendants de la valeur de référence choisie pour réaliser la correction. Dans le cas présent, les valeurs extrêmes de la

zone de linéarité ont été choisis, mais *a priori*, le choix de la valeur maximale aurait plus de sens que le choix d'un niveau trop faible, proche du bruit de fond. Par construction, la méthode C4 est indépendante de ce choix, ce qui en fait une méthode plus robuste et moins arbitraire.

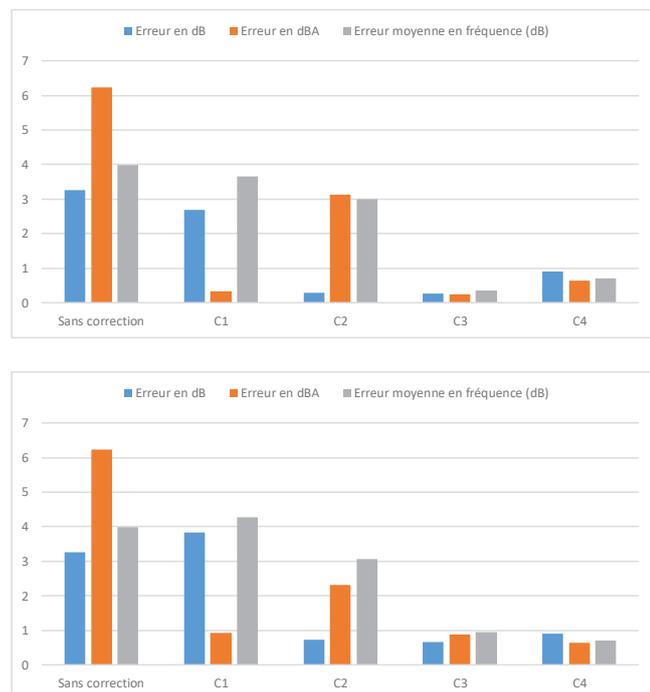


Figure 10. Erreur moyenne (en dB) sur l'ensemble des 4 jeux de données, des méthodes de calibrage C1 à C4, entre le smartphone « utilisateur » et le smartphone de référence, sur les valeurs globales en dB et dBA, et en moyenne sur l'ensemble des bandes de fréquence. Les erreurs sont calculées uniquement sur la partie linéaire utilisée pour l'interpolation. Les calibrages C1, C2 et C3 sont réalisés soit à partir de la valeur maximale (en haut), soit à partir de la valeur minimale (en bas) de la zone de linéarité en niveau.

4 Conclusion

Le travail développé dans cet article propose une nouvelle méthodologie de calibrage acoustique de smartphones, pour la mesure environnementale, basée, d'une part, sur un dispositif de mesure « contrôlé » et, d'autre part, sur une nouvelle méthode de calcul de la correction à apporter sur un smartphone quelconque.

L'objectif du système de mesure « contrôlé » est de créer un champ sonore diffus dans une boîte, à l'image d'une salle réverbérante, ce qui permet de réaliser une « même » mesure simultanément pour plusieurs smartphones « utilisateur » et un smartphone de référence. La mesure repose sur une succession de générations de bruit rose, contrôlée par le smartphone de référence, en faisant décroître le niveau sonore par pas de 3 dB. Pour limiter les coûts de ce dispositif, et en faciliter la reproduction, le matériel utilisé est relativement « simple » et facilement accessible. S'il n'a pas été possible d'obtenir un champ diffus pour toutes les bandes de fréquence et sur la totalité de la surface de la boîte, il semble néanmoins possible de limiter certains biais, en limitant les zones de mesure à quelques emplacements. Une étude détaillée du champ sonore dans la boîte, par exemple

par éléments-finis, permettrait sans-doute d'optimiser le placement des diffuseurs.

Dans un second temps, en se basant sur ces mesures, un facteur de calibrage est calculé en détectant la partie linéaire de la décroissance de niveau sonore, pour chaque bande de fréquence, puis en corrigeant la pente obtenue par le smartphone « utilisateur » par rapport à celle du smartphone de référence. Cette méthode de calibrage a été comparée à des méthodes plus classiques (correction en niveau global en dB et dBA), ainsi qu'à une méthode de correction par bande de fréquence sans correction de pente. La correction apportée par les méthodes proposant une correction pour chaque bande de fréquence est la plus efficace à la fois en dB, en dBA et par bande de fréquence. La méthode C4 étant par ailleurs indépendante du choix du niveau de référence pour le calibrage, c'est *a priori* la méthode la plus appropriée pour être intégrée dans une procédure automatique de calibrage.

En complément du calibrage, cette méthode permet également d'apporter des informations sur la qualité de la donnée produite par le smartphone : une mesure réalisée en dehors de la zone de linéarité serait en effet à prendre avec précaution. Par ailleurs, cette méthode permet une estimation des niveaux de saturation et de bruit de fond du smartphone. Ces informations peuvent être intéressantes pour l'utilisateur.

Pour les besoins de cette étude, nous avons utilisé une version modifiée de l'application NoiseCapture, développée conjointement par le CNRS et l'Ifsttar. Cette nouvelle méthodologie de calibrage devrait être intégrée dans une prochaine version publique de l'application. Un travail est actuellement en cours pour automatiser intégralement l'ensemble de la procédure de calibrage.

Références

- [1] C. A. Kardous, P. B. Shaw, Evaluation of smartphone sound measurement applications, *The Journal of the Acoustical Society of America* **135**(4), EL186-EL192 (2014). <https://doi.org/10.1121/1.4865269>
- [2] P. Aumond, C. Lavandier, C. Ribeiro, E. Gonzalez Boix, K. Kambona, E. D'Hondt, P. Delaitre, A study of the accuracy of mobile technology for measuring urban noise pollution in large scale participatory sensing campaigns », *Applied Acoustics* **117**, 219-26 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.07.011>
- [3] R. Ventura, V. Mallet, V. Issarny, P.-G. Raverdy, F. Rebhi, Evaluation and Calibration of Mobile Phones for Noise Monitoring Application. *The Journal of the Acoustical Society of America* **142**(5), 3084-3093 (2017). <https://doi.org/10.1121/1.5009448>.
- [4] G. Guillaume, A. Can, G. Petit, N. Fortin, S. Palominos, B. Gauvreau, E. Bocher, J. Picaut, Noise mapping based on participative measurements ». *Noise Mapping* **3**(1), 140-156 (2016). <https://doi.org/10.1515/noise-2016-0011>.
- [5] J. L. Sebaugh, P. D. McCray, Defining the Linear Portion of a Sigmoid-shaped Curve: Bend Points, *Pharmaceutical Statistics* **2**(3), 167-74 (2003). <https://doi.org/10.1002/pst.62>.