# Influence de la présence d'eau dans une protection anti-pluie sur la réponse fréquentielle d'un capteur acoustique

## Estimation de l'incertitude de mesure associée

**Carlos Ribeiro,**
*Bruitparif*
*9, impasse Milord*
*75018 Paris*
*E-mail : carlos.ribeiro@bruitparif.fr*

**Patrick Cellard**
*Laboratoire National de métrologie et d'Essais*
*29 rue Roger Hennequin*
*78197 Trappes*
*E-mail : patrick.cellard@lne.fr*

**David Ecotière**
*Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg*
*11, rue Jean Mentelin,*
*67035 Strasbourg*
*E-mail : david.ecotiere@developpement-durable.gouv.fr*

**Christelle André**
*Laboratoire Central de la Préfecture de Police de Paris*
*39 bis, rue de Dantzig*
*75015 Paris*
*E-mail : christelle.andre@interieur.gouv.fr*

**Bertrand Barbo**
*Aéroports de Paris*
*Laboratoire*
*Bât. 631 - Orly Sud 103*
*94396 Orly Aérogare CEDEX*
*E-mail : bertrand.barbo@adp.fr*

*Résumé*
*Si les protections anti-pluie existantes (boule de mousse, protection anti-pluie) permettent de protéger efficacement les éléments sensibles d'un capteur acoustique lors de mesures en environnement extérieur, l'eau qui pénètre et subsiste après une période de pluie dans la boule anti-vent modifie la réponse du capteur. Cet article présente une étude expérimentale de l'influence de la présence d'eau dans une protection anti-pluie sur la réponse fréquentielle du capteur. Les essais ont pour objectifs l'évaluation d'une correction éventuelle à apporter aux mesures effectuées avec une boule anti-vent mouillée ainsi que l'incertitude associée. Différents types de boules anti-vent ont été exposés à des niveaux de précipitations couramment observés en France métropolitaine pour deux débits normalisés (pluie fine et pluie soutenue). La réponse fréquentielle de chaque capteur équipé de la boule anti-vent testée a fait l'objet de la procédure courante de vérification des sonomètres (réponse en champ libre, norme CEI 61672-2). Les résultats obtenus permettent d'alimenter le projet de guide NF S 31-115 concernant l'« évaluation des incertitudes de mesurage en acoustique de l'environnement » en cours de rédaction au sein d'un groupe de travail AFNOR S30J/S30M.*

Les mesures acoustiques en environnement extérieur se déroulent fréquemment sur de longues périodes au cours desquelles les capteurs et leur protection peuvent êtres exposés aux intempéries et notamment à des précipitations. Ces situations se retrouvent par exemple dans le cadre des réseaux de surveillance du bruit dans l'environnement aux abords de grandes infrastructures de transports (réseau de Bruitparif ou d'Aéroports de Paris par exemple). Si les normes de mesure du bruit dans l'environnement préconisent d'invalider les mesures réalisées pendant les périodes de pluie marquée [1], elles ne fournissent en revanche aucune indication concernant les précautions à prendre quant à l'interprétation des résultats des mesures réalisées avec des protections anti-pluie mouillées consécutivement à une période de précipitations. Quel impact engendre ce phénomène sur la mesure ? Le niveau de précipitation, l'intensité, la position du microphone (horizontale ou verticale), le type de protection ont-ils une influence sur la mesure et dans quelle proportion ? Quelle incertitude de mesure appliquer ? À partir de quelle durée, la protection peut-être considérée comme sèche ?

Afin de répondre à ces interrogations, une étude expérimentale de l'influence de la présence d'eau dans une protection anti-pluie sur la réponse fréquentielle d'un capteur acoustique a été initiée pendant l'été 2009. Ce travail s'inscrit dans le cadre de travaux de normalisation menés au sein d'un groupe de travail AFNOR S30J/S30M destinés à élaborer une méthode d'estimation de l'incertitude de mesure en acoustique de l'environnement. Les résultats de cette étude permettent l'évaluation du poste d'incertitude associé à l'utilisation d'une protection anti-pluie ou anti-vent mouillée. Cette communication présente les premiers résultats de l'étude en cours.

Les résultats présentés résultent d'une campagne d'essais réalisée au Laboratoire National de métrologie et d'Essais (LNE). La mise en œuvre de cette campagne de mesures revêt un double objectif : comprendre et évaluer l'influence de la présence d'eau dans les protections acoustiques, estimer l'éventuelle correction à apporter aux mesures effectuées et l'incertitude associée.

## Protocole expérimental

Les essais concernent 6 types de protections courantes dont 4 kits anti-intempéries (protection anti-pluie et anti-vent) et 2 boules anti-vent (protection anti-vent uniquement). Les protections sont exposées à 7 niveaux de précipitations (1, 2, 4, 7, 12, 25, 40 mm) pour 2 débits (simulation pluie fine : débit 1 mm/min, simulation pluie soutenue : débit 3 mm/min). Une étude statistique portant sur des données de précipitations quotidiennes mesurées par une quarantaine de stations de Météo France réparties sur tout le territoire national et sur la période 1987-2007 (17 à 20 ans suivant les stations) indique que les niveaux de précipitations de 1 à 12 mm correspondent à des situations couramment observées en France métropolitaine (voir figure 1). Les niveaux de 25 et 40 mm peuvent être observés au sein des départements et territoires d'outre-mer.
Considérer les précipitations quotidiennes plutôt que les précipitations horaires revient ici à se placer dans le cas le plus défavorable (on suppose qu'une protection peut contenir autant d'eau à un instant donné que tout ce qui a pu tomber en 24 heures). En France métropolitaine, les niveaux de précipitations quotidiennes supérieures à 12 mm représentent moins de 10% des occurrences.

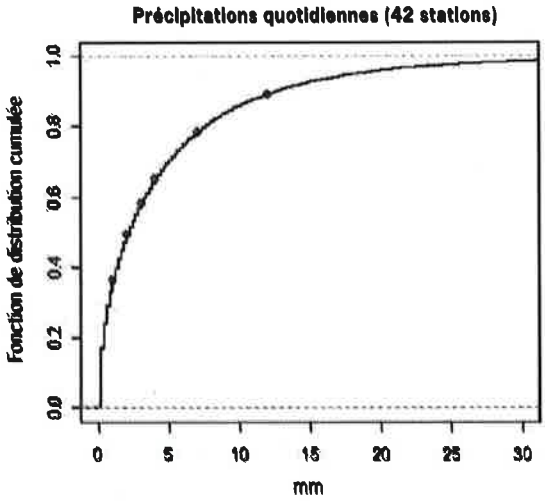


**Fig. 1 : Fonction de distribution cumulée de la hauteur de précipitations des jours pluvieux en France métropolitaine (1987-2007)**

Les protections imprégnées d'eau sont pesées en entrée et sortie du système de génération de pluie artificielle normalisé du LNE [2] (voir figure 2) afin de quantifier le volume d'eau absorbé dans les protections. La réalisation des essais pour un type de protection nécessite au minimum 30 essais (2 positions, 2 débits, 7 niveaux de précipitations, plus 2 situations «protection sèche» et «protection saturée»). La saturation correspond à la situation où la boule de mousse a atteint sa capacité d'absorption maximale ; cette configuration est obtenue en plongeant préalablement la boule de mousse dans l'eau sans la pressée. Cette configuration représente davantage un cas limite de référence qu'une situation d'utilisation réaliste de ce type de matériel.

**Fig. 2 : Protection anti-pluie sous le système de génération de pluie artificielle normalisé du LNE**

Le protocole de mesure acoustique reprend la procédure courante de vérification des sonomètres mise en œuvre au LNE [3]. Plus précisément, il s'agit d'une réponse en fréquence (spectres de 241 fréquences entre 80 Hz et 20 kHz) sous un niveau émis à 1 Pa en référence à un microphone étalon (étalonnage par comparaison). Les figures 3 et 4 présentent le dispositif expérimental.

**Fig. 3 : Salle anéchoïque du LNE ; procédure de vérification des sonomètres**

**Fig. 4 : Laboratoire du LNE ; positionnement du microphone par contrôle vidéo**

## Résultats

Deux séries d'enregistrements ont été effectuées. Elles distinguent principalement les deux débits utilisés (1 mm/min et 3 mm/min).

### Protections sèches

Des mesures préliminaires sont effectuées avec des protections sèches. Cette opération permet pour chaque type de protection d'obtenir un spectre de référence. L'influence de la pluie étant quantifiée par la différence entre le spectre de référence et le spectre mesuré avec une protection mouillée, cette mesure revêt une importance primordiale. Les spectres de niveaux sonores présentés sur la figure 5 correspondent à la différence entre les situations «microphone équipé de la protection» et «microphone de référence nu». La situation extrême «protection saturée d'eau» est comparée à la situation «protection sèche». Cette première approche permet d'observer les modifications maximales engendrées par la présence massive d'eau dans la protection acoustique. Cette série de mesures met en évidence un effet significatif de l'imprégnation de la protection pour les fréquences supérieures à 1 kHz, sans toutefois, pour l'exemple présenté ici, sortir du gabarit de tolérance de la norme CEI 61672.

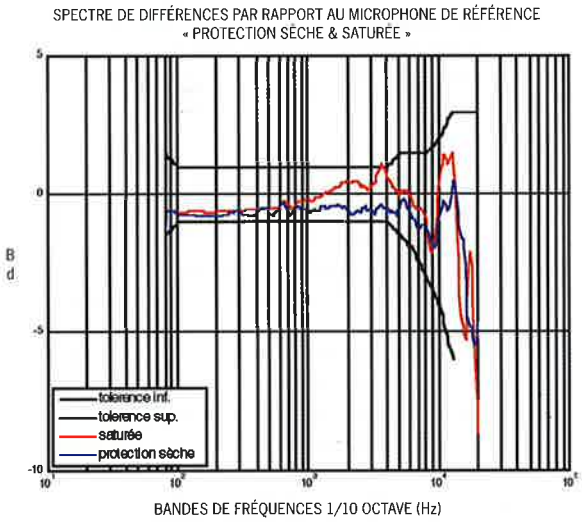


**Fig. 5 : Spectre des différences entre les situations «microphone équipé de la protection» et «microphone de référence nu»**

### Protections mouillées

Des mesures sont effectuées pour les 6 types de protections testées, pour les 7 niveaux de précipitations, pour les débits 1 mm/min et 3 mm/min, et pour les configurations «protection sèche» et «protection saturée» en eau. Afin de quantifier la modification du spectre de pression acoustique due à l'utilisation d'une protection mouillée, nous avons calculé par bandes de fréquences 1/10 d'octave la différence entre les situations «protection mouillée» et la situation «protection sèche».
La figure 6 présente à titre illustratif les résultats obtenus pour un type de protection pour le débit 3 mm/min.
Cette série de mesures avec des protections mouillées confirme l'effet significatif de l'imprégnation de la boule de mousse pour les fréquences supérieures à 1 kHz. Les résultats observés pour les 7 niveaux de précipitations étudiés sont sensiblement comparables. Un effet plus marqué est observé pour des taux d'imprégnations extrêmes (boule saturée).

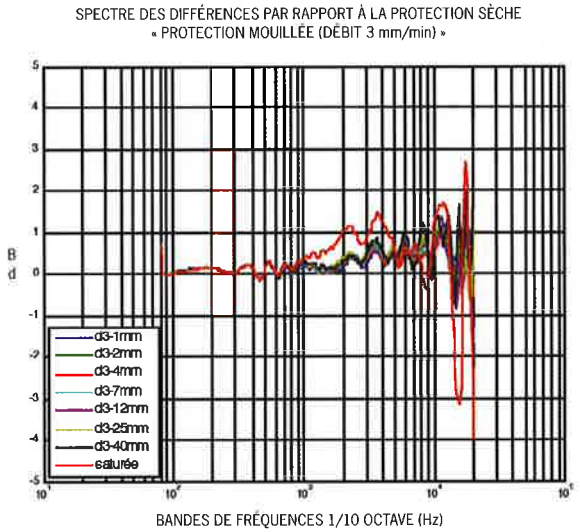


**Fig. 6 : Spectre des différences entre les situations «microphone équipé d'une protection mouillée» et «microphone équipé d'une protection sèche» ; débit 3 mm/min**

Des disparités importantes peuvent être rencontrées entre les différents matériels (voir figure 7). Afin de ne pas nuire à la clarté du propos, l'ensemble des résultats présentés dans ce document ne concerne qu'un seul type de protection anti-intempéries parmi les moins sensibles à l'effet de la présence d'eau dans sa protection (système n°3).

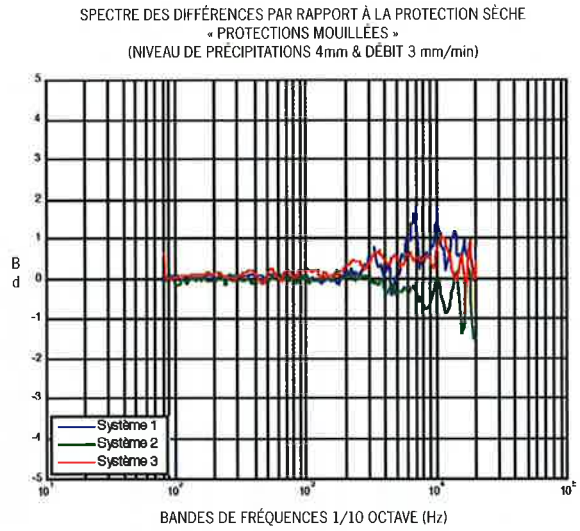


**Fig. 7 : Comparaison de 3 systèmes de protection ; spectres des différences entre les situations «microphone équipé d'une protection mouillée» et «microphone équipé d'une protection sèche» ; niveau de précipitations 4mm ; débit 3 mm/min**

### Influence de l'intensité des précipitations

L'influence de l'intensité des précipitations (pluie fine ou pluie soutenue) a été étudiée au moyen d'une analyse statis-

tique portant sur l'homogénéité des 2 séries de mesures associées respectivement à un débit de 1 mm/min et de 3 mm/min (test d'homogénéité de Wilcoxon). La table 1 présente à titre illustratif les 2 séries de mesures pour la bande de fréquences tiers d'octave centrée sur 1 kHz pour le système traité à titre d'exemple dans ce document.

| | 1 mm | 2 mm | 4 mm | 7 mm | 12 mm | 25 mm | 40 mm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 mm/min | 0,00 | 0,05 | 0,03 | 0,08 | 0,04 | 0,01 | 0,06 |
| 3 mm/min | 0,18 | 0,21 | 0,21 | 0,24 | 0,26 | 0,26 | 0,27 |

**Tabl. 1 : Différence exprimée en dB entre les situations «microphone équipé d'une protection mouillée» et «microphone équipé d'une protection sèche» pour la bande de fréquences tiers d'octave centrée sur 1 kHz**

Appliqué à l'ensemble des mesures disponibles à la date de la rédaction de ce document, le test non-paramétrique de Wilcoxon permet de rejeter avec un risque d'erreur de 5% l'hypothèse d'homogénéité des deux séries de mesure pour la majorité des bandes de fréquences et pour la majorité des protections testées. Cette hypothèse reste à vérifier au terme de la campagne de mesures sur la totalité des données. De ce fait, les deux séries de mesure associées aux débits 1 mm/min et 3 mm/min font pour le moment l'objet d'une analyse indépendante. La figure 8 illustre ce résultat. Elle présente la moyenne $m(f)$ des différences par rapport à la situation «microphone équipé d'une protection sèche» pour l'ensemble des bandes de fréquences tiers d'octave $f$ (moyennes portant sur les 7 niveaux de précipitations). À niveau de précipitation égal, une pluie plus soutenue semble accentuer les différences observées par rapport à la réponse du microphone équipé d'une protection sèche (voir figure 8).

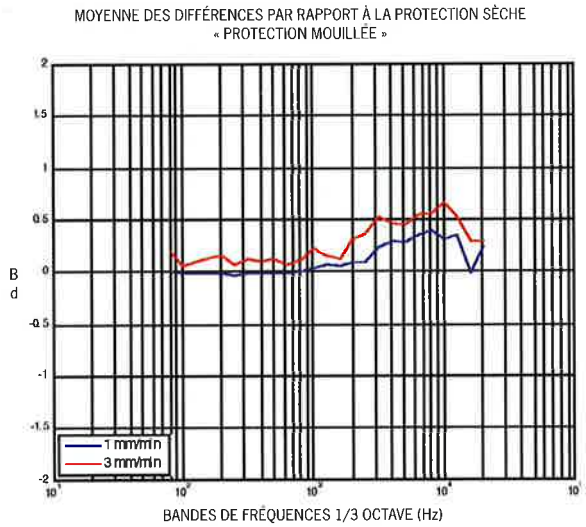


**Fig. 8 : Spectre des différences entre les situations «microphone équipé d'une protection mouillée» et «microphone équipé protection sèche» (moyenne $m(f)$ portant sur les 7 niveaux de précipitations étudiés)**

## Influence du niveau de précipitations

Le niveau de précipitations augmente légèrement la différence de réponse fréquentielle du capteur par rapport au microphone équipé d'une protection sèche. La figure 9 présente pour chaque niveau de précipitations la moyenne sur l'ensemble des fréquences des différences par rapport à la situation «microphone équipé d'une protection sèche».

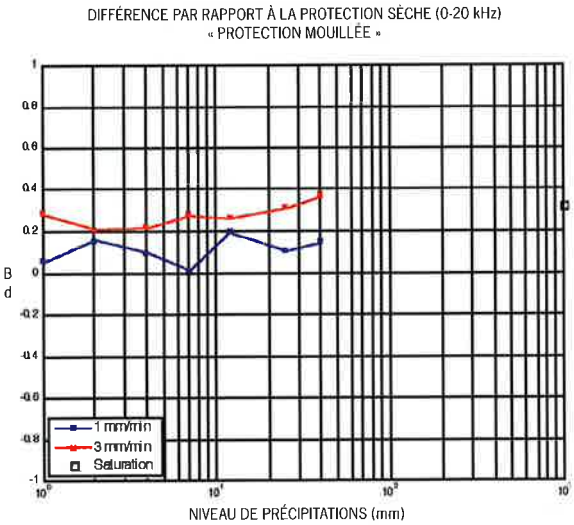


**Fig. 9 : Spectre des différences entre les situations «microphone équipé d'une protection mouillée» et «microphone équipé d'une protection sèche» (moyenne portant sur l'ensemble des bandes de fréquences)**

## Temps de séchage des protections

Les mesures de la masse des protections permettent d'étudier la relation entre le niveau de précipitations pour une quantité de précipitation et l'augmentation du poids des protections représentatif de l'imprégnation de la boule de mousse en eau.

Afin d'estimer la durée au cours de laquelle il est nécessaire de prendre en compte l'influence de la teneur en eau d'une protection acoustique, une étude complémentaire portant sur le temps de séchage des protections a été menée. L'étude a pour but d'estimer expérimentalement l'évolution de la teneur en eau d'une protection en fonction du temps puis de mettre en relation cette teneur en eau avec la quantité de précipitation à laquelle a été exposée la protection. Les dispositifs anti-pluie ont été imprégnés d'eau puis placés dans une étuve où l'humidité et la température sont contrôlées. Toutes les 30 minutes, chaque dispositif est extrait de l'étuve pour être pesé, puis replacé dans l'étuve. Ce processus est répété jusqu'au retour au poids initial de chaque système. Deux configurations de l'étuve ont été testées :

-T=15°C, 60% d'humidité relative,

-T=25°C, 60% d'humidité relative.

Il est ainsi possible d'obtenir une relation entre la masse d'eau dans une protection et la durée de séchage, pour différents niveaux de précipitations à laquelle a été exposée une protection. On constate sur la figure 10 que, pour l'exemple présenté et pour un niveau de précipitation initiale de 15 mm, il est nécessaire d'attendre plus de soixante minutes pour retrouver l'équivalent d'1 mm de précipitations dans la protection.

Ces expérimentations, en cours de finalisation, permettront d'estimer un ordre de grandeur de la durée au cours de laquelle il sera nécessaire de prendre en compte une incertitude liée à la présence d'eau dans la protection.

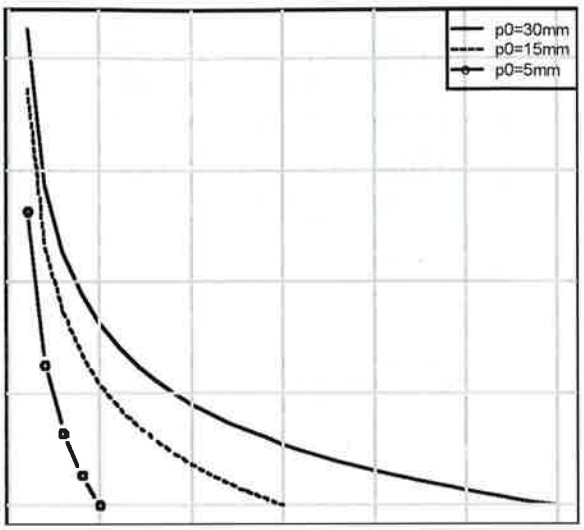


**Fig. 10 : Durée de séchage en fonction de la quantité d'eau dans la protection (exprimée en équivalent de niveau de précipitations) ; pour 3 niveaux de précipitations à laquelle a été exposée une protection**

## Estimation des incertitudes

Il a été choisi d'estimer les incertitudes de mesure associées à l'utilisation d'une protection mouillée par bandes de fréquences tiers d'octave. Cette approche nécessite l'estimation pour chaque bande de fréquences $f$ de 2 statistiques : la moyenne $m(f)$ et l'écart-type $\sigma(f)$ des différences entre les spectres associés aux situations «microphone équipé de la protection mouillée» et «microphone équipé de la protection sèche». Idéalement, ce travail nécessiterait pour chaque niveau de précipitations plusieurs échantillons de mesure (au moins 6) permettant d'estimer ces 2 statistiques. Cependant, étant donné le nombre très important d'expérimentations à réaliser d'une part et les écarts relativement réduits observés entre les réponses fréquentielles associées aux différents niveaux de précipitations (voir figure 9) d'autre part, les 2 statistiques (moyenne $m$ et écart-type $\sigma$) sont estimées à partir des valeurs associées aux 7 niveaux de précipitations.

### Estimation du biais et de la variance

La boîte à moustaches de Tukey constitue un moyen simple et rapide de visualiser le profil d'une série de données statistiques quantitative. Les figures 11 et 12 présentent son application aux données associées au système traité à titre d'exemple dans ce document pour le débit 3 mm/min. Les croix noires correspondent à la valeur moyenne $m(f)$, l'étendue des «boîtes à moustaches» est représentative de la dispersion des valeurs. Nous constatons une dispersion plus importante des valeurs à partir de la bande de fréquences tiers d'octave centrée sur 1 250 Hz.

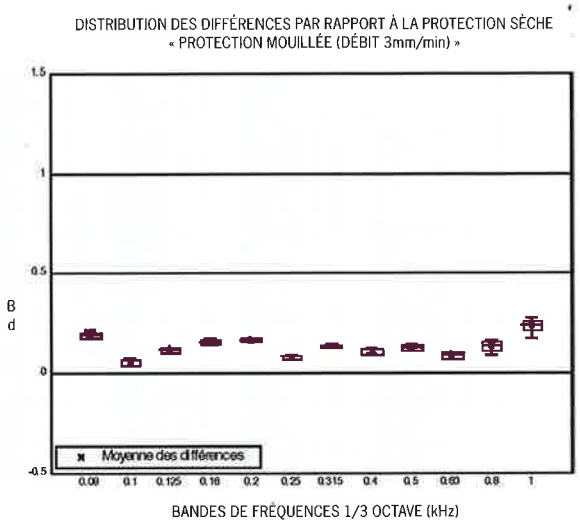


**Fig. 11 : Distribution des différences par rapport à la réponse «protection sèche» ; débit 3 mm/min ; bandes de fréquences tiers d'octave de 80 Hz à 1 kHz (dispersion portant sur les 7 niveaux de précipitations étudiés)**

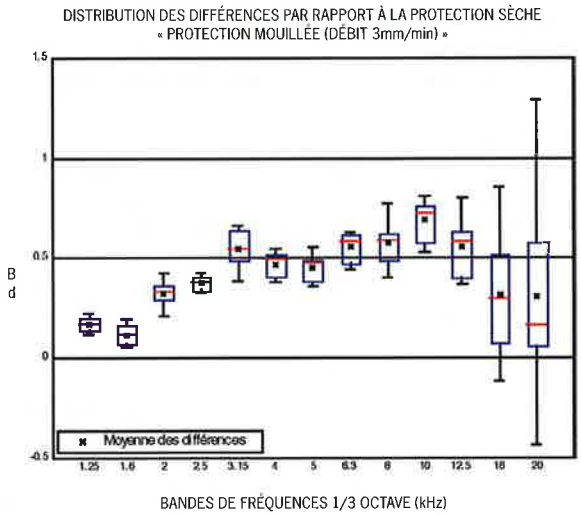


**Fig. 12 : Distribution des différences par rapport à la réponse «protection sèche» ; débit 3 mm/min ; bandes de fréquences tiers d'octave de 1 250 Hz à 20 kHz (dispersion portant sur les 7 niveaux de précipitations étudiés)**

La figure 13, page suivante, présente pour l'exemple considéré l'écart-type $\sigma(f)$ des différences par rapport à la protection sèche pour chaque bande de fréquences tiers d'octave $f$ pour les 2 débits étudiés (1 mm/min et 3 mm/min).

Ce travail a permis d'estimer le biais (écart moyen $m(f)$, voir figure 8) sur la réponse fréquentielle du capteur équipé d'une protection mouillée et la variance autour de cette valeur (carré de l'écart-type $\sigma^2(f)$ , voir figure 13). Ces deux statistiques sont indispensables au calcul de l'incertitude. Pour les 6 types de protections étudiées, ces deux valeurs sont variables selon les modèles de protection, ce qui traduit une disparité de la sensibilité à l'effet de la pluie suivant le type de matériel. Cette constatation suggère l'application d'une incertitude de mesure par type de protection plutôt qu'une incertitude globale applicable à l'ensemble des protections.

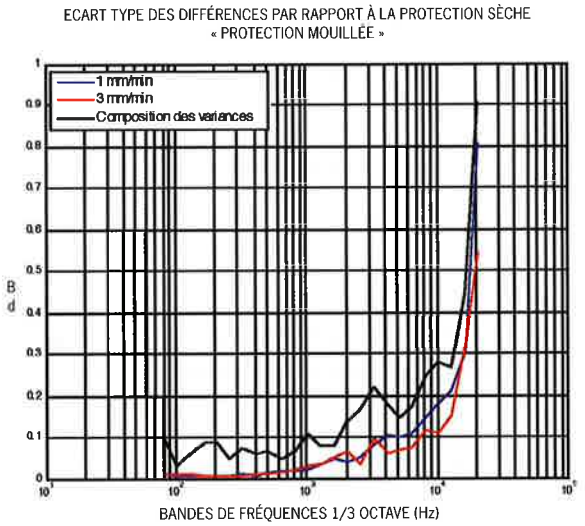


**Fig. 13 : Écart-type $\sigma(f)$ des différences par rapport à la protection sèche (variance portant sur les 7 niveaux de précipitations étudiés)**

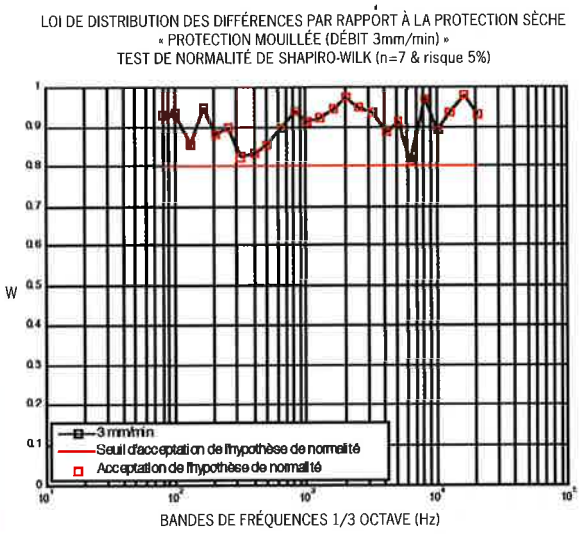


**Fig. 15 : Test de normalité de Shapiro-Wilk appliqué aux différences par rapport à la protection sèche (série de données portant sur les 7 niveaux de précipitations étudiés) ; débit 3 mm/min**

## Calcul de l'incertitude de mesure

La définition précise du calcul d'incertitude associée à l'utilisation d'une protection mouillée par la pluie est en cours d'élaboration au sein du groupe de travail AFNOR S30J/S30M. Néanmoins, nous présentons ci-après l'approche mise en œuvre couramment pour d'autres postes d'incertitude. Deux possibilités sont envisageables :

- le biais ($c=m$) est corrigé, l'incertitude porte alors sur la dispersion autour du biais (voir figure 14) ;
- le biais n'est pas corrigé, il est ajouté linéairement au bilan d'incertitude.

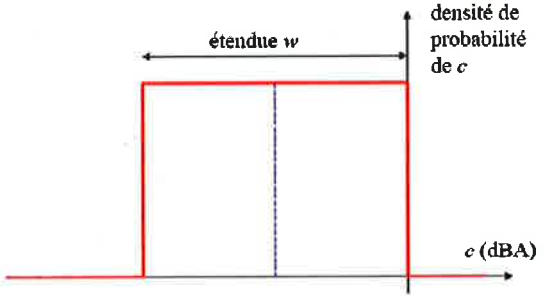


**Fig. 14 : Distribution de la correction associée à l'utilisation d'une protection mouillée**

La distribution des valeurs rencontrées dans l'étendue n'est en général pas connue : on suppose alors les valeurs équiprobables. La loi de répartition correspondante est rectangulaire (loi uniforme). Les valeurs ainsi obtenues sont les valeurs maximales de l'incertitude. Dans le cadre de cette étude, les valeurs mesurées ont fait l'objet d'un test statistique destiné à tester l'hypothèse de normalité des données (test de Shapiro-Wilk). Pour la majeure partie des types de protections testées, le test permet de rejeter avec un risque d'erreur de 5% l'hypothèse de non-normalité pour un grand nombre de bandes de fréquences tiers d'octave (voir figure 15). L'application d'une loi uniforme au calcul d'incertitude n'est, par conséquent, pas nécessairement justifiée.

Dans le cas d'une correction du biais c, pour chaque bande de fréquences tiers d'octave, le niveau corrigé $L_c$ exprimé en dB et l'incertitude type pour ce niveau sont calculés respectivement à partir des équations (1) et (2) :

$$L_c = L - c \qquad (1)$$

$$\sqrt{u^2(L) + u_c^2} \qquad (2)$$

où $u(L)$ et $u_c$ sont respectivement l'incertitude-type pour les autres composantes d'incertitude et l'incertitude-type de la correction relative à la protection. Cette dernière peut s'écrire :

$$u_c = \frac{b-a}{2\sqrt{3}} \qquad (3)$$

dans l'hypothèse d'une distribution uniforme, et

$$u_c = \frac{b-a}{6} \qquad (4)$$

dans l'hypothèse d'une distribution normale, $b - a$ représentant l'étendue des mesures.

## Conclusion

Les premières campagnes de mesures destinées à l'évaluation de l'incertitude de mesure associée à l'utilisation d'une protection mouillée ont permis de mettre en évidence un effet significatif de l'imprégnation de la boule de mousse pour les fréquences supérieures à 1 kHz. Il en résulte une correction éventuelle à appliquer et une valeur d'incertitude plus importante pour ces fréquences.
En outre, les résultats observés pour les 7 niveaux de précipitations étudiés (1, 2, 4, 7, 12, 25 et 40 mm) sont sensiblement comparables. Un effet plus marqué est observé pour des taux d'imprégnations extrêmes (boule saturée). La relation entre le niveau de précipitations et le temps de séchage de la protection est en cours d'étude.

Des travaux sont en cours afin de compléter le nombre de cas étudiés (type de protection, position d'exposition des capteurs...), ainsi que de préciser les ordres de grandeur de la durée au cours de laquelle il est nécessaire de prendre en compte l'effet de l'eau dans la protection.
À terme, lorsque la définition précise du calcul du poste d'incertitude associé à l'utilisation d'une protection mouillée par la pluie sera établie par le groupe de travail AFNOR S30J/S30M, il sera possible, connaissant le niveau de précipitations et le type de protection :
- d'appliquer une correction (le cas échéant) ;
- d'estimer l'incertitude de mesure associée ;
- de déterminer la durée à partir de laquelle la protection est considérée comme sèche et où l'incertitude de mesure associée à ce poste d'incertitude ne s'applique plus.
A la fin de cette étude, les résultats définitifs seront publiés dans une revue scientifique.

## Remerciements

Nous tenons à remercier l'ensemble des membres du groupe de travail AFNOR S30J/S30M qui participent au projet de guide NF S 31-115 concernant l'évaluation des incertitudes de mesurage en acoustique de l'environnement pour leurs compétences en acoustique, en métrologie et leur convivialité. Nous remercions également le ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer/DGPR/Mission Bruit et Agents Physiques qui a participé au financement de cette étude avec Bruitparif ainsi que les personnels du LNE, du LRPC de Strasbourg et de Bruitparif, et enfin les différents laboratoires partenaires et constructeurs de sonomètres qui ont mis à notre disposition un nombre conséquent de protections anti-pluie (LNE, LCPP, ADP, LRPC de Strasbourg, Bruitparif, Brüel & Kjaer et 01dB-Metravib).

## Références bibliographiques

[1] Norme NF S 31-010 «Acoustique - Caractérisation et mesurage des bruits de l'environnement - Méthodes particulières de mesurage», AFNOR, (1996).

[2] Norme NF EN 60529 «Degrés de protection procurés par les enveloppes (codes IP)», AFNOR, boite à gouttes fig.3, (1992).

[3] Norme NF EN 61672-2 «Electroacoustique - Sonomètres - Essais d'évaluation d'un modèle», AFNOR, réponse en champ libre §9.4.2, (2003).