

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Incertitude de mesurage du bruit en environnement par une méthode détaillée.

Michel Rumeau

commission Afnor S30J Bruits de l'environnement

et

Laboratoire Central de la Préfecture de Police - 39 bis rue de Dantzig 75015 Paris - michel.rumeau@interieur.gouv.fr

Cette présentation est issue des travaux de la commission S30J de l'Afnor, relatifs à l'application aux mesures en acoustique de l'environnement des préceptes du GUM (Guide for Uncertainty Measurements / NF S 31 005) en matière de détermination des incertitudes. La pratique du calcul des incertitudes dans ce domaine a longtemps été délaissée en acoustique de l'environnement, à la différence de ce qui se passe par exemple en certification de matériels ou de produits. C'est désormais une exigence internationale de l'ISO de voir figurer le calcul des incertitudes dans toutes les normes de mesure. Ce travail a été engagé depuis longtemps et a connu des orientations diverses. Les premiers travaux avaient fait l'objet d'une présentation au Mans en 2005.

La norme NF S 31 115-1, constituant un guide pour l'évaluation des incertitudes, est en voie d'achèvement. Elle est structurée autour de la prise en compte détaillée poste par poste des valeurs documentées, issues de la documentation technique ou des étalonnages. Une déclinaison de cette méthode incluant de la répétabilité est proposée en alternative.

Elle a intégré plusieurs campagnes d'expérimentation, notamment sur des postes d'incertitudes où la connaissance était fragmentaire et les données publiées anciennes ou inexistantes.

La commission vient de compléter son programme de travail par une partie destinée aux incertitudes propagées dans les méthodes de calcul, et par une méthode globale fondée sur la reproductibilité. Le dispositif d'ensemble est nécessaire à l'appréciation de l'incertitude globale et à la détection des voies d'amélioration. Il devrait mettre les professionnels en capacité de choisir leurs méthodes et de les adapter en fonction de la précision recherchée. L'un des objectifs consiste également à pouvoir dépasser les limites d'emploi des instruments en fonction du rapport signal/bruit recherché, sans être contraint par une limite théorique, comme c'est le cas pour la vitesse de vent.

L'application de ces méthodes fait appel à des forfaitisations, comme pour le rôle de la répartition spectrale du bruit mesuré. A cette occasion, la répartition spectrale du bruit, et l'application de la pondération A, apparaissent comme l'un des postes prépondérants dans la détermination de l'incertitude. L'application particulière dans le calcul de l'émergence (en niveau) est également abordée, avec le détail des cas où des compensations sont envisageables, et où il est permis d'envisager une incertitude sur l'émergence qui soit de l'ordre de grandeur de l'incertitude de mesurage sur les niveaux.

1 Introduction

Ce travail collectif a été engagé pour l'élaboration du document guide S 31 115-1 : il concerne spécifiquement l'incertitude qui affecte la mesure (c.a.d ce qui répond à la question « avec quelle précision est-il rendu compte de la grandeur mesurée »), à l'exclusion de :

- La variabilité attachée à la production du bruit, qui relève de l'échantillonnage (travail à mener par ailleurs),
- La variabilité attachée à la propagation le long d'un trajet, ou dépendant de la saison, doit être examinée avec les connaissances spécifiquement attachées à la météorologie.

La variabilité spatiale d'un champ sonore doit être examinée spécifiquement au sein de la norme (ou de la méthode) utilisant cette approche.

La spécificité de ce travail réside d'abord dans son objet : l'acoustique en environnement, et pour partie la mesure en milieux non maîtrisés, ainsi que, de façon très générale, la nécessité d'application à l'émergence en niveau.

Cette émergence en niveau, qui constitue un critère très répandu, résulte d'une différence de deux niveaux pour lesquels les caractéristiques ne sont pas toujours transposables, et pour lesquels l'incertitude résultante pourrait voisiner le double de l'incertitude de mesure sur un seul des niveaux.

2 Etat des lieux de la question

Des procédures de calcul sont déjà en place en dehors du domaine de l'environnement, ainsi que la connaissance des ordres de grandeurs typiques, dans des domaines de

laboratoire (mesures des caractéristiques acoustiques de moteurs, ou d'éléments de construction).

Dans le domaine de l'acoustique de l'environnement, des débuts de prise en compte de l'incertitude sont apparus dans le domaine normatif avec la norme générale ISO 1996 ou avec la norme ISO 20 906 relative à la surveillance du bruit autour des aéroports. Du fait de leur caractère incomplet, la commission Afnor a décidé de poursuivre le travail qu'elle avait engagé déjà depuis plusieurs années.

Les deux commissions S 30 J et S 30 M de l'Afnor ont conjointement créé un groupe de travail, qui a mené la réflexion et l'observation relatives aux particularités et aux sujétions spécifiques.

Le programme de travail est complété par une seconde partie de la norme (NF S 31 115-2), visant les incertitudes propagées dans les méthodes de calcul, et par une méthode globale (NF S 31 126) fondée sur la reproductibilité.

3 Méthodologie Générale

La méthodologie utilisée consiste à recenser les incertitudes par poste, selon une approche analytique et une individualisation des facteurs d'influence (comparable aux indications du GUM) puis à les combiner

La détermination des certaines de ces valeurs forfaitaires a fait l'objet de campagnes de mesures, notamment sur des postes d'incertitudes où la connaissance était fragmentaire et les données publiées anciennes ou inexistantes. L'une d'entre elles fait l'objet d'une présentation dans cette session.

3.1 Exclusions liées aux précautions opératoires :

La valeur de l'incertitude, pour les postes dépendant de l'instrumentation, est obtenue en application des modes opératoires en vigueur, dans les conditions prévues par la norme NF ISO CEI 61 672-1. Toute modification nécessite donc une nouvelle estimation.

3.2 Extrapolations

Le présent document concerne l'incertitude associée à la mesure d'un L_{eq} . Pour certains aspects, il permet l'accès aux grandeurs directement issues de la mesure, comme :

- Les niveaux fractiles,
- Les niveaux de crête et L_{pAmax} (F, S ou I)

Ces différentes grandeurs sont des niveaux de pression mesurés et qui donnent donc lieu à des incertitudes de mesure.

L'évaluation de l'incertitude associée au calcul permettant (dans le cas des niveaux fractiles) d'aboutir à chacun des niveaux ne relève pas de l'incertitude de mesure mais de la validation du code de calcul, et ne ressort pas du présent document.

4 Liste des facteurs d'influence

Les facteurs d'incertitude influents pour les mesures de bruit dans l'environnement sont :

↳ L'instrumentation, avec les composantes détaillées ci-

dessous

la directivité du microphone;

la linéarité de niveau ;

la pondération A ;

la température et de l'humidité ;

la pression de l'air ambiant ;

le niveau du calibre dans les conditions de référence ;

le niveau du calibre dans les conditions de fonctionnement.

↳ La mise en œuvre :

Emplacement de la mesure, et orientation

Durée de la mesure (selon le type de bruit)

Conditions opératoires (positionnement, présence d'un réflecteur)

Post-traitement : choix des instants de début et de fin du calcul de niveau équivalent $L_{Aeq, T}$

Conditions météorologiques locales (au niveau du microphone)

↳ L'opérateur (incertitude de répétabilité) : ce dernier poste doit faire l'objet d'une évaluation de l'opérateur. Néanmoins les postes affectant la répétabilité, comme les emplacements, ou les choix de période, peuvent être individualisés et remplacer la valeur issue d'essais de répétabilité.

Ces facteurs donnent lieu :

➤ soit à une étude par poste d'incertitude, étayée par des valeurs documentées (selon la méthode de la norme NF ENV 13 005),

➤ soit à un examen dans les conditions de l'expérimentation, plusieurs facteurs pouvant être réunis dans une même observation (Méthode expérimentale sur le site de mesure).

Ces deux modes d'acquisition des valeurs d'incertitudes sont examinés successivement dans les chapitres suivants

5 Collecte des valeurs d'incertitude pour chaque facteur d'influence

En application de ce qui précède, trois voies de collecte des valeurs d'incertitude de mesure (pour chacun des postes) sont exposées dans le présent document, soit, dans l'ordre où elles sont citées par la suite :

- 1) Une méthode expérimentale destinée à l'évaluation d'opérations spécifiques. Les expérimentations doivent être conduites selon le mode opératoire défini par la norme. Ces valeurs ne sont pas transposables à d'autres opérations conduites de façon différente.
- 2) Une méthode simplifiée, qui utilise les valeurs maximales connues, soit tirées des exigences normatives (par exemple celles énumérées par la norme CEI 61 672-1), soit issues de recherches documentaires (en particulier de résultats publiés d'expérimentation), ou encore d'expérimentations spécifiques conduites par les membres du groupe de travail. Elle est exposée au chapitre 5 de la norme.

Les publications utilisées à cet effet sont citées sur la liste jointe en annexe à la présente norme.

- 3) Une méthode détaillée, également adaptée à une approche analytique du type GUM, mais utilisant des valeurs particulières ayant fait l'objet de vérifications, et conduisant à des incertitudes réduites. Il peut s'agir par exemple :

- en ce qui concerne l'instrumentation des valeurs issues des étalonnages ou des vérifications régulières pratiquées par un établissement spécialisé ou par l'entité pour son propre compte.
- en ce qui concerne les opérateurs, de la répétabilité étudiée au moyen d'expérimentations.

Cette méthode détaillée fait également l'objet du chapitre 5 du projet de norme.

Ces 3 voies de collecte donnent lieu dans la norme à un exemple d'application pour chaque poste d'incertitude.

5.1 Méthode expérimentale sur le site de mesure

Cette méthode constitue la méthode d'origine du projet, orienté vers une 1^{ère} approche simplifiée, de type expérimental.

Il s'agit d'une méthode détaillée par poste, où les valeurs de chaque poste ne sont pas toutes collectées de façon documentaire : elle procède au moyen d'une évaluation de la variabilité du signal lors de la mesure, et de son étendue.

Le mesurande sur lequel est estimée l'incertitude est le $L_{Aeq,T}$ pendant un intervalle dit de base (selon les normes de mesure en environnement, telles que la norme générale NF S 31 110).

Le protocole d'estimation de l'incertitude est le suivant :

- mesurer le L_{Aeq} sur 6 échantillons au moins, non corrélés (disjoints),
- estimer l'écart-type sur ces valeurs, pour en tirer l'incertitude.

Bien que conçue comme une méthode détaillée par poste, cette méthode intègre pour chaque mesure tous les postes d'incertitude recensés avec leur importance respective.

		Situation	Exemples de domaines d'application (normes NF)		Protocole d'évaluation expérimentale
T Y P E D E B R U I T	1	Bruit stable	S 31010 (Chap. 6)	Variabilité intrinsèque du niveau au point de réception	- mesurer le L_{Aeq} sur au moins 6 échantillons (intervalles de base) non corrélés (disjoints), - estimer l'écart-type sur ces valeurs.
	2	Bruit stable/ intermittent	S 31010 (Chap. 6)	Choix des limites de l'intervalle d'observation pour L_{eq} , découpage	- choisir le niveau (haut ou bas) sur lequel porte la mesure, - vérifier la stabilité de ce niveau sur les intervalles élémentaires (fluctuations < 2 dB), - si créniaux de durée < 30 s : estimer l'incertitude comme l'écart-type sur au moins 6 intervalles élémentaires, - si créniaux de durée ≥ 30 s : estimer l'incertitude comme l'écart-type sur au moins 6 intervalles de base disjoints.
	3	Périodique	S 31010 (Chap. 6)	Nombre de cycles, choix des bornes	si la période du signal est T : estimer l'écart-type sur N valeurs de $L_{Aeq,T}$ ($N \geq 6$).

Tableau 1 — Protocole d'évaluation directe à partir de mesures

Néanmoins elle requiert un travail important sur le signal, qui n'est réaliste qu'avec de l'enregistrement. Elle nécessite un allongement de la durée de mesure qui peut se révéler finalement contre-productif, sauf pour des besoins très spécifiques.

5.2 Méthodes documentaires

La méthode alternative pouvant être mise en œuvre de façon forfaitisée sans alourdir le processus de mesure est encore fondée sur une connaissance poste par poste des incertitudes.

Cette évaluation des incertitudes par poste peut être

conduite de deux façons :

- soit avec les exigences (EMT) de la norme générale 61 672-1, qui représente le minimum de qualité (pour l'application dans le cadre des normes), mais qui conduisent à des écart-types relativement importants,
- soit avec les caractéristiques particulières du matériel utilisé, issues de contrôles, par exemple ceux pratiqués régulièrement par un laboratoire d'étalonnage, ou en interne.

La norme comporte cette dualité pour tous les postes d'incertitude recensés. Ce calcul est reproduit ci-dessous avec les deux méthodes, pour deux postes d'incertitude

particuliers pour lesquels l'écart attendu est suffisant pour montrer la différence de méthode. Cette partie du calcul est applicable aux postes d'incertitude concernant l'instrumentation.

Cas 1 : Calcul avec les valeurs forfaitaires normatives (maximales)

L'influence maximale des facteurs liés aux sonomètres est estimée en utilisant les limites de tolérance indiquées dans la norme CEI 61672-1 (EMT) : cette norme constitue donc de fait, pour les membres de la commission, l'exigence minimale en matière instrumentale.

Les valeurs documentées de base sont celles de la norme instrumentale NF ISO CEI 61 672-1

exemple 1 : Linéarité de niveau.

L'erreur de linéarité de niveau citée par la norme NF EN ISO CEI 61672-1:2002 (5.5.5, Classe 1) ne doit pas dépasser $\pm 1,1$ dB

$$u_{\text{lin}} = 2,2/\sqrt{12} \text{ dB} = 0,635 \text{ dB} \quad (1)$$

exemple 2 : Pondération A

La tolérance dans la plage de fréquences comprise entre 50 Hz et 4 kHz reste en dessous de $\pm 1,6$ dB (CEI 61672-1, Tableau 2, Classe 1).

$$u_A = 3,2/\sqrt{12} \text{ dB} = 0,924 \text{ dB} \quad (2)$$

Cas 2. Calcul avec des valeurs particulières

Alternativement, si l'on dispose d'éléments justifiés (valeurs issues de certificats d'étalonnage, d'études spécifiques, ou de publications de confiance, etc...) il est possible de d'utiliser d'autres formes de distribution (normale, dissymétrique, bornée, etc...).

Naturellement, un tel calcul peut s'appliquer pour des instruments qui ne répondent plus aux exigences normatives, mais avec les valeurs issues de contrôles particuliers : les conditions particulières de réalisation de la mesure permettent de réduire les postes d'incertitude ci-dessus lorsque les conditions sont vérifiées et lorsque les valeurs réelles de performance des instruments ont également fait l'objet de contrôles.

De la même façon, l'emploi des valeurs forfaitaires ci permettant de situer ces performances par rapport aux signal (par rapport à la bande maximale définie par la norme CEI 61 672-1).

Si par exemple, l'écart entre les deux niveaux est inférieur ou égal à 20 dB (valeur tenant compte de l'EMT aux bords du spectre pris en compte), la part du signal contenu dans les bandes latérales, même affectée d'une incertitude importante, n'a pas d'effet sur le niveau total. Il est alors possible de prendre en compte l'incertitude maximale (issue d'un certificat d'étalonnage, ou l'EMT issu de la norme NF EN ISO CEI 61 672-1) dans la bande réduite, pour faire chuter ce poste de façon notable.

Ces derniers calculs ne ressortent plus du forfaitaire – sauf exception – et leur usage devrait être réservé aux situations où une valeur maximale de l'incertitude est recherchée

exigences normatives, et de vérifier que les tolérances normatives sont bien respectées.

Les paragraphes ci-dessous utilisent des exemples particuliers (attachés -dessus (avec les tolérances normatives) implique une vérification chiffrée des caractéristiques des instruments utilisés, à des instruments différents) pour illustrer la méthode d'évaluation. Seule la méthode doit être transposée, les valeurs particulières devant être prises sur les documents de contrôle des appareils utilisés réellement.

Exemple 1 bis : Linéarité de niveau.

A titre d'exemple, si les valeurs extrêmes relevées sur un certificat d'étalonnage sont $-0,1$ dB et $+0,4$ dB, l'étendue de mesures est : $[-0,1 \text{ à } +0,4] = +0,5$ dB

D'où l'incertitude $= 0,5 / \sqrt{4,5} = 0,236$ (au lieu de 0,635 ci-dessus).

Exemple 2bis : Pondération A

Les deux premiers parmi les 3 exemples qui suivent sont appuyés sur une réduction de la bande d'analyse à l'intervalle [250 Hz, 800 Hz]. Une réduction du poste d'incertitude peut provenir de deux origines différentes :

- ❶ La bande étudiée est réduite : elle ne couvre pas tout le spectre présent, et est caractérisée par des tolérances normatives réduites : c'est le cas ici, l'intervalle toléré par la norme CEI 61 672-1 étant caractérisé par le domaine $\pm 1,4$ dB d'où un intervalle de 2,8 dB, et une incertitude de $2,8 / \sqrt{12}$ soit 0,808 dB (au lieu de 0,924).
- ❷ L'instrument utilisé bénéficie d'un étalonnage périodique. Considérons un exemple particulier où les valeurs indiquées dans la bande de 250 Hz à 800 Hz permettent d'indiquer une étendue de mesure de 0,0 à $-0,2$, soit une étendue de mesure de 0,2 et une incertitude de $0,2/\sqrt{12} = 0,058$ (à la place de 0,924).
- ❸ La composition spectrale du bruit particulier mesuré montre qu'il ne comporte qu'une part négligeable (par rapport à l'énergie totale du signal) dans les parties extérieures du spectre, là où les EMT (écart maximal toléré) sont importants : l'analyse peut être dissociée en plusieurs parties selon leur importance respective dans le niveau global : cet aspect peut être vérifié en comparant le niveau de bruit dans une bande réduite au niveau total dans les bandes délaissées du

6 Composition des incertitudes

Le tableau 2 ci-dessous montre un récapitulatif de composition d'incertitudes particulières (pour ce qui relève du champ de la norme NF S 31 110), associant des distributions de natures différentes. Il illustre certains des plus gros postes d'incertitudes, tels que :

- la pondération A,
 - la directivité du microphone,
 - la linéarité de niveau
- auxquels il faudrait ajouter (dans ce même champ) :
- les conditions météorologiques (notamment la vitesse du vent) pour les mesures faites à l'extérieur,
 - le post-traitement (choix des bornes d'intégration), qui dépendent des conditions de mesure.

Ceci ouvre une possibilité de forfaitisation de tous les autres postes (dans la mesure où ils restent négligeables par rapport à ces postes là) pour l'évaluation de l'incertitude dans le cas des contrôles effectués par divers organismes de façon répétitive.

7 Incertitude sur les émergences

Le calcul de l'émergence est fondé sur deux mesures, caractérisées chacune par leur incertitude. La nature, l'emplacement et la directivité des sources, le contenu fréquentiel du bruit résiduel et la sensibilité de l'instrumentation aux différentes fréquences, sont généralement différents pour le bruit résiduel et pour le bruit particulier. Les incertitudes affectant la mesure de ces deux grandeurs doivent donc en général être évaluées séparément, et il n'est pas possible d'estimer a priori que ces facteurs seraient systématiquement identiques, varieraient dans le même sens, et au total pourraient être compensés.

Néanmoins, lorsque des causes d'incertitude sont communes, le risque existe d'être confronté à une incertitude surévaluée, du fait d'une prise en compte excédentaire de certains postes communs. Cette question, qui mériterait un exposé spécifique, a donc fait l'objet d'un traitement.

7.1 Approche générale

La norme NF S 31 115-1 indique dans quelles conditions, appréciables à partir des coefficients de corrélation entre bruits, il peut y avoir compensation entre les valeurs d'incertitude, et réduction de l'incertitude totale. A partir de l'écriture des niveaux et de l'émergence :

$$E = L_{Aeq, Tpart} - L_{Aeq, Tres} \quad (3)$$

$$L_{Aeq, Tpart} = \mu_A + c.e + c_A.e_A \quad (4)$$

$$L_{Aeq, Tres} = \mu_R + c'.e + c_R.e_R \quad (5)$$

μ_A, μ_R Paramètres (valeurs vraies), sans incertitudes

e_A, e_R, e Erreurs ou corrections, d'espérances nulles mais de variances respectives

$$V(e_A) = u_A^2 \quad V(e_R) = u_R^2 \quad V(e) = u^2 \quad (6)$$

Ces grandeurs sont, par hypothèse, considérées comme non corrélées deux à deux.

A partir de la relation de définition de l'émergence, la loi de composition des incertitudes sous sa forme complète donne :

$$u_E = \sqrt{u_{L_{Aeq, Tpart}}^2 + u_{L_{Aeq, Tres}}^2 - 2 \cdot \text{cov}(L_{Aeq, Tpart}, L_{Aeq, Tres})} \quad (7)$$

(avec les abréviations Part pour « particulier » et Res pour « résiduel », deux types de bruit traités par les normes de la famille NF S 31110). On fait apparaître la loi de composition des incertitudes ainsi que l'expression de l'incertitude élargie sous une forme associant les coefficients de corrélation :

$$u_E = \sqrt{(c - c')^2 u^2 + c_A^2 u_A^2 + c_R^2 u_R^2} \quad (8)$$

La prise en compte de la corrélation induite par la variable commune e dans le modèle du niveau ambiant et du niveau résiduel permet de réduire l'incertitude de l'émergence par un phénomène de compensation. La similitude complète de la composante e se traduirait par $c = c'$ et la composante d'incertitude correspondante s'élimine complètement. Dans les autres cas, on note une compensation partielle.

7.2 Exemple

Pour l'incertitude liée à la pondération A, avec e_{AW} et e'_{AW} représentant les causes d'erreur apportées par la pondération A (qui peuvent être différentes dans les deux résultats en fonction de la composition spectrale des bruits)

Des simulations conduites pour des cas réels ou artificiels (Bruit rose, combustion, avions, trains, échappement, réfrigérants ...) permettent de constater que la variation maximale de l'incertitude de l'émergence est de l'ordre de 0,2 dB(A) pour un coefficient de corrélation variant entre 0,4 et 0,65.

Dans le cas où une valeur forfaitaire serait suffisante, une valeur raisonnable est $\rho_A = 0,5$. Si une détermination plus fine de la corrélation s'avère nécessaire, une interpolation linéaire entre 0,5 et 0,65 en fonction de l'émergence peut être suggérée.

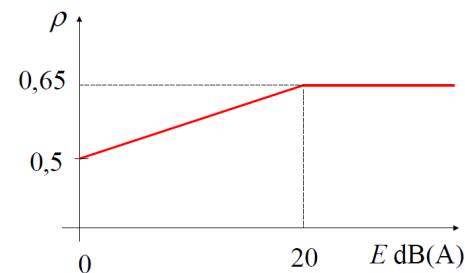


figure 1 : variation du coefficient de corrélation avec le niveau

Une proposition de méthodologie figure dans la norme, à partir des composantes indépendantes d'incertitude, de leur écart-type σ^2 et σ'^2 , et de leur coefficient de corrélation estimé ρ_A , permettant un calcul de la variance de l'émergence :

$$V(E) = \sigma^2 + \sigma'^2 + u_{WA}^2 + u_{WA}'^2 - 2\rho_A u_{WA} u_{WA}' \quad (9)$$

Références

- [1] Norme NF S 31-010 / A1 "Acoustique - Caractérisation et mesurage des bruits de l'environnement - Méthodes particulières de mesurage", AFNOR, (1996).
- [2] Norme NF S 31-110 "Acoustique - Caractérisation et mesurage des bruits de l'environnement - Grandeurs fondamentales et méthodes générales d'évaluation", AFNOR, (2005).

	Source d'incertitude	Incertitude type u_i en dB	u_i^2	Commentaires
1	Directivité du microphone	0,5	0,25	
2	Linéarité de niveau	0,6	0,36	
3	Pondération A	0,9	0,81	L'importance de ce poste est due à la prise en compte identique sur tout le spectre de l'incertitude élevée caractérisant les bords du spectre.
4	Température et humidité	0,0077	$<10^{-3}$	
5	Pression d'air statique	0,5	0,25	
6	Calibreur - conditions de référence	0,2	0,4	
7	Calibreur - conditions de fonctionnement	0,2	0,4	
8	Protection anti-vent	0,08	0,01	
9	mesure des Leq	0,173	0,03	
10	Emplacement de la mesure	0	0	A adapter selon la nature de la source, la disposition vis à vis de la source et les caractéristiques du rayonnement
11	Obstacle proche	0,35	0,12	rubrique 6 du guide NF S 31 115
12	Conditions météorologiques sur le microphone : vent			
13	Idem : pluie			
14	Post-traitement / choix des bornes d'intégration			Selon la dynamique du bruit
15	Champ électro-magnétique			Lieux spécifiques
16	Influence du niveau de bruit de fond			Selon l'exigence en termes de rapport S/B
17	Somme des carrés		2,88	
18	Incertitude-type composée u_c		1,70	$u_c = \sqrt{\sum_i u_i^2}$
19	Incertitude élargie (k=2)		3,39	

Tableau 2 — Récapitulatif des postes d'incertitudes : Tableau détaillé pour un cas particulier