

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR -ANNABA  
BADJI MOKHTAR ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار-عنابة

Année 2010

Faculté des Sciences de l'Ingénieur  
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister

*Evaluation des incertitudes dans le  
cadre des essais de métrologie  
Rapports des essais -Annexes-  
accessibilité CSTB*

Option

Génie Mécanique

Par:

Nayme GHEGHISSI

DIRECTEUR DE MEMOIRE : Rabia KHELIF MC

U. d'Annaba

Devant le jury :

PRESIDENT

N.E. ZEGHIB

Pr

U. d'Annaba

EXAMINATEURS

H. HAMADACHE

MC

U. d'Annaba

Z. ZEMOURI

MC

U. d'Annaba

## **REMERCIEMENTS**

*Tout d'abord. Je remercie le bon dieu, qui nous a donné la force pour accomplir ce travail, Je tiens à remercier **Mr R.KHELIF** directeur de mémoire, d'avoir dirigé et assisté tout au long de cette étude et aussi pour sa collaboration, ses conseils et sa disponibilité malgré sa charge de travail énorme*

*Je tiens à remercier **Mme NGUYEN**, responsable qualité au sein du CSTB de m'avoir accordé la participation à l'élaboration du projet d'accréditation des essais.*

*Je tiens à remercier vivement Professeur **N.E. ZEGHIB** d'avoir accepté de présider le jury de ma soutenance.*

*Mes vifs remerciements vont également à **Mme Z. ZEMOURI** et **Mr. H.HAMADACHE**, maitres de conférences à l'université Badji mokhtar pour avoir accepté d'examiner mon travail.*

*Enfin je remercie tous ceux qui ont participé de près ou de loin pour la réalisation de ce travail*

.

*« Si vous pouvez **mesurer** ce dont vous parlez et l'exprimer par un **nombre**, vous savez quelque chose de votre sujet ; mais si vous ne pouvez pas le mesurer, si vous ne pouvez pas l'exprimer par un nombre, vos connaissances sont d'une bien pauvre espèce et bien peu satisfaisante » .*

**KELVIN, Lord WILLIAN THOMSSON**  
**(1824-1904)**

## ملخص

تهدف المتولوجيا إلى إعطاء معلومات نوعية و هادفة من شأنها أن تساهم في اتخاذ قرار قبول أو رفض منتج، تجربة أو إجراء تعديلات بعد إخضاعها لمقاييس الجودة والنوعية. و في هذا الإطار ندرج هذا العمل ، الذي نود من خلاله تقييم الإرتيابات على مجموعة من التجارب بشأن إعتقاد بعض المخابر المتخصصة في مجال التعمير حسب المعيار الدولي (ISO 17025). تعالج هذه المذكرة في البداية المفاهيم العامة لحساب الإرتيابات، ثم تتطرق بإسهاب إلى طريقة العمل المنتهجة، و التي نلخصها في الخطوات التالية:

- الفهم الدقيق للتجربة.
- إستخلاص مجال الإرتياب من المعيار المعتمد.
- الإحتكاك بالمشرفين على التجربة قصد استقصاء العوامل المؤثرة في الإرتيابات.
- إعتقاد النموذج الرياضي المناسب.
- حساب الإرتيابات و مقارنتها مع مجال إرتياب المعيار المعتمد.
- و أخيرا وضعها تحت تصرف المختصين بالمخبر لاستخدامها و تحديثها.

## *Résumé*

La métrologie sert à fournir une information quantitative et objective qui aide à la prise de décision (accepter ou refuser un produit, accepter ou refuser un essai, accepter ou refuser une matière première, trier des produits, réguler un paramètre à l'aide d'un régulateur) et la prise d'actions (retoucher un produit, agir sur un paramètre physique).

C'est dans cette perspective que s'inscrit mon travail qui consiste à estimer les incertitudes sur les chaînes de mesure de la division Baies et Vitrages et par la suite évaluer l'incertitude des éléments calculés.

Le présent mémoire présente, tout d'abord quelques notions de calculs d'incertitudes, puis la méthodologie de travail adoptée qui se résume comme suit :

- Comprendre le processus de l'essai,
- Identifier les exigences normatives,
- Rechercher des informations auprès des exploitants d'essais (rapport d'essai),
- Identifier les facteurs d'influences sur le mesurande (méthode 5M),
- Etablir le modèle mathématique,
- Calculer les incertitudes,
- Enfin, saisir les données sur le serveur Dany.

Les résultats obtenus dans le domaine des essais AEV, la caractérisation des bancs d'essai clients et les essais mécaniques, répondent aux exigences de la spécification technique référencée BV/OE § 2.7N. Grâce à ce travail, le CSTB devient un prestataire de service (expertise) dans le domaine d'étalonnage des bancs désigné aux essais AEV. Donc il devient la référence française dans ce domaine.

## ***ABSTRACT***

Metrology is used to provide quantitative and objective information, which contributes to the decision-making (to accept or refuse a product, to accept or refuse a test, to accept or refuse a raw material, to sort products, to control a parameter using a regulator) and the catch of action (to improve a product, to act on a physical parameter).

It is from this point of view that my training course is registered which consists to estimate uncertainties on measuring equipment of power used in the fenestration department and to Thereafter evaluate the uncertainty of the calculated elements.

This report presents, first of ail, some concepts of calculation of uncertainties, and then the methodology of work adopted which is summarized as follows:

- To include/understand the process of the test,
- To identify the normative requirements,
- To seek information near the owners of tests (report of test),
- To identify the factors of influences on the misbrand (method 5M),
- To establish the mathematical model,
- To calculate uncertainties,
- And finally, to enter the data's on Dany net work.

# SOMMAIRE

## **INTRODUCTION GENERALE**

### **Chapitre I: ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE**

I.1.Introduction .....	01
I.2. Les spécificités de la métrologie .....	01
I.3. Les Trois Volets de la Métrologie .....	03
I.4. L'accréditation des laboratoires d'étalonnage .....	03
I.5. Assurance de la qualité des mesures .....	03
I.6. Surveillance des processus de mesure .....	06
I.7. Gestion des moyens de mesure, de contrôle et d'essai .....	07
I.8. Travaux récents en analyse des incertitudes .....	07

### **Chapitre II: TRAITEMENT DES RESULTATS DE MESURE**

II.1. Les types des erreurs dans les données expérimentales .....	10
II.2. Traitement statistique des erreurs aléatoires .....	11

### **Chapitre III: ÉVALUATION DES INCERTITUDES DE MESURE**

III.1. Méthode de calcul des incertitudes .....	15
III.2. Méthodologie d'évaluation .....	15
III.3. Détermination de l'incertitude d'étalonnage .....	17
III.4. Combinaison des incertitudes-types .....	25
III.5. Exemple de présentation du bilan d'incertitude .....	26
III.6. Analyse de régression par la méthode des moindres carrées .....	27
III.7. Capabilité des instruments de mesure .....	31

### **Chapitre IV: PARTIE EXPERIMENTALE**

IV.1. Organisation du CSTB .....	33
IV. 2. Organigramme du département enveloppe et revêtement (DER) .....	34
IV.3. Organigramme de la division baie et vitrages .....	35
IV.4. Objectif des essais réalisés .....	35
IV.5. Missions de la division baies et vitrages .....	35
IV.6. Méthodologie du travail .....	36
IV.7. Essais réalisés .....	38

IV.7.1. Estimation des incertitudes des essais AEV (air,eau,vent) .....	39
IV.7.2. Caractérisation des stations (aev) appliquée au banc d'essai d'un client CSTB ...	58
IV.7.3. Calcul d'incertitudes appliquées à la métrologie mécanique .....	79

## **Chapitre V: *RESULTATS ET DISCUSSIONS***

V.1. Essais mécaniques (CNOMO et MSA) .....	84
V.2. Essais AEV .....	84
V.3. Caractérisation des essais AEV appliquées au banc d'un client .....	85
V.4. Insertion dans le milieu professionnel et acquis technique .....	86

## ***CONCLUSION GENERALE***

## ***REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES***

## ***ANNEXES***



## **LISTE DES TABLEAUX**

**Tableau 1:** Impact des différentes caractéristiques sur l'incertitude de mesure

**Tableau2:** Coefficient de Student

**Tableau3 :** Facteurs d'influence

**Tableau 4:** Causes réelles ou potentielles de variation du résultat de mesure

**Tableau5 :** Exemple de présentation du bilan d'incertitudes

**Tableau 6 :** Essais réalisés de calcul d'incertitudes de mesures

**Tableau 7:** Récapitulatif des résultats essais AEV

**Tableau 8:** Liste des étalons pour la station client

**Tableau 9:** Récapitulatif des résultats essais AEV

**Tableau 10:** Récapitulatif des résultats essais mécaniques CNOMO

**Tableau 11:** Récapitulatif des résultats essais mécaniques MSA

**Tableau 12:** Résultats d'essais de caractérisation des stations AEV d'un client

## **LISTE DES FIGURES**

**Figure 1 :** Logigramme de la méthodologie de calcul d'incertitudes

**Figure 2 :** Logigramme de méthodologie de travail

**Figure 3 :** Schéma de l'essai

**Figure 4 :** Diagramme d'ISHIKAWA « 5M »



***Nomenclature***

## *Nomenclature*

- $\bar{X}$  : La moyenne d'un échantillon
- S: Ecart type expérimentale
- t: Coefficient de Student
- Urép: Incertitude de répétabilité
- N: Taille de l'échantillon
- A: Composante d'incertitude évaluée statistiquement
- BR: Incertitude déterminée à partir de certificat d'étalonnage ;
- BL: Incertitude liée au montage (dérive, résolution, bruit, température, etc)
- uM: La demi-étendue de la limite maximale d'erreur
- uc: Incertitude type composée
- U: Incertitude type élargie
- k: Coefficient d'élargissement (k=2 correspond à un niveau de confiance de 95)
- C: Coefficient de capacité
- T : Intervalle de tolérance
- K: Coefficient du diaphragme
- q<sub>v</sub>: Débit au niveau du diaphragme
- S : Section du diaphragme
- $\rho$  : Densité volumique de l'air
- $\Delta p$  : Différence de pression de part et d'autre du diaphragme
- V<sub>x</sub>: Débit brut
- V<sub>0</sub>: Débit au niveau du diaphragme
- V<sub>0</sub> /L: Perméabilité linéaire
- V<sub>0</sub> /S: Perméabilité surfacique

$\Delta V$ : Dérive maximale entre deux étalonnages

K: Coefficient de débit du diaphragme

$P_0, T_0$  et  $fh_0$ : Pression, température et humidité au niveau du diaphragme

$P_e, T_e$  et  $fh_e$ : Pression, température et humidité au niveau du caisson (corps d'épreuve)

L: Longueur du joint du corps d'épreuve

ff: Flèche de face

M: Flèche milieu

B: Flèche bas

H: Flèche haut

Ig: Incertitude globale

J: Erreur de justesse

Vd: Variance des différences

Rp: Etendue des moyennes

$K_3$ : Correcteur d'écart –type

Tv: Tolérance à vérifier

R&R: Répétabilité et Reproductibilité

$S_r$ : Ecart – type des résidus

$S_m$ : Ecart – type de la pente

Cov(a ; b): Covariance

## ***INTRODUCTION GENERALE***

Le développement de la compétitivité des entreprises, indépendamment de leur taille, leur secteur d'activité et leur implantation, s'appuie sur deux facteurs essentiels :

- L'innovation technologique,
- L'amélioration continue de leur efficacité engendrée par la démarche qualité de l'entreprise.

Pour assurer la phase « mesure, analyse et amélioration » du cycle P.D.C.A de tout système de management de la qualité, il est nécessaire de mettre en œuvre des contrôles, basés sur des mesures fiables et adaptées au mode de fabrication du produit.

La valeur numérique de mesurage doit être significative : elle doit exprimer la réalité de façon claire et précise, dans un langage accessible à tous, du moins à tous ses utilisateurs potentiels. L'obtention et la maîtrise de la qualité imposent donc au niveau des moyens de mesures de savoir mesurer : c'est-à-dire obtenir des données cohérentes de mesurage.

La confiance accordée au résultat de mesurage est fonction de l'effectif de la série de mesurage réalisée pour quantifier cette grandeur.

Dans la perspective de l'accréditation de ses laboratoires par le COFRAC, l'amélioration et l'exactitude des résultats de mesures et d'essais constituent un impératif, dans la division Baies et Vitrages du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment à Paris. Un planning de calcul des incertitudes des différentes chaînes de mesure est mis en place pour faciliter la prise de décision et la prise d'action.

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail, dont le but fut de maîtriser les protocoles d'essais et par la suite, calculer les incertitudes sur les différentes chaînes d'essais.

Le traitement des incertitudes de mesures est une thématique en plein essor aussi bien dans le milieu académique qu'industriel, les secteurs de l'environnement, la santé, la finance...etc. Aujourd'hui, le traitement des incertitudes dans les problèmes industriels fait l'objet d'un consensus méthodologique.

En métrologie, il existe notamment des normes, NF ISO 13005(Guide des incertitudes de mesure) qui précise la démarche des calculs d'incertitudes et qui repose sur trois points:

- Spécification du modèle physique représentant le système de mesure,
- Analyse du processus de mesure et détection des causes d'erreurs,
- Propagation des incertitudes à travers le modèle des dérivées partielles.

Les objectifs du travail peuvent être résumés comme suit :

- la prise de conscience de l'incertitude de mesure, et par conséquent, de la nécessité de s'intéresser à la capacité du processus de mesure en posant la question suivante: Mon processus de mesures est-il capable de vérifier cette tolérance?

- La correction des habitudes culturelles des industriels qui ont pris l'habitude d'étalonner leurs instruments de mesure, sous l'autorité de leurs clients et auditeurs tierce partie, mais plutôt exploiter les résultats d'étalonnage pour aller vers l'évaluation de l'incertitude de mesure. Sachant que l'instrument de mesure n'est pas le seul contributeur de l'incertitude, l'analyse de cette dernière conduit, dans certains cas, à mettre en évidence des causes (répétabilité des mesures, formation/sensibilisation des opérateurs, environnement de mesure...etc.). Diminuer l'incertitude de mesure, c'est donc la possibilité d'augmenter la zone de conformité et aussi gagner en productivité.
- Faire gagner de l'argent à son entreprise, voilà un challenge qui pourrait bien mettre le métrologue au cœur des processus industriels et, ainsi, valoriser sa mission à sa juste valeur.

Le travail du projet portera dans un premier temps à la fois sur la compréhension de l'essai et du mode opératoire, de la chaîne de mesure et sur la modélisation du processus de mesure, puis l'analyse des différentes sources d'erreurs.

Ensuite, l'estimation des incertitudes par la méthode dite statistique (type A), et ce tout ce qui concerne les essais faits dans des conditions de répétabilité et de reproductibilité.

Dans un deuxième temps, les travaux porteront sur l'évaluation d'incertitude liée à chaque erreur en choisissant la loi de distribution correspondante, puis la détermination des grandeurs d'entrée suivie par l'estimation d'incertitudes liée à chaque paramètre (méthode autre que statistique type B)

Après, l'incertitude composée se calcule en combinant l'incertitude type sur chacune des grandeurs d'entrées du modèle. La loi pour combiner les incertitudes s'appelle la loi de propagation de l'incertitude. Son expression pourra sembler compliquée, mais il faut savoir que dans de nombreux cas, elle se simplifie.

Le passage de l'incertitude composée à l'incertitude élargie contenant une large proportion des valeurs attribuables au mesurande, est assurée par une hypothèse supplémentaire. Il faut en effet connaître la forme de la distribution de la variable aléatoire. Classiquement, on fait l'hypothèse de la normalité de cette distribution, ce qui induit que pour un facteur d'élargissement ( $k=2$ ), l'intervalle contient environ 95% des valeurs attribuables au mesurande.

Dans certains cas, on dispose que de la courbe d'étalonnage d'instrument de mesure qui n'est pas linéaire. La linéarisation du modèle est accompagnée d'une incertitude sur la pente et l'ordonnée à l'origine qu'on peut les calculer uniquement par la méthode dite des moindres carrées.

## ***1.1. INTRODUCTION***

Directement ou non, toute décision dans une entreprise est liée à une mesure, qu'elle soit technique, financière, comptable, humaine... La fonction métrologie est donc stratégique dans la gestion de l'entreprise, et cela quelque soit son domaine : mécanique, électronique, agroalimentaire, chimie, pharmacie, médical, environnement, biologie, aéronautique, spatiale, nucléaire, agriculture...

Pour n'importe quelle entreprise, privée ou publique, ayant but soit économique soit social, faire de la qualité métrologique est un impératif qui entraîne bien sûr un coût. Mais n'est-ce pas le prix à payer pour une meilleure compétitivité, la pérennité de l'entreprise, sa capacité à innover et à se développer, sur la marché national ou à l'international ?

Toute fois, pour qu'elle apporte sa valeur ajoutée, la fonction métrologie dans l'entreprise doit être reconsidérée. Les entreprises doivent apprendre à mesurer pour bien produire plutôt que pour savoir si elles ont bien produit. Pour cela, elles doivent cesser de considérer la mesure comme une fonction de support et la placer au cœur du processus de production, dès la phase d'analyse des besoins.

Aujourd'hui, on peut assurer la qualité métrologique à l'aide de l'accréditation qui permet, d'assurer directement la fiabilité des essais et mesures effectuées dans les laboratoires accrédités internes aux organisations productrices de biens et services, soit d'y porter cette qualité par l'intermédiaire d'organismes tiers accrédités qui fournissent à ces organisations, des services d'étalonnage, essais, et certification de produits et systèmes. La qualité métrologique peut être réalisée seulement à la suite du développement de la culture et de bonnes pratiques métrologiques dans les organisations concernées.

Actuellement, la métrologie n'est pas assez connue dans notre pays. Elle doit renforcer sa visibilité.

Quelles sont les actions à mener ? Il faut communiquer avec les industriels pour leur faire connaître l'accréditation et les sensibilisés de ces intérêts économiques et financières.

## ***1.2. LES SPECIFICITES DE LA METROLOGIE***

### ***1.2.1. Le vocabulaire***

Le vocabulaire lié à la métrologie est tellement particulier et tellement rigoureux qu'il a été nécessaire d'établir un document spécifique intitulé Vocabulaire International de Métrologie connu sous

le vocable VIM. Ce document regroupe un peu plus de centaine (120 termes) : étalon, étalonnage, vérification, traçabilité, incertitudes, justesse, précision,...etc.

### ***1.2.2. La rigueur et le doute***

Le métrologue doit donc posséder un certain nombre de qualités pour exercer son métier :

- ***La curiosité***

Pour estimer une incertitude, il doit se livrer à une enquête minutieuse pour déterminer tous les paramètres qui peuvent influencer la mesure. Il doit donc se poser un grand nombre de question et y répondre.

- ***L'ordre de la méthode***

Toute opération de métrologie doit être écrite dans une procédure d'étalonnage ou de vérification. Pour comparer des étalonnages successifs, il est indispensable de répéter les opérations de manière rigoureusement identique (conditions de répétabilité).

- ***L'aptitude à douter***

Ce trait de caractère conduit à répéter les mesures dans des conditions différentes (conditions de reproductibilité).

- ***Le sens d'observation***

La connaissance des mesures permet au métrologue de répéter très vite un paramètre qui pourra perturber la mesure, des exemples : un montage mal réalisé en électricité, une température ambiante anormale, la présence de poussière ...etc.

- ***L'honnêteté***

Le métrologue a souvent la responsabilité de signer une série de résultats de mesure sous forme de certificat d'étalonnage ou de constat de vérification. Son honnêteté lui imposera de ne transcrire que les valeurs qu'il aura relevées sans modification ou adaptation qui pourrait satisfaire à une demande client pour rendre le produit conforme à une spécification.

### ***1.2.3. L'universalité de la mesure***

Plus la technologie se développe, plus les objets que nous utilisons sont équipés de capteurs de mesures physiques les plus diverses. L'exemple de l'automobile est impressionnant. Aujourd'hui, la plupart des voitures sont équipées d'une centaine de capteurs; parmi les paramètres mesurés, il y a des courants, des tensions, et des résistances électriques, des températures, des pressions, des accélérations, des déplacements, des volumes, des vitesses...etc.



Les mesures effectuées aux quatre coins du monde devront concourir soit au bon fonctionnement du véhicule soit à la sécurité des passagers. Cette mondialisation des étalons et la multiplicité de la diversité des mesures du monde moderne impliquent que les métrologues se rencontrent et communiquent aussi bien au niveau national que dans des réunions internationales.

### ***1.3. LES TROIS VOILETS DE LA METROLOGIE***

Suivant les buts poursuivis par l'entreprise ou le laboratoire, la métrologie mise en œuvre peut être :

- Scientifique, si elle est pratiquée dans le seul but de développer de nouveaux étalons ou les conserver (exemple : laboratoire National des Essais en France LNE)
- Légale, si elle est pratiquée dans le seul but de garantir que les lois sont appliquées (Office National de Métrologie Légale en Algérie ONML).
- Industrielle, si elle est pratiquée dans le but de garantir la qualité des mesures effectuées dans une entreprise fabricant des produits ou produisant des essais.

### ***1.4. L'ACCREDITATION DES LABORATOIRES D'ETALONNAGE***

Le label qualité décerné aux laboratoires de métrologie par les organismes d'accréditation des différents pays (Algérie Accréditation : ALGERAC en Algérie et Comité Français d'Accréditation : COFRAC en France) permet aux laboratoires accrédités de mettre en avant leur capacité à effectuer des étalonnages avec une rigueur non contestable, notamment en matière de traçabilité aux étalons et de détermination des incertitudes de mesure.

### ***1.5. ASSURANCE DE LA QUALITE DES MESURES***

#### ***1.5.1 Validation des méthodes d'analyses***

Selon la norme ISO 17025, la validation se définit comme la « confirmation par examen et l'apport de preuves objectives du fait que les prescriptions particulières en vue d'une utilisation prévue déterminée sont remplies »

Il faut donc démontrer que la méthode mise en œuvre par le laboratoire est apte à l'emploi prévu (besoin du client).

Les besoins et attentes client doivent être clairement définis et identifiés. Comme la norme l'indique, il faut élucider la demande et considérer ce dont le client aura besoin pour utiliser l'information qui lui sera remise. Il faut donc examiner les exigences règlementaires et légales et rechercher les informations nécessaires à la mise en œuvre de la méthode.

La norme demande de valider les méthodes lorsque les laboratoires utilisent les méthodes non normalisées ou hors du domaine d'application de la norme.

Les performances d'une méthode peuvent s'exprimer à l'aide des caractéristiques telles que : la justesse, la linéarité, la répétabilité, la reproductibilité, la robustesse, les limites de détections, sensibilité, sélectivité, spécificité ...

Ces caractéristiques s'évaluent grâce à des travaux expérimentaux, réalisés soit en interne, soit de manière collective en impliquant plusieurs laboratoires. La connaissance des caractéristiques des méthodes est une information tout à fait pertinente pour l'évaluation de l'incertitude des résultats d'analyse.

Toutes les caractéristiques qui servent à décrire les performances d'une méthode analytique n'ont pas une incidence directe sur l'évaluation de l'incertitude de résultat d'analyse.

Le tableau ci-dessous résume l'impact des différentes caractéristiques sur l'évaluation de l'incertitude

Caractéristiques	Impact sur l'incertitude
Sélectivité, spécificité	Les effets liés à la sélectivité et à la spécificité sont évalués globalement lors de l'évaluation de la composante d'incertitude liée à la justesse
Répétabilité, Reproductibilité	Ces variances figurent parmi les éléments les plus significatifs pour l'évaluation de l'incertitude
Linéarité, Sensibilité	<b>1<sup>er</sup> Cas</b> : Si le test statistique montre que le modèle est linéaire, pas d'incidence sur l'incertitude <b>2<sup>ème</sup> Cas</b> : Si le test montre que le modèle n'est pas linéaire, on peut alors soit réduire le domaine de mesure, soit ajouter une composante (de non linéarité) dans l'évaluation de l'incertitude. Cette composante pouvant être l'écart maximal au modèle.
Capacité de détection	Cette caractéristique n'a pas d'incidence sur l'évaluation d'incertitude, elle sert pour définir le domaine d'utilisation de la méthode
Robustesse	La technique des plans d'expériences permet de quantifier l'effet d'un facteur, pour un facteur dont le domaine de variation est (a), alors l'incertitude correspondante est $u_a = c \frac{a}{\sqrt{3}}$ , ou C est le coefficient de sensibilité de la réponse aux variations du facteur a.

**Tableau 1** : Impact des différentes caractéristiques sur l'incertitude de mesure

Quelles stratégies pour l'évaluation de l'incertitude et la prise en compte des caractéristiques de la méthode ?

Le laboratoire d'analyse face à la question de la validation des méthodes et à l'estimation de l'incertitude des résultats se trouve face à deux situations possibles : soit l'approche intra-laboratoire avec une démarche analytique qui lui permet d'évaluer l'incertitude du résultat de mesure en combinant toutes les sources d'incertitude, soit une approche collective (inter-laboratoire), si la méthode de mesure est aussi pratiquée par d'autres collègues [1].

### *1.5.2. L'approche intra-laboratoire*

Cette approche se décompose en plusieurs possibilités.

Si un modèle mathématique complet du processus de mesure est disponible, une évaluation analytique de type GUM (Guide Uncertainty Measurement) est possible. La procédure décrite dans le GUM comporte 4 étapes principales :

1. Identification des facteurs d'influence qui ont une action sur le résultat d'analyse et prise en compte de ces facteurs pour la construction du modèle mathématique
2. Évaluation de l'incertitude des différentes grandeurs d'entrée du modèle (facteurs d'influences) à l'aide de la méthode statistique de type A et autre que statistiques de type B.
3. Application de la loi de propagation de l'incertitude sur le résultat en fonction de l'incertitude sur le résultat en fonction de l'incertitude des différentes grandeurs d'entrée du modèle.
4. Evaluation d'une incertitude élargie.

### *1.5.3 L'approche inter-laboratoire*

Cette approche se base sur le calcul de la reproductibilité qui prend en compte à la fois la moyenne des répétabilités des différents laboratoires participant à la campagne d'évaluation des incertitudes, plus la composante liée à la dispersion des valeurs liée à chaque laboratoire (compétences de technicien par exemple).

### *1.5.4 Expression des besoins (cahier des charges)*

Le cahier des charges résulte de la revue de contrat, il consiste à répondre aux questions.

- **Dans quel but on mesure ? (objectif) :** étalonnage, contrôle de production, mesure dans un cadre réglementaire visant à prononcer une conformité, expertise judiciaire, mesure à l'initiative d'un particulier, d'une collectivité...

- **Sur quelle grandeur porte la mesure ?** (éventuellement, autant de processus de mesure que grandeurs) : quel mesurande, spécifications associées ou risques (valeurs et tolérance), incertitude acceptable.
- **Comment faire la mesure ?**
  1. Choix d'une méthode ;
  2. Existante : normalisée ou non, existante et validée ;
  3. Méthodes pouvant être mise en œuvre et validées rapidement ;
  4. Méthodes à concevoir en totalité (nouveau dans l'entreprise, phase de recherche et développement ...)
- **Quand ?** Délais
- **Combien ?** coûts
- **Contraintes** (prise en compte des contraintes imposées (réglementation, sécurité, protection de l'environnement) [2].

Dans les approches intra-laboratoire et inter-laboratoire, le principe pour évaluer l'incertitude est le même : combiner les sources d'incertitudes les plus significatives en faisant la somme de leurs variances.

En fonction des données disponibles, qui sont différentes suivant l'approche choisie, on compose, dans la démarche intra-laboratoire : justesse, répétabilité, non-linéarité, robustesse, et d'autres facteurs si nécessaire ; dans l'approche inter-laboratoire : au minimum justesse et reproductibilité inter-laboratoire.

## ***1.6. SURVEILLANCE DES PROCESSUS DE MESURE***

La surveillance d'un processus de mesure est un ensemble d'actions intervenant à la suite des différentes étapes préalables à son choix et utilisation (validation du processus de mesure, estimation d'incertitudes de mesure, des capacités, du risque industriel, ...) visant à s'assurer du maintien (pérennité) de ses performances dans le temps. Elle intervient entre les opérations d'étalonnage ou de vérification. Mais quelles sont les enjeux de la surveillance du processus de mesure ?

La mise en place d'une stratégie de surveillance permet :

- De réduire les coûts liés à la gestion des instruments de mesure (diminution de la périodicité d'étalonnage).
- De maîtriser aussi les processus de mesure, et ainsi à terme de réduire les coûts de non qualité.
- De sensibiliser tous les acteurs de l'entreprise aux incertitudes de mesure et aux

capabilités en observant, lors des surveillances, les dispersions liées aux mesures.

- Développer et promouvoir la culture statistique liée à la réalisation du produit et/ou service.

La mise en place d'un dispositif de surveillance des processus de mesure est un élément fondamental pour garantir la qualité des produits et pour maîtriser au mieux les risques.

La pratique de l'étalonnage périodique sans autre dispositif de surveillance conduit inévitablement à la conclusion suivante : Soit des équipements vérifiés trop tôt (conforme), soit des équipements vérifiés trop tard (non conforme). Il convient donc de passer à une fréquence de raccordement conditionnelle en fonction des risques encourus par l'entreprise. La fréquence de raccordement conditionnelle permet donc de tendre vers le ratio optimum (vérifié trop tôt ou vérifié trop tard) [3].

### ***1.7. GESTION DES MOYENS DE MESURE DE CONTROLE ET D'ESSAI***

La gestion des moyens de mesure recouvre l'ensemble des actions à engager pour constituer et entretenir le parc d'instruments de mesure nécessaire à la satisfaction des besoins de l'entreprise.

Cette gestion nécessite de prendre en compte :

- L'analyse du besoin et le choix des moyens de mesure.
- La réception, la mise en service et le suivi des moyens.
- L'étalonnage ou la vérification des moyens et les décisions qui en découlent.

Cette gestion doit aider l'entreprise à mieux maîtriser la connaissance des performances exactes de ses moyens, leurs limites d'emploi et leur comportement dans le temps, ceci afin qu'elle puisse donner l'assurance de la qualité des opérations de mesurage qu'elle réalise. Donc, le choix d'un moyen de mesure est en rapport avec l'incertitude de mesurage, la tolérance à contrôler et sa classe de précision [4].

Il faut bien constater que l'évaluation des incertitudes de mesure n'est pas encore totalement intégrée dans la plupart des entreprises, même si tout le monde a progressé ces dernières années sur ce sujet.

En mettant en place des stratégies de surveillance adaptées au contexte, les industriels pourront non seulement limiter les coûts liés aux étalonnages mais surtout diminuer le risque client.

### ***I.8. TRAVAUX RECENTS EN ANALYSE DES INCERTITUDES***

- Pour augmenter la qualité des résultats et motiver le personnel de laboratoire médical et le rendre favorable pour une amélioration continue, une équipe de travail [5]. a réussi l'accréditation du laboratoire pour 531 épreuves selon l'ISO 15189 version 2003).

Ce groupe ambitieux a fourni beaucoup d'efforts pour accomplir cette lourde tâche et a traversé l'évaluation avec succès.

Les étapes de l'accréditation se résument dans l'ordre suivant :

- Approches environnementales du laboratoire (maîtrise de températures, humidité et pression ...etc) ;
  - Installation d'un système de gestion de document (DMS) ;
  - Utilisation d'un système informatique de laboratoire (LIS) ;
  - Mettre en place des actions correctives et préventives ;
  - Calculs des incertitudes de mesures pour répondre à un besoin normatif.
- Dans ces travaux, l'équipe du laboratoire [6]. développé la notion de la qualité au sein des laboratoires de la santé publique en mettant l'accent sur le rôle des organismes accréditeurs.

L'erreur de qualité de santé publique est accomplie par les corps accréditant professionnellement fondés et exposé aux contrôles des ces agences.

Ces organisations mettent en place des normes ou définissent des règlements qui s'adressent à des fonctions importantes d'organisation.

Une des fonctions évaluée par les normes du Programme d'Accréditation Clinique(JCI) de Laboratoire est **la planification**, le **développement** et la **disposition** de services de laboratoire. les normes rattachées à cette édition adressent les processus nécessaires qui devraient être dans l'endroit avant d'exécuter la mise à l'essai.

Les fonctions couvertes par ces normes et ces services peuvent être résumées comme suit :

- Les chefs de laboratoire planifient les services, les fonctions et les produits à être fournis
- Les chefs de Laboratoire devraient s'assurer que les besoins des patients sont disponibles.
- Il doit y avoir des renseignements modernes pour tous les utilisateurs. La réalisation d'un manuel de laboratoire est une façon efficace de faciliter l'utilisation nécessaire des services de laboratoire.

Les renseignements pour les patients devraient inclure l'explication et les instructions concernant les procédures cliniques pour être exécutées.

- Le travail présente l'expérience développée par le Laboratoire de Métrologie d'Isotope radioactif (LMR)de l'Argentine en terme d'accréditation[6], ce laboratoire d'étalonnage

nous montre à travers son expérience la structure du système qualité , les résultats d'audit de la Commission nationale de l'énergie nucléaire (CNEA) comme le résultat du processus d'accréditation du Système de Qualité par ISO 17025 et donne le nombre de non-conformités découvertes et des observations faites qui ont toutes été résolues.

Le LMR, comme un laboratoire de référence national, a la responsabilité du développement, la maintenance et la diffusion des normes nationales pour la radioactivité Depuis 1998 le LMR a adopté l'ISO 17025.

- La société des pharmaciens et chimistes canadiens a publié cet article [7]. pour nous faire part de son expérience de la mise en place d'un système d'accréditation de laboratoires pharmaceutiques et médicaux pour :
  - S'assurer que le traitement aide les patients et ne cause pas de mal.
  - Minimiser les risques des traitements
  - Réduire le temps d'attente et les retards qui sont nuisibles aux patients
  - Ne pas gaspiller le temps et l'argent aussi pour les docteurs que pour les patients.
  - Rendre les services médicaux équitables et de grande qualité pour tous les patients indépendamment de leur statut social, culturel, racial ...etc.
- KBUDEK, est un programme de contrôle de qualité externe [8] de KBUD (Association de Pharmaciens(Chimistes) Cliniques) en Turquie qui a mis en place (ISO/IEC Guident 43-1) pour évaluer non seulement ces incertitudes de mesures dans les conditions du laboratoire , mais aussi il a pris en compte un écart-type qui exprime la compétence des techniciens en faisant des essais intralaboratoires pour évaluer la taille du déplacement(de la prévention) de laboratoire.

Les articles publiés dans le domaine de la métrologie mécanique sont rares.

## ***II.1. LES TYPES DES ERREURS DANS LES DONNEES EXPERIMENTALES***

L'obtention de la meilleure précision n'est pas une fin en soi. L'important quand on entreprend une série de mesures, est de savoir à quoi elles vont servir, d'adapter l'appareillage à la précision souhaitée, au moindre coût et le plus rapidement possible.

On distingue trois types principaux d'erreurs :

### ***II.1.1 Les erreurs aléatoires***

Affectent la précision des mesures. Elles sont étudiées soit en effectuant des calculs d'incertitudes soit en comparant statistiquement les résultats d'expériences soigneusement répétées.

### ***II.1.2 Les erreurs grossières***

Elles se produisent rarement et sont facilement identifiées car elles conduisent à des valeurs excentriques qui diffèrent significativement des résultats dans une série de mesures. Elles sont naturellement éliminées avant interprétation des résultats.

### ***II.1.3 Les erreurs systématiques***

Il est beaucoup plus délicat d'identifier les erreurs systématiques qui affectent l'exactitude. Il est très difficile d'être exhaustif dans la description des erreurs systématiques. Les principales sont :

1. les erreurs de méthodes.
2. les erreurs instrumentales.
3. les erreurs personnelles.

Les erreurs systématiques sont les plus difficiles à détecter et nécessitent une vigilance constante dans les laboratoires. Certaines dites « bonne pratique de laboratoire » permettent de donner un cadre réglementaire à cette vigilance.

La méthode la plus rigoureuse d'évaluation des erreurs aléatoires est toujours la méthode statistique, mais elle exige de répéter un nombre de fois significatif l'expérience et ce n'est pas toujours possible. Une manière simple d'appréhender l'incertitude sur un résultat est d'utiliser la combinaison des incertitudes de chaque étape [9].



## II.2. TRAITEMENT STATISTIQUE DES ERREURS ALEATOIRES

### II.2.1 Principe de base

On appelle échantillon de données un nombre fini (N) d'observations expérimentales de la grandeur x. Comme les lois statistiques ont été établies pour une population c'est à dire un échantillon de très grande taille, elles doivent être modifiées quand on les applique à un petit échantillon de données.

On appelle moyenne de l'échantillon, le terme suivant :

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad \text{..... II.1}$$

L'écart type (s) d'un échantillon fini est défini par :

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad \text{..... II.2}$$

On peut approfondir la signification statistique de l'écart type à condition d'y associer une limite de confiance (LC). La limite de confiance définit un intervalle de confiance dans lequel la valeur réelle a (p) de chance de se trouver.

Les calculs théoriques démontrent que l'écart type doit être majoré par un facteur multiplicatif d'autant plus grand que le nombre de mesures est faible et l'exigence de fiabilité grande :

A une limite de confiance de (p) correspond l'intervalle :

$$x = \bar{x} \pm \frac{ts}{\sqrt{N}} \quad \text{..... II.3}$$

Où :N, s,  $\bar{x}$  ont les significations précédentes et (t) coefficient de Student.

On trouve dans les ouvrages de statistique des tableaux complets donnant (t) en fonction de N et des limites de confiance [10]. .

Nombre de mesures N	Facteur p pour les limites de confiance			
	80%	90%	99%	99,9%
2	3,08	6,31	63,7	637
3	1,89	2,92	9,92	31,6
4	1,64	2,35	5,84	12,9
5	1,53	2,13	4,60	8,60
6	1,48	2,02	4,03	6,86
10	1,38	1,83	3,25	4,78
15	1,34	1,76	2,98	4,14

**Tableau 2 :** Coefficient de student

### *II. 2.2 Modèles et erreurs associées*

Dans de nombreuses applications, les mesures sont complétées par des résultats de modèles, conduisant à comparer des nombres tous incertains, mais dont seuls les résultats expérimentaux sont accompagnés d'une estimation des incertitudes. Avec le développement des méthodes d'estimation des incertitudes de mesure, se pose la question de la faisabilité et de la pertinence de l'application de ces méthodes pour déterminer l'incertitude des modèles. Il est montré que les définitions et méthode de calcul utilisées pour les incertitudes de mesure ne peuvent pas être utilisées comme indicateurs de la qualité des modèles.

### *II.2.3 Topologie des modèles*

Les modèles sont utilisés dans différents domaines (climatologie, météorologie, biologie, industrie, ...etc), dont l'objet n'est pas directement accessible à l'expérimentation. Ils peuvent être des modèles physiques (maquettes) ou modèles théoriques, exprimés sous forme de relations mathématiques dont la résolution est de plus en plus souvent traité par des méthodes de calculs numériques [11].

#### ➤ *Modèles physiques*

Les modèles physiques sont utilisés dans certains domaines où les lois théoriques ne sont pas complètement connues. L'étude sur ces modèles, souvent réalisée à échelle réduite, permet de visualiser l'ensemble du phénomène et de suivre son évolution au cours du temps, en mesurant les paramètres d'intérêt dans des conditions de laboratoires.

➤ **Modèles mathématiques**

Les modèles mathématiques sont des constructions conceptuelles, allant de modèles simples à des modèles plus complexes. Un exemple de modèle familier du métrologue est le développement limité de Taylor utilisé pour la propagation des incertitudes de mesure. Cette exemple rappelle que le modèle mathématique n'est applicable que sous certaines conditions et qu'il conduit, même en respectant ces conditions, à une solution éventuellement exacte mais d'une équation approchée.

➤ **Modèles numériques**

Les équations des modèles mathématiques peuvent être discrétisées sous forme numérique, avec des modèles de différents types en fonction de la représentation spatiale (0D, 1D, 2D, 3D) et temporelle (stationnaire ou instationnaire) choisies pour le système étudié.

Les modèles numériques se distinguent par la génération « rapide » d'un nombre élevé d'informations.

#### **II.2.4 Sources d'erreur dans les modèles**

L'identification et la réduction des erreurs sont les préoccupations naturelles des modélisateurs et guident l'élaboration des modèles. Pour tous les modèles, qu'ils soient physiques, mathématiques ou numériques, les erreurs sont dues à la méconnaissance des données d'entrée et des lois théoriques. A ces erreurs, les modélisations numériques ajoutent des erreurs liées à la discrétisation des équations tandis que les modèles physiques sont confrontés à des erreurs de similitude (liées aux changements d'échelle)

#### **II.2.5 Qualité des modèles**

Les caractéristiques décrivant la qualité d'un modèle sont nombreuses, parmi lesquelles on peut citer :

- La robustesse (le modèle ne diverge pas lorsque les données d'entrée sont peu modifiées)
- La sensibilité (la sortie est sensible à des variations significatives des données d'entrée)
- L'ambiguïté (simulations proches pour des valeurs différentes des paramètres)

D'une manière générale, la qualité d'un modèle est évaluée à travers la vérification et la validation.

L'évaluation des incertitudes de modèles et non la propagation des incertitudes de mesure, vise à exploiter la signification du résultat obtenu, elle doit correspondre à une réflexion argumentée sur le degré de vraisemblance et de prudence des éléments de l'étude les plus sensibles.

Un modèle, qu'il soit physique, mathématique ou numérique, est une représentation du système étudié, qui a pour objectif de répondre à une question posée sur l'objet soumis à étude et non sur le modèle lui même.

Le modèle doit servir à produire de la connaissance pour la construction d'hypothèses, de découvertes, de validations ou de prévisions ; il est nécessairement une simplification de la réalité, car d'après Selon G. Beslon, « l'enjeu de la définition de la qualité d'un modèle est d'apprécier son apport à la compréhension progressive d'un système et de ses comportements ».

La certification ISO 9000 est maintenant incontournable dans les relations clients-fournisseurs. Dans ce cadre la norme stipule que pour démontrer la conformité d'un produit aux exigences spécifiées, l'incertitude de mesure des équipements utilisés est connue et compatible avec l'aptitude requise en matière de mesurage.

La détermination de l'incertitude de mesure permet d'estimer les risques de déclarer conforme un produit mauvais ou non conforme un produit bon. Mais qu'est qu'une incertitude de mesure ?

Les incertitudes de mesurages sont les paramètres qui caractérisent la dispersion des valeurs associées au mesurande. Elles doivent être établies raisonnablement et exprimées sous forme d'un écart-type (ou d'un multiple de celui-ci).

Elle définit un intervalle dont on espère qu'il contient la valeur vraie de mesurande.

L'étude des incertitudes a donc pour objectif de déterminer les capacités des moyens de mesures [12].

### ***III.1. METHODES DE CALCULS D'INCERTITUDES***

Plusieurs méthodologies coexistent pour évaluer l'incertitude associée à un résultat de mesure, d'étalonnage, d'essai ou d'analyse.

Ces méthodologies sont souvent distinguées, par l'origine des données qu'elles utilisent :

- Méthodologies intra organismes lorsque les données sont accessibles au sein de l'organisme lui même (carte de contrôle, plan d'expérience)
- Méthodologies inter ou extra organismes lorsque les données sont externes à l'organisme (comparaison inter laboratoires) [13].

### ***III.2. METHODOLOGIE D'EVALUATION***

L'estimation de l'incertitude de mesure associée à un résultat de mesure se déroule en quatre étapes :

- La définition du mesurande
- La description et l'analyse du processus de mesure
- L'estimation de l'incertitude
- L'expression de l'incertitude

*Etape 1 : Définition du mesurande*

D'après le guide de vocabulaire international de la métrologie (VIM), le mesurande est défini comme la « grandeur particulière soumise à mesurage », cette description doit être aussi complète que possible et prise en compte :

- Le principe physique de la méthode
- Les caractéristiques de la méthode
- Les niveaux des valeurs auxquels on souhaite estimer l'incertitude
- Les grandeurs d'influence

Une mauvaise définition du mesurande peut entraîner des erreurs importantes dans l'exploitation des résultats de mesure et l'estimation de l'incertitude associée [14].

*Etape 2 : Description de la méthode de mesure*

Toute opération de mesure est entachée d'erreurs. Ces erreurs ont pour origine le système de mesure et la grandeur elle-même.

Le système de mesure n'est jamais parfait. Il peut être sensible à l'environnement (exp : température ambiante). Il n'est pas exact puisque la répétition des mesures révèle une dispersion des résultats, et même les étalons qui ont servi à son étalonnage ne sont pas exacts. Donc, les résultats de mesure sont très souvent dépendants de la méthode employée.

Il est donc important de la détailler avec une précision suffisante, l'objet étant de mettre en évidence les facteurs d'influence du résultat et de vérifier que ces facteurs sont bien pris en compte lors de l'évaluation des incertitudes.

Ces facteurs d'influence peuvent être listés par l'utilisation du diagramme d'Ishikawa (5M), mis en œuvre sur la méthode de mesure, d'analyse, d'essai ou d'étalonnage mais également aux opérations mises en œuvre avant (pré-) et après (post-) la mesure en elle-même. Les laboratoires d'analyses utilisent d'ailleurs les termes de « pré-analytique » et de « post-analytique » pour identifier ces phases :

Pré-méthode	Méthode	Post-méthode
- Main d'œuvre (préleveur) - Méthode: plan d'échantillonnage, ordre des prélèvements, etc - Milieu: conditions et durée de transport des échantillons - Matériel - Matière: qualité de l'échantillon	-Main d'œuvre (préleveur) -Méthode: plan d'échantillonnage, ordre des prélèvements, etc - Milieu: conditions et durée de transport des échantillons - Matériel -Matière: conservation de l'échantillon	- Main d'œuvre: personne en charge de la validation des résultats. - Méthode: calculs, etc. - Milieu: conditions et durée de transport des échantillons - Matériel - Matière: traitement des résultats bruts, logiciels et validation des logiciels.

**Tableau3** : Facteurs d'influence*Étape 3 : Evaluation de l'incertitude associée au résultat de mesure*

Précédemment, il a été établi que le processus de mesure, d'analyse, d'essai ou d'étalonnage considéré peut être morcelé (pré-méthode, méthode, post-méthode). Il est à noter que chaque morceau peut également être lui même morcelé, en répondant aux différentes questions :

- a. le résultat associé au résultat est-il quantitatif ?
- b. L'essai est –il modélisable ?
- c. Le modèle est –il linéaire ?
- d. le résultat est quantitatif, le processus n'est pas modélisable. La méthode est-elle commune à un ensemble d'organisme ?
- e. Existe-t-il des compagnes de comparaison inter laboratoire ?

*Étape 4: Détermination des incertitudes de mesure.***III.3. DETERMINATION DE L'INCERTITUDE D'ETALONNAGE**

Il y a lieu de distinguer deux sources d'incertitudes :

**III.3.1. Incertitude liée à la méthode et aux moyens d'étalonnage**

Cette opération se fonde sur des essais techniques et sur une analyse objective des causes d'incertitudes. Cette incertitude est déterminée à partir de plusieurs composantes provenant notamment du montage, des étalons et des instruments utilisés, des conditions d'environnement.

### III.3.2. Incertitude liée à l'instrument à étalonner

Cette incertitude est déterminée à partir des caractéristiques propres de l'instrument dont notamment la fidélité et l'erreur de lecture ou de quantification.

En général, l'incertitude de mesure comprend plusieurs composantes. Certaines peuvent être estimées en se fondant sur la distribution statistique des résultats de séries de mesurage et peuvent être caractérisées par un écart-type expérimental. L'estimation des autres composantes ne peut être fondée que sur l'expérience ou sur d'autres informations.

### III.3.3. Procédure de détermination des incertitudes

#### III.3.3.1. Méthodologie du travail

Afin de réaliser un travail organisé, une méthodologie a été mise en place et qui se résume comme suit :

- 1- Consulter le responsable de l'essai et la norme correspondante, ainsi que le rapport d'essai;
- 2- Comprendre le principe et le déroulement de l'essai ;
- 3- Identifier les différentes chaînes de mesure ;
- 4- Déceler les principales causes d'incertitudes ;
- 5- Établir le bilan d'incertitudes.

#### III.3.3.2. Identification des causes réelles ou potentielles de variation du résultat de mesure

<b>1</b>	<b>MESURANDE</b> variation spatiale, stabilité temporelle échantillonnage prélèvement
<b>2</b>	<b>INSTRUMENTS DE MESURE</b> INSTRUMENT 1 étalonnage hystérésis linéarité conservation de l'étalonnage
<b>3</b>	<b>METHODE DE MESURE</b> biais 1 dû à la méthode biais 2 dû à la méthode Modélisation constantes physiques ou mathématiques
<b>4</b>	<b>GRANDEURS D'INFLUENCE</b> Température, pression atmosphérique, humidité tension d'alimentation champs électromagnétiques
<b>5</b>	<b>OPERATEUR</b> Préparation, montage, relevé des résultats

**Tableau 4:** Causes réelles ou potentielles de variation du résultat de mesure

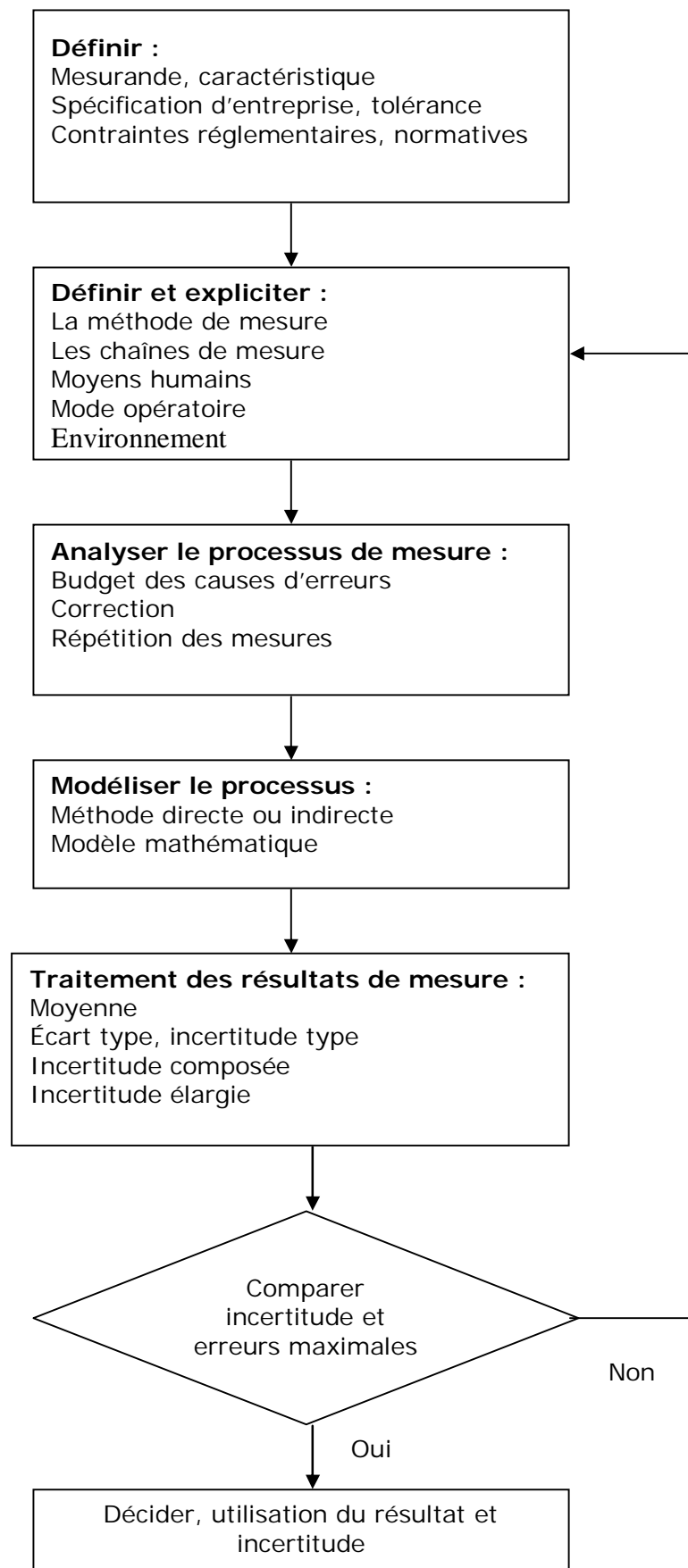


### *III. 3.3.3 Le principe de calcul des incertitudes*

La méthode de calcul utilisée est basée sur les instructions du « Guide pour l'Expression de l'incertitude de Mesure » (norme XP X 07-020) et du « Guide technique du COFRAC pour un dossier d'accréditation ».

Il s'agit d'un calcul simplifié pour les essais effectués dans des laboratoires accrédités. La méthode consiste à faire le tour de la question d'un point de vue technique avec les responsables d'essai et les acteurs qui interviennent dans son déroulement, en vue de déceler les principales causes d'incertitudes et d'appréhender facilement toutes les facettes de la chaîne de mesure [15].

La méthodologie de travail utilisée est présentée dans le logigramme suivant :



Oui : valeur satisfaisante

Non : valeur non satisfaisante

**Figure 1 :** Logigramme de la méthodologie de calcul d'incertitudes

Deux grandes catégories de méthodes permettent d'évaluer numériquement l'incertitude de mesure :

- Méthodes de type A qui utilise l'outil statistique  
C'est une approche globale, basée sur le caractère de variabilité du résultat de mesure.
- Méthodes de type B qui ne font pas appel à la statistique  
C'est une approche analytique, basée sur une analyse physique du contexte expérimental.  
Elles sont obligatoires pour toutes les composantes d'incertitudes qui ne se traduisent pas par une variabilité du résultat.

Une fois ces deux méthodes mises en œuvre, il faudra faire une synthèse de manière à exprimer l'incertitude composée, c'est à dire l'incertitude associée au résultat de la mesure, indépendamment des méthodes utilisées pour la quantifier [16].

#### ***III.3.3.4 Diagramme Causes-à- effets***

La réalisation d'une mesure fait intervenir du matériel et du personnel, selon un schéma clairement défini dit « Diagramme causes -à- effets » ou « 5M » :

- Le matériel de mesure utilisé, qui doit assurer la réalisation des contrôles,
- Le choix de la méthode de mesure mise en œuvre,
- L'honnêteté, la compétence et la neutralité de l'opérateur.
- La matière faisant l'objet du mesurage.
- La maîtrise de l'environnement des mesures.

#### ***III.3.4 Méthodes d'évaluation des incertitudes***

Cette méthode s'inspire du GUM " Guide pour l'Expression de l'Incertitude de Mesure" (Guide ISO ou XP-X-07-020-juin 1996), mais a été volontairement simplifiée pour les laboratoires accrédités.

##### ***III.3.4.1 Les incertitudes-types***

Les incertitudes-types sont évaluées suivant deux types de méthodes :

- de type A :  $A_i$  : estimées statistiquement
- de type B appréciées et subdivisées en deux sous-catégories :

BR<sub>j</sub> : liées aux raccordements externes et internes (extraites des certificats d'étalonnage)

$BL_k$  : liées au montage et évaluées par d'autres méthodes que les méthodes statistiques :

- Dérive des étalons utilisés
- Résolution
- bruit
- Influences diverses (température, environnement)

### ***III.3.4.2. Évaluation des incertitudes-types***

- Si une composante d'incertitude est présentée sous forme d'un écart-type (cas des estimateurs par exemple), elle sera directement utilisée dans le bilan des incertitudes.
- De même, les données issues d'une notice constructeur (pour les grandeurs d'influence) seront considérées directement en un écart-type à moins que le constructeur ne donne une information sur le facteur d'élargissement utilisé.
- Si une composante d'incertitude a été appréciée à partir d'une limite maximale d'erreur, sa valeur sera spécifiée ainsi que la manière dont elle a été réduite à un écart-type pour obtenir une incertitude-type.

02 cas se présentent lors de l'estimation ou du calcul des  $BL_k$  :

#### ***III.3.4.2.1. La distribution de probabilité relative à cette composante d'incertitude***

***est inconnue***

Soit  $u_{M1}$  la demi-étendue de la limite maximale d'erreur ; on prendra, dans le calcul, l'incertitude-type  $BL_1$  homogène à 1 écart-type, telle que :

Si la distribution de probabilité relative à cette composante d'incertitude est inconnue, on traitera le problème comme si la loi de distribution était rectangulaire :

$$BL_1 = u_{M1} / \sqrt{3} \quad \dots\dots\dots \text{III.1}$$

On pourra dans la pratique simplifier en divisant par 2.

#### ***III.3.4.2.2. La distribution de probabilité relative à cette composante d'incertitude***

***est connue***

Soit  $u_{M2}$ , la demi-étendue de la limite maximale d'erreur associée, par exemple, à une loi de distribution gaussienne (ou proche d'une gaussienne) à condition de prouver qu'elle l'est effectivement:

On obtiendra  $BL_2$  homogène à 1 écart-type par la relation :

$$BL_2 = u_{M2} / 3 \quad \dots\dots III.2$$

### ***III.3.4.2.3 Cas particuliers d'évaluation des incertitudes-types***

Dérive par rapport au temps d'un étalon ou d'un instrument de référence

Pour évaluer l'incertitude-type associée à cette composante d'incertitude, 4 cas se présentent :

#### **1er cas**

S'il existe au moins 5 valeurs connues de l'étalon au cours du temps :

Une méthode statistique (régression linéaire) peut être envisagée (évaluation suivant une méthode de type A).

#### **2ème cas**

S'il existe au moins 3 valeurs connues de l'étalon au cours du temps :

Considérer la limite maximale d'erreur entre deux valeurs et la diviser par  $2\sqrt{3}$  pour la rendre homogène à un écart-type (évaluation suivant une méthode de type B).

#### **3ème cas**

S'il existe une ou deux valeurs connues de l'étalon :

- Pour 2 valeurs : Comparer la dérive fournie par la notice constructeur à la dérive réelle observée entre deux raccordements. Considérer le cas le plus défavorable (évaluation suivant une méthode de type B)

- Pour 1 valeur : Prendre en compte la dérive fournie par la notice constructeur directement en un écart-type si le constructeur ne donne pas d'informations sur le facteur d'élargissement utilisé (évaluation suivant une méthode de type B).

#### **▪ Influence de la température**

Pour les rendre homogènes à un écart-type, les limites maximales d'erreur (valeurs maximales de fluctuations de température) seront divisées par  $2\sqrt{2}$  car la loi de distribution qui leur

sont associées correspond généralement à la densité de probabilité d'une fonction périodique sinusoïdale.

Le coefficient de température peut être soit issu d'une notice constructeur, soit évalué par le laboratoire.

▪ ***Résolution, bruit et sensibilité***

Les incertitudes-types associées à la résolution, au bruit ou à la sensibilité d'un montage peuvent être évaluées suivant des méthodes de type A ou B.

Ces composantes d'incertitude peuvent être déterminées a priori en évaluant l'écart-type expérimental d'une série de mesures (méthode de type A).

La distribution de probabilité associée à l'incertitude-type peut être envisagée comme une loi rectangulaire.

La demi-étendue de la limite maximale d'erreur sera donc divisée par  $\sqrt{3}$  pour être homogène à un écart-type.

▪ ***Linéarité***

Pour évaluer la composante d'incertitude associée à l'influence de la linéarité, deux cas peuvent se présenter :

- La linéarité est considérée comme une grandeur de référence, son évaluation doit être effectuée à partir des résultats d'un certificat d'étalonnage en employant une méthode adaptée.
- La linéarité est considérée comme une grandeur d'influence, son évaluation doit être effectuée soit à partir des résultats d'un certificat d'étalonnage, soit à partir de spécifications issues d'une notice constructeur.

▪ ***Interpolation (variation en fonction de la fréquence ou de la tension dans le cas de convertisseurs thermiques)***

L'incertitude-type associée à cette composante d'incertitude est égale à la limite maximale d'erreur relevée divisée par  $2\sqrt{3}$ .

### III.4. COMBINAISON DES INCERTITUDES-TYPES

Toutes les composantes d'incertitude doivent être exprimées en 1 écart-type et avec la même puissance de 10, afin d'en faciliter la somme (arithmétique ou quadratique).

Pour chacun des 3 groupes, l'incertitude-type composée intermédiaire est calculée de la façon suivante:

Les composantes d'incertitudes  $A_i$  et  $BR_j$  sont considérées comme non corrélées et donc composées respectivement entre elles quadratiquement pour donner les incertitudes-types composées intermédiaires A et BR.

$$BR = \left[ \sum_{j=1}^m BR_j^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{..... III.3}$$

Les composantes d'incertitudes  $BL_k$  sont considérées comme corrélées et donc additionnées arithmétiquement pour obtenir l'incertitude-type composée intermédiaire BL :

$$BL^2 = \sum_{k=1}^w BL_k^2 \quad \text{..... III.4}$$

L'incertitude-type composée  $u_c$  est la somme quadratique des incertitudes-types composées intermédiaires : A, BR et BL :

$$u_c = \left[ A^2 + BR^2 + BL^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{..... III.5}$$

L'incertitude élargie U, proposée par le laboratoire, est obtenue en multipliant  $u_c$  par le facteur d'élargissement  $k = 2$  :

$$U = \pm 2 \cdot u_c \quad \text{..... III.6}$$

A cette incertitude peut s'ajouter une incertitude supplémentaire BS qui est attribuée par la Commission Permanente d'Accréditation en fonction de différents critères dont il est difficile de tenir compte dans le calcul, tels que

- l'expérience du personnel.
- les redondances métrologiques.
- les moyens de détection d'erreurs accidentelles.
- etc...

L'incertitude d'accréditation, attribuée au laboratoire, exprimée en 2 écart-type, est :

$$U = (2.u_c + BS) \quad \dots\dots III.7$$

### III.5. EXEMPLE DE PRESENTATION DU BILAN D'INCERTITUDES

Avec n=2 (catégorie A), m=3 (catégorie BR), w=5 (catégorie BL), Valeurs en 1 écart- type

A <sub>1</sub>	XX
A <sub>2</sub>	XX
$A = [A_1^2 + A_2^2]^{1/2}$	XX
BR <sub>1</sub>	XX
BR <sub>2</sub>	XX
BR <sub>3</sub>	XX
$BR = [BR_1^2 + BR_2^2 + BR_3^2]^{1/2}$	XX
BL <sub>1</sub>	XX
BL <sub>2</sub>	XX
BL <sub>3</sub>	XX
BL <sub>4</sub>	XX
BL <sub>5</sub>	XX
$BL^2 = BL_1^2 + BL_2^2 + BL_3^2 + BL_4^2 + BL_5^2$	XX
$u_c = [A^2 + BR^2 + BL^2]^{1/2}$	XX

**Tableau5** : Exemple de présentation du bilan d'incertitudes

Incertitude élargie proposée par le laboratoire :

$$U = \pm 2.u_c$$

L'incertitude type composée définit un intervalle  $[\bar{x} - u_c, \bar{x} + u_c]$  qui contient la valeur vraie avec une probabilité de 2/3. On peut aussi dire que la probabilité que cette valeur vraie soit à l'extérieur de l'intervalle ainsi défini est d'environ 1/3. Ce risque d'erreur pouvant paraître excessif, on introduit la notion d'incertitude élargie définie par :

$$U = k.u_c$$

Avec k : facteur d'élargissement.

Dans le cas des laboratoires accrédités par le Cofrac (organisme d'accréditation Français) leurs résultats sont accompagnés d'une incertitude élargie, le facteur d'élargissement étant conventionnellement égale à 2.



Pour une distribution normale :

K=1 correspond à un niveau de confiance de 68 %

K=2 correspond à un niveau de confiance de 95 %

K=3 correspond à un niveau de confiance de 99,7 %

L'expression finale d'un résultat de mesure peut être exprimée sous la forme :

$$Y = y \pm U$$

y : valeur moyenne calculée

U : incertitude élargie pour (k=2), qui correspond à un niveau de confiance de 95%.

L'incertitude associée au résultat de mesure est en général donnée avec deux chiffres significatifs en cohérence avec la valeur moyenne calculée :

Exp : P=1013,25 Pa ou 0,12 hPa

### III.6. ANALYSE DE REGRESSION PAR LA METHODE DES MOINDRES CARRÉS

Le tracé de la meilleure droite au milieu de points expérimentaux est un problème courant au laboratoire. Une méthode numérique est objective, appelée analyse de régression (on considère ici la méthode la plus simple dite la méthode des moindres carrés), elle permet d'établir cette droite et de calculer les incertitudes associées.

#### ➤ Hypothèses

Soit une relation linéaire :  $y = m x + b$

On considère que x est affecté d'incertitude négligeable mais que y est entaché d'erreurs expérimentales aléatoires. Ce cas simple s'applique facilement dans le cas d'une courbe d'étalonnage.

#### ➤ Calcul de la droite des moindres carrés

L'écart vertical de chaque point à la droite est appelé un résidu. La droite calculée par la méthode des moindres carrés est celle qui minimise la somme des carrés des résidus de tous les points.

En pratique, on définit trois grandeurs  $S_{xx}$ ,  $S_{yy}$ ,  $S_{xy}$  :

$$S_{xx} = \sum (x_i - \bar{x})^2 = \frac{(\sum x_i)^2}{N} \quad \text{..... III.8}$$

$$S_{yy} = \sum (y_i - \bar{y})^2 = \frac{(\sum y_i)^2}{N} \quad \text{..... III.9}$$

$$S_{xy} = \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \frac{(\sum y_i)(\sum x_i)}{N} \quad \text{..... III.10}$$

Où

$x_i, y_i$  sont des paires de données, N le nombre de paires et  $\bar{x}$  et  $\bar{y}$  sont les valeurs moyennes des variables.

On peut en déduire :

- la pente de la droite :  $m = \frac{S_{xy}}{S_{xx}}$  ..... III.11

- l'ordonnée à l'origine :  $b = \bar{y} - m\bar{x}$  ..... III.12

- l'écart type des résidus :  $S_r = \sqrt{\frac{S_{yy} - m^2 S_{xx}}{N - 2}}$  ..... III.13

- L'écart type de la pente :  $S_m = \sqrt{\frac{S_r^2}{S_{xx}}}$  ..... III.14

- L'écart type de l'ordonnée à l'origine :

$$S_b = S_r \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}} \quad \text{..... III.15}$$

- Le coefficient de corrélation : r ou coefficient de Pearson permet d'établir le niveau de validité de la relation linéaire entre les deux variables x et y.

$$r = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{[N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][N \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \quad \text{..... III.16}$$

Plus la valeur de r est proche de 1 plus grande est la probabilité d'une corrélation de linéarité entre les deux variables x et y.

Actuellement, il existe des logiciels plus élaborés (par exemple Minim 3) qui permettent d'attribuer un poids différent (une incertitude différente) à chaque point expérimental. Les calculs de régression ou d'identification de paramètres sur ces logiciels permettent d'affiner la discussion dans les cas difficiles.

➤ *Mise en pratique de la méthode*

On désire n couples de valeurs  $x_i, y_i$  qui, dans un plan rapporté au système d'axes (Ox, Oy), sont représentés par n points.

On désire modéliser les points par la relation  $Y=a X+b$

➤ *Estimation au sens des moindres carrés*

1. Estimateur de la sensibilité (ou gain/ pente de la droite) a :

$$a^* = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad \dots\dots\dots \text{III.17}$$

2. Estimateur du décalage d'origine (ou ordonnée à l'origine) b :

$$b^* = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad \dots\dots\dots \text{III.18}$$

La droite des moindres carrés passe par le point de coordonnées :

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$$

C'est à dire que :  $\bar{y} = a^* \bar{x} + b^*$  ..... III.19

L'ordonnée du point d'abscisse  $x_i$  appartenant à la droite des moindres carrés :

$$y^* = a^* x_i + b^* \quad \dots\dots\dots \text{III.20}$$

Résidu :  $r_i = y_i - y^* = y_i - a^* x_i - b^*$  ..... III.21

Propriétés :  $\sum_{i=1}^n r_i = 0, \quad \sum_{i=1}^n r_i x_i = 0$  ..... III.22

3. Incertitudes des estimateurs :

➤ Sensibilité :  $u^2(a^*) = \frac{S^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$  ..... III.23

➤ L'ordonnée à l'origine :  $u^2(b^*) = S^2 \frac{1}{n} + S^2 \frac{\bar{x}^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$  ..... III.24

Avec  $S^2$  est la variance de répétabilité de  $y$ . Elle peut être obtenue en répétant les mesures de  $y$  pour une valeur de  $x$  donnée (conditions de répétabilité) ou à partir de la somme des carrés des résidus.

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n r_i^2}{n-2} \quad \text{..... III.25}$$

C'est à dire dans les conditions de reproductibilité.

L'application du principe des moindres carrés à l'estimation de la pente et de l'ordonnée à l'origine d'une droite affine entraîne une corrélation entre ces estimateurs donnée par :

$$\text{cov}(a^*, b^*) = -S^2 \frac{\bar{x}}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{..... III.26}$$

L'origine de cette corrélation est due à la contrainte de la droite des moindres carrés qui est astreinte à passer par le point de coordonnées  $(\bar{x}, \bar{y})$ . Il est possible d'annuler cette corrélation par un choix judicieux des axes de coordonnées [1].

**4.** La Variance de l'ordonnée  $y^*$  d'un point d'abscisse  $x$  appartenant à la droite des moindres carrés prend la forme :

$$u^2(y^*) = S^2 \frac{1}{n} + S^2 \frac{n(x - \bar{x})^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad \text{..... III.27}$$

Si:  $x^* = \frac{y^* - b^*}{a^*}$ , alors  $u^2(x^*) = \frac{u^2(y^*)}{a^{*2}}$  ..... III.28

Il existe donc plusieurs approches pour évaluer la validité des résultats expérimentaux.

- Au minimum, un résultat doit être exprimé avec une incertitude calculée à l'aide des calculs d'incertitudes simples. Mais l'inconvénient est qu'il n'est pas toujours possible d'identifier la relation expérimentale indispensable pour effectuer ce calcul.
- L'utilisation des méthodes statistiques permet d'exprimer plus rigoureusement les limites de fiabilité du résultat. Elles incitent à multiplier le nombre de mesures, ce qui n'est pas toujours possible.

- Une solution intermédiaire souvent utilisée est de donner uniquement les écarts types (selon le nombre de mesures). Ceci permet aux utilisateurs d'approfondir si nécessaire l'étude statistique en fonctions de leurs besoins.

### **III.7. CAPABILITE DES INSTRUMENTS DE MESURE**

La capabilité est l'aptitude d'un appareil à présenter les caractéristiques correspondant à l'utilisation prévue. Elle prend en compte : le mesurande, l'instrument, la méthode, l'incertitude de mesure, les conditions opératoires, le coût...etc

- **III.7.1. Les fiches de capabilité**

La capabilité concerne tout le matériel ayant un impact sur le résultat d'essai et particulièrement faisant l'objet d'une spécification.

La fiche de capabilité concerne un instrument pour un essai. Chaque équipement concerné possède une ou plusieurs fiches de capabilité qui reprennent ses références, l'incertitude d'étalonnage et d'essai, sa classe ainsi que les caractéristiques de l'essai, le rapport de capabilité (facteur) et un avis de validité de capabilité ou non capabilité de l'instrument à répondre aux spécifications demandées.

La capabilité d'un processus de mesure (et non d'un instrument de mesure ou moyen de mesure) est définie comme étant le rapport entre la tolérance à vérifier (T: différence entre les valeurs minimale et maximale de la spécification) et l'incertitude de mesure (notée U) qui s'exprime lors de la vérification de l'objet.

On peut définir alors le coefficient de capabilité C tel que:

$$C = T / U \quad \text{..... III.29}$$

Un processus de mesure peut, de ce fait, être déclaré « capable » ou « apte » si et seulement si il respecte la condition :

C est supérieur ou égale à une valeur contractuelle résultant d'un accord entre le client et le fournisseur.

Dans le cas où aucun accord client-fournisseur n'existe, on pourrait prendre comme coefficient de capabilité 4 pour une incertitude exprimée avec un niveau de confiance de 95 %.

### **III.7.2 Fiche de vie et intervention métrologique**

Pour toute nouvelle acquisition de matériel, une fiche de vie est créée dans la base de données. L'élément clé de la gestion d'un parc de matériel est la fiche de vie. Chaque laboratoire dispose d'une base de données concernant le matériel qu'il convient de répertorier « appareils de

mesure » et qui, à ce titre, est soumis à des contrôles métrologiques systématiques. Après chaque intervention sur un matériel, la fiche de vie correspondante est mise à jour.

### ***III.7.3. Etiquetage***

Le responsable de chaque parc doit affecter à chaque nouveau matériel une étiquette de référence.

#### ***IV.1. ORGANISATION DU CSTB***

Au sein de la concurrence et du bouleversement technologique, le Centre Scientifique et Technique de Bâtiment apporte, par ses travaux et résultats, une pleine contribution à la performance du bâtiment. Son action dans la durée en fait un moteur du présent et un créateur d'avenir.

Son organisation et son mode de fonctionnement s'appuient autour de quatre thèmes majeurs déclinés dans huit départements technologiques :

- ***Enjeux de société***
  - Développement Durable
  - Sécurité, Structures et Feu
  - Economie et Sciences Humaines
  
- ***Performances des ouvrages***
  - Acoustique et Eclairage
  - Climatologie, Aérodynamique, Pollution, Epuraton
  
- ***Produits et techniques de construction***
  - Enveloppe et Revêtements
  - Hydraulique et Equipements Sanitaires
  
- ***Industries de l'information***
  - Technologies de l'information et Diffusion du Savoir

## ***IV. 2. ORGANIGRAMME DU DEPARTEMENT ENVELOPPE ET REVETEMENT (DER)***

### ***IV 2.1 Les domaines d'intervention***

- Caractérisation physique des matériaux ;
- Baies et Vitrages : fenêtre en PVC, en aluminium à coupure thermique, profilés de fenêtres, fermetures, vitrages, toiles de stores ;
- Construction légères : façades, bardages, vêtements, panneaux sandwich, maisons et constructions légères ;
- Toitures ;
- Revêtement de sols.

### ***IV. 2.2 Objectifs de la recherche***

- Suivre et anticiper les solutions technologiques ;
- Créer des outils expérimentaux ou de simulation et de calcul pour la conception et l'évaluation des produits.

### ***IV. 2.3 L'évaluation des produits et ouvrages***

- Avis techniques,
- Conformité aux Euro normes et Avis technique Européens en vue des marquages CE,
- ATE (Agrément Technique Européen),
- ATEX (Appréciation Technique d'Expérimentation),
- Calcul des performances des produits,
- Certification



### ***IV. 3. ORGANIGRAMME DE LA DIVISION BAIES ET VITRAGES***

La division comprend 29 personnes dont 13 ingénieurs, 4 attachés techniques, 8 techniciens et 4 Secrétaires. Elle est structurée conformément à l'organigramme ci-après, en six activités technologiques.

Les moyens matériels comprennent essentiellement les équipements d'essais et sont répartis en six parcs :

Parc DIV : laboratoires de vitrages

Parc BAIE : laboratoires fenêtres-toiles

Parc PROF: laboratoires profilés-toiles

Parc FERM : laboratoires fermetures

Parc ETALAEV : équipements pour caractérisation in-situ

Parc GARAGE : équipements pour essais des portes de garages industrielle.

### ***IV. 4. OBJECTIF DES ESSAIS REALISES***

Le travail effectué s'inscrit dans le cadre de la maîtrise des essais sur les différentes chaînes de mesures utilisées lors des essais de la division Baies et Vitrages.

### ***IV. 5. MISSIONS DE LA DIVISION BAIES ET VITRAGES***

La division BV occupe une place stratégique au niveau du Département Enveloppe et Revêtement, son activité principale est l'évaluation des produits de construction suivants :

1. Vitrages organiques, simples et isolants ;
2. Fenêtres et ensembles menuisés ;
3. Profilés plastiques et profilés métalliques à coupure thermique ;
4. Toiles et stores ;
5. Portes industrielles ou portes de garages ;
6. Fenêtres (volets roulants).

#### ***IV. 6. METHODOLOGIE DU TRAVAIL***

Afin de réaliser un travail organisé, une méthodologie a été mise en place et qui se résume comme suit :

- ❖ Consulter le responsable de l'essai et la norme correspondante, ainsi que le rapport d'essai;
- ❖ Comprendre le principe et le déroulement de l'essai ;
- ❖ Consulter le responsable de l'essai et la norme correspondante, ainsi que le rapport d'essai;
- ❖ Identifier les différentes chaînes de mesure ;
- ❖ Déceler les principales causes d'incertitudes ;
- ❖ Etablir le bilan d'incertitudes.

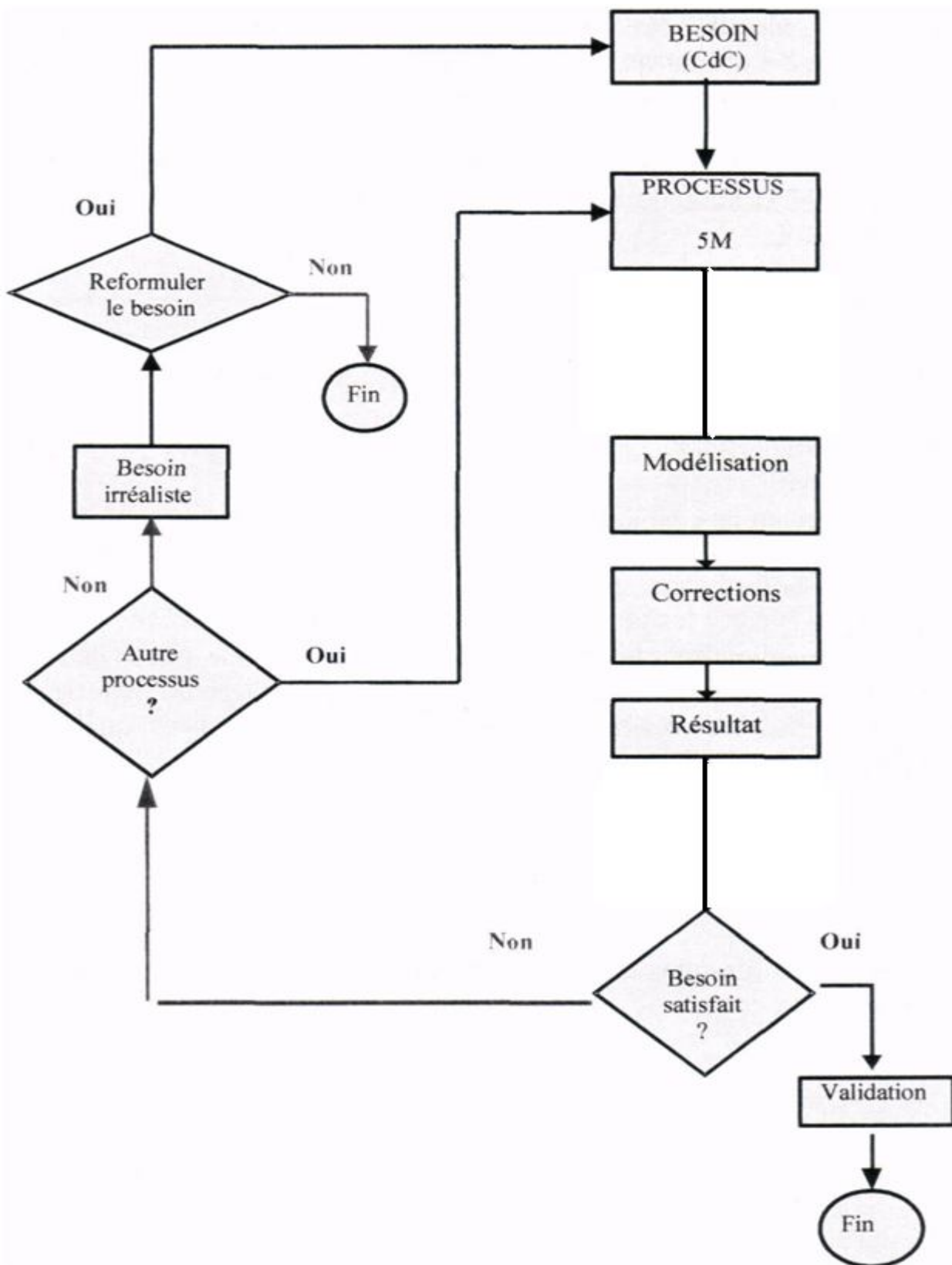


Figure 2 : Logigramme de méthodologie de travail

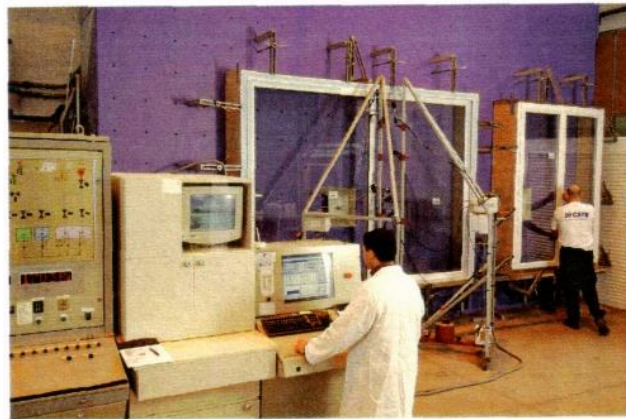
**IV. 7. ESSAIS REALISES**

Les bilans d'incertitudes sur les essais effectués se résument comme suit :

N°	Essais réalisés	Date de Remise du bilan
1	Essais AEV des menuiseries	24/03/2009
2	Caractérisation in-situ des stations AEV	31/03/2009
3	Essais AEV des portes industrielles	07/04/2009
4	Perméabilité sous gradient de température	14/04/2009
5	Essais mécaniques menuiseries	21/04/2009
6	Essais mécaniques portes industrielles	12/05/2009
7	Essais fermetures	31/05/2009
8	Essais profilés PVC	30/06/2009
9	Essais profilés Aluminium	28/07/2009
10	Essais profilés d'étanchéité	25/08/2009

**Tableau 6 :** Essais réalisés de calcul d'incertitudes de mesures

**Remarque :** Quelques rapports sont en annexes



*Banc d'essai AEV du CSTB*

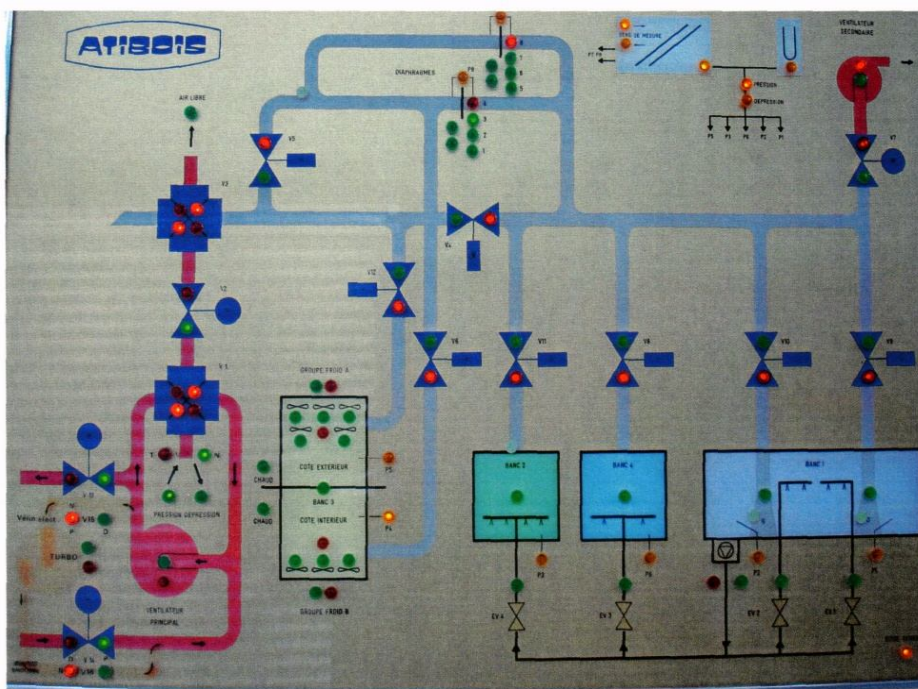
**IV.7.1. ESTIMATION DES INCERTITUDES DES ESSAIS AEV (AIR, EAU, VENT)**

**IV.7.1.1. Essai de perméabilité à l'air**

**IV.7.1.1.1. But de l'essai**

- Déterminer la perméabilité à l'air des fenêtres et des portes quand elles sont soumises à des pressions d'essai positives et négatives.

**IV.7.1.1.2. Mode opératoire**



**Figure3 : Schéma de l'essai**

- a. Le corps d'épreuve doit être conditionné juste avant l'essai pendant 4h au moins dans une ambiance de température comprise entre (10°C, 30°C) et de l'humidité relative entre (25,70) %HR.
- b. L'essai consiste à appliquer une série de pressions positives et négatives et à chaque pression d'essai, on mesure la perméabilité à l'air avec un dispositif d'essai approprié.
- c. Les paramètres températures, humidité et pression atmosphérique sont mesurés respectivement à 3°C, ± 5%HR et ± 1 KPa près.
- d. Appliquer la pression d'essai par paliers de 50 Pa jusqu'à 300Pa et par paliers de 150 Pa à partir de 300 jusqu'à 600 Pa.
- e. La durée de chaque palier doit être suffisante pour permettre à la pression d'essai de se stabiliser avant le mesurage de la perméabilité à l'air.

**IV.7.1.1.3. Chaîne de mesure**

- Capteurs de pression, de température et d'humidité CSTB (03 08 1 1, 03 08 1 2, 03 1 3 1 0, 03 131 1, 97 0014, 97 0015, 97 0016, 97 0017, 97 0018)
- Mètre ruban ELT 00 0024
- Diaphragmes ELT 89025

**IV.7.1.1.4. Modélisation mathématique des phénomènes**

- **Le Mesurande**

Les résultats fournis lors de l'essai de la perméabilité à l'air sont les suivants :

- **Mesure du débit brut :**  $V_x$
- **Perméabilité linéaire :**  $\frac{V_0}{L}$
- **Perméabilité surfacique :**  $\frac{V_0}{S}$

Le passage entre  $V_x$  et  $V_0$  se fait à l'aide de la relation :

$$V_0 = V_x \frac{P_x}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T_x} \cdot \frac{fh_x}{fh_0} \dots\dots\dots(VI.1)$$

$P_0, T_0, fh_0$  Sont des constantes.

La variance sur  $V_0$  devient alors :

$$\left(\frac{uV_0}{V_0}\right)^2 = \left(\frac{uV_x}{V_x}\right)^2 + \left(\frac{uP_x}{P_x}\right)^2 + \left(\frac{uT_x}{T_x}\right)^2 + \left(\frac{ufh_x}{fh_x}\right)^2 \dots\dots VI.2$$

Calcul de  $\frac{uV_x}{V_x}$  :

$V_x$  est calculé en ramenant le débit mesuré par le système de diaphragmes  $q_v$  aux conditions ambiantes ( $T_x, P_x$  aval fenêtre).

$$V_x = q_v \cdot \frac{P_e}{P_x} \cdot \frac{T_x}{T_e} \cdot \frac{fh_e}{fh_x} \dots\dots\dots \text{VI. 3}$$

( $P_e, T_e$  : Conditions d'essais au niveau du diaphragme).

L'incertitude sur  $V_x$  devient alors :

$$\left(\frac{uV_x}{V_x}\right)^2 = \left(\frac{uP_x}{P_x}\right)^2 + \left(\frac{uT_x}{T_x}\right)^2 + \left(\frac{uq_v}{q_v}\right)^2 + \left(\frac{uP_e}{P_e}\right)^2 + \left(\frac{uT_e}{T_e}\right)^2 \dots\dots \text{VI.4}$$

En combinant (1) et (2) :

$$V_0 = q_v \cdot \frac{P_e}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T_e} \cdot \frac{fh_e}{fh_a} \dots\dots\dots \text{VI.5}$$

**IV.7.1.1.5 Exigences de la norme**

- La perméabilité de l'air de la chambre doit être considérée comme nulle si elle est inférieure à 5% de la perméabilité maximale à l'air admise dans la série de la classe dans laquelle ne se trouve le corps d'épreuve.
- La perméabilité de l'air de la chambre ne doit dépasser en aucun cas 30% de la perméabilité de l'air total du corps d'épreuve et de la chambre d'essai.
- Le résultat de la perméabilité à l'air doit être donné avec une précision de 10%.

**VI.7.1.1.6 Calcul d'incertitudes**

A partir des caractéristiques techniques des instruments utilisés, nous estimons dans un premier temps les incertitudes sur les différentes mesures effectuées, puis l'incertitude sur les valeurs calculées.

**1) Incertitude sur la mesure du débit par diaphragme**

L'incertitude du débit  $q_v$  s'obtient par la relation suivante :

$$q_v = K \times S \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \dots\dots\dots \text{VI. 6}$$

**2) Incertitude sur la masse volumique de l'air**

La masse volumique de l'air s'exprime par la relation suivante :

$$\rho = \frac{P \cdot fh}{Z \cdot r \cdot T} \dots\dots\dots \text{VI. 7}$$

Nous appliquons la loi de composition des incertitudes (combinaison quadratique) :

$$\left(\frac{u\rho}{\rho}\right)^2 = \left(\frac{ur}{r}\right)^2 + \left(\frac{uZ}{Z}\right)^2 + \left(\frac{up}{p}\right)^2 + \left(\frac{uT}{T}\right)^2 + \left(\frac{ufh}{fh}\right)^2 \dots\dots\dots \text{VI. 8}$$

**N.B :** on considère que chaque grandeur est indépendante (covariance entre paramètres nulle)

Compte tenu des faibles variations de pression et de température, les valeurs de (**r**) et de (**z**) sont considérées comme constantes d'où :

$$\frac{ur}{r} = 0$$

$$\frac{uZ}{Z} = 0$$

### 3) Incertitude sur la mesure de l'humidité

- Le certificat d'étalonnage interne N°DT 03 1051 du transmetteur CSTB 97 0014 (hygrométrie ambiante) nous donne une incertitude élargie de **08,0 % HR** pour une humidité de **56% HR**.

L'incertitude d'étalonnage vaut donc :

$$BR_1 = \frac{8}{2} = 4\% HR$$

La résolution est de  $10^{-2}$ , nous associons à cette valeur une loi de distribution rectangulaire :

$$BL_1 = \frac{10^{-2}}{2\sqrt{3}} = 2,88 \cdot 10^{-3}\% HR$$

- On ne dispose que du dernier certificat d'étalonnage, la dérive sera prise comme égale à la composante d'incertitude d'étalonnage :

$$BL_2 = BR_1 = \frac{8}{2} = 4\% HR$$

L'incertitude type composée sur la mesure de l'humidité est la somme quadratique des incertitudes types composées intermédiaires :

$$u_{fh} = \sqrt{BR_1^2 + BL_1^2 + BL_2^2}$$

Application numérique

$$u_{fh} = 5,65\% HR$$



L'incertitude type relative  $\frac{ufh}{fh} = \frac{5,65 \cdot 10^{-2}}{56} = 9,92 \cdot 10^{-4}$

L'incertitude relative vaut donc :  $\frac{Ufh}{fh} = 9,92 \cdot 10^{-4} * 10^2 * 2 = 0,19\%$

#### 4) Incertitude sur la mesure de la température

Te et Tx sont mesurés par des moyens similaires et qui ont des valeurs proches. Pour la mesure de Te, on utilise un sonde de température amont référencé **97 0015** qui à une incertitude type élargie de 0,8°C pour une température de 19,2°C (voir *certificat d'étalonnage interne N°DT 03 1051*).

D'où une incertitude d'étalonnage de :

$$BR_1 = \frac{0,8}{2} = 0,4^\circ C$$

- La dérive maximale entre deux étalonnages traduit la dérive temporelle sur le long terme de l'appareil. A partir des deux derniers certificats d'étalonnages N°DT 03 0350 et

N° DT 01 0106, nous évaluons cette dérive avec l'expression suivante :

$$\Delta V_{\text{étalonnage}} = \max(|V_{\text{nouveau}} - V_{\text{ancien}}|)$$

**Avec :**

$\Delta V_{\text{étal}}$ , dérive maximale entre deux étalonnages ;

$V_{\text{nouveau}}$ , valeur mesurée lors du nouvel étalonnage ;

$V_{\text{ancien}}$ , valeur mesurée lors de l'ancien étalonnage ;

Nous associons à cette valeur une loi de distribution rectangulaire :

$$BL_3 = \frac{\Delta V_{\text{étal}}}{\sqrt{3}} = \frac{0,3}{\sqrt{3}} = 0,115^\circ C$$

- La résolution est de  $10^{-2}$ , nous associons à cette valeur une loi de distribution rectangulaire :

$$BL_4 = \frac{10^{-2}}{2\sqrt{3}} = 2,88 \cdot 10^{-3}^\circ C$$

L'incertitude type composée sur la mesure de la température est la somme quadratique des incertitudes types composées intermédiaires :

$$u_{Te} = \sqrt{BR_2^2 + BL_3^2 + BL_4^2}$$

Application numérique

$$u_{Te} = 0,42^\circ\text{C}$$

L'incertitude type relative

$$\frac{u_{Te}}{Te} = \frac{0,42 \times 10^2}{21,4} = 1,96\%$$

L'incertitude relative élargie vaut donc :

$$\frac{U_{Te}}{Te} = 1,96 \times 2 = 3,92\%$$

### 5) Incertitude sur la pression maquette

Le certificat d'étalonnage interne N°DT 03 1051 des transmetteurs CSTB 03 1310 (pression maquette 2500 Pa) nous donne une incertitude élargie de 4,9 Pa pour un intervalle de pression (450-2450) Pa.

L'incertitude d'étalonnage vaut donc :  $BR_3 = \frac{4,9}{2} = 2,45\text{Pa}$

- La résolution est de 0,5 Pa, nous associons à cette valeur une loi de distribution rectangulaire :

$$BL_5 = \frac{0,5}{2\sqrt{3}} = 0,144\text{Pa}$$

- On ne dispose que du dernier certificat d'étalonnage (N°P03378), la dérive sera prise comme égale à la composante d'incertitude d'étalonnage :

$$BL_6 = BR_3 = 2,45\text{Pa}$$

L'incertitude type composée sur la mesure de la pression maquette est la somme quadratique des incertitudes types composées intermédiaires :

$$u_{pm} = \sqrt{BR_3^2 + BL_5^2 + BL_6^2}$$

Application numérique

$$u_{pm} = 3,46\text{Pa}$$

L'incertitude type relative

$$\frac{u_{pm}}{pm} = \frac{3,46 * 100}{2000} = 0,173\%$$

L'incertitude relative élargie vaut donc :

$$\frac{U_{pm}}{pm} = 0,173 * 2 = 0,35\%$$

L'incertitude relative sur la mesure de la masse volumique vaut alors :

$$\frac{u\rho}{\rho} = 1,97\%$$

**6) Incertitude sur le coefficient de débit du diaphragme**

**Première méthode :**

En se référant au certificat d'étalonnage des diaphragmes N° VSD-03841(diaphragme 1 par exemple), on exploite la droite de régression  $K=f(\Delta p)$  donnée par l'expression :

$$K = -5,20089 \cdot 10^{-5} \Delta p + 7,74008E-01$$

K est de la forme :  $K = a * \Delta p + b$

On veut calculer l'incertitude sur K', en utilisant la droite des moindres carrés :

$$K' = a' * \Delta p + b'$$

Tel que : a' et b' sont les valeurs estimées de a et de b.

Sachant que le résidu est égal :  $r_i = K_i - K'_i$

L'incertitude sur K' se calcule à partir de l'expression :

$$u^2(K') = S^2 \left[ \frac{1}{n} + \frac{n(\Delta p - \overline{\Delta p})^2}{n \sum_{i=1}^n \Delta p_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n \Delta p_i \right)^2} \right] \dots\dots\dots \text{VI. 9}$$

En appliquant la formule simplifiée :

$$u^2(K') = \frac{S^2}{n}$$

Avec :

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n r_i^2}{n - 2} \dots\dots\dots \text{VI. 10}$$

L'application du principe des moindres carrés à l'estimation de la pente et de l'ordonnée à l'origine d'une droite affine entraîne une corrélation entre ces estimateurs, qui est pris en charge dans l'expression de la variance de K' ci-dessus.

Application numérique  $\frac{uK'}{K'} = 2,52 \cdot 10^{-2}$

**Deuxième méthode :**

- L'incertitude d'étalonnage des diaphragmes est estimée à 0,5% du débit,

$$BR' = \frac{0,5\%}{2} = 0,25\%$$

- L'incertitude d'interpolation linéaire (écart max observé sur le plus petit diaphragme) est de 2,5 % max. Nous associons à cette valeur, une loi rectangulaire.

$$BL' = \frac{2,5\%}{\sqrt{3}} = 1,44\%$$

- L'incertitude due à la dilatation du fer sous l'effet de la température (coefficient de dilatation  $12 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) pour une variation de température de  $10^{\circ}\text{C}$  (soit une incertitude de  $1,2 \cdot 10^{-4}$  sur une dimension linéique et en surfacique de  $2,4 \cdot 10^{-4}$ ).

$$BL'' = 12 \cdot 10^{-6} * 10 = 1,2 \cdot 10^{-4}$$

La loi de composition d'incertitude nous permet d'évaluer l'incertitude sur le coefficient de débit (somme quadratique) :

$$\frac{uK'}{K'} = 2,71 \cdot 10^{-2}$$

**7) Incertitude sur la pression différentielle au diaphragme**

Pour mesurer la pression différentielle au diaphragme, on utilise un capteur de pression gamme 2000Pa de sortie 4-20mA.

Le certificat d'étalonnage interne **N°DT 03 1051** du transmetteur **CSTB 03 0812**(Delta pression) nous donne une incertitude élargie de 4,8 Pa pour un intervalle de pression (450-2450) Pa.

L'incertitude d'étalonnage vaut donc :  $BR_4 = \frac{4,8}{2} = 2,4Pa$

- La résolution est de 0,5 Pa, nous associons à cette valeur une loi de distribution rectangulaire :

$$BL_7 = \frac{0,5}{2\sqrt{3}} = 0,144Pa$$

- On ne dispose que du dernier certificat d'étalonnage (N°P03379), la dérive sera prise comme égale à la composante d'incertitude d'étalonnage :

$$BL_8 = BR_4 = 2,4Pa$$

L'incertitude type composée sur la mesure de la pression maquette est la somme quadratique des incertitudes types composées intermédiaires :

$$u_{pm} = \sqrt{BR_4^2 + BL_7^2 + BL_8^2}$$

Application numérique  $u\Delta p = 3,39 Pa$

L'incertitude type relative  $\frac{u\Delta p}{\Delta p} = \frac{3,39 * 100}{2000} = 0,17\%$

L'incertitude relative élargie vaut donc :  $\frac{U\Delta p}{\Delta p} = 0,17 * 2 = 0,34\%$

### 8) Incertitude sur les mesures dimensionnelles

Le certificat d'étalonnage N°DT010219 du mètre ruban 5m référencé 00-0024 nous donne une incertitude élargie de 307µm, pour laquelle on peut ajouter l'incertitude sur la mise en œuvre de la mesure estimée à 5mm et la résolution qui de 1mm.

En appliquant la loi de composition des incertitudes (somme quadratique des différentes composantes).

$$(uL)^2 = \left(\frac{0,307}{2}\right)^2 + \left(\frac{5}{\sqrt{12}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{12}}\right)^2$$

L'incertitude sur la mesure de L (4\*1m) est majorée à  $\frac{uL}{L} = 1,47.10^{-3}$

Donc une incertitude sur S de :  $\frac{uS}{S} = 2 * \frac{uL}{L} = 2,94.10^{-3}$

L'incertitude sur  $q_v$  vaut :

$$\left(\frac{uq_v}{q_v}\right)^2 = (2,71.10^{-2})^2 + (2,94.10^{-3})^2 + \left(\frac{1}{2} \times 1,69.10^{-3}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \times 1,97.10^{-2}\right)^2$$

$$\frac{uq_v}{q_v} = 3,06.10^{-2}$$

### 9) Incertitude sur la pression $P_e$

La pression en amont du diaphragme se calcule à partir de l'expression suivante :

$$P_e = P_{at} + P_{\acute{e}}$$

$P_{\acute{e}}$  : pression amont du diaphragme qui est mesurée par un capteur de pression de gamme 2000Pa

de sortie 4-20mA.

➤ ***Incertitude sur Pé***

- Le certificat d'étalonnage interne **N°DT 03 1051** du transmetteur **CSTB 03 0811**(Delta pression) nous donne une incertitude élargie de 5 Pa pour un intervalle de pression (450-2450) Pa.

L'incertitude type d'étalonnage vaut donc :  $BR_5 = \frac{5}{2} = 2,5Pa$

- La résolution est de 0,5 Pa, nous associons à cette valeur une loi de distribution rectangulaire :

$$BL_9 = \frac{0,5}{2\sqrt{3}} = 0,144Pa$$

- On ne dispose que du dernier certificat d'étalonnage (N°P03379), la dérive sera prise comme égale à la composante d'incertitude d'étalonnage :

$$BL_{10} = BR_5 = 2,5Pa$$

L'incertitude type composée sur la mesure de la pression maquette est la somme quadratique des incertitudes types composées intermédiaires :

$$uPé = \sqrt{BR_4^2 + BL_7^2 + BL_8^2}$$

Application numérique

$$uPé = 3,54Pa$$

L'incertitude type relative

$$\frac{uPé}{Pé} = \frac{3,54 * 100}{2000} = 0,17\%$$

**10) Incertitude sur la pression atmosphérique**

- Le certificat d'étalonnage interne **N°DT 03 1051** des transmetteurs **CSTB 03 1311** (pression atmosphérique) nous donne une incertitude élargie de 60,6 Pa pour une pression atmosphérique de 100300 Pa.

L'incertitude type d'étalonnage vaut donc :  $BR_6 = \frac{60,6}{2} = 30,3Pa$

- La résolution est de 30 Pa, nous associons à cette valeur une loi de distribution rectangulaire :

$$BL_{11} = \frac{30}{2\sqrt{3}} = 8,66Pa$$

- On ne dispose que du dernier certificat d'étalonnage (N°P03380), la dérive sera prise comme égale à la composante d'incertitude d'étalonnage :

$$BL_{12} = BR_6 = 2,5Pa$$

L'incertitude type composée sur la mesure de la pression maquette est la somme quadratique des incertitudes types composées intermédiaires :

$$up_{atm} = \sqrt{BR_6^2 + BL_{11}^2 + BL_{12}^2}$$

Application numérique

$$up_{atm} = 6,61Pa$$

L'incertitude type relative

$$\frac{up_{atm}}{p_{atm}} = \frac{6,61 * 100}{100300} = 6,6.10^{-3}\%$$

Donc une incertitude sur la pression relative amont est :

$$\left(\frac{uPe}{Pe}\right)^2 = \left(\frac{up_{atm}}{p_{atm}}\right)^2 + \left(\frac{uPé}{Pé}\right)^2$$

Application numérique

$$\frac{uPe}{Pe} = 1,77.10^{-3}$$

### 11) Incertitude sur la mesure de Vo

L'incertitude type sur Vo est de la forme:

$$\left(\frac{uVo}{Vo}\right)^2 = \left(\frac{uPe}{Pe}\right)^2 + \left(\frac{uTe}{Te}\right)^2 + \left(\frac{uqv}{qv}\right)^2 + \left(\frac{ufh}{fh}\right)^2$$

Application numérique

$$\left(\frac{uVo}{Vo}\right) = 3,63.10^{-2}$$

### 12) Incertitude sur la perméabilité linéaire

$$\left(\frac{u\left(\frac{Vo}{L}\right)}{\left(\frac{Vo}{L}\right)}\right)^2 = \left(\frac{uVo}{Vo}\right)^2 + \left(\frac{uL}{L}\right)^2$$

$$= (3,63.10^{-2})^2 + (1,47.10^{-3})^2$$

$$\left( \frac{u\left(\frac{Vo}{L}\right)}{\left(\frac{Vo}{L}\right)} \right) = 3,63.10^{-2} \text{ soit } (3,63\%)$$

### 13) Incertitude sur la perméabilité surfacique

$$\left( \frac{u\left(\frac{Vo}{S}\right)}{\left(\frac{Vo}{S}\right)} \right)^2 = \left( \frac{uVo}{Vo} \right)^2 + \left( \frac{uS}{S} \right)^2$$

$$\left( \frac{u\left(\frac{Vo}{S}\right)}{\left(\frac{Vo}{S}\right)} \right)^2 = (3,63.10^{-2})^2 + (2,94.10^{-3})^2$$

$$\left( \frac{u\left(\frac{Vo}{S}\right)}{\left(\frac{Vo}{S}\right)} \right) = 3,64.10^{-2} \text{ (Soit } 3,64\%)$$



**Tableau récapitulatif**

Type	Composante d'incertitude	Incertitude type Absolue
<b>1. Mesure de l'humidité</b>		
BR <sub>1</sub>	Incertitude d'étalonnage	4 %HR
BL <sub>1</sub>	Résolution	0,86 %HR
BL <sub>2</sub>	Dérive maximale entre deux étalonnages	4 %HR
Incertitude type sur la mesure de l'humidité		
$u_{fh} = \sqrt{BR_1^2 + BL_1^2 + BL_2^2}$ Soit une incertitude relative élargie de 0,19 % pour une humidité de 56%HR		5,65% HR
<b>2. Mesure de la température</b>		
BR <sub>2</sub>	Incertitude d'étalonnage	0,4°C
BL <sub>3</sub>	Incertitude de fluctuation de lecture	2 88.10
BL <sub>4</sub>	Dérive maximale entre deux étalonnages	0,115°C
Incertitude sur la mesure de la température		
$u_{Te} = \sqrt{BR_2^2 + BL_3^2 + BL_4^2}$ Soit une incertitude relative élargie de 3,92% pour une température de 21,4°C		0,42°C
<b>3. Mesure de la pression maquette</b>		
BR <sub>3</sub>	Incertitude d'étalonnage	2,45 Pa
BL <sub>5</sub>	Incertitude de fluctuation de lecture	0,144 Pa
BL <sub>6</sub>	Dérive maximale entre deux étalonnages	2,45 Pa
Incertitude sur la mesure de la pression maquette		
$u_{m2} = \sqrt{BR_3^2 + BL_{21}^2 + BL_{22}^2}$ Soit une incertitude relative élargie de 0,35 % pour un intervalle de pression de 2000 Pa		3,46 Pa
l'incertitude sur la masse volumique vaut alors :		
$\left(\frac{u\rho}{\rho}\right)^2 = \left(\frac{uP}{P}\right)^2 + \left(\frac{ufh}{fh}\right)^2 + \left(\frac{uZ}{Z}\right)^2 + \left(\frac{ur}{r}\right)^2 + \left(\frac{uT}{T}\right)^2$		$\frac{U\rho}{\rho} = 3,94\%$

*b- Incertitude sur le débit du diaphragme*  $q_v = K \times S \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$

Type	Composante d'incertitude	Incertitude type Absolue
<b>1. Incertitude du coefficient de débit du diaphragme</b>		
BR <sub>1</sub>	Incertitude d'étalonnage	0,25 %
BL <sub>1</sub>	Incertitude d'interpolation linéaire	1,44 %
BL <sub>2</sub>	Résolution	0,012 %
Incertitude sur le coefficient de débit du diaphragme		
Soit une incertitude type relative :		$\frac{uK'}{K'} = 2,71 \cdot 10^{-2}$
<b>2. Incertitude sur les mesures dimensionnelles</b>		
Incertitudes sur la mesure de la longueur du joint		
BR <sub>2</sub>	Incertitude d'étalonnage	0,153 mm
BL <sub>3</sub>	Résolution	0,288 mm
BL <sub>4</sub>	Incertitude sur la mise en œuvre du mètre ruban	1,443 mm
Incertitude sur la mesure de longueur du joint et de la surface		
$(uL)^2 = \left(\frac{0,307}{2}\right)^2 + \left(\frac{5}{\sqrt{12}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{12}}\right)^2$ Soit en relative élargie : $\frac{uL}{L} = 1,47 \cdot 10^{-3}$ Donc une incertitude sur S de $\frac{uS}{S} = 2 * \frac{uL}{L} = 2,94 \cdot 10^{-3}$		1,47 mm
<b>3. Mesure de la pression différentielle</b>		
BR <sub>4</sub>	Incertitude d'étalonnage	2,4 Pa
BL <sub>7</sub>	Résolution	0,144 Pa
BL <sub>8</sub>	Dérive maximale entre deux étalonnages	2,4 Pa
Incertitude type sur la mesure de la pression différentielle		
$u_{\Delta p} = \sqrt{BR_4^2 + BL_7^2 + BL_8^2}$ l'incertitude relative élargie pour une 2000 Pa est de 0,34%		3,39 Pa

Type	Composante d'incertitude	Incertitude type Absolue
L'incertitude du débit $q_v$ s'obtient par la relation suivante : $\left(\frac{uq_v}{q_v}\right)^2 = \left(\frac{uK}{K}\right)^2 + \left(\frac{uS}{S}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{u\Delta p}{\Delta p}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{u\rho}{\rho}\right)^2$ L'incertitude relative élargie vaut donc : $\frac{Uq_v}{q_v} = 6,12 \cdot 10^{-2}$ (6,12%)		$3,06 \cdot 10^{-2}$
Incertitude sur la mesure de $V_0$ : $V_0 = q_v \cdot \frac{P_e}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T_e} \cdot \frac{fh_e}{fh_a}$		
<b><i>c-Incertitude sur la mesure de la pression amont</i></b>		
<b>1. Mesure de la pression au niveau du diaphragme (<math>P_e</math>)</b>		
BR <sub>5</sub>	Incertitude d'étalonnage	2,5 Pa
BL <sub>9</sub>	Résolution	0,144 Pa
BL <sub>10</sub>	Dérive maximale entre deux étalonnages	2,5 Pa
$uP_e = \sqrt{BR_4^2 + BL_7^2 + BL_8^2}$ L'incertitude relative élargie (K=2) : $\frac{UP_e}{P_e} = \frac{3,54 \cdot 100}{2000} \times 2 = 0,34\%$		$3,54$ Pa
<b>2. Mesure de la pression atmosphérique (<math>P_{atm}</math>)</b>		
BR <sub>6</sub>	Incertitude d'étalonnage	30,3 Pa
BL <sub>11</sub>	Dérive dans le temps	8,66 Pa
BL <sub>12</sub>	Résolution	30,3 Pa
$up_{atm} = \sqrt{BR_6^2 + BL_{11}^2 + BL_{12}^2}$ L'incertitude type relative élargie (K=2) : $\frac{Up_{atm}}{P_{atm}} = \frac{6,61 \cdot 100}{100300} \times 2 = 0,013\%$ Donc une incertitude sur la pression relative amont de : $\left(\frac{uPe}{Pe}\right)^2 = \left(\frac{up_{atm}}{p_{atm}}\right)^2 + \left(\frac{uP_e}{P_e}\right)^2$		$6,61$ Pa  $\frac{UPe}{Pe} = 0,35\%$
L'incertitude type sur la mesure de $V_0$ vaut donc : $\left(\frac{uV_0}{V_0}\right)^2 = \left(\frac{ufh}{fh}\right)^2 + \left(\frac{uq_v}{q_v}\right)^2 + \left(\frac{uP_e}{P_e}\right)^2 + \left(\frac{uT_e}{T_e}\right)^2$		$\left(\frac{uV_0}{V_0}\right) = 3,63 \cdot 10^{-2}$

Type	Composante d'incertitude	Incertitude type Absolue
Incertitude sur la perméabilité linéaire $\left(\frac{u\left(\frac{Vo}{L}\right)}{\left(\frac{Vo}{L}\right)}\right)^2 = \left(\frac{uVo}{Vo}\right)^2 + \left(\frac{uL}{L}\right)^2$		$\left(\frac{u\left(\frac{Vo}{L}\right)}{\left(\frac{Vo}{L}\right)}\right) = 3,63 \cdot 10^{-2}$ Soit 3,63%
Incertitude sur la perméabilité surfacique $\left(\frac{u\left(\frac{Vo}{S}\right)}{\left(\frac{Vo}{S}\right)}\right)^2 = \left(\frac{uVo}{Vo}\right)^2 + \left(\frac{uS}{S}\right)^2$		$\left(\frac{u\left(\frac{Vo}{S}\right)}{\left(\frac{Vo}{S}\right)}\right) = 3,64 \cdot 10^{-2}$ (Soit 3,64%)

**Tableau 7:** Récapitulatif des résultats essais AEV

#### IV.7.1.2. Incertitude sur la mesure de la résistance au vent

En se rapportant au résultat de mesure de résistance au vent dans les tableaux en annexe, on peut calculer l'incertitude sur la mesure de flèche en pression, ainsi que sur le positionnement du comparateur milieu pour les classes VA\*2 et VA\*3.

##### IV.7.1.2.1 Incertitude sur la Mesure de la flèche en pression (CHI meneau de menuiserie)

###### 1) Incertitude sur le comparateur

- ❖ L'incertitude élargie (à deux écarts types) sur le comparateur mécanique référencé CSTB 05 0297, selon le constat de vérification N°DT 05 0505-1 est de 2µm.

L'incertitude type d'étalonnage vaut donc :

$$BR_7 = \frac{2}{2} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

- ❖ Notre comparateur est de classe 0, son erreur maximale tolérée (EMT) est de 6 µm

L'incertitude correspondante vaut :  $up_r = \frac{6 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3}} = 3,46 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$

- ❖ La résolution est de 10<sup>-3</sup> mm, nous associons à cette valeur une loi de distribution rectangulaire :

$$BL_{13} = \frac{10^{-3}}{2\sqrt{3}} = 2,88 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$$

- ❖ On ne dispose que du dernier certificat d'étalonnage (N°P03379), la dérive sera prise comme égale à la composante d'incertitude d'étalonnage :

$$BL_{14} = BR_7 = 1.10^{-3} mm$$

- ❖ L'incertitude sur le positionnement du comparateur :

En se référant au tableau en annexe, les essais de répétabilité sur le positionnement du comparateur à une pression de 1200 Pa nous permettant de dire que l'incertitude de répétabilité peut être considérée comme étant l'incertitude de positionnement du comparateur.

➤ **Premier cas : 800 Pa**

L'incertitude de répétabilité est donnée par :

$$u_{PO} = \frac{S_x}{\sqrt{n}}$$

Avec :

$$S_x = 2,279.10^{-2} mm ; n = 10$$

Application numérique

$$u_{PO} = 7,2.10^{-3} mm$$

➤ **Deuxième cas : 1200 Pa**

De même pour la pression 1200 Pa

Avec :

$$S_x = 2,048 .10^{-2} mm ; n = 10$$

Application numérique

$$u_{PO} = 6,47.10^{-3} mm$$

L'incertitude type sur le comparateur vaut donc :

$$u_{cp} = \sqrt{BR_7^2 + BL_{13}^2 + BL_{14}^2 + u_{PO}^2}$$

Application numérique

$$\frac{u_{cp}}{cp} = 1,47.10^{-3} mm$$

#### IV.7.1.2.2 Calcul de l'incertitude sur la flèche

Le tableau en annexe nous permet de calculer l'incertitude sur la flèche de face (ff):

$$ff = M - \frac{(B + H)}{2} \dots\dots\dots \text{VI. 11}$$

tel que : M : flèche milieu,

B : flèche bas,

H : flèche haut.

$$\frac{uff}{ff} = \frac{u_{cp}M}{cp} + \frac{1}{2} \left[ \frac{u_{cp}B}{cp} + \frac{u_{cp}H}{cp} \right] + \frac{uf}{f}$$

Le terme  $\frac{uf}{f}$  représente la dispersion de la flèche.

L'incertitude de répétabilité sur la dispersion de la flèche se calcule à partir de l'expression suivante :

$$u_r f = \frac{Sx}{\sqrt{n}}$$

Avec :

Sx : l'écart type expérimental,

n : nombre de répétition.

Application numérique  $Sx = 6,32 \cdot 10^{-3}$  ; n=10

$$u_r f = \frac{Sx}{\sqrt{n}} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

La valeur moyenne de la flèche f est de 7,007 mm

$$\frac{uf}{f} = 2 * \frac{u_r f}{f} = 1,8 \cdot 10^{-3}$$

$$\frac{uff}{ff} = 2,45 \cdot 10^{-3} \text{ mm (Soit 0,24\%)}$$

#### **IV.7.1.2.3. Incertitude sur la Mesure de la flèche en pression (CH2 Battement d'une menuiserie)**

De la même manière, on calcule l'incertitude sur la mesure de la flèche en se référant au tableau en annexe.

$$\frac{uf}{f} = 2,62 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

Sachant que l'incertitude sur la flèche se calcul par la formule :

$$\frac{uff}{ff} = \frac{u_{CP}M}{cp} + \frac{1}{2} \left[ \frac{u_{CP}B}{cp} + \frac{u_{CP}H}{cp} \right] + \frac{uf}{f} \dots\dots\dots \text{VI. 11}$$

Application numérique :  $\frac{Uff}{ff} = 5,88 \cdot 10^{-3}$  (soit 0,58 %)

**IV.7.1.3. Essai étanchéité à l'eau**

Etude qualitative de l'essai, en vu de déceler les grandeurs d'influence sur la qualité de l'essai

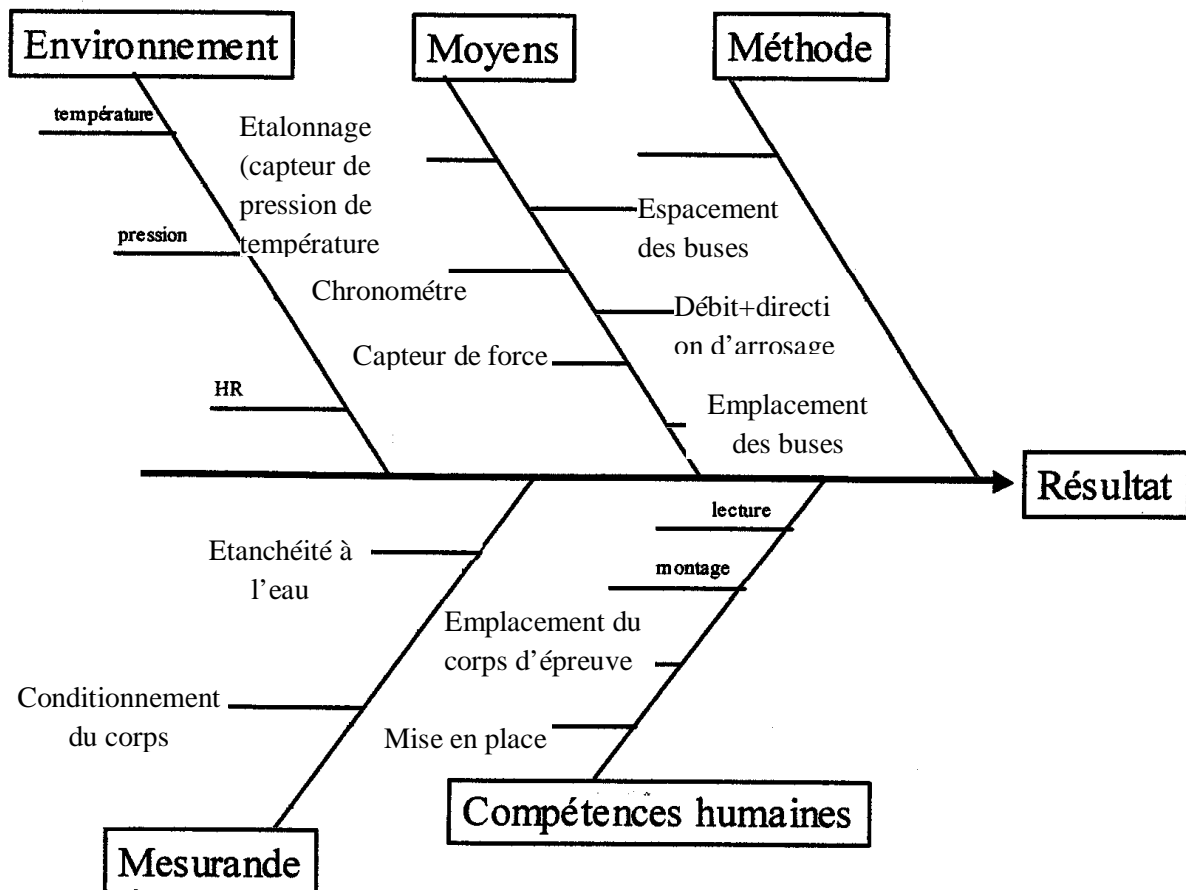


Figure 4 : Diagramme d'ISHIKAWA « 5M »

#### IV.7.2. CARACTERISATION DES STATIONS (AEV) APPLIQUEE AU BANC D'ESSAI D'UN CLIENT CSTB

Liste des étalons utilisés pour l'étalonnage de la station client CSTB

Désignation	Marque	N° CSTB	Affectation
Baromètre	ALHBORN	05-0040	Ambiant
Manomètre 1200 Pa	ALHBORN	05-0041	Banc
Thermomètre	ALHBORN	05-0042	T amont
Thermomètre	ALHBORN	05-0044	T ambiante
Hygromètre	ALHBORN	05-0044	Hygrométrie Ambiante
Débitmètre	Aerometrologie	05-0036	A
Débitmètre	Aerometrologie	05-0037	B
Débitmètre	Aerometrologie	05-0038	C
Débitmètre	Aerometrologie	05-0039	D
Manomètre 6000 Pa	ALHBORN	05-0109	Banc
Capteur de force Compression	ALHBORN 500 DaN	05-0072	Casse d'angle
Capteur de force Extension	ALHBORN 500 DaN	05-0072	Casse d'angle
Sonde température soudeuse	ALHBORN	05-0073	Soudeuse
Capteur de force Traction	ALHBORN 500 N	05-0071	Eau
Capteur de force Compression	ALHBORN 500 N	05-0071	Eau
Micromètre Digital	MITUTOYO	05-0070	Comparateur
Micromètre Mécanique	MITUTOYO	05-0110	Comparateur
Débitmètre	Aerometrologie	06-0104	Eau
Chronomètre	Quantum	05 0069	Eau

**Tableau 8:** Liste des étalons pour la station client



### ***Introduction***

Cette phase décrit la manière dont sont estimées les incertitudes associées aux paramètres mesurés, appliqués ou calculés lors des essais de caractérisation des stations AEV.

Les applications numériques sont effectuées à partir de valeurs expérimentales fournies par l'exploitant.

#### ***IV.7.2.1. Buts des essais***

- Vérifier l'étanchéité propre de la station d'essais tout en lui appliquant une pression nominale de 2000 Pa.
- Caractériser les manomètres de la station d'essais pour la pression fenêtre, en faisant varier la pression d'une manière croissante jusqu'à 2000 Pa et comparer les valeurs affichées à celles d'un manomètre étalon branché en parallèle.
- Caractériser les débitmètres d'air de la station d'essais, en déterminant pour chaque débitmètre de la station la relation qui le relie avec le débit étalon effectué par palier de 1/10 de l'étendue de mesure de la pression.
- Vérifier le débit d'eau, en mesurant la quantité d'eau écoulée (à l'aide de capteur de force) pendant un temps variant de 1 à 3 minutes (mesuré à l'aide d'un chronomètre).
- Contrôler les appareils de déplacement (comparateurs), en comparant les déplacements mesurés des appareils du banc et de l'appareil étalon.
- Vérifier la température des plaques soudeuses pour l'assemblage des profilés, en utilisant une sonde de température de référence qui est appliquée sur les plaques soudeuses. La mesure est comparée avec l'affichage de la sonde à caractériser.
- Caractériser les capteurs de force de la station par rapport à un capteur de référence qui est positionné en parallèle de celui de la station.

#### ***IV.7.2.2. Calcul d'incertitudes liées aux essais de caractérisation des stations AEV***

- Ces essais consistent à caractériser les différents dispositifs de mesure du banc (capteurs de pressions, les débitmètres, les systèmes de mesure du débit d'eau, les comparateurs).
- Les essais se déroulent dans des conditions atmosphériques de l'ambiante (température : 10 à 30 °C et une hygrométrie variant de 25 à 75 %).
- Le dispositif d'essais est stabilisé dans les conditions d'ambiantes pendant au moins deux heures.

- A partir des caractéristiques techniques des instruments utilisés, nous estimons dans un premier temps les incertitudes sur les différentes mesures effectuées, puis l'incertitude sur les valeurs calculées.

### **1- Vérification de l'étanchéité propre de la station**

Le caisson de raccordement monté sur la station est obturé, on applique sur la station une pression nominale de 2000 Pa et on lit le débit de fuite propre de la station sur le manomètre de référence du débitmètre étalon. Ce débit de fuite doit être inférieur à 1 m<sup>3</sup>/h ou une différence de pression de 200 Pa pour les débitmètres à diaphragme. Dans ce cas, il suffit de vérifier que le débit de fuite respecte la consigne.

### **2- Contrôle des manomètres de la station pour la pression fenêtre**

Sur les manomètres de la station, on fait varier les pressions de manière progressive par palier de 100 Pa jusqu'à 3000 Pa, et on lit la pression correspondante  $P_0$  sur le manomètre de référence branché en parallèle.

Pour la mesure des pressions, on utilise un manomètre qui peut mesurer des pressions allant jusqu'à 5000 Pa référencé 05 0109 (voir certificat d'étalonnage N°P06170).

#### **▪ Cas du manomètre 5000 Pa**

##### **➤ Incertitude d'étalonnage**

Le rapport de calculs d'incertitudes référencé BV/INC/CAR CSTB, nous donne une incertitude d'étalonnage type élargie de 0,1% de la valeur mesurée.

Soit une incertitude type pour une pression maximale 3000 Pa de :

$$BR_1 = \frac{0,1 * 3000}{2 * 100} = 1,5 Pa$$

##### **➤ Incertitude de répétabilité**

Dix essais de répétabilité ont été faits sur le manomètre (voir feuille de calcul en annexe) à une pression de 1000 Pa, nous permet de calculer l'incertitude de répétabilité :

L'écart type expérimental sur les valeurs corrigées est  $S_x = 3,16 Pa$

$$u_r = \frac{S_x}{\sqrt{10}} = \frac{3,16}{\sqrt{10}} = 1,00 Pa$$

➤ ***Incertitude de fluctuation***

Cette composante est estimée à 2 Pa .Nous associons à cette valeur une loi rectangulaire :

$$BL_{11} = \frac{2}{\sqrt{12}} = 0,58 Pa$$

➤ ***Incertitude de résolution du capteur***

Cette composante est estimée à 1Pa .Nous associons à cette valeur une loi rectangulaire :

$$BL_{12} = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0,29 Pa$$

➤ ***Influence de la température***

Le capteur a été étalonné à une température de  $20 \pm 2^\circ C$ , pendant que l'essai la température été de  $20,8^\circ C$ .

Donc l'influence de la température est négligeable.

L'incertitude type vaut alors :

$$u_m = \sqrt{BR_1^2 + BL_{11}^2 + BL_{12}^2 + u_r^2}$$

Application numérique :

$$u_m = 1,91 Pa$$

Soit une incertitude relative élargie pour une pression maximale mesurée de 3000 Pa de :

$$U_m = \frac{1,92 * 2 * 100}{3000} = 0,13\%$$

### 3- ***Caractérisation des débitmètres***

On ajuste la pression nominale de la station à l'aide d'un manomètre étalon. Pour chaque débitmètre, on détermine

la relation entre le débit de la station et le débit de référence effectué par palier de 1/10 de l'étendue de la mesure en pression.

Remarque : Le client mesure des différences de pressions ( $\Delta P$ ) qui sont proportionnelles aux débits suivant la relation suivante :

$$q_v = K \times S \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

Le calcul d'incertitude déjà établi sur le coefficient de débit et la section de diaphragme montre que ces deux composantes d'incertitudes sont nettement inférieures à l'incertitude sur la masse volumique de l'air.

Sachant que la masse volumique dépend de :  $\rho = \frac{P \cdot fh}{Z \cdot r \cdot T}$

Donc l'incertitude correspondante prend la forme :

$$\left(\frac{u\rho}{\rho}\right)^2 = \left(\frac{ur}{r}\right)^2 + \left(\frac{uZ}{Z}\right)^2 + \left(\frac{up}{p}\right)^2 + \left(\frac{uT}{T}\right)^2 + \left(\frac{ufh}{fh}\right)^2$$

N.B : On considère que chaque grandeur est indépendant (covariance entre paramètres nulle)

Compte tenu des faibles variations de pression et de température, les valeurs de ( $r$ ) et de ( $z$ ) sont considérés comme constantes, d'où :

$$\frac{ur}{r} = 0$$

$$\frac{uZ}{Z} = 0$$

L'incertitude sur la masse volumique dépend donc de la température, la pression et de l'humidité au niveau de diaphragme.

$$\left(\frac{u\rho}{\rho}\right)^2 = \left(\frac{up}{p}\right)^2 + \left(\frac{uT}{T}\right)^2 + \left(\frac{ufh}{fh}\right)^2$$

En absence de toute information sur les capteurs utilisés pour le client pour la mesure des grandeurs température, pression et humidité, on considère que l'incertitude du client est proche de nos incertitudes (voir document : Estimation des incertitudes de mesures (Essais AEV- § 6.1 paragraphe 6.1.1)...

D'où l'incertitude sur la masse volumique de l'air égale :  $\frac{u\rho}{\rho} = 1,97\%$

Alors :  $u\rho = 1,97\% \times \rho$

Cette composante est à prendre en compte (ajoutée quadratiquement avec l'incertitude d'étalonnage) chaque fois dans l'étalonnage des différents débitmètres (ajoutée quadratiquement avec l'incertitude d'étalonnage et les autres composantes).

➤ *Cas du débitmètre de capacité de 30 m<sup>3</sup> /h (voie 4/D)*

Deux méthodes peuvent être utilisées pour calculer l'incertitude sur  $\sqrt{\Delta p}$  :

❖ **Méthode 1**

En se référant au rapport d'étalonnage des débitmètres, en exploitant les droites de régression (étalonnage) en pression et en dépression  $K=f(\sqrt{\Delta p})$  donnée par l'expression :

$$K = a\sqrt{\Delta p} + b$$

Avec

$K$  : débit de référence (étalon)

$\Delta p$  : différence de pression indiquée par l'appareil du client.

On veut calculer l'incertitude sur  $\Delta p$ . L'équation (1) nous permet d'écrire :

$$\sqrt{\Delta p} = \frac{K - b}{a}$$

La variance se calcule comme suit :

$$V(\Delta p)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{1}{a}\right)^2 V(K)$$

Sachant que l'incertitude égale à la racine carrée de la variance.

Alors l'incertitude type vaut:

$$\frac{1}{2} \frac{u\Delta p}{\Delta p} = \left(\frac{1}{a}\right) \frac{uK}{K}$$

D'où

$$\frac{u\Delta p}{\Delta p} = \left(\frac{2}{a}\right) \frac{uK}{K}$$

Les deux paramètres sont connus:

$a$  : Pente de la droite de régression,

$\frac{uK}{K}$  : L'incertitude type relative sur le débitmètre de référence

❖ *Méthode 2*

Etant donné que  $K = a\sqrt{\Delta p} + b$

L'équation (1) nous permet d'écrire :

$$\sqrt{\Delta p} = \frac{K - b}{a}$$

On peut l'écrire sous la forme :  $\sqrt{\Delta p} = \frac{1}{a}K - \frac{b}{a}$

On veut calculer l'incertitude sur  $K'$ , en utilisant la droite des moindres carrés :

$$Y = a' X + b'$$

Tel que :  $a'$  et  $b'$  sont les valeurs estimées de  $a$  et de  $b$ .

L'application du principe des moindres carrés à l'estimation de la pente et de l'ordonnée à l'origine d'une droite affine entraîne une corrélation entre ces estimateurs, qui est pris en charge dans l'expression de la variance de  $\sqrt{\Delta p}$  (notée  $Y$ ).

Sachant que le résidu est égal :  $r_i = Y_i - Y'_i$

L'incertitude sur ( $Y$ ) se calcule à partir de l'expression :

$$u^2(Y) = S^2 \left[ \frac{1}{n} + \frac{n(X - \bar{X})}{n \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n X_i \right)^2} \right]$$

En appliquant la formule simplifiée :

$$u^2(Y) = \frac{S^2}{n}$$

Avec :

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n r_i^2}{n - 2}$$

❖ *Application au débitmètre D :*✓ *Méthode 1*1. *En pression*▪ *Incertitude d'étalonnage*

La droite de régression est donnée par :  $K = 0,4478\sqrt{\Delta p} + 0,054$

L'incertitude sur le débitmètre (D) est de 0,29%

En appliquant la formule démontrée ci-dessus:

$$\frac{u\Delta p}{\Delta p} = \left(\frac{2}{a}\right) \frac{uK}{K}$$

On obtient :  $\frac{u\Delta p}{\Delta p} = \left(\frac{2}{0,4478}\right) \times 0,29\% = 1,29\%$

Pour un  $\Delta p$  maximum de 300 Pa, l'incertitude d'étalonnage est de :

$$BR_1 = \frac{1,29 \times 300}{100} = 3,87 Pa$$

A cette composante d'étalonnage, on ajoute deux autres composantes qui sont liées à la lecture et à la fluctuation.

▪ *Incertitude de lecture*

Cette composante est estimée à 2 Pa .Nous associons à cette valeur une loi rectangulaire :

$$BL_{11} = \frac{2}{\sqrt{12}} = 0,58 Pa$$

▪ *Incertitude de fluctuation*

Cette composante est estimée à 3 Pa .Nous associons à cette valeur une loi rectangulaire :

$$BL_{12} = \frac{3}{\sqrt{12}} = 0,87 Pa$$

▪ *Incertitude sur la masse volumique de l'air*

Cette composante représente 1,97% de la valeur calculée :

$$u\rho = 1,97\% \times \rho$$

En réalité, la masse volumique varie dans un intervalle de (0,99 à 1,21).

Dans notre cas  $\rho = 1,1163$ , d'où une incertitude de  $u\rho = 1,97\% \times 1,1163 = 0,022$

L'incertitude type vaut alors :  $u_{\Delta p} = \sqrt{BR_1^2 + BL_{11}^2 + BL_{12}^2 + u\rho^2}$

Application numérique :  $u_{\Delta p} = 4,00 Pa$

Soit une incertitude relative élargie pour un  $\Delta p$  maximale mesurée de 300 Pa (cas le plus défavorable) de :

$$U_{\Delta p} = \frac{4,00 * 2 * 100}{300} = 2,67\%$$

## 2. En dépression

La droite de régression est donnée par :  $K = 0,4288\sqrt{\Delta p} - 0,0504$

$$\frac{u\Delta p}{\Delta p} = \left( \frac{2}{0,4288} \right) \times 0,29\% = 1,35\%$$

Pour un  $\Delta p$  maximum de 300 Pa, l'incertitude d'étalonnage est de :

$$BR_1' = \frac{1,35 \times 300}{100} = 4,05 Pa$$

À cette composante d'étalonnage, on ajoute deux autres composantes qui sont liées à la lecture et à la fluctuation calculées précédemment et l'incertitude sur la masse volumique de l'air :

L'incertitude type vaut alors  $u_{\Delta p} = \sqrt{BR_1'^2 + BL_{11}^2 + BL_{12}^2 + u\rho^2}$

Application numérique :  $u_{\Delta p} = 4,18 Pa$

Soit une incertitude relative élargie pour un  $\Delta p$  maximale mesurée de 300 Pa (cas le plus défavorable) de :

$$U_{\Delta p} = \frac{4,18 * 2 * 100}{300} = 2,78\%$$

### 3-1. Cas du débitmètre de capacité 30 m<sup>3</sup>/h (E)

On procède de la même façon que le débitmètre D.

- **En pression**

La droite de régression est donnée par :  $K = 0,9788\sqrt{\Delta p} + 0,301$

L'incertitude d'étalonnage du débitmètre (E) est de 0,57 %.

En appliquant la formule démontrée ci-dessus:



$$\frac{u\Delta p}{\Delta p} = \left(\frac{2}{a}\right) \frac{uK}{K}$$

On obtient :

$$\frac{u\Delta p}{\Delta p} = \left(\frac{2}{0,9788}\right) \times 0,28\% = 0,57\%$$

Pour un  $\Delta p$  maximum de 300 Pa, l'incertitude d'étalonnage est de :

$$BR_1 = u\Delta p = \frac{0,57 \times 300}{100} = 1,71 Pa$$

À cette composante d'étalonnage, on ajoute deux autres composantes qui sont liées à la lecture et à la fluctuation.

L'incertitude sur la masse volumique représente 1,97% de la valeur calculée :

$$u\rho = 1,97\% \times \rho$$

Dans notre cas  $\rho = 1,1163$ , d'où une incertitude de  $u\rho = 1,97\% \times 1,1163 = 0,022$

L'incertitude type vaut alors :

$$u_{\Delta p} = \sqrt{BR_1^2 + BL_{11}^2 + BL_{12}^2 + u\rho^2}$$

Application numérique :

$$u_{\Delta p} = 2,00 Pa$$

Soit une incertitude relative élargie pour un  $\Delta p$  maximale mesurée de 300 Pa (cas le plus défavorable) de :

$$U_{\Delta p} = \frac{2,00 * 2 * 100}{300} = 1,33\%$$

- **En dépression**

La droite de régression est donnée par :

$$K = 0,9387\sqrt{\Delta p} + 0,1185$$

$$\frac{u\Delta p}{\Delta p} = \left(\frac{2}{0,9387}\right) \times 0,28\% = 0,59\%$$

Pour un  $\Delta p$  maximum de 300 Pa l'incertitude d'étalonnage est de :

$$u\Delta p = \frac{0,59 \times 300}{100} = 1,77 Pa$$

À cette composante d'étalonnage, on ajoute deux autres composantes qui sont liées à la lecture et à la fluctuation calculées précédemment.

L'incertitude type vaut alors :

$$u_{\Delta p} = \sqrt{BR_1^2 + BL_{11}^2 + BL_{12}^2 + u\rho^2}$$

Application numérique :

$$u_{\Delta p} = 2,05 Pa$$

Soit une incertitude relative élargie pour un  $\Delta p$  maximale mesurée de 300 Pa (cas le plus défavorable) de :

$$U_{\Delta p} = \frac{2,05 * 2 * 100}{300} = 1,37\%$$

### 3-2. Cas des débitmètres (D-E) de capacité 60 m<sup>3</sup> /h

Pour des mesures comprises entre 30 et 60m<sup>3</sup> /h, on utilise la combinaison des débitmètres (E+D).

L'incertitude sur la combinaison (E+D) qui correspond au niveau de débit compris entre 30 et 60 m<sup>3</sup> /h est la somme quadratique des incertitudes sur le débitmètre E et celle du débitmètre D.

$$u_{D+E} = \sqrt{u_D^2 + u_E^2}$$

Application numérique :  $u_{D+E} = 0,2\%$

- **En pression**

La droite de régression est donnée par :  $K = 2,7624\sqrt{\Delta p} - 0,0099$

En appliquant la formule démontrée ci-dessus:

$$\frac{u\Delta p}{\Delta p} = \left(\frac{2}{a}\right) \frac{uK}{K}$$

On obtient :  $\frac{u\Delta p}{\Delta p} = \left(\frac{2}{2,7624}\right) \times 0,2\% = 0,145\%$

Pour un  $\Delta p$  maximum de 300 Pa, l'incertitude d'étalonnage est de :

$$u\Delta p = \frac{0,145 \times 300}{100} = 0,435 Pa$$

À cette composante d'étalonnage, on ajoute deux autres composantes qui sont liées à la lecture et à la fluctuation.

L'incertitude type vaut alors :  $u_{\Delta p} = \sqrt{BR_1^2 + BL_{11}^2 + BL_{12}^2 + u\rho^2}$

Application numérique :  $u_{\Delta p} = 1,13 Pa$

Soit une incertitude relative élargie pour un  $\Delta p$  maximale mesurée de 300 Pa (cas le plus défavorable) de :

$$U_{\Delta p} = \frac{1,13 * 2 * 100}{300} = 0,75\%$$

- **En dépression**

La droite de régression est donnée par :  $K = 2,681\sqrt{\Delta p} - 0,6315$

$$\frac{u\Delta p}{\Delta p} = \left( \frac{2}{2,681} \right) \times 0,2\% = 0,15\%$$

Pour un  $\Delta p$  maximum de 300 Pa, l'incertitude d'étalonnage est de :

$$u\Delta p = \frac{0,15 \times 300}{100} = 0,45 Pa$$

À cette composante d'étalonnage, on ajoute deux autres composantes qui sont liées à la lecture et à la fluctuation calculées précédemment et l'incertitude sur la masse volumique de l'air.

L'incertitude type vaut alors :  $u_{\Delta p} = \sqrt{BR_1^2 + BL_{11}^2 + BL_{12}^2 + u\rho^2}$

Application numérique :  $u_{\Delta p} = 1,14 Pa$

Soit une incertitude relative élargie pour un  $\Delta p$  maximale mesurée de 300 Pa :

$$U_{\Delta p} = \frac{1,14 * 2 * 100}{300} = 0,76\%$$

### 3-3. Cas du débitmètre de capacité de 50-700 m<sup>3</sup> /h (voie 2/B)

- **En pression**

La droite de régression est donnée par :  $K = 9,2542\sqrt{\Delta p} + 3,2321$

L'incertitude d'étalonnage du débitmètre B est de 0,52%

En appliquant la formule démontrée ci-dessus:

$$\frac{u\Delta p}{\Delta p} = \left( \frac{2}{a} \right) \frac{uK}{K}$$

On obtient :  $\frac{u\Delta p}{\Delta p} = \left( \frac{2}{9,2542} \right) \times 0,26\% = 0,06\%$

Pour un  $\Delta p$  maximum de 2000 Pa, l'incertitude d'étalonnage est de :

$$u\Delta p = \frac{0,06 \times 2000}{100} = 1,2 Pa$$

À cette composante d'étalonnage, on ajoute deux autres composantes qui sont liées à la lecture et à la fluctuation.

L'incertitude type vaut alors :  $u_{\Delta p} = \sqrt{BR_1^2 + BL_{11}^2 + BL_{12}^2 + u\rho^2}$

Application numérique :  $u_{\Delta p} = 2,53 Pa$

Soit une incertitude relative élargie pour un  $\Delta p$  mesurée de 300 Pa de :

$$U_{\Delta p} = \frac{2,53 * 2 * 100}{300} = 1,68\%$$

- **En dépression**

La droite de régression est donnée par :  $K = 9,0884\sqrt{\Delta p} + 0,5708$

$$\frac{u\Delta p}{\Delta p} = \left(\frac{2}{9,0884}\right) \times 0,26\% = 0,06\%$$

Pour un  $\Delta p$  maximum de 2000 Pa, l'incertitude d'étalonnage est de :

$$u\Delta p = \frac{0,06 \times 2000}{100} = 1,2 Pa$$

À cette composante d'étalonnage, on ajoute deux autres composantes qui sont liées à la lecture et à la fluctuation calculées précédemment et l'incertitude de la masse volumique de l'air.

L'incertitude type vaut alors :  $u_{\Delta p} = \sqrt{BR_1^2 + BL_{11}^2 + BL_{12}^2 + u\rho^2}$

Application numérique :  $u_{\Delta p} = 2,53 Pa$

Soit une incertitude relative élargie pour un  $\Delta p$  maximale mesurée de 300 Pa (cas le plus défavorable) de :

$$U_{\Delta p} = \frac{2,53 * 2 * 100}{300} = 1,68\%$$

### 3-4. Cas du débitmètre de capacité de 50-700 m<sup>3</sup> /h (voie 1/A)

- **En pression**

La droite de régression est donnée par :  $K = 24,438\sqrt{\Delta p} + 3,7469$

L'incertitude d'étalonnage du débitmètre (A) est de 0,53%.

En appliquant la formule démontrée ci-dessus:

$$\frac{u\Delta p}{\Delta p} = \left(\frac{2}{a}\right) \frac{uK}{K}$$

On obtient :

$$\frac{u\Delta p}{\Delta p} = \left( \frac{2}{24,438} \right) \times 0,265\% = 0,02\%$$

Pour un  $\Delta p$  maximum de 2000 Pa l'incertitude d'étalonnage est de :

$$u\Delta p = \frac{0,02 \times 2000}{100} = 0,4 Pa$$

À cette composante d'étalonnage, on ajoute deux autres composantes qui sont liées à la lecture et à la fluctuation.

L'incertitude type vaut alors :

$$u_{\Delta p} = \sqrt{BR_1^2 + BL_{11}^2 + BL_{12}^2 + u\rho^2}$$

Application numérique :

$$u_{\Delta p} = 1,25 Pa$$

Soit une incertitude relative élargie pour un  $\Delta p$  maximale mesurée de 300 Pa (cas le plus défavorable) de :

$$U_{\Delta p} = \frac{1,25 * 2 * 100}{300} = 0,84\%$$

- **En dépression**

La droite de régression est donnée par :

$$K = 25,611\sqrt{\Delta p} - 8,4006$$

$$\frac{u\Delta p}{\Delta p} = \left( \frac{2}{25,611} \right) \times 0,265\% = 0,02\%$$

Pour un  $\Delta p$  maximum de 2000 Pa l'incertitude d'étalonnage est de :

$$u\Delta p = \frac{0,02 \times 2000}{100} = 0,4 Pa$$

À cette composante d'étalonnage, on ajoute deux autres composantes qui sont liées à la lecture et à la fluctuation calculées précédemment.

L'incertitude type vaut alors :

$$u_{\Delta p} = \sqrt{BR_1^2 + BL_{11}^2 + BL_{12}^2 + u\rho^2}$$

Application numérique :

$$u_{\Delta p} = 1,25 Pa$$

Soit une incertitude relative élargie pour un  $\Delta p$  mesurée de 300 Pa :

$$U_{\Delta p} = \frac{1,25 * 2 * 100}{300} = 0,84\%$$

#### 4- Vérification du débit d'eau

La droite de régression est donnée par :

$$D_{\acute{e}a} = 0,9557D_{cl} - 1,2025$$

L'incertitude d'étalonnage du débitmètre d'eau est de 0,44%.

En appliquant la formule démontrée ci-dessus :

$$\frac{uD_{cl}}{D_{cl}} = \left( \frac{1}{a} \right) \frac{uD_{éta}}{D_{éta}}$$

On obtient :

$$\frac{uD_{cl}}{D_{cl}} = \left( \frac{1}{0,9557} \right) \times 0,22\% = 0,23\%$$

Soit une incertitude relative élargie (k=2) de :  $\frac{UD_{cl}}{D_{cl}} = 0,46\%$

### 5- Essais de caractérisation des dispositifs casse d'angle des assemblages soudés in situ

- Incertitude sur le capteur de force en traction 5 KN

La droite de régression est donnée par :  $F_{éta} = 0,984F_{cl} + 0,0122$

L'incertitude d'étalonnage du capteur de force est de 0,11%.

En appliquant la formule démontrée ci-dessus :

$$\frac{uF_{cl}}{F_{cl}} = \left( \frac{1}{a} \right) \frac{uF_{éta}}{F_{éta}}$$

On obtient :

$$\frac{uF_{cl}}{F_{cl}} = \left( \frac{1}{0,984} \right) \times 0,055\% = 0,056\%$$

Soit une incertitude relative élargie (k=2) de :

$$\frac{UF_{cl}}{F_{cl}} = 0,112\%$$

### 6- Essais de caractérisation de la température de contact (température des plaques soudeuses in situ)

La droite de régression est donnée par :  $th_{éta} = 1,036th_{cl} - 0,418$

L'incertitude d'étalonnage du thermomètre de contact est de 1,01%.

En appliquant la formule démontrée ci-dessus :

On obtient :

$$\frac{uth_{cl}}{th_{cl}} = \left( \frac{2}{1,036} \right) \times 0,505\% = 0,97\%$$

Soit une incertitude relative élargie ( $k=2$ ) de :  $\frac{U_{th_{cl}}}{th_{cl}} = 1,94\%$

### 7- Caractérisation des comparateurs

La flèche est mesurée à l'aide d'une des micromètres digitaux dont les numéros de série sont (milieu 70501680, haut 70502994).

#### ❖ Butée micrométrique (digitale)

##### ▪ Incertitude de l'étalon

Le certificat d'étalonnage, nous donne une incertitude type élargie de  $6 \mu m$ .

Soit une incertitude type de  $BR_{11} = \frac{6}{2} = 3 \mu m$

##### ▪ Résolution du capteur

Cette composante est de  $0,1 mm$ . Nous associons à cette valeur une loi rectangulaire :

$$BL'_{11} = \frac{0,1 * 10^3}{\sqrt{12}} = 0,28 \mu m$$

##### ▪ Dérive de l'instrument dans le temps

La dérive maximale entre deux étalonnages traduit la dérive temporelle sur le long terme de l'appareil. A partir des deux derniers certificats d'étalonnage, nous évaluons cette dérive à  $1,5 \mu m$ .

Nous associons à cette valeur une loi rectangulaire.

$$BL''_{12} = \frac{6 - 4,5}{\sqrt{3}} = 0,87 \mu m$$

##### ▪ Erreur de planéité

Cette composante est estimée à  $0,3 \mu m$ . Nous associons à cette valeur une loi rectangulaire.

$$BL'_{13} = \frac{0,3}{\sqrt{12}} = 0,1 \mu m$$

##### ▪ Erreur de justesse

Cette composante est estimée à  $3,2 \mu m$ . Nous associons à cette valeur une loi rectangulaire.

$$BL'_{14} = \frac{1,9}{\sqrt{12}} = 0,55 \mu m$$

- *Erreur de fidélité*

Cette composante est estimée à  $1,3\mu\text{m}$ . Nous associons à cette valeur une loi rectangulaire.

$$BL'_{15} = \frac{3,7}{\sqrt{12}} = 1,1\mu\text{m}$$

- *Influence de la température*

La butée micrométrique digitale a été étalonnée à une température ambiante de  $22,6^{\circ}\text{C}$ . Cependant l'étalonnage de la station a été effectué à une température de  $17^{\circ}\text{C}$ . Donc l'écart de température égale :

$$\Delta T = 22,6 - 17 = 5,6^{\circ}\text{C}$$

Notre capteur est en acier, son coefficient de température est de  $1,2 * 10^{-5} / ^{\circ}\text{C}$ .

Donc une incertitude de :  $BL'_{12} = u\Delta T = \frac{5,6 * 1,2 * 10^{-5}}{\sqrt{3}} * 50 * 10^3 = 1,94\mu\text{m}$

L'incertitude type liée à l'utilisation du comparateur vaut :

$$u_{cp} = \sqrt{BR_{11}^2 + BL_{11}'^2 + BL_{12}''^2 + BL_{13}''^2 + BL_{14}''^2 + BL_{15}''^2}$$

Application numérique :  $u_{cp1} = 3,88\mu\text{m}$

Soit une incertitude élargie :  $U_{cp} = 7,76\mu\text{m}$

L'incertitude relative élargie pour une valeur maximale mesurée de 50 mm est :

$$\frac{U_{cp}}{CP} = \frac{7,76 * 2 * 100}{50 * 10^3} = 0,031\%$$



**RECAPITULATIF DES RESULTATS**

Type	Composante d'incertitude	Incertitude type Absolue
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Contrôle du manomètre de la station pour la pression fenêtre</b></li> </ul>		
<i>Cas du manomètre 5000 Pa</i>		
$BR_1'$	Incertitude d'étalonnage	1,5 Pa
$u_r$	Incertitude de répétabilité	1,00Pa
$BL_{11}$	Incertitude de fluctuation	0,58Pa
$BL_{12}$	Incertitude de résolution	0,29Pa
Incertitude type du manomètre		
<p><b>L'incertitude type vaut alors :</b> <math>u_m = \sqrt{BR_1'^2 + BL_{11}^2 + BL_{12}^2 + u_r^2}</math></p> <p><b>Soit une incertitude relative élargie pour une pression maximale mesurée de 3000 Pa de :</b></p> $U_m = \frac{1,92 * 2 * 100}{3000} = 0,13\%$		<b>1,91Pa</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Caractérisation des débitmètres</b></li> </ul> <p><b>Remarque :</b> Le client mesure des différences de pressions (<math>\Delta P</math>) qui sont proportionnelles aux débits suivant la relation suivante :</p> $q_v = K \times S \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$		
1. <i>Cas du débitmètre de capacité de 30 m3 /h (voie 4/D)</i>		
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>En pression</b></li> </ul>		
$BR_1'$	Incertitude d'étalonnage	3,87 Pa
$BL_{11}$	Incertitude de lecture	0,58 Pa
$BL_{12}$	Incertitude de fluctuation	0,87 Pa
$u_\rho$	Incertitude de la masse volumique	0,022
<p><b>L'incertitude type vaut alors :</b> <math>u_{\Delta p} = \sqrt{BR_1'^2 + BL_{11}^2 + BL_{12}^2 + u_\rho^2}</math></p> <p><b>Soit une incertitude relative élargie pour un <math>\Delta p</math> maximale mesurée de 300 Pa</b></p> $U_{\Delta p} = \frac{4,00 * 2 * 100}{300} = 2,67\%$		$u_{\Delta p} = 4,00Pa$
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>En dépression</b></li> </ul>		
$BR_1'$	Incertitude d'étalonnage	4,05 Pa

Type	Composante d'incertitude	Incertitude type Absolue
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Contrôle du manomètre de la station pour la pression fenêtre</b></li> </ul>		
L'incertitude type vaut alors : $u_{\Delta p} = \sqrt{BR_1'^2 + BL_{11}^2 + BL_{12}^2 + u\rho^2}$ Soit une incertitude relative élargie pour un $\Delta p$ maximale mesurée de 300 Pa <b>(cas le plus défavorable) de :</b> $U_{\Delta p} = \frac{4,18 * 2 * 100}{300} = 2,78\%$		<b>4,18Pa</b>
<b>2. Cas du débitmètre de capacité de 30 m<sup>3</sup>/h (voie E)</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>En pression</b></li> </ul>		
$BR_1'$	Incertitude d'étalonnage	1,71Pa
L'incertitude type vaut alors : $u_{\Delta p} = \sqrt{BR_1'^2 + BL_{11}^2 + BL_{12}^2 + u\rho^2}$ Soit une incertitude relative élargie pour un $\Delta p$ maximale mesurée de 300 Pa : $U_{\Delta p} = \frac{2,00 * 2 * 100}{300} = 1,33\%$		$u_{\Delta p} = 2,00Pa$
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>En dépression</b></li> </ul>		
$BR_1'$	Incertitude d'étalonnage	1,77Pa
L'incertitude type vaut alors : $u_{\Delta p} = \sqrt{BR_1'^2 + BL_{11}^2 + BL_{12}^2 + u\rho^2}$ Soit une incertitude relative élargie pour un $\Delta p$ maximale mesurée de 300 Pa <b>(cas le plus défavorable)de :</b> $U_{\Delta p} = \frac{2,05 * 2 * 100}{300} = 1,37\%$		$u_{\Delta p} = 2,05Pa$
<b>3. Cas du débitmètre de capacité de 60 m<sup>3</sup>/h (D-E)</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>En pression</b></li> </ul>		
$BR_1'$	Incertitude d'étalonnage	1,29Pa
L'incertitude type vaut alors : $u_{\Delta p} = \sqrt{BR_1'^2 + BL_{11}^2 + BL_{12}^2 + u\rho^2}$ Soit une incertitude relative élargie pour un $\Delta p$ maximale mesurée de 300 Pa (cas le plus défavorable)de : $U_{\Delta p} = \frac{2,75 * 2 * 100}{300} = 1,83\%$		$u_{\Delta p} = 2,75Pa$

• En dépression		
$BR_1'$	Incertitude d'étalonnage	1,35Pa
L'incertitude type vaut alors : $u_{\Delta p} = \sqrt{BR_1^2 + BL_{11}^2 + BL_{12}^2 + u\rho^2}$ Soit une incertitude relative élargie pour un $\Delta p$ maximale mesurée de 300 Pa (cas le plus défavorable) de : $U_{\Delta p} = \frac{2,91 * 2 * 100}{300} = 1,94\%$		$u_{\Delta p} = 2,91Pa$
4. Cas du débitmètre de capacité de 50-700 m <sup>3</sup> /h (voie2/B)		
Pression / Dépression		
$BR_1'$	Incertitude d'étalonnage	1,2 Pa
L'incertitude type vaut alors : $u_{\Delta p} = \sqrt{BR_1^2 + BL_{11}^2 + BL_{12}^2 + u\rho^2}$ Application numérique : $u_{\Delta p} = 2,53Pa$ Soit une incertitude relative élargie pour un $\Delta p$ mesurée de 300 Pa de : $U_{\Delta p} = \frac{2,53 * 2 * 100}{300} = 1,68\%$		$u_{\Delta p} = 2,53Pa$
5. Cas du débitmètre de capacité de 50-700 m <sup>3</sup> /h (voie1/A)		
• En pression		
$BR_1'$	Incertitude d'étalonnage	0,4 Pa
Soit une incertitude relative élargie pour un $\Delta p$ mesurée de 300 Pa de : $U_{\Delta p} = \frac{1,25 * 2 * 100}{300} = 0,84\%$		$u_{\Delta p} = 1,25Pa$
• En dépression		
$BR_1'$	Incertitude d'étalonnage	0,4 Pa
L'incertitude type vaut alors : $u_{\Delta p} = \sqrt{BR_1^2 + BL_{11}^2 + BL_{12}^2 + u\rho^2}$ Soit une incertitude relative élargie pour un $\Delta p$ mesurée de 300 Pa : $U_{\Delta p} = \frac{1,25 * 2 * 100}{300} = 0,84\%$		$u_{\Delta p} = 1,25Pa$

**Vérification du débit d'eau**

La droite de régression est donnée par :  $D_{éta} = 0,9557D_{cl} - 1,2025$

L'incertitude d'étalonnage du débitmètre d'eau est de 0,44%.

En appliquant la formule démontrée ci-dessus:  $\frac{uD_{cl}}{D_{cl}} = \left(\frac{1}{a}\right) \frac{uD_{éta}}{D_{éta}}$

On obtient :  $\frac{uD_{cl}}{D_{cl}} = \left(\frac{1}{0,9557}\right) \times 0,22\% = 0,23\%$

Soit une incertitude relative élargie (k=2) de :  $\frac{UD_{cl}}{D_{cl}} = 0,46\%$

**6. Caractérisation des dispositifs casse d'angle des assemblages soudés in situ**

*Incertitude sur le capteur de force en traction 5 KN*

La droite de régression est donnée par :  $F_{éta} = 0,984F_{cl} + 0,0122$

L'incertitude d'étalonnage du débitmètre d'eau est de 0,11%.

En appliquant la formule démontrée ci-dessus:  $\frac{uF_{cl}}{F_{cl}} = \left(\frac{1}{a}\right) \frac{uF_{éta}}{F_{éta}}$

On obtient :  $\frac{uF_{cl}}{F_{cl}} = \left(\frac{1}{0,984}\right) \times 0,055\% = 0,056\%$

Soit une incertitude relative élargie (k=2) de :  $\frac{UF_{cl}}{F_{cl}} = 0,112\%$

La droite de régression est donnée par :  $th_{éta} = 1,036th_{cl} - 0,418$

L'incertitude d'étalonnage du thermomètre de contact est de 1,01%.

En appliquant la formule démontrée ci-dessus :

On obtient :  $\frac{uth_{cl}}{th_{cl}} = \left(\frac{2}{1,036}\right) \times 0,505\% = 0,97\%$

Soit une incertitude relative élargie (k=2) de :  $\frac{Uth_{cl}}{th_{cl}} = 1,94\%$

**Tableau 9:** récapitulatif des résultats essais AEV

**IV.7.3. CALCUL D'INCERTITUDES APPLIQUEES A LA METROLOGIE MECANIQUE****IV.7.3.1 Méthodes expérimentales CNOMO & MSA**

Ces deux méthodes sont développées par un donneur d'ordre pour ses sous-traitants. À ce niveau, la question de coefficient de capabilité est traitée dans la mesure où il répond aux exigences du donneur d'ordre. De ce fait, il devient délicat, voire excessivement risqué, de s'en remettre sans réflexions aux conditions de ces méthodes .

**1- Méthode CNOMO**

Cette méthode propose, dans un premier temps, d'évaluer la répétabilité, notée  $V_e$ , en mesurant un étalon de façon à s'assurer que cette dernière n'est pas, dans ces conditions très défavorables, déjà très importante devant la tolérance. Simplement les valeurs limites proposées (Tolérance/20 pour une tolérance supérieure à 16 $\mu$ m et T/10 dans l'autre cas).

Ensuite, la méthode propose d'évaluer la répétabilité sur une pièce type.

Une fois les deux premières étapes (répétabilité sur étalon puis sur pièce type) passées avec succès, la méthode propose de mesurer 5 fois (pour la répétabilité) 5 à 10 pièces prélevées au niveau de la fabrication. Ce prélèvement doit couvrir 60% au moins de la tolérance, ce qui peut conduire, parfois, à fabriquer des pièces spécifiques pour pouvoir respecter cette condition.

L'originalité de cette méthode consiste en la mesure des pièces prélevées dans les conditions de référence de sorte que l'incertitude de mesure à cette étape soit faible devant la tolérance. Ainsi, la valeur conventionnellement vraie de chacune des pièces est connue, ce qui permet de connaître l'écart entre la valeur mesurée dans les conditions du processus évalué et celle obtenue dans les conditions de références. C'est-à- dire l'erreur de justesse du processus de mesure.

L'erreur de justesse (notée  $J$ ) du processus de mesure est définie comme étant la moyenne des écarts obtenus entre chaque valeur mesurée et la valeur conventionnellement vraie correspondante. Dans la formule finale de l'incertitude globale ( $I_g$ ), ce terme est ajouté linéairement, en valeur absolue. Cela signifie qu'il est considéré comme une constante du processus de mesure étudié.

Après le calcul de ( $J$ ), on calcule la variance des différences définies par l'écart entre les écarts mesurés et l'écart moyen ( $J$ ). A partir de ces termes, l'incertitude globale se calcule suivant la formule:

$$I_g = J + 2V_d \dots \dots \dots \text{IV.1}$$

Il suffit ensuite de vérifier si le rapport de capabilité qui est, calculé suivant la formule :

$C=T/Ig$  remplit les conditions exigées.

## **2- Méthode MSA**

Les constructeurs automobiles américains ont également mis au point une méthode destinée à leurs sous – traitants, documentée dans un document intitulée « Measurement Système Analysis » MSA.

### **2-1. Principe de la méthode**

Le MSA définit différents types de paramètres à considérer dans le cadre de l'analyse des processus de mesure. La méthode a surtout retenu l'étude R&R(Répétabilité et Reproductibilité), mais il est utile de rappeler qu'il est nécessaire d'évaluer la stabilité du processus en utilisant la notion des étendues contrairement au GUM qui utilise des écarts types. On peut regretter que , contrairement au CNOMO, la MSA ne prenne pas en compte les éventuels effets de l'environnement de la mesure, tel que la dilatation par exemple.

La méthode consiste à faire mesurer, par deux ou trois opérateurs, une série de 2 à 10 pièces prélevées en fabrication. Les pièces seront mesurées deux à trois fois par chaque opérateur.

Les mesures réalisées permettent d'établir un tableau de synthèse dans lequel on détermine la valeur moyenne de chaque pièce obtenue par chaque opérateur et l'étendue de chaque série de mesure obtenue par chaque opérateur. On en déduit la moyenne des étendues moyennes et l'étendue des moyennes des opérateurs.

### **2-2. La répétabilité ( $E_v$ )**

La répétabilité du processus de mesure est estimée à partir de la moyenne des étendues. En fonction du nombre de série de mesure (deux ou trois), un coefficient correcteur est appliqué à l'étendue des moyennes pour aboutir au terme  $E_v$ . Ce coefficient, donnée par les tables statistiques, permet de corriger le faible nombre d'échantillons relevés, pour ramener l'étendue totale  $E_v$  à un niveau de confiance de 99%, au lieu de 95%. Cette exigence de 4% de confiance coûte 1,15 écart-type (4 écart-types pour 95%, (5,15) pour 99%).

Compte tenu des coefficients appliqués (4,56 pour deux séries, 3,05 pour trois séries), il est conseillé, dans la mesure du possible, de réaliser trois séries de mesures par pièce.

	<b>Moyenne des moyennes</b>	<b>Étendue moyenne</b>
Opérateur A	12,253	0,030
Opérateur b	12,291	0,025
Opérateur C	12,264	0,021
Moyennes des étendues moyennes		<b>0,025</b>
Étendue des moyennes		<b>0,038</b>

**Tableau 10:** Récapitulatif des résultats essais mécaniques CNOMO

### **2-3. La reproductibilité Av**

La reproductibilité est déterminée à partir de l'étendue des moyennes. A l'instar de la répétabilité, un coefficient correcteur est appliqué à cette étendue pour prendre en compte le fait que tous les opérateurs ne peuvent participer à l'étude.

Dans cette évaluation aussi, et compte tenu des coefficients appliqués (3,65 pour deux opérateurs et 2,70 pour trois opérateurs), on ne peut que conseiller de faire participer trois opérateurs à l'étude.

### **2-4. L'incertitude de mesure R&R**

Le terme R&R correspond à l'incertitude de mesure, au sens de la méthode CNOMO. On retrouve bien ici l'expression d'une somme de quasi variances, déjà étendues au niveau de confiance souhaité (99%), qui représente l'incertitude de mesure élargie du processus

### **2-5. La tolérance à vérifier**

La méthode prévoit trois possibilités de déterminer la tolérance à vérifier:

#### **❖ Sur la base de prélèvement effectué**

Dans ce cas, il est nécessaire de déterminer le terme Rp correspondant à l'étendue des moyens de chaque pièce, indépendamment de l'opérateur.

A partir de l'étendue des moyennes définie ci-avant, le terme Pv est calculé suivant la formule:

$$Pv = Rp \cdot K3 \dots \dots \dots IV.2$$

Avec K3 est un correcteur d'écart-type dépendant du nombre de pièces utilisées. PV déterminé, il convient de calculer le terme TV

❖ *Si la variation du processus de fabrication est connue*

Si le processus de fabrication a été analysé par les méthodes MSP, il est possible de définir TV directement par la formule :

$$TV = 5,15 \cdot (\text{Processus variation} / 6) \dots\dots IV.3$$

Tel que le processus de variation correspond à la variation maximale, estimée à partir de six écarts-types, du processus étudié. En divisant par 6, puis en multipliant par 5,15, la méthode revient à son niveau de confiance de 99%.

❖ *La tolérance de l'objet*

Le MSA prévoit que l'on puisse substituer au terme TV obtenu par les méthodes précédentes la tolérance de l'objet à réaliser, sans exigence particulière au niveau des précautions à respecter aux environs immédiats des limites de tolérance.

**2-6. Les correcteurs d'écart type**

Dans le cas où l'échantillon n'est pas suffisamment important, les tables statistiques présentent différents correcteurs d'écart type.

Dans le cadre d'évaluation des incertitudes de mesure, deux grandes méthodes sont disponibles: NF ENV 13005 et l'ISO 5725 traitant des essais inter laboratoires. En utilisant cette dernière pour évaluer les composantes de répétabilité et de reproductibilité inter opérateurs, cet objectif est partagé avec le MSA, et pour un même jeu de données, les deux méthodes donnent les résultats suivants:

**N.b:** la norme ISO 5725 permet d'évaluer les écarts-types, en multipliant par 5,15 pour être comparable avec le MSA.

	<b>R&amp;R</b>	<b>ISO 5725</b>	
Répétabilité	0,0396	0,0115	0,0592
Reproductibilité	0,0972	0,0327	0,1684
Incertitude 99%	<b>0,1050</b>	<b>0,1785</b>	

**Tableau 11:** Récapitulatif des résultats essais mécaniques MSA



*❖ Le niveau de confiance de l'incertitude de mesure*

Le MSA estime l'incertitude de mesure avec un niveau de confiance à 99%, le CNOMO à 95%. Ainsi, les coefficients demandés (10 pour le MSA et 4 pour le CNOMO) ne sont pas directement comparables. Pour connaître l'écart entre les deux exigences, il faut ramener les niveaux de confiance à la même valeur.

Pour la limite acceptable de 30%, le même calcul donne un coefficient de capacité de 4, celui est recommandé par CNOMO dans le cas des tolérances supérieures à 16 micromètres.

### ***V.1 ESSAIS MECANIQUES (CNOMO et MSA)***

L'évaluation des termes TV et R&R, comme dans la méthode CNOMO, sert à évaluer la capabilité du processus de mesure. Néanmoins, il réside une petite différence, purement mathématique, entre l'approche CNOMO et MSA. En effet, si nous avons l'habitude de définir le coefficient de capabilité comme le rapport entre la tolérance et l'incertitude, les américains font l'inverse.

Les limites d'acceptation pour  $1/C$  sont contractuellement de 10 % pour un processus «capable», sachant qu'il est possible d'aller jusqu'à 30%.

Il est important de préciser que ces valeurs ne peuvent être considérées comme des chiffres d'or ; 10 % représente un coefficient de 10 alors que CNOMO demande 4 (pour une incertitude exprimée en étendue totale). Même les 30% qui représentent un coefficient de 3,33, ne sont pas cohérents avec les exigences CNOMO. De plus, et contrairement au CNOMO, le MSA ne prévoit pas de modification de ses coefficients en fonction de la tolérance à atteindre (4 pour des tolérances supérieures 16 micromètres, mais 2 dans le cas contraire).

Ce constat montre bien que, si la méthode peut être préconisée comme méthode d'évaluation du coefficient de capabilité, la valeur de ce dernier relève bien d'un accord entre les contractants.

### ***V.2. ESSAIS AEV***

- ❖ Le niveau d'incertitude devrait faiblement évoluer compte tenu de la présence des deux incertitudes essentielles (coefficient de débit  $K$  et la pression différentielle  $\Delta p$ ) qui dominent les autres composantes d'incertitudes.
- ❖ Lors de calculs d'incertitudes, on ne dispose que des certificats d'étalonnage. De ce fait d'autres composantes d'incertitudes peuvent être prises en compte pour améliorer le budget d'incertitudes.
- ❖ Les valeurs d'incertitudes relatives sur la perméabilité linéaire (3,63%) et surfaciques (3,64%) s'inscrivent donc parfaitement dans la tolérance admise de 10%.
- ❖ Des mises à jour sont conseillées au responsable d'essai, afin de prendre en compte les nouveaux étalonnages des instruments de mesure utilisés.
- ❖ Pour rester toujours dans la conformité, le laboratoire est conseillé de participer aux essais inter laboratoires organisés par le Laboratoire National des Essais (LNE).

**V.3. CARACTERISATION DES ESSAIS AEV APPLIQUEES AU BANC D'UN CLIENT**

Cette essai décrit la manière dont sont estimées les incertitudes associées aux paramètres mesurés, appliqués ou calculés lors des essais de caractérisation des stations AEV d'un client suivant les normes BV/OE § 2.7.

Les résultats sont consignés dans le tableau ci-dessous.

Appareil de mesure	Incertitude élargie (k=2)	
	Etalon	Banc client
Manomètre 5000 Pa	0,1 %	0,13%
Manomètre 1200 Pa	0,11 %	/
Débitmètre A	0,53 %	Pression : 0,84% dépression : 0,84%
Débitmètre B	0,52 %	Pression : 1,68 % dépression : 1,68%
Débitmètre D	0,58 %	Pression : 2,67 % dépression : 2,78%
Débitmètre E	0,57 %	Pression : 1,33% dépression : 1,37 %
Combinaison D+E	0,4 %	Pression : 0,75 % dépression : 0,76 %
Capteur de force Traction 500N (EAU)+ Chronomètre	0,44 %	0,46%
Capteur de force en traction ou en Compression 500daN (casse d'angle)	0,11 %	0,2 %
Sonde température soudeuse	1,01 %	1 ,94 %

**Tableau 12:** Résultats d'essais de caractérisation des stations AEV d'un client

Ces résultats répondent aux exigences de la spécification technique référencée BV/OE § 2.7 dont le CSTB devient un prestataire de service (expertise) dans le domaine d'étalonnage des bancs désigné aux essais AEV.

Grâce à ce travail que j'ai mis en place avec le technicien chargé des étalonnages, aujourd'hui le CSTB est accrédité COFRAC dans le domaine des essais AEV, ainsi que le domaine d'étalonnage. Donc il devient la référence française dans ce domaine.

#### ***V.4. INSERTION DANS LE MILIEU PROFESSIONNEL ET ACQUIS TECHNIQUE***

##### ***➤ Insertion dans le milieu professionnel***

L'intégration au sein d'une équipe est la base de la réussite de toute mission. En particulier lorsqu'il s'agit de calcul d'incertitudes, car la diversité des essais impose d'être en contact avec plusieurs responsables et exploitants d'essais dans l'équipe BAIES et Vitrages. Au CSTB, l'intégration est facilitée par :

- Ses Formalités administratives simples et rapides,
- Dès l'arrivée, des distributions de documents qui contiennent toutes les informations nécessaires pour mieux connaître l'entreprise (photos du personnel pour faciliter le contact, adresses utiles ... ),
- La mise à disposition des moyens nécessaires (PC, bureau, téléphone, fourniture ...),
- La présentation d'étudiant à l'ensemble du personnel de la division,

##### ***➤ Acquis techniques***

Ce travail m'a permis :

- De rencontrer des personnes expérimentées dans le domaine du bâtiment et de la Métrologie,
- D'appréhender les différentes bases de données internes et logiciels d'exploitations,
- D'approfondir mes connaissances métrologiques en termes de procédures d'étalonnage et de vérification des instruments de mesures,
- De développer mes compétences dans le domaine des essais portant sur les portes et les fenêtres, ainsi que les essais mécaniques compte tenu de la diversité des essais traités,
- De renforcer mes compétences en rédaction de rapports.

### ***CONCLUSION GENERALE***

Ce travail rentre dans le cadre de la réalisation d'un grand projet lancé par la division Baies et Vitrages sur la maîtrise du processus de mesurage et auquel j'ai participé. Cette occasion constitue effectivement une véritable opportunité. Elle m'a permis de découvrir et d'apprécier la vie professionnelle et de développer mes capacités de communication outre l'élaboration du mémoire. Aussi, j'ai eu la chance de collaborer avec des personnes expérimentées qui m'ont appris beaucoup de choses grâce à leur méthodologie de travail et leur mode de raisonnement. En outre, ce travail m'a permis d'assimiler de nouvelles méthodes de rédaction de rapports exigeant une rigueur particulière ; les démonstrations et calculs doivent être, en effet, à la portée de tous, pour permettre l'exploitation et la mise à jour régulière du bilan des incertitudes. Ce projet m'a permis également de développer ma capacité de recherche et de patience tout en analysant la documentation technique, dans l'objectif de déceler les différentes composantes du bilan d'incertitudes.

Les résultats de ce travail répondent aux objectifs envisagés au début du projet et qui sont validés par le responsable métrologie en se référant aux tolérances exigées par chaque essai qui sont mentionnées dans chaque norme d'essais publié par l'AFNOR. Ces rapports sont validés également par le responsable qualité selon des exigences normatives de rédaction des rapports et aussi, selon les normes qualité. A la fin, des rapports résumant le travail réalisé ont été publiés et diffusés sur le serveur et sont consultables par l'ensemble de l'équipe et les éventuels auditeurs.

Il existe donc plusieurs approches pour évaluer la validité des résultats expérimentaux.

- Au minimum, un résultat doit être exprimé avec une incertitude calculée à l'aide des calculs d'incertitudes simples. Mais l'inconvénient est qu'il n'est pas toujours possible d'identifier la relation expérimentale indispensable pour effectuer ce calcul.
- L'utilisation de méthodes statistiques permet d'exprimer plus rigoureusement les limites de fiabilité du résultat. Elles incitent à multiplier le nombre de mesures, ce qui n'est pas toujours possible.
- Une solution intermédiaire souvent utilisée est de donner uniquement les écarts types (selon le nombre de mesures). Ceci permet aux utilisateurs d'approfondir si nécessaire l'étude statistique en fonctions de leurs besoins.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] Jean Paul SENELAR, « Traitement des résultats de mesure » École des Mines de Douai- édition 2005
- [2] M.LECOLLINET -Professeur CNAM à Paris-, « Evaluation et expression des incertitudes de mesure » édition 2004
- [3] Francis ROUSSEL, « La fonction métrologique dans l'entreprise »édition 2004
- [4] Mouvement Français Pour la Qualité « BIBLIOTHEQUE QUALITE » « Guide pour la détermination des incertitudes »version 2004
- [5] ISO 15189 accreditation: Requirements for quality and competence of medical laboratories, experience of a laboratory II,2006
- [6] A. Iglicki et al., Accreditation experience of radioisotope metrology laboratory of Argentina 2007
- [7] Inci Karaarslan, Joint Commission on International Accreditation workshop: Planning, development and provision of laboratory services. 2006
- [8] Berna Aslan et al., Uncertainty in proficiency testing schemes: KBUDEK experience 2007
- [9] Normes AFNOR
- NF ENV 13-005 Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (1995) abrégé non officiel : GUM
  - NF X 07-001 Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie (1994)
  - NF X 07-021 Aide à la démarche pour l'estimation de l'incertitude des mesures et des résultats d'essais
  - NF EN ISO 10012 Systèmes de management de la mesure – Exigences pour les processus et les équipements de mesure (septembre 2003)
  - NF ISO 17025 Prescriptions générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnage et d'essais.
  - NF ISO 5725 Fidélité des méthodes d'essais
- [10] Michèle Désenflant, Marc Priel, Cédric Rivier, « De la validation des méthodes d'analyse à l'évaluation de l'incertitude des résultats de mesure », Actes du 11e congrès international de métrologie, Toulouse, Laboratoire National des Essais LNE, 20-23 octobre 2003.
- [11] « Métrologie dans l'entreprise » AFNOR 2004.

- [12] Soraya AMAROUCHE, Armelle PICAU, Olivier PIERSON, Raphaël Dael. « Assurer la qualité des résultats d'essai et d'étalonnage », Actes du 12e congrès international de métrologie, Lyon, 20-23 juin 2005.
- [13] Guide COFRAC pour une accréditation 2004.
- [14] Christian BOURDILLON « Traitement des données expérimentales », juillet 2001.
- [15] B. BLANQUART, « Incertitude de mesure, un indicateur de qualité pour le résultat de modèles » Acte du 11<sup>ème</sup> congrès international de métrologie, Toulon du 20 au 23 octobre 2003
- [16] S.LAUDREL, « Démarche pour déterminer la méthode d'évaluation de l'incertitude adaptée », Acte du 13<sup>ème</sup> congrès international de métrologie. 18-21 juin 2007, Lille, France

### Sites Internet

- [1] Association française de normalisation : [www.afnor.fr](http://www.afnor.fr)
- [2] Bureau National de Métrologie : [www.bnm.fr](http://www.bnm.fr)
- [3] Comité français d'accréditation : [www.cofrac.fr](http://www.cofrac.fr)
- [4] Bureau International des Poids et Mesures : [www.bipm.org](http://www.bipm.org)
- [5] Euromet : [www.euromet.org](http://www.euromet.org)
- [6] European Committee for standardization ( CEN) : [www.cenorm.be](http://www.cenorm.be)
- [7] Organisation internationale de normalisation : [www.iso.ch](http://www.iso.ch)
- [8] Organisation internationale de Métrologie Légale : [www.oiml.org](http://www.oiml.org)
- [9] Intranet du CSTB

---

## **ANNEXE-1. TERMINOLOGIE**

### ***I. ESSAI DE PERMEABILITE A L'AIR***

- ***Pression d'essai***

Différence entre les pressions d'air statique sur la face extérieure et la face intérieure du corps d'épreuve.

- ***Pression positive***

La pression d'essai est positive si la pression d'air statique sur la face extérieure est supérieure à celle sur la face intérieure.

- ***Pression négative***

La pression d'essai est négative si la pression d'air statique sur la face extérieure est inférieure à celle sur la face intérieure.

- ***Perméabilité à l'air***

Quantité d'air traversant, du fait de la pression d'essai, un corps d'épreuve fermé et verrouillé. Elle est exprimée en (m<sup>3</sup>/h).

### ***II. ESSAI D'ETANCHEITE A L'EAU***

- ***Étanchéité à l'eau***

Capacité du corps d'épreuve fermé et verrouillé à s'opposer à la pénétration de l'eau dans les conditions de l'essai jusqu'à une pression (P<sub>max</sub> = limite d'étanchéité).

### ***III. RESISTANCE AU VENT***

- ***Flèche de face***

Déplacement maximal de face d'un élément de dormant, moins la moitié de la somme des déplacements de face de chaque extrémité de l'élément.



## ANNEXE 2

- *Mesure de la flèche en pression*

- Monté en pression 734 Pa mesure de la flèche, retour à 0 par fermeture de la vanne.
- Remise à zéro des comparateurs.
- Ouverture de la vanne et prise des mesures.

		CH1 meneau du menuiserie				CH2 Battement d'une menuiserie			
	Pression (Pa)	H (mm)	M (mm)	B (mm)	Flèche (mm)	H (mm)	M (mm)	B (mm)	Flèche (mm)
1	734	0,94	8,01	1,06	7,010	1,15	7,15	0,98	6,085
2	733	0,94	8	1,06	7,000	1,18	7,18	0,98	6,100
3	735	0,93	8,01	1,06	7,015	1,18	7,2	0,99	6,115
4	733	0,93	7,99	1,05	7,000	1,17	7,19	0,98	6,115
5	733	0,94	8,01	1,07	7,005	1,16	7,18	0,98	6,110
6	734	0,93	8	1,06	7,005	1,18	7,2	0,99	6,115
7	733	0,93	8	1,06	7,005	1,15	7,15	0,99	6,080
8	734	0,93	8,01	1,06	7,015	1,18	7,16	0,98	6,080
9	734	0,92	7,99	1,06	7,000	1,18	7,2	0,99	6,115
10	735	0,93	8,01	1,06	7,015	1,15	7,19	0,99	6,120
max	735,000	0,940	8,010	1,070	7,015	1,180	7,200	0,990	6,120
min	733,000	0,920	7,990	1,050	7,000	1,150	7,150	0,980	6,080
écart	2,0000	0,0200	0,0200	0,0200	0,0150	0,0300	0,0500	0,0100	0,0400

*Essais de répétabilité sur le positionnement du comparateur milieu*

<b>Technicien 1</b>		
	Pression (Pa)	Flèche (mm)
1	1200	13,03
2	1200	13,02
3	1199	13,04
4	1198	12,99
5	1198	13,05
6	1199	13,00
7	1200	13,04
8	1198	13,01
9	1199	13,04
10	1199	13,02
	<b>max</b>	<b>13,05</b>
	<b>min</b>	<b>12,99</b>
	<b>écart</b>	<b>0,06</b>
<b>Technicien 2</b>		
	Pression	
1	800	8,25
2	800	8,23
3	799	8,19
4	799	8,2
5	798	8,19
6	800	8,22
7	801	8,25
8	798	8,19
9	800	8,22
10	801	8,26
	<b>max</b>	<b>8,26</b>
	<b>min</b>	<b>8,19</b>
	<b>écart</b>	<b>0,07</b>