
NORME INTERNATIONALE 5168

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION • МЕЖДУНАРОДНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ • ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION

Mesure de débit des fluides — Calcul de l'erreur limite sur une mesure de débit

Measurement of fluid flow — Estimation of uncertainty of a flow-rate measurement

Première édition — 1978-07-15

ITeCh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

[ISO 5168:1978](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/c49b3c5e-74d8-4dba-bfc6-48190116f236/iso-5168-1978)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/c49b3c5e-74d8-4dba-bfc6-48190116f236/iso-5168-1978>

CDU 532.575 : 53.088

Réf. n° : ISO 5168-1978 (F)

Descripteurs : mesurage de débit, règle de calcul, calcul d'erreur.

Prix basé sur 25 pages

AVANT-PROPOS

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique correspondant. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO, participent également aux travaux.

Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour approbation, avant leur acceptation comme Normes internationales par le Conseil de l'ISO.

La Norme internationale ISO 5168 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 30, *Mesure de débit des fluides dans les conduites fermées*, et a été soumise aux comités membres en mars 1976.

(standards.iteh.ai)

Les comités membres des pays suivants l'ont approuvée :

Afrique du Sud, Rép. d'	Hongrie	Tchécoslovaquie
Belgique	Inde	Turquie
Chili	Pays-Bas	U.R.S.S.
Égypte, Rép. arabe d'	Philippines	U.S.A.
Finlande	Portugal	Yougoslavie
France	Roumanie	
Corée, Rép. de	Royaume-Uni	

Le comité membre du pays suivant l'a désapprouvée pour des raisons techniques :

Allemagne

SOMMAIRE

	Page
0 Introduction	1
0.1 Symboles	1
0.2 Glossaire	1
SECTION UN : THÉORIE GÉNÉRALE	
1 Objet et domaine d'application	3
2 Principes généraux	3
2.1 Terminologie	3
2.2 Rapports entre l'erreur limite et le niveau de confiance	3
3 Nature de l'erreur	3
3.1 Mesures aberrantes	4
3.2 Erreurs fortuites	4
3.3 Erreurs systématiques	5
4 Propagation des erreurs	6
4.1 Sensibilité	7
4.2 Identification des sources d'erreur	7
4.3 Combinaison des erreurs limites	7
5 Présentation des résultats	8
SECTION DEUX : EXEMPLES	
6 Symboles	11
7 Exemple de mesure de débit dans des conduites circulaires	11
7.1 Calculs généraux	11
7.2 Exemple numérique	13
7.3 Exemple de calcul simplifié	18
8 Exemple de mesure dans un canal découvert	19
8.1 Formule du débit-volume dans un canal découvert	19
8.2 Erreur limite globale sur la mesure de débit	20
8.3 Exemple numérique	21

Annexes

A : Test des valeurs aberrantes	23
B : Loi du <i>t</i> de Student	24
C : Erreurs limites sur des variables pour lesquelles les valeurs ont été obtenues par des mesurages indépendants	25
D : Combinaison des erreurs limites	26

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO 5168:1978

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/c49b3c5e-74d8-4dba-bfc6-48190116f236/iso-5168-1978>

Mesure de débit des fluides — Calcul de l'erreur limite sur une mesure de débit

0 INTRODUCTION

0.1 Symboles

Symbole	Désignation
a, b, c	Constantes
$(E_R)_{95}$	Erreur limite fortuite, en pourcentage pour un niveau de confiance de 95 %
E_s	Erreur limite systématique, en pourcentage
e_i	Erreur limite sur la mesure de la grandeur Y_i
$e_{i,j}$	Erreur limite interdépendante due à la dépendance de deux variables Y_i et Y_j
e_R	Erreur limite fortuite
$(e_R)_{95}$	Erreur limite fortuite pour un niveau de confiance de 95 %
e_s	Erreur limite systématique
M	Valeur mesurée
n	Nombre de mesurages de la valeur d'une variable
q	Débit
R	Résultat d'un mesurage
s_Y	Estimation de l'écart-type sur la variable Y
$s_{\bar{Y}}$	Estimation de l'écart-type sur la moyenne de n mesures indépendantes
t	Coefficient de Student
Y	Variable quelconque
\bar{Y}	Moyenne arithmétique des n mesures de la variable Y
δt	Erreur systématique
δq	Erreur limite sur une mesure de débit
θ_i	Coefficient dimensionnel de sensibilité de la grandeur Y_j
θ_i^*	Coefficient adimensionnel de sensibilité de la grandeur Y_j
ν	Nombre de degrés de liberté
σ_Y	Écart-type de la variable Y

0.2 Glossaire

La majorité des définitions données ci-après sont extraites de l'ISO 3534, *Statistique — Vocabulaire et symboles*. La figure 1 permet néanmoins de mieux comprendre certains termes.

Lorsqu'un terme particulier est convenablement défini dans le corps du texte, référence est faite au chapitre ou au paragraphe correspondant.

0.2.1 erreur : Dans un résultat, différence entre la valeur mesurée et la valeur vraie de la grandeur mesurée.

0.2.2 erreur fortuite : Voir 3.2.

0.2.3 erreur systématique : Voir 3.3.

0.2.4 mesure aberrante : Voir 3.1.

0.2.5 erreur systématique constante : Voir 3.3.

0.2.6 erreur systématique variable : Voir 3.3.

0.2.7 valeur vraie : Valeur qui caractérise une grandeur parfaitement définie dans les conditions qui existent au moment où cette grandeur est examinée (ou fait l'objet d'une détermination).

C'est une valeur idéale qu'on ne pourrait atteindre que si l'on pouvait éliminer toutes les causes d'erreur de mesure et si la population était infinie.

0.2.8 niveau de confiance : Voir chapitre 2.

0.2.9 limite de confiance : Chacune des limites inférieure et supérieure, T_1 et T_2 , d'un intervalle de confiance bilatéral. Pour un intervalle unilatéral, limite unique T de cet intervalle.

0.2.10 erreur limite : Intervalle à l'intérieur duquel on peut espérer que se trouve la valeur vraie avec une probabilité donnée; elle est exprimée par $\pm ts_Y$, en prenant pour t la valeur correspondant à la probabilité choisie.

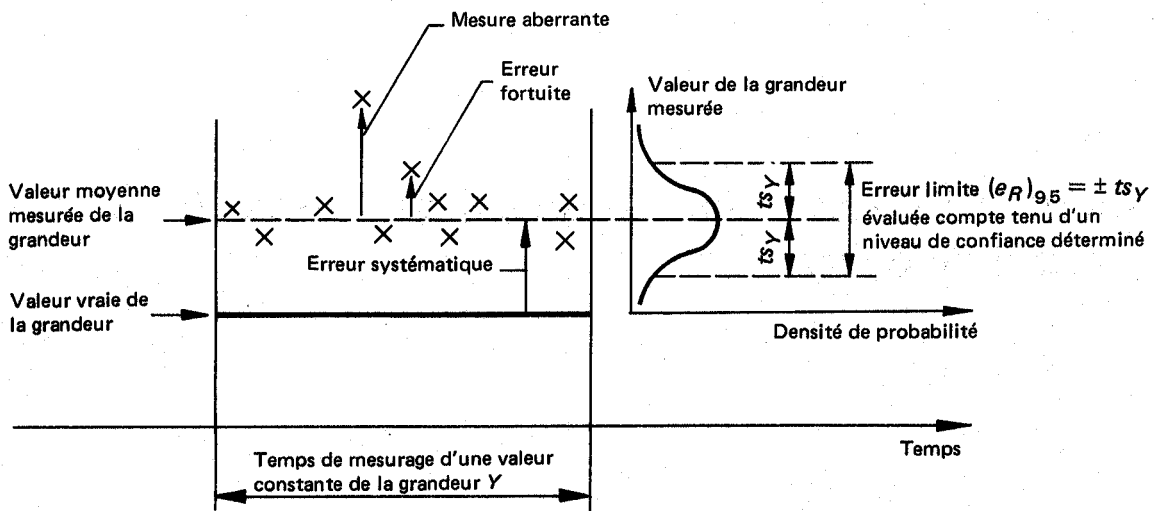


FIGURE 1

0.2.11 **erreur limite interdépendante** : Voir 4.3.

0.2.16 **coefficient de sensibilité** : Voir 4.1.

0.2.12 **erreur limite fortuite** : Erreur limite associée à une erreur fortuite.

0.2.17 **limites d'erreur d'un système de mesurage; classe de précision d'un système de mesurage** : Écarts maximaux possibles, positifs ou négatifs, d'une valeur mesurée par rapport à la valeur vraie; cet intervalle caractérise la gamme à l'intérieur de laquelle on trouvera la valeur vraie avec un haut degré de probabilité (supérieur à 95 %).

0.2.13 **erreur limite systématique** : Erreur limite associée à une erreur systématique.

0.2.14 **écart-type** : Racine carrée de la moyenne arithmétique des carrés des écarts par rapport à la moyenne arithmétique.

0.2.18 **erreur moyenne estimée** : Moyenne des valeurs maximales et minimales, que peut avoir une erreur systématique. (Voir également 3.3.1.)

0.2.15 **estimation de l'écart-type** : Voir 3.2.1.1.

0.2.19 **randomiser** : Faire varier selon les lois du hasard.

SECTION UN : THÉORIE GÉNÉRALE

1 OBJET ET DOMAINE D'APPLICATION

Chaque fois qu'on procède à un mesurage de débit, la valeur obtenue n'est que la meilleure estimation possible du débit vrai, compte tenu des données expérimentales. En pratique, le débit vrai est soit légèrement supérieur, soit légèrement inférieur à cette valeur. La présente Norme internationale décrit les calculs nécessaires pour arriver à une estimation statistique de l'intervalle à l'intérieur duquel on peut espérer que se trouve la valeur vraie du débit.

La présentation des calculs permet leur utilisation pour n'importe quelle méthode de mesurage du débit, que l'écoulement se fasse dans des conduites ouvertes ou fermées. Certains types de débitmètres ou de techniques de mesurage permettent toutefois, en pratique, certaines simplifications. Ces simplifications doivent être expliquées dans le chapitre « Erreur limite sur la mesure » de la norme particulière traitant de tel appareil ou de telle technique. Dans les cas particuliers, il convient donc de faire référence à la Norme internationale appropriée. La présente Norme internationale doit servir de guide dans le cas général.

La présente Norme internationale traite uniquement du traitement statistique des résultats de mesurage obtenus selon une méthode particulière donnant des valeurs uniques de débit-masse ou de débit-volume. Elle ne donne aucun renseignement sur la manière d'obtenir la meilleure estimation du débit à partir d'une série de mesures de débits différents, ni sur la manière d'obtenir le rapport le plus précis possible du débit considéré comme étant une variable à une autre variable (telle que, par exemple, la puissance absorbée par une pompe). Il est toutefois envisagé de réduire l'erreur limite sur la mesure de débit en répétant le mesurage et en prenant comme résultat la valeur moyenne.

2 PRINCIPES GÉNÉRAUX

Étant donné la nature même des mesures d'un phénomène physique, il est impossible d'effectuer le mesurage d'une grandeur physique sans erreurs. L'utilité du mesurage est toutefois grandement améliorée si le résultat peut être accompagné d'une indication de l'erreur possible commise. Il est cependant assez rare de pouvoir donner une limite supérieure absolue à la valeur de l'erreur. Il est donc plus pratique d'indiquer un certain intervalle dans lequel doit se trouver, avec une probabilité suffisamment élevée, la valeur vraie de la grandeur mesurée. Cet intervalle est appelé « erreur limite » sur la mesure, et le niveau de confiance qui lui est associé indique la probabilité que la valeur vraie de la grandeur mesurée se trouve effectivement dans l'intervalle considéré. Il n'est toutefois possible de calculer les limites théoriques de confiance qu'une fois connue la loi de répartition des valeurs mesurées autour de la valeur vraie.

Bien qu'il ne soit pas possible de fixer des limites de confiance à toute évaluation de l'erreur systématique (sauf dans des cas spéciaux où l'erreur peut être effectivement

randomisée — voir 3.3.1), il est néanmoins nécessaire d'obtenir certaines indications sur l'intervalle dans lequel on peut raisonnablement espérer trouver une erreur systématique. Dans ces cas, on se sert de l'erreur moyenne estimée (voir 3.3.1).

Il convient de noter une différence fondamentale entre l'erreur et l'erreur limite, à savoir que la première est par définition inconnue, alors que la seconde peut être évaluée.

2.1 Terminologie

La terminologie utilisée tout au long de la présente Norme internationale est celle qui est spécifiée dans l'ISO 3534, *Statistique — Vocabulaire et symboles*. Les définitions les plus importantes sont toutefois reprises dans le glossaire (0.2).

2.2 Rapports entre l'erreur limite et le niveau de confiance

L'erreur limite et la confiance avec laquelle elle peut être utilisée sont étroitement liées l'une à l'autre : plus l'erreur limite grandit, plus élevée est la confiance de renfermer la valeur vraie dans l'intervalle ainsi défini. Cela est valable même lorsqu'il n'est pas possible d'évaluer le niveau de confiance, par exemple lorsque l'erreur est de nature systématique. Lorsqu'on connaît la forme de la loi de probabilité, il est souvent possible, à partir d'une erreur limite donnée et de la probabilité qui lui est associée, de calculer une valeur nouvelle de l'erreur limite sur la mesure pour une probabilité différente. Il est cependant nécessaire d'atteindre à un compromis entre un extrême (choisir un intervalle d'erreur limite très étroit et un bas niveau de confiance) et un autre extrême (choisir un intervalle d'erreur limite plus large et un niveau de confiance élevé). Le niveau de confiance constitue néanmoins une part essentielle de l'évaluation de l'erreur limite et doit être mentionné, même si son indication révèle une nature très approximative.

Le choix du niveau de confiance à utiliser est dicté par les besoins de ceux qui auront à utiliser les résultats du mesurage, compte tenu de la nature des données disponibles. Pour la mesure de débit, choisir une probabilité de 95 % comme niveau de confiance à associer à l'erreur limite indiquée, s'avère un compromis convenable au vu des considérations précédentes. Ce sera la solution choisie dans la présente Norme internationale lorsqu'il sera possible de fixer un niveau de confiance.

3 NATURE DE L'ERREUR

Il y a quatre types d'erreurs à considérer :

- a) les mesures aberrantes;
- b) les erreurs fortuites;
- c) les erreurs systématiques constantes;
- d) les erreurs systématiques variables.

3.1 Mesures aberrantes

Ce sont les erreurs humaines ou les erreurs dues à un mauvais fonctionnement des instruments et qui dénaturent une mesure, par exemple mauvaise transcription d'un résultat, ou présence de poches d'air dans la conduite reliant une tuyauterie d'eau à un manomètre. Ces erreurs ne peuvent pas être prises en compte dans une analyse statistique, et la mesure correspondante doit être annulée. Lorsque l'erreur n'est pas suffisamment grande pour dénaturer visiblement le résultat, on peut, suivant certains critères à considérer, décider d'admettre ou de rejeter les données correspondantes.

Si l'on soupçonne donc qu'un ou plusieurs résultats ont été affectés par une erreur de cette nature, on peut appliquer le test statistique dit «des valeurs aberrantes». Lorsqu'une seule valeur est suspecte ou si plus d'un point peut être considéré comme aberrant, on utilisera le test général décrit dans l'annexe A. On notera cependant que ce test n'est autorisé en toute rigueur que si la population a une distribution normale. Il est nécessaire de recalculer l'écart-type de la distribution des résultats après avoir procédé au test des valeurs aberrantes si l'on a éliminé certains résultats. Il faut également souligner qu'on ne peut utiliser le test des valeurs aberrantes que s'il existe des raisons valables de croire qu'on se trouve en présence de points aberrants : il ne faut pas rejeter à la légère les résultats.

3.2 Erreurs fortuites

On appelle quelquefois les erreurs fortuites «erreurs de fidélité» ou «erreurs expérimentales». Elles sont dues à des effets nombreux, infimes et indépendants, qui empêchent un système de mesurage de donner deux fois la même valeur de sortie pour une même valeur d'entrée de la grandeur mesurée. Les résultats s'écartent de la moyenne selon les lois du hasard, de sorte que plus le nombre de données augmente et plus la distribution des résultats approche d'une loi normale.

Si l'échantillon est petit, il est nécessaire de corriger les résultats statistiques fondés sur une loi normale à l'aide des valeurs correspondantes du coefficient *t* de Student comme cela est précisé dans l'annexe B. Le coefficient *t* de Student est un coefficient qui compense le fait que, pour un niveau de confiance donné, l'erreur limite sur l'écart-type augmente si l'échantillon est de petite taille. Une erreur systématique variable peut également provoquer une distribution biaisée des mesures autour de la moyenne, et il faut donc en tenir compte comme cela est précisé en 3.3.

3.2.1 Calcul de l'erreur limite associée aux erreurs fortuites

Il est possible de calculer statistiquement l'erreur limite sur une mesure d'une variable lorsque l'erreur qui lui est

associée est de nature purement fortuite. À cet effet, il est nécessaire de calculer l'écart-type et de décider du niveau de confiance à associer à l'erreur limite. Pour la présente Norme internationale, on utilisera le niveau de confiance de 95 %.

3.2.1.1 ÉCART-TYPE

Si l'erreur de mesure de la grandeur Y_i est purement fortuite, lorsqu'on procède à n mesurages de cette grandeur, l'écart-type¹⁾ de la distribution des résultats, s_{Y_i} , est donné par l'équation

$$s_{Y_i} = \left[\frac{\sum_{r=1}^n [(Y_i)_r - \bar{Y}_i]^2}{n-1} \right]^{1/2} \dots (1)$$

où

\bar{Y}_i est la moyenne arithmétique des n mesures de la variable Y_i ;

$(Y_i)_r$ est la valeur obtenue lors du $r^{\text{ème}}$ mesurage de la variable Y_i ;

n est le nombre total des mesures de la variable Y_i .

En bref, s_{Y_i} est normalement appelé «écart-type de Y_i ».

On peut réduire l'erreur fortuite sur le résultat en faisant le plus possible de mesures de la variable et en prenant la moyenne arithmétique de ces mesures, puisque l'écart-type de la moyenne de n mesures est \sqrt{n} fois plus petit que l'écart-type des mesures elles-mêmes.

Par conséquent, l'écart-type de la moyenne, $s_{\bar{Y}}$, est donné par l'équation

$$s_{\bar{Y}} = \frac{s_{Y_i}}{\sqrt{n}} \dots (2)$$

3.2.1.2 NIVEAUX DE CONFIANCE

Si l'on connaît l'écart-type vrai σ_{Y_i} (quand n tend vers l'infini, s_{Y_i} tend vers σ_{Y_i}), on peut rapporter le niveau de confiance à l'erreur limite sur la mesure, comme l'indique le tableau 1.

TABLEAU 1 — Niveaux de confiance

Erreur limite	Niveau de confiance
$\pm 0,674 \sigma_{Y_i}$	0,50
$\pm 0,954 \sigma_{Y_i}$	0,66
$\pm 1,960 \sigma_{Y_i}$	0,95
$\pm 2,576 \sigma_{Y_i}$	0,99

1) L'écart-type défini ici est appelé avec plus de précision «estimation de l'écart-type» par les statisticiens.

Par exemple, l'étendue $\pm 1,96 \sigma_{Y_j}$ est présumée renfermer 95 % de la population. C'est-à-dire que, pour une seule mesure de la variable Y_j et une valeur de σ_{Y_j} connue indépendamment, il y aura une probabilité de 0,05 que l'intervalle $(Y_j)_r \pm 1,96 \sigma_{Y_j}$ ne renferme pas la valeur vraie.

En pratique donc, il n'est possible d'obtenir qu'une estimation de l'écart-type car il faudrait un nombre infini de mesures pour déterminer celui-ci avec précision, et l'on doit fonder les limites de confiance sur cette estimation. La «loi de t » doit donc être utilisée pour les petits échantillons (voir annexe B) pour associer le niveau de confiance requis à l'étendue.

3.3 Erreurs systématiques

Les erreurs systématiques sont celles qui ne peuvent pas être réduites en augmentant le nombre des mesures si l'on garde les mêmes matériels et les mêmes conditions de mesurage. Ces erreurs se divisent en deux grands groupes, à savoir : les erreurs systématiques constantes et les erreurs systématiques variables.

a) Erreurs systématiques constantes

Elles sont communes à toutes les mesures faites dans les mêmes conditions et demeurent constantes dans le temps; selon la nature de l'erreur, elles peuvent cependant varier avec la valeur obtenue pour la mesure. L'inexactitude de l'étalonnage d'un instrument peut ainsi, par exemple, donner une erreur qui varie le long de la gamme de mesure de l'instrument en question.

Au contraire, un mauvais réglage du zéro de l'instrument donne une erreur systématique constante, indépendante de la valeur mesurée.

NOTE — Si l'on devait procéder à une série de mesurages de débit (pour obtenir, par exemple, la courbe de rendement d'une turbine), ce premier type d'erreur varierait en fait avec le débit tout en restant une erreur systématique constante puisque, pour un même débit, la valeur de l'erreur serait toujours la même. Il faut cependant noter encore une fois que la présente Norme internationale ne traite que de la mesure d'un débit unique.

b) Erreurs systématiques variables

Elles peuvent provenir d'une surveillance insuffisante de l'essai ou de l'expérimentation, par exemple négligence des variations de température avec un manomètre étalonné pour une température donnée, ou usure progressive des paliers d'un instrument.

NOTE — Ces erreurs provoquent généralement un biais de la répartition des résultats. En pratique, aucune série finie de mesures ne peut donner une répartition parfaitement symétrique, même s'il n'y a pas d'erreur systématique variable, par suite de l'erreur d'échantillonnage. La façon de déterminer si le biais ainsi provoqué vient s'ajouter à celui que donne l'erreur d'échantillonnage sort du cadre de la présente Norme internationale; il est toutefois à noter qu'il existe des tests statistiques permettant de décider si le biais est de l'ordre présumé, attendu la taille de l'échantillon ou s'il existe une

erreur systématique variable. Dans ce dernier cas, il convient soit d'éliminer la source de l'erreur systématique variable (en renforçant la surveillance des conditions expérimentales), soit de tenir compte de cette erreur possible dans l'analyse des résultats.

Un second type d'erreur systématique variable est observé lors de mesures numériques. On mesure ici une série d'objets ou d'événements discrets, une certaine imprécision demeurant quant aux points de départ et de fin de cette série. L'erreur limite due à la nature numérique de la mesure dépend en fait de l'ordre de grandeur du dernier chiffre. Si l'on utilise, par exemple, un compteur à quatre chiffres pour compter le nombre de périodes d'une onde de forme périodique dont chaque période est enregistrée séparément, avec déclenchement de l'appareil à la fin de chaque période, l'erreur limite sur la mesure de 5 000 périodes sera de $\pm 0,5$ période et la valeur mesurée donnera 5 000,5 cycles. Si, par contre, le compteur est réglé pour enregistrer les périodes par dizaines, l'erreur limite pour une même mesure sera de ± 5 périodes et la valeur mesurée donnera 5 005 périodes.

3.3.1 Estimation de l'erreur limite associée aux erreurs systématiques

Il n'est pas possible d'estimer l'erreur limite associée aux erreurs systématiques de façon expérimentale sans changer le matériel ou les conditions de mesurage. C'est la solution envisagée dans la mesure du possible car la seule alternative est de porter un jugement subjectif en fonction de l'expérience acquise et du matériel employé. Lorsque la classe de précision ou les limites d'erreur d'un appareil de mesurage sont spécifiées, on peut utiliser cet intervalle comme erreur limite systématique de l'appareil avec un niveau de confiance supérieur à 95 %.

Il est important de distinguer entre l'«estimation» d'une erreur limite systématique obtenue selon la méthode précédente (qui tient plus de la devinette que de l'évaluation scientifique) et l'estimation d'une erreur limite fortuite (qui s'obtient par analyse de données objectives à un niveau de confiance spécifié). Il y a une tendance généralisée à sous-estimer les erreurs limites systématiques lorsque des facteurs subjectifs entrent en jeu, d'une part à cause de l'optimisme humain et, d'autre part, du fait de la possibilité d'oublier certaines sources d'erreur systématique. Il est donc nécessaire d'apporter le plus grand soin à l'estimation de l'erreur limite associée aux erreurs systématiques.

Il est quelquefois possible de rendre partiellement fortuites les erreurs systématiques en recommençant plusieurs fois un mesurage avec différents types d'appareils ou dans des conditions différentes influant sur l'erreur (voir figure 2). Il n'est possible de rendre complètement fortuites les erreurs systématiques qu'en répétant les mesurages avec des appareils dont le principe est différent. Cette méthode est à recommander chaque fois qu'elle est possible puisque

1) Les limites d'erreur d'un appareil de mesurage peuvent être mesurées directement ou déterminées à partir des données garanties par le constructeur. Si les limites, positive et négative, ne sont pas égales, la valeur moyenne déterminée par les mesures à l'aide de cet instrument peut être corrigée selon 3.3.1b).

non seulement elle donne une confiance plus élevée dans la valeur de l'erreur limite, mais aussi elle abaisse l'erreur limite elle-même. En pratique toutefois, il est rarement possible de pratiquer ce type de randomisation. C'est la raison pour laquelle (voir figure 2) la procédure à suivre pour évaluer des erreurs limites associées à des erreurs systématiques demande des moyens à la fois expérimentaux et subjectifs.

Si le débit dépend de nombreuses variables indépendantes dont les valeurs doivent être mesurées ou extraites de courbes, de tables ou d'équations, les erreurs limites systématiques associées à ces variables peuvent se traiter comme des erreurs limites systématiques randomisées.

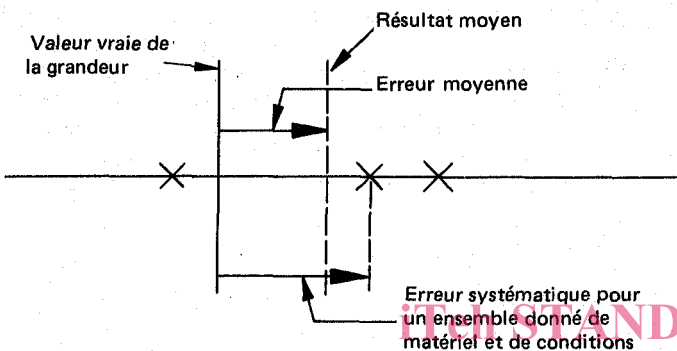


FIGURE 2

Les croix indiquent la randomisation des erreurs systématiques pour la détermination d'une grandeur donnée avec différents types de matériels ou de conditions d'essai.

La procédure à suivre pour arriver à l'erreur limite associée à l'erreur systématique dépend des données disponibles sur l'erreur elle-même, mais est la même que l'erreur systématique considérée, soit : constante ou variable.

a) Si l'erreur a une valeur unique connue, on l'ajoute au résultat du mesurage (ou on l'en retranche) et l'on considère que l'erreur limite de mesure due à cette source est nulle.

b) Si l'on connaît le signe de l'erreur, mais que sa valeur doit être estimée subjectivement, on ajoute l'erreur moyenne estimée au résultat du mesurage (en faisant bien attention au signe) et l'on considère que l'erreur limite de mesure est égale à la moitié de l'étendue dans laquelle l'erreur est censée se trouver. Cette procédure est illustrée par la figure 3 où la valeur mesurée est appelée M et l'erreur systématique est censée se trouver entre δt_1 et δt_2 [ce qui donne une erreur moyenne estimée de $(\delta t_1 + \delta t_2)/2$].

Le résultat, R , à utiliser est donné par l'équation

$$R = M + \frac{\delta t_1 + \delta t_2}{2} \quad \dots (3)$$

avec une erreur limite de

$$\pm \frac{\delta t_1 - \delta t_2}{2}$$

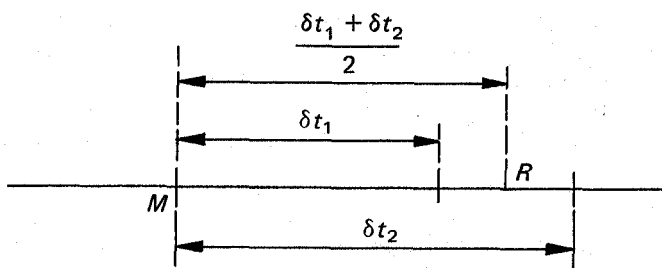


Illustration de la correction tenant compte de l'erreur moyenne estimée

Prendre l'erreur moyenne estimée égale à la moyenne des valeurs, minimale et maximale, estimées revient implicitement à considérer l'erreur systématique comme asymétrique.

FIGURE 3

c) Lorsqu'on peut évaluer expérimentalement la grandeur de l'erreur limite associée à l'erreur systématique, cette erreur limite peut être calculée de la manière décrite en 3.2 pour les erreurs fortuites, la valeur mesurée étant corrigée de la manière décrite précédemment. Ce genre de situation se rencontre, par exemple, lorsqu'on utilise un thermomètre qui n'a pas été étalonné individuellement, mais lorsque des essais préalables ont porté sur des lots de thermomètres identiques de façon à obtenir une moyenne et un écart-type de l'erreur associée à ces thermomètres.

d) Lorsqu'on ne connaît pas le signe de l'erreur et que sa valeur est estimée de façon subjective, l'erreur moyenne estimée est égale à zéro, et l'erreur limite doit à nouveau être considérée comme la moitié de l'étendue estimée de l'erreur. Cette méthode est illustrée par la figure 4 où la notation est la même que dans la figure 3. Dans ce cas, $\delta t_1 = \delta t_2$, et l'erreur limite est donc $\pm \delta t$.

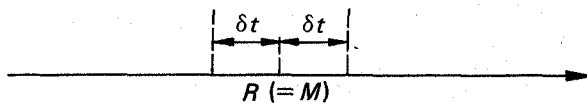


FIGURE 4

4 PROPAGATION DES ERREURS

Bien qu'il soit possible d'associer des valeurs aux erreurs limites sur les diverses mesures, l'erreur qui demeure d'un intérêt fondamental est l'erreur limite sur la valeur finale du débit obtenu. Il est donc essentiel d'adopter une méthode uniforme de combinaison des diverses erreurs limites associées à chaque variable entrant dans le calcul du débit. Dans le cas des chenaux, ces variables sont, par exemple, le niveau de l'eau et la profondeur des sections transversales; dans les conduites fermées, ce sont, par exemple, le diamètre de tuyauterie, la pression et le coefficient de dilatation.

Les mesures aberrantes ne posent pas de problème puisqu'on élimine toute mesure paraissant aberrante après les tests statistiques spécifiés dans l'annexe A (dans la mesure où un doute valable pèse sur le résultat du mesurage). Les techniques de combinaison des erreurs

fortuites sont bien au point, mais, si l'on veut employer les formules statistiques les plus simples, il faut que les différentes variables soient indépendantes. Chaque variable doit donc être examinée pour vérifier qu'il en est bien ainsi. Dans le cas contraire, les variables interdépendantes doivent être décomposées en variables de plus en plus fondamentales et ce, jusqu'à ce qu'on atteigne une indépendance vraie.

Dans certains cas toutefois, il est impossible d'aboutir à cette indépendance et, dans d'autres, il existe des variables interdépendantes par nature et qui ne peuvent pas être décomposées en variables fondamentales. Il faut alors avoir recours à des formules plus compliquées, qui sont décrites en détail en 4.3.

Il est reconnu que les avis divergent en ce qui concerne les méthodes de combinaison des erreurs limites associées aux erreurs systématiques, mais, pour aboutir à une normalisation convenable, seule la méthode spécifiée en 4.3 est à utiliser dans les normes de mesure de débit.

4.1 Sensibilité

Avant d'étudier les méthodes de combinaison des erreurs, il est primordial de prendre conscience qu'il est insuffisant de ne considérer que les grandeurs des composantes de l'erreur limite dans les mesures subsidiaires; il faut également considérer l'effet de chaque mesure sur le résultat final. Il y a donc lieu de définir la notion de sensibilité d'un résultat à une grandeur subsidiaire comme le pourcentage d'erreur du résultat dû à une erreur de 1 % sur la mesure de grandeur composante. Le «coefficient de sensibilité» de chaque grandeur subsidiaire s'obtient facilement de deux manières.

a) Selon une méthode analytique

Lorsqu'il existe une relation mathématique connue entre le résultat, R , et les grandeurs subsidiaires, Y_1, Y_2, \dots, Y_k , le coefficient dimensionnel de sensibilité, θ_i , d'une grandeur, Y_i , s'obtient par différenciation partielle.

Ainsi, si $R = f(Y_1, Y_2, \dots, Y_k)$, θ_i est donné par l'équation

$$\theta_i = \frac{\partial R}{\partial Y_i} \quad \dots (4)$$

b) Selon une méthode numérique

Lorsqu'il n'existe pas de relation mathématique ou que la différenciation est difficile, on peut utiliser des incréments finis pour évaluer θ_i .

Ainsi θ_i est donné par l'équation

$$\theta_i = \frac{\Delta R}{\Delta Y_i} \quad \dots (5)$$

Le résultat est calculé à partir de Y_i pour obtenir R , puis recalculé à partir de $(Y_i + \Delta Y_i)$ pour obtenir $(R + \Delta R)$. La valeur de ΔY_i utilisée doit être aussi petite que possible.

Le coefficient de sensibilité peut être rendu adimensionnel si l'on écrit

$$\theta_i^* = \theta_i \frac{Y_i}{R} \quad \dots (6)$$

Sous cette forme, la sensibilité s'exprime en «pourcentage pour cent». θ_i^* est donc le pourcentage de variation de R provoqué par une variation de 1 % de Y_i . C'est la forme à utiliser si les erreurs limites à corriger sont exprimées en pourcentages de leurs variables associées et non en valeurs absolues.

4.2 Identification des sources d'erreur

Avant de combiner toutes les erreurs limites, il convient de suivre la procédure suivante :

- identifier toutes les sources d'erreur indépendantes et en établir une liste;
- pour chaque source, déterminer la nature de l'erreur;
- estimer l'étendue possible des valeurs que chaque erreur systématique est raisonnablement présumée pouvoir prendre, en se servant le plus possible des données expérimentales;
- estimer l'erreur limite à associer à chaque erreur systématique de la manière indiquée en 3.3.1;
- calculer, de préférence d'après les données expérimentales, l'écart-type de la répartition de chaque erreur fortuite;
- procéder à un test des valeurs aberrantes, si l'on a des raisons de croire qu'il peut y avoir des mesures aberrantes (voir 3.1);
- recalculer les écarts-types si nécessaire, si les tests des valeurs aberrantes ont conduit à supprimer certains résultats;
- calculer l'erreur limite associée à chaque erreur fortuite pour un niveau de confiance de 95 %;
- calculer le coefficient de sensibilité pour chaque erreur limite;
- établir la liste, par ordre décroissant, des produits du coefficient de sensibilité par l'erreur limite pour chaque source d'erreur.

NOTE — Ce classement par ordre décroissant répond à deux objectifs. Le premier est de concentrer l'attention sur l'importance relative des différentes sources d'erreur, de manière à essayer de réduire l'erreur limite sur les variables les plus importantes. Le deuxième est d'éliminer les variables qui n'ont que peu ou pas d'influence sur la valeur de l'erreur limite sur la mesure de débit, comparativement aux sources d'erreur principales, et ainsi de simplifier les calculs.

4.3 Combinaison des erreurs limites

Du fait qu'on doive combiner de nombreuses erreurs limites, il est possible d'en négliger une si elle est très petite

devant la plus grande. D'une façon générale, une erreur limite plus petite que le cinquième de la plus grande dans un groupe peut être négligée.

4.3.1 Combinaison des erreurs limites fortuites

Afin d'éviter toute confusion possible, les erreurs limites associées aux erreurs fortuites, utilisées pour le calcul de l'erreur limite sur la mesure de débit, doivent toutes correspondre à un niveau de confiance de 95 %. Les erreurs limites associées aux erreurs systématiques doivent, elles, être estimées de la manière indiquée en 3.3.1.

Les grandeurs des diverses expressions, à partir desquelles on peut calculer le débit, n'étant pas normalement indépendantes, chaque variable doit être étudiée séparément pour déterminer de quelles variables indépendantes elle dépend. Il est souvent peu pratique ou même impossible de procéder ainsi et, dans ce cas, il faut que la formule de calcul de l'erreur limite globale comporte des termes tenant compte de l'interdépendance des variables.

Si l'on appelle e_j l'erreur limite sur une variable Y_j , on peut introduire la notion d'interdépendance des erreurs limites $e_{i,j}$, de manière à fabriquer ces termes supplémentaires. La grandeur $e_{i,j}$ tient alors compte de l'interdépendance des variables Y_i et Y_j .

Pour calculer l'erreur limite, e_A , sur un résultat, il faut donc combiner toutes les erreurs limites grâce à l'équation

$$e_A^2 = \sum_{i=1}^k (\theta_i e_i)^2 + 2 \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \theta_i \theta_j e_{i,j} \dots (7)$$

où

$$e_{i,j} = \frac{4}{n-1} \sum_{r=1}^n [(Y_{i,r} - \bar{Y}_i) [(Y_{j,r} - \bar{Y}_j)] \dots (8)$$

NOTE — L'équation (8) n'est valable que si les distributions de toutes les sources d'erreurs limites, e_j , sont supposées proches d'une loi normale et si les e_j sont à un niveau de confiance de 95 %. De plus, on suppose que les limites de confiance sont à plus ou moins deux fois l'écart-type, mais cela introduira une erreur, négligeable, dans le calcul de l'erreur limite globale.

La validité de l'équation (8) n'est remise en cause que si un nombre appréciable de sources d'erreur ont une distribution bimodale. Dans ce cas, on se référera à l'annexe D. Les θ_j sont donnés par les équations (4) à (6) et n est le nombre de mesures indépendantes de la variable Y_j .

Trois cas spéciaux valent d'être mentionnés.

a) Il est recommandé, dans la mesure du possible, de n'utiliser que des variables indépendantes; dans ce cas, l'équation (7) se réduit à

$$e_A^2 = \sum_{i=1}^k (\theta_i e_i)^2 \dots (9)$$

b) Lorsque le résultat, R , est donné par une simple somme, c'est-à-dire :

$$R = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_k$$

toutes les valeurs de θ_j sont égales à 1, l'équation (7) devient

$$e_A^2 = \sum_{i=1}^k e_i^2 + 2 \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k e_{i,j} \dots (10)$$

c) Lorsque le résultat, R , n'est fonction que de facteurs, le coefficient adimensionnel de sensibilité de chaque facteur est l'exposant de ce facteur. Par conséquent, pour la relation

$$R = K Y_1^a Y_2^b / Y_3^c$$

où Y_1 , Y_2 et Y_3 sont indépendants les uns des autres, on a

$$\theta_1^* = a; \theta_2^* = b; \theta_3^* = -c$$

et

$$E_A = [(a E_1)^2 + (b E_2)^2 + (c E_3)^2]^{1/2} \dots (11)$$

4.3.2 Combinaison des erreurs limites systématiques

Pour combiner les erreurs systématiques exposées en 3.3.1, on procédera comme en 4.3.1. Dans le cas particulier où l'on se trouve en présence d'un grand nombre d'erreurs limites systématiques (voir 3.3.1), ces dernières seront considérées comme des erreurs limites systématiques randomisées. Le niveau de confiance résultant pour l'erreur limite globale est d'au moins 95 %, en supposant que les erreurs limites systématiques randomisées sont celles qui sont associées aux variables indépendantes mesurées ou extraites de courbes, tables ou équations pour les besoins du calcul du débit. Généralement, le niveau de confiance résultant de l'erreur limite globale est supérieur au plus mauvais niveau de confiance de tous les niveaux de confiance associés aux erreurs limites des composantes.

5 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

En dépit du fait qu'il est préférable d'indiquer séparément les erreurs limites dues aux erreurs fortuites et aux erreurs systématiques, il faut bien reconnaître qu'il y a de nombreuses raisons pratiques pour présenter une seule valeur pour l'établissement du résultat d'un mesurage, aussi est-il permis de les combiner selon la méthode de la somme quadratique, en ayant au préalable calculé séparément les erreurs limites globales systématiques et fortuites. En combinant quadratiquement les erreurs limites fortuites et les erreurs limites systématiques randomisées, l'erreur limite globale résultante aura un niveau de confiance de 95 %. En fait, il ne sera pas possible normalement de relier les niveaux de confiance à l'erreur limite globale de cette façon et l'on donnera la limite de confiance de la composante fortuite.