NORME INTERNATIONALE

ISO 7066-1

Première édition
1989-10-01

Évaluation de l'incertitude dans l'étalonnage et l'utilisation des appareils de mesure du débit —

Partie 1 :
Relations d'étalonnage linéaires

Assessment of uncertainty in the calibration and use of flow measurement devices —

Part 1 : Linear calibration relationships

Numéro de référence
ISO 7066-1 : 1989 (F)

Sommaire

Organisation internationale de normalisation
Case postale 56 • CH-1211 Genève 20 • Suisse

Imprimé en Suisse

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 en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (CEI) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

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. Les Normes internationales sont approuvées conformément aux procédures de l'ISO qui requièrent l'approbation de 75 % au moins des comités membres votants.

La Norme internationale ISO 7066-1 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 30, *Mesure de débit des fluides dans les conduites fermées.*

L'ISO 7066 comprend les parties suivantes, présentées sous le titre général *Évaluation de l'incertitude dans l'étalonnage et l'utilisation des appareils de mesure du débit*:

— *Partie 1 : Relations d'étalonnage linéaires*

— *Partie 2 : Relations d'étalonnage non linéaires*

Les annexes A, B et C font partie intégrante de la présente partie de l'ISO 7066. Les annexes D, E, F et G sont données uniquement à titre d'information.

Introduction

La présente Norme internationale a été élaborée selon les principes décrits dans l'ISO 5168 et donne la manière de calculer l'incertitude associée à une courbe d'étalonnage ou à la moyenne de plusieurs mesurages d'un même débit. Pour ce faire, il est supposé que l'incertitude de chaque mesurage individuel de débit est calculée selon l'ISO 5168.

Cette partie de l'ISO 7066 ne prend en compte que les courbes d'étalonnage linéaires ou pouvant être linéarisées. L'ISO 7066-2 traite du cas de courbes d'étalonnage non linéaires.

Évaluation de l'incertitude dans l'étalonnage et l'utilisation des appareils de mesure du débit —

Partie 1 : Relations d'étalonnage linéaires

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale traite des méthodes de calcul de l'incertitude associée à l'étalonnage de n'importe quelle méthode de mesure de débit, que ce soit en conduites fermées, ou en canaux découverts. Elle traite aussi de l'estimation de l'incertitude sur une ou plusieurs mesures à partir de la courbe d'étalonnage résultante.

Seules les relations linéaires sont prises en considération dans la présente partie de l'ISO 7066; l'incertitude associée à des relations non linéaires fait l'objet de l'ISO 7066-2.

La présente partie de l'ISO 7066 ne s'applique donc que si

a) les variables peuvent être transformées (par exemple par les logarithmes) de façon à créer entre elles une relation linéaire;

b) le domaine dans lequel la relation a été établie peut être subdivisé de telle manière qu'une relation linéaire soit obtenue dans chaque subdivision; ou

c) les écarts systématiques de linéarité de la courbe d'étalonnage sont négligeables par rapport à l'incertitude associée à la détermination des points isolés constituant la courbe[1].

Bien que, par hypothèse, l'incertitude sur les variables indépendantes et les variables liées, pour lesquelles la courbe d'étalonnage est établie, soit normalement fixée avant que ne soit définie la courbe d'étalonnage, des indications sont données en 5.3 sur la manière dont ces incertitudes peuvent parfois être déterminées en cours de procédure d'étalonnage lorsqu'on ne connait pas l'incertitude sur un point d'étalonnage isolé.

Pour la plupart des calculs indiqués dans la présente partie de l'ISO 7066, il existe des programmes d'ordinateurs généralement dénommés «méthodes de régression linéaire» ou «ajustement par une droite» dans les bibliothèques de programmes.

Des exemples d'application de la présente partie de l'ISO 7066 sont donnés en annexes A et B.

2 Références normatives

Les normes suivantes contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui en est faite, constituent des dispositions valables pour la présente partie de l'ISO 7066. Au moment de la publication de cette partie de l'ISO 7066, les éditions indiquées étaient en vigueur. Toute norme est sujette à révision et les parties prenantes des accords fondés sur cette partie de l'ISO 7066 sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des normes indiquées ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des normes internationales en vigueur à un moment donné.

ISO 1100-2 : 1982, *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts — Détermination de la relation hauteur-débit.*

ISO 5168 : 1978, *Mesure de débit des fluides — Calcul de l'erreur limite sur une mesure de débit.*

3 Symboles et définitions

Les symboles et définitions utilisés dans la présente partie de l'ISO 7066 sont donnés dans l'ISO 772 et l'ISO 4006.

Les définitions données en 3.3 concernent les termes utilisés dans un sens précis ou les termes dont il paraît utile de donner une explication plus approfondie.

3.1 Symboles

a ordonnée de l'origine de la courbe d'étalonnage

b pente de la courbe d'étalonnage

C coefficient de décharge

d diamètre de l'orifice pour les diaphragmes

D diamètre de la conduite

1) Par exemple, la courbe d'étalonnage d'un compteur à turbine peut présenter une valeur minimale après la «bosse» avant de se mettre à croître asymptotiquement vers l'horizontale. Le domaine d'étalonnage linéaire est toutefois souvent considéré par hypothèse, comme s'étendant jusqu'au débit où l'extrapolation de la partie horizontale de la courbe coupe la partie montante, croissant vers le maximum.

$e(\ )$ incertitude sur la variable entre parenthèses[1)]

$e_r(\ )$ incertitude aléatoire sur la variable entre parenthèses[1)]

$e_s(\ )$ incertitude systématique sur la variable entre parenthèses[1)]

K coefficient d'étalonnage

M nombre de mesures d'un même débit

n nombre de points de mesure utilisés pour établir la courbe d'étalonnage

N_p nombre d'impulsions par seconde d'un compteur à turbine

Q débit

Re_d nombre de Reynolds rapporté au diamètre de l'orifice

$s(\ )$ écart-type expérimental de la variable entre parenthèses

s_R écart-type des points par rapport à la droite d'ajustement [voir équation (17)]

$s(x, y)$ covariance de x et y [voir équation (10)]

t coefficient de Student

x variable indépendante

y variable liée

$\hat{y}$ valeur de la variable liée, donnée par la courbe d'étalonnage

ν nombre de degrés de liberté

3.2 Indices et exposants

i *i*ème valeur d'une variable

k une valeur spécifiée d'une variable

$-$ valeur moyenne d'une variable

^ $\frac{17}{32}$. valeur de la variable donnée par l'équation de la courbe d'ajustement

3.3 Définitions

3.3.1 erreur (absolue) de mesurage: Résultat d'un mesurage moins la valeur vraie (conventionnelle) du mesurande.

NOTES

1 Le terme peut également qualifier :

- une indication,
- un résultat brut,
- un résultat corrigé.

2 Les parties connues de l'erreur de mesurage peuvent être compensées par des corrections appropriées. L'erreur sur le résultat corrigé ne peut être caractérisée que par une incertitude.

3 Ne pas confondre «*erreur absolue*», qui est une grandeur algébrique avec la valeur absolue d'une erreur qui est le module d'une erreur.

3.3.2 erreur aléatoire: Composante de l'erreur de mesurage qui varie de façon imprévisible lors de plusieurs mesurages du même mesurande.

NOTE — Il n'est pas possible de corriger une erreur aléatoire.

3.3.3 erreur systématique: Composante de l'erreur de mesurage qui reste constante ou varie de façon prévisible lors de plusieurs mesurages du même mesurande.

NOTE — Les erreurs systématiques et leurs causes peuvent être connues ou inconnues.

3.3.4 erreurs aberrantes: Erreurs qui dénaturent totalement un mesurage. Ces erreurs ont généralement une cause unique telle que transcription incorrecte d'un ou de plusieurs chiffres significatifs ou mauvais fonctionnement des instruments.

3.3.5 incertitude: Estimation caractérisant l'étendue des valeurs, dans laquelle se situe la valeur vraie d'un mesurande.

3.3.6 incertitude aléatoire: Composante de l'incertitude associée à une erreur aléatoire. Son effet sur la moyenne peut être réduit par la réalisation d'un grand nombre de mesurages.

3.3.7 incertitude systématique: Composante de l'incertitude associée à une erreur systématique. Son effet n'est pas réductible par la réalisation d'un grand nombre de mesurages.

3.3.8 écart-type expérimental: Pour une série de n mesurages du même mesurande, paramètre s caractérisant la dispersion des résultats, donné par la formule:

$$s = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}\right]^{1/2}$$

où

x_i est le résultat du *i*ème mesurage;

$\bar{x}$ est la moyenne arithmétique des n résultats considérés.

NOTES

1 L'écart-type expérimental ne devrait pas être confondu avec l'écart-type σ d'une population d'effectif N et de moyenne m, donné par la formule :

$$\sigma = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N} (x_i - m)^2}{N}\right]^{1/2}$$

2 Si l'on considère la série de n mesurages comme échantillon d'une population, s est une estimation de l'écart-type de la population.

1) Dans certaines normes internationales, les symboles U et E ont été utilisés à la place de e.

3.3.9 variance : Carré de l'écart-type.

3.3.10 limites de confiance : Limites supérieure et inférieure dans lesquelles est censée se trouver la valeur vraie avec une probabilité spécifiée supposant une erreur systématique négligeable.

3.3.11 courbe d'étalonnage : Lieu géométrique des points obtenus par report de l'indication donnée par un débitmètre en fonction du débit.

4 Généralités

Pour qu'un étalonnage présente de l'intérêt, il faut que l'incertitude systématique de l'étalon soit très inférieure à l'incertitude systématique du dispositif ou du système que l'on étalonne. Ceci est particulièrement vrai lorsqu'on utilise les procédures spécifiées en 7.3.

L'étalonnage d'un dispositif ou d'un système de mesure de débit fournit une courbe du coefficient d'étalonnage qui sera ensuite utilisée pour prévoir le débit. La prévision du débit que l'on pourra en déduire étant nécessairement affectée d'une incertitude, il faut établir au moment de l'étalonnage non seulement la relation fonctionnelle entre le coefficient d'étalonnage et le débit, mais également l'incertitude sur le coefficient d'étalonnage.

Il existe un certain nombre de couples de valeurs (x, y) dont l'une des méthodes décrites à l'article 5 permet de connaître l'incertitude [respectivement $e(x)$ et $e(y)$[1)]]. Le choix de la procédure à appliquer pour calculer les coefficients et l'incertitude de l'équation d'étalonnage est fixé par l'importance relative des composantes aléatoires des incertitudes $e_r(x)$ et $e_r(y)$, tel qu'indiqué à l'article 7.

Lorsque $e_r(x)$ peut être négligé (comme c'est généralement le cas, par exemple, lors de l'étalonnage d'un diaphragme), l'équation d'étalonnage et l'incertitude sur le coefficient d'étalonnage sont calculées par les méthodes décrites respectivement en 7.2 et 9.3. Par contre, dans le cas où les incertitudes aléatoires sur x et y sont d'égale importance, il faut appliquer les méthodes spécifiées en 7.3 et 9.4. Lorsque les incertitudes sur x et y sont toutes les deux significatives, mais ne peuvent pas être considérées comme égales, le calcul de l'incertitude sur la courbe d'étalonnage sort du cadre de la présente partie de l'ISO 7066.

Dans le cas particulier où y est effectivement indépendant de x (ce qui est un cas courant avec les débitmètres utilisés dans les conduites fermées car il est intéressant d'avoir un coefficient d'étalonnage indépendant du débit), la méthode décrite en 9.2 peut être utilisée pour calculer l'incertitude.

En plus de l'incertitude sur le coefficient ou la courbe d'étalonnage obtenue lors de l'étalonnage d'un débitmètre ou d'une station de jaugeage, il est nécessaire de déterminer l'incertitude sur la valeur particulière utilisée comme coefficient ou lue sur la courbe d'étalonnage quand le débitmètre est utilisé après étalonnage. Lorsque la valeur du coefficient d'étalonnage à utiliser est déterminée de manière totalement indépendante des mesures de débit effectuées, et si les conditions d'utilisation sont strictement identiques aux conditions d'étalonnage, ces deux valeurs sont alors les mêmes; si toutefois, avant de pouvoir utiliser le coefficient ou la courbe d'étalonnage, il est nécessaire de disposer de certaines informations sur la valeur du débit à mesurer, une incertitude supplémentaire est introduite. L'annexe C indique comment cette incertitude supplémentaire est introduite.

Les méthodes à suivre dans ces différents cas sont décrites à l'article 9; en outre, à l'article 11 sont décrites les méthodes permettant de calculer l'incertitude sur la moyenne de plusieurs mesures.

5 Incertitudes sur des points d'étalonnage isolés

5.1 Généralités

Lorsqu'on étalonne un débitmètre, on peut tracer la courbe d'une fonction quelconque du signal de sortie par rapport à une mesure de référence du débit ou par rapport à une fonction quelconque de ce débit, telle que le nombre de Reynolds.

Dans les deux cas, il est nécessaire de déterminer l'incertitude sur les coordonnées d'un point unique de manière à pouvoir calculer l'incertitude sur la courbe d'étalonnage; pour ce faire, deux méthodes peuvent être employées :

- utilisation de l'ISO 5168, ou
- parfois obtention directe d'éléments à partir des données de l'étalonnage.

Il faut toutefois faire remarquer que l'incertitude sur une coordonnée peut varier avec la valeur de la coordonnée elle-même; ainsi, par exemple, lorsque le débit de référence est mesuré par un système de dérivation mettant en œuvre la pesée d'une certaine quantité de liquide recueillie pendant un temps mesuré, l'incertitude due au chronométrage est généralement plus faible pour des périodes de dérivation longues (et donc pour les faibles débits si l'on recueille approximativement la même masse d'eau à chaque point d'essai) que pour des périodes de dérivation courtes.

1) Les catégories habituelles des variables indépendantes et liées, et leur représentation en abscisses (horizontales) ou ordonnées (verticales) sur une courbe ne sont pas applicables dans le cas des régressions linéaires, car ce qui importe ici, c'est la distinction entre variables entachées d'incertitudes significatives et variables entachées d'incertitudes négligeables (ou nulles). Lorsqu'une variable présente une incertitude notablement plus grande que l'autre (voir article 7) la première sera appelée y et la seconde x. De ce fait, les régressions étudiées seront toujours des régressions de y en x sans qu'il soit tenu compte de l'indépendance ou non de la variable et sans qu'il soit tenu compte de quelle variable est portée en abscisse (horizontalement).

Une justification doit toujours être fournie lorsqu'on suppose que l'incertitude reste constante sur toute la gamme d'une coordonnée. Lorsque l'incertitude ne peut être considérée comme constante, celle-ci doit être estimée pour un nombre suffisant de valeurs de la coordonnée de façon à se faire une idée de la manière dont elle varie avec la valeur de la coordonnée.

5.2 Utilisation de l'ISO 5168

L'ISO 5168 décrit de manière détaillée comment on peut arriver à l'estimation de l'incertitude sur une mesure unique de débit. Les procédures qui y sont décrites peuvent être utilisées pour calculer les incertitudes des variables indépendantes aussi bien que des variables liées de la courbe d'étalonnage.

Il est important, toutefois, de calculer séparément les composantes aléatoires et systématiques de l'incertitude, sans les combiner. Les diverses formules de calcul de l'incertitude d'une courbe d'étalonnage servent en premier lieu à calculer la composante aléatoire de l'incertitude et c'est seulement cette composante de l'incertitude sur les points isolés qui est utilisée à ce stade. À la valeur ainsi obtenue on ajoute par combinaison quadratique l'incertitude systématique en chaque point, ce qui donne la valeur finale combinée. Il est cependant nécessaire dans tous les cas de calculer séparément la composante aléatoire de l'incertitude car c'est l'importance relative des incertitudes aléatoires sur x et y qui détermine la procédure de calcul à suivre.

Cette méthode de calcul de l'incertitude sur les coordonnées d'un point expérimental unique ne peut être utilisée que lorsque des recherches antérieures ont permis de déterminer les incertitudes associées aux divers mesurages élémentaires qui doivent être effectués ou bien lorsqu'il est possible d'y accéder par une autre source d'information.

5.3 Utilisation des données d'étalonnage

Lorsqu'il est possible de maintenir constantes les conditions de mesurage, on peut déterminer les composantes aléatoires des incertitudes sur les coordonnées de la courbe d'étalonnage pendant l'étalonnage, en procédant à des mesurages répétés. Ainsi, par exemple, dans l'étalonnage d'un diaphragme, il serait possible de maintenir constant le nombre de Reynolds et d'effectuer une série de lectures des données nécessaires pour les calculs du coefficient d'étalonnage, et inversement de maintenir constante la pression différentielle au travers du diaphragme pendant que l'on effectue une série de déterminations du débit de référence (et par conséquent du nombre de Reynolds).

L'incertitude (due aux erreurs aléatoires) sur le coefficient d'étalonnage ou le nombre de Reynolds peut alors être calculée d'après les écarts-types des mesurages résultants.

Il n'existe pas d'autre solution que les méthodes de l'ISO 5168 pour déterminer les incertitudes systématiques, si l'incertitude doit être évaluée conformément à la présente partie de l'ISO 7066.

6 Linéarité de la courbe d'étalonnage

6.1 Généralités

Toute hypothèse sur la forme d'une courbe d'étalonnage quelconque doit prendre en compte l'expérience acquise ou la documentation relative à la méthode de mesure de débit utilisée (éventuellement les normes publiées). Si cette forme est inhabituelle, il faut répéter un nombre suffisant de points d'étalonnage pour vérifier la forme de la courbe correspondant au débitmètre particulier utilisé.

En l'absence de telles informations, ou lorsqu'il n'existe pas à priori de raison de croire que la forme de la courbe puisse être linéaire, on dispose de techniques simples permettant de déterminer si l'on peut ou non supposer la courbe linéaire mais ces techniques ne sont utilisables que lorsque les points expérimentaux ne sont pas rassemblés en groupe. Lorsque les points expérimentaux sont rassemblés en groupe, on ne peut se servir que d'observations visuelles, car les nombreux tests statistiques qui seraient alors nécessaires sortent du cadre de la présente partie de l'ISO 7066.

Lorsque les données peuvent être rassemblées en groupes, on peut se servir du test décrit ci-après, à condition toutefois que chaque groupe se compose de mesurages effectués pour une valeur fixée de l'une des coordonnées. La figure 1 montre un cas où l'on dispose de cinq groupes, le nombre de mesurages à l'intérieur de chaque groupe variant de quatre à six.

Le test consiste à comparer la variance des moyennes des groupes autour de la droite d'ajustement à la variance intrinsèque des groupes.

La variance intrinsèque des groupes, s_g^2, est donnée par l'équation

$$s_\mathrm{g}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{q} \sum_{j=1}^{n_i} (y_{i,j} - \overline{y}_i)^2}{n - q} \qquad \ldots (1)$$

où

n est le nombre total de mesurages;

n_i est le nombre de mesurages du $i$ème groupe;

q est le nombre de groupes;

$y_{i,j}$ est le $j$ème mesurage dans le $i$ème groupe.

$$\overline{y}_\mathrm{i} = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} y_{i,j}}{n_i}$$

La variance des moyennes des groupes par rapport à la droite d'ajustement, s_m^2, est donnée par l'équation:

$$s_\mathrm{m}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{q} n_i (\hat{y}_i - \overline{y}_i)^2}{q - 2} \qquad \ldots (2)$$

où

q et n_i ont la même signification que dans l'équation (1) ;

$\hat{y}_i$ est la valeur de y calculée pour une valeur donnée de x à l'aide de l'équation de la droite d'ajustement.

Le rapport soumis au test est donc s_m^2/s_g^2. Si ce rapport est égal ou supérieur à la valeur indiquée dans le tableau 1 pour $\nu_1 = q - 2$ et $\nu_2 = n - q$ degrés de liberté, la meilleure courbe d'ajustement passant par les points expérimentaux ne peut être assimilée à une droite. Par contre, si ce rapport est inférieur à la valeur correspondante indiquée dans le tableau 1, la courbe d'ajustement peut être assimilée à une droite avec un niveau de confiance de 95 %.

Si la relation entre le coefficient d'étalonnage et la variable indépendante n'est pas linéaire, il existe deux manières de présenter les données pour pouvoir les analyser conformément à la présente partie de l'ISO 7066. La première manière qui consiste à linéariser la courbe ne peut toutefois être mise en œuvre qu'en s'appuyant sur un modèle physique.

6.2 Linéarisation de la courbe

Il est possible soit de transformer les coordonnées en deux nouvelles variables qui, lorsqu'elles sont portées sur un graphique l'une par rapport à l'autre, donnent une droite, soit, pour obtenir le même résultat, d'utiliser, au lieu de la coordonnée elle-même, une fonction de celle-ci. Il est toutefois indispensable que la transformation soit facile à utiliser pour appliquer la courbe résultante au débitmètre ou à la méthode particulière de mesure de débit.

Tableau 1 — Valeurs de la fonction de distribution F pour différents degrés de liberté — Niveau de probabilité 0,05

ν_2 \ ν_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	40	80	100
1	161,44	200	216	225	230	234	237	239	241	242	248	250	251	252	253
2	18,51	19	19,2	19,2	19,3	19,3	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,5	19,5	19,5	19,5
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,66	8,62	8,59	8,56	8,55
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6	5,96	5,8	5,75	5,72	5,67	5,66
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,56	4,5	4,46	4,41	4,41
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,1	4,06	3,87	3,81	3,77	3,72	3,71
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,44	3,38	3,34	3,29	3,27
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,5	3,44	3,39	3,35	3,15	3,08	3,04	2,99	2,97
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	2,94	2,86	2,83	2,77	2,76
10	4,96	4,1	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,77	2,7	2,66	2,6	2,59
20	4,35	3,49	3,1	2,87	2,71	2,6	2,51	2,45	2,39	2,35	2,12	2,04	1,99	1,92	1,91
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	1,93	1,84	1,79	1,71	1,7
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	1,84	1,74	1,69	1,61	1,59
80	3,96	3,11	2,72	2,49	2,33	2,21	2,13	2,06	2	1,95	1,7	1,6	1,54	1,45	1,43
100	3,94	3,09	2,7	2,46	2,31	2,19	2,1	2,03	1,97	1,93	1,68	1,57	1,52	1,41	1,39

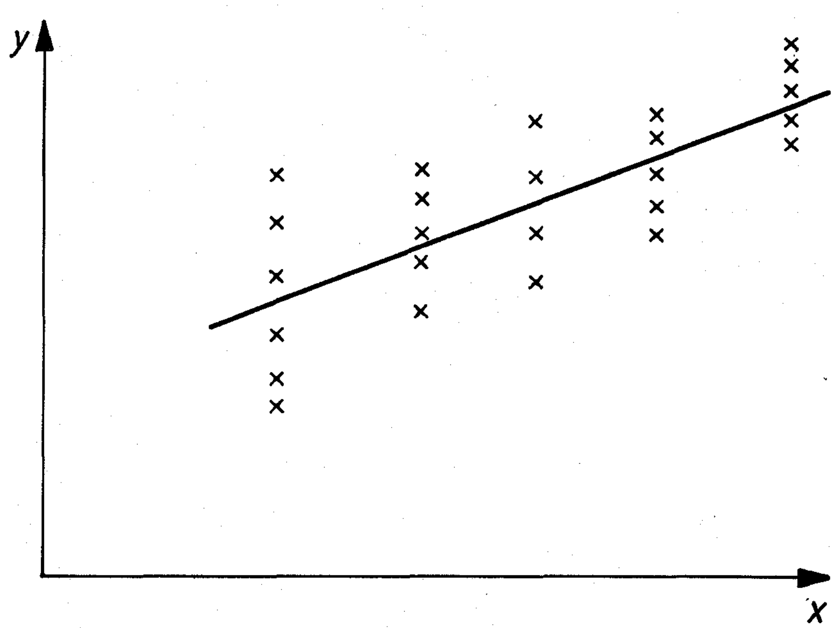


Figure 1 — Exemple de groupement des données permettant d'établir la linéarité de la droite d'ajustement

Comme exemple de la première possibilité on peut citer le tracé de «log y» en fonction de «log x» lorsque la relation de base est de la forme «$y = ax^2$» (a étant une constante).

Quant à la deuxième méthode de linéarisation d'une courbe, elle est couramment utilisée lorsqu'on étalonne un diaphragme. Dans ce cas, l'expérience montre qu'il vaut mieux tracer la courbe du coefficient de décharge, C, en fonction du nombre de Reynolds que tracer la courbe de la pression différentielle en fonction du nombre de Reynolds, car la relation obtenue est linéaire sur une assez grande étendue. Elle n'est cependant pas linéaire pour les faibles nombres de Reynolds mais l'expérience montre que si l'on porte le coefficient de décharge en fonction de certaines puissances du nombre de Reynolds ($Re_d^{-0,5}$ ou $Re_d^{-0,75}$ par exemple), le domaine de linéarité augmente.

6.3 Subdivision de la courbe

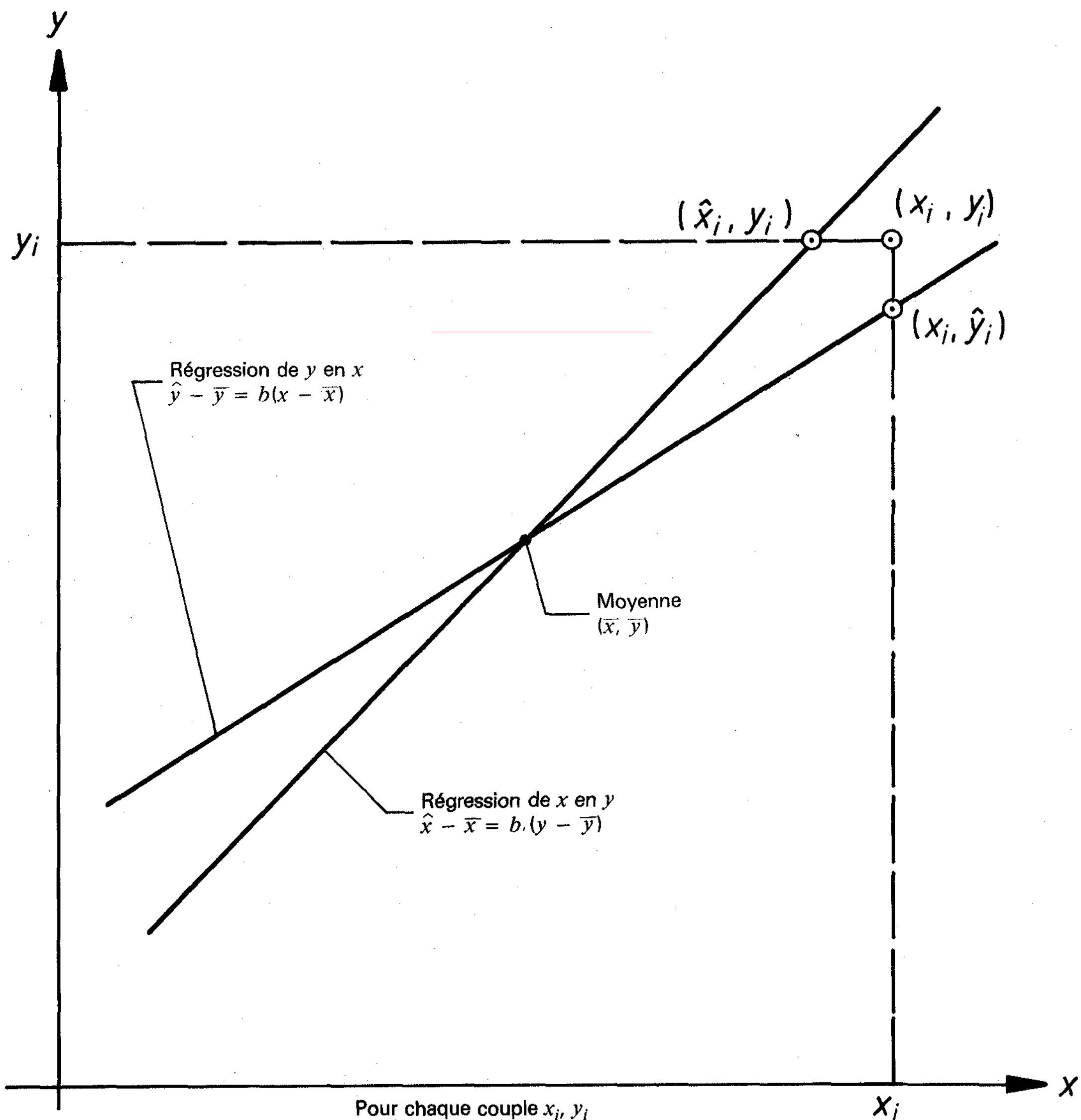
Bien qu'une courbe d'étalonnage puisse ne pas être linéaire sur toute l'étendue de l'étalonnage, elle peut très bien être rendue linéaire en la subdivisant en un certain nombre de parties, chaque partie pouvant être considérée comme linéaire; dans ce cas, il faut calculer séparément une équation d'étalonnage et des limites de confiance pour chaque partie de la courbe. Le nombre de points dans chaque subdivision de la courbe doit, si possible, donner approximativement la même incertitude dans chaque subdivision.

Étant donné que les courbes d'étalonnage ne doivent jamais être extrapolées au-delà des points expérimentaux extrêmes, à moins que cette extrapolation ne soit parfaitement justifiée, les parties adjacentes de la courbe d'étalonnage doivent avoir au moins trois points communs.

7 Droite d'ajustement

7.1 Généralités

Avant de calculer la droite d'ajustement et l'incertitude qui lui est associée, on doit d'abord étudier les données disponibles car on peut se trouver dans l'un des différents cas possibles et des formules différentes sont applicables selon le type de données. La figure 2 illustre quelques principes de base.



Pour chaque couple x_i, y_i

$\hat{y}_i = \overline{y} + b(x_i - \overline{x})$

$\hat{x}_i = \overline{x} + b.(y_i - \overline{y})$

Figure 2 — Principes de base pour l'établissement des droites d'ajustement

La droite d'ajustement d'un échantillon de n points, (x_i, y_i), lorsque $1 \leqslant i \leqslant n$, est donnée par la régression de y en x:

$$\hat{y}_i - \bar{y} = b(x_i - \bar{x}) \qquad \ldots \quad (3)$$

où

$\hat{y}_i$ est la valeur de y sur la droite pour une valeur mesurée x_i;

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \qquad \ldots \quad (4)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} \qquad \ldots \quad (5)$$

L'équation (3) peut également être écrite ainsi:

$$\hat{y}_i = a + bx_i \qquad \ldots \quad (6)$$

où

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \qquad \ldots \quad (7)$$

La méthode à utiliser pour le calcul des coefficients a et b dépend de la valeur des incertitudes aléatoires sur x et y.

Le cas le plus général se présente lorsque les incertitudes aléatoires sur x et y sont toutes les deux nettement différentes de zéro. Heureusement, si les deux variables présentent des incertitudes aléatoires nettement différentes de zéro, il est normalement possible d'émettre l'une des deux hypothèses suivantes:

a) l'une des incertitudes aléatoires est négligeable par rapport à l'autre, ou

b) les deux incertitudes aléatoires sont à peu près d'égale importance.

La première hypothèse conduit aux mêmes formules que pour le cas où une seule des variables a une incertitude aléatoire nettement différente de zéro; c'est la situation normale.

Pour calculer l'importance relative des incertitudes aléatoires sur x et y, il faut d'abord calculer $e_r(x)$ et $e_r(y)$ selon les principes de l'ISO 5168.

On obtient une valeur approchée de la pente b, soit d'après le graphique, soit en utilisant l'équation (8) ou bien l'équation (11). Si la valeur absolue de $be_r(x)$ est inférieure à 1/5ème de $e_r(y)$, les formules données en 7.2 doivent être utilisées pour calculer la droite d'ajustement. Dans le cas contraire, il faut utiliser les formules données en 7.3.

7.2 Cas où l'incertitude aléatoire d'une variable est négligeable ou peu importante par rapport à l'autre

La pente de la droite est donnée dans ce cas par

$$b = \frac{s(x, y)}{s^2(x)} \qquad \ldots \quad (8)$$

où

$$s^2(x) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2 \qquad \ldots \quad (9)$$

$$s(x, y) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \qquad \ldots \quad (10)$$

L'ordonnée à l'origine, a, est donnée par l'équation (7) :

$$a = \bar{y} - b\bar{x}$$

7.3 Cas où les incertitudes aléatoires des deux variables sont d'égale importance

La pente est calculée par

$$b = \pm \left[\frac{s^2(y)}{s^2(x)} \right]^{1/2} \qquad \ldots \quad (11)$$

où

$$s^2(y) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2 \qquad \ldots \quad (12)$$

$s^2(x)$ est donné par l'équation (9);

a est toujours donnée par l'équation (7).

Le signe de b est le même que celui de $s(x, y)$.

NOTE — Les formules suivantes peuvent aussi être utilisées pour calculer $s^2(x)$, $s^2(y)$ et $s(x, y)$ car elles sont plus aisées à employer dans un calcul manuel, mais il faut alors faire attention car elles sont susceptibles d'introduire des erreurs «d'arrondis» :

$$s^2(x) = \frac{1}{n(n-1)}\left[n\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2\right]$$

$$s^2(y) = \frac{1}{n(n-1)}\left[n\sum_{i=1}^{n} y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} y_i\right)^2\right]$$

$$s(x, y) = \frac{1}{n(n-1)}\left[n\sum_{i=1}^{n} x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n} y_i\right)\right]$$

8 Détection des points aberrants

Les mesures aberrantes (voir ISO 5168) sont les erreurs dues à l'homme ou à un mauvais fonctionnement des instruments, qui dénaturent un mesurage; elles peuvent être dues, par exemple, à la mauvaise transcription d'un résultat ou à la présence de poches d'air dans la conduite reliant une tuyauterie d'eau à un manomètre. De telles erreurs ne peuvent être prises en compte dans une analyse statistique et le mesurage correspondant doit être annulé. 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 qu'un ou plusieurs résultats ont été entachés d'erreurs de cette nature, il faut appliquer un test statistique des «valeurs aberrantes». Dans le cadre de la présente partie de l'ISO 7066, on peut utiliser soit le test de Dixon, soit le test des écarts extrêmes de Grubbs. Le test de Dixon est commode d'emploi pour le calcul manuel, mais lorsqu'on traite un ensemble de valeurs sur ordinateur, le test de Grubbs est plus approprié car il est plus fiable, plus facile à programmer et il occupe moins de place en mémoire.

Des détails sur ces tests sont donnés dans l'annexe E.

9 Incertitude d'étalonnage

9.1 Généralités

En général, l'incertitude sur la droite d'ajustement provient des incertitudes sur l'ordonnée à l'origine, a, et sur la pente b.

L'équation (3) donne:

$$\hat{y}_i = \overline{y} + b(x_i - \overline{x}) \qquad \ldots \quad (13)$$

Ainsi, en combinant quadratiquement les variances de $\overline{y}$, $\overline{x}$ et b (voir ISO 5168), on obtient

$$s^2(\hat{y}) = s^2(\overline{y}) + b^2 s^2(\overline{x}) + (x_k - \overline{x})^2 s^2(b) \qquad \ldots \quad (14)$$

où x_k est la valeur de x pour laquelle on recherche l'incertitude sur $\hat{y}$.

Ainsi, $s^2(\overline{y})$ est la variance de $\overline{y}$ qui serait obtenue en analysant la dispersion de *plusieurs déterminations* de $\overline{y}$ sur une même gamme de valeur de x, et pour le même nombre de mesurages de y. Elle est donnée par:

$$s^2(\overline{y}) = \frac{\sum_{i=1}^{n} (\overline{y}_i - \overline{y})^2}{n-1}$$

$s^2(\overline{x})$ est défini de la même manière.

Il faut noter que $s^2(\overline{x})$ et $s^2(\overline{y})$ sont tout à fait différents de $s^2(x)$ et $s^2(y)$, définis par les équations (9) et (12). $s^2(y)$, par exemple, est la variance de toutes les valeurs de y sur l'ensemble de la courbe d'étalonnage rapportée à leur valeur moyenne et $s^2(x)$ a la même signification, tandis que $s^2(\overline{y})$ est associée seulement à la dispersion de différentes déterminations de $\overline{y}$, et est essentiellement une indication de l'incertitude aléatoire sur y.

D'après l'équation (7), on peut voir que la variance de a est donnée par

$$s^2(y) + b^2 s^2(x)$$

et la contribution de la variance de b à la variance de $\hat{y}$ est

$$(x_k - \overline{x})^2 s^2(b)$$

Ainsi la composante aléatoire de l'incertitude sur $\hat{y}$, $e_r(\hat{y})$, est-elle donnée avec un intervalle de confiance de 95 % par

$$e_r(\hat{y}) = \pm\, t\,[s^2(\overline{y}) + b^2 s^2(\overline{x}) + (x_k - \overline{x})^2 s^2(b)]^{1/2} \qquad \ldots \quad (15)$$

où t est donné par le tableau 2 pour $n - 2$ degrés de liberté.

Tableau 2 — Valeurs du coefficient t de Student au niveau de confiance de 95 %

Nombre de degrés de liberté, ν	t
1	12,7
2	4,3
3	3,2
4	2,8
5	2,6
6	2,4
7	2,4
10	2,2
15	2,1
20	2,1
30	2
60	2
∞	1,96

L'équation (15) est l'équation de base pour le calcul de l'incertitude qui est utilisée soit directement, soit sous une forme modifiée dans les paragraphes qui suivent.

Comme indiqué à l'article 4, la méthode à utiliser pour le calcul de l'incertitude d'un étalonnage dépend de l'ampleur de l'incertitude aléatoire sur x et de l'indépendance ou non de y vis-à-vis de x, c'est-à-dire du fait que b soit ou non égal à zéro.

La première étape à suivre est par conséquent d'établir si la pente b est nettement différente de zéro; pour ce faire, on procédera de la façon suivante.

L'écart-type sur b, $s(b)$, doit être calculé d'après l'équation:

$$s^2(b) = \frac{s_R^2}{(n-1)s^2(x)} \qquad \dots \quad (16)$$

où s_R est l'écart-type des points expérimentaux par rapport à la droite d'ajustement, c'est-à-dire:

$$s_R = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}\right]^{1/2} \qquad \dots \quad (17)$$

$s(b)$ peut aussi être calculé par la formule suivante:

$$s(b) = \left[\frac{s^2(y)s^2(x) - s^2(x,y)}{(n-2)s^4(x)}\right]^{1/2} \qquad \dots \quad (18)$$

Cette formule est plus pratique d'emploi mais le calcul du numérateur peut être entaché d'erreurs «d'arrondis» et il est donc important d'utiliser un nombre suffisant de chiffres significatifs dans le calcul.

Les limites de confiance à 95 % de b sont données par:

$$\begin{matrix} b - ts(b) \\ b + ts(b) \end{matrix} \qquad \dots \quad (19)$$

où t est la valeur donnée par le tableau 2 pour $n - 2$ degrés de liberté.

Si ces limites comprennent la valeur zéro et à condition que le débitmètre ou le type de débitmètre utilisé soit censé (d'après les indications d'une norme ou d'un étalonnage antérieur, par exemple) avoir un coefficient d'étalonnage constant, on peut supposer le coefficient d'étalonnage constant. Si rien par ailleurs ne permet de supposer un coefficient constant, que l'intervalle comprenne ou non la valeur zéro, on doit utiliser les formules données en 9.3 (si l'on peut négliger l'incertitude sur x) ou en 9.4.

Pour calculer l'incertitude sur le coefficient d'étalonnage, on doit d'abord évaluer séparément les composantes aléatoires et systématiques. Les composantes aléatoires sont calculées d'après les formules données en 9.2 à 9.4 compte tenu de la contribution des incertitudes aléatoires des instruments de mesure utilisés lors de l'étalonnage, de manière qu'il ne soit pas nécessaire de traiter celles-ci séparément. L'hystérésis des instruments contribue notamment à l'incertitude aléatoire ainsi obtenue. Les composantes systématiques sont calculées selon l'ISO 5168.

NOTE — L'équation (16) n'est valable au sens strict que si l'incertitude aléatoire sur x contribue notablement moins à l'incertitude sur la courbe d'étalonnage que l'incertitude aléatoire sur y, étant donné qu'il s'agit d'une simplification d'une formule plus générale.

La transformation de l'équation (17) utilisée pour établir l'équation (18) requiert la même hypothèse. L'utilisation des équations (18) et (19) conduira cependant à une incertitude sur b plus faible que celle qu'auraient donnée les formules complètes et, par conséquent, si elles comprennent la valeur zéro, les formules plus générales devraient conduire à la même conclusion. Si elles ne comprennent pas la valeur zéro, il est possible que la pente soit traitée comme ayant une valeur différente de zéro alors qu'il aurait été admissible de la considérer comme nulle; mais ce cas est très rare et le seul ennui encouru serait d'utiliser, au lieu de la méthode plus simple donnée en 9.2, les formules plus compliquées données en 9.4. Dans un tel cas, les résultats obtenus pour l'incertitude sur la droite d'ajustement devraient virtuellement être identiques, que l'on utilise la formule donnée en 9.2 ou celle donnée en 9.4.

9.2 Courbe d'étalonnage à pente nulle

Dans le cas de courbe d'étalonnage à pente nulle, le coefficient d'étalonnage a une valeur unique et toutes les estimations de cette valeur peuvent être analysées en même temps, quelle que soit la valeur de la variable indépendante à laquelle elles correspondent. C'est généralement le cas pour l'étalonnage d'un débitmètre à turbine pour l'eau.

La meilleure estimation de la valeur du coefficient d'étalonnage est donnée par l'équation (5):

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n}$$

Dans ce cas, $b = s(b) = 0$, de sorte que d'après l'équation (15), la composante aléatoire de l'incertitude sur $\hat{y}$ est donnée avec un niveau de confiance de 95 % par l'équation:

$$e_r(\hat{y}) = \pm\, ts(\bar{y}) = \pm\, t\,\frac{s(y)}{n^{1/2}} \qquad \dots \quad (20)$$

où

$$s(y) = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}{n-1}\right]^{1/2} \qquad \dots \quad (21)$$

et t est donné par le tableau 2 pour $n - 1$ degrés de liberté.

La composante systématique de l'incertitude sur $\hat{y}$, $e_s(\hat{y})$, est calculée comme indiqué à l'article 5 et l'incertitude sur le coefficient d'étalonnage $e(\hat{y}_c)$ est alors donnée par l'équation:

$$e(\hat{y}_c) = [e_r^2(\hat{y}) + e_s^2(\hat{y})]^{1/2} \qquad \dots \quad (22)$$