

Libellé de l'UE : Métrologie et chimométrie Semestre : S2

Enseignant responsable de l'UE : Benyahia Azzedine

Enseignant responsable de la matière: Benyahia Azzedine

1. La chimométrie

Définition : La chimométrie est l'application d'outils mathématiques, en particulier statistiques, pour obtenir le maximum d'informations à partir de données chimiques. Il est basé sur la construction, puis l'exploitation d'un modèle de comportement à l'aide d'outils statistiques. Il peut traiter des systèmes complexes et donc généralement multivariés. Cela comprend notamment :

- les méthodes multivariées d'analyse de données
- Les méthodes taxonomiques et de classification
- les méthodes de traitement du signal
- la validation des méthodes de mesures
- la méthodologie des plans d'expérience qui a pour objectif d'organiser mathématiquement les conditions expérimentales pour choisir les plus informatives, ce qui permet de minimiser le nombre d'expériences tout en maximisant l'information obtenue
- les méthodes d'optimisation
- les outils statistiques de la qualité

Le but de la chimométrie est d'améliorer par l'emploi de ces méthodes, le contrôle et l'optimisation des procédés ainsi que la qualité des produits fabriqués.

I.2 Erreurs et incertitudes

L'erreur est l'écart (différence) entre la valeur mesurée et la valeur vraie. Par contre l'incertitude est un paramètre qui indique la dispersion des résultats des mesures.

Mesurer une grandeur (mesurande), revient à rechercher une valeur de cette grandeur et lui associer une incertitude afin d'évaluer la qualité de la mesure (mesurage). Lors d'une série de mesure d'une grandeur, les résultats varient lors de chaque mesure (mesurage). Une telle variabilité des résultats obtenus peut s'expliquer de plusieurs raisons :

- La grandeur à mesurer n'est pas parfaitement définie,
- les conditions expérimentales (température, pression, ...) évoluent,
- l'instrument de mesure est source d'erreur (temps de réponse, justesse, fidélité, sensibilité, ...),
- l'opérateur ne refait jamais la même mesure dans les mêmes conditions (fatigue, erreur de parallaxe, ...)

- le protocole de mesure n'est pas adapté, ...

Le **mesurage** est l'ensemble des opérations permettant de déterminer expérimentalement l'intervalle de valeurs que l'on peut raisonnablement attribuer à la grandeur mesurée appelée mesurande (longueur, masse, intensité,...)

La **valeur mesurée** est la valeur attribuée à la grandeur suite à un mesurage.

La **valeur vraie** est la valeur que l'on obtiendrait si le mesurage était parfait. Un mesurage n'étant jamais parfait, cette valeur est toujours inconnue.

L'**erreur de mesure** est l'écart entre la valeur mesurée et la valeur vraie (inconnue) ou une valeur de référence.

Un mesurage comporte en général plusieurs opérations dont chacune peut être source de variabilité.

1.2.1 Incertitude absolue, Incertitude relative

L'incertitude absolue Δx est l'erreur maximale que l'on est susceptible de commettre dans l'évaluation de x . L'incertitude absolue s'exprime donc dans les unités de la grandeur mesurée.

Exemple 1: Les physiciens américains Dumond et Cohen ont proposé au début des années 1950 plusieurs valeurs expérimentales pour la vitesse de la lumière :

- 1948 : $c = (299776 \pm 4) \text{ km.s}^{-1}$
- 1951 : $c = (299790,0 \pm 0,9) \text{ km.s}^{-1}$
- 1953 : $c = (299792,9 \pm 0,8) \text{ km.s}^{-1}$.

On remarquera l'incompatibilité apparente entre ces résultats, particulièrement entre celui de 1948 et ceux de 1951 et 1953. La conclusion est que ces chercheurs ont été optimistes dans l'appréciation des incertitudes...

L'incertitude relative $\Delta x/x$ représente l'importance de l'erreur par rapport à la grandeur mesurée.

L'incertitude relative n'a pas d'unités et s'exprime en général en % ($100 \Delta x/x$).

Exemple 2: une balance d'analyse de laboratoire permet de peser typiquement à $\pm 0,1$ mg près.

-Si la pesée est de 10 mg l'incertitude absolue est $\pm 0,1$ mg. L'incertitude relative est 1%.

-Si la pesée est de 1000 mg l'incertitude absolue est toujours $\pm 0,1$ mg. L'incertitude relative est 0,01%. Mais on peut choisir de peser à 10 mg près si on se contente d'une incertitude relative de 1%.

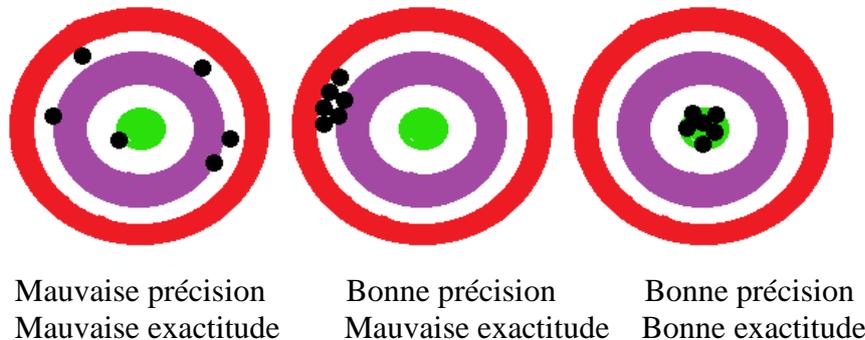
Exemple 3: La mesure de la vitesse de la lumière exprimée par $c = (299792,9 \pm 0,8) \text{ km.s}^{-1}$ correspond à une incertitude relative $\Delta x / c = 3.10^{-6}$.

L'incertitude relative est une manière commode de chiffrer la *précision* d'une mesure (notion définie ci dessous). Dans le langage scientifique, une mesure de fréquence est dite *très précise* car mesurée avec une incertitude relative meilleure que 0,0001 %. Par contre la mesure d'un paramètre physiologique ne peut être difficilement apprécié à mieux que quelques dizaines de % du fait de la variabilité rencontrée chez les êtres vivants.

1.2.2 précision et exactitude

Dans le langage habituel, ces deux derniers termes sont souvent confondus à tort.

La *précision* traduit le degré de proximité (ou reproductibilité) que l'on observe entre différentes mesures qui ont été obtenues par la même méthode. L'*exactitude* exprime la proximité entre un résultat et sa valeur réelle ou présumée telle. Cette notion nécessite la comparaison entre différentes méthodes.



1.3 Types des erreurs

On a deux types d'erreurs à savoir un type **aléatoire** et un type **systématique**.

1.3.1 Erreur systématique : elle est appelée aussi erreur déterminée, qui peut être détecté et corrigée. Ce type d'erreur inclut les erreurs instrumentales relatives aux appareils de mesures et les erreurs de méthodes. Les erreurs instrumentales peuvent provenir par exemple d'une burette non calibrée, de la contamination de la superficie intérieure du matériel volumétrique, etc. Les erreurs de méthodes peuvent provenir du comportement physique ou chimique non idéal des réactions ou réactifs durant l'analyse (lenteur de réaction, réactif non spécifique, existence de réactions secondaires qui interfère avec le processus de mesure). Par exemple en analyse gravimétrique, le chimiste doit séparer l'espèce à déterminer sous forme de solide de grande pureté. Si ce dernier n'est pas bien lavé, il sera contaminé par autres substances qui fausseront alors la pesée. Alors que l'excès de lavage du précipité engendrera une perte de la substance à mesurer, suite à la solubilisation du précipité. Ainsi l'exactitude de l'analyse est limitée, puisque ces erreurs sont inévitables. L'erreur en analyse volumétrique provient de l'excès de volume nécessaire pour l'atteinte du point final par apport à la théorie. Elle affecte le même sens.

1.3.2 Erreur aléatoire: appelée aussi erreur indéterminée ou erreurs personnelles. Elles proviennent des limitations physiques ou psychiques de l'analyste. Elles peuvent provenir d'une mauvaise lecture ou estimation de la position de l'aiguille entre deux divisions d'échelle, du niveau de liquide marqué par la graduation ou couleur final d'une valorisation. Les erreurs de calculs, transposition de numéros en notant les données, inversion de signe, usage d'échelle incorrecte sont des erreurs personnelles communes. l'erreur aléatoire, résulte typiquement des variations imprévisibles des grandeurs ayant une influence sur le résultat. Ces effets donnent lieu à des variations dans les observations répétées du mesurande. L'erreur aléatoire d'un résultat analytique ne peut être compensée, mais il est possible de la réduire en augmentant le nombre d'observations. En absence d'erreur systématique, la moyenne doit coïncider à la valeur réelle. L'intervalle des valeurs dépend de :

- La précision des mesures (déviation standard).
- numéro de mesures réalisées.

I.4. Composantes de l'incertitude

I. 4. 1. Incertitude type

L'incertitude type u_x est l'incertitude d'un résultat x d'une mesure exprimée à l'aide d'un écart-type. Dans l'estimation de l'incertitude globale, il peut être nécessaire de considérer chaque source d'incertitude et de la traiter séparément pour obtenir la contribution de cette source. Chacune des contributions à l'incertitude prise séparément est appelée composante de l'incertitude. Lorsque les composantes de l'incertitude sont concernées, elles doivent aussi être exprimées sous la forme d'un écart-type. Pour une distribution donnée, l'écart-type représente la mesure de la dispersion des données autour de la moyenne. Lorsque cette distribution concerne l'ensemble de la population testée, l'expression correcte de l'écart-type de la moyenne est celle de la population et se calcule comme suit :

$$\sigma = \sigma_N = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{N}}$$

où x_i est un résultat individuel, μ la moyenne de la population et N la taille de la population. Par contre lorsque cette distribution concerne un échantillon prélevé au sein d'une population, l'expression correcte de l'écart-type de la moyenne est :

$$s = \sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

où \bar{x} est la moyenne de l'échantillon, n la taille de l'échantillon et $\sum (x_i - \bar{x})^2$ la somme des carrés des différences entre chaque valeur x_i et la moyenne \bar{x} . L'estimation de l'incertitude de résultat basé sur l'échantillon prélevé au sein de la population de mesure est :

$$u_x = s$$

L'écart-type de la moyenne est la mesure de la variabilité de la moyenne :

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

où $s_{\bar{x}}$ est l'écart-type de l'échantillon et n la taille de l'échantillon. L'écart-type de la moyenne est aussi connu comme étant l'erreur type de la moyenne.

I.4.2. Incertitude type composée

L'incertitude type composée ou incertitude totale est la résultante de toutes les incertitudes types issues des composantes individuelles de l'incertitude. C'est l'écart-type estimé égal à la racine carrée de la variance totale obtenue en combinant toutes les composantes de l'incertitude. La combinaison se fait de deux manières selon que la source d'incertitude est proportionnelle ou non à la concentration de l'analyte. Dans le cas où toutes les sources d'incertitude sont proportionnelles à la concentration de l'analyte, les composantes d'incertitude sont d'abord converties en écart-type relatif puis ensuite combinées. Pour un résultat x (par exemple la concentration d'une solution stock d'une substance quelconque), affecté par les paramètres p , q et r (par exemple p la masse de la substance, q sa pureté et r le volume de la solution finale) et les incertitudes correspondantes $u(p)$, $u(q)$ et $u(r)$, l'incertitude type composée u_x devient :

$$\frac{u_x}{x} = \sqrt{\left(\frac{u(p)}{p}\right)^2 + \left(\frac{u(q)}{q}\right)^2 + \left(\frac{u(r)}{r}\right)^2 + \dots}$$

Par contre dans le cas où les sources d'incertitude sont indépendantes de la concentration de l'analyte, les composantes d'incertitude doivent être combinées sous forme d'écart-type. Pour un résultat donné x , l'incertitude type composée u_x sera calculée comme suit :

$$u_x = \sqrt{u(p)^2 + u(q)^2 + u(r)^2 + \dots}$$

I.4.3. Incertitude élargie

Appelée aussi incertitude globale, l'incertitude élargie U_x est une grandeur définissant un intervalle autour du résultat d'une mesure, dont on puisse s'attendre à ce qu'il comprenne une

fraction élevée de la distribution des valeurs qui pourraient être attribuées raisonnablement au mesurande. L'incertitude élargie est obtenue en multipliant l'incertitude type (composée) par un facteur d'élargissement k . Le choix de la valeur de ce facteur dépend du niveau de confiance exigé, de la connaissance de la distribution ainsi que du nombre de degrés de liberté correspondant. Dans la plupart des cas il est recommandé d'utiliser la valeur de $1,96 \approx 2$ correspondant au quantile à 95 % bilatéral de la distribution gaussienne (normale). Dans chaque cas, le niveau de confiance est de 95 %. Ainsi, l'incertitude élargie est calculée comme étant $U_x = ku_x = 2u_x$, et le résultat final écrit comme suit $x \pm U_x$. Cependant, la valeur de k pourrait être insuffisante, par exemple lorsque l'incertitude composée est basée sur les observations statistiques avec un nombre de degrés de liberté relativement faible. Le choix de k dépendra alors du nombre de degrés de liberté effectif. D'autre part, lorsque l'incertitude type composée est dominée par une seule contribution avec un nombre de degrés de liberté inférieur à 6, il est alors recommandé de prendre la valeur de k égale au t de Student bilatéral associé au nombre de degrés de liberté de cette contribution, et un niveau de confiance exigé, souvent 95 %. Le tableau .1 présente une liste des valeurs de t de Student bilatéral au niveau de confiance de 95%.

Table .1 – Quelques valeurs de t de Student bilatéral à 95 %

Degré de liberté	T
1	12.7
2	4.3
3	3.2
4	2.8
5	2.6
6	2.5

1.5 . Sources d'incertitude

En pratique l'incertitude affectant un résultat peut provenir de plusieurs sources possibles, ce qui pourrait expliquer la difficulté relative à l'estimation de l'incertitude de mesure, étant donné que toutes les composantes de l'incertitude contribuent à la dispersion de la distribution de l'incertitude. Lors de l'évaluation de l'incertitude, il faut d'abord identifier les sources majeures d'incertitude avant de les quantifier.

I.5.1. Sources d'incertitude selon le type d'évaluation de l'incertitude

Il existe deux manières différentes de classifier l'évaluation des composantes de l'incertitude à savoir l'évaluation du Type A et l'évaluation du Type B. Cette classification ne signifie toutefois pas qu'il existe une différence quelconque de nature entre les composantes résultant des deux types d'évaluation.

a) Evaluation du Type A

La méthode d'évaluation du Type A concerne l'évaluation de l'incertitude par l'analyse statistique de séries d'observations. L'évaluation se fait à partir d'une fonction de densité de probabilité déduite d'une distribution de l'effectif observé. La variance estimée u_2 qui caractérise une composante de l'incertitude obtenue par ce type d'évaluation est calculée à partir de séries d'observations répétées. La variance habituelle estimée statistiquement est alors s_2 et l'écart-type estimé u est donc $u = s$. Par commodité $u_2(x_i)$ et $u(x_i)$ évalués de cette façon sont parfois appelés respectivement variance de Type A et incertitude-type de Type A. Pour que l'évaluation du Type A soit fiable, il faudra qu'elle soit fondée sur un nombre relativement élevé d'observations statistiquement indépendantes. Cependant, les conditions pour l'estimation de la précision ne sont pas définies. Certaines sources d'incertitude ne peuvent pas être statistiquement évaluées ou leur évaluation statistique n'est pratiquement pas possible ou n'est pas nécessaire. Répondant à ce cas de figure, nous pouvons citer comme exemples l'incertitude en rapport avec l'étalonnage d'un équipement et l'incertitude sur le matériel volumétrique ou l'équipement utilisé. Dans ces cas, les estimations d'incertitude sont faites sur la base d'expériences ou selon l'évaluation du Type B.

b) Evaluation du Type B

L'évaluation du Type B est une méthode d'évaluation de l'incertitude qui se fait par des moyens autres que l'analyse statistique de séries d'observations. Elle se fait à partir d'une densité de probabilité supposée, fondée sur le degré de croyance en ce qu'un évènement se produise, souvent appelé probabilité subjective. Pour une estimation x_i d'une grandeur d'entrée X_i qui n'a pas été obtenue à partir d'observations répétées, la variance estimée associée $u_2(x_i)$ ou l'incertitude type est évaluée par un jugement scientifique fondé sur toutes les informations disponibles au sujet de la variabilité possible de x_i . L'ensemble d'informations accumulées peut comprendre des résultats de mesures antérieures, l'expérience ou la connaissance générale du comportement et des propriétés des matériaux et instruments utilisés, les spécifications du fabricant, les données fournies par des certificats d'étalonnage ou autres certificats, l'incertitude assignée à des valeurs de référence provenant

d'ouvrages et de manuels. Par commodité, $u_2(x_i)$ et $u(x_i)$ évalués de cette façon sont parfois appelés respectivement variance de Type B et incertitude-type de Type B. L'évaluation du Type B constitue une alternative pour pallier l'insuffisance d'informations telle qu'observée dans l'évaluation du type A. Ces estimations de l'incertitude sont obtenues au moyen des informations autres que statistiques telles que la littérature ou les spécifications du fabricant .

I.5.2 Sources d' incertitude selon l' erreur

I.5.2.1. Erreur et incertitude

L'erreur est définie comme étant la différence entre un résultat individuel et la valeur exacte ou vraie valeur du mesurande. En tant que telle, l'erreur est une valeur unique et la connaissance de cette valeur peut être appliquée pour corriger le résultat. Cependant, en pratique la correction n'est pas faisable car la valeur des erreurs n'est pas exactement connue. L'incertitude quant à elle, prend la forme d'un intervalle et, si elle est estimée pour une procédure analytique et un type particulier d'échantillon, elle peut s'appliquer à toutes les déterminations décrites de cette façon. La valeur de l'incertitude ne peut parfois pas être utilisée pour corriger le résultat d'une mesure et l'incertitude du résultat d'une mesure ne devrait jamais être interprétée comme représentant l'erreur elle-même, ni l'erreur subsistant après correction. L'erreur a deux composantes. La première, l'erreur aléatoire, résulte typiquement des variations imprévisibles des grandeurs ayant une influence sur le résultat. Ces effets donnent lieu à des variations dans les observations répétées du mesurande. L'erreur aléatoire d'un résultat analytique ne peut être compensée, mais il est possible de la réduire en augmentant le nombre d'observations. La seconde, une composante systématique appelée aussi biais systématique, est définie comme une composante de l'erreur qui, au cours d'un ensemble d'analyses du même mesurande, reste constante ou varie de façon prévisible Elle est indépendante du nombre de mesures réalisées et ne peut donc être réduite par l'augmentation du nombre d'analyses dans des conditions de mesure constantes. Le biais est la différence entre une valeur observée et la vraie valeur alors que l'erreur aléatoire est la différence entre la valeur observée et celle attendue. Le biais peut avoir aussi deux composantes, le biais de la méthode qui est une erreur inhérente à la méthode et le biais du laboratoire qui peut être considéré comme étant le biais introduit spécifiquement par un laboratoire lors de l'application d'une méthode non biaisée.

Finalement, pour le résultat d'une mesure x , l'erreur (équation (1)) doit être distinguée de l'incertitude (équation (2)). Les équations suivantes le montrent clairement:

$$x = \tau + e = \underbrace{\tau + \Delta + \delta}_{\mu} = \mu + \delta \dots\dots(1)$$

où τ représente la vraie valeur, e l'erreur associée qui est composée du biais Δ et de l'erreur aléatoire δ , et μ la valeur attendue obtenue suite à une série d'observations infinies,

$$x \pm U_x \dots\dots(2)$$

où U_x représente l'incertitude élargie du résultat de la mesure x . L'incertitude, représentée ici par l'incertitude élargie, est donc un intervalle.

1.5.2.2. L'échelle erreur

La classification de l'erreur peut aussi être réalisée en considérant l'échelle d'erreur. Comme l'indique l'équation (1) un résultat dévie de la vraie valeur à cause de l'existence d'un certain nombre d'erreurs, systématiques ou aléatoires, associées à ce résultat. L'erreur associée à un résultat x peut donc être décomposée comme suit

$$x = \text{vraie valeur} + \left\{ \begin{array}{l} \text{biais de la méthode} \\ \text{biais du laboratoire} \\ \text{effet de l'analyse} \\ \text{erreur de la mesure} \end{array} \right.$$

Comme il a été précédemment souligné, le biais de la méthode est une erreur systématique inhérente à la méthode. Le biais du laboratoire peut donc être considéré soit comme une erreur systématique pour un laboratoire individuel, ou soit comme une erreur aléatoire lorsque le laboratoire est considéré comme faisant partie d'une population de laboratoires par exemple dans une étude inter-laboratoires. Dans ce cas, c'est une composante de la reproductibilité de la méthode utilisée. L'erreur due à l'analyse comprend l'estimé de la fidélité intermédiaire qui est une erreur aléatoire résultant des conditions dans lesquelles l'analyse a été faite. Celle-ci peut être faite à des temps différents, par des opérateurs différents ou/et au moyen d'équipements différents. L'erreur due à la répétabilité est une erreur aléatoire qui apparaît lors de l'analyse de plusieurs répétitions d'un échantillon, chaque analyse étant effectuée dans les conditions de répétabilité

1.6 . Sources d'incertitude dans l'analyse pharmaceutique

Les contrôles de qualité dans le domaine pharmaceutique sont de plus en plus souvent réalisés par des techniques de séparation, en l'occurrence la chromatographie liquide à haute performance (CLHP), dont le domaine d'application s'étend aussi bien au dosage du principe actif qu'à la séparation et détermination des impuretés chirales ou non, en passant par la quantification des traces d'ions métalliques et d'anions inorganiques. Cependant, d'autres techniques de séparation sont aussi appliquées pour les analyses dans les domaines précités, telles que l'électrophorèse capillaire (EC). Bien que présentant encore quelques insuffisances au niveau de la précision des résultats, cette technique se prête bien à la séparation chirale. La rapidité d'obtention des résultats lors du développement des méthodes et surtout l'efficacité de la séparation observée (en terme de nombre de plateaux théoriques) en font une technique très recherchée. Un autre avantage non moins important de cette technique est le coût réduit par analyse. Comme autre technique de séparation, la chromatographie en phase gazeuse est aussi utilisée mais son usage est beaucoup plus limité. Le grand avantage des techniques de séparation est la possibilité qu'elles offrent d'effectuer une analyse simultanée de plusieurs substances, apportant un gain de temps considérable et une réduction des coûts pour les industriels du secteur pharmaceutique. Néanmoins, un certain nombre d'étapes préalables sont nécessaires en vue de garantir l'obtention de résultats fiables, notamment la vérification des échantillons et des matériels d'analyse, la préparation des solutions d'échantillons et des solutions tampons, la vérification de la performance des équipements. Pourtant, l'accroissement du nombre d'étapes a pour conséquence d'accroître aussi les sources d'incertitude ce qui du reste, demande une maîtrise parfaite de la succession des étapes en vue d'assurer la qualité du résultat final. D'une manière générale, quelques sources sont citées dans le guide Eurachem et sont reprises dans le diagramme de cause à effet ci-après.

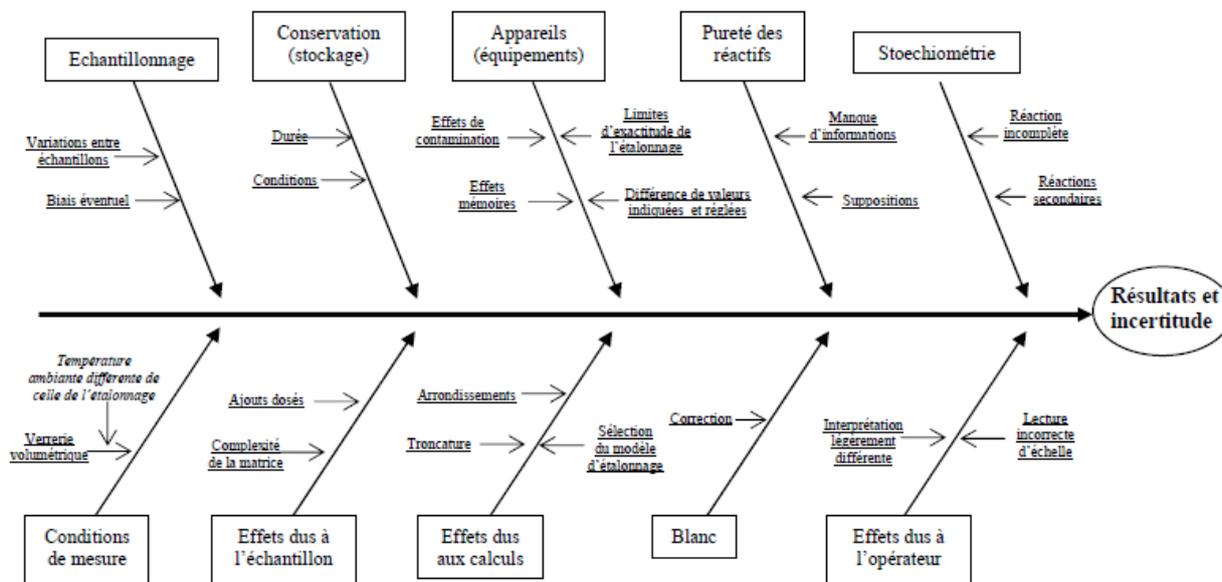


Figure .1 Diagramme d'Ishikawa présentant les causes et les effets y compris les sources d'incertitudes pour un processus analytique.

A ces sources d'incertitude illustrées ci-avant, il faut encore ajouter les effets aléatoires qui contribuent à l'incertitude dans tout le processus analytique et qui doivent figurer dans le diagramme de cause à effet. Le diagramme peut varier selon la technique analytique utilisée, compte tenu de la complexité et de la diversité des opérations effectuées.

1.7. Propagation des erreurs aléatoires :

Le tableau.2 résume la propagation des erreurs aléatoires dans les calculs arithmétiques :

Tableau. 2 calcul des erreurs aléatoires.

Type de calcul	Exemples	Deviation standard
Addition et soustraction	$Y=a+b-c$	$s_y = \sqrt{s_a^2 + s_b^2 + s_c^2}$
Multiplication et division	$Y = \frac{a \times b}{c}$	$\frac{s_y}{y} = \sqrt{\left(\frac{s_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{s_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{s_b}{b}\right)^2}$
Exponentiation	$Y=a^x$	$\frac{s_y}{y} = x \left(\frac{s_a}{a}\right)$
Logarithme	$Y=\text{Log}_{10} a$	$s_y = 0.434 \left(\frac{s_a}{a}\right)$

Exemple 1 : un prélèvement double d'un volume 9.992 mL à l'aide d'une pipette de 10 mL a été réalisé. La déviation standard est de 0.006.

Calculer l'erreur absolue et relative du volume total prélevé?

Solution :

Le volume total est la somme des deux volumes prélevé :

$$V_{\text{tot}} = 9.992 + 9.992 = 19.984 \text{ mL}$$

L'erreur totale du volume prélevé est :

$$s = \sqrt{(0.006)^2 + (0.006)^2} = 0.0085$$

Le volume prélevé s'écrit : 19.984 ± 0.008 mL

L'erreur relative est exprimée en pourcentage :

$$\frac{0.0085}{19.984} \times 100 = 0.043\%$$

Exemple 2 : La quantité de charge Q en coulombs passant à travers d'un circuit électrique est exprimé selon la formule : $Q = I \times t$

Avec :

I : courant en ampères et t le temps en secondes.

Quand le courant est 0.15 ± 0.01 A et le temps 120 ± 1 s

Calculer l'erreur absolue de la charge totale?

Solution :

La charge totale : $Q = 0.15 \times 120 = 18 \text{ C}$

La charge totale étant le produit de multiplication du courant et temps, l'erreur absolue est :

$$\frac{S_Q}{Q} = \sqrt{\left(\frac{0.01}{0.15}\right)^2 + \left(\frac{1}{120}\right)^2} = 0.0672$$

$$S_Q = Q \times 0.0672 = 18 \times 0.0672 = 1.2$$

La charge totale s'écrit : 18 ± 1 C

Références:

- Cours et exercices de chimométrie. Dr. HAMIDA. S.
- Notions de base sur les incertitudes et le traitement des données expérimentales en physique, chimie, biologie. Christian BOURDILLON, Coordinateur, version Juillet 2001
- Notion d'erreurs et d'incertitudes en sciences expérimentales. Jean-Marie BIAN SAN, Stéphane BLAT, Carole NICOULES, Jean-François OLIVE. Version 2017