

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE LA LUTTE CONTRE
LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Guide d'estimation de l'incertitude des mesures pour les analyses chimiques (DR-12-INC)

Mise à jour : 1^{er} octobre 2022

Coordination et rédaction

Cette publication a été réalisée par la Direction générale de la coordination scientifique et du Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). Elle a été produite par la Direction des communications du MELCC.

Renseignements

Téléphone : 418 521-3830
1 800 561-1616 (sans frais)

Formulaire : www.environnement.gouv.qc.ca/formulaires/renseignements.asp
Internet : www.environnement.gouv.qc.ca

Pour obtenir un exemplaire du document :

Direction générale de la coordination scientifique
et du Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec
du ministère de l'Environnement
et de la Lutte contre les changements climatiques

2700, rue Einstein, bureau E-2-220
Québec (Québec) G1P 3W
Téléphone : 418 643-1301
Télécopieur : 418 528-1091
Courriel : ceaeq@environnement.gouv.qc.ca

Ou

Visitez notre site Web : www.environnement.gouv.qc.ca

Dépôt légal – 2022
Bibliothèque et Archives nationales du Québec
ISBN 978-2-550-92850-8 (PDF)
ISBN 978-2-550-74904-2 (Édition précédente, PDF)

Tous droits réservés pour tous les pays.
© Gouvernement du Québec - 2022

Table des matières

Introduction	1
1. Approche statistique	2
1.1 Généralités	2
1.2 Échantillon de référence unique	2
1.3 Échantillon de référence unique	3
1.3.1 Variance induite par la préparation de l'échantillon	3
1.3.2 Sources d'erreur liées à la préparation des solutions utilisées dans la préparation des matériaux de référence	4
1.4 Calcul des coefficients de variation	5
1.5 Calcul de l'incertitude	5
2. Exemple	6
3. Expression de l'incertitude	6
Bibliographie	7

Introduction

Les résultats d'analyse des laboratoires accrédités sont encadrés par un système de management bien structuré, conformément aux exigences du Programme d'accréditation des laboratoires d'analyse du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques et aux lignes directrices s'adressant aux laboratoires de chimie.

Toute mesure étant affectée d'une incertitude, il est impossible de déterminer avec une précision absolue la concentration des contaminants dans les échantillons. Chaque résultat d'analyse est donc affecté d'une certaine variabilité.

Ce document présente une méthode pour estimer l'écart en question en s'appuyant sur les données de contrôle de la qualité utilisées dans la chaîne de production des analyses chimiques. L'usage de cette méthode est recommandé à l'ensemble des laboratoires accrédités. Toute autre méthode en utilisation dans un laboratoire accrédité devra être approuvée par la Direction générale de la coordination scientifique et du Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec.

1. Approche statistique

1.1 Généralités

Il existe deux approches pour évaluer l'incertitude des résultats analytiques. La première consiste à isoler toutes les étapes qui comportent des variations potentielles, à quantifier celles-ci une à une et à les additionner en tenant compte du type d'interaction (additive ou multiplicative). Cette approche peut aussi, le cas échéant, nécessiter l'identification de sources de covariances. La somme des variances permet d'exprimer l'incertitude du processus analytique en utilisant une méthode d'inférence statistique appropriée.

La seconde approche consiste à répéter des mesures sur un même échantillon, puis à calculer la variance du processus à partir d'un grand nombre de résultats. Nous obtenons ainsi une mesure globale de l'incertitude qui inclut toutes les composantes des étapes de l'analyse. Cette approche pratique élimine le besoin de déterminer la variance de toutes les composantes aléatoires présentes à chacune des étapes de réalisation des méthodes d'analyse et exclut toute possibilité d'avoir omis des sources de variances et de covariances. Toutefois, elle ne permet pas d'identifier des sources de variation dominante à l'intérieur des étapes du processus analytique; elle privilégie plutôt un suivi global de la performance des méthodes d'analyse, qui vise à améliorer de façon continue les pratiques en laboratoire.

Les laboratoires accrédités doivent appliquer un programme d'assurance et de contrôle de la qualité dans le cadre duquel ils analysent des échantillons de contrôle pour maintenir et documenter la fiabilité du processus analytique. Ces mesures peuvent être utilisées directement pour déterminer la variance du processus.

L'approche expliquée ici repose sur la détermination du coefficient de variation calculé à partir des échantillons de contrôle de qualité, qui sont analysés dans chaque séquence analytique.

1.2 Échantillon de référence unique

Le cas le plus simple est celui d'un matériel de référence stable et homogène. Cet échantillon est généralement utilisé sur une longue période, par exemple pendant quelques mois. À court ou à moyen terme, le laboratoire dispose ainsi de plusieurs dizaines de résultats.

Soit X , une variable aléatoire représentant des résultats d'analyse d'un échantillon de contrôle et $x_1, x_2, \dots, x_n$ représentant des résultats individuels.

La moyenne est donnée par :
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

L'écart type par :
$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Le coefficient de variation par :
$$CV(X) = \frac{S}{\bar{x}}$$

La moyenne, l'écart type et le coefficient de variation sont donc calculés uniquement à partir des caractéristiques de la distribution des résultats sans faire intervenir la valeur de référence, même si elle est généralement disponible. La différence entre la moyenne obtenue et la valeur de référence des échantillons doit être interprétée comme un biais.

À remarquer que, lorsqu'on procède de la sorte, le biais est tout à fait indépendant de l'incertitude, puisque la valeur de référence de l'échantillon n'intervient pas dans le calcul de l'écart type. L'incertitude ainsi obtenue est exhaustive pour le processus analytique, car elle englobe toutes les sources de variation inhérentes au processus, tout en excluant toutes les sources de variation liées à la préparation de l'échantillon de contrôle, les mesures étant effectuées sur un échantillon unique.

Les sources de variation associées à la préparation peuvent occasionner un biais de la valeur de référence, mais en raison du caractère unique de l'échantillon utilisé, il n'existe pas de possibilité de transmission des sources de variation entre la préparation et l'analyse. Toutefois, si l'échantillon de référence requiert une manipulation, par exemple une dilution, il faudra tenir compte, lors de l'interprétation des résultats, de cette variance additionnelle.

1.3 Échantillon de référence unique

Cette approche s'applique lorsqu'il n'est pas possible de préparer un matériel de référence qui sera analysé à plusieurs reprises ou lorsque sa concentration est volontairement différente d'une préparation à l'autre. En conséquence, les conditions précédentes sont absentes et l'interprétation devient plus complexe en raison des deux variables aléatoires : la préparation de l'échantillon et l'analyse. Il faut alors déterminer l'importance des sources de variation des concentrations dans les échantillons de contrôle et leur rôle dans la détermination de l'erreur globale du processus analytique.

Parce que la valeur de référence peut changer, il faut la rattacher à la valeur obtenue en calculant la récupération apparente. Ce paramètre constitue la variable aléatoire. L'écart type de cette récupération apparente constitue la base pour exprimer l'incertitude entourant la récupération.

1.3.1 Variance induite par la préparation de l'échantillon

L'équation utilisée pour faire le calcul de la récupération apparente, exprimée en pourcentage, est donnée par :

$$\text{Rec} = \frac{V_o}{V_A} 100$$

où V_A désigne la valeur attendue (valeur de référence) et V_o la valeur obtenue lors de l'analyse.

Lorsqu'on désigne l'écart type de la valeur obtenue par S_{VO} et l'écart type de la préparation par S_{VA} , la variance totale S_T de ce processus peut être représentée par l'équation générale suivante (multiplication ou division) :

$$\left(\frac{S_T}{\text{Rec}} \right)^2 = \left(\frac{S_{VO}}{V_o} \right)^2 + \left(\frac{S_{VA}}{V_A} \right)^2$$

Cette équation est exacte dans la mesure où la covariance entre la préparation et l'analyse est nulle. En principe, cette affirmation est acceptable lorsqu'il y a peu ou pas d'interaction humaine ou matérielle entre les équipes qui réalisent les deux travaux ou entre les équipements utilisés.

L'objectif de l'analyste est de déterminer la variance de la méthode d'analyse indépendamment de la préparation. Il faut par conséquent estimer S_{VA} pour pouvoir isoler S_{VO} .

1.3.2 Sources d'erreur liées à la préparation des solutions utilisées dans la préparation des matériaux de référence

Les solutions d'étalons intermédiaires peuvent être stables pendant plusieurs années. Ainsi, la variance existante dans des dilutions répétées de la solution originale pour préparer plusieurs solutions intermédiaires n'est pas digne de considération. Par contre, la solution intermédiaire peut comporter un biais.

Considérons $C_i \pm b_i$, la concentration d'une solution intermédiaire i , où b est une constante qui représente un biais de la solution intermédiaire par rapport à la valeur calculée. Ce biais peut résulter d'une erreur de préparation ou simplement de la variation normale issue de la précision des instruments de mesure (par exemple : balance, pipettes, fioles volumétriques). Compte tenu de la fiabilité des méthodes actuelles, nous pouvons considérer que b_i est normalement très faible par rapport à C_i , probablement de l'ordre de 1 % si le biais dépend uniquement de la précision des instruments de mesure.

Nous savons qu'en effectuant des prélèvements répétés de la solution intermédiaire C_i , nous obtiendrons $S^2(C_i \pm b_i) = S^2(C_i)$.

Cela demande que la variance et l'écart type ne soient pas affectés par une erreur systématique causée par un biais induit lors de la préparation. Cependant, nous avons aussi :

$$CV = \frac{S}{\overline{C_i} \pm b_i}$$

ce qui indique que le coefficient de variation est affecté par le biais systématique $\pm b_i$. Toutefois, ce terme peut être négligé dans la mesure où il est faible. En pratique, il est certainement possible d'accepter qu'un biais systématique du coefficient de variation de l'ordre de 1 % n'affecte pas suffisamment l'incertitude pour être pris en considération.

Suivant le raisonnement précédent, il s'avère que, dans la plupart des cas, l'écart type induit par la préparation, S_{VA} , est négligeable dans cette équation :

$$\left(\frac{S_T}{\overline{Rec}} \right)^2 = \left(\frac{S_{VO}}{V_O} \right)^2 + \left(\frac{S_{VA}}{V_A} \right)^2$$

et donc :

$$\left(\frac{S_T}{\overline{Rec}} \right)^2 \approx \left(\frac{S_{VO}}{V_O} \right)^2$$

1.4 Calcul des coefficients de variation

Les calculs définis ci-après sont effectués à partir des valeurs obtenues lors de l'analyse des matériaux de référence utilisés pour la détermination de l'incertitude. Si les concentrations varient d'une séquence à l'autre, chaque donnée est normalisée en pourcentage par rapport à la valeur attendue en utilisant l'équation suivante pour chaque composé :

$$\text{Rec} = \frac{V_o}{V_A} 100$$

Nous calculons par la suite l'écart type de tous les résultats de récupération obtenus à l'aide de l'équation suivante :

$$S_{\text{Rec}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\text{Rec}_i - \overline{\text{Rec}} \right)^2}{n-1}}$$

Ensuite, le coefficient de variation est calculé à partir de l'écart type (S_{Rec}) par rapport à la moyenne ($\overline{\text{Rec}}$) de tous les résultats utilisés.

Le calcul du coefficient de variation observé (CV_{Rec}) pour une récupération apparente moyenne, exprimé en pourcentage, est réalisé à l'aide de la formule suivante :

$$CV_{\text{Rec}} = \frac{S_{\text{Rec}}}{\overline{\text{Rec}}} \times 100$$

1.5 Calcul de l'incertitude

Dans le cas des échantillons à référence unique et à un niveau donné, l'incertitude peut se calculer ainsi :

$$\text{Incertainde} = \pm k \times CV$$

Dans le cas des échantillons à référence multiple, il faut plutôt utiliser :

$$\text{Incertainde} = \pm k \times CV_{\text{Rec}}$$

Le résultat final est exprimé avec une incertitude étendue à un degré de confiance de 95 % à l'aide d'un facteur de couverture k . Il s'agit du facteur t de Student (table normale centrée réduite) qui se trouve dans la plupart des ouvrages traitant de statistique. Pour une série de 20 mesures, $t = 2,093$. Nous utiliserons donc une valeur arrondie à 2 en autant que le nombre de mesures soit égal ou supérieur à 20.

Bien que le plus grand nombre de données possible soit souhaitable, un minimum de cinq données par composé est nécessaire pour établir une incertitude. Il faut alors ajuster la valeur du facteur k , tel qu'il est recommandé de la faire dans les références.

2. Exemple

Dans cet exemple fictif, trois composés sont analysés suivant une méthode analytique. La concentration des composés dans les matériaux de référence est différente pour chaque séquence d'analyse.

Essai	Composé A				Composé B				Composé C		
	Vo	Va	% Rec		Vo	Va	% Rec		Vo	Va	% Rec
1	57	65	87,7		54	80	67,5		125	220	56,8
2	62	70	88,6		45	70	64,3		285	250	114,0
3	64	70	91,4		41	60	68,3		33	25	132,0
4	81	78	103,8		39	55	70,9		158	125	126,4
5	75	72	104,2		12	20	60,0		300	365	82,2
6	72	75	96,0		40	58	69,0		225	258	87,2
7	58	50	116,0		30	45	66,7		485	458	105,9
8	65	60	108,3		6,8	11	61,8		611	654	93,4
9	64	60	106,7		50	80	62,5		925	852	108,6
10	63	60	105,0		40	70	57,1		75	100	75,0
11	61	55	110,9		39	60	65,0		200	244	82,0
12	62	75	82,7		34	55	61,8		500	577	86,7
13	74	70	105,7		14	20	70,0		360	598	60,2
14	73	75	97,3		40	58	69,0		300	365	82,2
15	70	80	87,5		34	45	75,6		400	451	88,7
16	64	60	106,7		55	80	68,8		751	852	88,1
17	57	50	114,0		42	70	60,0		508	558	91,0
18	85	80	106,3		44	60	73,3		390	411	94,9
19	57	55	103,6		15	22	68,2		225	254	88,6
20	29	35	82,9		15	28	53,6		580	753	77,0
Rec moy (%)	100,3				65,7				91,0		
S_{rec}	10,3				5,5				19,0		
CV_{Rec} (%)	10,2				8,4				20,9		
Incertitude (%)	20,5				16,8				41,8		

3. Expression de l'incertitude

Si une analyse comporte plusieurs composés (ex. : analyse des BPC), l'incertitude est rapportée pour chaque composé, sauf si la norme ou l'objectif visé par l'analyse porte sur le total. Dans ce dernier cas, l'incertitude porte sur le total, et l'incertitude pour chaque composé n'a pas à être fournie.

L'incertitude peut être calculée en utilisant tous les niveaux de concentration des échantillons de contrôle disponibles ou en séparant les données en deux ou trois plages de concentrations par rapport à la courbe d'étalonnage, comme entre 0 et 25 % des valeurs de sa courbe d'étalonnage ou de la plage des matériaux de référence utilisés, puis entre 25 % et 75 %, et enfin entre 75 % et 100 %.

Bibliographie

CANADIAN ASSOCIATION FOR LABORATORY ACCREDITATION, CALA Measurement Uncertainty Policy, Révision 1.10, 2010, 52 p.

CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC, Lignes directrices concernant les travaux analytiques en chimie, DR-12-SCA-01, Québec, ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2018, 24 p.

CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC, Programme d'accréditation des laboratoires d'analyse : normes et exigences, DR 12 PALA, Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 2012, 77 p.

B. Magnusson et U. Örnemark (eds.) Eurachem Guide : The Fitness for Purpose of Analytical Methods – A Laboratory Guide to Method Validation and Related Topics, 2^e édition, 2014, www.eurachem.org.

S. L. R. Ellison, A. Williams (eds), Eurachem/CITAC Guide CG4 : Eurachem/CITAC, Quantifying uncertainty in analytical measurement, 3^e édition, Eurachem, 2012, www.eurachem.org.

INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY, Use of the Terms “Recovery” and “Apparent Recovery” in Analytical Procedures, Pure Appl. Chem., vol. 74, n° 11, 2002, pp. 2201-2205.



**Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques**

Québec 