
**Aciers et fontes — Détermination de
la teneur en cuivre — Méthode par
spectrométrie d'absorption atomique
dans la flamme**

*Steel and cast iron — Determination of copper content — Flame
atomic absorption spectrometric method*

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO 4943:2022

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/3825c1ce-6173-471f-9fd6-a4455018d44f/iso-4943-2022>



iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO 4943:2022

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/3825c1ce-6173-471f-9fd6-a4455018d44f/iso-4943-2022>



DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT

© ISO 2022

Tous droits réservés. Sauf prescription différente ou nécessité dans le contexte de sa mise en œuvre, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie, ou la diffusion sur l'internet ou sur un intranet, sans autorisation écrite préalable. Une autorisation peut être demandée à l'ISO à l'adresse ci-après ou au comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office
Case postale 401 • Ch. de Blandonnet 8
CH-1214 Vernier, Genève
Tél.: +41 22 749 01 11
E-mail: copyright@iso.org
Web: www.iso.org

Publié en Suisse

Sommaire

Page

Avant-propos	iv
1 Domaine d'application	1
2 Références normatives	1
3 Termes et définitions	1
4 Principe	1
5 Réactifs	1
6 Appareillage	2
6.1 Spectromètre d'absorption atomique	2
6.1.1 Fidélité minimale	3
6.1.2 Limite de détection	3
6.1.3 Linéarité de l'étalonnage	3
6.1.4 Concentration caractéristique	3
6.2 Équipement auxiliaire	3
7 Prélèvement	3
8 Mode opératoire	3
8.1 Prise d'essai	4
8.2 Essai à blanc	4
8.3 Détermination	4
8.3.1 Préparation de la solution pour essai	4
8.3.2 Préparation des solutions d'étalonnage	4
8.3.3 Réglage et optimisation du spectromètre d'absorption atomique	6
8.3.4 Mesurages spectrométriques	7
8.4 Tracé de la courbe d'étalonnage	7
9 Expression des résultats	7
10 Fidélité	8
11 Rapport d'essais	8
Annexe A (normative) Procédures pour la détermination des critères instrumentaux	10
Annexe B (informative) Informations supplémentaires sur l'essai interlaboratoires international	13
Annexe C (informative) Représentation graphique des données de fidélité	15
Bibliographie	16

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 (IEC) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les procédures utilisées pour élaborer le présent document et celles destinées à sa mise à jour sont décrites dans les Directives ISO/IEC, Partie 1. Il convient, en particulier, de prendre note des différents critères d'approbation requis pour les différents types de documents ISO. Le présent document a été rédigé conformément aux règles de rédaction données dans les Directives ISO/IEC, Partie 2 (voir www.iso.org/directives).

L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence. Les détails concernant les références aux droits de propriété intellectuelle ou autres droits analogues identifiés lors de l'élaboration du document sont indiqués dans l'Introduction et/ou dans la liste des déclarations de brevets reçues par l'ISO (voir www.iso.org/brevets).

Les appellations commerciales éventuellement mentionnées dans le présent document sont données pour information, par souci de commodité, à l'intention des utilisateurs et ne sauraient constituer un engagement.

Pour une explication de la nature volontaire des normes, la signification des termes et expressions spécifiques de l'ISO liés à l'évaluation de la conformité, ou pour toute information au sujet de l'adhésion de l'ISO aux principes de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) concernant les obstacles techniques au commerce (OTC), voir www.iso.org/avant-propos.

Le présent document a été élaboré par le comité technique ISO/TC 17, *Acier*, sous-comité SC 1, *Méthodes de détermination de la composition chimique*, en collaboration avec le comité technique CEN/TC 459/SC 2, *Méthodes d'analyses chimiques pour le fer et l'acier*, du Comité européen de normalisation (CEN) conformément à l'Accord de coopération technique entre l'ISO et le CEN (Accord de Vienne).

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition (ISO 4943:1985), qui a fait l'objet d'une révision technique.

Les principales modifications sont les suivantes:

- extension de la fourchette de détermination;
- réorganisation d'un essai de fidélité;
- réévaluation des données de fidélité.

Il convient que l'utilisateur adresse tout retour d'information ou toute question concernant le présent document à l'organisme national de normalisation de son pays. Une liste exhaustive desdits organismes se trouve à l'adresse www.iso.org/fr/members.html.

Aciers et fontes — Détermination de la teneur en cuivre — Méthode par spectrométrie d'absorption atomique dans la flamme

1 Domaine d'application

Le présent document spécifie une méthode par spectrométrie d'absorption atomique dans la flamme pour la détermination du cuivre dans les aciers et les fontes.

Cette méthode est applicable aux teneurs en cuivre comprises entre 0,003 % (en masse) et 3,0 % (en masse).

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

ISO 648, *Verrerie de laboratoire — Pipettes à un volume*

ISO 1042, *Verrerie de laboratoire — Fioles jaugées à un trait*

ISO 3696, *Eau pour laboratoire à usage analytique — Spécification et méthodes d'essai*

ISO 14284, *Fontes et aciers — Prélèvement et préparation des échantillons pour la détermination de la composition chimique*

3 Termes et définitions

Aucun terme n'est défini dans le présent document.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <https://www.electropedia.org/>

4 Principe

Mise en solution d'une prise d'essai par les acides chlorhydrique, nitrique et perchlorique.

Nébulisation de la solution pour essai dans une flamme air/acétylène d'un spectromètre d'absorption atomique. Mesurage spectrométrique de l'absorption atomique de la raie spectrale à 324,7 nm ou 327,4 nm émise par une lampe à cathode creuse en cuivre.

NOTE D'autres sources de rayonnement appropriées peuvent également être utilisées.

5 Réactifs

Au cours de l'analyse, sauf spécification contraire, utiliser uniquement des réactifs de qualité analytique reconnue et uniquement de l'eau de qualité 2, comme spécifié dans l'ISO 3696.

5.1 Fer pur, à teneur en cuivre inférieure à 0,000 5 % (en masse) ou dont la teneur en cuivre est faible et connue.

5.2 Mélange d'acides chlorhydrique-et nitrique.

Mélanger trois volumes d'acide chlorhydrique (ρ environ 1,19 g/ml), un volume d'acide nitrique (ρ environ 1,40 g/ml) et deux volumes d'eau.

Préparer ce mélange immédiatement avant emploi.

5.3 Mélange d'acides chlorhydrique, nitrique et perchlorique.

Mélanger 20 ml d'acide chlorhydrique (ρ environ 1,19 g/ml) avec 55 ml d'acide nitrique (ρ environ 1,40 g/ml) et 75 ml d'acide perchlorique (ρ environ 1,54 g/ml).

NOTE L'acide perchlorique (ρ environ 1,67 g/ml) peut également être utilisé. 100 ml d'acide perchlorique (ρ environ 1,54 g/ml) équivalent à 79 ml d'acide perchlorique (ρ environ 1,67 g/ml).

5.4 Solution étalon de cuivre, 1 g/l.

Peser ($1,000 \pm 0,001$) g de cuivre [pureté > 99,95 % (en masse)]. L'introduire dans un bécher de 400 ml, ajouter 25 ml d'acide nitrique (ρ environ 1,40 g/ml, dilué 1 + 4) et couvrir d'un verre de montre. Chauffer modérément jusqu'à mise en solution complète. Laisser refroidir, transvaser quantitativement la solution dans une fiole jaugée de 1 000 ml, compléter au volume avec de l'eau et homogénéiser.

1 ml de cette solution étalon contient 1 mg de cuivre.

5.5 Solution étalon de cuivre, 20 mg/l.

Introduire 20,0 ml de la solution étalon (5.4) dans une fiole jaugée de 1 000 ml, compléter au volume avec de l'eau et homogénéiser.

1 ml de cette solution étalon contient 20 μ g de cuivre.

Préparer cette solution étalon immédiatement avant emploi.

6 Appareillage

Toute la verrerie jaugée doit être de classe A, conformément à l'ISO 648 ou à l'ISO 1042 selon le cas.

Toute la verrerie doit d'abord être lavée avec de l'acide chlorhydrique (ρ environ 1,19 g/ml, dilué 1 + 1), puis avec de l'eau. La quantité de cuivre présente dans les béchers et les fioles peut être vérifiée en mesurant l'absorption de l'eau distillée introduite dans la verrerie après le nettoyage avec de l'acide.

Du matériel courant de laboratoire doit être utilisé, en plus du matériel suivant.

6.1 Spectromètre d'absorption atomique

Le spectromètre doit être équipé d'une lampe à cathode creuse en cuivre et être alimenté en air et en acétylène suffisamment purs pour produire une flamme pauvre en combustible, claire et stable, et exempts d'eau, d'huile et de cuivre.

NOTE D'autres sources de rayonnement appropriées peuvent également être utilisées.

Le spectromètre d'absorption atomique utilisé est satisfaisant si, après optimisation conformément au 8.3.4, la limite de détection et la concentration caractéristique sont raisonnablement en accord avec les valeurs données par le fabricant et s'il satisfait aux critères de fidélité donnés du 6.1.1 au 6.1.3.

Il convient également que l'instrument soit conforme aux exigences de performance supplémentaires décrites en 6.1.4.

6.1.1 Fidélité minimale

Utiliser les procédures décrites à l'[Annexe A](#). Calculer l'écart-type de 10 mesurages de l'absorbance de la solution d'étalonnage la plus concentrée. L'écart-type ne doit pas excéder 1,0 % d'absorbance moyenne.

Calculer l'écart-type de 10 mesurages de l'absorbance de la solution d'étalonnage la moins concentrée (excepté le terme zéro). Cet écart-type ne doit pas excéder 0,5 % d'absorbance moyenne de la solution d'étalonnage la plus concentrée.

6.1.2 Limite de détection

Utiliser les procédures décrites à l'[Annexe A](#). La limite de détection est un nombre, exprimé en unités de concentration (ou quantité) qui représente le plus faible niveau de concentration (ou quantité) d'un élément dont il peut être déterminé qu'il est statistiquement différent d'un blanc analytique.

La limite de détection du cuivre dans une matrice similaire à la solution pour essai finale doit être meilleure que 0,05 µg/ml.

6.1.3 Linéarité de l'étalonnage

Utiliser les procédures décrites à l'[Annexe A](#). La pente de la courbe d'étalonnage correspondant aux 20 % des valeurs supérieures du domaine de concentration (exprimée en variation d'absorbance) ne doit pas être inférieure à 0,7 fois la valeur de la pente correspondant aux 20 % des valeurs inférieures du domaine de concentration (exprimée en variation d'absorbance) déterminée de la même manière.

Pour les instruments ayant des étalonnages automatiques, utilisant deux solutions d'étalonnage ou plus, les exigences susmentionnées pour la linéarité de la courbe d'étalonnage doivent être satisfaites, par lecture des absorbances, avant l'analyse.

6.1.4 Concentration caractéristique

Utiliser les procédures décrites à l'[Annexe A](#). La concentration caractéristique en cuivre dans une matrice similaire à la solution pour essai finale doit être supérieure à 0,08 µg/ml à 324,7 nm.

6.2 Equipement auxiliaire

L'expansion d'échelle peut être utilisée tant que le bruit observé est supérieur à l'erreur de lecture et elle est toujours recommandée pour des absorbances inférieures à 0,1. Si l'expansion d'échelle doit être utilisée et si l'instrument ne peut pas lire la valeur du coefficient d'expansion d'échelle, la valeur peut être calculée en mesurant une solution appropriée avec et sans expansion d'échelle puis en divisant le signal obtenu.

7 Prélèvement

Effectuer le prélèvement conformément à l'ISO 14284 ou aux normes nationales appropriées pour les aciers et les fontes.

8 Mode opératoire

AVERTISSEMENT — Les vapeurs d'acide perchlorique peuvent produire des explosions en présence d'ammoniaque, de vapeurs nitreuses ou de matières organiques en général. Toutes les évaporations doivent être effectuées sous des hottes de laboratoire adaptées à l'utilisation d'acide perchlorique.

S'assurer que le système de nébulisation et le système de drainage soient nettoyés de façon à être exempts d'acide perchlorique après avoir été utilisés.

8.1 Prise d'essai

Peser, à 0,001 g près, environ 0,50 g d'échantillon pour essai.

8.2 Essai à blanc

Parallèlement à la détermination et en suivant le même mode opératoire, effectuer un essai à blanc en utilisant les mêmes quantités de tous les réactifs, en incluant le fer pur (5.1) au lieu de la prise d'essai.

8.3 Détermination

8.3.1 Préparation de la solution pour essai

8.3.1.1 Mise en solution de la prise d'essai

Introduire la prise d'essai (8.1) dans un bécher de 250 ml. Ajouter, par petites portions, 20 ml du mélange d'acides (5.3) pour les échantillons difficilement solubles dans le mélange acide (5.3), dissoudre d'abord dans 10 ml du mélange acide (5.2) avant d'ajouter 20 ml du mélange acide (5.3), couvrir le bécher d'un verre de montre et chauffer modérément jusqu'à cessation de l'action de l'acide. Évaporer jusqu'à émission abondante de fumées blanches d'acide perchlorique. Continuer le chauffage à fumées à une température appropriée afin de maintenir un reflux stable de fumées blanches d'acide perchlorique sur les parois du bécher jusqu'à cristallisation des sels.

Laisser refroidir, ajouter 25 ml d'eau et chauffer modérément pour dissoudre les sels. Laisser de nouveau refroidir et transvaser la solution pour essai quantitativement dans une fiole jaugée de 100 ml. Compléter au volume avec de l'eau et homogénéiser.

Filtrer par décantation sur un papier filtre de texture moyenne, sec, afin d'éliminer tous les résidus ou précipités, par exemple le graphite, la silice ou l'acide tungstique, et recueillir le filtrat dans un bécher sec après avoir jeté les premières fractions.

8.3.1.2 Dilution de la solution pour essai

Selon la teneur en cuivre présumée dans la prise d'essai, préparer la solution pour essai conformément à a), b) ou c), comme suit:

- a) Si la teneur en cuivre présumée est inférieure ou égale à 0,1 % (en masse), utiliser le filtrat (voir 8.3.1.1) non dilué.
- b) Si la teneur en cuivre présumée est comprise entre 0,1 % (en masse) et 1,0 % (en masse), introduire 10,0 ml de la solution pour essai dans une fiole jaugée de 100 ml, compléter au volume avec de l'eau et homogénéiser.
- c) Si la teneur en cuivre présumée est comprise entre 1,0 % (en masse) et 3,0 % (en masse), introduire 5,0 ml de la solution pour essai dans une fiole jaugée de 250 ml, compléter au volume avec de l'eau et homogénéiser.

S'il est nécessaire de diluer la solution pour essai, l'essai à blanc (8.2) doit être dilué de la même manière.

8.3.2 Préparation des solutions d'étalonnage

8.3.2.1 Dissolution du fer pur

Introduire (5,00 ± 0,01) g de fer pur (5.1) dans un bécher de 500 ml. Ajouter, par petites portions, 200 ml du mélange d'acides (5.3) et chauffer modérément jusqu'à ce que la mise en solution soit complète.

Évaporer jusqu'à émission abondante de fumées blanches d'acide perchlorique. Continuer l'émission de fumées à une température appropriée afin de maintenir un reflux stable des fumées blanches d'acide perchlorique sur les parois du bécher jusqu'à cristallisation des sels.

Laisser refroidir, ajouter 100 ml d'eau et chauffer modérément pour dissoudre les sels. Laisser de nouveau refroidir et transvaser la solution quantitativement dans une fiole jaugée de 500 ml. Compléter au volume avec de l'eau et homogénéiser.

8.3.2.2 Teneur en cuivre jusqu'à 0,1 % (en masse)

Dans une série de fioles jaugées de 100 ml, introduire 50,0 ml de la solution de fer (8.3.2). A l'aide d'une burette ou d'une pipette, ajouter les volumes de la solution étalon de cuivre (5.5) indiqués dans le [Tableau 1](#). Compléter au volume avec de l'eau et homogénéiser.

Tableau 1 — Solutions d'étalonnage pour les teneurs en cuivre inférieures ou égales à 0,1 % (en masse)

Volume de la solution étalon de cuivre (5.5) ml	Masse de cuivre mg	Teneur en cuivre correspondante de l'échantillon pour essai % (en masse)
0 ^a	0	0
0,5	0,01	0,002
2,5	0,05	0,010
5,0	0,10	0,020
10,0	0,20	0,040
15,0	0,30	0,060
20,0	0,40	0,080
25,0	0,50	0,100

^a Terme zéro.

8.3.2.3 Teneurs en cuivre comprises entre 0,1 % (en masse) et 1,0 % (en masse)

Dans une série de fioles jaugées de 100 ml, introduire 5,0 ml de la solution de fer (8.3.2). A l'aide d'une burette ou d'une pipette, ajouter les volumes de la solution étalon de cuivre (5.5) indiqués dans le [Tableau 2](#). Compléter au volume avec de l'eau et homogénéiser.

Tableau 2 — Solutions d'étalonnage pour les teneurs en cuivre comprises entre 0,1 % (en masse) et 1,0 % (en masse)

Volume de la solution étalon de cuivre (5.5) ml	Masse de cuivre mg	Teneur en cuivre correspondante de l'échantillon pour essai % (en masse)
0 ^a	0	0
2,5	0,05	0,10
5,0	0,10	0,20
10,0	0,20	0,40
15,0	0,30	0,60
20,0	0,40	0,80
25,0	0,50	1,00

^a Terme zéro.

8.3.2.4 Teneurs en cuivre comprises entre 1,0 % (en masse) et 3,0 % (en masse)

Dans une série de fioles jaugées de 100 ml, introduire 1,0 ml de la solution de fer (8.3.2). A l'aide d'une burette ou d'une pipette, ajouter les volumes de la solution étalon de cuivre (5.5) indiqués dans le [Tableau 3](#). Compléter au volume avec de l'eau et homogénéiser.

Tableau 3 — Solutions d'étalonnage pour les teneurs en cuivre comprises entre 1,0 % (en masse) et 3,0 % (en masse)

Volume de la solution étalon de cuivre (5.5) ml	Masse de cuivre mg	Teneur en cuivre correspondante de l'échantillon pour essai % (en masse)
0 ^a	0	0
5,0	0,10	1,0
7,5	0,15	1,5
10,0	0,20	2,0
12,5	0,25	2,5
15,0	0,30	3,0

^a Terme zéro.

8.3.3 Réglage et optimisation du spectromètre d'absorption atomique

Installer la lampe à cathode creuse en cuivre (voir [6.1](#)) sur le spectromètre d'absorption atomique ([6.1](#)), mettre l'appareil sous tension et attendre qu'il se stabilise.

Régler la longueur d'onde à 324,7 nm pour les teneurs en cuivre pour tout le domaine d'application ou à 327,4 nm pour les teneurs en cuivre comprises entre 0,1 % et 3,0 % (en masse) à la valeur minimale d'absorbance, si possible.

En suivant les instructions du fabricant, installer un brûleur air/acétylène, allumer la flamme et laisser la température du brûleur se stabiliser.

Régler à zéro la valeur d'absorbance à l'aide du terme zéro ([8.3.2.1](#), [8.3.2.2](#) ou [8.3.2.3](#)).

Régler l'amortissement ou le temps d'intégration afin d'obtenir un signal suffisamment régulier pour satisfaire aux critères de fidélité donnés du [6.1.1](#) au [6.1.4](#).

En suivant scrupuleusement les instructions du fabricant concernant le débit minimal d'acétylène, nébuliser alternativement la solution d'étalonnage la plus concentrée et le terme zéro, régler le débit des gaz et la position du brûleur (horizontalement, verticalement et latéralement) jusqu'à ce que la différence d'absorbance entre les solutions d'étalonnage atteigne une valeur maximale.

NOTE D'autres sources de rayonnement appropriées peuvent également être utilisées.

AVERTISSEMENT — Les recommandations du fabricant doivent être scrupuleusement respectées; une attention particulière est attirée sur les points de sécurité suivants:

- la nature explosive de l'acétylène et les réglementations relatives à son utilisation;
- la nécessité de protéger les yeux de l'opérateur contre le rayonnement ultraviolet au moyen de verres teintés;
- la nécessité de préserver des dépôts la tête du brûleur, car un brûleur sévèrement obturé peut provoquer un retour de flamme;
- la nécessité de s'assurer que le piège à liquide est rempli d'eau;

- e) la nécessité de nébuliser systématiquement de l'eau entre les solutions pour essai, la solution à blanc et/ou les solutions d'étalonnage.

Évaluer les critères indiqués en [6.1.1](#) à [6.1.3](#) et les exigences de performance supplémentaires données en [6.1.4](#) afin de s'assurer que l'appareil est adapté à la détermination.

8.3.4 Mesurages spectrométriques

8.3.4.1 Mesurage spectrométrique des solutions d'étalonnage

Nébuliser successivement dans la flamme la série concernée de solutions d'étalonnage ([8.3.2.1](#), [8.3.2.2](#) ou [8.3.2.3](#)) en fonction de la teneur présumée en cuivre et mesurer l'absorbance de chaque solution. Veiller à maintenir constant le débit de nébulisation tout au long de l'acquisition de la courbe d'étalonnage. Nébuliser de l'eau à travers le brûleur après chaque mesure.

NOTE Pour certains types d'appareillage, il est préférable de remplacer l'eau par une solution contenant les réactifs d'attaque dans les mêmes concentrations que celles utilisées dans les solutions pour essai.

8.3.4.2 Mesurage spectrométrique des solutions pour essai

Mesurer l'absorbance de la solution d'essai à blanc ([8.2](#)) et répéter les mesurages de la solution pour essai ([8.3.1](#)). Nébuliser les solutions d'étalonnage à intervalles fréquents pendant la mesure d'une série de déterminations.

8.4 Tracé de la courbe d'étalonnage

Il est nécessaire d'établir une nouvelle courbe d'étalonnage pour chaque série de déterminations, et pour chaque gamme de teneurs en cuivre.

Utiliser un logiciel approprié du spectromètre ou un ordinateur autonome pour les calculs de régression, ou tracer un graphique.

Calculer l'absorbance nette de chaque solution d'étalonnage en soustrayant l'absorbance de la solution d'étalonnage zéro (terme zéro).

Tracer les courbes d'étalonnage en représentant les valeurs d'absorbance nette des solutions d'étalonnage en fonction de la concentration en cuivre, en microgrammes par millilitre.

9 Expression des résultats

Convertir l'absorbance de la solution pour essai et de l'essai à blanc en microgrammes par millilitre de cuivre, au moyen de la courbe d'étalonnage (voir [8.4](#)).

La teneur en cuivre w_{Cu} , exprimée en pourcentage en masse, est donnée par la [Formule \(1\)](#) :

$$w_{\text{Cu}} = \frac{(\rho_{\text{Cu},1} - \rho_{\text{Cu},0}) \times D \times 100}{10^6} \times \frac{100}{m}$$

$$= \frac{(\rho_{\text{Cu},1} - \rho_{\text{Cu},0}) \times D}{100m} \quad (1)$$

où

m est la masse de la prise d'essai, exprimée en grammes;

$\rho_{\text{Cu},1}$ est la concentration en cuivre de la solution pour essai déduite de la courbe d'étalonnage, exprimée en microgrammes par millilitre ([8.4](#));