

---

---

**Mesurage de la radioactivité dans  
l'environnement — Sol —**

Partie 3:  
**Méthode d'essai des radionucléides  
émetteurs gamma par spectrométrie  
gamma**

*Measurement of radioactivity in the environment — Soil —*

*Part 3: Test method of gamma-emitting radionuclides using gamma-ray spectrometry*

[ISO 18589-3:2023](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/647e4cbe-e63d-42c9-adf7-81218c49ff48/iso-18589-3-2023)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/647e4cbe-e63d-42c9-adf7-81218c49ff48/iso-18589-3-2023>



iTeh STANDARD PREVIEW  
(standards.iteh.ai)

ISO 18589-3:2023

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/647e4cbe-e63d-42c9-adf7-81218c49ff48/iso-18589-3-2023>



**DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT**

© ISO 2023

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](mailto:copyright@iso.org)  
Web: [www.iso.org](http://www.iso.org)

Publié en Suisse

## Sommaire

Page

<b>Avant-propos</b> .....	<b>v</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>vi</b>
<b>1</b> <b>Domaine d'application</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b> <b>Références normatives</b> .....	<b>1</b>
<b>3</b> <b>Termes, définitions et symboles</b> .....	<b>2</b>
3.1    Termes et définitions .....	2
3.2    Symboles .....	2
<b>4</b> <b>Principe</b> .....	<b>3</b>
<b>5</b> <b>Sources de référence</b> .....	<b>4</b>
5.1    Source(s) utilisée(s) pour l'étalonnage en énergie .....	4
5.2    Source(s) de référence pour l'étalonnage en rendement .....	4
5.2.1    Généralités .....	4
5.2.2    Sources de référence pour les chaînes de spectrométrie gamma de laboratoire .....	4
5.2.3    Sources de référence utilisées avec des méthodes numériques .....	5
<b>6</b> <b>Équipement de spectrométrie gamma</b> .....	<b>5</b>
6.1    Description générale .....	5
6.2    Types de détecteurs .....	6
6.3    Alimentation haute tension .....	6
6.4    Préamplificateur .....	6
6.5    Cryostat ou refroidisseur électrique .....	6
6.6    Blindage .....	6
6.7    Électronique d'acquisition analogique ou numérique .....	7
6.7.1    Généralités .....	7
6.7.2    Électronique analogique .....	7
6.7.3    Système électronique numérique de traitement des signaux (DSP) .....	7
6.8    Ordinateur avec logiciels et matériels périphériques associés .....	8
<b>7</b> <b>Données relatives à la décroissance nucléaire</b> .....	<b>8</b>
<b>8</b> <b>Conteneur d'échantillon</b> .....	<b>9</b>
<b>9</b> <b>Mode opératoire</b> .....	<b>9</b>
9.1    Conditionnement des échantillons pour les besoins du mesurage .....	9
9.2    Niveau de bruit de fond du laboratoire .....	10
9.3    Étalonnage .....	10
9.3.1    Étalonnage en énergie .....	10
9.3.2    Étalonnage en rendement .....	11
9.4    Corrections requises pour les mesurages des radionucléides naturels .....	12
9.5    Contrôle de la qualité .....	13
<b>10</b> <b>Expression des résultats</b> .....	<b>13</b>
10.1    Calcul de l'activité massique .....	13
10.1.1    Généralités .....	13
10.1.2    Corrections du temps mort et des empilements (voir l'ISO 20042) .....	13
10.1.3    Corrections de décroissance .....	14
10.1.4    Correction de l'effet d'auto-absorption .....	14
10.1.5    Somme des coïncidences vraies .....	15
10.2    Incertitude-type .....	17
10.3    Seuil de décision .....	17
10.4    Limite de détection .....	18
10.5    Limites de l'intervalle élargi .....	18
10.5.1    Limites de l'intervalle élargi probabilistiquement symétrique .....	18
10.5.2    Intervalle élargi le plus court .....	18

10.6	Corrections relatives aux contributions d'autres radionucléides et du bruit de fond .....	19
10.6.1	Généralités.....	19
10.6.2	Contribution des autres radionucléides.....	19
10.6.3	Contribution du bruit de fond.....	20
<b>11</b>	<b>Rapport d'essai .....</b>	<b>21</b>
<b>Annexe A</b> (informative)	<b>Analyse par spectrométrie gamma de radionucléides naturels présents dans des échantillons de sol.....</b>	<b>22</b>
<b>Annexe B</b> (informative)	<b>Correction de l'auto-atténuation<sup>[21][22]</sup> .....</b>	<b>28</b>
<b>Annexe C</b> (informative)	<b>Sommation des coïncidences vraies .....</b>	<b>31</b>
<b>Annexe D</b> (informative)	<b>Calcul de l'activité massique à partir d'un spectre de rayonnement gamma par soustraction d'un bruit de fond linéaire.....</b>	<b>33</b>
<b>Bibliographie</b> .....		<b>35</b>

iTeh STANDARD PREVIEW  
(standards.iteh.ai)

[ISO 18589-3:2023](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/647e4cbe-e63d-42c9-adf7-81218c49ff48/iso-18589-3-2023)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/647e4cbe-e63d-42c9-adf7-81218c49ff48/iso-18589-3-2023>

## 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](http://www.iso.org/directives)).

L'ISO attire l'attention sur le fait que la mise en application du présent document peut entraîner l'utilisation d'un ou de plusieurs brevets. L'ISO ne prend pas position quant à la preuve, à la validité et à l'applicabilité de tout droit de propriété revendiqué à cet égard. À la date de publication du présent document, l'ISO n'avait pas reçu notification qu'un ou plusieurs brevets pouvaient être nécessaires à sa mise en application. Toutefois, il y a lieu d'avertir les responsables de la mise en application du présent document que des informations plus récentes sont susceptibles de figurer dans la base de données de brevets, disponible à l'adresse [www.iso.org/brevets](http://www.iso.org/brevets). L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié tout ou partie de tels droits de brevet.

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](http://www.iso.org/avant-propos).

Le présent document a été élaboré par le comité technique ISO/TC 85, *Énergie nucléaire, technologies nucléaires et radioprotection*, sous-comité SC 2, *Radioprotection*.

Cette troisième édition annule et remplace la deuxième édition (ISO 18589-3:2015), qui a fait l'objet d'une révision technique. La principale modification est la suivante:

— correction de la [Formule \(4\)](#).

Une liste de toutes les parties de la série ISO 18589 se trouve sur le site Web de l'ISO.

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](http://www.iso.org/fr/members.html).

## Introduction

Tout individu est exposé à des rayonnements naturels. Les sources naturelles de rayonnement sont les rayons cosmiques et les substances radioactives naturellement présentes dans la terre, la faune et la flore, incluant le corps humain. À cette exposition naturelle aux rayonnements s'ajoute celle issue des activités anthropiques mettant en œuvre des rayonnements et des substances radioactives. Certaines de ces activités, dont l'exploitation minière et l'utilisation de minerais contenant des matières radioactives naturelles (MRN) ainsi que la production d'énergie par combustion de charbon contenant ces substances, ne font qu'augmenter l'exposition des sources naturelles de rayonnement. Les centrales électriques nucléaires et autres installations nucléaires emploient des matières radioactives et génèrent des effluents et des déchets radioactifs dans le cadre de leur exploitation et leur déclassement. L'utilisation de matières radioactives dans les secteurs de l'industrie, de l'agriculture et de la recherche connaît un essor mondial.

Toutes ces activités anthropiques provoquent des expositions aux rayonnements qui ne représentent qu'une petite fraction du niveau moyen mondial d'exposition naturelle. Dans les pays développés, l'utilisation des rayonnements à des fins médicales représente la plus importante source anthropique d'exposition aux rayonnements et qui, de plus, ne cesse d'augmenter. Ces applications médicales englobent la radiologie diagnostique, la radiothérapie, la médecine nucléaire et la radiologie interventionnelle.

L'exposition aux rayonnements découle également d'activités professionnelles. Elle est subie par les employés des secteurs de l'industrie, de la médecine et de la recherche qui utilisent des rayonnements ou des substances radioactives, ainsi que par les passagers et le personnel navigant pendant les voyages aériens. Le niveau moyen des expositions professionnelles est généralement inférieur au niveau moyen mondial des expositions naturelles aux rayonnements (voir la Référence [1]).

Du fait de l'utilisation croissante des rayonnements, le risque pour la santé et les préoccupations du public augmentent. Par conséquent, toutes ces expositions sont régulièrement évaluées afin:

- de mieux connaître les niveaux mondiaux et les tendances temporelles de l'exposition du public et des salariés;
- d'évaluer les composantes de l'exposition et de chiffrer leur importance relative;
- d'identifier de nouvelles problématiques qui peuvent mériter une plus grande attention et une surveillance. Alors que les doses reçues par les travailleurs sont le plus souvent mesurées directement, celles reçues par le public sont habituellement évaluées par des méthodes indirectes qui consistent à exploiter les résultats des mesurages de la radioactivité de déchets, effluents et/ou échantillons environnementaux.

Afin de garantir que les données obtenues dans le cadre de programmes de surveillance de la radioactivité permettent de répondre à l'objectif de l'évaluation, il est primordial que les parties prenantes (par exemple, les exploitants de site nucléaire, les organismes de réglementation et les autorités locales) conviennent des méthodes et modes opératoires appropriés pour obtenir des échantillons représentatifs ainsi que pour la manipulation, le stockage, la préparation et le mesurage des échantillons pour essai. Il est également nécessaire de procéder systématiquement à une évaluation de l'incertitude globale de mesure. Pour toute décision en matière de santé publique s'appuyant sur des mesures de la radioactivité, il est capital que les données soient fiables, comparables et adéquates par rapport à l'objectif de l'évaluation; c'est pourquoi les normes internationales spécifiant des méthodes d'essai des radionucléides qui ont été vérifiées par des essais et validées sont un outil important dans l'obtention de tels résultats de mesure. L'application de normes permet également de garantir la comparabilité des résultats d'essai dans le temps et entre différents laboratoires d'essai. Les laboratoires les appliquent pour démontrer leurs compétences techniques et pour passer les essais d'aptitude lors d'e comparaisons interlaboratoires, deux conditions préalables à l'obtention d'une accréditation nationale.

À l'heure actuelle, plus d'une centaine de Normes internationales sont à la disposition des laboratoires d'essai pour leur permettre de mesurer les radionucléides dans différentes matrices.

Les normes générales aident les laboratoires d'essai à maîtriser le processus de mesure en définissant les exigences et méthodes générales d'étalonnage des appareils et de validation des techniques. Ces normes viennent à l'appui de normes spécifiques qui décrivent les méthodes d'essai à mettre en œuvre par le personnel, par exemple pour différents types d'échantillons. Les normes spécifiques couvrent les méthodes d'essai relatives aux:

- radionucléides naturels (le  $^{40}\text{K}$ , le  $^3\text{H}$ , le  $^{14}\text{C}$  et les radionucléides des familles radioactives du thorium et de l'uranium, notamment le  $^{226}\text{Ra}$ , le  $^{228}\text{Ra}$ , le  $^{234}\text{U}$ , le  $^{238}\text{U}$  et le  $^{210}\text{Pb}$ ) qui peuvent être retrouvés dans des matériaux issus de sources naturelles ou qui peuvent être émis par des procédés technologiques impliquant des matières radioactives naturelles (par exemple l'exploitation minière et le traitement des sables minéraux ou la production et l'utilisation d'engrais phosphatés);
- radionucléides anthropiques, tels que les éléments transuraniens (américium, plutonium, neptunium, curium), le  $^3\text{H}$ , le  $^{14}\text{C}$ , le  $^{90}\text{Sr}$  et les radionucléides émetteurs gamma retrouvés dans les déchets, les effluents liquides et gazeux, dans les matrices environnementales (telles que l'eau, l'air, le sol, le biote), dans l'alimentation et dans les aliments pour animaux à la suite de rejets autorisés dans l'environnement, d'une contamination par des retombées radioactives engendrées par l'explosion dans l'atmosphère de dispositifs nucléaires et d'une contamination par des retombées radioactives résultant d'accidents tels que ceux qui se sont produits à Tchernobyl et à Fukushima.

La fraction du débit de dose d'exposition au rayonnement bruit de fond, due aux rayonnements environnementaux, principalement aux rayonnements gamma, qu'une personne reçoit est très variable et dépend de plusieurs facteurs tels que la radioactivité de la roche locale et du sol local, la nature des matériaux de construction et la construction des bâtiments dans lesquels les personnes vivent ou travaillent.

Une détermination fiable de l'activité massique des radionucléides émetteurs gamma dans différentes matrices est nécessaire pour évaluer le niveau potentiel d'exposition des êtres humains, vérifier la conformité à la législation en matière d'environnement et de radioprotection ou donner des recommandations visant à limiter les risques sur la santé. Les radionucléides émetteurs gamma sont également utilisés en tant que traceurs en biologie, médecine, physique, chimie et ingénierie. Un mesurage précis de l'activité des radionucléides est également nécessaire pour la sécurité intérieure et dans le cadre du traité de non-prolifération (T.N.P.).

Le présent document doit être utilisé dans le cadre d'un système de management de l'assurance qualité (ISO/IEC 17025).

L'ISO 18589 est publiée en plusieurs parties, à utiliser ensemble ou séparément selon les besoins. Elles sont complémentaires entre elles et s'adressent aux personnes chargées de déterminer la radioactivité présente dans les sols, les socles rocheux et le minerai (MRN ou MRNAT). Les deux premières parties sont générales et décrivent la définition des programmes et des techniques d'échantillonnage, des méthodes de traitement général d'échantillons dans le laboratoire (ISO 18589-1), ainsi que la stratégie d'échantillonnage et la technique d'échantillonnage des échantillons de sol, la manipulation et la préparation des échantillons de sol (ISO 18589-2). L'ISO 18589-3, l'ISO 18589-4 et l'ISO 18589-5 traitent de méthodes d'essai propres à un nucléide pour quantifier l'activité massique des radionucléides émetteurs gamma (ISO 18589-3 et ISO 20042), des isotopes de plutonium (ISO 18589-4) et  $^{90}\text{Sr}$  (ISO 18589-5) des échantillons de sol. L'ISO 18589-6 traite des mesurages non spécifiques pour quantifier rapidement des activités alpha globale ou bêta globale et l'ISO 18589-7 décrit un mesurage in situ de radionucléides émetteurs gamma.

Les méthodes d'essai décrites dans les normes ISO 18589-3 à ISO 18589-6 peuvent également être utilisées pour mesurer les radionucléides dans une boue, dans un sédiment, dans un matériau de construction et dans des produits de construction en suivant un mode opératoire d'échantillonnage approprié.

Le présent document fait partie d'un ensemble de Normes internationales traitant du mesurage de la radioactivité dans l'environnement.



# Mesurage de la radioactivité dans l'environnement — Sol —

## Partie 3: Méthode d'essai des radionucléides émetteurs gamma par spectrométrie gamma

### 1 Domaine d'application

Le présent document spécifie l'identification et le mesurage de l'activité d'un grand nombre de radionucléides émetteurs gamma, dans des sols, par spectrométrie gamma. Cette méthode non destructive applicable à des échantillons de grand volume (jusqu'à 3 l) permet de déterminer, par un seul mesurage, tous les émetteurs  $\gamma$  présents dont l'énergie des photons est comprise entre 5 keV et 3 MeV.

La méthode d'essai générique et les principes fondamentaux d'utilisation de la spectrométrie gamma sont décrits dans l'ISO 20042.

Le présent document peut être utilisé par les laboratoires d'essai réalisant des mesures de radioactivité en routine, car la majorité des radionucléides émetteurs gamma est caractérisée par des raies d'émission gamma entre 40 keV et 2 MeV.

Cette méthode peut être mise en œuvre en utilisant un germanium ou un autre type de détecteur d'une résolution supérieure à 5 keV.

Le présent document a pour objet les méthodes et les pratiques de détermination de l'activité des radionucléides émetteurs gamma présents dans les sols, notamment dans les roches provenant du socle rocheux et de minerai, les matériaux et les produits de construction, les poteries, etc. Ces sols et matériaux contiennent des matières radioactives naturelles (MRN), ou sont le résultats de procédés technologiques mettant en œuvre des matières radioactives naturelles améliorées technologiquement (MRNAT), telles que l'exploitation minière et le traitement des sables minéraux, la production et l'utilisation d'engrais phosphatés, ainsi que les boues et les sédiments. Utilisée en général dans un but de radioprotection, cette méthode de détermination de l'activité des radionucléides émetteurs gamma est parfaitement adaptée à la surveillance de l'environnement et à l'inspection d'un site et permet, en cas d'accident, une évaluation rapide du niveau de radioactivité gamma. Elle peut concerner les sols de jardins ou des terres agricoles, les sols de sites urbains ou industriels pouvant contenir des débris de matériaux de construction, ainsi que les sols qui n'ont pas été modifiés par des activités humaines.

Lorsque la caractérisation radiologique d'un matériau non tamisé supérieur à 200  $\mu\text{m}$  ou à 250  $\mu\text{m}$ , de nature pétrographique ou d'origine anthropogénique, tels que des débris de matériaux de construction, est nécessaire, ce matériau peut être broyé afin d'obtenir un échantillon homogène pour les essais décrits dans l'ISO 18589-2.

### 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 et sont indispensables pour son application. 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 10703, *Qualité de l'eau — Radionucléides émetteurs gamma — Méthode d'essai par spectrométrie gamma à haute résolution*

ISO 11074, *Qualité du sol — Vocabulaire*

ISO/IEC 17025, *Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais*

ISO 18589-1, *Mesurage de la radioactivité dans l'environnement — Sol — Partie 1: Lignes directrices générales et définitions*

ISO 20042:2019, *Mesurage de la radioactivité — Radionucléides émetteurs gamma — Méthode d'essai générique par spectrométrie gamma*

ISO 80000-10, *Grandeurs et unités — Partie 10: Physique atomique et nucléaire*

Guide ISO/IEC 98-1, *Incertitude de mesure — Partie 1: Introduction à l'expression de l'incertitude de mesure*

### 3 Termes, définitions et symboles

#### 3.1 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de l'ISO 10703, l'ISO 11074, l'ISO 18589-1, l'ISO 20042 et l'ISO 80000-10 s'appliquent.

#### 3.2 Symboles

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de l'ISO 10703, l'ISO 11074, l'ISO 18589-1, l'ISO 20042 et l'ISO 80000-10 s'appliquent.

Symbole	Signification	Unité
$A$	Activité de chaque radionucléide présent dans la source d'étalonnage, au moment de l'étalonnage	Bq
$a, a_c$	Activité massique de chaque radionucléide, sans et avec correction	Bq·kg <sup>-1</sup>
$\varepsilon_E$	Rendement du détecteur à l'énergie $E$ , avec la géométrie de mesure utilisée	
$f_E$	Facteur de correction incluant toutes les corrections nécessaires	
$f_{att}(E)$	Facteur de correction de l'auto-atténuation à l'énergie photonique $E$	
$F_{att}(E)_{\text{échantillon}}$ $F_{att}(E)_{\text{étalon}}$	Facteur d'atténuation, à l'énergie photonique $E$ , de l'échantillon et de l'étalon, respectivement	
$f_d$	Facteur de correction de la décroissance pour une date de référence	
$f_{cl,E}$	Facteur de correction des pertes de comptage par coïncidence (effets de sommation)	
$f_{su,E}$	Facteur de correction des pics sommes	
$f_{dt\ pu,E}$	Facteur de correction du temps mort et de l'empilement	
$h$	Hauteur de l'échantillon dans le conteneur	cm
$\lambda$	Constante de désintégration de chaque radionucléide	s <sup>-1</sup>
$\mu_m(E)$	Coefficient d'atténuation massique à l'énergie photonique $E$	cm <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup>
$\mu_{\text{échantillon}}(E),$ $\mu_{\text{étalon}}(E)$	Coefficient d'atténuation linéique, à l'énergie photonique $E$ , de l'échantillon et de l'étalon, respectivement	cm <sup>-1</sup>
$n_{N,E}, n_{N0,E}, n_{Ns,E}$	Nombre de coups dans l'aire nette du pic, à l'énergie $E$ , respectivement dans le spectre de l'échantillon pour essai, le spectre du bruit de fond et le spectre d'étalonnage	
$n_{N,E}^T$	Nombre théorique de coups dans l'aire nette du pic, à l'énergie $E$	

Symbole	Signification	Unité
$n_{g,E}, n_{g0,E}, n_{gs,E}$	Nombre de coups dans l'aire brute du pic, à l'énergie $E$ , respectivement dans le spectre de l'échantillon pour essai, le spectre du bruit de fond et le spectre d'étalonnage	
$n_{b,E}, n_{b0,E}, n_{bs,E}$	Nombre de coups du fond continu sous le pic, à l'énergie $E$ , respectivement dans le spectre de l'échantillon pour essai, le spectre du bruit continu et le spectre d'étalonnage	
$P_E$	Probabilité d'émission d'un rayon gamma d'énergie $E$ de chaque radionucléide, par décroissance	
$\rho$	Masse volumique apparente de l'échantillon, en grammes par centimètre cube	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
$S$	Section de surface	
$t_g$	Temps de comptage du spectre de l'échantillon pour essai	s
$t_0$	Temps de comptage du spectre du bruit de fond	s
$t_i$	Intervalle de temps compris entre le temps de référence et le début de la mesure	s
$t_S$	Temps de comptage du spectre d'étalonnage	s
$u(a), u(a_c)$	Incertitude-type associée au résultat du mesurage (sans et avec corrections)	$\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$
$u_{\text{rel}}$	Incertitude relative	
$u_c$	Incertitude composée	
$U$	Incertitude élargie calculée avec $k = 2$	$\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$
$x$	Épaisseur de l'unité	cm
$X$	Épaisseur de l'échantillon traversé par le flux de photons, qui correspond à la hauteur de remplissage de l'échantillon dans le conteneur de mesurage	cm
$w_i$	Fraction massique de l'élément $i$ (pas d'unité)	
$a^*, a_c^*$	Seuil de décision, sans et avec corrections	$\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$
$a^\#, a_c^\#$	Limite de détection, sans et avec corrections	$\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$
$a^{<}, a^{>}$	Limites basse et haute de l'intervalle élargi probabilistiquement symétrique	$\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$
$a^{<}, a^{>}$	Limites basse et haute de l'intervalle élargi le plus court	$\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$
$k_p$	Quantile de la loi normale centrée réduite pour la probabilité $p$ (par exemple $p = 1 - \alpha, 1 - \beta$ or $1 - \gamma/2$ )	
$k_q$	Quantile de la loi normale centrée réduite pour la probabilité $q$ (par exemple $q = 1 - \omega \cdot \gamma/2$ )	
$\phi$	Fonction de distribution de la loi normale centrée réduite	
$\omega$	Quantité auxiliaire	

## 4 Principe

Les rayons gamma produisent des paires électron-trou lors de leur interaction avec la matière. Lorsqu'une tension est appliquée à un détecteur semi-conducteur, ces paires électron-trou sont, après une amplification adaptée, détectées sous forme d'impulsions de courant. La hauteur de l'impulsion est liée à l'énergie absorbée par les gamma-photons ou les photons pendant le temps de résolution du détecteur et de l'électronique. Une différenciation de la hauteur des impulsions permet d'obtenir un spectre de hauteur d'impulsion des rayons gamma. Après l'analyse de ce spectre, les différents pics sont rattachés aux radionucléides qui ont émis les rayons gamma correspondants, en utilisant une courbe établie d'étalonnage en énergie du détecteur.

L'activité des radionucléides émetteurs gamma présents dans les échantillons de sol est calculée en utilisant la courbe établie de rendement du détecteur en fonction de l'énergie. Ces techniques permettent l'identification et la quantification des radionucléides[2][3].

La nature et la géométrie des détecteurs et des échantillons nécessitent des étalonnages adéquats en énergie et en rendement[2][3]. Les effets de sommation des coïncidences vraies doivent être pris en

considération, en particulier en cas d'analyses d'échantillons avec une efficacité de détection élevée; c'est le cas, par exemple, si des conteneurs de type Marinelli ou des détecteurs puits sont utilisés ou si les conteneurs reposent directement sur le détecteur (voir [10.1.5](#)).

Les principes fondamentaux de la spectrométrie gamma, les termes et définitions ainsi que la description générique des équipements de spectrométrie gamma sont résumés dans l'ISO 20042.

NOTE La présente partie traite exclusivement de la spectrométrie gamma mettant en œuvre des détecteurs semi-conducteurs.

## 5 Sources de référence

### 5.1 Source(s) utilisée(s) pour l'étalonnage en énergie

L'étalonnage en énergie du spectromètre doit être établi en utilisant une ou plusieurs sources contenant des radionucléides qui émettent des rayons gamma couvrant la plage des énergies d'intérêt. Les sources peuvent être de forme quelconque, mais le temps mort du spectromètre pour les mesurages doit être tel que la forme des pics d'absorption totale ne soit pas altérée et que l'empilement des impulsions soit évité.

Le nombre de pics (pics d'absorption totale) requis dépend du degré du polynôme nécessaire pour la courbe d'étalonnage en énergie en fonction des canaux; en général, il convient que 5 à 10 pics suffisent. Les sources contenant des radionucléides à durée de vie longue (par exemple  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{60}\text{Co}$  ou  $^{137}\text{Cs}$ ) sont recommandées à cette fin. Pour les contrôles périodiques de l'étalonnage en énergie, il est permis d'utiliser un plus petit nombre de pics d'énergie.

### 5.2 Source(s) de référence pour l'étalonnage en rendement

#### 5.2.1 Généralités

La méthode générale pour étalonner le spectromètre consiste à établir le rendement de détection en fonction de l'énergie, pour une géométrie et une plage d'énergies définies. Une ou plusieurs sources de référence contenant un seul ou plusieurs radionucléides peuvent être utilisées à cette fin. L'activité ou les taux d'émission des radionucléides dans la ou les sources de référence doivent assurer la traçabilité par rapport à des étalons nationaux ou internationaux.

Les énergies des rayons gamma émis doivent être réparties sur l'ensemble de la plage d'énergies d'intérêt, de manière à pouvoir déterminer avec suffisamment de précision le rendement du spectromètre en fonction de l'énergie, pour cette géométrie spécifique. Dans la majorité des cas, une précision suffisante est obtenue pour une plage d'énergies de 60 keV à 1 836 keV si une source à plusieurs radionucléides est utilisée, laquelle source contenant la totalité ou la majeure partie des radionucléides suivants:  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{139}\text{Ce}$ ,  $^{203}\text{Hg}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{113}\text{Sn}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{65}\text{Zn}$  ou  $^{88}\text{Y}$ .

Pour déterminer l'activité des radionucléides émetteurs gamma ou X dans la région d'énergies inférieures à 60 keV, le système de spectrométrie peut être étalonné en utilisant une source de référence contenant les radionucléides d'intérêt.

Il peut être nécessaire de tenir compte des corrections de sommation des coïncidences vraies pour les radionucléides d'étalonnage (par exemple  $^{60}\text{Co}$  et  $^{88}\text{Y}$ ).

#### 5.2.2 Sources de référence pour les chaînes de spectrométrie gamma de laboratoire

Les sources de référence pour les chaînes de spectrométrie gamma de laboratoire doivent correspondre, aussi étroitement que possible, à la géométrie, à la densité et à la composition de la matrice des échantillons à mesurer. Les sources de référence peuvent être préparées à partir de solutions normalisées ou être achetées sous forme de sources scellées. Seules des solutions normalisées ou des sources de référence traçables par rapport à des étalons de radioactivité primaires nationaux ou internationaux doivent être utilisées.

Si aucun matériau de référence adapté aux échantillons n'est disponible, des facteurs de correction doivent être calculés, documentés et appliqués aux résultats issus des mesurages afin de tenir compte des différences de rendement de détection dues aux effets de la géométrie, de la densité et de la matrice.

NOTE Il convient de préparer les matériaux de référence utilisés pour l'étalonnage conformément à l'ISO 17034.

Si une source de référence est préparée par dilution à partir d'une solution normalisée, les recommandations du fournisseur concernant la forme chimique du diluant doivent être suivies. Il est également recommandé d'inclure dans le processus de distribution des contrôles de pertes éventuelles de matière active et de précision de la distribution (par exemple, il convient d'utiliser des techniques gravimétriques, volumétriques et radiométriques et de les recouper).

À cet effet, il convient que la source d'étalonnage présente les mêmes propriétés physiques et chimiques que l'échantillon. Elle peut être produite, par exemple, par dopage d'un échantillon de sol adéquat. Il est dans ce cas essentiel de garantir l'homogénéité du sol dopé.

### 5.2.3 Sources de référence utilisées avec des méthodes numériques

Les sources de référence pour les chaînes de spectrométrie gamma reposant sur des modèles numériques doivent être utilisées conformément aux recommandations du fabricant (voir 9.3.2). L'activité ou les taux d'émission des sources de référence doivent assurer la traçabilité par rapport à des étalons nationaux ou internationaux.

## 6 Équipement de spectrométrie gamma

### 6.1 Description générale

Le système de mesure fonctionne de la façon suivante: dans les détecteurs à semi-conducteur, une charge libérée (autrement dit, les porteurs de charge positive et négative, soit les trous et les électrons) est générée par l'interaction du rayonnement ionisant avec le matériau du détecteur (via l'effet photoélectrique, l'effet Compton ou la production de paires). Une alimentation haute tension polarise le cristal du détecteur et entraîne la formation d'un champ électrique. La charge libérée est accélérée par le champ électrique, en direction des électrodes du détecteur. La charge collectée est convertie en tension de sortie par un préamplificateur et l'impulsion de sortie résultante est mise en forme et amplifiée par l'amplificateur principal.

Deux types de systèmes électroniques peuvent être utilisés pour traiter le signal émis par le préamplificateur du détecteur: un amplificateur analogique combiné à un convertisseur analogique-numérique (CAN), ou un système de traitement numérique des signaux (DSP, *Digital Signal Processor*). Les deux systèmes convertissent l'amplitude d'impulsion et l'histogramme (spectre) des hauteurs d'impulsion est enregistré à l'aide d'un analyseur multicanaux (MCA). La hauteur de l'impulsion est proportionnelle à la quantité de charge libérée, et donc à l'énergie du rayonnement ionisant heurtant le détecteur.

Le spectre enregistré par le MCA montre un ensemble de pics (pics d'absorption totale) superposés sur un continuum de fond de rayonnement diffus. Les pics d'absorption totale ont une forme approximativement gaussienne. Le nombre de canaux du centroïde du pic dépend de l'énergie du photon détecté. L'aire nette du pic d'absorption totale est proportionnelle au nombre de photons de cette énergie qui ont interagi avec le détecteur pendant la période de comptage (corrigée du temps mort). L'aire nette du pic d'absorption totale est normalement déterminée dans le progiciel d'analyse par l'une des deux techniques suivantes: sommation ou ajustement.

Pour une utilisation en laboratoire, il convient de placer le spectromètre dans un lieu à température stable, conformément aux recommandations du fabricant. Il convient de noter que toute variation de température peut affecter le gain de l'amplificateur, et donc modifier considérablement l'étalonnage en énergie.

L'appareillage doit comprendre les parties nécessaires suivantes de 6.2 à 6.8.