

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61577-1

Première édition
First edition
2000-08

**Instrumentation pour la radioprotection –
Instruments de mesure du radon
et des descendants du radon –**

**Partie 1:
Règles générales**

**Radiation protection instrumentation –
Radon and radon decay product
measuring instruments –**

**Part 1:
General requirements**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 61577-1:2000

Numéros des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000.

Publications consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

Validité de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique.

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles dans le Catalogue de la CEI.

Les renseignements relatifs à des questions à l'étude et des travaux en cours entrepris par le comité technique qui a établi cette publication, ainsi que la liste des publications établies, se trouvent dans les documents ci-dessous:

- «Site web» de la CEI*
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement
(Catalogue en ligne)*
- **Bulletin de la CEI**
Disponible à la fois au «site web» de la CEI* et comme périodique imprimé

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 60050: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI).

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera la CEI 60027: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*, la CEI 60417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*, et la CEI 60617: *Symboles graphiques pour schémas*.

* Voir adresse «site web» sur la page de titre.

Numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series.

Consolidated publications

Consolidated versions of some IEC publications including amendments are available. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Validity of this publication

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology.

Information relating to the date of the reconfirmation of the publication is available in the IEC catalogue.

Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is to be found at the following IEC sources:

- **IEC web site***
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates
(On-line catalogue)*
- **IEC Bulletin**
Available both at the IEC web site* and as a printed periodical

Terminology, graphical and letter symbols

For general terminology, readers are referred to IEC 60050: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV).

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications IEC 60027: *Letter symbols to be used in electrical technology*, IEC 60417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets* and IEC 60617: *Graphical symbols for diagrams*.

* See web site address on title page.

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61577-1

Première édition
First edition
2000-08

**Instrumentation pour la radioprotection –
Instruments de mesure du radon
et des descendants du radon –**

**Partie 1:
Règles générales**

**Radiation protection instrumentation –
Radon and radon decay product
measuring instruments –**

**Part 1:
General requirements**

© IEC 2000 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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 et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

International Electrotechnical Commission
Telefax: +41 22 919 0300

3, rue de Varembe Geneva, Switzerland
e-mail: inmail@iec.ch IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX XB
PRICE CODE

Pour prix, voir catalogue en vigueur
For price, see current catalogue

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	6
INTRODUCTION	10
Articles	
1 Domaine d'application et objet.....	12
2 Références normatives.....	12
3 Terminologie et unités	14
4 Caractéristiques des éléments radioactifs à mesurer	26
5 Instruments utilisés pour la mesure du radon et des descendants du radon	30
5.1 Critères pour la classification des instruments de mesure du radon et de ses descendants	30
5.2 Méthodes de mesure du radon dans une atmosphère.....	30
5.3 Méthodes de mesure des descendants du radon dans une atmosphère	32
5.4 Gamme de paramètres d'essai.....	32
6 Nécessité d'une atmosphère de référence	32
6.1 Méthodes d'essai usuelles.....	32
6.2 Mélanges d'isotopes du radon.....	34
6.3 Le concept de STAR	34
7 Procédures pour les essais des instruments de mesure du radon et des descendants du radon	36
7.1 Procédures pour les essais des instruments de mesure du radon	36
7.2 Procédures pour les essais des instruments de mesure des RnDP	36
Annexe A (informative) Les radionucléides des chaînes de l'uranium et du thorium	38
Annexe B (informative) Classification des instruments de mesure du radon et des descendants du radon	52
Annexe C (normative) Installation pour la production des atmosphères de référence contenant des isotopes du radon et leurs descendants (STAR)	56
Annexe D (informative) Méthodes de mesure couramment utilisées	78
Annexe E (normative) Etalonnage et traçabilité des méthodes et des instruments de mesure utilisés dans un STAR	96
Annexe F (informative) Exemples de STAR.....	102
Annexe G (informative) Liste quasi complète des STAR existant dans le monde.....	118
Bibliographie	126
Figure 1 – L'uranium 238 et ses descendants	28
Figure 2 – Le thorium 232 et ses descendants	28
Figure 3 – Constitution d'un STAR	36
Figure A.1 – Distribution granulométrique typique de l'aérosol de l'atmosphère d'une mine souterraine	48
Figure F.1 – Implantation mécanique et aérodynamique	102
Figure F.2 – La chambre à radon du NRPB	110

CONTENTS

	Page
FOREWORD	7
INTRODUCTION	11
Clause	
1 Scope and object	13
2 Normative references	13
3 Terminology and units	15
4 Characteristics of the radioactive elements to be measured	27
5 Instruments used for measuring radon and radon decay products	31
5.1 Criteria for the classification of radon and RnDP measuring instruments	31
5.2 Methods of measuring radon in an atmosphere	31
5.3 Methods of measuring radon decay products in an atmosphere	33
5.4 Range of test parameters	33
6 Need for a reference atmosphere	33
6.1 Usual test methods	33
6.2 Mixtures of radon isotopes	35
6.3 The concept of STAR	35
7 Protocols for testing radon and RnDP measuring instruments	37
7.1 Protocols for testing radon measuring instruments	37
7.2 Protocols for testing RnDP measuring instruments	37
Annex A (informative) Radionuclides in the uranium and thorium series	39
Annex B (informative) Classification of radon and radon decay product measuring instruments	53
Annex C (normative) Equipment for the production of reference atmospheres containing radon isotopes and their decay products (STAR)	57
Annex D (informative) Currently used methods	79
Annex E (normative) Calibration and traceability of measurement methods and instruments used in a STAR	97
Annex F (informative) Examples of STARs	103
Annex G (informative) Nearly complete list of existing radon facilities in the world	119
Bibliography	127
Figure 1 – Uranium 238 and its decay products	29
Figure 2 – Thorium 232 and its decay products	29
Figure 3 – Construction of a STAR	37
Figure A.1 – Particle size distribution typical of the atmosphere in an underground mine	49
Figure F.1 – Mechanical and aerodynamic set-up	103
Figure F.2 – NRPB radon calibration chamber	111

Tableau 1 – Liste des unités	24
Tableau 2 – Liste de radionucléides	26
Tableau A.1 – Caractéristiques des radionucléides de la chaîne de l'uranium 238	40
Tableau A.2 – Caractéristiques des radionucléides de la chaîne du thorium 232.....	42
Tableau A.3 – Caractéristiques physico-chimiques des principaux composants radioactifs d'un environnement atmosphérique.....	44
Tableau B.1 –Types d'instruments utilisés pour la mesure du radon	52
Tableau B.2 – Types d'instruments utilisés pour la mesure des descendants du radon	54
Tableau C.1 – Domaine de fonctionnement d'un STAR (radioactivité).....	68
Tableau C.2 – Conditions de référence et d'essai normalisées	76
Tableau C.3 – Essais avec variation des grandeurs d'influence	76
Tableau D.1 – Diagramme de temps, méthode de Thomas.....	82
Tableau D.2 – Temps de comptage optimaux de la méthode de Thomas optimisés par Hartley	82
Tableau D.3 – Diagramme des temps, méthode de Thomas optimisée par Hartley	84
Tableau D.4 – Coefficients de la méthode de Thomas optimisés par Hartley	84
Tableau D.5 – Diagramme des temps, méthode de Markov	86
Tableau D.6 – Diagramme des temps, méthode de Nazaroff	88
Tableau D.7 – Diagramme des temps, méthode de Hill	90
Tableau D.8 – Diagramme des temps, méthode de Kusnetz.....	90
Tableau D.9 – Exemple d'un diagramme de temps, méthode de Rolle	94
Tableau F.1 – Instrumentation de la chambre du NRPB	114

Table 1 – List of units	25
Table 2 – List of radionuclides	27
Table A.1 – Uranium 238 nuclide radioactive characteristics	41
Table A.2 – Thorium 232 nuclide radioactive characteristics.....	43
Table A.3 – Physical and chemical properties of the main radioactive components that may be present in an atmospheric environment	45
Table B.1 – Types of instruments used for measuring radon	53
Table B.2 – Types of instruments used for measuring radon decay product.....	55
Table C.1 – Working range of a STAR (radioactivity).....	69
Table C.2 – Reference and standard test conditions.....	77
Table C.3 – Tests with variation of the influence quantities.....	77
Table D.1 – Time diagram, Thomas's method	83
Table D.2 – Optimal counting times of Thomas's method optimised by Hartley	83
Table D.3 – Time diagram, Thomas's method optimized by Hartley	85
Table D.4 – Coefficient of Thomas's method optimized by Hartley.....	85
Table D.5 – Time diagram, Markov's method	87
Table D.6 – Time diagram, Nazaroff's method.....	89
Table D.7 – Time diagram, Hill's method.....	91
Table D.8 – Time diagram, Kusnetz's method	91
Table D.9 – Example of time diagram, Rolle's method.....	95
Table F.1 – Instrumentation of the NRPP chamber.....	115

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

INSTRUMENTATION POUR LA RADIOPROTECTION – INSTRUMENTS DE MESURE DU RADON ET DES DESCENDANTS DU RADON –

Partie 1: Règles générales

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Électrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, spécifications techniques, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 61577-1 a été établie par le sous-comité 45B: Instrumentation pour la radioprotection, du comité d'études 45 de la CEI: Instrumentation nucléaire.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
45B/267/FDIS	45B/276/RVD

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

La CEI 61577 est composée des parties suivantes, sous le titre général: *Instrumentation pour la radioprotection – Instruments de mesure du radon et des descendants du radon*:

- Partie 1: Règles générales
- Partie 2: Exigences spécifiques concernant les instruments de mesure du radon ¹⁾;
- Partie 3: Exigences spécifiques concernant les instruments de mesure des descendants du radon ¹⁾;

¹⁾ A publier.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

RADIATION PROTECTION INSTRUMENTATION – RADON AND RADON DECAY PRODUCT MEASURING INSTRUMENTS –

Part 1: General requirements

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical specifications, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International standard IEC 61577-1 has been prepared by subcommittee 45B: Radiation protection instrumentation, of IEC technical committee 45: Nuclear instrumentation.

The text of this standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
45B/267/FDIS	45B/276/RVD

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the report on voting indicated the above table.

IEC 61577 consists of the following parts, under the general title: *Radiation protection instrumentation – Radon and radon decay product measuring instruments*:

Part 1: General requirements;

Part 2: Specific requirements for radon measuring instruments¹⁾;

Part 3: Specific requirements for radon decay product measuring instruments¹⁾;

¹⁾ To be published.

Partie 4: Instruments de mesure rapide de l'énergie alpha potentielle dans les mines¹⁾.

Les parties 2, 3 et 4 doivent être utilisées conjointement avec la présente partie.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 3.

Les annexes C et E font partie intégrante de cette norme.

Les annexes A, B, D, F et G sont données uniquement à titre d'information.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant 2004. A cette date, la publication sera

- reconduite;
- supprimée;
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

¹⁾ A l'étude. Disponible actuellement sous la référence CEI 61263.

Part 4: Instruments for rapid measurement of potential alpha energy in mines¹⁾.

Parts 2, 3 and 4 are to be read in conjunction with this part.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 3.

Annexes C and E form an integral part of this standard.

Annexes A, B, D, F and G are for information only.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until 2004. At this date, the publication will be

- reconfirmed;
- withdrawn;
- replaced by a revised edition, or
- amended.

¹⁾ Under consideration. Presently available under reference IEC 61263.

INTRODUCTION

Le radon est un gaz radioactif produit par la désintégration du ^{226}Ra et du ^{224}Ra , respectivement les descendants de l' ^{238}U et du ^{232}Th qui sont présents dans les roches de la croûte terrestre. En se désintégrant, les isotopes du radon génèrent deux chaînes de désintégration finissant chacune par un isotope stable du plomb.

Les isotopes du radon et leurs descendants correspondants (RnDP) sont d'une importance considérable puisqu'ils constituent la majeure partie ($\approx 54\%$) de l'exposition des populations à la radioactivité naturelle. Sur certains lieux de travail, comme, par exemple, les mines souterraines, les stations thermales et les installations d'adduction d'eau, les travailleurs sont soumis à des expositions très importantes aux descendants du radon. Ces radionucléides sont présents dans l'air en quantités variables, sous forme de gaz dans le cas des isotopes du radon, et sous forme de particules très fines dans le cas de leurs descendants. Compte tenu du danger connu, lié à l'inhalation de ces radionucléides, qu'ils représentent pour la santé, il importe aux physiciens de la santé de disposer de moyens pour mesurer avec une grande précision le niveau de ce type de radioactivité naturelle dans l'atmosphère. En raison du comportement très particulier de ces éléments radioactifs dans l'atmosphère et dans les instruments de mesure correspondants, il est nécessaire de formaliser la façon de contrôler de tels instruments.

Ces instruments peuvent être de types variés et être classés selon l'utilisation pour laquelle ils sont prévus, (étude des risques pour la santé dans les lieux d'habitation, sur les lieux de travail ou dans les mines, mesures en laboratoire pour la recherche, prospection du minerai d'uranium, surveillance de l'environnement, etc.). L'annexe B en présente une classification détaillée.

La CEI 61577-2, la CEI 61577-3 et la CEI 61263 sont dédiées aux essais respectifs des instruments pour la mesure du radon, des descendants du radon, et des descendants du radon dans les environnements miniers; elles doivent être utilisées conjointement avec la présente partie 1.

INTRODUCTION

Radon is a radioactive gas produced by the decay of ^{226}Ra and ^{224}Ra , respectively decay products of ^{238}U and ^{232}Th which are present in the crustal rocks. By decay, radon isotopes produces two decay chains ended by a stable lead isotope.

Radon isotopes and their corresponding Radon Decay Products (RnDP) are of considerable importance as they constitute the major part ($\approx 54\%$) of the exposure to natural radioactivity for the general public. In some workplaces, also, for instance in underground mines, spas and waterworks, the workers are submitted to a very significant exposure to RnDP. These radionuclides are present in variable quantities in the air, in a gaseous form for the radon isotopes, and as very fine particles for the decay products. Due to the known health hazard linked to the inhalation of these radionuclides, it is worthwhile for health physicists to be able to measure with a great accuracy the level of this kind of natural radioactivity in the atmosphere. Because the very particular behaviour of these radioactive elements in the atmosphere and in the corresponding measuring instruments, it is necessary to formalize the way such instruments could be tested.

These instruments may be of various types and may be classified by their intended use, (i.e. health risk assessment in dwelling, workplaces or in mines, laboratory measurement for research purposes, prospecting for uranium ore, environment monitoring, etc.). A detailed classification is given in annex B.

IEC 61577-2, IEC 61577-3 and IEC 61263 are specialized standards, respectively dedicated to the tests of radon, RnDP and RnDP in mines measuring instruments and are to be used in conjunction with this publication.

INSTRUMENTATION POUR LA RADIOPROTECTION – INSTRUMENTS DE MESURE DU RADON ET DES DESCENDANTS DU RADON –

Partie 1: Règles générales

1 Domaine d'application et objet

La présente partie de la CEI 61577 traite des caractéristiques générales concernant les essais et étalonnages des instruments de mesure du radon et de ses descendants; une importance particulière y est accordée à la définition et à l'utilisation des atmosphères de référence.

Cette norme ne concerne que les isotopes 220 et 222 du radon et leurs descendants à vie courte.

Compte tenu de la très courte période radioactive du radon 219, son activité et celle de ses descendants est considérée comme négligeable en comparaison de l'activité des deux autres séries. Ses effets sur la santé sont donc insignifiants. Sauf mention particulière, le radon 219 ne sera pas concerné par cette norme.

Cette norme ne s'applique donc pas aux installations utilisant de l'uranium enrichi.

Cette norme a pour but d'aider l'utilisateur ou le fabricant à choisir l'instrument le mieux adapté à une application donnée.

Elle a aussi pour vocation d'aider à la définition des essais de type à effectuer pour qualifier ces instruments. Ces essais de type sont décrits dans la CEI 61577-2, la CEI 61577-3 et la CEI 61263.

2 Références normatives

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la CEI 61577. Pour les références datées, les amendements ultérieurs ou les révisions de ces publications ne s'appliquent pas. Toutefois, les parties prenantes aux accords fondés sur la CEI 61577 sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Pour les références non datées, la dernière édition du document normatif en référence s'applique. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

CEI 60050(151):1978, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 151: Dispositifs électriques et magnétiques*
Amendement 1 (1987)

CEI 61263:1994, *Instrumentation pour la radioprotection – Appareil portatif pour la mesure de l'énergie alpha potentielle pour mesures rapides dans les mines*

CEI 61577-2, — *Exigences spécifiques concernant l'instrumentation pour la radioprotection – Instruments de mesure du radon et des descendants du radon – Partie 2: Instruments de mesure du radon*¹⁾

CEI 61577-3, — *Exigences spécifiques concernant l'instrumentation pour la radioprotection – Instruments de mesure du radon et des descendants du radon – Partie 3: Instruments de mesure des descendants du radon*¹⁾

¹⁾ A publier.

RADIATION PROTECTION INSTRUMENTATION – RADON AND RADON DECAY PRODUCT MEASURING INSTRUMENTS –

Part 1: General requirements

1 Scope and object

This part of IEC 61577 covers the general features concerning tests and calibrations of radon and radon decay product measuring instruments. It emphasizes the definition and use of reference atmospheres.

This standard addresses only the isotopes 220 and 222 of radon and their subsequent short-lived decay products.

Due to the very short half-life of radon 219, its activity and the activity of its RnDP are considered as negligible compared to the activity of the two other series. Its health effects are therefore not important. Unless particularly mentioned, it will not be addressed by this standard.

Thus this standard does not apply to installations where enriched uranium is used.

This standard is intended to help the user or the manufacturer to choose the most appropriate instrument for a given application.

It is also intended to help to define type tests which have to be conducted in order to qualify these instruments. These type tests are described in IEC 61577-2, IEC 61577-3 and IEC 61263.

2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this part of IEC 61577. For dated references, subsequent amendments to, or revisions of, any of these publications do not apply. However, parties to agreements based on this part of IEC 61577 are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. For undated references, the latest edition of the normative document referred to applies. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 60050(151):1978, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 151: Electrical and magnetic devices*
Amendment 1 (1987)

IEC 61263:1994, *Radiation protection instrumentation – Portable potential alpha energy meter for rapid measurement in mines*

IEC 61577-2, — *Specific requirements for radiation protection instrumentation – Radon and radon decay product measuring instruments – Part 2: Radon measuring instruments* ¹⁾

IEC 61577-3, — *Specific requirements for radiation protection instrumentation – Radon and radon decay product measuring instruments – Part 3: RnDP measuring instruments* ¹⁾

¹⁾ To be published.

3 Terminologie et unités

Pour les besoins de la présente norme, les définitions suivantes s'appliquent.

NOTE 1 Dans l'ensemble de la présente norme, le mot *radon* est utilisé pour désigner tous les isotopes du radon concernés. Un isotope particulier sera indiqué par son symbole chimique précédé de son nombre de masse (par exemple ^{220}Rn , ^{222}Rn).

NOTE 2 Le terme *descendant du radon* ou son abréviation (RnDP) représente l'ensemble des descendants à vie courte. Un isotope particulier est indiqué par son symbole chimique précédé de son nombre de masse. Les indices 220, 222 ajoutés à l'abréviation RnDP désignent tous les descendants de l'isotope du radon correspondant (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po), (^{216}Po , ^{212}Pb , ^{212}Bi , ^{212}Po , ^{208}Tl).

3.1

activité volumique

activité d'un radionucléide contenu dans un volume unité

3.2

énergie alpha potentielle (EAP)

énergie alpha totale émise pendant la désintégration d'un atome de RnDP le long de la chaîne jusqu'au ^{210}Pb ou ^{208}Pb respectivement pour les chaînes de ^{238}U et du ^{232}Th .

Si N_{xxxXx} est le nombre d'atomes de $^{\text{xxx}}\text{Xx}$,

$$\text{EAP}_{222} = [(6,003 + 7,687) \times N_{218\text{Po}} + 7,687 \times (N_{214\text{Pb}} + N_{214\text{Bi}})] \times 1,602 \times 10^{-13} \quad (\text{J})$$

$$\text{EAP}_{220} = [((6,779 + 7,804) \times N_{216\text{Po}}) + (7,804 \times (N_{212\text{Pb}} + N_{212\text{Bi}})) + (8,785 \times N_{212\text{Po}})] \times 1,602 \times 10^{-13} (\text{J})$$

NOTE EAP_{222} et EAP_{220} sont toujours calculées ou mesurées séparément puisqu'une EAP, étant un indicateur de risque sanitaire, est liée directement aux limites annuelles d'inhalation (LAI) qui sont différentes pour RnDP₂₂₂ et RnDP₂₂₀.

3.3

énergie alpha potentielle volumique (EAPv)

énergie alpha potentielle des RnDP présente dans un volume unité de l'atmosphère étudiée

3.4

exposition à l'énergie alpha potentielle volumique (Ex_{EAPv})

intégrale de l'EAPv sur le temps d'exposition

$$\text{Ex}_{\text{EAPv}} = \int_{\text{exposition}} \text{EAPv} \cdot dt$$

3.5

activité volumique équivalente du radon en équilibre (EEC_{Rn})

activité volumique du radon en équilibre radioactif avec ses RnDP qui a la même énergie alpha potentielle que le mélange non à l'équilibre auquel l' EEC_{Rn} fait référence

3.6

facteur d'équilibre

rapport F entre l' EEC_{Rn} et l'activité volumique réelle du radon dans l'atmosphère étudiée

3.7

rapport d'équilibre (ou fraction d'équilibre)

rapport entre l'activité d'un descendant du radon donné et l'activité de l'isotope du radon parent dans l'atmosphère étudiée

3 Terminology and units

For the purpose of this standard, the following definitions apply.

NOTE 1 Throughout the whole document, the term *radon* is used to denote all the radon isotopes which are concerned by this standard. When a particular isotope is to be referred to, it will be indicated by its chemical symbol preceded by its mass number (e.g. ^{220}Rn , ^{222}Rn).

NOTE 2 The term *radon decay product* or its abbreviation (RnDP) denotes the whole set of short-lived decay products which are concerned by this standard. A particular isotope is indicated by its chemical symbol preceded by its mass number. The subscripts 220, 222 added to the symbol RnDP refer to the whole set of decay products of the corresponding radon isotope (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po), (^{216}Po , ^{212}Pb , ^{212}Bi , ^{212}Po , ^{208}Tl).

3.1

volume activity

the activity of a radionuclide contained in a unit volume

3.2

potential alpha energy (PAE)

the total alpha energy emitted during the decay of an RnDP atom along the decay chain up to ^{210}Pb or ^{208}Pb respectively for the decay chains of the ^{238}U and ^{232}Th .

If N_{xxxXx} is the number of $^{\text{xxx}}\text{Xx}$ atoms,

$$\text{PAE}_{222} = [(6,003 + 7,687) \times N_{218\text{Po}} + 7,687 \times (N_{214\text{Pb}} + N_{214\text{Bi}})] \times 1,602 \times 10^{-13} \text{ (J)}$$

$$\text{PAE}_{220} = [(6,779 + 7,804) \times N_{216\text{Po}} + (7,804 \times (N_{212\text{Pb}} + N_{212\text{Bi}})) + (8,785 \times N_{212\text{Po}})] \times 1,602 \times 10^{-13} \text{ (J)}$$

NOTE PAE_{222} and PAE_{220} are always calculated or measured separately since a PAE as an indicator of health risk is directly linked to the Annual Limits of Intake (ALI) which are different for RnDP₂₂₂ and RnDP₂₂₀.

3.3

volume potential alpha energy (or Potential Alpha Energy Concentration (PAEC))

the potential alpha energy of the RnDP present in a unit volume of the atmosphere being studied

3.4

exposure to volume potential alpha energy (Ex_{PAEC})

the integral of PAEC over time of exposure

$$\text{Ex}_{\text{PAEC}} = \int_{\text{exposure}} \text{PAEC} \cdot dt$$

3.5

equilibrium equivalent radon volume activity (EEC_{Rn})

the volume activity of radon in radioactive equilibrium with its RnDP that has the same potential alpha energy as the non-equilibrium mixture to which the EEC_{Rn} refers

3.6

equilibrium factor

the ratio F between the EEC_{Rn} and the actual radon volume activity in the atmosphere under examination

3.7

equilibrium ratio (or equilibrium fraction)

the ratio between the activity of a given radon decay product and the activity of the parent radon isotope in the atmosphere under investigation

3.8

exposition au radon (Ex_{AvRn})

intégrale sur le temps d'exposition d'un individu à l'activité volumique du radon

$$Ex_{AvRn} = \int_{\text{exposition}} Av_{Rn} \cdot dt$$

3.9

coefficient d'émanation (τ)

rapport entre le nombre d'atomes de radon (n) transférés dans l'espace occupé par les pores d'un matériau et le nombre (N) d'atomes de radon présents dans la totalité du matériau, y compris l'espace des pores,

$$\tau = n/N$$

3.10

taux d'émanation

valeur de l'activité des atomes de radon quittant un corps par unité de temps et de masse

3.11

taux d'exhalaison

valeur de l'activité des atomes de radon quittant un corps par unité de temps et de surface

3.12

déconvolution

traitement mathématique d'un ensemble de données constituant un résultat de mesure (par exemple un nombre d'impulsions totalisées), permettant, par l'usage d'un ensemble particulier d'équations, d'obtenir la valeur de la grandeur à mesurer

3.13

aérosols

suspension dans l'air de particules fines solides ou liquides. Les dimensions de l'aérosol porteur auquel la plupart des RnDP sont attachés, varient généralement entre 0,1 μm et 0,3 μm . Les dimensions qui sont généralement prises en compte pour la radioprotection varient entre 0,01 μm et 10 μm

3.14

diamètre aérodynamique médian en activité (AMAD)

médiane de la distribution en activité des diamètres de sphères de densité unité ($1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) qui ont la même vitesse limite de chute que les particules de l'aérosol considéré

3.15

fraction libre

il se peut qu'une fraction des RnDP ne soit pas attachée à l'aérosol; cette grandeur est souvent appelée fraction libre ou non attachée. La fraction libre est définie, pour un radionucléide donné, comme le rapport entre l'activité des atomes non attachés et l'activité de l'isotope du radon considéré. La taille des particules concernées est de l'ordre de 1 nm

3.16

fraction attachée

rapport, pour un radionucléide donné, entre l'activité des atomes radioactifs attachés à des particules d'aérosol et l'activité de l'isotope du radon concerné

3.8**exposure to radon (Ex_{AvRn})**

the integral over time of the radon volume activity to which an individual is exposed

$$Ex_{AvRn} = \int_{\text{exposure}} Av_{Rn} \cdot dt$$

3.9**emanating power (or emanation coefficient) (τ)**

the ratio between the number of radon atoms (n) transferred in the space occupied by the pores of the material and the number (N) of radon atoms present in the material itself, including the pores space

$$\tau = n/N$$

3.10**emanation rate**

the value of the activity of radon atoms leaving a body per unit time and per unit mass

3.11**exhalation rate**

the value of the activity of radon atoms leaving a body per unit time and per unit surface

3.12**deconvolution**

mathematical treatment of a set of data resulting from a measurement (i.e. counted events) allowing, through the use of a particular set of equations, to get the value of the original quantity to be measured

3.13**aerosols**

suspension of fine solid or liquid particles in air. The sizes of the carrier aerosol, to which most of RnDP are attached, are generally in the 0,1 μm to 0,3 μm range. The dimensions generally taken into account for radiation protection purposes are in the range of 0,01 μm to 10 μm

3.14**activity median aerodynamic diameter (AMAD)**

the median of the activity distribution of diameters of the unit density ($1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) spheres that have the same settling velocity as the aerosol particle concerned

3.15**unattached fraction**

a fraction of RnDP may not become attached to airborne particles and this quantity is often referred to as the free or unattached fraction. The unattached fraction is defined, for a given radionuclide, by the ratio of the activity of the unattached atoms to the activity of the concerned radon isotope. The particle size concerned is of the order of magnitude of 1 nm

3.16**attached fraction**

for a given radionuclide, the ratio of the activity of the radioactive atoms attached to airborne particles to the activity of the concerned radon isotope

3.17

méthode de mesure directe

méthode de mesure qui mesure, sans perturbation, une propriété physique ou radioactive du radionucléide concerné (par exemple la mesure du ^{222}Rn par détection de sa désintégration alpha à 5,490 MeV)

3.18

méthode de mesure indirecte

méthode de mesure qui permet d'estimer la mesure d'un radionucléide par une combinaison de données acquises à partir des propriétés physiques ou radioactives du parent ou des descendants du radionucléide concerné (par exemple une estimation de l'énergie alpha potentielle volumique obtenue en calculant les équations de la désintégration, compte tenu de la période radioactive des descendants)

3.19

prélèvement ponctuel

prélèvement (d'air contenant du radon ou des particules d'aérosol) pendant une période de temps considérée comme courte comparée aux fluctuations de la grandeur étudiée (par exemple l'activité volumique de l'air)

3.20

méthode de mesure en continu

méthode qui permet un enregistrement en continu de la valeur de la grandeur à mesurer, pendant une période de temps définie, et avec une résolution temporelle adaptée au phénomène à étudier

3.21

méthode intégrée

méthode qui repose sur la mesure de l'intégrale sur une période définie de prélèvement et de mesure de la grandeur à étudier

3.22

taux d'émission surfacique d'une source

nombre de particules alpha ou bêta émises de la surface de la source, par unité de temps

3.23

source de contrôle

source radioactive (étalon secondaire) utilisée pour la vérification des performances d'un instrument de mesure

3.24

source de vérification

source radioactive utilisée pour la vérification du bon fonctionnement d'un instrument de mesure

3.25

source de référence

source radioactive qui est traçable à un étalon reconnu

3.26

atmosphère de référence

atmosphère dans laquelle les paramètres d'influence (aérosols, radioactivité, climat, etc.) sont suffisamment bien connus ou contrôlés pour permettre son utilisation dans une procédure pour l'essai d'instruments de mesure du radon ou des descendants du radon. Les valeurs des paramètres concernés doivent être traçables à des étalons reconnus

3.17**direct method of measurement**

a method of measurement which measures, without any disturbance, a physical or radioactive property of the radionuclide concerned (i.e. measurement of ^{222}Rn by detection of its alpha decay at 5,490 MeV)

3.18**indirect method of measurement**

a method of measurement which allows an estimation of the measure of a radionuclide by combination of data gained from the physical or radioactive properties of the parent or of the decay products of the radionuclide concerned (i.e. estimation of volume potential alpha energy by calculation of the decay equations, knowing the half-life of the decay products)

3.19**grab sampling**

the collection of a sample (of air containing radon or aerosol particles) during a period considered short compared with the fluctuations of the quantity under study (i.e. volume activity of the air)

3.20**continuous method of measurement**

a method which ensures a continuous recording of the parameter to be measured, over a defined period of time, and with a time resolution adapted to the phenomenon to be studied

3.21**integrating method**

a method which relies on the measurement of the integral over a defined sampling and measurement time of the quantity under study

3.22**surface emission rate of a source**

the number of alpha or beta particles emerging from the front face of the source in unit time

3.23**test source**

a radioactive source (secondary standard) used for testing the performances of a measuring instrument

3.24**check source**

a radioactive source used for checking the proper operation of a measuring instrument

3.25**reference source**

a radioactive source which is traceable to a recognized standard

3.26**reference atmosphere**

a radioactive atmosphere in which the influencing parameters (aerosols, radioactivity, climatic, etc.) are sufficiently well-known or controlled to allow its use in a testing procedure for radon or RnDP measuring instruments. The parameter values concerned shall be traceable to recognized standards

3.27

source solide de RnDP

dépôt d'un radionucléide parent (^{226}Ra , par exemple) qui, l'émanation du radon ayant été bloquée par des moyens physiques (par exemple en l'encapsulant sous une couche de résine synthétique ou une couche métallique mince évaporée sous vide), permet à son isotope du radon d'atteindre un certain état d'équilibre avec lui. Les RnDP qui sont formés sont alors mis en équilibre avec le radon emprisonné

NOTE Il est souvent très difficile de garantir la stabilité d'une telle source sur une longue période de temps.

3.28

filtres à particules à haute efficacité (filtres HEPA)

filtres utilisés pour le prélèvement de particules d'aérosol avec une efficacité minimum de 99,97% pour une taille de particule de $0,3\ \mu\text{m}$

3.29

étalon absolu de référence

étalon dont la valeur est directement liée aux unités primaires: temps, masse, longueur, ...

3.30

étalon primaire

étalon qui possède les plus hautes qualités métrologiques dans un domaine spécifié (par exemple, qui est directement raccordée à une ou plusieurs des principales grandeurs de mesure: temps, longueur, masse, ...)

3.31

étalon secondaire (ou étalon de transfert)

étalon dont la valeur est fixée par comparaison avec un étalon primaire

3.32

débit massique

masse d'un gaz s'écoulant dans un conduit pendant une unité de temps

3.33

débit volumique

volume d'un gaz s'écoulant dans un conduit pendant une unité de temps

3.34

caractéristiques d'une atmosphère normale

conditions climatiques qui correspondent à une température de $0\ ^\circ\text{C}$ et à une pression atmosphérique de $101\,325\ \text{Pa}$ (pression atmosphérique au niveau de la mer). D'habitude, les volumes de gaz ou les débits volumiques sont normalisés à ces conditions

3.35

temps de réponse

délai entre l'exposition initiale de l'ensemble de détection à une valeur donnée de la grandeur mesurée et l'obtention de 90 % de la lecture finale, ou dans le cas des assemblages intégrateurs, 90 % de la valeur finale de la dérivée première par rapport au temps de l'indication

3.36

temps de mise à l'équilibre en température de l'électronique

temps nécessaire à un instrument de mesure, après avoir été mis sous tension, pour afficher une valeur s'éloignant de moins de 10 % de la valeur conventionnellement vraie

3.27**solid source of RnDP**

a deposit of a parent radionuclide (^{226}Ra , for example) allowing, by blocking the radon emanation using physical means (e.g. encapsulation using a synthetic resin or a vacuum evaporated thin metal layer), its radon isotope to reach a certain state of equilibrium with it. The RnDP which are formed are then put into equilibrium with the trapped radon

NOTE It is generally very difficult to ensure that such a source remains stable over a long period of time.

3.28**high efficiency particle filters (HEPA filters)**

filters used for the collection, with a minimum efficiency 99,97 % for a particle size of $0,3\text{ }\mu\text{m}$, of aerosol particles

3.29**absolute reference standard**

a standard whose value is directly linked to the primary units: time, mass, length, ...

3.30**primary standard**

a standard which has the highest metrological qualities in a specified field (i.e. is directly traceable to one or more of the main measuring quantities, that is to time, length, mass, ...)

3.31**secondary standard (or transfer standard)**

a standard whose value is fixed by comparison with a primary standard

3.32**mass flow rate**

the mass of a gas flowing in a conduit during a unit of time

3.33**volume flow rate**

the volume of gas flowing in a conduit during a unit of time

3.34**atmospheric standard conditions**

climatic conditions corresponding to a temperature of $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ and a pressure of $101\,325\text{ Pa}$ (atmospheric pressure at sea level). Volume of gas or volume flow rate are generally normalized to these standard conditions

3.35**response time**

the time delay between initial exposure of the detection assembly to a given value of the measured quantity and the attainment of 90 % of the equilibrium reading, or for integrating (slope) assemblies, 90 % of the equilibrium value of the first derivative of the indication, with respect to time

3.36**electronic warm-up time**

time needed after applying power, for a measuring instrument, for the indicated value to reach a value departing less than 10 % from the conventionally true value

3.37

valeur conventionnellement vraie d'une grandeur

meilleure estimation de la valeur réelle d'une grandeur utilisée pour l'étalonnage des instruments; cette grandeur et son incertitude seront déterminées à l'aide d'un étalon primaire ou secondaire, ou d'un instrument de référence qui aura été étalonné par rapport à un étalon primaire ou secondaire

3.38

erreur d'indication

différence entre la valeur indiquée et la valeur conventionnellement vraie au point de mesure

3.39

erreur d'indication relative

quotient, exprimé en pourcentage, de l'erreur d'indication par la valeur conventionnellement vraie

3.40

erreur relative intrinsèque

erreur d'indication relative d'un ensemble par rapport à une valeur spécifiée sous des conditions de référence spécifiées

3.41

seuil de décision

valeur du signal net en dessous duquel il n'est pas possible d'affirmer que la valeur conventionnellement vraie n'est pas zéro

3.42

limite de détection (ou activité minimale détectable)

plus petite valeur de la grandeur mesurée pour laquelle la méthode de mesure permet d'assurer qu'elle n'est pas nulle. Dans les calculs statistiques classiques, la limite de détection correspond à $\approx 50\%$ d'incertitude relative (3σ)

3.43

coefficient de variation

rapport V de l'écart type s à la valeur de la moyenne arithmétique $\bar{x}$ d'un ensemble de n mesures x_i , donné par la formule suivante:

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

3.44

réponse de référence

réponse de l'assemblage, soit au débit d'émission venant d'une source solide de référence, soit à l'atmosphère de référence, dans des conditions d'essai standard

Elle est exprimée par:

$$R_{ref} = (I_{rs} - I_b) / Q_{rs}$$

où

I_{rs} est l'indication due à la source de référence ou à l'atmosphère de référence;

I_b est l'indication due au bruit de fond;

Q_{rs} est la valeur conventionnellement vraie de la source de référence ou de l'activité de l'atmosphère de référence.

3.37**conventionally true value of a quantity**

the best estimate of the true value of the quantity used for calibration of equipment; this quantity and its uncertainty shall be determined from a primary or secondary standard, or by a reference instrument which has been calibrated against a primary or secondary standard

3.38**error of indication**

the difference between the indicated value and the conventionally true value at the point of measurement

3.39**relative error of indication**

the quotient, expressed as a percentage, of the error of indication by the conventionally true value

3.40**relative intrinsic error**

the relative error of indication of an assembly with respect to a specified value under specified reference conditions

3.41**lower limit of detection (or critical level)**

the level of the net signal under which it is not possible to assess that the conventionally true value is not zero

3.42**detection limit (or minimum detectable activity)**

the smallest value of the measured quantity which the method of measurement allows to be sure not to be zero. In statistical calculations used, the detection limit corresponds to $\approx 50\%$ of relative uncertainty (3σ)

3.43**coefficient of variation**

the ratio V of the standard deviation s to the value of the arithmetic mean $\bar{x}$ of a set of n measurements x_i given by the following formula:

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

3.44**reference response**

the response of the assembly under standard test conditions either to reference solid-source emission rate or reference atmosphere

It is expressed as:

$$R_{ref} = (I_{rs} - I_b) / Q_{rs}$$

where

I_{rs} is the indication due to reference source or reference atmosphere;

I_b is the indication due to radiation background;

Q_{rs} is the conventionally true value of reference source or reference atmosphere activity.

3.45

essais de qualification

essais effectués afin de vérifier que les exigences d'une spécification sont remplies

Les essais de qualification sont subdivisés en essais de type et essais individuels de série

3.45.1

essai de type

essai effectué sur un ou plusieurs dispositifs réalisés selon une conception donnée pour vérifier que cette conception répond à certaines spécifications [VEI 151-04-15]

3.45.2

essai individuel de série

essai auquel est soumis chaque dispositif en cours ou en fin de fabrication pour vérifier qu'il satisfait à des critères définis [VEI 151-04-16]

3.46

essai de réception

essai contractuel ayant pour objet de prouver au client que le dispositif répond à certaines conditions de sa spécification [VEI 151-04-20]

3.47

unités

La présente norme utilise le système international d'unités (SI)

Tableau 1 – Liste des unités

Grandeur	Unité*
Activité volumique de l'air	Bq·m ⁻³
Energie alpha potentielle volumique	J·m ⁻³
Exposition au radon	Bq·h·m ⁻³
Exposition à l'EAP	J·h·m ⁻³
Activité volumique du radon équivalente à l'équilibre	Bq·m ⁻³
Taux d'émanation	Bq·s ⁻¹ ·kg ⁻¹
Taux d'exhalaison	Bq·s ⁻¹ ·m ⁻²
* Quelques unités «non standard» sont parfois encore utilisées: Ci, unité d'activité égale à $3,7 \times 10^{10}$ Bq Working Level (WL), unité d'énergie alpha potentielle volumique égale à $20,8 \mu\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$. Working Level Month (WLM), unité d'exposition à l'énergie alpha potentielle égale à $3,6 \text{ mJ} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$ EEC, unité d'énergie alpha potentielle volumique égale à: $5,62 \times 10^{-3} \mu\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$ for RnDP₂₂₂ $75,8 \times 10^{-3} \mu\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$ for RnDP₂₂₀ MeVα·l⁻¹, unité d'énergie alpha potentielle volumique égale à $1,6 \times 10^{-4} \mu\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$	

3.45

qualification tests

qualification tests are performed in order to verify that the requirements of a specification are fulfilled

Qualification tests are subdivided into type tests and routine tests

3.45.1

type test

a type of one or more devices made to a certain design to show that the design meets certain specifications [IEV 151-04-15]

3.45.2

routine test

a test to which each individual device is subjected during or after manufacture to ascertain whether it complies with certain criteria [IEV 151-04-16]

3.46

acceptance test

a contractual test to prove to the customer that the device meets certain conditions of its specifications [IEV 151-04-20]

3.47

units

This standard uses the International System of Units (SI)

Table 1 – List of units

Quantity	Unit*
Volume activity of air	Bq·m ⁻³
Volume potential alpha energy	J·m ⁻³
Exposure to radon	Bq·h·m ⁻³
Exposure to PAEC	J·h·m ⁻³
Equilibrium equivalent radon volume activity	Bq·m ⁻³
Emanation rate	Bq·s ⁻¹ ·kg ⁻¹
Exhalation rate	Bq·s ⁻¹ ·m ⁻²

* Some "non-standard" units are still sometimes used:

Ci, a unit of activity equal to $3,7 \times 10^{10}$ Bq

Working Level (WL), a unit of volume potential alpha energy equal to $20,8 \mu\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$.

Working Level Month (WLM), a unit of exposure to potential alpha energy equal to $3,6 \text{ mJ}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$

EEC, a unit of volume potential alpha energy equal to: $5,62 \times 10^{-3} \mu\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$ for RnDP₂₂₂
 $75,8 \times 10^{-3} \mu\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$ for RnDP₂₂₀

MeVα·l⁻¹, a unit of volume potential alpha energy equal to $1,6 \times 10^{-4} \mu\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$

4 Caractéristiques des éléments radioactifs à mesurer

Une description des propriétés physiques et chimiques des éléments radioactifs à mesurer est fournie à la fin de cette partie dans l'annexe A.

Les figures 1 et 2 présentent les chaînes de désintégration de l'uranium et du thorium, en insistant sur les isotopes du radon et leurs descendants correspondants. Les principaux types de désintégration sont aussi indiqués. Le tableau 2 donne la liste des radionucléides concernés par la présente norme.

Tableau 2 – Liste de radionucléides

Chaîne ^{238}U	Chaîne ^{232}Th
^{222}Rn	^{220}Rn
^{218}Po	^{216}Po
^{214}Pb	^{212}Pb
^{214}Bi	^{212}Bi
^{214}Po	^{212}Po
	^{208}Tl

Les tableaux A.1, A.2 et A.3 de l'annexe A donnent une description plus complète des propriétés de ces radionucléides.

4 Characteristics of the radioactive elements to be measured

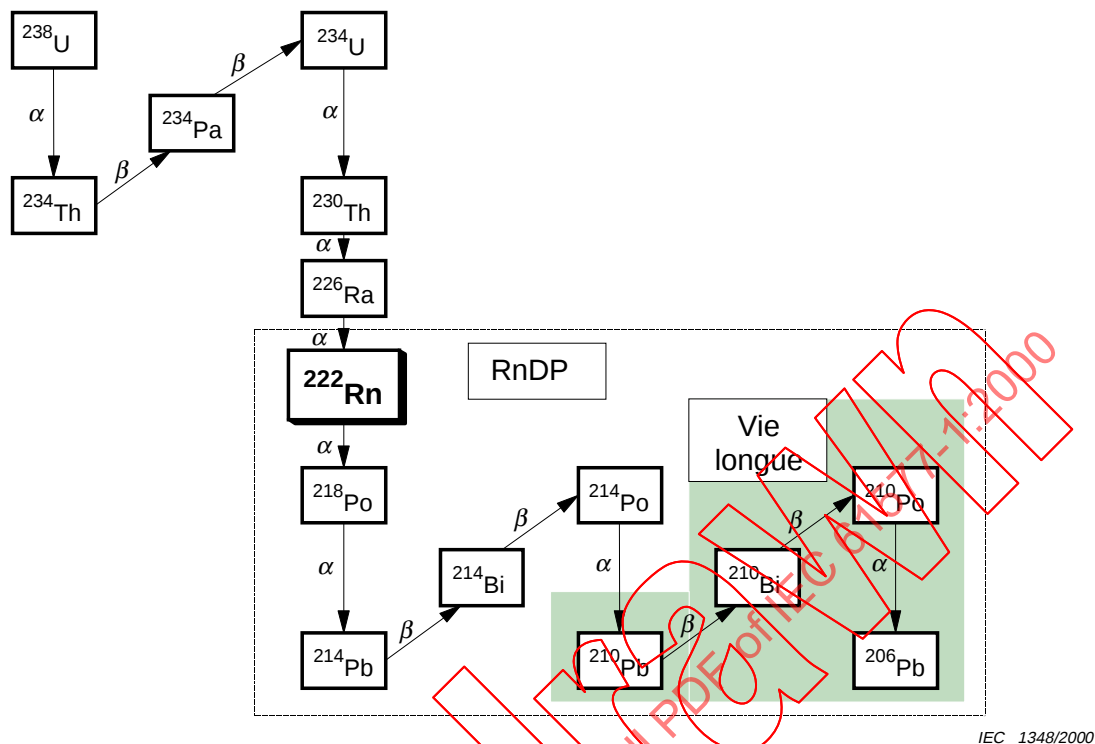
A description of the physical and chemical properties of the radioactive elements which have to be measured is given in annex A.

The figures 1 and 2 show the decay chains of both uranium and thorium, with highlight on the radon isotopes and corresponding RnDP. The major decay types are also indicated. Table 2 summarizes the list of radionuclides concerned by this standard.

Table 2 – List of radionuclides

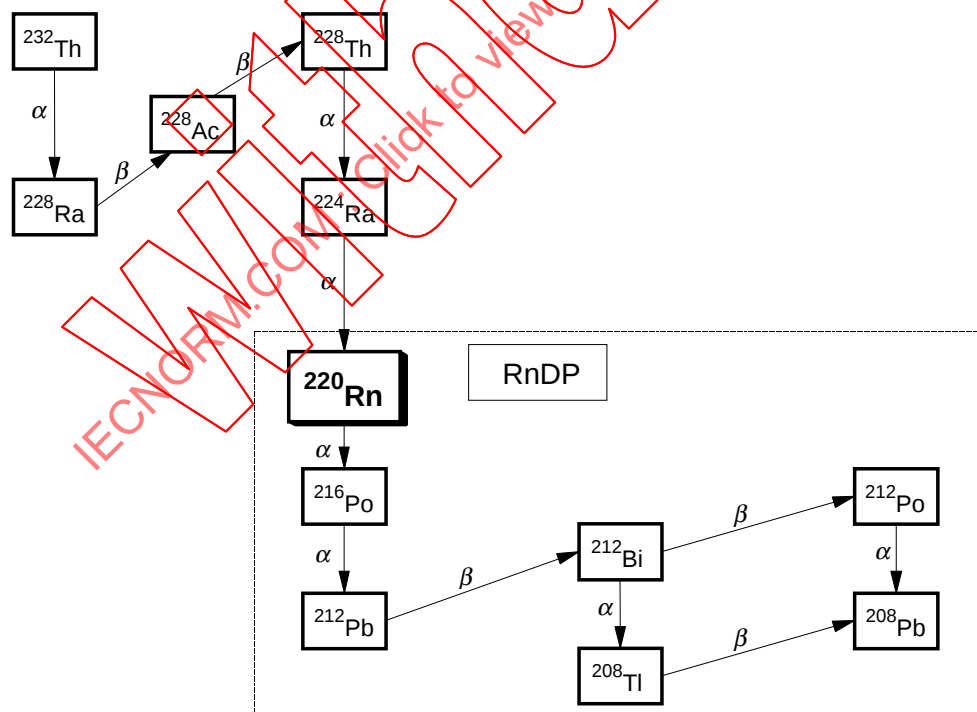
²³⁸ U chain	²³² Th chain
²²² Rn	²²⁰ Rn
²¹⁸ Po	²¹⁶ Po
²¹⁴ Pb	²¹² Pb
²¹⁴ Bi	²¹² Bi
²¹⁴ Po	²¹² Po
	²⁰⁸ Tl

Tables A.1, A.2 and A.3 give a more complete description of the properties of these radionuclides.



IEC 1348/2000

Figure 1 – L'uranium 238 et ses descendants



IEC 1349/2000

Figure 2 – Le thorium 232 et ses descendants

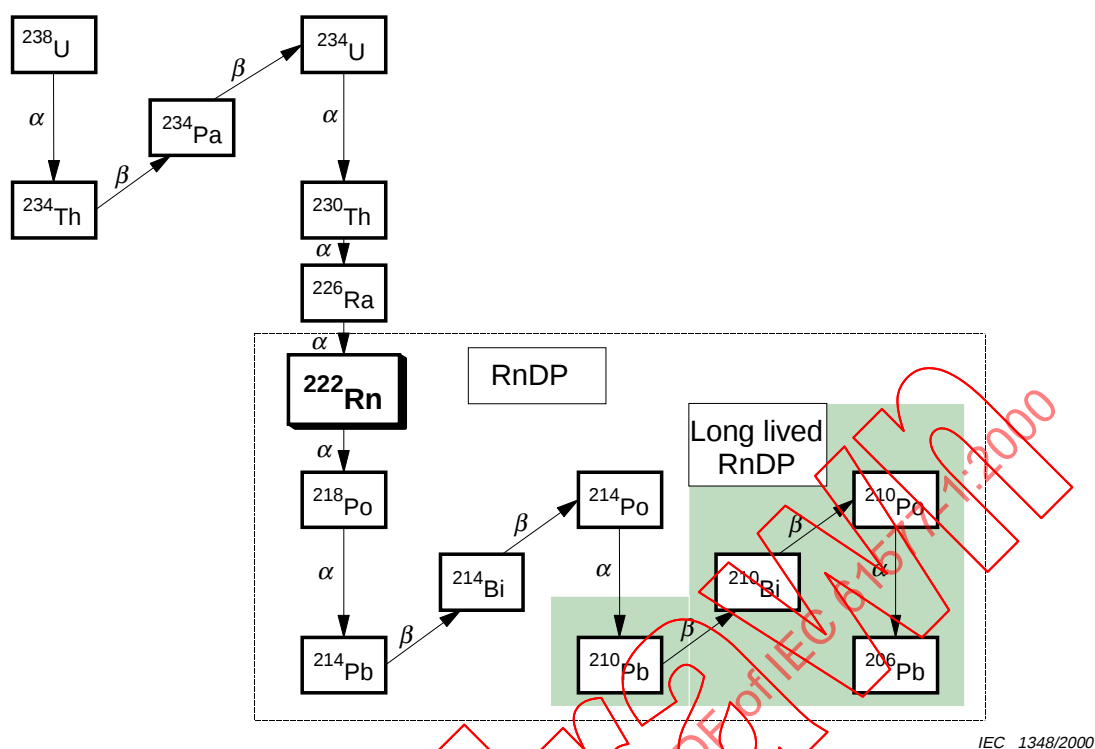


Figure 1 – Uranium 238 and its decay products

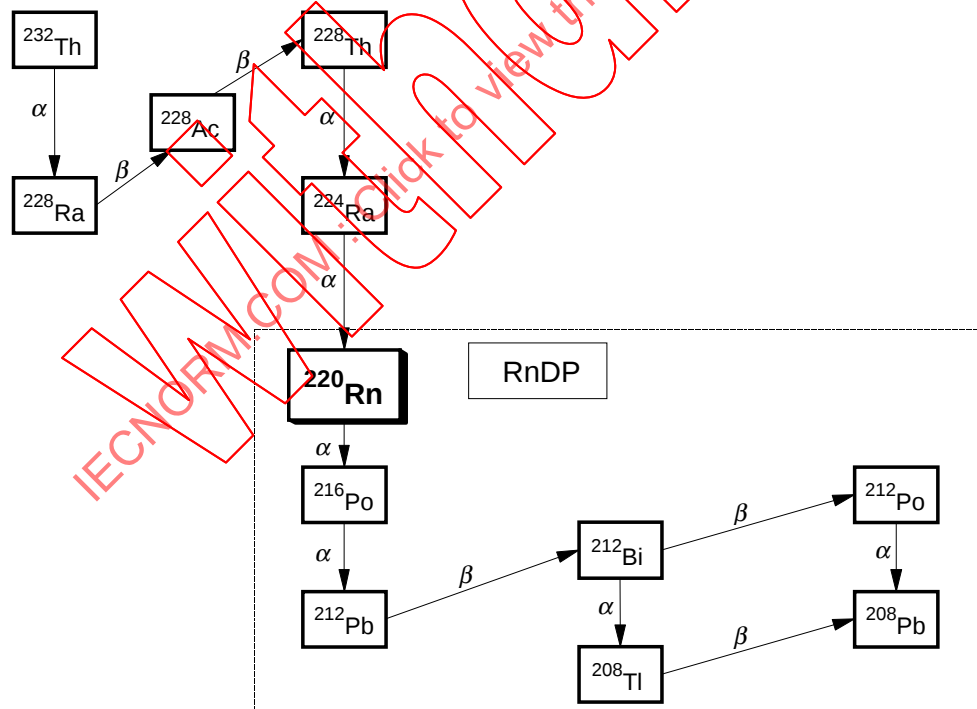


Figure 2 – Thorium 232 and its decay products

5 Instruments utilisés pour la mesure du radon et des descendants du radon

Les instruments utilisés pour la mesure des isotopes du radon ou des RnDP constituent une classe particulière d'instruments de mesure de la radioactivité. Compte tenu de la nature de la radioactivité à mesurer, il est nécessaire de les décrire, non seulement par leurs performances, mais aussi par leur utilisation potentielle et/ou leurs principes de mesure.

En ce qui concerne le cas particulier de la mesure du radon et de ses descendants, la méthode de mesure et l'instrument utilisé pour effectuer la mesure sont souvent étroitement liés. Sauf indication contraire, l'expression *méthode de mesure* sera donc utilisée dans le reste du texte comme terme générique pour la méthode de mesure et l'instrument associé.

Cette phrase implique que, pour une *méthode de mesure* dans laquelle il y a séparation entre la détection et l'analyse, l'ensemble du système de mesure doit être pris en compte.

5.1 Critères pour la classification des instruments de mesure du radon et de ses descendants

Les instruments de mesure concernés par la présente norme peuvent être classés dans plusieurs groupes selon les critères pris en compte. La méthode de mesure utilisée est d'habitude associée à ce groupe.

Les critères le plus souvent utilisés pour classer ces instruments de mesure sont les suivants (voir tableaux B.1 et B.2):

- type d'application (à l'extérieur, dans les mines, etc.);
- durée de prélèvement (prélèvement ponctuel, prélèvement intégré, prélèvement en continu);
- méthode de prélèvement (diffusion, pompage, etc.);
- méthode de comptage (alpha global, spectrométrie, intégrée, etc.);
- méthode de détection (détecteur silicium, scintillateur, détecteurs solides de trace, chambre d'ionisation, etc.);
- méthode de calcul (déconvolution des équations de désintégration, spectroscopie, etc.);
- détection directe ou indirecte;
- gamme de mesure;
- possibilités de recyclage (pièces jetables, remplacement des filtres, etc.).

Les méthodes décrites sont celles utilisées par les instruments concernés par la présente norme; elles concernent soit les instruments de référence utilisés pour la qualification des atmosphères de référence (voir annexe C), soit les instruments à essayer selon la présente norme (voir CEI 61577-2 et CEI 61577-3).

NOTE Dans l'ensemble de la présente norme, il est important de ne pas confondre la méthode de mesure utilisée dans l'instrument en essai et la méthode de mesure utilisée comme méthode de référence pour la définition de l'atmosphère de référence, bien qu'elles puissent être les mêmes.

5.2 Méthodes de mesure du radon dans une atmosphère

Les méthodes décrites dans le tableau B.1 sont celles couramment utilisées pour les instruments de mesures concernés par la présente norme, ainsi que pour les essais qui utilisent des atmosphères de référence et qui font l'objet de la majeure partie de cette norme.

Lorsqu'elles sont basées sur la seule mesure de l'émission alpha propre aux isotopes du radon, avec ou sans prélèvement, ces méthodes peuvent être considérées comme des méthodes de mesure directes.

5 Instruments used for measuring radon and radon decay products

The instruments used for the measurement of radon isotopes or of RnDP constitute a special class of radioactivity measuring instruments. Due to the nature of the radioactivity to be measured, they need to be described, not only by their performances, but also by their potential use and/or their principles of measurement.

In the special case of radon and RnDP measurements, the method of measurement and the device used to make the measurement are often very closely linked. The expression *method of measurement* will therefore be used in the rest of the text as a generic term for both the method of measurement and the associated device used to carry it out, except when there is a specific indication to the contrary.

This sentence implies that, for *method of measurement* consisting of separated detection and analysis, the whole measuring system shall be considered.

5.1 Criteria for the classification of radon and RnDP measuring instruments

The measuring instruments concerned by this standard can be separated into various groups depending on the criteria taken into account. The method of measurement used is generally related to this group.

The criteria which are commonly used for classification of these measuring instruments are as follows (see tables B.1 and B.2):

- type of application (i.e. outdoor, mines, etc.);
- duration of sampling (i.e. grab sampling, integrated sampling, continuous sampling);
- method of sampling (i.e. diffusion, pumping, etc.);
- method of counting (i.e. gross alpha, spectrometric, integrating, etc.);
- method of detection (silicon detector, scintillator, SSNTD, ionization chamber, etc.);
- method of calculation (deconvolution of decay equations, spectroscopy, etc.);
- direct or indirect detection;
- working range;
- suitability for reuse (disposable equipment, filter exchange, etc.).

The methods described are those used by the instruments concerned by this standard; they refer either to the reference instruments used for the qualification of the reference atmospheres (see annex C) or to the instruments to be tested according to this standard (see IEC 61577-2 and IEC 61577-3).

NOTE Throughout the whole document, care must be taken not to get confused between the method of measurement implemented in the instrument under test and the method of measurement used as a reference method for defining the reference atmosphere, although it could be the same.

5.2 Methods of measuring radon in an atmosphere

The methods listed in table B.1 are those currently in use in the measuring instruments concerned by this standard, and are those which are involved in the tests with reference atmospheres and which form the subject of the major part of this standard.

When based on the measurement of the alpha radiation from radon isotopes themselves, with or without sampling, these methods can be considered as direct methods.

Les méthodes de mesure basées:

- soit sur la mesure du radon et de ses descendants placés dans un état d'équilibre connu;
- soit sur la seule mesure des descendants, un calcul, prenant en compte l'état d'équilibre et les lois de la désintégration radioactive, permettant alors de remonter à la valeur de l'activité volumique du radon,

sont toujours considérées comme méthodes de mesure indirectes.

5.3 Méthodes de mesure des descendants du radon dans une atmosphère

Les méthodes décrites dans le tableau B.2 sont celles qui sont utilisées actuellement couramment dans les instruments à contrôler, et peuvent aussi servir à réaliser des essais utilisant des atmosphères de référence.

NOTE Les méthodes qui reposent sur des prélèvements d'aérosols entraînent toujours des perturbations de la grandeur à mesurer (par pertes d'aérosol, enrichissement ou diminution de la concentration en aérosols causé par les modifications d'écoulement devant l'ouverture de prélèvement, etc.).

La majorité des méthodes courantes de mesure des RnDP sont des méthodes de mesure indirectes basées sur un prélèvement.

5.4 Gamme de paramètres d'essai

Les gammes des paramètres pour réaliser les essais des différents types d'instruments sont données dans la CEI 61577-2, la CEI 61577-3 et la CEI 61263.

6 Nécessité d'une atmosphère de référence

6.1 Méthodes d'essai usuelles

Les essais des instruments de mesure du radon et de ses descendants sont souvent effectués en utilisant des sources de référence solides ou gazeuses qui sont composées d'un radionucléide bien défini dont l'activité est connue de façon précise: par exemple, les sources solides électrodéposées de ^{241}Am , ^{239}Pu mises en œuvre pour essayer les appareils utilisant la mesure des émissions α , les sources de ^{137}Cs , ou ^{90}Sr pour les essais des instruments utilisant la mesure des émissions β , et les sources gazeuses de ^{85}Kr ou ^{133}Xe utilisées pour les essais des instruments utilisant l'ionisation des gaz comme moyen de détection.

Les essais qui utilisent de telles sources permettent en principe de vérifier le bon fonctionnement des circuits électroniques utilisés pour l'analyse, depuis le détecteur jusqu'à l'affichage.

Dans quelques cas, cependant, ces essais peuvent s'avérer insuffisants parce que les sources utilisées ne sont pas assez représentatives du phénomène réel à mesurer.

Quel que soit le radionucléide choisi, l'énergie maximale des particules alpha émises par un radionucléide artificiel ne dépasse pas $\approx 5,8$ MeV. Si les circuits d'analyse ont une réponse non linéaire à des énergies au-delà de cette valeur, cet artefact ne sera détecté dans aucun des essais cités ci-dessus. Le ^{214}Po (RnDP₂₂₂), par exemple, émet une particule α de 7,687 MeV.

La gamme d'énergies correspondante ne pourrait donc pas être complètement contrôlée en utilisant les radionucléides artificiels normaux.

De plus, le dépôt par diffusion sur les surfaces, les systèmes de prélèvement et de comptage simultanés, la mesure simultanée du ^{222}Rn et du ^{220}Rn , le comportement de l'aérosol porteur des RnDP (qui est l'objet de la mesure) ne peuvent pas être simulés.

Methods based:

- either on the measurement of the radon and its decay products placed in a known equilibrium state;
- or on the measurement of the decay products only, a calculation involving the equilibrium state and the radioactive decay laws, which make it possible to calculate back and obtain a measurement of the radon volume activity,

are always considered as indirect methods.

5.3 Methods of measuring radon decay products in an atmosphere

The methods listed in table B.2 are those currently in use for the instruments being tested, and may be also involved in the tests with reference atmospheres.

NOTE Methods involving aerosol sampling will always disturb the measurement (by aerosol losses, depletion or enrichment of aerosol concentration due to air flow pattern modifications in front of the sampling orifice, etc.).

The majority of the standard methods of measuring RnDPs are indirect methods based on sampling techniques.

5.4 Range of test parameters

The ranges of parameters for testing the different kind of instruments are given in IEC 61577-2, IEC 61577-3 and IEC 61263.

6 Need for a reference atmosphere

6.1 Usual test methods

Tests of instruments for measuring radon and its decay products are often carried out using solid or gaseous reference sources consisting of a well-defined radionuclide whose activity is accurately known. Examples include the electro-deposited solid sources of ^{241}Am , ^{239}Pu used for testing equipment using the measurement of α emission, the sources of ^{137}Cs , or ^{90}Sr for testing equipment using the measurement of β emission, and the gaseous sources of ^{85}Kr or ^{133}Xe used for testing equipment using the ionization of gases as a means of detection.

The tests using such sources make it possible in principle to check the correct operation of the electronic circuits used for analysis, starting from the detector through to the display device.

However, in some cases these tests may be deficient because the sources used are insufficiently representative of the real phenomenon to be measured.

Whatever radionuclide is chosen, the maximum energy of the alpha particles emitted by an artificial radionuclide does not exceed $\approx 5,8$ MeV. If the analysis circuits have a non-linear response at energies beyond this value, this artefact would not be detected during any of the above-mentioned tests. ^{214}Po (RnDP₂₂₂), for example, emits an α -particle of 7,687 MeV.

The corresponding energy range thus could not be completely tested using the normal artificial radionuclides.

Moreover, plate out effect, simultaneous sampling and counting system, ^{222}Rn and ^{220}Rn simultaneous measurement, RnDP aerosol (which is the object of measurement) behaviour cannot be simulated.

Certains instruments, en particulier ceux qui sont utilisés pour l'évaluation de l'activité volumique des descendants du radon, utilisent des algorithmes informatiques basés sur les lois de la décroissance radioactive spécifiques au descendant radioactif en question. Ces algorithmes, eux non plus, ne peuvent pas être essayés en utilisant des sources de radionucléides artificiels à vie longue.

Quant aux appareils de mesure du radon gaz qui ne fonctionnent que par détection de l'émission α propre au radon, ils ne peuvent évidemment qu'être incomplètement testés à l'aide de gaz radioactifs émetteurs β ou γ .

Somme toute, la nécessité d'une atmosphère de référence relève du fait qu'il n'y a aucun radionucléide artificiel qui présente des propriétés de désintégration qui ressemblent à celles des descendants du radon, et qui puisse être utilisé pour un essai complet des instruments de mesure concernés.

6.2 Mélanges d'isotopes du radon

Dans les atmosphères réelles, nous nous trouvons confrontés à un mélange d'isotopes du radon variés dans des proportions et avec des facteurs d'équilibre variables. Une atmosphère de référence doit être capable de contenir de tels mélanges, du moins dans des proportions fixes et définies. Les gammes d'activités volumiques définies dans l'annexe C (voir C.4.2.1) peuvent être utilisées si elles s'appliquent à chaque isotope pris à part. L'énergie alpha potentielle et l'exposition à l'énergie alpha potentielle seront, quant à elles, mesurées, puisqu'il n'y a aucun moyen simple de prédire directement de telles grandeurs.

Dans quelques cas particuliers (par exemple une zone fortement ventilée avec une forte activité volumique du radon, mesure des $RnDP_{222}$ en présence de $RnDP_{220}$, mesure des $RnDP_{220}$ en présence de $RnDP_{222}$), il convient de considérer le radon et/ou les $RnDP$ comme grandeurs d'influence.

6.3 Le concept de STAR

Les différents exemples illustrés indiquent la nécessité de disposer d'un dispositif d'essai qui permette d'établir une relation directe avec les éléments à mesurer. Ce dispositif complexe sera composé de quatre parties indissociables:

- le dispositif pour la production de l'atmosphère;
- le dispositif pour contenir l'atmosphère;
- l'atmosphère de référence ainsi créée;
- le matériel et les méthodes pour la surveillance en continu de cette atmosphère;

le tout associé à la traçabilité jusqu'à une organisation ou un laboratoire de référence reconnu.

Pour simplifier le texte de cette norme, un tel système est désigné sous le nom de STAR (Système de Test en Atmosphères contenant du Radon).

La figure 3 montre la structure générale d'un STAR complet.

Ce système est parfois aussi appelé chambre à radon; ce terme, cependant, n'exprime pas le même concept intégré.

Il est possible, cependant, que certains STAR ne comprennent que certaines parties du système complet. Par exemple un STAR utilisé uniquement pour le radon n'a besoin ni d'un instrument de référence pour la mesure des $RnDP$ ni de systèmes pour le contrôle et la mesure de l'aérosol, excepté dans le cas des essais d'instruments utilisant des détecteurs ouverts.

Some instruments, particularly those used for the evaluation of the volume activity of radon decay product, use computer algorithms based on the decay laws specific to the radioactive decay product in question. These algorithms, too, cannot be checked with the help of sources using long-lived artificial radionuclides.

As for instruments that measure radon gas, which operate only by detecting the α emission specifically from radon, it is obvious that they can be only incompletely tested using β - or γ -emitting radioactive gases.

As a whole, the need for a reference atmosphere arises from the fact that there is no artificial radionuclide showing similar decay properties with RnDP, able to be used for a complete testing of the measuring instruments concerned.

6.2 Mixtures of radon isotopes

In real atmospheres, we are concerned with a mixture of different radon isotopes in varying proportions and with variable equilibrium factors. A reference atmosphere shall be capable of containing such mixtures, at least in fixed and defined proportions. The ranges of volume activities defined in C.4.2.1 can be used as if they applied to each isotope taken separately. For their part, the potential alpha energy, and furthermore the exposure to potential alpha energy, will be measured, since no simple way of predicting them can be given.

In some special cases (i.e. very strongly ventilated area with high radon volume activity, RnDP₂₂₂ measurement in the presence of RnDP₂₂₀, RnDP₂₂₀ measurement in the presence of RnDP₂₂₂), radon and/or RnDP should be considered as influence quantities.

6.3 The concept of STAR

The various examples illustrated indicate a need for a test facility related directly to the elements to be measured. Such a facility will be complex and will consist of four inseparable parts:

- the equipment for producing the atmosphere;
- the equipment for containing the atmosphere;
- the reference atmosphere thus created;
- the equipment and methods for monitoring this atmosphere;

the whole associated with traceability to a recognized reference organisation or laboratory.

In order to simplify the text of this standard, such a system is referred as a STAR (an acronym for System for Test Atmospheres with Radon).

Figure 3 shows the general construction of a complete STAR.

It is also sometimes called "radon chamber"; however, this term does not imply the same integrated concept.

However, some STARs may comprise only parts of the complete scheme. As an example, STAR used only for radon needs neither reference RnDP measuring instrument nor aerosol control and measurement systems, except for testing instruments with open detectors.

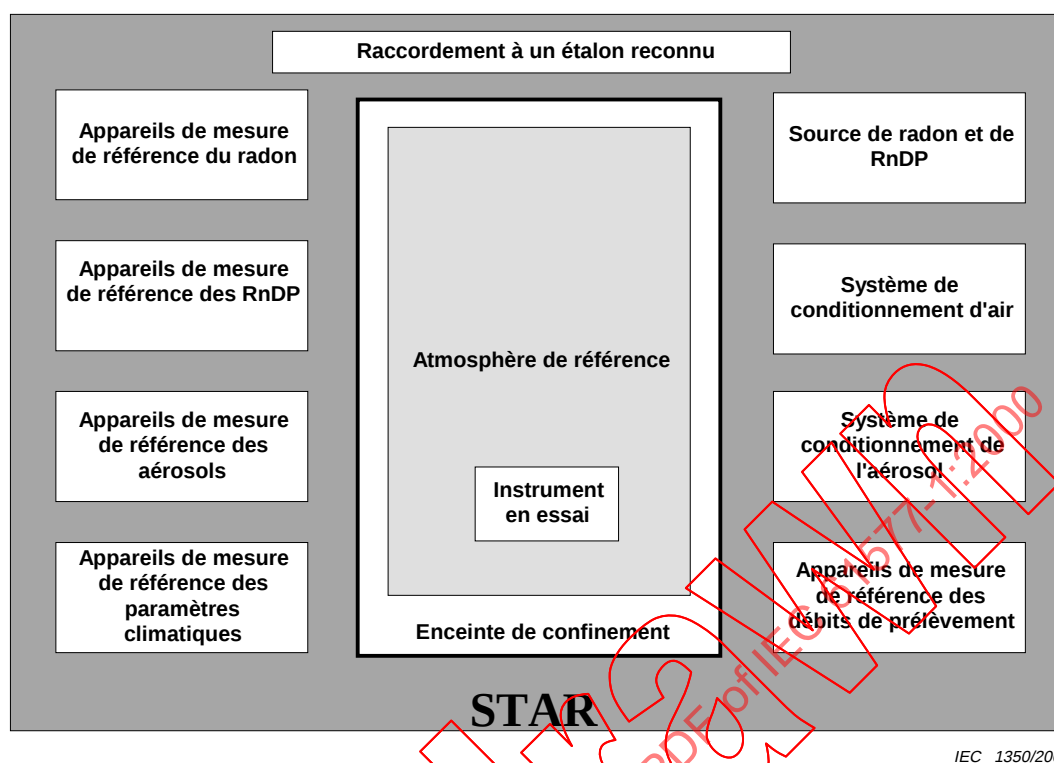


Figure 3 – Constitution d'un STAR

Quelques exemples de STAR sont présentés dans l'annexe F.

7 Procédures pour les essais des instruments de mesure du radon et des descendants du radon

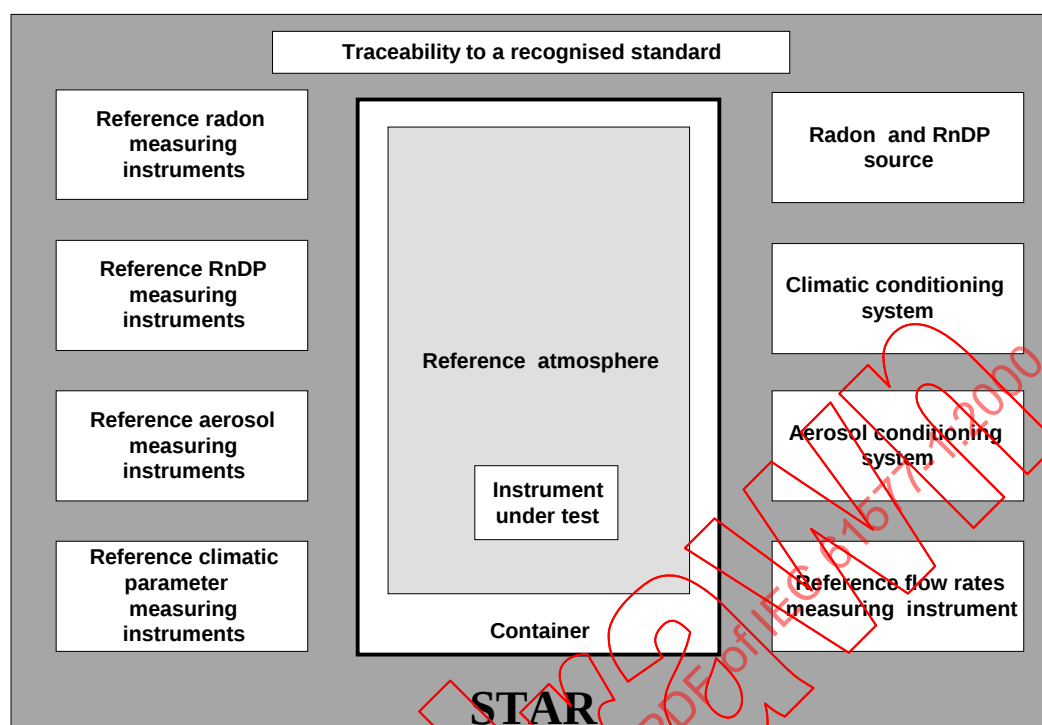
Ces procédures concernent des exigences spécifiques.

7.1 Procédures pour les essais des instruments de mesure du radon

Les procédures concernées sont décrites dans la CEI 61577-2. Elles concernent les essais des instruments destinés à la mesure de l'activité volumique du radon dans l'atmosphère. Ces essais doivent être effectués, avec variations des grandeurs d'influence, en utilisant des sources radioactives de référence et des atmosphères de référence créées avec un STAR.

7.2 Procédures pour les essais des instruments de mesure des RnDP

Les procédures concernées sont décrites dans la CEI 61577-3. Elles concernent les essais des instruments destinés à la mesure de l'activité volumique des descendants du radon et/ou de l'énergie alpha potentielle volumique. Ces essais doivent aussi être effectués, avec variations des grandeurs d'influence, en utilisant des sources radioactives de référence et des atmosphères radioactives de référence créées avec un STAR.



IEC 1350/2000

Figure 3 – Construction of a STAR

Some examples of STAR are given in annex F.

7 Protocols for testing radon and RnDP measuring instruments

These protocols concern specific requirements.

7.1 Protocols for testing radon measuring instruments

The protocols concerned are described in IEC 61577-2. They concern tests of instruments dedicated to the measurement of the radon volume activity in the atmosphere. These tests have to be conducted using together reference radioactive sources and reference radioactive atmospheres created with a STAR, with variations of the influence quantities.

7.2 Protocols for testing RnDP measuring instruments

The protocols concerned are described in IEC 61577-3. They concern tests of instruments devoted to the measurement of RnDP volume activity and/or of potential alpha energy concentration. These tests have also to be conducted using together reference radioactive sources and reference radioactive atmospheres created with a STAR, with variations of the influence quantities.

Annexe A (informative)

Les radionucléides des chaînes de l'uranium et du thorium

Les caractéristiques radioactives¹⁾ des nucléides des familles ou chaînes suivantes sont présentées dans les tableaux A.1 et A.2 respectivement:

- uranium 238 (15 nucléides)
- thorium 232 (12 nucléides)

A.1 Têtes de chaîne

Les têtes de chaîne correspondent à des radionucléides ayant des périodes dont les valeurs sont comparables à l'âge de la terre:

- âge de la terre: $\approx 5 \times 10^9$ ans
- période de l'uranium 238: $4,468 \times 10^9$ ans
- période du thorium 232: $1,405 \times 10^{10}$ ans

Pour ces deux radionucléides, le nombre d'atomes qui subsistent encore représente:

- 46 % pour l'uranium 238;
- 78 % pour le thorium 232,

de ceux qui existaient au moment de la formation de la terre.

NOTE Par convention, l'incertitude sur la valeur de la période radioactive et de l'énergie des émissions des radionucléides mesurés sera considérée comme nulle. Les valeurs conventionnellement vraies sont données dans les tableaux A.1 et A.2.

¹⁾ Toutes les constantes radioactives citées dans la présente norme sont extraites de la référence [1], donnée en bibliographie.

Annex A (informative)

Radionuclides in the uranium and thorium series

The radioactive characteristics¹⁾ of the nuclides in the following families or series are listed in tables A.1 and A.2 respectively:

- uranium 238 (15 nuclides)
- thorium 232 (12 nuclides)

A.1 Heads of series

It is worth noting that the properties of the nuclides at the head of each series, as given in the tables, show that their half-lives are comparable with the age of the earth.

- age of the earth: $\approx 5 \times 10^9$ years
- half-life of uranium 238: $4,468 \times 10^9$ years
- half-life of thorium 232: $1,405 \times 10^{10}$ years

Thus, the proportions of these radionuclides that still persist on the earth, expressed in terms of the number that existed at the time when the earth was formed, are:

- 46 % for uranium 238;
- 78 % for thorium 232.

NOTE By convention, the uncertainty of the value of the half-life and of the energies of emissions of the measured radionuclides will be taken as zero. The values of these conventionally true values are given in tables A.1 and A.2.

¹⁾ All the radioactive data given in this standard are extracted from [1] (see bibliography).

A.2 Chaîne de l'uranium

Tableau A.1 – Caractéristiques des radionucléides de la chaîne de l'uranium 238

Symbole	Période	Energies des principales radiations MeV			Nombre d'atomes par Bq
		Alpha	Bêta (moyenne)	Gamma	
$^{238}_{92}\text{U}$	$4,468 \times 10^9$ an	4,149 (22,9 %) 4,198 (76,8 %)			$2,03 \times 10^{17}$
$^{234}_{90}\text{Th}$	24,10 j		0,024 93 (18,6 %) 0,050 55 (72,5 %)	0,063 29 (3,81 %) 0,092 80 (2,69 %)	$3,00 \times 10^6$
$^{234m}_{90}\text{Pa}$	1,17 min		0,825 3 (98,3 %)		$1,01 \times 10^2$
$^{234}_{90}\text{Pa}$	6,7 h		0,141 0 (25,3 %) 0,141 2 (11,6 %) 0,198 1 (15,9 %)	0,131 2 (19,7 %) 0,227 2 (5,50 %) 0,733 0 (8,58 %)	$34,70 \times 10^3$
$^{234}_{92}\text{U}$	244 500 an	4,721 (27,4 %) 4,773 (72,3 %)			$1,11 \times 10^{13}$
$^{230}_{90}\text{Th}$	77 000 an	4,621 (23,4 %) 4,688 (76,2 %)			$3,50 \times 10^{12}$
$^{226}_{88}\text{Ra}$	1 600 an	4,602 (5,55 %) 4,785 (94,4 %)		0,186 (3,28 %)	$7,28 \times 10^{10}$
$^{222}_{86}\text{Rn}$	3,8235 j	5,490 (99,9 %)			$4,77 \times 10^5$
$^{218}_{84}\text{Po}$	3,05 min	6,003 (100 %)			$2,64 \times 10^2$
$^{214}_{82}\text{Pb}$	26,8 min		0,207 2 (48,1 %) 0,227 4 (42,1 %)	0,295 2 (19,2 %) 0,351 9 (37,1 %)	$2,32 \times 10^3$
$^{214}_{83}\text{Bi}$	19,9 min		0,491 9 (8,28 %) 0,525 2 (17,6 %) 0,539 3 (17,9 %) 1,269 (17,7 %)	0,609 3 (46,1 %) 1,120 (15,0 %) 1,765 (15,9 %)	$1,72 \times 10^3$
$^{214}_{84}\text{Po}$	164,3 μs	7,687 (100 %)			$2,37 \times 10^{-4}$
$^{210}_{82}\text{Pb}$	22,3 an		0,016 13 (20 %)	0,046 5 (4,05 %)	$1,01 \times 10^9$
$^{210}_{83}\text{Bi}$	5,012 j		0,388 9 (100 %)		$6,25 \times 10^5$
$^{210}_{82}\text{Po}$	138,38 j	5,297 (100 %)			$1,72 \times 10^7$
$^{206}_{82}\text{Pb}$	Stable				

A.2 Uranium series

Table A.1 – Uranium 238 nuclide radioactive characteristics

Symbol	Half-life	Major radiation energies MeV			Number of atoms per Bq
		Alpha	Beta (average)	Gamma	
$^{238}_{92}\text{U}$	$4,468 \times 10^9$ y	4,149 (22,9 %) 4,198 (76,8 %)			$2,03 \times 10^{17}$
$^{234}_{90}\text{Th}$	24,10 d		0,024 93 (18,6 %) 0,050 55 (72,5 %)	0,063 29 (3,81 %) 0,092 80 (2,69 %)	$3,00 \times 10^6$
$^{234\text{m}}_{90}\text{Pa}$	1,17 min		0,825 3 (98,3 %)		$1,01 \times 10^2$
$^{234}_{90}\text{Pa}$	6,7 h		0,141 0 (25,3 %) 0,141 2 (11,6 %) 0,198 1 (15,9 %)	0,131 2 (19,7 %) 0,227 2 (5,50 %) 0,733 0 (8,58 %)	$34,70 \times 10^3$
$^{234}_{92}\text{U}$	244 500 y	4,721 (27,4 %) 4,773 (72,3 %)			$1,11 \times 10^{13}$
$^{230}_{90}\text{Th}$	77 000 y	4,621 (23,4 %) 4,688 (76,2 %)			$3,50 \times 10^{12}$
$^{226}_{88}\text{Ra}$	1 600 y	4,602 (5,55 %) 4,785 (94,4 %)		0,186 (3,28 %)	$7,28 \times 10^{10}$
$^{222}_{86}\text{Rn}$	3,8235 d	5,490 (99,9 %)			$4,77 \times 10^5$
$^{218}_{84}\text{Po}$	3,05 min	6,003 (100 %)			$2,64 \times 10^2$
$^{214}_{82}\text{Pb}$	26,8 min		0,207 2 (48,1 %) 0,227 4 (42,1 %)	0,295 2 (19,2 %) 0,351 9 (37,1 %)	$2,32 \times 10^3$
$^{214}_{83}\text{Bi}$	19,9 min		0,491 9 (8,28 %) 0,525 2 (17,6 %) 0,539 3 (17,9 %) 1,269 (17,7 %)	0,609 3 (46,1 %) 1,120 (15,0 %) 1,765 (15,9 %)	$1,72 \times 10^3$
$^{214}_{84}\text{Po}$	164,3 μs	7,687 (100 %)			$2,37 \times 10^{-4}$
$^{210}_{82}\text{Pb}$	22,3 y		0,016 13 (20 %)	0,046 5 (4,05 %)	$1,01 \times 10^9$
$^{210}_{83}\text{Bi}$	5,012 d		0,388 9 (100 %)		$6,25 \times 10^5$
$^{210}_{82}\text{Po}$	138,38 d	5,297 (100 %)			$1,72 \times 10^7$
$^{206}_{82}\text{Pb}$	Stable				

A.3 Chaîne du thorium

Tableau A.2 – Caractéristiques des radionucléides de la chaîne du thorium 232

Symbole	Période	Energies des principales radiations MeV			Nombre d'atomes par Bq
		Alpha	Bêta (moyenne)	Gamma	
²³² ₉₀ Th	1,405 × 10 ¹⁰ an	3,952 (23 %) 4,010 (76,8 %)			639 × 10 ¹⁵
²²⁸ ₈₈ Ra	5,75 an		0,009 865 (100 %)		262 × 10 ⁶
²²⁸ ₈₉ Ac	6,13 h		0,386 1 (40,4 %) 0,610 8 (11,4 %)	0,338 4 (12 %) 0,911 1 (29 %) 0,968 9 (17,5 %)	31,8 × 10 ³
²²⁸ ₉₀ Th	1,9131 an	5,340 (26,7 %) 5,423 (72,7 %)			87 × 10 ⁶
²²⁴ ₈₈ Ra	3,66 j	5,449 (4,9 %) 5,686 (95,1 %)			456 × 10 ³
²²⁰ ₈₆ Rn	55,6 s	6,288 (99,9 %)			80,2
²¹⁶ ₈₄ Po	0,15 s	6,779 (100 %)			216 × 10 ⁻³
²¹² ₈₂ Pb	10,64 h		0,041 94 (5,21 %) 0,094 46 (84,9 %) 0,172 7 (9,89 %)	0,238 6 (44,6 %)	55,3 × 10 ³
²¹² ₈₃ Bi	60,55 min	6,051 (25,2 %) 6,090 (9,63 %)	0,190 5 (3,44 %) 0,228 6 (2,65 %) 0,530 6 (7,9 %) 0,831 5 (48,4 %)	0,727 2 (11,8 %)	5,24 × 10 ³
²¹² ₈₄ Po	0,305 μs	8,786 (100 %)			4,4 × 10 ⁻¹⁰
²⁰⁸ ₈₁ Tl	3,07 min		0,438 8 (22,8 %) 0,532 5 (22 %) 0,646 5 (50,9 %)	0,510 8 (21,6 %) 0,583 1 (85,8 %) 0,860 4 (12 %) 2,615 (99,8 %)	266
²⁰⁸ ₈₂ Pb	Stable				

A.3 Thorium series

Table A.2 – Thorium 232 nuclide radioactive characteristics

Symbol	Half-life	Major radiation energies MeV			Number of atoms per Bq
		Alpha	Beta (average)	Gamma	
$^{232}_{90}\text{Th}$	$1,405 \times 10^{10}$ y	3,952 (23 %) 4,010 (76,8 %)			639×10^{15}
$^{228}_{88}\text{Ra}$	5,75 y		0,009 865 (100 %)		262×10^6
$^{228}_{89}\text{Ac}$	6,13 h		0,386 1 (40,4 %) 0,610 8 (11,4 %)	0,338 4 (12 %) 0,911 1 (29 %) 0,968 9 (17,5 %)	$31,8 \times 10^3$
$^{228}_{90}\text{Th}$	1,9131 y	5,340 (26,7 %) 5,423 (72,7 %)			87×10^6
$^{224}_{88}\text{Ra}$	3,66 d	5,449 (4,9 %) 5,686 (95,1 %)			456×10^3
$^{220}_{86}\text{Rn}$	55,6 s	6,288 (99,9 %)			80,2
$^{216}_{84}\text{Po}$	0,15 s	6,779 (100 %)			216×10^{-3}
$^{212}_{82}\text{Pb}$	10,64 h		0,041 94 (5,21 %) 0,094 46 (84,9 %) 0,172 7 (9,89 %)	0,238 6 (44,6 %)	$55,3 \times 10^3$
$^{212}_{83}\text{Bi}$	60,55 min	6,051 (25,2 %) 6,090 (9,63 %)	0,190 5 (3,44 %) 0,228 6 (2,65 %) 0,530 6 (7,9 %) 0,831 5 (48,4 %)	0,727 2 (11,8 %)	$5,24 \times 10^3$
$^{212}_{84}\text{Po}$	0,305 μs	8,786 (100 %)			$4,4 \times 10^{-10}$
$^{208}_{81}\text{Tl}$	3,07 min		0,438 8 (22,8 %) 0,532 5 (22 %) 0,646 5 (50,9 %)	0,510 8 (21,6 %) 0,583 1 (85,8 %) 0,860 4 (12 %) 2,615 (99,8 %)	266
$^{208}_{82}\text{Pb}$	Stable				

A.4 Caractéristiques des éléments radioactifs à mesurer

A.4.1 Caractéristiques physico-chimiques des radionucléides qui peuvent être présents dans l'atmosphère étudiée

Une description des caractéristiques physiques et chimiques des principaux composants d'une atmosphère de référence est donnée dans le tableau A.3. Cette description souligne le fait que, malgré le petit nombre d'atomes présents dans une telle atmosphère, des phénomènes de nature chimique et/ou physique peuvent parfois modifier les caractéristiques générales de l'environnement atmosphérique à l'étude (voir [2]*, [3], [4]).

Tableau A.3 – Caractéristiques physico-chimiques des principaux composants radioactifs d'un environnement atmosphérique (voir [5])

	Masse volumique kg·m ⁻³	Point de fusion °C	Point d'ébullition °C
Radon (²²² Rn, ²²⁰ Rn)	9,73	-71	-61,7
Polonium (²¹⁸ Po, ²¹⁴ Po, ²¹⁶ Po, ²¹² Po, ²¹⁰ Po)	9,320	254	962
Bismuth (²¹⁴ Bi, ²¹² Bi, ²¹⁰ Bi)	9,747	271,4	1564
Plomb (²¹⁴ Pb, ²¹² Pb, ²¹⁰ Pb)	11,350	327,46	1749
Thallium (²⁰⁸ Tl)	11,850	304	1473

A.4.2 Comportement physique du radon

Il faut garder à l'esprit que 100 Bq·m⁻³ de radon gazeux représentent seulement quelque 10⁻¹⁵ mm³. Dans le domaine de la mesure du radon, les éléments à mesurer ne sont présents qu'à l'état de trace.

A.4.3 Comportement physique des descendants du radon

Les descendants du radon sont composés pour la plupart d'isotopes des Pb, Bi, Tl et Po, qui sont tous à l'état solide à température ambiante.

Ils sont donc présents dans l'atmosphère étudiée sous forme d'aérosols qui peuvent être classés selon deux catégories:

- une fraction libre: lorsque le radon se désintègre, les atomes de polonium fraîchement formés peuvent s'attacher rapidement aux particules de l'aérosol atmosphérique. Les atomes qui restent non attachés se groupent rapidement (dans un laps de temps de quelques secondes) pour former des amas;
- une fraction attachée: les atomes ou amas d'atomes radioactifs attachés à des particules de l'aérosol atmosphérique.

* Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie.

A.4 Characteristics of the radioactive elements to be measured

A.4.1 Physical and chemical properties of radionuclides that may be present in the atmosphere under study

A description of the physical and chemical characteristics of the main components of a reference atmosphere is given in the table A.3. This draws the attention to the fact that, in spite of the small number of atoms present in such an atmosphere, phenomena of a chemical and/or physical nature can sometimes cause changes in the overall characteristics of the atmosphere under investigation (see [2]*, [3], [4]).

Table A.3 – Physical and chemical properties of the main radioactive components that may be present in an atmospheric environment (see [5])

	Specific gravity kg·m ⁻³	Melting point °C	Boiling point °C
Radon (²²² Rn, ²²⁰ Rn)	9,73	-71	-61,7
Polonium (²¹⁸ Po, ²¹⁴ Po, ²¹⁶ Po, ²¹² Po, ²¹⁰ Po)	9,320	254	962
Bismuth (²¹⁴ Bi, ²¹² Bi, ²¹⁰ Bi)	9,747	271,4	1 564
Lead (²¹⁴ Pb, ²¹² Pb, ²¹⁰ Pb)	11,350	327,46	1 749
Thallium (²⁰⁸ Tl)	11,850	304	1 473

A.4.2 Physical behaviour of radon

It is necessary to be aware of the fact that 100 Bq·m⁻³ of radon in a gaseous form represents only a few 10⁻¹⁵ mm³. In the domain of radon measurement, the elements to be measured are present only as trace quantities.

A.4.3 Physical behaviour of decay products

The decay products of radon consist mostly of isotopes of Pb, Bi, Tl and Po, all solids at ambient temperature.

They therefore are present in the atmosphere under investigation in the form of aerosols which can be classified into two groups:

- unattached fraction: when radon decays, the atoms of freshly formed polonium may quickly attach to airborne particles. Those atoms that remain unattached will rapidly (in a period of time of a few seconds) group to form clusters;
- attached fraction: radioactive atoms or clusters of atoms attached to airborne particles.

* The figures in square brackets refer to the bibliography.

A.4.4 Paramètres caractéristiques d'un aérosol

Un aérosol est caractérisé par certains paramètres, dont le plus significatif est le diamètre de ses composants. Celui-ci peut être mesuré en utilisant un microscope optique ou électronique. Au diamètre réel on substitue, en général, le diamètre aérodynamique et/ou thermodynamique moyen équivalent.

Les diamètres qui nous concernent varient de quelque 10^{-10} m (fraction libre) à plusieurs 10^{-5} m.

Un aérosol peut être:

- soit monodispersé, lorsque toutes les particules dont il est composé sont de la même taille;
- soit polydispersé, lorsque la distribution de la taille des particules varie sur une certaine étendue de diamètres.

En ce qui concerne les aérosols ultrafins et la fraction libre, un deuxième paramètre important est le coefficient de diffusion (indiqué par D et exprimé en $m^2 \cdot s^{-1}$). Ce coefficient reflète la capacité d'un aérosol ultrafin à s'attacher par diffusion brownienne à n'importe quelle particule ou surface.

Un troisième paramètre important est la charge électrique de l'aérosol due à l'arrachement d'électrons périphériques, soit par une action électrique ou mécanique, soit lors de la désintégration du radionucléide parent.

D'autres paramètres tels que la masse et le type chimique peuvent être significatifs (par exemple, dans la détermination du rendement de collection des instruments de prélèvement), mais en général leur effet est significatif seulement dans le cas des particules dont les diamètres dépassent plusieurs μm .

A.4.4.1 Comportement d'un aérosol

Les particules qui composent un aérosol sont sujettes aux forces suivantes:

- la diffusion turbulente;
- la diffusion brownienne;
- l'inertie, qui peut causer une modification de trajectoire dans le fluide porteur suivie d'une impaction sur n'importe quelle surface présente;
- la gravité, qui entraîne la sédimentation;
- les forces électrostatiques;
- les forces d'attraction dues à la viscosité du fluide porteur.

Ces forces agissent de façon différente selon la distribution des tailles des particules de l'aérosol et sa vitesse.

A.4.4.2 Distribution granulométrique des particules des aérosols radioactifs

Le spectre granulométrique des aérosols radioactifs est le résultat de la diffusion des particules radioactives ultrafines sur les noyaux de condensation atmosphériques.

La disparition des particules ultrafines par fixation sur des particules plus grosses est gouvernée par la loi:

$$\frac{dN}{dt} = -\beta \cdot n \cdot N$$

A.4.4 Characteristic parameters of an aerosol

An aerosol is characterized by certain parameters, the most significant of which is the diameter of its constituents. This can be measured using an optical or electron microscope. Generally speaking, the real diameter is replaced by the median equivalent aerodynamic and/or thermodynamic diameter.

The diameters that concern us range from some 10^{-10} m (unattached fraction) to several 10^{-5} m.

An aerosol may be:

- either monodisperse, when all the constituent particles have the same size;
- or polydisperse, when the particle size distribution extends over a certain range of diameters.

For ultrafine aerosols and the unattached fraction, a second important parameter is the coefficient of diffusion (denoted by D and expressed in $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). This reflects the ability of an ultrafine aerosol to become attached through Brownian diffusion to any particle or surface.

A third important parameter is the electric charge on the aerosol due to the removal of outer electrons, either by electrical or mechanical action, or during the decay of the parent radionuclide.

Other parameters such as mass and chemical type may be relevant (for example, in the determination of the collection efficiency of sampling devices), but their effect is generally significant only for particles with diameters greater than several μm .

A.4.4.1 Behaviour of an aerosol

The particles making up an aerosol are subjected to the following forces:

- turbulent diffusion;
- Brownian diffusion;
- inertia, which may cause a deflection of the path in the carrier fluid followed by an impact on any surface present;
- gravity, which produces sedimentation;
- electrostatic forces;
- drag forces due to the viscosity of the carrier fluid.

These forces act in different ways depending on the particle size distribution of the aerosol and its velocity.

A.4.4.2 Particle size distribution of radioactive aerosols

The spectrum of sizes exhibited by radioactive aerosols is the result of the diffusion of the ultrafine radioactive particles onto atmospheric condensation nuclei.

The disappearance of the ultrafine particles through their attachment to larger particles is governed by the law:

$$\frac{dN}{dt} = -\beta \cdot n \cdot N$$

où

n est la concentration des particules ultrafines;

N est la concentration des noyaux de condensation;

β est le coefficient d'attachement.

En première approximation, il est possible de calculer le spectre théorique des noyaux radioactifs en utilisant la formule ci-dessus et à partir du spectre théorique ou expérimental des noyaux de condensation.

On trouvera, à titre d'exemple, la figure A.1, caractéristique d'une atmosphère de mine souterraine [6].



Figure A.1 – Distribution granulométrique typique de l'aérosol de l'atmosphère d'une mine souterraine

A.4.5 Energie alpha potentielle [7]

Le concept d'énergie alpha potentielle (EAP) est un concept de physique sanitaire qui désigne l'indicateur de risque utilisé pour la radioprotection des personnes exposées au radon et à ses descendants.

Etant un gaz noble, le radon ne reste pas dans les poumons (l'organe cible); pour cette raison, le concept de l'énergie alpha potentielle ne s'applique normalement pas au radon. Ce sont les descendants solides à vie courte qui présentent un risque potentiel pour la santé puisqu'ils sont présents dans l'atmosphère sous forme d'aérosols et sont donc susceptibles de se déposer dans le système respiratoire et d'y déposer leur énergie en provoquant des lésions cellulaires.

Si l'on examine les chaînes de désintégration (tableaux A.1 et A.2), on peut constater que, vue leur très faible période, les ²¹⁴Po et ²¹²Po par exemple, sont quasiment inexistantes dans l'atmosphère, et se désintègrent dès qu'ils sont formés. Tout se passe comme si les particules alpha qu'ils émettent avaient été émises par leurs prédécesseurs, en l'occurrence les ²¹⁴Bi et ²¹²Bi.

where

n is the concentration of ultrafine particles;

N is the concentration of condensation nuclei;

β is the attachment coefficient.

In a first approximation, it is possible to calculate the theoretical spectrum of radioactive nuclei from the above formula and from the theoretical or experimental spectrum of the condensation nuclei.

As an example, the diagram set out in figure A.1 is typical of the atmosphere in an underground mine [6].

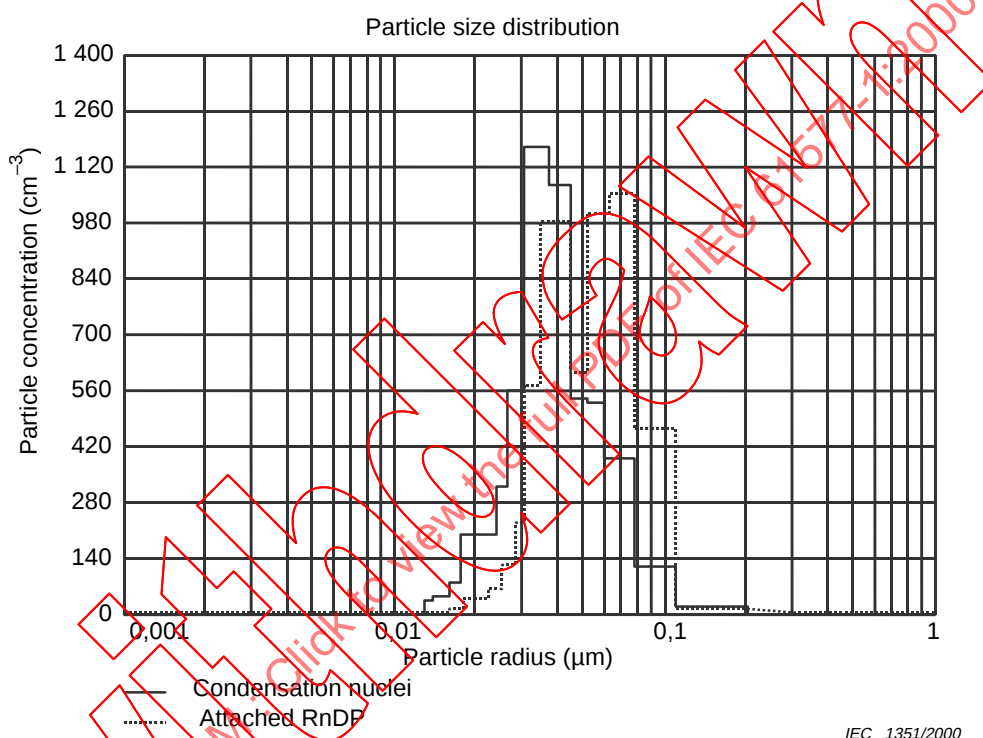


Figure A.1 – Particle size distribution typical of the atmosphere in an underground mine

A.4.5 Potential alpha energy as a health risk indicator [7]

The concept of potential alpha energy (PAE) originates in the field of health physics and is a risk indicator used in connection with the radiological protection of people exposed to radon and its decay products.

Because it is a noble gas, radon does not remain in the lungs (the target organ) and hence is not normally involved in the PAE concept. It is the short-lived solid decay products which present a potential risk to health, since they occur in the atmosphere in the form of aerosols and may therefore be deposited in the respiratory tract where they release their energy by causing damage to cells.

If the radioactive series (tables A.1 and A.2) are examined, it can be seen that ^{214}Po and ^{212}Po , for example, because of their very short half-life, are virtually non-existent in the atmosphere, decaying as soon as they are formed. Everything occurs as if the alpha particles they emit were emitted by their predecessors, in this case ^{214}Bi and ^{212}Bi .

Dans la chaîne du ^{222}Rn , le ^{218}Po émet des particules alpha ayant une énergie de 6,003 MeV. Cependant, compte tenu de la période radioactive de ses descendants, très courte en comparaison de leur période d'élimination biologique, le ^{214}Pb et puis le ^{214}Bi seront formés à l'endroit où le ^{218}Po a été déposé puis s'y désintégreront, aboutissant à l'émission d'une particule alpha du ^{214}Po ayant une énergie de 7,687 MeV.

Tout se passe comme si le ^{218}Po avait émis en tout deux particules alpha, avec des énergies respectives de 6,003 MeV et 7,687 MeV.

L'énergie totale à laquelle les tissus des poumons auront alors été exposés sera de l'ordre de $6,003 + 7,687 = 13,690$ MeV.

C'est par définition l'énergie alpha potentielle d'un atome de ^{218}Po .

Pour les ^{214}Bi et ^{214}Pb on calcule de même que leur énergie alpha potentielle vaut 7,687 MeV.

Dans la chaîne du ^{220}Rn , la désintégration du ^{212}Bi par émission alpha implique seulement 35,89 % des désintégrations totales, pour donner une énergie alpha potentielle de:

$$\frac{6,051 \times 35,89}{100} + \frac{8,785 \times 64,11}{100} = 7,804 \text{ MeV par atome.}$$

Par conséquent, le ^{212}Pb , prédécesseur du ^{212}Bi et émetteur bêta aura lui aussi une énergie alpha potentielle de 7,804 MeV.

On constate qu'il suffit donc de connaître le nombre d'atomes de chacun de ces radionucléides pour en déduire l'énergie alpha potentielle totale d'un mélange quelconque de ceux-ci.

In the ^{222}Rn series, ^{218}Po emits alpha particles with an energy of 6,003 MeV. However, owing to the very short radioactive half-life of its decay products compared with the time taken for biological elimination, ^{214}Pb and then ^{214}Bi will be formed at the spot where ^{218}Po was deposited and will then decay there, ending up with the emission of an alpha particle from ^{214}Po with an energy of 7,687 MeV.

Everything occurs as if the ^{218}Po had emitted two alpha particles in all, with energies of 6,003 MeV and 7,687 MeV respectively.

The total energy which will then have been yielded up to lung tissue will amount to $6,003 + 7,687 = 13,690$ MeV.

By definition, this is the potential alpha energy of a ^{218}Po atom.

Calculation of the potential alpha energy of ^{214}Bi and ^{214}Pb gives 7,687 MeV.

In the ^{220}Rn series, the decay of ^{212}Bi by alpha emission involves only 35,89 % of the total disintegrations, so that its potential alpha energy per atom is:

$$\frac{6,051 \times 35,89}{100} + \frac{8,785 \times 64,11}{100} = 7,804 \text{ MeV per atom}$$

^{212}Pb , the beta-emitting predecessor of ^{212}Bi , will therefore also have a potential alpha energy of 7,804 MeV.

It can be seen from this that, in order to deduce the total potential alpha energy of any mixture of radionuclides, we need to know only the number of atoms of each radionuclide involved in the mixture.

Annexe B (informative)

Classification des instruments de mesure du radon et des descendants du radon

B.1 Types d'instruments utilisés pour la mesure du radon

Tableau B.1 – Types d'instruments utilisés pour la mesure du radon

Type d'instrument/méthode	Type d'utilisation ¹⁾	Analyse par prélèvement ponctuel ²⁾	Analyse en continu ²⁾	Analyse par intégration ²⁾
Fioles scintillantes statiques/dynamiques	I,U,S	Indirecte	Directe/Indirecte	
Scintillation liquide (bullage)	I	Indirecte	Directe/Indirecte	Indirecte
Détecteur solide de traces ouvert	O,I,U,S			Indirecte
Détecteur solide de traces associé à un préleveur sur filtre	O,I,U			Indirecte
Détecteur solide de traces associé à une chambre de diffusion	O,I,U,S			Indirecte
Détecteur solide de traces associé à une chambre de désintégration avec circulation	O,I,U	Indirecte	Indirecte	
Détecteur à charbon actif (analyse γ spectrométrique)/(scintillation liquide)/SSNDT	I			Indirecte
Compteur proportionnel avec circulation	I,U		Directe/Indirecte	
Chambre d'ionisation avec circulation (impulsions)	O,I,S		Directe	
Chambre d'ionisation avec circulation (mesure du courant)	O,I,U	Indirecte	Indirecte	
Chambre d'ionisation statique	O,I,U	Directe/Indirecte	Indirecte	Indirecte
Electret ouvert	I			Indirecte
Electret associé à une chambre de diffusion	I			Indirecte
Détecteur semi-conducteur ouvert	I,O,U	Directe/Indirecte	Directe/Indirecte	Indirecte
Détecteur semi-conducteur associé à une chambre de diffusion	O,I,U,S	Indirecte	Indirecte	
Détecteur semi-conducteur associé à une chambre de désintégration avec circulation	O,I,U		Indirecte	
Détecteur semi-conducteur associé à un préleveur sur filtre	I,U	Indirecte	Indirecte	
Semi-conducteur associé à une collection électrostatique	I,O	Indirecte	Indirecte	
¹⁾ O indique une utilisation à l'extérieur, I indique une utilisation à l'intérieur, U indique une utilisation souterraine, S indique les mesures dans les sols. ²⁾ <i>Directe</i> fait référence aux méthodes qui permettent d'effectuer une mesure directe de la désintégration de l'isotope du radon, c'est-à-dire par l'émission alpha de 5,490 MeV pour le ^{222}Rn ou de 6,288 MeV pour le ^{220}Rn (voir 3.17 et 3.18).				

Annex B (informative)

Classification of radon and radon decay product measuring instruments

B.1 Types of instruments used for measuring radon

Table B.1 – Types of instruments used for measuring radon

Type of instrument/method	Indicative type of use ¹⁾	Grab sampling analysis ²⁾	Continuous analysis ²⁾	Analysis by integration ²⁾
Static/dynamic scintillation flasks	I, U, S	Indirect	Direct/Indirect	
Liquid scintillation (bubbling)	I	Indirect	Direct/Indirect	Indirect
Open solid-state nuclear track detector (SSNTD)	O, I, U, S			Indirect
SSNTD coupled to a filter sampling device	O, I, U			Indirect
SSNTD coupled to a diffusion chamber	O, I, U, S			Indirect
SSNTD coupled to a decay chamber with circulation	O, I, U	Indirect	Indirect	
Activated charcoal detector (γ spectrometry analysis)/(liquid scintillation)/SSNTD	I			Indirect
Proportional counter with circulation	I, U		Direct/Indirect	
Ionization chamber with circulation (pulses)	O, I, S		Direct	
Ionization chamber with circulation (current measurement)	O, I, U	Indirect	Indirect	
Static ionization chamber	O, I, U	Direct/Indirect	Indirect	Indirect
Open electret	I			Indirect
Electret coupled to a diffusion chamber	I			Indirect
Open semiconductor detector	I, O, U	Direct/Indirect	Direct/Indirect	Indirect
Semiconductor detector coupled to a diffusion chamber	O, I, U, S	Indirect	Indirect	
Semiconductor detector coupled to a decay chamber with circulation	O, I, U		Indirect	
Semiconductor detector coupled to a filter sampling device	I, U	Indirect	Indirect	
Semiconductor coupled with electrostatic collection	I, O	Indirect	Indirect	
¹⁾ O is for outdoor use, I is for indoor use, U is for underground use, S is for soil measurements. ²⁾ <i>Direct</i> refers to methods allowing a direct measurement of the radon isotope decay, i.e. through the 5,490 MeV alpha emission for ²²² Rn or the 6,288 MeV for ²²⁰ Rn (see 3.17 and 3.18).				

B.2 Types d'instruments utilisés pour la mesure des descendants du radon

Tableau B.2 – Types d'instruments utilisés pour la mesure des descendants du radon

Type d'instrument/méthode	Type d'utilisation ¹⁾	Analyse instantanée ou quasi instantanée ²⁾	Analyse en continu ²⁾	Analyse par intégration ²⁾
Détecteur solide de traces ouvert	O,I,U,S			Indirecte
Détecteur solide de traces associé à un préleveur sur filtre	O,I,U		Indirecte	Indirecte
Chambre d'ionisation statique associée à une méthode de déconvolution ³⁾	O,I	Indirecte	Indirecte	
Electret ouvert	O,I			Indirecte
Détecteur semi-conducteur ouvert (α ou γ) associé à une méthode de déconvolution ³⁾	I	Directe/indirecte	Indirecte	
Détecteur semi-conducteur ou ZnS(Ag) et préleveur à filtre associés à une méthode de déconvolution ³⁾	O,I,U	Direct/indirecte	Indirecte	
¹⁾ O indique une utilisation à l'extérieur, I indique une utilisation à l'intérieur, U indique une utilisation souterraine, S indique les mesures dans les sols. ²⁾ Directe fait référence aux méthodes qui permettent d'effectuer une mesure directe et séparée des descendants du radon, c'est-à-dire en utilisant l'émission alpha de 6,003 MeV pour le ²¹⁸Po ou de 609,3 keV pour le ²¹⁴Bi (voir 3.17 et 3.18). ³⁾ Certaines méthodes de déconvolution sont décrites dans l'annexe D.				

B.2 Types of instruments used for measuring radon decay product

Table B.2 – Types of instruments used for measuring radon decay products

Type of instrument/method	Indicative type of use ¹⁾	Instantaneous or almost instantaneous analysis ²⁾	Continuous analysis ²⁾	Analysis by integration ²⁾
Open solid-state track detector	O, I, U, S			Indirect
Solid-state track detector coupled to a filter sampling device	O, I, U		Indirect	Indirect
Static ionization chamber coupled to a deconvolution method ³⁾	O, I	Indirect	Indirect	
Open electret	O, I			Indirect
Open semiconductor detector (α or γ) coupled to a deconvolution method ³⁾	I	Direct/Indirect	Indirect	
Semiconductor or ZnS(Ag) detector with filter sampling device coupled to a deconvolution method ³⁾	O, I, U	Direct/Indirect	Indirect	
¹⁾ O is for outdoor use, I is for indoor use, U is for underground use, S is for soil measurements. ²⁾ <i>Direct</i> refers to methods allowing a direct and separate measurement of the RnDP decay, i.e. through the 6,003 MeV alpha emission for ²¹⁸ Po or the 609,3 keV gamma line for ²¹⁴ Pb (see 3.17 and 3.18). ³⁾ Some deconvolution methods are described in annex D.				

Annexe C (normative)

Installation pour la production des atmosphères de référence contenant des isotopes du radon et leurs descendants (STAR)

NOTE La présente annexe ne prétend ni résoudre tous les problèmes associés à la mise en place du matériel nécessaire pour la création des atmosphères de référence pour le radon et ses descendants ni décrire toutes les méthodes possibles. Cependant, elle se veut un guide pour aider ceux qui se trouvent confrontés à de tels problèmes à choisir les meilleures méthodes en toute connaissance de cause.

En particulier, elle met l'accent sur une caractéristique essentielle de la mesure d'une atmosphère de référence qui a souvent été négligée: il s'agit de la nécessité d'avoir une connaissance précise des débits de prélèvement ou des volumes prélevés, sans laquelle toute tentative de fournir une description exacte des propriétés de l'atmosphère de référence serait vaine.

C.1 Sources

Ce sont les premiers composants essentiels d'un STAR. Les sources doivent être stables et leurs caractéristiques indépendantes des paramètres environnementaux.

C.1.1 Sources de radon

C.1.1.1 Sources solides

Les sources solides sont constituées en général d'un sel de ^{226}Ra ou ^{228}Th pour générer le ^{222}Rn et le ^{220}Rn , respectivement. Le sel peut être pur ou bien mélangé avec une matrice ou piégé sur une matrice.

La nature du matériau va déterminer la valeur du coefficient d'émanation ainsi que du taux d'émanation et donc la capacité de la source à fournir des quantités plus ou moins grandes de radon.

Puisque le coefficient d'émanation dépend beaucoup de certains paramètres physiques (humidité relative, etc.), l'utilisation de ces sources nécessite des précautions importantes (contrôle de la température, de l'humidité, etc.). Néanmoins, ces sources sont très utilisées grâce à leur facilité d'emploi.

Des essais sont en cours [8] pour produire une source absolue de radon solide à basse température par piégeage du radon sur une surface refroidie à une température inférieure au point de fusion du radon.

La source ainsi créée se compose du radon solide en équilibre thermodynamique avec sa vapeur.

C.1.1.2 Sources à base de minerai ou de résidus de minerai d'Uranium /Thorium

On utilise souvent des sources de radon constituées de minerai ou de résidus de traitement de minerai d'uranium ou de thorium enfermés dans un récipient clos; bien que ce type de source soit économique et facile d'emploi, sa stabilité n'est pas bien établie et la quantité du radon générée doit être systématiquement mesurée.

Annex C

(normative)

Equipment for the production of reference atmospheres containing radon isotopes and their decay products (STAR)

NOTE This annex does not claim to solve all the problems involved in the production of equipment for setting up reference atmospheres for radon and its decay products, nor to describe all the methods for doing so. It does however set out to be a guide enabling those faced with such problems to choose the best methods for adoption in full knowledge of the facts.

In particular, it emphasizes an essential feature in the measurement of a reference atmosphere which has often been overlooked: this is the need to have an accurate knowledge of the sampling rates or of the volumes sampled, without which any attempt to provide an accurate description of the properties of the reference atmosphere is futile.

C.1 Sources

These are first essential constituents of STAR. The sources shall be stable and independent of environmental parameters.

C.1.1 Radon sources

C.1.1.1 Solid sources

Solid sources generally consist of a salt of ^{226}Ra or ^{228}Th to generate ^{222}Rn and ^{220}Rn , respectively. The salt may be pure or it may be mixed with, or trapped on, a matrix.

The nature of the material will determine the value of the emanating power and of the emanation rate and thus the capacity of the source to supply more or less large amounts of radon.

Since the emanating power is highly dependent on certain physical parameters (relative humidity, etc.), the use of such sources will require considerable precautions to be taken (control of temperature, humidity, etc.). Nevertheless, these sources are very widely used because of the ease with which they can be handled.

Tests are in progress [8] to produce a low temperature solid-radon absolute source by trapping the radon on a surface cooled to a temperature below the melting point of radon.

The source then consists of solid radon in thermodynamic equilibrium with its vapour.

C.1.1.2 Uranium/Thorium ore or tailings sources

Radon sources are often simply constructed using uranium or thorium ore or tailings packed in a closed container; although this kind of source may be cheap to build and easy to operate, its stability is not well-established and the quantity of radon generated has to be measured.

C.1.1.3 Sources liquides

Les sources liquides sont en général constituées d'une solution en milieu acide d'un sel de ^{226}Ra ou de ^{228}Th pour obtenir le ^{222}Rn ou le ^{220}Rn , respectivement. Après un laps de temps dépendant de la période de l'isotope du radon considéré, celui-ci se trouve alors en équilibre séculaire avec le radionucléide parent constituant la source.

Par un dégazage soigné de la solution il est alors possible de récupérer le radon formé, soit

- en une seule fois (étalonnage des appareils de mesure statiques); ou
- en continu (étalonnage des appareils de mesure en continu).

Dans ce dernier cas, un calcul simple permet d'obtenir le débit de radon en fonction de l'activité de la source et du débit du gaz porteur.

C.1.1.4 Sources gazeuses

Des ampoules contenant du radon sont aussi utilisées comme source gazeuse pour la génération de l'atmosphère d'un STAR. Lorsque l'on utilise ce type de source, il faut s'assurer du transfert complet du radon contenu dans l'ampoule.

C.1.2 Sources de RnDP sous forme d'aérosols

Une source de RnDP sous forme d'aérosol est composée d'un gaz porteur (en général de l'air à la pression atmosphérique) contenant un aérosol naturel ou artificiel et du radon sous forme gazeuse. La désintégration du radon génère des descendants du radon qui se retrouvent alors sous forme d'aérosols libres et/ou attachés dans le gaz porteur.

Si l'aérosol d'origine est absent ou présent seulement dans de très faibles concentrations, les atomes des descendants du radon créés ne peuvent s'attacher qu'aux parois du récipient contenant la source et ceux qui restent présents dans le gaz vecteur formeront un aérosol ultrafin. On dit qu'ils restent libres.

Si l'aérosol d'origine est présent en quantités suffisantes et que ses particules constituantes sont d'une taille adéquate (noyaux de condensation), les atomes de RnDP formés dans le gaz porteur peuvent s'y attacher par diffusion. La source sera alors composée d'un aérosol de particules radioactives.

C.1.3 Contrôle de la formation ou de l'élimination des RnDP dans une source sous forme d'aérosols

Dans une certaine mesure, il est possible d'ajuster la concentration des RnDP et la valeur de la fraction libre dans le gaz porteur. De tels changements exigent une modification de l'aérosol d'origine (nombre de noyaux de condensation, distribution granulométrique de l'aérosol) qui s'obtient en utilisant un générateur d'aérosols et/ou un précipitateur électrostatique. Plus basse sera la concentration volumique en particules, plus il y aura de fraction libre.

C.2 Enceintes d'essai

L'enceinte d'essai peut être définie comme le conteneur de l'atmosphère du STAR. Il en existe deux grandes catégories:

- des enceintes de petites dimensions qui ne contiennent que les appareils à l'étude ($<2 \text{ m}^3$);
- des enceintes de grandes dimensions (volume interne de plusieurs m^3), appelées aussi «walk in», qui sont conçues pour permettre à un opérateur de manipuler l'appareil soit dans la chambre elle-même soit dans son environnement immédiat.

NOTE L'enceinte d'essai peut être aussi constituée simplement du volume interne de l'instrument en essai.

C.1.1.3 Liquid sources

Liquid sources generally consist of an acid solution of a salt of ^{226}Ra or ^{228}Th in order to obtain ^{222}Rn or ^{220}Rn , respectively. After a time that depends on the half-life of the radon isotope in question, the latter is then in secular equilibrium with the parent nuclide forming the source.

By careful degassing of the solution, it is then possible to recover the radon formed either

- in a single operation (calibration of static measuring devices); or
- continuously (calibration of continuous measuring devices).

In the latter case, a simple calculation enables the radon flow rate to be obtained in terms of the activity of the source and the flow rate of the carrier gas.

C.1.1.4 Gaseous sources

Ampoules containing radon are also used as a gaseous source for generation of the STAR atmosphere. Using this type of source, care shall be taken to ensure the complete transfer of the radon contained in the ampoule.

C.1.2 Airborne sources of RnDP

An airborne RnDP source consists of a carrier gas (generally air at atmospheric pressure) containing a natural or artificial aerosol and gaseous radon. The decay of the latter generates the RnDP which then occur in the form of unattached and/or attached aerosols in the carrier gas.

If the original aerosol is absent or present in very low concentrations, the RnDP atoms created can only attach themselves to the walls of the vessel containing the source and those present in the carrier gas will then form an ultrafine aerosol. They are said to remain unattached.

If the airborne particles are present in sufficient amounts and if they have an adequate size (condensation nuclei), the RnDP atoms formed in the carrier gas can become attached to them by diffusion. The source will then consist of an aerosol of radioactive particles.

C.1.3 Control of the formation or removal of RnDP in an airborne source

It is possible, within certain limits, to adjust the RnDP concentration and the value of the unattached fraction in the carrier gas. Such changes require a modification of the original aerosol (number of condensation nuclei, particle size distribution) which can be achieved by using an aerosol generator and/or electrostatic precipitation equipment. The lower the volume number of particles is, the higher the unattached fraction is.

C.2 Test enclosures

The test enclosure may be defined as the container of the STAR atmosphere. There are two main categories:

- small enclosures containing only the equipment under test ($<2\text{ m}^3$);
- large enclosures (internal volume of several m^3), also called "walk in" which are designed to allow the equipment to be handled by an operator present in the enclosure or situated in its immediate vicinity.

NOTE The test enclosure may also be constituted by the instrument under test itself.

C.2.1 Caractéristiques techniques des enceintes de STAR

Une enceinte de STAR doit être suffisamment étanche:

- pour d'une part garantir la sécurité en confinant de façon efficace toute radioactivité qu'elle est susceptible de contenir;
- pour éviter d'autre part toute modification intempestive de l'atmosphère d'essai qui pourrait être entraînée par des fuites.

Il convient qu'elle soit réalisée, au moins pour sa paroi interne, en un matériau incorrodable, lisse, bon conducteur de l'électricité. Ces qualités permettront, outre une décontamination aisée et un piégeage des aérosols par diffusion limité au minimum, d'éviter toute collection parasite des RnDP par effets électrostatiques.

S'il est de plus prévu d'y réaliser des essais sous pression, elle doit supporter la pression interne exigée par ces essais et éventuellement être conforme à toutes les règles en vigueur relatives aux enceintes sous pression.

Les parois devront être isolées thermiquement ($R_{th} > 3 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$), à moins que la température ne soit pas une grandeur d'influence pour les essais.

Quand l'environnement atmosphérique dans l'enceinte doit être renouvelé en continu, il convient que les formes intérieures soient conçues pour éviter des zones dites mortes, mal ventilées et susceptibles de conduire à une répartition hétérogène des activités volumiques. Ce critère de conception peut aussi faciliter les procédures de vidange et de décontamination de l'atmosphère.

Ses dimensions intérieures devraient représenter le meilleur compromis possible entre deux exigences contradictoires:

- d'une part être réduites au minimum afin de limiter les inhomogénéités de l'atmosphère préjudiciables à la qualité des mesures,
- d'autre part être aussi grandes que possible afin de réduire au minimum les effets de paroi, et pour pouvoir recevoir un nombre élevé d'instruments à essayer.

Quel que soit le type d'enceinte utilisée, la manipulation des appareils lors des essais doit être autant que possible effectuée de l'extérieur, soit par commande à distance soit au moyen de passages de gants pour réduire au minimum toute perturbation des conditions internes.

Pour la même raison, il convient que les enceintes de grande dimensions soient équipées d'un sas, pour introduire les instruments ainsi que pour permettre les entrées et sorties des opérateurs.

Il convient que les enceintes soient équipées de systèmes efficaces (filtres absolus, appareils de dilution, etc.) pour limiter ou réduire, jusqu'au niveau du bruit de fond naturel, les rejets de radioactivité vers l'extérieur.

Il convient que l'alimentation électrique soit stable en termes de tension et de fréquence et fournisse une puissance suffisante.

Il convient de prévoir à proximité du STAR un emplacement pour le stockage, pendant la durée de l'essai, des instruments en essai.

C.2.1 Technical characteristics of STAR enclosures

A STAR enclosure shall be sufficiently leakproof:

- to ensure safety through the effective confinement of any radioactivity it might contain;
- to prevent any unforeseen change due to leakage of the test atmosphere.

At least as regards its internal wall, it should be made of a smooth material which cannot corrode and which is a good electrical conductor. These qualities not only facilitate decontamination and limit the trapping of aerosols by diffusion to a minimum, but they also prevent any stray collection of RnDPs through electrostatic effects.

If, in addition, the enclosure is to be provided with means for carrying out tests under pressure, it shall withstand the internal pressure required for such tests and, eventually, be in conformity with all relevant regulations related to pressure vessels.

The walls shall be thermally insulated ($R_{th} > 3 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$) unless temperature is not a significant quantity in the tests.

Where the atmosphere in the enclosure is to be continuously renewed, its internal shape should be designed so as to avoid badly ventilated "dead" zones capable of leading to a non-uniform distribution of activities throughout the volume. Such a design might also facilitate the processes of evacuation and decontamination of the atmosphere.

Its internal dimensions should achieve the best possible compromise between two contradictory requirements:

- to be as small as possible so as to limit any non-uniformity in the atmosphere that might detract from the quality of the measurements;
- to be as large as possible so as to reduce wall effects to a minimum, and to accommodate a large number of instruments under test.

Whatever the type of enclosure used, the manipulation of equipment during tests shall as far as possible be carried out from the outside, either by remote control or by the use of glove apertures so as to cause the least possible disturbance to the internal conditions.

For the same reason, the large enclosures should be fitted with an airlock, both for the introduction of instruments and for the entrance and exit of operators.

The enclosures should be equipped with efficient systems (absolute filters, dilution equipment, etc.) to limit or to reduce, down to background level, discharges of radioactivity to the outside.

The electricity supply should be stable both in voltage and frequency and should provide sufficient power.

A suitable location should be provided near the STAR for storing during the test, the equipment under test.

C.2.2 Conditions aérauliques dans un STAR

C.2.2.1 Mode d'opération statique des enceintes

Les enceintes statiques peuvent être définies comme celles dont les conditions internes sont déterminées au début de l'opération et qu'aucune action directe externe ne peut changer, la source se trouvant en général placée à l'intérieur. Le mode d'opération en statique peut inclure l'utilisation d'un ventilateur interne pour homogénéiser l'atmosphère.

Les enceintes statiques sont relativement simples à installer et à utiliser et elles permettent de créer et de manipuler des atmosphères variées.

Cependant, la possibilité de maîtriser les conditions internes (atmosphères, aérosols, etc.) est assez limitée.

C.2.2.2 Mode d'opération dynamique des enceintes

Par définition il s'agit d'enceintes ayant en général une source externe, ce qui permet de contrôler, ou du moins mesurer en continu, les conditions internes.

Les enceintes dynamiques contiennent toujours un moyen pour renouveler l'atmosphère interne, en circuit ouvert ou fermé (le circuit est dit ouvert lorsque le renouvellement de l'atmosphère interne entraîne le rejet de l'atmosphère du STAR vers l'extérieur; il est dit fermé lorsque l'atmosphère du STAR circule sans contact avec l'extérieur).

Le choix d'un circuit ouvert ou fermé peut avoir une influence sur les rejets radioactifs dans l'environnement.

Certains STAR fonctionnent dans les deux modes d'opération.

C.3 Méthodes associées d'analyse et de contrôle

C.3.1 Radioactivité

NOTE L'absence actuelle d'un étalon absolu «radon» impose que tout STAR dispose de moyens de mesure de la radioactivité de l'atmosphère précis, stables et spécifiques des radioéléments à mesurer. L'étalon sera donc constitué par la mesure précise de l'atmosphère créée (si possible à l'aide d'une méthode directe).

Lorsqu'une source solide ou liquide est utilisée comme référence, les valeurs d'activités volumiques du STAR peuvent être dérivées directement de l'activité spécifique de la source utilisée; il faut cependant être très prudent, le taux de production du radon par ces sources étant en général difficile à connaître avec précision et de plus pas toujours stable.

Les moyens utilisés pour l'analyse de la radioactivité du STAR seront choisis en fonction des essais prévus. Ils doivent comprendre, *au minimum*:

- un appareil de mesure du radon en continu ou en semi-continu, ayant une sensibilité adaptée à la gamme de mesures à effectuer et équipé de son propre dispositif d'enregistrement;
- un appareil de mesure des descendants du radon qui peut être composé d'un système de prélèvement sur filtre simple associé à un compteur pour analyser la radioactivité du filtre et d'une méthode de déconvolution. La méthode utilisée doit être décrite en détail;
- un dispositif de mesure du débit de prélèvement ou du volume prélevé doit impérativement compléter cet équipement. Il faut que l'étalonnage de ce matériel soit traçable à un étalon reconnu.

C.2.2 Flow conditions in a STAR

C.2.2.1 Static mode of operation of enclosures

Static enclosures may be defined as those for which the internal conditions are settled at the beginning of the operation and cannot be changed by any direct external action, the source generally being placed inside. The static mode of operation may include the use of an internal fan for the purpose of homogenization of the atmosphere.

Static enclosures are relatively simple to set up and to use, and they enable a diverse set of atmospheres to be created and manipulated.

However, there are only limited possibilities when it comes to controlling the internal conditions (atmospheres, aerosols, etc.).

C.2.2.2 Dynamic mode of operation of enclosures

These are by definition enclosures with the source generally located outside them, thus allowing some control, or at least a continuous monitoring, of the internal conditions.

Dynamic enclosures always incorporate some method of renewing the internal atmosphere, either in open or closed loop circuit (open loop circuit applies when the renewing of the atmosphere implies discharge of the STAR atmosphere to the outside air, closed loop circuit applies when the STAR atmosphere circulates without contact with the outside air).

The use of a closed or open loop air circuit may have influence on the radioactive releases to the environment.

Some STAR may be operated in the two modes of operation.

C.3 Associated method of analysis and control

C.3.1 Radioactivity

NOTE The present lack of an easily available absolute "radon" standard means that all STAR shall include devices for measuring the radioactivity of the atmosphere which are accurate, stable and devoted to the radioactive elements to be measured. The standard will therefore be formed by the accurate measurement of the atmosphere created (if possible being a direct method).

When a solid or liquid source is used for reference purposes, the volume activity of the reference atmosphere of the STAR may be derived directly from the specific activity of the source; great care shall be taken, since the rate of production of radon from such sources is in general difficult to ascertain with any accuracy and it is, in addition, not always stable.

The means used to analyze the radioactivity of the STAR will be chosen according to the tests that are planned. They shall include, *at the minimum*:

- a device for measuring radon continuously or semi-continuously, with a sensitivity adapted to the range of measurement to be processed and with its own recording device;
- a device for measuring RnDPs which may consist of a simple filter sampling system combined with a counting device for analysis of the radioactivity of the filter, and the use of a method of deconvolution. Such a method shall be described in detail;
- a device for measuring the sampling flow rate or the sampled volume is an essential feature that shall be included in the equipment. The calibration of this equipment shall be traceable to a recognized standard.

Il convient que la traçabilité de l'ensemble de ce matériel à un étalon reconnu soit établie avant qu'il ne soit mis en service pour la mesure de l'atmosphère du STAR.

Des instruments de mesure complémentaires, si possible raccordés à des étalons reconnus, sont à ajouter en fonction des essais à effectuer.

Par exemple, si une grandeur d'influence significative à examiner est le rayonnement gamma, alors un instrument adapté à la mesure de ce type de rayonnement sera nécessaire.

C.3.2 Paramètres climatiques

La mesure des principaux paramètres météorologiques doit faire partie intégrante de tout STAR. La température et l'humidité relative ainsi que la pression atmosphérique représentent des grandeurs d'influence pour la réponse des détecteurs et du système de prélèvement de l'appareil en essai.

Dans les STAR utilisés en mode dynamiques, l'activité volumique doit être homogène. Il est recommandé de mesurer les vitesses d'écoulement et éventuellement les profils de vitesse, afin d'apprécier l'importance éventuelle des phénomènes de diffusion turbulente et l'inhomogénéité de la concentration.

C.3.3 Paramètres physicochimiques

Les principaux paramètres physicochimiques à mesurer ou à contrôler dans un STAR dépendent de l'utilisation du STAR, soit comme référence primaire soit comme référence secondaire. Ces paramètres sont les suivants:

- le nombre de particules d'aérosol;
- la distribution en nombre des particules pour les aérosols fins et ultrafins;
- la distribution en activité des particules pour les aérosols fins et ultrafins;
- l'état de la charge électrostatique des aérosols;
- l'état de turbulence de atmosphère.

Les instruments utilisés pour ces mesures seront autant que possible sélectionnés pour leur insensibilité à l'humidité.

Pour modifier les paramètres ci-dessus, il est possible d'utiliser des générateurs d'aérosols, des appareils de filtration, des précipitateurs électrostatiques, des générateurs d'ions, etc.

C.3.4 Mesure de référence des débits de prélèvement

Quel que soit le matériel utilisé pour mesurer l'activité du Rn et des RnDP, le résultat de la mesure est presque toujours exprimé sous forme de concentration volumique ou d'exposition. Le débit de prélèvement ou le volume d'air prélevé est donc directement impliqué dans la mesure. Il est donc nécessaire de mesurer avec précision les débits de prélèvement, sans quoi une erreur significative sur le résultat des mesures pourrait être introduite par l'incertitude associée à la mesure du débit ou du volume prélevé.

Les équipements du STAR doivent permettre de mesurer ou de générer les débits de prélèvement ou les volumes d'air prélevés par l'appareil en essai aussi bien que par les dispositifs de mesure propres au STAR. La mesure des débits doit être complétée par une mesure de la température du gaz, de la pression dans l'appareil en essai et éventuellement par une mesure de la masse volumique du gaz porteur du radon (CO₂ par exemple pour certains appareils de mesure dans les sols). La mesure du débit sera réalisée, soit en débit-masse, soit en débit-volume, et exprimée en effectuant les corrections de pression et de volume nécessaires, à 1 013 hPa et 20 °C.

This equipment should be carefully calibrated against recognized standards before being used for the measurements of the STAR atmosphere.

Auxiliary measuring equipment, if possible traceable to recognized standards, will be added accordingly to the tests to be carried out.

If, for example, an influence quantity to be investigated is the gamma radiation, an instrument for measuring this type of radiation will then be required.

C.3.2 Climatic parameters

The measurement of the main meteorological parameters shall be included as an integral part of any STAR. The temperature, relative humidity and atmospheric pressure are influence quantities for the response of the detectors and sampling system of the instrument under test.

When a STAR is operated under dynamic conditions, the volume activity in the STAR shall be homogeneous. It is recommended to measure the rates of flow and the velocity profiles might also be measured in order to assess the possible significance of the importance of turbulent diffusion or of the inhomogeneity in the concentration.

C.3.3 Physical-chemical parameters

The main physical-chemical parameters to be measured or monitored in a STAR depend whether the STAR is to be used as a primary or secondary reference. These include:

- the number of aerosol particles;
- the distribution of particle numbers in fine and ultrafine aerosols;
- the distribution of particle activities in fine and ultrafine aerosols;
- the state of electrostatic charge of aerosols;
- the turbulent state of the atmosphere.

The instruments used for these measurements will, as far as possible, be chosen for their insensitivity to humidity.

In order to modify the above parameters, aerosol generators, filtration devices, electrostatic precipitators, ion generators, etc. can be used.

C.3.4 Reference measurement of sampling flow rates

Whatever type of equipment is used to measure R_n and R_nDP activity, the result of the measurement is almost always expressed in the form of a concentration per unit volume or an exposure. The sampling rate or the volume sampled is thus directly involved in the measurement. Sampling rates shall therefore be measured accurately, since significant error in the result could be introduced by the uncertainty in the flow rate or the volume sampled.

The STAR equipment shall allow for the measurement or the generation of the sampling rates or the volumes sampled by the apparatus under test as well as by the measuring devices belonging to the STAR. The measurement of the flow rates shall be supplemented by a measurement of the gas temperature and of the pressure in the apparatus under test, and possibly by a measurement of the density of the radon carrier gas (e.g. CO_2 in certain instruments for measurements in soils). The flow rate will be measured either as a mass-flow or as a volume-flow, and will be expressed by making the necessary corrections for pressure and volume to 1 013 hPa and 20 °C.

Il convient que les erreurs associées aux appareils de mesure utilisés ne dépassent pas, si possible, les autres incertitudes associées aux résultats des essais.

Les gammes de débits à contrôler sont fonction du matériel à tester.

C.4 Essais qu'il est possible d'effectuer avec un STAR

Compte tenu des spécificités des STAR, il se peut qu'ils ne puissent pas effectuer tous les essais décrits dans la présente norme. Il convient donc de choisir le STAR en fonction de l'instrument à essayer, après accord entre le fabricant et l'utilisateur.

Certaines grandeurs d'influence peuvent modifier la précision de l'indication de certains types d'instruments, par exemple la température, la taille des aérosols et la déposition des aérosols sur les parois du STAR, le facteur d'équilibre, les propriétés aérauliques du circuit de prélèvement, etc.

Par conséquent, après accord entre le fabricant et l'utilisateur, il convient que les essais effectués avec un STAR indiquent la valeur des grandeurs d'influence utilisées, tant pour les conditions d'essai que pour les conditions de référence.

C.4.1 Caractéristiques des environnements atmosphériques qui peuvent être simulés dans un STAR

Les instruments concernés par la présente norme sont destinés à être utilisés dans différents environnements atmosphériques, comme indiqué ci-dessous. Le STAR doit donc pouvoir simuler au moins quelques-unes des caractéristiques de ces environnements atmosphériques.

C.4.1.1 Environnement atmosphérique extérieur

Un environnement atmosphérique extérieur est caractérisé par une gamme d'activités volumiques du radon et par une distribution d'aérosols similaires à celle que l'on trouve naturellement au dessus des continents.

C.4.1.2 Environnement atmosphérique intérieur

Un environnement atmosphérique intérieur est caractérisé par une gamme d'activités volumiques du radon et une distribution d'aérosols similaires à celle que l'on trouve dans un bâtiment. La distribution granulométrique des aérosols dépend en partie du style de vie des habitants (cuisine, fumée de tabac, ventilation, etc.) ou du niveau d'activité professionnelle.

C.4.1.3 Environnement atmosphérique souterrain

Un environnement atmosphérique souterrain est caractérisé principalement par la gamme d'activités volumiques du radon et par le temps de séjour de l'air. Il peut aussi être saturé d'humidité.

Dans le cas des mines, la distribution granulométrique des particules et la charge électrique des aérosols dans une telle atmosphère sont très variables dans l'espace et dans le temps et peuvent être influencées par les gaz d'échappements, par les brouillards d'huiles, par la fumée des tirs, etc.

C.4.1.4 Environnement atmosphérique des sols

La présente norme concerne aussi l'environnement atmosphérique des sols, parce que la quantité de radon présent dans le sol est d'une grande importance en ce qui concerne la radioprotection, étant la source [9] principale du radon dans les maisons et sur les lieux de travail intérieurs. Il faut donc le mesurer pour estimer la tendance naturelle d'un sol à produire du radon (par exemple avant la construction d'une maison).

The errors associated with the measuring devices used should, if possible, be no greater than the other uncertainties associated with the test results.

The ranges of flow rates to be monitored depend on the equipment to be tested.

C.4 Test which can be performed with a STAR

STAR, regarding their specificities, may be not able to carry out all the tests described in this standard. Therefore, the STAR should be chosen according to the instrument to be tested by agreement between manufacturer and user.

The precision of the indication of certain types of instruments may be influenced by different influence quantities, for example temperature, aerosol size and aerosol plate-out on the walls of the STAR, equilibrium factor, aerodynamic properties of the sampling tray, etc.

Thus the tests conducted with a STAR should indicate, after agreement between manufacturer and user, the value of the influence quantities used, both for reference and variable conditions.

C.4.1 Characteristics of atmospheres that can be simulated in a STAR

The instruments concerned by this standard are scheduled to be used in different atmospheres, as described hereinafter. The STAR therefore shall be able to simulate at least part of the characteristics of these atmospheres.

C.4.1.1 Outdoor atmosphere

An outdoor atmosphere is characterized by a range of radon volume activities and a distribution of aerosols typical to those encountered naturally over terrestrial surfaces.

C.4.1.2 Indoor atmosphere

An indoor atmosphere is characterized by a range of radon volume activities and a distribution of aerosols typical to those encountered in a building. The latter is partly dependent on the life style of the inhabitants (cooking, tobacco smoke, ventilation, etc.), or on the level of working activity.

C.4.1.3 Underground atmosphere

An underground atmosphere is characterized mainly by its range of radon volume activities and by the residence time of the air. It may also be saturated with moisture.

In the case of mines, the particle size distribution and the electric charge of the aerosols in such an atmosphere are markedly variable both in space and time and may be influenced by engine exhausts, oil fumes, smoke from blasting, etc.

C.4.1.4 Soil atmosphere

This standard concerns also soil atmosphere, because soil radon is of considerable interest for radiation protection purposes, as the major source [9] of radon for dwelling and indoor working places. Its measurement has therefore to be made in order to assess the propensity of a soil to produce radon (e.g. before building a dwelling).

L'environnement atmosphérique d'un sol est principalement caractérisé par sa gamme d'activités volumiques du radon. Lui aussi est souvent saturé d'humidité.

Dans certains cas, le gaz vecteur peut être un autre gaz que l'air, par exemple du CO₂.

C.4.2 Domaine de fonctionnement d'un STAR

C.4.2.1 Domaine de fonctionnement pour le radon et pour les RnDP

Le présent paragraphe fournit des informations concernant les domaines de fonctionnement d'un STAR, pour le radon et/ou les descendants du radon, qui sont nécessaires pour les essais de différents types d'instruments.

Le tableau C.1 donne les valeurs de ces domaines de fonctionnement.

Tableau C.1 – Domaine de fonctionnement d'un STAR (radioactivité)

	Domaine de fonctionnement (valeurs typiques)			
	Atmosphère extérieure**	Atmosphère intérieure***	Atmosphère souterraine	Atmosphère du sol
Activité volumique ²²² Rn	10 Bq·m ⁻³ à 50 kBq·m ⁻³	10 Bq·m ⁻³ à 100 kBq·m ⁻³	100 Bq·m ⁻³ à 1 MBq·m ⁻³	100 Bq·m ⁻³ à 1 MBq·m ⁻³
Activité volumique ²²⁰ Rn	10 Bq·m ⁻³ à 10 kBq·m ⁻³	10 Bq·m ⁻³ à 50 kBq·m ⁻³	100 Bq·m ⁻³ à 5 MBq·m ⁻³	100 Bq·m ⁻³ à 1 MBq·m ⁻³
Facteur d'équilibre F	0,2 à 0,6	0,2 à 0,8	0,1 à 0,8	Non applicable
Fraction libre	0,9 à 0,1	0,7 à 0,2	0,9 à 0,1	Non applicable
EAPV ₂₂₂	11 nJ·m ⁻³ à 170 μJ·m ⁻³	11 μJ·m ⁻³ à 420 μJ·m ⁻³	56 nJ·m ⁻³ à 4,4 mJ·m ⁻³	Non applicable
EAPV ₂₂₀	A définir*	A définir*	A définir*	Non applicable
EEC ₂₂₂	2 Bq·m ⁻³ à 30 kBq·m ⁻³	2 Bq·m ⁻³ à 80 kBq·m ⁻³	10 Bq·m ⁻³ à 0,8 MBq·m ⁻³	Non applicable
EEC ₂₂₀	A définir*	A définir*	A définir*	Non applicable
Concentration en aérosols	10 ⁶ à 10 ¹² particule·m ⁻³	10 ⁸ à 10 ¹⁴ particule·m ⁻³	10 ¹⁰ à 10 ¹⁴ particule·m ⁻³	Non applicable
Dimension de l'aérosol (AMAD)	10 ⁻³ à 0,5 μm	10 ⁻³ à 10 μm	10 ⁻³ à 10 μm	Non applicable
* Les essais ²²⁰Rn sont à effectuer uniquement après accord entre fabricant et utilisateur. L'étendue de l'essai sera définie par accord entre fabricant et utilisateur. ** A proximité de résidus de mines d'uranium, l'activité volumique du radon dans l'air peut monter jusqu'à 50 kBq·m⁻³. *** Dans les zones de stockage de sources de radium, on peut trouver des activités volumiques en radon s'élevant jusqu'à 100 kBq·m⁻³. NOTE Dans certains cas les activités volumiques peuvent couvrir plus de six ordres de grandeur.				

C.4.2.2 Domaine de fonctionnement pour l'exposition aux RnDP

Le domaine de fonctionnement pour l'exposition aux descendants du radon est normalement couvert par le domaine de fonctionnement pour l'EAPV; cependant, pour les essais d'appareils de mesure dans la partie supérieure de leur étendue de mesure, il convient de maintenir une grande stabilité de l'atmosphère pendant une période d'au moins un jour.

A soil atmosphere is characterized mainly by its range of radon volume activities. It is also often saturated with moisture.

In some cases, the carrier gas can be different from air, e.g. CO₂.

C.4.2 Working ranges of a STAR

C.4.2.1 Working ranges for radon and RnDP

This subclause provides information concerning the working ranges of the radon and/or RnDP, of a STAR, needed for testing different types of instruments.

Table C.1 gives the values of these ranges.

Table C.1 – Working range of a STAR (radioactivity)

	Working ranges (typical values)			
	Outdoor atmosphere**	Indoor atmosphere***	Underground atmosphere	Soil atmosphere
²²² Rn volume activity	10 Bq·m ⁻³ to 50 kBq·m ⁻³	10 Bq·m ⁻³ to 100 kBq·m ⁻³	100 Bq·m ⁻³ to 1 MBq·m ⁻³	100 Bq·m ⁻³ to 1 MBq·m ⁻³
²²⁰ Rn volume activity	10 Bq·m ⁻³ to 10 kBq·m ⁻³	10 Bq·m ⁻³ to 50 kBq·m ⁻³	100 Bq·m ⁻³ to 5 MBq·m ⁻³	100 Bq·m ⁻³ to 1 MBq·m ⁻³
Equilibrium factor F	0,2 to 0,6	0,2 to 0,8	0,1 to 0,8	Not applicable
Unattached fraction f _p	0,9 to 0,1	0,7 to 0,2	0,9 to 0,1	Not applicable
PAEC ₂₂₂	11 nJ·m ⁻³ to 170 μJ·m ⁻³	11 μJ·m ⁻³ to 420 μJ·m ⁻³	56 nJ·m ⁻³ to 4,4 mJ·m ⁻³	Not applicable
PAEC ₂₂₀	To be defined*	To be defined*	To be defined*	Not applicable
EEC ₂₂₂	2 Bq·m ⁻³ to 30 kBq·m ⁻³	2 Bq·m ⁻³ to 80 kBq·m ⁻³	10 Bq·m ⁻³ to 0,8 MBq·m ⁻³	Not applicable
EEC ₂₂₀	To be defined*	To be defined*	To be defined*	Not applicable
Volume number of aerosols	10 ⁶ to 10 ¹² particle·m ⁻³	10 ⁸ to 10 ¹⁴ particle·m ⁻³	10 ¹⁰ to 10 ¹⁴ particle·m ⁻³	Not applicable
Aerosol size (AMAD)	10 ⁻³ to 0,5 μm	10 ⁻³ to 10 μm	10 ⁻³ to 10 μm	Not applicable
* ²²⁰Rn tests will be carried out only if agreed between manufacturer and user. The range of test will be defined by agreement between manufacturer and user. ** In the neighbourhood of uranium mine tailings, outdoor radon volume activity may rise up to 50 kBq·m⁻³. ***In radium sources storage areas, radon volume activity up to 100 kBq·m⁻³ can be found. NOTE In certain cases, the range of volume activities may cover over six orders of magnitude.				

C.4.2.2 Working range for exposure to RnDP

The working range for the exposure to RnDP is normally covered by the range of PAEC. Nevertheless, attention should be given to the fact that, for testing measuring devices in the upper part of their range of operation, the atmosphere should be kept at a high level of stability for a time period lasting at least one day.

C.4.2.3 Domaine de fonctionnement pour les aérosols

Le domaine de fonctionnement pour les aérosols doit couvrir au minimum la gamme typique de tailles et de distribution granulométriques existant dans l'atmosphère pour la mesure de laquelle l'appareil en essai a été étudié. Dans des cas particuliers, cette gamme peut être étendue ou réduite après accord entre le fabricant et l'utilisateur.

C.4.2.4 Les mesures de débits

Les dispositifs de prélèvement utilisés pour le fonctionnement du STAR lui-même (c'est-à-dire inclus dans le circuit de prélèvement de référence) ont d'habitude des débits de l'ordre de quelques $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ et il convient que leur incertitude de mesure moyenne soit inférieure à 1 %.

C.4.3 Conditions de référence

Les valeurs de référence pour les paramètres de la radioactivité et des facteurs d'équilibre sont à déterminer par accord entre l'opérateur du STAR et le fabricant de l'appareil en essai. Dans tous les cas, il convient qu'un STAR puisse être utilisé pour les essais des appareils avec des valeurs des paramètres ci-dessus variant de 1/3 à 2/3 de chaque gamme de mesure indiquée sur l'appareil en essai.

Il est possible cependant d'adopter une valeur située entre 100 et 1 000 $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ pour l'activité du ^{222}Rn et une valeur de 0,4 pour le facteur d'équilibre comme conditions de base des essais afin d'obtenir le même point de fonctionnement pour tous les instruments soumis aux essais.

Cependant, le point de fonctionnement ainsi défini n'est *en aucun cas* suffisant pour assurer le bon étalonnage d'un instrument.

Le tableau C.2 résume les valeurs de toutes les grandeurs de référence ainsi que des conditions d'essai standard.

C.4.4 Grandeurs d'influence

Le tableau C.3 résume la gamme de variations des grandeurs d'influence.

C.4.4.1 Température

La température est une grandeur d'influence d'une grande importance. Elle affecte les instruments de mesure au niveau du système de détection, de l'électronique analogique associée et de l'affichage des résultats (affichage à cristaux liquides). Elle a un effet sur les caractéristiques aérodynamiques des préleveurs et sur la durée de vie des batteries primaires ou secondaires. Elle peut aussi influencer sur les paramètres qui déterminent le comportement des aérosols.

La température de référence sera +20 °C avec des tolérances qui permettent des variations de +18 °C à +22 °C.

La variation de température à utiliser pour les essais est de:

- –40 °C à +60 °C pour les environnements atmosphériques extérieurs;
- +5 °C à +40 °C pour les environnements atmosphériques domestiques;
- 0 °C à +60 °C pour les environnements atmosphériques souterrains.

D'autres gammes de températures peuvent être utilisées après accord entre le fabricant et l'utilisateur.

C.4.2.3 Working range for aerosols

The working range for aerosols shall cover at least the typical range of size and distribution of the aerosol existing in the atmosphere for the measurement of which the instrument under test has been designed. In particular cases, this range may be extended or restricted after agreement between the manufacturer and the user.

C.4.2.4 Flow rates measurements

The sampling devices used for the actual functioning of the STAR (i.e. included into the reference sampling tray) will generally have flow rates of the order of some $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ and should have an overall error factor better than one per cent.

C.4.3 Reference conditions

The reference values for the parameters "radioactivity", and "equilibrium factors" will be fixed by mutual agreement between the operator of the STAR and the constructor of the equipment under test. In any case, the STAR should be capable of being used for tests of equipment with values of the above parameters varying from 1/3 to 2/3 of each range of measurement indicated on the equipment under test.

However, it is possible to adopt a value situated between 100 and 1 000 $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ for the activity of ^{222}Rn and 0,4 for the equilibrium factor as basic standard test conditions, enabling the same operating point to be obtained for all the equipment under test.

However, the operating point defined in this way is *in no case* sufficient to ensure correct calibration of an instrument.

Table C.2 summarizes the values of all the reference values and standard test conditions.

C.4.4 Influence quantities

Table C.3 summarizes the range of variation of the influence quantities.

C.4.4.1 Temperature

Temperature is a quantity of considerable significance. It has an effect on the measuring devices in the detection system, on the associated analogue electronics and on the system used for displaying the results (liquid crystal display). It affects the aerodynamic characteristics of the sampling devices and the life time of primary or secondary batteries. It can also affect the parameters governing the behaviour of aerosols.

The reference temperature will be +20 °C with tolerances allowing variations from +18 °C to +22 °C.

The temperature range to be used for the tests is from:

- –40 °C to +60 °C for external atmospheres;
- +5 °C to +40 °C for domestic atmospheres;
- 0 °C to +60 °C for underground atmospheres.

Other temperature ranges can be used after agreement between manufacturer and user.

C.4.4.2 Humidité relative

L'humidité relative (HR) de l'atmosphère d'essai est une grandeur d'influence d'une grande importance pour le fonctionnement des systèmes de détection. En particulier, la condensation sur un détecteur par exemple peut réduire ses performances et causer éventuellement une contamination. L'humidité a un effet aussi sur le comportement physique des aérosols et peut être aussi sur le fonctionnement des préleveurs (colmatage de filtres hygroscopiques, systèmes de collection électrostatiques, etc.).

La valeur de référence sera 65 % HR avec des tolérances qui permettent des variations de 50 % HR à 75 % HR.

La variation d'humidité relative à utiliser pour les essais est de:

- 10 % HR à 100 % HR (condensation) pour les atmosphères externes;
- 10 % HR à 70 % HR pour les atmosphères domestiques;
- 10 % HR à 100 % HR (condensation) pour les atmosphères souterraines.

D'autres gammes d'humidité relative peuvent être utilisées après accord entre le fabricant et l'utilisateur.

C.4.4.3 Pression atmosphérique

La pression atmosphérique n'est une grandeur d'influence d'une grande importance pour la mesure de la radioactivité que dans certains cas seulement:

- dans le cas des instruments de mesure qui fonctionnent sous pression (par exemple la mesure du radon dans les forages);
- les détecteurs qui ont besoin d'un grand parcours pour les particules alpha dans l'air: dans ce cas, l'efficacité de la détection peut être modifiée par une variation de pression.

Il se peut que les caractéristiques des systèmes de prélèvement soient sensibles à des variations de pression: il faut donc que le dispositif de mesure des débits de prélèvement du STAR permette de quantifier cet effet.

La valeur de référence sera 1 013 hPa.

Les variations de la pression atmosphérique (sauf dans le cas des instruments sous pression qu'il convient de contrôler jusqu'à leur pression de fonctionnement maximale) vont de 860 hPa à 1 060 hPa.

D'autres gammes de pression peuvent être utilisées après accord entre le fabricant et l'utilisateur.

C.4.4.4 Rayonnement gamma ambiant

Il convient que les conditions de référence prévoient un débit d'équivalent de dose effectif inférieur à $0,20 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$.

Le rayonnement gamma ambiant peut avoir un effet très important sur la réponse des instruments de mesure. Par exemple, les instruments utilisant la détection des particules bêta ou les chambres d'ionisation sont aussi sensibles au rayonnement γ ambiant. Il convient que les essais de ce type d'instrument spécifient l'importance de cet effet dans les conditions d'essai.

C.4.4.2 Relative humidity

The relative humidity (RH) of the test atmosphere is a quantity of considerable significance for detection systems. In particular, condensation on a detector, for example can cause a reduction in performance and possibly bring about contamination. It also has a significant effect on the physical behaviour of aerosols and possibly on the operation of the sampling systems (clogging of hygroscopic filters, electrostatic collection systems, etc.).

The reference value will be 65 % RH with tolerances allowing variations from 50 % RH to 75 % RH.

The range of relative humidity to be used for the tests is from:

- 10 % RH to 100 % RH (condensing) for external atmospheres;
- 10 % RH to 70 % RH for domestic atmospheres;
- 10 % RH to 100 % RH (condensing) for underground atmospheres.

Other relative humidity ranges can be used after agreement between manufacturer and user.

C.4.4.3 Atmospheric pressure

Atmospheric pressure is a quantity of considerable significance for radioactivity measurements in certain cases only:

- measuring instruments operating under pressure (e.g. measurement of radon in drilling);
- detectors needing a large path for alpha particles in air: in this case, the detection efficiency may be changed by a variation in pressure.

The characteristics of the sampling devices may be sensitive to pressure variations and the system for measuring the sampling rates of the STAR shall enable this effect to be quantified.

The reference value will be 1 013 hPa.

The range of variation in atmospheric pressure (apart from instruments under pressure which should be tested up to their maximum operating pressure) is from 860 hPa to 1 060 hPa.

Other pressure ranges can be used after agreement between manufacturer and user.

C.4.4.4 Ambient gamma field

The reference conditions should provide for an effective dose rate below $0,20 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$.

The ambient gamma field can have a considerable effect on the response of measuring instruments. For example, instruments using the detection of beta-particles, or ionization chambers are also sensitive to ambient γ radiation. Tests of this type of instrument should specify the magnitude of this effect under test conditions.

C.4.4.5 Temps

Le temps est une grandeur d'une très grande importance pour tous les instruments qui utilisent l'intégration ou le prélèvement ponctuel. Pour les autres types d'instruments, il convient que le temps soit pris en compte si la durée de l'analyse, que ce soit du bruit de fond ou du signal, est variable ou réglable (il peut entraîner, par exemple une modification du seuil de décision).

En outre, si l'instrument à l'étude a une constante de temps grande par rapport à la durée des fluctuations de la grandeur mesurée pendant le fonctionnement, le STAR doit permettre de simuler ces fluctuations de façon aussi proche de la réalité que possible.

C.4.4.6 Aérosols

Les aérosols utilisés pour réaliser un essai dans un STAR peuvent varier selon le type d'instrument à l'étude.

Il est possible d'utiliser des dimensions d'aérosols qui varient de 10^{-3} μm jusqu'à plusieurs dizaines de μm . La nature de l'aérosol dépend du générateur d'aérosols. Il est souvent intéressant d'utiliser un aérosol de granulométrie $\approx 0,2$ μm , sauf cas particulier après accord entre le fabricant et l'utilisateur. Il faut garder à l'esprit que la qualité du prélèvement des aérosols a une très grande influence sur le résultat des mesures (par exemple une entrée d'air mal conçue peut entraîner des pertes d'aérosols par dépôt).

C.4.4.7 Débit de prélèvement des appareils en essai

Le débit de prélèvement est une grandeur d'influence d'une très grande importance, non seulement à cause des incertitudes associées à la mesure, mais aussi à cause des pertes éventuelles associées au débit de prélèvement dans l'appareil de mesure (auto-absorption dans les filtres de prélèvement, perte d'aérosols dans le circuit aérodynamique de prélèvement).

Il faut donc que le STAR dispose d'un ensemble de débitmètres suffisamment précis pour évaluer les caractéristiques de prélèvement des instruments en essai.

Les différents débits d'air à contrôler dépendent des utilisations pour lesquels les instruments en essai ont été conçus. Certains instruments individuels ou ceux qui n'ont besoin que d'une faible sensibilité (surveillance des atmosphères souterraines, instruments intégrateurs, etc.) auront des débits de prélèvement pouvant se situer dans une gamme allant de environ 10^{-3} $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ à 1 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, alors que les instruments pour la surveillance de l'environnement présenteront une étendue beaucoup plus large pouvant aller de $0,1$ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ à 100 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Au vu de cette diversité, on conçoit que l'équipement de mesure de débit d'un STAR puisse représenter une part très importante du coût de l'ensemble. L'étalonnage des dispositifs de mesure de débit doit être réalisé dans une installation spécifique.

C.4.4.8 Conditions aérauliques

Les différents modes de fonctionnement d'un STAR (voir C.2.2) impliquent différentes conditions aérauliques de fonctionnement:

C.4.4.8.1 Convection

La convection doit être prise en compte dans les modes d'opération statiques ou dynamiques avec un très faible taux de renouvellement de l'atmosphère. Ce phénomène peut, dans ces conditions expérimentales, modifier l'homogénéité de l'atmosphère du STAR.

C.4.4.8.2 Taux de renouvellement d'air

Le taux de renouvellement d'air peut aussi influencer le comportement des RnDP dans l'atmosphère de référence.

C.4.4.5 Time

Time shall be considered as a quantity of considerable significance for all instruments using integration or grab sampling. For other types of instruments, it should be taken into account if the duration of the analysis, either of the background noise or of the signal, is variable or adjustable (e.g. by modification of the detection threshold, etc.).

Furthermore, if the instrument under test has a time constant which is large compared with the time occupied by fluctuations experienced during use, the STAR shall allow for a simulation of these fluctuations which is as close to reality as possible.

C.4.4.6 Aerosols

The aerosols used to realize a test in a STAR may vary accordingly with the type of instrument under test.

Sizes ranging from 10^{-3} μm to several tens of μm may be used. The nature of the aerosol depends upon the aerosol generator used. It is often interesting to use an aerosol with a dimension of $\approx 0,2$ μm , except in particular cases after agreement between manufacturer and user. It is necessary to keep in mind that the quality of the aerosol sampling is of great influence on the measurement result (e.g. a badly designed air inlet may cause aerosol losses by deposition).

C.4.4.7 Sampling flow rate of equipment under test

The sampling flow rate is a quantity of considerable significance, firstly because of the uncertainties associated with the measurement, and secondly because of possible associated losses in the sampling device (self-absorption in the sampling filters, loss of aerosols in the aerodynamic sampling circuit).

Thus a STAR shall provide a set of air-flow-rate measuring devices with a sufficient high-precision to assess the sampling characteristics of an instrument to be tested.

The ranges of flow rates to be monitored depend on where the equipment to be tested is to be used. Individual instruments or those requiring a low sensitivity (surveillance of underground atmospheres, integrating instruments, etc.) will have sampling rates ranging from some 10^{-3} $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ to 1 $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, while instruments for monitoring the environment will cover a much wider range from $0,1$ $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ to 100 $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$. As a result of this wide diversity, it can be seen that the "flow-rate measurement" equipment of a STAR can form a very considerable proportion of the total cost. Calibration of the flow rate measuring devices shall be done in a specific facility.

C.4.4.8 Fluid dynamic

The different modes of operation of a STAR (see C.2.2) may involve various air-flow conditions:

C.4.4.8.1 Convection

Convection shall be taken into account in static or very low air exchange rate conditions. This phenomenon may, in these experimental conditions, modify the homogeneity of the STAR atmosphere.

C.4.4.8.2 Air exchange rate

Air exchange rate may also influence the behaviour of RnDP in the reference atmosphere.

C.4.4.8.3 Ecoulement forcé

Le mode d'écoulement forcé peut avoir une influence sur le comportement des aérosols, principalement par diffusion turbulente et impaction, entraînant une variation du taux de dépôt sur les surfaces des RnDP.

Il peut être aussi important pour l'homogénéité de l'atmosphère.

Tableau C.2 – Conditions de référence et d'essai normalisées

Grandeur d'influence	Conditions de référence (sauf indication contraire du fabricant)	Conditions d'essai normales
Température	20 °C	18 °C à 22 °C
Humidité relative	65 %	50 % à 75 %
Pression atmosphérique	1 013 hPa	860 hPa à 1 060 hPa
Débit d'équivalent de dose γ ambiant	$<0,2 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ (ou moins si possible)	$<0,25 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$
Facteur d'équilibre	0,4	0,3 – 0,5
Fraction libre	$<0,2$	$<0,25$
Concentration volumique des aérosols	$10^{10} \text{ particule}\cdot\text{m}^{-3}$	$10^9 \text{ à } 10^{11} \text{ particule}\cdot\text{m}^{-3}$
Dimensions des aérosols (AMAD)	$0,2 \mu\text{m}$	$0,1 \mu\text{m} \text{ à } 0,25 \mu\text{m}$
NOTE Le débit d'air prélevé normal nécessaire pour l'essai d'un appareil sera défini par le fabricant de l'appareil.		

Tableau C.3 – Essais avec variation des grandeurs d'influence

Grandeurs d'influence	Gammes de valeurs (sauf indication contraire du fabricant)			
Type d'atmosphère	Extérieur	Intérieur	Souterrain	Sol
Température	–40 °C à +60 °C	+5 °C à +40 °C	0 °C à +60 °C	–10 °C à +50 °C
Humidité relative	10 % à 100 % (avec condensation)	10 % à 70 %	10 % à 100 % (avec condensation)	80 % à 100 % (avec condensation)
Pression atmosphérique	860 hPa à 1 060 hPa			
Débit d'équivalent de dose γ ambiant	à définir entre le fabricant et l'opérateur du STAR			
Activité volumique ^{222}Rn (pour les instruments de mesure du ^{220}Rn ou des RnDP ₂₂₀)	10 Bq·m ^{–3} à 500 Bq·m ^{–3}	10 Bq·m ^{–3} à 50 kBq·m ^{–3}	100 Bq·m ^{–3} à 1 MBq·m ^{–3}	100 Bq·m ^{–3} à 1 MBq·m ^{–3}
Activité volumique ^{220}Rn (pour les instruments de mesure du ^{222}Rn ou des RnDP ₂₂₂)	10 Bq·m ^{–3} à 1 kBq·m ^{–3}	10 Bq·m ^{–3} à 50 kBq·m ^{–3}	100 Bq·m ^{–3} à 5 MBq·m ^{–3}	100 Bq·m ^{–3} à 1 MBq·m ^{–3}
Facteur d'équilibre	0,2 à 0,6	0,2 à 0,8	0,1 à 0,8	Non applicable
Fraction libre	0,9 à 0,1	0,7 à 0,2	0,9 à 0,1	Non applicable
Concentration volumique en aérosols	$10^6 \text{ à } 10^{12}$ particule·m ^{–3}	$10^8 \text{ à } 10^{14}$ particule·m ^{–3}	$10^{10} \text{ à } 10^{14}$ particule·m ^{–3}	Non applicable
Dimensions des aérosols* (AMAD)	$10^{-3} \text{ à } 0,5 \mu\text{m}$	$10^{-3} \text{ à } 10 \mu\text{m}$	$10^{-3} \text{ à } 10 \mu\text{m}$	Non applicable
* Les essais avec variation de dimension des aérosols sont à effectuer après accord entre le fabricant, l'utilisateur et l'opérateur du STAR.				

C.4.4.8.3 Forced air movement

Forced air movement may have an influence on aerosol behaviour, mainly by turbulent diffusion and impaction phenomena, leading to changes in the plate-out of RnDP.

It may also be important for the homogeneity of the atmosphere.

Table C.2 – Reference and standard test conditions

Influence quantity	Reference conditions (unless otherwise indicated by the manufacturer)	Standard test conditions
Temperature	20 °C	18 °C to 22 °C
Relative humidity	65 %	50 % to 75 %
Atmospheric pressure	1 013 hPa	860 hPa to 1 060 hPa
Ambient γ dose rate	$<0,2 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ (or less if practicable)	$<0,25 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$
Equilibrium factor	0,4	0,3 – 0,5
Unattached fraction f_p	$<0,2$	$<0,25$
Volume number of aerosols	$10^{10} \text{ particle}\cdot\text{m}^{-3}$	$10^9 \text{ to } 10^{11} \text{ particle}\cdot\text{m}^{-3}$
Aerosol size (AMAD)	$0,2 \mu\text{m}$	$0,1 \text{ to } 0,25 \mu\text{m}$
NOTE The standard sampling flow rate needed for testing a particular device will be defined by the manufacturer of the device under test.		

Table C.3 – Tests with variation of the influence quantities

Influence quantities	Range of values (unless otherwise indicated by the manufacturer)			
	Outdoor	Indoor	Underground	Soil
Type of atmosphere				
Temperature	–40 °C to +60 °C	+5 °C to +40 °C	0 °C to +60 °C	–10 °C to +50 °C
Relative humidity	10 % to 100 % (with condensing)	10 % to 70 %	10 % to 100 % (with condensing)	80 % to 100 % (with condensing)
Atmospheric pressure	860 hPa to 1 060 hPa			
Ambient γ dose rate	to be defined between STAR operator and manufacturer			
^{222}Rn (volume activity (for ^{220}Rn or RnDP ₂₂₀ measuring instruments))	$10 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ to $500 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$	$10 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ to $50 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$	$100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ to $1 \text{ MBq}\cdot\text{m}^{-3}$	$100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ to $1 \text{ MBq}\cdot\text{m}^{-3}$
^{220}Rn (volume activity (for ^{222}Rn or RnDP ₂₂₂ measuring instruments))	$10 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ to $1 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$	$10 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ to $50 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$	$100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ to $5 \text{ MBq}\cdot\text{m}^{-3}$	$100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ to $1 \text{ MBq}\cdot\text{m}^{-3}$
Equilibrium factor	0,2 to 0,6	0,2 to 0,8	0,1 to 0,8	Not applicable
Unattached fraction f_p	0,9 to 0,1	0,7 to 0,2	0,9 to 0,1	Not applicable
Volume number of aerosols	$10^6 \text{ to } 10^{12} \text{ particle}\cdot\text{m}^{-3}$	$10^8 \text{ to } 10^{14} \text{ particle}\cdot\text{m}^{-3}$	$10^{10} \text{ to } 10^{14} \text{ particle}\cdot\text{m}^{-3}$	Not applicable
Aerosol size* (AMAD)	$10^{-3} \text{ to } 0,5 \mu\text{m}$	$10^{-3} \text{ to } 10 \mu\text{m}$	$10^{-3} \text{ to } 10 \mu\text{m}$	Not applicable
* Tests with variation of aerosol size will be done after agreement between STAR operator, manufacturer and user.				

Annexe D (informative)

Méthodes de mesure couramment utilisées

D.1 Méthodes courantes pour la mesure de l'activité du radon dans un STAR

Les méthodes décrites ici sont celles qui sont le plus couramment utilisées pour les mesures de laboratoire, et sont celles que l'on utilise dans les STAR existants. Il existe beaucoup d'autres méthodes qui sont mentionnées dans le tableau B.1 de l'annexe B. Généralement, ces autres méthodes ne sont pas considérées comme des méthodes de référence à utiliser dans un STAR, mais elles sont données par la CEI 61577-2, en tant que méthodes utilisées par les instruments soumis aux essais.

La plupart des instruments qui utilisent ces méthodes sont maintenant complètement automatisés, et les informations sur les méthodes ne sont données ci-après qu'à titre d'information.

D.1.1 Mesure avec une chambre d'ionisation

L'utilisation d'une chambre d'ionisation pour la mesure du radon fut la première méthode adoptée par Marie Curie [11]. Ses principes de base sont les suivants:

Une électrode est placée dans un récipient conducteur qui contient l'atmosphère à analyser et est maintenue à une tension différente de celle des parois du récipient. L'absorption de l'énergie des particules α émis par les atomes de radon dans l'atmosphère contenue dans le récipient entraîne l'ionisation du gaz, et les électrons et les ions formés sont collectés par les électrodes sous l'action de la différence de potentiel. Ceci crée des impulsions de charge, ou, si le nombre de particules α émis est suffisamment élevé, un courant d'ionisation.

Les impulsions de charge peuvent être mesurées à l'aide d'un préamplificateur de charge ou d'un instrument de mesure de charge. Les courants d'ionisation, qui sont très faibles ($\approx 10^{-16}$ A), peuvent être mesurés par des électromètres.

Même si l'air est filtré avant de pénétrer dans la chambre d'ionisation, des descendants du radon se forment dans le volume de mesure et s'attachent aux parois par diffusion; ils créent ainsi une ionisation qui n'est pas directement liée au radon à mesurer. Ceci se traduit par une augmentation du bruit de fond qui fait croître le seuil de détection de l'appareil. Par conséquent, une décontamination systématique de l'appareil est nécessaire, soit en purgeant régulièrement la chambre avec un gaz sans radon, soit en démontant et en nettoyant l'intérieur de la chambre.

Les chambres d'ionisation qui fonctionnent dans le mode impulsions peuvent, si elles sont équipées d'une analyse spectroscopique des impulsions qui permet de mesurer séparément les particules alpha des isotopes du radon, être considérées comme instruments de mesure directs. Par conséquent, cette méthode peut être utilisée comme méthode de référence pour un STAR.

D.1.2 Mesure avec des dispositifs à scintillation

Les premiers instruments à utiliser la scintillation α du ZnS(Ag) pour la mesure du radon furent décrits par Lucas [12] et Pradel [13]. Ils sont constitués en général d'un volume fermé de plusieurs centaines de centimètres cubes qui peut être mis en communication avec l'atmosphère étudiée. L'intérieur de ce volume est recouvert d'une couche de ZnS(Ag).

Annex D (informative)

Currently used methods

D.1 Currently used methods for measuring the activity of radon in a STAR

The methods described here are the most commonly used for laboratory measurement purposes and are those encountered in the existing STAR. Many other different methods exist which are mentioned in table B.1. These other methods are not normally considered as the reference methods to be used in a STAR, but are given by IEC 61577-2, as the methods used by the instruments under test.

Most instruments using these methods are now completely automated, and the corresponding information is given only for reference purposes.

D.1.1 Measurement using an ionization chamber

The use of an ionization chamber to measure radon was the first method adopted by Marie Curie [11]. Its basic principles are as follows:

An electrode is placed inside a conducting vessel containing the atmosphere to be analyzed and is maintained at a voltage different from that of the walls of the vessel. The absorption of the energy of the α particles from the radon in the atmosphere contained in the vessel leads to the ionization of the gas and the electrons and ions formed, under the action of the potential difference, are collected by the electrodes. This creates pulses of charge or, if the number of α particles emitted is high enough, an ionization current.

The pulses of charge can be measured with a charge preamplifier or a charge measuring instrument. The ionization currents, which are very small ($\approx 10^{-16}$ A), can be measured with electrometers.

Even if the air is filtered before entering the ionization chamber, RnDPs are formed in the measurement volume, they become attached to the walls by diffusion, thus creating ionization not directly related to the radon being measured. This is reflected by an increase in background noise, leading to a rise in the lower limit of detection by the device. As a result, systematic decontamination of the device is necessary, either by regular purging using a gas without radon, or by dismantling and cleaning.

Ionization chambers operating in the pulse mode may, if equipped with a spectroscopic analysis of the pulses enabling the measurement of the alpha particles of the radon isotopes, be considered as instruments allowing a direct method of measurement. As a result, this method can be used as a reference method for a STAR.

D.1.2 Measurement using scintillation devices

The first instruments using the α scintillation of ZnS(Ag) to measure radon were described by Lucas [12] and Pradel [13]. They generally consist of an enclosed volume of a few hundred cubic centimetres which can be put into communication with the atmosphere under test. The interior of this volume is lined up with ZnS(Ag).

Pour l'analyse, le volume est connecté optiquement à la fenêtre d'entrée d'un photomultiplicateur capable de détecter les photons émis par le ZnS(Ag) lorsqu'il est excité par les particules α du radon et des descendants du radon qui sont présents dans le volume. Le photomultiplicateur est relié à un compteur qui mesure le nombre total de photons émis. Une formule simple établit le rapport entre le nombre de photons comptés et le nombre de particules α émises et on en déduit l'activité volumique du radon.

En sus de leur faible coût et de leur facilité d'utilisation, de tels appareils présentent une très grande sensibilité due à la relativement grande surface de détection. Cependant, le contact direct qui existe entre le détecteur et le radon entraîne une pollution croissante de l'instrument à cause des descendants du radon à vie longue formés à l'intérieur qui se déposent par diffusion sur le ZnS(Ag). Le bruit de fond de ces appareils augmente donc au fil du temps.

D.2 Méthodes courantes pour la mesure des descendants du radon et de l'énergie alpha volumique potentielle dans un STAR

Les méthodes décrites ici sont parmi les plus utilisées pour les mesures de laboratoire, et sont celles que l'on utilise dans les STAR existants. Elles sont toutes basées sur un prélèvement sur filtre des radionucléides présents dans l'air, suivi de l'analyse mathématique de la désintégration des descendants du radon collectés. Ce ne sont pas des méthodes directes.

Il existe d'autres méthodes qui sont présentées dans le tableau B.2 de l'annexe B. Généralement, ces autres méthodes ne sont pas considérées comme des méthodes de référence à utiliser dans un STAR, mais elles sont données dans la CEI 61577-3, en tant que méthodes utilisées par les instruments soumis aux essais.

Quelques analyses mathématiques concernant ces autres méthodes sont aussi décrites en D.3.

Toutes ces méthodes sont principalement conçues pour l'évaluation des $RnDP_{222}$. A cause de la période relativement longue du ^{212}Pb , la mesure des $RnDP_{220}$ n'est pas aussi facile; il n'y a que très peu de méthodes qui permettent la mesure des $RnDP_{220}$; ces méthodes sont citées dans le texte.

La plupart des instruments qui utilisent ces méthodes sont maintenant complètement automatisés, et les calculs correspondants ci-dessous serviront simplement de référence.

D.2.1 La méthode de Thomas [14] ($RnDP_{222}$)

La méthode de Thomas permet de déterminer les activités volumiques des ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi et de calculer l'énergie alpha potentielle volumique correspondante.

La désintégration successive des trois radionucléides suit des lois exponentielles fonction de la quantité initiale de chacun des éléments.

Les équations correspondantes ont été décrites par Bateman [15] optimisées par Tsivoglou [16] puis encore par Thomas, aboutissant à la formulation de Thomas ci-dessous.

La méthode consiste en trois comptages successifs de durées différentes, à des instants précis, d'un filtre ayant prélevé des $RnDP$.

For the analysis, the volume is optically coupled to the entrance window of a photomultiplier capable of detecting the photons emitted by the ZnS(Ag) when it is excited by the α -particles from the radon and its decay products present in the volume. The photomultiplier is connected to a scaler counter which counts the total number of photons emitted. A simple formula relates the number of photons counted to the number of α particles emitted and hence to the activity of the radon.

Apart from their cheapness and the ease with which they can be used, such devices have a very high inherent sensitivity due to the relatively large area of detection. On the other hand, the direct contact that exists between the detector and the radon leads to increasing pollution of the instrument by the long-lived RnDPs formed in the interior, which become attached to the ZnS(Ag) by diffusion. The background noise of these devices thus inevitably increases as time goes on.

D.2 Currently used methods for measuring RnDP and volume potential alpha energy in a STAR

The methods described here are some of the most commonly used for laboratory measurement purposes and are those encountered as measurement methods in the existing STAR. They are all based on the collection of airborne radionuclides onto a filter, followed by mathematical analysis of the decay of the collected RnDP. They are not direct methods.

Other different methods exist which are mentioned in table B.2. These other methods are not normally considered as the reference methods to be used in a STAR, but are given by IEC 61577-3, as the methods used by the instruments under test.

Some mathematical analysis concerning these other methods are described also in clause D.3.

All these methods are primarily designed for the assessment of RnDP₂₂₂. Due to the relatively long half-life of the ²¹²Pb, the measurement of RnDP₂₂₀ is not so easy; only a few methods are able to provide this information; they are cited in the text.

Most instruments using these methods are now completely automated, and the corresponding calculations are given hereinafter only for reference purposes.

D.2.1 Thomas's method [14] (RnDP₂₂₂)

Thomas's method allows determination of ²¹⁸Po, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi volume activities and calculation of the corresponding potential alpha energy.

Successive decay of the three radionuclides follows exponential laws depending on the initial quantity of each of the elements.

The corresponding equations were described by Bateman [15], optimized by Tsivoglou [16] and subsequently optimized by Thomas, leading to Thomas's formulation given below.

The method involves three successive counts of a filter which has sampled the RnDPs at different time intervals.

Le diagramme des temps qui suit s'applique à une durée de prélèvement de 300 s:

Tableau D.1 – Diagramme de temps, méthode de Thomas

Prélèvement	Attente	Premier comptage	Attente	Deuxième comptage	Attente	Troisième comptage
		I_1		I_2		I_3
300 s	120 s	180 s	60 s	840 s	60 s	540 s

Soit

ρ_g l'efficacité de détection géométrique (4π sr);

N_{Po218} le nombre d'atomes de ^{218}Po collectés sur le filtre;

N_{Pb214} le nombre d'atomes de ^{214}Pb collectés sur le filtre;

N_{Bi214} le nombre d'atomes de ^{214}Bi collectés sur le filtre.

Nous avons:

$$N_{Po218} = (1/\rho_g)(61,06 I_1 - 29,64 I_2 + 28,02 I_3)$$

$$N_{Pb214} = (1/\rho_g)(0,43 I_1 - 7,45 I_2 + 17,7 I_3)$$

$$N_{Bi214} = (1/\rho_g)(-8,13 I_1 + 12 I_2 - 13,63 I_3)$$

et

$$EAP = (13,690 N_{Po218} + 7,687 (N_{Pb214} + N_{Bi214})) \times 1,602 \times 10^{-13} \text{ (J)}$$

Si le volume d'air prélevé est V (m^3), l'énergie alpha potentielle volumique est obtenue par

$$EAP_v = \frac{EAP}{V} \text{ (J} \cdot m^{-3}\text{)}.$$

La méthode de Thomas permet aussi de déterminer les activités volumiques individuelles des différents radionucléides.

D.2.2 La méthode de Thomas optimisée par Hartley [17] ($RnDP_{222}$)

Cette méthode est l'optimisation la plus récente de la méthode de Thomas et elle est identique à la précédente, excepté en ce qui concerne le diagramme des temps et les coefficients dans les équations. Le diagramme des temps du tableau D.3 est optimisé (dans le sens d'une réduction maximale de l'incertitude) pour chaque $RnDP$ ou pour l'EAPv et dépend de la valeur du facteur d'équilibre F . Le tableau D.2 présente un exemple de ce diagramme des temps.

Tableau D.2 – Temps de comptage optimaux de la méthode de Thomas optimisés par Hartley

Facteur d'équilibre F	Temps de comptage s	Optimisation de l'analyse du ^{218}Po	Optimisation de l'analyse du ^{214}Pb	Optimisation de l'analyse du ^{214}Bi	Optimisation de l'analyse de l'EAP
$\approx 0,5$	t_1	270	240	240	240
	t_2	1 830	1 530	1 530	1 530
	t_3	3 000	3 000	3 000	3 000

Le temps de prélèvement et le premier intervalle d'attente sont par exemple fixés à 300 s et 60 s, respectivement, et il n'y a aucun intervalle d'attente entre les différents comptages.

The time diagram is as follows for a 300 s sampling period:

Table D.1 – Time diagram, Thomas's method

Sampling	Waiting	First count	Waiting	Second count	Waiting	Third count
		I_1		I_2		I_3
300 s	120 s	180 s	60 s	840 s	60 s	540 s

Let

- ρ_g be the geometrical detection efficiency (4π sr);
 N_{Po218} be the number of ^{218}Po atoms collected onto the filter;
 N_{Pb214} be the number of ^{214}Pb atoms collected onto the filter;
 N_{Bi214} be the number of ^{214}Bi atoms collected onto the filter.

We have:

$$N_{Po218} = (1/\rho_g)(61,06 I_1 - 29,64 I_2 + 28,02 I_3)$$

$$N_{Pb214} = (1/\rho_g)(0,43 I_1 - 7,45 I_2 + 17,7 I_3)$$

$$N_{Bi214} = (1/\rho_g)(-8,13 I_1 + 12 I_2 - 13,63 I_3)$$

and

$$PAE = (13,690 N_{Po218} + 7,687 (N_{Pb214} + N_{Bi214})) \times 1,602 \times 10^{-13} \text{ (J)}$$

If the volume of air sampled is V (m^3), we obtain the volume potential alpha energy as

$$PAEC = \frac{PAE}{V} \text{ (J}\cdot\text{m}^{-3}\text{)}.$$

Thomas's method also enables the volume activities of the different nuclides to be determined.

D.2.2 Thomas's method optimized by Hartley [17] ($RnDP_{222}$)

This method is the most recent optimization of Thomas's method and is identical to the previous one, except for the time diagram and the coefficients in the equations. The following time diagram (table D.3) is optimized (in the sense of a maximum reduction in uncertainties) for each $RnDP$ or for PAE and depends upon the value of the equilibrium factor F . Table D.2 presents an example of this time diagram.

Table D.2 – Optimal counting times of Thomas's method optimized by Hartley

Equilibrium factor F	Counting Time s	Optimization of ^{218}Po analysis	Optimization of ^{214}Pb analysis	Optimization of ^{214}Bi analysis	Optimization of PAE analysis
$\approx 0,5$	t_1	270	240	240	240
	t_2	1 830	1 530	1 530	1 530
	t_3	3 000	3 000	3 000	3 000

The sampling time and the first waiting time are fixed, for example, to 300 s and 60 s, respectively, and there is no waiting time between the different counting times.

Le diagramme des temps devient alors:

Tableau D.3 – Diagramme des temps, méthode de Thomas optimisée par Hartley

Prélèvement	Attente	Premier comptage	Deuxième comptage	Troisième comptage
300 s	60 s	t_1	t_2	t_3
		I_1	I_2	I_3

t_1 , t_2 , t_3 commencent ensemble après la période d'attente.

Les équations deviennent alors:

$$N_{Po218} = (1/\rho_g)(A I_1 + B I_2 + C I_3)$$

$$N_{Pb214} = (1/\rho_g)(D I_1 + E I_2 + F I_3)$$

$$N_{Bi214} = (1/\rho_g)(G I_1 + H I_2 + J I_3)$$

où I_1 , I_2 , I_3 sont les résultats des comptages respectivement pour les périodes de comptage t_1 , t_2 , t_3 , et avec les coefficients A, B, C... donnés dans le tableau D.4.

Tableau D.4 – Coefficients de la méthode de Thomas optimisés par Hartley

Facteur d'équilibre F	Coefficient	Optimisation du ^{218}Po	Optimisation du ^{214}Pb	Optimisation du ^{214}Bi	Optimisation de l'EAP
$\approx 0,5$	A	0,108 03	0,121 45	0,121 45	0,121 45
	B	-0,0459	-0,047	-0,047	-0,047
	C	0,0453	0,0296	0,0296	0,0296
	D	$-9,139 \times 10^{-3}$	$-8,647 \times 10^{-3}$	$-8,647 \times 10^{-3}$	$-8,647 \times 10^{-3}$
	E	$-2,605 \times 10^{-3}$	$-4,1213 \times 10^{-3}$	$-4,1213 \times 10^{-3}$	$-4,1213 \times 10^{-3}$
	F	0,0157	0,012 88	0,012 88	0,012 88
	G	$-6,490 \times 10^{-3}$	$-9,345 \times 10^{-3}$	$9,345 \times 10^{-3}$	$9,345 \times 10^{-3}$
	H	0,0151	0,017 15	0,017 15	0,017 15
	J	-0,0180	-0,0126	-0,0126	-0,0126

Une combinaison de mesures α , β et γ donnera la meilleure évaluation indépendante de chaque radionucléide et donc l'évaluation la plus précise de l'activité des RnDP. Ceci est décrit par B.M. Hartley [18].

D.2.3 Méthode de Markov [20] (RnDP₂₂₂)

Markov a décrit une méthode rapide pour l'estimation de l'activité volumique du ^{218}Po et de l'EAPv. Son diagramme des temps est le suivant:

The time schedule then becomes:

Table D.3 – Time diagram, Thomas's method optimized by Hartley

Sampling	Waiting	First count	Second count	Third count
300 s	60 s	t_1	t_2	t_3
		I_1	I_2	I_3

t_1 , t_2 , t_3 start together after the waiting time.

The equations then become:

$$N_{Po218} = (1/\rho_g)(A I_1 + B I_2 + C I_3)$$

$$N_{Pb214} = (1/\rho_g)(D I_1 + E I_2 + F I_3)$$

$$N_{Bi214} = (1/\rho_g)(G I_1 + H I_2 + J I_3)$$

with I_1 , I_2 , I_3 being the results of the counts respectively for counting time t_1 , t_2 , t_3 , and with the coefficients A, B, C . . . given as an example in table D.4.

Table D.4 – Coefficient of Thomas's method optimized by Hartley

Equilibrium factor F	Coefficient	Optimization of ^{218}Po	Optimization of ^{214}Pb	Optimization of ^{214}Bi	Optimization of PAE
$\approx 0,5$	A	0,108 03	0,121 45	0,121 45	0,121 45
	B	-0,0459	-0,047	-0,047	-0,047
	C	0,0453	0,0296	0,0296	0,0296
	D	$-9,139 \times 10^{-3}$	$-8,647 \times 10^{-3}$	$-8,647 \times 10^{-3}$	$-8,647 \times 10^{-3}$
	E	$-2,605 \times 10^{-3}$	$-4,1213 \times 10^{-3}$	$-4,1213 \times 10^{-3}$	$-4,1213 \times 10^{-3}$
	F	0,0157	0,012 88	0,012 88	0,012 88
	G	$-6,490 \times 10^{-3}$	$-9,345 \times 10^{-3}$	$9,345 \times 10^{-3}$	$9,345 \times 10^{-3}$
	H	0,0151	0,017 15	0,017 15	0,017 15
	J	-0,0180	-0,0126	-0,0126	-0,0126

A combination of α , β , and γ measurements will give the best independent evaluation of each radionuclide and then the most reliable evaluation of RnDP volume activity. This is described by B. M. Hartley [18]

D.2.3 Markov's method [20] (RnDP_{222})

Markov described a rapid method for the estimation of the volume activity of ^{218}Po and of the PAEC. Its time schedule is as follows:

Tableau D.5 – Diagramme des temps, méthode de Markov

Prélèvement	Attente	Premier comptage	Attente	Deuxième comptage
		I_1		I_2
300 s	60 s	180 s	180 s	180 s

Soit:

I_1 le résultat de la première période de comptage;

I_2 le résultat de la deuxième période de comptage;

ε l'efficacité de comptage;

η un coefficient de correction pour l'auto- absorption des particules alpha;

Q le débit de prélèvement ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$).

L'activité volumique du ^{218}Po est donnée par:

$$Av_{218} = \frac{1,18 \cdot (I_1 - I_2)}{\varepsilon \cdot \eta \cdot Q} \cdot 0,037 \text{ (Bq} \cdot \text{m}^{-3}\text{)}$$

L'EAPv est alors donnée par:

$$\text{EAPv} = \frac{40 \cdot I_2}{\varepsilon \cdot \eta \cdot Q} \cdot 1,602 \cdot 10^{-7} \text{ (}\mu\text{J} \cdot \text{m}^{-3}\text{)}$$

L'incertitude globale qui en résulte est de l'ordre de 15 %.

D.2.4 Méthode de Nazaroff [21] (RnDP_{222} et RnDP_{220})

Cette méthode utilise la spectroscopie alpha pour déterminer la concentration des descendants à courte vie du ^{222}Rn et du ^{220}Rn . Les descendants sont collectés sur un filtre membrane. L'activité est mesurée par un détecteur solide en silicium à haute résolution. Le comptage peut avoir lieu sous un vide partiel (100 hPa) pour donner une bonne résolution en énergie tout en réduisant au minimum la contamination du détecteur par les atomes de recul des descendants du radon. Pour séparer les contributions des descendants, y compris ceux du ^{220}Rn , trois intervalles d'énergie et deux périodes de comptage sont utilisés:

1,0 à 6,15 MeV (^{218}Po , ^{212}Bi)

6,15 à 8 MeV (^{214}Po)

8,0 à 9,8 MeV (^{212}Po).

La chaîne des descendants du ^{220}Rn se ramifie pour donner 35,89 % du comptage dans le premier intervalle d'énergie et 64,11 % dans le troisième intervalle d'énergie. Ceci permet d'estimer et de soustraire l'apport du ^{212}Bi dans le premier intervalle d'énergie. Quelques impulsions dues au ^{214}Po seront enregistrés dans le premier intervalle d'énergie; les comptages correspondants observés dans cet intervalle d'énergie peuvent être corrigés après la désintégration du ^{218}Po .

Le diagramme des temps pour les périodes de prélèvement et de comptage est donné au tableau D.6.

Table D.5 – Time diagram, Markov's method

Sampling	Waiting	First count	Waiting	Second count
		I_1		I_2
300 s	60 s	180 s	180 s	180 s

let

I_1 be the result of the first counting period;

I_2 be the result of the second counting period;

ε be the counting efficiency;

η be a self-absorption correction coefficient for alpha particles;

Q be the sampling flow rate ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$).

The ^{218}Po volume activity is given by:

$$Av_{218} = \frac{1,18 \cdot (I_1 - I_2)}{\varepsilon \cdot \eta \cdot Q} \cdot 0,037 \text{ (Bq} \cdot \text{m}^{-3}\text{)}$$

The PAEC is then given by

$$\text{PAEC} = \frac{40 \cdot I_2}{\varepsilon \cdot \eta \cdot Q} \cdot 1,602 \cdot 10^{-7} \text{ (}\mu\text{J} \cdot \text{m}^{-3}\text{)}$$

The resulting overall uncertainty is in the order of 15 %.

D.2.4 Nazaroff's method [21] (RnDP₂₂₂ and RnDP₂₂₀)

This method uses alpha spectroscopy to determine the concentration of the short-lived decay products of ^{222}Rn and ^{220}Rn . The decay products are collected on a membrane filter. The activity is measured with a high resolution silicon solid state detector. Counting can take place under a partial vacuum (100 hPa) to give better energy resolution while minimizing the contamination of the detector by recoil decay products. To separate the contributions from the decay products, including those from ^{220}Rn , three energy intervals and two counting periods are used:

1,0 – 6,15 MeV (^{218}Po , ^{212}Bi)

6,15 – 8 MeV (^{214}Po)

8,0 – 9,8 MeV (^{212}Po).

The ^{220}Rn decay chain branches, give 35,89 % of counts in the first energy range and 64,11 % in the third energy range. This allows the contribution from ^{212}Bi in the first energy range to be estimated and subtracted. Some counts from ^{214}Po will occur in the first energy range; the observed counts can be corrected after decay of the ^{218}Po .

The time diagram for sampling and counting is shown in table D.6.

Tableau D.6 – Diagramme des temps, méthode de Nazaroff

Prélèvement	Attente	Premier comptage	Attente	Deuxième comptage
5 min	1 min	10 min	10 min	19 min

Supposons que:

V est le volume total prélevé (m^3)

ρ est l'efficacité de détection.

Après correction (si nécessaire) du chevauchement des pics entre les deux premiers intervalles d'énergie concernant respectivement le ^{218}Po et le ^{214}Po , les comptages dans les deux premiers intervalles d'énergie sont corrigés en fonction des apports des $RnDP_{220}$, calculés à partir du troisième intervalle d'énergie. On obtient ainsi les résultats bruts suivants:

$C_{218Po}(1)$ comptages corrigés dans l'intervalle d'énergie ^{218}Po dans la première période de comptage;

$C_{218Po}(2)$ comptages corrigés dans l'intervalle d'énergie ^{218}Po dans la deuxième période de comptage;

$C_{214Po}(1)$ comptages corrigés dans l'intervalle d'énergie ^{214}Po dans la première période de comptage;

$C_{214Po}(2)$ comptages corrigés dans l'intervalle d'énergie ^{214}Po dans la deuxième période de comptage;

$C_{212Po}(1)$ comptages dans l'intervalle d'énergie ^{212}Po dans la première période de comptage;

$C_{212Po}(2)$ comptages dans l'intervalle d'énergie ^{212}Po dans la deuxième période de comptage;

Les activités volumiques des $RnDP_{220}$, A_{Po218} , A_{Pb214} , A_{Bi214} sont:

$$A_{Po218} = \frac{1,7257 \times C_{218Po}(1)}{V \times \rho} \text{ (Bq} \cdot m^{-3} \text{)}$$

$$A_{Pb214} = \frac{0,5418 \times C_{214Po}(2) - 0,4406 \times C_{214Po}(1)}{V \times \rho} - 0,1251 \times A_{Po218} \text{ (Bq} \cdot m^{-3} \text{)}$$

$$A_{Bi214} = \frac{0,4466 \times C_{214Po}(1)}{V \times \rho} - 0,0210 \times A_{Po218} - 0,2992 \times A_{Pb214} \text{ (Bq} \cdot m^{-3} \text{)}.$$

L'activité volumique équivalente à l'équilibre ou l'énergie alpha volumique potentielle peut alors être exprimée comme suit:

$$EEC_{Rn} = 0,1065 \times A_{Po218} + 0,5150 \times A_{Pb214} + 0,3786 \times A_{Bi214} \text{ (Bq} \cdot m^{-3} \text{)}$$

$$EAPv = (0,579 \times A_{Po218} + 2,86 \times A_{Pb214} + 2,1 \times A_{Bi214}) \times 10^{-9} \text{ (J} \cdot m^{-3} \text{)}$$

Pour les $RnDP_{220}$, les résultats suivants sont obtenus:

$$A_{Po212} = \frac{1,7257 \times C_{212Po}(2)}{V \times \rho} \text{ (Bq} \cdot m^{-3} \text{)}$$

NOTE En Grande-Bretagne, cette méthode a été retenue comme méthode de référence par la Commission Nationale pour la Radioprotection (NRPB).

Table D.6 – Time diagram, Nazaroff's method

Sampling	Waiting	First count	Waiting	Second count
5 min	1 min	10 min	10 min	19 min

The following is assumed:

V is the total volume sampled (m^3)

ρ is the detection efficiency.

After correction for peak overlap between the two first energy intervals concerning respectively the ^{218}Po and the ^{214}Po (if needed), the counts in the two first energy intervals are corrected for contributions from RnDP_{220} , calculated from the third energy interval. The following raw results are obtained:

- $C_{218\text{Po}}(1)$ corrected counts in energy interval ^{218}Po in the first counting period;
 $C_{218\text{Po}}(2)$ corrected counts in energy interval ^{218}Po in the second counting period;
 $C_{214\text{Po}}(1)$ corrected counts in energy interval ^{214}Po in the first counting period;
 $C_{214\text{Po}}(2)$ corrected counts in energy interval ^{214}Po in the second counting period;
 $C_{212\text{Po}}(1)$ counts in energy interval ^{212}Po in the first counting period;
 $C_{212\text{Po}}(2)$ counts in energy interval ^{212}Po in the second counting period.

The volume activities of the RnDP_{222} , $A_{\text{Po}218}$, $A_{\text{Pb}214}$, $A_{\text{Bi}214}$ are:

$$A_{\text{Po}218} = \frac{1,7257 \times C_{218\text{Po}}(1)}{V \times \rho} \quad (\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3})$$

$$A_{\text{Pb}214} = \frac{0,5418 \times C_{214\text{Po}}(2) - 0,4406 \times C_{214\text{Po}}(1)}{V \times \rho} - 0,1251 \times A_{\text{Po}218} \quad (\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3})$$

$$A_{\text{Bi}214} = \frac{0,4466 \times C_{214\text{Po}}(1)}{V \times \rho} - 0,0210 \times A_{\text{Po}218} - 0,2992 \times A_{\text{Pb}214} \quad (\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}).$$

The equivalent equilibrium volume activity or the volume potential alpha energy can then be expressed as follows:

$$\text{EEC}_{\text{Rn}} = 0,1065 \times A_{\text{Po}218} + 0,5150 \times A_{\text{Pb}214} + 0,3786 \times A_{\text{Bi}214} \quad (\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3})$$

$$\text{PAEC} = (0,579 \times A_{\text{Po}218} + 2,86 \times A_{\text{Pb}214} + 2,1 \times A_{\text{Bi}214}) \times 10^{-9} \quad (\text{J} \cdot \text{m}^{-3})$$

For RnDP_{220} , the following results are obtained:

$$A_{\text{Po}212} = \frac{1,7257 \times C_{212\text{Po}}(2)}{V \times \rho} \quad (\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3})$$

NOTE This method has been chosen in principle as a reference method by the National Radiological Protection Board (NRPB) (UK).

D.3 Autres méthodes courantes utilisées pour les instruments de mesure des descendants du radon

D.3.1 Méthode de Hill [22]

Cette méthode est la première à avoir donné naissance à un appareil portatif et autonome de mesure de l'EAPv.

La méthode repose sur le fait que, à EAPv constante, le total des émissions α et β des descendants du radon collectées sur le filtre est presque constant. Elle a l'autre avantage de donner une bonne estimation de l'âge de l'air et du facteur d'équilibre dans la gamme $0,1 < F < 0,7$.

L'instrument conçu pour utiliser cette méthode utilise la procédure suivante:

Tableau D.7 – Diagramme des temps, méthode de Hill

Prélèvement et comptage du bruit de fond	Attente	Comptage α et β
2 min	0,5 min	2 min

Le bruit de fond est mesuré pendant le prélèvement. Il peut être lu à la fin du prélèvement et est soustrait automatiquement. Le résultat est exprimé en WL.

Avec sa pompe, l'instrument forme un ensemble compact et assez pratique. Le résultat est obtenu rapidement, ce qui permet de refaire un prélèvement en cas de doute. Cependant, la présence du compteur β qui fonctionne avec un scintillateur plastique rend l'instrument très sensible au rayonnement gamma ambiant. Lorsque le niveau du rayonnement gamma devient important par rapport aux niveaux d'activité α et β , il peut y avoir des erreurs de mesure importantes, surtout s'il y a des variations de rayonnement gamma pendant la mesure (déplacement de personnel ou d'engins, changement d'orientation de l'instrument pendant la mesure, etc.).

D.3.2 Méthode de Kusnetz [24] ($RnDP_{222}$ et $RnDP_{220}$)

D.3.2.1 Mesure des $RnDP_{222}$

Cette mesure utilise un seul comptage alpha global pour estimer l'énergie alpha potentielle. La procédure pour l'analyse des $RnDP_{222}$ est la suivante:

Tableau D.8 – Diagramme des temps, méthode de Kusnetz

Prélèvement	Attente	Comptage
5 à 10 min	40 à 90 min	

Soit

N_1 le nombre de coups par minute, corrigé du bruit de fond au temps t_1 ;

ρ_g l'efficacité de comptage géométrique (4π sr);

V le volume prélevé (litres);

K le facteur de correction.

D.3 Other standard methods used in RnDP measuring instruments

D.3.1 Hill's [22] method

This is the first method to have given rise to a portable independently operating instrument for measuring PAEC.

The method is based on the fact that, at constant PAEC, the sum of the α and β emissions from the RnDPs deposited on a filter is almost constant. It has also the advantage to give a good estimate of the age of the air and of the equilibrium factor in the range $0,1 < F < 0,7$.

The instrument designed to exploit this method uses the following sequence:

Table D.7 – Time diagram, Hill's method

Sampling and background counting	Waiting	α and β counting
2 min	0,5 min	2 min

The background noise is measured during the sampling. It can be read off at the end of the sampling and subtracted automatically. The result is given in WL.

With its pump, the instrument forms a compact unit and is fairly practical. The result is obtained quickly, enabling the sampling to be restarted in case of doubt. However, the presence of the β counter using a plastic scintillator makes the instrument very sensitive to the ambient gamma field. When the level of this field becomes significant in comparison with the levels of α and β activity, considerable errors of measurement may occur, particularly if there are variations in the gamma field during the measurement (movement of staff or machines, change in the orientation of the instrument during the measurement, etc.).

D.3.2 Kusnetz's [24] method (RnDP₂₂₂ and RnDP₂₂₀)

D.3.2.1 Measurement of RnDP₂₂₂

This uses a single gross alpha count to estimate the potential alpha energy. The sequence for the analysis of RnDP₂₂₂ is as follows:

Table D.8 – Time diagram, Kusnetz's method

Sampling	Waiting	Counting
5 to 10 min	40 to 90 min	

Let

N_1 be the number of counts per minute, corrected from background, at counting time t_1 ;

ρ_g be the geometrical counting efficiency (4π sr);

V be the volume sampled (litres);

K be the correction factor.

Nous avons:

$$EAPv_{222} = \frac{20,8 \cdot N_1}{\rho_g \cdot V \cdot K} (\mu J \cdot m^{-3})$$

K peut être calculé à partir des expressions suivantes:

$$K = 230 - 2 \cdot t_1 \quad \text{pour} \quad 40 \text{ min} \leq t_1 \leq 70 \text{ min}$$

$$K = 195 - 1,5 \cdot t_1 \quad \text{pour} \quad 70 \text{ min} \leq t_1 \leq 90 \text{ min}$$

L'intérêt principal de cette méthode est de permettre l'analyse par comptage alpha au laboratoire, grâce à la durée élevée d'attente. Cependant, et à cause même de cette durée, elle ne donne pas d'information immédiate sur l'état de l'atmosphère étudiée.

D.3.2.2 Cas d'un mélange de RnDP₂₂₂ et de RnDP₂₂₀

En présence de RnDP₂₂₀, on applique une équation modifiée:

$$EAPv_{222} = \frac{20,8 \cdot (N_1 - N_2 \cdot e^{\lambda_{Pb212} \cdot \Delta t})}{\rho_g \cdot V \cdot K} (\mu J \cdot m^{-3})$$

où

N_2 est le nombre de coups par minute, corrigé du bruit de fond, au temps t_2 ;

λ_{Pb212} est la constante de désintégration pour le ^{212}Pb ,

$$\Delta t = t_2 - t_1.$$

D.3.2.3 Mesure des RnDP₂₂₀

L'énergie alpha potentielle des RnDP₂₂₀ peut être calculée de cette manière:

$$EAPv_{220} = \frac{20,8 \cdot N}{\rho_g \cdot V \cdot G} (\mu J \cdot m^{-3}).$$

où

N est le taux de comptage par minute, corrigé du bruit de fond, au temps t ;

G peut être calculé à partir des expressions suivantes:

$$G \approx 13 - 0,7675 \cdot (t - 5) \quad \text{pour} \quad 5 \text{ h} \leq t \leq 9 \text{ h}$$

$$G = 11,64 - 0,5159 \cdot (t - 5) \quad \text{pour} \quad 11 \text{ h} \leq t \leq 17 \text{ h}$$

D.3.3 Méthode de Rolle [25] (RnDP₂₂₂)

Rolle a décrit une méthode basée sur un comptage alpha global pris à un moment précis après la fin du prélèvement. Plusieurs combinaisons de périodes de prélèvement et de mesure sont proposées.

Une estimation de l'EAPv est obtenue directement en appliquant un coefficient simple au résultat du comptage.

C'est la méthode retenue pour la réalisation de certains instruments. La procédure choisie est la suivante:

We have:

$$\text{PAEC}_{222} = \frac{20,8 \cdot N_1}{\rho_g \cdot V \cdot K} \text{ (}\mu\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\text{)}$$

K can be calculated from the following expressions:

$$K = 230 - 2 \cdot t_1 \quad \text{for} \quad 40 \text{ min} \leq t_1 \leq 70 \text{ min}$$

$$K = 195 - 1,5 \cdot t_1 \quad \text{for} \quad 70 \text{ min} \leq t_1 \leq 90 \text{ min}$$

The main interest of the method is that it enables the analysis to be made by alpha counting in the laboratory, which is an advantage given the long waiting time. However, because of this rather long waiting time, it does not give immediate information about the state of the atmosphere under investigation.

D.3.2.2 Case of a mixture of RnDP₂₂₂ and RnDP₂₂₀

In the presence of RnDP₂₂₀, a modified equation is applied:

$$\text{PAEC}_{222} = \frac{20,8 \cdot (N_1 - N_2 \cdot e^{\lambda_{\text{Pb}212} \cdot \Delta t})}{\rho_g \cdot V \cdot K} \text{ (}\mu\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\text{)}$$

where

N_2 is the number of counts per minute, corrected from background, at counting time t_2 ;

$\lambda_{\text{Pb}212}$ is the decay constant for ²¹²Pb, and

$$\Delta t = t_2 - t_1.$$

D.3.2.3 Measurement of RnDP₂₂₀

The potential alpha energy of RnDP₂₂₀ can be calculated as follows:

$$\text{PAEC}_{220} = \frac{20,8 \cdot N}{\rho_g \cdot V \cdot G} \text{ (}\mu\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\text{)}$$

where

N is the number of counts per minute, corrected from background, at counting time t ;

G can be calculated from the following expressions:

$$G \approx 13 - 0,7675 \cdot (t - 5) \quad \text{for} \quad 5 \text{ h} \leq t \leq 9 \text{ h}$$

$$G = 11,64 - 0,5159 \cdot (t - 5) \quad \text{for} \quad 11 \text{ h} \leq t \leq 17 \text{ h}$$

D.3.3 Rolle's [25] method (RnDP₂₂₂)

Rolle has described a method based on a global alpha count at a fixed instant of time after the end of sampling. Various combinations of sampling and measuring times are proposed.

An estimate of the PAEC is obtained directly by applying a simple coefficient to the count.

This is the method chosen in designing some instruments. The sequence chosen is as follows:

Tableau D.9 – Exemple d'un diagramme de temps, méthode de Rolle

Prélèvement et comptage du bruit de fond	Attente	Comptage
2 min	8 min	2 min

Toute contamination est déduite automatiquement et le résultat fourni directement en $\mu\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$, le débit de prélèvement étant calculé par un débitmètre électronique intégré.

Le comptage α est réalisé par un détecteur silicium qui n'est pas sensible au rayonnement gamma.

L'affichage automatique du niveau de contamination à la fin du prélèvement permet de détecter toute contamination éventuelle de l'instrument.

Le résultat est obtenu 10 min après la fin du prélèvement et permet de renouveler le prélèvement en cas de doute.

Pour la procédure utilisée dans certains instruments, Rolle donne dans sa description de la méthode le rapport suivant:

1 nJ (EAP) sur le filtre correspond à ≈ 10 dpm sur le filtre (4π sr)

Soit:

Q le débit de prélèvement ($\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$)

T_P la durée de prélèvement (min)

T_C la durée de comptage (min)

ρ_d l'efficacité de détection (4π sr)

L la valeur affichée de l'énergie alpha potentielle ($\mu\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$)

N_0 le nombre de particules alpha qui correspondent à la contamination comptée pendant la période T_P

N le nombre de particules alpha comptées pendant la période de comptage T_C

$A(t)$ la radioactivité des descendants collectés sur le filtre (Bq).

Nous avons alors:

$$A(t) = \frac{N}{60 \cdot T_C \cdot \rho_d} \text{ (Bq)}$$

ou, avec $T_P = T_C = 2$ min et la déduction de la contamination:

$$L = \frac{60 \cdot A(t)}{10} \cdot \frac{1}{Q \cdot T_P} \text{ (}\mu\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\text{)}$$

$$L = \frac{N - N_0}{40 \cdot Q \cdot \rho_d} \text{ (}\mu\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\text{)}$$

Table D.9 – Example of time diagram, Rolle's method

Sampling and background count	Waiting	Counting
2 min	8 min	2 min

Subtraction of any contamination is automatic and the result is given directly in $\mu\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$, the sampling rate being calculated by the incorporated electronic flow-meter.

The α counting is carried out using a silicon detector insensitive to gamma radiation.

Automatic display of the level of contamination at the end of the sampling makes it possible to detect any contamination of the instrument that might have occurred.

The result is obtained 10 min after the end of sampling and again allows the sampling to be taken or renewed in doubtful cases.

For the sequence used in some instruments, Rolle gives the following relationship in his description of the method:

1 nJ (PAE) on the filter corresponds to ≈ 10 dpm on the filter (4π sr)

Let

Q be the sampling rate ($\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$);

T_P be the sampling time (min);

T_C be the counting time (min);

ρ_d be the detection efficiency (4π sr);

L be the displayed value of the potential alpha energy ($\mu\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$);

N_0 be the number of alpha particles corresponding to the contamination counted during the time T_P ;

N be the number of alpha particles counted during the counting time T_C ;

$A(t)$ be the radioactivity of the decay products collected on the filter (Bq).

Then we have:

$$A(t) = \frac{N}{60 \cdot T_C \cdot \rho_d} \text{ (Bq)}$$

or, with $T_P = T_C = 2$ min and the deduction of the contamination:

$$L = \frac{60 \cdot A(t)}{10} \cdot \frac{1}{Q \cdot T_P} \text{ (}\mu\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\text{)}$$

$$L = \frac{N - N_0}{40 \cdot Q \cdot \rho_d} \text{ (}\mu\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\text{)}$$

Annexe E (normative)

Etalonnage et traçabilité des méthodes et des instruments de mesure utilisés dans un STAR

E.1 Etalons

E.1.1 Etalon absolu de référence

Comme nous l'avons indiqué en C.1.1, aucun étalon absolu de référence ni du radon ni des descendants du radon n'est actuellement facilement disponible. La traçabilité d'une atmosphère de STAR ne peut donc pas être réalisée de façon absolue, et il faut utiliser soit un étalon primaire ou secondaire de caractéristiques connues, soit une mesure appelée *mesure de référence directe*.

Un exemple de ce concept est l'installation de référence radon du National Institute of Standard and Technology (NIST [27]).

La seconde solution sera préférée dans la mesure du possible, vu les problèmes actuels de stabilité et de reproductibilité rencontrés avec les sources. On décrit cependant dans la présente annexe les différents étalons secondaires connus en précisant qu'ils ne doivent être utilisés qu'avec beaucoup de précautions.

E.1.2 Etalon primaire

En général, un étalon primaire est un étalon qui représente la meilleure évaluation possible de la grandeur à mesurer. De tels étalons existent dans tous les laboratoires de référence. Leur qualité est vérifiée principalement par des exercices d'intercomparaison. Un étalon primaire n'est jamais utilisé directement pour réaliser des mesures.

E.1.3 Etalon secondaire (appelé aussi étalon de transfert)

L'étalon secondaire est un étalon de haute qualité, raccordé métrologiquement à l'étalon primaire local. C'est l'étalon utilisé normalement pour l'étalonnage ou la réalisation de l'atmosphère d'un STAR. Cet étalon peut être constitué soit d'une source radioactive, soit d'un instrument de mesure correctement étalonné.

L'étalon secondaire utilisé dans un STAR doit être connu avec une incertitude inférieure à 5 % (2σ d'intervalle de confiance). Cette incertitude s'applique à la source radioactive utilisée pour générer l'atmosphère d'un STAR. L'étalonnage d'un instrument utilisé comme étalon secondaire présentera une incertitude statistique liée au niveau d'activité volumique à mesurer.

Dans tous les cas, un instrument utilisé comme étalon secondaire doit permettre de réaliser des mesures avec une incertitude meilleure que celle des mesures faites à l'aide des instruments à l'essai.

E.1.3.1 Radium 226

Des solutions acides de sels de ^{226}Ra peuvent être utilisées pour générer le ^{222}Rn par barbotage. En général, ces solutions sont traçables à des étalons primaires de rayonnement. Cependant malgré cela la traçabilité du radon produit est rarement établie, sauf dans le cas très spécial des sources [28] produites par imprégnation et fixation chimique, qu'il convient d'utiliser dans des conditions climatiques strictement contrôlées (humidité relative très élevée, température élevée constante, etc.).

Annex E (normative)

Calibration and traceability of measurement methods and instruments used in a STAR

E.1 Standards

E.1.1 Absolute reference standard

As already mentioned in C.1.1, no absolute reference standard of radon or of RnDP is easily available at present. It is therefore impossible to carry out absolute tracking of a STAR atmosphere, and use must be made either of a primary or of a secondary standard of known characteristics, or of a measurement known as a *direct reference measurement*.

An example of this concept is the National Institute of Standards and Technology (NIST [27]) radon reference installation.

As far as possible, preference is given to the second alternative because of the current problems of stability and reproducibility encountered with sources. Nevertheless, we describe the various known secondary standards in the remainder of this clause, while making it clear that they must be used with great care.

E.1.2 Primary standard

Generally speaking, a primary standard is a standard which represents the best achievable evaluation of the quantity to be measured. Such standards exist in each reference laboratory. Their quality is checked mainly by means of intercomparison exercises. A primary standard is never used directly for measurement purposes.

E.1.3 Secondary standard (also called transfer standard)

The secondary standard is a high quality standard, traceable to the local primary standard. It is normally the standard used for calibration or generation of the reference atmosphere of a STAR. It may be constituted either by a radioactive source or by a well-calibrated measuring instrument.

The secondary standard used in a STAR shall be known with an uncertainty of less than 5 % (2σ confidence level). This uncertainty applies to the radioactive source used for the generation of the STAR atmosphere. The calibration of a measuring instrument used as secondary standard will present a statistical uncertainty linked to the level of volume activity to be measured.

In any case, an instrument used as a secondary standard shall give measurements with a lower uncertainty than the uncertainty of the measurement given by the instrument under test.

E.1.3.1 Radium 226

Acid solutions of ^{226}Ra salts may be used to generate ^{222}Rn by bubbling. Generally speaking, these solutions are traceable with primary radiation standards. The traceability of the radon produced is, on the other hand, rarely established, except in the very special case of sources [28], produced by impregnation and chemical fixation, which should be carried out under strictly controlled meteorological conditions (very high relative humidity, a constant high temperature, etc).

En ce qui concerne les sources solides réalisées par dépôt de ^{226}Ra , combiné à un dépôt surfacique limitant ou bloquant le départ du radon, un raccordement aux étalons primaires est réalisable avec cependant une limitation importante de la durée de ce raccordement, lié à la mauvaise stabilité intrinsèque du système de blocage de l'émanation du radon.

E.1.3.2 Thorium 228

Des solutions acides de ^{228}Th ou des sels de ^{232}Th peuvent être utilisées pour générer le ^{220}Rn par barbotage. En général, ces solutions sont traçables à des étalons primaires de rayonnement. Cependant, malgré cela, la traçabilité du radon produit est rarement établie.

E.1.3.3 Radon 222

Comme indiqué auparavant, une étude est en cours pour produire une atmosphère de radon traçable à des étalons primaires.

La traçabilité sera assurée en établissant un équilibre thermodynamique entre le radon solide collecté sur un piège froid et sa vapeur, et en mesurant en géométrie de détection définie les particules α du ^{222}Rn .

Des ampoules de gaz Radon raccordables aux étalons du NPL¹⁾ ou du NIST²⁾ peuvent être aussi utilisées.

E.1.4 Etalonnage des mesures des isotopes du radon

Le présent paragraphe décrit les appareils et les méthodes qui peuvent être considérés comme des étalons.

E.1.4.1 Mesures alpha

Il existe deux instruments qui peuvent être considérés comme des instruments de référence:

- les chambres d'ionisation; et
- les chambres à scintillation.

Dans ces deux types d'instruments, l'atmosphère qui entre dans la chambre de mesure doit être filtrée pour enlever tous les descendants du radon présents à l'entrée.

Le signal de sortie de la chambre d'ionisation peut être exploité en traitant soit les impulsions soit le courant d'ionisation; la première méthode peut être considérée comme une méthode de mesure directe (chambres multifils).

E.1.4.2 Mesures gamma

Une méthode de mesure qui est basée sur l'analyse spectroscopique gamma de la raie γ de 609 keV du ^{214}Bi placé en équilibre avec son radon parent a été décrite récemment [29], [30], [31]. Elle mérite d'être considérée, bien qu'elle soit indirecte en tant que méthode de référence. Elle a en outre l'inconvénient d'être statique.

1) NPL: National Physical Laboratory (Grande-Bretagne).

2) NIST: National Institute of Standards and Technology (Etats-Unis d'Amérique).

As regards solid sources produced by the deposition of ^{226}Ra , combined with a surface deposit limiting or blocking the exit of the radon, a connection with the primary standards can be established, but with a considerable limitation placed on the duration of such a connection because of the poor inherent stability of the system blocking the radon emanation.

E.1.3.2 Thorium 228

Acid solutions of ^{228}Th or ^{232}Th salts may be used to generate ^{220}Rn by bubbling. These solutions are in general traceable to primary radiation standards. On the other hand, the traceability of the radon produced is rarely established.

E.1.3.3 Radon 222

As indicated previously, a study is currently in progress to produce a radon atmosphere traceable with primary standards.

The traceability will be ensured by establishing thermodynamic equilibrium between solid radon collected in a cold trap and its vapour, and by measuring the ^{222}Rn α particles with a defined geometrical detection efficiency.

Radon gas ampoules traceable to NPL¹⁾ or NIST²⁾ standards may also be used.

E.1.4 Standardization of measurements of radon isotopes

In this section, we describe the apparatus and methods of measurement that can be considered as standards.

E.1.4.1 Alpha measurements

There are two instruments which can be considered as reference instruments:

- ionization chambers; and
- scintillation chambers.

In both types of instrument, the atmosphere entering the measuring chamber must be filtered in order to remove all the radon decay product present at its input.

The output signal of the ionization chamber can be exploited by processing either the pulses or the ionization current, the first case allowing a direct measurement method (multiwire chambers).

E.1.4.2 Gamma measurements

A method of measurement based on the gamma-spectroscopic analysis of the 609 keV γ line from ^{214}Bi placed in equilibrium with its parent radon has recently been described [29], [30], [31]. It is worthy of consideration, even though it is indirect as a reference method. It has, however, the disadvantage of being static.

1) NPL: National Physical Laboratory (UK).

2) NIST: National Institute of Standards and Technology (USA).

E.1.5 Etalonnage des mesures des descendants du radon

E.1.5.1 Mesures alpha

Les méthodes basées sur la résolution des équations de décroissance radioactive et optimisées par Thomas, Markov, Nazarov et Hartley peuvent être utilisées en tant que méthodes de référence d'usage pratique.

E.1.5.2 Mesures gamma ou coïncidence alpha/gamma

Il est possible de considérer la mesure spectroscopique γ des descendants du radon émetteurs de γ tels que ^{214}Pb , ^{214}Bi , etc. comme méthode de référence pour les radionucléides en question. Les méthodes de coïncidence gamma/alpha, bien que relativement complexes, peuvent, elles aussi, être utilisées comme méthodes de référence.

E.2 Exercices d'intercomparaison

Un STAR doit être intégré dans un circuit d'intercomparaisons pour vérifier l'absence de toute dérive dans la qualité de son atmosphère de référence.

Ces circuits [32], [33], [34], [35] existent dans certains pays, en Europe, en Amérique du Nord, en Asie, et dans la zone Pacifique. Organisés autour d'un STAR local de référence, ils permettent de faire des comparaisons entre des STAR ou directement entre des méthodes de mesure.

E.3 Incertitudes associées dans les mesures de référence réalisées dans un STAR

Tout STAR fournit des résultats d'essais qui incluent les incertitudes associées, provenant des sources suivantes:

- incertitude statistique liée au phénomène de désintégration nucléaire (valeur des transferts linéiques d'énergie (TLE), rendement de comptage, etc.);
- inhomogénéités de l'atmosphère;
- pertes d'aérosols;
- autoabsorption dans les filtres de prélèvement;
- rendement géométrique de détection (mesure en géométrie définie);
- débit de prélèvement ou volume prélevé;
- précision des séquences temporelles.

Il convient que les résultats de mesure soient, en règle générale, exprimés avec un intervalle de confiance de 2σ .

Il convient que les calculs d'incertitudes fassent apparaître les valeurs des seuils de décision [36] et limites de détection de la méthode de référence du STAR dans la configuration usuelle d'utilisation de l'appareil en essai.

E.1.5 Standardization of measurements of radon decay product

E.1.5.1 Alpha measurements

The methods based on the equations of radioactive decay and optimized by Thomas, Markov, Nazaroff, and Hartley can be used as reference methods in practice.

E.1.5.2 Gamma or gamma/alpha coincidence measurements

It is possible to consider the γ spectroscopic measurement of the γ -emitting decay product such as ^{214}Pb , ^{214}Bi , etc. as a reference method for the radionuclides in question. Gamma/alpha coincidence methods, although relatively complex, can also be used as reference methods.

E.2 Intercomparison exercises

A STAR shall be incorporated in an intercomparison circuit, in order to verify that it does not suffer from any uncontrolled drift in the quality of its reference atmosphere.

Such circuits [32], [33], [34], [35] exist in some countries: Europe, North America, Asia or the Pacific zone. Organized around a local reference STAR, they allow comparisons to be made between STAR or directly between measurement methods.

E.3 Associated uncertainties in the reference measurements carried out in a STAR

Any STAR inevitably gives test results which include associated uncertainties, arising from the following sources:

- statistical uncertainties connected with the phenomenon of nuclear decay (value of linear energy transfer (LET), counting efficiency);
- non-uniformity of the atmosphere;
- loss of aerosols;
- self-absorption in the sampling filters;
- geometric efficiency of detection (measurement in a defined geometry);
- flow rate or sampled volume;
- timing accuracy.

Measurement results should normally be expressed at 2σ confidence level.

Calculations of the uncertainties should reveal the lower limit of detection values [36] and the minimum detectable activity of the STAR reference method in the operating conditions used for the equipment under test.

Annexe F (informative)

Exemples de STAR

F.1 STAR existants

Les STAR existants diffèrent beaucoup selon leur application. Un STAR peut être grand, comme SETARAD (station d'étalonnage radon) et NRPB (National Radiological Protection Board) petit ou même très petit comme une simple fiole de Lucas associée à une source de radon. Il peut être sophistiqué comme les chambres à radon de l'Ente Nazionale per l'Energia e l'Ambiente (ENEA, Italie) ou du Statens strålskyddinstitut (SSI, Suède) qui offrent la possibilité de contrôler chaque paramètre dans la chambre, simple comme une boîte à gants, ou très bon marché comme une glacière portable associée à une source constituée de minerai d'uranium. Une liste non exhaustive des STAR existant dans le monde est présentée dans l'annexe G.

Deux modèles de STAR grands et très élaborés sont présentés ci-après en détail, à titre d'exemple.

F.2 Description de la station d'étalonnage radon (SETARAD)

La SETARAD a été conçue comme un outil de travail par et pour la société ALGADE installée à Bessines (Division minière du Limousin, France). L'intérêt principal de cette station est de permettre le suivi complet du grand nombre de paramètres nécessaires à la compréhension du fonctionnement d'un appareil de mesure du radon ou de ses descendants en mine.

Lors de la conception, l'accent a donc été mis sur l'automatisation la plus complète possible des mesures ainsi que du traitement de celles-ci.

Le second point important concerne la mobilité de cette station: en effet, toute la partie mesure étant implantée dans une caravane, la mise en place complète ou le démontage de la station ne nécessite qu'une journée de travail.

Les deux premières intercomparaisons des méthodes et appareils de mesure du radon et de ses descendants en mines souterraines réalisées en 1985 et 1989 ont utilisé SETARAD dans deux versions de plus en plus évoluées.

F.2.1 Implantation mécanique et aérodynamique

La figure F.1 représente l'ensemble complet de la station en ce qui concerne les parties aérodynamiques et leur environnement mécanique.

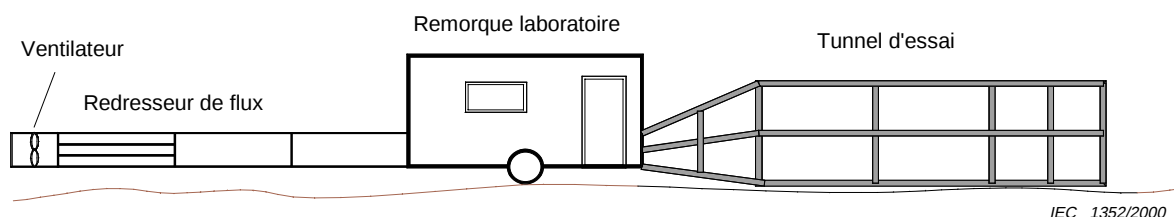


Figure F.1 – Implantation mécanique et aérodynamique

Annex F (informative)

Examples of STARs

F.1 Existing STARs

Existing STARs, depending upon their application, may be of very different constructions. A STAR may be large, like the Station d'ETalonnage RADon (SETARAD) and the STAR of National Radiological Protection Board (NRPB, UK), small or very small like a simple Lucas cell connected to a radon source. It may be sophisticated like the Ente Nazionale per l'Energia e l'Ambiente (ENEA, Italy) or Statens strålskyddsinstitut (SSI, Sweden) radon chambers, with the possibility of controlling each parameter inside the enclosure, simple like glove boxes, or very cheap using a camping ice box connected to an uranium ore source. A list of some existing radon facilities in the world is given in annex G.

Two types of large and complex STARs are presented in detail.

F.2 Description of the radon calibration station (SETARAD)

SETARAD was designed as a working tool by and for ALGADE established in Bessines (Limoges mining district, France). The main advantage of the station is its ability to provide a complete monitoring of the large number of parameters required to understand the operation of an instrument for measuring radon or its decay products in mines.

During design, emphasis was therefore placed on making the measurements and their processing as completely automated as possible.

The second important feature concerns the mobility of the station: since the whole measurement section is installed in a trailer, the entire setting up or dismantling of the station requires only one day's work.

The first two intercomparisons of the methods and instruments for measuring the concentrations of radon and its decay products in underground mines took place in 1985 and 1989, and used two increasingly developed versions of SETARAD.

F.2.1 Mechanical and aerodynamic set-up

Figure F.1 shows the complete arrangement of the aerodynamic parts of the station and their mechanical setting.

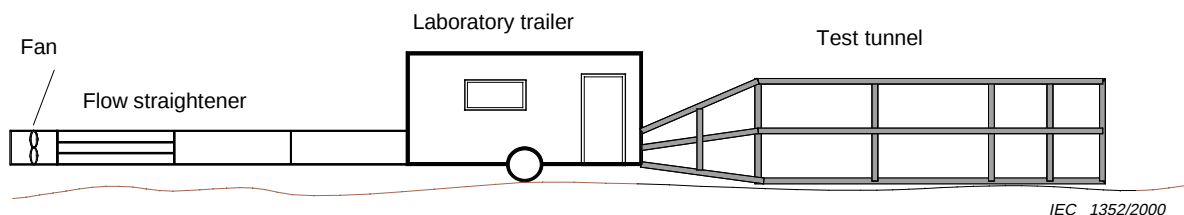


Figure F.1 – Mechanical and aerodynamic set-up

Le circuit aérodynamique est composé comme suit:

- un ventilateur de 1,5 kW et d'un diamètre de 600 mm prend l'air dans la galerie de la mine et l'envoie dans un conduit (diamètre 600 mm, longueur 6 m) comportant, à son entrée, un redresseur de flux. Cette longueur de canalisation est nécessaire pour stabiliser le régime d'écoulement;
- cette canalisation est reliée à la veine d'essai de 3,50 m de longueur utile installée dans la caravane laboratoire. C'est dans cette partie du circuit aérodynamique que sont mesurés tous les paramètres;
- la sortie de la veine d'essai est raccordée soudainement à un tunnel d'essai de 12 m de longueur utile par un divergent. L'ensemble constitué du tunnel d'essai et du divergent est composé:
 - d'un plancher modulaire,
 - d'une structure gonflable modulaire soutenant une toile métallisée.

C'est dans ce tunnel que les laboratoires participants installent leurs appareils de mesure. La manipulation des appareils de prélèvement s'effectue de l'extérieur du tunnel par des passages de gants, afin d'y perturber le moins possible l'écoulement.

F.2.2 Présentation des mesures réalisées dans la SETARAD

Les paramètres mesurés sont répartis en trois catégories:

- paramètres climatologiques;
- paramètres d'aérosols;
- paramètres concernant la radioactivité de l'atmosphère étudiée.

F.2.2.1 Paramètres climatologiques

Quatre paramètres sont mesurés en permanence par SETARAD:

- la température de l'air;
- l'humidité relative;
- la pression atmosphérique;
- la vitesse de l'air dans la veine d'essai.

En outre, un profil de vitesse dans la veine d'essai peut être tracé selon deux diamètres perpendiculaires et à des distances de 0,5 m tout le long de la veine d'essai.

F.2.2.2 Paramètres de l'aérosol

Le nombre de noyaux de condensation est mesuré en continu. La distribution des dimensions des particules dans l'aérosol est mesurée régulièrement en utilisant différentes méthodes.

F.2.2.3 Paramètres de la radioactivité

Les paramètres mesurés en continu sont:

- le débit de dose du rayonnement gamma ambiant;
- l'activité volumique du ^{222}Rn et, si nécessaire, du ^{220}Rn ;
- l'énergie alpha potentielle des RnDP_{222} , et, si nécessaire, des RnDP_{220} ;
- les activités volumiques des ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po et, si nécessaire, des ^{212}Po et ^{212}Bi .

The aerodynamic circuit consists of the following:

- a 600 mm diameter 1,5 kW fan that takes the air in the gallery of the mine and sends it into a channel 600 mm in diameter and 6 m in length incorporating a flow settling chamber at its input end. This length of channel is needed for stabilizing the flow pattern;
- the channel is connected to the test section of a working length of 3,5 m installed in the laboratory trailer. All the parameters are measured in this part of the aerodynamic circuit;
- the output from the test section is connected flexibly to a test tunnel of a working length of 12 m through a dispersing section. The system of test tunnel plus dispersing section consists of:
 - a modular floor,
 - an inflatable modular structure supporting a metallized fabric.

The participating laboratories set up their measuring equipment in this tunnel. The sampling equipment is manually operated from outside the tunnel using glove apertures so as to disturb the flow as little as possible.

F.2.2 Presentation of measurements made in SETARAD

The measured parameters may be divided into three categories:

- climatological parameters;
- aerosol parameters;
- parameters concerning the radioactivity of the atmosphere under investigation.

F.2.2.1 Climatological parameters

Four parameters are permanently measured by SETARAD:

- air temperature;
- relative humidity;
- atmospheric pressure;
- air speed in the test section.

In addition, a velocity profile in the test section may be plotted along two perpendicular diameters and at every 0,5 m along the length of the test section.

F.2.2.2 Aerosol parameters

The number of condensation nuclei is measured continuously. The particle size distribution in the aerosol is measured regularly using various methods.

F.2.2.3 Radioactivity parameters

The parameters measured continuously are:

- the ambient gamma dose rate;
- the volume activity of the ^{222}Rn and, if needed ^{220}Rn ;
- the potential alpha energy of the RnDP_{222} , and, if needed of RnDP_{220} ;
- the volume activities of ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po and, if needed of ^{212}Po and ^{212}Bi .

F.2.3 Description des méthodes de mesure utilisées

F.2.3.1 Paramètres climatiques

Les paramètres climatiques sont mesurés par des instruments classiques.

F.2.3.2 Vitesse de l'air et profil de vitesse

La vitesse de l'air est mesurée à l'aide d'une sonde anémométrique à fil chaud qui se déplace sur deux diamètres perpendiculaires dans la veine d'essai.

F.2.3.3 Noyaux de condensation

Un compteur optique de noyaux de condensation est utilisé.

F.2.3.4 Distribution en taille et en activité de l'aérosol fin

Trois méthodes de mesure sont utilisées:

- un compteur de noyaux de condensation couplé à une batterie de diffusion à plusieurs étages;
- un impacteur inertiel et diffusionnel;
- un impacteur automatique à microbalance à quartz;
- un analyseur de mobilité électrique différentielle (DMA).

La gamme effective de mesures se situe entre $\approx 10^{-3} \mu\text{m}$ et $10 \mu\text{m}$.

F.2.3.5 Débit de dose du rayonnement gamma ambiant

Il est mesuré en utilisant une chambre d'ionisation, d'un volume utile de 12 l, placée sur le plancher du laboratoire mobile (à environ 60 cm au dessus du sol) suivie d'un amplificateur de courant et d'un dispositif électronique à affichage direct en $\mu\text{Gy/h}$.

F.2.3.6 Mesure de l'activité volumique du radon

Cette mesure est réalisée en utilisant une chambre d'ionisation à circulation d'un volume utile de 12 l, suivie de ses circuits électroniques. Une correction de l'effet du rayonnement gamma ambiant est faite automatiquement.

Pour éviter toute contamination, la chambre est purgée toutes les 15 min avec de l'azote.

La mesure du ^{222}Rn est donc une mesure pseudo continue, le radon n'étant échantillonné que toutes les 15 min.

Une deuxième chambre d'ionisation associée à un volume de désintégration peut être utilisée pour la mesures du ^{220}Rn .

F.2.3.7 Mesure de l'activité des descendants du radon à vie courte

F.2.3.7.1 Mesure en continu de l'activité des ^{218}Po et ^{214}Po

L'activité des ^{218}Po et ^{214}Po est mesurée en continu par spectrométrie alpha.

La sonde de mesure décrite ci-dessous est composée:

- d'un ensemble de pompage capable de fournir un débit de $2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ sous une pression absolue de 20 mbar;

F.2.3 Description of the methods of measurement used

F.2.3.1 Climatic parameters

Climatic parameters are measured using standard instruments.

F.2.3.2 Air speed and velocity profile

The air speed is measured with a hot-wire anemometer probe which can move along two perpendicular diameters in the test section.

F.2.3.3 Condensation nuclei

An optical condensation nuclei counter is used.

F.2.3.4 Distribution of sizes and activities in the fine aerosol

Three methods of measurement are used:

- a condensation nuclei counter coupled with a multi-stage diffusion battery;
- an inertia and diffusion impactor;
- an automatic quartz microbalance impactor;
- the differential mobility analyzer (DMA).

The actual range of measurement extends from $\approx 10^{-3} \mu\text{m}$ to $10 \mu\text{m}$.

F.2.3.5 Ambient gamma dose rate

This is measured using an ionization chamber, with a working volume of 12 l, placed on the floor of the trailer (at about 60 cm from the ground) followed by a current amplifier and an electronic instrument providing a direct reading in $\mu\text{Gy/h}$.

F.2.3.6 Measurement of the radon volume activity

This is measured using an ionization chamber with circulation and a working volume of 12 l, followed by its electronic circuits. A correction for the effect of the ambient gamma field is made automatically.

In order to avoid any contamination, a regular purge with nitrogen is carried out every 15 min.

The measurement of ^{222}Rn is thus a pseudo-continuous measurement, the radon being sampled only once every 15 min.

A second ionization chamber coupled with a decay volume may be implemented for ^{220}Rn measurements.

F.2.3.7 Measurement of the activity of the short-lived decay products of radon

F.2.3.7.1 Continuous measurement of the activity of ^{218}Po and ^{214}Po

The activity of ^{218}Po and ^{214}Po is measured continuously by alpha spectrometry.

The measuring sensor is described below and consists of:

- one pump unit capable of providing a flow rate of $2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ at an absolute pressure of 20 mbar;

- d'une sonde de prélèvement isocinétique;
- d'une chambre de mesure dans laquelle le détecteur (jonction Si implantée avec 1 700 mm² de surface utile) est positionnée en face du filtre de prélèvement.

Cette chambre de mesure est mise sous vide partiel (400 mbar de pression absolue) à l'aide d'un col sonique assurant ainsi, malgré une distance importante entre le détecteur et le filtre, une faible dégradation du spectre alpha des descendants du radon collectés sur le filtre.

La grande distance entre détecteur et filtre permet d'éviter les problèmes d'écoulement dans le capteur. La pression dans la chambre de mesure est mesurée en continu, permettant ainsi de corriger la position des pics du spectre au cours du colmatage du filtre.

Une mesure de pression en amont du col permet un calcul précis du débit de prélèvement.

F.2.3.7.2 Mesure en continu des activités volumiques des ²¹⁴Pb et ²¹⁴Bi

Le ²¹⁴Pb et le ²¹⁴Bi sont mesurés sur le filtre de prélèvement à l'aide d'un détecteur GeHP travaillant en liaison avec une chaîne d'analyse spectrométrique couplée au calculateur.

F.2.3.7.3 Mesure instantanée des activités volumiques des ²¹⁸Po, ²¹⁴Pb et ²¹⁴Bi

Un ensemble de comptage alpha géré par l'ordinateur permet d'effectuer une mesure selon la méthode de Thomas optimisée par B. M. Hartley. Cette mesure est utilisée comme référence.

F.2.3.8 Mesure de l'énergie alpha potentielle des descendants du radon

Les valeurs d'activité obtenues par la méthode de référence donnent une valeur instantanée de l'énergie alpha potentielle.

En outre, la mesure effectuée par spectrométrie alpha permet de faire un calcul de l'énergie alpha potentielle à l'aide des activités volumiques de ²¹⁸Po, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi and ²¹⁴Po déjà mesurées.

Un enregistrement en continu de l'activité alpha globale des descendants du radon collectée sur un filtre est réalisé à l'aide d'un instrument conçu à cet effet.

Cet enregistrement donne une estimation de l'énergie alpha potentielle des descendants du radon.

F.2.4 Gestion des instruments de mesure et traitement des données

Les matériels suivants:

- station météorologique (température, humidité relative, pression atmosphérique);
- sonde anémométrique;
- ensemble de mesure électronique pour les chambres d'ionisation avec circulation;
- ensemble de mesure électronique pour la chambre d'ionisation (rayonnements gamma);
- enregistreur de l'activité alpha des descendants du radon;
- compteur de noyaux de condensation;
- instruments de mesure des débits de prélèvement, comportant:
 - deux débitmètres de précision;
 - une sonde pour la mesure de la pression dans la chambre de prélèvement alpha;
 - une sonde pour la mesure du débit dans la buse sonique;

- one isokinetic sampling probe;
- one measuring chamber in which the detector (implanted Si junction with 1 700 mm² useful surface area) is positioned opposite the sampling filter.

The measuring chamber is placed under a partial vacuum (400 mbar absolute pressure) using a sonic nozzle, and this means that, despite the considerable distance between the detector and the filter, there is only a slight weakening in the alpha spectrum of the decay products of radon collected on the filter.

The long distance between the detector and the filter avoids flow problems in the sensor. The pressure in the measuring chamber is measured continuously, thus enabling the position of the spectral peaks to be corrected while the filter is clogging up.

A measurement of the pressure upstream from the sonic nozzle allows a precise calculation of the sampling rate to be made.

F.2.3.7.2 Continuous measurement of the volume activities of ²¹⁴Pb and ²¹⁴Bi

The ²¹⁴Pb and ²¹⁴Bi are measured on the sampling filter using a GeHP detector working in conjunction with a spectroscopic analysis circuit coupled to the computer.

F.2.3.7.3 Measurement of the instantaneous volume activities of ²¹⁸Po, ²¹⁴Pb and ²¹⁴Bi

An alpha counting circuit controlled by the computer enables a measurement to be carried out by Thomas's method optimized by B. M. Hartley. This measurement is used as a reference.

F.2.3.8 Measurement of the potential alpha energy of the decay products of radon

The values of activity obtained by the reference method give an instantaneous value of the potential alpha energy.

Moreover, the measurement made by alpha spectroscopy allows a calculation to be made of the potential alpha energy by using the volume activities of ²¹⁸Po, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi and ²¹⁴Po measured previously.

A continuous recording of the gross alpha activity of the decay products of radon deposited on a filter is made by means of a special designed instrument.

This recording gives an estimate of the potential alpha energy of the decay products of radon.

F.2.4 Management of the measuring equipment and data processing

The following items of equipment:

- weather station (temperature, relative humidity, atmospheric pressure);
- anemometer probe;
- electronic measuring unit for the ionization chambers with circulation;
- electronic measuring unit for the ionization chamber (gamma fields);
- alpha activity of RnDP recorder;
- condensation nuclei counter;
- sampling flow metering instruments comprising:
 - two precision flow meters;
 - a pressure-measuring sensor in the alpha sampling chamber;
 - a flow-rate measuring sensor in the sonic nozzle;

- analyseur multicanal;
- systèmes de comptage qui permettent d'effectuer des mesures granulométriques et des mesures de l'énergie alpha potentielle;

sont reliés à un ordinateur PC équipé de logiciels et de cartes pour l'acquisition des données.

F.3 Description du STAR du NRPB.

Le NRPB a un programme de recherche sur le radon et ses descendants depuis les années 1970.

Le NRPB assure le fonctionnement d'une chambre à radon [37] du type «walk in», d'un volume interne de 43 m³, comportant des étalons raccordés aux étalons du National Physical Laboratory (NPL) (Grande-Bretagne). Cette installation est le laboratoire de référence régional en Europe pour les mesures de radon, à l'intérieur d'une structure d'intercalibration et d'intercomparaison proposée à l'origine par l'OCDE/AEN puis par l'AIEA [38], et le NRPB a organisé des exercices d'intercomparaison pour la CCE pendant plus de 10 ans [39]. Dans le cadre de ce programme, quatre laboratoires régionaux (deux en Amérique du Nord, un en Europe et un en Australie) ont comparé des étalons de mesure entre eux et ont publié les résultats de ces intercomparaisons.

Le plan de la chambre est présenté sur la figure F.2. Elle est construite en deux parois d'acier galvanisé séparées par une couche de 50 mm d'air. Afin de limiter son coût, elle a été construite à l'aide d'éléments standard utilisés pour la construction des chambres froides. La chambre a un volume d'environ 43 m³ et possède un sas d'entrée à double porte permettant l'entrée du personnel sans perturber trop l'atmosphère.

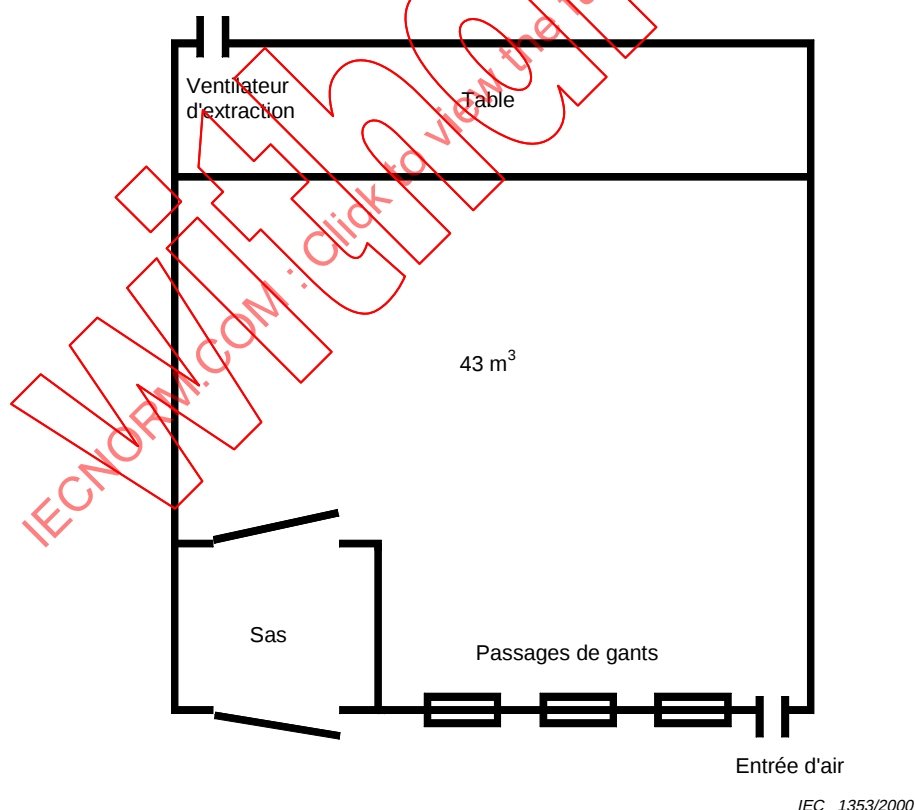


Figure F.2 – La chambre à radon du NRPB

La chambre est équipée de hublots, de tables, d'étagères, d'éclairage et d'une alimentation électrique. Sa construction en matériau conducteur et pourvue d'une bonne mise à la terre évite les effets de charge sur les parois. L'alimentation électrique se fait à travers un disjoncteur différentiel. Six passages de gants de 15 cm de diamètre sont prévus pour effectuer les échantillonnages de l'atmosphère ou des réglages d'appareils de l'extérieur.