

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61468

Première édition
First edition
2000-03

**Centrales nucléaires de puissance –
Instrumentation en-cœur –
Caractéristiques et méthodes
d'essais des collecteurs**

**Nuclear power plants –
In-core instrumentation –
Characteristics and test methods
of self-powered neutron detectors**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 61468:2000

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**

61468

Première édition
First edition
2000-03

**Centrales nucléaires de puissance –
Instrumentation en-cœur –
Caractéristiques et méthodes
d'essais des collecteurs**

**Nuclear power plants –
In-core instrumentation –
Characteristics and test methods
of self-powered neutron detectors**

© 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
PRICE CODE

U

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	6
Articles	
1 Domaine d'application et objet.....	8
2 Références normatives.....	8
3 Définitions et abréviations	10
3.1 Définitions.....	10
3.2 Abréviations	14
4 Collectrons – caractéristiques générales.....	16
5 Structure mécanique et caractéristiques	18
6 Caractéristiques électriques et nucléaires.....	22
7 Recommandations pour les applications	24
7.1 Carte de flux neutronique, surveillance et contrôle du cœur	24
7.2 Régulation	26
7.3 Protection du cœur	26
7.4 Classification	26
8 Recommandations pour la conception	26
8.1 Bruit de fond	26
8.2 Temps de réponse	26
8.3 Durée de vie	28
8.4 Construction mécanique et câblage	28
9 Méthodes d'essai	28
9.1 Essais sur un prototype	28
9.2 Essais de fin de fabrication	30
10 Etalonnage d'un détecteur	30
10.1 Etalonnage absolu	30
10.2 Etalonnage par comparaison	32
10.3 Calibration en-cœur	32
10.4 Procédure de calibration	32
10.5 Recommandations pour la périodicité de la calibration.....	34
Annexe A (informative) Principes du collectron	36
A.1 Mécanismes qui conditionnent la réponse d'un collectron.....	36
A.1.1 Désintégration bêta (réponse retardée)	36
A.1.2 Capture neutronique (réponse prompte)	36
A.1.3 Effet photoélectrique (réponse prompte).....	36
A.1.4 Effet Compton (réponse prompte)	38

CONTENTS

	Page
FOREWORD	7
Clause	
1 Scope and object	9
2 Normative references	9
3 Definitions and abbreviations.....	11
3.1 Definitions.....	11
3.2 Abbreviations	15
4 Self-powered neutron detectors – General characteristics.....	17
5 Mechanical structure and characteristics	19
6 Nuclear and electrical characteristics.....	23
7 Application recommendations.....	25
7.1 Fluence rate mapping – core monitoring and surveillance.....	25
7.2 Feedback control	27
7.3 Core protection	27
7.4 Classification	27
8 Design recommendations.....	27
8.1 Background noise.....	27
8.2 Time response.....	27
8.3 Lifetime.....	29
8.4 Mechanical design and electrical connection	29
9 Test methods.....	29
9.1 Prototype testing.....	29
9.2 Production tests	31
10 Detector calibration.....	31
10.1 Absolute calibration.....	31
10.2 Comparison calibration.....	33
10.3 In-core calibration	33
10.4 Calibration procedure.....	33
10.5 Recommended calibration periods.....	35
Annex A (informative) Self-powered detector principles.....	37
A.1 SPND response mechanisms.....	37
A.1.1 Beta decay (delayed response).....	37
A.1.2 Neutron capture (prompt response)	37
A.1.3 Photoelectric effect (prompt response)	37
A.1.4 Compton effect (prompt response)	39

A.2	Nature de la réponse d'un collectron	38
A.2.1	Interactions aux neutrons thermiques	38
A.2.2	Interactions gamma.....	38
A.3	Fluence de combustion d'un détecteur	38
A.4	Caractéristiques fonctionnelles des collectrons	40
A.4.1	Caractéristiques des émetteurs vanadium	40
A.4.2	Caractéristiques des émetteurs cobalt.....	40
A.4.3	Caractéristiques des émetteurs rhodium.....	40
A.4.4	Caractéristiques des émetteurs argent	42
A.4.5	Caractéristiques des émetteurs platine.....	42
A.4.6	Caractéristiques des émetteurs hafnium.....	42
A.5	Assemblages de collectrons	46
A.5.1	Assemblages de collectrons pour réacteurs à eau légère.....	46
A.5.2	Assemblages typiques de collectrons pour réacteurs à eau lourde	48

IEC NORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 61468:2000

A.2 Nature of SPND response	39
A.2.1 Thermal neutron interactions	39
A.2.2 Gamma interactions	39
A.3 Detector burn-up life.....	39
A.4 Self-powered detector operating characteristics.....	41
A.4.1 Vanadium emitter characteristics.....	41
A.4.2 Cobalt emitter characteristics	41
A.4.3 Rhodium emitter characteristics.....	41
A.4.4 Silver emitter characteristics.....	43
A.4.5 Platinum emitter characteristics.....	43
A.4.6 Hafnia emitter characteristics	43
A.5 Self-powered detector assemblies	47
A.5.1 Light water reactor self-powered detector assemblies.....	47
A.5.2 Typical heavy water reactor self-powered detector assembly.....	49

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

CENTRALES NUCLÉAIRES DE PUISSANCE – INSTRUMENTATION EN-COEUR – CARACTÉRISTIQUES ET MÉTHODES D'ESSAIS DES COLLECTEURS

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 61468 a été établie par le sous-comité 45A: Instrumentation des réacteurs, du comité d'études 45 de la CEI: Instrumentation nucléaire.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
45A/369/FDIS	45A/379/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.

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

L'annexe A est donnée 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.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**NUCLEAR POWER PLANTS –
IN-CORE INSTRUMENTATION –
CHARACTERISTICS AND TEST METHODS
OF SELF-POWERED NEUTRON DETECTORS**

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 61468 has been prepared by subcommittee 45A: Reactor instrumentation, of IEC technical committee 45: Nuclear instrumentation.

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

FDIS	Report on voting
45A/369/FDIS	45A/379/RVD

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

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

Annex A is 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.

CENTRALES NUCLÉAIRES DE PUISSANCE – INSTRUMENTATION EN-COEUR – CARACTÉRISTIQUES ET MÉTHODES D'ESSAIS DES COLLECTRONS

1 Domaine d'application et objet

La présente Norme internationale est applicable aux détecteurs en-cœur et à l'instrumentation associée, conçus pour des fonctions importantes pour la sûreté: la protection, le contrôle et l'information. Elle se limite aux caractéristiques et méthodes d'essais pour les collectrons. Les collectrons peuvent être utilisés pour mesurer un débit de fluence neutronique (flux) et la distribution spatiale de puissance des réacteurs nucléaires. Cette norme précise les exigences et les recommandations, et donne des conseils pour sélectionner un type de collectrons et les caractéristiques des collectrons pour différentes applications possibles.

Concernant les principes de conception générale d'une installation et du système de contrôle commande pour la mesure du débit de fluence neutronique, il convient de se référer aux principes généraux des systèmes d'instrumentation nucléaire conformément aux codes et guides de sûreté de l'AIEA, ainsi qu'à la CEI 61513.

2 Références normatives

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions variables pour la présente Norme internationale. 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 présente Norme internationale 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(394):1995, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 394: Instrumentation nucléaire: Instruments*

CEI 60515:1975, *Détecteurs de rayonnement pour l'instrumentation et la protection des réacteurs nucléaires: caractéristiques et méthodes d'essai*

CEI 60568:1977, *Appareillage de mesure du débit de fluence neutronique dans le cœur des réacteurs de puissance*

CEI 61226:1993, *Centrales nucléaires – Systèmes d'instrumentation et de contrôle-commande importants pour la sûreté – Classification*

CEI 61513, *Centrales nucléaires de puissance – Contrôle-commande des systèmes importants pour la sûreté – Prescriptions générales pour les systèmes* ¹⁾

¹⁾ A publier.

NUCLEAR POWER PLANTS – IN-CORE INSTRUMENTATION – CHARACTERISTICS AND TEST METHODS OF SELF-POWERED NEUTRON DETECTORS

1 Scope and object

This International Standard applies to in-core neutron detectors and instrumentation which are designed for purposes important to safety: protection, control and information. It is restricted to characteristics and test methods for self-powered neutron detectors (SPNDs). Self-powered neutron detectors can be used for neutron fluence rate (flux) measurements and spatial power measurements in nuclear reactors. This standard gives requirements, recommendations and guidance on selection of the type and characteristics of SPNDs for different possible applications of SPNDs.

For the principles of overall plant and I&C system design and the purpose of neutron fluence rate measurements, reference should be made to general principles of nuclear reactor instrumentation according to IAEA Codes and Safety Guides and IEC 61513.

2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this International Standard. For dated references, subsequent amendments to, or revisions of, any of these publications do not apply. However, parties to agreements based on this International Standard 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(394):1995, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) Chapter 394: Nuclear Instrumentation: Instruments*

IEC 60515:1975, *Radiation detectors for the instrumentation and protection of nuclear reactors; characteristics and test methods*

IEC 60568:1977, *In-core instrumentation for neutron fluence rate (flux) measurements in power reactors*

IEC 61226:1993, *Nuclear power plants – Instrumentation and control systems important for safety – Classification*

IEC 61513, *Nuclear power plants – Instrumentation and control for systems important to safety – General requirements for systems*¹⁾

¹⁾ To be published.

3 Définitions et abréviations

3.1 Définitions

Pour les besoins de la présente norme, les définitions suivantes sont applicables.

3.1.1

compensation par câble de bruit de fond ou conducteur de compensation (du signal d'un collectron)

méthode utilisée pour corriger le signal issu d'un collectron en retranchant la contribution du bruit de fond. Cette correction est généralement obtenue en plaçant un détecteur de bruit de fond dans l'assemblage ou en utilisant un détecteur équipé d'une deuxième âme pour la compensation (voir figure 3)

3.1.2

désintégration bêta

processus de désintégration au cours duquel le nombre de masse A reste inchangé alors que le numéro atomique Z est modifié. Les processus comprennent l'émission d'un électron (désintégration β^-), la capture d'un électron, et l'émission d'un positron (désintégration β^+)

3.1.3

combustion

appauvrissement ou réduction du nombre d'atomes lorsque ceux-ci sont exposés à un débit de fluence neutronique thermique pendant une certaine durée, à cause de leur transformation en d'autres radio-isotopes

3.1.4

fluence de combustion (d'un détecteur de neutrons)

fluence estimée de neutrons d'une distribution énergétique donnée, pour laquelle la quantité de matière sensible consommée est telle que les caractéristiques du détecteur se situent hors des tolérances spécifiées pour une application déterminée [VEI 394-18-30]

3.1.5

section efficace de capture

mesure de la probabilité d'une collision ou d'un processus d'interaction, défini comme la surface effective présentée par les particules de la cible vis à vis des particules incidentes pour ce processus

3.1.6

effet Compton

collision élastique simple dans laquelle un photon d'une énergie $E_0 = h\nu_0$ entre en collision avec un électron, provoquant ainsi le recul de l'électron qui emporte une énergie $E = 1/2mv^2$. Le photon lui même est diffusé avec un angle Θ et une énergie $E' = h\nu_0 - E$

3.1.7

section efficace, σ

surface d'un noyau cible, qui, lorsqu'elle est frappée par une particule incidente, produit une réaction. Le nombre de particules soumises à l'interaction (n_r) est égal au produit du nombre des particules incidentes (n_i) par la valeur de la section efficace (σ), par le nombre total des noyaux par unité de volume de la cible (N) et par l'épaisseur de la cible (t)

$$n_r = n_i \sigma N t$$

La section efficace est exprimée en barns ($1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$)

3 Definitions and abbreviations

3.1 Definitions

For the purpose of this publication, the following definitions apply:

3.1.1

background or lead-compensation (of a self-powered detector signal)

a method employed to correct the current from a SPND for background contribution. This is usually accomplished by placing an "emitterless" background detector in the in-core assembly, or by using detectors with an internal compensating lead wire (see figure 3)

3.1.2

beta decay

radioactive decay process in which mass number A remains unchanged but the atomic number Z changes. Processes include electron emission (β^- decay), electron capture, and positron emission (β^+ decay)

3.1.3

burn-up

depletion or reduction of target atoms when exposed to a thermal neutron fluence rate over time, due to conversion to other radioisotopes

3.1.4

burn-up life (of a neutron detector)

estimated fluence of neutrons of a given energy distribution after which the sensitive material will be consumed to such an extent that the detector characteristics exceed the specified tolerances for a specified purpose [IEV 394-18-30]

3.1.5

capture cross-section

measure of the probability of a particular collision or interaction process, stated as the effective area which target particles present to incident particles for that process

3.1.6

Compton effect

ordinary elastic collision in which an incident photon of energy $E_0 = h\nu_0$ strikes a target electron causing the electron to recoil with energy $E = 1/2mv^2$. The photon itself is scattered at an angle Θ and energy $E' = h\nu_0 - E$

3.1.7

cross-section, σ

area within a target nucleus, which if struck by an incident particle will lead to a reaction taking place. The number of particles undergoing interaction (n_r) is equal to the number of incident particles (n_i) times the cross-section (σ) times the total number of target nuclei per target volume (N) times the target thickness (t).

$$n_r = n_i \sigma N t$$

The cross-section is expressed in barns ($1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$)

3.1.8

constante de décroissance radioactive (λ)
constante de désintégration radioactive,
constante de décroissance du radio-isotope
constante de proportionnalité,

constante obtenue, pour chaque isotope, en divisant le logarithme naturel de 0,5 par la période (demi-vie, en secondes), et exprimée en s^{-1} :

$$\lambda = (\ln 0,5)/t_{1/2} = 0,693/t_{1/2}$$

3.1.9

réponse retardée

retard ou décalage dans la production du signal après une exposition à un échelon de débit de fluence neutronique. Le retard moyen est $(t_{1/2}/\ln 2)$ où $t_{1/2}$ est la période du radio-isotope qui produit le signal. Le signal atteint l'équilibre en un temps de l'ordre de cinq fois $t_{1/2}$ après l'échelon.

3.1.10

réponse à l'équilibre

pour des collecteurs utilisant la désintégration bêta, la réponse du détecteur (le signal) produite lorsque le taux de réaction de capture dans l'émetteur est égal au taux de désintégration du radio-isotope contenu dans l'émetteur

3.1.11

période ou demi-vie ($t_{1/2}$)

temps nécessaire pour que la valeur du nombre d'atomes ou de l'activité d'un élément radioactif soit diminuée de moitié

3.1.12

détecteur de neutrons en-cœur

détecteur, fixe ou mobile, conçu pour la mesure du débit de fluence neutronique (flux) ou pour celle de la fluence en un point déterminé ou dans une zone du cœur ou de l'enveloppe primaire

3.1.13

collecteur intégral

assemblage qui réunit un collecteur et son câble de telle manière que le câble constitue une extension du collecteur lui-même, c'est-à-dire que l'émetteur est directement connecté à l'âme du câble. Le câble et le collecteur partagent le même isolant, et le collecteur constitue aussi l'enveloppe extérieure du câble (voir figure 1)

3.1.14

collecteur modulaire

assemblage obtenu par une liaison mécanique (soudure ou brasure) d'un détecteur (émetteur, isolant, collecteur) à un câble conducteur (âme, isolant, enveloppe extérieure) (voir figure 2)

3.1.15

effet photoélectrique

collision d'un photon dans laquelle la totalité de l'énergie du photon incident est absorbée par l'atome cible, provoquant l'émission d'un électron avec une énergie $E = h\nu - B_e$, où $h\nu$ est l'énergie du photon incident et B_e est l'énergie de liaison de l'électron émis

3.1.16

réponse prompte

production d'un signal par un collecteur dont le principe est basé sur des réactions (n,γ,e)

3.1.8**decay constant (λ)****disintegration constant****radioisotope decay constant****proportionality constant**

for each radioisotope, λ is derived by dividing the natural logarithm of 0,5 by the half-life (in seconds), and expressed in s^{-1}

$$\lambda = (\ln 0,5)/t_{1/2} = 0,693/t_{1/2}$$

3.1.9**delayed response**

time delay or lag in signal generation after exposure to a step change in neutron fluence rate. The mean lag time is $(t_{1/2}/\ln 2)$ where $t_{1/2}$ is the half-life of the radioisotope which produces the signal. The signal reaches equilibrium after a period of about five times $t_{1/2}$ following the step change

3.1.10**equilibrium response**

for beta-decay self-powered neutron detectors, the response (signal) generated once the rate of neutron capture in the emitter equals the decay rate of radioisotopes in the emitter

3.1.11**half-life ($t_{1/2}$)**

time required for the number of atoms or the activity of a radioactive element to decrease from a particular value to half that value

3.1.12**in-core neutron detector**

detector, fixed or movable, designed for the measurement of neutron fluence rate (flux) or neutron fluence at a defined point or in a region of a reactor core or primary envelope

3.1.13**integral self-powered neutron detector**

self-powered neutron detector assembly in which the lead cable section is an extension of the detector section, i.e. the emitter is directly attached to the core/signal wire; both sections share common insulation, and the collector of the detector section is also the outer sheath of the lead cable section (see figure 1)

3.1.14**modular self-powered neutron detector**

self-powered neutron detector assembly made by mechanically joining, welding or brazing a detector (emitter, insulator, collector) to a length of lead cable (core/signal wire, insulator, outer sheath) (see figure 2)

3.1.15**photoelectric effect**

photon collision in which the energy of the incident photon is absorbed by the target atom, causing an electron to be emitted with energy $E = h\nu - B_e$, where $h\nu$ is the energy of the incident photon and B_e is the binding energy of the emitted electron

3.1.16**prompt response**

signal generation from a self-powered neutron detector based on the (n, γ , e) reaction

3.1.17

radio-isotopes

isotopes radioactifs

espèces atomiques instables ayant un nombre atomique Z identique (c'est le même élément) mais un nombre de masse différent; isotope de cet élément qui est sujet à la désintégration

3.1.18

collectron

détecteur de neutrons qui ne nécessite pas de polarisation extérieure et qui est constitué de trois éléments principaux: l'émetteur qui interagit avec les neutrons pour émettre des électrons, un collecteur qui récupère ces électrons et un isolant placé entre l'émetteur et le collecteur (voir figure 1)

3.1.19

autoprotection

auto-absorption qui se produit dans l'émetteur. Lorsque le diamètre de l'émetteur augmente, la probabilité pour un électron créé à l'intérieur de l'émetteur de sortir de celui-ci décroît, et la génération d'un courant diminue en efficacité

3.1.20

sensibilité (d'un détecteur)

sensibilité d'un détecteur vis à vis du rayonnement qu'il doit mesurer, donnée par la relation:

$$S = \frac{\text{variation du signal de sortie (réponse du détecteur)}}{\text{variation de la grandeur d'entrée (rayonnement à mesurer)}}$$

Dans la plupart des applications, la réponse du détecteur est linéaire et le signal de sortie est négligeable en l'absence de rayonnement.

Ainsi:

$$\text{la sensibilité } S = \frac{\text{signal de sortie (réponse du détecteur)}}{\text{grandeur d'entrée (rayonnement à mesurer)}}$$

3.1.21

neutrons thermiques

neutrons dont l'énergie cinétique est environ de 0,025 eV à 293 K; neutrons qui sont en équilibre thermique avec leur environnement

3.1.22

vie utile (d'un détecteur)

durée de fonctionnement, dans des conditions d'irradiation et d'environnement comprises entre des limites spécifiées, à la suite de laquelle les caractéristiques du détecteur se situent hors des tolérances spécifiées [VEI 394-18-29]

NOTE La vie utile peut s'exprimer en fluence de particules incidentes, etc.

3.2 Abréviations

3.2.1

REB

réacteur à eau bouillante

3.2.2

CANDU

nom donné par les Canadiens à leur filière de réacteur utilisant l'uranium naturel comme combustible et l'eau lourde comme réfrigérant et comme modérateur. Abréviation de CANada, Deuterium, Uranium

3.1.17**radioisotopes****radioactive isotopes**

unstable atomic species which have the atomic number Z of the same element but different mass numbers A ; isotope of an element that undergoes disintegration

3.1.18**self-powered neutron detector (SPND)**

neutron-sensitive radiation detector that requires no external power supply and consists of three basic elements: an emitter that interacts with neutrons to emit electrons; a collector that collects these electrons and an insulator that isolates the emitter from the collector (see figure 1)

3.1.19**self-shielding**

self-absorption which occurs in the emitter: as emitter diameter increases, the escape probability of an electron born in the interior of the emitter decreases, and current-producing efficiency drops

3.1.20**sensitivity (of a detector)**

sensitivity of a detector to the radiation to be measured. This sensitivity is given by:

$$S = \frac{\text{variation of the output quantity (detector response)}}{\text{variation of the input quantity (radiation to be measured)}}$$

In most applications, the detector response is linear and has a negligible output signal for zero input.

Hence

$$\text{sensitivity } S = \frac{\text{output quantity (detector response)}}{\text{input quantity (radiation to be measured)}}$$

3.1.21**thermal neutrons**

neutrons with kinetic energy equal to about 0,025 eV at 293 K; neutrons that are approximately in thermal equilibrium with their surroundings

3.1.22**useful life (of a neutron detector)**

operational life, under irradiation and environmental conditions restricted within specified limits, after which the detector characteristics exceed the specified tolerances [IEV 394-18-29]

NOTE Useful life can be expressed in incident particle fluence, etc.

3.2 Abbreviations**3.2.1****BWR**

boiling water reactor

3.2.2**CANDU**

the name given to a Canadian reactor design featuring natural uranium fuel and heavy water moderator and coolant. An acronym for CANada, Deuterium, Uranium

3.2.3

HWR

réacteur à eau lourde; réacteur refroidi et modéré à l'eau lourde (D₂O)

3.2.4

REL

réacteur à eau légère; réacteur refroidi et modéré à l'eau légère. Les types de réacteurs commercialisés comprennent les réacteurs à eau pressurisée (REP) et les réacteurs à eau bouillante (REB)

3.2.5

REP

réacteur à eau pressurisée

3.2.6

RBMK

réacteur modéré au graphite et refroidi à l'eau légère

3.2.7

SIR

sigle anglais: "straight individually replaceable". Désigne les collecteurs de type intégral utilisés sur les réacteurs à eau lourde

3.2.8

SPND

sigle anglais: "self powered neutron detector": détecteur de neutron auto-alimenté (se traduit par "collectron")

4 Collectrons – caractéristiques générales

Dans les collectrons, les interactions entre les neutrons et les noyaux sont utilisées pour produire un courant proportionnel au débit de fluence neutronique. Comparativement aux autres détecteurs en-cœur, les collectrons présentent les avantages suivants:

- ils ne nécessitent pas de polarisation;
- leur structure est simple et robuste;
- leur petite taille est bien adaptée aux applications en-cœur;
- une bonne stabilité en fonction des conditions de température et de pression;
- une faible perte de sensibilité en fonction de la fluence (selon le type d'émetteur).

Néanmoins, ils présentent les inconvénients suivants:

- dynamique de mesure réduite du fait de leur faible sensibilité aux neutrons;
- ils nécessitent une compensation du bruit de fond (pour certains émetteurs);
- leur réponse est retardée (certains émetteurs).

3.2.3**HWR**

heavy water reactor – A heavy water (D_2O) cooled and moderated reactor

3.2.4**LWR**

light water reactor – A light water cooled and moderated reactor. Commercial types include the pressurized water reactor (PWR) and the boiling water reactor (BWR)

3.2.5**PWR**

pressurized water reactor

3.2.6**RBMK**

a graphite moderated light water cooled reactor

3.2.7**SIR**

an acronym for "straight individually replaceable". An integral type self-powered detector used in HWRs

3.2.8**SPND**

self-powered neutron detector

4 Self-powered neutron detectors – General characteristics

In self-powered neutron detectors (SPNDs), the interactions of neutrons and atomic nuclei are used to produce a current which is proportional to the neutron fluence rate (flux). When compared to other types of in-core detectors, they have the following advantages:

- no need of power supply;
- simple and robust structure;
- relatively small mechanical "size" well-suited for in-core installation;
- good stability under temperature and pressure conditions;
- low burn-up (dependent on emitter material).

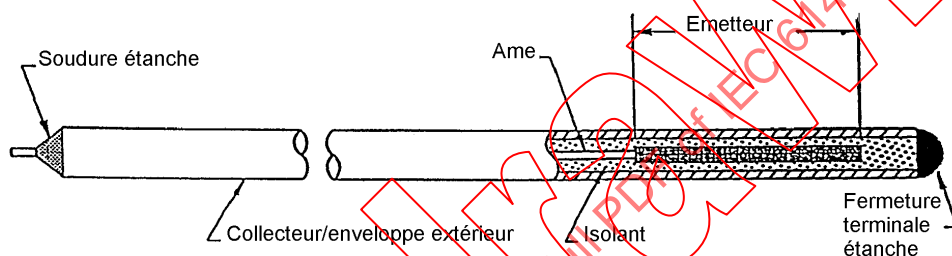
At the same time, they have the following disadvantages:

- limited operating range due to relatively low neutron sensitivity;
- compensation for background noise required (for some emitters);
- delayed signal response (for some emitters).

5 Structure mécanique et caractéristiques

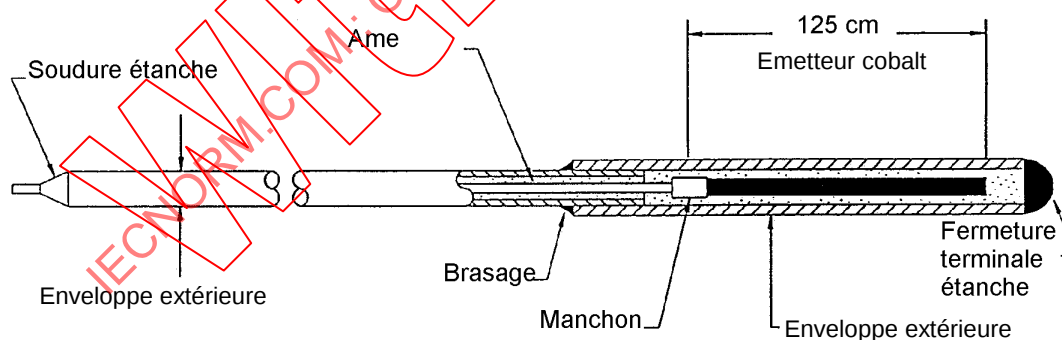
Un collectron (voir figure 1) se présente typiquement sous la forme d'un câble coaxial comprenant une électrode interne (l'émetteur), entourée d'un isolant et d'une électrode externe (le collecteur).

Il est préférable que le câble de liaison et le détecteur forment une structure intégrale, c'est-à-dire que l'âme du câble soit reliée directement à l'émetteur; que l'isolant du détecteur et du câble soient identiques et que le collecteur du détecteur soit aussi l'enveloppe extérieure du câble. Les détecteurs conçus de cette manière s'appellent des collectrons intégraux. Il est aussi possible d'avoir des assemblages avec un détecteur rapporté sur le câble de liaison: ce sont alors des collectrons modulaires comme cela est montré sur la figure 2.



IEC 244/2000

Figure 1 – Structure typique d'un collectron intégral



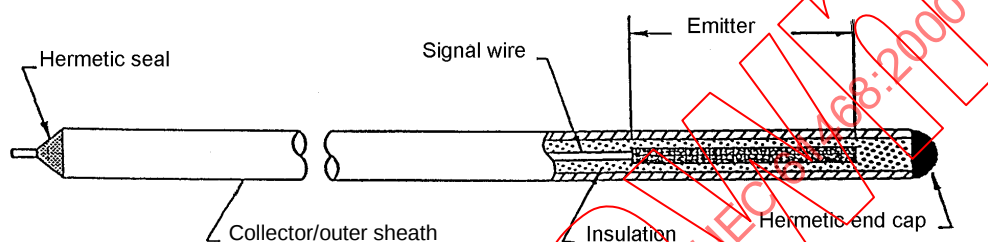
IEC 245/2000

Figure 2 – Structure typique d'un collectron modulaire

5 Mechanical structure and characteristics

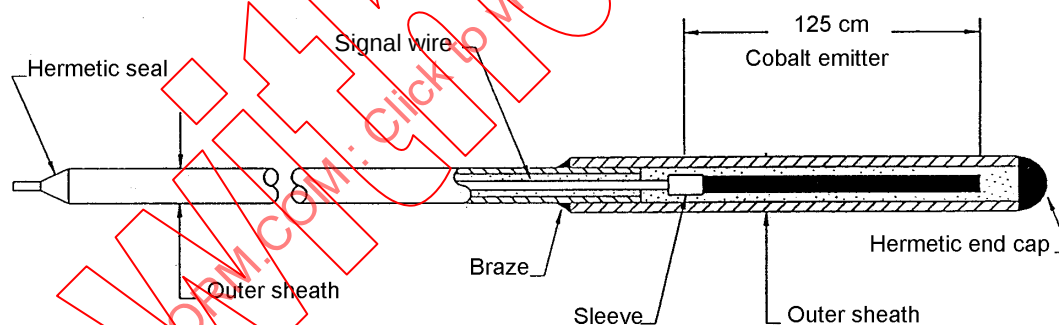
The typical SPND (see figure 1) is a coaxial cable consisting of an inner electrode (the emitter), surrounded by insulation and an outer electrode (the collector).

Preferably, the lead cable and detector sections are integral, i.e. the signal wire of the lead cable mates directly to the emitter; the insulation of both sections is identical and the collector of the detector section is also the outer sheath of the lead cable section. Detectors constructed in this manner are termed Integral SPNDs. SPND assemblies may also be made from separate detector and lead cable sections and are termed modular SPNDs as shown in figure 2.



IEC 244/2000

Figure 1 – Typical integral self-powered neutron detector



IEC 245/2000

Figure 2 – Typical modular self-powered neutron detector

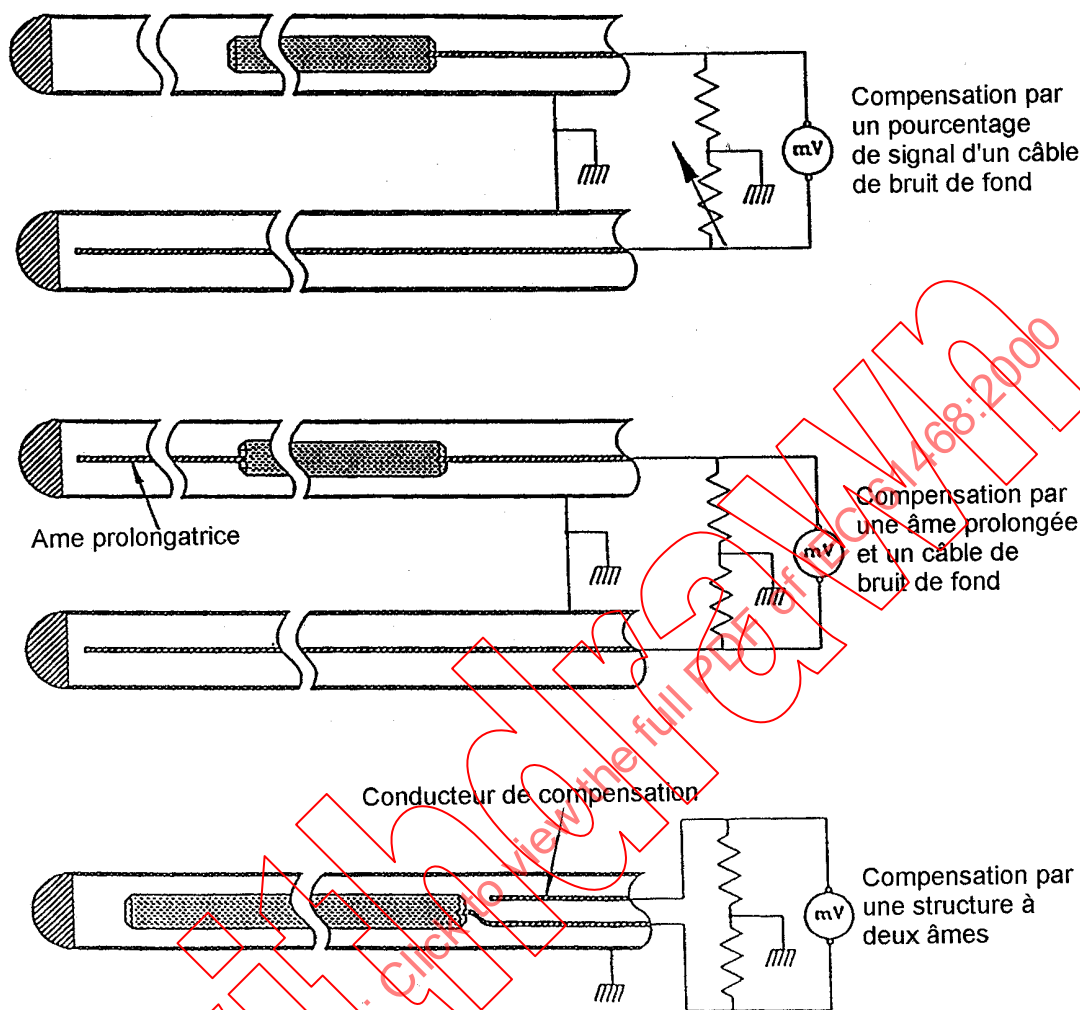
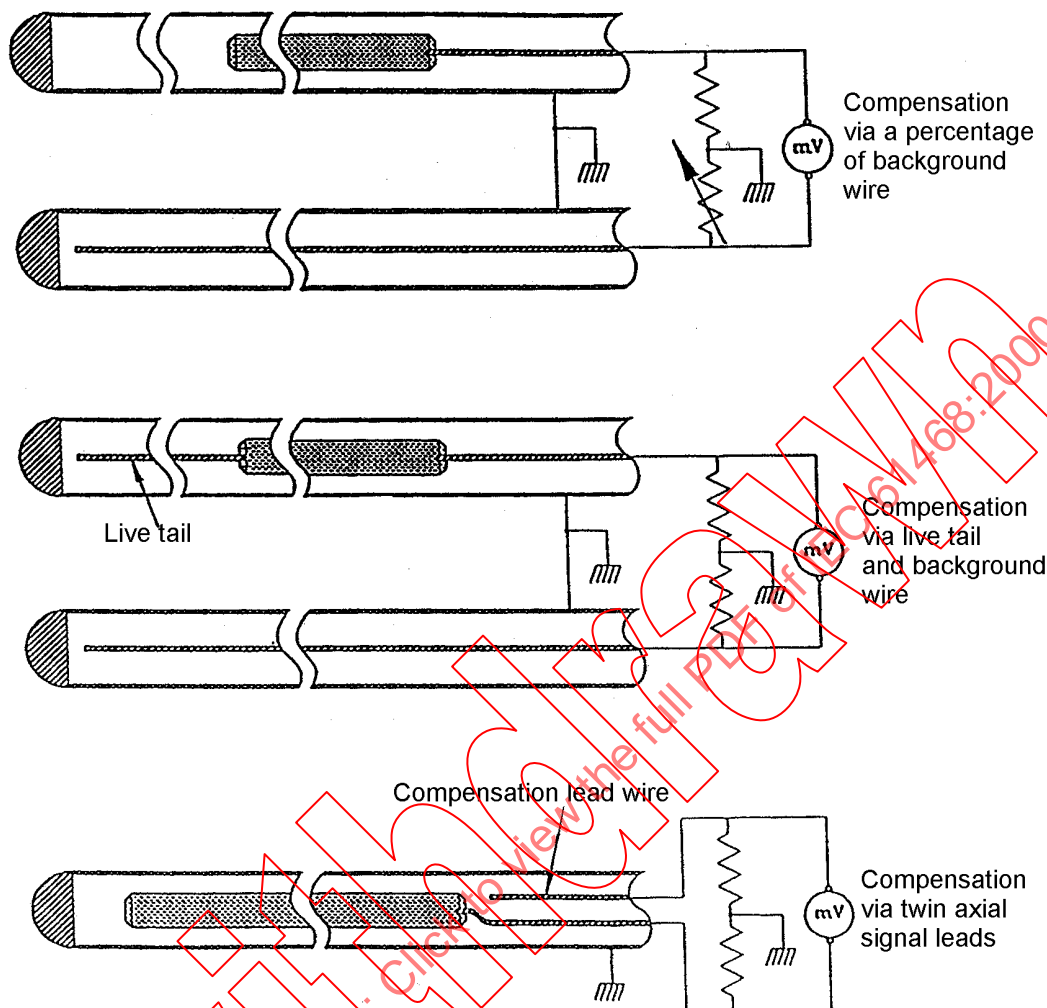


Figure 3 – Méthodes de compensation du signal d'un collectron

Les collectrons peuvent être placés dans le cœur d'un réacteur comme de simples éléments ponctuels, ou plus généralement sous la forme d'assemblages de plusieurs détecteurs disposés autour d'un tube central dans lequel peut être placé le détecteur d'un système de calibration. Des exemples sont donnés en A.5 et montrent les configurations d'assemblages typiques utilisées dans les centrales nucléaires à eau légère et à eau lourde.

Les collectrons présentent une grande variété de types avec des longueurs sensibles allant de quelques centimètres jusqu'à la totalité de la hauteur du cœur. A la conception d'un collectron, il convient de choisir précisément le type de l'émetteur et son diamètre, ainsi que les matériaux de son enveloppe et son isolant, en nature et en dimensions, dans le but de disposer d'une mécanique optimale pour un rayonnement donné.

Le matériau du collecteur et celui de l'enveloppe du câble de liaison doivent résister à la corrosion s'ils sont en contact avec le fluide primaire dans les conditions de fonctionnement normales ou même s'ils n'entrent que passagèrement en contact avec le fluide primaire. Les collectrons peuvent être utilisés dans des assemblages dans lesquels les éléments sensibles ne sont pas en contact avec le fluide primaire pour éliminer les effets de la corrosion et augmenter ainsi la durée de vie de l'assemblage.



IEC 246/2000

Figure 3 – Methods of compensation of a self-powered detector signal

SPNDs may be located in the reactor core as single elements, or more typically, in assemblies of several units grouped around a central tube in which the sensor of a calibration system can be located. Examples are described in A.5, showing typical assembly configurations used in light water and heavy water nuclear power plants.

SPNDs are available in a variety of designs with sensitive lengths ranging from a few centimetres to full core height. The design of an SPND should incorporate proper selection of emitter type and thickness, as well as sheath and insulation material types and dimensions, to optimize the mechanical design for a specific radiation measurement.

The material of the collector and lead cable sections shall be resistant to corrosion effects if in contact with the primary coolant under normal operation and transient conditions. SPNDs may be installed in assemblies in which the SPND elements are not in contact with the primary coolant, to eliminate the effects of corrosion and extend the element lifetime.

Le collecteur peut être fabriqué à partir d'alliages de nickel, caractérisés par une faible teneur en manganèse et une excellente tenue à la corrosion. (Une teneur en manganèse inférieure à 1 % est souhaitée parce que le manganèse donne une émission bêta sous l'action des neutrons et perturbe ainsi le signal de mesure.)

L'isolant doit être en principe transparent aux neutrons et aux gammas, c'est-à-dire qu'il doit présenter une très faible probabilité d'interaction. Il doit garantir une bonne résistance d'isolement entre le conducteur central et le collecteur, typiquement meilleure que $10^7 \Omega$ en opération à chaud et meilleure que $10^{12} \Omega$ à froid lorsque le collecteur n'est pas en service. On préfère utiliser des céramiques sous forme d'oxydes métalliques parce qu'elles peuvent résister aux conditions environnementales qui règnent dans le cœur d'un réacteur nucléaire.

Typiquement, trois matériaux peuvent être utilisés comme isolant des collecteurs pour les applications en réacteur de puissance: ce sont Al_2O_3 , MgO et SiO_2 . Al_2O_3 a été choisi dans la plupart des applications parce qu'il est facilement disponible, et que sous forme de poudre il est moins sensible que MgO aux effets de l'humidité. MgO est hygroscopique et peut provoquer le gonflement en cas de pénétration de l'humidité dans l'enveloppe du câble. Cependant MgO a une section efficace thermique significativement plus faible que Al_2O_3 . SiO_2 peut être utilisé dans certaines applications parce que sa faible densité améliore la transmission électronique entre l'émetteur et le collecteur et optimise ainsi la sensibilité. Cependant SiO_2 présente une résistance d'isolement plus faible à haute température que MgO ou Al_2O_3 .

6 Caractéristiques électriques et nucléaires

Pour les applications en réacteur de puissance, les principaux matériaux utilisés comme émetteurs de collecteurs sont le vanadium, le cobalt, le rhodium, l'argent, le platine et le hafnium. Il convient d'utiliser ces matériaux parce qu'ils possèdent une température de fusion relativement haute, des sections efficaces de réaction aux neutrons thermiques relativement élevées, et sont compatibles avec les procédés de fabrication des collecteurs. D'autres matériaux comme le cadmium, le gadolinium, et l'erbium peuvent être utilisés pour faire des collecteurs dans le cas de réacteur expérimentaux à basse température, mais ils n'ont pas d'applications pratiques en réacteur de puissance.

Le tableau 1 donne un aperçu de quelques caractéristiques importantes des émetteurs de collecteurs utilisés en réacteurs de puissance.

The collector may be fabricated from nickel-based alloys, characterized by low manganese content and excellent corrosion resistance. (Low manganese content of less than 1 % is desired because manganese produces interfering beta emissions when exposed to neutrons.)

The insulation should be virtually transparent to neutrons or gamma fluence rate, i.e. it should have an extremely low probability of interaction with neutrons or gamma rays. It should ensure that the detector maintains a resistance between centre conductor and collector in excess of $10^7 \Omega$ in "hot" operating conditions, and in excess of $10^{12} \Omega$ for "cold" nonoperating conditions. Ceramic oxides are the preferred materials because they can withstand the hostile environment inside a nuclear reactor.

Typically, three materials may be used for the insulation in SPNDs employed in power reactor applications, namely, Al_2O_3 , MgO and SiO_2 . Al_2O_3 has been chosen for most applications as it is readily available and, in powder form, is less sensitive than MgO to the effects of humidity. MgO is hygroscopic and is therefore sensitive to cable swelling if moisture penetrates the cable sheath. SiO_2 may be used in some applications because its low density enhances emitter to collector electron transmission and thus maximizes sensitivity characteristics. However SiO_2 has lower insulation resistance at high temperature than MgO or Al_2O_3 .

6 Nuclear and electrical characteristics

For power reactor applications, typical emitter materials used in SPNDs include vanadium, cobalt, rhodium, silver, platinum and hafnia. These materials should be used because they possess relatively high melting temperatures, relatively high cross-sections to thermal neutrons and are compatible with the SPND manufacturing process. Other emitters such as cadmium, gadolinium and erbium may be used in SPNDs for low temperature experimental reactors, but are not practical for power reactor applications.

Table 1 gives an overview of some of the important characteristics of SPND emitters used in power reactor applications.

Tableau 1 – Caractéristiques des matériaux des émetteurs de collectrons

Matériau émetteur	Section efficace aux neutrons thermiques cm^2	Retardé n, β	Prompt n, γ, e	Prompt γ, e	Applications
V^{51}	$4,9 \times 10^{-24}$	X ¹⁾	X	O ²⁾	Carte de flux HWR Carte de flux REL
Co^{59}	37×10^{-24}	O	X	O	Carte de flux REL Contrôle REL Protection locale du coeur
Rh^{103}	145×10^{-24}	X	—	—	Carte de flux REL
$\text{Ag}^{107,109}$	$64,8 \times 10^{-24}$	X	—	—	Carte de flux RBMK ³⁾
Pt^{195}	24×10^{-24}	O	X	X	Contrôle REL Contrôle HWR
HfO_2	115×10^{-24}	O	X	O	Carte de flux RBMK Contrôle local RBMK Protection locale RBMK
¹⁾ X interaction primaire ²⁾ O interaction secondaire ³⁾ RBMK mis à niveau					

7 Recommandations pour les applications

Le choix du type de collectron le plus approprié pour chacune des applications considérées ci-dessous doit être fait en respectant les recommandations suivantes.

Le type de mesure, les exigences de maintenance ainsi que la classification de sûreté entraînent des différences dans :

- le nombre de SPND nécessaires,
- le choix d'applications simples, distribuées ou redondantes,
- les positions (équidistantes ou en groupes),
- la disposition des assemblages avec traversées communes.

7.1 Carte de flux neutronique, surveillance et contrôle du coeur

Les collectrons peuvent être utilisés pour réaliser des cartes de flux neutronique ainsi que pour le contrôle et la surveillance du coeur en intégrant ou non un système de calibration.

Une grande sensibilité simplifie le traitement du signal et permet des mesures dans un faible débit de fluence.

Une vitesse de combustion rapide peut être acceptable si l'on dispose d'un système de calibration.

Table 1 – Characteristics of SPND emitters

Emitter materials	Thermal neutron cross-sections cm ²	Delayed n,β	Prompt n,γ,e	Prompt γ,e	Applications
V ⁵¹	$4,9 \times 10^{-24}$	X ¹⁾	X	O ²⁾	HWR fluence rate mapping LWR fluence rate mapping
Co ⁵⁹	37×10^{-24}	O	X	O	LWR fluence rate mapping LWR control LWR local core protection
Rh ¹⁰³	145×10^{-24}	X	—	—	LWR fluence rate mapping
Ag ^{107,109}	$64,8 \times 10^{-24}$	X	—	—	RBMK ³⁾ fluence rate mapping
Pt ¹⁹⁵	24×10^{-24}	O	X	X	LWR control HWR control
HfO ₂	115×10^{-24}	O	X	O	RBMK fluence rate mapping RBMK local control RBMK local protection
¹⁾ X primary interaction ²⁾ O secondary interaction ³⁾ Upgraded RBMK					

7 Application recommendations

The selection of the most appropriate type of SPND for each of the applications considered below shall be based upon the following recommendations.

The type of measuring task, maintenance requirements, as well as assignment to categories, cause differences in:

- quantities of SPNDs required,
- single, distributed or redundant applications,
- locations (equidistant or in specific groups),
- arrangements such as assemblies with common penetrations.

7.1 Fluence rate mapping – core monitoring and surveillance

SPNDs may be used for fluence rate mapping and core monitoring and surveillance with or without an associated calibration system.

High sensitivity simplifies the signal processing and enables measurements at low fluence rate levels.

High burn-up may be acceptable if a calibration system is available.

7.2 Régulation

Les collectrons peuvent être utilisés pour des fonctions de régulation, cependant, un retard du signal pourra être acceptable à condition de respecter les limitations suivantes:

- le contrôle de la distribution axiale de puissance peut accepter un retard modéré;
- le contrôle de la puissance totale ne doit pas admettre de retard sur le signal;
- la vitesse de combustion doit être modérée.

7.3 Protection du coeur

Les caractéristiques des collectrons nécessaires pour assurer la protection locale du coeur dépendent du comportement transitoire du débit de fluence.

Un signal avec une réponse rapide ou une compensation dynamique est requise.

La faible sensibilité inhérente à la conception des collectrons à réponse rapide peut être acceptée en utilisant des amplificateurs à faible bruit.

Une vitesse de combustion acceptable dépend de la méthode de calibration ou de l'utilisation d'une méthode de compensation de l'usure.

7.4 Classification

Les collectrons peuvent être utilisés comme capteurs dans des chaînes de mesure pour assurer des fonctions dont l'importance pour la sûreté peut être différente. Elles doivent alors être classées conformément aux recommandations de la CEI 61226.

8 Recommandations pour la conception

Il est possible d'optimiser l'utilisation des collectrons dans les réacteurs de puissance en suivant les recommandations suivantes.

8.1 Bruit de fond

Il existe plusieurs sources de bruit dans le signal issu des collectrons.

Le bruit apparaît en général principalement sous la forme de courants induits dans le câble par les neutrons et les gammas. Il est possible de compenser ce signal en utilisant un câble spécifique pour la mesure du bruit de fond indépendant (sans émetteur) dont le signal est retranché du signal issu du collectron. Une autre technique consiste à utiliser un câble avec deux âmes pour construire le collectron. Une âme est reliée à l'émetteur pour mesurer le signal, et la seconde est utilisée pour mesurer le bruit de fond (voir figure 3). Une troisième technique consiste à optimiser les dimensions du conducteur central et de la gaine de façon à ce que les contributions au signal positif des réactions (n,β) et (n,γ,e) annulent les contributions négatives (n,β) .

Il convient de réduire le bruit lié aux interférences électromagnétiques par une mise à la masse correcte et en portant un soin particulier à la conception des supports et des chemins de câble.

8.2 Temps de réponse

Lorsqu'un collectron génère un signal retardé après une modification du débit de fluence local, le temps pour obtenir un signal suffisamment stabilisé peut être estimé entre 3 et 5 fois la demi-vie du nucléide prédominant de l'émetteur.

7.2 Feedback control

SPNDs may be used for feedback control purposes, however acceptability of a signal delay will depend on the following limitations:

- axial power shape control may tolerate moderate delay;
- integral power control shall not permit signal delay;
- burn-up shall be moderate.

7.3 Core protection

The characteristics required of SPNDs used for local core protection purposes depend on the transient behaviour of the fluence rate levels.

Prompt signal response or adequate dynamic compensation to achieve prompt response is required.

Low sensitivity typical of prompt response SPND designs may be accepted by using amplifiers with low noise characteristics.

An acceptable burn-up rate depends on the calibration method or the application of a burn-up compensation method.

7.4 Classification

SPNDs may be used as sensors in measuring channels for functions with different degrees of importance for safety. These shall be classified in categories according to IEC 61226.

8 Design recommendations

The following design recommendations should be considered for optimizing the use of SPNDs in power reactors.

8.1 Background noise

There are different sources of signal noise in SPNDs.

Signal noise is generated primarily by neutron and gamma induced currents in the signal cable. Compensation may be achieved by using a separate background cable (without an emitter) and subtracting its signal from the SPND signal. Another technique involves the use of twin axial cables in the SPND construction, with one lead connected to the emitter and the second lead used as the background lead (see figure 3). A third technique is to optimize the dimensions of the lead core and sheath so that the positive (n,β) and (n,γ,e) signal contributions cancel the negative (n,β) contribution.

Electrical interference noise should be minimized by adequate grounding and careful design of cable trays and cable routing.

8.2 Time response

If an SPND produces a delayed signal after a change in the local neutron fluence rate level, the time to obtain an acceptable stable signal may be estimated as three to five times the half-life of the predominant nuclide of the emitter material.

Le temps nécessaire pour obtenir un signal stable peut être réduit d'un facteur de l'ordre de dix grâce à un traitement électronique approprié du signal. L'algorithme de correction avec un filtre est simple lorsqu'il n'y a qu'un seul nucléide prédominant et lorsqu'il n'y a pas de composante prompt.

8.3 Durée de vie

La durée de vie d'un collectron peut s'exprimer soit par la fluence de combustion soit par la vie utile. La durée de vie définie par la fluence de combustion (voir les définitions) dépend du rapport signal sur bruit pour une application particulière, qui dépend de la vitesse de combustion du matériau constituant l'émetteur et peut être calculée comme cela est montré à l'article A.3. La vie utile d'un collectron dépend:

- du procédé de fabrication des collectrons, des câbles de signaux, et des matériaux de structure;
- de la fabrication proprement dite;
- du circuit électrique.

Pour estimer la fluence de combustion, il est recommandé d'adopter les rapports signal sur bruit suivants:

- ≥ 10 pour des fonctions de protection;
- ≥ 2 pour des fonctions de contrôle;
- ou un taux combustion < 60 % dans le cas d'émetteurs comme le rhodium.

Des collectrons à longue vie utile utilisant des émetteurs comme le cobalt, le platine ou le vanadium ayant un coefficient de combustion faible peuvent atteindre une vie utile de l'ordre de 10 ans du fait des limites imposées par la structure du collectron après irradiation.

8.4 Construction mécanique et câblage

Il faut s'assurer des points suivants:

- le procédé de fabrication des collectrons respecte les spécifications relatives à l'épaisseur et à la ductilité des matériaux des parois;
- pendant la fabrication, le transport des éléments, le montage, aucune contrainte ou courbure excessive des éléments ne peut endommager les éléments ou les câbles de signaux connectés;
- les matériaux des collectrons et l'ensemble de l'assemblage peuvent supporter les effets des radiations, de la température, de la pression, des vibrations et de la corrosion chimique pouvant survenir dans le coeur du réacteur;
- la connexion électrique terminale des collectrons est appropriée pour éviter l'apparition des surtensions produites par la génération des courants dans les collectrons; cela est nécessaire dans le coeur et dans la piscine de stockage du combustible.

9 Méthodes d'essai

Il convient que les méthodes d'essai des collectrons respectent les recommandations de la CEI 60515 et de la CEI 60568.

9.1 Essais sur un prototype

Il convient que les essais sur des collectrons prennent en compte toutes les caractéristiques mécaniques et électriques présentées dans les articles 5 et 6 de la présente norme. Il convient d'accorder de l'importance aux caractéristiques qui conditionnent l'utilisation à long terme dans

The time to obtain a stable signal may be improved by a factor of ten with appropriate electronic signal processing. The correction algorithm with filter is simple if there is only one predominant nuclide and no prompt yield.

8.3 Lifetime

The lifetime of a SPND may be expressed either as burn-up life and/or useful life. The detector burn-up life (see definitions) is dependent on the signal-to-noise ratio in a particular application. This in turn is dependent on the burn-up rate of the SPND emitter material which can be calculated as shown in A.3. The useful life of the SPND is dependent on:

- the manufacturing process of the SPND elements, the signal cables, and the materials of construction;
- the manufacturing construction;
- the connected electrical circuit.

Recommended signal-to-noise ratios for estimating burn-up life of SPNDs are as follows:

- ≥ 10 for protection functions;
- ≥ 2 for monitoring functions;
- or burn-up $< 60\%$ for emitters such as rhodium.

Long burn-up life SPNDs utilizing emitters such as cobalt, platinum and vanadium with low burn-up factors have a useful life of approximately 10 years due to limitations in the SPND structural characteristics after exposure to radiation.

8.4 Mechanical design and electrical connection

It shall be assured that:

- the manufacturing process of SPND elements fulfils the specified values especially of wall thickness and ductility of wall material;
- during manufacturing, transport of the elements, and mounting of the assemblies, no undue stretching and bending is exceeded on the elements and the connected signal cables;
- the materials of the SPND elements and the entire assembly can withstand the effects of radiation, temperature, pressure, vibration, and chemical corrosion caused by the environment present in the reactor core;
- there is proper electric termination of SPND elements to avoid high voltages generated by SPND signal current, this is necessary within the core and in the fuel pool.

9 Test methods

Proposed test methods for SPNDs should follow the guidelines recommended in IEC 60515, and IEC 60568.

9.1 Prototype testing

Prototype testing of SPNDs should take into account all the critical mechanical and electrical characteristics shown in clauses 5 and 6 of this standard. Emphasis should be given to performance characteristics relevant to long-term operation under in-core conditions,

les conditions en-cœur, pour démontrer la stabilité à long terme des caractéristiques mécaniques et électriques. De plus, il convient que les essais prennent en compte le signal dû au bruit de fond, les effets du chauffage gamma et la diminution de la sensibilité suite à la combustion de l'émetteur. Il convient de faire des essais en simulant les conditions en-cœur, y compris la pression et les cycles de température, afin de déterminer si la conception du collectron est susceptible de respecter les exigences vis-à-vis de la probabilité de défaillance pour une application en réacteur de puissance.

Pour une conception donnée, il est recommandé d'essayer au moins trois collectrons pour vérifier leurs caractéristiques mécaniques et électriques par rapport à leurs spécifications. Un essai de prototype sur deux assemblages de collectrons est recommandé dans un cœur ou dans des conditions simulées normales ou extrêmes.

9.2 Essais de fin de fabrication

Les collectrons et les assemblages doivent subir des essais pour s'assurer que toutes les exigences ont été respectées.

Les caractéristiques suivantes doivent être mesurées sur toutes les fabrications de collectrons:

- l'étanchéité du collectron et de son enveloppe dans les conditions maximales de pression hydrostatique et de température (pour les conceptions adaptées aux conditions humides);
- la résistance d'isolement à 20 °C et à la température maximale d'utilisation (des valeurs acceptables de résistance d'isolement sont données dans le tableau A.2 pour la température ambiante (20 °C) et pour une température d'utilisation maximale typique (350 °C);
- la continuité entre l'émetteur et l'âme du câble de liaison (par mesure de capacité ou par d'autres méthodes adaptées);
- le positionnement de l'émetteur dans le collectron. Ceci est réalisé généralement par des techniques radiographiques (selon au moins deux plans).

De plus, il convient que la dispersion des sensibilités des collectrons dans un lot de fabrication soit évaluée. Pour cela, il est possible d'étalonner un échantillon statistique de collectrons pris sur le lot de fabrication.

Finalement, il est recommandé que des mesures soient faites pour certifier que la qualité et la pureté des matériaux utilisés respectent les spécifications.

10 Etalonnage d'un détecteur

Il est possible d'étalonner un collectron soit sur le site, soit dans un réacteur d'essai avant l'installation définitive sur le site.

10.1 Etalonnage absolu

Il est possible de faire un étalonnage absolu d'un collectron par une méthode d'analyse utilisant un fil d'activation. La méthode classique consiste à soumettre le collectron à une source de neutrons (typiquement thermiques) et à mesurer le courant résultant en sortie. La valeur du débit de fluence neutronique est obtenue en mesurant l'activation de fines feuilles ou de fils dont la section efficace aux neutrons dans le domaine d'énergie souhaité est bien connue, par exemple en cobalt ou en or pour les neutrons thermiques.

La sensibilité est simplement donnée par le rapport du courant mesuré sur la valeur du débit de fluence.

to demonstrate long-term stability of mechanical and electrical characteristics. Moreover, the tests should consider background signal build-up, gamma heating effects and sensitivity changes due to burn-up of the emitter materials. Tests simulating in-core ambient conditions, including pressure and temperature cycling, should be performed to such an extent that it is demonstrated whether the SPND design can be expected to meet requirements with regard to the probabilities of failure in a power reactor application.

It is recommended that a minimum of three SPNDs of a particular design should be prototype tested according to their mechanical and electrical specifications. Prototype testing of two in-core SPND assemblies is recommended in an operating or simulated core under normal and worst case environmental conditions.

9.2 Production tests

SPNDs and assemblies shall undergo final testing to ensure that all established requirements have been met.

The following characteristics shall be measured on all production SPNDs:

- SPND sheath and detector envelope integrity under maximum hydrostatic pressure and temperature conditions (for wet assembly designs);
- insulation resistance at 20 °C and at the maximum operating temperature (acceptable insulation resistance values are shown in table A.2 for both room temperature (20 °C) and a typical maximum operating temperature (350 °C);
- continuity of emitter-to-signal wire connection (by capacitance measurement or other suitable method);
- the emitter's location within the SPND. This is typically performed using radiography techniques (in two or more planes).

In addition, the variability of SPND neutron sensitivity within a production lot should be established. This may be performed by calibrating a statistical sample of the production lot.

Finally, it is recommended that measurements be made to certify that the quality and purity of all the detector materials used meet the specification requirements.

10 Detector calibration

The calibration of self-powered neutron detectors may be performed at the installation site, or in a test reactor prior to final installation.

10.1 Absolute calibration

The absolute neutron sensitivity of an SPND may be determined by wire activation analysis. The basic method involves exposing the SPND to a source of neutrons (typically thermal) and measuring the resulting output current. Neutron fluence rate during exposure is determined from activation analysis of high purity, thin foils or wires with a well-defined capture cross-section for the neutron energy range of interest, e.g., cobalt or gold for thermal neutrons.

Sensitivity is readily calculated as measured output current divided by neutron fluence rate.

10.2 Etalonnage par comparaison

Il est possible de connaître la sensibilité absolue aux neutrons d'un collectron par comparaison avec un collectron étalon. La méthode classique consiste à soumettre le collectron à étalonner (le collectron d'essai) et un collectron étalon (un détecteur dont la sensibilité absolue aux neutrons est connue et dont les caractéristiques physiques sont identiques à celles du collectron d'essai) à une source de neutrons (typiquement thermiques) et à mesurer les courants en sortie.

La sensibilité est simplement calculée en multipliant le rapport de la valeur du courant mesurée sur le collectron d'essai et de la valeur du courant mesurée sur le collectron étalon par la valeur de la sensibilité du collectron étalon. (Il est possible que des corrections soient nécessaires pour prendre en compte la différence des débits de fluence entre le site d'étalonnage du collectron d'essai et celui du collectron étalon).

10.3 Calibration en-cœur

Il existe plusieurs méthodes éprouvées, pour calibrer les collectrons en-cœur, utilisant des détecteurs fixes ou mobiles ou des techniques d'activation. On distingue :

- les détecteurs en-cœur fixes caractérisés par l'absence ou une très faible vitesse de combustion comme par exemple les collectrons au vanadium ou les thermomètres gammas;
- des chambres à fission mobiles simples ou multiples ou bien des collectrons se déplaçant dans des tubes de calibration placés à l'intérieur des assemblages de collectrons;
- des colonnes dans lesquelles circulent des billes d'acier chargé au vanadium qui sont déplacées par une pression d'air ou d'un autre gaz et dont on mesure l'activité après un séjour dans le cœur.

10.4 Procédure de calibration

Il est possible d'utiliser la méthode d'essai en réacteur (méthode par activation) pour obtenir une calibration absolue ou relative selon l'étalonnage des détecteurs de référence.

Les méthodes de calibration en-cœur fournissent des données relatives qu'il est possible de corréler avec la puissance intégrée du cœur.

Plusieurs corrections peuvent être nécessaires pour obtenir des résultats plus précis à cause de la nature même du système de calibration, par exemple :

- les corrections d'écran pour compenser les effets dus à la proximité des détecteurs (effet d'ombre);
- les corrections prenant en compte la sensibilité du câble conducteur;
- les corrélations spatiales (distances, positionnements);
- la sensibilité en fonction du spectre de neutrons;
- la dépendance de la mesure en fonction du temps;
- le temps disponible pour réaliser la totalité de la carte de flux;
- la décroissance radioactive pendant le transport et pendant le procédé de mesure.

Plusieurs techniques basées sur le traitement des signaux de sortie peuvent être nécessaires pour obtenir des informations concernant les conditions qui règnent :

- localement au niveau du collectron;
- au centre d'un assemblage combustible;
- au centre d'une zone de surveillance.

Ces techniques peuvent aussi fournir des informations sur les niveaux maximaux dans une zone de surveillance.

10.2 Comparison calibration

The absolute neutron sensitivity of an SPND may be determined through comparison with a standard SPND. The basic method involves exposing the SPND undergoing calibration (the test SPND) and a standard SPND (a detector of known absolute neutron sensitivity and physical characteristics identical to those of the test SPND) to a source of neutrons (typically thermal) and measuring the resulting output currents.

Sensitivity is readily calculated as the measured output of the test SPND divided by the measured output current of the standard SPND times the absolute neutron sensitivity of the standard SPND (it may be necessary to apply corrections to account for fluence rate variance existing between the calibration site of the test SPND and that of the standard SPND).

10.3 In-core calibration

There are several well-proven in-core calibration systems that use fixed, or movable detectors, as well as activation techniques. These include:

- fixed in-core detectors characterized by no or low burn-up factors such as vanadium self-powered detectors or gamma thermometers;
- single or multiple movable in-core fission chambers, or self-powered detectors located in calibration tubes within each self-powered detector assembly;
- columns of steel balls with vanadium content moved by air or another gas which are irradiated in-core and later have their induced activity measured out-of-core.

10.4 Calibration procedure

The test reactor (activation) method may be used to obtain relative or absolute calibration results depending on the calibration of the reference detectors.

In-core calibration methods provide relative data which may be correlated to the integrated power of the core.

Several corrections may be necessary to obtain accurate results due to the nature of the calibration system, concerning for example:

- shielding correction due to the detector overlap or "shadowing";
- corrections due to lead cable sensitivity;
- spatial correlations (distances, locations);
- sensitivity with respect to the neutron spectrum;
- time dependencies of the measurement;
- allowable time limit for the entire core fluence rate map;
- radiation decay during the transport and measuring process.

Various techniques based on the use of the output signal may be required to gather information regarding the conditions at:

- the location of the SPND;
- the centre of a fuel element;
- the centre of the surveillance zone.

These techniques may also provide information regarding the maximum levels within a surveillance zone.

10.5 Recommandations pour la périodicité de la calibration

Pour les systèmes de calibration en-cœur, il convient de fixer la périodicité de la calibration en fonction de la vitesse de combustion du matériau constituant l'émetteur et de l'affectation du signal à une fonction particulière.

L'expérience montre par exemple:

- que les collectrons avec des émetteurs cobalt qui sont utilisés pour la protection locale doivent de préférence avoir les périodicités de calibration suivantes:
 - . en début de cycle du combustible: 2-3 semaines;
 - . en fin de cycle du combustible: 4-6 semaines;
- que les collectrons avec des émetteurs rhodium qui sont utilisés pour la cartographie du flux doivent avoir de préférence les périodicités suivantes:
 - . en début de cycle du combustible: 2 semaines;
 - . en fin de cycle du combustible: 4 semaines.

10.5 Recommended calibration periods

For in-core calibration systems, the calibration period should be chosen according to the burn-up rate of the specific SPND emitter material and the assignment of the signal to a particular function.

Experience shows that for example:

- SPNDs with cobalt emitters which are used for a local core protection function should have calibration periods as follows:
 - . beginning of a fuel cycle: 2-3 weeks;
 - . end of a fuel cycle: 4-6 weeks.
- SPNDs with rhodium emitters which are used for fluence rate mapping should have calibration periods as follows:
 - . beginning of a fuel cycle: 2 weeks;
 - . end of a fuel cycle: 4 weeks.

Annexe A (informative)

Principes du collectron

A.1 Mécanismes qui conditionnent la réponse d'un collectron

Tous les collectrons interagissent avec les neutrons et les gamma à des degrés différents. Les principaux mécanismes de génération d'un courant sont: la désintégration bêta (réponse retardée), la capture neutronique (réponse prompt), l'effet Compton (réponse prompt), et l'effet photoélectrique (réponse prompt). La désintégration bêta et la capture neutronique sont induites par les neutrons, alors que l'effet photoélectrique et l'effet Compton sont induits par les gammas.

A.1.1 Désintégration bêta (réponse retardée)

Les collectrons qui mettent en oeuvre principalement la désintégration bêta (la réaction n, β) pour produire un courant présentent toujours une réponse retardée. La désintégration bêta se produit lorsque un noyau se brise après avoir absorbé un neutron. Après la cassure, le noyau émet un électron. Dans 50 % des cas, cet électron atteint le collecteur, où il participe à la génération du courant de sortie. Parmi les quatre processus évoqués, la désintégration bêta est, de loin, le plus efficace pour générer un courant.

Les collectrons à réponse retardée, comme ceux dont l'émetteur est en rhodium ou en vanadium, génèrent la plus grande partie de leur courant selon ce processus.

A.1.2 Capture neutronique (réponse prompt)

Les collectrons qui mettent en oeuvre principalement la capture neutronique (la réaction n, γ, e) pour produire un courant présentent une réponse prompt. Comparativement aux collectrons par désintégration bêta, les collectrons par capture neutronique ont des émetteurs avec des valeurs de section efficace intermédiaires et des périodes relativement longues. La période longue engendre un faible courant produit par désintégration bêta. Par contre, ces collectrons produisent leur courant à partir de la capture neutronique initiale. A cause de leur section efficace intermédiaire, de nombreux neutrons sont capturés. Suite à la capture, les nouveaux radio-isotopes ainsi créés émettent un photon qui va à son tour interagir avec un électron. Une partie de ces électrons va atteindre le collecteur. Par comparaison avec la désintégration bêta, il s'agit d'un processus très peu efficace. Typiquement, seulement 2 % des neutrons capturés contribuent à la production du courant de sortie.

Les collectrons avec des émetteurs en cobalt ou en hafnium produisent principalement leur courant par capture neutronique.

A.1.3 Effet photoélectrique (réponse prompt)

L'effet photoélectrique se produit lorsque des atomes ayant un numéro atomique élevé (c'est-à-dire une forte densité électronique) sont exposés à des photons de faible énergie. Cette interaction se produit dans l'émetteur, l'isolant et le collecteur. Les électrons éjectés du collecteur se déplacent vers l'émetteur et neutralisent quelques électrons qui quittent l'émetteur. Les électrons libérés dans l'isolant peuvent aller dans toutes les directions. Le courant total délivré par un collectron est en fait la différence entre le courant sortant produit par l'émetteur et l'isolant et le courant entrant produit par le collecteur et l'isolant.

Annex A (informative)

Self-powered detector principles

A.1 SPND response mechanisms

All SPNDs react to neutron and gamma fluence rates to some degree. The main current-producing mechanisms are: beta decay (delayed response), neutron capture (prompt response), Compton effect (prompt response), and photoelectric effect (prompt response). Beta decay and neutron capture are caused by the neutron fluence rate, while the photoelectric and Compton effects are caused by the gamma fluence rate.

A.1.1 Beta decay (delayed response)

SPNDs which are based primarily on beta decay (the n, β reaction), always have a delayed response. Beta decay occurs when an atom breaks down after absorbing a neutron. On breakdown, the atom releases an electron. About 50 % of the time this electron goes to the collector where it contributes to the output current. Of the four relevant processes, beta decay is, by far, the most efficient at producing current.

Delayed response SPNDs, such as those with rhodium or vanadium emitters, produce most of their current by this mechanism.

A.1.2 Neutron capture (prompt response)

SPNDs that generate current primarily from neutron capture (the n, γ, e reaction) give a prompt response. Compared to beta-decay SPNDs, neutron capture SPNDs have emitters with intermediate sized cross-sections and a relatively long half-life. The long half-life results in very little beta-decay current being generated. Instead, these SPNDs generate their current from the initial neutron capture. Because of the emitters intermediate sized cross-section, many neutrons are captured. Upon capture, these newly created radioisotopes emit a photon which in turn collides with an electron. A number of these electrons may travel to the collector. Compared to beta decay, this is a very inefficient process. Typically, only about 2 % of the neutrons captured contribute to the output current.

SPNDs with cobalt or hafnia emitters generate most of their current via neutron capture.

A.1.3 Photoelectric effect (prompt response)

The photoelectric effect takes place when atoms of large atomic number (i.e. high electron densities) are exposed to low energy photons. This interaction occurs in the emitter, the insulator and the collector. Electrons knocked out of the collector travel to the emitter and cancel some of the electrons leaving the emitter. Electrons ejected from the insulation can go in either direction. The total current that leaves the SPND is the difference between the outward current from the emitter and insulator and the inward current from the collector and insulator.

A.1.4 Effet Compton (réponse prompt)

L'effet Compton ressemble à l'effet photoélectrique, sauf qu'il implique des atomes plus petits et des énergies intermédiaires. Comme l'effet photoélectrique, l'effet Compton se produit dans les trois composants du collectron: le collecteur, l'isolant, et l'émetteur. Le signal effectif produit par les collectrons est la différence entre les courants entrant et sortant.

Les détecteurs ayant des émetteurs en platine produisent un courant généré à la fois par effet Compton et par effet photoélectrique mais également par capture neutronique.

A.2 Nature de la réponse d'un collectron

La nature de la réponse d'un collectron lors d'une interaction gamma ou neutron est principalement déterminée par la section efficace de capture de son émetteur. Généralement plus la section efficace est grande, plus grande est la probabilité d'interaction et plus grand est le courant qui sort du détecteur, (et aussi, pour les interactions neutroniques, plus rapide est la combustion de l'émetteur). Les valeurs des sections efficaces élémentaires sont généralement disponibles dans la plupart des tables de caractéristiques des nucléides.

A.2.1 Interactions aux neutrons thermiques

Dans le cas des interactions neutroniques thermiques, la section efficace de capture, notée σ_{eff} , dépend de la section efficace du nucléide, de la géométrie de l'émetteur et de l'autoprotection. La géométrie de l'émetteur est directement liée à l'autoprotection. De manière générale, lorsque le diamètre de l'émetteur augmente, la probabilité pour que des particules bêta sortent ou pour qu'un électron soit extrait de l'émetteur et gagne le collecteur diminue.

A.2.2 Interactions gamma

Les interactions avec les gammas dépendent de la section efficace qui varie en fonction de l'énergie des photons, de la géométrie de l'émetteur et de l'autoprotection. Pour l'effet Compton, la section efficace augmente comme Z et décroît avec E . Pour l'effet photoélectrique, la section efficace d'interaction augmente comme Z^5 (le numéro atomique, c'est-à-dire le nombre de protons dans l'atome) et décroît avec E^3 (énergie du photon) soit:

$$\sigma_{\text{pe}} \approx Z^5 (h\nu)^{-3}$$

A.3 Fluence de combustion d'un détecteur

Lorsque l'émetteur absorbe des neutrons, il est soumis à un effet de combustion. Chaque atome de l'émetteur ne peut absorber qu'un seul neutron; quand cela se produit on dit qu'il est brûlé, qu'il est consommé ou qu'il s'est appauvri. Tous les émetteurs de collectrons utilisant la capture neutronique sont soumis à la combustion quand ils sont exposés aux neutrons. La combustion induit une diminution de la sensibilité. Pour compenser cet effet, les vitesses de combustion sont soigneusement calculées pour chaque type d'émetteur et sont utilisées pour interpréter correctement les variations du courant issu de l'émetteur. En complément, il est possible de calibrer périodiquement les collectrons grâce à un détecteur mobile qui se déplace dans un tube de calibration (s'il existe), prévu à cet effet à l'intérieur de l'assemblage de collectrons.

Il est possible de déterminer en première approximation la durée de vie par combustion d'un collectron de la manière suivante:

On utilise la relation $N = N_0 \exp(-(\lambda + \sigma_{\text{eff}} \Phi_{\text{th}})t)$. Soit N/N_0 la fraction restante des atomes de l'émetteur, par exemple dans le cas d'une spécification qui impose le remplacement lorsque le taux de combustion atteint 60 %, $N/N_0 = 0,4$. On convertit la constante de décroissance radioactive λ du nucléide résultant de l'émetteur de (secondes)⁻¹ en (années)⁻¹. On convertit également le débit de fluence neutronique (Φ_{th}) dans le réacteur de n/(cm² × s) en n/(cm² × an).

A.1.4 Compton effect (prompt response)

The Compton effect is much like the photoelectric effect except that it involves smaller atoms and photons of medium energy. Like the photoelectric effect, the Compton effect takes place in all three regions of the SPND: the collector, insulator, and emitter. The SPND's actual output is the difference between the inward and outward flow of electrons.

Detectors with platinum emitters generate current from both Compton and photoelectric effects as well as neutron capture.

A.2 Nature of SPND response

The nature of the response of an SPND to any neutron or gamma interaction, is determined primarily by the (capture) cross-section of its emitter. Generally, the larger the cross-section, the greater probability of interaction and the greater the output current of the detector (also, for neutron interactions, the faster the emitter burns up). Elemental cross-sections are readily available from most standard nuclide tables.

A.2.1 Thermal neutron interactions

For thermal neutron interactions, the effective capture cross-section, denoted σ_{eff} is dependent on the nuclide cross-section, emitter geometry, and self-shielding. Emitter geometry is directly related to self-shielding. Generally as emitter diameter increases, the beta escape probability, or chance that an electron freed from the interior of the emitter reaches the collector, decreases.

A.2.2 Gamma interactions

Gamma interactions depend on the gamma ray photon energy interaction cross-section, emitter geometry and self-shielding. For the Compton effect, the interaction cross-section increases with Z and decreases with E . For the photoelectric effect, the interaction cross-section increases as Z^5 (the atomic number, i.e. the number of protons in the atom) and decreases with E^3 (photon energy), i.e.

$$\sigma_{\text{pe}} \approx Z^5(h\nu)^{-3}$$

A.3 Detector burn-up life

As the emitter absorbs neutrons it undergoes burn-up. Each emitter atom can only absorb one neutron; when it does this, it has burned-up or become consumed or depleted. All SPND emitters based on neutron capture undergo burn-up when exposed to neutrons. As burn-up occurs the SPND sensitivity decreases. To compensate for this, burn-up rates are carefully calculated for each emitter type and are then used to correctly interpret the changing emitter current. In addition to this, SPNDs may be periodically calibrated by a movable detector that is inserted into the in-core assembly calibration tube (if present).

The burn-up life of any SPND may be determined, to a first approximation, as follows:

Based on the equation, $N = N_0 \exp(-(\lambda + \sigma_{\text{eff}} \Phi_{\text{th}})t)$, let N/N_0 equal the fraction of emitter atoms remaining, for example for a specification that detectors be replaced after 60 % depletion, $N/N_0 = 0.4$. Convert the units for the decay constant (λ) of the resulting emitter nuclide from (seconds)⁻¹ to (years)⁻¹. Convert the average thermal neutron fluence rate (Φ_{th}) in the reactor from n/(cm² × second) to n/(cm² × year).

Alors, la durée de vie en années s'exprime par:

$$t = \frac{-\ln(N/N_0)}{\lambda + \sigma_{\text{eff}}\Phi_{\text{th}}}$$

A.4 Caractéristiques fonctionnelles des collectrons

Les informations suivantes présentent les caractéristiques des collectrons les plus couramment utilisés sur les centrales nucléaires de puissance. Ces informations ont pour but de servir de référence pour aider l'utilisateur de la présente publication dans le choix du meilleur collectron possible dans le cadre des systèmes d'instrumentation en-cœur.

A.4.1 Caractéristiques des émetteurs vanadium

Le V^{51} présente une interaction n-bêta avec une section efficace aux neutrons thermiques de 4,9 b qui se caractérise par une décroissance en $1/v$ sans résonance dans le domaine des énergies thermiques et épithermiques.

La vitesse de combustion est de 0,012 % par mois dans un débit de fluence neutronique égal à 10^{13} n/(cm² × s).

99 % du signal présente une période de 3,76 min, 1 % du signal est prompt.

Il y a en même temps une émission bêta avec une énergie de 2,6 MeV.

Un collectron vanadium présente une sensibilité relativement faible, une vitesse de combustion faible, il perturbe faiblement la densité locale de puissance, mais son signal est fortement retardé.

A.4.2 Caractéristiques des émetteurs cobalt

Le Co^{59} présente une interaction n-gamma avec une section efficace aux neutrons thermiques de 37 b et en parallèle une photo-réaction.

La vitesse de combustion est de 0,094 % par mois dans un débit de fluence neutronique égal à 10^{13} n/(cm² × s).

Le signal est prompt, mais nécessite une compensation pour les effets à long terme du fait de l'accumulation des isotopes radioactifs Co^{60} Co^{61} .

Un collectron cobalt présente une sensibilité relativement faible, une vitesse de combustion modérée, il perturbe faiblement la densité locale de puissance, et son signal est prompt.

A.4.3 Caractéristiques des émetteurs rhodium

Le Rh^{103} présente une réaction n-bêta avec une section efficace aux neutrons thermiques de 145 b avec une résonance à 1,25 eV.

La vitesse de combustion est de 0,39 % par mois dans un débit de fluence neutronique égal à 10^{13} n/(cm² × s).

92 % du signal présente une période de 42 s.

8 % du signal présente une période de 4,4 min.

Therefore, lifetime (t), in years is:

$$t = \frac{-\ln(N/N_0)}{\lambda + \sigma_{\text{eff}}\Phi_{\text{th}}}$$

A.4 Self-powered detector operating characteristics

The following information presents the characteristics of self-powered detectors most commonly used in nuclear power plants. This information is intended to serve as reference for the user of this publication in selecting the optimum SPND for specific uses for in-core instrumentation systems.

A.4.1 Vanadium emitter characteristics

V^{51} has an n-beta interaction with a thermal neutron cross-section of 4,9 b featuring a $1/v$ characteristic without resonances in the energy range of thermal/epithermal neutrons.

The burn-up rate is 0,012 % per month in a thermal neutron fluence rate of 10^{13} n/(cm² × s).

99 % of the signal has a half-life of 3,76 min, 1 % of the signal is prompt.

There is a parallel beta emission of 2,6 MeV.

An SPND with a vanadium emitter has a relatively low sensitivity, low burn-up rate and minimal perturbation of the local power density, but has a very long delayed signal.

A.4.2 Cobalt emitter characteristics

Co^{59} has an n-gamma interaction with a 37 b thermal neutron cross-section and a parallel gamma-photon reaction.

The burn-up rate is 0,094 % per month in a thermal neutron fluence rate of 10^{13} n/(cm² × s).

The signal is prompt, but requires long-term compensation due to build-up of radioactive isotopes Co^{60} and Co^{61} .

An SPND with a cobalt emitter has relatively low sensitivity, a moderate burn-up rate, low perturbation of the local power density and a prompt signal.

A.4.3 Rhodium emitter characteristics

Rh^{103} has an n-beta interaction with a 145 b cross-section for thermal neutrons and a resonance at 1,25 eV.

The burn-up rate is 0,39 % per month in a thermal neutron fluence rate of 10^{13} n/(cm² × s).

92 % of the signal has a half-life of 42 s.

8 % of the signal has a half-life of 4,4 min.

L'émission bêta a une énergie de 2,44 MeV.

Un collectron rhodium présente une sensibilité relativement élevée, une vitesse de combustion importante, il perturbe la densité locale de puissance, et son signal comporte deux composantes retardées.

A.4.4 Caractéristiques des émetteurs argent

L'Ag présente une réaction n-bêta avec une section efficace aux neutrons thermiques de 64,8 b avec quelques résonances dans la gamme de 5 eV à 134 eV.

La vitesse de combustion est de 0,16 % par mois dans un débit de fluence neutronique égal à 10^{13} n/(cm² × s).

66 % du signal initial présente une période de 24,4 s.

25 % du signal présente une période de 2,42 min.

9 % du signal est prompt.

Un collectron argent présente une sensibilité moyenne, une vitesse de combustion moyenne, la perturbation de la densité locale de puissance qu'il provoque est moyenne et son signal comporte deux composantes retardées.

A.4.5 Caractéristiques des émetteurs platine

Le Pt¹⁹⁵ présente une réaction n-gamma avec une section efficace aux neutrons thermiques de 24 b et en parallèle une réaction aux photons gammas.

La vitesse de combustion est de 0,03 % par mois dans un débit de fluence neutronique égal à 10^{13} n/(cm² × s).

Le signal est prompt et a deux composantes, une neutron et une gamma.

Un collectron platine est sensible à la fois aux neutrons et aux gammas avec 93 % du signal dû aux gammas et 7 % dû aux neutrons dans un environnement correspondant à celui d'un coeur de réacteur à eau légère.

Un collectron platine présente une sensibilité relativement faible, une vitesse de combustion faible, il perturbe peu la densité locale de puissance, et son signal est prompt.

A.4.6 Caractéristiques des émetteurs hafnium

Le HfO₂ présente une réaction n-gamma avec une section efficace aux neutrons thermiques de 115 b et en parallèle une réaction aux photons gammas.

La vitesse de combustion moyenne est de 0,3 % par mois dans un débit de fluence neutronique égal à 10^{13} n/(cm² × s).

96 % du signal est prompt, 4 % du signal est retardé comme rayonnement gamma provenant de produits de fission.

Un collectron hafnium présente une sensibilité relativement faible, une vitesse de combustion élevée, il perturbe la densité locale de puissance, et son signal est prompt.

The beta emission has an energy of 2,44 MeV.

An SPND with a rhodium emitter has a relatively high sensitivity and high burn-up rate, perturbs the local power density and has a (two-fold) delayed signal.

A.4.4 Silver emitter characteristics

Ag has a n-beta interaction with a 64,8 b cross-section for thermal neutrons and a few resonances in the range 5 eV – 134 eV.

The burn-up rate is 0,16 % per month in a thermal neutron fluence rate of 10^{13} n/(cm² × s).

66 % of the initial signal has a half-life of 24,4 s.

25 % of the signal has a half-life of 2,42 min.

9 % of the signal is a prompt signal.

An SPND with a silver emitter has an average sensitivity, average burn-up rate, average perturbation of local power density and a (two-fold) delayed signal.

A.4.5 Platinum emitter characteristics

Pt¹⁹⁵ has an n-gamma interaction with a 24 b thermal neutron cross-section and a parallel gamma-photon reaction.

The burn-up rate is 0,03 % per month in a thermal neutron fluence rate of 10^{13} n/(cm² × s).

The signal is prompt and has both neutron and gamma components.

An SPND with a platinum emitter is sensitive to both gamma and neutron radiation with 93 % of the signal current due to gamma fluence rate response and 7 % due to neutron fluence rate response in a typical light water reactor core radiation environment.

An SPND with a platinum emitter has relatively low sensitivity, a low burn-up rate, low perturbation of the local power density, and a prompt signal.

A.4.6 Hafnia emitter characteristics

HfO₂ has an n-gamma interaction with a 115 b thermal neutron cross-section and parallel gamma-photon reaction.

The average burn-up rate is 0,3 % per month in a thermal neutron fluence rate of 10^{13} n/(cm² × s).

96 % of the signal is prompt, 4 % of the signal is delayed as gamma-radiation from fission products.

An SPND with a hafnia emitter has relatively low sensitivity, a high burn-up rate, perturbs the local power density and has a prompt signal.

Tableau A.1 – Caractéristiques nucléaires des matériaux des émetteurs sélectionnés ¹⁾

Matériau émetteur	Isotope stable	Composition %	Section efficace b	nucléide produit	Période (demi vie)
Vanadium	$^{50}_{23}\text{V}$	0,24	100	$^{51}_{23}\text{V}$	Stable
	$^{51}_{23}\text{V}$	99,76	4,9	$^{52}_{23}\text{V}$	3,76 min
Cobalt	$^{59}_{27}\text{Co}$	100	37	$^{60}_{27}\text{Co}$	5,27 années
Rhodium	$^{103}_{45}\text{Rh}$	100	11 (8 %)	$^{104}_{45}\text{Rh}$	4,4 min
			135 (92 %)	$^{104}_{45}\text{Rh}$	42 s
Argent	$^{107}_{47}\text{Ag}$	51,82	35	$^{108}_{47}\text{Ag}$	2,42 min
	$^{109}_{47}\text{Ag}$	48,18	93	$^{110}_{47}\text{Ag}$	24,4 s
Hafnium	$^{174}_{72}\text{Hf}$	0,18	390	$^{175}_{72}\text{Hf}$	70 j
	$^{176}_{72}\text{Hf}$	5,20	15	$^{177\text{m}}_{72}\text{Hf}$	51,4 min
	$^{177}_{72}\text{Hf}$	18,50	380	$^{178\text{m}}_{72}\text{Hf}$	31 années
	$^{178}_{72}\text{Hf}$	27,14	75	$^{179\text{m}}_{72}\text{Hf}$	25,1 j
	$^{179}_{72}\text{Hf}$	13,75	65	$^{180\text{m}}_{72}\text{Hf}$	5,5 h
	$^{180}_{72}\text{Hf}$	35,23	14	$^{181\text{m}}_{72}\text{Hf}$	42,4 j
Platine	$^{192}_{78}\text{Pt}$	0,78	14	$^{193\text{m}}_{78}\text{Pt}$	4,3 j
	$^{194}_{78}\text{Pt}$	32,90	2	$^{195\text{m}}_{78}\text{Pt}$	4,1 j
	$^{195}_{78}\text{Pt}$	33,80	24	$^{196}_{78}\text{Pt}$	Stable
	$^{196}_{78}\text{Pt}$	25,30	1	$^{197\text{m}}_{78}\text{Pt}$	1,3 h
	$^{198}_{78}\text{Pt}$	7,22	4	$^{199}_{78}\text{Pt}$	30,8 min

¹⁾ Voir Lederer, C.M., J.M. Hollander, et I. Perlman: "Table of the Isotopes", 6ème édition, John Wiley and Sons, Inc., New York 1967

Table A.1 – Nuclear characteristics of selected emitter materials ¹⁾

Emitter material	Stable isotope	Composition %	Cross-section b	Resulting nuclide	Half-life
Vanadium	$^{23}\text{V}^{50}$	0,24	100	$^{23}\text{V}^{51}$	Stable
	$^{23}\text{V}^{51}$	99,76	4,9	$^{23}\text{V}^{52}$	3,76 min
Cobalt	$^{27}\text{Co}^{59}$	100	37	$^{27}\text{Co}^{60}$	5,27 years
Rhodium	$^{45}\text{Rh}^{103}$	100	11 (8 %)	$^{45}\text{Rh}^{104}$	4,4 min
			135 (92 %)	$^{45}\text{Rh}^{104}$	42 s
Silver	$^{47}\text{Ag}^{107}$	51,82	35	$^{47}\text{Ag}^{108}$	2,42 min
	$^{47}\text{Ag}^{109}$	48,18	93	$^{47}\text{Ag}^{110}$	24,4 s
Hafnia	$^{72}\text{Hf}^{174}$	0,18	390	$^{72}\text{Hf}^{175}$	70 d
	$^{72}\text{Hf}^{176}$	5,20	15	$^{72}\text{Hf}^{177\text{m}}$	51,4 min
	$^{72}\text{Hf}^{177}$	18,50	380	$^{72}\text{Hf}^{178\text{m}}$	31 years
	$^{72}\text{Hf}^{178}$	27,14	75	$^{72}\text{Hf}^{179\text{m}}$	25,1 d
	$^{72}\text{Hf}^{179}$	13,75	65	$^{72}\text{Hf}^{180\text{m}}$	5,5 h
	$^{72}\text{Hf}^{180}$	35,23	14	$^{72}\text{Hf}^{181\text{m}}$	42,4 d
Platinum	$^{78}\text{Pt}^{192}$	0,78	14	$^{78}\text{Pt}^{193\text{m}}$	4,3 d
	$^{78}\text{Pt}^{194}$	32,90	2	$^{78}\text{Pt}^{195\text{m}}$	4,1 d
	$^{78}\text{Pt}^{195}$	33,80	24	$^{78}\text{Pt}^{196}$	Stable
	$^{78}\text{Pt}^{196}$	25,30	1	$^{78}\text{Pt}^{197\text{m}}$	1,3 h
	$^{78}\text{Pt}^{198}$	7,22	4	$^{78}\text{Pt}^{199}$	30,8 min

¹⁾ See Lederer, C.M., J.M. Hollander, and I. Perlman: "Table of the Isotopes", 6th Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York 1967

Tableau A.2 – Exemples de spécifications pour les collectrons typiques utilisés dans les réacteurs

	Matériaux émetteurs					
	Vanadium	Cobalt	Rhodium	Argent	Hafnium (HfO ₂)	Platine
Diamètre émetteur mm	2,0	2,0	0,46	0,65	1,24	0,51
Longueur émetteur mm	100	210	400	7000	7000	3050
Nature de l'isolant	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	MgO	Al ₂ O ₃
Matériau du collecteur	Inconel	Inconel	Inconel	Inox	Inox	Inconel
Diamètre du collecteur mm	3,5	3,5	1,57	3,0	3,0	1,6
Sensibilité aux neutrons thermiques A/nv	$4,8 \times 10^{-21}$	$5,4 \times 10^{-21}$	$3,6 \times 10^{-20}$	42×10^{-20}	$7,9 \times 10^{-20}$	$2,5 \times 10^{-22}$
Sensibilité aux gammas Co ⁶⁰ A/(Gy × h)	$4,0 \times 10^{-19}$	$5,6 \times 10^{-19}$	$7,0 \times 10^{-19}$	$13,5 \times 10^{-18}$	$2,8 \times 10^{-18}$	$3,4 \times 10^{-18}$
Résistance d'isolement Ω						
20 °C	>10 ¹²	>10 ¹²	>10 ¹²	>10 ⁹	>10 ¹⁰	>10 ¹²
350 °C	>10 ⁸	>10 ⁸	>10 ⁸	>10 ⁷	>10 ⁸	>10 ⁸
Temps de réponse (0-63 %)	5,5 min	Prompt	1,1 min	0,5 min	Prompt	Prompt
Vitesse de combustion % par mois sous 10 ¹³ nv	0,01	0,09	0,39	0,16	0,30	0,03

A.5 Assemblages de collectrons

La description suivante et les figures associées montrent les configurations des assemblages utilisés dans les réacteurs à eau légère et les réacteurs à eau lourde à travers le monde. Ces configurations ne sont qu'une partie des combinaisons possibles de collectrons et des géométries utilisées pour générer les signaux pour les applications destinées aux carte de flux, au contrôle et à la protection du cœur.

A.5.1 Assemblages de collectrons pour réacteurs à eau légère

A.5.1.1 Assemblage typique de collectrons rhodium pour réacteur à eau pressurisée (montage par le bas)

Un assemblage typique de collectrons pour un réacteur à eau pressurisée (montage par le bas) est représenté sur la figure A.1. L'assemblage comprend cinq collectrons rhodium (émetteurs équidistants répartis sur toute la hauteur du cœur), un détecteur de bruit de fond (qui couvre la hauteur totale du cœur) et un thermocouple placé en sortie du cœur. Tous les éléments sensibles sont contenus dans une enveloppe extérieure en Inconel 600. Un tube de calibration, une fermeture soudée et un boîtier de connexion multiprise complète l'assemblage. La longueur totale de l'assemblage est de 35 m environ.

A.5.1.2 Assemblage typique de collectrons rhodium pour réacteurs VVER (montage par le haut)

Un assemblage typique de collectrons pour un réacteur VVER est représenté sur la figure A.2. L'assemblage comprend quatre collectrons rhodium, un détecteur vanadium qui couvre la totalité de la hauteur du cœur, un détecteur de bruit de fond sur la hauteur totale du cœur et un thermocouple placé à l'entrée du cœur. Tous les éléments sensibles sont contenus dans une enveloppe extérieure en Inconel 600. Une terminaison, une embase soudée et un coffret électrique multiprise complètent l'assemblage dont la longueur totale est de 10 m environ.