

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la  
Propriété Intellectuelle  
Bureau international



(43) Date de la publication internationale  
26 octobre 2023 (26.10.2023)

WIPO | PCT

(10) Numéro de publication internationale  
**WO 2023/203247 A1**

(51) Classification internationale des brevets :  
G01T 1/16 (2006.01) G01T 1/169 (2006.01)  
G01T 1/36 (2006.01)

(74) Mandataire : INNOV-GROUP ; 310 avenue Berthelot,  
69372 LYON Cedex 08 (FR).

(21) Numéro de la demande internationale :  
PCT/EP2023/060551

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(22) Date de dépôt international :  
22 avril 2023 (22.04.2023)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :  
FR2203789 23 avril 2022 (23.04.2022) FR

(71) Déposant : COMMISSARIAT A L'ENERGIE  
ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES  
[FR/FR] ; BAT LE PONANT 25 RUE LEBLANC, 75015  
PARIS (FR).

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasiatique (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK,

(72) Inventeurs : VENARA, Julien ; 237 Chemin de la Grande  
Vigne, 30131 PUJAUT (FR). MAHE, Charly ; 285B Ave-  
nue de la Gare, 26230 CHAMARET (FR).

(54) Title: DEVICE AND METHOD FOR CHARACTERIZING A DEPTH OF ACTIVITY OF A RADIONUCLIDE IN A SOLID MEDIUM

(54) Titre : DISPOSITIF ET PROCÉDE DE CARACTERISATION D'UNE PROFONDEUR D'ACTIVITE D'UN RADIONUCLEIDE DANS UN MILIEU SOLIDE

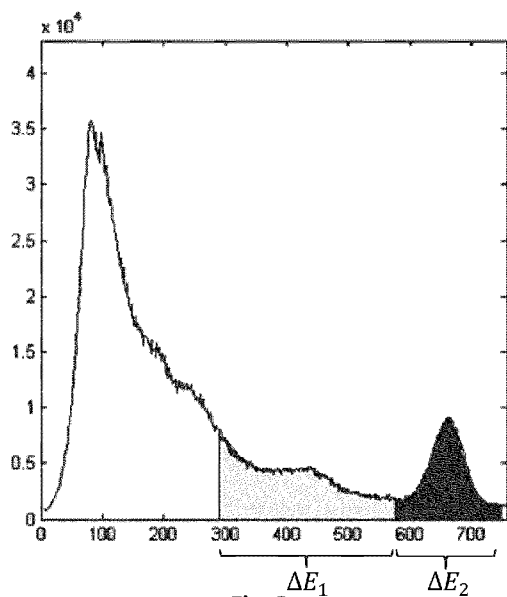


Fig. 3

(57) Abstract: The invention is a method for determining a depth at which a gamma-emitting radionuclide lies in a solid medium, the latter possibly being concrete or earth. The method is based on a measurement of a spectrum of the gamma radiation emitted by the radionuclide and emanating from a surface bounding the solid medium. Two energy bands are selected in the spectrum. On the basis of spectral values in each energy band, a calibration function allowing the depth to be estimated may be applied. The calibration function is established beforehand based on spectral models.

(57) Abrégé : L'invention est un procédé de détermination d'une profondeur selon laquelle s'étend un radionucléide, émetteur gamma, dans un milieu solide, ce dernier pouvant être du béton ou de la terre. Le procédé est basé sur une mesure d'un spectre du rayonnement gamma émis par le radionucléide et émanant d'une surface délimitant le milieu solide. Deux bandes d'énergie sont sélectionnées sur le spectre. A partir de valeurs spectrales dans chaque bande d'énergie, on peut appliquer une fonction de calibration permettant une estimation de la profondeur. La fonction de calibration est préalablement établie sur la base de modélisations spectrales.

WO 2023/203247 A1

SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ,  
GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Publié:**

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

## Description

Titre : DISPOSITIF ET PROCEDE DE CARACTERISATION D1 UNE PROFONDEUR D1 ACTIVITE D1 UN RADIONUCLEIDE DANS UN MILIEU SOLIDE

5 **DOMAINE TECHNIQUE**

Le domaine technique de l'invention est la caractérisation d'une profondeur de l'activité d'un radionucléide dans un milieu solide, en particulier une paroi de béton.

**ART ANTERIEUR**

10 Au cours de l'exploitation d'une installation nucléaire, les structures du génie civil peuvent être contaminées par des radionucléides. Lorsque les structures sont formées de béton, certains radionucléides peuvent migrer, en particulier lorsqu'ils se trouvent dans une phase liquide. De ce fait, l'activité due à la contamination est répartie de façon inhomogène dans une structure béton. Il est généralement admis que l'activité est répartie selon un gradient décroissant avec l'épaisseur de la structure : plus on est proche de la surface exposée à la contamination, plus  
15 l'activité est élevée.

Lors des opérations de démantèlement, il est utile d'estimer les niveaux d'activité résiduels dans les structures en béton d'une installation. Cela permet d'établir des scénarios des travaux à effectuer, ainsi que de prévoir la quantité des déchets nucléaires qui seront générés. On comprend que cela suppose une estimation de la profondeur de migration de la contamination  
20 à travers le béton.

A l'heure actuelle, la principale méthode d'estimation d'une telle profondeur repose sur des prélèvements d'échantillons, suivis par des analyses destructives en laboratoire. Cependant, la réalisation de prélèvements, de type carottage, peut être fastidieuse. Une autre limitation est la représentativité statistique des échantillons prélevés.

25 La publication Potapov V.N et al «Reliably Implemented Non-destructive Spectrometric Method for the Characterization of Volume Contamination of Objects at Nuclear Industry», IEEE 2019 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, décrit une méthode non destructive permettant une estimation de la profondeur de migration de la contamination dans de la terre contaminée ou dans du béton. La méthode est basée sur le recours à la spectrométrie  
30 gamma. L'estimation de la profondeur de contamination, sur la base de mesures non destructives, est particulièrement intéressante. La mise en œuvre est considérablement

simplifiée par rapport à la réalisation de prélèvements. Cela permet de multiplier le nombre de mesures, et d'aboutir à une connaissance plus exhaustive de l'état radiologique du génie civil.

Les inventeurs ont constaté que la méthode précédemment décrite pouvait être améliorée, en particulier lors de la phase de calibration ou lors de la mise en œuvre sur le terrain. L'invention  
5 présentée ci-après répond à ces besoins d'amélioration.

### **EXPOSE DE L'INVENTION**

Un premier objet de l'invention est un procédé d'estimation d'une profondeur selon laquelle s'étend un radionucléide dans un milieu solide, à partir d'une surface, le milieu solide étant délimité par la surface, le radionucléide émettant un rayonnement gamma à au moins une  
10 énergie d'émission, le procédé comportant :

- a) disposition d'un détecteur spectrométrique face à la surface du milieu solide, et mesure, par le détecteur spectrométrique d'un spectre d'énergie du rayonnement gamma, émis par le radionucléide et émanant de la surface, le spectre mesuré comportant un nombre d'impulsions détectées par le détecteur pour différentes valeurs  
15 d'énergie, le spectre d'énergie comportant un pic à l'énergie d'émission ;
- b) prise en compte d'une première et d'une deuxième bandes d'énergie, préalablement définies, la première bande d'énergie comportant des valeurs d'énergie inférieures à la deuxième bande d'énergie, la deuxième bande d'énergie comportant le pic à l'énergie d'émission ;
- 20 - c) à partir du spectre mesuré, détermination d'une première valeur spectrale à la première bande d'énergie et d'une deuxième valeur spectrale à la deuxième bande d'énergie ;
- d) application  
- d'un premier coefficient de calibration à la première valeur spectrale pour obtenir une première valeur spectrale calibrée ;
- 25 - d'un deuxième coefficient de calibration à la deuxième valeur spectrale, pour obtenir une deuxième valeur spectrale calibrée ;  
chaque coefficient de calibration correspondant à un ratio, dans chaque bande d'énergie, entre une activité prédéterminée du milieu solide et une estimation d'une valeur spectrale correspondant à ladite activité prédéterminée ;
- 30 - e) calcul d'un indicateur de comparaison à partir d'une comparaison de la première valeur spectrale calibrée et de la deuxième valeur spectrale calibrée résultant de d) ;
- f) application d'une fonction de calibration à l'indicateur de comparaison résultant de e), de façon à estimer la profondeur selon laquelle s'étend le radionucléide dans le milieu

solide, la fonction de calibration étant préalablement établie, en considérant une activité du radionucléide décroissante en fonction de la profondeur ;

le procédé étant caractérisé en ce que lors de l'étape d), le premier coefficient de calibration et le deuxième coefficient de calibration sont déterminés, dans chaque bande d'énergie, par  
5 une modélisation numérique d'un spectre détecté par le détecteur spectrométrique, le milieu solide étant considéré, lors de la modélisation, comme ayant ladite activité prédéterminée.

La première valeur spectrale et la deuxième valeur spectrale sont un nombre d'impulsions ou un taux de comptage respectivement dans la première bande d'énergie et dans la deuxième bande d'énergie.

10 L'activité unitaire peut être une activité surfacique uniforme ou une activité massique uniforme dans le milieu analysé ou une activité prédéterminée répartie selon un gradient d'activité prédéfini.

Le procédé peut comprendre, préalablement à l'étape c) :

- prise en compte d'un spectre représentatif du milieu solide ;
- 15 - prise en compte d'au moins une bande d'énergie prédéterminée correspondant à une énergie d'émission d'un radionucléide naturel, présent naturellement dans le milieu solide ;
- à partir d'une valeur spectrale du spectre représentatif dans ladite bande d'énergie prédéterminée, estimation d'une activité du radionucléide naturel dans le milieu solide ;
- 20 - estimation d'une contribution du radionucléide naturel dans le spectre mesuré lors de l'étape a) ;
- correction du spectre mesuré lors de l'étape a), de façon à retirer la contribution du radionucléide naturel, au moins dans la première bande d'énergie.

Le spectre représentatif du milieu solide peut être

- 25 - le spectre mesuré lors de l'étape a) ;
- ou un spectre mesuré par un détecteur spectrométrique différent du détecteur spectrométrique mis en œuvre lors de l'étape a) ;
- ou un spectre mesuré par le détecteur spectrométrique mis en œuvre lors de l'étape a).

Le procédé peut comporter, préalablement à l'étape d) :

- 30 - détermination d'une densité du milieu solide examiné ;
- en fonction de la densité du milieu solide examiné, sélection du premier coefficient de calibration parmi des premiers coefficients de calibration respectivement déterminés pour différentes densités.

Le procédé peut comporter, préalablement à l'étape f) :

- détermination d'une densité du milieu solide examiné ;
- en fonction de la densité du milieu solide examiné, sélection de la fonction de calibration parmi des fonctions de calibration respectivement déterminées pour différentes densités.

5 Selon un mode de réalisation, la détermination de la densité du milieu solide examiné comporte les sous-étapes suivantes :

- prise en compte d'un spectre représentatif du milieu solide ;
- sélection d'au moins deux bandes d'énergies correspondant à des énergies d'émission d'un même radionucléide, notamment naturel, présent naturellement dans le milieu

10

- solide ;
- estimation d'activités du radionucléide naturel à partir d'une valeur spectrale du spectre représentatif respectivement dans chaque bande d'énergie sélectionnée, chaque estimation d'activité étant effectuée en prenant en compte une densité du milieu solide ;
- détermination de la densité minimisant un écart entre les activités du radionucléide

15

estimées à partir des bandes d'énergie sélectionnées.

Le spectre représentatif du milieu solide peut être :

- le spectre mesuré lors de l'étape a) ;
- ou un spectre mesuré par un détecteur spectrométrique différent du détecteur spectrométrique mis en œuvre lors de l'étape a) ;

20

- ou un spectre mesuré par le détecteur spectrométrique mis en œuvre lors de l'étape a).

Le procédé peut comporter :

- g) multiplication de la deuxième valeur spectrale calibrée, résultant de e), par une fonction de correction de façon à estimer une activité du milieu solide, la fonction de correction étant préalablement établie pour différentes valeurs de l'indicateur de

25

comparaison.

L'indicateur de comparaison peut être un ratio ou une différence entre la première valeur spectrale calibrée et la deuxième valeur spectrale calibrée.

Le milieu solide peut être du béton ou de la terre ou du sable.

Un deuxième objet de l'invention est un dispositif destiné à estimer d'une profondeur selon laquelle s'étend un radionucléide dans un milieu solide, à partir d'une surface, le milieu solide étant délimité par la surface, le dispositif comportant :

30

- un détecteur spectrométrique, configuré pour mesurer un spectre d'un rayonnement gamma émanant de la surface ;

- une unité de traitement, programmée pour mettre en œuvre les étapes b) à f), et éventuellement l'étape g), d'un procédé selon le premier mode de réalisation à partir du spectre mesuré par le détecteur spectrométrique.

L'invention sera mieux comprise à la lecture de l'exposé des exemples de réalisation présentés, dans la suite de la description, en lien avec les figures listées ci-dessous.

### **FIGURES**

- La figure 1 schématise les principaux composants d'un dispositif selon l'invention.
- La figure 2 montre les principales étapes d'un procédé de mise en œuvre de l'invention.
- La figure 3 illustre deux bandes d'énergies appliquées à un spectre.
- 10 La figure 4A montre un spectre de l'activité naturelle d'une paroi de béton.
- La figure 4B est un spectre de l'activité d'une paroi de béton faiblement contaminée en  $^{137}\text{Cs}$ .
- La figure 5A montre une évolution d'une première grandeur spectrale calibrée et d'une deuxième grandeur spectrale calibrée (axe des ordonnées) en fonction de la profondeur d'activité (axe des abscisses).
- 15 La figure 5B représente une fonction de calibration (courbe 1) et une fonction de correction (courbe 2).
- La figure 6A montre un dispositif de mesure dont le détecteur est un cristal de Germanium refroidi.
- La figure 6B montre des modélisations d'un spectre d'une paroi de béton de densité  $2.3 \text{ g.cm}^{-3}$  pour une même activité totale de  $^{137}\text{Cs}$  et différentes profondeurs de l'activité.
- 20 La figure 6C montre des modélisations d'un spectre d'une paroi de béton baryté de densité  $3.35 \text{ g.cm}^{-3}$  pour une même activité totale de  $^{137}\text{Cs}$  et différentes profondeurs de l'activité.
- La figure 6D montre des modélisations d'un spectre d'une paroi de béton de densité  $2.3 \text{ g.cm}^{-3}$  pour une même activité totale de  $^{60}\text{Co}$  et différentes profondeurs de l'activité.
- 25 La figure 6E montre des modélisations d'un spectre d'une paroi de béton baryté de densité  $3.35 \text{ g.cm}^{-3}$  pour une même activité totale de  $^{60}\text{Co}$  et différentes profondeurs de l'activité.
- La figure 7A montre des fonctions de calibration établies en prenant en compte deux densités différentes ( $2.3 \text{ g.cm}^{-3}$  et  $3.35 \text{ g.cm}^{-3}$ ) et une activité de  $^{137}\text{Cs}$ .
- La figure 7B montre des fonctions de calibration établies en prenant en compte deux densités
- 30 différentes ( $2.3 \text{ g.cm}^{-3}$  et  $3.35 \text{ g.cm}^{-3}$ ) et une activité de  $^{60}\text{Co}$ .
- La figure 7C montre des fonctions de correction établies en prenant en compte deux densités différentes ( $2.3 \text{ g.cm}^{-3}$  et  $3.35 \text{ g.cm}^{-3}$ ) et une activité de  $^{137}\text{Cs}$ .

La figure 7D montre des fonctions de correction établies en prenant en compte deux densités différentes ( $2.3 \text{ g.cm}^{-3}$  et  $3.35 \text{ g.cm}^{-3}$ ) et une activité de  $^{60}\text{Co}$ .

#### **EXPOSE DE MODES DE REALISATION PARTICULIERS**

La figure 1 décrit un dispositif 1 adapté à une mise en œuvre de l'invention. Le dispositif  
5 comporte un détecteur spectrométrique 10, destiné à être disposé face à une surface S délimitant un milieu solide M. Le milieu solide est un milieu susceptible d'avoir été contaminé par un radionucléide. Il peut notamment s'agir d'un milieu comportant du béton ou de la terre ou du sable. Un objectif de l'invention est d'estimer une épaisseur  $Z_0$  du milieu susceptible de contenir une majeure partie de l'activité. Par majeure partie, on entend plus de 80% ou plus de  
10 90% de l'activité du radionucléide.

Le détecteur spectrométrique 10 est disposée à une distance D de la surface S du milieu M. Il s'agit d'un détecteur sensible au rayonnement X ou gamma. Ainsi, la mise en œuvre de l'invention suppose que le radionucléide soit émetteur X ou gamma. Selon le type d'installation, le radionucléide peut être, de façon non limitative,  $^{137}\text{Cs}$  (par exemple dans les installations de  
15 retraitement du combustible) ou  $^{60}\text{Co}$  (par exemple dans les réacteurs nucléaires).

Lorsqu'un photon gamma interagit dans le détecteur 10, ce dernier génère une impulsion dont l'amplitude dépend, de préférence linéairement, de l'énergie libérée par le photon au cours de son interaction dans le détecteur. Le détecteur 10 est relié à un circuit électronique de spectrométrie 12. Durant une période de mesure, pouvant durer quelques secondes à quelques  
20 minutes ou dizaines de minutes, les impulsions générées par le détecteur 10 sont dénombrées et classées en fonction de leur amplitude, de façon à former un spectre d'amplitude. En utilisant une fonction d'étalonnage en énergie, établissant une relation entre l'amplitude de l'impulsion et l'énergie libérée dans le détecteur, on obtient un spectre en énergie. D'une façon générale, le spectre en énergie est discrétisé en différents canaux d'énergie  $k$ , le nombre  $K$  de canaux  
25 étant généralement compris entre plusieurs centaines et plusieurs milliers.

Ainsi, le dispositif 1 permet de former un spectre en énergie des photons émis par le milieu M. Lorsqu'un radionucléide émetteur gamma est présent dans ou sur la paroi, selon une quantité détectable, il produit, dans le spectre mesuré, une signature spectrale comportant un ou plusieurs pics dont l'énergie est connue. L'énergie de chaque pic correspond à l'énergie des  
30 photons émis par le radionucléide. Les énergies d'émission des principaux radionucléides sont connues et disponibles dans des bases de données nucléaires.

Dans l'exemple représenté sur la figure 1, le détecteur est un détecteur scintillateur, de type NaI couplé à un convertisseur photons de scintillation / porteurs de charges. D'autres types de détecteurs sont utilisables, par exemple un détecteur scintillateur LaBr<sub>3</sub>. De façon avantageuse, on peut mettre en œuvre un détecteur semi-conducteur, par exemple Ge, ce qui permet  
5 d'obtenir des spectres dont la résolution en énergie est plus favorable. Le recours à un détecteur Germanium est décrit par la suite, en lien avec les figures 6A à 6E.

Sur la figure 1, on a également schématisé un gradient de l'activité  $Act(z)$  en fonction de la profondeur  $z$ .

Le spectre mesuré peut comporter une composante de bruit de fond, qui correspond au fond  
10 radiologique auquel est exposé le détecteur 10. Le bruit de fond peut avoir plusieurs composantes.

Une première composante est le bruit de fond naturel, dû à la radioactivité naturelle du milieu examiné. C'est notamment le cas lorsque le milieu est formé de béton ou de terre. Le bruit de fond naturel provient d'isotopes radioactifs, émetteurs gamma, naturellement présents le  
15 milieu M. Un émetteur gamma naturel usuellement rencontré est <sup>40</sup>K, sachant que d'autres émetteurs gamma, résultant des chaînes de désintégration de <sup>238</sup>U ou de <sup>232</sup>Th peuvent être rencontrés. La prise en compte du bruit de fond naturel constitue un aspect intéressant de l'invention, décrit par la suite.

Une deuxième composante est le bruit de fond induit par le voisinage de la paroi contrôlée. Afin  
20 de réduire la contribution du bruit de fond « de voisinage », le détecteur est usuellement entouré par un blindage 14. Le blindage forme un collimateur délimitant un angle d'ouverture de façon à limiter le champ d'observation du détecteur 10. Cependant, le blindage n'agit pas en tout ou rien et certains photons, émis dans le voisinage du détecteur, peuvent traverser le blindage et être détectés par le détecteur. Et cela notamment lorsque le bruit de fond de  
25 voisinage est plus intense que le signal émis par le milieu M, dans le champ d'observation du détecteur. Le blindage 14 peut comporter un bouchon 14' amovible, configuré pour obturer le champ d'observation du détecteur 10. Dans ce cas, le bruit de fond de voisinage est pris en compte en effectuant deux mesures successives avec et sans bouchon. La mesure effectuée avec le bouchon est alors considérée comme représentative du bruit de fond de voisinage. Elle peut  
30 ainsi être soustraite de la mesure effectuée sans bouchon.

Le dispositif 1 comporte une unité de traitement 20, destinée à effectuer un traitement de chaque spectre résultant du circuit de spectrométrie 12. L'unité de traitement 20 peut par

exemple comporter un microprocesseur. L'unité de traitement est programmée pour mettre en œuvre certaines étapes du procédé décrites par la suite, en lien avec la figure 2.

La figure 2 représente les principales étapes de mise en œuvre du procédé, qui sont à présent décrites.

- 5 Etape 100 : disposition du dispositif 1 face au milieu à analyser. Dans cet exemple, le milieu solide est une paroi de béton.

Etape 110 : acquisition d'un spectre de bruit de fond de voisinage. Cette étape est optionnelle. Au cours de cette étape, comme précédemment décrit, le bouchon 14' obture le champ d'observation du détecteur. On acquiert un spectre représentatif du bruit de fond de voisinage.

- 10 Etape 120 : acquisition d'un spectre de mesure. Au cours de cette étape, on acquiert un spectre du rayonnement gamma détecté par le détecteur 10, le collimateur étant ouvert. En fonction de l'activité de la paroi et de la sensibilité du détecteur 10, la durée d'acquisition peut être comprise entre quelques dizaines de secondes et quelques dizaines de minutes.

- 15 Etape 130 : prise en compte du bruit de fond de voisinage. Cette étape est mise en œuvre lorsqu'on dispose d'un spectre de bruit de fond, résultant de l'étape 110. Au cours de cette étape, le spectre du bruit de fond de voisinage est soustrait du spectre de mesure, de façon à obtenir un spectre corrigé. De préférence, les durées d'acquisition du spectre de mesure (étape 120) et du spectre de bruit de fond de voisinage (étape 110) sont identiques. A défaut, les spectres sont recalés de façon à correspondre à une même durée d'acquisition.

- 20 Suite à l'étape 120 ou à l'éventuelle étape 130, on dispose d'un spectre d'énergie du rayonnement gamma émanant de la surface. Dans la suite de la description, ce spectre est désigné spectre d'intérêt. Il s'agit soit du spectre résultant de l'étape 120, soit du spectre corrigé résultant de l'étape 130.

Etape 140 : Sélection de bandes d'énergie

- 25 Au cours de cette étape, on sélectionne deux bandes d'énergies différentes dans le spectre d'intérêt. Une partie de l'invention est basée sur une évolution différente du contenu du spectre d'intérêt dans deux bandes d'énergies différentes, en fonction de la profondeur de contamination. Chaque bande d'énergie a été déterminée au cours d'une phase préalable de calibration 70, décrite par la suite.

- 30 Une première bande d'énergie  $\Delta E_1$  s'étend de part et d'autre d'une zone spectrale correspondant au front Compton. La largeur de la première bande d'énergie  $\Delta E_1$  dépend de la

résolution en énergie du détecteur, l'énergie maximale de la bande d'énergie  $\Delta E_1$  pouvant correspondre à l'énergie minimale de la bande d'énergie  $\Delta E_2$ . Elle s'étend généralement sur quelques centaines de keV. Une particularité de la première bande d'énergie est que la valeur spectrale évolue peu avec la profondeur de la contamination. Par valeur spectrale, on entend le nombre d'impulsions détectées, dont l'énergie appartient à la première bande d'énergie. Le nombre d'impulsions détectées est usuellement désigné « nombre de coups ».

Sur la figure 3, on a représenté un spectre, obtenu par un détecteur scintillateur NaI de volume 1 pouce par 1 pouce, simulé à l'aide d'un code de calcul de transport de particules (code MCNP). Le détecteur est disposé face à une paroi de béton délimité par une surface S, et comportant une activité de  $^{137}\text{Cs}$  dont le gradient, selon la profondeur  $z$ , est modélisé par une fonction exponentielle décroissante. Sur la figure 3, la première bande d'énergie  $\Delta E_1$  s'étend entre 290 keV et 600 keV.

La première bande d'énergie  $\Delta E_1$  est formée par des interactions ayant deux origines :

- des interactions correspondant à la diffusion Compton, dans le détecteur, de photons gamma non ou faiblement atténués par la paroi de béton : ces interactions forment une première composante du spectre dans la première bande d'énergie  $\Delta E_1$ . Sur la figure 1, on a représenté de telles interactions par des flèches en traits pleins.
- des interactions correspondant à une absorption, dans le détecteur, par effet photoélectrique, de photons gamma ayant diffusé, selon des angles de diffusion compris entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$  par la paroi de béton : ces interactions forment une deuxième composante du spectre dans la première bande d'énergie  $\Delta E_1$ . Sur la figure 1, on a représenté une telle interaction par une flèche en pointillés.

En présence d'une faible profondeur de contamination, la première composante est prédominante. En présence d'une profondeur élevée de contamination, la deuxième composante devient prédominante. Ainsi, on considère que le contenu spectral dans la première bande d'énergie  $\Delta E_1$  est faiblement dépendant, par exemple à  $\pm 20\%$ , de la profondeur de contamination.

La première bande d'énergie  $\Delta E_1$  peut être définie préalablement et être optimisée par des modélisations de spectres détectés par le détecteur en considérant différents gradients d'activité dans la paroi et, pour un même gradient d'activité, différentes profondeurs de contamination. Cet aspect est décrit par la suite en lien avec les figures 6A à 6E.

Une deuxième bande d'énergie  $\Delta E_2$  comporte une énergie d'émission du radionucléide. On sait que, sous réserve d'un taux d'embranchement suffisant, chaque énergie d'émission d'un radionucléide se traduit par l'apparition, sur le spectre, d'un pic, dit pic d'énergie totale. La deuxième bande d'énergie  $\Delta E_2$  correspond à tout ou partie du pic d'énergie totale. En fonction

5 de la résolution en énergie du détecteur, la deuxième bande d'énergie  $\Delta E_2$  est plus ou moins large. De préférence, la deuxième bande d'énergie  $\Delta E_2$  est centrée sur l'énergie d'émission du radionucléide. Contrairement à la première bande d'énergie, le contenu spectral, dans la deuxième bande d'énergie, varie fortement en fonction de la profondeur de contamination. Cela est dû à l'absorption photoélectrique, dans le milieu solide M, des photons émis à l'énergie

10 d'émission.

Dans l'exemple représenté sur la figure 3, la deuxième bande d'énergie  $\Delta E_2$  s'étend de part et d'autre de l'énergie d'émission de  $^{137}\text{Cs}$ , soit 662 keV. Dans cet exemple, la deuxième bande d'énergie  $\Delta E_2$  s'étend entre 577 keV et 747 keV.

De préférence, la première bande d'énergie et la deuxième bande d'énergie ne se recouvrent

15 pas, ou faiblement. La première bande d'énergie peut s'étendre entre une première borne minimale et une première borne maximale. La deuxième bande d'énergie peut s'étendre entre une deuxième borne minimale et une deuxième borne maximale. La deuxième borne minimale est supérieure ou égale à la première borne maximale.

Suite à l'étape 140, on dispose d'un premier nombre d'impulsions  $N_1$  dans la première bande

20 d'énergie  $\Delta E_1$  et d'un deuxième nombre d'impulsions  $N_2$  dans la deuxième bande d'énergie  $\Delta E_2$ . Les nombres d'impulsions sont généralement exprimés par unité de temps, auquel cas il s'agit de taux de comptage : nombre d'impulsions détectées par seconde.

Dans la suite de la description, le terme valeur spectrale désigne un nombre d'impulsion, ou un nombre d'impulsion par unité de temps, dans une bande d'énergie du spectre. Suite à l'étape

25 140, on dispose d'une première valeur spectrale  $N_1$  et d'une deuxième valeur spectrale  $N_2$ .

Etape 150 : prise en compte de l'activité naturelle. Cette étape est optionnelle mais elle est avantageuse en particulier pour les faibles niveaux de contaminations du milieu M.

La méthode est destinée à être utilisée sur des matériaux tels que le béton ou de la terre. Ce type de matériau est susceptible de comporter des radionucléides naturels, dont certains sont

30 des émetteurs gamma. La présence de ces derniers peut induire une erreur de mesure. En effet, la quantité de radionucléides naturels peut avoir une influence sur la première valeur spectrale

$N_1$ . Afin d'améliorer la précision de la mesure, la contribution des isotopes naturels émetteurs gamma, notamment dans la première bande d'énergie  $\Delta E_1$ , doit être quantifiée et retirée.

De la même façon, la présence des radionucléides naturels peut avoir une influence sur la deuxième valeur spectrale  $N_2$ . Ainsi, il est préférable que la contribution des isotopes naturels émetteurs gamma, dans la deuxième bande d'énergie  $\Delta E_2$ , soit quantifiée et retirée.

Les principaux émetteurs naturels peuvent aisément être identifiés par leurs pics photoélectriques d'émission. Il s'agit de descendants du  $^{232}\text{Th}$ , de  $^{238}\text{U}$ . Il s'agit également du  $^{40}\text{K}$ .

La prise en compte de la radioactivité naturelle correspond à des sous-étapes 151 à 154. Ces étapes sont effectuées en prenant en compte un spectre représentatif  $Sp'$  du volume examiné. Le spectre représentatif peut être le spectre acquis  $Sp$  lors de l'étape 120 ou un spectre différent, par exemple acquis avec le même détecteur et une durée d'acquisition plus longue, de façon à obtenir une quantification plus précise de l'activité naturelle. Le spectre représentatif est effectué sur la paroi examinée ou sur une paroi considérée comme représentative de la paroi examinée. Le spectre représentatif peut également être acquis par un détecteur différent.

Sous-étape 151: Identification, dans le spectre représentatif  $Sp'$ , de pics d'émission correspondant à des descendants de  $^{232}\text{Th}$  et de  $^{238}\text{U}$  ou de  $^{40}\text{K}$ .

Le tableau suivant énumère des radionucléides naturels (première colonne) et leurs descendants émetteurs gamma (deuxième colonne), ainsi que leurs énergies d'émission (troisième colonne - keV) et les taux d'embranchement (quatrième colonne - %). Cette liste est non exhaustive. Seules les raies d'énergie de plus forte intensité sont prises en compte.

Radionucléide père	Descendant émetteur $\gamma$	keV	%
$^{232}\text{Th}$	$^{212}\text{Pb}$	238.63	43.5
$^{238}\text{U}$	$^{214}\text{Pb}$	295.22	18.29
$^{232}\text{Th}$	$^{228}\text{Ac}$	338.37	12.01
$^{238}\text{U}$	$^{214}\text{Pb}$	351.93	35.35
$^{232}\text{Th}$	$^{208}\text{Tl}$	583.19	85.10
$^{238}\text{U}$	$^{214}\text{Bi}$	609.31	48.89
$^{232}\text{Th}$	$^{228}\text{Ac}$	911.32	29
$^{232}\text{Th}$	$^{228}\text{Ac}$	969.16	17.46
$^{238}\text{U}$	$^{214}\text{Bi}$	1120.28	15.5
$^{40}\text{K}$		1460.82	10.66
$^{238}\text{U}$	$^{214}\text{Bi}$	1764.5	16.2
$^{232}\text{Th}$	$^{208}\text{Tl}$	2614.55	99.83

Tableau 1

La figure 4A représente un spectre, mesuré par un détecteur spectrométrique Germanium, sur une paroi de béton propre. Le spectre est représentatif de la radioactivité naturelle. On observe les pics correspondant aux énergies mentionnées dans le tableau 1. La durée de l'acquisition du spectre était de 12 heures. Un tel spectre peut être considéré comme représentatif de tout ou partie des parois d'une même installation. Il permet une estimation d'une activité moyenne des principaux radionucléides naturels composant le béton, comme décrit par la suite. La contribution de l'activité de chaque radionucléide peut être prise en compte pour corriger des spectres mesurés sur les parois de l'installation, en particulier dans la première bande d'énergie  $\Delta E_1$ .

Sous-étape 152 : Estimation d'une activité massique de  $^{232}\text{Th}$ , de  $^{238}\text{U}$  et de  $^{40}\text{K}$ .

L'activité massique de  $^{232}\text{Th}$  et  $^{238}\text{U}$  est estimée à partir de moyennes d'activités massiques calculées à partir de pics du spectre détectés à chaque énergie d'émission. On suppose que les

descendants radioactifs de  $^{232}\text{Th}$  et de  $^{238}\text{U}$  sont en équilibre radioactif avec leurs pères respectifs.

A partir de chaque pic d'émission, une activité massique  $A_i$  est d'un radionucléide naturel  $RN_i$  est obtenue en appliquant l'expression :

$$5 \quad A_i = \frac{N(E_i)}{FT(i, E_i, d)} \quad (1)$$

où  $N(E_i)$  est le taux de comptage à l'énergie d'émission  $E_i$  du radionucléide  $RN_i$  considéré et  $FT(i, E_i, d)$  est une fonction de transfert, obtenue par modélisation, correspondant à un nombre de coups détecté par unité de temps pour une activité prédéterminée de la paroi considérée, par exemple une activité unitaire de  $1 \text{ Bq.g}^{-1}$ . La fonction de transfert est considérée en prenant en compte une hypothèse de répartition homogène dans la paroi, ce qui est pertinent s'agissant de la radioactivité naturelle. La fonction de transfert  $FT(i, E_i, d)$  dépend de la densité  $d$  du béton. Cette dernière peut être déterminée a priori, ou faire l'objet d'une détermination expérimentale comme décrit par la suite. De préférence, la modélisation du détecteur a été préalablement vérifiée en laboratoire, en utilisant des sources irradiantes étalons.

L'activité moyenne  $A_m$  de chaque radionucléide père est estimée en effectuant une moyenne des activités massiques  $A_i$  de chaque radionucléide  $RN_i$  descendants dudit radionucléide père :

$$A_m = \frac{\sum_i \frac{A_i}{\sigma_{A_i}^2}}{\sum_i \frac{1}{\sigma_{A_i}^2}} \quad (2)$$

où  $A_i$  correspond aux activités massiques des radionucléides descendants de chaque radionucléide père et  $\sigma_{A_i}^2$  est la variance assignée à  $A_i$ .

Dans le cas de  $^{40}\text{K}$ , l'activité massique est obtenue en appliquant l'expression (1) au pic d'émission à 1460 keV.

Sous-étape 153 : Simulation de la contribution de  $^{232}\text{Th}$ , de  $^{238}\text{U}$  et de  $^{40}\text{K}$ .

A partir des activités massiques estimées dans la sous-étape 152, la contribution de l'activité naturelle dans le spectre, et plus particulièrement dans la première bande d'énergie  $\Delta E_1$ , est estimée. Selon une possibilité, on a préalablement simulé une contribution de chaque radionucléide naturel pour une activité homogène unitaire, par exemple  $1 \text{ Bq.g}^{-1}$ , en prenant en compte la configuration de mesure : épaisseur de la paroi, position du détecteur par rapport à

la paroi. La contribution de l'activité naturelle est alors obtenue en pondérant chaque contribution unitaire de chaque radionucléide naturel par l'activité massique dudit radionucléide, résultant de la sous-étape 152. On obtient ainsi une contribution naturelle  $N_{1,nat}$  dans la première bande d'énergie.

#### 5 Sous-étape 154

Au cours de cette étape, la contribution de l'activité naturelle est soustraite de la première valeur spectrale : la valeur  $N_1$  est remplacée par  $N_1 - N_{1,nat}$ . De même, la valeur  $N_2$  peut être remplacée par  $N_2 - N_{2,nat}$ .

La figure 4B montre un spectre d'une paroi de béton faiblement contaminée en  $^{137}\text{Cs}$ . On observe le pic d'émission de  $^{137}\text{Cs}$ , à l'énergie 661.6 keV. Sur la figure 4B, on a représenté la première bande d'énergie  $\Delta E_1$ , qui a été définie entre 300 keV et 659 keV. La deuxième bande d'énergie  $\Delta E_2$  correspond au pic d'émission de  $^{137}\text{Cs}$ , en prenant en compte la résolution spectrale du détecteur. Dans cet exemple, elle s'étend entre 659.5 keV et 663.1 keV.

#### Etape 160 : Obtention de valeurs spectrales calibrées

15 Au cours de cette étape, la première valeur spectrale  $N_1$  et la deuxième valeur spectrale  $N_2$  sont multipliées respectivement par un premier coefficient de calibration et par un deuxième coefficient de calibration.

Chaque coefficient de calibration est déterminé au cours d'une étape préalable de calibration 50. Au cours de cette étape, on détermine une première valeur de référence  $N_{10}$  et une 20 deuxième valeur de référence  $N_{20}$ .

Chaque valeur de référence correspond à une estimation d'une valeur spectrale (comptage ou taux de comptage) qui serait détectée par le détecteur, dans la même configuration de mesure (même collimateur, même position et orientation par rapport à la surface S), en considérant une activité de référence  $A_0$  de la paroi. Par exemple, l'activité de référence  $A_0$  est une activité 25 purement surfacique, homogène, de valeur prédéterminée. Il peut par exemple s'agir d'une activité surfacique uniforme égale  $1 \text{ Bq.cm}^{-2}$ , ce qui correspond à une activité surfacique dite unitaire. Alternativement, l'activité de référence est une activité massique de  $1 \text{ Bq.g}^{-1}$  prise en compte sur une épaisseur prédéterminée de la paroi, par exemple 1 cm. L'activité de référence peut également être une activité massique de  $1 \text{ Bq.g}^{-1}$  que l'on considère répartie selon un 30 gradient prédéterminée, jusqu'à une profondeur arbitraire.

Le premier coefficient de calibration  $\alpha$  et le deuxième coefficient de calibration  $\beta$  sont tels que :

$$\alpha \times N_{10} = A_0 \quad (3)$$

et

$$\beta \times N_{20} = A_0 \quad (4)$$

De préférence, la détermination de chaque coefficient de calibration est effectuée par une modélisation numérique, mettant en œuvre un code de transport de particules, par exemple le code MCNP précédemment cité. La détermination du premier coefficient de calibration et du deuxième coefficient de calibration en utilisant un modèle numérique, en se basant sur une activité de référence, permet d'obtenir des valeurs précises de chaque coefficient, ce qui améliore la précision de la mesure.

10 Au cours de l'étape 140, la première valeur spectrale  $N_1$  multipliée par le premier coefficient de calibration  $\alpha$ , et la deuxième valeur spectrale  $N_2$  multipliée par le deuxième coefficient de calibration  $\beta$ . On obtient ainsi une première valeur calibrée  $G = \alpha \times N_1 = \frac{A_0 N_1}{N_{10}}$  (5) et une deuxième valeur calibrée  $A = \beta \times N_2 = \frac{A_0 N_2}{N_{20}}$  (6).

Lorsque l'activité de référence est une activité surfacique unitaire,  $G$  et  $A$  peuvent être considérées comme des activités surfaciques équivalentes estimées sur la base de  $N_1$  et de  $N_2$ , en prenant l'hypothèse d'une absence de profondeur de contamination.

La figure 5A montre l'évolution de la première grandeur calibrée  $G$  et de la deuxième valeur calibrée  $A$  en fonction de la profondeur de contamination  $Z$  (axe des abscisses). On observe que la grandeur  $G$  est relativement stable, et varie dans une marge de  $\pm 10\%$  jusqu'à une profondeur d'environ 15 cm.

Etape 180 : Calcul d'un ratio de la première valeur calibrée sur la deuxième valeur calibrée.

Au cours de cette étape, on calcul un ratio de la première valeur calibrée  $G$  sur la deuxième valeur calibrée  $A$ . On obtient ainsi un ratio  $\frac{G}{A}$ . Ce ratio correspond à un indicateur de comparaison.

25 Etape 190 : Prise en compte d'une fonction de calibration.

Au cours de cette étape, le ratio  $\frac{G}{A}$  résultant de l'étape 180 est utilisé en tant qu'argument d'une fonction de calibration  $f$ , préalablement définie, de façon à estimer une profondeur de contamination  $Z_0$  dans la paroi examinée.

$$\text{Ainsi, } Z_0 = f\left(\frac{G}{A}\right) \quad (7)$$

La fonction de calibration est définie au cours d'une étape préalable 70, au cours de laquelle on prend en compte une forme analytique d'un gradient d'activité dans la paroi, par exemple une forme exponentielle décroissante, et on estime les valeurs spectrales  $N_1$  et  $N_2$  pour différentes profondeurs de contamination  $Z_0$ . Notons que le terme profondeur de contamination désigne une profondeur comportant  $x$  % de l'activité, avec de préférence  $x \geq 75\%$ . Dans cet exemple,  $x = 90\%$ . Par exemple, on considère que le gradient d'activité du radionucléide, dans le béton, suit une loi décroissante  $P(z)$  de forme analytique :

$$\text{où } P(z) = \frac{2.3026}{Z_0} \exp\left(-\frac{2.3026}{Z_0} z\right) \quad (8)$$

Ainsi,

$$10 \quad Act(z) = Act_{tot} P(z) \quad (9)$$

où :

- $z$  correspond à une profondeur, selon l'axe  $Z$ , perpendiculaire à la surface  $S$  délimitant le milieu solide  $M$  ;
- $Act(z)$  est une activité surfacique à la profondeur  $z$  ;
- 15 -  $Act_{tot}$  est l'activité totale.

Dans cet exemple, la profondeur  $Z_0$  correspond à la profondeur jusqu'à laquelle on estime que 90% de l'activité du radionucléide est contenue. Ainsi,

$$\int_0^{Z_0} Act(z) dz = \int_0^{Z_0} Act_{tot} P(z) dz = 0.9 Act_{tot} \quad (10)$$

La définition de la fonction de calibration  $f$  consiste à prendre en compte, pour une même forme analytique du gradient de contamination, et pour une même activité totale, différentes profondeurs de contamination  $Z_0$ . Pour chaque profondeur de contamination  $Z_0$  prise en compte, on simule un spectre résultant du détecteur, à partir duquel on estime les valeurs spectrales  $N_1(Z_0)$  et  $N_2(Z_0)$ . On utilise les coefficients de calibration  $\alpha$  et  $\beta$ , obtenus suite à l'étape 50, de façon à estimer, pour chaque profondeur  $Z_0$ , des valeurs calibrées  $G(Z_0)$  et  $A(Z_0)$ .

La fonction de calibration  $f$  correspond à l'évolution de la grandeur  $\frac{G(Z_0)}{A(Z_0)}$  en fonction de  $Z_0$ . Elle est obtenue par modélisation numérique, en utilisant un code de calcul modélisant le transport de photons dans la matière, et en prenant en compte la géométrie de la mesure : modélisation du détecteur, de l'éventuel collimateur, de la paroi de béton, et de la position du détecteur par

rapport à la paroi de béton. Les modélisations peuvent être effectuées avec le code de calcul MCNP.

La figure 5B (courbe 1 – axe des ordonnées de gauche) montre un exemple de fonction de calibration  $f$  obtenue en considérant un gradient d'activité décroissant suivant une fonction exponentielle telle qu'explicitée dans (8). Sur la figure 5B, l'axe des abscisses correspond à la grandeur  $G/A$  et l'axe des ordonnées de gauche correspond à la profondeur d'activité  $Z_0$  telle que définie dans l'expression (10).

Les modélisations permettant de simuler le spectre détecté sont également basées sur une hypothèse relative à la densité du béton. Différentes modélisations peuvent être effectuées, en prenant en compte différentes valeurs de la densité  $d$  du matériau formant le milieu solide. Cela permet d'obtenir une fonction de calibration pour chaque valeur considérée de la densité.

Etape 200 : Estimation de l'activité totale.

Au cours de cette étape, optionnelle mais préférable, on estime l'activité totale à partir de la première valeur calibrée  $G$ . En première approximation, l'activité totale  $Act_{tot}$  peut être estimée en utilisant directement  $G$ . Cependant, il est préférable d'appliquer une fonction de correction  $K_{corr}$  à la fonction  $G$ . La fonction de correction  $K_{corr}$  est établie préalablement, sur la base de modélisations.

Ainsi, en première approximation, l'activité totale  $Act_{tot}$  peut être estimée par la première valeur calibrée  $G$  :  $Act_{tot} \approx G$

Une façon plus précise d'estimer l'activité est d'utiliser la fonction  $K_{corr}$  avec

$$Act_{tot} = GK_{corr}(G/A) \quad (11).$$

La fonction  $K_{corr}$  est déterminée préalablement, au cours d'une étape 80, sur la base de modélisations, en prenant en compte plusieurs gradients d'activité.

Les étapes 50, 70 et 80 forment des étapes de calibration du dispositif, permettant de définir le premier coefficient de calibration  $\alpha$ , et le deuxième coefficient de calibration  $\beta$  (étape 50), la fonction de calibration  $f$  (étape 70) et la fonction de correction  $K_{corr}$  (étape 80). De façon pratique, les étapes 50, 70 et 80 peuvent être réalisées simultanément, sur la base des mêmes modélisations.

La figure 5B (courbe 2 – axe des ordonnées de droite) montre un exemple de fonction de correction obtenue en considérant un gradient d'activité décroissant suivant une fonction exponentielle telle que décrite dans (8). Sur la figure 5B, l'axe des ordonnées de droite

correspond à la valeur de la fonction de correction  $K_{corr}$ . On observe que la fonction  $K_{corr}$  varie selon une plage de variation étroite, comprise entre 0.9 et 1.2.

Comme décrit dans l'étape 190, les modélisations sont effectuées en prenant en compte une hypothèse quant à la densité du béton. Différentes modélisations peuvent être effectuées, en  
5 prenant en compte différentes valeurs de la densité du béton. Cela permet d'obtenir une fonction de correction pour chaque valeur considérée de la densité du béton.

#### Estimation de la densité

Le procédé peut comporter une étape 170 d'estimation de la densité du matériau formant le volume examiné. La densité du matériau formant la paroi, qu'il s'agisse de béton ou de terre,  
10 n'est généralement pas connue avec précision. Or, cette densité peut varier, par exemple lorsque le béton est du béton standard (densité = 2.35) ou du béton baryté (densité = 3.35). Afin d'améliorer la précision de la mesure, le procédé peut comporter une estimation de la densité du matériau formant le milieu examiné. Pour cela, on tire profit de l'activité naturelle du  
15 matériau et on sélectionne différents pics d'émission d'un même radionucléide naturel, par exemple  $^{214}\text{Bi}$  couvrant une large gamme d'énergie pour exploiter le contraste lié à l'atténuation plus ou moins importante des raies d'émission dans le milieu en fonction de leur énergie

L'activité massique du radionucléide naturel sélectionné est estimée, sur la base de différents pics d'émission, sur la base de l'expression (1). La fonction de transfert  $FT(i, E_i, d)$  dépend de la densité du béton. Sur la base de plusieurs pics d'énergie  $E_i$ , on détermine les activités  
20 massiques  $A_i(E_i)$  du radionucléide naturel  $i$ , et cela en utilisant différentes fonctions de transfert  $FT(i, E_i, d)$  établies en prenant en compte différentes valeurs de la densité du béton. On détermine ensuite la densité  $d$  pour laquelle les différentes activités massiques du même radionucléide sont les plus proches.

On considère que lorsque la densité prise en compte dans la fonction de transfert est supérieure  
25 à la densité réelle du matériau examiné, les activités massiques déterminées à partir des pics d'énergie d'émission les plus faibles sont supérieures aux activités massiques déterminées à partir des pics d'énergie d'émission les plus élevées. Réciproquement, lorsque la densité prise en compte dans la fonction de transfert est inférieure à la densité réelle, les activités massiques déterminées à partir des pics d'énergie d'émission les plus faibles sont inférieures aux activités  
30 massiques déterminées à partir des pics d'énergie d'émission les plus élevées..

L'estimation de la densité du matériau formant le milieu examiné est bénéfique car elle permet une sélection de la fonction de calibration et de la fonction de correction lorsqu'on a

préalablement établi différentes fonctions de calibration et/ou différentes fonctions de corrections basées sur différentes valeurs de la densité.

L'estimation de la densité est également applicable à tout autre matériau susceptible de contenir une radioactivité naturelle, par exemple le béton ou la terre.

- 5 De même que pour la prise en compte de l'activité naturelle, l'estimation de la densité est établie à partir d'un spectre considéré comme représentatif de la paroi ou des parois d'une installation. Le spectre représentatif peut être mesuré sur une paroi considérée comme représentative de l'installation. La densité déterminée à partir du spectre représentatif est ensuite utilisée pour le traitement de différents spectres acquis sur une même paroi, voire sur
- 10 plusieurs parois d'une même installation. Une telle solution permet d'obtenir un spectre représentatif selon une longue durée d'acquisition, de façon à estimer la densité de façon plus précise. Selon une autre possibilité, la densité est estimée à partir de chaque spectre mesuré. Cela suppose toutefois que la durée d'acquisition soit suffisamment longue pour que la densité puisse être estimée précisément et que la présence de radioactivité artificielle faible ou du
- 15 même ordre de grandeur que la radioactivité naturelle pour que les raies caractéristiques de la radioactivité naturelle puissent être identifiées.

### Modélisations

Les inventeurs ont modélisé différentes configurations de mesures. La figure 6A illustre une configuration de modélisation. Chaque modélisation suppose une description de la géométrie :

- 20 - du détecteur ;
- du blindage et du collimateur agencés autour du détecteur ;
- du matériau examiné : épaisseur, densité, gradient d'activité en fonction de la profondeur ;
- position du détecteur par rapport au matériau examiné, en particulier la distance du
- 25 détecteur par rapport à la surface délimitant le matériau examiné.

Dans l'exemple de la figure 6A, le détecteur utilisé est un détecteur basé sur un cristal de Germanium refroidi par un réservoir d'azote liquide.

- La figure 6B représente des spectres simulés en prenant en compte une même activité de  $^{137}\text{Cs}$  purement surfacique (courbe a) ou s'étendant, selon un gradient décroissant, sur 100 mm (courbe b), 200 mm (courbe c) et 300 mm (courbe d). Le gradient d'activité pris en compte était
- 30 un gradient exponentiel. Sur la figure 6B, on a pris en compte un béton de densité  $2.3 \text{ g.cm}^{-3}$ .

Ce type de simulation permet de définir les bornes de la première bande d'énergie  $\Delta E_1$ . Dans cet exemple, la borne supérieure de la première bande d'énergie correspond à la borne inférieure de la deuxième bande d'énergie  $\Delta E_2$ . La borne inférieure de la première bande d'énergie  $\Delta E_1$  correspond à une énergie à laquelle le spectre obtenu par simulation d'une

5 activité surfacique (courbe a) croise le spectre obtenu par simulation d'une activité en profondeur, par exemple la courbe b. Dans cet exemple, le spectre la borne inférieure de la première bande d'énergie  $\Delta E_1$  est de 290 keV. Le retour d'expérience a montré que la borne inférieure de la première bande d'énergie peut varier entre 290 keV et 400 keV, voire davantage, selon les radioéléments considérés et les conditions de mesure.

10 La figure 6C représente des spectres simulés en prenant en compte une même activité de  $^{137}\text{Cs}$  purement surfacique (courbe a) ou s'étendant, selon un gradient décroissant, sur 100 mm (courbe b), 200 mm (courbe c) et 300 mm (courbe d). Le gradient d'activité pris en compte était un gradient exponentiel. Sur la figure 6C, on a pris en compte un béton de densité  $3.35 \text{ g.cm}^{-3}$ , ce qui correspond à un béton baryté. On observe qu'en prenant les mêmes hypothèses quant

15 au gradient d'activité, les spectres de la figure 6C sont différents de ceux de la figure 6B. Cela provient de la différence des densités considérées. En prenant en compte le même critère pour la détermination de la borne inférieure de la première bande d'énergie  $\Delta E_1$ , cette borne inférieure est ici égale à 310 keV.

Les figures 6D et 6E correspondent à des spectres simulés en prenant en compte une activité de

20  $^{60}\text{Co}$  en considérant respectivement du béton standard ( $d = 2.3 \text{ g.cm}^{-3}$ ) et du béton baryté ( $d = 3.35 \text{ g.cm}^{-3}$ ). Sur chacune de ces figures, on a représenté des spectres en prenant en compte une activité purement surfacique (courbe a) ou s'étendant, selon un gradient décroissant, sur 100 mm (courbe b), 200 mm (courbe c) et 300 mm (courbe d). La borne inférieure de la première bande d'énergie est respectivement de 340 keV (figure 6D) et 360 keV (figure 6E).

25 Les simulations telles que décrites en lien avec les figures 6B à 6E permettent d'établir une fonction de calibration, en faisant varier la profondeur de contamination  $Z_0$  entre 0 et 300 mm.

La fonction de calibration a été établie en prenant en compte, pour une activité de  $^{137}\text{Cs}$  :

- pour du béton ordinaire ( $d = 2.3 \text{ g.cm}^{-3}$ ),  $\alpha = 4.507 \text{ Bq.cm}^{-2}$  et  $\beta = 6.716 \text{ Bq.cm}^{-2}$  ;
- pour du béton baryté ( $d = 3.35 \text{ g.cm}^{-3}$ ) :  $\alpha = 4.535 \text{ Bq.cm}^{-2}$  et  $\beta = 6.716 \text{ Bq.cm}^{-2}$  ;

30 et pour une activité de  $^{60}\text{Co}$  :

- pour du béton ordinaire ( $d = 2.3 \text{ g.cm}^{-3}$ ),  $\alpha = 1.157 \text{ Bq.cm}^{-2}$  et  $\beta = 4.013 \text{ Bq.cm}^{-2}$  ;
- pour du béton baryté ( $d = 3.35 \text{ g.cm}^{-3}$ ) :  $\alpha = 1.161 \text{ Bq.cm}^{-2}$  et  $\beta = 4.013 \text{ Bq.cm}^{-2}$  .

$\alpha$  varie avec la densité car les bornes de la première bande d'énergie  $\Delta E_1$  varient en fonction de la densité, comme décrit en lien avec les figures 6B à 6E.

Les figures 7A et 7B montrent des fonctions de calibration établies respectivement en prenant en compte du béton ordinaire (courbe a) et du béton baryté (courbe b), pour des activités de <sup>137</sup>Cs et <sup>60</sup>Co respectivement. Sur chacune de ces figures, l'axe des abscisses correspond au ratio  $\frac{G}{A}$  et l'axe des ordonnées correspond à la profondeur  $Z_0$ . Pour une même valeur de  $\frac{G}{A}$ , la différence entre les deux profondeurs  $Z_0$  estimées en prenant en compte les fonctions de calibration, correspondant à chaque densité, montre l'impact d'une méconnaissance de la densité sur l'estimation de la profondeur  $Z_0$ .

Les figures 7C et 7D montrent des fonctions de correction établies respectivement en prenant en compte du béton ordinaire (courbe a) et du béton baryté (courbe b), pour une activité de <sup>137</sup>Cs et <sup>60</sup>Co respectivement. Sur chacune de ces figures, l'axe des abscisses correspond au ratio  $\frac{G}{A}$  et l'axe des ordonnées correspond à la valeur de la fonction de correction.

Les figures 6B à 6E et 7A à 7D illustrent l'importance de la phase de modélisation de mesures, de façon à établir, le plus précisément possible, la fonction de calibration et la fonction de correction. Les modélisations sont basées sur des hypothèses, concernant la densité du béton ou la forme du gradient d'activité en fonction de la profondeur. Comme précédemment décrit, les hypothèses relatives à la densité peuvent être confirmées par une phase d'estimation de la densité (cf. étape 170). En ce qui concerne le gradient d'activité, il est difficile de l'estimer précisément, car cela suppose une analyse de prélèvements. Les inventeurs considèrent qu'un gradient de forme exponentielle, telle que décrit en lien avec l'expression (8), est approprié. D'une façon plus générale, lorsque le gradient réel d'activité s'écarte du gradient d'activité pris en compte dans les modélisations, l'incertitude de mesure augmente. Il est cependant considéré que sous réserve d'une prise en compte d'un gradient d'activité décroissant, le procédé permet d'obtenir un ordre de grandeur suffisant de la profondeur  $Z_0$ .

Par ailleurs, compte tenu de l'atténuation du rayonnement gamma par le béton, on considère que la méthode est appropriée pour la détermination de profondeurs d'activités comprises entre 0 cm et 20 cm ou 30 cm. Au-delà, l'effet de l'atténuation est trop important : la quantité de rayonnement gamma émis à des profondeurs supérieures à 20 cm ou 30 cm est trop faible. Le domaine de validité de la méthode est limité par l'asymptote verticale de la fonction de calibration  $f\left(\frac{G}{A}\right)$ . On observe que plus la pente de la fonction  $f\left(\frac{G}{A}\right)$  augmente, plus l'incertitude

de mesure est élevée. La profondeur « limite » dépend du matériau observé, notamment de sa densité, ainsi que la durée d'acquisition de chaque spectre. Il est préférable que cette dernière soit de quelques minutes, et soit de préférence inférieure à 10 min ou 15 minutes si l'on souhaite rester compatible avec une cadence de mesure industrielle. La profondeur limite dépend également de l'énergie d'émission du radionucléide dont on cherche à évaluer la profondeur dans le milieu examiné. La profondeur limite est plus élevée pour  $^{60}\text{Co}$  (énergies d'émission de 1173 keV et 1332 keV) que pour  $^{137}\text{Cs}$  (énergie d'émission 662 keV).

L'invention pourra être mise en œuvre pour le contrôle de structures d'installations nucléaires, en support à des opérations de maintenance ou de démantèlement. Elle pourra également être déployée pour la réalisation de contrôle radiologique sur des terres contaminées.

**REVENDICATIONS**

1. Procédé d'estimation d'une profondeur ( $Z_0$ ) selon laquelle s'étend un radionucléide dans un milieu solide (M), à partir d'une surface (S), le milieu solide étant délimité par la surface, le radionucléide émettant un rayonnement gamma à au moins une énergie d'émission, le
- 5 procédé comportant :
- a) disposition d'un détecteur spectrométrique (10) face à la surface (S) du milieu solide, et mesure, par le détecteur spectrométrique d'un spectre d'énergie du rayonnement gamma, émis par le radionucléide et émanant de la surface, le spectre mesuré comportant un nombre d'impulsions détectées pour différentes valeurs d'énergie, le
  - 10 spectre d'énergie comportant un pic à l'énergie d'émission ;
  - b) prise en compte d'une première et d'une deuxième bandes d'énergie, préalablement définies, la première bande d'énergie ( $\Delta E_1$ ) comportant des valeurs d'énergie inférieures à la deuxième bande d'énergie ( $\Delta E_2$ ), la deuxième bande d'énergie comportant le pic à l'énergie d'émission ;
  - 15 - c) à partir du spectre mesuré, détermination d'une première valeur spectrale ( $N_1$ ) à la première bande d'énergie et d'une deuxième valeur spectrale ( $N_2$ ) à la deuxième bande d'énergie ;
  - le procédé étant caractérisé en ce que la première valeur spectrale est considérée comme indépendante de la profondeur selon laquelle le radionucléide s'étend, et en ce qu'il
  - 20 comporte :
  - d) application
  - d'un premier coefficient de calibration ( $\alpha$ ) à la première valeur spectrale pour obtenir une première valeur spectrale calibrée ;
  - d'un deuxième coefficient de calibration ( $\beta$ ) à la deuxième valeur spectrale, pour obtenir
  - 25 une deuxième valeur spectrale calibrée ;
  - chaque coefficient de calibration correspondant à un ratio, dans chaque bande d'énergie, entre une activité prédéterminée ( $A_0$ ) du milieu solide et une estimation d'une valeur spectrale ( $N_{10}, N_{20}$ ) correspondant à ladite activité prédéterminée ;
  - e) calcul d'un indicateur de comparaison ( $\frac{G}{A}$ ) à partir d'une comparaison de la première
  - 30 valeur spectrale calibrée ( $G$ ) et de la deuxième valeur spectrale calibrée ( $A$ ) résultant de d) ;
  - f) application d'une fonction de calibration ( $f$ ) à l'indicateur de comparaison ( $\frac{G}{A}$ ) résultant de e), de façon à estimer la profondeur ( $Z_0$ ) selon laquelle s'étend le radionucléide dans

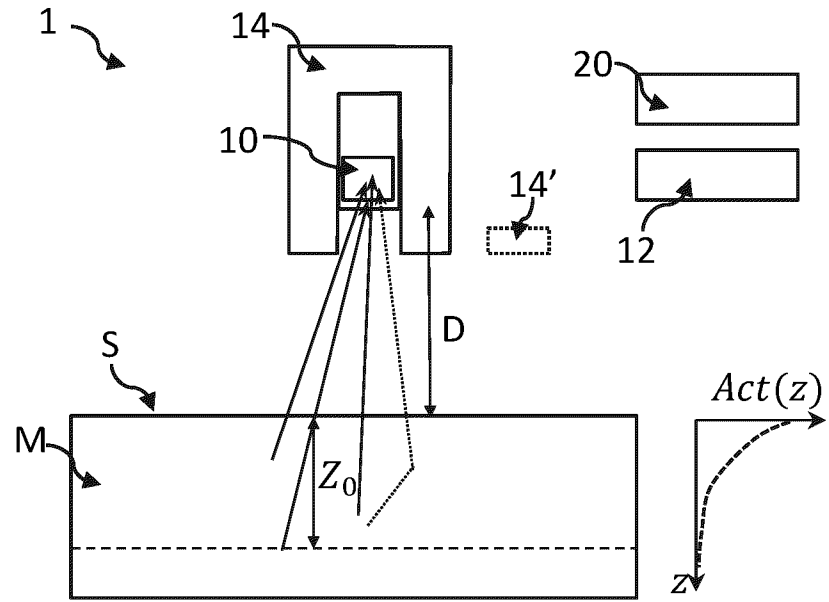
le milieu solide, la fonction de calibration étant préalablement établie, en considérant une activité du radionucléide décroissante en fonction de la profondeur ;

le procédé étant caractérisé en ce que lors de l'étape d), le premier coefficient de calibration et le deuxième coefficient de calibration sont déterminés, dans chaque bande, par une modélisation numérique d'un spectre détecté par le détecteur spectrométrique, le milieu solide étant considéré, lors de la modélisation, comme ayant ladite activité prédéterminée.

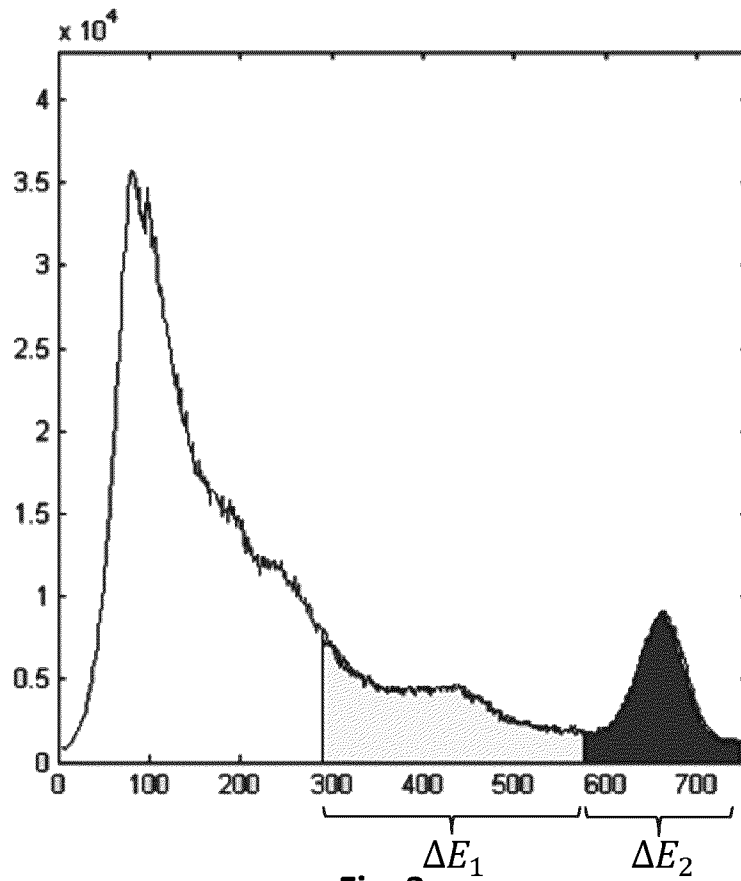
2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel la première valeur spectrale et la deuxième valeur spectrale sont un nombre d'impulsions ou un taux de comptage respectivement dans la première bande d'énergie et dans la deuxième bande d'énergie.
- 10 3. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel l'activité prédéterminée est une activité surfacique uniforme ou une activité massique uniforme dans le milieu analysé ou une activité prédéterminée répartie selon un gradient d'activité prédéfini.
4. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, comportant,  
15 préalablement à l'étape c) :
  - prise en compte d'un spectre représentatif du milieu solide ;
  - prise en compte d'au moins une bande d'énergie prédéterminée correspondant à une énergie d'émission d'un radionucléide naturel, présent naturellement dans le milieu solide ;
  - 20 - à partir d'une valeur spectrale du spectre représentatif dans ladite bande d'énergie prédéterminée, estimation d'une activité du radionucléide naturel dans le milieu solide ;
  - estimation d'une contribution du radionucléide naturel dans le spectre mesuré lors de l'étape a);
  - correction du spectre mesuré lors de l'étape a), de façon à retirer la contribution du  
25 radionucléide naturel, au moins dans la première bande d'énergie.
5. Procédé selon la revendication 4, dans lequel le spectre représentatif du milieu solide est :
  - le spectre mesuré lors de l'étape a) ;
  - ou un spectre mesuré par un détecteur spectrométrique différent du détecteur spectrométrique mis en œuvre lors de l'étape a) ;
  - 30 - ou un spectre mesuré par le détecteur spectrométrique mis en œuvre lors de l'étape a).

6. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes comportant, préalablement à l'étape d) :
- détermination d'une densité du milieu solide examiné ;
  - en fonction de la densité du milieu solide examiné, sélection du premier coefficient de calibration parmi des premiers coefficients de calibration respectivement déterminés pour différentes densités.
- 5
7. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, comportant, préalablement à l'étape f) :
- détermination d'une densité du milieu solide examiné ;
  - en fonction de la densité du milieu solide examiné, sélection de la fonction de calibration parmi des fonctions de calibration respectivement déterminées pour différentes densités.
- 10
8. Procédé selon l'une quelconque des revendications 6 ou 7, dans lequel la détermination de la densité du milieu solide examiné comporte les sous-étapes suivantes :
- prise en compte d'un spectre représentatif du milieu solide ;
  - sélection d'au moins deux bandes d'énergies correspondant à des énergies d'émission d'un même radionucléide naturel, présent naturellement dans le milieu solide ;
  - estimation d'activités du radionucléide naturel à partir d'une valeur spectrale du spectre représentatif respectivement dans chaque bande d'énergie sélectionnée, chaque estimation d'activité étant effectuée en prenant en compte une densité du milieu solide ;
  - détermination de la densité minimisant un écart entre les activités du radionucléide estimées à partir des bandes d'énergie sélectionnées.
- 15
- 20
9. Procédé selon la revendication 8, dans lequel le spectre représentatif du milieu solide est :
- le spectre mesuré lors de l'étape a) ;
  - ou un spectre mesuré par un détecteur spectrométrique différent du détecteur spectrométrique mis en œuvre lors de l'étape a) ;
  - ou un spectre mesuré par le détecteur spectrométrique mis en œuvre lors de l'étape a).
- 25
10. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, comportant :
- g) multiplication de la deuxième valeur spectrale calibrée ( $G$ ), résultant de e), par une fonction de correction ( $K_{corr}$ ) de façon à estimer une activité du milieu solide, la fonction de correction étant préalablement établie pour différentes valeurs de l'indicateur de comparaison ( $\frac{G}{A}$ ).
- 30

11. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le milieu solide est du béton ou de la terre.
12. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, selon lequel la première bande spectrale s'étend sur plusieurs centaines de keV.
- 5 13. Dispositif (1) destiné à estimer d'une profondeur ( $Z_0$ ) selon laquelle s'étend un radionucléide dans un milieu solide, à partir d'une surface (S), le milieu solide étant délimité par la surface, le dispositif comportant :
  - un détecteur spectrométrique (10), configuré pour mesurer un spectre d'un rayonnement gamma émanant de la surface ;
- 10 - une unité de traitement (20), programmée pour mettre en œuvre les étapes b) à f) d'un procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes à partir du spectre mesuré par le détecteur spectrométrique.



**Fig. 1**



**Fig. 3**

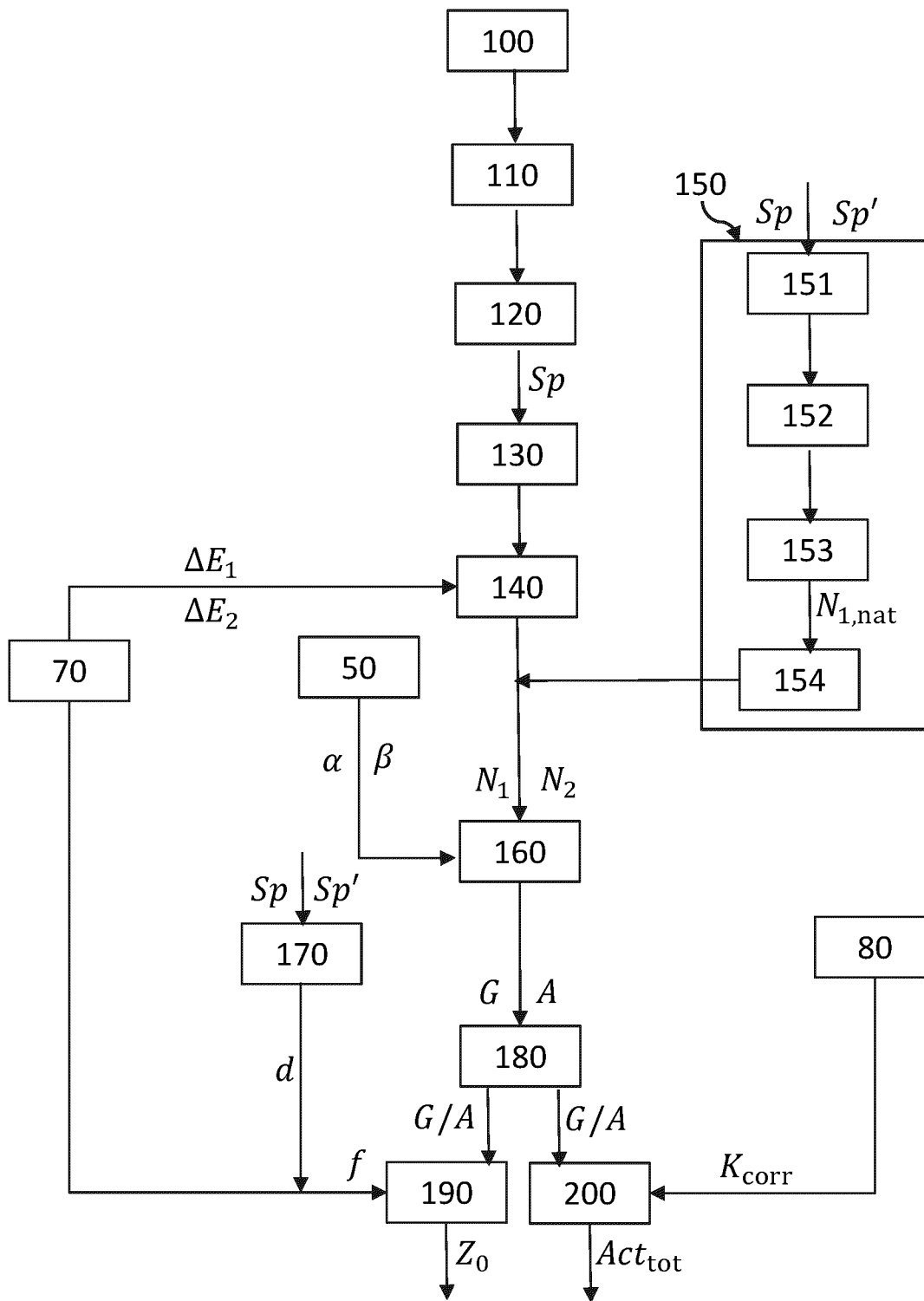
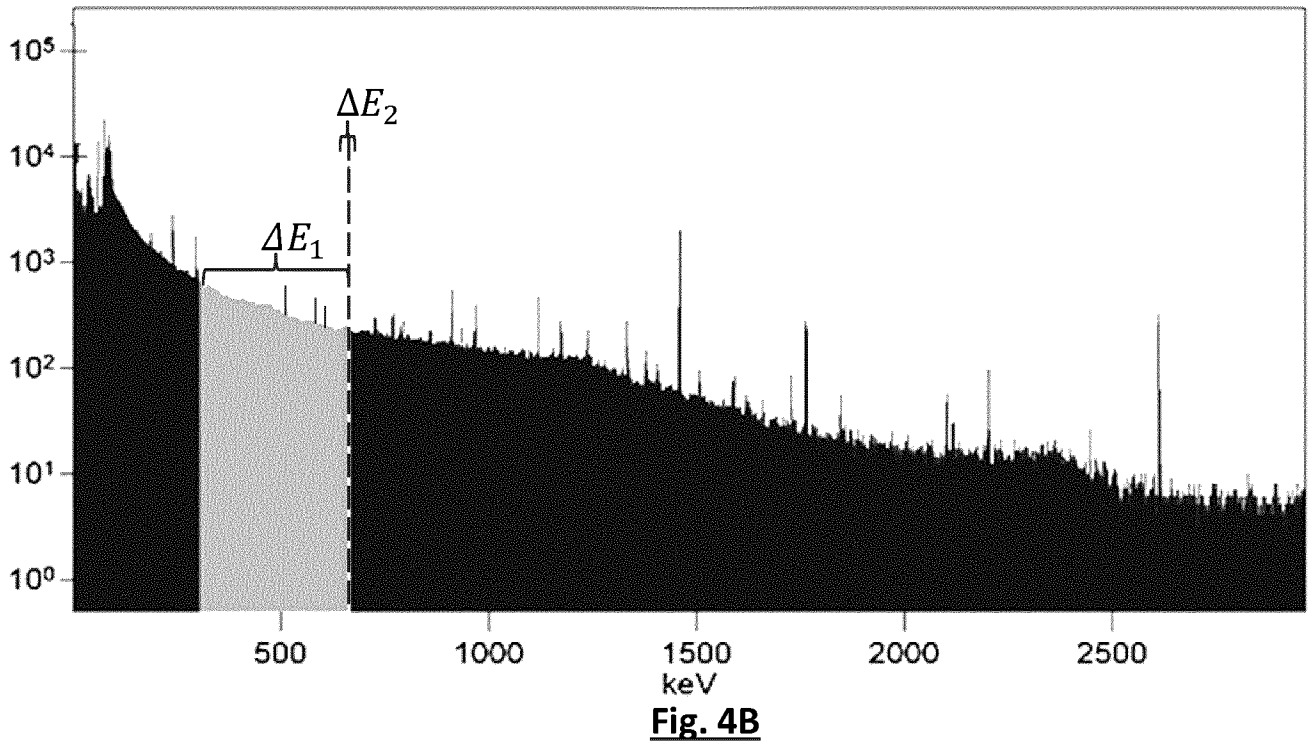
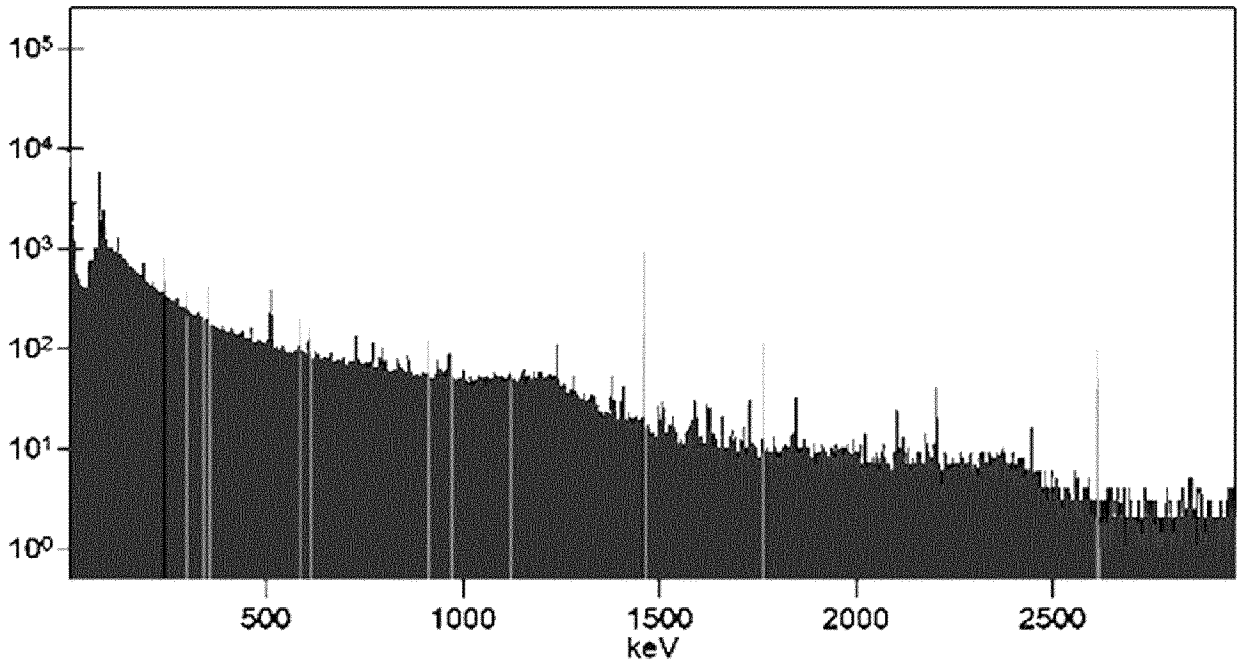


Fig. 2



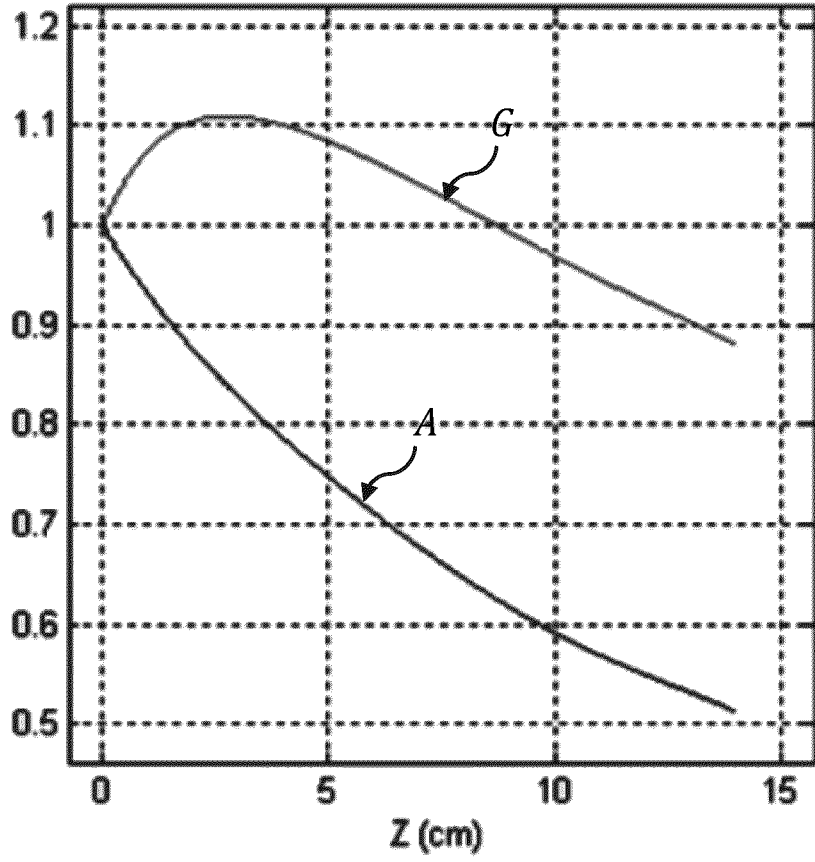


Fig. 5A

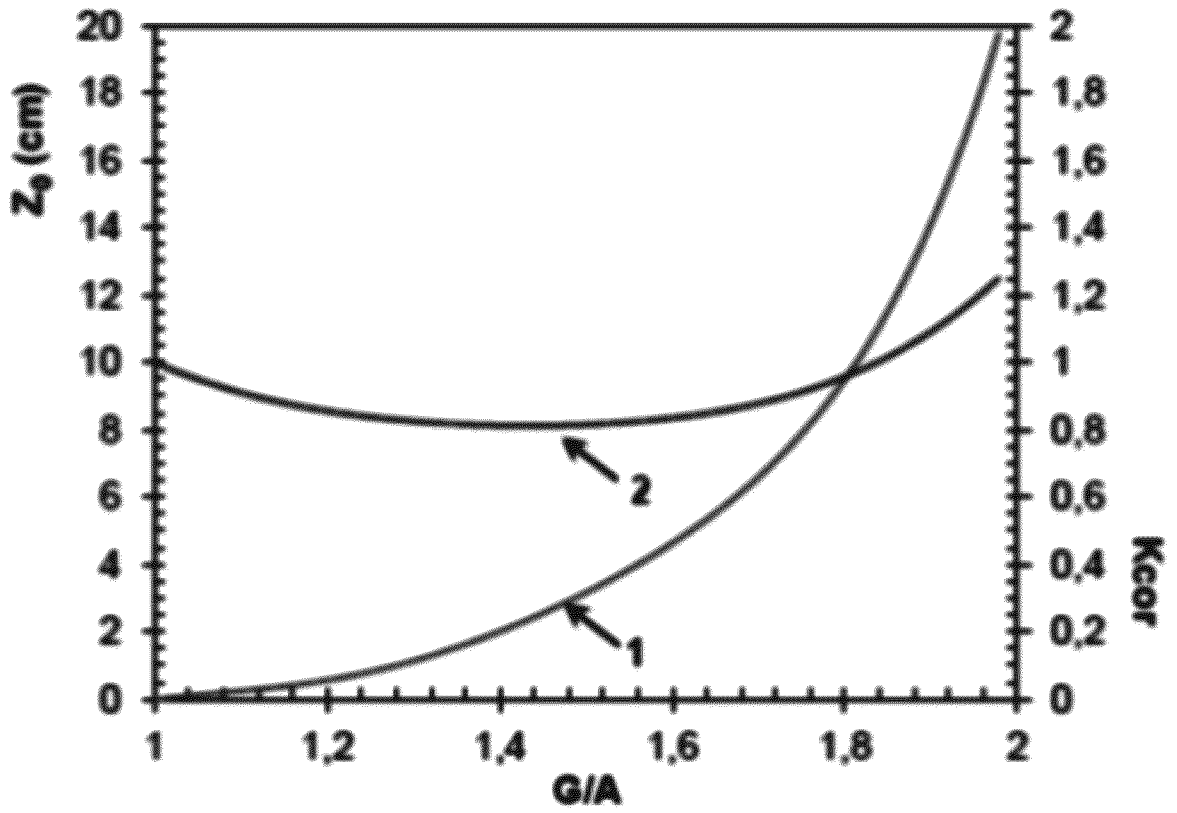
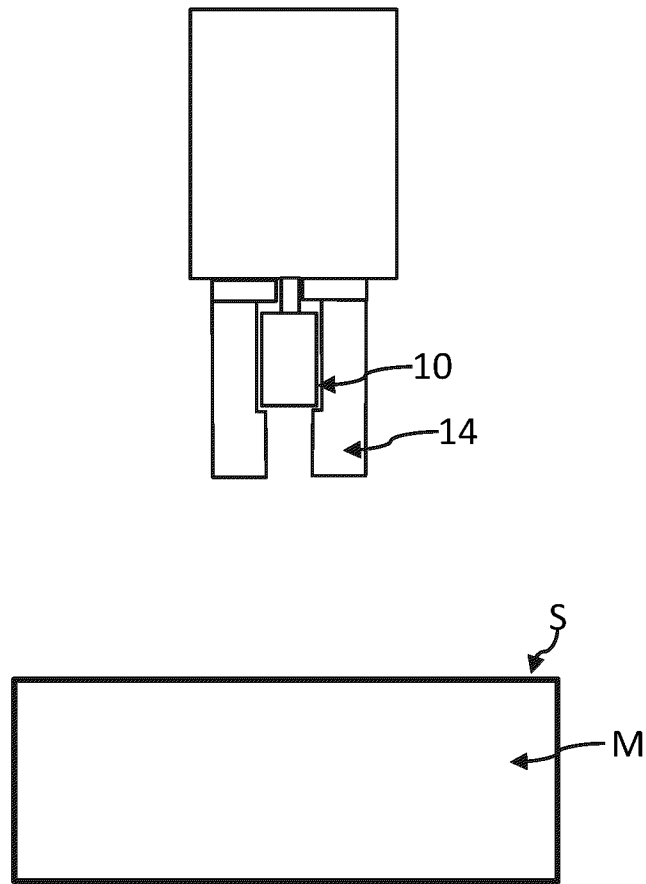


Fig. 5B



**Fig. 6A**

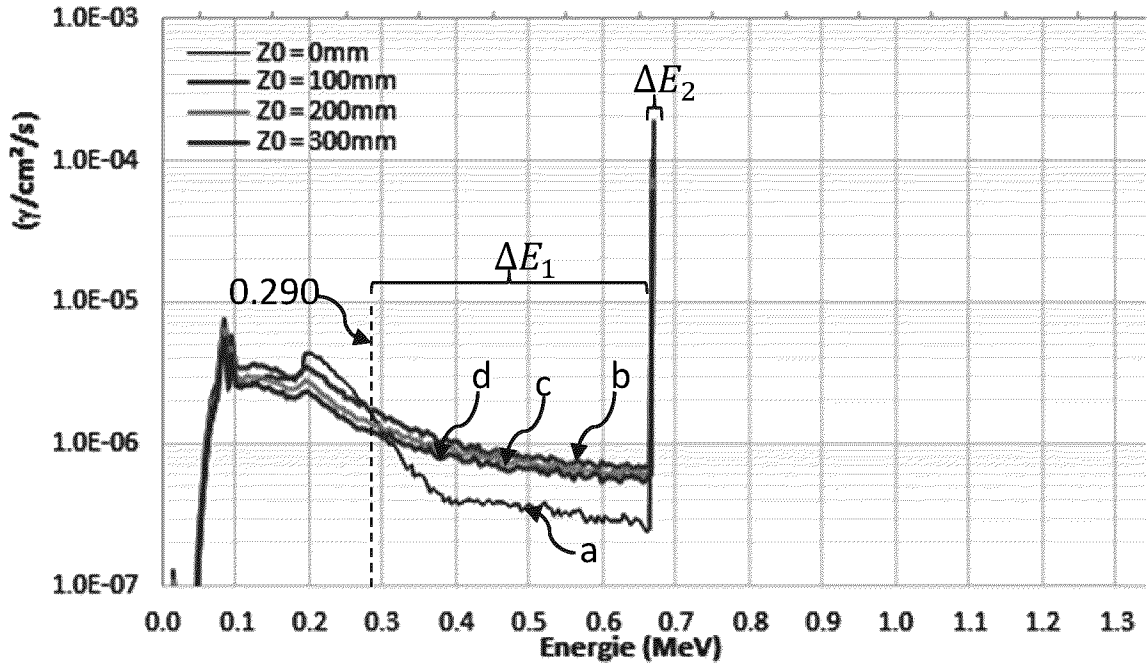


Fig. 6B

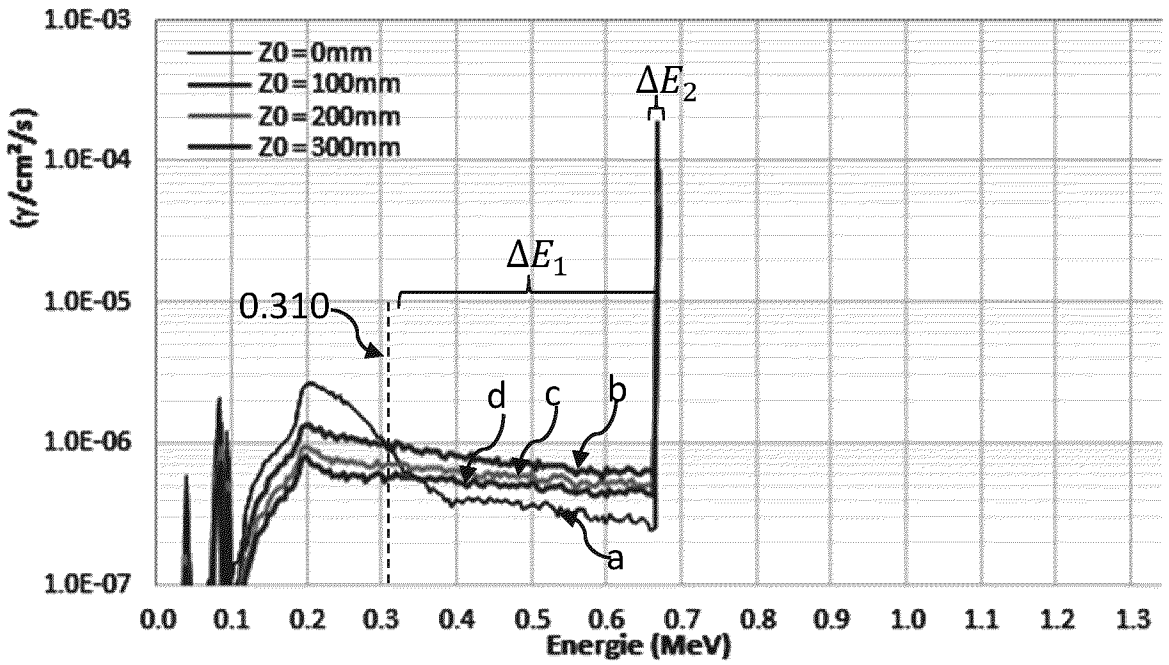


Fig. 6C

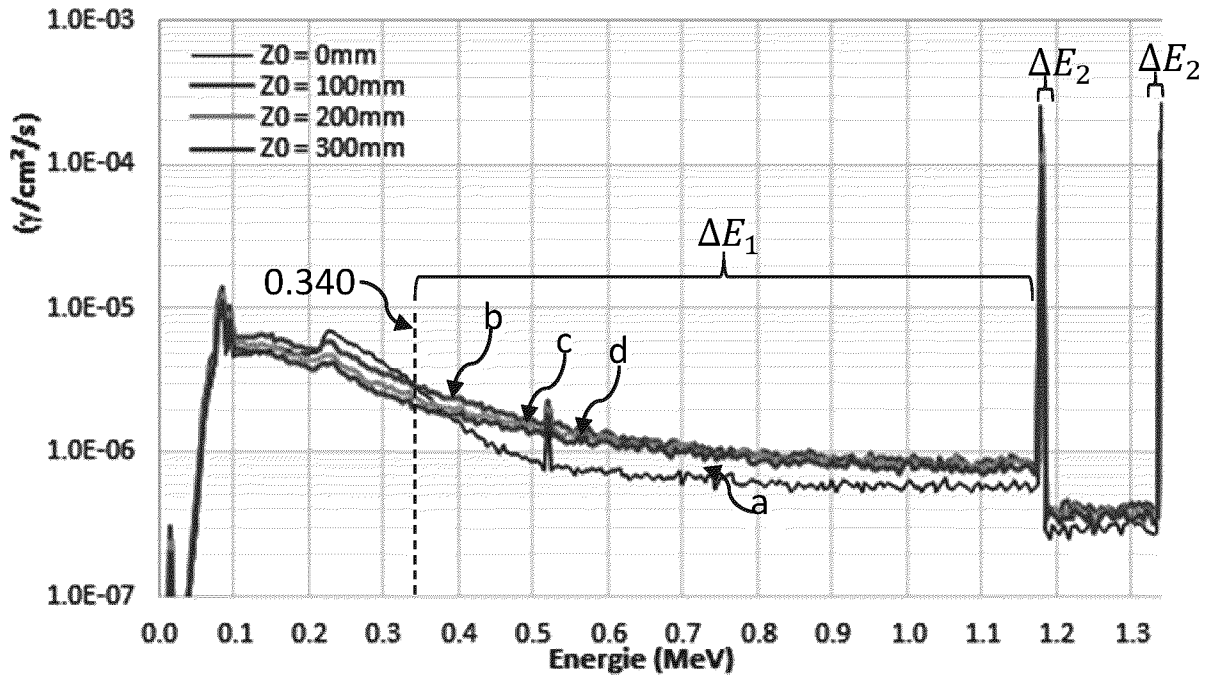


Fig. 6D

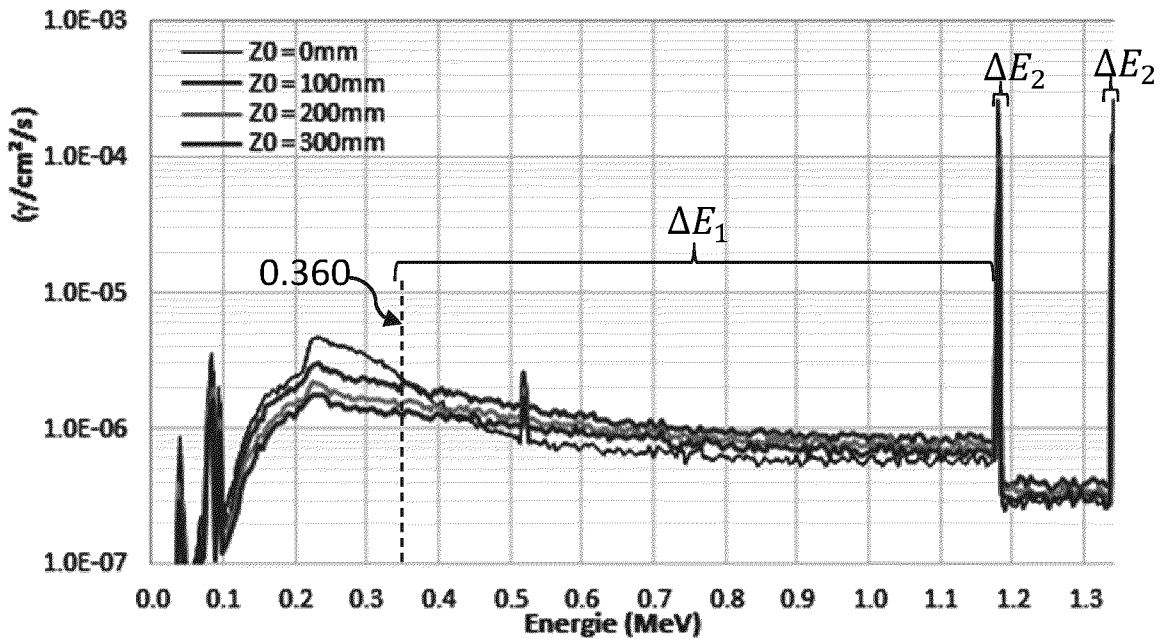
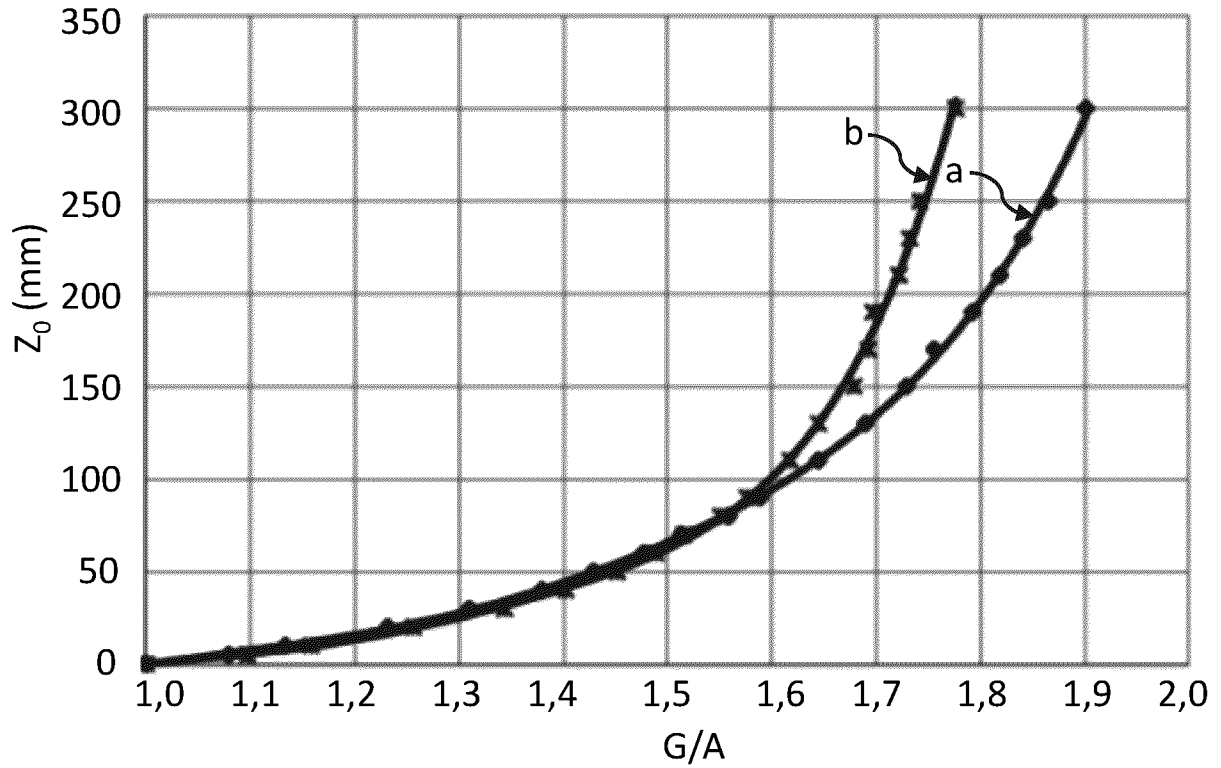
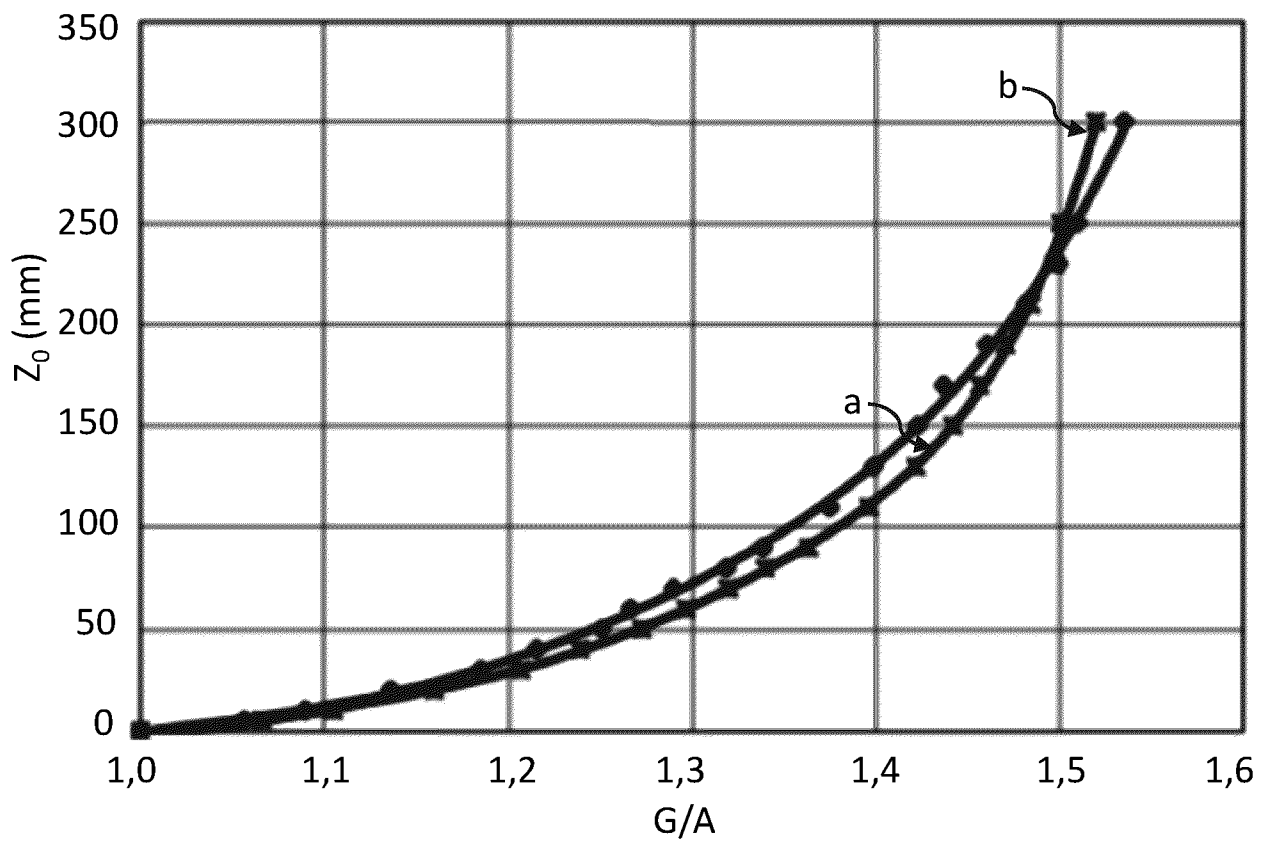


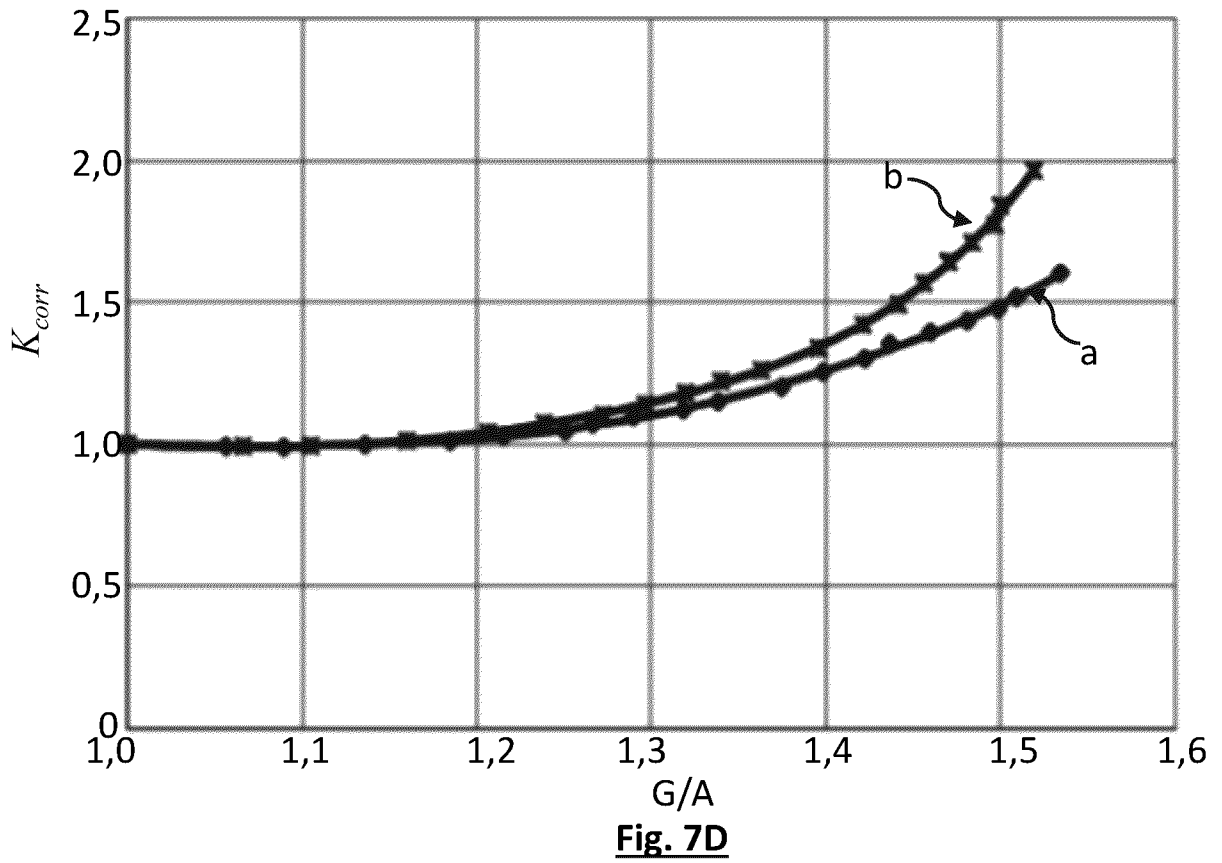
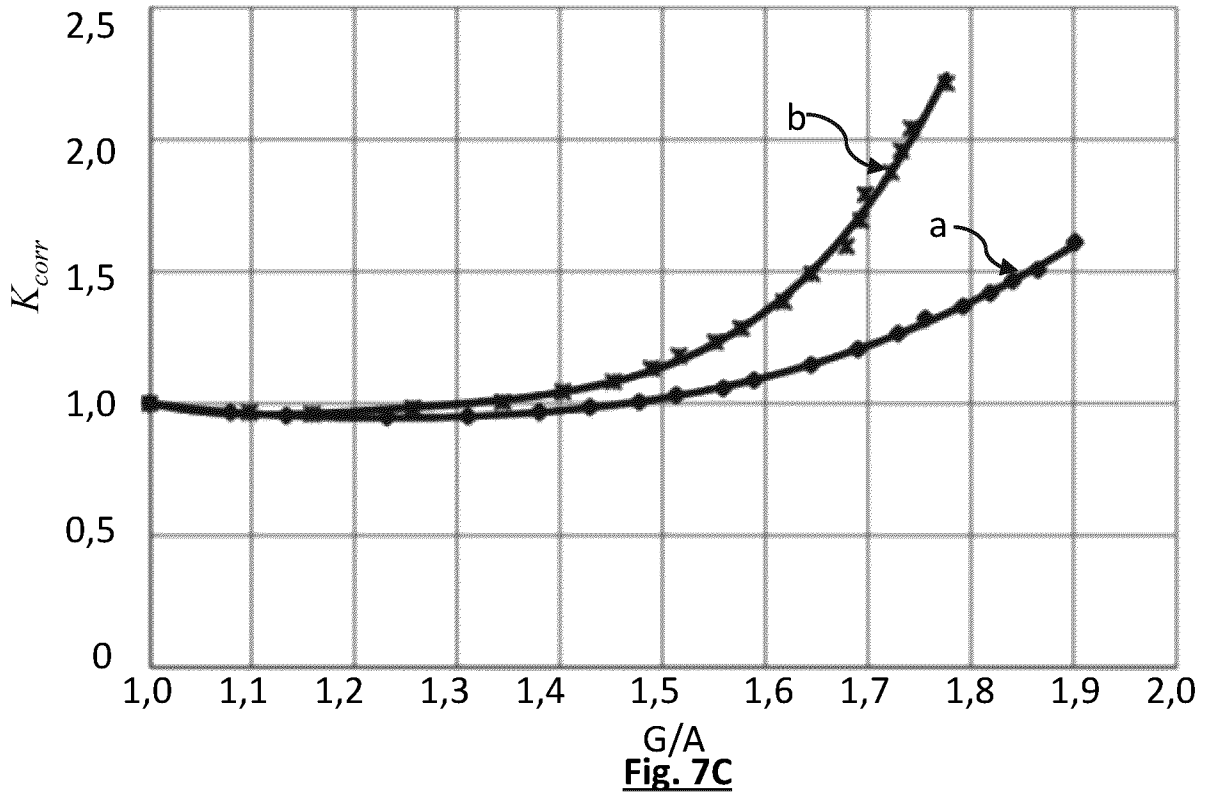
Fig. 6E



**Fig. 7A**



**Fig. 7B**



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2023/060551

<b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b>		
<i>G01T 1/16</i> (2006.01)i; <i>G01T 1/36</i> (2006.01)i; <i>G01T 1/169</i> (2006.01)i		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
<b>B. FIELDS SEARCHED</b>		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)		
G01T		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
EPO-Internal		
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	KR 20200054020 A (KOREA ATOMIC ENERGY RES [KR]) 19 May 2020 (2020-05-19) paragraphs [0001] - [0003], [0010], [0011], [0021], [0024], [0025], [0028], [0032], [0033], [0035], [0037], [0048] - paragraphs [0051] - [0055], [0062], [0063], [0067], [0078] - [0084]; figures 1-4	1-13
X	JP 2018141669 A (SHIMIZU CONSTRUCTION CO LTD) 13 September 2018 (2018-09-13) paragraphs [0006], [0007], [0012], [0019] - [0023], [0025], [0029]; figures 1-4	1,12
A	JP 2020193811 A (MITSUBISHI HEAVY IND LTD) 03 December 2020 (2020-12-03) paragraph [0064]; figures 1,2,9	1,12
Y	Marchais Thomas. "Optimisation des mesures de spectrométrie gamma pour la prospection de l'uranium" <i>HAL Open Science</i> , 16 November 2019 (2019-11-16), pages 1-205, Retrieved from the Internet: <a href="https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02366534/document">https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02366534/docu ment</a> XP055915158	3
A	page 186, paragraphs A.11, A.12 - page 191; figures 18, 155,156	1,12
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search		Date of mailing of the international search report
20 July 2023		28 July 2023
Name and mailing address of the ISA/EP		Authorized officer
European Patent Office p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk Netherlands Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		Van Ouysel, Krist'l  Telephone No.

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2023/060551

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	KR 101958627 B1 (KOREA ATOMIC ENERGY RES [KR]) 15 March 2019 (2019-03-15) paragraph [0031]	4,5 11
X	POTAPOV V.N ET AL. "Reliably Implemented Non-destructive Spectrometric Method for the Characterization of Volume Contamination of Objects at Nuclear Industry" <i>IEEE 2019 IEEE NUCLEAR SCIENCE SYMPOSIUM AND MEDICAL IMAGING CONFÉRENCE</i> , IEEE, 13 December 2019 (2019-12-13), XP033747784 cited in the application page 1, column 2, lines 1-4; figures 2,4 page 2, column 1, lines 1-26 page 3, column 2, line 23 - page 5, column 2, line 12 page 8, column 1	1-13
Y	"Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data" , Vol. IAEA-TECDOC-1363, 01 July 2003 (2003-07-01), pages 1-173, IAEA TECHNICAL DOCUMENTS SERIES, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, AT, Retrieved from the Internet: <a href="http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/6746/Guide_lines-for-Radioelement-Mapping-Using-Gamma-Ray-Spectrometry-Data">http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/6746/Guide_lines-for-Radioelement-Mapping-Using-Gamma-Ray-Spectrometry-Data</a> ISSN: 1011-4289, XP007923231 section 10.1;page 137 - page 139	1-13

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
**Information on patent family members**

International application No. <b>PCT/EP2023/060551</b>
---

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
KR	20200054020	A	19 May 2020	NONE	
JP	2018141669	A	13 September 2018	NONE	
JP	2020193811	A	03 December 2020	JP 7112989 B2	04 August 2022
				JP 2020193811 A	03 December 2020
KR	101958627	B1	15 March 2019	NONE	

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

**PCT/EP2023/060551**

<b>A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE</b> INV. <b>G01T1/16</b> <b>G01T1/36</b> <b>G01T1/169</b> ADD.		
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB		
<b>B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE</b> Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) <b>G01T</b>		
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche		
Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) <b>EPO-Internal</b>		
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS</b>		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
<b>Y</b>	<b>KR 2020 0054020 A (KOREA ATOMIC ENERGY RES [KR]) 19 mai 2020 (2020-05-19)</b> alinéas [0001] - [0003], [0010], [0011], [0021], [0024], [0025], [0028], [0032], [0033], [0035], [0037], [0048] - alinéas [0051] - [0055], [0062], [0063], [0067], [0078] - [0084]; figures 1-4 -----	<b>1-13</b>
<b>X</b>	<b>JP 2018 141669 A (SHIMIZU CONSTRUCTION CO LTD) 13 septembre 2018 (2018-09-13)</b> alinéas [0006], [0007], [0012], [0019] - [0023], [0025], [0029]; figures 1-4 -----	<b>1, 12</b>
<b>A</b>	<b>JP 2020 193811 A (MITSUBISHI HEAVY IND LTD) 3 décembre 2020 (2020-12-03)</b> alinéa [0064]; figures 1, 2, 9 -----	<b>1, 12</b>
	-/--	
<input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents <input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe		
* Catégories spéciales de documents cités:		
"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée) "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée		"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention "X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément "Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier "&" document qui fait partie de la même famille de brevets
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée  <b>20 juillet 2023</b>		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale  <b>28/07/2023</b>
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Fonctionnaire autorisé  <b>Van Ouytsel, Krist '1</b>

1

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
Y	<p>Marchais Thomas: "Optimisation des mesures de spectrométrie gamma pour la prospection de l'uranium", HAL Open Science, 16 novembre 2019 (2019-11-16), pages 1-205, XP055915158, Extrait de l'Internet: URL:https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02366534/document</p>	3
A	<p>page 186, alinéas A.11, A.12 - page 191; figures 18, 155,156</p> <p>-----</p>	1,12
Y	<p>KR 101 958 627 B1 (KOREA ATOMIC ENERGY RES [KR]) 15 mars 2019 (2019-03-15)</p>	4,5
A	<p>alinéa [0031]</p> <p>-----</p>	11
X	<p>POTAPOV V.N ET AL.: "Reliably Implemented Non-destructive Spectrometric Method for the Characterization of Volume Contamination of Objects at Nuclear Industry", IEEE 2019 IEEE NUCLEAR SCIENCE SYMPOSIUM AND MEDICAL IMAGING CONFÉRENCE, 13 décembre 2019 (2019-12-13), XP033747784, IEEE cité dans la demande page 1, colonne 2, lignes 1-4; figures 2,4 page 2, colonne 1, lignes 1-26 page 3, colonne 2, ligne 23 - page 5, colonne 2, ligne 12 page 8, colonne 1</p> <p>-----</p>	1-13
Y	<p>"Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data", IAEA TECHNICAL DOCUMENTS SERIES, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, AT / vol. IAEA-TECDOC-1363 1 juillet 2003 (2003-07-01), pages 1-173, XP007923231, ISSN: 1011-4289 Extrait de l'Internet: URL:http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/6746/Guidelines-for-Radioelement-Mapping-Using-Gamma-Ray-Spectrometry-Data section 10.1; page 137 - page 139</p> <p>-----</p>	1-13

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2023/060551

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
KR 20200054020 A	19-05-2020	AUCUN	
JP 2018141669 A	13-09-2018	AUCUN	
JP 2020193811 A	03-12-2020	JP 7112989 B2 JP 2020193811 A	04-08-2022 03-12-2020
KR 101958627 B1	15-03-2019	AUCUN	