

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
—
**INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE**
—
COURBEVOIE
—

①1 N° de publication :

3 134 900

(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

②1 N° d'enregistrement national :

22 03789

⑤1 Int Cl⁸ : **G 01 T 1/169 (2022.01)**

⑫

BREVET D'INVENTION

B1

⑤4 Dispositif et procédé de caractérisation d'une profondeur d'activité d'un radionucléide dans un milieu solide.

②2 Date de dépôt : 23.04.22.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public
de la demande : 27.10.23 Bulletin 23/43.

④5 Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 04.10.24 Bulletin 24/40.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑥0 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦1 Demandeur(s) : *Commissariat à l'Energie Atomique
et aux Energies Alternatives Etablissement public à
caractère industriel et commercial — FR.*

⑦2 Inventeur(s) : MAHE Charly et VENARA Julien.

⑦3 Titulaire(s) : *Commissariat à l'Energie Atomique et
aux Energies Alternatives Etablissement public à
caractère industriel et commercial.*

⑦4 Mandataire(s) : INNOV-GROUP.

FR 3 134 900 - B1



Description

Titre de l'invention : Dispositif et procédé de caractérisation d'une profondeur d'activité d'un radionucléide dans un milieu solide

Domaine technique

[0001] 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

[0002] 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 l'activité est élevée.

[0003] 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 à travers le béton.

[0004] 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.

[0005] 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 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.

[0006] 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 présentée ci-après répond à ces besoins d'amélioration.

Exposé de l'invention

[0007] 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 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 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 ;
- 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 ;
- d'un deuxième coefficient de calibration à la deuxième valeur spectrale, pour obtenir une deuxième valeur spectrale calibrée ;

[0008] 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 ;

- 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 ;

- [0009] 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 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.
- [0010] 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.
- [0011] 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.
- [0012] Le procédé peut comprendre, 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 ;
 - 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 radionucléide naturel, au moins dans la première bande d'énergie.
- [0013] 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) ;
 - ou un spectre mesuré par le détecteur spectrométrique mis en œuvre lors de l'étape a).
- [0014] Le procédé peut comporter, 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.
- [0015] 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.
- [0016] 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 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.
- [0017] 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) ;
 - ou un spectre mesuré par le détecteur spectrométrique mis en œuvre lors de l'étape a).
- [0018] 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 comparaison.
- [0019] L'indicateur de comparaison peut être un ratio ou une différence entre la première valeur spectrale calibrée et la deuxième valeur spectrale calibrée.
- [0020] Le milieu solide peut être du béton ou de la terre ou du sable.
- [0021] 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 :
- 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.

[0022] 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

[0023] La [Fig.1] schématise les principaux composants d'un dispositif selon l'invention.

[0024] La [Fig.2] montre les principales étapes d'un procédé de mise en œuvre de l'invention.

[0025] La [Fig.3] illustre deux bandes d'énergies appliquées à un spectre.

[0026] La [Fig.4A] montre un spectre de l'activité naturelle d'une paroi de béton.

[0027] La [Fig.4B] est un spectre de l'activité d'une paroi de béton faiblement contaminée en ^{137}Cs .

[0028] La [Fig.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).

[0029] La [Fig.5B] représente une fonction de calibration (courbe 1) et une fonction de correction (courbe 2).

[0030] La [Fig.6A] montre un dispositif de mesure dont le détecteur est un cristal de Germanium refroidi.

[0031] La [Fig.6B] montre des modélisations d'un spectre d'une paroi de béton de densité 2.3 g.cm^{-3} pour une même activité totale de ^{137}Cs et différentes profondeurs de l'activité.

[0032] La figure 6C montre des modélisations d'un spectre d'une paroi de béton baryté de densité 3.35 g.cm^{-3} pour une même activité totale de ^{137}Cs et différentes profondeurs de l'activité.

[0033] La [Fig.6D] montre des modélisations d'un spectre d'une paroi de béton de densité 2.3 g.cm^{-3} pour une même activité totale de ^{60}Co et différentes profondeurs de l'activité.

[0034] La [Fig.6E] montre des modélisations d'un spectre d'une paroi de béton baryté de densité 3.35 g.cm^{-3} pour une même activité totale de ^{60}Co et différentes profondeurs de l'activité.

[0035] La [Fig.7A] montre des fonctions de calibration établies en prenant en compte deux densités différentes (2.3 g.cm^{-3} et 3.35 g.cm^{-3}) et une activité de ^{137}Cs .

[0036] La [Fig.7B] montre des fonctions de calibration établies en prenant en compte deux densités différentes (2.3 g.cm^{-3} et 3.35 g.cm^{-3}) et une activité de ^{60}Co .

[0037] La [Fig.7C] montre des fonctions de correction établies en prenant en compte deux densités différentes (2.3 g.cm^{-3} et 3.35 g.cm^{-3}) et une activité de ^{137}Cs .

[0038] La [Fig.7D] montre des fonctions de correction établies en prenant en compte deux densités différentes (2.3 g.cm^{-3} et 3.35 g.cm^{-3}) et une activité de ^{60}Co .

EXPOSE DE MODES DE REALISATION PARTICULIERS

- [0039] La [Fig.1] décrit un dispositif 1 adapté à une mise en œuvre de l'invention. Le dispositif 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 90% de l'activité du radionucléide.
- [0040] 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}Cs (par exemple dans les installations de retraitement du combustible) ou ^{60}Co (par exemple dans les réacteurs nucléaires).
- [0041] 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 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 étant généralement compris entre plusieurs centaines et plusieurs milliers.
- [0042] 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 photons émis par le radionucléide. Les énergies d'émission des principaux radionucléides sont connues et disponibles dans des bases de données nucléaires.
- [0043] Dans l'exemple représenté sur la [Fig.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_3 . De façon avantageuse, on peut mettre en œuvre un détecteur semi-conducteur, par exemple Ge, ce qui permet 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.

- [0044] Sur la figure 1, on a également schématisé un gradient de l'activité $Act(z)$ en fonction de la profondeur z .
- [0045] Le spectre mesuré peut comporter une composante de bruit de fond, qui correspond au fond radiologique auquel est exposé le détecteur 10. Le bruit de fond peut avoir plusieurs composantes.
- [0046] 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 milieu M. Un émetteur gamma naturel usuellement rencontré est ^{40}K , sachant que d'autres émetteurs gamma, résultant des chaînes de désintégration de ^{238}U ou de ^{232}Th peuvent être rencontrés. La prise en compte du bruit de fond naturel constitue un aspect intéressant de l'invention, décrit par la suite.
- [0047] Une deuxième composante est le bruit de fond induit par le voisinage de la paroi contrôlée. Afin 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 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 ainsi être soustraite de la mesure effectuée sans bouchon.
- [0048] 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 [Fig.2].
- [0049] La [Fig.2] représente les principales étapes de mise en œuvre du procédé, qui sont à présent décrites.
- [0050] Etape 100 : disposition du dispositif 1 face au milieu à analyser. Dans cet exemple, le milieu solide est une paroi de béton.

- [0051] 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.
- [0052] 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.
- [0053] 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.
- [0054] 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.
- [0055] Etape 140 : Sélection de bandes d'énergie
- [0056] 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.
- [0057] Une première bande d'énergie ΔE_1 s'étend de part et d'autre d'une zone spectrale correspondant au front Compton. La largeur de la première bande d'énergie ΔE_1 dépend de la résolution en énergie du détecteur, l'énergie maximale de la bande d'énergie ΔE_1 pouvant correspondre à l'énergie minimale de la bande d'énergie ΔE_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 ».
- [0058] 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}Cs dont le gradient, selon la profondeur z , est modélisé par une fonction exponentielle décroissante. Sur la figure 3, la première bande d'énergie ΔE_1 s'étend entre 290 keV et 600 keV.

[0059] La première bande d'énergie ΔE_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 ΔE_1 . Sur la [Fig.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° et 90° par la paroi de béton : ces interactions forment une deuxième composante du spectre dans la première bande d'énergie ΔE_1 . Sur la [Fig.1], on a représenté une telle interaction par une flèche en pointillés.

[0060] 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 ΔE_1 est faiblement dépendant, par exemple à $\pm 20\%$, de la profondeur de contamination.

[0061] La première bande d'énergie ΔE_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.

[0062] Une deuxième bande d'énergie ΔE_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 ΔE_2 correspond à tout ou partie du pic d'énergie totale. En fonction de la résolution en énergie du détecteur, la deuxième bande d'énergie ΔE_2 est plus ou moins large. De préférence, la deuxième bande d'énergie ΔE_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 d'émission.

- [0063] Dans l'exemple représenté sur la figure 3, la deuxième bande d'énergie ΔE_2 s'étend de part et d'autre de l'énergie d'émission de ^{137}Cs , soit 662 keV. Dans cet exemple, la deuxième bande d'énergie ΔE_2 s'étend entre 577 keV et 747 keV.
- [0064] De préférence, la première bande d'énergie et la deuxième bande d'énergie ne se recouvrent 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.
- [0065] Suite à l'étape 140, on dispose d'un premier nombre d'impulsions N_1 dans la première bande d'énergie ΔE_1 et d'un deuxième nombre d'impulsions N_2 dans la deuxième bande d'énergie ΔE_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.
- [0066] 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 140, on dispose d'une première valeur spectrale N_1 et d'une deuxième valeur spectrale N_2 .
- [0067] 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.
- [0068] 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 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 ΔE_1 , doit être quantifiée et retirée.
- [0069] 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 ΔE_2 , soit quantifiée et retirée.
- [0070] Les principaux émetteurs naturels peuvent aisément être identifiés par leurs pics photoélectriques d'émission. Il s'agit de descendants du ^{232}Th , de l' ^{238}U . Il s'agit également du ^{40}K .
- [0071] 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.

[0072] Sous-é tape 1 5 1 : Identification, dans le spectre représentatif *Sp'*, de pics d'émission correspondant à des descendants de ^{232}Th et de ^{238}U ou de ^{40}K .

[0073] 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 γ	keV	%
^{232}Th	^{212}Pb	238.63	43.5
^{238}U	^{214}Pb	295.22	18.29
^{232}Th	^{228}Ac	338.37	12.01
^{238}U	^{214}Pb	351.93	35.35
^{232}Th	^{208}Tl	583.19	85.10
^{238}U	^{214}Bi	609.31	48.89
^{232}Th	^{228}Ac	911.32	29
^{232}Th	^{228}Ac	969.16	17.46
^{238}U	^{214}Bi	1120.28	15.5
^{40}K		1460.82	10.66
^{238}U	^{214}Bi	1764.5	16.2
^{232}Th	^{208}Tl	2614.55	99.83

[0074] 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 ΔE_i .

[0075] Sous-é tape 1 5 2 : Estimation d'une activité massique de ^{232}Th , de ^{238}U et de ^{40}K .

[0076] L'activité massique de ^{232}Th et ^{238}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}Th et de ^{238}U sont en équilibre radioactif avec leurs pères respectifs.

[0077] 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 :

$$[0078] \quad A_i = \frac{N(E_i)}{FT(i, E_i, d)} \quad (1)$$

[0079] 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 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.

[0080] 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 :

$$[0081] \quad A_m = \frac{\sum_i \frac{A_i}{\sigma_{A_i}^2}}{\sum_i \frac{1}{\sigma_{A_i}^2}} \quad (2)$$

[0082] 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 .

[0083] Dans le cas de ^{40}K , l'activité massique est obtenue en appliquant l'expression (1) au pic d'émission à 1460 keV.

[0084] Sous-étape 1 5 3 : Simulation de la contribution de ^{232}Th , de ^{238}U et de ^{40}K .

[0085] 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 ΔE_i , est estimée. Selon une possibilité, on a préalablement simulé une contribution de chaque radionucléide naturel pour une activité homogène unitaire,

par exemple 1 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.

Sous-étape 154

- [0086] 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 $N_2 - N_{2,nat}$
- [0087] La figure 4B montre un spectre d'une paroi de béton faiblement contaminée en ^{137}Cs . On observe le pic d'émission de ^{137}Cs , à l'énergie 661.6 keV. Sur la figure 4B, on a représenté la première bande d'énergie ΔE_1 , qui a été définie entre 300 keV et 659 keV. La deuxième bande d'énergie ΔE_2 correspond au pic d'émission de ^{137}Cs , en prenant en compte la résolution spectrale du détecteur. Dans cet exemple, elle s'étend entre 659.5 keV et 663.1 keV.
- [0088] Etape 1 6 0 : Obtention de valeurs spectrales calibrées
- [0089] 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.
- [0090] 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 deuxième valeur de référence N_{20} .
- [0091] 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 purement surfacique, homogène, de valeur prédéterminée. Il peut par exemple s'agir d'une activité surfacique uniforme égale 1 Bq.cm^{-2} , ce qui correspond à une activité surfacique dite unitaire. Alternativement, l'activité de référence est une activité massique de 1 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 Bq.g^{-1} que l'on considère répartie selon un gradient prédéterminée, jusqu'à une profondeur arbitraire.
- [0092] Le premier coefficient de calibration α et le deuxième coefficient de calibration β sont tels que :

[0093] $\alpha \times N_{10} = A_0$ (3)

[0094] et

[0095] $\beta \times N_{20} = A_0$ (4)

[0096] 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.

[0097] Au cours de l'étape 140, la première valeur spectrale N_1 multipliée par le premier coefficient de calibration α , et la deuxième valeur spectrale N_2 multipliée par le deuxième coefficient de calibration β . 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

$$A = \beta \times N_2 = \frac{A_0 N_2}{N_{20}} \quad (6)$$

[0098] 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.

[0099] 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.

[0100] Etape 1 8 0 : Calcul d'un ratio de la première valeur calibrée sur la deuxième valeur calibrée.

[0101] 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.

[0102] Etape 1 9 0 : Prise en compte d'une fonction de calibration.

[0103] 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.

[0104] Ainsi, $Z_0 = f\left(\frac{G}{A}\right)$ (7)

[0105] 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 :

[0106] où $P(z) = \frac{2,3026}{Z_0} \exp\left(-\frac{2,3026}{Z_0}z\right)$ (8)

[0107] Ainsi,

[0108] $Act(z) = Act_{tot}P(z)$ (9)

[0109] 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 ;
- Act_{tot} est l'activité totale.

[0110] 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,

$$\int_0^{Z_0} Act(z) dz = \int_0^{Z_0} Act_{tot}P(z) dz = 0,9 Act_{tot} \quad (10)$$

[0111] 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 α et β , obtenus suite à l'étape 50, de façon à estimer, pour chaque profondeur Z_0 , des valeurs calibrées $G(Z_0)$ et $A(Z_0)$.

[0112] 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.

[0113] 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).

[0114] 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.

[0115] Etape 200 : Estimation de l'activité totale.

[0116] 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.

[0117] Ainsi, en première approximation, l'activité totale Act_{tot} peut être estimée par la première valeur calibrée G : $Act_{tot} \approx G$

[0118] Une façon plus précise d'estimer l'activité est d'utiliser la fonction K_{corr} avec

$$[0119] \quad Act_{tot} = GK_{corr}(G/A) \quad (11)$$

[0120] 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.

[0121] Les étapes 50, 70 et 80 forment des étapes de calibration du dispositif, permettant de définir le premier coefficient de calibration α , et le deuxième coefficient de calibration β (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.

[0122] 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.

[0123] 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 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

[0124] 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, 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 matériau et on sélectionne différents pics d'émission d'un même radionucléide naturel, par exemple ^{214}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

- [0125] 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 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.
- [0126] On considère que lorsque la densité prise en compte dans la fonction de transfert est supérieure 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 massiques déterminées à partir des pics d'énergie d'émission les plus élevées..
- [0127] 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.
- [0128] 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.
- [0129] 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 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 même ordre de grandeur que la radioactivité naturelle pour que les raies caractéristiques de la radioactivité naturelle puissent être identifiées.

Modélisations

- [0130] Les inventeurs ont modélisé différentes configurations de mesures. La [Fig.6A] illustre une configuration de modélisation. Chaque modélisation suppose une description de la géométrie :
- 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 détecteur par rapport à la surface délimitant le matériau examiné.
- [0131] Dans l'exemple de la [Fig.6A], le détecteur utilisé est un détecteur basé sur un cristal de Germanium refroidi par un réservoir d'azote liquide.
- [0132] La [Fig.6B] représente des spectres simulés en prenant en compte une même activité de ^{137}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 [Fig.6B], on a pris en compte un béton de densité 2.3 g.cm^{-3} .
- [0133] Ce type de simulation permet de définir les bornes de la première bande d'énergie ΔE_1 . Dans cet exemple, la borne supérieure de la première bande d'énergie correspond à la borne inférieure de la deuxième bande d'énergie ΔE_2 . La borne inférieure de la première bande d'énergie ΔE_1 correspond à une énergie à laquelle le spectre obtenu par simulation d'une 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 ΔE_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.
- [0134] La figure 6C représente des spectres simulés en prenant en compte une même activité de ^{137}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 g.cm^{-3} , ce qui correspond à un béton baryté. On observe qu'en prenant les mêmes hypothèses quant 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 ΔE_1 , cette borne inférieure est ici égale à 310 keV.

- [0135] Les figures 6D et 6E correspondent à des spectres simulés en prenant en compte une activité de ^{60}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 ([Fig.6D]) et 360 keV ([Fig.6E]).
- [0136] 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.
- [0137] La fonction de calibration a été établie en prenant en compte, pour une activité de ^{137}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 $\beta = 6.716 \text{ Bq.cm}^{-2}$;
- [0138] et pour une activité de ^{60}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 $\beta = 4.013 \text{ Bq.cm}^{-2}$.
- [0139] α varie avec la densité car les bornes de la première bande d'énergie ΔE_1 varient en fonction de la densité, comme décrit en lien avec les figures 6B à 6E.
- [0140] 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 ^{137}Cs et ^{60}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 .
- [0141] 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 ^{137}Cs et ^{60}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.

[0142] 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 .

[0143] 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}Co (énergies d'émission de 1173 keV et 1332 keV) que pour ^{137}Cs (énergie d'émission 662 keV).

[0144] 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

[Revendication 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 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 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 (ΔE_1) comportant des valeurs d'énergie inférieures à la deuxième bande d'énergie (ΔE_2), la deuxième bande d'énergie comportant le pic à l'énergie d'émission ;
- 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 ;
- d) application
- d'un premier coefficient de calibration (α) à la première valeur spectrale pour obtenir une première valeur spectrale calibrée ;
- d'un deuxième coefficient de calibration (β) 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 (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 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 :

- la première valeur spectrale est considérée comme faiblement dépendante de la profondeur selon laquelle le radionucléide s'étend,;
- 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.

[Revendication 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.

[Revendication 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.

[Revendication 4]

Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, comportant, 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 ;

- 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 radionucléide naturel, au moins dans la première bande d'énergie.

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

[Revendication 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.

[Revendication 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.

[Revendication 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.

[Revendication 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).

[Revendication 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 ($\frac{G}{A}$).

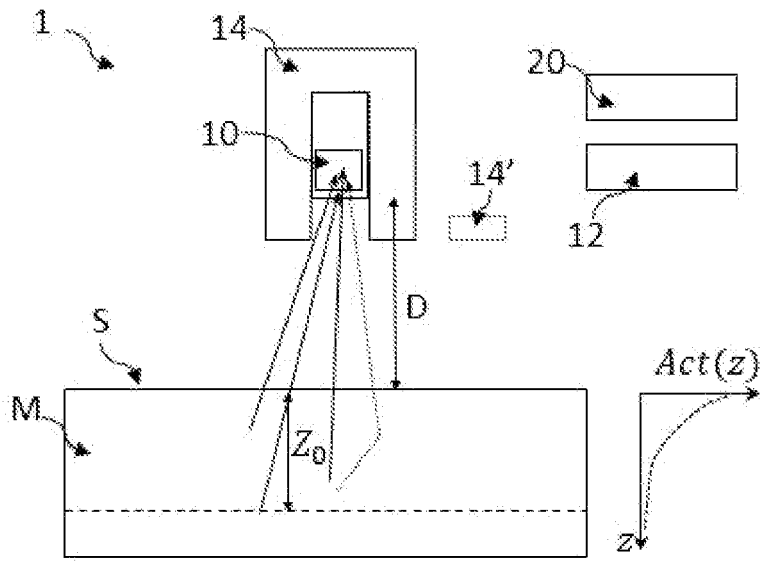
[Revendication 11] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le milieu solide est du béton ou de la terre.

[Revendication 12] 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 ;

- 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. 1**

[Fig. 2]

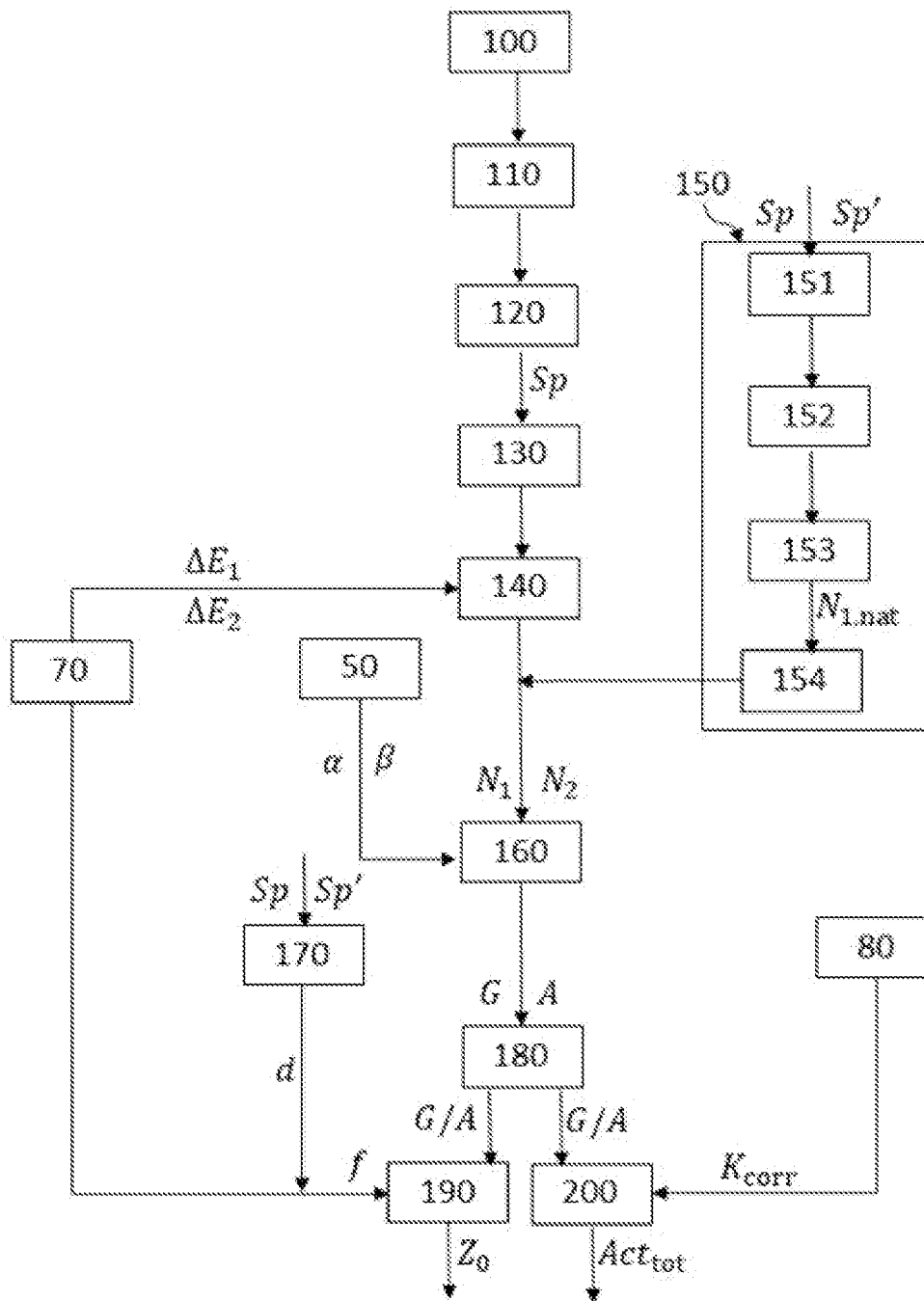
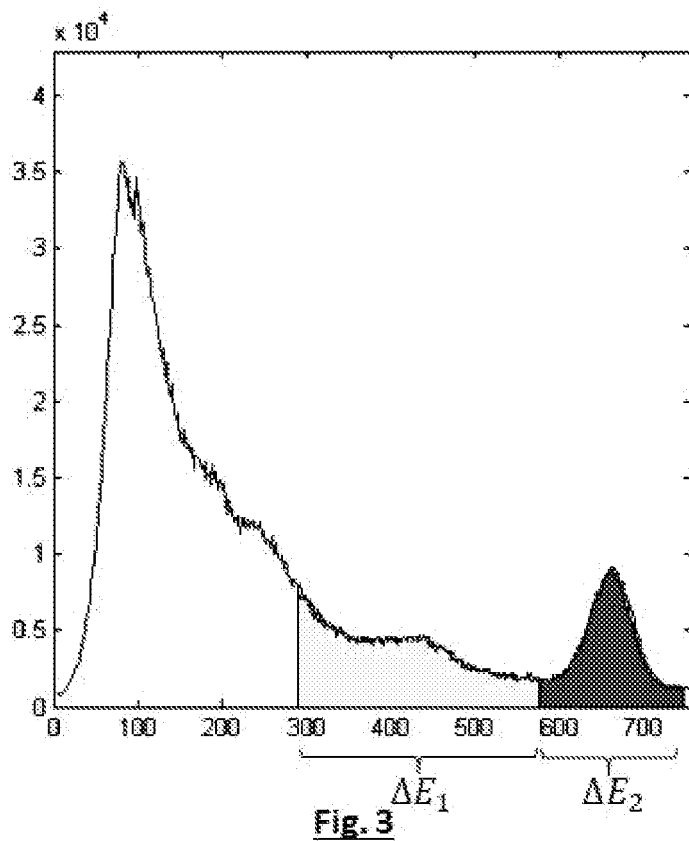
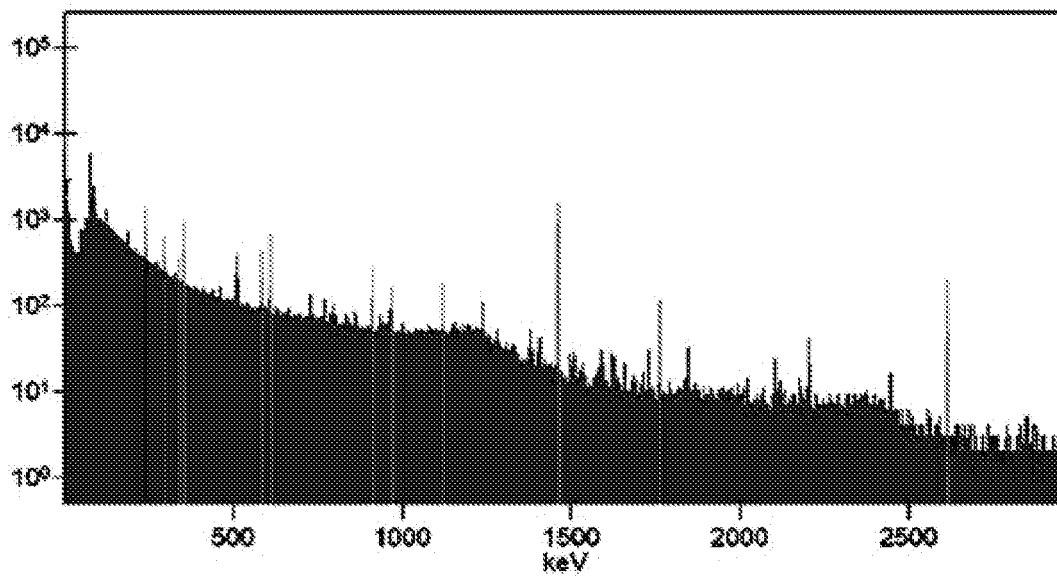


Fig. 2

[Fig. 3]



[Fig. 4A]



[Fig. 4B]

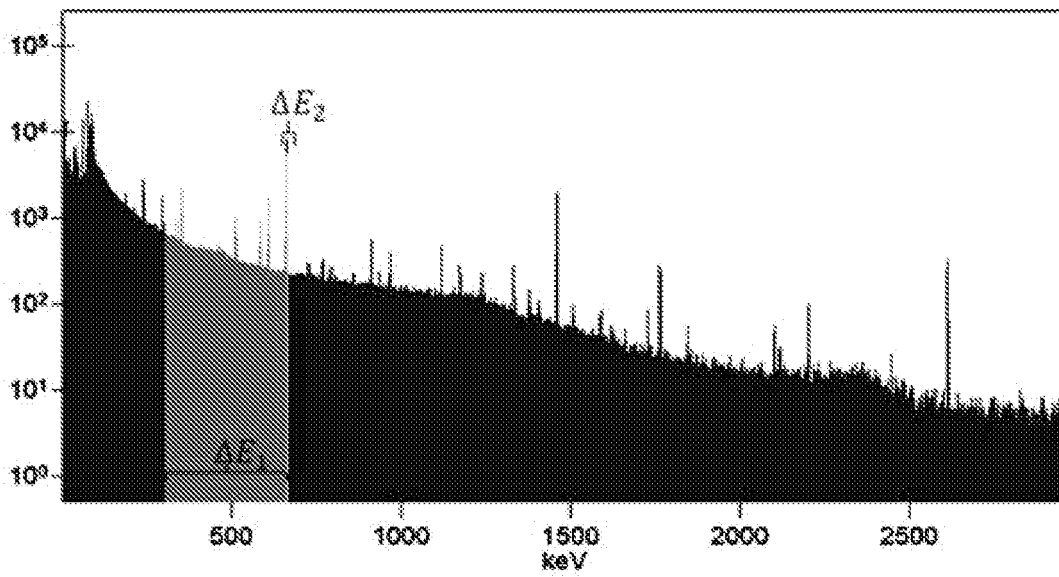


Fig. 4B

[Fig. 5A]

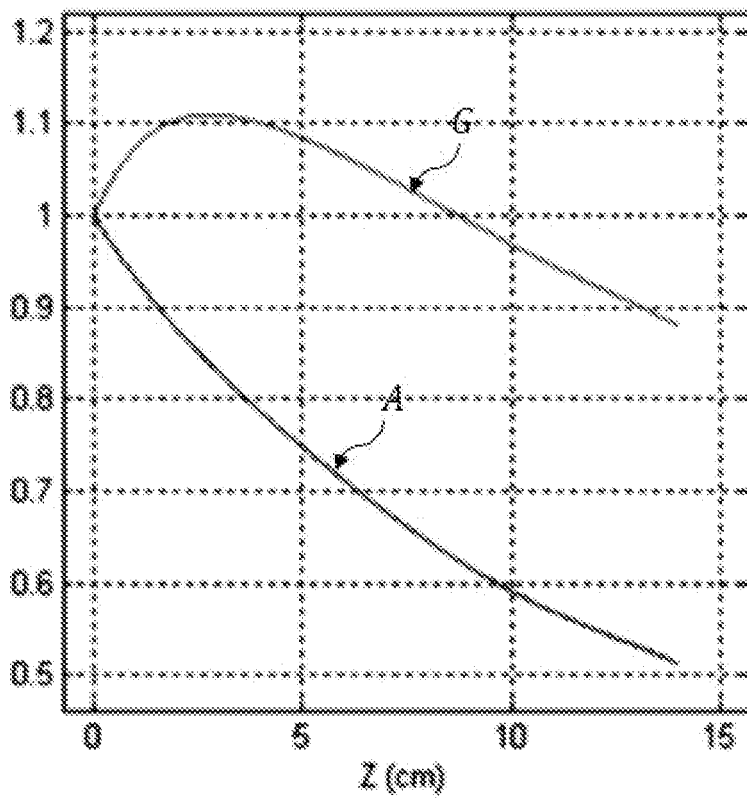


Fig. 5A

[Fig. 5B]

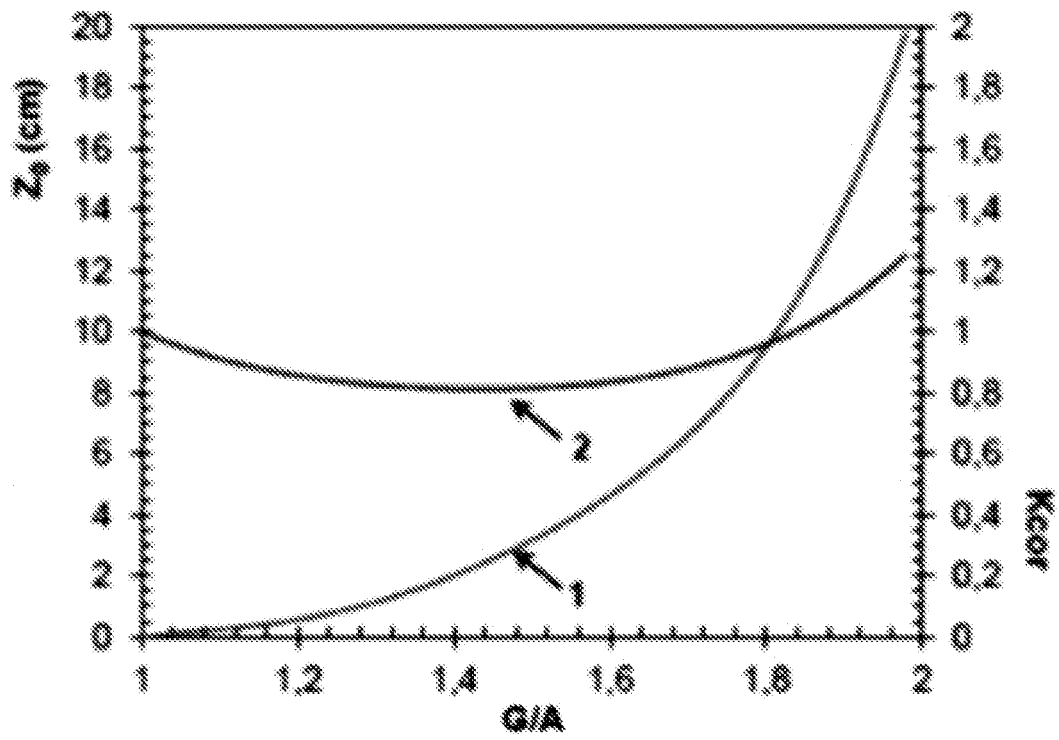


Fig. 5B

[Fig. 6A]

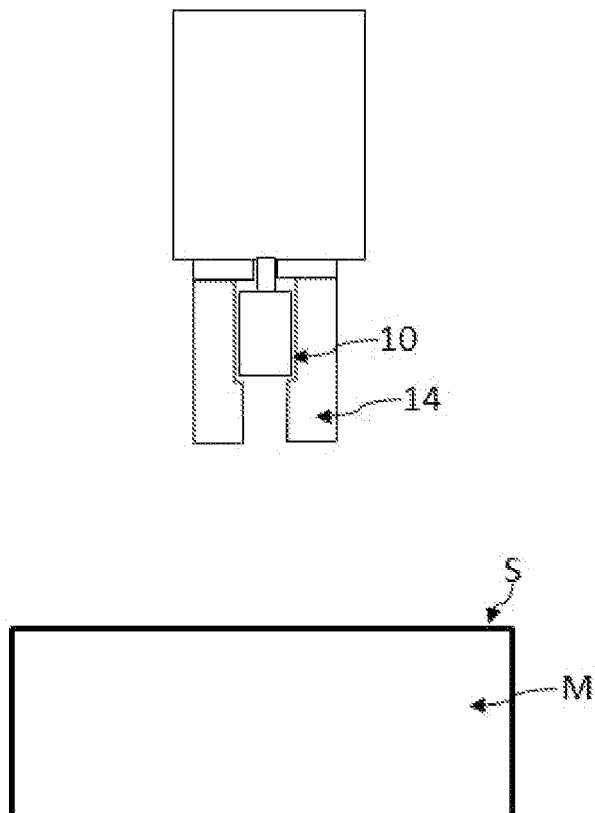


Fig. 6A

[Fig. 6B]

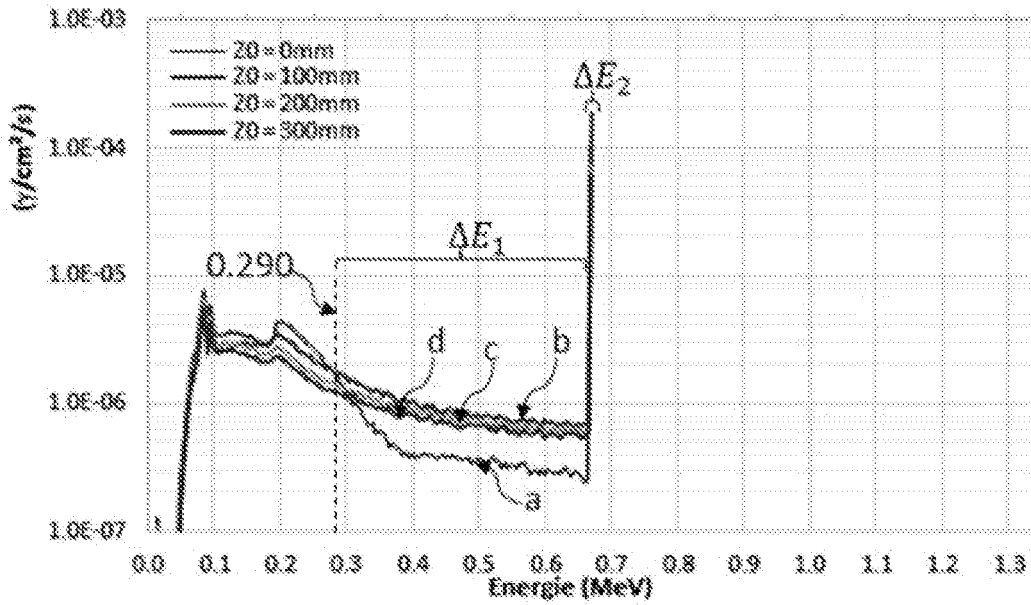


Fig. 6B

[Fig. 6D]

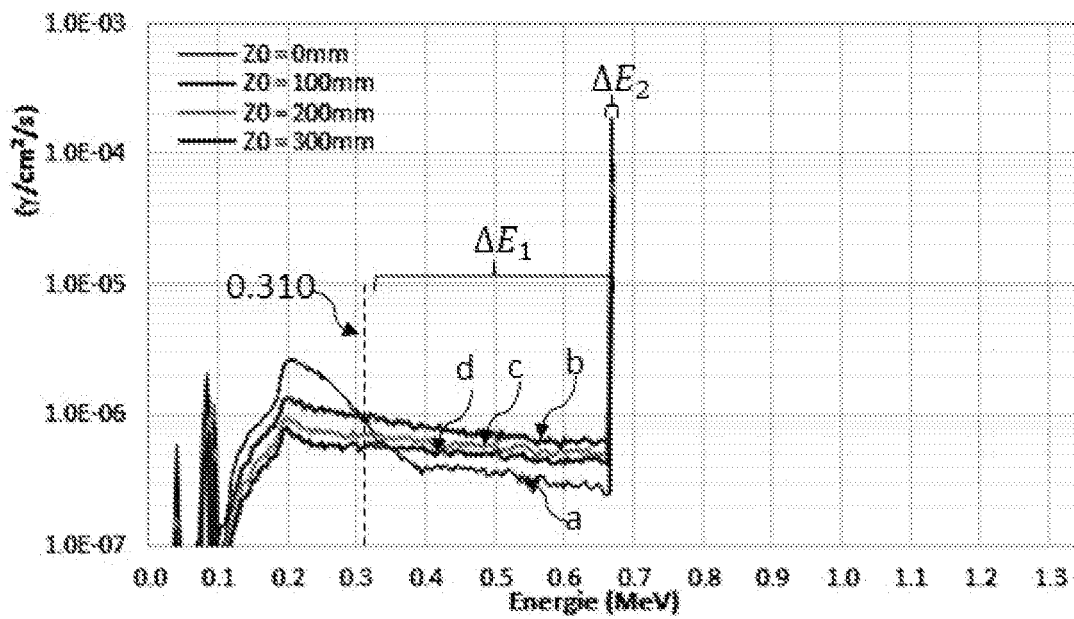


Fig. 6C

[Fig. 6D]

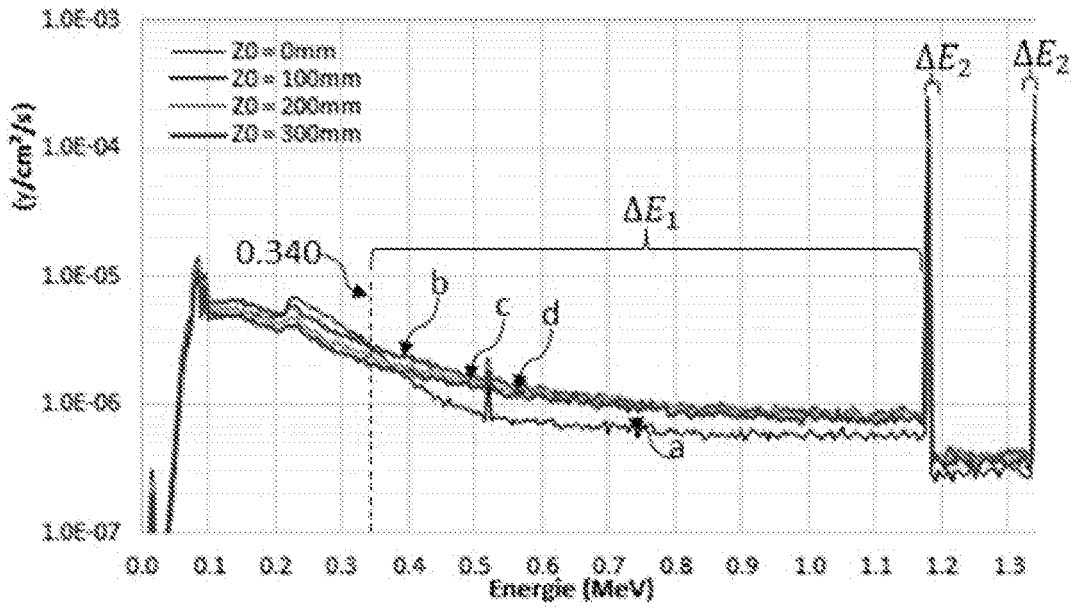


Fig. 6D

[Fig. 6E]

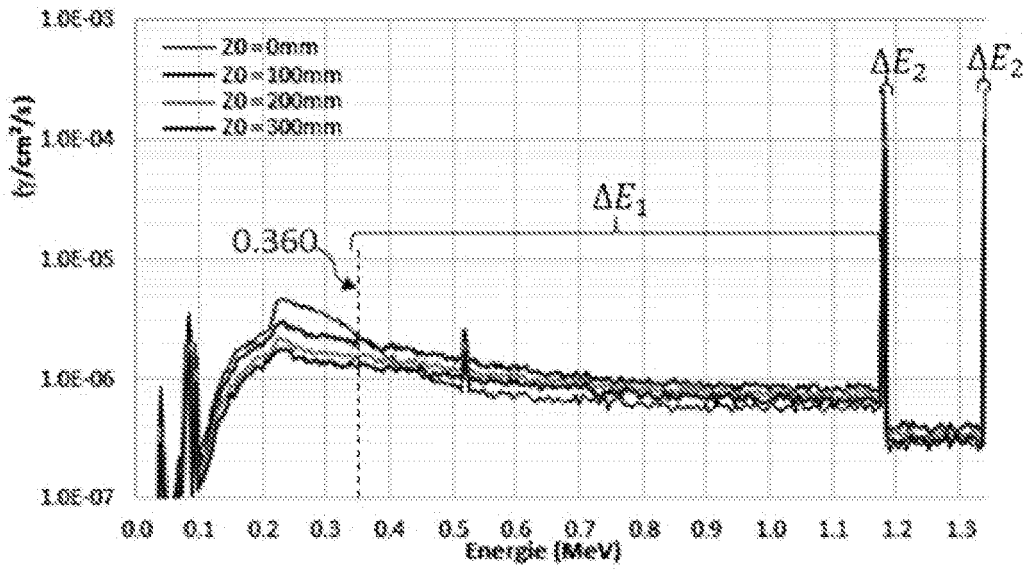
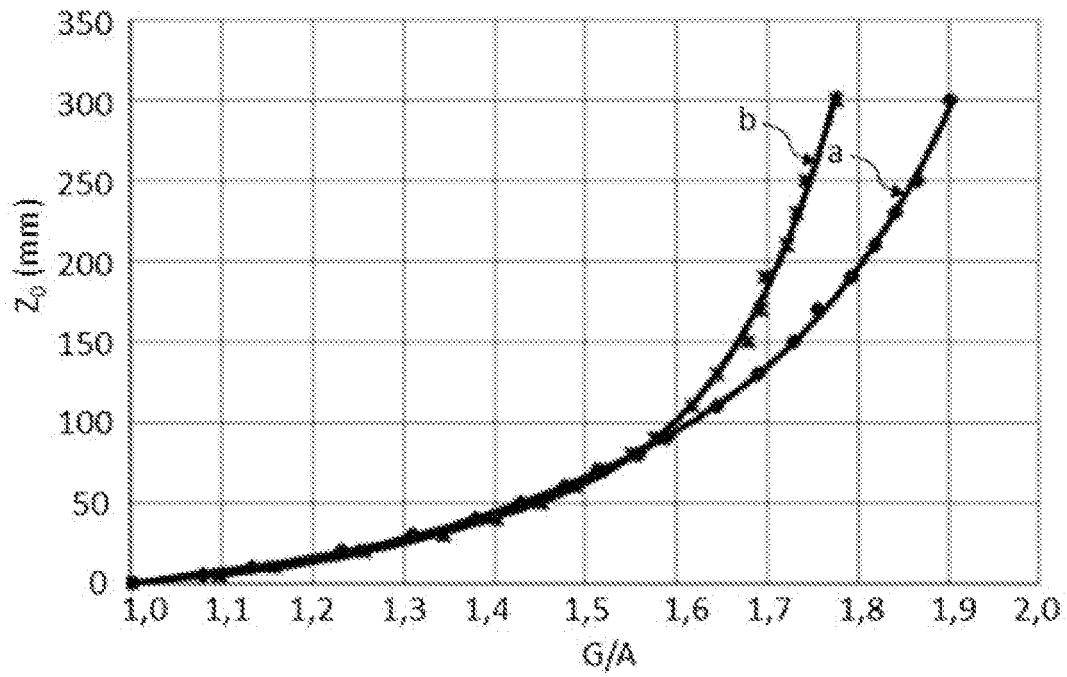
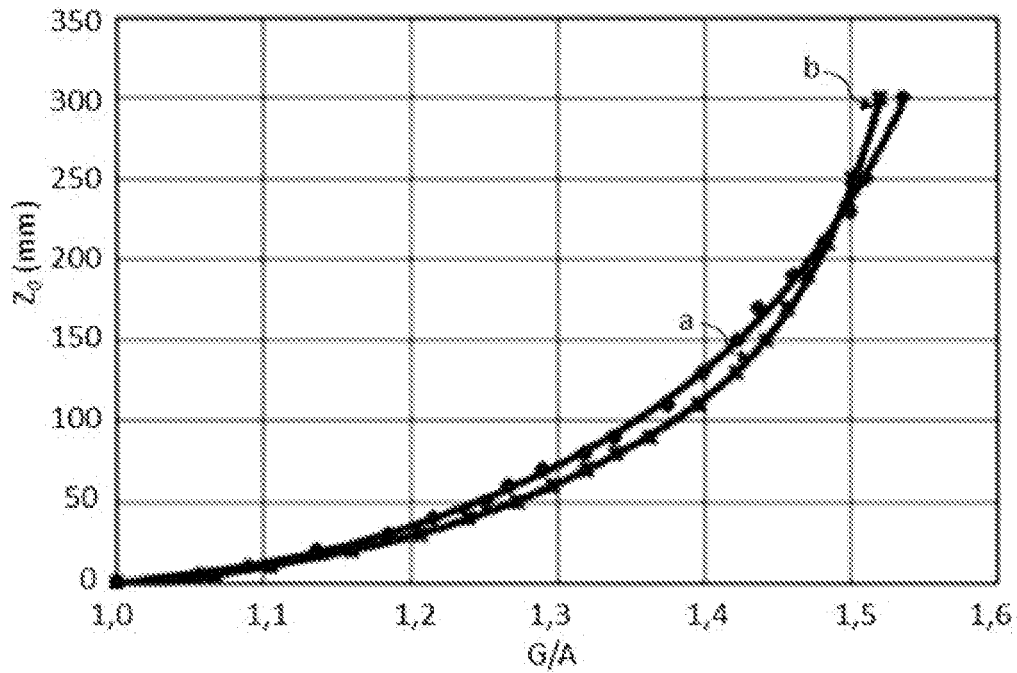


Fig. 6E

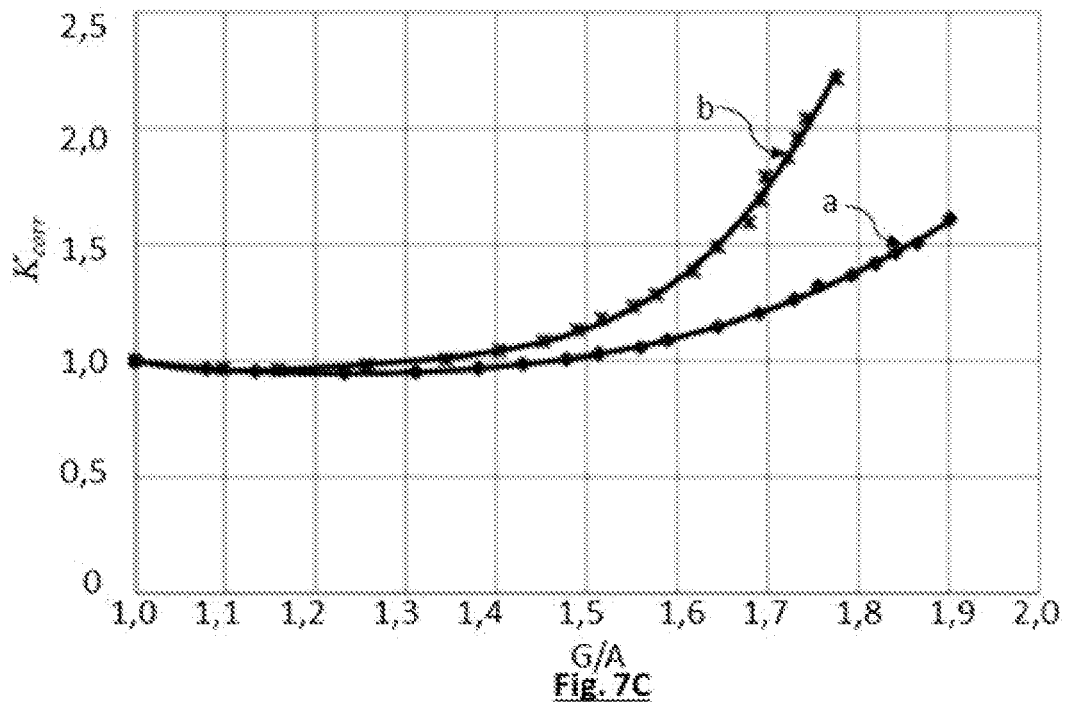
[Fig. 7A]

**Fig. 7A**

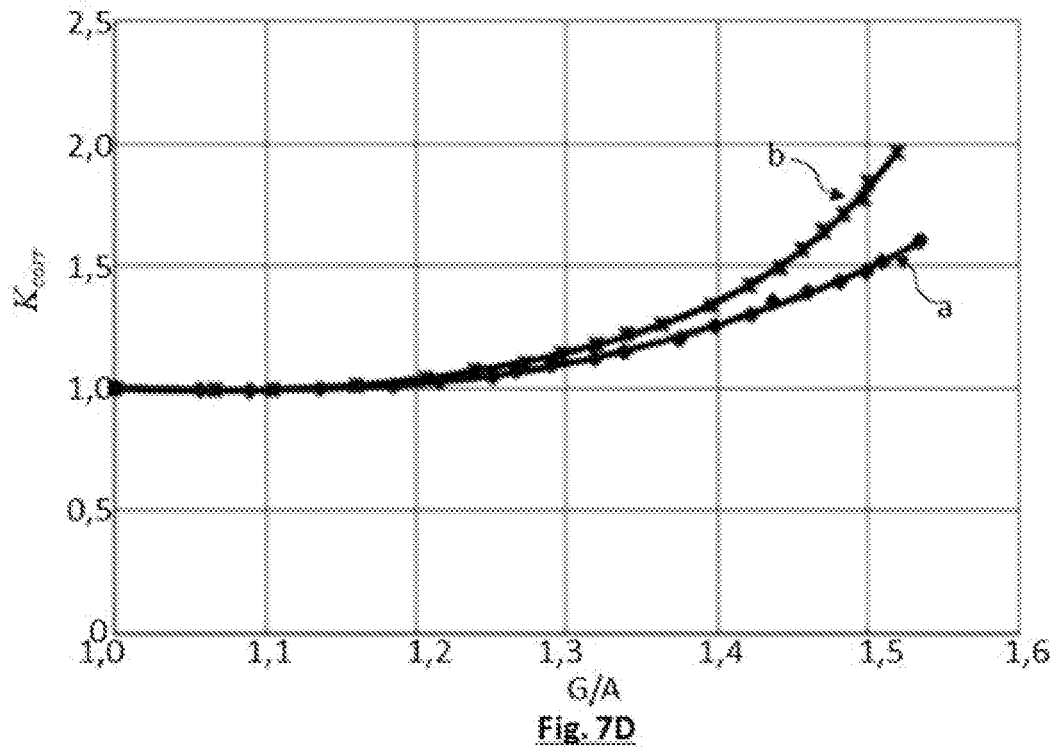
[Fig. 7B]

**Fig. 7B**

[Fig. 7C]



[Fig. 7D]



RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

Le demandeur a maintenu les revendications.

Le demandeur a modifié les revendications.

Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION

KR 2020 0054020 A (KOREA ATOMIC ENERGY RES [KR]) 19 mai 2020 (2020-05-19)

JP 2018 141669 A (SHIMIZU CONSTRUCTION CO LTD) 13 septembre 2018 (2018-09-13)

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>

KR 101 958 627 B1 (KOREA ATOMIC ENERGY RES [KR]) 15 mars 2019 (2019-03-15)

2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE GENERAL

JP 2020 193811 A (MITSUBISHI HEAVY IND LTD) 3 décembre 2020 (2020-12-03)

3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND DE LA VALIDITE DES PRIORITES

NEANT