

⑫ **BREVET D'INVENTION** **B1**

⑤④ Dispositif d'estimation d'une direction pointant vers une source irradiante.

②② Date de dépôt : 27.12.21.

③③ Priorité :

⑥⑥ 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.*

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 30.06.23 Bulletin 23/26.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 10.05.24 Bulletin 24/19.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑦② Inventeur(s) : MOLINE Yoann, CORRE Gwenolé,
GAMEIRO Jordan, LYNDE Clément et WOO
Romuald.

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

⑦④ Mandataire(s) : INNOV-GROUP.



Description

Titre de l'invention : Dispositif d'estimation d'une direction pointant vers une source irradiante

Domaine technique

[0001] Le domaine technique de l'invention concerne l'estimation d'une direction entre un dispositif de détection et une source irradiante détectée. Le dispositif de détection forme une boussole, pointant vers la source irradiante.

ART ANTERIEUR

[0002] La détermination d'une position d'une source radioactive irradiante dans un environnement peut être une opération fastidieuse. Il s'agit d'une opération susceptible d'être mise en œuvre dans des installations nucléaires, à des fins de radioprotection, ou dans des opérations de contrôle de marchandises ou de déchets suspects, par exemple à des frontières.

[0003] Une première option consiste à utiliser un dispositif de mesure d'irradiation tel que ceux usuellement utilisés dans le domaine de la radioprotection. Ce type de dispositif permet d'estimer un niveau d'irradiation ambiant, sans information quant à la position de sources générant l'irradiation. La localisation d'une source d'irradiation suppose un balayage spatial en effectuant des mesures régulières, en espérant s'approcher progressivement de la source en fonction des niveaux d'irradiation successivement mesurés. Une telle opération est longue, et donc pénalisante du point de vue de la dosimétrie. Le principal avantage de cette démarche est d'utiliser des moyens de mesure peu onéreux, simples à utiliser et disponibles.

[0004] Une autre option consiste à utiliser un imageur, de type gamma caméra. Une gamma caméra est un dispositif permettant de former une image d'une scène observée, sur laquelle les principales sources irradiantes peuvent être localisées. Ce type de dispositif s'est développé depuis les années 1990 et a atteint une maturité industrielle. Des gamma caméra compactes, et relativement légères, sont actuellement commercialement disponibles. Cependant, il s'agit d'un dispositif coûteux, et dont l'utilisation suppose un certain savoir-faire.

[0005] Le brevet US10024981B2 décrit un dispositif de mesure porté par un drone, et destiné à localiser une source irradiante en utilisant plusieurs détecteurs. La localisation de la source est effectuée par une comparaison de signaux simultanément détectés par plusieurs détecteurs. Mais la localisation est imprécise, car elle résulte d'une simple comparaison entre les intensités des signaux mesurés.

[0006] L'inventeur a conçu un dispositif, fonctionnant comme une boussole, permettant d'indiquer une direction pointant vers une source irradiante. Le dispositif est de

conception simple, et permet d'obtenir une information directionnelle. Il s'agit également d'un dispositif peu onéreux, et simple à utiliser.

Exposé de l'invention

- [0007] Un premier objet de l'invention est un dispositif d'estimation d'une direction pointant vers une source irradiante, la source irradiante émettant un rayonnement composé de particules gamma ou X ou neutrons, le dispositif comportant :
- un support;
 - au moins deux détecteurs de rayonnement, chaque détecteur étant configuré pour générer un signal de détection dépendant d'un nombre de particules détectées par le détecteur;
- [0008] le dispositif étant tel qu'à chaque détecteur est assigné une position, les détecteurs étant disposés autour d'un centre correspondant à un isobarycentre de chaque position, le dispositif comportant une unité de traitement, configurée pour
- effectuer un calcul d'un barycentre de chaque position pondéré par le signal de détection mesuré par le détecteur occupant ladite position ;
 - en fonction du barycentre, estimer une direction pointant vers la source irradiante, correspondant à une direction entre le dispositif et la source irradiante.
- [0009] Selon un mode de réalisation, le dispositif comporte au moins trois détecteurs non alignés.
- [0010] Selon un mode de réalisation, l'unité de traitement est configurée pour :
- mémoriser les signaux de détection des détecteurs à un premier instant;
 - mémoriser les signaux de détection des détecteurs à un deuxième instant, postérieur au premier instant ;
 - prendre en compte une position de chaque détecteur au premier instant et au deuxième instant ;
 - effectuer un calcul du barycentre des positions respectives des détecteurs à chaque instant, pondéré par les signaux de détection mesurés respectivement par chaque détecteur à chaque instant.
- [0011] Le dispositif peut comporter une unité d'orientation, configurée pour estimer une variation de la position des détecteurs entre le premier instant et le deuxième instant.
- [0012] Le dispositif peut comporter une unité d'affichage, reliée à l'unité de traitement, et configurée pour afficher la direction pointant vers la source irradiante.
- [0013] Au moins un détecteur ou chaque détecteur peut comporter un matériau de détection de type scintillateur. Au moins un détecteur ou chaque détecteur peut comporter un matériau de détection de type scintillateur inorganique.
- [0014] Selon un mode de réalisation, l'unité de traitement est configurée pour :

- prendre en compte une distance de déplacement du dispositif entre deux instants de mesure successifs, selon la direction pointant vers la source irradiante ;
 - mesurer les signaux de détection générés par un détecteur du dispositif aux deux instants de mesure successifs ;
 - estimer une distance entre le dispositif et la source en fonction de la distance de déplacement et des signaux de détection mesurés à chaque instant.
- [0015] Le dispositif peut comporter une unité de géolocalisation, configurée pour mesurer la distance de déplacement du dispositif entre les deux instants de mesure successifs.
- [0016] Un deuxième objet de l'invention est un procédé de détermination d'une direction pointant vers une source irradiante à l'aide d'un dispositif selon le premier objet de l'invention, le procédé comportant les étapes suivantes :
- a. mesure de signaux de détection par chaque détecteur ;
 - b. calcul d'un barycentre de chaque position pondéré par le signal de détection mesuré par le détecteur occupant ladite position ;
 - c. estimation de la direction pointant vers la source en fonction du barycentre calculé.
- [0017] Selon un mode de réalisation,
- l'étape a) comporte :
 - mesure d'un signal de détection résultant d'au moins deux détecteurs à un premier instant ;
 - mesure du signal de détection résultant desdits détecteurs à un deuxième instant ;
 - l'étape b) comporte une prise en compte d'une position de chaque détecteur au premier instant et au deuxième instant ;
 - l'étape c) comporte calcul d'un barycentre des positions respectives des détecteurs à chaque instant, pondéré par les signaux de détection mesurés respectivement par chaque détecteur à chaque instant.
- [0018] Entre le premier instant et le deuxième instant, le dispositif peut effectuer une rotation autour de l'isobarycentre, l'angle de rotation étant prédéterminé et/ou mesuré.
- [0019] Le procédé peut comporter une étape d'affichage de la direction pointant vers la source irradiante.
- [0020] Selon un mode de réalisation, le procédé comporte les étapes de :
- d) déplacement du dispositif entre deux positions, le long de la direction pointant vers la source, selon une distance de déplacement ;
 - e) à chaque position, mesure d'un signal de détection par un détecteur ;
 - f) prise en compte de la distance de déplacement et du signal de détection mesuré en chaque position pour estimer une distance entre la source irradiante

et le dispositif.

[0021] Le procédé peut comporter les étapes de :

- g) comparaison entre la distance entre la source et le dispositif, estimée lors de l'étape f), avec une distance seuil prédéterminée ;
- h) en fonction de la comparaison, validation ou invalidation de la distance estimée entre la source irradiante et le dispositif.

[0022] Un troisième objet de l'invention est un dispositif d'estimation d'une distance par rapport à une source irradiante, la source irradiante émettant un rayonnement composé de particules gamma ou X ou neutrons, le dispositif comportant :

- un support;
- un détecteur de rayonnement, configuré pour générer un signal de détection, dépendant d'un nombre de particules détectées par le détecteur;

[0023] le dispositif étant tel qu'il comporte une unité de traitement, configurée pour

- mémoriser les signaux de détection résultant du détecteur en deux instants successifs ;
- prendre en compte une distance de déplacement du dispositif entre les deux instants successifs ;
- estimer une distance entre le dispositif et la source irradiante à partir des signaux de détection mémorisés et de la distance de déplacement prise en compte.

[0024] Un quatrième objet de l'invention est un procédé d'estimation d'une distance entre une source irradiante et un dispositif selon le troisième objet de l'invention, comportant :

- a) prise en compte d'une direction pointant vers la source irradiante;
- b) déplacement du dispositif entre deux positions, le long de la direction pointant vers la source, selon une distance de déplacement ;
- c) à chaque position, mesure d'un signal de détection par le détecteur ;
- d) prise en compte de la distance de déplacement et du signal de détection mesuré en chaque position pour estimer une distance entre la source irradiante et le dispositif.

[0025] 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

[0026] Les figures 1A et 1B schématisent un premier mode de réalisation. La [Fig.1A] est une vue en perspective et la [Fig.1B] est une vue de dessus.

[0027] Les figures 2A et 2B illustrent une possibilité de mise en œuvre du premier mode de réalisation. Ces deux figures sont des vues de dessus.

- [0028] Les figures 3A et 3B schématisent un deuxième mode de réalisation. La [Fig.3A] est une vue en perspective et la [Fig.3B] est une vue de dessus.
- [0029] La [Fig.4] représente un exemple de dispositif portable selon le deuxième mode de réalisation.
- [0030] La [Fig.5] schématise un essai expérimental réalisé en utilisant un dispositif selon le deuxième mode de réalisation.
- [0031] Les figures 6A et 6B montrent l'utilisation d'un dispositif pour effectuer une localisation en trois dimensions d'une source irradiante.
- [0032] La [Fig.7] schématise une simulation réalisée en utilisant un dispositif selon le premier mode de réalisation.
- [0033] La [Fig.8] illustre une mise en œuvre du dispositif pour estimer une distance par rapport à une source irradiante dont l'orientation par rapport au dispositif a été préalablement déterminée.
- [0034] Les figures 9A et 9B représentent des mesures expérimentales effectuées pour estimer la distance et entre le dispositif et la source.
- [0035] La [Fig.10] résume différentes étapes de mise en œuvre d'un dispositif formant un objet l'invention.

EXPOSE DE MODES DE REALISATION PARTICULIERS

- [0036] Les figures 1A et 1B représentent un premier mode de réalisation d'un dispositif 1 selon l'invention. Le dispositif est destiné à déterminer une orientation d'une source irradiante S, disposée à distance du dispositif, et à déterminer une direction rectiligne pointant vers la source, à partir du dispositif. La source irradiante S est typiquement positionnée à quelques mètres du dispositif. Il peut s'agir d'une source émettant une irradiation photonique (photons X ou gamma) et/ou neutronique.
- [0037] L'utilisation du dispositif suppose que la source irradiante soit disposée à une distance telle que compte-tenu de son activité, le rayonnement incident au dispositif soit suffisant pour être détecté.
- [0038] Dans les exemples représentés, le dispositif est destiné à être porté par un utilisateur, de façon à indiquer la direction pointant vers la source. Il s'agit donc d'un dispositif à usage nomade. Alternativement, comme décrit par la suite, le dispositif peut être monté sur un véhicule, notamment dans le cadre d'interventions en milieu hostile.
- [0039] Le dispositif 1 comporte un support 2, sur lequel sont disposés plusieurs détecteurs 10_1 , 10_2 . Chaque détecteur est configuré pour détecter un rayonnement ionisant, en particulier des neutrons ou des photons X ou gamma.
- [0040] Chaque détecteur est formé d'un matériau de détection relié à un circuit de détection. Sous l'effet d'une interaction dans le matériau de détection, une particule formant le rayonnement ionisant (neutron ou photon X ou gamma) génère une impulsion électrique, cette dernière étant détectée par le circuit de détection. Lorsque le matériau

de détection est un scintillateur, l'impulsion électrique est générée par un photo-détecteur couplé au matériau de détection. Lorsque le matériau de détection est un semi-conducteur, l'impulsion électrique résulte de la collection de porteurs de charges créés dans le matériau sous l'effet de l'interaction. Le circuit de détection permet d'établir un taux de comptage, qui correspond à un nombre d'impulsions détectées par unité de temps. Par exemple un nombre d'impulsions par seconde, usuellement désigné « coups par seconde ». Alternativement, le circuit de détection permet d'établir un comptage, qui correspond à un nombre d'impulsions détectées durant une durée de mesure.

- [0041] D'une façon générale, le circuit de détection permet de former un signal de détection, ce dernier correspondant soit un taux de comptage, soit à un comptage. Dans les exemples décrits par la suite, le signal de détection est un taux de comptage.
- [0042] De préférence, le matériau de détection de chaque détecteur est solide. Il peut notamment s'agir d'un scintillateur. Lorsque les particules formant le rayonnement sont des photons, les matériaux scintillateurs inorganiques sont préférés, en raison de leur numéro atomique élevé, qui leur confère une bonne propriété d'atténuation. Parmi ces derniers, on peut citer, à titre non limitatif NaI(Tl), CsI(Tl), GBO (Germanate de Bismuth), LaBr₃, YSO(Ce) (Yttrium Orthosilicate Cerium – Y₂SiO₅:Ce), SrI₂(Eu). Lorsque les particules formant le rayonnement sont des neutrons, les matériaux scintillateurs organiques sont préférés, en raison de leur forte teneur en atomes légers.
- [0043] Dans l'exemple décrit sur la [Fig.1A], le dispositif est dédié à une détermination d'une source émettrice de photons gamma. Aussi, les détecteurs sont basés sur un matériau de détection de type scintillateur inorganique.
- [0044] Le dispositif comporte également :
- une unité de traitement 20, reliée à chaque détecteur. L'unité de traitement peut comporter un calculateur, par exemple de type FPGA (Field Programmable Gate Array – Circuit logique programmable ou ASIC – Application Specific Integrated Circuit – Circuit intégré à application spécifique), ou un microprocesseur, programmé pour effectuer des calculs utilisant les taux de comptage respectivement générés par chaque détecteur. L'unité de traitement est programmée pour établir une direction, pointant vers la source, à partir des taux de comptage.
 - une unité d'orientation 21, configurée pour mesurer une orientation du dispositif. Il peut par exemple s'agir d'une centrale inertielle. L'unité d'orientation est optionnelle.
 - une unité d'affichage 22, pour afficher la direction pointant vers la source. Il peut s'agir d'un écran ou d'un ensemble de diodes. L'unité d'affichage est optionnelle.

- une unité de géolocalisation 23, configurée pour établir une position du dispositif. Il peut par exemple s'agir d'un système de type GPS lorsque le dispositif est utilisé à l'extérieur. Il peut s'agir d'un système utilisant des balises émettant un signal électromagnétique à courte portée (par exemple wifi) lorsque le dispositif est utilisé à l'intérieur. L'unité de géolocalisation est optionnelle.
- [0045] La [Fig.1A] représente une configuration particulièrement simple du dispositif 1. Selon cette configuration, le dispositif comporte uniquement deux détecteurs 10₁ et 10₂. Sur la [Fig.1B], on a représenté le dispositif et la source S, en vue de dessus.
- [0046] A partir de la position de chaque détecteur sur le support 2, on peut établir un isobarycentre O. L'isobarycentre O est un point géométrique à égale distance de chaque détecteur. Pour calculer l'isobarycentre, à chaque détecteur 10_i peut être assignée une position ponctuelle P_i , qui correspond au centre du détecteur. i est un entier naturel désignant chaque détecteur.
- [0047] L'unité de traitement 20 est configurée pour calculer un barycentre B de la position P_i de chaque détecteur 10_i, pondéré par le taux de comptage respectivement mesuré par chaque détecteur. Si P_i désigne un point du support associé à chaque détecteur 10_i, pouvant être par exemple le centre de chaque détecteur, le barycentre B est tel que :
- [0048]
$$\sum_i N_i \overrightarrow{BP_i} = \vec{0} \quad (1)$$
- [0049] N_i correspond au taux de comptage mesuré par le détecteur 10_i.
- [0050] Le vecteur $\overrightarrow{OB}$ pointe vers la source S. Ainsi, le calcul du vecteur $\overrightarrow{OB}$ permet d'estimer une direction, pointant vers la source, à partir du dispositif.
- [0051] La direction pointant vers la source peut être affichée sur l'unité d'affichage 22. Le dispositif fonctionne alors de manière équivalente à une boussole. L'unité d'affichage peut comporter une flèche pointant vers la source.
- [0052] En n'utilisant que deux détecteurs, une seule mesure n'est pas suffisante, car la direction obtenue est forcément parallèle à la direction selon laquelle les détecteurs sont alignés.
- [0053] Cependant, en effectuant une rotation du dispositif autour d'un axe perpendiculaire au support et passant par l'isobarycentre O, on peut effectuer plusieurs calculs du vecteur $\overrightarrow{OB}$ et déterminer l'orientation du dispositif pour laquelle la norme $\| \overrightarrow{OB} \|$ est maximale. Dans une telle orientation, les détecteurs sont alignés selon la direction pointant vers la source.
- [0054] Lorsque les détecteurs 10₁, 10₂ et la source S sont alignés, le détecteur 10₁ forme un détecteur avant et le détecteur 10₂ forme un détecteur arrière. Le détecteur avant est interposé entre la source et le détecteur arrière. Selon cet agencement, le rayonnement émis par la source et atteignant le détecteur arrière est atténué par le détecteur avant.

Les matériaux de détection composant les détecteurs étant absorbants, en particulier lorsqu'il s'agit de détecteurs inorganiques, l'atténuation du rayonnement par le détecteur avant est significative. Ainsi, dans cette configuration, l'écart entre les taux de comptage respectivement mesurés par chaque détecteur est maximal. Cela permet de maximiser la norme $\| \vec{OB} \|$.

[0055] L'unité d'affichage 22 peut afficher une flèche dont la taille est corrélée à la norme $\| \vec{OB} \|$. L'utilisateur peut ainsi visuellement déterminer l'orientation du dispositif maximisant la norme $\| \vec{OB} \|$. De façon alternative, une valeur numérique, correspondant à la norme, est affichée sur l'unité d'affichage.

[0056] Les figures 2A et 2B illustrent un procédé simple pour déterminer la position d'une source par rapport au dispositif, en utilisant un dispositif comportant au moins deux détecteurs. Dans l'exemple représenté, le dispositif correspond à celui décrit en lien avec la figure 1A : il comporte uniquement deux détecteurs. A un premier instant t_1 , le dispositif est disposé dans une orientation choisie aléatoirement, comme représenté sur la figure 2A. A un deuxième instant t_2 , postérieur au premier instant t_1 , le dispositif subit une rotation de 90° , autour de l'isobarycentre O, par rapport au deuxième instant.

[0057] L'unité de traitement 20 est configurée pour mémoriser les taux de comptage respectifs à chaque instant de mesure et pour calculer une position du barycentre B.

$$[0058] \quad \sum_i \sum_j N_i(t_j) \vec{BP}_i = \vec{0} \quad (2)$$

[0059] où $N_i(t_j)$ est le taux de comptage du détecteur 10_i , occupant la position $P_i(t_j)$, à l'instant de mesure t_j , avec j variant entre 1 et 2 dans cet exemple.

[0060] Sur les figures 2A et 2B, on a représenté la configuration du dispositif respectivement au premier instant t_1 et au deuxième instant t_2 . La direction pointant vers la source est calculée suite au deuxième instant t_2 .

[0061] Selon une possibilité, le dispositif comporte une unité d'orientation 21 telle que précédemment décrite. Dans ce cas, l'unité d'orientation 21 peut être configurée pour détecter, au cours de la rotation du dispositif, l'atteinte d'un angle de rotation de 90° par rapport au premier instant t_1 est effectuer directement les mesures.

[0062] Selon une autre possibilité, l'unité d'orientation 21 détermine un angle de rotation entre le premier instant et le deuxième instant. Cela permet un calcul plus précis de la position du barycentre B et cela évite à l'utilisateur d'effectuer une rotation selon un angle proche de 90° . L'utilisateur peut actionner un commutateur, de façon à signaler à l'unité de traitement les premiers et deuxièmes instants. L'unité d'orientation détermine l'angle entre le premier instant et le deuxième instant et le fournit à l'unité de traitement. La valeur réelle de l'angle est prise en compte pour effectuer le calcul du barycentre. La rotation entre les deux instants peut ainsi être différente de 90° . Elle

peut être de 45° ou de 110° . Cependant, il est préférable que l'angle de rotation soit proche de 90° .

[0063] Les figures 3A et 3B représentent un mode de réalisation dans lequel le dispositif comporte quatre détecteurs régulièrement répartis autour d'un isobarycentre O. Avec ce type de dispositif, l'unité de traitement 20 est configurée pour calculer le barycentre des positions de chaque détecteur, pondéré par leurs taux de comptage respectifs. Cela permet d'obtenir une direction pointant vers la source irradiante sans avoir à effectuer une rotation du dispositif. Un tel mode de réalisation peut fonctionner dès lors que le dispositif comporte au moins trois détecteurs non alignés. Selon une possibilité, le dispositif comporte trois détecteurs, de préférence régulièrement répartis autour d'un centre, avec un écart angulaire de 120° .

[0064] Quelle que soit la configuration, lorsque le rayonnement à détecter est un rayonnement gamma, le recours à des détecteurs basés sur des matériaux inorganiques maximise l'absorption d'une partie du rayonnement émis par la source par les détecteurs les plus proches de cette dernière. Cela permet d'augmenter le contraste entre les taux de comptages mesurés par chaque détecteur. Le barycentre B est ainsi d'autant plus éloigné de l'isobarycentre O, ce qui augmente la précision de la direction estimée par le dispositif. Afin que l'absorption résultant d'un détecteur puisse influencer significativement le taux de comptage d'un autre détecteur, la distance entre les détecteurs est de préférence inférieure à 30 ou 40 cm. Afin que l'effet de l'absorption soit plus significatif, il est préférable que la distance entre les détecteurs soit inférieure à 20 cm.

[0065] La [Fig.4] schématise un mode de réalisation similaire à celui des figures 3A et 3B, basé sur quatre détecteurs s'étendant autour d'un centre. Les positions respectives de chaque détecteur forment une croix dont le centre correspond à l'isobarycentre O. Sur le dispositif représenté sur la [Fig.4], le dispositif comporte des poignées 25, facilitant une préhension du dispositif.

[0066] L'inventeur a effectué un essai expérimental en disposant quatre détecteurs dans un même plan horizontal, selon une configuration similaire à celle représentée sur les figures 3A et 3B. Chaque détecteur était composé d'un matériau scintillateur NaI(Tl) de diamètre 50,8 mm et de hauteur 25,4 mm, soit 2 pouces de diamètre et 1 pouce de hauteur. Les positions de chaque détecteur formaient un carré de diagonale 20 cm. Cf. [Fig.5]. On a disposé une source de ^{137}Cs d'activité 500 kBq à une distance de 5 cm du détecteur le plus proche. On a mesuré les taux de comptage suivants :

- détecteur 10_1 : 800 cps (coups par seconde) ;
- détecteur 10_2 : 150 cps ;
- détecteur 10_3 : 240 cps ;
- détecteur 10_4 : 250 cps ;

[0067] L'écart entre les différents taux de comptage a permis de déterminer sans difficulté la

direction pointant vers la source.

[0068] On a modélisé une configuration telle que représentée sur la [Fig.3B], chaque détecteur étant un détecteur de type YSO, de dimensions 7.11 mm x 7.11 mm x 21.08 mm. La distance entre deux détecteurs opposés était de 20 cm. On a simulé une source de ^{137}Cs d'activité $2.9 \cdot 10^9$ Bq disposée à différentes distances du dispositif. La source était centrée par rapport au dispositif, dans le plan XY. On a fait varier la distance entre la source de ^{137}Cs et le dispositif. Le tableau 1 montre les taux de comptage (coups par seconde) simulés résultant de chaque détecteur, en fonction de la distance.

[0069] [Tableaux1]

	5m	4m	3m	2m	1m
10 ₃ (gauche)	187.61	293.15	521.15	1172.59	4690.35
10 ₁ (avant)	205.37	320.90	570.48	1283.58	5134.33
10 ₄ (droit)	190.29	297.33	528.59	1189.33	4757.32
10 ₂ (arrière)	98.72	154.25	274.22	616.99	2467.95

[0070] On observe que le contraste observé entre les détecteurs avant (10₁) et arrière (10₂) est élevé quelle que soit la distance.

[0071] Dans une autre modélisation, on a modélisé une source de ^{137}Cs , telle que précédemment décrite, placée à 5 mètres du dispositif. On a fait varier le matériau formant chaque détecteur. Quel que soit le matériau, chaque détecteur était de dimension cylindrique, de diamètre et de hauteur égaux à 25.4 mm. Le tableau 2 montre les taux de comptage estimés pour chaque détecteur en fonction des matériaux de détection, ces derniers étant NaI(Tl), BGO, LaBr₃(Ce), SrI₂(Eu).

[0072] [Tableaux2]

	NaI(Tl)	BGO	LaBr ₃ (Ce)	SrI ₂ (Eu)
10 ₃ (gauche)	1958.49	3326.15	2454.65	2247.79
10 ₁ (avant)	2064.44	3501.76	2577.38	2375.98
10 ₄ (droite)	1987.16	3362.26	2486.10	2281.82
10 ₂ (arrière)	963.66	568.30	909.89	949.59

[0073] On observe que le contraste entre les détecteurs avant (10₁) et arrière (10₂) est particulièrement élevé pour BGO ou, dans une moindre mesure, LaBr₃(Ce), du fait de leur numéro atomique élevé, propice à une forte atténuation des photons.

[0074] Les figures 6A et 6B illustrent deux possibilités d'utilisation du dispositif. Sur la [Fig.6A], le dispositif est disposé horizontalement, parallèlement au sol, de façon à pouvoir estimer une direction pointant vers la source dans le plan horizontal. Sur la

[Fig.6B], le dispositif est disposé verticalement, par exemple parallèlement à une paroi, de façon à pouvoir estimer une direction pointant vers la source dans le plan vertical. En combinant ces deux orientations du dispositif, on peut estimer une position 3D de la source.

- [0075] On a simulé le fonctionnement du dispositif selon le mode de réalisation décrit en lien avec les figures 2A et 2B. Une source a été positionnée aléatoirement dans un plan. Une position initiale a été assignée aléatoirement au dispositif. On a simulé une progression du dispositif dans le plan, entre différents points de mesure. En chaque point de mesure :
- un calcul barycentrique était effectué après une rotation du détecteur, de façon à disposer de 4 mesures en 4 positions différentes.
 - à partir du calcul barycentrique, une direction pointant vers la source était déterminée en chaque point de mesure.
 - le dispositif était déplacé d'un pas spatial prédéterminé selon la direction déterminée. La [Fig.7] illustre la progression du dispositif vers la source. La source est considérée comme atteinte lorsque la direction pointant vers la source varie fortement sous l'effet d'un faible déplacement du dispositif.
- [0076] Les modes de réalisation précédemment décrits permettent de déterminer une direction pointant vers une source irradiante. L'information directionnelle peut ensuite être utilisée pour estimer une distance entre le dispositif et la source.
- [0077] Selon l'hypothèse d'une source ponctuelle, l'intensité du rayonnement diminue proportionnellement à l'inverse du carré de la distance. Si r désigne une distance entre une source irradiante et le dispositif, l'intensité du rayonnement, entre le dispositif et la source, varie en $\frac{1}{r^2}$. L'intensité peut correspondre à un flux (nombre de particules par unité de temps) ou à un débit de fluence (nombre de particules par unités de temps et de surface). Le taux de comptage de chaque détecteur varie linéairement en fonction de l'intensité du rayonnement émis par la source. Connaissant la direction selon laquelle se situe la source, en mettant en œuvre un des modes de réalisation précédemment décrit, il est possible d'estimer une distance entre le dispositif et la source, en se déplaçant, d'une distance connue, par rapport la source, et en mesurant la variation du taux de comptage d'au moins un détecteur. Le déplacement par rapport à la source est effectué selon la direction pointant vers la source. La connaissance de la distance parcourue, combinée à la mesure des taux de comptage avant et après le déplacement, permet d'évaluer la distance entre le dispositif et la source.
- [0078] Ainsi, lorsque le dispositif est déplacé, selon une direction rectiligne, pointant vers la source, entre une position r_1 et une position r_2 , cf. [Fig.8] :

[0079]
$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad (3)$$

- [0080] où N_1 et N_2 sont les taux de comptage respectivement mesurés, par un détecteur (et de préférence un même détecteur) lorsque le dispositif occupe les positions r_1 et r_2 par rapport à la source. Si d est une distance entre r_1 et r_2 , on a $r_2 = r_1 + d$.
- [0081] d est une distance signée, qui est négative si $r_2 < r_1$ et positive si $r_2 > r_1$.
- [0082] Le développement de (3) mène à :
- [0083] $(N_2 - N_1)r_1^2 + 2r_1N_2d + N_2d^2 = 0 \quad (4)$
- [0084] N_2 et N_1 sont mesurés. d peut être prédéterminée ou mesurée. Lorsque d est prédéterminée, l'utilisateur portant le dispositif se déplace, le long de la direction pointant vers la source, d'une distance prédéterminée, par exemple 50 ou 60 cm, ce qui correspond à un pas. Alternativement, le dispositif est équipé d'une unité de géolocalisation 23, permettant une mesure de la distance d parcourue entre les positions r_2 et r_1 .
- [0085] L'unité de traitement 20 est programmée pour estimer r_1 en résolvant (4).
- [0086] Les taux de comptage suivent une statistique de Poisson. L'expression (4) peut être mise en œuvre sous-réserve que la différence entre N_1 et N_2 soit supérieure à un seuil, de façon à être représentative d'un point de vue statistique. En prenant l'hypothèse que N_1 et N_2 soient suffisamment élevés pour suivre une loi statistique gaussienne, et un risque de faux positif de 2,5%, la différence entre N_1 et N_2 est considérée comme significative d'un point de vue statistique lorsque
- [0087] $|N_1 - N_2| \geq (1 - \alpha)\sqrt{2N_2} \quad (5)$
- [0088] avec $1 - \alpha = 1,96$.
- [0089] Au-delà du seuil statistique $(1 - \alpha)\sqrt{2N_2}$, la différence entre N_1 et N_2 a une probabilité de 97,5% d'être statistiquement représentative et de ne pas être due aux fluctuations statistiques.
- [0090] Un essai de faisabilité a été réalisé en utilisant un détecteur scintillateur inorganique BGO de 25,4 mm x 25,4 mm (1 pouce par 1 pouce). Le scintillateur a été déplacé, par pas de 20 cm, en ligne droite, par rapport à une source ponctuelle de ^{137}Cs . La source de ^{137}Cs générerait un débit d'équivalent de dose de $10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$, et était placée à 5 mètres du détecteur. La distance entre le détecteur et la source a varié entre 10 m et 2 m. La figure 9A représente l'écart (ou contraste) $N_2 - N_1$ détecté par le détecteur (axe des ordonnées de gauche – unité coups par seconde - en fonction de la distance entre la source et le détecteur (axe des abscisses – unité cm) : courbe a).
- [0091] On a également calculé, l'écart relatif $\frac{N_2 - N_1}{N_1}$, ce dernier étant reporté sur l'axe des ordonnées de droite – unité %. La courbe b) correspond à l'évolution de l'écart relatif en fonction de la distance.
- [0092] En chaque point de mesure, on a calculé le seuil statistique tel que défini dans (5). La

courbe c) représente l'évolution du seuil statistique en fonction de la distance.

[0093] L'écart des taux de comptage $N_2 - N_1$ peut être considéré comme statistiquement représentatif lorsque $N_2 - N_1 > (1 - \alpha) \sqrt{2N_2}$. Dans cet exemple, $N_2 - N_1$ franchit le seuil statistique à une distance seuil d_s de 6,5 m de la source. On peut alors considérer que la mesure différentielle $N_2 - N_1$ permet une estimation de la distance entre le détecteur et la source sur une plage de distance comprise entre 0 et 6,5 m, c'est-à-dire jusqu'à la distance seuil. Cela correspond à un écart relatif d'environ 6%.

[0094] La figure 9B représente l'écart relatif $\frac{N_2 - N_1}{N_1}$ (niveaux de gris) en fonction de la variation de distance $r_1 - r_2$ (axe des abscisses – unité mètre - $r_2 \leq r_1$), et cela pour différentes distances r_1 par rapport à la source (axe des ordonnées – unité mètre). Plus r_1 augmente, plus la variation de distance $r_1 - r_2$ doit être élevée pour observer un écart relatif supérieur aux fluctuations statistiques. Cette figure montre que la distance $r_1 - r_2$ est de préférence supérieure à 20 cm pour obtenir un écart relatif supérieur à 6%, ce dernier correspondant au seuil statistique : cf. [Fig.9A].

[0095] Les figures 9A et 9B montrent qu'au-delà d'une certaine distance seuil, la distance estimée ne devrait pas être considérée comme valide du fait de l'incertitude associée. La distance seuil dépend du détecteur, en particulier la sensibilité, et peut être déterminée expérimentalement comme décrit en lien avec la [Fig.9A]. Lorsque, après avoir déterminé la direction pointant vers la source, le dispositif est utilisé pour estimer la distance entre le dispositif et la source, l'unité de traitement peut être programmée pour invalider la distance estimée si cette dernière est supérieure à la distance seuil pré-déterminée.

[0096] Pour déterminer la distance entre la source et le dispositif, on utilisera de préférence le détecteur le plus proche de la source, ce dernier ne subissant pas l'atténuation du rayonnement émis par la source due aux autres détecteurs.

[0097] La [Fig.10] schématise les principales étapes d'un procédé de détermination d'une direction entre un dispositif de mesure et une source, ainsi qu'éventuellement une estimation de la distance entre la source et le dispositif.

[0098] Etape 100 : mesure des taux de comptage des détecteurs formant le dispositif.

[0099] Lorsque le dispositif comporte plus de 2 détecteurs, l'étape 120 peut être directement mise en œuvre.

[0100] Etape 110 : cette étape est notamment mise en œuvre lorsque le dispositif comporte uniquement 2 détecteurs. Le dispositif subit une rotation autour de l'isobarycentre O et perpendiculaire au support. Une mesure du taux de comptage de chaque détecteur est réalisée.

[0101] Etape 120 : En fonction des mesures effectuées lors de l'étape 100 et de l'éventuelle étape 110, calcul du barycentre des positions de chaque détecteur pondéré par les taux

de comptages respectivement mesurés par chaque détecteur.

- [0102] Etape 130 : En fonction de la position du barycentre résultant de l'étape 120, détermination d'une direction pointant vers la source.
- [0103] Etape 140 : déplacement du dispositif selon la direction résultant de l'étape 130 selon une distance prédéterminée ou quelconque.
- [0104] Etape 150 : lorsque la distance de déplacement de l'étape 140 est quelconque, estimation de la distance par l'unité de géolocalisation ou à l'aide de la centrale de navigation inertielle, à partir d'une position de départ.
- [0105] Etape 160 : mesure du taux de comptage d'un détecteur du dispositif.
- [0106] Etape 170 : à partir de la mesure résultant de l'étape 160 et de la mesure du détecteur effectuée avant le déplacement, par exemple lors de l'étape 100 (ou 110), estimation d'une distance entre la source et le dispositif.
- [0107] Etape 180 : comparaison de la distance estimée avec la distance seuil d_s , de façon à valider ou invalider la mesure. La distance seuil a été préalablement déterminée.
- [0108] Le dispositif précédemment décrit peut être utilisé en étant porté par un utilisateur. Il peut également être monté sur un véhicule autonome. Dans ce cas, la direction déterminée par le dispositif est transmise à une unité de pilotage du véhicule, de façon que le véhicule puisse être dirigé en fonction de cette direction. Le recours à un véhicule convient aux environnements hostiles, par exemple en présence de contamination ou de forte irradiation.

Revendications

[Revendication 1] Dispositif (1) d'estimation d'une direction pointant vers une source irradiante (S), la source irradiante émettant un rayonnement composé de particules gamma ou X ou neutrons, le dispositif comportant :

- un support (2);
- au moins deux détecteurs de rayonnement ($10_1, 10_2, 10_3, 10_4, 10_i$), chaque détecteur étant configuré pour générer un signal de détection (N_i), dépendant d'un nombre de particules détectées par le détecteur;

le dispositif étant tel qu'à chaque détecteur est assigné une position (P_i), les détecteurs étant disposés autour d'un centre (O) correspondant à un isobarycentre de chaque position, le dispositif comportant une unité de traitement (20), configurée pour

- effectuer un calcul d'un barycentre (B) de chaque position pondéré par le signal de détection mesuré par le détecteur occupant ladite position ;
- en fonction du barycentre, estimer une direction pointant vers la source irradiante, correspondant à une direction entre le dispositif et la source irradiante ;

l'unité de traitement est configurée pour :

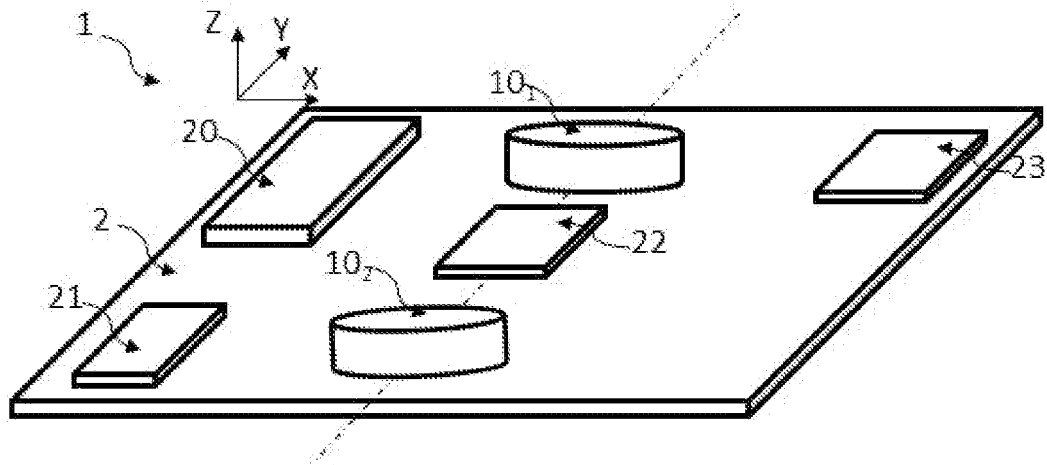
- mémoriser les signaux de détection des détecteurs à un premier instant (t_1) ;
- mémoriser les signaux de détection des détecteurs à un deuxième instant (t_2), postérieur au premier instant ;
- prendre en compte une position ($P_i(t_j)$) de chaque détecteur au premier instant et au deuxième instant ;
- effectuer un calcul du barycentre des positions respectives des détecteurs à chaque instant, pondéré par les signaux de détection mesurés respectivement par chaque détecteur à chaque instant.

[Revendication 2] Dispositif selon la revendication 1, comportant au moins trois détecteurs non alignés.

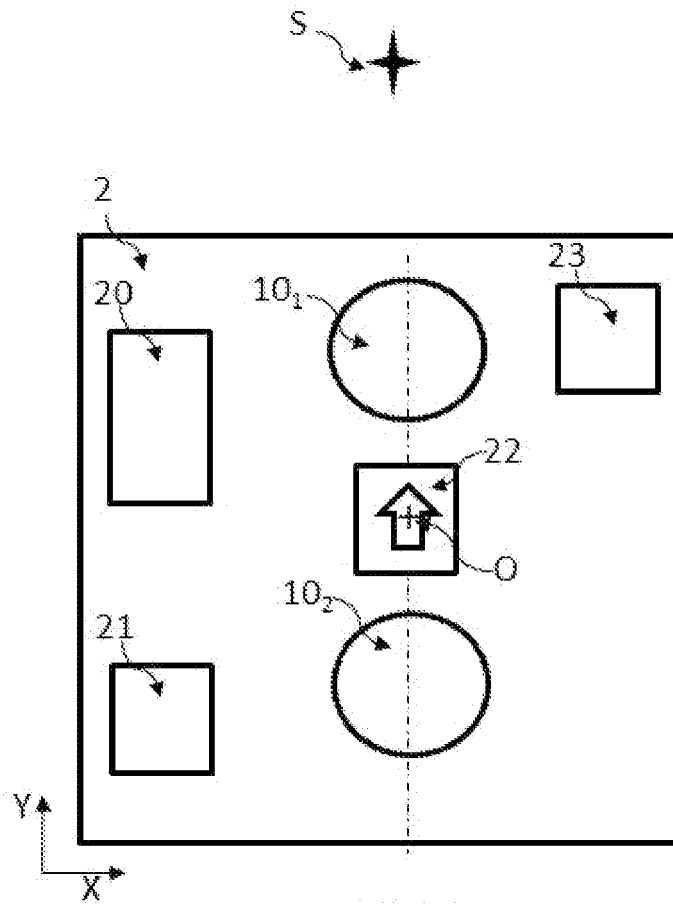
- [Revendication 3] Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, comportant une unité d'orientation (21), configurée pour estimer une variation de la position des détecteurs entre le premier instant et le deuxième instant.
- [Revendication 4] Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le dispositif comporte une unité d'affichage (22), reliée à l'unité de traitement, et configurée pour afficher la direction pointant vers la source irradiante.
- [Revendication 5] Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel au moins un détecteur ou chaque détecteur comporte un matériau de détection de type scintillateur.
- [Revendication 6] Dispositif selon la revendication 5, dans lequel au moins un détecteur ou chaque détecteur comporte un matériau de détection de type scintillateur inorganique.
- [Revendication 7] Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, et dans lequel l'unité de traitement est configurée pour :
- prendre en compte une distance (d) de déplacement du dispositif entre deux instants de mesure successifs, selon la direction pointant vers la source irradiante ;
 - mesurer les signaux de détection générés par un détecteur du dispositif aux deux instants de mesure successifs ;
 - estimer une distance entre le dispositif et la source en fonction de la distance de déplacement et des signaux de détection mesurés à chaque instant.
- [Revendication 8] Dispositif selon la revendication 7, comportant une unité de géolocalisation (23), configurée pour mesurer la distance de déplacement du dispositif entre les deux instants de mesure successifs.
- [Revendication 9] Procédé de détermination d'une direction pointant vers une source irradiante à l'aide d'un dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, le procédé comportant les étapes suivantes :
- a. mesure de signaux de détection par chaque détecteur ;
 - b. calcul d'un barycentre de chaque position pondéré par le signal mesuré par le détecteur occupant ladite position ;
 - c. estimation de la direction pointant vers la source en fonction du barycentre calculé.

- [Revendication 10] Procédé selon la revendication 9 dans lequel :
- l'étape a) comporte :
 - mesure d'un signal de détection résultant d'au moins deux détecteurs à un premier instant ;
 - mesure du signal de détection résultant desdits détecteurs à un deuxième instant ;
 - l'étape b) comporte une prise en compte d'une position de chaque détecteur au premier instant et au deuxième instant ;
 - l'étape c) comporte calcul d'un barycentre des positions respectives des détecteurs à chaque instant, pondéré par les signaux de détection mesurés respectivement par chaque détecteur à chaque instant.
- [Revendication 11] Procédé selon la revendication 10, dans lequel entre le premier instant et le deuxième instant, le dispositif effectue une rotation autour de l'isobarycentre, l'angle de rotation étant prédéterminé et/ou mesuré.
- [Revendication 12] Procédé selon l'une quelconque des revendications 9 à 11, comportant une étape d'affichage de la direction pointant vers la source irradiante.
- [Revendication 13] Procédé selon l'une quelconque des revendications 9 à 12, comportant les étapes de :
- d) déplacement du dispositif entre deux positions (r_1 , r_2), le long de la direction pointant vers la source, selon une distance de déplacement (d) ;
 - e) à chaque position, mesure d'un signal de détection par un détecteur ;
 - f) prise en compte de la distance de déplacement et du signal de détection mesuré en chaque position pour estimer une distance entre la source irradiante et le dispositif.
- [Revendication 14] Procédé selon la revendication 13, comportant les étapes de :
- g) comparaison entre la distance entre la source et le dispositif, estimée lors de l'étape f), avec une distance seuil (d_s) prédéterminée ;
 - h) en fonction de la comparaison, validation ou invalidation de la distance estimée entre la source irradiante et le dispositif.

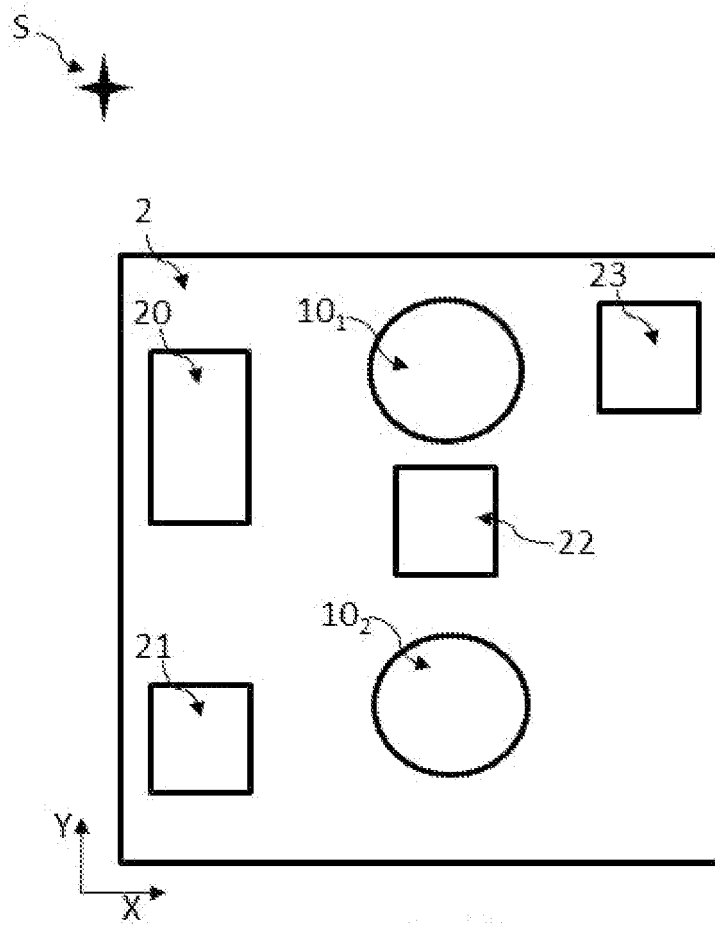
[Fig. 1A]

Fig. 1A

[Fig. 1B]

Fig. 1B

[Fig. 2A]

Fig. 2A

[Fig. 2B]

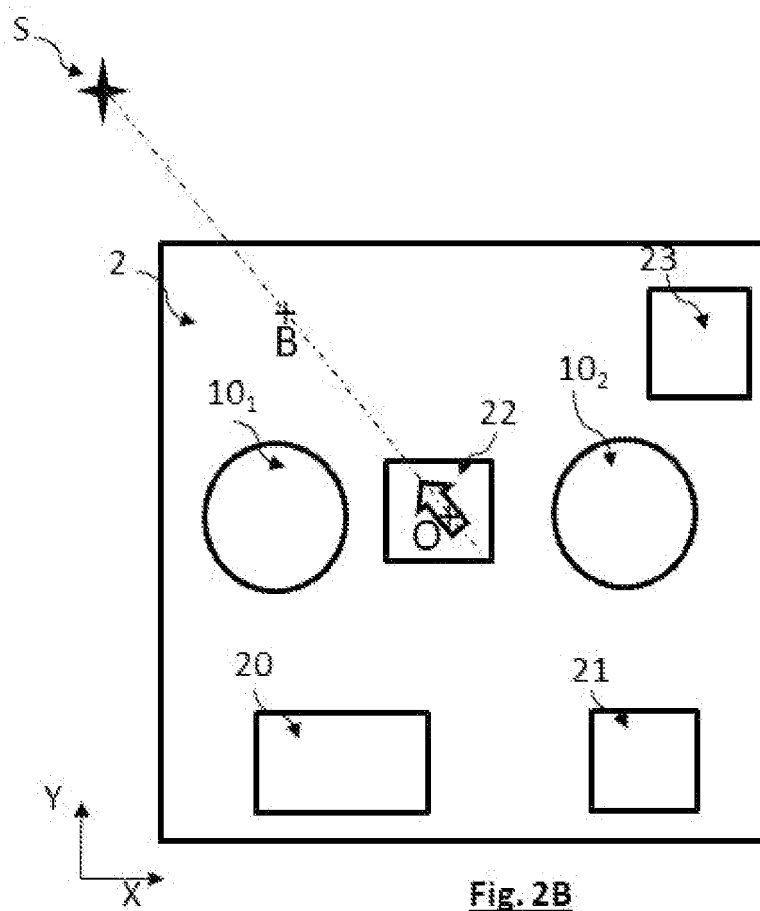


Fig. 2B

[Fig. 3A]

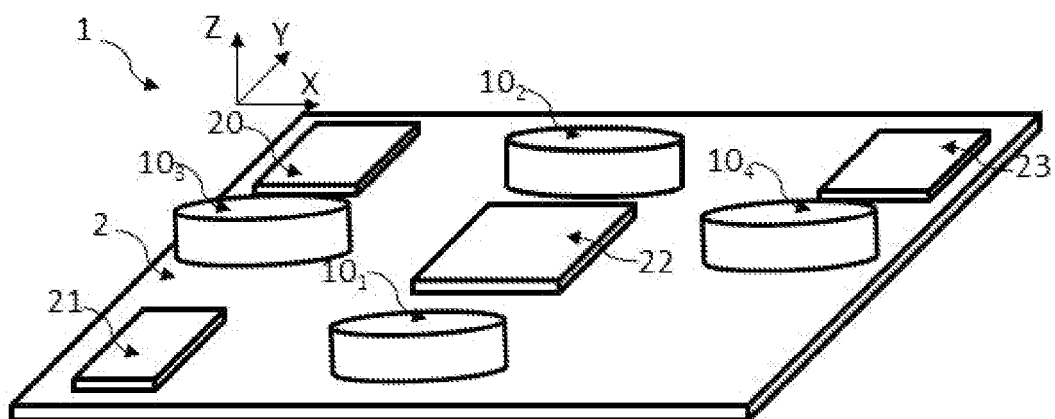
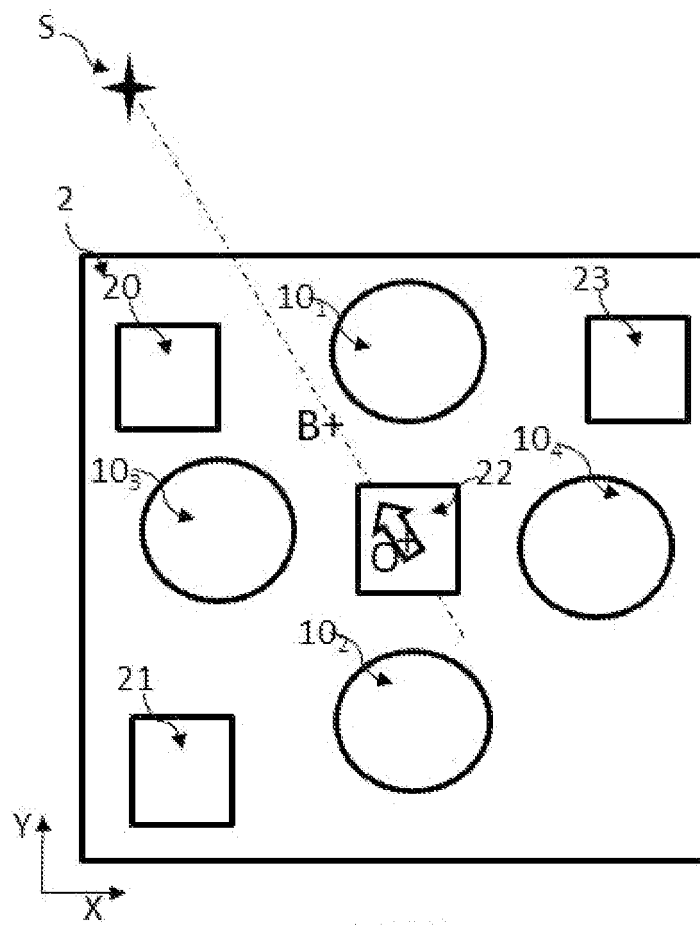
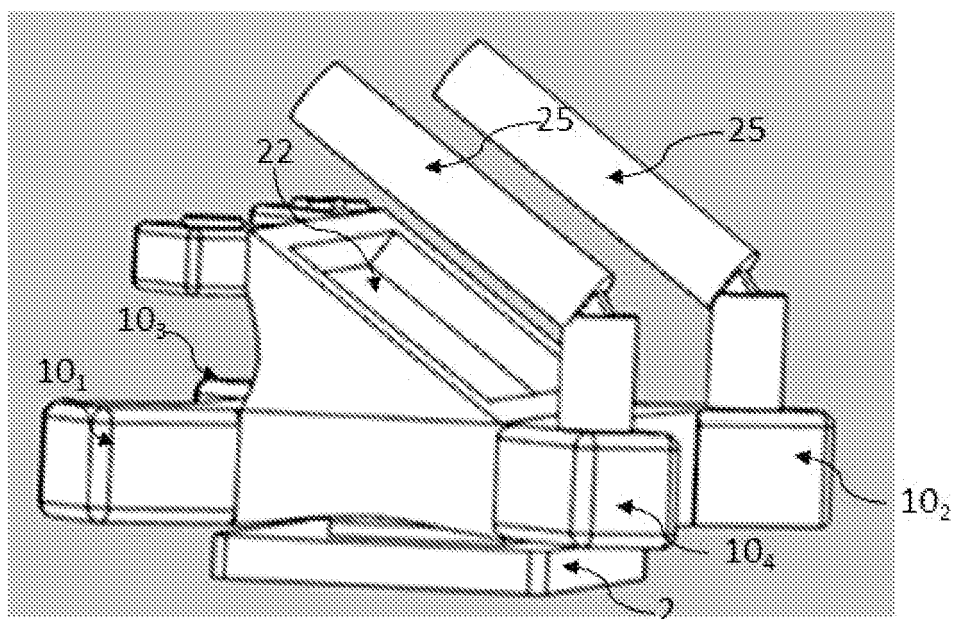


Fig. 3A

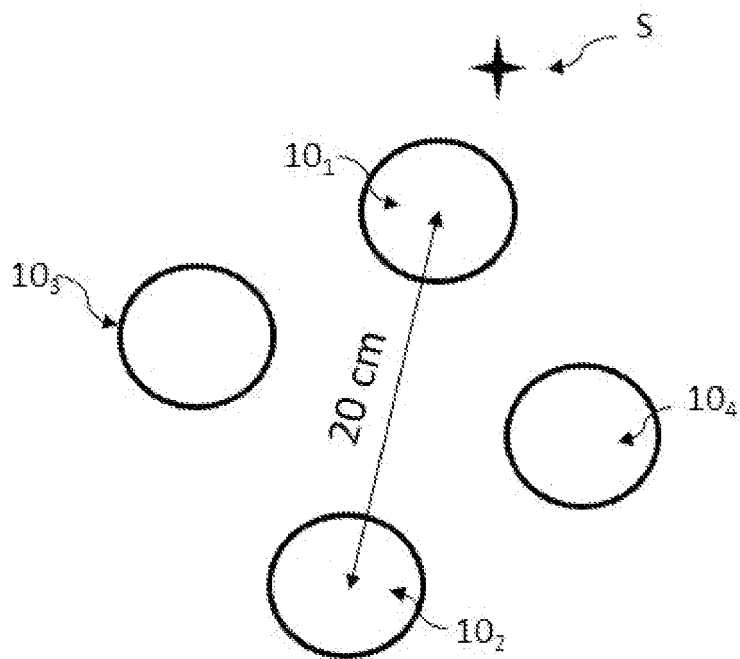
[Fig. 3B]

Fig. 3B

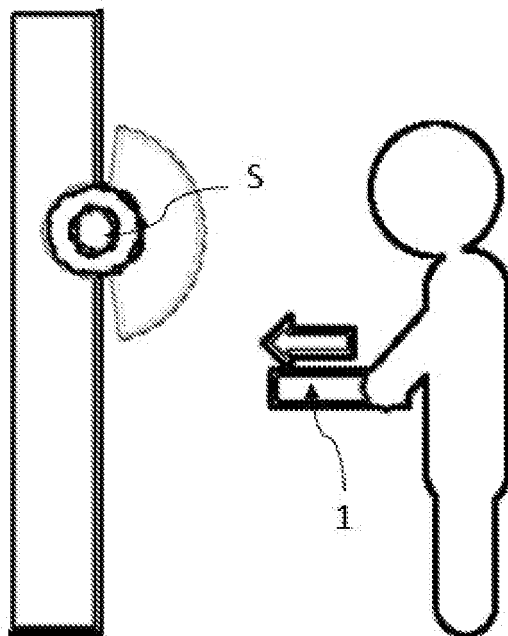
[Fig. 4]

Fig. 4

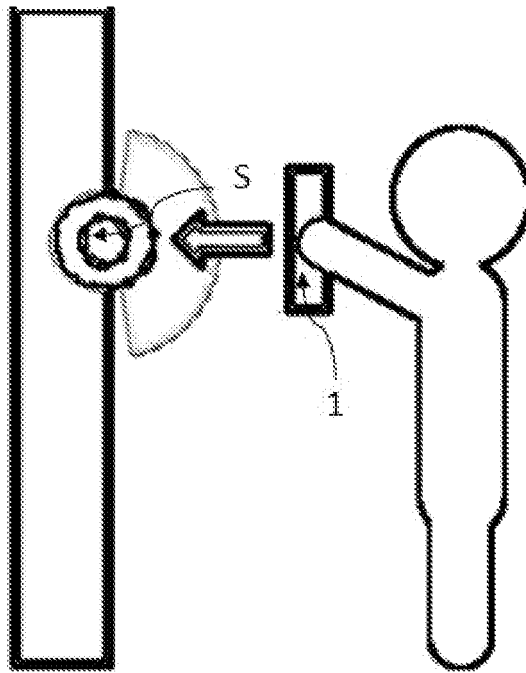
[Fig. 5]

Fig. 5

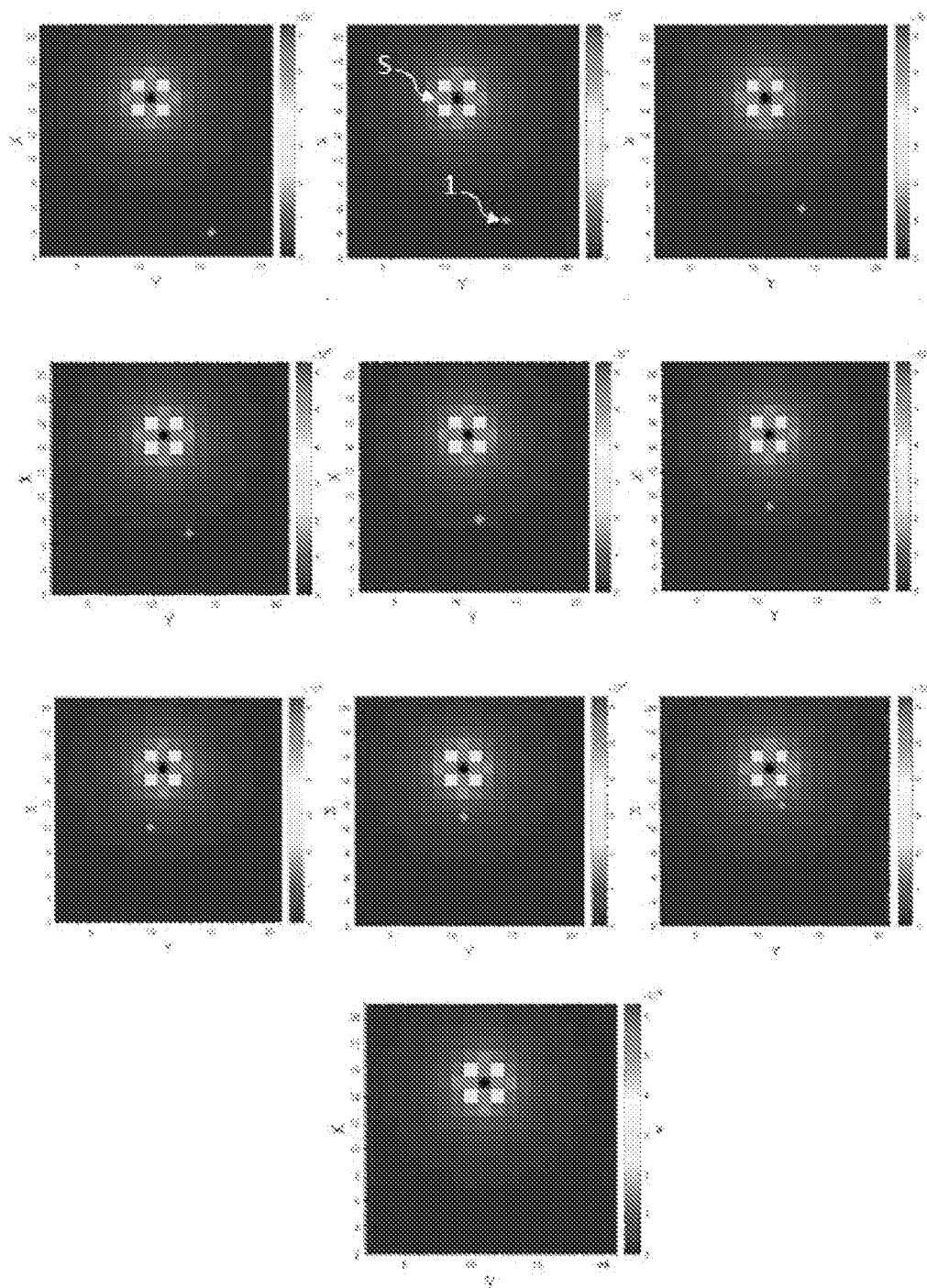
[Fig. 6A]

Fig. 6A

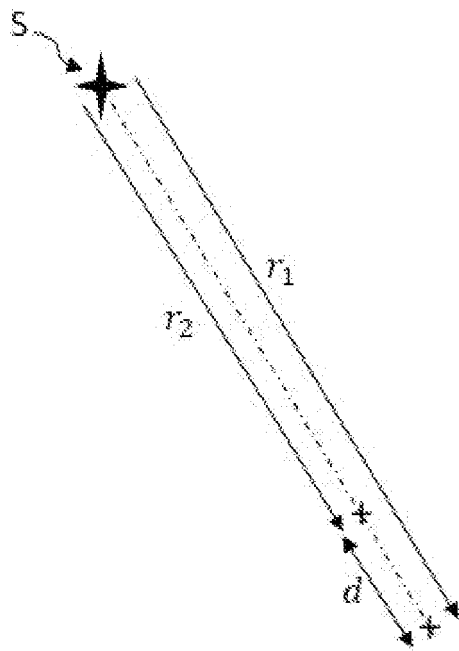
[Fig. 6B]

Fig. 6B

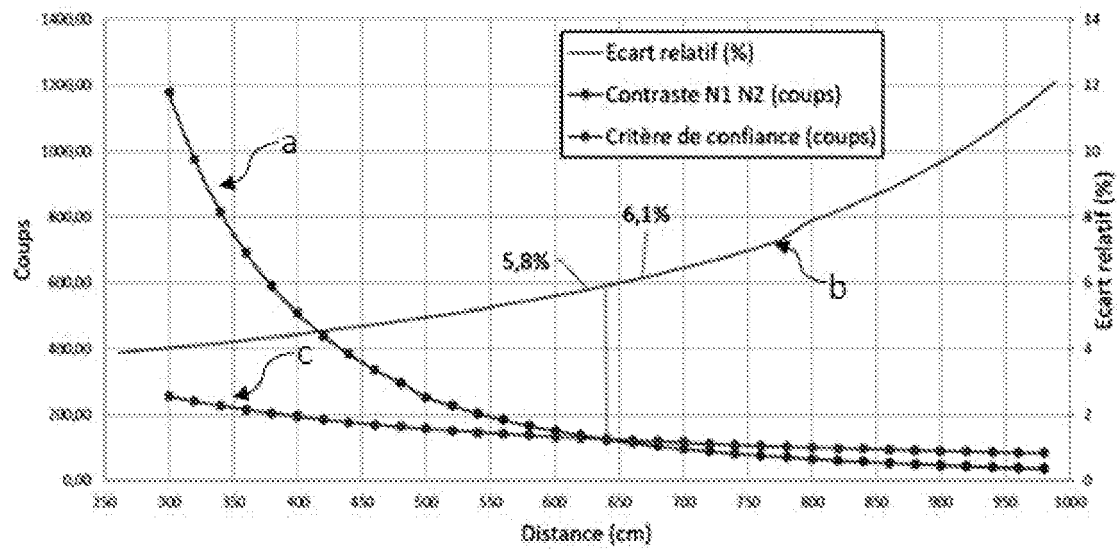
[Fig. 7]

**Fig. 7**

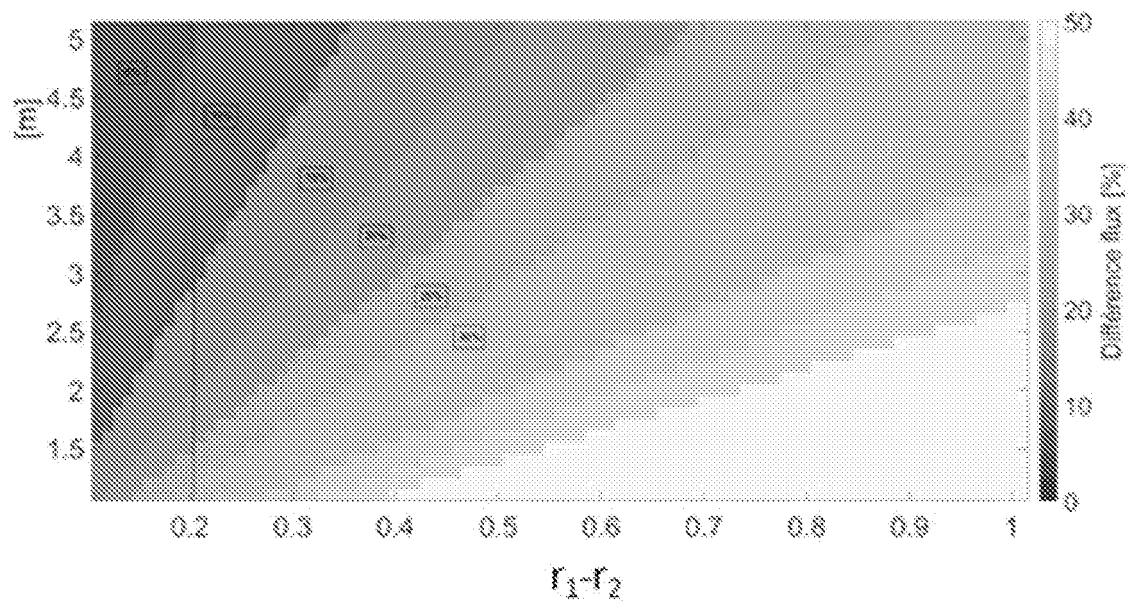
[Fig. 8]

**Fig. 8**

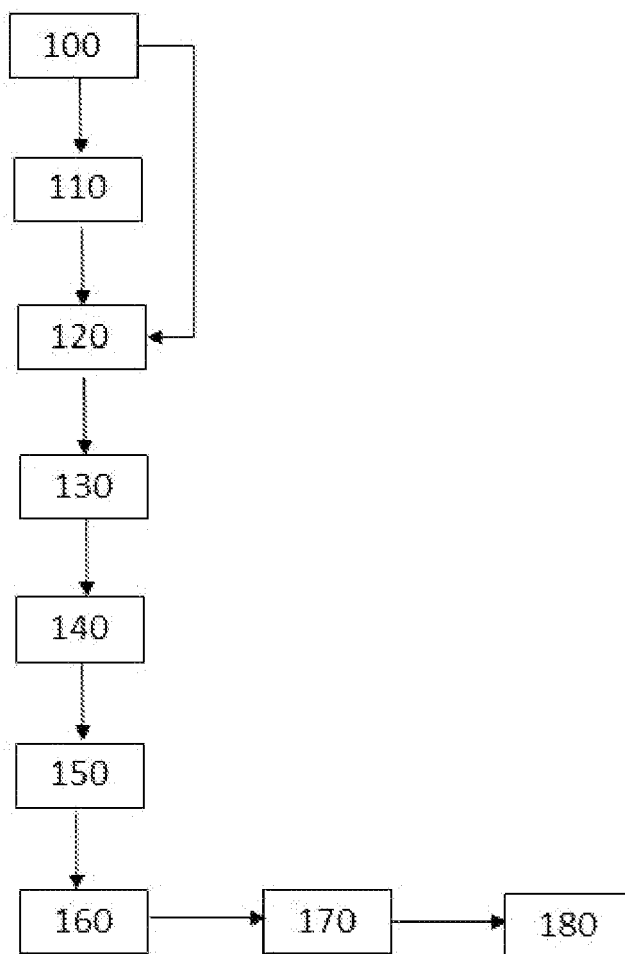
[Fig. 9A]

**Fig. 9A**

[Fig. 9B]



[Fig. 10]

**Fig. 10**

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**

US 10 101 472 B1 (NEWMAN DAVID EDWARD
[US]) 16 octobre 2018 (2018-10-16)

CN 109 655 875 A (MAT INST CHINA ACADEMY
ENG PHYSICS) 19 avril 2019 (2019-04-19)

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

NEANT

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

NEANT