

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
PARIS

11 N° de publication :  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

2 948 193

21 N° d'enregistrement national : 09 55011

51 Int Cl<sup>8</sup> : G 01 N 23/203 (2006.01), G 01 V 5/00

12 DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 20.07.09.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la demande : 21.01.11 Bulletin 11/03.

56 Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du présent fascicule*

60 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

71 Demandeur(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE — FR.

72 Inventeur(s) : FABIANI ELISA, RINKEL JEAN, TABARY JOACHIM et DINTEN JEAN MARC.

73 Titulaire(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE.

74 Mandataire(s) : BREVALEX.

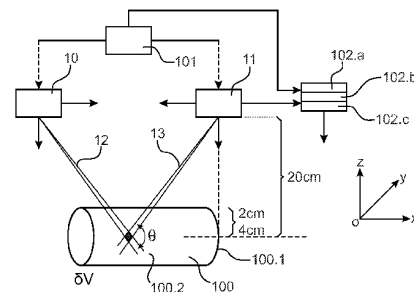
54 PROCÉDE ET DISPOSITIF D'IDENTIFICATION D'UN MATERIAU D'UN OBJET.

57 Dispositif d'identification d'un matériau d'un objet comportant:

une source de photons X (10),  
un détecteur spectrométrique (11), la source irradiant l'objet (100) avec un faisceau incident (12), le détecteur mesurant une grandeur d'un faisceau rétrodiffusé (13) issu du faisceau incident après diffusion dans un volume ( $\delta V$ ) du matériau et une énergie des photons X du faisceau rétrodiffusé, les faisceaux incident et rétrodiffusé formant un angle de diffusion ( $\theta$ );

des moyens (101) pour régler la position entre la source, le détecteur et l'objet pour que le volume soit à des profondeurs différentes avec l'angle constant,

des moyens de traitement (102.a) des deux grandeurs dans deux positions et de l'énergie dans une position et de calcul d'un paramètre ( $\beta(E_1, \text{Matériau}, \theta)$ ), d'un coefficient d'atténuation ( $\mu_{\text{matériau}}(E_0, E_1, \epsilon)$ ), des moyens d'estimation (102.b) de la densité ( $\rho$ ) du matériau, des moyens de détermination (102.c) de la nature chimique du matériau avec le paramètre  $\beta(E_1, \text{Matériau}, \theta)$ , le coefficient combiné d'atténuation  $\mu_{\text{matériau}}(E_0, E_1, \epsilon)$  et la densité.



FR 2 948 193 - A1



**PROCEDE ET DISPOSITIF D'IDENTIFICATION D'UN MATERIAU  
D'UN OBJET**

**DESCRIPTION**

**DOMAINE TECHNIQUE**

La présente invention concerne un procédé  
5 et un dispositif d'identification d'un matériau d'un  
objet.

La détection de substances illicites dans  
les bagages constitue un élément important de la  
sécurité de la vie courante. Le but de la lutte contre  
10 le terrorisme est d'empêcher que des explosifs ou des  
produits chimiques dangereux placés dans des bagages  
soient embarqués dans des avions ou soient dissimulés  
dans des colis abandonnés dans des lieux publics comme  
des gares, le métro, ou des aéroports. Les drogues ou  
15 les cigarettes de contrebande sont également  
recherchées par les douaniers aussi bien dans les  
aéroports et qu'aux frontières.

**ÉTAT DE LA TECHNIQUE ANTÉRIEURE**

20 Les dispositifs d'identification de la  
composition chimique de matériaux d'un objet,  
développés jusqu'à ce jour, exploitent l'absorption du  
rayonnement X transmis à travers l'objet à inspecter.  
Cependant dans certains cas d'objets volumineux ou de  
25 colis abandonnés contre un mur, ces dispositifs  
fonctionnant par transmission ne conviennent pas, car  
il faut placer l'objet à inspecter entre la source de

photons X et le détecteur détectant les photons X transmis.

D'autres dispositifs sont basés sur la rétrodiffusion. Cette technologie ne requiert l'accès  
5 qu'à un seul côté de l'objet suspect à inspecter. Dans ce cas la source de photons X et le détecteur se trouvent du même côté de l'objet. Les photons X vont rebondir sur l'objet plus que le traverser.

Cette technique devient un bon outil  
10 d'inspection pour la détection et l'identification d'explosifs qui sont des matériaux dont les atomes qui les constituent possèdent des numéros atomiques faibles, par exemple inférieurs à 10. En effet ils sont constitués de carbone, d'oxygène, d'hydrogène, d'azote.  
15 Dans ce cas, le phénomène de diffusion par effet Compton est prépondérant par rapport au phénomène d'absorption par effet photoélectrique aux énergies classiquement utilisées, comprises entre environ 50 et 200 keV.

20 On va maintenant décrire un dispositif d'identification d'un matériau d'un objet commercialisé par la société American Science and Engineering, Inc utilisant la technologie « Z<sup>®</sup>Backscatter » et la technologie « Flying Spot ». D'autres dispositifs  
25 similaires ont été développés par les sociétés Rapiscan ou PCO Inc.

On se réfère à la figure 1. Une source de photons X 1 polychromatique fournit un faisceau de photons X 2 long et fin vers un objet à inspecter 3. Le  
30 faisceau de photons X est composé de photons d'énergies différentes. On suppose que l'objet à inspecter 3 est un

bagage contenant des blocs d'explosif plastique. On a représenté un détecteur de photons X 4 en aval de l'objet à inspecter 3 et une paire 5 de détecteurs de photons X en amont de l'objet à inspecter 3 de part et d'autre du faisceau de photons X 2.

Des photons X seront donc transmis par les atomes de l'objet à inspecter 3 et détectés par le détecteur de photons X 4 aval et d'autres rétrodiffusés par les atomes de l'objet à inspecter 3 et détectés par la paire de détecteurs de photons X 5 amont.

Le faisceau de photons X 2 est animé d'un mouvement de balayage de l'objet à inspecter 3 de manière que la position du faisceau de photons X 3 soit définie à chaque instant et que chaque mesure du signal détecté par un détecteur soit corrélée à une région particulière de l'objet à inspecter 3. L'interprétation des résultats est facile et rapide. De plus, grâce au faisceau de photons X long et fin balayant, les doses de radiation peuvent être beaucoup plus faibles que dans les dispositifs d'inspection conventionnels à faisceau de photons X en éventail.

Il faut noter que la société American Science and Engineering commercialise sous la marque déposée « Z<sup>®</sup>Backscatter Van <sup>™</sup> » un système d'inspection par rétrodiffusion seule, intégré dans un camion qui permet l'inspection de véhicules et de cargos en mouvement, le système étant à l'arrêt.

L'inconvénient du dispositif que l'on vient de décrire est que les détecteurs de photons X fonctionnent en mode d'intégration de charges. Les photons X qui arrivent sur le détecteur sont convertis

en charges électriques et les charges électriques créées dans un pixel donné du détecteur sont intégrées pendant un temps d'exposition. Pendant ce temps d'exposition, on connaît l'énergie totale des photons X et on peut accéder à une information unique qui est l'atténuation moyenne du matériau inspecté correspondant au pixel donné sur les différentes énergies du spectre d'irradiation puisque le faisceau de photons X est polychromatique. Cette atténuation moyenne est due à la densité  $\rho$  du matériau inspecté. Mais le signal intégré ne permet pas de distinguer deux matériaux ayant la même atténuation moyenne. Il faudrait pour cela disposer de l'information supplémentaire qui est le numéro atomique  $Z$  du matériau inspecté. Cette information supplémentaire est difficilement accessible avec le signal intégré.

Le dispositif d'identification induit donc de nombreuses fausses alarmes puisque la composition chimique des explosifs est proche de celle d'un grand nombre de matériaux courants qui peuvent présenter les mêmes caractéristiques en termes de densité  $\rho$ .

#### **EXPOSÉ DE L'INVENTION**

La présente invention a pour but de proposer un procédé d'identification d'un matériau dont est composé un objet, ce matériau étant enterré ou en surface de l'objet, ainsi qu'un dispositif d'identification du matériau, ce procédé et ce dispositif ne présentant pas les limitations et difficultés ci-dessus.

Un but de l'invention est de proposer un procédé d'identification fiable de substances illicites liquides ou solides contenues dans des bagages pour améliorer la sécurité dans les aéroports. Cette  
5 identification peut se faire quelle que soit la nature du bagage et la position de la substance dans le bagage.

Un autre but de l'invention est de proposer un procédé permettant de pouvoir aisément distinguer de  
10 l'eau par rapport à un explosif liquide.

Pour y parvenir, la présente invention propose d'exploiter la signature spectrale rétrodiffusée par un objet, irradié par un faisceau de photons X incident, cette signature spectrale étant  
15 délivrée par un détecteur spectrométrique. Le procédé objet de l'invention propose au moins deux irradiations de l'objet positionné à deux distances différentes par rapport à l'ensemble source de photons X-détecteur spectrométrique.

20 Plus précisément la présente invention propose un procédé d'identification d'un matériau d'un objet, ce matériau étant pourvu d'un rang  $i$  ( $i$  entier),  $i$  valant un s'il est en surface et étant supérieur à un s'il est enterré sous  $i-1$  couches, dans lequel :

25 a°) on irradie une surface sensiblement plane au moins localement de l'objet avec un faisceau de photons X incident généré par une source de photons X collimatée,

30 b°) on mesure à l'aide d'un détecteur spectrométrique collimaté un premier flux d'un faisceau de photons X rétrodiffusé généré après diffusion, selon

un angle  $\theta$  de diffusion donné, du faisceau de photons X incident dans un premier volume d'inspection du matériau de rang  $i$  se trouvant à une première profondeur dans le matériau de rang  $i$ ,

5 c°) on mesure à l'aide du détecteur spectrométrique collimaté un second flux d'un faisceau photons X rétrodiffusé généré après diffusion, selon le même angle  $\theta$  de diffusion donné, du faisceau de photons X incident dans un second volume d'inspection du  
10 matériau de rang  $i$  se trouvant à une seconde profondeur dans le matériau de rang  $i$ ,

d°) on calcule à l'aide des mesures des deux flux de photons X ( $X_{i1}(E_1)$ ,  $X_{i2}(E_1)$ ) un paramètre  $\beta(E_1, \text{Matériau}, i, \theta)$  et un coefficient combiné d'atténuation  
15  $\mu'_{\text{matériau}, i}(E_0, E_1, \varepsilon)$  dans lequel  $E_0$  est l'énergie des photons X du faisceau de photons X incident et  $E_1$  l'énergie des photons X du faisceau de photons X rétrodiffusé selon l'angle de diffusion donné et tels que :

20  $X_{i1}(E_1) = \beta(E_1, \text{Matériau}, i, \theta) \cdot e^{-\mu'_{\text{matériau}, i}(E_0, E_1, \varepsilon) l_{i1}} \cdot F_i$   
 $X_{i2}(E_1) = \beta(E_1, \text{Matériau}, i, \theta) \cdot e^{-\mu'_{\text{matériau}, i}(E_0, E_1, \varepsilon) l_{i2}} \cdot F_i$  avec  $\varepsilon = l_{i'1}/l_{i1} = l_{i'2}/l_{i2}$ ,  $l_{i1}$  respectivement  $l_{i2}$  étant la distance parcourue par le faisceau de photons X incident dans le matériau de rang  $i$  jusqu'au premier  
25 respectivement second volume d'inspection,  $l_{i'1}$  respectivement  $l_{i'2}$  étant la distance parcourue par le faisceau de photons X rétrodiffusé dans le matériau de rang  $i$  depuis le premier, respectivement, second volume d'inspection,  $F_i$  étant un facteur d'atténuation égal à  
30 un lorsque  $i=1$  et fonction d'une atténuation apportée

par les un ou plusieurs matériaux de rang 1 à  $i-1$  lorsque  $i$  est différent de 1;

e°) on estime la densité du matériau  $i$  à partir du coefficient combiné d'atténuation  $\mu'_{\text{matériau}.i}(E_0, E_1, \varepsilon)$  moyenné sur une plage d'énergie donnée des photons X du faisceau de photons X rétrodiffusé ;

f°) on détermine la nature chimique du matériau  $i$  à partir du paramètre  $\beta(E_1, \text{Matériau}.i, \theta)$ , du coefficient combiné d'atténuation  $\mu'_{\text{matériau}.i}(E_0, E_1, \varepsilon)$  et de la densité du matériau.

Pour déterminer la nature chimique du matériau  $i$ , on peut utiliser le rapport  $\beta(E_1, \text{Matériau}.i, \theta) / (k(E_0, \theta) \rho)$  en fonction de la densité,  $k(E_0, \theta)$  étant un paramètre indépendant du matériau  $i$  mais dépendant de l'énergie du faisceau de photons X incident, de l'angle de diffusion, et de la position de la source de photons X et du détecteur spectrométrique par rapport au volume inspecté.

On peut calculer les distances  $li_1, li_2, li'_1, li'_2$  à partir des positions relatives de la source de photons X, du détecteur spectrométrique et de l'objet et si  $i$  différent de 1, d'une distance  $lj$  parcourue par le faisceau de photons X incident dans chacun des uns ou plusieurs matériaux de rang 1 à  $i-1$ , et d'une distance  $l'_j$  parcourue par le faisceau de photons X rétrodiffusé selon l'angle  $\theta$  dans chacun des uns ou plusieurs matériaux de rang 1 à  $i-1$  en :

1°) effectuant des mesures successives du flux de faisceaux de photons X rétrodiffusés pour des volumes d'inspection situés de plus en plus profond, à

partir de la couche de surface et espacés d'un pas ( $p$ ), l'angle de diffusion restant sensiblement constant d'une mesure à l'autre,

2°) calculant pour un premier, un second  
5 et un troisième flux  $X_1(E_1)$ ,  $X_2(E_2)$  et  $X_3(E_3)$  de faisceaux de photons X rétrodiffusés un premier coefficient combiné d'atténuation

$$\mu'_1(E_0, E_1, \varepsilon) = -\frac{1}{lj_1 - lj_2} \ln \left( \frac{X_1(E_1)}{X_2(E_1)} \right) \text{ et un second coefficient}$$

$$\text{combiné d'atténuation } \mu'_2(E_0, E_1, \varepsilon) = -\frac{1}{lj_2 - lj_3} \ln \left( \frac{X_2(E_1)}{X_3(E_1)} \right), \text{ avec}$$

10  $\varepsilon = lj'_1/lj_1 = lj'_2/lj_2 = lj'_3/lj_3$ ,  $lj_1$ ,  $lj_2$ ,  $lj_3$  et respectivement  $lj'_1$ ,  $lj'_2$ ,  $lj'_3$  étant des distances parcourues par le faisceau de photons X incident et respectivement le faisceau de photons X rétrodiffusé, dans le matériau dans lequel se trouve le volume  
15 d'inspection pour lequel la mesure est effectuée, ces distances étant calculées à partir de la position relative entre la source de photons X, le détecteur spectrométrique et l'objet.

3°) comparant le premier et le second  
20 coefficient combiné d'atténuation,

4°) dès qu'une différence apparaît, la distance  $lj$  recherchée est la plus grande des distances utilisées dans la formule du premier coefficient combiné d'atténuation,

25 5°) en réitérant les étapes 2°) à 4°) une ou plusieurs fois en prenant trois mesures successives du flux de faisceaux de photons X rétrodiffusés dont deux sont des mesures successives utilisées pour le calcul de l'étape 2°) précédente, le calcul des

distances parcourues par le faisceau de photons X dans le matériau dans lequel se trouve le volume d'inspection pour lequel la mesure est effectuée prenant en compte les distances  $l_j$  et  $l'_j$  déterminées  
5 précédemment.

Le facteur d'atténuation  $F_i$  peut s'exprimer par  $F_i = \prod_{j=1}^{i-1} e^{-\mu'_{\text{matériau},j}(E_0, E_1, \epsilon)^{l_j}}$ ,  $\epsilon$  valant  $l'_j/l_j$  et  $\mu'_{\text{matériau},j}(E_0, E_1, \epsilon)$  étant un coefficient combiné d'atténuation dans le matériau de rang  $j$ , ce  
10 coefficient combiné d'atténuation étant calculé à partir de deux mesures du flux de photons X de faisceaux de photons X rétrodiffusés pour deux volumes d'inspection situés à deux profondeurs différentes dans le matériau de rang  $j$ , l'angle de diffusion restant  
15 sensiblement constant,  $l_j$  respectivement  $l'_j$  étant des distances parcourues par le faisceau de photons X incident respectivement rétrodiffusé dans le matériau de rang  $j$  respectivement avant et après la diffusion.

Le paramètre indépendant du matériau  $k(E_0, \theta)$   
20 s'exprime par  $k(E_0, \theta) = C(E_0, \theta) \cdot F(E_0) \left[ \frac{d\sigma_{KN}(E_0, \theta)}{d\Omega} d\omega N_a dl \right]$  avec  $F(E_0)$  débit de fluence à l'énergie  $E_0$  du faisceau de photons X incident,  $N_a$  nombre d'Avogadro,  $\frac{d\sigma_{KN}(E_0, \theta)}{d\Omega}$   
section efficace différentielle de diffusion par électron par effet Compton approximée par une formule  
25 dite de Klein-Nishina,  $\delta\omega$  angle solide sous lequel est vu le détecteur spectrométrique depuis chaque point du volume d'inspection  $\delta V$ ,  $C(E_0, \theta)$  efficacité du détecteur spectrométrique à l'énergie  $E_1$  qui est l'énergie du

faisceau de photons X rétrodiffusé, ce faisceau de photons X possédant l'énergie  $E_0$  avant diffusion, selon l'angle de diffusion  $\theta$  donné.

Le paramètre  $k(E_0, \theta)$  peut être obtenu par modélisation ou par mesures dans un matériau étalon.

La présente invention concerne également un dispositif d'identification d'un matériau d'un objet comportant un ensemble source de photons X-détecteur spectrométrique collimaté, la source de photons X étant destinée à irradier une surface sensiblement plane au moins localement de l'objet avec un faisceau de photons X incident dont les photons X ont une énergie  $E_0$ , le détecteur spectrométrique étant destiné à mesurer un flux d'un faisceau de photons X rétrodiffusé généré après diffusion du faisceau de photons X incident dans un volume d'inspection du matériau, les photons X de faisceau de photons X ayant une énergie  $E_1$ , le faisceau de photons X incident et le faisceau de photons X rétrodiffusé formant un angle de diffusion dont le sommet est le volume d'inspection. Il comporte en outre :

-des moyens de réglage de la position relative entre la source de photons X, le détecteur spectrométrique et l'objet de manière à placer le volume d'inspection dans au moins deux positions à des profondeurs différentes dans le matériau tout en conservant un angle de diffusion sensiblement constant,

- des moyens de traitement des deux flux des faisceaux de photons X rétrodiffusés mesurés par le détecteur spectrométrique dans les au moins deux positions et de calcul d'un paramètre  $\beta(E_1, \text{Matériau}, \theta)$  et

d'un coefficient combiné d'atténuation  $\mu'_{\text{matériau}}(E_0, E_1, \varepsilon)$  à l'aide de ces deux flux de faisceaux de photons X rétrodiffusés mesurés,

-des moyens d'estimation de la densité du  
5 matériau à partir du coefficient combiné d'atténuation moyenné sur une plage d'énergie des photons X du faisceau de photons X rétrodiffusé donnée,

-des moyens de détermination de la nature  
chimique du matériau à l'aide du paramètre  
10  $\beta(E_1, \text{Matériau}, \theta)$ , du coefficient combiné d'atténuation  $\mu'_{\text{matériau}}(E_0, E_1, \varepsilon)$  et de la densité.

Les moyens de détermination peuvent  
utiliser la valeur du rapport  $\beta(E_1, \text{Matériau}, \theta) / (k(E_0, \theta)\rho)$   
en fonction de la densité, le rapport traduisant la  
15 nature chimique du matériau,  $k(E_0, \theta)$  étant un paramètre indépendant du matériau mais dépendant de l'énergie du faisceau de photons X incident, de l'angle de diffusion, et de la position de la source de photons X et du détecteur spectrométrique par rapport au volume  
20 inspecté.

Dans un but de simplification, il est  
préférable que le faisceau de photons X incident forme  
un angle avec une surface irradiée de l'objet qui est  
sensiblement égal à l'angle que fait le faisceau de  
25 photons X rétrodiffusé avec la surface irradiée de l'objet.

On conserve de préférence un même angle de diffusion sur deux mesures successives.

Les moyens de réglage peuvent rapprocher  
30 et/ou éloigner l'ensemble source de photons X-détecteur spectrométrique par rapport à l'objet et rapprocher

et/ou éloigner la source de photons X du détecteur spectrométrique.

Les moyens de réglage peuvent fonctionner pas à pas, lors du rapprochement et/ou de l'éloignement de l'ensemble source de photons X-détecteur spectrométrique par rapport à l'objet, le pas étant plus petit que l'épaisseur d'une couche de matériau de l'objet de manière à ce que le volume d'inspection puisse prendre au moins deux positions dans la couche de matériau.

#### **BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS**

La présente invention sera mieux comprise à la lecture de la description d'exemples de réalisation donnés, à titre purement indicatif et nullement limitatif, en faisant référence aux dessins annexés sur lesquels :

la figure 1, déjà décrite, monte un dispositif d'identification d'un matériau d'un objet de l'art antérieur ;

la figure 2 est un graphique représentant la fonction incohérente de diffusion  $S(x, Z)$ , pour un angle de diffusion de  $120^\circ$ , en fonction de l'énergie des photons X détectés pour une série de 24 matériaux d'intérêt, explosifs ou non ;

la figure 3 est une représentation du rapport du numéro atomique effectif sur la masse molaire normalisée en fonction de la densité pour une vingtaine de matériaux d'intérêt, cette représentation permettant d'identifier le matériau, cette

représentation étant exploitée par le procédé de l'invention ;

la figure 4 représente un faisceau de photons X incident irradiant un matériau, un faisceau de photons X rétrodiffusé issu du faisceau de photons X incident ayant diffusé dans un volume d'inspection du matériau ;

la figure 5 représente de manière géométrique le principe multi-profondeur du procédé selon l'invention pour l'inspection d'un objet mono matériau ;

la figure 6A est une représentation des coefficients d'atténuation linéaire de matériaux en fonction de l'énergie des photons X détectés et la figure 6B montre la relation entre la densité des matériaux et la valeur de ces coefficients d'atténuation linéaire pour trois énergies, à savoir 50 keV, 100 keV et 150 keV ;

la figure 7 est une représentation de la valeur moyenne du coefficient combiné d'atténuation  $\mu'_{\text{matériau}}(E_0, E_1, \epsilon)$  en fonction de la densité de ces matériaux, cette valeur moyenne ayant été calculée dans un cas où  $\epsilon=1$ ,  $\theta=120^\circ$  et  $E_1$  compris dans la plage 50 keV à 100 keV ;

la figure 8 illustre le principe du procédé de l'invention pour un objet multi matériaux à n couches ;

la figure 9 illustre le principe du procédé de l'invention pour un objet multi matériaux bicouche ;

la figure 10 illustre le dispositif d'identification de l'invention utilisé avec un objet cylindrique ;

les figures 11A, 11C représentent le rapport  $\beta(E_1, \text{Matériau}, \theta) / \rho \cdot k(E_0, \theta)$  simulé en fonction de la densité  $\rho$  théorique pour des matériaux d'intérêt solides, respectivement liquides, contenus dans un récipient en PETP qui est un polyéthylènetéréphtalate, la figure 11B représente le rapport du numéro atomique effectif sur la masse molaire normalisée théoriques en fonction de la densité théorique;

la figure 12 illustre, pour les mêmes matériaux solides qu'à la figure 11A le rapport  $\beta(E_1, \text{Matériau}, \theta) / \rho \cdot k(E_0, \theta)$  en fonction de  $\rho$ ,  $\beta(E_1, \text{Matériau}, \theta)$  étant calculé et  $\rho$  estimé par le procédé de l'invention.

Des parties identiques, similaires ou équivalentes des différentes figures décrites ci-après portent les mêmes références numériques de façon à faciliter le passage d'une figure à l'autre.

Les différentes parties représentées sur les figures ne le sont pas nécessairement selon une échelle uniforme, pour rendre les figures plus lisibles.

25

#### **EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS**

On va maintenant expliquer dans le cas d'un matériau formé d'un seul élément chimique, comment l'identifier. Cet élément chimique est caractérisé par

son numéro atomique  $Z$ , c'est-à-dire son nombre d'atomes, et par sa densité  $\rho$ .

Quand un photon  $X$  entre en collision avec un électron libre ou faiblement lié au matériau, il lui cède une partie de son énergie  $h\nu$ . Un photon d'énergie plus faible est alors diffusé dans une direction différente de la direction incidente, les deux directions sont séparées par un angle  $\theta$  dit angle de diffusion et l'électron est éjecté de sa position. La quantité d'énergie du photon résultant  $h\nu'$  est régie par l'équation de Compton.

La quantité de rayonnement diffusé Compton, pour une énergie donnée du photon  $X$  incident et un angle de diffusion donné  $\theta$ , est proportionnelle à ce que l'on appelle la fonction de diffusion incohérente  $S(x, Z)$  qui correspond au nombre d'électrons par atome qui peuvent induire la diffusion Compton.

Dans la fonction de diffusion incohérente, le paramètre  $x$ , appelé transfert de la quantité de mouvement et exprimé en  $\text{cm}^{-1}$  est défini par l'expression :

$$x = \frac{1}{\lambda_0} \sin(\theta/2) = \frac{E_0}{hc} \sin(\theta/2) \approx \frac{E_0}{12,399} \sin(\theta/2) \quad (1)$$

$E_0$  représente l'énergie du photon  $X$  incident en keV. La section efficace différentielle atomique par diffusion Compton qui est majoritaire aux énergies supérieures à environ 10 keV est donnée par le produit de  $S(x, Z)$  par la section efficace différentielle de diffusion par électron par effet Compton  $\frac{d\sigma_{KN}(E_0, \theta)}{d\Omega}$ , donnée par la formule de Klein-Nishina.

Dans le cas d'un matériau qui n'est pas un corps simple, mais qui est un mélange comportant n éléments chimiques, il est possible de généraliser et de définir la fonction de diffusion incohérente de la  
5 manière suivante :

$$S(x,Z) = \sum_{i=1}^n \alpha_i^{at} S(x, Z_i) \quad (1')$$

avec  $\alpha_i^{at}$  pourcentages en atomes de chaque élément et  $S(x, Z_i)$  fonction de diffusion incohérente pour chaque élément, ces fonctions ont été tabulées par  
10 Hubbell et al. dans « Atomic form factors, incoherent scattering functions, and photon scattering cross sections », J. : Phys. Chem. Ref. Data 4, (1975), pages 71-538 ; erratum (1977), 6, pages 615-616.

Chaque  $\alpha_i^{at}$  est défini à partir du  
15 pourcentage en masse  $\omega_i$  et de la masse atomique  $A_i$  de

$$\text{l'élément chimique } i : \alpha_i^{at} = \frac{\frac{\omega_i}{A_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{\omega_i}{A_i}} \quad (2).$$

Pour un angle de diffusion  $\theta$  donné, au-delà d'une certaine énergie, on s'aperçoit que la fonction  $S(x,Z)$  tend vers une asymptote. Sur l'exemple de la  
20 figure 2, pour un angle de diffusion  $\theta$  de  $120^\circ$ , on voit que cette asymptote est obtenue pour des énergies supérieures à environ 10 keV. On définit donc un paramètre de même nature que le numéro atomique  $Z$ , mais noté  $Z_{eff}$  et appelé numéro atomique effectif. Il  
25 caractérise le mélange et correspond à l'asymptote de la fonction  $S(x,Z)$ . La fonction  $S(x, Z)$  tend vers  $Z_{eff}$ .

De manière similaire, on définit une masse molaire normalisée  $A_{norm}$  définie par:  $A_{norm} = \sum_i \alpha_i^{at} A_i$ .

Si on représente la grandeur  $S(x,Z)/A_{norm}$  en fonction de l'énergie comme illustré sur la figure 2, on remarque que les courbes représentatives de différents explosifs comme le TNT (trinitrotoluène) (a), l'ammonal composé de nitrate d'ammonium, de poudre d'aluminium et de tolite) (b), le DNT (dinitrotoluène) (c), la dynamite gomme (d), le  $C_{105}H_{417}N_{200}O_{374}$  (commercialisé sous le nom de gelamon 22 par Sprengstoffwerke Gnaschwitz GmbH) (e), l'hexogène (Cyclotriméthylène trinitramine) (f), le nitrate d'ammonium (g), le nitroglycol (h), la nitroglycérine (i), la nitropentrite (j), la poudre noire (k) sont bien distinguables des courbes des différents matériaux rencontrés classiquement dans des bagages comme l'aluminium (l), la cellulose (m), le Delrin (n) qui est un polyoxyméthylène (ou polyformaldéhyde) commercialisé par Du Pont, l'eau (o), le Kynar (p) qui est un PVDF (polyfluorure de vinylidène) commercialisé par Arkema, le nylon (q), la paraffine (r), le PEPT (s), le plexiglas (t), le polyéthylène (u), le polystyrène (v), le polyvinyle (w), le téflon (x) qui est un polytétrafluoroéthylène (PTFE) commercialisé par Du Pont.

Les courbes de la figure 2 ont été tracées en utilisant la formule (1') à partir des données tabulées par Hubbell. La grandeur  $S(x,Z)/A_{norm}$  est donc porteuse d'une information traduisant la nature chimique du matériau étudié.

En représentant l'espace  $Z_{\text{eff}}/A_{\text{norm}}(\rho)$  comme sur la figure 3, on définit une zone caractéristique des explosifs pour des densités supérieures à 1,4 et une grandeur  $Z_{\text{eff}}/A_{\text{norm}}$  comprise entre environ 0,48 et 5 0,53. Cette zone est encadrée.

Le procédé d'identification objet de l'invention permet d'estimer d'une part la densité  $\rho$  et d'autre part la grandeur  $Z_{\text{eff}}/A_{\text{norm}}$ .

Pour cela, on va utiliser une source de 10 photons X destinée à produire un faisceau de photons X et un détecteur spectrométrique et réaliser des mesures multi-profondeur.

On se réfère à la figure 4 qui montre un dispositif permettant de mettre en œuvre le procédé de 15 l'invention. La source de photons X porte la référence 10, le détecteur spectrométrique porte la référence 11. On suppose que dans l'exemple décrit, l'objet 100 est composé d'un seul matériau homogène et se présente sous la forme d'un bloc sensiblement rectangulaire 20 d'épaisseur connue. On verra plus loin que le procédé de l'invention peut aussi être employé si l'objet 100 comporte plusieurs matériaux en couches empilées au moins localement. Il suffit que l'objet ait une surface 25 devant être irradiée par les photons X émis par la source.

La source de photons X 10 et le détecteur spectrométrique 11 sont collimatés, l'angle de collimation est généralement faible, préférentiellement 30 inférieur à environ  $10^\circ$  et plus particulièrement inférieur à  $5^\circ$ . La source de photons X 10 peut être

monochromatique, par exemple une source isotopique, ou bien polychromatique, par exemple un tube générateur de rayons X. L'intensité des rayonnements produits par les tubes générateurs de rayons X étant supérieure à celle  
5 des rayonnements produits par les sources isotopiques, les tubes générateurs de rayons X sont préférés.

La source de photons X 10 est destinée à produire un faisceau de photons X incident 12 dont le spectre est une fonction de l'énergie  $E_0$ . Le faisceau  
10 de photons X incident 12 pénètre dans le matériau de l'objet 100, au niveau d'une zone sensiblement plane, et diffuse dans un volume d'inspection  $\delta V$ , situé à une profondeur donnée. Une atténuation se produit entre l'émission par la source de photons X 10 et le volume  
15 d'inspection  $\delta V$ . Un faisceau de photons X rétrodiffusé 13 est généré et il est capturé par le détecteur spectrométrique 11. Une atténuation se produit entre le volume d'inspection  $\delta V$  et le détecteur spectrométrique 11. Le volume d'inspection  $\delta V$  correspond à  
20 l'intersection entre le faisceau de photons X incident 12 et le faisceau de photons X rétrodiffusé 13 vers le détecteur spectrométrique 11. Du fait de la collimation de la source de photons X 10 et du détecteur spectrométrique 11, les faisceaux photons X incident et  
25 rétrodiffusé sont délimités spatialement, ce qui permet de définir un volume d'inspection  $\delta V$  relativement faible, typiquement de l'ordre du centimètre cube. Les angles de collimation de la source de photons X 10 et du détecteur spectrométrique 11 seront choisis en  
30 conséquence. Le faisceau de photons X incident 12 et le faisceau de photons X rétrodiffusé 13 sont séparés

par un angle de diffusion  $\theta$ , comme illustré sur la figure 4.

Le sommet de l'angle de diffusion  $\theta$  est l'intersection entre l'axe central du faisceau de photons X incident 12 et le faisceau de photons X rétrodiffusé 13 vers le détecteur spectrométrique 11. Ces axes centraux sont représentés en pointillés sur la figure 4. L'angle de diffusion  $\theta$  vaut  $0^\circ$  lorsque les deux axes centraux sont dans le prolongement l'un de l'autre.

Comme on le verra plus loin, on fait au moins deux mesures consécutives d'une grandeur relative au rayonnement du faisceau de photons X rétrodiffusé 13 vers le détecteur spectrométrique 11. Pour cela, on déplace la source de photons X 10, le détecteur spectrométrique 11 et l'objet 100 relativement l'un par rapport à l'autre de manière à ce que la diffusion se fasse à des profondeurs différentes dans le matériau. Les deux positions ne sont illustrées que sur la figure 5 décrite ultérieurement. Le déplacement de la source de photons X 10 et du détecteur spectrométrique 11 entre les deux mesures consécutives sera réalisé en conservant le même angle de diffusion  $\theta$ . Ce déplacement pourra par exemple se faire selon une direction sensiblement perpendiculaire à la surface de l'objet examiné, cette surface étant supposée sensiblement plane au moins localement.

Le faisceau de photons X incident 12 forme un angle  $\alpha_{inc}$  avec une normale N à la surface irradiée de l'objet 100. Le faisceau de photons X rétrodiffusé 13 forme un angle  $\alpha_{dif}$  avec la normale N à la surface

irradiée de l'objet 100. Les angles  $\alpha_{inc}$  et  $\alpha_{dif}$  ne sont pas forcément égaux, par contre, préférentiellement, les angles  $\alpha_{inc}$  et  $\alpha_{dif}$  restent sensiblement constants lors des deux mesures consécutives.

5                    Considérons le débit de fluence du faisceau de photons X incident. Ce débit de fluence est noté  $F(E_0)$ . Ce débit de fluence  $F(E_0)$  est une des caractéristiques de la source de photons X 10. On rappelle que la fluence est le quotient d'un nombre de photons X émis ou détectés par unité de surface et le débit de fluence, la fluence par unité de temps. On note  $X(E_1)$  le flux de photons X du faisceau de photons X rétrodiffusé 13 selon l'angle de diffusion  $\theta$  vers le détecteur spectrométrique 11, ce flux de photons X 15 étant mesuré par le détecteur spectrométrique 11. On rappelle que le flux correspond au nombre de photons X émis ou détectés par unité de temps.

Ce flux  $X(E_1)$  s'exprime par :

$$X(E_1) = C(E_0, \theta) \cdot F(E_0) \cdot e^{-\mu_{matériau}(E_0, Z) \cdot \ell_{bef}} \left[ \frac{d\sigma_{Kn}(E_0, \theta)}{d\Omega} \delta\omega \frac{N_a \cdot S(x, Z) \cdot \rho}{A_{norm}} \delta V \right] e^{-\mu_{matériau}(E_1) \cdot \ell_{aft}}$$

20

(3)

où :

$$- E_1 = \frac{E_0}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \text{ est l'énergie des photons X}$$

détectés par le détecteur spectrométrique après la diffusion selon l'angle de diffusion  $\theta$  et  $\alpha = E_0/m_e c^2$ ,  $m_e$  25 est la masse de l'électron au repos soit  $9,1093097 \times 10^{-31}$  kg et  $c$  la célérité de la lumière dans le vide soit 299792458 m/s, les photons X du faisceau de photons X incident avant diffusion possédant l'énergie  $E_0$  ;

-C( $E_0, \theta$ ) est un coefficient d'efficacité, égal au rapport entre le flux de photons X mesuré par le détecteur spectrométrique à l'énergie  $E_1$  sur le flux de photons X du faisceau de photons X rétrodiffusé arrivant au niveau du détecteur spectrométrique à la même énergie  $E_1$ , l'énergie  $E_1$  dépendant de l'énergie  $E_0$  comme on vient de le voir au paragraphe précédent ;

-  $\mu_{\text{matériau}}(E_0)$  et  $\mu_{\text{matériau}}(E_1)$  sont des coefficients d'atténuation linéaire du matériau avant et après la diffusion aux énergies respectives  $E_0$  et  $E_1$ ;

-  $l_{\text{bef}}$  est la distance parcourue par le faisceau de photons X incident dans le matériau avant la diffusion ;

-  $l_{\text{aft}}$  est la distance parcourue par le faisceau de photons X rétrodiffusé dans le matériau après la diffusion ;

-  $\frac{d\sigma_{KN}(E_0, \theta)}{d\Omega}$  est la section efficace différentielle de diffusion par électron par effet Compton donnée par la formule de Klein-Nishina ;

-  $\delta\omega$  est l'angle solide sous lequel est vu le détecteur spectrométrique depuis chaque point du volume d'inspection  $\delta V$ , cet angle solide n'est pas illustré pour ne pas surcharger la figure 4 ;

-  $N_a$  est le nombre d'Avogadro ;

-  $S(x, Z)$  est la fonction incohérente de diffusion Compton, elle tend vers  $Z_{\text{eff}}$  comme on l'a vu précédemment.

Les autres paramètres ont déjà été présentés.

Dans la formule (3), trois paramètres dépendent du matériau à identifier, il s'agit de :

- $\rho$  la densité du matériau qui est le terme qui différencie le plus deux matériaux différents.

- $\sigma(E)$  qui est le coefficient d'atténuation massique du matériau, il est généralement exprimé en  $\text{cm}^2/\text{g}$ , ce paramètre est contenu dans les termes d'atténuation avant et après la diffusion à savoir :

$$e^{-\mu_{\text{matériau}}^{(E_0)} l_{\text{bef}}} = e^{-\sigma(E_0) \rho l_{\text{bef}}} \text{ et}$$

$$e^{-\mu_{\text{matériau}}^{(E_1)} l_{\text{aft}}} = e^{-\sigma(E_1) \rho l_{\text{aft}}}$$

Pour les matériaux recherchés à base de carbone, d'oxygène, d'hydrogène, d'azote, de fluor etc...,  $\sigma(E)$  présente une faible variation par rapport à celle de la densité  $\rho$  à laquelle il est multiplié pour exprimer le coefficient d'atténuation linéaire  $\mu(E)$ . Ainsi, le coefficient d'atténuation linéaire  $\mu(E)$  dépend très fortement de la densité du matériau comme l'illustre la figure 6B. En conséquence, le coefficient d'atténuation massique du matériau  $\sigma(E)$  ne porte que peu d'information concernant la nature du matériau que l'on cherche à identifier.

- $S(x, Z)$  la fonction de diffusion incohérente qui est liée au nombre d'électrons qui diffusent par atome des éléments chimiques constituant le matériau à identifier.

La formule (3) est valable si les distances  $l_{\text{bef}}$  et  $l_{\text{aft}}$  séparant respectivement différents points du volume d'inspection  $\delta V$  de la source de photons  $X$  10 respectivement du détecteur spectrométrique 11 ne varient sensiblement pas. Cela signifie que les dimensions des côtés du volume  $\delta V$  sont petites devant les distances  $l_{\text{bef}}$  et  $l_{\text{aft}}$ .

Dans la formule (3), on note

$$k(E_0, \theta) = C(E_0, \theta) \cdot F(E_0) \left[ \frac{d\sigma_{Kn}(E_0, \theta)}{d\Omega} d\omega N_a \cdot dl \right].$$

Le paramètre  $k(E_0, \theta)$  ne dépend pas du matériau à identifier. Ce paramètre peut être calculé par simulation ou obtenu par mesure d'une grandeur relative au rayonnement du faisceau de photons X rétrodiffusé vers le détecteur spectrométrique, connaissance des caractéristiques expérimentales  $\delta\omega$ ,  $\theta$ ,  $\delta V$  définies par le positionnement de l'ensemble source de photons X - détecteur spectrométrique 11 par rapport à l'objet 100 et utilisation de la formule de Klein-Nishina. On s'aperçoit toutefois que ce paramètre  $k(E_0, \theta)$  peut être difficilement estimé avec précision, notamment lors de l'utilisation d'une source de photons X non monoénergétique. Ainsi, selon un mode de réalisation de l'invention, on détermine  $k(E_0, \theta)$  de manière expérimentale en utilisant un matériau connu dit étalon. Le détail de ce mode d'obtention du paramètre  $k(E_0, \theta)$  sera précisé plus loin dans la description.

On note également :

$$\beta(E_1, \text{Matériau}, \theta) = \frac{S(x, Z) \cdot \rho}{A_{norm}} k(E_0, \theta) \approx \frac{Z_{eff} \cdot \rho}{A_{norm}}, \quad \beta(E_1, \text{Matériau}, \theta) \text{ est}$$

un paramètre décrivant le phénomène de diffusion dans le matériau. La presque égalité n'est valable qu'au-delà d'une certaine énergie, notamment au-delà de quelques keV, comme on peut le voir sur la figure 2.

C'est la grandeur  $\frac{Z_{eff} \cdot \rho}{A_{norm}}$  que le procédé selon

l'invention va permettre d'estimer.

$$X(E_1) = \beta(E_1, \text{Matériau}, \theta) \cdot e^{-\mu_{matériau}(E_0) \cdot \ell_{bef}} \cdot e^{-\mu_{matériau}(E_1) \cdot \ell_{aft}}$$

$$\begin{aligned}
&= \beta(E_1, \text{Matériau}, \theta) \cdot e^{-\mu_{\text{matériau}}(E_0) \cdot \ell_{\text{vef}}} \left[ 1 + \frac{\mu_{\text{matériau}}(E_1) \cdot \ell_{\text{aft}}}{\mu_{\text{matériau}}(E_0) \cdot \ell_{\text{bef}}} \right] \\
&= \beta(E_1, \text{Matériau}, \theta) \cdot e^{-\mu_{\text{matériau}}(E_0) \cdot \ell_{\text{bef}}} \left[ 1 + \frac{\mu_{\text{matériau}}(E_1) \cdot \varepsilon}{\mu_{\text{matériau}}(E_0)} \right] \\
&= \beta(E_1, \text{Matériau}, \theta) \cdot e^{-\mu'_{\text{matériau}}(E_0, E_1, \varepsilon) \cdot \ell_{\text{bef}}} \tag{4}
\end{aligned}$$

avec  $\mu'_{\text{matériau}}(E_0, E_1, \varepsilon) = \mu_{\text{matériau}}(E_0) \cdot \left[ 1 + \frac{\mu_{\text{matériau}}(E_1)}{\mu_{\text{matériau}}(E_0)} \varepsilon \right]$  et  $\varepsilon = \frac{\ell_{\text{aft}}}{\ell_{\text{bef}}}$

5  $\mu'_{\text{matériau}}(E_0, E_1, \varepsilon)$  est un coefficient appelé coefficient combiné d'atténuation du matériau, car il est établi selon une combinaison du coefficient d'atténuation linéaire du matériau aux énergies  $E_0$  et  $E_1$ .

Comme on suppose que l'objet 100 inspecté  
10 possède une surface sensiblement plane au moins localement, c'est-à-dire au moins au niveau de l'intersection de l'objet avec le faisceau de photons X incident et le faisceau de photons X rétrodiffusé, le facteur  $\varepsilon$  est constant pour n'importe quelle profondeur  
15 d'inspection et le coefficient combiné d'atténuation  $\mu'$  est indépendant de la profondeur. Cette surface forme une frontière de l'objet 100 avec un milieu ambiant.

Pour estimer la grandeur  $\frac{Z_{\text{eff}} \cdot \rho}{A_{\text{norm}}}$  recherchée,  
il faut donc connaître séparément le paramètre  
20  $\beta(E_1, \text{Matériau}, \theta)$ , le paramètre  $k(E_0, \theta)$  ainsi que le coefficient combiné d'atténuation  $\mu'_{\text{matériau}}(E_0, E_1, \varepsilon)$ . Pour cela, on réalise donc deux mesures successives du flux de photons X de faisceaux rétrodiffusés détecté par le détecteur spectrométrique 12, chacune des mesures se  
25 faisant à une profondeur d'inspection propre.

On appelle  $X_1(E_1)$  le flux de photons X du faisceau de photons X rétrodiffusé 13 détecté par le

détecteur spectrométrique 11 alors que l'ensemble source de photons X 10 et détecteur spectrométrique 11 est dans une première position d'inspection P1 et  $X_2(E_1)$  le flux de photons X du faisceau de photons X rétrodiffusé 13 détecté par le détecteur spectrométrique 11 alors que l'ensemble source de photons X 10 et détecteur spectrométrique 11 est dans une seconde position d'inspection P1. Pour la première position d'inspection P1, la distance parcourue par le faisceau de photons X incident 12 dans le matériau jusqu'au volume d'inspection  $\delta V$  est notée  $l_1$ . Pour la seconde position d'inspection P2, la distance parcourue par le faisceau de photons X incident 12 dans le matériau jusqu'au volume d'inspection  $\delta V$  est notée  $l_2$ .

On peut se placer dans des conditions telles que  $\varepsilon = l_{aft1}/l_{bef1} = l_{aft2}/l_{bef2}$ . Il suffit notamment, pour réaliser les mesures de  $X_1(E_1)$ ,  $X_2(E_1)$  que  $\alpha_{inc1} = \alpha_{inc2}$  et que  $\alpha_{dif1} = \alpha_{dif2}$ . On obtient alors :

$$X_1(E_1) = \beta(E_1, \text{Matériau}, \theta) \cdot e^{-\mu'_{\text{matériau}}(E_0, E_1, \varepsilon) \cdot l_1} \quad (5)$$

$$X_2(E_1) = \beta(E_1, \text{Matériau}, \theta) \cdot e^{-\mu'_{\text{matériau}}(E_0, E_1, \varepsilon) \cdot l_2} \quad (6)$$

On calcule le rapport entre  $X_1(E_1)$  et  $X_2(E_1)$ .

$$\frac{X_1(E_1)}{X_2(E_1)} = \frac{\beta(E_1, \text{Matériau}, \theta) \cdot e^{-\mu'_{\text{matériau}}(E_0, E_1, \varepsilon) \cdot l_1}}{\beta(E_1, \text{Matériau}, \theta) \cdot e^{-\mu'_{\text{matériau}}(E_0, E_1, \varepsilon) \cdot l_2}} \quad (7)$$

On pose  $\Delta l = l_1 - l_2$

$$\ln\left(\frac{X_1(E_1)}{X_2(E_1)}\right) = \ln(e^{-\mu'_{\text{matériau}}(E_0, E_1, \varepsilon) \cdot \Delta l}) \quad (8)$$

$$\ln\left(\frac{X_1(E_1)}{X_2(E_1)}\right) = -\mu'_{\text{matériau}}(E_0, E_1, \varepsilon) \cdot \Delta\ell \quad (9)$$

$$\mu'_{\text{matériau}}(E_0, E_1, \varepsilon) = -\frac{1}{\Delta\ell} \ln\left(\frac{X_1(E_1)}{X_2(E_1)}\right) = -\frac{1}{\ell_1 - \ell_2} \ln\left(\frac{X_1(E_1)}{X_2(E_1)}\right) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} 5 \quad \beta(E_1, \text{Matériau}, \theta) &= \frac{X_1(E_1)}{e^{-\mu'_{\text{matériau}}(E_0, E_1, \varepsilon) \cdot \ell_1}} = \frac{X_1(E_1)}{e^{-\ell_1 \left( \frac{1}{\ell_1 - \ell_2} \ln \frac{X_1(E_1)}{X_2(E_1)} \right)}} \\ &= \frac{X_1(E_1)}{e^{\left( -\frac{\ell_1}{\ell_1 - \ell_2} \ln \frac{X_1(E_1)}{X_2(E_1)} \right)}} = \frac{X_1(E_1)}{\left( \frac{X_1(E_1)}{X_2(E_1)} \right)^{\frac{\ell_1}{\ell_1 - \ell_2}}} \\ &= \frac{X_2(E_1)^{\frac{\ell_1}{\ell_1 - \ell_2}}}{X_1(E_1)^{\frac{\ell_1}{\ell_1 - \ell_2} - 1}} = \frac{X_2(E_1)^{\frac{\ell_1}{\ell_1 - \ell_2}}}{X_1(E_1)^{\frac{\ell_2}{\ell_1 - \ell_2}}} \quad (11) \end{aligned}$$

Pour chacune des positions de mesure, on place l'ensemble source de photons X 10-détecteur spectrométrique 11 par rapport à l'objet 100, de manière à connaître l'angle de diffusion  $\theta$  et à le conserver sensiblement constant. On peut déterminer géométriquement  $\ell_1$  et  $\ell_2$  et par conséquent  $\Delta\ell$ , puis le paramètre  $\beta(E_1, \text{Matériau}, \theta)$  et le coefficient combiné d'atténuation  $\mu'_{\text{matériau}}(E_0, E_1, \varepsilon)$  avec les formules (10) et (11). Les deux distances  $\ell_1$  et  $\ell_2$  peuvent être exprimées en se basant sur les positions relatives de la source de photons X 10, du détecteur spectrométrique 11 et de l'objet à inspecter 100. On utilise la distance AI séparant la source de photons X 10 du détecteur spectrométrique 11, les distances AC, BC séparant la source de photons X 10 de la surface de l'objet 100 irradiée par le faisceau de photons X incident 12,

c'est-à-dire par laquelle le faisceau de photons X 12 incident pénètre dans l'objet 100, lorsque l'ensemble source de photons X 10-objet 100 est dans la première position P1 et dans la seconde position P2 respectivement. Les distances AI, AC, BC sont illustrées sur la figure 5.

On note :

$$\delta = \pi - \theta$$

$$\ell_1 = EF / \sin(\delta / 2)$$

Le point F est la projection du volume d'inspection  $\delta V$  aussi bien à la première profondeur qu'à la seconde profondeur sur la surface de l'objet 100 irradiée par le faisceau de photons X incident 12.

$$EF = AI / 2 - CE = AI / 2 - AC \operatorname{tg}(\delta / 2)$$

Le point E est le point de la surface de l'objet 100 irradiée par l'axe central du faisceau de photons X incident 12 dans la première position P1 de mesure.

$$\ell_1 = [AI / 2 - AC \operatorname{tg}(\delta / 2)] / \sin(\delta / 2) = \frac{AI}{2 \sin(\delta / 2)} - AC \frac{1}{\cos(\delta / 2)}$$

Le point D est le point de la surface de l'objet 100 irradiée par l'axe central du faisceau de photons X incident 12 dans la seconde position P2 de mesure.

$$\ell_2 = DF / \sin(\delta / 2)$$

$$DF = AI / 2 - CD = AI / 2 - BC \cot g(\delta / 2)$$

$$\ell_2 = [AI / 2 - BC \operatorname{tg}(\delta / 2)] / \sin(\delta / 2) = \frac{AI}{2 \sin(\delta / 2)} - BC \frac{1}{\cos(\delta / 2)}$$

Connaissant  $k(E_0, \theta)$  et sachant qu'il est indépendant du matériau à identifier, on peut en déduire le rapport  $Z_{eff}\rho/A_{norm}$  tel que :

$$\frac{Z_{eff}\rho}{A_{norm}} = \left[ \frac{X_2(E_1)^{\frac{\ell_1}{(\ell_1-\ell_2)}}}{X_1(E_1)^{\frac{\ell_2}{(\ell_1-\ell_2)}}} \right] / k(E_0, \theta) = \beta(E_1, \text{Matériau}, \theta) / k(E_0, \theta) \quad (12)$$

On va maintenant déterminer  $k(E_0, \theta)$ . Il peut être modélisé, mais avantageusement on le déterminera par mesure en utilisant un matériau étalon connu. Le matériau étalon étant connu, seul  $k(E_0, \theta)$  est inconnu dans la formule (3). Il peut donc être aisément déterminé. Avec un matériau connu et une source de photons X dont on connaît le flux de photons X du faisceau de photons X émis, en faisant deux mesures de flux de photons X du faisceau de photons X rétrodiffusé dans deux positions différentes de l'ensemble source de photons X détecteur spectrométrique, il est possible de déterminer :

$$X_{calib1}(E_1) = \beta(E_1, \text{Matériau - étalon}, \theta) \cdot e^{-\mu'_{matériau-étalon}(E_0, E_1, \epsilon) \cdot L_1}$$

$$X_{calib2}(E_1) = \beta(E_1, \text{Matériau - étalon}, \theta) \cdot e^{-\mu'_{matériau-étalon}(E_0, E_1, \epsilon) \cdot L_2}$$

$$\beta(E_1, \text{Matériau - étalon}, \theta) = \frac{S(x, Z) \cdot \rho}{A_{norm}} \approx \frac{Z_{eff}}{A_{norm}} k(E_0, \theta)$$

Les formules présentées ci-dessus sont valables pour des mesures dans le vide ou dans l'air ou de façon générale dans un gaz ou un mélange gazeux ou tout autre milieu faiblement absorbant aux énergies  $E_0$ ,

$E_1$ , c'est-à-dire bien moins absorbant que le matériau connu.

Les matériaux explosifs qui nous intéressent ont des densités  $\rho$  suffisamment différentes  
 5 comme illustré sur la figure 3. On va maintenant expliquer comment estimer la densité  $\rho$  du matériau à identifier.

Pour des énergies suffisamment élevées, par exemple supérieures à environ 30 keV, on constate sur  
 10 la figure 6A, que les coefficients d'atténuation linéaire  $\mu$  dans les matériaux sont ordonnés dans le même sens que leurs densités  $\rho$ . Précisément, on constate même que le coefficient d'atténuation linéaire  $\mu$  dépend linéairement de la densité du matériau comme  
 15 l'illustre la figure 6B. Le coefficient combiné d'atténuation  $\mu'$  est obtenu à partir d'une combinaison linéaire de coefficients d'atténuation linéaire  $\mu$  du même matériau à deux énergies différentes  $E_0$  et  $E_1$ .

$$\begin{aligned} \mu'_{\text{matériau}}(E_0, E_1, \varepsilon) &= \mu_{\text{matériau}}(E_0) \left[ 1 + \frac{\mu_{\text{matériau}}(E_1)}{\mu_{\text{matériau}}(E_0)} \varepsilon \right] \\ 20 \qquad \qquad \qquad &= \mu_{\text{matériau}}(E_0) + \mu_{\text{matériau}}(E_1) \varepsilon \end{aligned}$$

On en déduit qu'une relation linéaire existe également entre  $\mu'$  et la densité  $\rho$  du matériau:

Les densités des matériaux représentés sur les figures 6A, 6B et 7 sont données ci-dessous.

25

Matériau	Densité $\rho$
eau	1
nylon	1,14
plexiglas	1,18

Delrin	1,42
cellulose	1,45
polyvinyle	1,47
Kynar	1,7
Téflon	2,16
Gelamon 22	1,4
Octanitrocubane	1,98
nitropentrite	1,77
TNT	1,64
tétrazène	1,7
PETN	1,77
DNT	1,538
hexogène	1,82

La figure 7 représente la correspondance entre la densité  $\rho$  des matériaux et la moyenne du coefficient combiné d'atténuation  $\mu'_{\text{mean}}$  pour des énergies  $E_1$  comprises entre 50 et 100 keV dans un cas spécifique expérimental dans lequel  $\varepsilon = 1$  et  $\theta = 120^\circ$ .

Ce cas précis confirme la forte relation de linéarité entre la moyenne arithmétique du coefficient combiné d'atténuation  $\mu'_{\text{mean}}$  calculée par des tables et la densité  $\rho$ . En pratique, l'angle de diffusion  $\theta$  et le rapport  $\varepsilon$  sont connus et dépendent de la géométrie du dispositif d'identification utilisé, on peut estimer  $m$  ( $m$  entier supérieur à un) coefficients combinés d'atténuation  $\mu'(E_0, E_1, \varepsilon)$  pour une série de  $m$  valeurs de l'énergie  $E_0$ , de telle sorte que l'énergie  $E_1$ , dépendant de l'énergie  $E_0$  et de l'angle de diffusion  $\theta$  varie dans une plage d'énergie donnée, typiquement de quelques dizaines de keV, par exemple comprise entre 50

keV et 100 keV. En réalisant la moyenne arithmétique de ces  $m$  coefficients combinés d'atténuation, on obtient la moyenne arithmétique du coefficient combiné d'atténuation  $\mu'_{\text{mean}}$  qui dépend de l'angle de diffusion  $\theta$  et du rapport  $\varepsilon$  connus.

On peut dresser une table de données obtenues de manière expérimentale pour un angle de diffusion  $\theta$  et un rapport  $\varepsilon$  donnés, cette table permettant d'établir une relation de type :

$$\mu'_{\text{mean}}(\theta, \varepsilon) = a\rho + b.$$

On peut donc obtenir une estimation de la densité  $\rho$  du matériau à partir de cette relation. Les coefficients  $a$  et  $b$  peuvent également être obtenus par une phase de calibrage en réalisant des mesures avec un angle de diffusion un angle de diffusion  $\theta$  et un rapport  $\varepsilon$  donnés sur une pluralité d'objets de dimensions connues réalisés dans des matériaux dont on connaît la densité.

On utilisera un détecteur spectrométrique ayant un nombre de canaux suffisamment important pour recouvrir l'ensemble du signal utile de spectrométrie, par exemple correspondant à une bande d'énergie comprise entre quelques keV et 200 keV. On évitera les canaux correspondant aux plus basses énergies du spectre, ces derniers pouvant être perturbés par du bruit à ces énergies la linéarité entre la moyenne arithmétique du coefficient combiné d'atténuation  $\mu'_{\text{mean}}$  et la densité  $\rho$  est moins précise.

On peut alors estimer, à partir de la formule (12),  $Z_{\text{eff}}/A_{\text{norm}}$  en fonction de  $\beta(E_1, \text{Matériau}, \theta)$ ,  $k(E_0)$  et  $\rho$  et représenter  $Z_{\text{eff}}/A_{\text{norm}}$  en fonction de  $\rho$

comme sur la figure 3, ce qui permet d'identifier le matériau.

On va maintenant en se référant à la figure 8 expliquer comment, selon le procédé de l'invention, identifier, dans un objet, un matériau qui est enterré sous une ou plusieurs couches d'autres matériaux. On suppose que chacune des couches de l'objet est dans un matériau homogène, au moins dans la zone où se propage le faisceau de photons X incident 12 et le faisceau de photons X rétrodiffusé 13. On suppose que l'objet 100 est formé de n couches empilées référencées 100.1, 100.2, 100.3,..... 100.i, .....100.n, n est un entier supérieur ou égal à 1. Les couches ont un rang croissant plus on s'éloigne de la surface qui est irradiée par le faisceau de photons X incident 12. Il va falloir faire au moins deux mesures du flux de photons X du faisceau de photons X rétrodiffusé vers le détecteur spectrométrique par couches, pour deux profondeurs de diffusion différentes.

Dans la couche de rang i (i supérieur ou égal à 2) on mesure donc deux flux de photons X  $X_{i1}(E_1)$  et  $X_{i2}(E_1)$  de faisceaux de photons X rétrodiffusés selon un même angle  $\theta$  de rétrodiffusion à partir de volumes d'inspection  $\delta V$  situés à des profondeurs de diffusion différentes. Ces flux de photons X s'expriment de la manière suivante :

$$X_{i1}(E_1) = \beta(E_1, \text{Matériau}.i, \theta) \cdot e^{-\mu'_{\text{matériau}.i}(E_0, E_1, \epsilon) \cdot li1} \cdot Fi \quad (13)$$

$$X_{i2}(E_1) = \beta(E_1, \text{Matériau}.i, \theta) \cdot e^{-\mu'_{\text{matériau}.i}(E_0, E_1, \epsilon) \cdot li2} \cdot Fi \quad (14)$$

li1 et li2 sont les distances parcourues par le faisceau de photons X 12 incident dans le matériau de la couche 100.i, jusqu'au volume

d'inspection. On appelle  $li'1$ ,  $li'2$  les distances parcourues par le faisceau de photons X rétrodiffusé dans la couche 100.1 depuis le volume d'inspection. Dans une même couche 100.i de matériau, le coefficient  
 5 combiné d'atténuation  $\mu'_{\text{matériau}.i}(E_0, E_1, \varepsilon)$  reste constant. Ici, le rapport  $\varepsilon$  est tel que  $\varepsilon = li'1/li1 = li'2/li2$ .

On résout donc le système d'équations (13), (14) pour trouver le paramètre  $\beta(E_1, \text{Matériau}.i, \theta)$ . On calcule  $li1$ ,  $li2$ ,  $li'1$ ,  $li'2$  à partir des positions  
 10 relatives de la source de photons X, du détecteur spectrométrique et de l'objet, de la distance  $lj$  parcourue par le faisceau de photons X 12 incident dans chacun des uns ou plusieurs matériaux de rang 1 à  $i-1$ , de la distance  $lj'$  parcourue par le faisceau de photons  
 15 X 13 rétrodiffusé dans chacun des ou plusieurs matériaux de rang 1 à  $i-1$ . Pour cela, on effectue des mesures successives de flux de photons X de faisceaux rétrodiffusés pour des volumes d'inspection  $\delta V$  situés de plus en plus profond, à partir de la couche de  
 20 surface et espacés d'un pas  $p$ , l'angle de diffusion  $\theta$  restant sensiblement constant d'une mesure à l'autre. On choisit le pas  $p$ , de préférence petit par rapport à l'épaisseur des  $i-1$  couches. On calcule pour un premier flux  $X_1(E_1)$ , un second flux  $X_2(E_1)$  et un troisième flux  
 25  $X_3(E_1)$  successifs un premier coefficient combiné

d'atténuation  $\mu'_1(E_0, E_1, \varepsilon) = -\frac{1}{lj1 - lj2} \ln\left(\frac{X_1(E_1)}{X_2(E_1)}\right)$  et un second

coefficient combiné d'atténuation

$$\mu'_2(E_0, E_1, \varepsilon) = -\frac{1}{lj2 - lj3} \ln\left(\frac{X_2(E_1)}{X_3(E_1)}\right), \quad \text{avec}$$

$\varepsilon = lj'1/lj1 = lj'2/lj2 = lj'3/lj3$ ,  $lj1$ ,  $lj2$ ,  $lj3$  étant les

distances parcourues par le faisceau de photons X 12 incident dans le matériau dans lequel se trouve le volume d'inspection pour lequel la mesure est effectuée,  $lj'1$ ,  $lj'2$ ,  $lj'3$  étant les distances  
5 parcourues par le faisceau de photons X 13 rétrodiffusé dans le matériau dans lequel se trouve le volume d'inspection pour lequel la mesure est effectuée. Ces distances sont calculées à partir de la position relative entre la source de photons X 10, le détecteur  
10 spectrométrique 11 et l'objet 100, et du pas  $p$ . On compare le premier et le second coefficient combiné d'atténuation et dès qu'une différence apparaît, on attribue à la distance  $lj$  recherchée la plus grande des distances utilisées dans la formule du premier  
15 coefficient combiné d'atténuation. Dès que le premier coefficient combiné d'atténuation est très différent du second coefficient combiné d'atténuation, cela signifie que l'on vient de passer d'une couche donnée à la suivante qui est dans un autre matériau.

20 Les distances  $lj$ ,  $lj'$  permettent d'estimer la profondeur  $Pj$  de la frontière séparant deux matériaux différents connaissant l'angle d'incidence du faisceau de photons X incident par rapport à la surface du matériau, la dite surface étant  
25 considérée comme plane au moins localement, c'est-à-dire entre la zone d'impact du faisceau de photons X incident et la zone traversée par le faisceau de photons X rétrodiffusé selon l'angle  $\theta$ .

30 En effet, à partir de la distance  $lj$ , il est possible de connaître la profondeur  $Pj$  de l'interface entre une couche de matériau de rang  $j$  et

une couche de matériau de rang  $j+1$  en connaissant l'angle d'incidence  $\alpha_{inc}$  du faisceau de photons X incident par rapport à une normale  $N$  de la face d'entrée de la première couche 100.1 du matériau analysé, selon l'égalité  $P_j = l_j \times \sin(\alpha_{inc})$ . La normale  $N$  est dirigée vers l'extérieur du matériau.

De même, connaissant  $l'_j$ , il est possible d'estimer la profondeur  $P_j$  en connaissant l'angle  $\alpha_{dif}$  du faisceau de photons X rétrodiffusé par rapport à cette la normale  $N$  précédemment citée selon l'égalité

$$P_j = l'_j \times \cos(\alpha_{dif}).$$

On suppose que la surface d'entrée de la première couche 100.1 du matériau analysé est localement plane entre la zone d'impact du faisceau de photons X incident et la zone traversée par le faisceau de photons X rétrodiffusé selon l'angle  $\theta$ . On remarquera d'ailleurs que  $\theta = \alpha_{inc} + \alpha_{dif}$ .

On réitère les étapes de calcul, de comparaison et d'attribution une ou plusieurs fois en prenant trois flux de photons X successifs, deux d'entre eux successifs étant des flux utilisés pour le calcul de l'étape de calcul précédente. Le calcul des distances parcourues par le faisceau de photons X dans le matériau dans lequel se trouve le volume d'inspection pour lequel la mesure est effectuée prend en compte la distance  $l_j$  calculée précédemment.

On pourrait également faire le même raisonnement en déterminant le coefficient  $\beta(E_1, \text{matériau}, i, \theta)$  avec deux des mesures successives puis avec les deux autres mesures successives. Une

variation du coefficient  $\beta(E_1, \text{matériau}.i, \theta)$  signale un changement de matériau.

En connaissant l'angle d'incidence du faisceau de photons X incident par rapport à la surface de l'objet observé, il est possible, connaissant la distance  $lj$  parcourue par le faisceau de photons X incident avant la rétrodiffusion dans la couche  $j$ , de déterminer la profondeur de la frontière entre la couche  $i$  et la couche  $j$  par rapport à la surface de l'objet en utilisant des relations trigonométriques simples.

Il faut aussi déterminer le facteur d'atténuation  $Fi$ , cette atténuation dépend des matériaux des  $i-1$  couches 100.1 à 100. $i-1$ , traversées par le faisceau de photons X incident et le faisceau de photons X rétrodiffusé et recouvrant la couche  $i$ .

$$Fi = \prod_{j=1}^{i-1} e^{-\mu'_{\text{matériau}.j}(E_0, E_1, \varepsilon) \cdot lj} \quad (15)$$

avec  $\varepsilon = lj' / lj$   $lj$  correspond à la distance parcourue par le faisceau de photons X incident dans la couche  $j$  et  $lj'$  correspondant à la distance parcourue par le faisceau de photons X rétrodiffusé dans la couche  $j$ .

Pour chacune des  $i-1$  couches, on doit donc calculer le coefficient combiné d'atténuation  $\mu'_{\text{matériau}.j}(E_0, E_1, \varepsilon)$  grâce à deux mesures de flux  $X_{j1}(E_1)$ ,  $X_{j2}(E_1)$  à des profondeurs différentes en utilisant la formule suivante :

$$\mu'_{\text{matériau}.k}(E_0, E_1, \varepsilon) = (1/l1j - l2j) \ln(X_{j1}(E_1) / X_{j2}(E_1))$$

$\varepsilon = l1'j / l1j = l2'j / l2j$ ,  $l1j$  et  $l2j$  sont les distances parcourues par le faisceau de photons X

incident dans le matériau de la couche  $j$  jusqu'au volume d'inspection correspondant à la mesure considérée,  $l1'j$  et  $l2'j$  sont les distances parcourues par le faisceau de photons  $X$  rétrodiffusé dans le  
 5 matériau de la couche  $j$  jusqu'au volume d'inspection correspondant à la mesure considérée.

Maintenant que l'on a généralisé, on va détailler les calculs pour un objet 100 possédant deux couches empilées 100.1 et 100.2, la première  
 10 superficielle réalisée dans un matériau.1, la seconde enterrée réalisée dans un matériau.2. On se réfère à la figure 9. On suppose que l'objet 100 ne comporte que deux couches homogènes empilées 100.1, 100.2.

On réalise trois mesures du flux de photons  
 15  $X$  de faisceaux de photons  $X$  rétrodiffusés, selon l'angle de diffusion  $\theta$ , à trois profondeurs différentes dans la couche 100.1 superficielle et deux dans la couche 100.2 enterrée.

Ces mesures s'expriment de la manière  
 20 suivante :

$$\left. \begin{aligned} X_1(E_1) &= \beta(E_1, \text{Matériau.1}, \theta) \cdot e^{-\mu'_{\text{matériau.1}}(E_0, E_1, \varepsilon) \cdot \ell_1} \\ X_2(E_1) &= \beta(E_1, \text{Matériau.1}, \theta) \cdot e^{-\mu'_{\text{matériau.1}}(E_0, E_1, \varepsilon) \cdot \ell_2} \\ X_3(E_1) &= \beta(E_1, \text{Matériau.1}, \theta) \cdot e^{-\mu'_{\text{matériau.1}}(E_0, E_1, \varepsilon) \cdot \ell_3} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned} X_4(E_1) &= \beta(E_1, \text{Matériau.2}, \theta) \cdot e^{-\mu'_{\text{matériau.1}}(E_0, E_1, \varepsilon) \cdot \ell_4} \cdot e^{-\mu'_{\text{matériau.2}}(E_0, E_1, \varepsilon) \cdot \ell_5} \\ X_5(E_1) &= \beta(E_1, \text{Matériau.2}, \theta) \cdot e^{-\mu'_{\text{matériau.1}}(E_0, E_1, \varepsilon) \cdot \ell_5} \cdot e^{-\mu'_{\text{matériau.2}}(E_0, E_1, \varepsilon) \cdot \ell_6} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Le rapport  $\varepsilon$  correspond toujours au rapport de la distance parcourue par le faisceau de photons  $X$  rétrodiffusé sur la distance parcourue par le faisceau  
 25 de photons  $X$  incident dans le matériau.

La combinaison de  $X_1(E_1)$  et de  $X_2(E_2)$  permet de calculer le paramètre  $\beta(E_1, \text{Matériau.1}, \theta)$  et le coefficient combiné d'atténuation  $\mu'_{\text{matériau.1}}(E_0, E_1, \epsilon)$  de la manière suivante :

$$\beta(E_1, \text{Matériau.1}, \theta) = \left( \frac{X_2(E_1)^{\frac{\ell_1}{(\ell_1 - \ell_2)}}}{X_1(E_1)^{\frac{\ell_2}{(\ell_1 - \ell_2)}}} \right)$$

$$\mu'_{\text{matériau.1}}(E_0, E_1) = -\frac{1}{\ell_1 - \ell_2} \left( \ln \left( \frac{X_1(E_1)}{X_2(E_1)} \right) \right)$$

En introduisant le coefficient combiné d'atténuation  $\mu'_{\text{matériau.1}}(E_0, E_1, \epsilon)$ , dans les formules des flux (17), on obtient le coefficient combiné d'atténuation  $\mu'_{\text{matériau.2}}(E_0, E_1, \epsilon)$  et le paramètre  $\beta(E_1, \text{Matériau.2}, \theta)$ .

$$\Rightarrow \mu'_{\text{matériau.2}}(E_1, E_1, \epsilon) = -\frac{1}{\ell_5 - \ell_6} \left( \ln \frac{X_4}{X_5} \right)$$

$$\Rightarrow \beta(E_1, \text{Matériau.2}, \theta) = \frac{X_4(E_1)}{e^{-\mu'_{\text{matériau.1}}(E_0, E_1, \epsilon) \cdot \ell_4} e^{-\mu'_{\text{matériau.2}}(E_0, E_1, \epsilon) \cdot \ell_5}}$$

Il ne reste plus qu'à estimer la densité  $\rho$  avec la moyenne du coefficient combiné d'atténuation  $\mu'_{\text{mean}}$ . Avec les grandeurs ci-dessus, on peut estimer le rapport  $Z_{\text{eff}}/A_{\text{norm}} = \beta(E_1, \text{Matériau.2}, \theta) / k(E_0, \theta) \cdot \rho$  pour pouvoir représenter  $Z_{\text{eff}}/A_{\text{norm}}$  en fonction de  $\rho$  comme sur la figure 3.

On va maintenant donner un exemple d'identification du matériau d'un objet par le procédé selon l'invention. On utilise un récipient 100.1 cylindrique en PETP ( $C_{10}H_8O_4$ ) dont la densité  $\rho$  vaut

1,32. Le récipient 100.1 a un rayon de 4 cm, une longueur de 32 cm et une épaisseur de 1 mm.

On va remplir ce récipient 100.1 d'un matériau 100.2 que l'on cherche à identifier par le  
5 procédé de l'invention. On se réfère à la figure 10. L'objet référencé 100 correspond au récipient 100.1 contenant le matériau 100.2.

On dispose de deux groupes de matériaux. Le premier groupe de matériaux solides comprend : l'acide  
10 picrique\*, l'ammonal\*, le camphre\*, la cellulose, le Delrin, le DNT\*, la dynamite gomme\*, le gelamon 22\*, l'hexogène\*, l'HMX ( $C_4H_8N_8O_8$  ou High Melting-Point Explosive)\*, le Kynar, le nitrate d'ammonium\*, le nitropentrite\*, le nylon, le nitroglycol\*,  
15 l'octanitrocubane\*, la paraffine, la pentrite ou Pentaéthythritol Tétranitrate ou PETN\*, le PETP, le plexiglas, le polyéthylène, le polystyrène, le polyvinyle, la poudre noire\*, le Téflon, le tétrazène\*, le TNT\*.

20 Le second groupe comprend cinq matériaux liquides comme l'eau, le peroxyde d'hydrogène, la nitroglycérine\*, l'acétone, le peroxyde d'acétone. Les matériaux suivis d'une « \* » sont des explosifs.

On a utilisé une source de photons X 10 de  
25 type XRS-3 fournissant un faisceau de photons X d'énergie maximale de 270 kV, en impulsions avec 20 impulsions par minute. Le détecteur spectrométrique 11 est un détecteur en tellure de cadmium.

La source de photons X 10 et le détecteur  
30 spectrométrique 11 sont placés dans un plan xoy se trouvant à une distance d'environ 20 cm du volume

d'inspection  $\delta V$ . Ils sont à la même distance de la surface de l'objet 100. Ce plan xoy est parallèle à une génératrice du cylindre formant l'objet 100. Lors d'une des mesures du flux de photons X du faisceau de photons X rétrodiffusé par le détecteur spectrométrique 11, le volume d'inspection  $\delta V$  se trouve à une profondeur de 2cm dans le récipient 100.1. Lors de l'autre mesure, il se trouve à une profondeur de 4 cm. Le volume d'inspection  $\delta V$  se trouve dans le matériau 100.2.

10 L'angle de diffusion  $\theta$  vaut  $120^\circ$ . Le détecteur spectrométrique 11 et la source de photons X 10 sont collimatés, ils ont une ouverture de  $2,4^\circ$ . On prévoit des moyens réglage 101 de la position relative entre la source de photons X 10, le détecteur spectrométrique 11

15 et l'objet 100 de manière à placer le volume d'inspection  $\delta V$  dans au moins deux positions à des profondeurs différentes dans le matériau 100.2 tout en conservant l'angle de diffusion sensiblement constant. Les moyens de réglage 101 rapprochent et/ou éloignent

20 l'ensemble source de photons X-détecteur spectrométrique par rapport à l'objet et rapprochent et/ou éloignent la source de photons X du détecteur spectrométrique. Les déplacements, par exemple de l'ensemble source de photons X 10-détecteur

25 spectrométrique 11 se font selon la direction z. On peut aussi déplacer la source de photons 10 et/ou le détecteur spectrométrique selon la direction x. La génératrice du cylindre est dirigée selon x. Les moyens de réglage 101 permettent d'ajuster l'angle de

30 diffusion  $\theta$  d'une part et la distance entre l'ensemble source de photons X-détecteur spectrométrique. Le

réglage peut se faire pas à pas. Le pas peut être constant ou non. On choisira avantageusement le pas inférieur à l'épaisseur d'une couche de matériau de l'objet de manière à ce que le volume d'inspection  
5 puisse prendre au moins deux positions dans la couche de matériau. Si on cherche à trouver l'épaisseur d'une couche de matériau, le pas sera encore plus petit afin de faire plus de deux mesures de flux de photons X dans une même couche.

10 On prévoit des moyens de traitement et de calcul 102.a pour traiter les flux de photons X mesurés par le détecteur spectrométrique dans les deux positions et pour calculer le paramètre  $\beta(E_1, \text{Matériau}, \theta)$  et le coefficient d'atténuation combiné  
15  $\mu'_{\text{matériau}}(E_0, E_1, \varepsilon)$  à l'aide des flux de photons X mesurés dans les deux positions. On prévoit aussi des moyens d'estimation 102.b de la densité  $\rho$  du matériau à partir d'une moyenne  $\mu'_{\text{mean}}$  du coefficient d'atténuation combiné  $\mu'_{\text{matériau}}(E_0, E_1, \varepsilon)$  sur une plage d'énergie donnée  
20 des photons X du faisceau de photons X rétrodiffusé. Cette moyenne  $\mu'_{\text{mean}}$  est représentative de la densité  $\rho$  du matériau. Il y a également des moyens de détermination 102.c de la nature chimique du matériau à l'aide du paramètre  $\beta(E_1, \text{Matériau}, \theta)$  décrivant le  
25 phénomène de diffusion, du coefficient d'atténuation combiné  $\mu'_{\text{matériau}}(E_0, E_1, \varepsilon)$  et de la densité  $\rho$ .

Ces moyens de traitement et de calcul 102.a reçoivent les signaux acquis par le détecteur spectrométrique 11 et les grandeurs géométriques  
30 reliant la source de photons X 10 au détecteur spectrométrique 11 et à l'objet 100. La connaissance de

$\mu'$ ,  $\rho$ ,  $\beta$  permet d'identifier la nature chimique du matériau examiné. Les moyens d'estimation 102.b et les moyens de détermination 102.c reçoivent les signaux acquis par le détecteur spectrométrique 11 et les

5 grandeurs géométriques reliant la source de photons X 10 au détecteur spectrométrique 11 et à l'objet 100, ainsi que les signaux délivrés par les moyens de traitement et de calcul 102.a.

Les moyens de détermination 102.c peuvent

10 utiliser la variation du rapport  $\beta(E_1, \text{Matériau}, \theta) / (k(E_0, \theta) \rho)$  en fonction de la densité, et notamment fournir un graphique représentant  $\beta(E_1, \text{Matériau}, \theta) / \rho \cdot k(E_0, \theta)$  en fonction de la densité  $\rho$  comme sur la figure 3 et/ou les trois fonctions  $\mu'$ ,  $\beta$ ,

15  $\rho$ .

Les résultats des calculs obtenus par le procédé selon l'invention sont illustrés sur la figure 11A qui représente la variation du rapport  $\beta(E_1, \text{Matériau}, \theta) / \rho \cdot k(E_0, \theta)$  en fonction de la densité  $\rho$ . Sur

20 la figure 11B, on a représenté, pour les mêmes matériaux, la variation du rapport  $Z_{\text{eff}}/A_{\text{norm}}$  théorique en fonction de la densité  $\rho$ . Dans ces deux représentations la densité  $\rho$  est la densité théorique.

On s'aperçoit que la présence du récipient

25 n'a pas d'influence sur la détermination du matériau qu'il contient. La répartition des valeurs est sensiblement la même sur la figure 11A et sur la figure 11B.

Sur ces figures 11A, 11B, on peut

30 distinguer nettement sur la moitié droite du graphique une zone d'explosifs. Plusieurs configurations ont été

employées pour la position de l'ensemble source de photons X détecteur par rapport à l'objet. Les meilleurs résultats en termes de précision ont été obtenus avec la distance de 20 cm et l'ouverture de 2,4° comme indiqué plus haut. Un plus grand espacement et une ouverture plus grande ne donnaient pas d'aussi bons résultats.

Sur la figure 11C, pour les cinq liquides du second groupe, on a représenté la variation du rapport  $\beta(E_1, \text{Matériau}, \theta) / \rho \cdot k(E_0, \theta)$  en fonction de la densité  $\rho$  à partir de mesures de la grandeur relative au rayonnement. On a effectué deux séries de mesures avec des collimations différentes pour l'ensemble source de photons X - détecteur spectrométrique. L'ouverture de la source de photons X et celle du détecteur spectrométrique ont été de 1,2° et de 1,5° ce qui a fait passer le volume d'inspection de 0,65 cm<sup>3</sup> à 1,43 cm<sup>3</sup>. Les points pleins correspondent à l'ouverture de 1,2° et les points pleins à l'ouverture de 1,5°.

Sur les figures 11A, 11B, 11C, les valeurs indiquées sont des moyennes pondérées représentées avec des barres d'erreurs suite à une étude statistique sur 100 réalisations. On s'aperçoit que les liquides peuvent être distingués des solides, leur densité étant moindre.

Dans les mêmes conditions de simulation que celles exposées plus haut et ayant conduit aux représentations des figures 11A et 11B, on a calculé la densité estimée  $\rho_m$  à partir de l'énergie moyenne comme on l'a expliqué à partir de l'expression (13).

Sur la figure 12, on a représenté la variation du rapport  $\beta(E, \text{Matériau}, \theta) / \rho_m \cdot k(E_0, \theta)$  en fonction de  $\rho_m$  pour tous les matériaux testés à la figure 11A et dans les mêmes conditions géométriques. Cette représentation est en bon accord avec celle de la figure 11A.

L'exploitation des informations apportées par le faisceau de photons X rétrodiffusé en s'appuyant sur les performances du détecteur spectrométrique est utile pour notamment:

- l'identification de la nature d'un liquide
- la distinction de l'eau par rapport à un explosif liquide sachant qu'un explosif peut être un mélange à base de produits courants comme l'eau oxygénée, l'acétone, les engrais, etc. ou un explosif liquide comme la nitroglycérine et le peroxyde d'acétone.

Bien qu'un certain mode de réalisation de la présente invention ait été représenté et décrit de façon détaillée, on comprendra que différents changements et modifications puissent être apportés sans sortir du cadre de l'invention. On peut notamment envisager que l'objet à inspecter ne soit pas dans sa globalité en couches empilées, mais que cet empilement ne se trouve que dans une zone d'inspection parcourue par les faisceaux de photons X incident et rétrodiffusé.

Le dispositif permettant de mettre en œuvre le procédé précédemment décrit peut être une source de photons X, comme un générateur de rayons X collimaté et un détecteur spectrométrique collimaté, l'un et l'autre étant déplacés entre deux mesures consécutives de telle

sorte que l'axe de collimation du détecteur soit centré sur le même angle de diffusion  $\theta$  par rapport au rayonnement produit par la source. Les flèches sur la figure 8 illustrent les directions de déplacement  
5 possibles.

Selon une autre disposition, la source de photons X est fixe, et le détecteur est déplacé de telle sorte qu'entre deux mesures consécutives, l'axe de collimation soit orienté selon le même angle de  
10 diffusion  $\theta$  par rapport au rayonnement produit par la source.

Selon une autre disposition illustrée sur la figure 4, la source de photons X 10 peut être fixe, le détecteur 11 étant formé d'un arrangement de  
15 détecteurs élémentaires 11.1, 11.2, ..., 11.n collimatés, les axes de collimation étant de préférence parallèles et orientés selon un même angle de diffusion  $\theta$  par rapport au rayonnement produit par la source. Il est alors possible de comparer au moins deux mesures du  
20 rayonnement rétrodiffusé mesurées par au moins deux détecteurs différents.

### REVENDEICATIONS

1. Procédé d'identification d'un matériau d'un objet, ce matériau étant pourvu d'un rang  $i$  ( $i$  entier),  $i$  valant un s'il est en surface et étant supérieur à un s'il est enterré sous  $i-1$  couches, dans lequel :

a°) on irradie une surface sensiblement plane au moins localement de l'objet (100) avec un faisceau de photons X incident (12) généré par une source (10) de photons X collimatée,

b°) on mesure à l'aide d'un détecteur spectrométrique (11) collimaté un premier flux de photons X d'un faisceau de photons X rétrodiffusé (13) selon un angle de diffusion ( $\theta$ ) donné, généré après diffusion du faisceau de photons X incident dans un premier volume d'inspection du matériau de rang  $i$ , se trouvant à une première profondeur dans le matériau de rang  $i$ ,

c°) on mesure à l'aide du détecteur spectrométrique collimaté un second flux de photons X d'un faisceau de photons X rétrodiffusé selon le même angle de diffusion donné, généré après diffusion du faisceau de photons X incident dans un second volume d'inspection du matériau de rang  $i$ , se trouvant à une seconde profondeur dans le matériau de rang,

d°) on calcule à l'aide des mesures des deux flux de photons X ( $X_{i1}(E_1)$ ,  $X_{i2}(E_2)$ ), un paramètre  $\beta(E_1, \text{Matériau}, i, \theta)$  et un coefficient combiné d'atténuation  $\mu'_{\text{matériau}, i}(E_0, E_1, \varepsilon)$  dans lequel  $E_0$  est l'énergie des photons X du faisceau de photons X incident et  $E_1$  l'énergie des photons X du faisceau de photons X

rétrodiffusé selon l'angle de diffusion donné, les deux flux étant tels que :

$$Xi1(E_1) = \beta(E_1, \text{Matériau } i, \theta) \cdot e^{-\mu'_{\text{matériau } i}(E_0, E_1, \varepsilon) li1} \cdot Fi$$

$$Xi2(E_1) = \beta(E_1, \text{Matériau } i, \theta) \cdot e^{-\mu'_{\text{matériau } i}(E_0, E_1, \varepsilon) li2} \cdot Fi \text{ avec } \varepsilon$$

5 un rapport tel que  $\varepsilon = li'1/li1 = li'2/li2$ ,  $li1$  respectivement  $li2$  étant la distance parcourue par le faisceau de photons X incident dans le matériau de rang  $i$  jusqu'au premier respectivement second volume d'inspection,  $li'1$  respectivement  $li'2$  étant la  
10 distance parcourue par le faisceau de photons X rétrodiffusé dans le matériau de rang  $i$  depuis le premier respectivement second volume d'inspection,  $Fi$  étant un facteur d'atténuation égal à 1 lorsque  $i=1$  et fonction d'une atténuation apportée par les un ou  
15 plusieurs matériaux de rang 1 à  $i-1$  lorsque  $i$  est différent de 1,

e°) on estime la densité  $\rho$  du matériau  $i$  à partir du coefficient combiné d'atténuation  $\mu'_{\text{matériau } i}(E_0, E_1, \varepsilon)$  moyenné sur une plage d'énergie des  
20 photons X du faisceau de photons X rétrodiffusé donnée ;

f°) on détermine la nature chimique du matériau  $i$  à partir du paramètre  $\beta(E_1, \text{Matériau } i, \theta)$ , du coefficient combiné d'atténuation  $\mu'_{\text{matériau } i}(E_0, E_1, \varepsilon)$  et  
25 de la densité du matériau.

2. Procédé d'identification selon la revendication 1, dans lequel pour déterminer la nature chimique du matériau  $i$  à l'étape f°), on peut utiliser  
30 la variation du rapport  $\beta(E_1, \text{Matériau } i, \theta) / (k(E_0, \theta) \rho)$  en fonction de la densité,  $k(E_0, \theta)$  étant un paramètre

indépendant du matériau  $i$  mais dépendant de l'énergie du faisceau de photons  $X$  incident, de l'angle de diffusion, et de la position de la source de photons  $X$  et du détecteur spectrométrique par rapport au volume inspecté.

3. Procédé d'identification d'un matériau selon l'une des revendications 1 ou 2, dans lequel on calcule les distances  $li_1, li_2, li'_1, li'_2$  à partir des positions relatives de la source de photons  $X$  (10), du détecteur spectrométrique (11) et de l'objet (100) et si  $i$  différent de 1, d'une distance  $lj$  parcourue par le faisceau de photons  $X$  incident dans chacun des uns ou plusieurs matériaux de rang 1 à  $i-1$  et d'une distance  $l'_j$  parcourue par le faisceau de photons  $X$  rétrodiffusé selon l'angle de diffusion ( $\theta$ ) dans chacun des uns ou plusieurs matériaux de rang 1 à  $i-1$ , en :

1°) effectuant des mesures successives du flux de photons  $X$  du faisceau de photons  $X$  rétrodiffusé pour des volumes d'inspection situés de plus en plus profond, à partir de la couche de surface et espacés d'un pas ( $p$ ), l'angle de diffusion restant sensiblement constant d'une mesure à l'autre,

2°) calculant pour un premier flux ( $X_1(E_1)$ ), un second et un troisième flux de photons  $X$  ( $X_2(E_2), X_3(E_3)$ ) de faisceaux de photons  $X$  rétrodiffusés un premier coefficient combiné d'atténuation

$$\mu'_1(E_0, E_1, \epsilon) = -\frac{1}{lj_1 - lj_2} \ln \left( \frac{X_{j_1}(E_1)}{X_{j_2}(E_1)} \right) \text{ et un second coefficient}$$

$$\text{combiné d'atténuation } \mu'_2(E_0, E_1, \epsilon) = -\frac{1}{lj_2 - lj_3} \ln \left( \frac{X_{j_2}(E_1)}{X_{j_3}(E_1)} \right), \text{ avec}$$

$\varepsilon = l_j'1/l_{j1}=l_j'2/l_{j2}=l_j'3/l_{j3}$ ,  $l_{j1}$ ,  $l_{j2}$ ,  $l_{j3}$  et respectivement  $l_j'1$ ,  $l_j'2$ ,  $l_j'3$  étant des distances parcourues par le faisceau de photons X incident et respectivement le faisceau de photons X rétrodiffusé, dans le matériau dans lequel se trouve le volume d'inspection pour lequel la mesure est effectuée, ces distances étant calculées à partir de la position relative entre la source de photons X, le détecteur spectrométrique et l'objet,

3°) comparant le premier et le second coefficient combiné d'atténuation,

4°) dès qu'une différence apparaît, la distance  $l_j$  recherchée est la plus grande des distances utilisées dans la formule du premier coefficient combiné d'atténuation,

5°) en réitérant les étapes 2°) à 4°) une ou plusieurs fois en prenant trois mesures successives du flux de photons X du faisceau de photons X rétrodiffusé dont deux sont des mesures successives utilisées pour le calcul de l'étape 2°) précédente, le calcul des distances parcourues par le faisceau de photons X incident et rétrodiffusé dans le matériau dans lequel se trouve le volume d'inspection pour lequel la mesure est effectuée prenant en compte les distances  $l_j$  et  $l_j'$  déterminées précédemment.

4. Procédé d'identification d'un matériau selon la revendication 3, dans lequel le facteur  $F_i$  s'exprime par 
$$F_i = \prod_{j=1}^{i-1} e^{-\mu'_{matériau.j}(E_0, E_1, \varepsilon) \cdot l_j^j}$$
, avec  $\varepsilon = l_j' / l_j$  et  $\mu'_{matériau.j}(E_0, E_1, \varepsilon)$  étant un coefficient combiné

d'atténuation dans le matériau de rang  $j$ , ce coefficient combiné d'atténuation étant calculé à partir de deux mesures du flux de photons  $X$  du faisceau de photons  $X$  rétrodiffusé pour deux volumes d'inspection situés à deux profondeurs différentes dans le matériau de rang  $j$ , l'angle de diffusion restant sensiblement constant au cours des deux mesures,  $lj$  étant la distance parcourue par le faisceau de photons  $X$  incident dans le matériau de rang  $j$  et  $lj'$  la distance parcourue par le faisceau de photons  $X$  rétrodiffusé dans le matériau de rang  $j$ .

5. Procédé d'identification d'un matériau selon l'une des revendications 1 à 4, dans lequel le paramètre  $k(E_0, \theta)$  s'exprime par

$$k(E_0, \theta) = C(E_0, \theta) \cdot F(E_0) \left[ \frac{d\sigma_{KN}(E_0, \theta)}{d\Omega} d\omega N_a \cdot dl \right]$$

avec  $F(E_0)$  débit de fluence du faisceau de photons  $X$  incident,  $N_a$  nombre d'Avogadro,  $\frac{d\sigma_{KN}(E_0, \theta)}{d\Omega}$  section efficace différentielle de diffusion par électron par effet Compton approximée par une formule dite de Klein-Nishina,  $\delta\omega$  angle solide sous lequel est vu le détecteur spectrométrique depuis chaque point du volume d'inspection  $\delta V$ ,  $C(E_0, \theta)$  coefficient d'efficacité du détecteur spectrométrique à l'énergie  $E_1$ .

25

6. Procédé d'identification d'un matériau selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le paramètre  $k(E_0, \theta)$  est obtenu par modélisation ou par mesures dans un matériau étalon.

30

7. Dispositif d'identification d'un matériau d'un objet (100) comportant une source de photons X (10) collimatée, un détecteur spectrométrique (11) collimaté, la source de photons X étant destinée à  
 5 irradianer une surface sensiblement plane au moins localement de l'objet avec un faisceau de photons X incident (12), le détecteur spectrométrique (11) étant destiné à mesurer un flux de photons X d'un faisceau de photons X rétrodiffusé (13) généré après diffusion du  
 10 faisceau de photons X incident dans un volume d'inspection ( $\delta V$ ) du matériau, le faisceau incident et le faisceau de photons X rétrodiffusé formant un angle de diffusion ( $\theta$ ) dont le sommet est le volume d'inspection, caractérisé en ce qu'il comporte en  
 15 outre :

-des moyens de réglage (101) de la position relative entre la source de photons X, le détecteur spectrométrique et l'objet de manière à placer le volume d'inspection dans au moins deux positions à des  
 20 profondeurs différentes dans le matériau tout en conservant l'angle de diffusion ( $\theta$ ) sensiblement constant,

-des moyens de traitement (102.a) de deux flux du faisceau de photons X rétrodiffusé mesurés par  
 25 le détecteur spectrométrique dans les au moins deux positions et de calcul d'un paramètre  $\beta(E_1, \text{Matériau}, \theta)$  et d'un coefficient combiné d'atténuation  $\mu'_{\text{matériau}}(E_0, E_1, \varepsilon)$  à l'aide de ces deux flux de photons X,

-des moyens d'estimation (102.b) de la  
 30 densité ( $\rho$ ) du matériau à partir du coefficient combiné d'atténuation  $\mu'_{\text{matériau}}(E_0, E_1, \varepsilon)$  moyenné sur une plage

d'énergie des photons X du faisceau de photons X rétrodiffusé donnée,

-des moyens de détermination (102.c) de la nature chimique du matériau à l'aide du paramètre

5  $\beta(E_1, \text{Matériau}, \theta)$ , du coefficient combiné d'atténuation  $\mu_{\text{matériau}}(E_0, E_1, \varepsilon)$  et de la densité.

8. Dispositif d'identification selon la revendication 7, dans lequel les moyens de

10 détermination (102.c) utilisent la variation du rapport  $\beta(E_1, \text{Matériau}, \theta) / (k(E_0, \theta)\rho)$  en fonction de la densité,  $k(E_0, \theta)$  étant un paramètre indépendant du matériau mais dépendant de l'énergie du faisceau de photons X incident, de l'angle de diffusion, et de la position de

15 la source de photons X et du détecteur spectrométrique par rapport au volume inspecté.

9. Dispositif d'identification selon l'une des revendications 7 ou 8, dans lequel l'angle de

20 diffusion est sensiblement constant pour deux mesures successives.

10. Dispositif d'identification selon l'une des revendications 7 à 9, dans lequel les moyens de

25 réglage (101) rapprochent et/ou éloignent l'ensemble source de photons X-détecteur spectrométrique par rapport à l'objet et rapprochent et/ou éloignent la source de photons X du détecteur spectrométrique.

30 11. Dispositif d'identification selon la revendications 10, dans lequel les moyens de réglage

(101) sont pas à pas, lors du rapprochement et/ou de l'éloignement de l'ensemble source de photons X-détecteur spectrométrique par rapport à l'objet, le pas étant plus petit que l'épaisseur d'une couche de  
5 matériau de l'objet de manière à ce que le volume d'inspection puisse prendre au moins deux positions dans la couche de matériau.

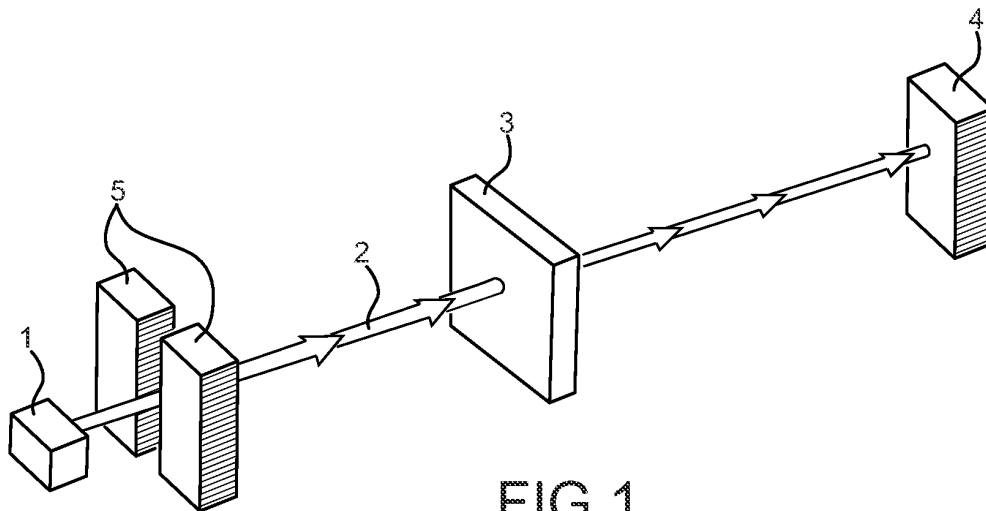


FIG.1

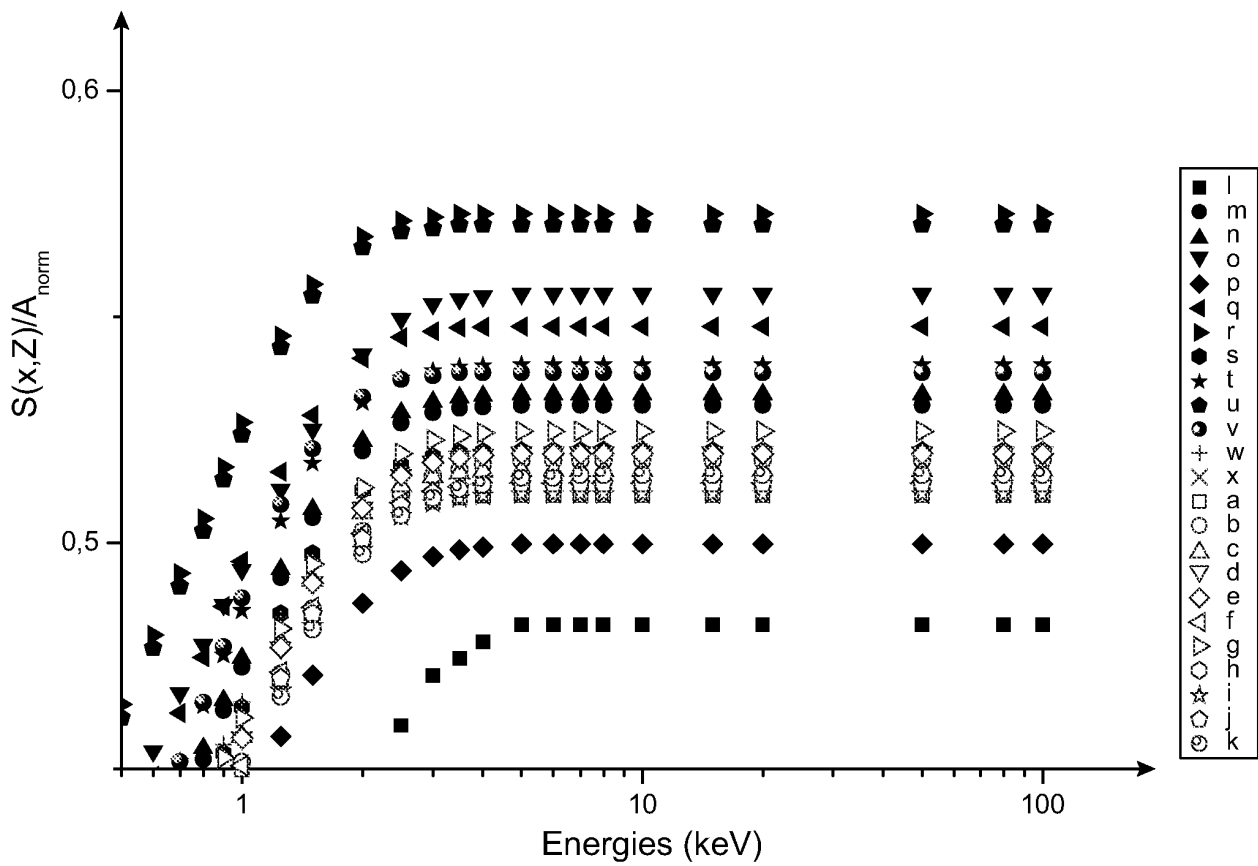


FIG.2

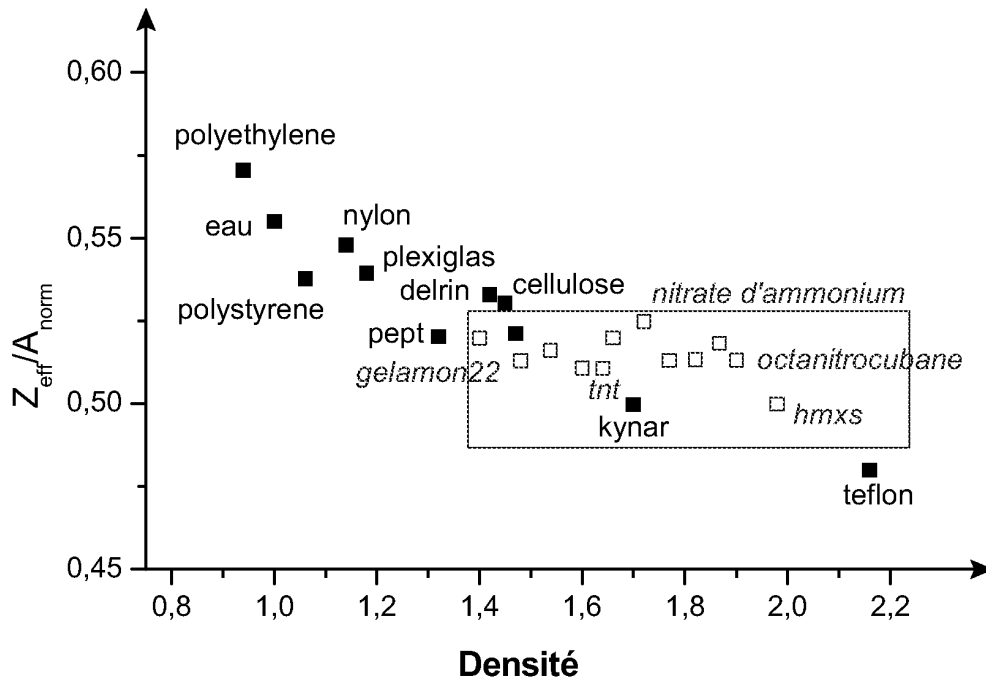


FIG.3

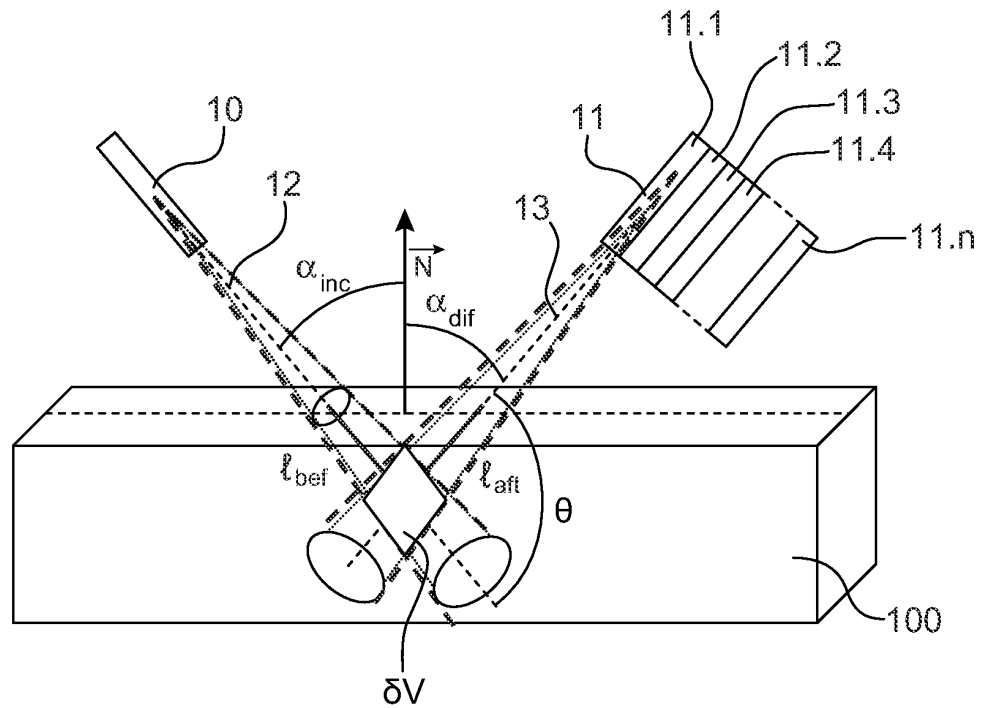


FIG.4

3/8

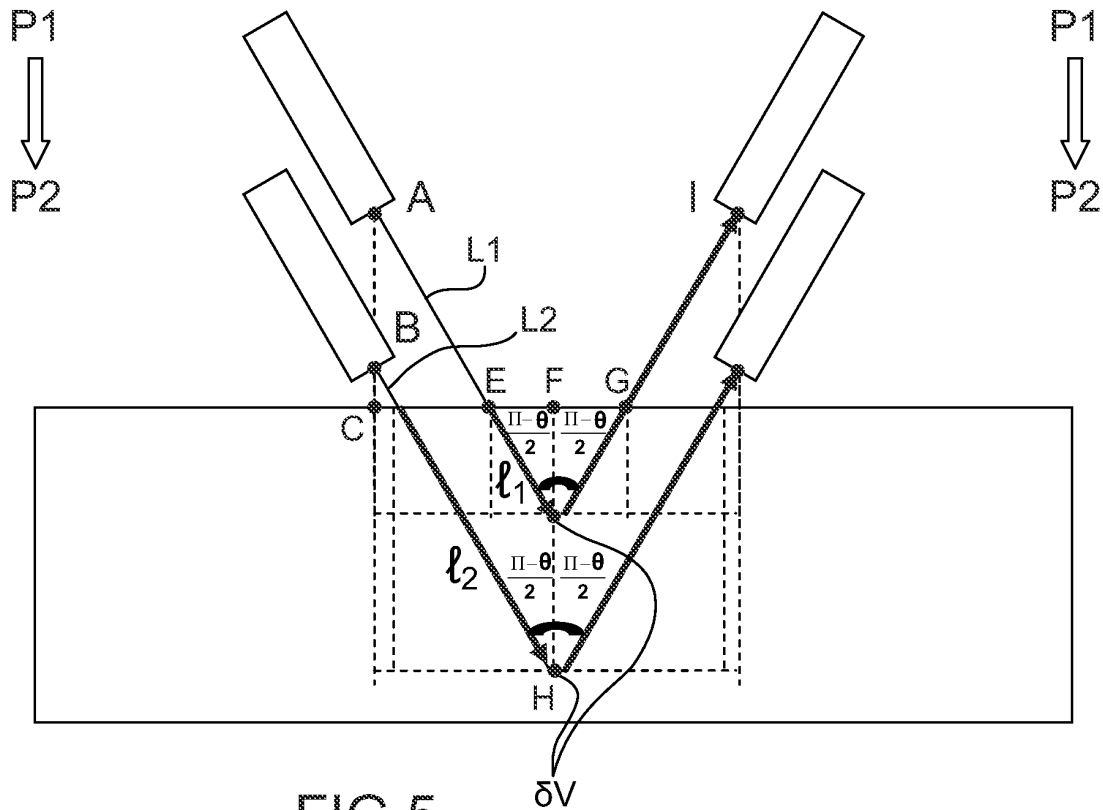


FIG.5

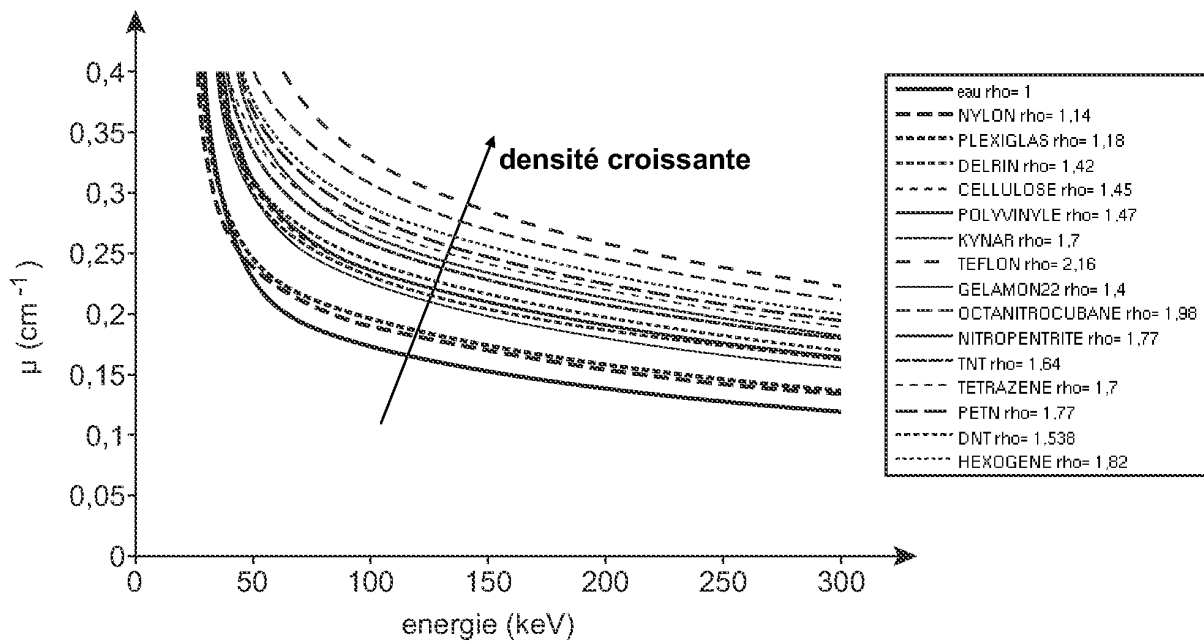
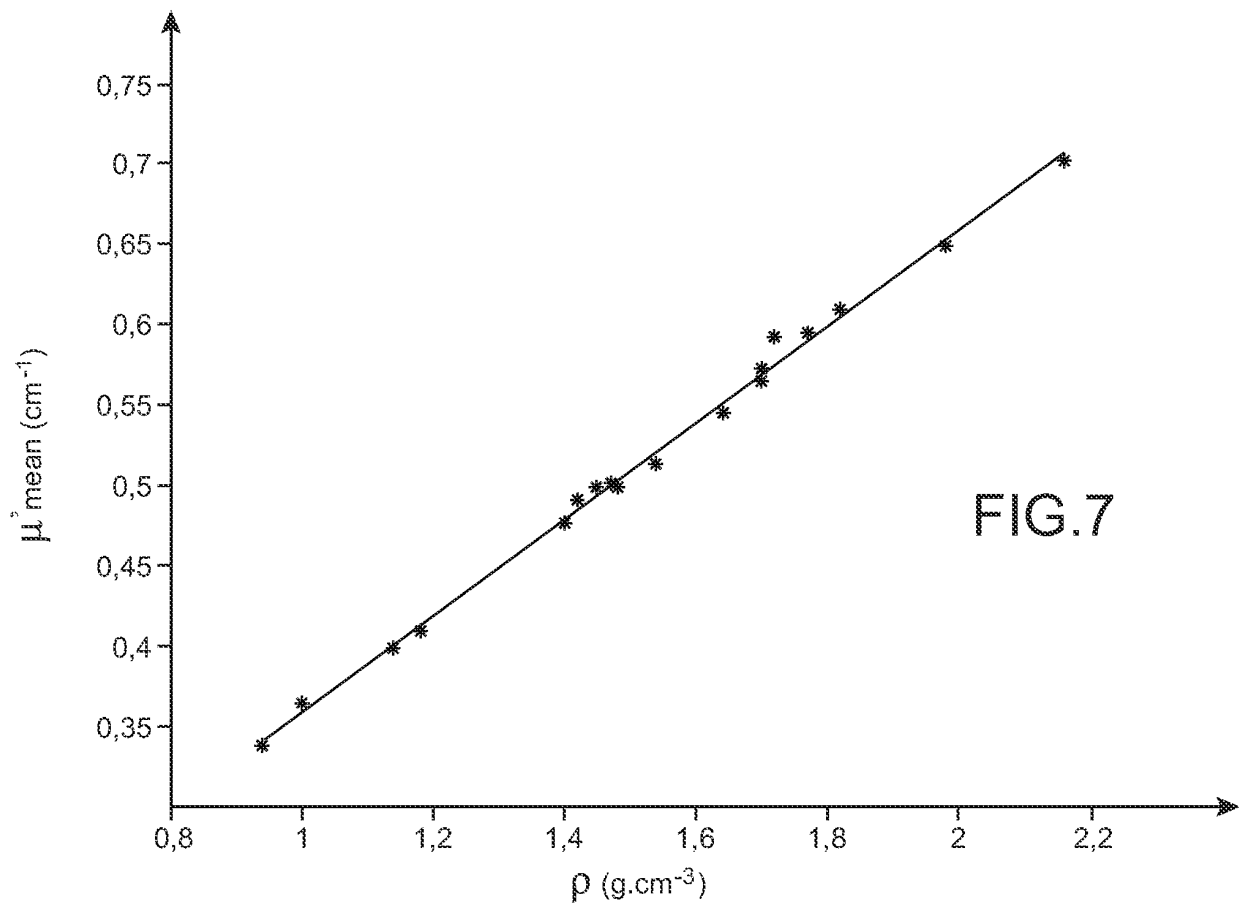
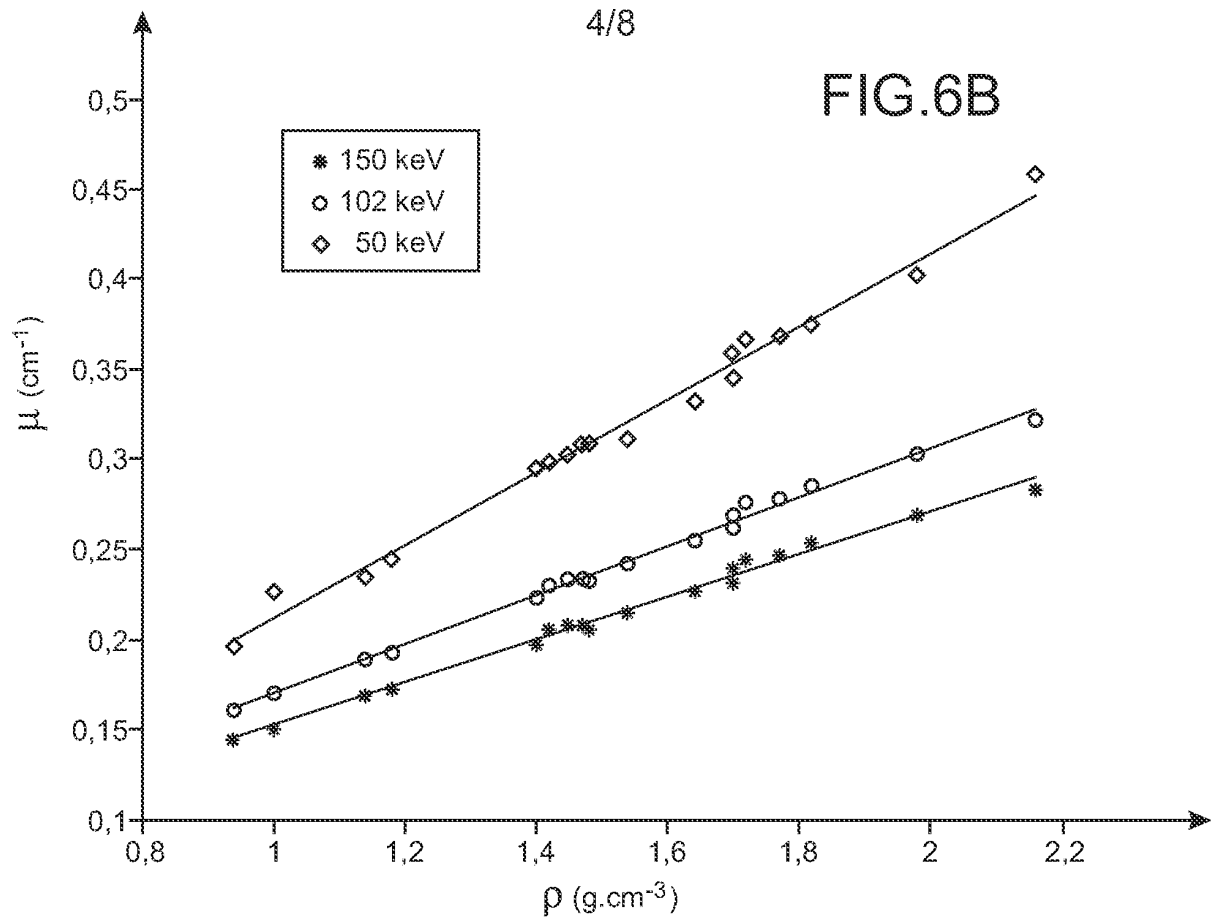


FIG.6A



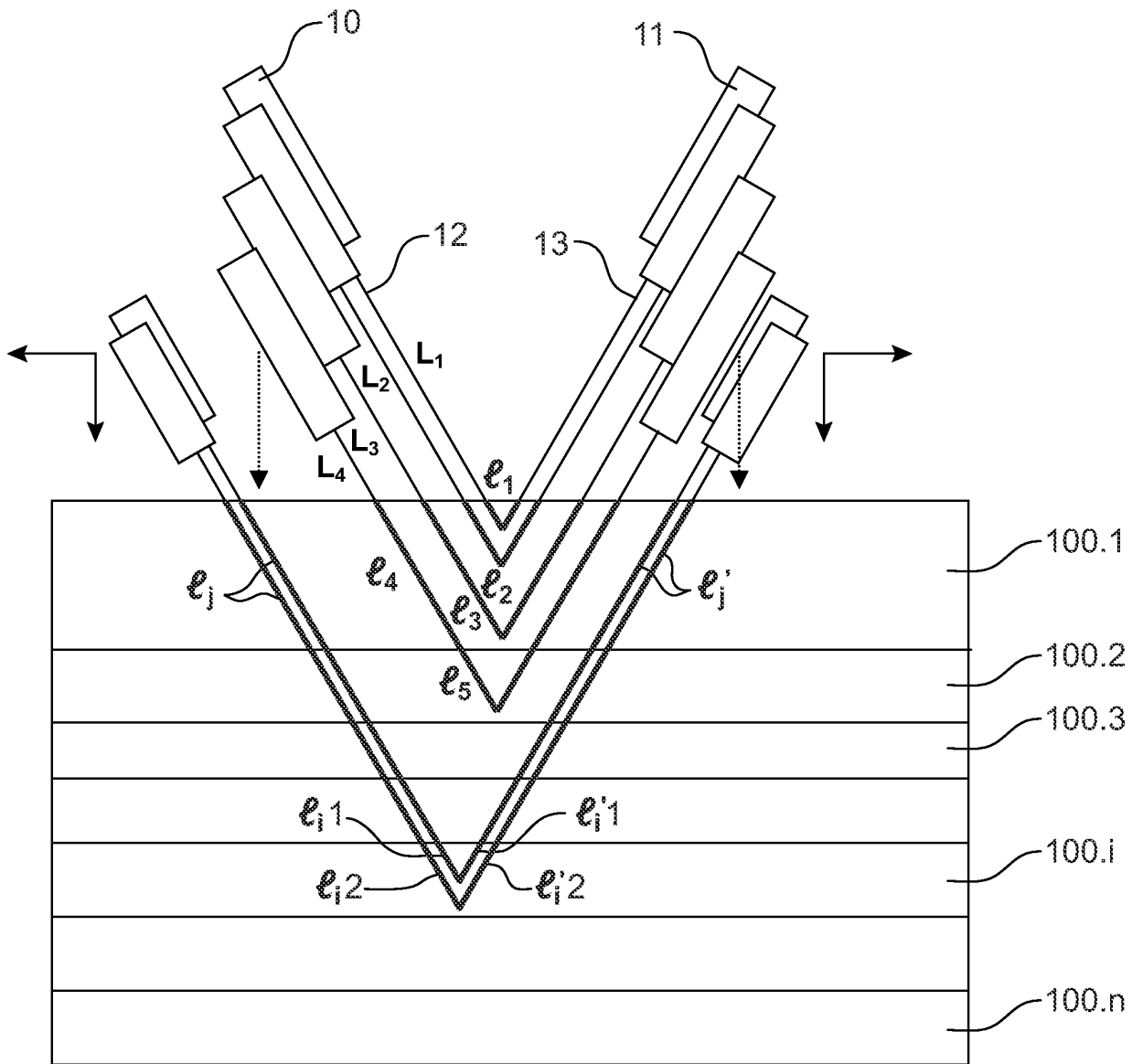


FIG.8

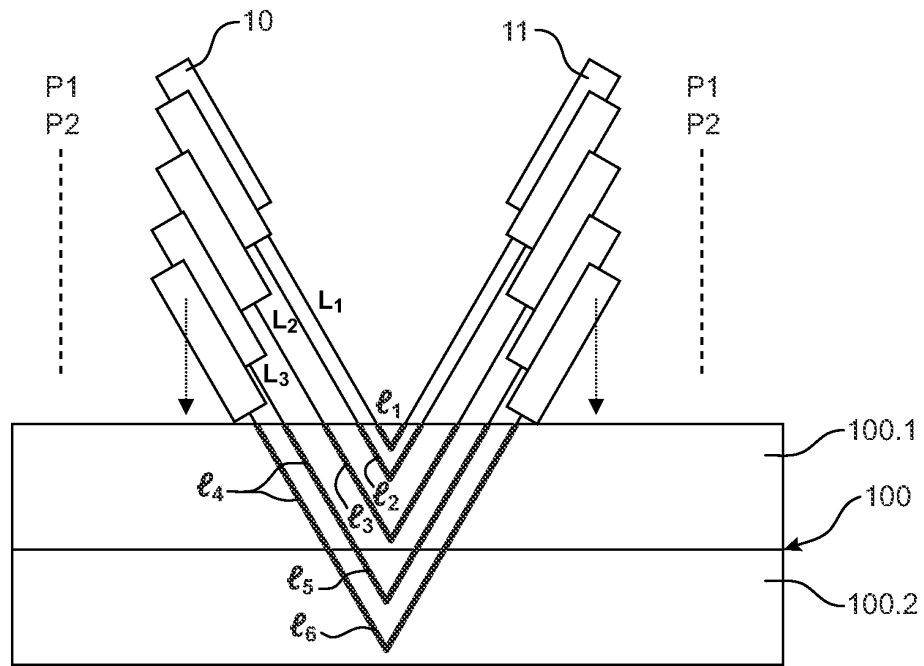


FIG. 9

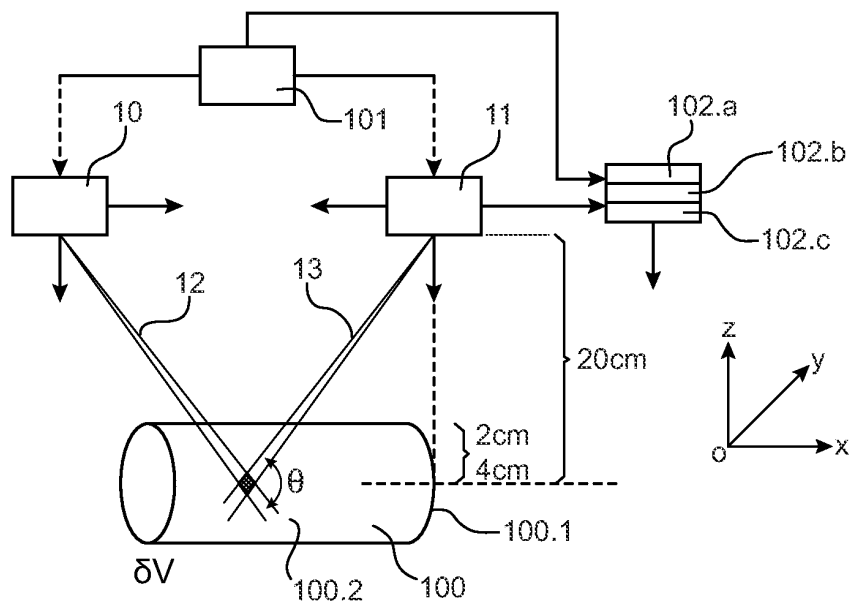


FIG. 10

7/8

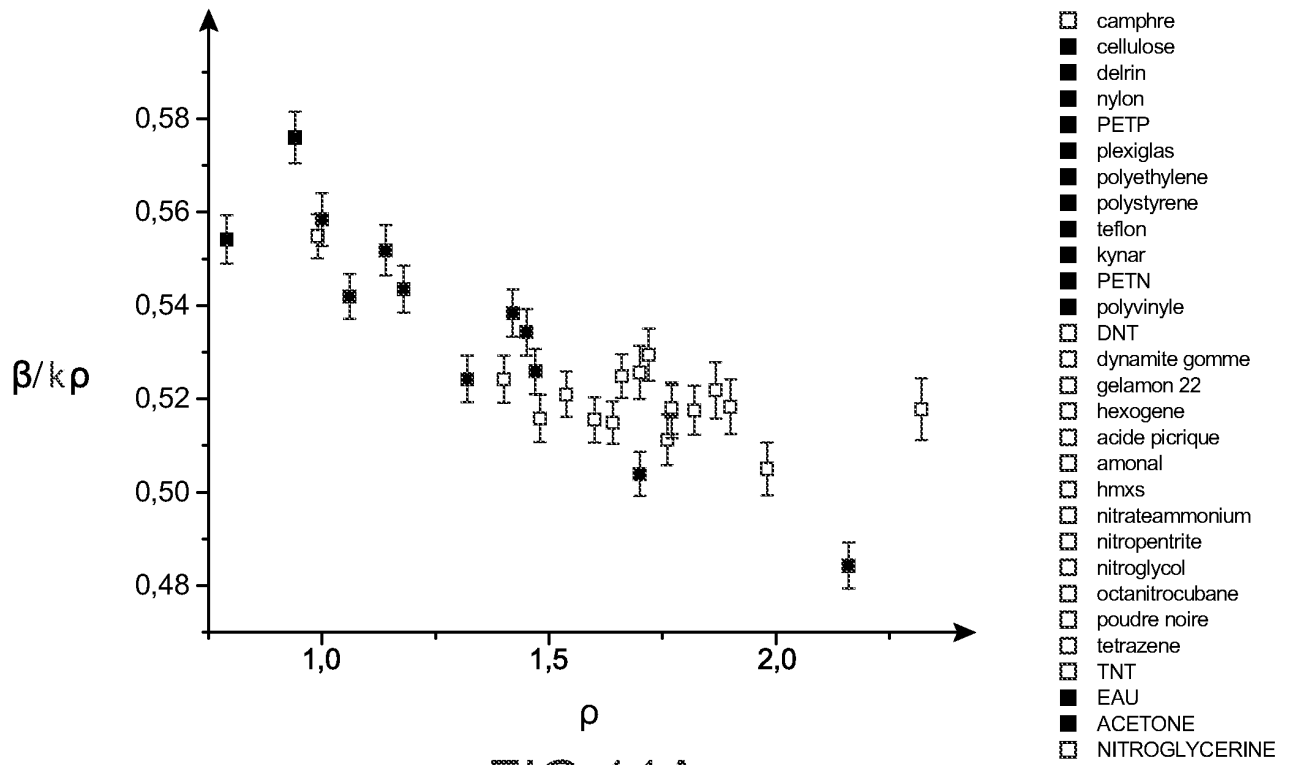


FIG.11A

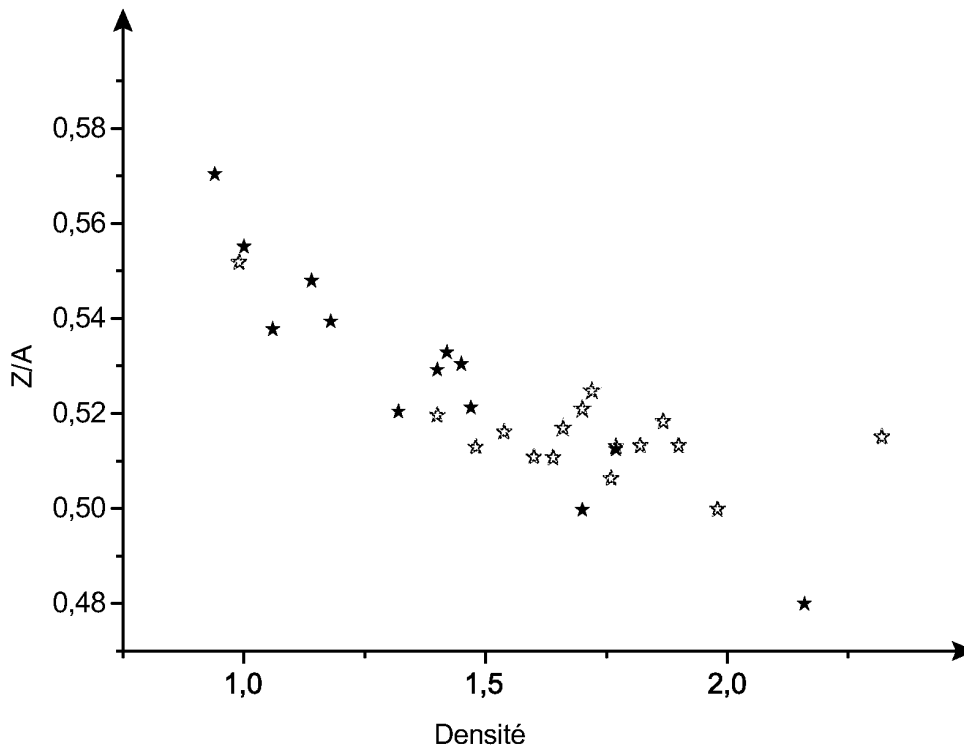


FIG.11B

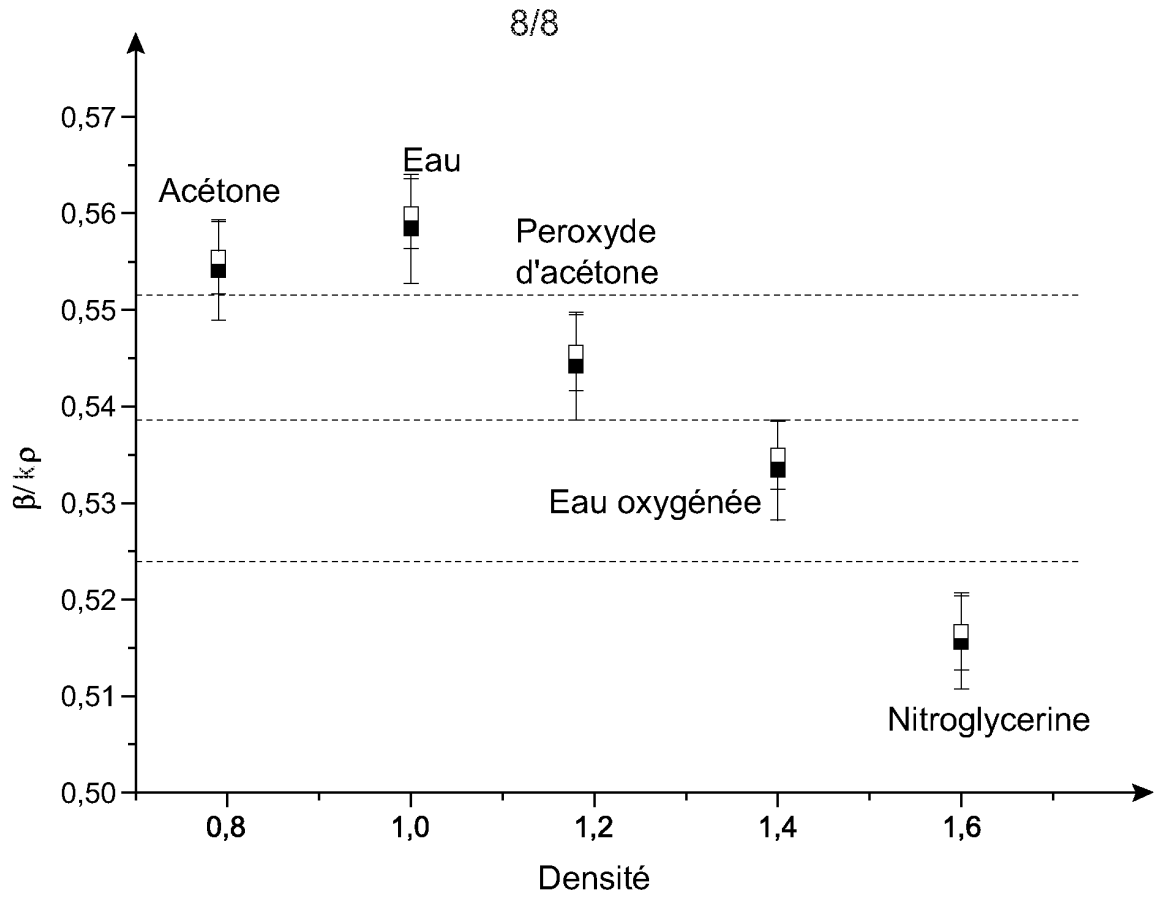


FIG.11C

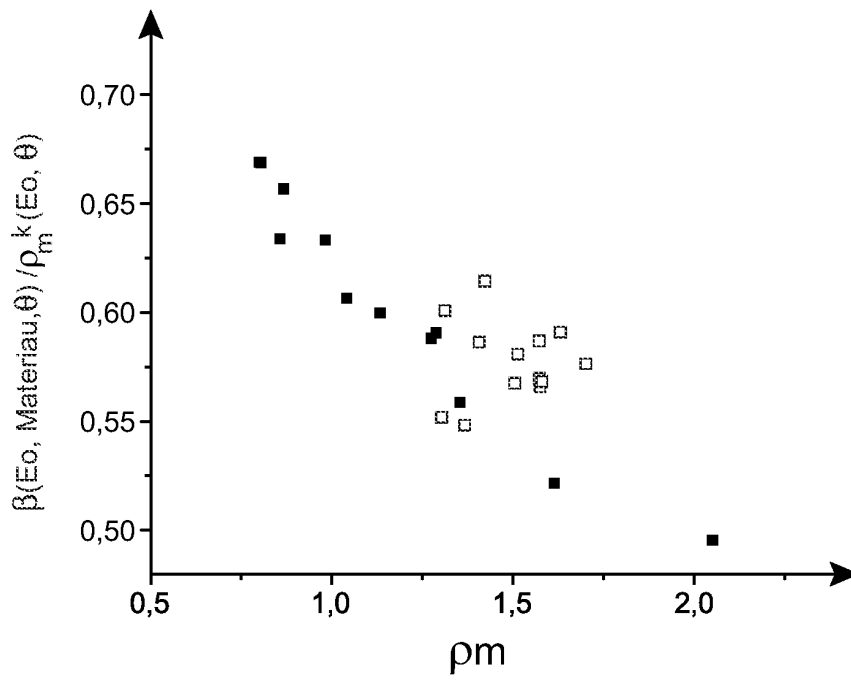


FIG.12



**RAPPORT DE RECHERCHE  
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement  
national

établi sur la base des dernières revendications  
déposées avant le commencement de la recherche

FA 729026  
FR 0955011

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
Y	SHIRO TUZI ET AL: "LOCATING THE POSITIONS OF REINFORCING BARS IN REINFORCED CONCRETE USING BACKSCATTERED GAMMA RAYS" INTERNATIONAL JOURNAL OF RADIATION APPLICATIONS AND INSTRUMENTATION PART A: APPLIED RADIATION AND ISOTOPES, PERGAMON PRESS LTD., EXETER, GB, vol. 41, no. 10 / 11, 1 janvier 1990 (1990-01-01), pages 1013-1018, XP000172902 * le document en entier *	1-11	G01N23/203 G01V5/00
Y	JP 61 193057 A (MITSUBISHI ELECTRIC CORP) 27 août 1986 (1986-08-27) * abrégé; figure 1 *	1-11	
A	US 2005/163282 A1 (ZERLE LUDWIG [DE]) 28 juillet 2005 (2005-07-28) * alinéas [0023], [0024], [0027]; figure 1 *	1-11	
A	RUNKLE R C ET AL: "Photon and neutron interrogation techniques for chemical explosives detection in air cargo: A critical review" NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH, SECTION - A: ACCELERATORS, SPECTROMETERS, DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT, ELSEVIER, AMSTERDAM, NL, vol. 603, no. 3, 21 mai 2009 (2009-05-21), pages 510-528, XP026097560 ISSN: 0168-9002 [extrait le 2009-02-20] * pages 520,521 *	1-11	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) G01N G01V
----- -/--			
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
31 mars 2010		Wulveryck, J	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention	
X : particulièrement pertinent à lui seul		E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure.	
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie		D : cité dans la demande	
A : arrière-plan technologique		L : cité pour d'autres raisons	
O : divulgation non-écrite		-----	
P : document intercalaire		& : membre de la même famille, document correspondant	

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)



**RAPPORT DE RECHERCHE  
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement  
national

établi sur la base des dernières revendications  
déposées avant le commencement de la recherche

FA 729026  
FR 0955011

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A	WO 2007/036359 A1 (KATZ ELISABETH [DE]; KLEIN ALBERT [DE]) 5 avril 2007 (2007-04-05) * page 2, ligne 18-23 * * page 4, ligne 14 - page 5, ligne 2; figure 1 *	1-11	
A	----- US 5 600 700 A (KRUG KRISTOPH D [US] ET AL) 4 février 1997 (1997-02-04) * colonne 4, ligne 33 - colonne 5, ligne 59; figures 1,2 * -----	1-11	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
31 mars 2010		Wulveryck, J	
<p>CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS</p> <p>X : particulièrement pertinent à lui seul                      Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un                      autre document de la même catégorie                      A : arrière-plan technologique                      O : divulgation non-écrite                      P : document intercalaire</p> <p>T : théorie ou principe à la base de l'invention                      E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure                      à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date                      de dépôt ou qu'à une date postérieure.                      D : cité dans la demande                      L : cité pour d'autres raisons                      .....                      &amp; : membre de la même famille, document correspondant</p>			

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE  
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 0955011 FA 729026**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **31-03-2010**

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
JP 61193057 A	27-08-1986	JP 2008305 C	11-01-1996
		JP 7023876 B	15-03-1995
		US 4817122 A	28-03-1989
-----			
US 2005163282 A1	28-07-2005	EP 1526376 A1	27-04-2005
-----			
WO 2007036359 A1	05-04-2007	AU 2006296785 A1	05-04-2007
		DE 102005046878 A1	12-04-2007
		EP 1931976 A1	18-06-2008
		US 2008285714 A1	20-11-2008
-----			
US 5600700 A	04-02-1997	AT 249621 T	15-09-2003
		AU 7372296 A	17-04-1997
		AU 7513196 A	17-04-1997
		DE 69629906 D1	16-10-2003
		DE 69629906 T2	22-07-2004
		EP 0793804 A1	10-09-1997
		ES 2207686 T3	01-06-2004
		WO 9712228 A1	03-04-1997
		WO 9712231 A1	03-04-1997
-----			