

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE

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

3 144 285

21 N° d'enregistrement national : 22 14565

51 Int Cl⁸ : G 01 N 21/47 (2023.01), A 61 B 5/00

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 27.12.22.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la demande : 28.06.24 Bulletin 24/26.

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 :

Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES Etablissement public à caractère industriel et commercial — FR.

72 Inventeur(s) : PLANAT-CHRETIEN Anne.

73 Titulaire(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES Etablissement public à caractère industriel et commercial.

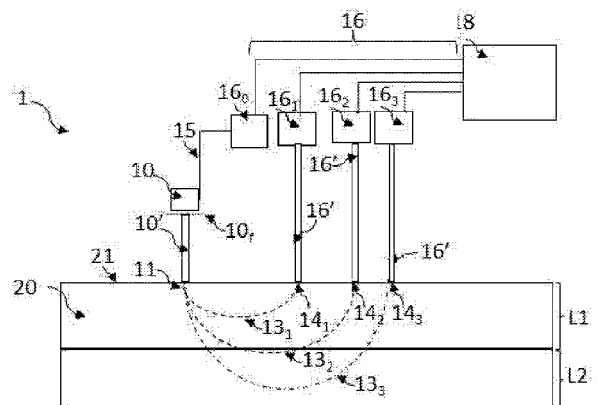
74 Mandataire(s) : INNOV-GROUP.

54 Procédé d'analyse d'un objet comportant plusieurs couches superposées, par mesures de réflectance optique.

57 Procédé de détermination d'une variation de propriétés d'absorption d'un objet (20), entre un premier instant (t1) et un deuxième instant (t2), l'objet comportant une couche superficielle (L1) et une couche profonde (L2), le procédé comportant :

a) illumination de l'objet par une source de lumière (10), émettant un faisceau d'illumination (11) formant une zone (12) à la surface de l'objet ; b) détection de photons rétrodiffusés par l'objet, les photons rétrodiffusés détectés émanant d'une zone de détection (141, 142, 143), la zone de détection étant située à une distance de détection de la zone d'illumination, la distance de détection étant choisie parmi, dans un ordre croissant : une première distance de détection (d1), formant une première zone de détection ; une deuxième distance de détection (d2) formant une deuxième zone de détection ; une troisième distance de détection (d3), formant une troisième zone de détection ;

Figure 1A.



FR 3 144 285 - A1



Description

Titre de l'invention : Procédé d'analyse d'un objet comportant plusieurs couches superposées, par mesures de réflectance optique.

Domaine technique

[0001] Le domaine technique de l'invention concerne l'analyse d'un objet comportant deux couches superposées, par mesures de réflectance optique.

ART ANTERIEUR

[0002] La spectroscopie de réflectance diffuse, usuellement désignée par l'acronyme DRS (Diffuse Reflectance Spectroscopy), est une technique d'analyse non destructive permettant d'estimer des propriétés de propagation de la lumière dans un objet analysé. Cette technique est par exemple décrite dans EP2762064 ou EP3054282 ou EP3054281 ou EP3311138. Elle consiste à illuminer le milieu par un faisceau de lumière incident, et à détecter des photons rétrodiffusés par l'objet analysé, à distance du faisceau incident. Il est fréquent que la détection soit effectuée à différentes longueurs d'onde et ou à plusieurs distances du faisceau incident, de façon à obtenir des propriétés spectrales de propagation de la lumière dans l'objet analysé.

[0003] Les propriétés de propagation de la lumière comprennent généralement des propriétés d'absorption et/ou des propriétés de diffusion de la lumière. Il s'agit notamment de coefficients d'absorption ou de diffusion, ces derniers représentant respectivement des probabilités d'absorption et de diffusion d'un photon par unité de longueur. L'estimation des propriétés de propagation de la lumière, à certaines longueurs d'onde, permet une estimation d'une concentration d'analytes dans l'objet analysé. Ainsi, la DRS peut être utilisée pour estimer les concentrations d'Oxyhémoglobine et déoxyhémoglobine par exemple – permettant le calcul du taux d'oxygénation du tissu et l'estimation de la quantité de hémoglobine totale (oxyhémoglobine + déoxyhémoglobine).

[0004] Une difficulté peut survenir lorsque l'objet analysé n'est pas homogène, et comporte une couche superficielle sous laquelle s'étend une couche profonde. Afin de caractériser correctement la couche profonde, la contribution de la couche superficielle doit être prise en compte sous peine d'induire des erreurs d'estimation des concentrations d'analytes de la couche profonde. C'est d'autant plus vrai lorsque la couche superficielle évolue dans le temps : les changements de la couche superficielle peuvent être attribués à la couche profonde (ou réciproquement), ce qui peut induire de mauvais diagnostics ; lorsqu'il s'agit du compartiment extra-cérébral et cérébral par exemple, un faux négatif en cas d'hypoxie cérébrale peut avoir des conséquences cliniques et de prise en charge dramatiques.

[0005] Dans le cas de l'examen pratiqué sur la tête d'un individu, il est nécessaire de caractériser, de façon indépendante, une couche superficielle, correspondant à un compartiment extra-cérébral (peau, crâne, dure-mère, liquide céphalorachidien), et d'une couche profonde, correspondant au cortex. Une telle caractérisation indépendante permet de distinguer la survenue d'une variation systémique de propriétés optiques, affectant simultanément les deux couches, de la survenue d'une variation cérébrale, affectant uniquement le cortex.

[0006] L'invention décrite ci-après répond à ce problème : il s'agit de séparer les contributions des couches superficielle et profonde de manière à estimer l'évolution des concentrations, en fonction du temps, d'un analyte dans les deux couches, l'analyte pouvant notamment être l'oxyhémoglobine ou la dé-oxyhémoglobine.

Exposé de l'invention

[0007] Un premier objet de l'invention est un procédé de détermination d'une variation de propriétés d'absorption d'un objet, entre un premier instant et un deuxième instant, postérieur au premier instant, l'objet étant délimité par une surface, l'objet comportant une couche superficielle et une couche profonde, la couche superficielle s'étendant entre la surface et la couche profonde, le procédé comportant :

- a) illumination de l'objet par une source de lumière, la source de lumière émettant un faisceau d'illumination formant une zone d'illumination à la surface de l'objet ;
- b) détection de photons rétrodiffusés par l'objet, après s'être propagés dans l'objet, par un photodétecteur, les photons rétrodiffusés détectés émanant d'une zone de détection à la surface de l'objet, la zone de détection étant située à une distance de détection de la zone d'illumination, la distance de détection étant choisie parmi, dans un ordre croissant :
 - une première distance de détection, formant une première zone de détection ;
 - une deuxième distance de détection, formant une deuxième zone de détection ;
 - une troisième distance de détection, formant une troisième zone de détection ;

[0008] la détection des photons générant un signal de détection ;

[0009] le procédé étant caractérisé en ce qu'il comporte, chronologiquement, les étapes suivantes :

- (i) : au premier instant, mise en œuvre des étapes a) et b) en détectant, lors de l'étape b), les photons rétrodiffusés au niveau de la deuxième et de la troisième zones de détection ;

- (ii) : à partir des signaux de détection résultant de (i) :
 - prise en compte d'une propriété optique de diffusion dans l'objet ;
 - estimation d'un coefficient d'absorption de l'objet, la couche superficielle et la couche profonde étant considérées comme ayant le même coefficient d'absorption ;
- (iii) : à partir du coefficient d'absorption résultant de (ii), estimation d'une distance moyenne parcourue par les photons, dans la couche superficielle, entre la zone d'illumination et la première zone de détection ;
- (iv) : au deuxième instant, mise en œuvre des étapes a) et b) en détectant, lors de l'étape b) les photons rétrodiffusés au niveau de la première zone de détection ;
- (v) : à partir du signal de détection résultant de (iv), et de la distance moyenne résultant de (iii), estimation d'une variation du coefficient d'absorption dans la couche superficielle entre le premier instant et le deuxième instant ;
- (vi) : au deuxième instant, mise en œuvre des étapes a) et b) en détectant, lors de l'étape b), les photons rétrodiffusés au niveau de la deuxième et de la troisième zones de détection ;
- (vii) : à partir des signaux de détection résultant de (vi), et de la variation du coefficient d'absorption dans la couche superficielle, résultant de (v), estimation du coefficient d'absorption dans la couche profonde au deuxième instant.

[0010] L'étape (i) peut comporter :

- à partir des signaux de détection mesurés au niveau de la deuxième zone de détection et de la troisième zone de détection, au premier instant, détermination d'une variation spatiale de l'absorbance de l'objet, au premier instant ;
- à partir de la variation spatiale de l'absorbance de l'objet, au premier instant, première estimation du coefficient d'absorption dans la couche superficielle et dans la couche profonde au premier instant ;
- application d'une première fonction de calibration d'absorption à la première estimation du coefficient d'absorption résultant de la sous-étape précédente, de façon à déterminer le coefficient d'absorption, dans la couche superficielle et dans la couche profonde, au premier instant.

[0011] L'étape (vii) peut comporter :

- à partir des signaux de détection mesurés au niveau de la deuxième zone de détection et de la troisième zone de détection, au deuxième instant, détermination d'une variation spatiale de l'absorbance de l'objet, au deuxième instant ;

- à partir de la variation spatiale de l'absorbance de l'objet, au deuxième instant, première estimation du coefficient d'absorption dans la couche profonde au deuxième instant ;
- application d'une deuxième fonction de calibration d'absorption à la première estimation du coefficient d'absorption résultant de la sous-étape précédente, de façon à déterminer le coefficient d'absorption, dans la couche profonde, au deuxième instant, la deuxième fonction de calibration d'absorption prenant en compte la variation du coefficient d'absorption dans la couche superficielle entre le premier instant et le deuxième instant.

[0012] L'étape (vii) peut comporter :

- à partir de la variation du coefficient d'absorption dans la couche superficielle résultant de (v), estimation d'une distance moyenne parcourue par les photons, dans la couche superficielle, entre la zone d'illumination et la première zone de détection, au deuxième instant ;
- calcul d'un ratio entre les distances moyennes parcourues par les photons résultant respectivement de la sous-étape précédente et de l'étape (ii) ;
- utilisation du ratio pour former la deuxième fonction de calibration d'absorption.

[0013] Selon une possibilité,

- le procédé comporte une estimation du coefficient d'absorption, dans la couche superficielle, au deuxième instant ;
- la deuxième fonction de calibration d'absorption est établie à l'aide de modélisations ou de mesures expérimentales effectuées sur des fantômes, chaque fantôme comportant :
 - une couche superficielle, dont le coefficient d'absorption correspond au coefficient d'absorption estimé, dans la couche superficielle, au deuxième instant ;
 - une couche profonde, dont le coefficient d'absorption est variable entre les différents fantômes.

[0014] Selon une possibilité

- la première distance de détection est inférieure à 2 cm ;
- les deuxième et troisième distances de détection sont supérieures à 2 cm.

[0015] Un deuxième objet de l'invention est un dispositif destiné à être appliqué face à une surface d'un objet entre au moins un premier instant et un deuxième instant, le dispositif comportant :

- une source de lumière configurée pour émettre un faisceau d'illumination, formant une zone d'illumination, à la surface de l'objet ;
- un photodétecteur, configuré pour former un signal de détection à partir d'une

- détection de photons rétrodiffusés par l'objet, au niveau ;
- d'une première zone de détection, s'étendant à une première distance de détection de la zone d'illumination ;
 - d'une deuxième zone de détection, s'étendant à une deuxième distance de détection de la zone d'illumination, la deuxième distance de détection étant supérieure à la première distance de détection ;
 - d'une troisième zone de détection, s'étendant à une troisième distance de détection de la zone d'illumination, la troisième distance de détection étant supérieure à la deuxième distance de détection ;
- une unité de traitement, programmée pour mettre en œuvre les étapes (ii), (iii), (v) et (vii) d'un procédé selon le premier objet de l'invention à partir de signaux de détection formés par le photodétecteur :
- lors de l'étape (ii), à partir de photons détectés au niveau des deuxième et troisième zone de détection ;
 - lors l'étape (v), à partir de photons détectés au niveau de la première zone de détection ;
 - lors de l'étape (vii), à partir de photons détectés au niveau des deuxième et troisième zones de détection.

[0016] La première distance de détection peut être inférieure à 2 cm. Les deuxième et troisième distances de détection peuvent être supérieures à 2 cm.

[0017] L'invention sera mieux comprise à la lecture de l'exposé des exemples de réalisation présentés, dans la suite de la description, en lien avec les figures listées ci-dessous.

FIGURES

[0018] La [Fig.1A] schématise un dispositif permettant une mise en œuvre de l'invention.

[0019] La [Fig.1B] montre une zone d'illumination et une zone de détection formées à la surface d'un échantillon.

[0020] La [Fig.2] montre les principales étapes permettant une mise en œuvre de l'invention.

[0021] La [Fig.3] représente un exemple de fonction de calibration d'absorption.

[0022] La [Fig.4] montre un exemple de détermination d'une fonction de correction.

[0023] Les figures 5A à 5D montrent des résultats obtenus, par simulation, en mettant en œuvre l'invention selon une première configuration.

[0024] Les figures 6A à 6D montrent des résultats obtenus, par simulation, en mettant en œuvre l'invention selon une deuxième configuration.

[0025] Les figures 7A à 7D montrent des résultats obtenus, par simulation, en mettant en œuvre l'invention selon une troisième configuration.

EXPOSE DE MODES DE REALISATION PARTICULIERS

[0026] La [Fig.1A] représente un dispositif 1 configuré pour estimer des propriétés optiques

d'absorption dans un objet 20. Dans cet exemple, l'objet est un tissu biologique, par exemple une partie de la tête d'un individu, animal ou être humain.

[0027] Le dispositif comporte une source de lumière 10. La source de lumière est configurée pour émettre un faisceau lumineux 11, se propageant en direction de l'objet 20 à analyser. L'échantillon 20 est délimité par une surface 21. L'intersection du faisceau d'illumination 11 et de la surface 21 de l'échantillon forme une zone d'illumination 12, spatialement délimitée. La zone d'illumination est de préférence ponctuelle : elle est par exemple inscrite dans un cercle de diamètre inférieur à 1mm, voire inférieur à quelques centaines de μm , par exemple 100 μm ou 1 mm. La zone élémentaire d'illumination 12 est représentée sur la [Fig.1B].

[0028] La source de lumière peut être disposée au contact de l'objet 20 ou à distance de ce dernier. La source de lumière peut être un laser, une LED ou OLED (ou tout autre source de photons). Dans l'exemple représenté, la source de lumière est disposée à distance de l'échantillon. Le faisceau lumineux 11 est transporté jusqu'à la surface 21 de l'échantillon par une fibre optique d'illumination 10'. La source de lumière peut être filtrée en longueur d'onde par un filtre 10f.

[0029] Les photons formant le faisceau d'illumination 11 se propagent dans le tissu biologique à analyser. Le tissu biologique 20 est formé d'un milieu diffusant, susceptible d'absorber les photons, les propriétés de propagation des photons dans le milieu dépendant notamment de propriétés d'absorption ou de diffusion dans le milieu. De façon usuelle, les propriétés d'absorption peuvent être quantifiées par un coefficient d'absorption linéaire $\mu_a(\lambda)$. De façon connue, le coefficient d'absorption linéaire quantifie une probabilité d'absorption par le milieu par unité de longueur, à la longueur d'onde λ . Il est usuellement exprimé en cm^{-1} . Les propriétés de diffusion peuvent être quantifiées par un coefficient de diffusion $\mu_s(\lambda)$ ou un coefficient de diffusion réduit $\mu_s'(\lambda)$, qui quantifie une probabilité de diffusion par le milieu par unité de longueur, à la longueur d'onde λ . Il est usuellement exprimé en cm^{-1} .

[0030] Le dispositif comporte au moins trois photodétecteurs élémentaires 16₁, 16₂, 16₃ formant un photodétecteur 16. Les photons détectés par le photodétecteur 16 émanent d'une zone élémentaire de détection 14 à la surface 21 de l'échantillon 20. La zone de détection 14 est de préférence ponctuelle, en étant, à l'instar de la zone d'illumination 12, inscrite dans un diamètre inférieur à 1 mm voire à 250 μm . La zone de détection 14 est séparée de la zone d'illumination 12. La distance entre la zone d'illumination 12 et la zone de détection 14 est une distance détection d. Elle peut être de quelques centimètres ou de l'ordre du centimètre, voire peut être inférieure à 1 cm.

[0031] Chaque photodétecteur peut être un ou plusieurs pixels d'un capteur d'image, un compteur de photons, un photodétecteur organique, une photodiode (ou tout autre

composant permettant la détection de photons)

[0032] Le dispositif est configuré pour former :

- une première zone de détection 14_1 , s'étendant à une première distance de détection $d1$ de la zone d'illumination ;
- une deuxième zone de détection 14_2 , s'étendant à une deuxième distance de détection $d2$ de la zone d'illumination, la deuxième distance de détection étant supérieure à la première distance de détection ;
- une troisième zone de détection 14_3 , s'étendant à une troisième distance de détection $d3$ de la zone d'illumination, la troisième distance de détection étant supérieure à la deuxième distance de détection.

[0033] Selon une possibilité, le nombre de zones de détection peut être supérieur à 3, en particulier lorsque le nombre de couches à caractériser est supérieur à 2.

[0034] Dans le cas d'une étude sur tête d'un fœtus ou d'un enfant, la première distance $d1$ peut être inférieure à 1 cm. Les deuxième et troisième distances peuvent être supérieures à 1 cm, par exemple $d2 = 2.25$ cm et $d3 = 2.5$ cm.

[0035] Dans le cas d'une tête d'adulte, la première distance $d1$ peut être de l'ordre de 1 cm. Les deuxième et troisième distances peuvent être supérieures ou égales à 3 cm, par exemple $d2 = 3$ cm et $d3 = 3.5$ cm.

[0036] Le choix des distances $d1$, $d2$ et $d3$ dépend de l'épaisseur de la couche superficielle. La première distance $d1$ est définie de façon que les photons rétrodiffusés dans la première zone de détection aient essentiellement traversé la couche superficielle. Les distances $d2$ et $d3$ sont choisies de façon à ce que la majorité des photons détectés aient traversé la couche profonde. On comprend que ces distances sont définies au cas par cas, selon la géométrie et les propriétés optiques de l'objet à caractériser. Ces distances dépendent donc des propriétés optiques et de l'épaisseur de la couche superficielle.

[0037] Sur la [Fig.1B], les trajets 13_1 , 13_2 et 13_3 correspondent à des trajets moyens parcourus par les photons respectivement détectés au niveau des zones de détection 14_1 , 14_2 , 14_3 .

[0038] Dans le mode de réalisation de l'invention, la source de lumière émet selon une longueur d'onde d'illumination pouvant correspondre à une longueur d'onde d'absorption de la désoxyhémoglobine ($\lambda=750$ nm) et/ou de l'oxyhémoglobine ($\lambda=850$ nm). Cela permet l'estimation de concentrations en désoxyhémoglobine et oxyhémoglobine à partir des coefficients d'absorption mesurés, selon des relations connues de l'homme du métier.

[0039] Le dispositif comporte une unité de traitement 18. L'unité de traitement comporte un microprocesseur programmé pour mettre en œuvre les étapes décrites par la suite, en lien avec la [Fig.2], à partir de signaux de détection détectés par le photodétecteur suite à une illumination de l'objet par la source de lumière.

- [0040] Le dispositif est appliqué contre la surface 21 d'un objet 20, ce dernier comportant une couche superficielle L1 et une couche profonde L2. La couche superficielle est interposée entre la surface de l'objet et la couche profonde. Par couche, on entend une partie macroscopique de l'échantillon dans laquelle les propriétés optiques sont considérées comme homogènes.
- [0041] L'objet 20 peut par exemple être un organe, par exemple une tête. Dans ce cas, la couche superficielle 21 correspond à une couche extra-cérébrale (peau+ graisse + crâne+ dure-mère+ Liquide céphalo rachidien) et la couche profonde correspond à une couche cérébrale (cortex).
- [0042] Il est connu qu'en utilisant des signaux de détection détectés au niveau de différentes zones de détection, on peut estimer les propriétés optiques, en particulier le coefficient d'absorption, d'un objet.
- [0043] Par exemple, la technique de spectroscopie de réflectance diffuse (SRS – Spatially resolved spectroscopy), est une approche « multi distances », qui permet d'estimer un coefficient d'absorption, par exemple pour déterminer un niveau de saturation d'oxygène.
- [0044] D'une façon générale, chaque mesure de réflectance consiste à mesurer le signal rétrodiffusé par le milieu, émanant d'une zone de détection située à une distance de détection de la zone d'illumination. On obtient ainsi un signal de détection $S(d, \lambda, t)$, dépendant du nombre de photons rétrodiffusés à la distance de détection. Le signal de détection est mesuré par le photodétecteur. Il s'agit cependant d'un signal de détection brut, qu'il est préférable de corriger.
- [0045] Une première correction consiste à corriger l'offset (courant d'obscurité) de l'instrument, selon l'expression :
- [0046] $S_c(d, \lambda, t) = S(d, \lambda, t) - S_{offset}(\lambda)$ (1)
- [0047] Où $S_{offset}(\lambda)$ est un signal d'obscurité, détecté alors que la source est éteinte. Cela correspond au bruit de détection associé à la chaîne de mesure.
- [0048] Une deuxième correction consiste à prendre en compte une dérive potentielle de la source de lumière 10, formant la zone d'illumination. Il s'agit de tenir compte d'une variation de la quantité de photons formant le faisceau d'illumination. Pour cela, une fibre de retour d'excitation 15 relie directement la source de lumière à un photodétecteur 16₀. Le photodétecteur est ainsi configuré pour mesurer la quantité de lumière formant le faisceau d'illumination $S_{c,0}(\lambda, t)$
- [0049] La réflectance correspond à un ratio entre $S_c(d, \lambda, t)$ et $S_{c,0}(\lambda, t)$ explicité selon l'expression :
- [0050]
$$R(d, \lambda, t) = \frac{S_c(d, \lambda, t)}{S_{c,0}(\lambda, t)} \quad (2)$$

[0051] L'absorbance de l'objet, à la distance de détection d , est obtenue selon l'expression :

$$[0052] \quad A(d, \lambda, t) = DO = -\log_{10}(R(d, \lambda, t)) \quad (3)$$

[0053] Selon l'approche « multi distances », on dispose de signaux de détection mesurés selon différentes distances de détection, par exemple d et d' . On obtient ainsi autant d'estimations de l'absorbance, à chaque distance de détection. Les coefficients μ_a et μ'_s sont reliés à l'absorbance par la relation :

$$[0054] \quad \mu_a \mu'_s \approx \frac{1}{3} \left(\ln(10) \frac{\partial A}{\partial d} - \frac{2}{d} \right)^2 \quad (4)$$

[0055] avec

$$[0056] \quad \frac{\partial A}{\partial d} \sim \frac{\Delta A}{\Delta d} = \frac{A(d, \lambda, t) - A(d', \lambda, t)}{d - d'} \quad (5)$$

[0057] Si l'un des coefficients est connu, par exemple μ'_s , on peut déduire μ_a de (4) et (5).

[0058] Une telle approche convient lorsque l'objet analysé est considéré comme homogène. Sur un objet non homogène, comportant une couche superficielle et une couche profonde, cette approche peut être appliquée pour déterminer le μ_a de la couche profonde, sous réserve que la couche superficielle soit suffisamment fine, typiquement inférieure à 0.5 cm ou 0.6 cm et les distances d_2 et d_3 suffisamment grandes. Dans ce cas, la variation spatiale de l'absorbance ΔA permet de s'affranchir de la contribution de la couche superficielle, considérée comme identique en d_2 et d_3 . En pratique (exemple de la tête d'enfant/adulte), cette correction ne permet pas de s'affranchir totalement de la contribution de la couche superficielle (voir exemple décrit en lien avec les figures 5A à 5D).

[0059] Selon une autre approche, dite MBL (Beer Lambert modifiée – Modified Beer Lambert), le coefficient d'absorption peut être estimé, à partir d'une absorbance $A(d)$ estimée selon une distance de détection d , par

$$[0060] \quad A(d) = \frac{1}{\ln(10)} (\mu_a d \text{DPF} + G) \quad (6),$$

[0061] où DPF est un chemin moyen parcouru dans l'objet, par les photons formant le signal de détection

[0062] G est une constante dépendant de la diffusion du milieu et de la géométrie du dispositif. La constante G peut être éliminée en déterminant une variation temporelle de l'absorbance $\Delta A(t_1, t_2)$ entre deux instants t_1 et t_2 .

$$[0063] \quad \Delta A(t_1, t_2) = \frac{1}{\ln(10)} d_1 \text{DPF} \Delta \mu_a(L_1, t_1, t_2) \quad (7)$$

[0064] Où $\Delta \mu_a(L_1, t_1, t_2)$ correspond à une variation de $\mu_a(L_1)$ entre les instants t_1 et t_2 dans la couche superficielle L_1 .

[0065] La méthode MBL a déjà été mise en œuvre en combinant une courte distance de détection et une longue distance de détection, de façon à corriger la contribution de la couche superficielle dans l'estimation de l'absorption d'une couche profonde.

Cependant, on a montré que cette méthode présente des limites, en particulier lorsque les variations temporelles du coefficient d'absorption sont de même type dans la couche profonde et dans la couche superficielle. Dans une telle situation, la couche profonde peut être « sur-correctée » par la couche superficielle. De ce fait, une variation de l'absorption dans la couche profonde peut être masquée. Ainsi, en cas de survenue d'une hypoxie dans la couche superficielle et la couche profonde, l'hypoxie de la couche profonde peut être sous-estimée, voire non détectée.

[0066] L'approche MBL associée à la distance courte permet cependant de caractériser la couche superficielle de l'objet.

[0067] La [Fig.2] illustre les principales étapes de l'invention. Le dispositif utilisé permet de combiner les deux approches précédemment décrites (SRS et MBL), par le recours à une première distance de détection faible (i-e généralement < 1 cm) et deux distances de détection plus élevées ($2 \text{ cm} > d_2 > d_3$). Cela permet de combiner la méthode SRS en mettant en œuvre les signaux de détection détectés aux distances de détection d_2 et d_3 , et la MBL, en mettant en œuvre un signal détecté à la distance de détection d_1 .

[0068] Etape 100 : initialisation. Cette étape est effectuée à un premier instant t_1

[0069] Au cours d'une étape 100, on prend en compte une hypothèse selon laquelle l'objet est homogène : la couche superficielle et la couche profonde sont considérées comme présentant les mêmes propriétés optiques de diffusion et d'absorption.

[0070] On prend en compte un coefficient de diffusion réduit μ_s' déterminé a priori. Le document EP3054281 décrit une méthode permettant de déterminer le coefficient de diffusion réduit d'un milieu. Des modèles empiriques analytiques peuvent être utilisés.

[0071] Au cours de cette étape, on effectue une mesure de la réflectance selon deux distances de détection élevées, c'est-à-dire la deuxième distance d_2 et la troisième distance d_3 .

[0072] A partir des signaux détectés $S(d_2, \lambda, t_1)$ et $S(d_3, \lambda, t_1)$, on met en œuvre les expressions (1) à (3) pour obtenir des absorbances $A(d_2, \lambda, t_1)$ et $A(d_3, \lambda, t_1)$.

[0073] $\mu_a(L\tilde{1}, t_1)\mu_s' = \mu_a(L\tilde{2}, t_1)\mu_s' \approx \frac{1}{3} \left(\ln(10) \frac{\partial A}{\partial d} - \frac{2}{d} \right)^2 (10)$, dérivé de (4)

[0074] avec

[0075] $\frac{\partial A}{\partial d} \sim \frac{\Delta A}{\Delta d} = \frac{A(d_3, \lambda, t_1) - A(d_2, \lambda, t_1)}{d_3 - d_2}$ (11), dérivé de (5)

[0076] $\mu_a(L\tilde{1}, t_1)$ est une estimation, au premier ordre, du coefficient d'absorption $\mu_a(L1, t_1)$ de la couche superficielle L1, à l'instant t_1 ;

[0077] $\mu_a(L\tilde{2}, t_1)$ est une estimation, au premier ordre, du coefficient d'absorption $\mu_a(L2, t_1)$ de la couche profonde L2, à l'instant t_1 ;

[0078] Par hypothèse : $\mu_a(L1, t_1) = \mu_a(L2, t_1)$

- [0079] $\mu_a(L\tilde{1}, t1)$ et $\mu_a(L\tilde{2}, t1)$ sont déduits de l'expression (10) sachant que μ'_s est connu.
- [0080] $\mu_a(L1, t1)$ et $\mu_a(L2, t1)$ et se déduisent de $\mu_a(L\tilde{2}, t1)$ et $\mu_a(L\tilde{2}, t1)$ en prenant en compte une première fonction de calibration d'absorption, établie sur la base de modélisations et/ou de fantômes de calibration en prenant en compte des coefficients μ_a et μ'_s connus. La fonction de calibration d'absorption permet de prendre en compte la réponse instrument, en particulier lorsque des fantômes connus sont utilisés, ou si la réponse instrument est prise en compte dans la modélisation.
- [0081] La [Fig.3] illustre un exemple de fonction de calibration d'absorption linéaire, de type :
- [0082] $\mu_a = a_0\tilde{\mu}_a + b_0$ (12).
- [0083] En appliquant cette fonction à $\mu_a(L\tilde{2}, t1)$ (ou à $\mu_a(L\tilde{2}, t1)$), on obtient $\mu_a(L1, t1)$ et $\mu_a(L2, t1)$.
- [0084] Sur la figure 3, l'axe des ordonnées correspond à la vraie valeur μ_a et l'axe des abscisses correspond à la valeur $\tilde{\mu}_a$ résultant de la combinaison des expressions (10) et (11), à partir de signaux de détection mesurés sur fantômes homogènes ou modélisés. Par fantôme homogène, on entend un fantôme dont les propriétés optiques sont homogènes. Les scalaires a_0 et b_0 sont des paramètres de la fonction de calibration d'absorption.
- [0085] Suite à l'étape 100, on dispose d'une estimation du coefficient μ_a de la couche superficielle L1 et de la couche profonde L2 à l'instant t1.
- [0086] Etape 110 : évaluation du chemin moyen des photons dans la couche superficielle, à l'instant t1.
- [0087] Au cours de cette étape, on détermine le chemin moyen parcouru par les photons dans la couche superficielle, entre la zone d'illumination et la zone de détection correspondant à une distance de détection faible, c'est-à-dire la première distance de détection $d1$. La première distance de détection $d1$ est choisie de façon que les photons détectés à cette distance soient essentiellement représentatifs de la couche superficielle. Sur la [Fig.1B], on a représenté le trajet moyen 13_1 des photons détectés à la première distance de détection.
- [0088] Le chemin moyen, noté DPF, acronyme de (Differential Pathlength Factor), parcouru peut être estimé, en première approximation, selon l'expression :
- [0089]
$$D\tilde{P}F(d1, t1) = \frac{1}{2} \left(\frac{3\mu'_s}{\mu_a(L1, t1)} \right)^{1/2} \left(1 - \left(\frac{1}{1+d1(3\mu_a(L1, t1)\mu'_s)^{1/2}} \right) \right) \quad (13)$$
- [0090] L'expression (13) a été décrite dans Scholkmann, F., & Wolf, M. General equation for the differential pathlength factor of the frontal human head depending on wavelength and age, 2013.

[0091] Cependant, l'expression analytique (13) est valable pour des grandes distances de détection, typiquement supérieures à 1 cm ou 2 cm. Or, la première distance de détection est généralement inférieure à 1 cm. Pour des distances de détection inférieures, il est possible d'appliquer un facteur de correction k , de telle sorte que

$$[0092] \quad DPF(d1, t1) = k \times \tilde{DPF}(d1, t1) \quad (14)$$

[0093] La [Fig.4] montre l'évolution du facteur de recalage (axe des ordonnées) en fonction de la distance de détection (axe des abscisses – unité cm). La courbe de la [Fig.4] a été obtenue par simulations.

[0094] Etape 120 : détermination d'une variation du coefficient d'absorption de la couche superficielle à un instant $t2$

[0095] L'étape 120 est mise en œuvre à un deuxième instant $t2$, postérieur à l'instant $t1$. L'instant $t2$ peut être postérieur de quelques minutes ou quelques dizaines de minutes ou quelques heures à l'instant $t1$.

[0096] Au cours de cette étape, en utilisant le $DPF(d1, t1)$ résultant de l'étape 110, on détermine le coefficient d'absorption de la première couche, à l'instant $t2$, selon l'expression :

$$[0097] \quad A(d1, t2) = \frac{1}{\ln(10)} (\mu_a(d1)d1 DPF(d1, t1) + G) \quad (15)$$

[0098] Comme précédemment décrit, en lien avec (6), la constante G peut être éliminée en déterminant une variation de l'absorbance $\Delta A(t1, t2)$ entre les instants $t1$ et $t2$.

$$[0099] \quad \Delta A(t1, t2) = \frac{1}{\ln(10)} d1 DPF \Delta \mu_a(L1, t1, t2) \quad (16)$$

[0100] Où $\Delta \mu_a(L1, t1, t2)$ correspond à une variation de $\mu_a(L1)$ entre les instants $t1$ et $t2$ dans la couche superficielle L1.

[0101] La mise en œuvre des expressions (15) et (16) suppose que la variation du DPF soit considérée comme négligeable entre les instants $t1$ et $t2$.

[0102] Etape 130 mise à jour du coefficient d'absorption de la couche profonde à l'instant $t2$.

[0103] Cette étape vise à tenir compte de la variation du coefficient d'absorption, dans la couche superficielle, pour estimer le coefficient d'absorption dans la couche profonde à l'instant $t2$.

[0104] De même que dans l'étape 100, on effectue une mesure de la réflectance au niveau des distances de rétrodiffusion $d2$ et $d3$.

[0105] Ainsi,

$$[0106] \quad \mu_a(\tilde{L2}, t2) \mu'_s \approx \frac{1}{3} \left(\ln(10) \frac{\partial A}{\partial d} - \frac{2}{d} \right)^2 \quad (17)$$

[0107] avec

$$[0108] \quad \frac{\partial A}{\partial d} \sim \frac{\Delta A}{\Delta d} = \frac{A(d3, t2) - A(d2, t2)}{d3 - d2} \quad (18)$$

[0109] L'expression (17) permet d'obtenir $\mu_a(L\tilde{2}, t2)$, qui est une estimation au premier ordre du coefficient d'absorption $\mu_a(L2, t2)$ dans la couche profonde $L2$ à l'instant $t2$.

[0110] Selon la même approche que décrite dans l'étape 110, le recours à une fonction de calibration d'absorption, dite deuxième fonction de calibration d'absorption, prenant en compte la réponse instrument, est nécessaire de façon à déterminer $\mu_a(L2, t2)$. Un aspect important de l'invention est de prendre en compte que l'absorption dans la couche superficielle qui peut être différente de l'absorption dans la couche profonde (modèle bi-couche) pour établir la deuxième fonction de calibration d'absorption.

[0111] A l'instant $t1$, la fonction de calibration est linéaire, de type

$$[0112] \quad \mu_a(L2, t1) = fa_0\mu_a(L\tilde{2}, t1) + c_0 \quad (19) \text{ où } f \text{ et } c_0 \text{ sont des scalaires.}$$

[0113] Les paramètres fa_0 et c_0 sont déterminés sur la base de modélisations et/ou de mesures réalisées sur des fantômes bicouches, comportant une couche superficielle, dont le coefficient d'absorption est $\mu_a(L1, t1)$, et une couche profonde de la même épaisseur que l'objet analysé, et de préférence les mêmes propriétés de diffusion.

[0114] Or, d'après (12),

$$[0115] \quad \mu_a(L2, t1) = a_0\mu_a(L\tilde{2}, t1) + b_0 \quad (20)$$

[0116] En combinant (19) et (20), on obtient :

$$[0117] \quad \mu_a(L2, t1) = fa_0\mu_a(L\tilde{2}, t1) + (1-f)\mu_a(L\tilde{2}, t1) + b_0 \quad (21)$$

[0118] L'expression (21) est une expression analytique, correspondant à une fonction de calibration d'absorption, à l'instant $t1$, permettant de déterminer $\mu_a(L2, t1)$ à partir de $\mu_a(L\tilde{2}, t1)$, selon un modèle bicouche. Si elle est établie à partir d'essais expérimentaux, elle prend en compte la réponse instrument. Sinon, il est préférable d'introduire la réponse instrument dans la modélisation

[0119] A l'instant $t2$, l'expression (21) doit être corrigée, de façon à prendre en compte l'évolution de $\mu_a(L1)$ entre les instants $t1$ et $t2$.

[0120] A l'instant $t2$, la fonction de calibration d'absorption devient :

$$[0121] \quad \mu_a(L2, t2) = gfa_0\mu_a(L\tilde{2}, t2) + (1-f)\mu_a(L\tilde{2}, t2) + b_0 \quad (21)$$

[0122] Avec $g = \frac{D\tilde{P}F(d1,t2)}{D\tilde{P}F(d1,t1)}$, avec

$$[0123] \quad D\tilde{P}F(d1, t1) = \frac{1}{2} \left(\frac{3\mu'_s}{\mu_a(L1, t1)} \right)^{1/2} \left(1 - \left(\frac{1}{1+d1(3\mu_a(L1, t1)\mu'_s)^{1/2}} \right) \right) \quad (22)$$

$$[0124] \quad D\tilde{P}F(d1, t2) = \frac{1}{2} \left(\frac{3\mu'_s}{\mu_a(L1, t2)} \right)^{1/2} \left(1 - \left(\frac{1}{1+d1(3\mu_a(L1, t2)\mu'_s)^{1/2}} \right) \right) \quad (23)$$

[0125] Le terme g traduit la prise en compte de l'évolution de l'absorption dans la couche

superficielle entre les instants t_1 et t_2 .

[0126] Ainsi, à partir de $\mu_a(L_2, t_2)$ résultant de (17), on applique (21), de façon à estimer $\mu_a(L_1, t_2)$, la variation de $\mu_a(L_1)$, entre les instants t_1 et t_2 , dans la couche superficielle L_1 étant prise en compte dans le terme multiplicatif g .

[0127] Selon une autre possibilité, on détermine une fonction de correction, de type :

$$[0128] \quad \mu_a(L_2, t_2) = a'_0 \mu_a(L_2, t_2) + b'_0 \quad (24)$$

[0129] a'_0 et b'_0 étant déterminés à partir de modélisations et de mesures expérimentales sur des fantômes bicouches, le μ_a de la couche profonde étant variable, la couche superficielle ayant un coefficient d'absorption $\mu_a(L_1, t_2)$, tel que :

$$[0130] \quad \mu_a(L_1, t_2) = \mu_a(L_1, t_1) + \Delta\mu_a(L_1, t_1, t_2) \quad (25)$$

Essais expérimentaux.

[0131] On a simulé une mise en œuvre de l'invention dans différentes configurations. Dans les configurations d'essai, on a pris en compte un tissu biologique, comportant une couche superficielle, d'épaisseur 0.5 mm, et une couche profonde et dont le coefficient de diffusion réduit était de 9.35 cm^{-1} à $\lambda = 750 \text{ nm}$ et 7.64 cm^{-1} à $\lambda = 850 \text{ nm}$. On a simulé différents profils temporels du taux d'oxygénation (TOI) de la couche superficielle et de la couche profonde. TOI est un index d'oxygénation des tissus, tel que :

$$[0132] \quad TOI = \frac{[HbO_2]}{[HbO_2] + [Hb]} \times 100 \quad (26)$$

[0133] $[HbO_2]$ correspond à la concentration d'oxyhémoglobine

[0134] $[Hb]$ correspond à la concentration de déoxyhémoglobine.

[0135] L'invention a été mise en œuvre à un premier instant, qui correspond à $t = 0$, puis à différents instants successifs, jusqu'à $t = 60$. L'instant t_1 correspond au premier instant. Les instants t_2 correspondent à chaque instant de mesure jusqu'à $t = 60$. Les mesures simulées ont fait l'objet d'une addition d'un bruit : bruit photonique de type Poisson et bruit instrument de type gaussien.

[0136] L'invention a été mise en œuvre pour évaluer le coefficient d'absorption μ_a , à $\lambda = 750 \text{ nm}$ et à $\lambda = 850 \text{ nm}$, au cours du temps, dans la couche superficielle et dans la couche profonde. A partir de μ_a , dans la couche superficielle et dans la couche profonde, on a estimé $[HbO_2]$ et $[Hb]$ dans chacune de ces couches.

[0137] Selon une première configuration, cf. figures 5A à 5D, l'oxygénation de la couche superficielle varie (cf. [Fig.5A]), tandis que l'oxygénation de la couche profonde est constante (cf. [Fig.5B]). Sur les figures 5A et 5B, l'axe des abscisses correspond au temps (unité arbitraire) et l'axe des ordonnées correspond au taux d'oxygénation défini dans (26).

[0138] La [Fig.5C] montre :

– le profil réel de $[HbO_2]$ dans la couche profonde: cf. courbe O1

- les estimations de $[HbO_2]$ dans la couche profonde sans prise en compte de la variation de μ_a dans la couche superficielle par SRS: cf. courbe O2
- les estimations de $[HbO_2]$ dans la couche profonde en mettant en œuvre l'invention : cf. courbe O3
- le profil réel de $[Hb]$ dans la couche profonde: cf. courbe D1
- les estimations de $[Hb]$ dans la couche profonde sans prise en compte de la variation de μ_a dans la couche superficielle (méthode SRS dans cet exemple) : cf. courbe D2
- les estimations de $[Hb]$ dans la couche profonde en mettant en œuvre l'invention : cf. courbe D3.

[0139] On observe que les courbes D3 et O3 sont plus proches des valeurs réelles D1 et O1.

[0140] La [Fig.5D] montre :

- la variation réelle $[HbO_2]$ dans la couche profonde: cf. courbe $\Delta O1$
- les estimations de la variation de $[HbO_2]$ dans la couche profonde sans prise en compte de la variation de μ_a dans la couche superficielle : cf. courbe $\Delta O2$
- les estimations de la variation de $[HbO_2]$ dans la couche profonde en mettant en œuvre l'invention : cf. courbe $\Delta O3$
- la variation réelle de $[Hb]$ dans la couche profonde: cf. courbe $\Delta D1$
- les estimations de la variation de $[Hb]$ dans la couche profonde sans prise en compte de la variation de μ_a dans la couche superficielle : cf. courbe $\Delta D2$
- les estimations de la variation de $[Hb]$ dans la couche profonde en mettant en œuvre l'invention : cf. courbe $\Delta D3$.

[0141] On observe que les courbes $\Delta D3$ et $\Delta O3$ sont plus proches des valeurs réelles $\Delta D1$ et $\Delta O1$.

[0142] Selon une deuxième configuration, cf. figures 6A à 6D, l'oxygénation de la couche superficielle est stable (cf. [Fig.6A]), tandis que l'oxygénation de la couche profonde varie (cf. [Fig.6B]). Sur les figures 6A et 6B, l'axe des abscisses correspond au temps (unité arbitraire) et l'axe des ordonnées correspond au taux d'oxygénation défini dans (26).

[0143] La [Fig.6C] montre :

- le profil réel de $[HbO_2]$ dans la couche profonde: cf. courbe O1
- les estimations de $[HbO_2]$ dans la couche profonde sans prise en compte de la variation de μ_a dans la couche superficielle : cf. courbe O2
- les estimations de $[HbO_2]$ dans la couche profonde en mettant en œuvre l'invention : cf. courbe O3
- le profil réel de $[Hb]$ dans la couche profonde: cf. courbe D1
- les estimations de $[Hb]$ dans la couche profonde sans prise en compte de la variation de μ_a dans la couche superficielle : cf. courbe D2

- les estimations de $[Hb]$ dans la couche profonde en mettant en œuvre l'invention : cf. courbe D3.
- [0144] Sur la [Fig.6C], l'axe des abscisses correspond au temps (unité arbitraire) et l'axe des ordonnées correspond aux concentrations estimées.
- [0145] On observe que les courbes D3 et O3 sont plus proches des valeurs réelles D1 et O1. Cela est dû au fait que l'invention permet une meilleure maîtrise de la concentration de Hb ou HbO2 dans la couche superficielle. Plus précisément, l'invention permet de prendre en compte la stabilité de l'absorption de la couche superficielle. Dans la méthode selon l'art antérieur, la variation de l'absorption dans la couche profonde est répartie à la fois dans la couche profonde et dans la couche superficielle.
- [0146] La [Fig.6D] montre :
- la variation réelle $[HbO2]$ dans la couche profonde: cf. courbe $\Delta O1$
 - les estimations de la variation de $[HbO2]$ dans la couche profonde sans prise en compte de la variation de μ_a dans la couche superficielle : cf. courbe $\Delta O2$
 - les estimations de la variation de $[HbO2]$ dans la couche profonde en mettant en œuvre l'invention : cf. courbe $\Delta O3$
 - la variation réelle de $[Hb]$ dans la couche profonde: cf. courbe $\Delta D1$
 - les estimations de la variation de $[Hb]$ dans la couche profonde sans prise en compte de la variation de μ_a dans la couche superficielle : cf. courbe $\Delta D2$
 - les estimations de la variation de $[Hb]$ dans la couche profonde en mettant en œuvre l'invention : cf. courbe $\Delta D3$.
- [0147] Sur la [Fig.6D], l'axe des abscisses correspond au temps (unité arbitraire) et l'axe des ordonnées correspond aux variations de concentrations estimées.
- [0148] On observe que les courbes $\Delta D3$ et $\Delta O3$ sont plus proches des valeurs réelles $\Delta D1$ et $\Delta O1$.
- [0149] Selon une troisième configuration, cf. figures 7A à 7D, l'oxygénation de la couche superficielle et l'oxygénation de la couche profonde varient (cf. figures 7A et 7B). Sur les figures 7A et 7B, l'axe des abscisses correspond au temps (unité arbitraire) et l'axe des ordonnées correspond au taux d'oxygénation défini dans (26).
- [0150] La [Fig.7C] montre :
- le profil réel de $[HbO2]$ dans la couche profonde: cf. courbe O1
 - les estimations de $[HbO2]$ dans la couche profonde sans prise en compte de la variation de μ_a dans la couche superficielle : cf. courbe O2
 - les estimations de $[HbO2]$ dans la couche profonde en mettant en œuvre l'invention : cf. courbe O3
 - le profil réel de $[Hb]$ dans la couche profonde: cf. courbe D1
 - les estimations de $[Hb]$ dans la couche profonde sans prise en compte de la variation de μ_a dans la couche superficielle : cf. courbe D2

- les estimations de $[Hb]$ dans la couche profonde en mettant en œuvre l'invention : cf. courbe D3.

[0151] Sur la [Fig.7C], l'axe des abscisses correspond au temps (unité arbitraire) et l'axe des ordonnées correspond aux concentrations estimées.

[0152] On observe que les courbes D3 et O3 sont plus proches des valeurs réelles D1 et O1.

[0153] La [Fig.7D] montre :

- la variation réelle $[HbO_2]$ dans la couche profonde: cf. courbe $\Delta O1$
- les estimations de la variation de $[HbO_2]$ dans la couche profonde sans prise en compte de la variation de μ_a dans la couche superficielle : cf. courbe $\Delta O2$
- les estimations de la variation de $[HbO_2]$ dans la couche profonde en mettant en œuvre l'invention : cf. courbe $\Delta O3$
- la variation réelle de $[Hb]$ dans la couche profonde: cf. courbe $\Delta D1$
- les estimations de la variation de $[Hb]$ dans la couche profonde sans prise en compte de la variation de μ_a dans la couche superficielle : cf. courbe $\Delta D2$
- les estimations de la variation de $[Hb]$ dans la couche profonde en mettant en œuvre l'invention : cf. courbe $\Delta D3$.

[0154] Sur la [Fig.7D], l'axe des abscisses correspond au temps (unité arbitraire) et l'axe des ordonnées correspond aux variations de concentrations estimées.

[0155] On observe que les courbes $\Delta D3$ et $\Delta O3$ sont plus proches des valeurs réelles $\Delta D1$ et $\Delta O1$.

Revendications

[Revendication 1]

Procédé de détermination d'une variation de propriétés d'absorption d'un objet (20), entre un premier instant (t_1) et un deuxième instant (t_2), postérieur au premier instant, l'objet étant délimité par une surface (21), l'objet comportant une couche superficielle (L1) et une couche profonde (L2), la couche superficielle s'étendant entre la surface et la couche profonde, le procédé comportant :

- a) illumination de l'objet par une source de lumière (10), la source de lumière émettant un faisceau d'illumination (11) formant une zone (12) à la surface de l'objet ;
- b) détection de photons rétrodiffusés par l'objet, après s'être propagés dans l'objet, par un photodétecteur (16), les photons rétrodiffusés détectés émanant d'une zone de détection (14_1 , 14_2 , 14_3) à la surface de l'objet, la zone de détection étant située à une distance de détection de la zone d'illumination, la distance de détection étant choisie parmi, dans un ordre croissant :
 - une première distance de détection (d_1), formant une première zone de détection ;
 - une deuxième distance de détection (d_2) formant une deuxième zone de détection ;
 - une troisième distance de détection (d_3), formant une troisième zone de détection ;

la détection des photons générant un signal de détection ;

le procédé étant caractérisé en ce qu'il comporte, chronologiquement, les étapes suivantes :

- (i) : au premier instant, mise en œuvre des étapes a) et b) en détectant les photons rétrodiffusés au niveau de la deuxième et de la troisième zones de détection ;
- (ii) : à partir des signaux de détection résultant de (i) :
 - prise en compte d'une propriété optique de diffusion dans l'objet ;
 - estimation d'un coefficient d'absorption de l'objet, la couche superficielle et la couche profonde étant considérées comme ayant le même coefficient

d'absorption ($\mu_a(L1, t1), \mu_a(L2, t1)$);

- (iii) : à partir du coefficient d'absorption résultant de (ii), estimation d'une distance moyenne parcourue par les photons ($DPF(d1, t1)$), dans la couche superficielle, entre la zone d'illumination et la première zone de détection;
- (iv) : au deuxième instant, mise en œuvre des étapes a) et b) en détectant les photons rétrodiffusés au niveau de la première zone de détection ;
- (v) : à partir du signal de détection résultant de (iv), et de la distance moyenne résultant de (iii), estimation d'une variation du coefficient d'absorption ($\Delta\mu_a(L1, t1, t2)$) dans la couche superficielle entre le premier instant et le deuxième instant ;
- (vi) : au deuxième instant, mise en œuvre des étapes a) et b) en détectant, lors de l'étape b), les photons rétrodiffusés au niveau de la deuxième et de la troisième zones de détection ;
- (vii) : à partir des signaux de détection résultant de (vi), et de la variation du coefficient d'absorption dans la couche superficielle, résultant de (v), estimation du coefficient d'absorption dans la couche profonde au deuxième instant ($\mu_a(L2, t2)$).

[Revendication 2]

Procédé selon la revendication 1, dans lequel l'étape (i) comporte :

- à partir des signaux de détection mesurés au niveau de la deuxième zone de détection et de la troisième zone de détection, au premier instant, détermination d'une variation spatiale de l'absorbance de l'objet (ΔA) au premier instant ($t1$);
- à partir de la variation spatiale de l'absorbance de l'objet, au premier instant, première estimation du coefficient d'absorption dans la couche superficielle ($\mu_a(\tilde{L1}, t1)$) et dans la couche profonde $\mu_a(\tilde{L2}, t1)$ au premier instant ;
- application d'une première fonction de calibration d'absorption à la première estimation du coefficient d'absorption résultant de la sous-étape précédente, de façon à déterminer le coefficient d'absorption ($\mu_a(L1, t1), \mu_a(L2, t1)$), dans la couche superficielle et dans la couche profonde, au premier instant.

- [Revendication 3] Procédé selon la revendication 2, dans l'étape (vii) comporte :
- à partir des signaux de détection mesurés au niveau de la deuxième zone de détection et de la troisième zone de détection, au deuxième instant, détermination d'une variation spatiale de l'absorbance de l'objet (ΔA), au deuxième instant (t_2);
 - à partir de la variation spatiale de l'absorbance de l'objet, au deuxième instant, première estimation du coefficient d'absorption dans la couche profonde au deuxième instant ($\mu_a(L_2, t_2)$);
 - application d'une deuxième fonction de calibration d'absorption à la première estimation du coefficient d'absorption résultant de la sous-étape précédente, de façon à déterminer le coefficient d'absorption, dans la couche profonde, au deuxième instant ($\mu_a(L_2, t_2)$), la deuxième fonction de calibration d'absorption prenant en compte la variation du coefficient d'absorption dans la couche superficielle entre le premier instant et le deuxième instant.

- [Revendication 4] Procédé selon la revendication 3, dans lequel l'étape (vii) comporte :
- à partir de la variation du coefficient d'absorption dans la couche superficielle résultant de (v), estimation d'une distance moyenne parcourue par les photons, dans la couche superficielle, entre la zone d'illumination et la première zone de détection, au deuxième instant ;
 - calcul d'un ratio (\mathcal{R}) entre les distances moyennes parcourues par les photons résultant respectivement de la sous-étape précédente et de l'étape (ii) ;
 - utilisation du ratio pour former la deuxième fonction de calibration d'absorption.

- [Revendication 5] Procédé selon la revendication 3 dans lequel
- le procédé comporte une estimation du coefficient d'absorption, dans la couche superficielle, au deuxième

instant ;

- la deuxième fonction de calibration d'absorption est établie à l'aide de modélisations ou de mesures expérimentales effectuées sur des fantômes, chaque fantôme comportant :
 - une couche superficielle, dont le coefficient d'absorption correspond au coefficient d'absorption estimé, dans la couche superficielle, au deuxième instant ;
 - une couche profonde, dont le coefficient d'absorption est variable entre les différents fantômes.

[Revendication 6] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel

- la première distance de détection est inférieure à 2 cm ;
- les deuxième et troisième distances de détection sont supérieures à 2 cm.

[Revendication 7] Dispositif (1) destiné à être appliqué face à une surface d'un objet entre au moins un premier instant et un deuxième instant, le dispositif comportant :

- une source de lumière (10) configurée pour émettre un faisceau d'illumination (11), formant une zone d'illumination (12), à la surface de l'objet ;
- un photodétecteur, configuré pour former un signal de détection à partir d'une détection de photons rétrodiffusés par l'objet, au niveau ;
 - d'une première zone de détection (14₁), s'étendant à une première distance de détection (d1) de la zone d'illumination ;
 - d'une deuxième zone de détection (14₂), s'étendant à une deuxième distance de détection (d2) de la zone d'illumination, la deuxième distance de détection étant supérieure à la première distance de détection ;
 - d'une troisième zone de détection (14₃), s'étendant à une troisième distance (d3) de détection de la zone d'illumination, la troisième distance de détection

- étant supérieure à la deuxième distance de détection ;
- une unité de traitement (18), programmée pour mettre en œuvre les étapes (ii), (iii), (v) et (vii) d'un procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes à partir de signaux de détection formés par le photodétecteur :
 - lors de l'étape (ii), à partir de photons détectés au niveau des deuxième et troisième zone de détection ;
 - lors l'étape (v), à partir de photons détectés au niveau de la première zone de détection ;
 - lors de l'étape (vii), à partir de photons détectés au niveau des deuxième et troisième zones de détection.

[Revendication 8] Dispositif selon la revendication 7, dans lequel

- la première distance de détection est inférieure à 2 cm ;
- les deuxième et troisième distances de détection sont supérieures à 2 cm.

[Fig. 1A]

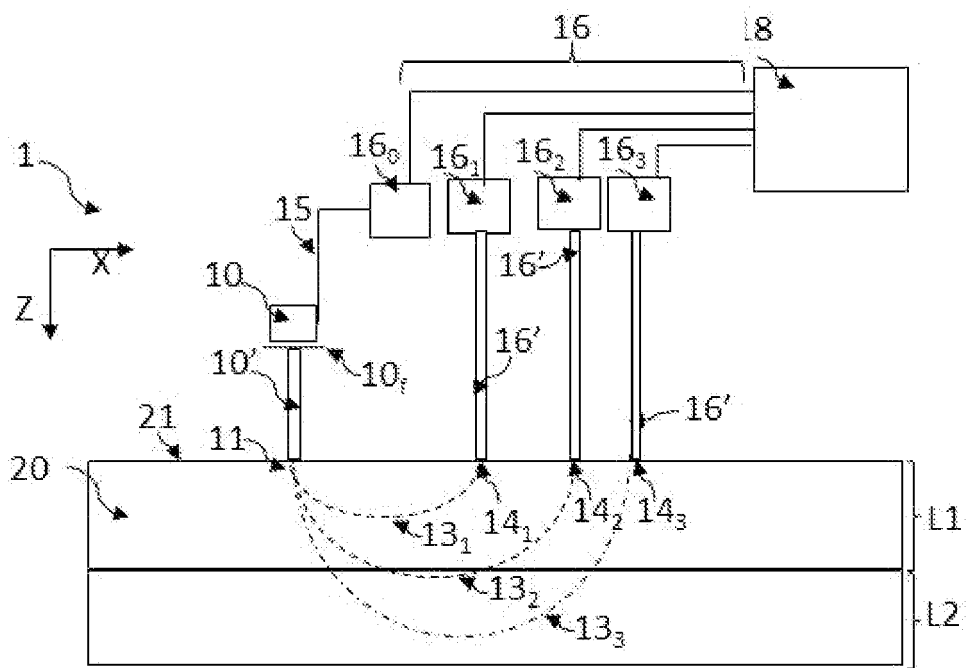


Fig. 1A

[Fig. 1B]

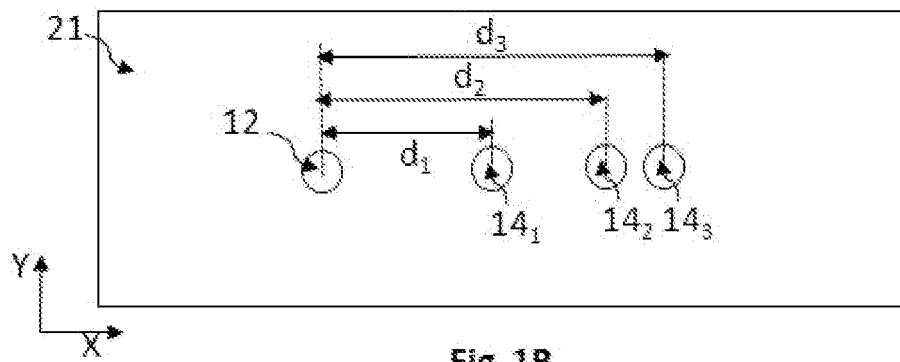
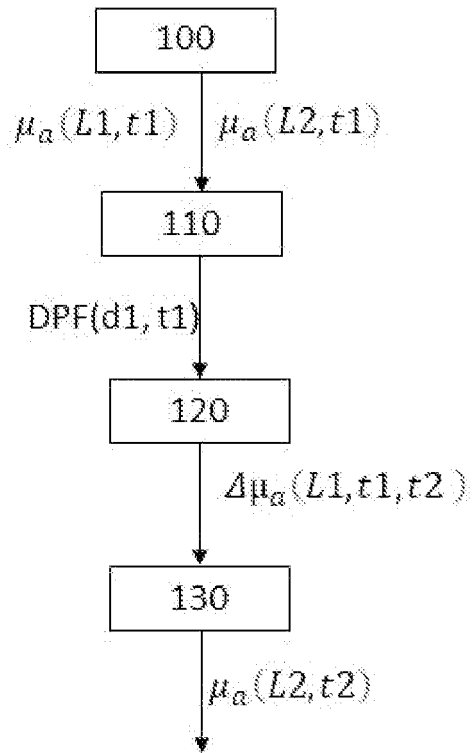
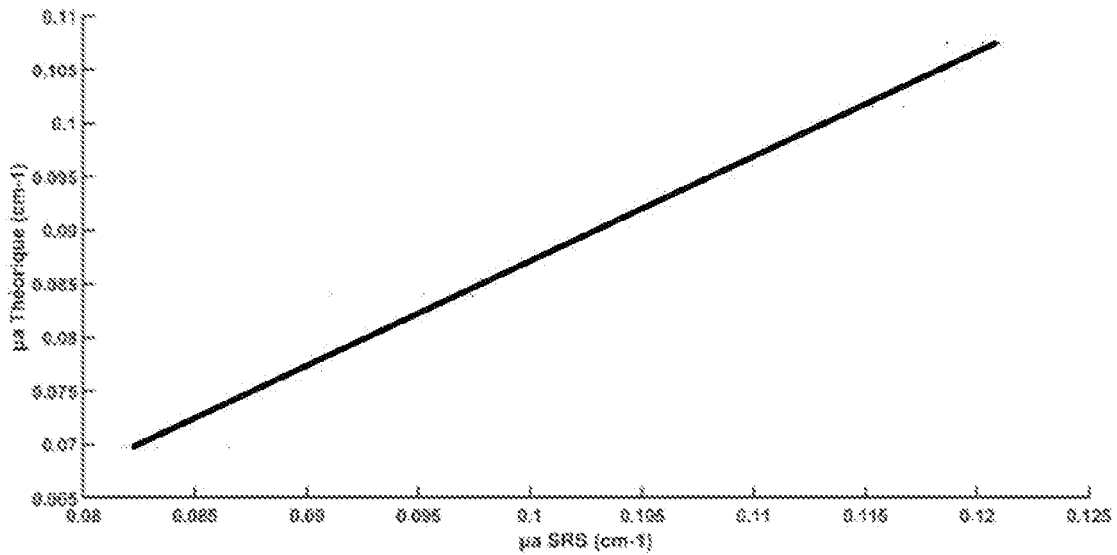


Fig. 1B

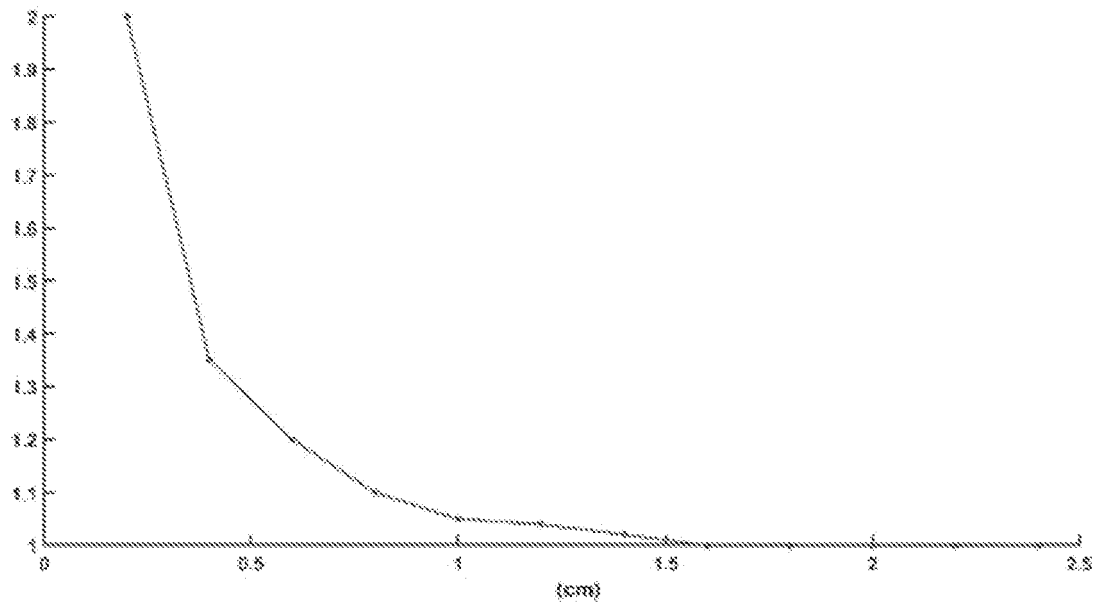
[Fig. 2]

**Fig. 2**

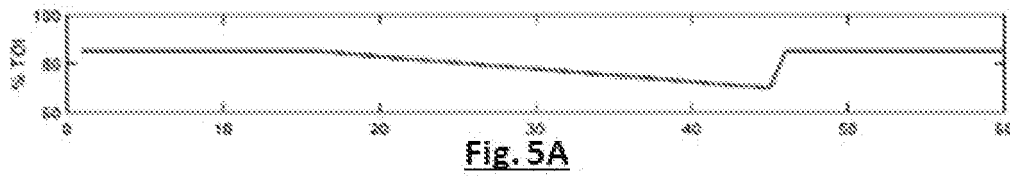
[Fig. 3]



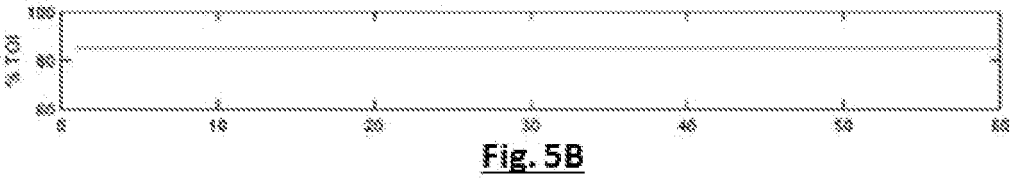
[Fig. 4]



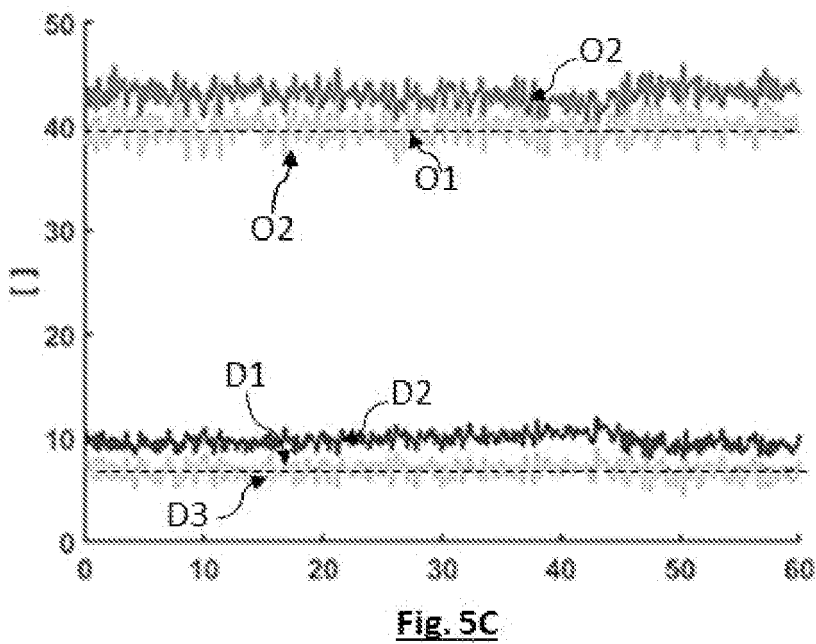
[Fig. 5A]

**Fig. 5A**

[Fig. 5B]

**Fig. 5B**

[Fig. 5C]

**Fig. 5C**

[Fig. 5D]

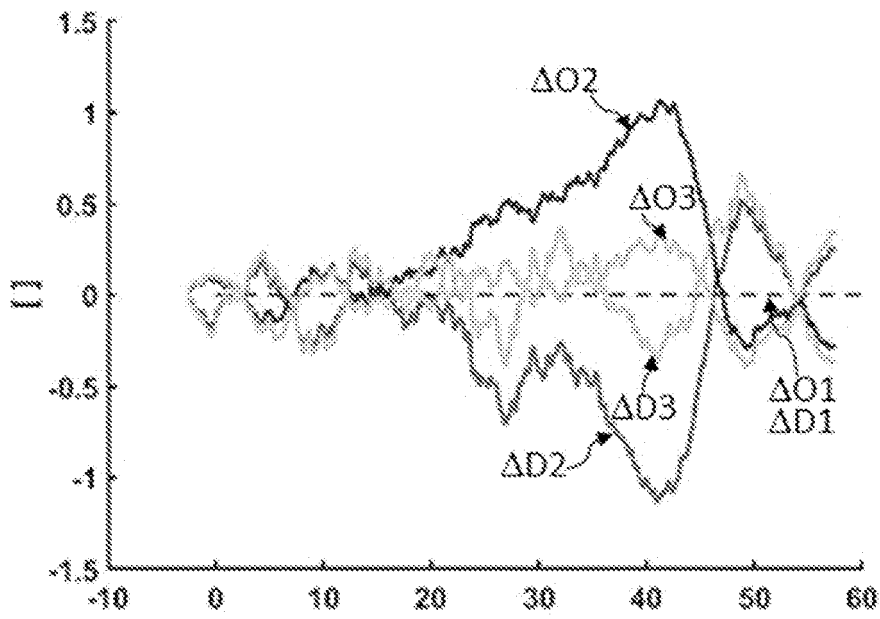


Fig. 5D

[Fig. 6A]

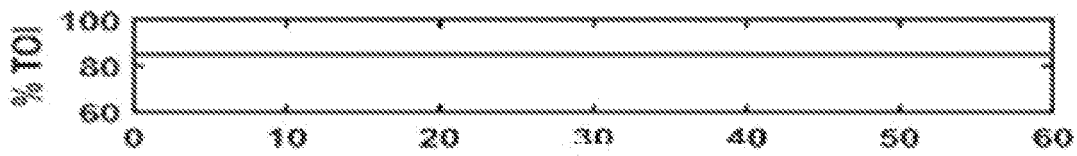


Fig. 6A

[Fig. 6B]

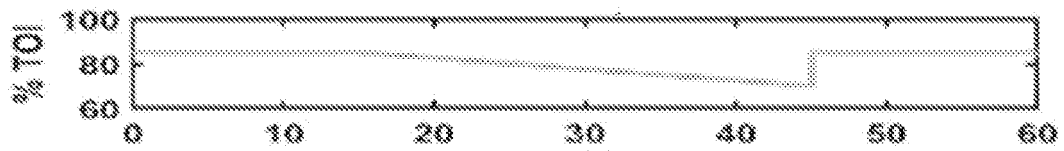


Fig. 6B

[Fig. 6C]

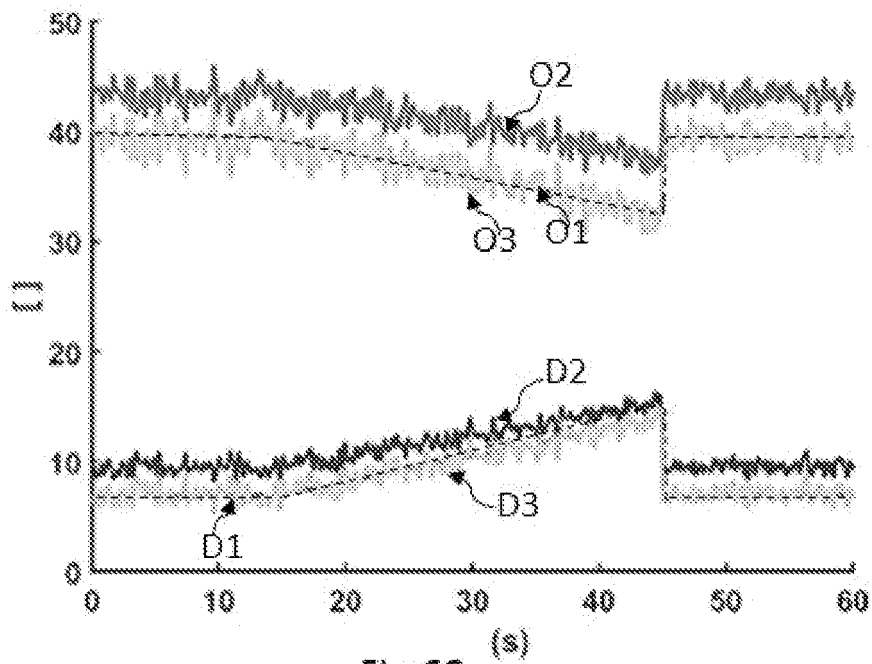


Fig. 6C

[Fig. 6D]

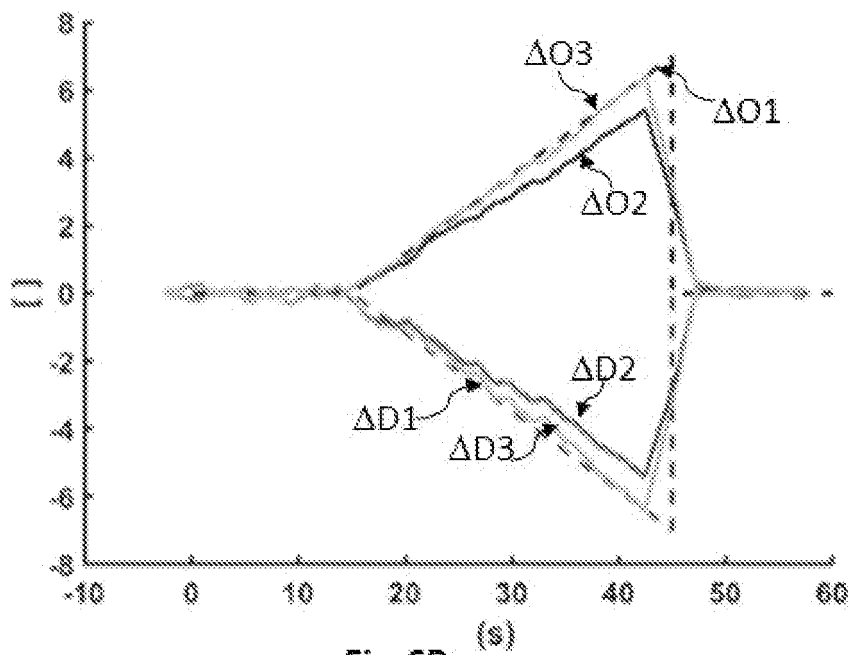


Fig. 6D

[Fig. 7A]

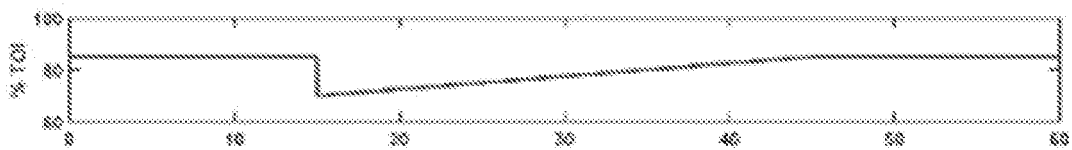
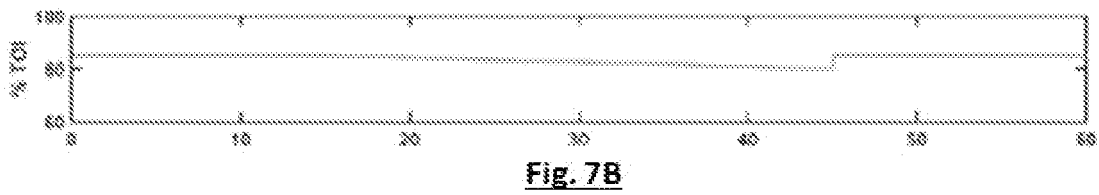
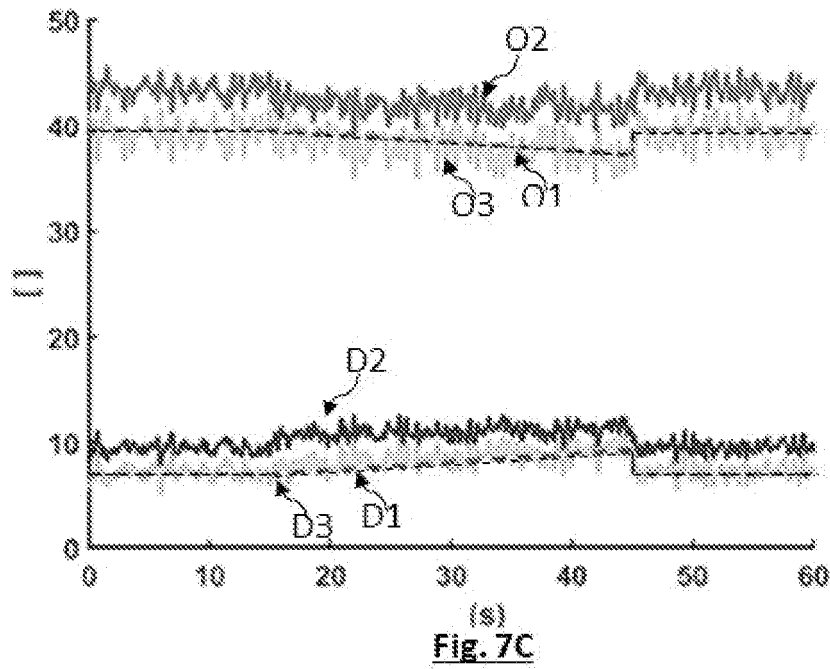


Fig. 7A

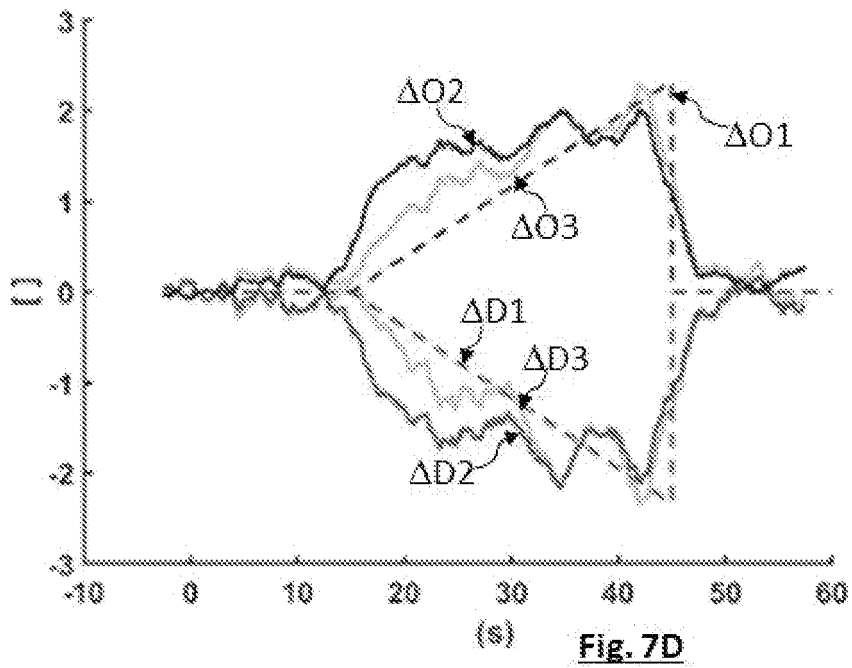
[Fig. 7B]



[Fig. 7C]



[Fig. 7D]



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement
national

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

FA 915888
FR 2214565

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	<p>US 9 433 352 B2 (NIWAYAMA MASATSUGU [JP]; KANAYAMA NAOHIRO [JP] ET AL.) 6 septembre 2016 (2016-09-06) * colonne 13, ligne 14 - colonne 14, ligne 33; figures 1,4,5 *</p> <p>-----</p>	1-8	<p>G01N21/47 A61B5/00</p> <p>DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)</p> <p>G01N A61B</p>
A	<p>US 2007/201788 A1 (LIU QUAN [US] ET AL) 30 août 2007 (2007-08-30) * alinéas [0064] - [0069]; figures 2,8 *</p> <p>-----</p>	1-8	
A	<p>US 2021/204816 A1 (KIRBY BRETT S [US] ET AL) 8 juillet 2021 (2021-07-08) * abrégé; figures 1, 10 * * alinéa [0026] *</p> <p>-----</p>	1-8	
A	<p>US 2015/018642 A1 (GULATI SANDEEP [US] ET AL) 15 janvier 2015 (2015-01-15) * alinéas [0070] - [0075]; figure 6 *</p> <p>-----</p>	1-8	
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
28 juin 2023		Meacher, David	
<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 & : membre de la même famille, document correspondant</p>			

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2214565 FA 915888**

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 **28-06-2023**
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	
US 9433352	B2	06-09-2016	EP 2679981 A1	01-01-2014
			JP 5966135 B2	10-08-2016
			JP WO2012115210 A1	07-07-2014
			US 2014039284 A1	06-02-2014
			WO 2012115210 A1	30-08-2012

US 2007201788	A1	30-08-2007	EP 1988829 A2	12-11-2008
			US 2007201788 A1	30-08-2007
			WO 2007100648 A2	07-09-2007

US 2021204816	A1	08-07-2021	CN 109348727 A	15-02-2019
			CN 115770016 A	10-03-2023
			EP 3408627 A1	05-12-2018
			US 11147481 B1	19-10-2021
			US 2021204816 A1	08-07-2021
			WO 2017132404 A1	03-08-2017

US 2015018642	A1	15-01-2015	US 2015015888 A1	15-01-2015
			US 2015018642 A1	15-01-2015
			US 2015018646 A1	15-01-2015
			US 2015041656 A1	12-02-2015
			US 2015045636 A1	12-02-2015
