

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 11.04.22.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 13.10.23 Bulletin 23/41.

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) : ANYFIELDS Société par actions sim-
plifiée — FR.

⑦2 Inventeur(s) : CAPET NICOLAS et PROST DANIEL.

⑦3 Titulaire(s) : ANYFIELDS Société par actions simpli-
fiée.

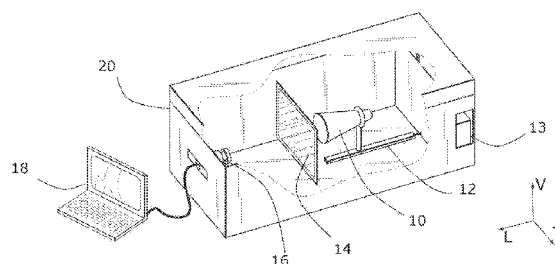
⑦4 Mandataire(s) : BRINGER IP.

⑤4 DISPOSITIF DE MESURE DU RAYONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE D'UN OBJET RAYONNANT.

⑤7 DISPOSITIF DE MESURE DU RAYONNEMENT
ELECTROMAGNETIQUE D'UN OBJET RAYONNANT

L'invention concerne un dispositif de mesure du rayonnement électromagnétique d'un objet rayonnant (10) comprenant : un caisson (20) étanche logeant ledit objet rayonnant (10); des moyens de déplacement (12) selon une direction longitudinale (L) dudit objet rayonnant (10); un film thermosensible (14) logé dans ledit caisson (20); une caméra (16) logée à une extrémité longitudinale dudit caisson (20) étanche, à l'opposée dudit objet rayonnant (10) à mesurer par rapport au film thermosensible (14), et configurée pour faire l'acquisition d'images dudit film thermosensible; des moyens de traitement (18) desdits images configurés pour fournir une cartographie du champ électromagnétique dudit objet rayonnant (10) capté par ledit film thermosensible (14).

Figure pour l'abrégé : figure 1



Description

Titre de l'invention : DISPOSITIF DE MESURE DU RAYONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE D'UN OBJET RAYONNANT

Domaine technique de l'invention

[0001] L'invention concerne un dispositif de mesure du rayonnement électromagnétique d'un objet rayonnant, en particulier aux fréquences radioélectriques ou microondes, telle qu'une antenne.

Arrière-plan technologique

[0002] Il est souvent nécessaire de connaître le rayonnement électromagnétique d'un objet rayonnant, telle qu'une antenne, un radiotéléphone, un émetteur-récepteur hyper-fréquence, un dispositif micro-onde, un dispositif à induction, etc.

[0003] Pour ce faire, le document WO20200351193 propose un dispositif de mesure des performances d'un objet rayonnant dans au moins deux bandes de fréquences différentes. Ce dispositif comprend un boîtier externe formant une chambre externe pourvue de parois réfléchissantes de radiofréquences, une chambre interne pourvue de parois absorbantes de radiofréquences dans laquelle est logée l'objet rayonnant testé, un premier agencement d'antennes d'essai logé dans la chambre externe pour permettre la mesure dans une première bande de fréquences et un second agencement d'antennes d'essai agencé à l'intérieur de la chambre interne pour permettre la mesure dans la seconde bande de fréquence.

[0004] Ce dispositif permet donc de mesurer les performances de l'objet rayonnant dans un environnement de radiofréquences réfléchissant par le premier agencement d'antennes d'essai et la mesure des performances dans un environnement radiofréquence essentiellement anéchoïque par le second agencement d'antennes d'essai.

[0005] Cette solution ne permet pas de caractériser le rayonnement électromagnétique d'un objet rayonnant antenne, elle permet uniquement de mesurer les performances de l'objet rayonnant dans des bandes de fréquences prédéterminées. En outre, cette solution est complexe à mettre en œuvre et nécessite l'utilisation de deux ensembles d'antennes d'essai.

[0006] Les inventeurs ont donc cherché à développer un dispositif intégré plus simple et qui permet la caractérisation d'un objet rayonnant et la reconstitution du diagramme de rayonnement.

Objectifs de l'invention

[0007] L'invention vise à fournir un dispositif de mesure, de caractérisation et de visualisation du rayonnement électromagnétique d'un objet rayonnant.

- [0008] L'invention vise en particulier à fournir un tel dispositif de mesure qui permette la mesure, la caractérisation et la visualisation du rayonnement de l'objet pour des fréquences variées.
- [0009] L'invention vise en particulier à fournir un tel dispositif de mesure qui ne nécessite pas l'utilisation de composants complexes et dont le nombre de composants est limité.
- [0010] L'invention vise en particulier à fournir un tel dispositif de mesure qui puisse être utilisé sans difficultés majeures par quiconque, sans connaissance technique particulière du fonctionnement des antennes.
- [0011] L'invention vise aussi à fournir, dans au moins un mode de réalisation, un dispositif manuable de mesure et de caractérisation du rayonnement électromagnétique d'un objet rayonnant.

Exposé de l'invention

- [0012] Pour ce faire, l'invention concerne un dispositif de mesure du rayonnement électromagnétique d'un objet rayonnant comprenant :
- [0013] un caisson étanche au rayonnement électromagnétique s'étendant le long d'une direction longitudinale équipé d'une ouverture adaptée pour permettre le logement dudit objet rayonnant à mesurer dans ledit caisson,
- [0014] des moyens de modulation du rayonnement dudit objet rayonnant.
- [0015] Le dispositif selon l'invention est caractérisé en ce qu'il comprend en outre :
- [0016] des moyens de déplacement selon la direction longitudinale dudit objet rayonnant à l'intérieur du caisson étanche entre une position, dite proximale, et une position, dite distale,
- [0017] un film thermosensible au champ électromagnétique logé dans ledit caisson étanche et s'étendant transversalement au voisinage de ladite position proximale,
- [0018] une caméra logée à une extrémité longitudinale dudit caisson étanche, à l'opposée dudit objet rayonnant à mesurer par rapport au film thermosensible, et configurée pour faire l'acquisition d'images dudit film thermosensible, ledit film thermosensible étant agencé à la distance focale de ladite caméra,
- [0019] des moyens de traitement desdites images acquises par ladite caméra configurés pour fournir une cartographie du champ électromagnétique capté par ledit film thermosensible.
- [0020] Le dispositif selon l'invention permet ainsi de mesurer le champ électromagnétique d'un objet rayonnant et d'en fournir une cartographie. En particulier et selon l'invention, le film thermosensible, s'échauffe au contact du rayonnement électromagnétique de l'objet rayonnant. Cet échauffement est imagé par la caméra, puis détecté et caractérisé par les moyens de traitement d'images. Le film thermosensible peut être sensible soit au champ magnétique, soit au champ électrique. Le film thermosensible

est agencé à la distance focale de la caméra.

- [0021] Le dispositif selon l'invention permet de tester tout type d'objet rayonnant pouvant être logé dans le caisson étanche, supprimant ainsi le besoin de recourir à une chambre anéchoïde ou réverbérante des solutions de l'art antérieur. En particulier, le dispositif selon l'invention permet d'obtenir des images du champ rayonné par une source radio-fréquence et/ou microonde sans précaution particulière. Un tel dispositif peut donc être utilisé dans une salle de classe, un bureau d'études et de manière générale dans n'importe quelle pièce non spécifiquement conçue pour le rayonnement électromagnétique.
- [0022] Dans tout le texte et conformément aux usages, il est considéré que les ondes radio-électriques (ou ondes hertziennes) désignent les ondes électromagnétiques dont les fréquences sont comprises entre 3Hz et 300 MHz et les microondes (ou ondes hyper-fréquences) désignent les ondes électromagnétiques dont les fréquences sont comprises entre 300 MHz et 300 GHz.
- [0023] Le dispositif selon l'invention est un dispositif intégré qui ne nécessite aucun équipement externe si ce n'est une source d'énergie pour l'alimentation électrique de la source rayonnante, de la caméra, des moyens de traitement d'images et des moyens de déplacement longitudinal de l'objet rayonnant. Selon une variante avantageuse, cette source d'énergie électrique est formée par une batterie rechargeable logée dans un compartiment adjacent au boîtier étanche.
- [0024] En outre, le dispositif selon l'invention présente la particularité de permettre un déplacement longitudinal de l'objet rayonnant par rapport au film thermosensible (par exemple par des moyens motorisés) entre une position distale éloignée du film thermosensible et une position proximale proche du film thermosensible, ce qui permet de mesurer le rayonnement électromagnétique de l'objet rayonnant dans différents plans situés à différentes distances du film thermosensible. Le dispositif selon l'invention permet ainsi, par les moyens de traitement d'images, de réaliser une reconstitution 3D du champ proche en amplitude.
- [0025] En outre et dans le cas d'une antenne, des mesures d'amplitude en deux plans distincts permettent de reconstruire algorithmiquement la phase du champ en tout point de l'ouverture de l'antenne, et ainsi de reconstituer le diagramme de rayonnement de cette antenne.
- [0026] Selon un mode de réalisation avantageux, la caméra est équipée d'un capteur d'acquisition d'images dans le domaine du visible et le dispositif comprend en outre une source lumineuse monochromatique logée dans ledit caisson et orientée vers le film thermosensible de manière à pouvoir l'illuminer, ce dernier étant revêtu d'une couche d'un matériau fluorescent.
- [0027] Selon cette variante de réalisation, le dispositif est équipé d'une caméra équipée d'un

capteur CCD ou CMOS dans le visible. Cette caméra est munie d'un filtre optique adapté à la longueur d'onde de la lumière fluorescente émise par le film thermosensible recouvert d'un fluorophore. En outre, une source lumineuse logée dans le caisson illumine le film thermosensible.

- [0028] Le matériau fluorescent doit être un fluorophore qui émet dans le domaine du visible (approximativement 400 nm à 800 nm) et dont l'intensité de fluorescence dépend de la température. Selon un mode de réalisation, le matériau utilisé est la Rhodamine B dont l'intensité maximale de fluorescence se situe autour de 600 nm à la température ambiante lorsqu'elle est soumise à une lumière de longueur d'onde 470 nm et voit cette intensité baisser fortement (environ 2%/°C) avec l'élévation de sa température. La différence entre les longueurs d'ondes reçues par l'excitation et de fluorescence facilite la mesure, car le filtrage sur la caméra permettra d'éliminer la réflexion sur le film de la lumière émise, sans perte de signal utile.
- [0029] Bien entendu, d'autres matériaux à la fois fluorescents et thermosensibles peuvent être utilisés sans remettre en cause le principe de ce mode avantageux de réalisation.
- [0030] Selon un deuxième mode de réalisation, la caméra est une caméra équipée d'un capteur infrarouge.
- [0031] Dans ce cas, la caméra fait directement l'acquisition de l'échauffement du film thermosensible.
- [0032] Quelle que soit le type de caméra utilisée (infrarouge ou visible), le film thermosensible utilisé est soit faiblement conducteur (pour la mesure du champ électrique), soit isolant et à pertes magnétiques (pour la mesure du champ magnétique). Ainsi, sous l'effet du champ électromagnétique de l'objet rayonnant, le film s'échauffe (typiquement dans une gamme de 0,01 à 10°C).
- [0033] Cet échauffement est directement enregistré par la caméra infrarouge (pour la version infrarouge), ou bien est responsable d'une variation de l'intensité de fluorescence (pour la version fluorescence) enregistrée par la caméra dans le domaine du visible.
- [0034] De façon avantageuse, le dispositif de mesure comprend en outre un filtre agencé entre l'objet rayonnant à mesurer et le film thermosensible, ce filtre étant configuré pour filtrer une composante du champ électromagnétique de manière à permettre une mesure des autres composantes du rayonnement électromagnétique de l'objet rayonnant à mesurer.
- [0035] Ainsi et selon cette variante avantageuse, un filtre est interposé entre l'objet rayonnant et le film thermosensible. Ce filtre prend par exemple la forme d'un second film mince, du type grille conductrice, grille absorbante ou motifs particuliers. Ce filtre permet de laisser passer sur le film thermosensible uniquement les composantes non filtrées. On peut ainsi réaliser une mesure de polarisation croisée par exemple. Dans le cas d'une polarisation circulaire, le caractère droite/gauche peut également être obtenu

avec un film filtre utilisant les motifs adéquats, en particulier des surfaces sélectives en polarisation (connues sous l'acronyme PSS).

- [0036] Selon une variante avantageuse de l'invention, le film thermosensible est monté de manière amovible à l'intérieur dudit caisson étanche.
- [0037] Cette variante permet de changer facilement et rapidement le type de film. En particulier, et selon l'invention, le type de film thermosensible utilisé détermine le type de champ (électrique ou magnétique) que l'on peut mesurer. Pour la mesure du champ électrique, on utilise un film faiblement conducteur. Pour la mesure du champ magnétique, on utilise un film isolant et à pertes magnétiques.
- [0038] Ce montage amovible peut être de tout type. Il peut par exemple s'agir d'un cadre sur lequel le film est placé, ce cadre étant logé dans des glissières de guidage sur les parois internes du caisson en regard l'une de l'autre.
- [0039] Selon un mode de réalisation particulier de l'invention, le film thermosensible est un film anisotrope permettant de déterminer la direction du champ et sa variation spatiale ou son taux d'ellipticité en fonction de la polarisation du champ rayonné par ledit objet mesurer.
- [0040] Selon cette variante avantageuse, le film anisotrope comprend un réseau de motifs permettant de déterminer la variation spatiale de l'amplitude et de la direction du champ (en polarisation linéaire), ou bien la variation spatiale de l'amplitude et du taux d'ellipticité (en polarisation circulaire) du champ rayonné par ledit objet rayonnant.
- [0041] Un tel film anisotrope est un film présentant des motifs particuliers (bandes parallèles, étoiles à 3 branches ou plus) qui permet de déterminer, outre l'amplitude, la polarisation du champ électrique, y compris le taux d'ellipticité dans le cas d'une polarisation circulaire. Avec un tel réseau de motifs, on peut en outre déterminer la distribution spatiale dans le plan de ces amplitudes et polarisations.
- [0042] Selon une variante de l'invention, lesdits moyens de modulation du rayonnement dudit objet rayonnant comprennent un microcontrôleur, un synthétiseur et un amplificateur radiofréquence ou microondes logés dans un compartiment dédié.
- [0043] Cette variante permet d'alimenter et de piloter l'objet rayonnant.
- [0044] Selon une autre variante de l'invention, lesdits moyens de modulation du rayonnement dudit objet rayonnant comprennent :
- [0045] – un écran obturateur agencé entre ledit objet rayonnant et ledit film thermosensible, ledit écran obturateur étant configuré pour pouvoir passer d'un état, dit transparent, dans lequel le rayonnement dudit objet rayonnant peut atteindre ledit film thermosensible, à un état, dit opaque, dans lequel ledit écran empêche ledit rayonnement dudit objet rayonnant d'atteindre ledit film thermosensible,
- une électronique de commande configuré pour piloter ledit écran obturateur

entre l'état opaque et l'état transparent et inversement.

- [0046] Cette variante permet de mesurer les champs des objets non coopératifs. L'écran obturateur placé devant le film thermosensible permet d'assurer la modulation basse fréquence de l'objet en s'ouvrant et se fermant à la fréquence susmentionnée de quelques dixièmes à quelques Hz. L'obturation peut être obtenue par des moyens électriques ou mécaniques. Un obturateur mécanique est par exemple constitué de deux grilles parallèles et masquant chacune 50% du film thermosensible, l'une oscillant latéralement sur une distance égale au pas de la grille, permettant une ouverture à 50% (grilles superposées) ou fermeture (grilles décalées d'un pas). L'obturateur électrique peut être un film à cristaux liquides ou à plasma (dont l'allumage intermittent assure l'alternance opacité/transparence).
- [0047] De façon avantageuse, les moyens de déplacement de l'objet rayonnant selon la direction longitudinale comprennent un rail le long duquel l'objet rayonnant peut coulisser et un moteur électrique de déplacement de l'objet sur le rail.
- [0048] D'autres moyens de déplacement de l'objet rayonnant entre la position proximale et la position distale peuvent être mis en œuvre sans changer l'objet et le résultat de l'invention.
- [0049] Outre, le déplacement longitudinal de l'objet, il peut également être prévu de doter le dispositif de moyens de pivotement de l'objet rayonnant sur lui-même pour modifier l'ouverture angulaire de la mesure du champ.
- [0050] Avantageusement et selon l'invention, le caisson étanche au rayonnement électromagnétique est formé d'un caisson présentant une paroi interne recouverte d'absorbants microondes.
- [0051] Ces absorbants sont configurés pour éviter toute réflexion du champ électromagnétique et pour atténuer l'émission du champ vers l'extérieur du caisson étanche.
- [0052] L'invention concerne également un dispositif de mesure caractérisé en combinaison par tout ou partie des caractéristiques mentionnées ci-dessus ou ci-après.

Liste des figures

- [0053] D'autres buts, caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description suivante donnée à titre uniquement non limitatif et qui se réfère aux figures annexées dans lesquelles :
- [0054] [Fig.1] est une vue schématique en perspective d'un dispositif de mesure selon un mode de réalisation de l'invention équipé d'une caméra infrarouge, la vue comprenant en outre un arraché permettant de visualiser les éléments présents dans le dispositif de mesure,
- [0055] [Fig.2] est une vue schématique en perspective du dispositif de la [Fig.1] sur laquelle l'objet rayonnant a été déplacé par rapport au film thermosensible,
- [0056] [Fig.3] est une vue schématique en perspective d'un dispositif de mesure selon un

autre mode de réalisation de l'invention équipé d'une caméra dans le domaine visible et d'une source d'émission d'une lumière fluorescente, la vue comprenant en outre un arraché permettant de visualiser les éléments présents dans le dispositif de mesure,

[0057] [Fig.4] est une vue schématique en perspective du dispositif de la [Fig.3] sur laquelle l'objet rayonnant a été déplacé par rapport au film thermosensible,

[0058] [Fig.5] est une vue schématique en perspective d'un dispositif de mesure selon un autre mode de réalisation de l'invention équipé d'un filtre additionnelle agencé entre l'objet rayonnant et le film thermosensible, la vue comprenant en outre un arraché permettant de visualiser les éléments présents dans le dispositif de mesure,

[0059] [Fig.6] est une vue schématique en perspective d'un dispositif de mesure selon un mode de réalisation de l'invention sur laquelle on peut observer le couvercle du dispositif en position ouverte, la vue comprenant en outre un arraché permettant de visualiser les éléments présents dans le dispositif de mesure.

[0060] **Description détaillée d'un mode de réalisation de l'invention**

[0061] Sur les figures, les échelles et les proportions ne sont pas strictement respectées et ce, à des fins d'illustration et de clarté. Dans toute la description détaillée qui suit en référence aux figures, sauf indication contraire, chaque élément du dispositif de mesure et décrit tel qu'il est agencé lorsqu'un objet rayonnant est logé dans le caisson étanche du dispositif de mesure. Cette configuration est notamment représentée sur la [Fig.1].

[0062] En outre, les éléments identiques, similaires ou analogues sont désignés par les mêmes références dans toutes les figures. Enfin, les termes longitudinal, transversal et vertical sont utilisés à titre non limitatif en référence au trièdre L, T, V tel que représenté sur la [Fig.1]. La direction longitudinale correspond à la direction principale du dispositif de mesure le long de laquelle peut se déplacer l'objet rayonnant. La direction verticale est la direction définie par la gravité. La direction transversale est la direction perpendiculaire à la direction longitudinale et à la direction verticale.

[0063] Les figures 1 et 2 illustrent un dispositif de mesure du rayonnement électromagnétique d'un objet rayonnant 10, telle qu'une antenne selon un premier mode de réalisation.

[0064] Selon ce mode de réalisation, le dispositif comprend un caisson 20 étanche formé d'un boîtier inférieur 20a et d'un couvercle 20b, représenté sur la [Fig.6], monté articulé sur le boîtier inférieur 20a.

[0065] L'objet rayonnant 10 est monté sur un rail coulissant 12 qui forme les moyens de déplacement selon la direction longitudinale L de l'objet rayonnant 10.

[0066] L'objet rayonnant 10 peut être déplacé le long de la direction longitudinale L entre une position, dite proximale, représentée schématiquement sur les figures 1 et 3 et une position, dite distale, représentée schématiquement sur les figures 2 et 4.

[0067] Ce déplacement peut être obtenu par des moyens motorisés (non représentés sur les

- figures) tels qu'un moteur électrique entraînant l'objet rayonnant 10 le long du rail 12.
- [0068] Le dispositif de mesure comprend également des moyens 13 de modulation du rayonnement de l'objet rayonnant. Ces moyens sont par exemple logés dans un compartiment 15 spécifique agencé à une première extrémité longitudinale du caisson étanche 20.
- [0069] Le dispositif de mesure comprend également un film thermosensible 14 au champ électromagnétique logé dans le caisson étanche 20 et s'étendant transversalement au voisinage de la position proximale.
- [0070] Le dispositif de mesure comprend également une caméra 16 logée à une seconde extrémité longitudinale du caisson étanche 20, à l'opposé de l'objet rayonnant 10 à mesurer par rapport au film thermosensible 14.
- [0071] Le dispositif de mesure comprend enfin un ordinateur 18 formant les moyens de traitement des images acquises par la caméra 16. Cet ordinateur 18 comprend des routines logicielles configurées pour fournir une cartographie du champ électromagnétique capté par le film thermosensible 14.
- [0072] Dans le mode de réalisation des figures 1 et 2, la caméra 16 est une caméra infrarouge configurée pour pouvoir faire directement l'acquisition de l'échauffement du film thermosensible.
- [0073] Dans le mode de réalisation des figures 3 et 4, la caméra 16 est une caméra dans le domaine visible et la caméra est configurée pour pouvoir faire l'acquisition de la lumière fluorescente émise par le film thermosensible 14 recouvert d'un fluorophore. Pour ce faire, le dispositif comprend en outre, une source de lumière 17 qui illumine le film thermosensible 14. Dans ce cas, la caméra 16 est munie d'un filtre optique adapté à la longueur d'onde de la lumière fluorescente émise par le film thermosensible recouvert du fluorophore. Le matériau qui recouvre le film thermosensible peut par exemple être de la Rhodamine B dont l'intensité maximale de fluorescence se situe autour de 600 nm à la température ambiante lorsqu'elle est soumise à une lumière de longueur d'onde 470 nm.
- [0074] Quel que soit le mode de réalisation, le principe de l'invention repose sur
- [0075] l'interaction du film 14 avec le champ rayonné par l'objet rayonnant 10.
- [0076] Ce film thermosensible 14 est soit faiblement conducteur (pour la mesure du champ électrique), soit isolant et à pertes magnétiques (pour la mesure du champ magnétique). Ainsi, sous l'effet du champ, le film s'échauffe (typiquement dans une gamme de 0,01 à 10°C). Cet échauffement est directement enregistré par la caméra infrarouge (pour le mode de réalisation des figures 1 et 2), ou bien est responsable d'une variation de l'intensité de fluorescence (pour le mode de réalisation des figures 3 et 4), qui est enregistrée par la caméra 16.
- [0077] Le rayonnement de l'objet rayonnant 10 provoque l'échauffement du film 14 (qui est

un film mince, c'est-à-dire d'une épaisseur très faible devant l'épaisseur de peau et la longueur d'onde : le champ et la température sont supposés constants dans l'épaisseur du film) proportionnel à la densité de puissance absorbée suivant la formule suivante :

$$[0078] \quad \Delta T = \frac{P_{abs} \cdot e}{2h}$$

[0079] où e représente l'épaisseur du film 14 et h est un coefficient de convection. La densité de puissance absorbée est donnée par l'équation suivante :

$$[0080] \quad P_{abs} = \frac{1}{2} \left[(\sigma + 2\pi f \varepsilon'') E^2 + (2\pi f \mu'') H^2 \right]$$

[0081] où f représente la fréquence du rayonnement, σ la conductivité du film 14, ε'' sa permittivité (composante imaginaire), et μ'' sa perméabilité magnétique (composante imaginaire).

[0082] Pour la mesure du champ électrique, le dispositif de mesure est équipé d'un film « à pertes électriques », c'est-à-dire à faible permittivité et perméabilité négligeable, mais conductivité non nulle. Ainsi, seule la première composante de l'équation précédente est prise en compte et la puissance est proportionnelle au carré du champ électrique.

[0083] Pour la mesure du champ magnétique, le dispositif de mesure est équipé d'un film « à pertes magnétiques », c'est-à-dire à forte perméabilité, mais conductivité et permittivité négligeable. Ainsi, seule la seconde composante de l'équation précédente est prise en compte et la puissance est proportionnelle au carré du champ magnétique.

[0084] Ainsi, pour le mode de réalisation des figures 1 et 2 (caméra infrarouge), l'ordinateur 18 comprend des routines logicielles configurées pour reconstruire, à partir des images thermiques acquises par la caméra 16, la cartographie de l'amplitude du champ (électrique ou magnétique) dans le plan (Oxy) du film, à partir de la racine carrée de l'échauffement et avec un coefficient k de proportionnalité qui ne dépend que du film. Les moyens logiciels sont programmés pour calculer les amplitudes suivantes :

- [0085] – pour un film à pertes électriques, $|E(x, y)| = k_E \sqrt{\Delta T(x, y)}$
- pour un film à pertes magnétiques, $|H(x, y)| = k_H \sqrt{\Delta T(x, y)}$

[0086] Pour le mode de réalisation des figures 3 et 4 (caméra visible et fluorescence), les moyens de traitement 18 d'images sont configurés pour reconstruire, à partir des images optiques acquises par la caméra 16, la cartographie de l'amplitude du champ (électrique ou magnétique) dans le plan (Oxy) du film, à partir de la racine carrée de l'intensité de fluorescence (signal reçu par la caméra) et avec un coefficient g . En général la fluorescence décroît avec la température ; la fluorescence en l'absence de champ (« à froid ») donne une intensité I_0 , qui est donc abaissée par le champ (par le truchement de la variation de température du film qu'il induit) en I_{flu} . Les moyens de traitement 18 comprennent par exemple des moyens logiciels programmés pour calculer les amplitudes :

- [0087] – pour un film à pertes électriques,

$$|E(x, y)| = g_E \sqrt{I_0(x, y) - I_{fluor}(x, y)}$$
 – pour un film à pertes électriques, $|H(x, y)| = g_H \sqrt{I_0(x, y) - I_{fluor}(x, y)}$
- [0088] Comme indiqué précédemment, le film thermosensible 14 dépend du type de mesure à effectuer. Ce film est de préférence monté de manière amovible dans le caisson étanche 20 pour pouvoir être aisément installé/remplacé en fonction du type de mesure à effectuer.
- [0089] Pour la mesure de l'amplitude du champ électrique (E) de l'objet rayonnant 10, on utilise un film mince 14 faiblement conducteur, constitué d'un matériau composite à base d'une matrice électriquement isolante et de particules électriquement conductrices. La charge particulaire électriquement conductrice doit être ajustée de façon à ce que le matériau absorbant présente une « faible » impédance de surface (=résistivité/épaisseur), c'est-à-dire une impédance de surface comprise entre 500 et 3000 Ω , afin qu'il n'absorbe qu'une partie seulement du champ électrique. Cette impédance de surface est ajustée en fonction de la concentration de particules dans la matrice isolante et de l'épaisseur de la couche de matériau absorbant. Un polyimide (Kapton) chargé Carbone de quelques dizaines de microns d'épaisseur est un exemple de film pouvant être utilisé.
- [0090] Pour la mesure de champ magnétique, on utilise un matériau composite à base d'une matrice électriquement isolante et de particules magnétiques. La densité de particules ferromagnétiques doit rester suffisamment faible afin de limiter l'absorption et donc la perturbation apportée sur le champ que l'on souhaite mesurer. Dans la pratique, des films à matrice polymère contenant des particules de fer (10 à 20 % en fraction volumique) sont parfaitement utilisables. On peut aussi envisager des films neutres (électriquement et magnétiquement) sur lesquels une solution contenant des nanoparticules magnétiques est déposée, avec une concentration et une épaisseur adaptées à la mesure.
- [0091] Le dispositif de mesure comprend également de préférence un compartiment 15 logeant les moyens de modulation du rayonnement de l'objet rayonnant 12.
- [0092] Ces moyens de modulation dépendent du type d'objet rayonnant dont on cherche à mesurer le rayonnement.
- [0093] En particulier, le dispositif de mesure selon l'invention peut présenter un mode transitoire et un mode de modulation Basse Fréquence.
- [0094] Dans le cadre d'un phénomène transitoire rapide (ne mettant pas en œuvre de phénomènes thermiques complexes telles que conduction, convection etc.), l'enregistrement direct des images permet une interprétation électromagnétique et la transcription en champ.

- [0095] Dans le cadre d'une alimentation harmonique continue de la source (CW), soit son mode usuel s'il s'agit d'une antenne par exemple, une modulation basse fréquence (de quelques dixièmes de Hz à quelques Hz) de la source, associée à un filtrage des images enregistrées (détection synchrone) permet d'éliminer les phénomènes thermiques susmentionnés, soit la conduction dans le film et la convection avec l'air ambiant. En outre cette démodulation synchrone permet d'améliorer le rapport signal sur bruit et la dynamique de mesure. En effet, l'épaisseur du film est de l'ordre de la centaine de microns ou inférieur. Avec des caractéristiques typiques du Kapton (mesure de E) ou bien d'un film à matrice polymère (mesure de H), les constantes de temps thermiques des films, données par la formule suivante, sont de quelques secondes:
- [0096]
$$\tau = \frac{\rho C e}{2h}$$
- [0097] où C correspond à la capacité calorifique (en J/kg/K), ρ est la masse volumique (en kg/m³), h est un coefficient de convection en (W/m²/K) et e est l'épaisseur du film en m.
- [0098] L'équilibre convectif est atteint en quelques secondes (le film monte en température selon une loi exponentielle en $(1 - e^{-t/\tau})$ et se stabilise), mais la modulation BF ne lui en laisse pas le temps. Ainsi l'élévation de température est minorée, et linéarisable (par exemple en triangle pour une modulation carrée – tout ou rien – de la source).
- [0099] Ainsi le système de modulation est agencé pour appliquer une séquence temporelle de modulation du rayonnement électromagnétique auquel le film est exposé. Le système de détection synchrone est agencé pour filtrer les intensités saisies dans des images successives de la surface du film, conformément à la séquence temporelle de modulation. Cela peut être réalisé au cours de la mesure ou bien après l'enregistrement complet, par transformée de Fourier rapide (FFT) par exemple.
- [0100] Dans le cas où la source rayonnante ne peut pas être contrôlée, un obturateur (mécanique ou électrique) placé devant le film capteur et piloté en ouverture/fermeture permet de recréer la modulation (en tout ou rien), ce qui permet la mesure par détection synchrone et ramène au cas précédent. L'obturateur mécanique peut être, par exemple, constitué de deux grilles parallèles et masquant chacune 50% du film, l'une oscillant latéralement sur une distance égale au pas de la grille, permettant une ouverture à 50% (grilles superposées) ou fermeture (grilles décalées d'un pas). L'obturateur électrique peut être un film à cristaux liquides ou à plasma (dont l'allumage intermittent assure l'alternance opacité/transparence).
- [0101] Le dispositif selon l'invention permet de déplacer l'objet rayonnant 10 le long du rail longitudinale 12.
- [0102] Le dispositif selon l'invention permet donc de mesurer le rayonnement électromagnétique de l'objet rayonnant 10 dans différents plans situés à différentes distances du

film thermosensible 14. Le dispositif selon l'invention permet ainsi, par les moyens de traitement 18 d'images, de réaliser une reconstitution 3D du champ proche en amplitude.

- [0103] En particulier, dans le cas d'une antenne, des mesures d'amplitude en deux plans distincts permettent d'obtenir la phase du champ en tout point de l'ouverture de l'antenne, et ainsi la reconstitution du diagramme de rayonnement de cette antenne. Pour ce faire, les moyens de traitement d'images peuvent mettre en œuvre par des moyens logiciels la méthode connue sous la dénomination anglaise de « *Planar Near-Field/Far Field Phase Retrieval* ».
- [0104] La [Fig.5] illustre une variante de réalisation du dispositif de mesure dans lequel un filtre 19 est agencé entre l'objet rayonnant 10 à mesurer et le film thermosensible 14. Ce filtre est configuré pour filtrer une composante du champ électromagnétique de manière à permettre une mesure des autres composantes du rayonnement électromagnétique de l'objet à mesurer. Ce filtre 19 est par exemple formé d'un film mince du type grille conductrice ou grille absorbante ou motifs particuliers, notamment des surfaces sélectives en polarisation (PSS). Il permet de ne laisser passer sur le film thermosensible 14 que les composantes non filtrées.

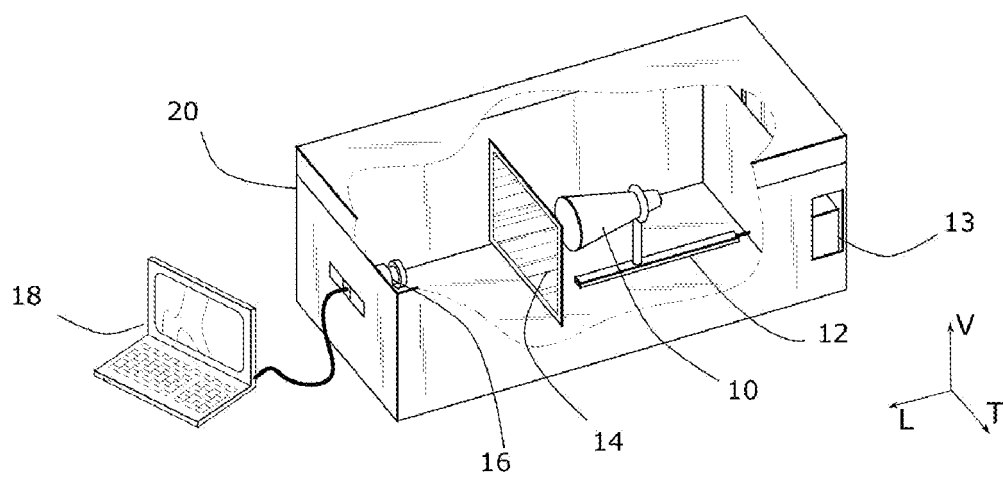
Revendications

- [Revendication 1] Dispositif de mesure du rayonnement électromagnétique d'un objet rayonnant (10) comprenant :
- un caisson (20) étanche au rayonnement électromagnétique s'étendant le long d'une direction longitudinale (L) équipé d'une ouverture adaptée pour permettre le logement dudit objet rayonnant (10) à mesurer dans ledit caisson,
 - des moyens de modulation (13) du rayonnement dudit objet rayonnant, caractérisé en ce qu'il comprend en outre :
 - des moyens de déplacement (12) selon la direction longitudinale (L) dudit objet rayonnant (10) à l'intérieur du caisson (20) étanche entre une position, dite proximale, et une position, dite distale,
 - un film thermosensible (14) au champ électromagnétique logé dans ledit caisson (20) étanche et s'étendant transversalement au voisinage de ladite position proximale,
 - une caméra (16) logée à une extrémité longitudinale dudit caisson (20) étanche, à l'opposée dudit objet rayonnant (10) à mesurer par rapport au film thermosensible (14), et configurée pour faire l'acquisition d'images dudit film thermosensible, ledit film thermosensible (14) étant agencé à la distance focale de ladite caméra (16),
 - des moyens de traitement (18) desdits images acquises par ladite caméra (16) configurés pour fournir une cartographie du champ électromagnétique dudit objet rayonnant (10) capté par ledit film thermosensible (4).
- [Revendication 2] Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que ladite caméra (16) est équipée d'un capteur d'acquisition d'images dans le domaine du visible et en ce qu'il comprend en outre une source lumineuse (17) monochromatique orientée de manière à illuminer le film thermosensible (14) et en ce que ce dernier est revêtu d'une couche d'un matériau fluorescent.
- [Revendication 3] Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que ladite caméra (16) est une caméra équipée d'un capteur infrarouge.
- [Revendication 4] Dispositif selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que lesdits moyens de modulation (13) du rayonnement dudit objet rayonnant (10) comprennent un microcontrôleur, un synthétiseur et un amplificateur radio-fréquence ou microondes logés dans un compartiment (15) dédié.

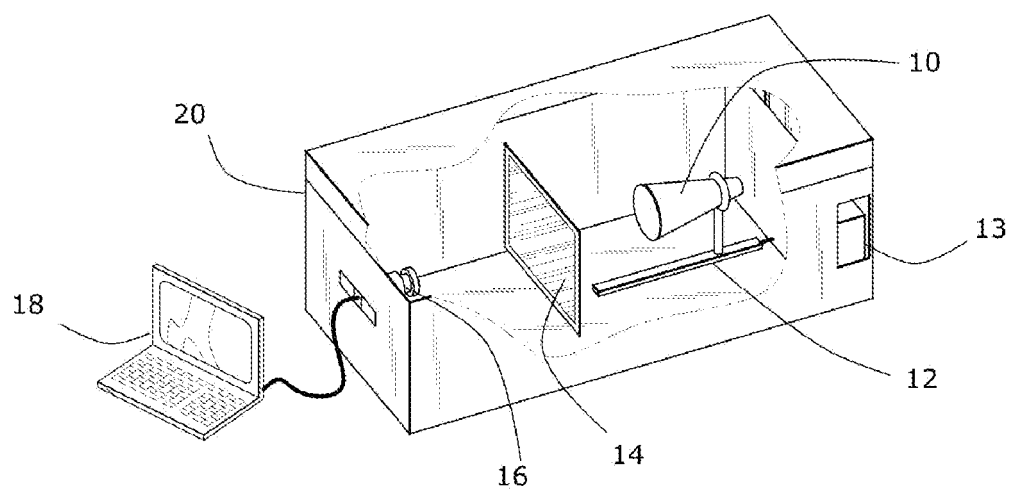
- [Revendication 5] Dispositif selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que lesdits moyens de modulation (13) du rayonnement dudit objet rayonnant comprennent :
- un écran obturateur agencé entre ledit objet rayonnant (10) et ledit film thermosensible (14), ledit écran obturateur étant configuré pour pouvoir passer d'un état, dit transparent, dans lequel le rayonnement dudit objet rayonnant peut atteindre ledit film thermosensible, à un état, dit opaque, dans lequel ledit écran empêche ledit rayonnement dudit objet rayonnant d'atteindre ledit film thermosensible,
 - une électronique de commande configurée pour piloter ledit écran obturateur entre l'état opaque et l'état transparent et inversement.
- [Revendication 6] Dispositif selon l'une des revendications 1 à 5, caractérisé en ce qu'il comprend en outre un filtre (19) agencé entre ledit objet rayonnant (10) à mesurer et ledit film thermosensible (14), ledit filtre (19) étant configuré pour filtrer une composante du champ électromagnétique de manière à permettre une mesure des autres composantes du rayonnement électromagnétique dudit objet rayonnant (10) à mesurer.
- [Revendication 7] Dispositif selon l'une des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que ledit film thermosensible (14) est un film anisotrope comprenant un réseau de motifs permettant de déterminer la variation spatiale de l'amplitude et de la direction du champ (en polarisation linéaire), ou bien la variation spatiale de l'amplitude et du taux d'ellipticité (en polarisation circulaire) du champ rayonné par ledit objet rayonnant (10).
- [Revendication 8] Dispositif selon l'une des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que ledit film thermosensible (14) est monté de manière amovible à l'intérieur dudit caisson (20) étanche.
- [Revendication 9] Dispositif selon l'une des revendications 1 à 8, caractérisé en ce que lesdits moyens de déplacement (12) dudit objet rayonnant (10) selon la direction longitudinale (L) comprennent un rail le long duquel ledit objet rayonnant (10) peut coulisser et un moteur électrique de déplacement dudit objet sur ledit rail.
- [Revendication 10] Dispositif selon l'une des revendications 1 à 9, caractérisé en ce que ledit caisson (20) étanche au rayonnement électromagnétique est formé d'un caisson présentant une paroi interne recouverte d'absorbants mi-

croondes.

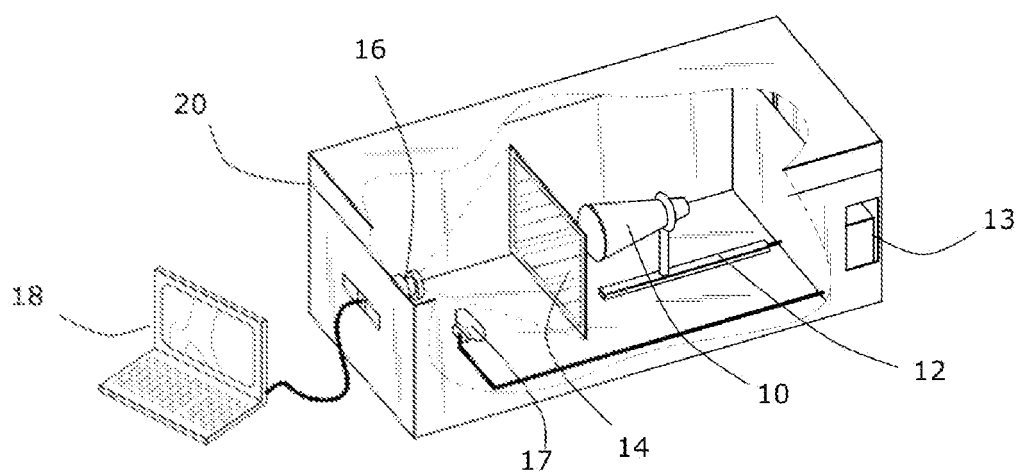
[Fig. 1]



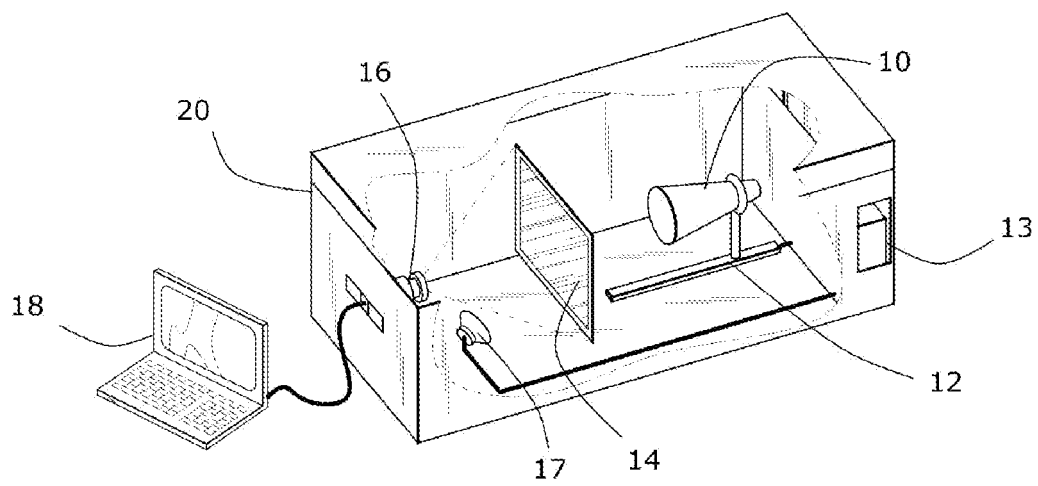
[Fig. 2]



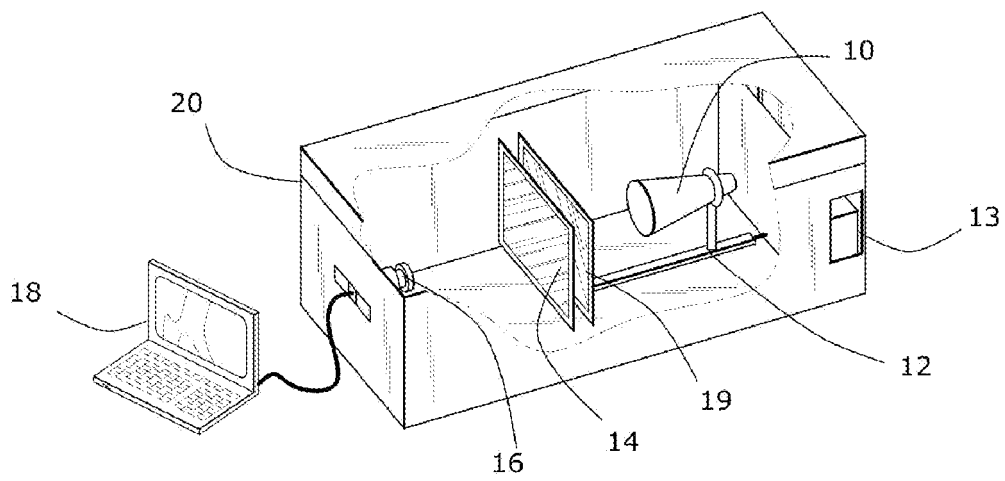
[Fig. 3]



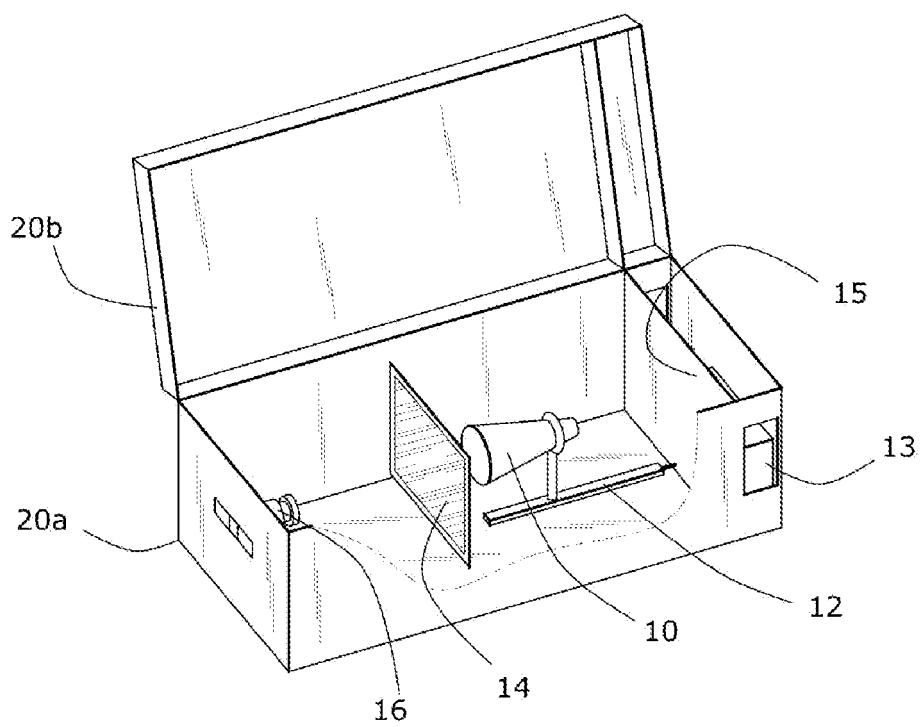
[Fig. 4]



[Fig. 5]



[Fig. 6]



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

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

N° d'enregistrement
national

FA 907024

FR 2203286

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	RAGAZZO H ET AL: "Detection and Imaging of Magnetic Field in the Microwave Regime With a Combination of Magnetic Losses Material and Thermofluorescent Molecules", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, IEEE, USA, vol. 55, no. 2, 1 février 2019 (2019-02-01), pages 1-4, XP011706023, ISSN: 0018-9464, DOI: 10.1109/TMAG.2018.2860520 [extrait le 2019-01-18] * abrégé * * figure 5 * -----	1-10	G01J5/48 G01J5/02 G01J5/08 G06T1/00
A	WO 2021/058895 A1 (OFFICE NATIONAL DETUDES RECH AEROSPATIALES [FR] ET AL.) 1 avril 2021 (2021-04-01) * figures * * revendications * * alinéas [0026] - [0047] * -----	1-10	
A	PROST DANIEL: "Measurement of the Amplitude and Polarization of the Electric Field by Electromagnetic Infrared Thermography", IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, IEEE, USA, vol. 70, no. 5, 29 décembre 2021 (2021-12-29), pages 3799-3805, XP011907751, ISSN: 0018-926X, DOI: 10.1109/TAP.2021.3137491 [extrait le 2021-12-29] * le document en entier * ----- -/--	1-10	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) G01J G01R
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
9 novembre 2022		Moulara, Guilhem	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		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	
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			

RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

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

N° d'enregistrement
national

FA 907024
FR 2203286

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	US 2020/119460 A1 (MARUO TOMOHIKO [JP] ET AL) 16 avril 2020 (2020-04-16) * figures * * revendications * * alinéas [0058] - [0072] * -----	1-10	
A	US 10 458 851 B2 (KEYSIGHT TECHNOLOGIES INC [US]) 29 octobre 2019 (2019-10-29) * figures * * revendications * * colonne 4, ligne 5 - colonne 10, ligne 13 * -----	1-10	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
9 novembre 2022		Moulara, Guilhem	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		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	
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			

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE **RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2203286 FA 907024**

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 **09-11-2022**
 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
WO 2021058895 A1		01-04-2021	CA 3153957 A1	01-04-2021
			CN 114651181 A	21-06-2022
			EP 4034894 A1	03-08-2022
			FR 3101151 A1	26-03-2021
			WO 2021058895 A1	01-04-2021

US 2020119460 A1		16-04-2020	CN 111044801 A	21-04-2020
			CN 114814385 A	29-07-2022
			JP 6836565 B2	03-03-2021
			JP 2020060535 A	16-04-2020
			US 2020119460 A1	16-04-2020

US 10458851 B2		29-10-2019	AUCUN	
