

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

①1 N° de publication : **2 827 383**

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

②1 N° d'enregistrement national : **01 09334**

⑤1 Int Cl⁷ : G 01 N 21/31, G 01 N 33/483

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 13.07.01.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 17.01.03 Bulletin 03/03.

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

⑥0 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

⑦1 Demandeur(s) : UNIVERSITE PARIS 7 - DENIS DIDE-
ROT — FR.

⑦2 Inventeur(s) : FRANGI JEAN PIERRE, JACQUE-
MOUD STEPHANE, DE ROSNY GILLES, EQUER
BERNARD, ROCA I CABARROCAS PERE et VANDE-
RHAGHEN REGIS.

⑦3 Titulaire(s) :

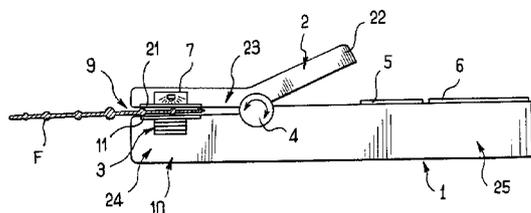
⑦4 Mandataire(s) : PONTET ET ALLANO SARL.

⑤4 DISPOSITIF ET PROCEDE DE RADIOMETRIE POUR DETERMINER IN SITU LE CONTENU BIOCHIMIQUE DE
FEUILLES, ET APPAREIL PORTATIF INTEGRANT CE DISPOSITIF.

⑤7 Dispositif de radiométrie pour déterminer in situ le
contenu biochimique de feuilles (F), comprenant des
moyens (7) pour émettre de la lumière à la surface d'une
feuille, des moyens (3) pour capter le faisceau lumineux
transmis à travers l'épaisseur de la feuille et pour délivrer
des signaux électriques représentatifs de caractéristiques
d'absorption de ladite feuille à au moins une longueur d'on-
de prédéterminée.

La lumière émise est sous la forme d'un faisceau unique
émis par une source de lumière à large bande de longueur
d'onde et les moyens capteurs comprennent un empilement
d'une pluralité de photodiodes traversées successivement
par le faisceau transmis.

Utilisation notamment dans l'agriculture de précision et
pour la recherche scientifique dans le domaine de l'environ-
nement et des écosystèmes.



FR 2 827 383 - A1



« Dispositif et procédé de radiométrie pour déterminer in situ le contenu biochimique de feuilles, et appareil portatif intégrant ce dispositif »

La présente invention concerne un dispositif de radiométrie pour
5 déterminer in situ le contenu biochimique de feuilles. Elle vise également un
procédé mis en œuvre dans ce dispositif ainsi qu'un appareil portatif
intégrant le dispositif de radiométrie selon l'invention.

Dans des domaines d'application aussi variés que l'agriculture de
précision, l'écologie à l'échelle globale ou la télédétection des ressources
10 végétales pour comprendre le fonctionnement des écosystèmes, il est très
important de connaître la composition biochimique des feuilles :
essentiellement la chlorophylle a et b, l'eau et la matière sèche. Si une
simple balance de précision et une étuve permettent de déterminer les
teneurs en eau et en matière sèche, l'extraction et le dosage de la
15 chlorophylle des feuilles font appel à des techniques de chimie analytique
beaucoup plus complexes et coûteuses. Par ailleurs, ces techniques,
toujours destructrices, sont difficiles à mettre en œuvre lorsque le lieu
d'expérimentation est éloigné du laboratoire d'analyse. En effet, une fois la
feuille sectionnée, l'eau a tendance à s'évaporer rapidement et les
20 chlorophylles tendent à se dégrader irrémédiablement. Tous ces facteurs
limitent l'échantillonnage, et donc la représentativité des mesures.

On connaît notamment par l'article « Comparison of four radiative
transfer models to simulate plant canopies reflectance : Direct and inverse
mode » de S. Jacquemoud et al. , Remote Sens Environ. 74 :471-481
25 (2000), un modèle de propriétés optiques des feuilles PROSPECT qui
requiert le paramètre de structure de la feuille, la quantité de chlorophylle,
l'épaisseur d'eau équivalente et la quantité de matière sèche pour simuler la
réflectance et la transmittance de feuilles dans le domaine optique.

L'article Ann.Chim.Fr 20 (1995) 491 de R.Vanderhaghen et al décrit
30 un capteur optique en couche mince à sélectivité spectrale et son application
à la mesure du trouble atmosphérique. Des détecteurs à sélectivité spectrale
sont réalisés à partir d'empilements de diodes en silicium amorphe
hydrogéné, polarisées à des tensions variables.

On connaît aussi un dispositif prévu pour des mesures in situ de la chlorophylle et des caroténoïdes d'une feuille, divulgué dans Proc.Int.Coll. « photosynthesis and remote sensing », Montpellier 28-31 Août 1995, de G. de Rosny et al. Ce dispositif est basé sur des mesures de réflectance ou de transmittance optique des feuilles dans la bande de longueur d'onde 400-1000 nm. La lumière réfléchie est mesurée par un empilement de semi-conducteurs silicium-germanium hydrogénés amorphes, en tirant parti de leurs propriétés de photoconduction et de filtrage optique. Les propriétés optiques des feuilles sont calculées à partir de leurs teneurs en pigments en utilisant le modèle PROSPECT. La détermination des teneurs en pigments à partir des signaux collectés par le dispositif implique la résolution d'un problème inverse.

Le document US4395042, correspondant à un brevet américain délivré à Fuji Photo Film Co Ltd le 13 Octobre 1981, divulgue un procédé pour mesurer la chlorophylle dans des feuilles, dans lequel la lumière traversant la feuille est divisée en une composante de lumière de longueur d'onde plus courte dont l'intensité varie avec la quantité de chlorophylle et en une composante de longueur d'onde plus élevée dont l'intensité ne change pas avec la quantité de chlorophylle. Les valeurs respectives de ces deux composantes sont mesurées simultanément et leur différence est utilisée pour déterminer la quantité de chlorophylle contenue dans la feuille. Ce document divulgue également un appareil de mesure mettant en œuvre ce procédé et pourvu de moyens de division spectroscopique pour diviser la lumière traversant la feuille.

Le document US6020587, correspondant à un brevet américain délivré à la National Aeronautics and Space Administration le 1^{er} Février 2000, divulgue un appareil de mesure de la chlorophylle dans lequel on collecte de la lumière réfléchie d'une plante cible et on sépare la lumière ainsi collectée en deux bandes de longueur d'onde distinctes. Ces bandes de longueur d'onde présentent des longueurs d'onde centrales de 700 nm et 840 nm. La lumière collectée dans les deux canaux est traitée en utilisant des photodétecteurs et des amplificateurs.

On connaît aussi, notamment par le document JP1049941A, un appareil portatif de mesure de la chlorophylle construit par la société Minolta Co. Ltd et commercialisé sous la désignation « SPAD-505 Chlorophyll Meter » par la société Spectrum Technologies Inc. Cet appareil met en œuvre une mesure de la transmittance d'une feuille pincée par un capteur, à 650 nm et 950 nm au moyen de deux diodes émettrices et d'une photodiode réceptrice. Un indice spectral est alors calculé à partir de ces deux valeurs de transmittance, permettant d'estimer la concentration en chlorophylle de la feuille au moyen d'une relation de calibrage préétablie par le constructeur.

Il existe dans l'état de la technique de nombreuses relations empiriques entre les propriétés optiques des feuilles et la teneur en tel ou tel constituant biochimique de ces feuilles. Toutefois, ces relations statistiques sont valables pour un nombre limité d'espèces en raison de l'influence de la structure anatomique des feuilles sur le signal réfléchi ou transmis, non seulement dans le proche infrarouge mais sur tout le spectre.

Un but principal de la présente invention est de proposer un instrument de terrain capable d'estimer instantanément et simultanément la concentration en chlorophylle, la teneur en eau et celle en matière sèche des feuilles, qui présente une précision supérieure à celle des instruments portatifs existants, notamment lorsque l'espèce végétale change, tout en étant de réalisation moins coûteuse.

Cet objectif est atteint avec un dispositif de radiométrie pour déterminer in situ le contenu biochimique de feuilles, comprenant des moyens pour émettre de la lumière, des moyens pour capter le faisceau lumineux transmis à travers l'épaisseur de ladite feuille et pour délivrer des signaux électriques représentatifs de caractéristiques d'absorption de ladite feuille à au moins une longueur d'onde prédéterminée.

Suivant l'invention, la lumière émise est sous la forme d'un faisceau unique émis par une source de lumière à large bande de longueur d'onde et les moyens capteurs comprennent un empilement d'une pluralité de photodiodes traversées successivement par le faisceau transmis.

Il est à noter que le faisceau lumineux mis en œuvre dans le dispositif de radiométrie selon l'invention est de préférence large bande (400-2000

nm), qu'il peut être éventuellement émis sous incidence sensiblement normale, par exemple par l'intermédiaire d'un faisceau de fibres optiques, ou encore émis sous incidence sensiblement isotrope par l'intermédiaire d'un diffuseur.

5 Dans une forme de réalisation avantageuse, le dispositif selon l'invention comprend en outre des moyens pour traiter les signaux électriques générés par les photodiodes empilées et délivrer des informations représentatives des caractéristiques biochimiques de la feuille.

10 Les moyens de traitement sont principalement agencés pour délivrer une information sur la teneur en chlorophylle a et b de la feuille, mais ils peuvent aussi être agencés pour délivrer une information sur la teneur en xanthophylles et/ou en caroténoïdes de la feuille, ou sur la teneur en anthocyanes.

15 On peut avantageusement prévoir que les capteurs comprennent en outre, en aval de l'empilement de photodiodes, des moyens pour détecter la teneur en eau et en matière sèche, par exemple sous la forme d'un détecteur au silicium micro-cristallin suivi d'un filtre passe-bande et d'une diode infrarouge (IR) InGaAs (Indium-Arseniure de Gallium).

20 Les moyens de traitement peuvent avantageusement inclure un circuit intégré agencé pour exécuter un ensemble de relations obtenues préalablement à partir d'un algorithme d'inversion du modèle de propriétés optiques des feuilles, comme par exemple par utilisation d'un réseau de neurones pour inverser un modèle de propriétés optiques de feuilles.

25 Suivant un autre aspect de l'invention, il est proposé un appareil portatif pour déterminer des caractéristiques de contenu biochimique d'une feuille, comprenant des moyens pour pincer ladite feuille entre une partie d'émission lumineuse et une partie de réception lumineuse, des moyens pour traiter des signaux issus de la partie de réception lumineuse, des moyens pour visualiser des informations représentatives de caractéristiques de contenu biochimique de ladite feuille, caractérisé en ce qu'il comprend en
30 outre un dispositif de radiométrie comprenant des moyens pour émettre de la lumière à la surface d'une feuille, des moyens pour capter le faisceau lumineux transmis à travers l'épaisseur de ladite feuille et pour délivrer des

signaux électriques représentatifs de caractéristiques d'absorption de ladite feuille à au moins une longueur d'onde prédéterminée, la lumière émise étant sous la forme d'un faisceau unique émise par une source de lumière à large bande de longueur d'onde et les capteurs comprenant un empilement d'une pluralité de photodiodes traversées successivement par le faisceau transmis.

L'appareil portable selon l'invention est généralement conçu pour délivrer des signaux représentatifs de caractéristiques d'absorption de la feuille à plusieurs longueurs d'onde, ou dans une ou plusieurs bandes spectrales.

Plusieurs versions peuvent être envisagées pour cet appareil portable, au nombre desquels une version dans laquelle les moyens de pince font partie intégrante du corps dudit appareil, et une version dans laquelle les moyens de pince sont à distance du corps dudit appareil et sont reliés audit corps par des moyens de liaison incluant des moyens pour transmettre les signaux électriques générés par un dispositif capteur situé dans l'une des pinces.

Pour cette seconde version d'un appareil portable selon l'invention, les moyens de liaison peuvent par exemple comprendre une tige ou perche, ou encore un câble souple.

Suivant encore un autre aspect de l'invention, il est proposé un procédé de radiométrie pour déterminer in situ le contenu biochimique de feuilles, mis en œuvre dans un dispositif selon l'invention, comprenant une émission de lumière à la surface d'une feuille, une captation du faisceau lumineux transmis à travers l'épaisseur de ladite feuille et une génération de signaux électriques représentatifs de caractéristiques d'absorption de ladite feuille à au moins une longueur d'onde prédéterminée.

Ce procédé est caractérisé en ce qu'on émet un faisceau unique à partir d'une source de lumière à large bande de longueur d'onde et en ce que les signaux électriques représentatifs de caractéristiques d'absorption sont émis à partir d'un empilement d'une pluralité de photodiodes traversées successivement par le faisceau transmis.

Le procédé de détermination selon l'invention peut avantageusement comprendre un traitement des signaux électriques représentatifs de

caractéristiques d'absorption à partir de l'inversion d'un modèle de propriétés optiques de feuilles. Ce modèle de propriétés optiques peut avoir été préalablement inversé, par exemple par utilisation d'un réseau de neurones puis implémenté dans un circuit intégré.

5 On peut ainsi disposer d'un appareil de mesure robuste, fiable et précis dont le fonctionnement repose sur une configuration optique à faisceau unique, aisée à calibrer et ne nécessitant pas d'ajustement géométrique précis, et sur un modèle de transfert radiatif connu et validé dont l'inversion, par exemple par réseau de neurones, est puissante.

10 Suivant encore un autre aspect de l'invention, on peut prévoir un appareil, portable ou non, utilisant un empilement de diodes ou bi-diodes à base de a-Si : H ou m-cSi et de leurs alliages, éventuellement associé à un détecteur IR, associé à un modèle optique, et un système d'inversion de type calcul neuronal, permettant, par la réponse spectrale entre 350 et 1500nm,
15 de connaître la composition de l'échantillon.

D'autres avantages et caractéristiques de l'invention apparaîtront à l'examen de la description détaillée d'un mode de mise en œuvre nullement limitatif, et des dessins annexés sur lesquels :

- 20 - la figure 1 est une vue latérale d'un appareil portable selon l'invention ;
- la figure 2 est une vue d'ensemble d'un appareil portable selon l'invention en cours d'utilisation sur une feuille ;
- la figure 3 est un schéma fonctionnel d'un exemple de réalisation d'un appareil portable selon l'invention ;
- 25 - les figures 4a à 4c illustrent trois versions d'un appareil portable selon l'invention ;
- la figure 5A illustre les étapes préalables de réalisation du module de traitement des signaux optiques captés par l'appareil portable selon l'invention ;
- 30 - la figure 5B illustre les étapes principales du procédé de détermination du contenu biochimique mis en œuvre dans l'appareil portable selon l'invention ; et

- la figure 6 illustre le principe de radiométrie mis en œuvre dans un dispositif selon l'invention.

On va maintenant décrire, en référence aux figures 1 et 2, un exemple non limitatif de réalisation d'un appareil portatif de détermination selon l'invention. Cet appareil 1 comprend un boîtier 10 comportant une partie de 5 détection 9 formant pince pour recevoir une feuille F à mesurer et une partie d'interface 25 comportant sur sa face supérieure un écran de visualisation 5 et un clavier de commande 6. La partie de détection 9 comprend une pièce de pince fixe 24 faisant partie intégrante du boîtier 10 et une pièce de pince 10 mobile 23 comportant une partie de levier 22 pourvue d'un axe de rotation 4 incluant des moyens de rappel et actionnée pour ouvrir la partie de détection 9 afin d'y insérer une feuille à mesurer. La partie de pince mobile 23 inclut un dispositif d'éclairage 7 agencé pour délivrer, à travers la face intérieure 21 15 transparente de ladite partie de pince mobile 23, un flux lumineux sur la face intérieure 21 et dirigé vers la partie de pince fixe 24 qui inclut un dispositif capteur 3 disposé de façon à être sensiblement en vis à vis du dispositif d'éclairage 7 lorsque que la pince 9 est fermée, et dont la face active est 20 disposée contre la face intérieure 11 transparente de la partie de pince fixe 24. Le dispositif d'éclairage 7 est par exemple constitué d'une source de lumière à large bande produite par une lampe à incandescence, mais on peut aussi prévoir d'utiliser une source de lumière naturelle, ou une association de diodes électroluminescentes pour générer un spectre large bande. Ce dispositif d'éclairage 7 peut par exemple inclure un diffuseur pour 25 procurer un éclairage de la surface de la feuille sous incidence sensiblement isotrope.

On peut aussi envisager un obturateur (ou modulateur) sur le trajet du faisceau optique traversant la feuille, en vue d'améliorer la sensibilité du dispositif, éventuellement associé à une autre illumination du détecteur qui ne traverserait pas la feuille.

30 Un appareil portatif 1 selon l'invention présente, dans sa structure interne, un module électronique de mesure 31 associé au dispositif capteur 3, un module de contrôle et de traitement numérique 30 à base de circuit intégré tel qu'un microcontrôleur, un clavier de commande 6, un module

d'affichage 5, une unité de stockage de données 33, un module de transmission 34 (non filaire ou filaire), et une source d'énergie autonome 32 comportant une pile ou une batterie pour alimenter la source lumineuse 7 et l'ensemble des équipements électroniques et numériques de l'appareil portatif. La source d'énergie peut aussi être externe.

Le dispositif capteur 3 comprend des photodétecteurs à bandes semi-étroites constitués par un empilement de photodiodes en alliages divers silicium-germanium-carbone amorphe, dont il a été démontré antérieurement qu'il pouvait présenter une résolution spectrale suffisante pour déterminer le contenu en chlorophylle des feuilles. L'empilement de photodiodes est en outre complété par un détecteur au silicium micro-cristallin en couche mince suivi d'un filtre passe bande et d'une photodiode de type InGaAs. Cette configuration optique à faisceau unique est facile à calibrer et ne nécessite pas d'ajustement géométrique précis, ce qui permet de réaliser un appareil robuste et fiable. Les épaisseurs actives de chaque élément de photodiode sont optimisées et peuvent varier entre 0,1 μm et 2 μm . Il est à noter que l'on peut aussi prévoir l'emploi d'une bi-diode dont la sélectivité spectrale varie en fonction de la tension appliquée. Dans ce cas, il peut être installé une deuxième source de lumière, qui peut être monochromatique et qui illumine directement les détecteurs sans traverser la feuille pour fournir un courant de polarisation.

Pour la réalisation du dispositif capteur par empilement, on peut prévoir, comme le divulgue notamment la publication « Proc. Int. Coll. Photosynthesis and Remote Sensing » Montpellier 28-31 Août 1995, l'utilisation de photodiodes *pin* en couches minces en silicium amorphe (a-Si) ou en alliage silicium-germanium (a-Si:Ge). Dans un dispositif capteur 3, la lumière transmise à travers la feuille F arrive sur une première couche P1 de photodiode en silicium amorphe, à titre d'exemple d'épaisseur 0,3 μm , et les composantes bleues et vertes du spectre de lumière sont préférentiellement absorbées et converties en un courant électrique qui est mesuré. La lumière transmise en sortie de la première couche P1 et appauvrie en bleu et en vert traverse ensuite une seconde couche P2 de photodiode en silicium amorphe, à titre d'exemple non limitatif de 0,8 μm

d'épaisseur, dans laquelle la composante rouge est partiellement absorbée et convertie en un courant électrique qui est également mesuré. Une troisième couche P3 de photodiode en silicium-germanium amorphe, à titre d'exemple non limitatif d'épaisseur 1,6 μm , suivie d'une quatrième couche P4
5 de photodiode également en silicium amorphe-germanium, à titre d'exemple non limitatif d'épaisseur 0,8 μm , est prévue pour absorber la composante infra-rouge du spectre.

Le principe du dispositif radiomètre selon l'invention est basé sur la dépendance du spectre de transmission optique d'une feuille avec sa
10 constitution biochimique. L'étude des propriétés optiques des feuilles – réflectance, transmittance et absorptance – a depuis longtemps montré que ces propriétés optiques dépendaient principalement de deux facteurs : leur structure anatomique et leur composition biochimique. Les effets de ces facteurs varient en fonction du domaine de longueur d'onde: le visible (400-
15 700 nm) se caractérise par une forte absorption de la lumière par les pigments chlorophylliens qui participent à la photosynthèse ; le proche infrarouge (700-1200 nm) est au contraire très peu sensible à la composition biochimique de la feuille mais informatif sur sa structure anatomique ; enfin le rayonnement moyen infrarouge (1200-2500 nm) est absorbé par l'eau et,
20 dans une moindre mesure, par la matière sèche qui représente entre 10 et 40% du poids frais de la feuille.

Les signaux générés par le dispositif capteur 3 sont filtrés et traités puis convertis sous forme de données numériques au sein du module électronique 31. Ces données numériques sont ensuite traitées par un
25 programme stocké dans le microcontrôleur 30 et implémentant des relations issues de l'inversion du modèle PROSPECT de propriétés optiques des feuilles.

Ce modèle est aujourd'hui largement utilisé en télédétection des ressources terrestres. Il calcule la réflectance et la transmittance spectrale
30 d'une feuille verte en fonction d'un paramètre de structure N et des concentrations en chlorophylle, eau et matière sèche. En inversion, on peut donc estimer ces paramètres, par exemple à partir des signaux captés par les photodiodes. Le modèle PROSPECT a été préalablement inversé en

utilisant par exemple un réseau de neurones puis les formules résultant de cette inversion ont été inscrites dans une zone de mémoire du microcontrôleur, en référence à la figure 5A.

5 Le modèle PROSPECT peut aussi être mis en œuvre pour sélectionner la configuration optimale des bandes spectrales (nombre, position et largeur) du dispositif de radiométrie selon l'invention. Cette configuration optimale peut être sélectionnée en fonction d'impératifs techniques mais aussi par une analyse de sensibilité du modèle *via* des plans d'expériences numériques. Ces derniers, couramment utilisés dans l'industrie où l'acquisition de
10 connaissances est basée sur la réalisation d'essais, sont désormais appliqués en modélisation afin d'extraire une information quantitative à partir d'un nombre limité de simulations.

Le procédé de détermination de la composition biochimique d'une feuille comporte, en référence à la figure 5B, une étape d'illumination de la
15 feuille par de lumière naturelle ou artificielle à large bande et de réception du faisceau transmis à travers l'épaisseur de la feuille, une étape d'acquisition des signaux électriques délivrés par le dispositif capteur constitué de l'empilement de photodiodes traversées par le faisceau transmis, une étape de traitement de ces signaux par le module de traitement intégrant le modèle
20 inverse, une étape de fourniture par ce module de traitement des informations sur la teneur en chlorophylle a+b, en eau et en matière sèche, et des étapes sélectives de visualisation, de stockage dans une mémoire tampon au sein de l'appareil portable ou de télétransmission par filaire ou non filaire.

25 On va maintenant décrire, en référence aux figures précitées, un exemple de mise en œuvre et d'utilisation d'un appareil portable selon l'invention. Lors de la fabrication de l'appareil, le microcontrôleur 30 a été programmé pour exécuter un ensemble de fonctions représentatives de l'inversion du modèle PROSPECT et obtenues à partir d'un réseau de
30 neurones.

En utilisation, l'opérateur tenant dans l'une de ses mains l'appareil portable 1 selon l'invention approche celui-ci d'une feuille F dont il a choisi de déterminer le contenu biochimique et pince cette feuille. Il lance alors une

séquence de mesure, en entrant par exemple une commande sur le clavier 6. Les signaux délivrés par le dispositif capteur 3 sont immédiatement traités pour fournir un ensemble d'informations sur le contenu biochimique de la feuille directement exploitables et affichables sur l'écran 5, par exemple sous la forme d'un menu déroulant dans lequel chaque information est successivement affichée. L'opérateur peut aussi commander un stockage des informations de contenu biochimique avec horodatage et localisation dans l'unité de stockage 33 de l'appareil portatif 1. Une transmission par voie non filaire, par exemple via un module de radiocommunication 34 ou via un module de communication mobile, peut aussi être prévue.

Plusieurs versions d'appareil portatif selon l'invention peuvent être proposées en fonction du contexte de mesure, comme l'illustrent à titre d'exemples non limitatifs les figures 4a, 4b et 4c. Ainsi, dans une première version (4a) correspondant à une configuration où l'opérateur peut avoir directement accès à la feuille à mesurer, l'appareil portatif 40a présente une structure compacte, telle que celle correspondant aux figures 1 et 2 précitées, dans laquelle la partie de pince 42a fait corps avec la partie de traitement et de visualisation 41a.

Dans une seconde version (4b) correspondant à une situation de mesure dans laquelle l'opérateur ne peut directement approcher la feuille à mesurer, l'appareil portatif 40b est pourvue d'une tige 43b, télescopique ou de longueur fixe, reliant la partie de pince 42b à la partie de traitement et de visualisation 41b. On peut aussi prévoir (4c) un appareil portatif 40c comportant une câble de liaison souple 43c pour relier la partie de pince 42c à la partie de traitement et de visualisation 41c.

Dans les deux versions précitées dans lesquelles la partie de pince est déportée par rapport au boîtier incluant la partie de traitement et de visualisation, on peut prévoir que la source lumineuse soit située dans le boîtier et que le flux lumineux généré par cette source soit transmis jusqu'à l'une des pinces au moyen d'un guide de lumière réalisé par exemple au moyen d'un fibre optique ou d'un faisceau de fibres optiques.

Bien sûr, l'invention n'est pas limitée aux exemples qui viennent d'être décrits et de nombreux aménagements peuvent être apportés à ces

exemples sans sortir du cadre de l'invention. En particulier, on peut prévoir, pour un appareil portatif selon l'invention, bien d'autres agencements que ceux représentés sur les figures de la description.

REVENDEICATIONS

- 5 1. Dispositif de radiométrie pour déterminer in situ le contenu biochimique de
feuilles (F), comprenant des moyens (7) pour émettre de la lumière à la
surface d'une feuille, des moyens (3) pour capter le faisceau lumineux
transmis à travers l'épaisseur de ladite feuille et pour délivrer des signaux
électriques représentatifs de caractéristiques d'absorption de ladite feuille à
10 au moins une longueur d'onde prédéterminée, caractérisé en ce que la
lumière émise est sous la forme d'un faisceau unique émise par une source
de lumière à large bande de longueur d'onde et en ce que les moyens
capteurs comprennent un empilement d'une pluralité de photodiodes (P1-P4)
traversées successivement par le faisceau transmis.
- 15 2. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comprend en
outre des moyens (30) pour traiter les signaux électriques générés par les
photodiodes empilées et délivrer des informations représentatives de
caractéristiques biochimiques de la feuille.
- 20 3. Dispositif selon la revendication 2, caractérisé en ce que les moyens de
traitement sont agencés pour délivrer une information sur la teneur en
chlorophylle a et b de la feuille.
- 25 4. Dispositif selon l'une des revendications 2 ou 3, caractérisé en ce que les
moyens de traitement sont agencés pour délivrer une information sur la
teneur en hexanthophylles et/ou en caroténoïdes de la feuille.
- 30 5. Dispositif selon l'une des revendications 2 à 4, caractérisé en ce que les
moyens de traitement sont agencés pour délivrer une information sur la
teneur en anthocyanes de la feuille.
6. Dispositif selon l'une des revendications 2 à 5, caractérisé en ce que les
moyens capteurs comprennent en outre, en aval de l'empilement de

l'empilement de photodiodes, des moyens pour détecter la teneur en eau et en matière sèche.

5 7. Dispositif selon la revendication 6, caractérisé en ce que les moyens de détection de la teneur en eau et en matière sèche comprennent un détecteur au silicium micro-cristallin suivi d'un filtre passe-bande et d'une photodiode IR telle que InGaAs (Indium-Arseniure de Gallium).

10 8. Dispositif selon l'une des revendications 2 à 7, caractérisé en ce que les moyens de traitement comprennent un circuit intégré agencé pour exécuter un ensemble de relations pour inverser un modèle de propriétés optiques de feuilles.

15 9. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que les moyens d'émission de lumière comprennent un obturateur de la lumière émise.

20 10. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que les moyens d'émission de lumière comprennent un modulateur sur le trajet de la lumière émise.

25 11. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend en outre des moyens pour éclairer directement ou indirectement l'empilement de photodiodes par une autre source lumineuse.

30 12. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que les photodiodes sont à base de silicium amorphe ou microcristallin hydrogéné et de leurs alliages Germanium ou Carbone.

13. Dispositif selon la revendication 12, caractérisé en ce que les photodiodes comprennent des diodes simples.

14. Dispositif selon l'une des revendications 12 ou 13, caractérisé en ce que les photodiodes comprennent des bi-diodes.
15. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que les moyens d'émission lumineuse sont agencés pour émettre un faisceau lumineux sous incidence sensiblement normale à la surface de la feuille.
16. Dispositif selon la revendication 15, caractérisé en ce que les moyens d'émission lumineuse comprennent un faisceau de fibres optiques pour conduire le faisceau lumineux sous incidence sensiblement normale à la surface de la feuille.
17. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 14, caractérisé en ce que les moyens d'émission lumineuse sont agencés pour émettre un faisceau lumineux sous incidence sensiblement isotrope à la surface de la feuille.
18. Dispositif selon la revendication 17, caractérisé en ce que les moyens d'émission lumineuse comprennent un diffuseur pour produire un faisceau lumineux sous incidence sensiblement isotrope à la surface de la feuille.
19. Appareil portatif (1) pour déterminer des caractéristiques de contenu biochimique d'une feuille (F), comprenant des moyens (23, 24) pour pincer la dite feuille (F) entre une partie d'émission lumineuse (9) et une partie de réception lumineuse (3), des moyens (30) pour traiter des signaux issus de la partie de réception lumineuse, des moyens (5) pour visualiser des informations représentatives de caractéristiques de contenu biochimique de ladite feuille (F), caractérisé en ce qu'il comprend en outre un dispositif de radiométrie comprenant des moyens (7) pour émettre de la lumière à la surface d'une feuille, des moyens (3) pour capter le faisceau lumineux transmis à travers l'épaisseur de ladite feuille (F) et pour délivrer des signaux électriques représentatifs de caractéristiques d'absorption de ladite feuille à

au moins une longueur d'onde prédéterminée, la lumière émise étant sous la forme d'un faisceau unique émise par une source de lumière à large bande de longueur d'onde et les moyens capteurs (3) comprenant un empilement d'une pluralité de photodiodes (P1-P4) traversées successivement par le
5 faisceau transmis.

20. Appareil selon la revendication 19, dans lequel le faisceau unique de lumière est obtenu par une superposition de diverses sources telles que des diodes électroluminescentes.

10

21. Appareil portatif (1) selon l'une des revendications 19 ou 20, caractérisé en ce que les moyens de pince font partie intégrante du corps dudit appareil.

22. Appareil portatif (40b, 40c) selon l'une des revendications 19 à 21,
15 caractérisé en ce que les moyens de pince (42b, 42c) sont à distance du corps (41b, 41c) dudit appareil et sont reliés audit corps par des moyens de liaison (43b, 43c) incluant des moyens pour transmettre les signaux électriques générés par un dispositif capteur situé dans l'une des pinces.

20 23. Appareil portatif (40b) selon la revendication 22, caractérisé en ce que les moyens de liaison comprennent une tige ou perche (43b).

24. Appareil portatif (40c) selon la revendication 22, caractérisé en ce que les moyens de liaison comprennent un câble souple (43c).

25

25. Appareil utilisant un empilement de diodes ou bi-diodes à base de a-Si : H ou m-cSi et de leurs alliages, et un système d'inversion de type calcul neuronal, permettant, par une réponse spectrale entre 350 et 1500nm, de connaître la composition d'un échantillon.

30

26. Appareil selon la revendication 25, caractérisé en ce qu'il comprend un détecteur IR associé à un modèle optique,

27. Procédé de radiométrie pour déterminer in situ le contenu biochimique de feuilles, mis en œuvre dans un dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 18, comprenant une émission de lumière à la surface d'une feuille, une captation du faisceau lumineux transmis à travers l'épaisseur de ladite feuille et une génération de signaux électriques représentatifs de caractéristiques d'absorption de ladite feuille à au moins une longueur d'onde prédéterminée, caractérisé en ce qu'on émet un faisceau unique à partir d'une source de lumière à large bande de longueur d'onde et en ce que les signaux électriques représentatifs de caractéristiques d'absorption sont émis à partir d'un empilement d'une pluralité de photodiodes traversées successivement par le faisceau transmis.

28. Procédé selon la revendication 27, caractérisé en ce qu'il comprend en outre un traitement des signaux électriques représentatifs de caractéristiques d'absorption à partir de l'inversion d'un modèle de propriétés optiques de feuilles.

29. Procédé selon la revendication 28, caractérisé en ce que le modèle de propriétés optiques a été préalablement inversé par utilisation d'un réseau de neurones puis implémenté dans un circuit intégré.

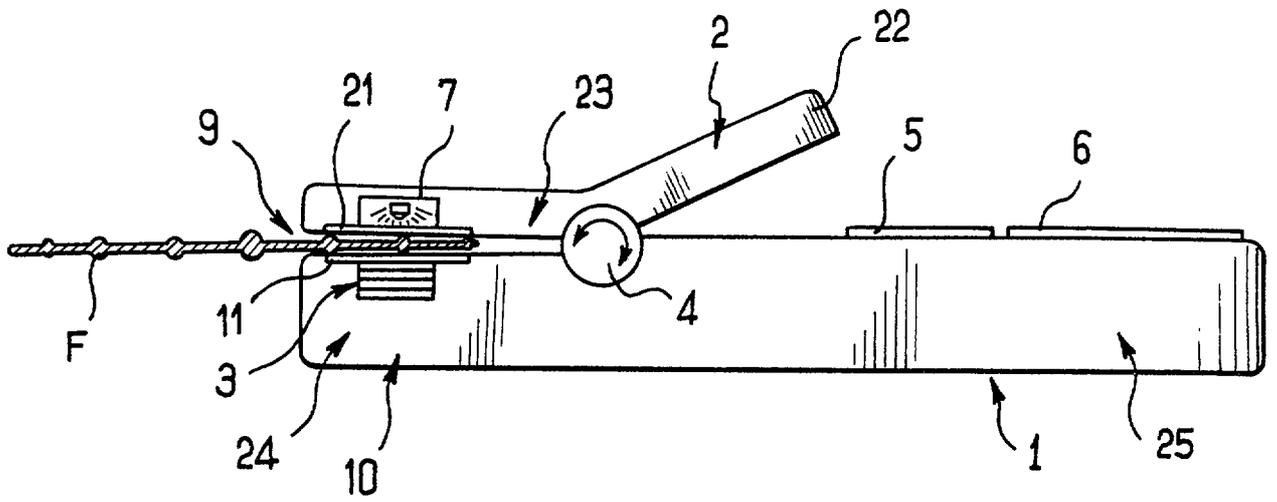


FIG. 1

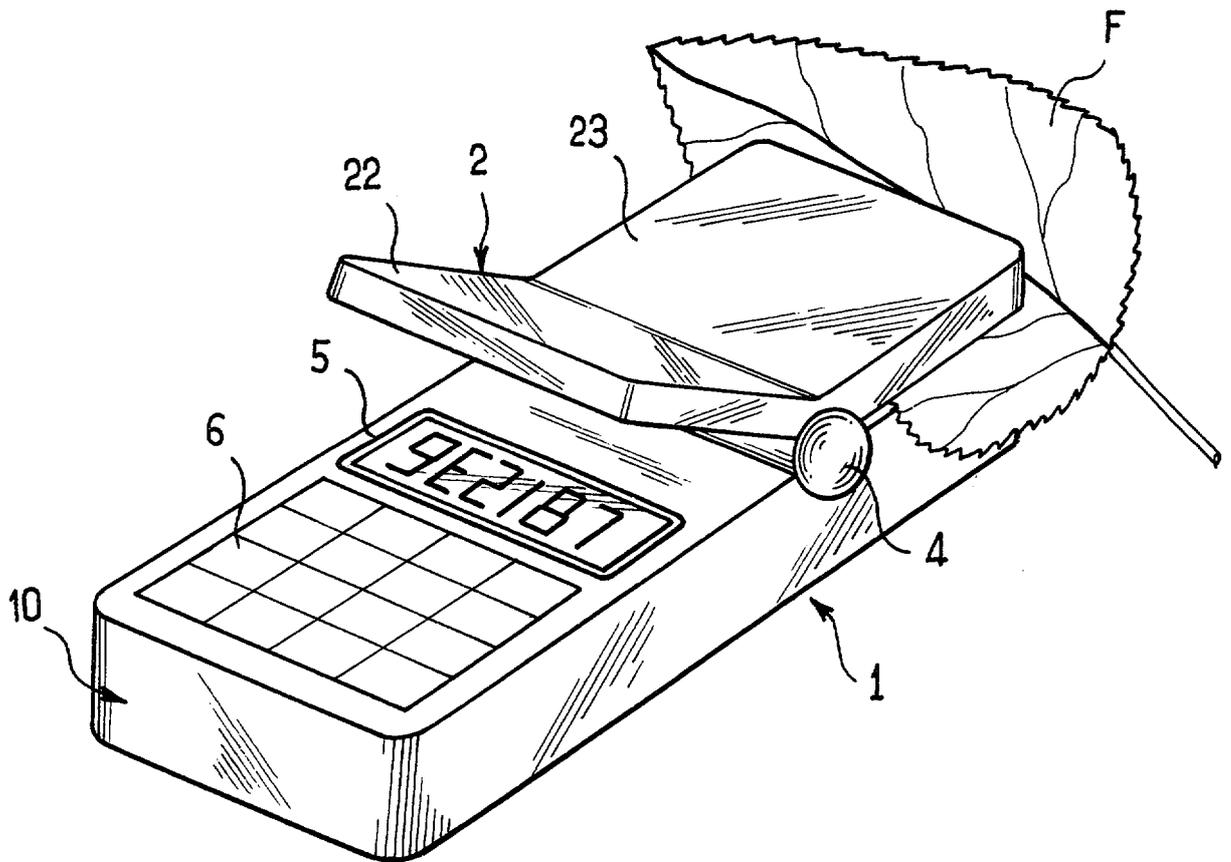


FIG. 2

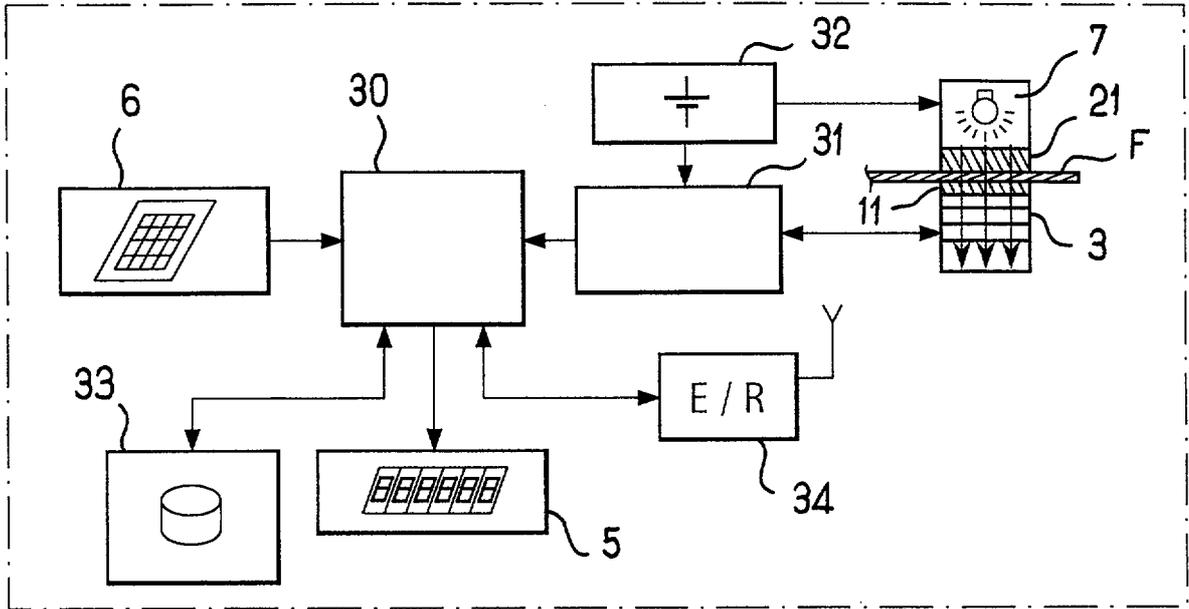


FIG. 3

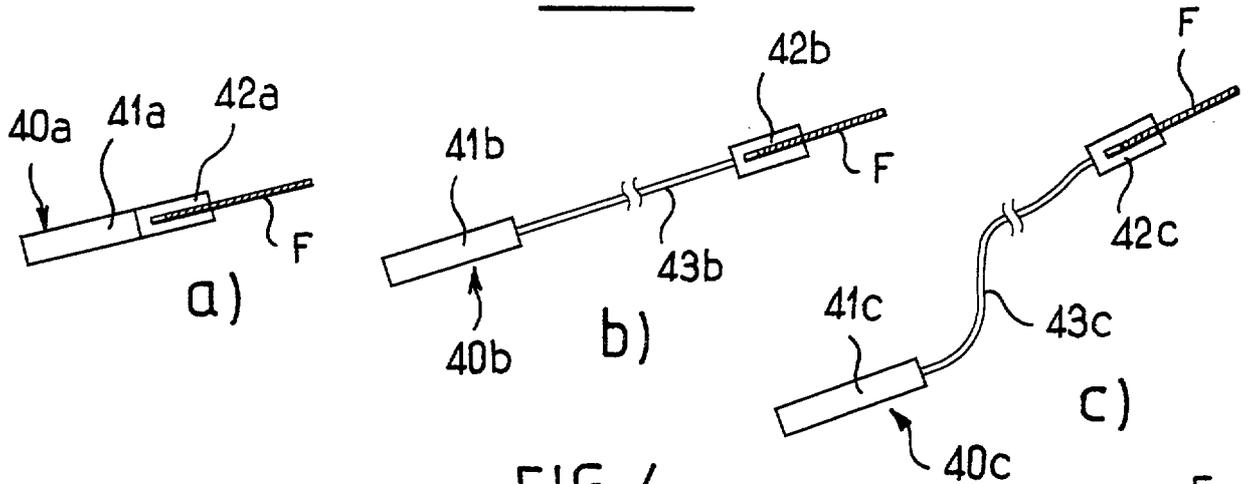


FIG. 4

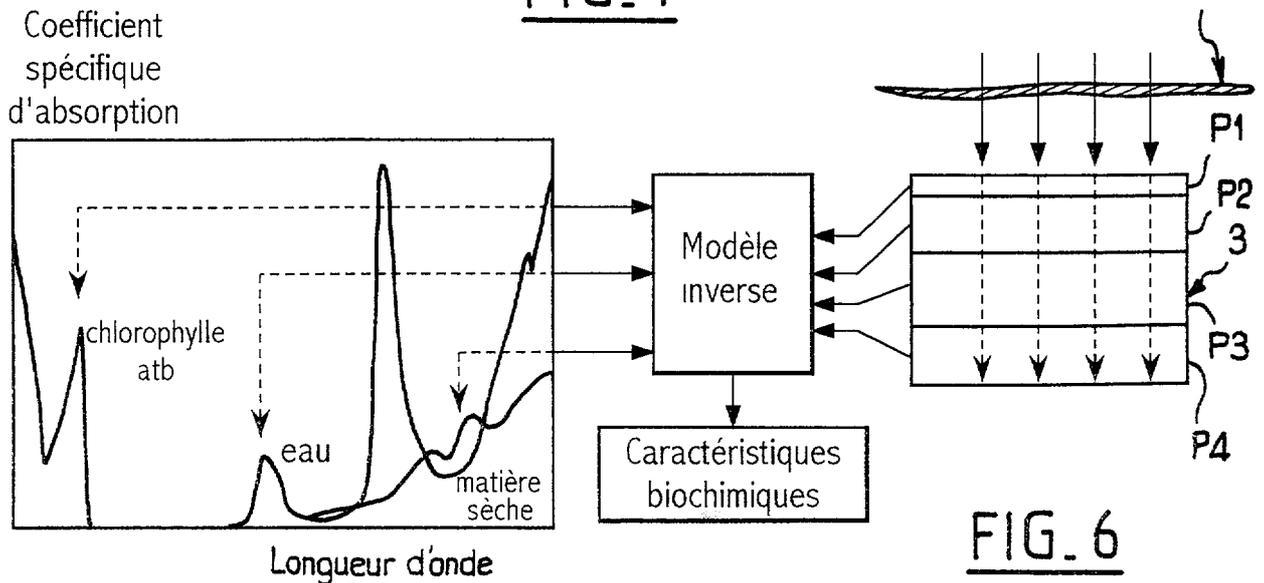
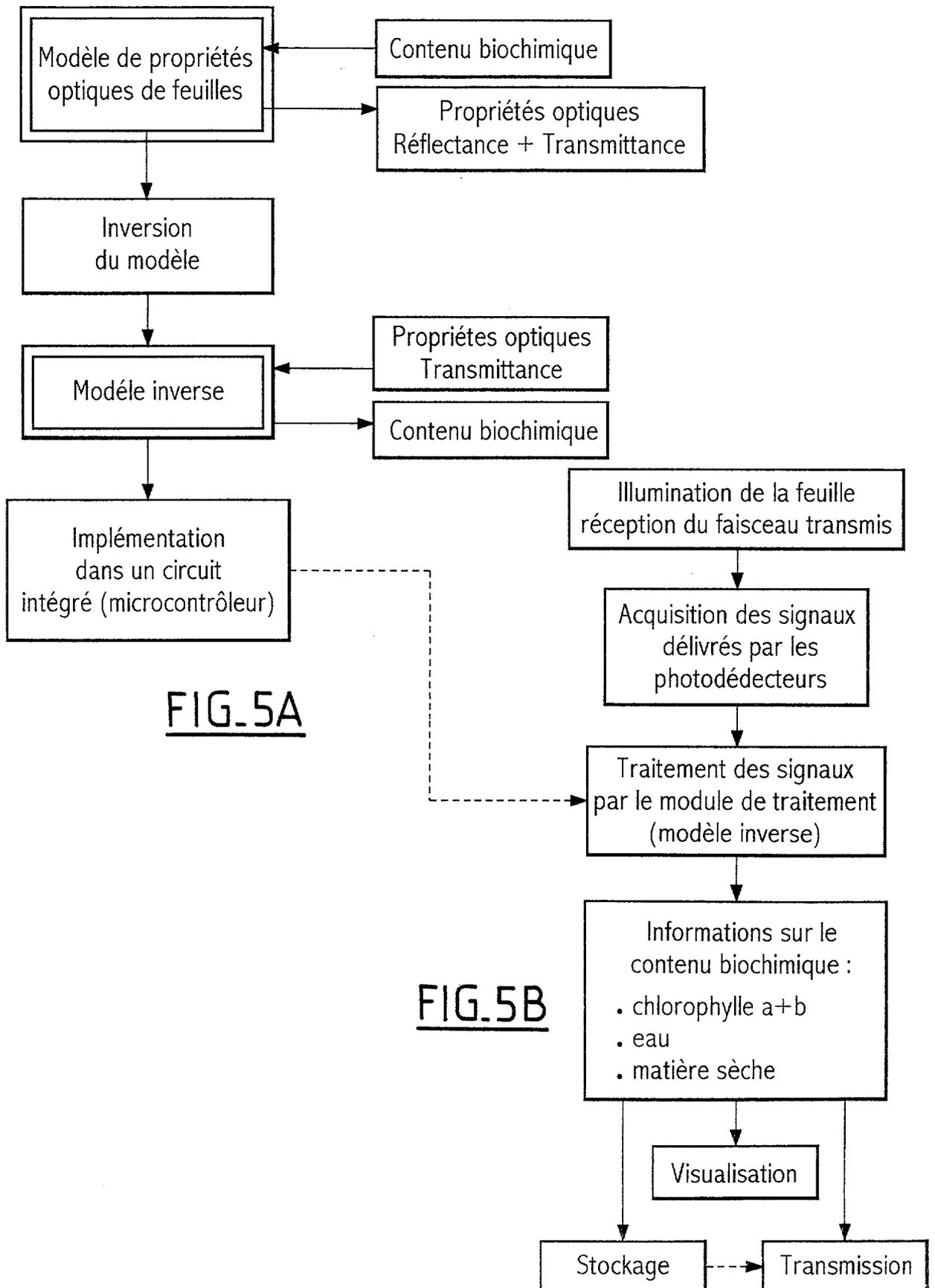


FIG. 6

3 / 3





**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement national

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

FA 605678
FR 0109334

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		
D,X	G. DE ROSNY, R. VANDERHAGHEN, F.BARET, B.EQUER, J.P. FRANGI: "A device for in situ measurements of leaf chlorophyll and carotenoid concentrations" INT.COLL. PHOTOSYNTHESIS AND REMOTE SENSING, pages 135-141, XP008002286 Montpellier	25	
Y	* page 135, alinéa 6 - page 137, alinéa 2 *	1-4,12, 13,15, 17,27-29	
A	* page 138, alinéa 3 - page 139, alinéa 3 * * page 140, alinéa 1 - alinéa 2 *	26-29	
Y	B.HOSGOOD ET AL: "The JRC Leaf Optical Properties Experiment (LOPEX'93)" INTERNET ARTICLE, PUBLISHED BY EUROPEAN COMMISSION, DG XIII, CL-NA-16095-EN-C, 'en ligne! pages 1-14, XP002196872 Extrait de l'Internet: <URL:http://www.sigu7.jussieu.fr/Led/LED_1opex.htm> 'extrait le 2002-04-12!	1-4,12, 13,15, 17,27-29	
A	* page 3, alinéa 1 - alinéa 2 *	6,7,27	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (Int.CL.7) G01N H01L G03G G01J
A	EP 0 434 644 A (CONSIGLIO NAZIONALE RICERCHÉ) 26 juin 1991 (1991-06-26) * abrégé *	16,22,24	
D,A	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 013, no. 250 (P-882), 12 juin 1989 (1989-06-12) & JP 01 049941 A (MINOLTA CAMERA CO LTD), 27 février 1989 (1989-02-27) * abrégé *	19-22	
		-/--	
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
22 avril 2002		Verdoodt, E	
<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</p> <p>& : membre de la même famille, document correspondant</p>			

3

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)

**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

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

N° d'enregistrement
national

FA 605678
FR 0109334

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		
D,A	S.JACQUEMOUD ET AL: "Comparison of four radiative transfer models to simulate plant canopies reflectance: Direct and Inverse Mode" REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, vol. 74, 2000, pages 471-481, XP002196873 * figure 1 * * page 473, colonne de gauche, ligne 1 - dernière ligne *	1,19,25, 27	
D,A	VANDERHAGHEN R ET AL: "Thin film optical sensor with spectral selectivity. Atmospheric turbidity application" SYMPOSIUM SENSORS: MATERIALS AND DETECTION DEVICES , SAINT-ETIENNE, FRANCE, 16-17 MAY 1995, vol. 20, no. 7-8, pages 491-494, XP008002255 Annales de Chimie (Science des Matériaux), 1995, Masson, France ISSN: 0151-9107 * le document en entier *	14	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (Int.CL.7)
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
22 avril 2002		Verdoedt, E	
<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>			

3

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 0109334 FA 605678**

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 22-04-2002

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
EP 0434644	A	26-06-1991	IT 1236230 B 25-01-1993
			AT 152518 T 15-05-1997
			DE 69030617 D1 05-06-1997
			DE 69030617 T2 25-09-1997
			EP 0434644 A2 26-06-1991
JP 01049941	A	27-02-1989	AUCUN