

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 28.10.96.

30 Priorité :

43 Date de la mise à disposition du public de la demande : 30.04.98 Bulletin 98/18.

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) : NIKOLOVSKI JEAN PIERRE — FR
et CASSAGNÉ FRANCIS — FR.

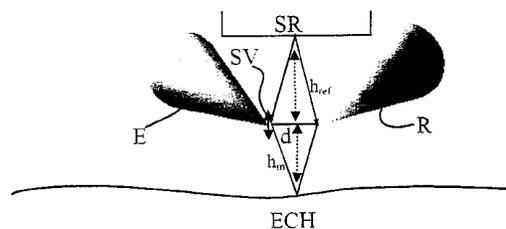
72 Inventeur(s) : NIKOLOVSKI JEAN PIERRE.

73 Titulaire(s) : .

74 Mandataire : REGIMBEAU.

54 DISPOSITIF DE CONTROLE DIMENSIONNEL SANS CONTACT ULTRASONORE.

57 L'invention propose un dispositif de contrôle dimensionnel par génération et détection locale et sélective d'ultrasons dans un gaz, exploitant un mode de propagation antisymétrique dans une pointe effilée. Le dispositif est constitué d'une tête de lecture constituée d'un émetteur E dont l'extrémité vibre selon une direction privilégiée SV et d'un récepteur R extrêmement sensible dans cette même direction, lesdits émetteur et récepteur étant constitués de transducteurs électromécaniques couplés à des pointes de focalisation. Le dispositif détermine, sans contact mécanique, la distance h_m séparant la tête de lecture d'une surface de qualité optique quelconque et d'impédance mécanique très variable en utilisant le couplage du champ ultrasonore entre la tête de lecture et la surface de l'objet sondé. La présence d'une surface de référence SR située à une distance h_{ref} permet d'effectuer une mesure de la distance h_m indépendamment de la nature ainsi que de la température du gaz environnant. Une combinaison de deux têtes de lecture situées de part et d'autre des faces d'un objet permet d'en déterminer son épaisseur.



Il existe dans l'industrie un besoin en outils de contrôle dimensionnel, de profilométrie, sans contact et complémentaires de ceux proposés par la mécanique ou l'optique. En profilométrie, la surface à contrôler n'est pas toujours bien réfléchissante optiquement, et la rugosité à contrôler ainsi que l'étendue sur laquelle la mesure doit être effectuée ne sont pas toujours adaptées à une technique optique. Mécaniquement, il n'est pas toujours possible de mettre un échantillon en contact avec un palpeur micrométrique, simplement parce que la structure à contrôler est trop fragile pour résister à la contrainte exercée par le palpeur.

La présente invention propose un moyen d'accéder, sans contact, au contrôle dimensionnel voire à la rugosité de surfaces de qualité optique ainsi que d'impédance mécanique très variables.

Ainsi l'invention concerne un dispositif de mesure sans contact de la distance séparant une surface élémentaire d'une tête de lecture constituée d'un ou de plusieurs émetteurs ainsi que d'un ou de plusieurs récepteurs constitués de transducteurs électromécaniques X couplés à des amplificateurs mécaniques C (figure 1). L'objet sondé ECH (figure 3) présente une impédance mécanique différente de celle du milieu dans lequel se propagent les ultrasons engendrés au niveau de la tête de lecture. Dans la présente invention, le milieu de propagation entre l'objet sondé et la tête de lecture est de l'air ambiant, mais n'importe quel autre milieu gazeux pourrait convenir. Les amplificateurs mécaniques sont des pointes pleines de profil en général conique et de bande passante adaptée à l'amplification d'un déplacement ultrasonore de type impulsionnel ou harmonique, selon un mode guidé antisymétrique tel que par exemple un mode de flexion, c'est à dire un mode dont la composante de déplacement orthogonale à l'axe de symétrie cylindrique du cône est antisymétrique par rapport à cet axe. L'utilisation d'un mode antisymétrique couplé à une pointe de focalisation présente l'avantage unique de pouvoir engendrer avec une intensité suffisante, localement et de façon directive, un champ ultrasonore CHP (figure 2) que l'on oriente en direction de l'objet à sonder. La mesure du temps de vol en régime impulsionnel ou de l'amplitude et de la phase de l'écho en régime harmonique renvoyé par la surface sondée permet de mesurer la distance séparant un élément de surface SS (figure 8) de l'objet sondé de l'extrémité de la pointe de focalisation.

D'autres aspects, buts et avantages de la présente invention apparaîtront mieux à la lecture de la description détaillée suivante de formes et de réalisations préférées de celle-ci, donnée à titre d'exemple non limitatif et faite en référence aux dessins annexés, sur lesquels :

La figure 1 illustre par un schéma en coupe axiale un cas où une pointe C est couplée à un élément piézoélectrique X placé dans un compartiment cylindrique Cpt, le compartiment et la

pointe étant usinés dans la même tige métallique afin d'optimiser le transfert de la contrainte mécanique entre l'élément piézoélectrique X et la pointe C,

la figure 2 est une représentation qualitative du diagramme de directivité en émission comme en réception du champ ultrasonore CHP engendré dans l'air par le système de la figure 1,
5 lorsque l'extrémité de la pointe vibre selon une direction SV.

la figure 3 illustre schématiquement un moyen permettant de modifier localement la direction du maximum d'émission d'un système identique à celui de la figure 1 en usinant l'extrémité du cône en biseau,

la figure 4 représente schématiquement un exemple permettant d'augmenter la directivité
10 d'un système émetteur récepteur par polissage de l'extrémité d'une pointe,

la figure 5 est une vue schématique en coupe axiale illustrant un cas de couplage direct maximal entre deux systèmes identiques à celui de la figure 1, l'un jouant le rôle d'émetteur E, l'autre celui de récepteur R,

la figure 6 est une vue schématique en coupe axiale illustrant le cas d'un couplage direct
15 localisé entre deux systèmes identiques à celui de la figure 1,

la figure 7 illustre schématiquement selon une vue en coupe axiale le cas où les génératrices intérieures des pointes coniques forment un angle aigu α dont dépend la position de la zone de couplage direct entre les pointes correspondant au plus court chemin acoustique reliant les bases des pointes,

la figure 8 illustre une configuration à deux pointes en opposition permettant de détecter la
20 présence d'une surface de petites dimensions par couplage indirect entre les deux pointes,

la figure 9 illustre schématiquement le principe de mesure de la distance séparant une tête de lecture de la surface d'un échantillon, de façon indépendante de la nature et de la température du gaz environnant,

la figure 10 illustre schématiquement et en perspective un moyen simple pour obtenir une
25 surface courbe de référence dont l'extrémité du rayon de courbure associé se situe sur l'axe de symétrie cylindrique de la pointe effilée,

la figure 11 illustre schématiquement un profilomètre fonctionnant en régime sinusoïdal et utilisant une méthode de perturbation du champ de couplage entre les pointes et la surface sondée à l'aide d'un écran vertical intercalé entre les deux pointes et dont la distance par rapport à
30 la surface sondée est modulée,

la figure 12 représente schématiquement un système à deux têtes de lecture permettant de mesurer sans contact l'épaisseur d'un objet,

la figure 13 représente un schéma de câblage du générateur électrique d'excitation du transducteur émetteur,

la figure 14 est un schéma-bloc d'un dispositif de détection de position sans contact, selon l'invention.

5 On notera préliminairement que, d'une figure à l'autre, des éléments ou parties identiques similaires sont désignés dans la mesure du possible par les mêmes signes de référence.

On engendre dans une pointe pleine effilée C, par exemple un cône plein, un paquet d'ondes ultrasonores se propageant selon un mode de propagation antisymétrique par rapport à l'axe de symétrie cylindrique de la pointe (typiquement un mode de flexion). Ceci s'obtient par
10 exemple à l'aide d'une céramique ferroélectrique à polarisation alternée collée sur la base plane du cône ¹. Le demi-angle au sommet de la pointe est choisi de façon à disposer d'une bande passante suffisante ne déformant pas ou très peu la forme du paquet d'ondes qui est concentré à l'extrémité du cône. En cette extrémité, le vecteur déplacement de matière possède une polarisation rectiligne SV orientée perpendiculairement par rapport au segment délimitant la
15 polarisation alternée de la céramique collée sur la base plane du cône.

Lorsque le matériau solide constituant le cône est caractérisé par une faible atténuation mécanique et possède une relativement faible impédance acoustique, une partie non négligeable de la vibration mécanique qui se propage dans la pointe est transmise dans l'air.

L'aspect inventif de ce système réside, d'une part, dans l'effet de focalisation produit par le
20 profil effilé peu dispersif de la pointe, d'autre part, dans l'utilisation d'une onde transversale qui permet d'engendrer un diagramme de rayonnement dans l'air directif et intense au voisinage de la pointe comme illustré sur la figure 2, enfin dans le montage de l'élément piézoélectrique X et de la pointe de focalisation qui assure à la fois une bonne solidité du montage au niveau de la base de la pointe et un transfert optimal de la contrainte engendrée par l'élément piézoélectrique X
25 dans la pointe de focalisation. La figure 1 illustre comment un transfert optimal de la contrainte dans la pointe conique C est assuré lorsque la pointe et le compartiment C_{pt} abritant l'élément piézoélectrique X sont usinés ou coulés en un seul bloc. La résonance de l'élément piézoélectrique X, inséré dans le tube isolant MI et collé sur la base plane de la pointe, est fortement atténuée à l'aide de l'absorbant W. L'absorbant est confiné dans le compartiment C_{pt} à
30 l'aide du bouchon S, de l'anneau isolant AI et du capuchon fileté CAP. Le mode de flexion qui se

¹ Jean-Pierre Nikolovski, "Détecteur à ondes de Lamb de la position d'un stylet", thèse de doctorat de l'université Pierre et Marie Curie, 2 février 1995.

propage dans la pointe est engendré soit par l'élément piézo-électrique qui résonne naturellement en cisaillement d'épaisseur telle qu'une coupe X ou Y+166° d'un cristal de niobate de lithium, soit par une conversion d'une onde longitudinale en onde transversale.

On dispose alors à l'extrémité de la pointe C d'une source locale d'ultrasons engendrant dans l'air un champ acoustique CHP permettant de mesurer la rugosité d'une surface solide ou éventuellement de sonder une matière de très faible impédance acoustique. En effet, étant donné la très faible impédance acoustique de l'air par rapport à n'importe quel autre matériau solide, il est très difficile de sonder en profondeur de la matière solide à partir d'ultrasons se propageant dans l'air. Par contre, les ultrasons se propageant dans l'air peuvent être utilisés pour sonder en profondeur des surfaces très poreuses telles que des voiles bactériens. Ceci n'est possible ni avec un palpeur micromécanique, ni optiquement.

On récupère l'écho renvoyé par la matière, soit avec la même sonde, soit avec une autre sonde R identique à la première. L'utilisation d'une deuxième sonde présente un certain nombre d'avantages. Par exemple, l'avantage de ne pas être perturbée par les échos dans la pointe émettrice, d'autre part de pouvoir détecter dans une direction privilégiée déterminée par le diagramme de directivité de l'élément piézo-électrique récepteur. Lorsque la deuxième sonde capte l'écho renvoyé par la matière, on dit que le couplage entre les deux sondes est indirect. Il existe cependant aussi un couplage direct entre les deux sondes qui dépend de l'orientation d'une sonde par rapport à l'autre. Le couplage direct est obtenu lorsque la direction de la vibration mécanique SV à l'extrémité d'une pointe est parallèle à la direction du maximum de sensibilité du transducteur de la pointe réceptrice. Lorsque les pointes sont opposées par le sommet, le couplage direct dépend de l'angle ϕ que font les pointes entre elles (figure 6) ainsi que de la longueur ℓ de couplage et de la distance d séparant les pointes. Le couplage optimal sans contact est obtenu lorsque les axes sont parallèles, que la distance d séparant les pointes est minimale sans pour autant que les pointes se touchent et que la longueur de couplage ℓ est environ d'une longueur d'onde (figure 5). Au-delà de cette longueur de couplage, une impulsion transmise dans le cône récepteur se scinde en deux impulsions en raison de la réflexion à l'extrémité du cône récepteur. Lorsque les génératrices des pointes forment un angle aigu α (figure 7), il existe une valeur particulière de α telle que le temps de vol le plus court permettant à un paquet d'ondes de voyager de la base du cône émetteur à la base du cône récepteur correspond à un chemin acoustique passant nécessairement par les extrémités des pointes.

En effet, si oz désigne l'axe défini par la bissectrice des axes des 2 cônes (figure 7), d_0 , la distance séparant les extrémités des cônes, c_{air} , la vitesse des ondes dans l'air, c_{dur} , la vitesse du

mode transversal dans la pointe en Duralumin, θ l'angle au sommet des deux cônes identiques, α , l'angle séparant les génératrices intérieures des deux cônes, t_{zi} (avec $i = 1$ ou 2), le temps de vol d'un paquet d'ondes joignant les deux bases et passant par les abscisses z_i ($i=1$ ou 2) et t_{\max} , le temps de vol d'un paquet d'ondes joignant les 2 bases et passant par les extrémités, alors la

5 condition $t_{\max} < t_z$, implique la condition $\alpha > 2 \arcsin\left(\frac{c_{\text{air}}}{c_{\text{dur}}}\right)$. A 20°C , l'angle α limite pour lequel $t_{\max} = t_z$ vaut $12,6^\circ$. Pour cet angle α limite, le signal aux bornes du transducteur récepteur est maximum.

Pour que la condition $t_{\max} < t_z$ soit satisfaite sur toute la gamme de température de fonctionnement du dispositif, il suffit que α soit plus grand que la valeur de α limite

10 correspondant à la température de fonctionnement dans l'air la plus élevée.

Ainsi, un couplage direct peut être utilisé pour engendrer efficacement et sans contact des ultrasons dans un autre milieu solide qui peut éventuellement être en mouvement par rapport à l'émetteur. Le couplage direct peut aussi servir à détecter la présence d'un objet s'interposant entre les pointes. Une application importante du couplage direct optimal concerne la

15 thermométrie acoustique. Avec un système émetteur-récepteur semblable à celui de la figure 5 combiné à un polissage des pointes de façon à obtenir une extrémité plane selon le schéma de la figure 4 augmentant la surface en regard entre les deux pointes, on obtient un interféromètre acoustique de petites dimensions applicable en thermométrie. En effet, les surfaces en regard à l'extrémité des pointes constituent une petite cavité résonnante dont la fréquence de résonance

20 dépend de la température du gaz compris entre les surfaces en regard. Pour trouver les fréquences de résonance fondamentale ou harmoniques de la cavité il suffit d'exciter l'un des deux transducteurs par une tension électrique sinusoïdale dont on fait varier la fréquence et de contrôler l'amplitude et la phase du signal aux bornes du transducteur récepteur. A la résonance fondamentale, la distance d séparant les deux pointes est égale à une moitié de la longueur

25 d'onde des ondes longitudinales dans le gaz. Pour une fréquence de résonance harmonique d'ordre n on a la relation :

$$\lambda = \frac{2d}{n}$$

$$c = \lambda f = \frac{2df}{n} \quad (1)$$

où λ désigne la longueur d'onde dans le gaz, f la fréquence de résonance, d la distance entre les pointes, c la vitesse des ondes longitudinales dans le gaz et n l'ordre de la fréquence de

résonance. Dans le cas où le gaz compris dans la cavité est assimilé à un gaz parfait, la température du gaz peut être déduite de la relation² :

$$T = \frac{c_0^2 M}{\gamma R} \quad (2)$$

où M désigne la masse molaire du gaz (M = 28,96 Kg/kmol pour l'air), c₀ la vitesse des ondes longitudinales à la température T extrapolée à pression nulle pour rester dans les conditions du gaz parfait, γ le rapport des chaleurs spécifiques du gaz (γ = 1,4 à 273 K pour l'air) et R la constante des gaz parfaits (R = 8,314 kJ/kmol.K).

En combinant les formules (1) et (2) la valeur de la température du gaz est donnée par la relation (3) :

10

$$T = \frac{4d^2 M}{n^2 \gamma R} f^2 \quad (3)$$

A titre indicatif, pour une distance d de 331 μm, la fréquence de résonance fondamentale (n = 1) de la cavité à 273 K est de 500 KHz.

15 Lorsque les axes font un angle φ non nul entre eux, la zone de couplage est localisée à l'extrémité de la pointe émettrice dans le cas de la figure 6.

Un couplage minimal est obtenu lorsque, à partir du couplage direct maximal, on fait subir à l'une ou mieux aux deux pointes une rotation de π/2 autour de leur axe.

20 Dans le cas d'un couplage direct minimal entre les deux pointes, (la direction du maximum d'émission du transducteur émetteur SV étant parallèle à la direction du maximum de sensibilité du récepteur), un couplage indirect est obtenu si le champ émis par l'émetteur E est capté par le récepteur R après avoir subi une réflexion sur un élément de surface SS d'un échantillon ECH situé à proximité (figure 8).

Par cette technique il est tout à fait possible de réaliser un détecteur de position.

25 La longueur d'onde des ondes dans l'air à 1 MHz est de 331 μm à 273 K. En utilisant une électronique de détection du paquet d'ondes basée soit sur la détection de l'énergie du paquet d'ondes, c'est à dire basée sur la détection de la valeur quadratique du signal amplifié, soit, lorsque la forme d'onde est fixe comme c'est le cas ici pour le couplage direct, basée sur le

² M. Zemansky, R.H. Dittman, "Heat and thermodynamics", Sixth Edition, McGraw-Hill international book company, 1981.

simple déclenchement d'un comparateur, il est possible d'atteindre une résolution sur le temps d'arrivée du paquet d'ondes égale à une fraction de la pseudo-période du paquet d'ondes.

La résolution verticale d'un détecteur de position constitué par un système de deux pointes peut être de l'ordre du micromètre. La résolution latérale dépend de l'inclinaison des axes de symétrie des pointes par rapport à la surface sondée ainsi que de la taille et du rayon de courbure des pointes en leur extrémité. Elle est de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de micromètres.

La directivité des pointes, en émission comme en réception, peut-être grandement augmentée en polissant l'extrémité d'une pointe de façon à disposer d'une surface localement plane EP(figure 4).

Un des aspects préférés de cette invention est de faire fonctionner le système en régime impulsionnel. Il va sans dire qu'il est possible de faire aussi fonctionner le système en régime sinusoïdal. Ce mode de fonctionnement procure un gain de signal, en particulier lorsque la fréquence de fonctionnement est une fréquence de résonance mécanique fondamentale ou harmonique de l'émetteur E et/ou du récepteur R.

L'émetteur ainsi que le récepteur étant constitués par une pointe de focalisation C couplée à une source électromécanique, ces fréquences de résonance sont déterminées, d'une part, par les dimensions constituant la pointe ainsi que par la vitesse des ondes ultrasonores dans la pointe, et d'autre part, par le couplage de la pointe à la source électromécanique X collée sur la base de la pointe. La source électromécanique peut éventuellement fixer la fréquence de fonctionnement si l'on exploite la résonance mécanique de l'élément la constituant. Pour gagner sur l'amplitude du signal de sortie, il est bien sûr préférable que l'émetteur et le récepteur possèdent des fréquences de résonance identiques. En régime sinusoïdal, la bande passante de la pointe n'est pas cruciale et une forme géométrique autre que conique peut être choisie. En régime sinusoïdal, il n'est pas question de mesurer précisément le temps de propagation de l'onde ultrasonore, mais uniquement la variation d'amplitude et de phase du signal aux bornes du récepteur par rapport au signal d'excitation lorsque l'on approche un échantillon ou que l'on fait glisser un échantillon sous une tête de lecture.

Pour effectuer une mesure profilométrique, il y a plusieurs façons de procéder. L'une d'entre-elles consiste à asservir mécaniquement la tête de lecture à distance constante du profil et à enregistrer le signal électrique d'asservissement en fonction de la position, l'autre à déplacer les deux pointes dans un plan et à observer les variations du temps de vol du paquet d'ondes. Dans ce dernier cas la précision de la mesure est plus aléatoire lorsque le profil de la surface varie

rapidement spatialement car la résolution latérale du système dépend de la distance pointe - échantillon.

Par exemple pour une distance pointe-échantillon valant h (figure 3), le rayon r de la zone de couplage avec la surface sondée est déterminé par l'intervalle dt séparant l'instant de référence d'arrivée du paquet d'ondes déterminé par l'électronique de détection de l'instant d'arrivée de la tête du paquet, ainsi que de la vitesse c_ℓ des ondes longitudinales dans l'air selon la formule

$$r = \sqrt{c_\ell^2 \cdot dt^2 + 2 \cdot dt \cdot c_\ell \cdot h}.$$

Ainsi pour un intervalle dt de $1 \mu\text{s}$, une distance pointe-échantillon h de 2 mm et une vitesse de 331 m/s , le rayon de la zone d'interaction ayant participé à la forme d'onde à l'instant de la mesure est de $1,2 \text{ mm}$. Par ailleurs, si l'on désire éviter que la pointe, relativement longue, n'encombre trop la surface sondée, il peut être utile de la tailler en biseau BS (figure 3). On peut alors la redresser légèrement tout en conservant une direction de sensibilité maximale perpendiculaire à la surface de l'échantillon.

En régime sinusoïdal, le rayon de la zone de couplage avec la surface sondée ne permet pas de conserver la résolution latérale du régime impulsionnel. Pour améliorer la résolution latérale, on peut perturber le champ de couplage CHP entre les deux pointes et la surface sondée à l'aide d'un écran Ecr dont on module verticalement la position à une fréquence f_1 suffisamment éloignée de la fréquence d'excitation f_0 de la pointe émettrice comme l'illustre le schéma de la figure 11. Une détection synchrone du champ perturbé à la fréquence f_1 permet alors de ne retenir que l'information sur le profil de l'objet au voisinage immédiat de l'écran. La résolution obtenue sur le profil dépend de la finesse de l'écran au voisinage de la surface de l'objet sondé. L'écran peut être constitué par exemple d'une plaque PSC à l'extrémité de laquelle est fixée une lame de rasoir. Le déplacement vertical de la lame de rasoir est obtenu en excitant le premier mode symétrique de Lamb S_0 dans la plaque de verre à l'aide d'une barrette de céramique PZT collée sur le chant de la plaque et excitée à la fréquence f_1 de résonance longitudinale de la plaque de verre.

En régime impulsionnel, la dépendance de la vitesse du son en fonction de la température est un inconvénient. De la formule (2) on tire :

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \text{ et } \frac{\Delta c}{c} = \frac{1}{2} \frac{\Delta T}{T} \quad (4)$$

Or, dans le cas où la distance h_m séparant l'extrémité des pointes de la surface sondée est grande devant la distance d séparant l'émetteur E du récepteur R d'un système de lecture à deux pointes comme dans le cas de la figure 3, le temps de vol aller retour t_{gm} d'une onde entre la tête

de lecture et la surface sondée vaut approximativement $t_{gm} = \frac{2h_m}{c}$. La variation relative de ce temps de vol est facilement reliée à la variation relative de température. On en déduit la variation relative de la mesure $\Delta h_m/h_m$ à la variation relative de la température $\Delta T/T$:

$$\frac{\Delta t_{gm}}{t_{gm}} = -\frac{\Delta c}{c} = -\frac{1}{2} \frac{\Delta T}{T} \Rightarrow \frac{\Delta h_m}{h_m} = -\frac{1}{2} \frac{\Delta T}{T} \quad (5)$$

5 où c est la vitesse des ondes dans le gaz et T la température du gaz. Si la tête de lecture se trouve à 0,6 mm de la surface, une augmentation de la température de + 3°C entraîne une mesure de la hauteur h_m de 3 μm plus petite. Par ailleurs, toujours avec $h_m = 0,6$ mm, une distance d entre les extrémités des pointes de 50 μm entraîne une erreur de mesure de h_m par excès de 1 μm .

10 Dans le cas où l'on désire effectuer une mesure de h_m prolongée dans le temps et avec une précision micrométrique, il est nécessaire de corriger la dérive en température du système. On peut obtenir cela dans le cas d'une mesure impulsionnelle sachant qu'une pointe vibrante émet dans les deux sens, c'est à dire vers la surface sondée, mais aussi en sens opposé de la surface sondée. Il suffit alors de placer à une distance de référence h_{ref} une surface réfléchissante SR donnant un écho après un temps de vol total t_{ref} . Un moyen judicieux d'amplifier l'écho renvoyé
15 par la surface de référence consiste à utiliser une surface courbe de référence telle que son rayon de courbure est centré sur l'extrémité de la pointe réceptrice. Cette surface courbe peut être une portion de tube ou de sphère creuse. Le point important ici réside dans la difficulté à faire en sorte que l'axe de symétrie cylindrique du tube ou que le centre de la sphère soient confondus avec l'extrémité de la pointe. Un moyen de surmonter cette difficulté est illustré à la figure 10 : la
20 surface courbe de référence est une portion de tube couvrant un secteur angulaire strictement inférieur à 180° afin de ne pas empêcher le rapprochement des pointes. La portion de tube est découpée dans un tube de diamètre intérieur D égal au diamètre extérieur du compartiment cylindrique C_{pt} abritant l'élément piézoélectrique X de la figure 1. On fixe alors la portion de tube par l'un de ses cotés sur la base cylindrique de la sonde réceptrice telle que celle de la figure
25 1. Ceci facilite énormément la concordance entre l'axe de la portion de tube et l'axe de la pointe. L'inconvénient de ce montage réside dans le fait que la distance de référence h_{ref} égale à $D/2$ à l'extrémité de la pointe diminue lorsque l'on remonte l'axe de la pointe réceptrice. Cet inconvénient est supprimé en créant un trou oblong sur la portion de tube dans le secteur angulaire correspondant au maximum de sensibilité du récepteur.

30 Un temps de vol total d'un paquet d'ondes issu de la base d'une sonde émettrice se décompose en un temps de vol t_1 associé au temps de vol dans la première pointe, cumulé d'un

temps de vol t_2 dans la deuxième pointe, cumulé d'un temps de vol t_{gm} dans le gaz vers l'échantillon (et t_{gr} dans le gaz vers le plan de référence). Les temps de vol t_m et t_{ref} s'expriment par les relations :

$$\begin{aligned} t_m &= t_1 + t_2 + t_{gm} = t_1 + t_2 + \frac{2h_m}{c} \\ t_{ref} &= t_1 + t_2 + t_{gr} = t_1 + t_2 + \frac{2h_{ref}}{c} \end{aligned} \quad (6)$$

- 5 Dans le cas d'une mesure de position h_m , la distance d séparant les deux pointes est prise la plus petite possible. En pratique, il est assez facile de faire en sorte que cette distance soit plus petite que le micromètre, de sorte qu'un temps de vol total qu'il soit de référence ou de mesure, se décompose en un temps de vol t_1+t_2 dans les pointes par couplage direct, et un temps de vol par couplage indirect valant t_{gm} ou t_{gr} selon qu'il s'agisse de la surface de référence ou de la
- 10 surface de mesure. Si l'origine des temps est choisie au moment de l'arrivée du paquet d'ondes issue du couplage direct, on peut s'affranchir des erreurs de mesure liées aux variations de temps de vol dans les pointes. L'équation (6) devient :

$$\begin{aligned} \Delta t_m &= t_m - (t_1 + t_2) = \frac{2h_m}{c} = t_{gm} \\ \Delta t_{ref} &= t_{ref} - (t_1 + t_2) = \frac{2h_{ref}}{c} = t_{gr} \\ \frac{\Delta t_{ref}}{\Delta t_m} &= \frac{h_{ref}}{h_m} \Rightarrow h_m = h_{ref} \frac{\Delta t_m}{\Delta t_{ref}} \end{aligned} \quad (7)$$

- La mesure de position h_m peut ainsi être une mesure absolue et être effectuée
- 15 indépendamment de la vitesse c , donc indépendamment de la température, en effectuant le rapport $\Delta t_m/\Delta t_{ref}$. La mesure ne dépend alors plus que de la connaissance précise de h_{ref} , Δt_{ref} et Δt_m . En pratique, les intervalles de temps Δt_m et Δt_{ref} sont quantifiés à l'aide d'une horloge haute fréquence. On a alors $\Delta t_m = N_m T_{ck}$ et $\Delta t_{ref} = N_{ref} T_{ck}$ où N_m et N_{ref} sont les résultats de la division entière de Δt_m et Δt_{ref} par la période T_{ck} de l'horloge. Compte tenu de la formule (4) il est aisé de
- 20 démontrer que le nombre N_{ref} obtenu à la température T et noté $N_{ref}(T)$ peut être relié au nombre

$N_{ref}(T')$ obtenu à la température T' selon la formule : $T = T' \frac{N_{ref}^2(T')}{N_{ref}^2(T)}$. La mesure de $N_{ref}(T')$

permet ainsi de déterminer la température T' si l'on connaît la température T .

- La figure 13 représente le schéma de câblage d'un générateur d'échelon permettant de charger périodiquement en courant le transducteur émetteur X. Le générateur est constitué de 2
- 25 oscillateurs l'un OSC1 ayant pour but de charger un condensateur réservoir C23 l'autre OSC2

d'ouvrir un transistor par lequel l'élément piézoélectrique X est excité. La présence de l'inductance L1 et de la diode D1 permet de réduire le temps de montée de l'échelon et d'en augmenter l'amplitude à une valeur proche du double de la valeur obtenue avec l'étage élévateur de tension ETN. L'étage élévateur de tension est composé de diodes (D2 à D21) et de condensateurs (C3 à C22). Il est alimenté par la sortie ST1 de l'oscillateur OSC1. Les oscillateurs sont alimentés en tensions symétriques +Vcc et -Vcc. La fréquence de l'oscillateur OSC1 est de l'ordre du mégaHertz tandis que celle de OSC2 est de l'ordre du kiloHertz. Les condensateurs C23, C24 et le transistor T1 doivent supporter la tension élevée engendrée par l'étage ETN.

Si l'on conjugue deux têtes de lecture à deux pointes (E, R) et (E_2, R_2) comme l'illustre le schéma de la figure 12, il est possible de mesurer l'épaisseur e d'un objet avec une résolution micrométrique. La distance h_0 entre les deux têtes de lecture doit être étalonnée et mise en mémoire. Elle est déduite soit de la mesure du temps de vol d'un paquet d'ondes issu du transducteur émetteur de la tête 1 et détecté par le transducteur récepteur de la tête 2 alors que l'échantillon dont on veut connaître l'épaisseur e n'est pas encore placé entre les têtes, soit en présence d'un échantillon d'épaisseur e connue, déduite des mesures des distances h_{m1} et h_{m2} relatives aux deux faces de l'échantillon de référence. On obtient alors : $h_0 = e + h_{m1} + h_{m2}$. On place ensuite un échantillon d'épaisseur inconnue entre les têtes, et les distances h_{m1} , h_{m2} séparant les faces de l'échantillon des têtes de lecture sont alors mesurées. L'épaisseur e de l'objet est obtenue selon la formule :

$$e = h_0 - h_{m1} - h_{m2}$$

Dans le cas d'une mesure de position, pour rehausser le niveau du signal correspondant au couplage indirect on peut procéder en deux étapes. Lors de la première étape, il n'y a pas d'échantillon, et les signaux enregistrés par une têtes sont sauvegardés dans une mémoire pour que l'on puisse, dans une deuxième étape, les soustraire aux signaux obtenus en présence de l'échantillon. La distance h_0 séparant deux têtes de lecture doit être légèrement supérieure aux distances de référence h_{ref1} et h_{ref2} pour éviter qu'un couplage mutuel entre les têtes ne perturbe leur fenêtre de mesure (définie pour chaque tête par le signal de couplage direct et l'écho provenant de la surface de référence associée).

Une technique permettant de réaliser une mesure différentielle consiste à échantillonner les signaux analogiques par exemple sur huit bits en amplitude et à les sauvegarder en mémoire pour pouvoir effectuer ensuite un traitement numérique. Afin de limiter la quantité de données sauvegardées, l'échantillonnage des signaux analogiques peut se limiter à la fenêtre de mesure,

soit sur environ 80 μs au maximum pour une distance pointe-surface de référence de 10 mm dans l'air. Pour une fréquence d'échantillonnage de 100 points par microseconde, la profondeur mémoire pour chaque tête est de 7,6 koctets au maximum correspondant à une plage de température de -100 °C à +250 °C. La résolution en température du dispositif en régime
 5 impulsionnel est de 0,1°C. La résolution du dispositif sur une mesure de position est de 1,7 μm à 0°C.

La figure 14 donne le schéma-bloc d'un dispositif selon l'invention permettant de réaliser un détecteur de position de résolution micrométrique sans correction de température, à l'aide d'une tête de lecture à deux pointes. La mesure de la distance h_m séparant la tête de lecture de la
 10 surface de l'échantillon consiste à exciter à l'aide du générateur d'échelon 1 le transducteur émetteur de la pointe émettrice 2 qui engendre un paquet d'ondes qui va se réfléchir sur l'échantillon 16 pour être détecté par le transducteur de la pointe réceptrice 3. Les deux pointes sont orientées de façon à avoir un couplage direct minimal. Le signal détecté est alors amplifié par un amplificateur 4 puis éventuellement mis en forme en étant élevé au carré par un
 15 quadrateur 5 et intégré deux fois à l'aide des intégrateurs actifs 61 et 62. Le signal renvoyé par le transducteur de la pointe réceptrice contient un premier paquet d'ondes D dû à un couplage direct résiduel entre les pointes ainsi qu'un autre paquet d'ondes I dû au couplage indirect entre les deux pointes et la surface sondée, retardé d'un temps Δt_m proportionnel à h_m . Afin de déterminer quantitativement le temps de vol Δt_m , les paquets d'ondes D et I sont isolés à l'aide des
 20 monostables 71 et 72 déclenchés sur front montant et le monostable 73 déclenché sur front descendant, ainsi que la porte logique ET 81. On obtient ainsi les signaux S1 dont le front montant correspond à l'arrivée du paquet d'ondes D et S2 dont le front montant correspond à l'arrivée du paquet d'ondes I. Le temps de vol Δt_m est obtenu à l'aide de la fonction logique ET 83 entre le signal S1 et le signal issu du monostable 74 déclenché sur front montant par le signal
 25 S2. Une horloge 9 de fréquence 80 MHz permet de quantifier la durée Δt_m par un nombre entier N_{bcd} égal à la division entière de Δt_m par la période de l'horloge. Le nombre N_{bcd} est compté à l'aide des compteurs BCD 101, 102, 103, 104. Sur front descendant du signal issu de la porte ET 83, un monostable 75 est déclenché pour, d'une part, permettre de remettre à zéro (RAZ) les compteurs après un retard supplémentaire imposé par le monostable 76 et, d'autre part, pour
 30 créer un bit informant au niveau bas de la disponibilité d'une donnée ($\overline{AffEn} = \overline{cs}$). Une interface parallèle 11 utilisant un adaptateur d'interface périphérique programmable de type Intel 8255 permet de transmettre à un micro-ordinateur le mot binaire constitué du nombre N_{bcd}

ainsi que du bit $\overline{AffEn} = \overline{cs}$. Un affichage direct de la donnée est aussi possible à l'aide d'un afficheur LCD 4 digits multiplexé 13. Chacun des quatre digits est adressé via les bits d'adresse a1 et a2 commandant un décodeur 15 qui lui même commande les drivers trois états 121, 122, 123, 124. Les bits d'adresse a1 et a2 sont incrémentés via un compteur oscillateur CD4060
5 actionné à l'aide de la porte ET 82 par un niveau haut du bit de présence de donnée AffEn.

REVENDEICATIONS

1. Dispositif de détection acoustique, caractérisé en ce qu'il comprend au moins un organe d'émission comportant une pointe solide de profil effilé (C), associée à des moyens d'excitation (X) de ladite pointe, pour émettre dans un gaz environnant des ondes ultrasonores selon un mode de propagation antisymétrique, et au moins un organe de réception comportant une pointe solide de profil effilé, associée à des moyens de détection, pour recevoir lesdites ondes ultrasonores.
2. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que les moyens d'excitation et les moyens de détection comprennent respectivement un élément piézoélectrique (X) placé dans un compartiment (Cpt), ladite pointe et ledit compartiment étant usinés en un seul bloc.
3. Dispositif selon l'une des revendications 1 et 2, caractérisé en ce que là ou chaque pointe solide est constituée par un matériau plein élastique, de profil conique, de faible impédance ultrasonore.
4. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisé en ce qu'il comprend un organe d'émission et un organe de réception séparés, en ce que les pointes effilées des deux organes sont disposées selon deux directions essentiellement opposées, les extrémités desdites pointes étant en regard au niveau de leurs sommets sur une longueur axiale de couplage l égale à la longueur d'onde des ondes ultrasonores et étant séparées l'une de l'autre d'une distance d constante sur toute la longueur de couplage, de telle sorte que les directions de vibrations et de sensibilité maximale (SV) soient parallèles, et qu'un couplage direct maximal entre les deux pointes soit obtenu.
5. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisé en ce qu'il comprend un organe d'émission et un organe de réception séparés, en ce que les pointes effilées des deux organes sont disposées selon deux directions essentiellement opposées, sans recouvrement, et en ce que les sommets des deux pointes sont à égale distance d'une surface dont la

position par rapport au dispositif doit être déterminée, de telle sorte que les directions (SV) des maxima des vibrations en émission et en réception soient parallèles, et qu'un couplage indirect maximal entre les deux pointes et ladite surface soit obtenu.

5

6. Dispositif selon l'une des revendications 1, 2, 3 et 5, caractérisé en ce qu'il comprend en outre des moyens de mesure du temps de vol d'un paquet d'ondes ultrasonores se propageant de la pointe de l'organe d'émission vers une petite surface (SS) d'un échantillon (ECH), et réfléchi par cette surface vers la pointe de l'organe de réception, pour ainsi déterminer la distance (hm) entre ladite surface et lesdites pointes.

10

7. Dispositif selon la revendication 5, caractérisé en ce qu'il comprend en outre des moyens de mesure des variations d'amplitude et de phase des ondes ultrasonores reçues par l'organe de réception après réflexion sur une surface, en régime harmonique, pour ainsi déterminer la distance (hm) entre lesdites pointes et ladite surface.

15

8. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que l'extrémité de la pointe ou d'au moins l'une des pointes est polie de façon à obtenir une surface (EP) localement plane à ladite extrémité, de telle sorte que le diagramme de directivité de la pointe est affiné et sa sensibilité accrue.

20

9. Dispositif selon la revendication 6, caractérisé en ce que les moyens de mesure de temps de vol comprennent une horloge de cadencement de fréquence élevée devant la fréquence centrale des ondes ultrasonores émises.

25

10. Dispositif selon l'une des revendications 6 et 9, caractérisé en ce qu'il comprend en outre des moyens de détermination d'un instant auquel les ondes résultant d'un couplage direct avec l'organe d'émission sont reçues par l'organe de réception, cet instant étant utilisé comme origine des temps pour le calcul du temps de vol.

30

35

11. Dispositif selon l'une des revendications 6, 9 et 10, caractérisé en ce qu'il comprend en outre une surface réfléchissante de référence (SR) située à une distance connue (h_{ref}) de la pointe d'un même organe formant en même temps organe d'émission et organe de réception, et d'un côté de ladite pointe opposé à celui où se trouve une surface d'échantillon dont la distance à la pointe est à mesurer, et en ce que la distance (hm) entre ladite surface d'échantillon et la pointe est donnée par la formule :

$$hm = h_{ref} \cdot \Delta t_m / \Delta t_{ref}$$

10 où

Δt_m est le temps de vol des ondes réfléchies sur la surface d'échantillon et Δt_{ref} est le temps de vol des ondes réfléchies sur la surface de référence.

12. Dispositif selon la revendication 11, caractérisé en ce que la surface de référence (SR) est courbe et de symétrie cylindrique ou sphérique, l'axe ou le centre de symétrie correspondant étant respectivement sécant ou confondu avec l'axe de la pointe.

13. Dispositif selon les revendications 2 et 12 prises en combinaison, caractérisé en ce que la surface de référence est à symétrie cylindrique et constituée d'une portion d'un tube de diamètre D , en ce que le compartiment de l'organe d'émission et de réception présente un même diamètre D , et en ce que ledit tube est fixé sur ledit compartiment.

14. Dispositif selon la revendication 5, caractérisé en ce que les axes des pointes des organes d'émission et de réception forment entre eux un angle α qui vérifie sur toute la gamme prévue de températures de fonctionnement la condition :

$$30 \quad \alpha > 2 \arcsin(c_{gaz} / c_{cône})$$

où

c_{gaz} désigne la vitesse des ondes dans le gaz et

$c_{cône}$ désigne la vitesse des ondes dans les pointes.

15. Dispositif selon l'une des revendications 1, 2, 3 et 5, destiné à effectuer une mesure sans contact de l'épaisseur (e) d'un échantillon, caractérisé en ce qu'il comprend deux têtes de mesure comportant chacune un organe d'émission et un organe de réception, espacées d'une distance (h₀) et entre lesquelles ledit échantillon est apte à être interposé, en ce qu'il comprend des moyens pour déterminer ladite distance (h₀) entre les deux têtes par mesure du temps de vol d'un paquet d'ondes se propageant d'une tête vers l'autre en l'absence de l'échantillon ou par mesure des temps de vol aller-et-retour de deux paquets d'ondes se propageant entre chacune des deux têtes et la face correspondante d'un échantillon de référence d'épaisseur connue, et pour déterminer la distance (h_{m1}, h_{m2}) entre chacune des deux têtes et la face correspondante de l'échantillon à mesurer par mesure du temps de vol aller-et-retour d'un paquet d'ondes se propageant entre chaque tête et ladite face correspondante de l'échantillon à mesurer, l'épaisseur de ce dernier étant calculée selon la formule :

$$e = h_0 - h_{m1} - h_{m2}.$$

16. Dispositif selon la revendication 10, destiné à effectuer une mesure de température relative d'un gaz, caractérisé en ce que ladite surface d'échantillon constitue une surface réfléchissante de référence (SR) située à une distance connue (h_{ref}) de la pointe d'un même organe formant en même temps organe d'émission et organe de réception, en ce que le dispositif comprend en outre des moyens pour déterminer le nombre de périodes d'horloge (N(T')) correspondant au temps de vol aller-et-retour, entre l'extrémité de la pointe de l'organe d'émission et de réception et la surface de référence (SR), d'un paquet d'ondes se propageant dans le gaz à une température connue (T') et pour déterminer le nombre de périodes d'horloge (N(T)) correspondant au temps de vol aller-et-retour, sur le même trajet, d'un paquet d'ondes se propageant dans le gaz à la température à mesurer (T), et en ce que la température à mesurer est donnée par la formule :

$$T = T' \cdot (N(T')^2 / N(T)^2).$$

17. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 16, caractérisé en ce qu'il comprend en outre des moyens d'échantillonnage et de conversion analogique/numérique du signal délivré par l'organe de réception, des mémoires pour y conserver les données numérisées, une unité de
5 traitement numérique du signal permettant de réaliser la différence entre les signaux délivrés dans deux situations différentes.

18. Dispositif selon la revendication 7, destiné à effectuer une mesure profilométrique, caractérisé en ce qu'il comprend un moyen pour
10 perturber le champ de couplage entre les pointes des organes d'émission et de réception et la surface analysée, ce moyen de perturbation comprenant un écran (Ecr) dont la position est modulée à une fréquence (f_1) différente de la fréquence (f_0) d'excitation du mode antisymétrique dans la pointe de
15 l'organe d'émission (E), ladite modulation engendrant dans la pointe de l'organe de réception (R) une modulation d'amplitude et de phase du signal d'excitation du mode antisymétrique, et en ce que le dispositif comprend en outre un amplificateur à détection synchrone dont la fréquence de référence est la fréquence (f_1) de modulation de la position de l'écran.

19. Dispositif selon la revendication 18, caractérisé en ce que
20 l'écran (Ecr) est constitué d'une plaque à l'extrémité de laquelle est fixé un élément en forme de lame de rasoir disposé verticalement entre les deux pointes, ladite plaque étant mise en résonance mécanique longitudinale à la fréquence de modulation de position (f_1) à l'aide d'un transducteur piézo-
25 électrique (PZT).

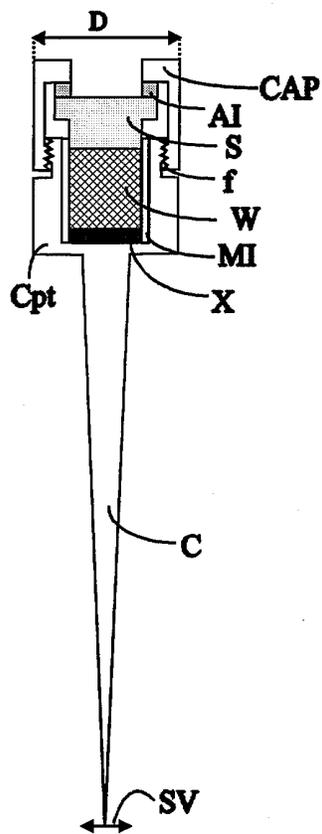


FIG - 1

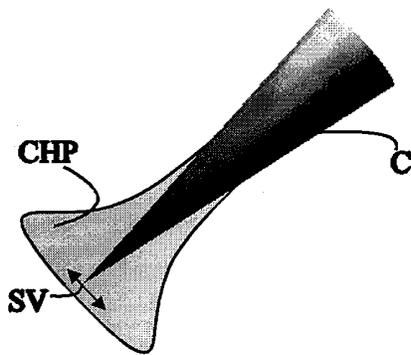


FIG - 2

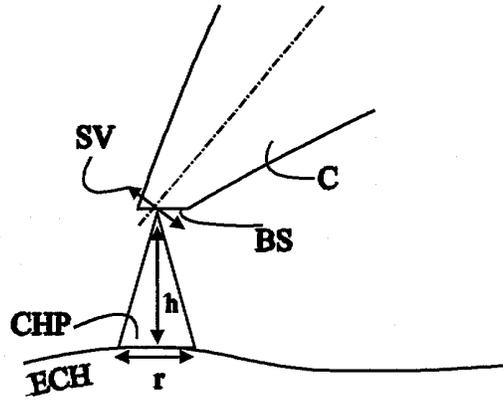


FIG - 3

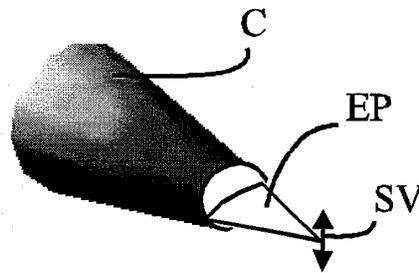


FIG - 4

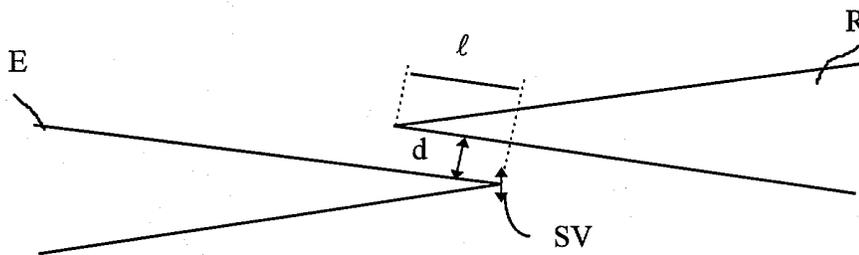
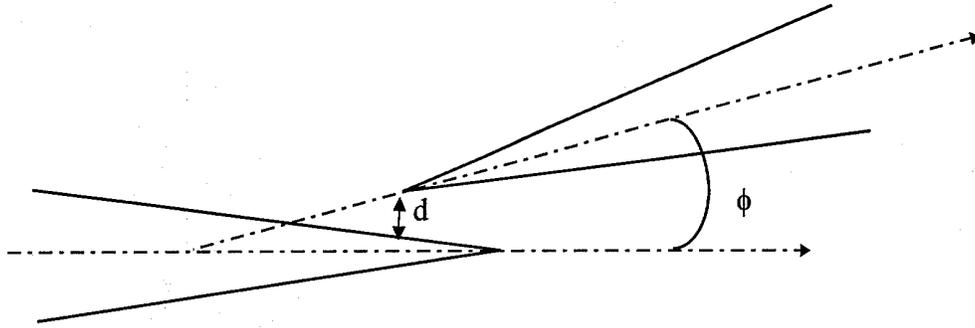
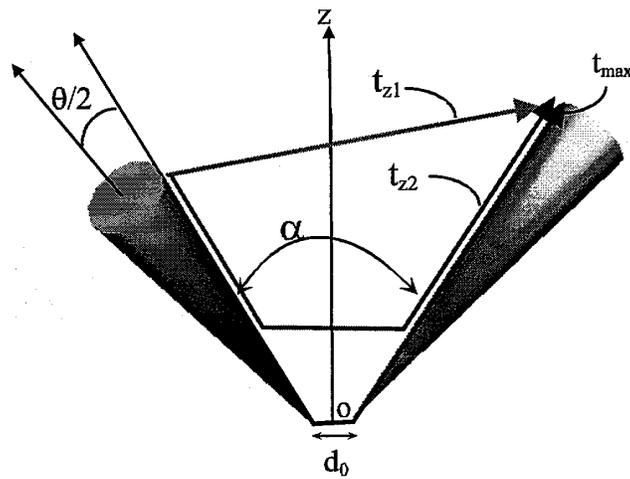
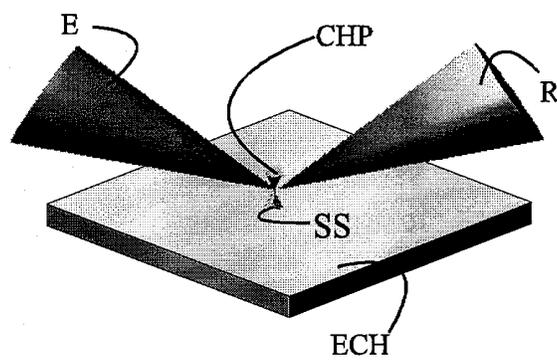


FIG - 5

3/7

FIG - 6FIG - 7FIG - 8

4/7

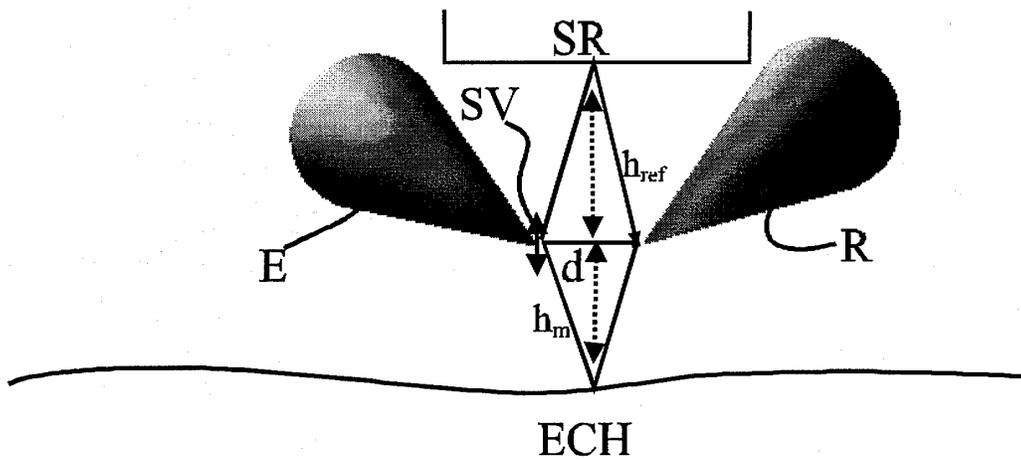


FIG - 9

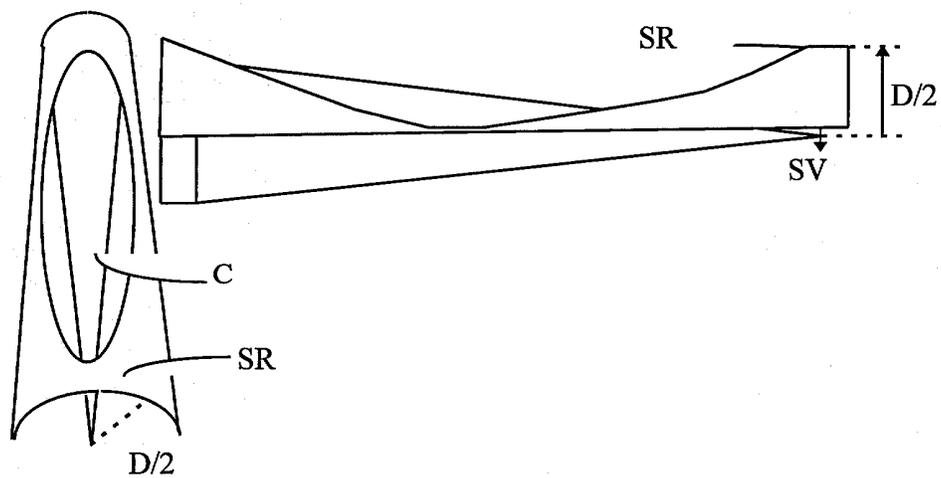


FIG - 10

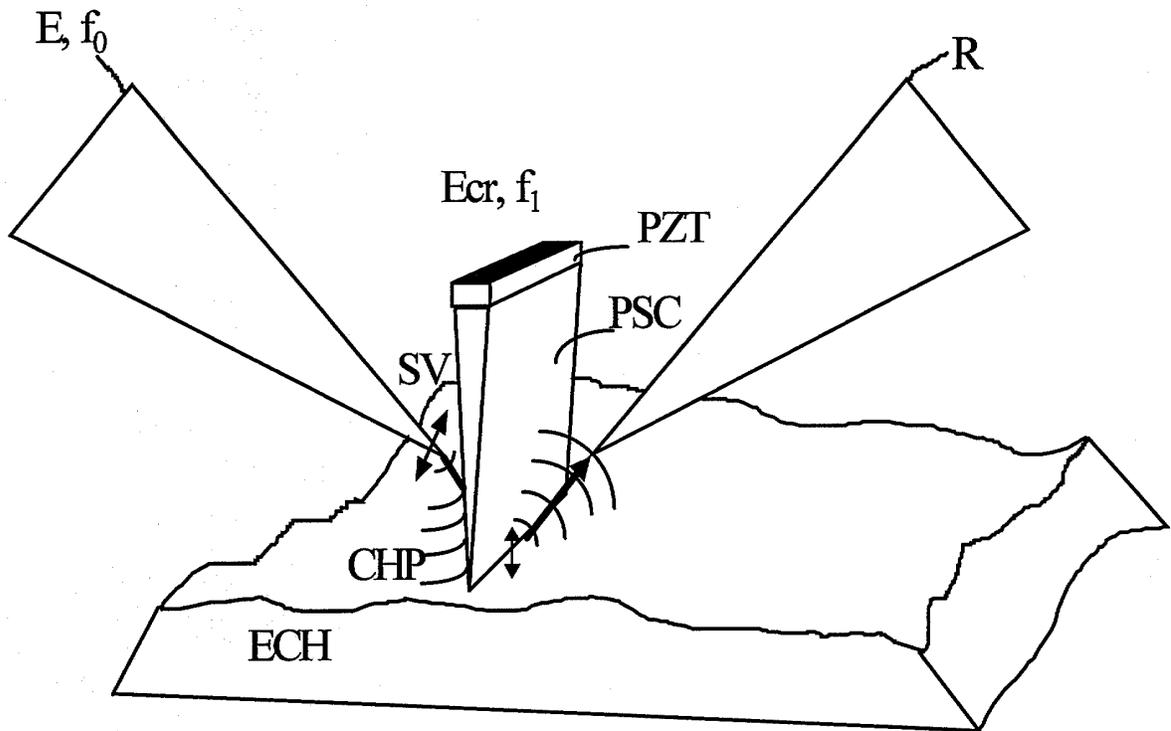


FIG - 11

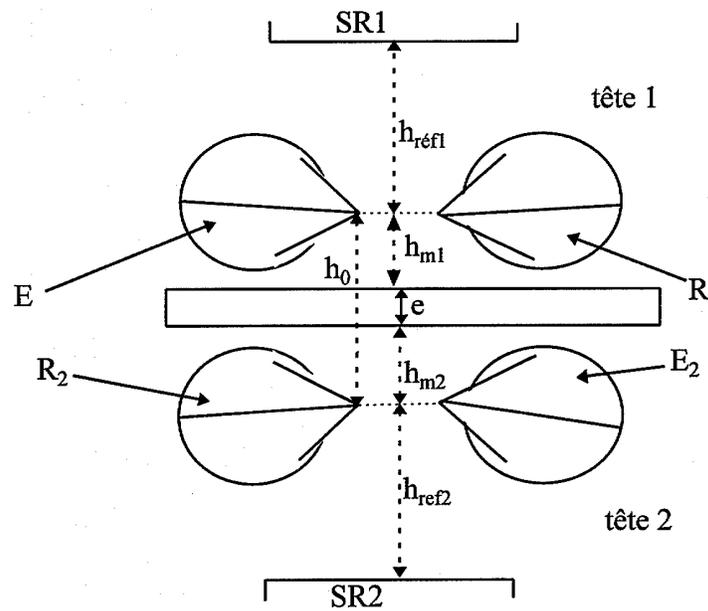


FIG- 12

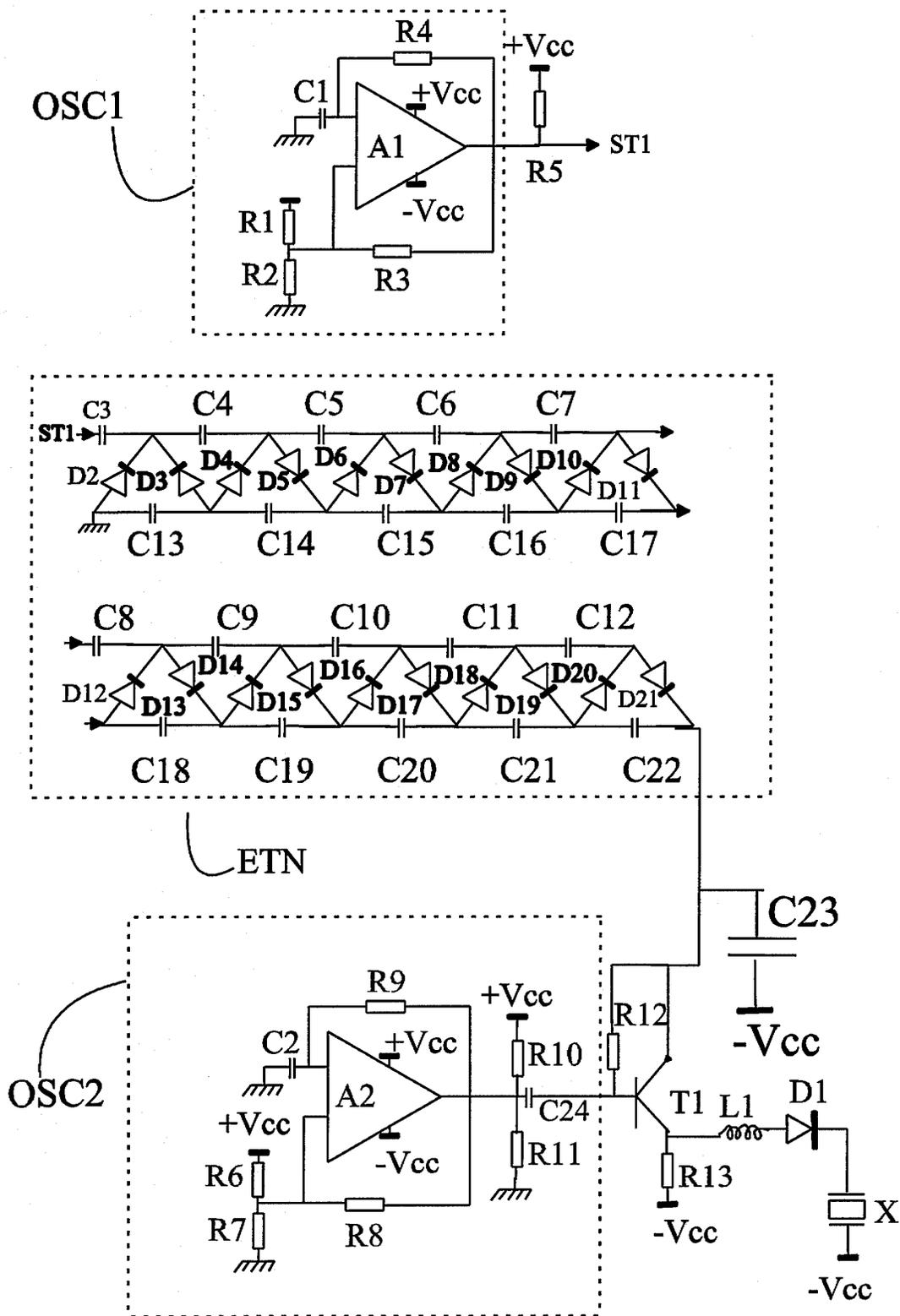


FIG - 13

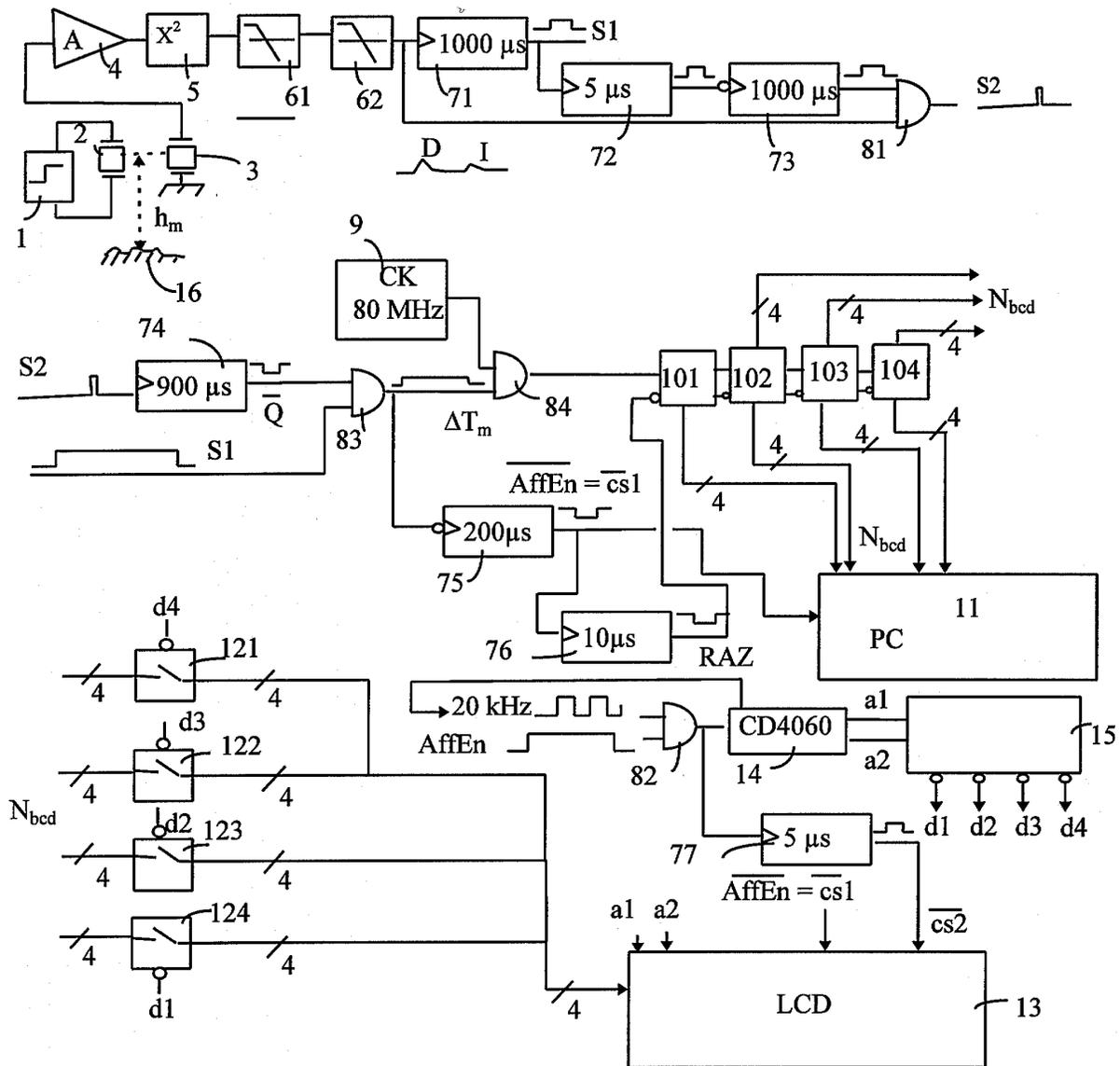


FIG - 14

RAPPORT DE RECHERCHE
PRELIMINAIRE

INSTITUT NATIONAL

de la

PROPRIETE INDUSTRIELLE

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

FA 540092
FR 9613107

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		Revendications concernées de la demande examinée
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	
A	RCA REVIEW, vol. 44, no. 3, Septembre 1983, PRINCETON, NJ, USA, pages 430-464, XP002033033 S. TOSIMA ET AL: "Surface acoustic wave stylus: Part I-Pickup and recording devices" * page 432 - page 433; figure 1 *	1
A	WO 96 11378 A (UNIV PARIS CURIE ;NIKOLOVSKI JEAN PIERRE (FR); FOURNIER DANIELE (F) * abrégé; figures 6,15 *	1
A	EP 0 045 456 A (BALLHAUS HERIBERT) * abrégé; figure 1 *	1,18
A	IEICE TRANSACTIONS ON FUNDAMENTALS OF ELECTRONICS, COMMUNICATIONS AND COMPUTER SCIENCES, vol. 76A, no. 10, 1 Octobre 1993, page 1861/1862 XP000422034 IMANO K ET AL: "A NONCONTACT THICKNESS MEASUREMENT OF THIN SAMPLES USING 40 KHZ ULTRASONIC WAVE" * page 1861; figure 1 *	1,15
A	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 009, no. 292 (P-406), 19 Novembre 1985 & JP 60 131437 A (MITSUBISHI DENKI KK) * abrégé *	1,16
		DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int.CL.6)
		G01B
Date d'achèvement de la recherche		Examineur
16 Juin 1997		Vorropoulos, G
<p>CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES</p> <p>X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : pertinent à l'encontre d'au moins une revendication ou arrière-plan technologique général 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>		

1

EPO FORM 1503 03.92 (P04C13)