

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②② Date de dépôt : 17.03.99.

③① Priorité : 17.03.98 GB 09805534.

④③ Date de mise à la disposition du public de la demande : 24.09.99 Bulletin 99/38.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : *Ce dernier n'a pas été établi à la date de publication de la demande.*

⑥① Références à d'autres documents nationaux apparentés :

⑦① Demandeur(s) : CENTRAL RESEARCH LABORATORIES LTD — GB.

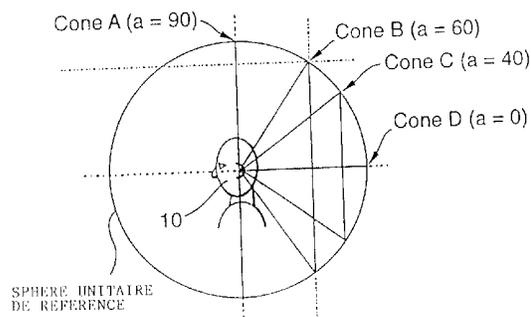
⑦② Inventeur(s) : SIBBALD ALASTAIR, CLEMOW RICHARD DAVID et NACKVI FAWAD.

⑦③ Titulaire(s) :

⑦④ Mandataire(s) : REGIMBEAU.

⑤④ PROCÉDE DE PERFECTIONNEMENT DE REPRODUCTION SONORE TRIDIMENSIONNELLE.

⑤⑦ L'invention concerne un procédé, un appareil et un programme informatique de traitement d'un signal audio à canal unique pour produire un signal audio à canaux gauche et droit correspondant à une source sonore virtuelle, dans une direction donnée pour une position préférée d'auditeur (10), par rapport à laquelle l'espace inclut deux hémisphères, avant et arrière. L'information audio inclut des indications pour percevoir de cette position la direction dudit signal de canal unique. Le procédé produit dans chaque canal le signal de canal unique; modifie les deux signaux en modifiant les deux canaux par une fonction de transfert de réponse de tête, pour produire un signal de droite dans un canal d'oreille droite, et de même pour le côté gauche; introduit entre les canaux un retard correspondant, pour un signal de la direction donnée, à la différence de temps entre oreilles. Il filtre aussi les signaux des deux canaux, par un moyen de filtre de coupure HF à caractéristiques fixées selon la direction de la source sonore virtuelle (cônes A à D).



La présente invention concerne un procédé de perfectionnement de la reproduction sonore tridimensionnelle, ou 3D.

Le traitement de signaux audio stéréo, c'est-à-dire à deux canaux, ou destinés aux deux oreilles, pour produire des images sonores tridimensionnelles hautement réalistes est bien connu, et est décrit par exemple dans la demande de brevet international N° WO94/22 278. La technologie stéréo est basée sur des enregistrements effectués en utilisant un système de microphone dit à "tête artificielle", et les enregistrements sont ensuite traités numériquement. L'utilisation de la tête artificielle assure que les indications sonores tridimensionnelles naturelles, que le cerveau utilise pour déterminer la position de sources sonores dans l'espace tridimensionnel, sont incorporées dans les enregistrements stéréo.

Les indications sonores tridimensionnelles sont introduites naturellement par la tête et les oreilles lorsque nous écoutons réellement des sons, et ils incluent les caractéristiques suivantes: différence d'amplitude entre les deux oreilles ou IAD selon les initiales de terme anglo-saxon inter-aural amplitude difference, différence de temps entre les oreilles ou ITD selon les initiales du terme inter-aural time difference, et configuration spectrale par l'oreille externe. Afin de fixer la position d'une source sonore virtuelle, des filtres audio séparés pour les canaux gauche et droit du signal audio ajoutent ces caractéristiques, en fonction de la position souhaitée pour le son. On désignera en général gauche et droit par g et d aux figures. Les caractéristiques elles-mêmes sont déterminées en mesurant la fonction de transfert liée à la tête, ou HRTF selon les initiales du terme head-related transfer function. Les caractéristiques de la fonction de transfert liée à la

tête caractérisent les modifications auxquelles un signal audio est soumis sur son trajet qui va d'un point de l'espace, situé dans une direction et à une distance définies de l'auditeur, jusqu'aux tympans des oreilles de l'auditeur.

Lorsqu'une paire de signaux audio qui incorporent de telles indications sonores tridimensionnelles est introduite efficacement dans les oreilles de l'auditeur, par exemple par des casques à écouteurs, il perçoit une source sonore virtuelle à situer à la position associée dans l'espace tridimensionnel. Mais, si les signaux traités ne sont pas transmis directement et efficacement aux oreilles de l'auditeur, les effets tridimensionnels complets ne sont pas perçus. Par exemple, lors d'une audition de sons provenant de hauts-parleurs stéréo classiques, l'oreille gauche entend un peu du signal du haut-parleur droit, et vice versa, une diaphonie désignée par le terme anglo-saxon de "transaural", dont une traduction littérale serait un néologisme: transauriculaire et que l'on désignera ici par les mots "de sons croisés". Annuler la diaphonie de sons croisés permet de bénéficier d'effets totalement tridimensionnels à partir de hauts-parleurs éloignés de l'auditeur. Le diaphonie de sons croisés qui provient de chacun des hauts-parleurs peut être annulée en créant des signaux appropriés d'annulation de diaphonie, qui proviennent du haut-parleur opposé. Des signaux d'annulation de diaphonie sont égaux en amplitude aux signaux de diaphonie de sons croisés et sont inversés par rapport à ceux-ci, c'est-à-dire de polarité opposée.

Les effets acoustiques de diaphonie de sons croisés peuvent être illustrés à l'aide d'un exemple pratique illustré à la Figure 1. Supposons qu'un enregistrement sonore est effectué en utilisant une

paire de microphones espacés d'une largeur de tête, approximativement 15 cm. Une source sonore 16 est maintenant placée immédiatement à gauche de la configuration de microphones, c'est-à-dire à l'azimut  
5 -90°. Lorsque la source sonore 16 émet une impulsion sonore, l'impulsion arrive en premier lieu au microphone gauche, et elle est ainsi enregistrée par le microphone du côté gauche avant d'être enregistrée par le microphone du côté droit. Le retard relatif  $t_w$   
10 entre les temps d'arrivée, pour l'impulsion sonore qui atteint le microphone du côté droit, est approximativement de 437  $\mu s$  et est égal à la distance de séparation, de 15 cm, divisée par la vitesse du son dans l'air, approximativement 343 m/s. En pratique,  
15 bien que les oreilles soient séparées par une largeur de tête, les ondes sonores doivent se diffracter autour de la circonférence de la tête, et la longueur effective de trajet est par conséquent plus grande. Elle peut être approchée par l'expression  
20  $(\theta / 360) 2 \pi r + r \cdot \sin \phi$ , où  $r$  est le rayon de la tête et  $\phi$  est l'angle d'azimut de la source sonore.

Supposons maintenant que cet enregistrement est reproduit sur un système audio à deux hauts-parleurs et qu'un auditeur 10 est assis à la position  
25 représentée à la Figure 1. Dans de telles conditions, lorsque les hauts-parleurs 12 et 14 sont situés à des angles d'environ  $\pm 30^\circ$  par rapport à l'auditeur, la différence de temps  $t_e$ , entre l'arrivée des signaux aux oreilles gauche et droite, est approximativement  
30 de 250  $\mu s$ . Lorsque l'enregistrement de l'impulsion est reproduit, elle est émise en premier lieu par le haut-parleur gauche 12, puis par le haut-parleur droit 14, après le retard enregistré de 437  $\mu s$ .

En se référant maintenant à la Figure 1,  
35 l'oreille gauche entend en premier lieu le son primaire W du haut-parleur gauche 12, mais la

diaphonie X du haut-parleur gauche n'arrive ensuite à l'oreille droite que  $250 \mu\text{s}$  ( $t_e$ ) plus tard. Puisque ce signal de diaphonie est dérivé de la même source sonore réelle, le cerveau reçoit une paire de signaux

5 sonores gauche et droit hautement corrélés, qu'il utilise immédiatement pour déterminer où la source sonore enregistrée est apparemment située. Le cerveau reçoit donc une différence de temps entre oreilles ou ITD de  $250 \mu\text{s}$  seulement, au lieu de  $437 \mu\text{s}$ , ce qui

10 correspond à la position réelle du haut-parleur gauche à un azimut de  $-30^\circ$ . Par conséquent, le cerveau situe incorrectement la source sonore à  $-30^\circ$  et non à sa position correcte à un azimut de  $-90^\circ$ . La diaphonie de sons croisés a en fait invalidé l'information du

15 domaine de temps qui était incorporée dans l'enregistrement.

Si une annulation de diaphonie de sons croisés est effectuée correctement, et si des données de source à fonction de transfert liée à la tête ou HRTF

20 de haute qualité sont utilisées, les effets sur l'auditeur peuvent être très remarquables. Par exemple, il est possible de déplacer une source sonore virtuelle sur un cercle complet autour de l'auditeur, en commençant en face de lui, c'est-à-dire à l'azimut

25 de  $0^\circ$ , en tournant sur le côté droit de l'auditeur, c'est-à-dire vers l'azimut de  $+90^\circ$ , puis derrière l'auditeur, à l'azimut de  $\pm 180^\circ$  et en revenant autour du côté gauche, à l'azimut de  $-90^\circ$ , vers l'avant. Il est possible aussi d'amener la source sonore virtuelle

30 à sembler se déplacer dans un cercle vertical autour de l'auditeur et en fait d'amener le son à sembler provenir d'une quelconque position sélectionnée dans l'espace.

Mais certaines positions sont plus difficiles à

35 synthétiser que d'autres. Par exemple, l'efficacité de déplacement d'une source sonore virtuelle directement

vers le haut et le bas est plus grande sur les côtés de l'auditeur, c'est-à-dire aux azimuts de  $\pm 90^\circ$ , que directement en face de l'auditeur, c'est-à-dire à l'azimut de  $0^\circ$ . La raison en est probablement qu'il  
5 existe davantage d'information de différence entre gauche et droite à traiter par le cerveau. De même, il est difficile de différencier entre une source sonore située directement en face de l'auditeur, à l'azimut de  $0^\circ$ , et une source directement en arrière de  
10 l'auditeur, à l'azimut de  $\pm 180^\circ$ . La raison en est qu'il n'existe aucune information du domaine des temps que le cerveau puisse traiter, c'est-à-dire que la différence de temps entre les oreilles ou ITD = 0, et que la seule autre information de position disponible  
15 pour le cerveau, constituée par des données spectrales, est semblable pour les deux positions.

En pratique, il existe davantage d'énergie de hautes fréquences perçue lorsque la source sonore est face à l'auditeur. La raison en est que les hautes  
20 fréquences provenant de sources frontales sont réfléchies vers le canal auditif à partir de la paroi arrière de la conque, alors que des hautes fréquences qui proviennent d'une source arrière ne peuvent pas se diffracter suffisamment autour du pavillon de  
25 l'oreille: voir Figure 12.

L'une des premières méthodes pratiques d'annulation de diaphonie a été décrite dans le brevet des Etats Unis N° 3 236 949 de Atal et Schroeder et expliquée plus complètement dans la publication de  
30 Schroeder de 1975, "Models of Hearing", c'est-à-dire Modèles d'audition, paru dans les Proc. IEEE, septembre 1975, 63 (9), pages 1332 à 1350. Un schéma logique de ce procédé est représenté à la Figure 2.

35 En se référant à la Figure 2, il existe deux sources sonores stéréo gauche 18 et droite 20 qui sont

filtrées par des filtres d'alimentation croisée 21 et 23, afin d'engendrer des signaux 22 et 24 d'excitation de hauts-parleurs, respectivement. Les filtres 21 et 23 représentent la combinaison de deux fonctions de base: en premier lieu, la fonction de transfert, S, entre un premier haut-parleur d'une paire de hauts-parleurs et l'oreille d'un auditeur 10 qui est la plus proche de ce haut-parleur; et en deuxième lieu une fonction A, qui représente la fonction de transfert à partir du même haut-parleur vers l'oreille de l'auditeur éloignée du haut-parleur. En l'absence de tout diaphonie de sons croisés, la fonction de transfert de la source sonore droite 20 vers l'oreille droite serait simplement S, et il en serait de même pour la source sonore gauche 18 et l'oreille gauche. La présence de diaphonie de sons croisés exige cependant qu'un signal d'annulation soit fourni par l'autre haut-parleur.

Considérons par exemple le traitement de transfert du signal 20 du canal droit vers l'oreille droite seulement. Le transfert du haut-parleur droit 14 vers l'oreille droite s'effectue par la fonction S "de même côté". La diaphonie de sons croisés provenant du haut-parleur droit arrive à l'oreille gauche selon une fonction de transfert A. Il faut par conséquent envoyer du haut-parleur gauche à l'oreille gauche un signal  $(- A)$  pour l'annuler. Mais on sait que la fonction de transfert du haut-parleur gauche vers l'oreille gauche est S, et le signal d'annulation de diaphonie d'ensemble du canal droit vers le canal gauche doit être  $(- A/S)$ . Ceci amènerait à l'oreille gauche, de façon appropriée, le signal correct d'annulation de diaphonie. Par conséquent, selon ces observations, la fonction C d'alimentation croisée peut être fixée égale à  $(- A/S)$ . S et A peuvent être établies par des mesures directes, idéalement à partir

d'une tête artificielle qui présente les particularités physiques et les dimensions d'une tête humaine moyenne.

5 Mais un système parfait d'annulation de diaphonie n'est obtenu que lorsque la tête d'un auditeur est totalement immobile et est fixée au centre absolu de la position préféré, c'est-à-dire le "bon endroit" où les oreilles coïncident exactement avec les noeuds d'annulation respectifs d'ondes sonores. La raison en  
10 est que les effets d'annulation d'ondes sonores dépendent de la coïncidence précise de signaux égaux et opposés, et l'annulation d'onde est par conséquent incomplète lorsqu'une onde est relativement décalée.

15 Par exemple, si la tête d'un auditeur devait être déplacée latéralement de façon que l'oreille gauche soit 5 cm plus près du haut-parleur gauche, et 5 cm plus loin du haut-parleur droit, le signal primaire indésirable provenant du haut-parleur droit à  
20 l'oreille gauche, qui doit être annulé, serait relativement décalé de 10 cm par rapport à l'onde prévue d'annulation en provenance du haut-parleur gauche. Par conséquent, l'annulation de diaphonie de sons croisés serait imparfaite. Au fur et à mesure que  
25 la fréquence des signaux audio augmente, cet effet se produit pour des déplacements latéraux relativement petits, parce que les noeuds et les anti-noeuds se rapprochent de plus en plus.

Le brevet des Etats Unis N° 4 975 964 de Cooper  
30 et Bauck décrit une méthode particulière d'annulation de diaphonie de sons croisés, représentée à la Figure 3. La méthode prévoit une paire de filtres 26 et 28 de coupure des hautes fréquences, ou de HF, c'est-à-dire des fréquences > 8 kHz. Selon ce procédé, les signaux  
35 de hautes fréquences qui sont envoyés aux moyens d'annulation de diaphonie sont atténués par des

filtres passe-bas 26 et 28 situés dans le trajet 8 du  
filtre d'alimentation croisée allant du canal gauche  
vers le canal droit, et vice versa. Le brevet  
revendique par conséquent qu'une annulation imparfaite  
5 de diaphonie à fréquences élevées, provoquée par le  
déplacement de la tête hors de la position préférée,  
serait réduite parce que ces hautes fréquences ne sont  
pas annulées quant à la diaphonie de sons croisés.

Mais ce procédé est inefficace lorsque les  
10 sources sonores virtuelles sont placées en arrière  
parce que les composantes de hautes fréquences  
contenues dans les signaux 18 et 20 de source sont  
transmises directement aux hauts-parleurs eux-mêmes,  
sans annulation de diaphonie. Les sources perçues des  
15 sons de hautes fréquences sont par conséquent les  
hauts-parleurs eux-mêmes et non une ou plusieurs  
sources sonores virtuelles. Par conséquent, le son HF  
semble détaché des images sonores virtuelles et semble  
créer une confusion spatiale frontale. Lorsque l'image  
20 sonore virtuelle doit être positionnée en face de  
l'auditeur, l'effet de cette méthode est un étalement  
de la position spatiale de l'image sonore mais,  
lorsque l'image sonore virtuelle doit être positionnée  
derrière l'auditeur, l'effet gêne ou empêche la  
25 formation d'une image arrière. Au contraire, l'image  
devient réfléchie en face de l'auditeur.

En ce qui concerne d'autres méthodes  
d'annulation de diaphonie, comme celle de Atal et  
Schroeder, il est impossible de garantir que la tête  
30 d'un auditeur reste dans la position préférée, dans  
des situations pratiques, et l'annulation de diaphonie  
de sons croisés ne serait pas parfaite si la tête  
s'éloignait de sa position préférée. L'effet d'une  
annulation imparfaite de diaphonie aux fréquences plus  
35 élevées est qu'elles semblent provenir des hauts-  
parleurs eux-mêmes, et non de la position souhaitée

dans laquelle la source sonore virtuelle a été placée en utilisant les fonctions de transfert liées à la tête ou HRTF, comme noté précédemment. De ce fait, positionner une image sonore virtuelle derrière l'auditeur devient beaucoup plus difficile à réaliser, en particulier parce que c'est l'information sonore de hautes fréquences qui fournit, comme indiqué précédemment, une indication frontale qui permet à un auditeur de distinguer entre des sons placés en face de lui et des sons placés derrière lui.

Il est intéressant de noter ici que créer une annulation efficace de diaphonie n'est pas aussi difficile qu'il pourrait le sembler. Ceci résulte des propriétés acoustiques naturelles de la tête et des oreilles elles-mêmes. Essentiellement, au fur et à mesure que la fréquence d'un signal augmente, la tête agit de façon de plus en plus efficace comme une chicane, qui supprime naturellement des diaphonies aux hautes fréquences. Par conséquent, les diaphonies de hautes fréquences à annuler sont faibles, et le procédé de Cooper et Bauck ne fournit pas, en pratique, un avantage significatif par rapport au procédé de Atal et Schroeder.

C'est un but de la présente invention que de réaliser un traitement sonore tridimensionnel plus efficace en réduisant les confusions liées aux composantes de hautes fréquences d'une source sonore virtuelle positionnée derrière un auditeur, de préférence en utilisant un filtrage à coupure progressive de hautes fréquences.

Selon un premier aspect, l'invention fournit un procédé de traitement d'un signal audio à canal unique pour produire un signal audio à canaux gauche et droit qui correspond à une source sonore virtuelle située en cours d'utilisation dans une direction donnée de l'espace par rapport à une position préférée d'un

auditeur, dans lequel l'espace inclut une hémisphère avant et une hémisphère arrière par rapport à ladite position préférée et l'information audio inclut des indications pour la perception de la direction dudit  
5 signal audio de canal unique à partir de ladite position préférée,

qui comprend les étapes consistant à:

i) produire un signal à deux canaux qui inclut dans les deux canaux le même signal de canal unique;  
10 ii) modifier les deux signaux de canaux en modifiant les deux canaux en utilisant une fonction d'une série de fonctions de transfert de réponse de tête afin de produire un signal de droite dans un premier canal pour l'oreille droite d'un auditeur et  
15 un signal de gauche dans l'autre canal pour l'oreille gauche de l'auditeur;

iii) introduire entre les canaux un retard de temps qui correspond à la différence de temps entre oreilles pour un signal provenant de ladite direction  
20 donnée,

caractérisé en ce que le procédé inclut une autre étape consistant à

(iv) filtrer le signal dans les deux canaux en utilisant un moyen de filtre de coupure de hautes  
25 fréquences, ou HF, les caractéristiques du moyen de filtre de coupure de hautes fréquences pouvant être fixées en fonction de la direction donnée de la source sonore virtuelle.

On peut prévoir que l'ampleur du filtrage de  
30 coupure de hautes fréquences atteint un maximum pour des sources sonores virtuelles placées directement derrière la position préférée de l'auditeur, c'est-à-dire dans une direction dont l'azimut est de  $\pm 180^\circ$  et l'élévation de  $0^\circ$  par rapport à la position préférée  
35 de l'auditeur, et que

l'ampleur du filtrage de coupure de HF diminue progressivement au fur et à mesure de l'approche de l'hémisphère avant.

Le filtrage de coupure de HF peut être nul pour  
5 des sources sonores virtuelles placées dans des directions dont l'azimut est compris entre  $0^\circ$  et  $\pm 90^\circ$  par rapport à la position préférée de l'auditeur.

Les signaux des canaux gauche et droit peuvent être traités par un moyen d'annulation de diaphonie de  
10 sons croisés afin de produire des signaux compatibles avec des hauts-parleurs.

Les coefficients des moyens de filtre de coupure de hautes fréquences peuvent être fixés en fonction de l'angle d'azimut et de l'angle d'élévation de la  
15 source sonore virtuelle.

L'ampleur de filtrage de coupure des HF peut être sensiblement la même pour des sources sonores virtuelles placées à des positions de l'hémisphère arrière qui sont équidistantes de l'azimut de  $\pm 180^\circ$   
20 et de l'élévation de  $0^\circ$  par rapport à une position préférée de l'auditeur.

Les coefficients des moyens de filtre de coupure de HF peuvent être fixés par une table à consulter, appelée simplement table dans ce qui suit.

25 Le moyen de filtre de coupure de HF peut être utilisé en série avec une fonction de transfert liée à la tête, ou HRTF.

Le procédé peut inclure une convolution d'une fonction de transfert liée à la tête, ou HRTF, avec un  
30 moyen de filtre de coupure de HF pour produire une fonction de transfert liée à la tête, ou HRTF, modifiée.

Selon un deuxième aspect, l'invention réalise un appareil de mise en oeuvre du procédé selon l'une  
35 quelconque des modalités précédentes, caractérisé en ce qu'il inclut

un moyen de traitement de signaux,  
un moyen de filtre à fonction de transfert liée  
à la tête ou HRTF,

un moyen de filtre de coupure de hautes  
5 fréquences, ou HF, et

un moyen de détermination de coefficients de  
filtre de coupure de hautes fréquences en fonction de  
la direction de la source sonore virtuelle.

Selon un troisième aspect, l'invention réalise un  
10 programme informatique de mise en oeuvre d'un procédé  
selon l'une quelconque des modalités exposées  
précédemment.

Les buts, particularités et avantages de la  
présente invention exposés ci-dessus ainsi que  
15 d'autres ressortiront davantage de la description qui  
suit d'un mode de réalisation préféré, prise en  
liaison avec les dessins annexés dans lesquels:

la Figure 1 représente l'enregistrement d'un  
événement au moyen de microphones espacés;

20 les Figures 2 et 3 représentent les méthodes  
respectives de Schroeder et de Cooper et Bauck  
d'annulation de diaphonie de sons croisés, selon l'art  
antérieur;

la Figure 4 représente la tête d'un auditeur à  
25 l'intérieur d'une sphère imaginaire de référence, et  
un système de coordonnées.

La Figure 5 représente un lieu géométrique de  
filtrage défini par un cône imaginaire conforme à la  
présente invention;

30 les Figures 6a, 6b et 6c sont une vue en  
élévation de face, une vue en élévation en bout, et  
une vue en plan, respectivement, de la Figure 5 selon  
l'invention;

les Figures 7a, 7b et 7c sont une vue en  
35 élévation de face, une vue en élévation en bout, et  
une vue en plan, respectivement, d'un système de cônes

une vue en plan, respectivement, d'un système de cônes imaginaires d'indexation de filtres selon l'invention;

la Figure 8 représente la transformation de coordonnées sphériques en cônes d'indexation selon  
5 l'invention;

la Figure 9 représente la transformation de coordonnées sphériques en transformation de cône d'indexation, selon l'invention;

Les figures 10 et 11 représentent la surface des  
10 transformées des équations (1) et (2), respectivement, selon l'invention, et

la Figure 12 représente la structure de l'oreille externe.

Par des expérimentations extensives, les  
15 inventeurs ont découvert que des composantes de hautes fréquences de la source sonore virtuelle pour lesquelles la diaphonie n'est pas annulée, ou n'est pas annulée de façon appropriée, doivent être réduites ou éliminées d'une manière appropriée pour qu'un  
20 auditeur puisse placer efficacement derrière lui une source sonore virtuelle, à partir d'une paire de hauts-parleurs classiques. Ces composantes HF sont perçues comme émanant de positions situées en face de lui, c'est-à-dire frontales, et provoquent des  
25 confusions pour l'auditeur.

Comme indiqué précédemment, une autre raison de la réduction des composantes HF de source sonore virtuelle à positionner derrière l'auditeur est que le pavillon de l'oreille constitue en pratique, pour ces  
30 composantes d'une source sonore arrière, un obstacle pour atteindre le canal auditif, et que leur amplitude est donc réduite pour des sources sonores provenant de l'arrière. Une méthode de réduction des composantes HF consiste à appliquer une réduction globale de hautes  
35 fréquences (HF) à toute la chaîne audio. Mais ceci ne serait pas une solution parce que cela ne modifierait

pas les données spectrales différentielles qui permettent à un auditeur de discriminer entre des sources frontales et des sources arrière.

Le procédé de la présente invention réduit les  
5 composantes HF en employant un filtre de coupure de HF pour toutes les sources sonores virtuelles qui doivent être placées derrière l'auditeur. Afin de créer une transition sans distinction remarquable entre des sources sonores virtuelles non filtrées situées en  
10 face de l'auditeur et des sources sonores virtuelles filtrées situées derrière l'auditeur, l'invention introduit progressivement une coupure des hautes fréquences pour des sons virtuels placés derrière la position préférée de l'auditeur, en augmentant de plus  
15 en plus l'effet de filtrage au fur et à mesure que la source s'approche d'un azimut de  $\pm 180^\circ$ , c'est-à-dire directement derrière l'auditeur. Ce procédé intervient progressivement et en douceur dans les trois dimensions, et non simplement dans le plan horizontal.  
20 Le procédé peut aussi être réduit à un algorithme simple qui peut être mis en application sous la forme d'une table, plutôt qu'au moyen d'équations mathématiques qui impliquent des fonction transcendantes, parce que ces dernières exigent des  
25 efforts considérables de calcul.

Ces exigences peuvent être satisfaites par la présente invention décrite ci-dessous qui fournit, pour choisir le filtre approprié de coupure des hautes fréquences, un agencement d'indexation en fonction des  
30 valeurs d'azimut et d'élévation de la source sonore virtuelle choisie. En premier lieu, un système de références spatiales est défini par rapport à l'auditeur, comme représenté à la Figure 4. La Figure 4 représente la tête et les épaules d'un auditeur 10,  
35 entourées par une sphère imaginaire de références 30. Le plan horizontal qui coupe la sphère 30 est illustré

par la zone hachurée et des axes horizontaux P-P' et Q-Q' y sont représentés. P-P' est l'axe avant arrière, et Q-Q' est l'axe dit latéral, perpendiculaire au premier, et tous deux passent par la tête de l'auditeur.

La convention choisie ici comme référence pour les angles d'azimut est qu'ils sont mesurés à partir du plan frontal P vers le plan arrière P', les valeurs positives de l'azimut étant sur le côté droit de l'auditeur et les valeurs négatives sur le côté gauche. Le pôle arrière P' est un azimut de + 180°, et aussi de - 180°. Le plan médian est le plan bissecteur vertical de la tête de l'auditeur, qui passe dans une direction avant arrière par l'axe P-P'. Les angles d'élévation sont mesurés directement à partir du plan horizontal, vers le haut pour des angles positifs, et vers le bas pour des angles négatifs.

La Figure 5 représente un cône d'indexation conforme à la présente invention, utilisé pour effectuer une division notionnelle de la sphère imaginaire. A partir de l'origine, qui est le centre de la tête de l'auditeur, le cône d'indexation se projette dans l'espace derrière l'auditeur en étant aligné axialement selon l'axe P-P'. Le cône coupe la sphère de référence en formant à l'intersection un cercle que l'on appellera le bord du cône. Soit ce bord, soit le cône lui-même, peut former un lieu géométrique de points pour indexer le filtrage de coupure de HF. En d'autres termes, tous les points du cône imaginaire sont filtrés identiquement. Si la source sonore virtuelle doit être placée sur la surface de l'hémisphère, c'est-à-dire à une distance donnée de la position préférée de l'auditeur, tous les points situés sur le bord du cône défini ci-dessus sont filtrés identiquement. On peut donc voir que l'ampleur du filtrage de la coupure de

HF est identique pour des sources sonores virtuelles placées à des positions derrière l'auditeur qui sont équidistantes, sur l'hémisphère arrière, du point P', de coordonnées  $\pm 180^\circ$  d'azimut,  $0^\circ$  d'élévation.

5 La Figure 6 représente un cône d'indexation typique 32 selon l'invention. Plus spécifiquement, la Figure 6a représente en vue en élévation de face, la Figure 6b représente la vue en élévation en bout, et la Figure 6c une vue en plan d'un cône d'indexation  
10 32. Le cône 32 est défini par le demi angle  $a$  au sommet du cône, représenté à la Figure 6b. Plus le demi angle au sommet du cône est grand, plus le cône est "plat".

La Figure 7 représente plusieurs cônes  
15 d'indexation typiques selon l'invention, y compris deux conditions limites:  $a = 0^\circ$  et  $a = 90^\circ$ . Lorsque  $a = 90^\circ$  le cône s'approche d'une feuille plane qui passe par l'axe Q-Q' et qui est limitée par la sphère imaginaire de référence. Ceci est représenté par le  
20 cône A à la Figure 7. Pour  $a = 0^\circ$ , le bord du cône est un point unique, où l'axe P-P' coupe la sphère imaginaire de référence dans l'hémisphère arrière. C'est le cône D de la Figure 7.

Les cônes d'indexation sont utilisés de la  
25 manière suivante. En premier lieu, un filtre de coupure de HF de "position polaire" est choisi pour la position la plus en arrière, qui correspond au cône D aux Figures 7b et 7c. On y parvient, de préférence, en écoutant le système de synthèse sonore  
30 tridimensionnelle, et en introduisant progressivement un filtrage approprié de coupure de HF jusqu'à ce que l'emplacement arrière d'une source sonore virtuelle à l'azimut  $180^\circ$  soit totalement efficace pour les mouvements latéraux nécessaires de la tête de  
35 l'auditeur au "bon endroit". Par exemple, les caractéristiques du filtre de coupure de HF de la

position polaire peuvent débiter à 5 kHz selon une progression linéaire telle que la coupure de HF atteint 30 dB à 10 kHz. On effectue alors, sur la caractéristique du filtre à coupure de HF à la position polaire, une division notionnelle par un facteur approprié (N) pour produire une série de N filtres de coupure de HF. Un facteur de 30 est choisi ici parce que des points de la sphère imaginaire sont typiquement quantifiés pour des raisons pratiques par étapes de  $3^\circ$  pour le traitement des signaux, à partir d'un azimut de  $180^\circ$  jusqu'à un azimut de  $90^\circ$ . Par conséquent, le filtre numéro 30 coupe de 30 dB à 10 kHz et correspond à un filtrage maximal de coupure de HF, le filtre numéro 29 coupe de 29 dB à 10 kHz, et ainsi de suite, en diminuant jusqu'au filtre numéro 1 qui coupe de 1 dB à 10 kHz et correspond à un filtrage minimal de coupure de HF. C'est en pratique un filtre unique de coupure de HF qui est utilisé, avec des coefficients réglables qui correspondent aux caractéristiques de la série de filtres de coupure de HF décrits ci-dessus.

Lorsqu'une source sonore virtuelle doit être placée dans l'hémisphère arrière, les coordonnées de sa position sont utilisées pour déterminer le plus proche des différents bords de cône, cônes qui sont au nombre de 30 dans le cas présent. Le numéro d'index du cône est ensuite utilisé pour sélectionner le filtre approprié de coupure de hautes fréquences. En ne se référant actuellement qu'à des sources sonores virtuelles qui doivent être placées dans le plan horizontal, l'azimut d'une source sonore située à la position polaire arrière P' est de  $180^\circ$ , et elle exigerait donc un filtrage maximal de coupure de HF. C'est par conséquent le filtre numéro 30 à coupure de 30 dB qui serait utilisé. En se déplaçant maintenant vers un point d'azimut de  $177^\circ$ , le filtre numéro 29

serait utilisé, et ainsi de suite, le filtre minimal 1 étant utilisé à  $93^\circ$ . Le procédé d'adressage de filtre pour le plan horizontal est résumé dans le tableau suivant.

	Angle d'azimut (Elevation= $0^\circ$ )	Numéro d'index	Coupure de HF à 10 kHz (dB)
		-	-
	$84^\circ$	-	0
	$87^\circ$	-	0
5	$90^\circ$	-	0
	$93^\circ$	1	1
	$96^\circ$	2	2
	$99^\circ$	3	3
	-	-	-
10	$174^\circ$	28	28
	$177^\circ$	29	29
	$180^\circ$	30	30
	$-177^\circ$	29	29
	$-174^\circ$	28	28
15	$-171^\circ$	27	27
	-	-	-

Tableau 1 - Exemple d'agencement typique d'indexation dans le plan horizontal

Pour des points situés dans le plan horizontal, il existe une relation simple entre le demi angle,  $a$ , au sommet du cône et l'angle d'azimut: ce sont des angles complémentaires dont la somme est toujours de  $180^\circ$ . En revanche, pour une source sonore virtuelle située à une position extérieure au plan horizontal, le cône d'indexation est lié non seulement à l'angle d'azimut mais aussi à l'angle d'élévation. Considérons par exemple un angle d'azimut de  $180^\circ$  dans le plan horizontal: le numéro d'indexation est 30. En revanche, si l'angle d'azimut était de  $180^\circ$  mais si l'angle d'élévation était de  $90^\circ$ , la position spatiale serait exactement au-dessus de la tête de l'auditeur,

et le numéro d'indexation serait donc de 0, ce qui exige une absence de filtrage. Afin d'appliquer les coordonnées sphériques au demi angle au sommet du cône, il faut utiliser une fonction appropriée. On va maintenant décrire cette fonction.

Les Figures 8a et 8b représentent un point B, situé sur la moitié arrière de la sphère imaginaire de référence et représentant la position dans laquelle une source sonore virtuelle doit être placée. La Figure 8a représente l'angle d'azimut de B et sa relation avec l'angle complémentaire: c'est-à-dire  $180^\circ$  moins l'angle d'azimut. La Figure 8b représente l'angle d'élévation de B, mesuré par rapport au plan horizontal.

En se référant maintenant à la Figure 9, on abaisse de B une perpendiculaire qui coupe le plan horizontal en C. Une ligne est tracée de C pour couper l'axe P-P' en D de façon que la ligne CD soit parallèle à l'axe Q-Q'. Quatre triangles sont ainsi formés: ABC, DBC, ABD et ACD. L'angle CAB est l'angle d'élévation, l'angle CAD est le complément à  $180^\circ$  de l'angle d'azimut et l'angle DAB est le demi angle au sommet du cône.

En inspectant les relations entre les côtés des triangles, on peut voir que la relation suivante est valide entre le demi angle  $a$  au sommet du cône, l'angle d'azimut  $\theta$  et l'angle d'élévation  $\phi$

$$a = \sin^{-1} \sqrt{(\sin^2 \phi + \cos^2 \phi \cdot \sin^2 (180 - \theta))} \quad (1)$$

Lorsque l'équation ci-dessus est appliquée à des valeurs d'azimut et d'élévation de l'hémisphère arrière, elle permet de déterminer le demi angle  $a$  au sommet du cône. La valeur de  $a$  peut être arrondie, par exemple, au multiple de  $3^\circ$  la plus voisin, ce qui permet de déterminer le cône d'indexation le plus voisin. Par conséquent, l'index du filtre à utiliser

pour la position spatiale du point B peut être trouvé de la manière représentée au tableau 2.

	Demi angle $\alpha$ au sommet du cône)	Numéro d'index de filtre	Coupure de HF à 10 kHz (dB)
5	90°	-	0
	87°	1	1
	84°	2	2
	81°	3	3
	78°	4	4
10	75°	5	5
	-	-	-
	6°	28	28
	3°	29	29
	0°	30	30

15 Tableau 1 - Exemple d'agencement typique d'indexation dans le plan horizontal

Un tracé de la surface tridimensionnelle de l'équation est représenté à la Figure 10.

L'équation (1) décrit une relation de dépendance  
 20 linéaire entre la coupure de HF, en dB, et le demi angle au sommet du cône, mais elle est également valide pour définir une fonction linéaire, par exemple une fonction logarithmique, ou un développement en série de puissances. Utiliser une fonction non  
 25 linéaire permet d'optimiser les propriétés spatiales du procédé. Par exemple, un ralentissement de l'allure de variation de coupure de HF est appropriée au point d'entrée, c'est-à-dire à la position à laquelle le filtre débute dans l'hémisphère arrière, et aussi à la  
 30 position polaire, c'est-à-dire à l'azimut 180°, afin de réaliser un effet de transition plus en douceur lorsque la source sonore virtuelle se déplace en passant par ces positions. On y parvient, par exemple, en utilisant des fonctions sinusoidales et  
 35 cosinusoidales, mises à l'échelle et déportées de façon appropriée. En particulier:

$$\text{Index } (\theta, \phi) = \left[ \frac{\cos (2\theta - \pi) + 1}{2} \right] \left[ \frac{(\cos 2\phi) + 1}{2} \right] \quad (2)$$

Ici,  $\theta$  est l'angle d'azimut et  $-90^\circ > \theta > +90^\circ$ ,  
 et  $\phi$  est l'angle d'élévation, compris entre 0 et  $\pm$   
 5  $90^\circ$ . Ici aussi, le degré de filtrage de coupure de HF  
 est directement lié à la valeur de l'index. La valeur  
 d'un index est comprise entre 0, pour un filtrage nul,  
 et + 1 pour un filtrage maximal, et elle peut être  
 mise à l'échelle, par exemple de 1 à 30, afin de  
 10 fournir l'index direct approprié pour une sélection de  
 filtre. Un tracé tridimensionnel de la surface de  
 l'équation (2) est représenté à la Figure 11.

La technique peut également être appliquée à des  
 signaux audio traités pour être utilisés avec des  
 15 casques à écouteurs lorsqu'aucune annulation de  
 diaphonie n'est nécessaire. Enlever les hautes  
 fréquences de sources sonores arrière peut réduire la  
 compression spatiale avant-arrière de perspective  
 arrière présentes lors d'une audition par un casque à  
 20 écouteurs. Des raisons d'une telle compression sont  
 liées au fait que des sources sonores riches en  
 informations de hautes fréquences sont perçues par le  
 cerveau comme situées très près des oreilles. La  
 raison en est que les sons de hautes fréquences sont  
 25 plus absorbés par leur transmission dans l'air que les  
 sons à basse fréquence. Lorsque des hauts-parleurs  
 sont utilisés pour l'écoute, ils sont habituellement  
 installés à un ou plusieurs mètres de l'oreille,  
 tandis que, en cas d'utilisation d'un casque à  
 30 écouteurs, les unités d'excitation de ce dernier sont  
 en contact intime avec l'oreille, de sorte que le  
 contenu en HF est plus élevé que ce qui est naturel.  
 Ce contenu HF apparent élevé correspond à des sources  
 sonores proches, et l'image sonore résultante produite  
 35 par le casque à écouteurs est contrainte à être près  
 de la tête, et non à la distance correcte.

Les modes de réalisation décrits précédemment peuvent être mis en application, par exemple, par les éléments suivants: (1) un filtre sériel de coupure de hauteurs fréquences, intervenant avec l'ensemble classique de fonctions de transfert liées à la tête ou HRTF; ou (2) un ensemble modifié de filtres à fonctions de transfert liées à la tête ou HRTF peut être créé par convolution, avec son filtre respectif de coupure de HF, de chacun des filtres à fonction de transfert liée à la tête destiné à placer des sons virtuels dans l'hémisphère arrière; ou (3) des paires modifiées individuelles de fonctions de transfert liées à la tête peuvent être utilisées indépendamment, par exemple, dans la simulation d'un système sonore entourant à canaux multiples, comme AC-3 5.1.

Les modes de réalisation peuvent être mis en application à l'aide de programmes informatiques.

REVENDICATIONS

1. Procédé de traitement d'un signal audio à canal unique pour produire un signal audio à canaux gauche et droit qui correspond à une source sonore virtuelle située en cours d'utilisation dans une direction donnée de l'espace par rapport à une position préférée d'un auditeur (10), dans lequel l'espace inclut une hémisphère avant et une hémisphère arrière par rapport à ladite position préférée et l'information audio inclut des indications pour la perception de la direction dudit signal audio de canal unique à partir de ladite position préférée, qui comprend les étapes consistant à:

i) produire un signal à deux canaux qui inclut dans les deux canaux le même signal de canal unique;

ii) modifier les deux signaux de canaux en modifiant les deux canaux en utilisant une fonction d'une série de fonctions de transfert de réponse de tête afin de produire un signal de droite dans un premier canal pour l'oreille droite d'un auditeur (10) et un signal de gauche dans l'autre canal pour l'oreille gauche de l'auditeur (10);

iii) introduire entre les canaux un retard de temps qui correspond à la différence de temps entre oreilles pour un signal provenant de ladite direction donnée,

caractérisé en ce que le procédé inclut une autre étape consistant à

(iv) filtrer le signal dans les deux canaux en utilisant un moyen de filtre de coupure de hautes fréquences, ou HF, les caractéristiques du moyen de filtre de coupure de hautes fréquences pouvant étant fixées en fonction de la direction donnée de la source sonore virtuelle (cônes A à D).

2. Procédé selon la revendication 1 caractérisé en ce que

l'ampleur du filtrage de coupure de hautes fréquences atteint un maximum pour des sources sonores virtuelles placées directement derrière la position préférée de l'auditeur (10), c'est-à-dire dans une direction dont l'azimut est de  $\pm 180^\circ$  (cône D) et l'élévation de  $0^\circ$  par rapport à la position préférée de l'auditeur (10), et

l'ampleur du filtrage de coupure de HF diminue progressivement au fur et à mesure de l'approche de l'hémisphère avant (cônes C, B, A).

3. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le filtrage de coupure de HF est nul pour des sources sonores virtuelles placées dans des directions dont l'azimut est compris entre  $0^\circ$  et  $\pm 90^\circ$  par rapport à la position préférée de l'auditeur (10).

4. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que

les signaux des canaux gauche et droit sont traités par un moyen d'annulation de diaphonie de sons croisés afin de produire des signaux compatibles avec des hauts-parleurs.

5. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que les coefficients des moyens de filtre de coupure de HF sont fixés en fonction de l'angle d'azimut et de l'angle d'élévation de la source sonore virtuelle.

6. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'ampleur de filtrage de coupure de HF est sensiblement la même pour des sources sonores virtuelles placées à des positions de l'hémisphère arrière qui sont équidistantes de l'azimut de  $\pm 180^\circ$  (cône D) et de l'élévation de  $0^\circ$  par rapport à une position préférée de l'auditeur (10).

7. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que les coefficients des moyens de filtre de coupure de HF sont fixés par une table à consulter.

5 8. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes caractérisé en ce que

le moyen de filtre de coupure de HF est utilisé en série avec une fonction de transfert liée à la tête, ou HRTF.

10 9. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, caractérisé par

une convolution d'une fonction de transfert liée à la tête, ou HRTF, avec un moyen de filtre de coupure de HF pour produire une fonction de transfert liée à la tête ou HRTF modifiée.

15 10. Appareil de mise en oeuvre du procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il inclut

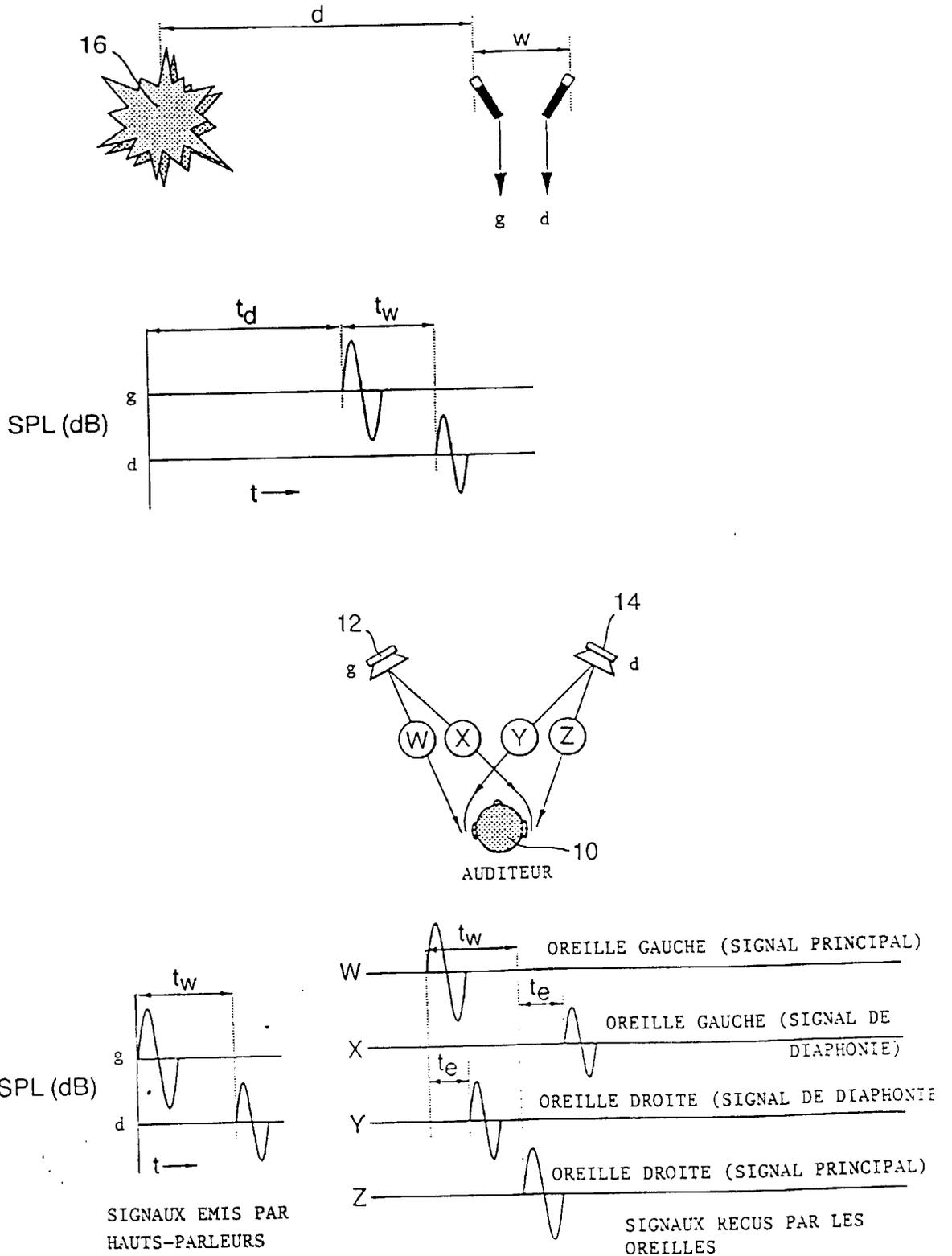
un moyen de traitement de signaux,

20 un moyen de filtre à fonction de transfert liée à la tête ou HRTF,

un moyen de filtre de coupure de HF, et

25 un moyen de détermination de coefficients de filtre de coupure de HF en fonction de la direction de la source sonore virtuelle.

Fig.1.



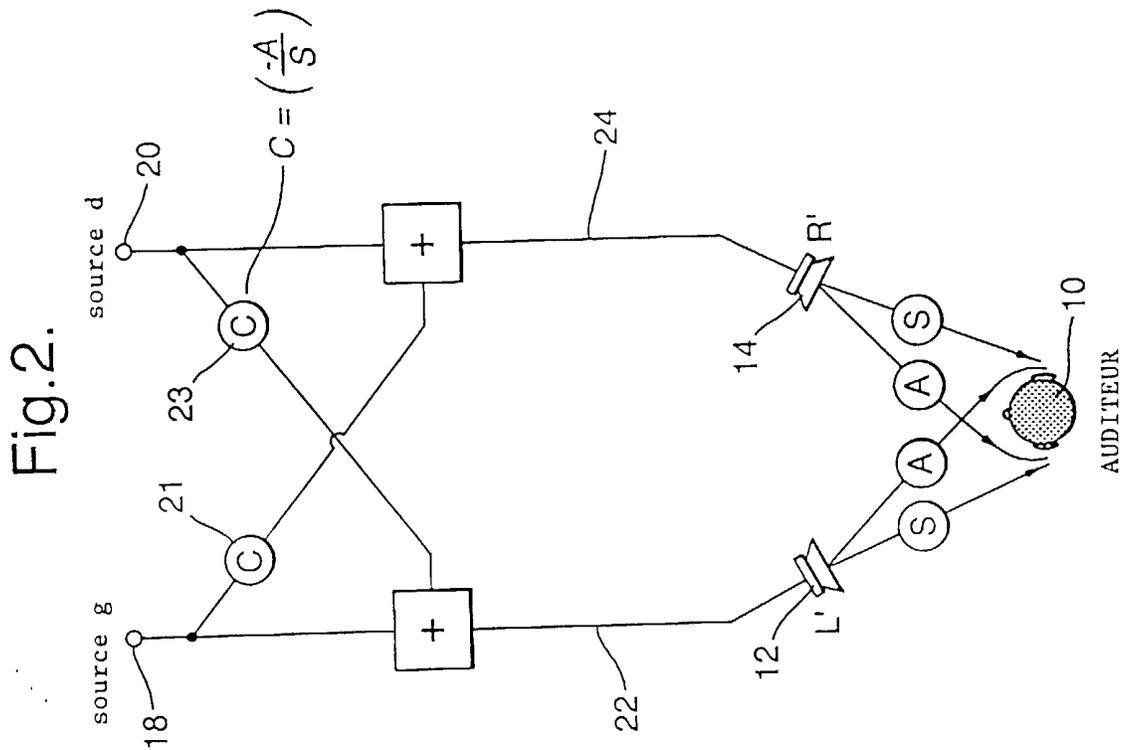
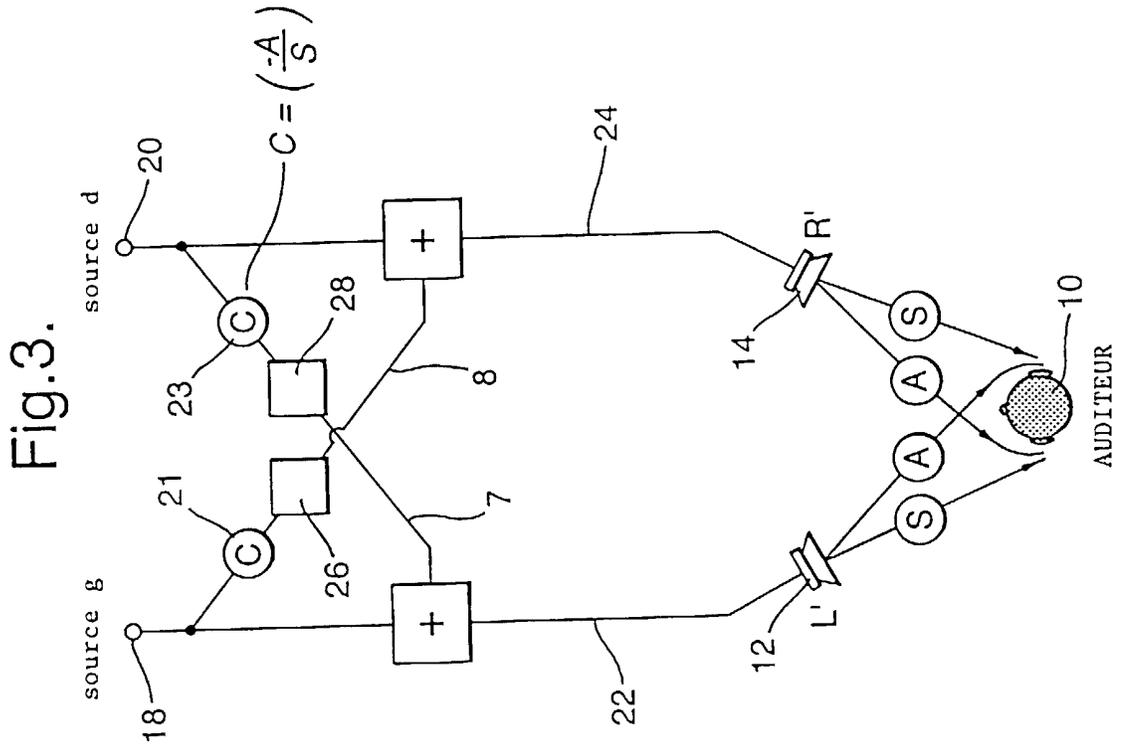


Fig.4.

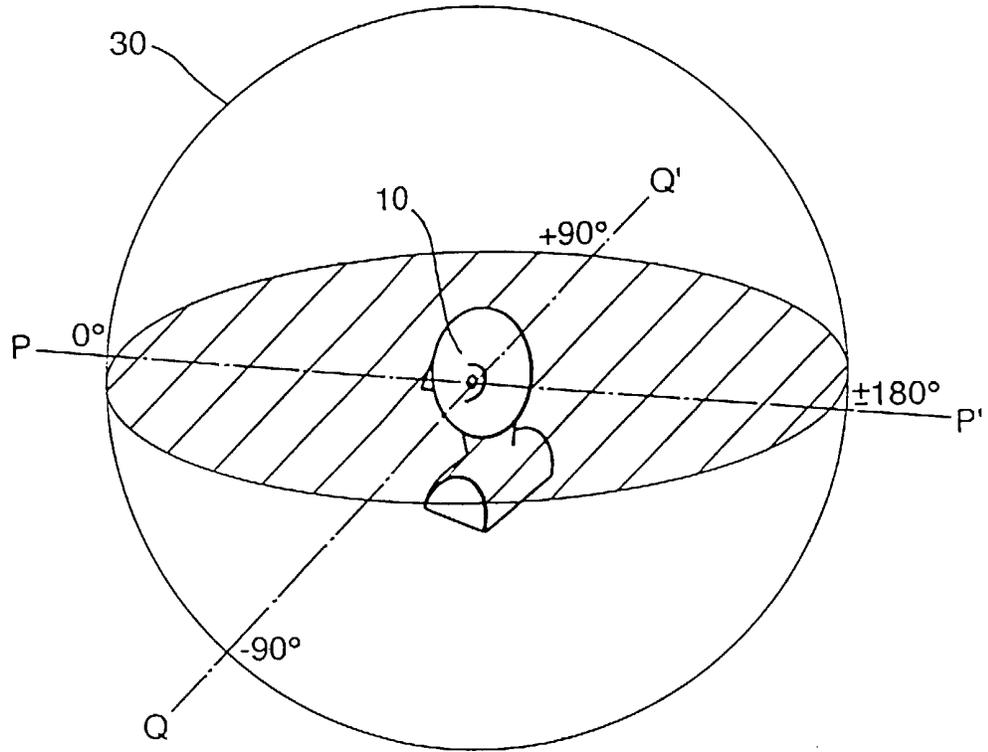


Fig.5.

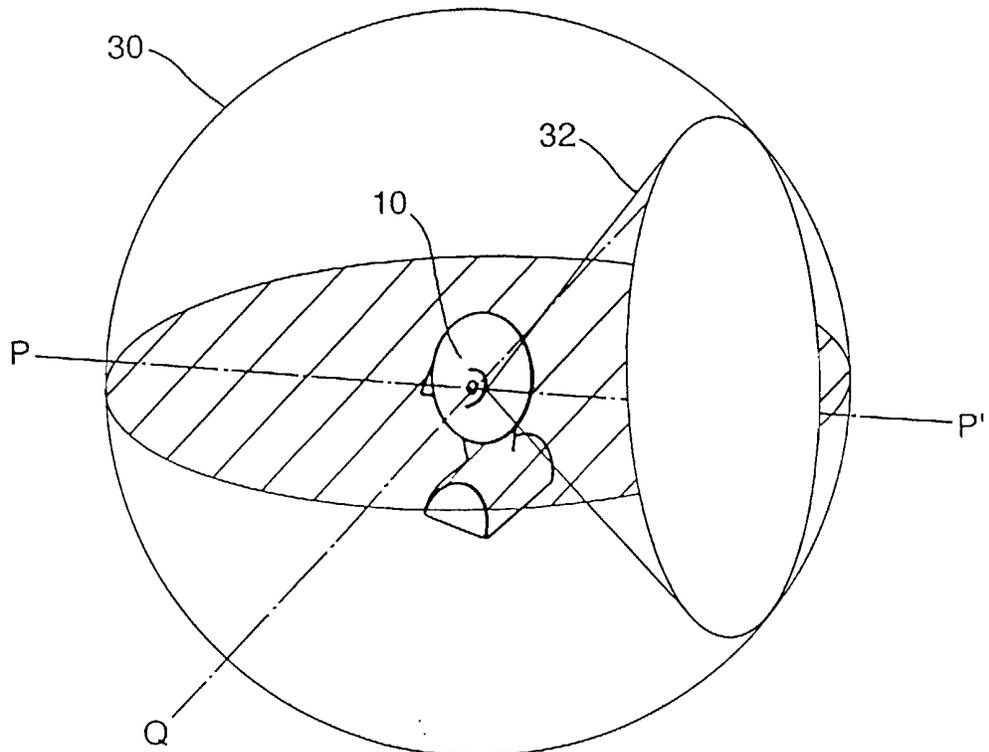


Fig. 6b.

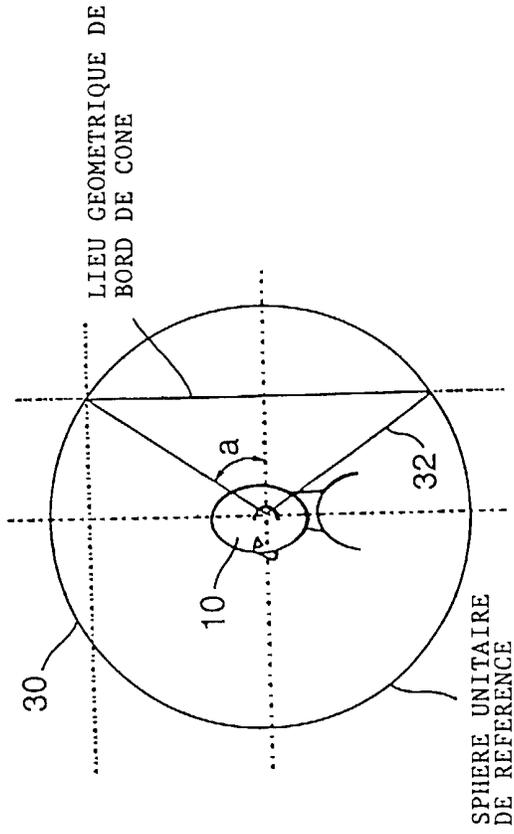


Fig. 6c.

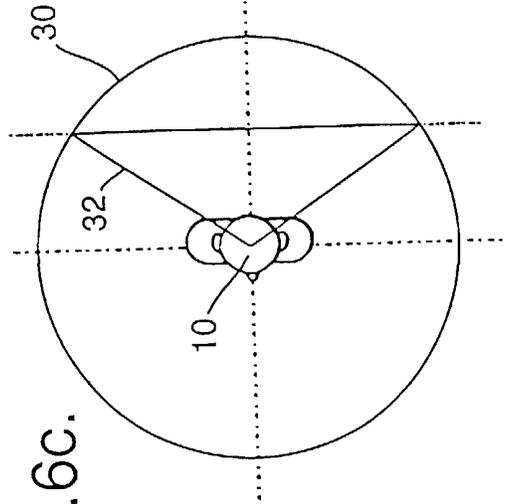
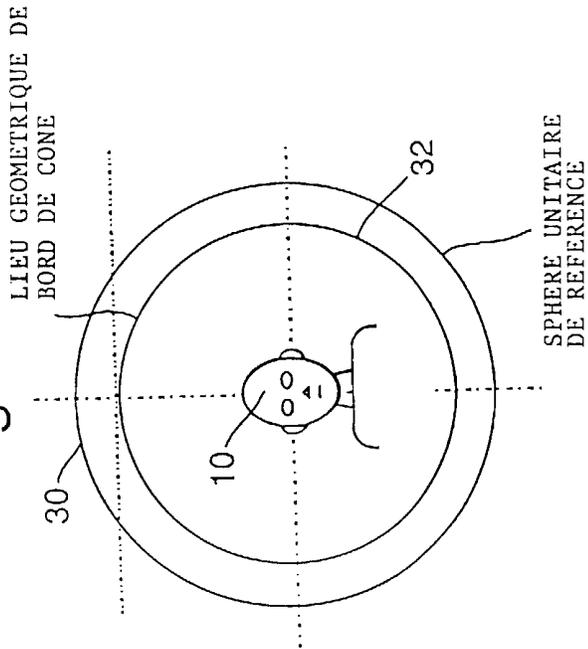


Fig. 6a.



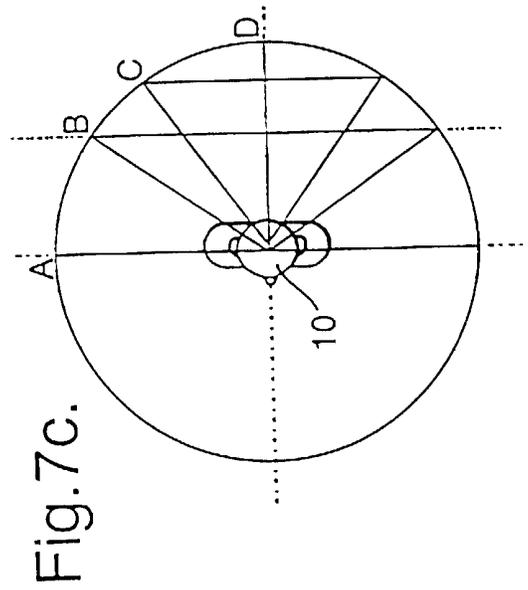
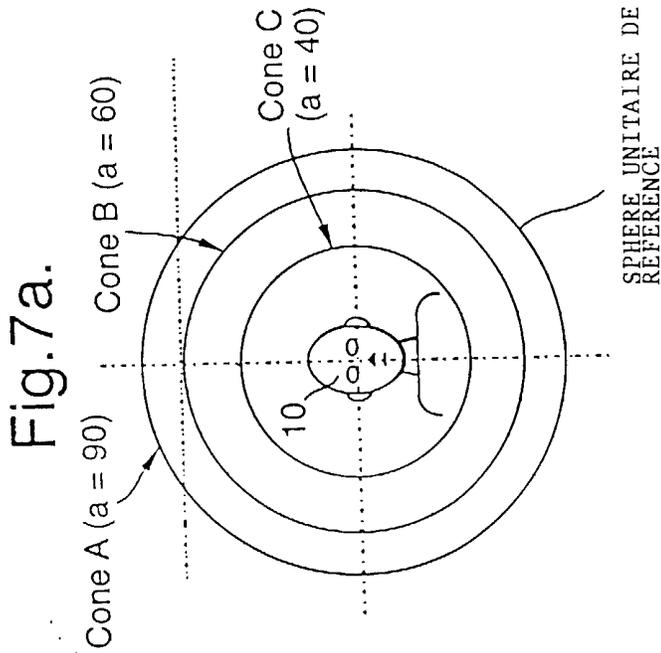
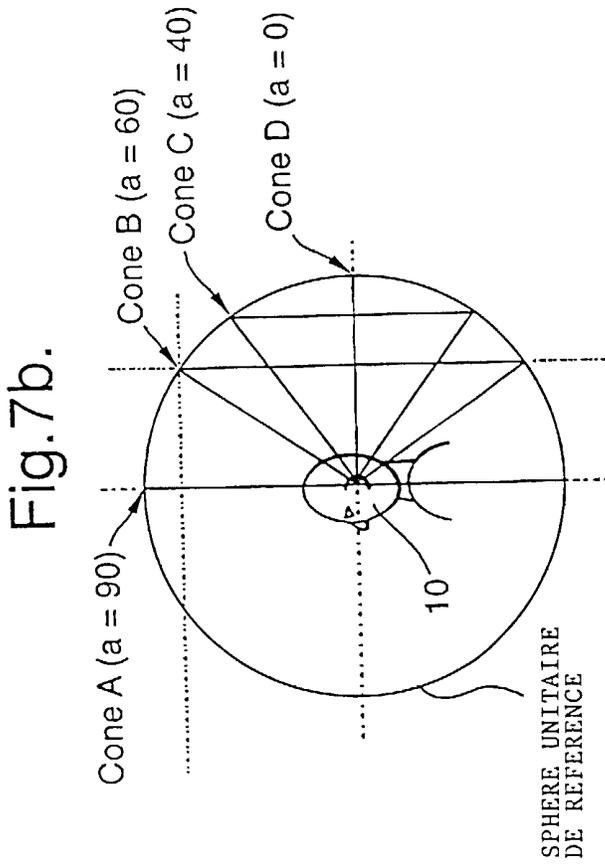


Fig.8a.

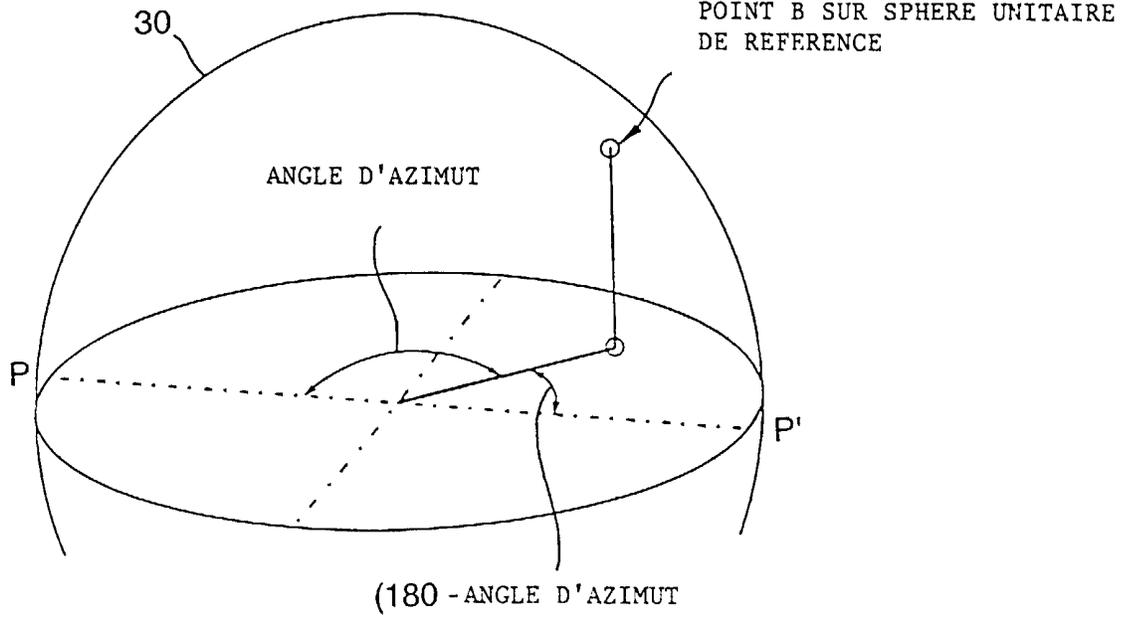


Fig.8b.

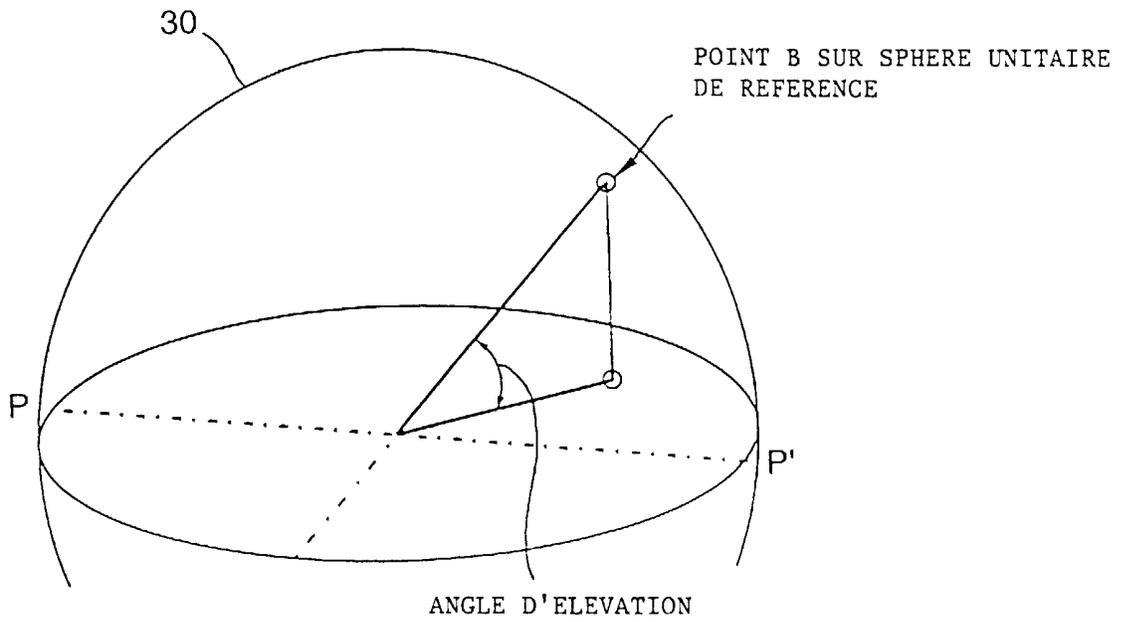
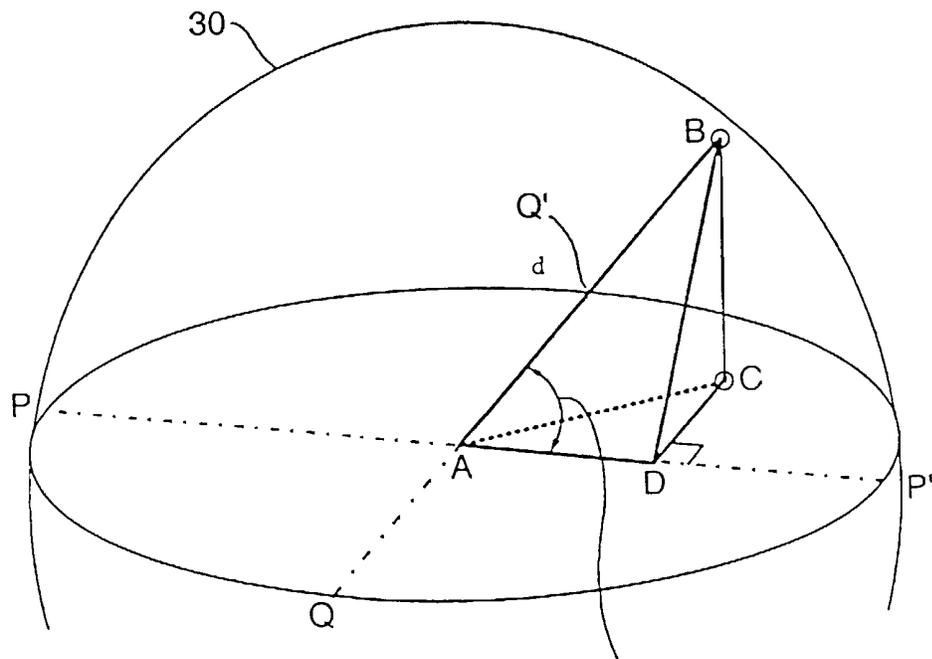


Fig.9.



DEMI ANGLE AU SOMMET DU CONE , DAB

Fig.10.

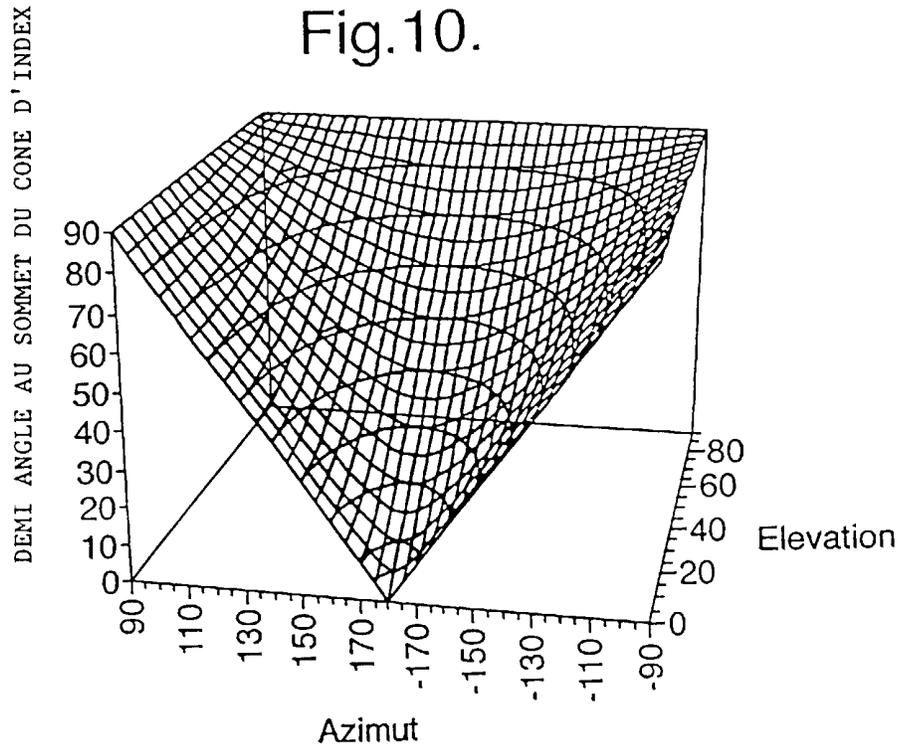


Fig.11.

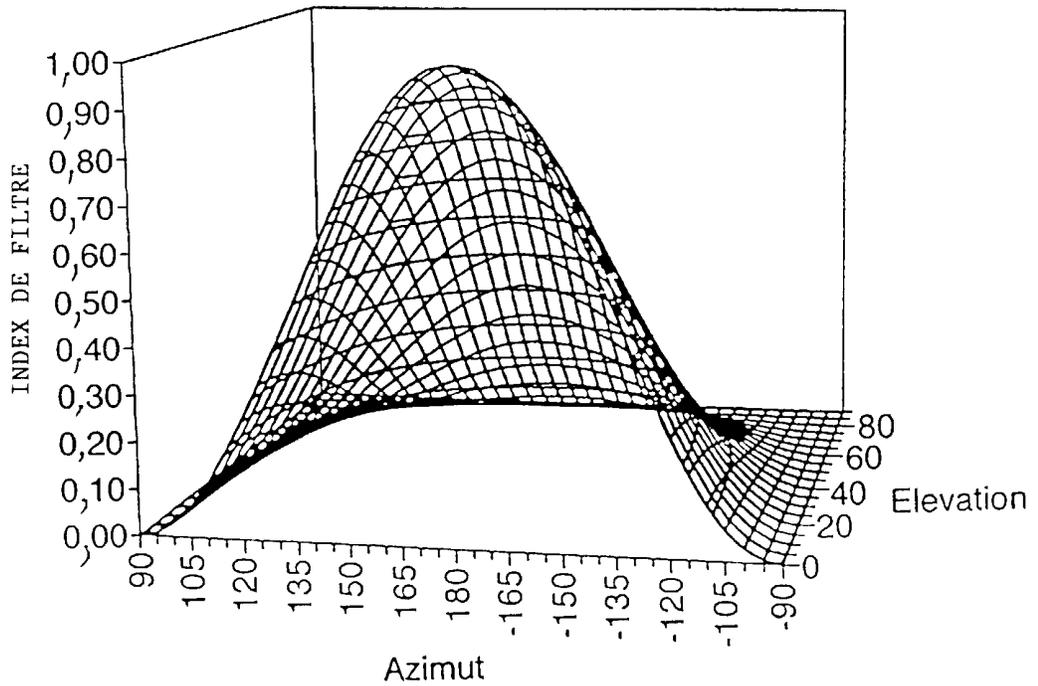


Fig.12.

