



(51) Classification internationale des brevets :
G01H 15/00 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2015/061454

(22) Date de dépôt international :
22 mai 2015 (22.05.2015)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
1454649 23 mai 2014 (23.05.2014) FR

(71) Déposants : CENTRE NATIONAL DE LA RE-
CHERCHE SCIENTIFIQUE [FR/FR]; 3, rue Michel
Ange, F-75016 Paris (FR). UNIVERSITE PIERRE ET
MARIE CURIE [FR/FR]; 4, Place Jussieu, F-75005 Paris
(FR).

(72) Inventeurs : HENRICH BERNARDONI, Nathalie; 145,
rue des Ecrins, F-38530 Pontcharra (FR). ERBSEN, Cé-
drik; 13, Cité Voltaire, F-75011 Paris (FR). DOVAL, Bo-
ris; 20, rue Poliveau, F-75005 Paris (FR).

(74) Mandataires : LUCAS, Laurent et al.; Marks & Clerk
France, Immeuble VISIUM, 22, avenue Aristide Briand, F-
94117 Arcueil Cedex (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre
de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM,
AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY,
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR,
KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG,
MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM,
PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC,
SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN,
TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre
de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH,
GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ,
TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU,
TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE,
DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU,
LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK,
SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ,
GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : SYSTEM AND METHOD FOR MEASURING THE ACOUSTIC IMPEDANCE OF A CAVITY

(54) Titre : SYSTEME ET PROCEDE POUR MESURER L'IMPEDANCE ACOUSTIQUE D'UNE CAVITE

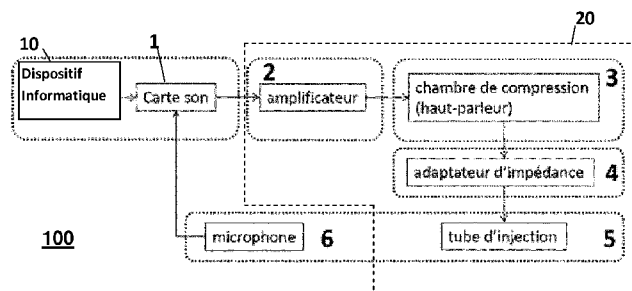


FIGURE 1

- 1 Sound card
- 2 Amplifier
- 3 Compression chamber (speaker)
- 4 Impedance adapter
- 5 feeding tube
- 10 Computer device

(57) Abstract : The invention relates to a method for measuring the acoustic impedance of a cavity by feeding a flow at a given point inside or at the entrance of the cavity by means of a feeding device. The method includes the following steps for each impedance measurement: feeding an excitation signal $x(t)$ in the form of a flow at the given point of the cavity and recording the response $y(t)$ of the cavity to the fed flow by means of a microphone (6) substantially arranged at the given point, thus providing the pressure at the given point; and applying an impedance calculation function for calculating the acoustic impedance of the cavity (30) at the given point on the basis of the recorded pressure. Said impedance calculation function implements the following steps: convolving the recorded response $y(t)$ with a reverse signal $x'(t)$ calculated on the basis of $x(t)$, thus providing a composite response including the impulse response from the linear portion of the system that is defined between the excitation signal $x(t)$ and the recorded response $y(t)$; and extracting the linear portion from said composite response, thus providing the acoustic impedance of the cavity. The cavity can be a vocal tract or a cavity of any volume.

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]

**Publiée :**

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

— avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues (règle 48.2.h))

L'invention propose un procédé pour mesurer l'impédance acoustique d'une cavité par injection d'un débit en un point donné à l'intérieur de la cavité ou en entrée de la cavité au moyen d'un dispositif d'injection, le procédé comprenant les étapes suivantes, pour chaque mesure d'impédance : - injecter un signal excitateur $x(t)$ sous la forme d'un débit au point donné de la cavité, et enregistrer la réponse $y(t)$ de la cavité au débit injecté au moyen d'un microphone (6) agencé sensiblement au niveau du point donné, ce qui fournit la pression au point donné, - appliquer une fonction de calcul d'impédance pour calculer l'impédance acoustique de la cavité (30) au point donné à partir de la pression enregistrée, ladite fonction de calcul d'impédance mettant en œuvre les étapes suivantes : o convoluer la réponse enregistrée $y(t)$ avec un signal inverse $x'(t)$ calculé à partir de $x(t)$, ce qui fournit une réponse composite comprenant la réponse impulsionnelle de la partie linéaire du système défini entre le signal excitateur $x(t)$ et la réponse enregistrée $y(t)$, et o extraire la partie linéaire de cette réponse composite, ce qui fournit l'impédance acoustique de la cavité. La cavité peut être un conduit vocal ou une cavité de volume quelconque.

Système et procédé pour mesurer l'impédance acoustique d'une cavité

Domaine technique

La présente invention concerne de manière générale les systèmes de mesure en temps-réel des propriétés acoustiques de cavités de résonance, et en particulier un
5 procédé, système et programme d'ordinateur pour mesurer l'impédance acoustique d'une cavité.

Art Antérieur

Les systèmes de mesure d'impédance acoustique ont connus de nombreux développements depuis les années 1970, comme décrit dans l'article de revue Dalmont, J.-P. 2001 Acoustic impedance measurement, part I : A review. J. Sound Vib.243(3), 427-439 ou dans l'article de Paul Dickens, John Smith and Joe Wolfe, Improved precision in measurements of acoustic impedance spectra using resonance-free calibration loads and controlled error distribution, Journal of Acoust. Soc. Am., Vol. 121, No. 3, (2007), pp. 1471-1481.

De tels systèmes permettent de mesurer l'impédance acoustique d'éléments acoustiques à caractériser tels que des cavités de résonance, comme le conduit vocal humain et le corps des instruments de musique à vents.

L'approche classique pour mesurer l'impédance acoustique d'une cavité de résonance consiste à envoyer un signal d'excitation externe dans la cavité à mesurer. Par exemple, pour la mesure de la fonction de transfert du conduit vocal, certains systèmes connus injectent au niveau laryngé et de façon externe un signal sinusoïdal (O.Fujimura and J. Lindqvist, « Sweep-tone measurements of vocal-tract characteristics », The Journal of the Acoustical Society of America, 49(2), p. 541-558, 1971), du bruit blanc (Castelli E, and Badin P (1988), « Vocal tract transfer functions with white noise excitation—application to the naso-pharyngeal tract » Proc., 7th FASE Symposium, Edinburgh, 415–422.), ou un signal d'excitation pseudo-aléatoire (Djeradi A, Guerin B, Badin P, and Perrier P (1991), « Measurement of the acoustic transfer function of the vocal tract : a fast and accurate method », J. Phonetics 19, 387–395). Cependant de tels systèmes sont limités par :

- la durée de tenue d'un son lors de la mesure,

- une puissance parfois très supérieure à celle du signal de parole et donc inconfortable pour un locuteur, et
- l'absence de connaissance de la fonction de transfert de la peau et des cartilages au niveau laryngé.

Plus récemment, des systèmes de mesure temps-réel des résonances acoustiques d'une cavité ont été développés pour les instruments de musique (J. Wolfe, J. Smith, J. Tann, and N. H. Fletcher (2001) "Acoustic impedance spectra of classical and modern flutes," J. Sound Vib. 243, 127–144) et la voix humaine (Epps J, Smith J R, and Wolfe J (1997), "A novel instrument to measure acoustic resonances of the vocal tract during speech", Meas. Sci. Technol. 8, 1112–1121). Ces systèmes sont basés sur le fonctionnement suivant : durant l'émission vocale ou durant le jeu de l'instrument, un signal acoustique calibré est généré à partir d'un dispositif constitué d'un haut-parleur couplé à un conduit exponentiel qui joue le rôle d'adaptateur d'impédance. La source de débit acoustique ainsi générée charge la cavité à mesurer et un microphone placé à proximité en mesure la réponse. La réponse à la charge acoustique se superpose au signal acoustique produit par la voix ou le jeu de l'instrument. Avec suffisamment de puissance émise en charge, le spectre du signal enregistré fait apparaître des pics aux fréquences de résonance de la cavité. La source de débit acoustique utilisée est un signal harmonique à spectre plat. L'aplatissement du spectre est obtenu par traitement de signal (inversion des coefficients de Fourier de la série harmonique) lors d'une étape préalable de calibrage du système. L'injection du signal acoustique et son enregistrement sont pilotés par ordinateur. De tels systèmes permettent ainsi la mesure des fréquences de résonance. Toutefois, ils ne permettent pas de mesurer la largeur de bande, le facteur de qualité ou l'information de phase de ces résonances. Par ailleurs, ces systèmes sont exposés à des problèmes de saturation en cas de niveau sonore important, ont un coût important lié à la qualité du microphone d'enregistrement et de la carte d'acquisition, ainsi qu'une durée de mesure de l'ordre de 2 à 4s, ce qui oblige à tenir le son (les mesures ne sont pas possibles lors des transitions).

Ainsi, les systèmes de mesure existants ne mesurent que les fréquences de résonance. Ils ne permettent pas une mesure des largeurs de bande, un fonctionnement en régime saturé, ni l'injection de fortes puissances. Ils sont en outre

contraignants et ne présentent pas de flexibilité sur les conditions aux limites de rayonnement. Par ailleurs, en plus de leur coût souvent élevé, ils ne permettent pas les mesures acoustiques dans la dynamique du jeu vocal ou instrumental.

Définition générale de l'invention

L'invention vient améliorer la situation en proposant un procédé pour mesurer l'impédance acoustique d'une cavité par injection d'un débit en un point donné à l'intérieur de la cavité ou en entrée de la cavité au moyen d'un dispositif d'injection, le procédé comprenant les étapes suivantes, pour chaque mesure d'impédance :

- 5 - injecter un signal excitateur $x(t)$ sous la forme d'un débit au point donné de la cavité pendant une durée temporelle finie, et enregistrer la réponse $y(t)$ de la cavité au débit injecté au moyen d'un microphone agencé sensiblement au niveau du point donné, ce qui fournit la pression au point donné,
- appliquer une fonction de calcul d'impédance pour calculer l'impédance acoustique
- 10 de la cavité au point donné à partir de la pression enregistrée, la fonction de calcul d'impédance mettant en œuvre les étapes suivantes :
 - convoluer la réponse enregistrée $y(t)$ avec un signal $x'(t)$ calculé à partir du signal excitateur $x(t)$, ce qui fournit un signal composite $hcomp(t)$ comprenant la réponse impulsionnelle de la partie linéaire du système défini entre le signal $x(t)$ et la
 - 15 réponse enregistrée $y(t)$, et
 - extraire la partie linéaire du signal composite $hcomp(t)$, ce qui fournit l'impédance acoustique de la cavité.

Selon une autre caractéristique, le signal composite peut comprendre en outre les

20 réponses impulsionnelles des distorsions harmoniques.

Le procédé peut comprendre en outre une étape préalable de calibrage pour mesurer la fonction de transfert du dispositif d'injection, l'étape de calibrage comprenant les étapes consistant à :

- 25 - injecter le signal excitateur $x(t)$ sous la forme d'une source de débit en un point de référence situé dans l'espace ouvert ou au niveau d'une surface plane à l'extérieur de la cavité,
- enregistrer la pression au point de référence, et

- appliquer la fonction de calcul d'impédance à la réponse enregistrée au point de référence, ce qui fournit une impédance de correction,
chaque mesure d'impédance au point donné de la cavité comprenant l'application de l'impédance de correction à la valeur de pression enregistrée au point donné de la cavité.

Le point donné de la cavité peut être situé au niveau de l'entrée de la cavité.

L'étape d'extraction de la partie linéaire du signal composite $hcomp(t)$ peut comprendre l'application d'un fenêtrage temporel choisi au signal enregistré.

- 10 Le fenêtrage peut être adapté pour extraire la partie de la fonction de transfert située dans l'intervalle $[T, 2T]$.

Dans une forme de réalisation, le signal excitateur peut être un sinus glissants à fréquence instantanée exponentielle (SIGFIE).

- Le signal excitateur peut être synthétisé par un dispositif informatique équipé d'une
- 15 carte son, le dispositif d'injection comprenant :
 - un amplificateur pour amplifier le signal synthétisé,
 - une chambre de compression pour générer un signal de pression acoustique à partir du signal amplifié,
 - un adaptateur d'impédance pour transformer un signal de pression en un signal de
 - 20 débit acoustique, et
 - un tube d'injection positionné en sortie de l'adaptateur d'impédance de manière à amener la source de débit acoustique au niveau du point d'injection.

La cavité peut être un conduit vocal.

- L'invention propose en outre un système pour mesurer l'impédance acoustique
- 25 d'une cavité comprenant un dispositif d'injection configuré pour injecter un débit en un point donné de la cavité, pour chaque mesure d'impédance, le dispositif d'injection étant configuré pour injecter un signal excitateur $x(t)$ sous la forme d'un débit en un point donné de la cavité. Le système comprend en outre :
 - un microphone (6), pour enregistrer la réponse $y(t)$ de la cavité au débit injecté, ce
 - 30 qui fournit la pression au point donné,

- un dispositif informatique comprenant une fonction de calcul d'impédance pour calculer l'impédance acoustique de la cavité au point donné à partir de la pression enregistrée, la fonction de calcul d'impédance mettant en œuvre les étapes suivantes :

- 5 ○ convoluer la réponse enregistrée $y(t)$ avec un signal $x'(t)$ calculé à partir du signal excitateur $x(t)$, ce qui fournit un signal composite $hcomp(t)$ comprenant la réponse impulsionnelle de la partie linéaire du système défini entre le signal $x(t)$ et la réponse enregistrée $y(t)$, et
- extraire la partie linéaire du signal composite $hcomp(t)$, ce qui fournit
- 10 l'impédance acoustique de la cavité.

Le dispositif informatique peut être muni d'une carte son pour synthétiser le signal excitateur $x(t)$, tandis que le dispositif d'injection comprend :

- un amplificateur pour amplifier le signal excitateur synthétisé,
- 15 - un transducteur électroacoustique pour générer un signal de pression acoustique à partir du signal amplifié,
- un adaptateur d'impédance pour transformer un signal de pression en un signal de débit acoustique, et
- un tube d'injection positionné en sortie de l'adaptateur d'impédance de manière à
- 20 amener la source de débit acoustique au niveau du point d'injection.

Les modes de réalisation proposés offrent ainsi une solution de mesure de l'impédance d'un conduit acoustique plus simple et moins coûteuse que les solutions existantes. Ils permettent ainsi d'obtenir une quantité de résultats importante dans un temps plus court et à moindre coût.

Un autre avantage de l'invention est de permettre un fonctionnement en régime saturé et l'injection de fortes puissances dans la cavité acoustique.

Les mesures acoustiques peuvent être en outre effectuées dans la dynamique du jeu vocal ou instrumental.

Un autre avantage de l'invention est qu'elle permet une caractérisation complète des résonances non seulement en fréquence mais aussi en largeur de bande, en facteur de qualité et/ou en information de phase.

L'invention permet également une mesure de l'impédance acoustique d'une cavité sans nécessiter de fixation étanche entre le dispositif et la cavité.

Brève description des dessins

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à l'aide de la description qui suit et des figures des dessins annexés dans lesquels :

- La figure 1 est une vue générale du système de mesure d'impédance, selon certains modes de réalisation ;
- 5 - la figure 2 est un schéma illustrant l'injection d'une source de débit, selon certains modes de réalisation ;
- la figure 3 est un diagramme illustrant la caractérisation des distorsions harmoniques,
- La figure 4 est un organigramme du procédé de calibrage, selon certains modes de
10 réalisation de l'invention,
- La figure 5 est un organigramme du procédé de mesure d'impédance, selon certains modes de réalisation de l'invention, et
- la figure 6 illustre l'évolution du module et de la phase de l'impédance en fonction de la fréquence, selon un exemple de réalisation.

Description détaillée

La Figure 1 représente de manière schématique les éléments de l'architecture d'un système de mesure d'impédance temps-réel 100 configuré pour mesurer l'impédance d'une cavité acoustique 30, selon certains modes de réalisation. La cavité 30 peut être une cavité acoustique de volume quelconque, comme par exemple un conduit vocal humain ou une cavité de résonance d'un instrument de musique. Bien que non limitée à de telles applications, l'invention est

particulièrement adaptée à la mesure de cavité de grand volume, comme par exemple une ligne d'échappement sur un moteur à explosion.

Le système de mesure d'impédance temps-réel 100 est configuré pour injecter une source de débit acoustique calibrée en un point de la cavité et pour mesurer la réponse impulsionnelle de la cavité à cette charge acoustique et en déduire la fonction de transfert correspondante.

- 5 L'impédance acoustique correspond à la résistance d'un milieu au passage du son et est représentée par le rapport entre la pression acoustique et le débit volumique acoustique. L'impédance d'entrée d'une cavité acoustique, telle qu'un conduit vocal, permet notamment d'accéder aux résonances de la cavité à travers son module et sa phase.
- 10 Le système de mesure d'impédance temps-réel 100 comprend un dispositif informatique 10 (tel que par exemple un ordinateur) équipé d'une carte son 1 (encore appelée « carte d'acquisition ») pour générer un signal excitateur, un dispositif d'injection 20 pour injecter le signal excitateur sous la forme d'un débit acoustique en un point de mesure de la cavité 30, et un microphone 6 pour
- 15 enregistrer la réponse de la cavité à la source de débit injectée sous la forme d'une pression. La carte son 1 est en outre configurée pour numériser la réponse enregistrée par le microphone 6 pour un traitement numérique par le dispositif informatique 10 afin de déterminer l'impédance acoustique d'entrée de la cavité à partir de la réponse enregistrée par le microphone 6.
- 20 Le dispositif d'injection 20 comprend un amplificateur 2, un transducteur électro-acoustique 3 (par exemple de type haut-parleur ou chambre de compression), un adaptateur d'impédance 4 et un tube d'injection 5. En particulier, le tube d'injection 5 peut être en plastique et de petit diamètre. La matière du tube d'injection, son diamètre et sa longueur peuvent être choisis en fonction de l'application de
- 25 l'invention. Dans un mode de réalisation préféré, le tube d'injection 5 est un tube rigide, sensiblement court et de faible diamètre.

La carte son 1 de l'ordinateur est configurée pour synthétiser un signal excitateur $x(t)$ et le convertir. Le signal excitateur est ensuite amplifié par l'amplificateur 2 avant d'être transmis au transducteur électroacoustique 3 qui le transforme en pression

acoustique. Le signal de pression acoustique généré en sortie du transducteur électroacoustique 3 est transformé en un signal de débit acoustique à l'aide de l'adaptateur d'impédance 4 qui comprend un conduit pouvant être notamment de forme conique ou exponentielle. Le tube d'injection 5 est positionné en sortie de l'adaptateur d'impédance 4 de manière à amener la source de débit acoustique en un point de l'espace où se fait la mesure comme par exemple à l'intérieur ou à l'entrée de la cavité 30. Le microphone 6 est de préférence attaché à l'extrémité du tube d'injection 5. Le microphone 6 est configuré pour enregistrer la réponse de la cavité à la charge acoustique qui lui est imposée. Le microphone 6 et l'extrémité du tube d'injection 5 sont notamment positionnés à une distance proche l'un de l'autre de manière à pouvoir considérer qu'ils sont positionnés au même point dans l'espace de propagation acoustique. Le signal acoustique (pression acoustique au point de mesure) enregistré par le microphone 6 est ensuite numérisé par la carte son 1 et est traité numériquement par le dispositif informatique pour déterminer l'impédance d'entrée de la cavité. L'impédance acoustique mesurée est caractérisée par son module et sa phase qui sont fonction de la fréquence. Elle est mesurée sur une fenêtre temporelle de durée finie T . La précision de la mesure d'impédance peut varier en fonction de la durée T . En particulier, cette durée peut être fixée sur une très large gamme de valeurs dont l'ordre de grandeur peut aller d'une durée de 10 millisecondes jusqu'à des durées de l'ordre de la minute. L'impédance acoustique est mesurée sur une bande de fréquences $[f_1, f_2]$. Les fréquences f_1 et f_2 , exprimés en Hertz, peuvent prendre toute valeur positive. La fréquence f_1 peut notamment être nulle. Dans un mode de réalisation, la fréquence f_2 peut être choisie en fonction des réponses en fréquence des différents éléments du système de mesure. En particulier, la fréquence f_2 peut être inférieure ou égale à la moitié de la fréquence d'échantillonnage. En complément ou en variante, la bande de fréquence $[f_1, f_2]$ sur laquelle la mesure d'impédance est effectuée peut être choisie en fonction du domaine d'application de l'invention.

Telle qu'utilisée ici, l'expression « mesure d'impédance » fait référence à une détermination de l'impédance à partir de l'enregistrement d'une réponse à un signal injecté.

La figure 2 représente une vue partielle du système 100 illustrant l'injection du signal excitateur $x(t)$ en entrée de la cavité 30 et l'enregistrement de la réponse $y(t)$ dans un mode de réalisation où la cavité 30 est un conduit vocal, dont on veut mesurer l'impédance, modélisé par un tube ouvert-fermé de longueur L s'étendant selon un axe z . Comme montré sur la figure 2, le signal $x(t)$ est injecté au niveau de l'entrée du conduit vocal ($z=L$). Le débit sortant du transducteur 3 est dirigé vers la bouche du chanteur ou à l'entrée de la cavité à mesurer grâce au tube 5 relié au transducteur qui peut être un tuyau en plastique. Le microphone 6 enregistre alors la réponse $y(t)$ à la charge acoustique appliquée.

La contribution apportée par le dispositif d'injection 20 (par exemple, la chaîne de production du signal excitateur qui est injecté au niveau des lèvres, en parallèle avec le rayonnement aux lèvres, pour une cavité de type conduit vocal) peut avoir un effet sur la mesure de l'impédance d'entrée de la cavité étudiée. Elle peut induire
5 notamment une modification des conditions de rayonnement du fait de la présence du tube 5 et du microphone 6. Pour tenir compte de cette contribution, avant d'effectuer la mesure d'impédance à partir de l'injection d'une source de débit, une prise de référence peut être mise en œuvre pour déterminer l'impédance de correction induite par le dispositif d'injection lors d'une étape de calibrage.
10 L'impédance de correction est déterminée en injectant un débit en un point de référence choisi sur une surface plane quelconque à l'extérieur de la cavité (au niveau de la cavité fermée comme par exemple au niveau des lèvres fermées pour une cavité de type conduit vocal) ou dans l'espace environnant (espace libre). Il convient de noter qu'une surface plane ou l'espace environnant présentent des
15 conditions de rayonnement différentes. La réponse acoustique au signal excitateur ainsi injecté est ensuite enregistrée, ce qui fournit la fonction de transfert du dispositif d'injection en parallèle avec l'impédance de rayonnement du milieu extérieur, et donc l'impédance de correction.

L'impédance mesurée en un point de la cavité peut alors être corrigée à partir de
20 cette impédance de correction.

L'impédance de correction peut être appliquée avant injection ou en post-traitement. L'étape de calibrage permet ainsi une maîtrise de la source de débit injectée. Lorsque l'impédance de correction est appliquée avant l'injection, la source injectée

est une source calibrée.

D'un point de vue théorique, le signal injecté $x(t)$ est choisi de telle sorte que, convolué à un signal inverse $x'(t)$ calculé à partir de $x(t)$, il permet d'obtenir un Dirac, soit :

$$x(t) * x'(t) = \delta(t) \quad (\text{Equation 1})$$

Dans l'équation 1 :

- $x(t)$ désigne le signal excitateur ;
- $x'(t)$ désigne le signal inverse appliqué ;
- $\delta(t)$ désigne la distribution de Dirac.

Lorsque le système à étudier est considéré comme invariant, il peut être modélisé par une partie linéaire de réponse impulsionnelle $h(t)$, une partie non linéaire et du bruit. La sortie s'obtient alors en fonction de l'entrée par :

$$y(t) = h(t) * x(t) + F\{x(t)\} + n(t) \quad (\text{équation 2})$$

Dans l'équation 2 :

- $y(t)$ est la sortie du système en réponse au signal $x(t)$
- $h(t)$ est la réponse impulsionnelle de la partie linéaire du système
- $F\{x(t)\}$ est la partie non linéaire
- $n(t)$ est le bruit

Un modèle courant de la partie non linéaire est la décomposition en série de Volterra jusqu'à l'ordre N (ici F ne contient que les noyaux d'ordre ≥ 2) :

$$F\{x(t)\} = x(t)^2 * h_2(t) + x(t)^3 * h_3(t) + \dots + x(t)^N * h_N(t) \quad (\text{équation 3})$$

où $h_i(t)$ est la réponse impulsionnelle du noyau d'ordre i.

Le signal composite $h_{comp}(t)$ (encore appelé ci après « réponse composite ») est défini par :

$$h_{comp}(t) = y(t) * x'(t) \quad (\text{équation 4})$$

On considère en outre l'équation 5 suivante :

$$h(t) * x(t) * x'(t) = h(t) * \delta(t) = h(t) \quad (\text{équation 5})$$

En remplaçant dans l'équation 4 $y(t)$ par l'expression de l'équation 2 et en appliquant l'équation 5 ci-dessus, le signal composite $h_{comp}(t)$ peut encore être exprimé selon l'équation 6 ci-dessous :

$$h_{comp}(t) = h(t) + F\{x(t)\} * x'(t) + n(t) * x'(t) \quad (\text{équation 6})$$

En choisissant $x(t)$ pour que la partie non linéaire soit temporellement séparée de $h(t)$ et en négligeant le produit $n(t) * x'(t)$, l'extraction de la réponse impulsionnelle $h(t)$ à partir de $h_{comp}(t)$ peut être obtenu par fenêtrage temporel :

$$h(t) = h_{comp}(t)w(t) \quad (\text{équation 7})$$

où $w(t)$ désigne une fenêtre de pondération, nulle à l'extérieur d'un intervalle. Par exemple, $w(t)$ peut être une fenêtre rectangulaire dont la taille est calculée en fonction de la réponse impulsionnelle $h(t)$.

La fonction de transfert de la partie linéaire du système est obtenue par :

$$H(f) = TF\{h(t)\} \quad (\text{équation 8})$$

En pratique, le signal injecté $x(t)$ dans la cavité 30 est de taille finie T , à bande de fréquence limitée $[f1, f2]$ et causal. L'équation (1) est alors remplacée par l'équation 1bis :

$$x(t) * x'(t) = d(t - T) \quad (\text{Equation 1bis})$$

où $d(t)$ désigne un signal tel que $D(f) = 1$, pour tout f appartenant à $[f1, f2]$, et arbitraire ailleurs. Par exemple $D(f)$ peut être nul hors de l'intervalle $[f1, f2]$.

L'équation 6 est alors remplacée par l'équation 6bis :

$$h_{comp}(t) = h(t) * d(t - T) + F\{x(t)\} * x'(t) + n(t) * x'(t) \quad (\text{Equation 6bis}).$$

La partie linéaire $h(t) * d(t)$ vérifie la propriété :

$$H(f)D(f) = H(f), \text{ pour tout } f \text{ appartenant à } [f1, f2]$$

Ainsi la partie linéaire du système peut être extraite sur la bande de fréquences $[f1, f2]$ par l'équation 7 modifiée (équation 7bis):

$$h(t) = h_{comp}(t)w(t - T) \quad (\text{Equation 7bis})$$

La fonction de transfert mesurée est encore donnée par l'équation 8 ci-dessus.

Le système 100 injecte ainsi le signal excitateur $x(t)$ sous la forme d'un débit acoustique en entrée de la cavité 30 et récupère la sortie $y(t)$ sous la forme d'une pression. À partir de la pression enregistrée, la valeur de l'impédance d'entrée de la cavité peut être alors mesurée selon la fonction de transfert $H(f)$ décrite ci-dessus.

La longueur du tube 5 utilisée peut induire de faibles non-linéarités qui s'associent aux distorsions de l'amplificateur et du transducteur pour distordre le signal envoyé. Les non-linéarités du tube sont comparables en intensité aux distorsions des autres éléments de la chaîne de production du son. Ces imperfections dans l'estimation de l'impédance du conduit vocal peuvent être supprimées grâce à l'emploi d'un signal excitateur $x(t)$ adapté pour extraire la réponse impulsionnelle $h(t)$ de la partie linéaire du système.

Le dispositif informatique 10 comprend ainsi une fonction de calcul d'impédance pour calculer l'impédance acoustique à partir du signal enregistré au point choisi de la cavité. Dans le mode de réalisation où une étape de calibrage est mise en œuvre, la même fonction de calcul d'impédance est utilisée pour la détermination de l'impédance de correction. La fonction de calcul d'impédance est configurée pour :

- générer le signal à injecter $x(t)$ ainsi que le signal inverse $x'(t)$,
 - déterminer la réponse composite $h_{comp}(t)$ selon l'équation 4,
 - extraire la partie linéaire $h(t)$ du système à partir de la réponse composite selon l'équation 7bis et en déduire la fonction de transfert selon l'équation 8, ce qui fournit l'impédance acoustique au niveau du point d'injection (point choisi de la cavité dans l'étape de mesure ou point de référence dans l'étape de calibrage).
- La fonction de calcul peut en complément extraire les réponses impulsionnelles des noyaux d'ordre 2 ou plus correspondant aux distorsions harmoniques.

L'opération d'extraction permet ainsi de ne récupérer que la partie linéaire du système, ce qui est particulièrement avantageux dans les situations où des non-linéarités se superposent à la réponse linéaire du système. L'extraction de la partie linéaire de la fonction de transfert est notamment mise en œuvre en appliquant un

fenêtrage choisi $w(t)$ à la réponse impulsionnelle calculée $h(t)$. Un tel fenêtrage peut notamment être configuré de manière à extraire une partie de la fonction de transfert sur un intervalle de temps choisi.

L'utilisation d'un signal excitateur adapté pour extraire la partie linéaire de la réponse impulsionnelle de la cavité (fonction de transfert) permet de limiter le nombre d'opérations requis : en effet, la fonction de transfert $h(t)$ peut être obtenue directement à partir de la convolution du signal enregistré $y(t)$ avec une inversion du signal excitateur. Par ailleurs, l'extraction de la partie linéaire permet une connaissance complète des phases, donc une correction non seulement dans le domaine fréquentiel mais également dans le domaine temporel.

Dans un mode de réalisation particulier, le signal excitateur peut être un signal de type sinus glissant à fréquence instantanée exponentielle (encore appelé SIGFIE) défini par la méthode de Farina (Farina A. (2000) Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a Swept-Sine Technique, Journal of the Audio Engineering Society Vol.5093, pp. 1-24). En effet, les inventeurs ont établi qu'un signal SIGFIE utilisé classiquement pour caractériser la fonction de transfert entre deux points (i.e. rapport sortie sur entrée) dans le cas de l'acoustique des salles ou du matériel audio pour la stéréophonie pouvait être utilisé avantageusement pour caractériser l'impédance d'entrée d'une cavité.

Dans ce mode de réalisation, le signal excitateur $x(t)$ de type SIGFIE est donné par l'équation 9 :

$$x(t) = \sin \left[2\pi \frac{f_1}{\alpha} (e^{\alpha t} - 1) \right] \quad (\text{Equation 9})$$

Pour déterminer le signal inverse $x'(t)$, le signal $x(t)$ peut être inversé temporellement de sorte que la fréquence instantanée diminue au cours du temps.

Ainsi, le signal inverse $x'(t)$ peut être obtenu de la façon suivante :

$$x'(t) = x(-t)e^{-\alpha t} \quad (\text{Equation 10})$$

avec

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{f_2}{f_1}\right)}{T} \quad (\text{Equation 11})$$

Dans l'équation 11 :

- α représente le coefficient de compression du signal SIGFIE ;
- f_1 et f_2 désignent les fréquences entre lesquelles varie le signal pendant la durée T. En particulier, la fréquence varie exponentiellement en fonction du temps entre f_1 et f_2 pendant la durée T.

5 Lorsque le signal excitateur SIGFIE est convolué avec le signal inverse $x'(t)$, le signal obtenu est de taille $2 \cdot T$, T correspondant à la durée temporelle de la SIGFIE. La partie de ce signal située dans l'intervalle $[0, T]$ correspond aux distorsions harmoniques. La partie linéaire du système peut alors être obtenue en appliquant un fenêtrage $w(t)$ configuré pour n'extraire que l'intervalle $[T, 2T]$.

10 Il a été observé que plus le signal est long, moins il est sensible aux perturbations, et donc que le rapport signal sur bruit est d'autant plus important que le signal est long.

Les inventeurs ont également constaté que plus la durée d'injection est petite plus son comportement est proche de celui d'un Dirac de sorte que des non-linéarités peuvent perturber la partie linéaire du système. L'éloignement des non-linéarités de
15 la partie linéaire est notamment lié à la durée de la SIGFIE et plus largement au coefficient de compression α .

Un autre avantage de ce mode de réalisation à base de signal excitateur de type SIGFIE est qu'il permet la caractérisation de la cavité même en fonctionnement saturé. Les résultats liés à la saturation sont écartés au moment du traitement
20 numérique par le dispositif informatique 10. Les mesures peuvent alors être effectuées même lorsque le système ou l'appareil de mesure présente des distorsions harmoniques.

Le dispositif d'injection 20 a pour particularité de transformer, grâce à son cône exponentiel, une source de pression en source de débit. Ainsi, l'utilisation de la
25 technique des SIGFIE pour redresser une réponse fréquentielle permet de redresser la réponse fréquentielle d'une source de débit. En injectant cette source de débit en entrée de la cavité, et en mesurant sensiblement au même endroit la pression, l'impédance acoustique de la cavité peut être ainsi obtenue.

Les signaux de type SIGFIE étant parfaitement définis en module et en phase, la
30 réponse impulsionnelle $h(t)$ obtenue permet de déterminer très précisément le

module de l'impédance acoustique ainsi que sa phase. La position des pics d'impédance et leur largeur est alors connue. De plus, la capacité des SIGFIE à s'affranchir des problèmes de distorsion autorise l'envoi d'une énergie conséquente. Dès lors, il est possible de caractériser des conduits dont la taille est de l'ordre du conduit vocal ou d'un instrument de musique. Mais la puissance que peut transmettre le système 100 permet d'effectuer des mesures sur des cavités plus imposantes, telles que des sorties d'échappement de véhicules ou des tuyères de grandes dimensions.

Deux types de mesures peuvent être mises en œuvre dans l'étape de mesure selon l'application de l'invention :

- une mesure isolée dite « mesure statique » selon laquelle l'impédance d'entrée est mesurée pendant la durée T ;

- une mesure dite « dynamique » comprenant une série de mesures consécutives entre un instant de départ et un instant de fin définis par l'opérateur. Les différentes mesures dynamiques sont effectuées presque sans temps mort. De telles mesures dynamiques, dans une application de l'invention à la détermination des résonances d'une cavité de forme variable au cours du temps, telle qu'un conduit vocal, permettent de tendre vers une observation en temps réel des résonances de la cavité. Les mesures acoustiques, et notamment les mesures de l'impédance acoustique, peuvent donc se faire dans la dynamique temporelle d'évolution de la fonction d'aire de la cavité à mesurer ou de ses propriétés acoustiques. C'est le cas du conduit vocal dans la parole ou dans le chant, dont la fonction d'aire est modifiée en permanence par les mouvements des articulateurs. C'est aussi le cas dans le jeu de l'instrument à vent, où les doigtés modifient les propriétés de résonance acoustique de l'instrument. Dans ces conditions où le système acoustique étudié n'est plus invariant dans le temps, le système de mesure d'impédance peut être utilisé pour déterminer dynamiquement l'évolution temporelle de la partie linéaire dudit système acoustique étudié.

Le système de mesure d'impédance peut être utilisé pour observer les valeurs des résonances obtenues par la mesure de l'impédance acoustique, en visualisant l'impédance complexe au travers de son module et de sa phase, de préférence

selon une approche du temps réel avec le plus de mesures possibles dans un temps le plus court possible. Pour cela, le dispositif informatique 10 peut comprendre un écran pour afficher presque en temps réel les courbes mesurées. En complément, le dispositif informatique 10 peut comprendre un gestionnaire d'interfaces graphiques pour générer sur une ou plusieurs interfaces des diagrammes (e.g. module d'une impédance en fonction de la fréquence, phase d'une impédance en fonction de la fréquence) à partir des mesures d'impédances réalisées, selon l'application de l'invention.

Chaque injection d'un signal SIGFIE produit une réponse composite qui contient les distorsions harmoniques de tout ordre n.

Il a été observé par exemple que dans certains modes de réalisation, les distorsions harmoniques apparaissent dans la réponse composite sous la forme de réponses impulsionnelles d'ordre n, décalées par rapport à la réponse impulsionnelle de la partie linéaire du système. Il est dans ce cas possible de calculer la valeur de ce décalage Δ_n pour un ordre n, selon l'équation 12 ci-dessous :

$$\Delta_n = \frac{\ln n}{\ln \frac{f_1}{f_2}} \cdot T \quad (\text{Equation 12})$$

Comme représenté sur le diagramme de la figure 3, en observant la réponse impulsionnelle, il est possible de situer les pics correspondants aux distorsions harmoniques.

Le taux de distorsion harmonique THD est alors donné par l'équation 13 :

$$THD = \frac{\sum_{n=2}^{\infty} E_{h_n}}{E_{h_1}} \quad (\text{Equation 13})$$

$$\text{avec } E_{h_n} = \sum h(t - \Delta_n)^2$$

L'influence de la puissance sur le taux de distorsion a été étudiée par les inventeurs dans un mode de réalisation particulier utilisant des tubes 5 courts et en calculant le taux de distorsion pour les 7 premières harmoniques. Il a été observé qu'au delà de la 7ème harmonique le taux de distorsion peut être inférieur à 0.1% à la puissance maximale dans certaines formes de réalisation. Plus généralement, le taux de

distorsion dépend de la puissance initiale. Ainsi, dans d'autres formes de réalisation, il peut être possible d'obtenir moins de 0.1 % de distorsion dès la seconde harmonique.

La figure 4 représente les étapes du procédé de calibrage du dispositif d'injection pour déterminer la fonction de transfert du dispositif d'injection 20. La figure 4 est décrite en relation avec un signal exciteur de type SIGFIE à titre d'exemple non limitatif. Pour cela, un signal exciteur $x(t)$ de type SIGFIE, défini sur la plage de fréquences souhaitée $[f_1, f_2]$ et de la durée T souhaitée selon l'équation 9, est injecté sur une surface plane quelconque ou dans l'espace libre à l'étape 400. La réponse $y(t)$ est enregistrée à l'étape 402. L'enregistrement $y(t)$ est ensuite convolué à l'étape 404 avec la SIGFIE inverse correspondante $x'(t)$, ce qui fournit la réponse composite $hcomp(t)_{cal}$ du dispositif d'injection. Cette réponse composite $hcomp(t)_{cal}$ est ensuite fenêtrée à l'étape 406 en utilisant la fenêtre $w(t)$ pour n'extraire que la partie linéaire sur l'intervalle $[T, 2T]$ qui est alors inversée pour obtenir l'impulsion de correction. L'impulsion de correction $h(t)_{cal}$ (encore appelée impédance de correction) est ensuite stockée.

Après cette étape de calibrage, l'étape de mesure peut ensuite être mise en œuvre.

La figure 5 représente les étapes du procédé de mesure d'impédance acoustique temps-réel, selon une forme de réalisation de l'invention où le signal exciteur est de type SIGFIE.

A l'étape 500, la source de débit $x(t)$ est injectée au point P choisi de la cavité 30 qui est à caractériser. Différentes configurations d'injections peuvent être utilisées pour respecter les conditions de rayonnement souhaitées : cavité fermée, rayonnement dans un plan infini, rayonnement simple du conduit, etc.

A l'étape 502, la réponse du système $y(t)$ est enregistrée par un microphone positionné sensiblement au niveau du point P donc au voisinage de la source de débit. L'enregistrement d'une pression acoustique est ainsi obtenu dans un point de l'espace assimilé au point d'injection de la source de débit acoustique.

Une étape de traitement numérique est alors mise en œuvre pour déterminer la réponse impulsionnelle comme indiqué ci-avant en relation avec la figure 4.

A l'étape 504, la pression enregistrée lors de l'étape de mesure $y(t)$ est convoluée avec le signal inverse $x'(t)$, ce qui fournit la réponse composite $h_{\text{comp}}(t)$.

A l'étape 506, la partie linéaire de la réponse composite $h_{\text{comp}}(t)$ est extraite, ce qui fournit une fonction de transfert entre le point d'injection et le point de mesure, points
5 qui sont considérés comme étant sensiblement identiques. Cette fonction de transfert lie ainsi un débit (connu) et une pression (mesurée) en un même point et correspond à l'impédance de l'ensemble du conduit mesuré et du dispositif de mesure (y compris le rayonnement).

A l'étape 508, l'impulsion de correction h_{cal} calculée au moment de l'étape de
10 calibrage (étape 400-406) peut être appliquée à cette impédance, ce qui fournit l'impédance de la cavité à mesurer. En variante, l'impédance de correction peut être appliquée au calcul du signal de débit (débit calibré) avant l'injection de la source de débit calibré à l'entrée de la cavité à caractériser.

Les modes de réalisation décrit ci-avant présentent notamment les avantages
15 suivants :

- La mesure d'une fonction d'impédance acoustique en un point de l'espace, en module et en phase ;
- Un fonctionnement possible en régime saturé ;
- La possibilité d'injecter de fortes puissances ;
- 20 - Une flexibilité sur les conditions aux limites de rayonnement pour l'étape de calibrage ;
 - la possibilité d'effectuer une mesure d'impédance sans nécessité d'assurer l'étanchéité du dispositif de mesure avec la cavité à mesurer ; et
 - un coût peu élevé.

25 En particulier, contrairement aux solutions classiques de mesures d'impédance, les modes de réalisation de l'invention permettent d'envoyer une quantité très importante d'énergie dans la cavité à caractériser, sans se préoccuper des phénomènes de saturation.

30 C'est un autre avantage de l'invention de fournir la réponse complète du conduit, à savoir une information tant en module qu'en phase.

L'invention peut être par exemple utilisée pour détecter des résonances du conduit vocal d'un locuteur ou d'un chanteur. Pour détecter les pics de résonances, le module et/ou la phase de l'impédance acoustique peuvent être utilisés. En effet, à chaque résonance correspond un maximum au niveau du module ainsi qu'un
5 décrochement au niveau de la phase.

La figure 6 représente l'évolution du module et de la phase de l'impédance en fonction de la fréquence, selon un exemple de réalisation. La détection de résonance peut être effectuée en détectant les maxima du module de l'impédance acoustique à partir d'une telle courbe et/ou en tenant compte des informations de
10 phase de l'impédance acoustique. Pour caractériser les résonances, les caractéristiques de chaque pic détecté peuvent être ensuite analysées. Le dispositif peut s'appliquer à la mesure pendant la production d'un son vocal ou pendant le jeu de l'instrument. La courbe d'impédance peut alors présenter des maxima locaux de faible amplitude aux harmoniques du son vocal ou instrumental. Ces maxima
15 harmoniques présents sur la courbe d'impédance peuvent être supprimés par traitement du signal.

Les modes de réalisation de l'invention permettent ainsi de mesurer l'impédance de cavité en temps réel, même en cas de mobilité : Ils permettent une mesure en temps réel dans la dynamique d'une cavité, ce qui est particulièrement avantageux pour les conduits mobiles (voix, instruments à vent).

L'homme du métier comprendra que le procédé de mesure d'impédance peut être mis en œuvre de diverses manières par matériel (« hardware »), logiciel, ou une combinaison d'éléments matériels et de logiciels.

20 L'invention n'est pas limitée aux modes de réalisation décrits ci-avant à titre d'exemple non limitatif. Elle englobe toutes les variantes de réalisation qui pourront être envisagées par l'homme du métier. En particulier, l'invention n'est pas limitée à un type particulier de transducteur électroacoustique, de tube d'injection, de microphone. Elle n'est pas non plus limitée à une forme particulière d'adaptateur
25 d'impédance et peut s'appliquer par exemple à un adaptateur ayant un cône linéaire ou un cône exponentiel. Par ailleurs, l'invention n'est pas limitée à un type de cavité particulière et peut s'appliquer plus généralement à tout type de cavité ayant des

propriétés acoustiques de résonance.

L'invention n'est pas non plus limitée aux applications de mesure de résonances mentionnées ci-avant. Elle peut être utilisée par exemple dans tout type de laboratoire d'acoustique sans limitation à l'acoustique musicale, pour des mesures d'impédances acoustiques de cavité. Bien que non limitée à de telles applications, l'invention a un avantage particulier pour mesurer le comportement formantique du conduit vocal pour des applications dans le domaine de la parole silencieuse (« Silent Speech ») et plus largement de l'analyse de la parole (e.g. applications pour les laboratoires de phonétique et de parole ainsi que pour les orthophonistes). Elle offre notamment une solution à la fois simple et efficace pour mesurer l'impédance acoustique d'objets de grandes dimensions tel que des lignes d'échappement ou des tuyères, objet dont les propriétés acoustiques sont fortement contrôlées.

Revendications

1. Procédé pour mesurer l'impédance acoustique d'une cavité (30) par injection d'un débit en un point donné à l'intérieur de la cavité (30) ou en entrée de la cavité (30) au moyen d'un dispositif d'injection (20), le procédé comprenant les étapes
5 suivantes, pour chaque mesure d'impédance :
 - injecter (500) un signal excitateur $x(t)$ sous la forme d'un débit au point donné de la cavité pendant une durée temporelle finie, et enregistrer la réponse $y(t)$ de la cavité au débit injecté au moyen d'un microphone (6) agencé sensiblement au niveau dudit point donné, ce qui fournit la pression audit point donné,
 - 10 - appliquer une fonction de calcul d'impédance pour calculer l'impédance acoustique de la cavité (30) audit point donné à partir de la pression enregistrée, la fonction de calcul d'impédance mettant en œuvre les étapes suivantes :
 - convoluer la réponse enregistrée $y(t)$ avec un signal $x'(t)$ calculé à partir du signal excitateur $x(t)$, ce qui fournit un signal composite $hcomp(t)$ comprenant la
15 réponse impulsionnelle de la partie linéaire du système défini entre le signal $x(t)$ et la réponse enregistrée $y(t)$, et
 - extraire la partie linéaire du signal composite $hcomp(t)$, ce qui fournit l'impédance acoustique de la cavité.
- 20 2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que le signal composite comprend en outre les réponses impulsionnelles des distorsions harmoniques.
3. Procédé selon l'une des revendications 1 et 2, caractérisé en ce qu'il comprend en outre une étape préalable de calibrage pour mesurer la fonction de transfert du
25 dispositif d'injection (20), ladite étape de calibrage comprenant les étapes consistant à :
 - injecter le signal excitateur $x(t)$ sous la forme d'une source de débit en un point de référence situé dans l'espace ouvert ou au niveau d'une surface plane à l'extérieur de la cavité,
 - 30 - enregistrer la pression audit point de référence, et
 - appliquer ladite fonction de calcul d'impédance à la réponse enregistrée au point de référence, ce qui fournit une impédance de correction,

et en ce que chaque mesure d'impédance au point donné de la cavité comprend l'application de l'impédance de correction à la valeur de pression enregistrée (508) au point donné de la cavité (30).

5 4. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le point donné de la cavité est situé au niveau de l'entrée de la cavité (30).

5. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'étape d'extraction de la partie linéaire de $h_{comp}(t)$ comprend l'application d'un fenêtrage temporel choisi au signal enregistré.

10 6. Procédé selon la revendication 5, caractérisé en ce que le fenêtrage est adapté pour extraire la partie de la réponse composite $h_{comp}(t)$ située dans l'intervalle $[T, 2T]$.

7. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le signal excitateur est un sinus glissant à fréquence instantanée exponentielle
15 (SIGFIE).

8. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le signal excitateur est synthétisé par un dispositif informatique (10) équipé d'une carte son, et en ce que le dispositif d'injection (20) comprend :

- un amplificateur (2) pour amplifier le signal synthétisé,
- 20 - une chambre de compression (3) pour générer un signal de pression acoustique à partir du signal amplifié,
- un adaptateur d'impédance (4) pour transformer un signal de pression en un signal de débit acoustique, et
- un tube d'injection (5) positionné en sortie de l'adaptateur d'impédance (4) de
25 manière à amener la source de débit acoustique au niveau du point d'injection.

9. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la cavité est un conduit vocal.

10. Système (100) pour mesurer l'impédance acoustique d'une cavité (30) comprenant un dispositif d'injection (20) configuré pour injecter un débit en un
30 point donné de la cavité (30), caractérisé en ce que, pour chaque mesure

d'impédance, le dispositif d'injection est configuré pour injecter un signal exciteur $x(t)$ sous la forme d'un débit en un point donné de la cavité (500), le système comprenant en outre :

- un microphone (6), pour enregistrer la réponse $y(t)$ de la cavité au débit injecté, ce qui fournit la pression audit point donné,
- un dispositif informatique comprenant une fonction de calcul d'impédance pour calculer l'impédance acoustique de la cavité (30) audit point donné à partir de la pression enregistrée, ladite fonction de calcul d'impédance mettant en œuvre les étapes suivantes :

- 10 ○ convoluer la réponse enregistrée $y(t)$ avec un signal $x'(t)$ calculé à partir du signal exciteur $x(t)$, ce qui fournit un signal composite $hcomp(t)$ comprenant la réponse impulsionnelle de la partie linéaire du système défini entre le signal $x(t)$ et la réponse enregistrée $y(t)$, et
 - extraire la partie linéaire du signal composite $hcomp(t)$, ce qui fournit
- 15 l'impédance acoustique de la cavité.

11. Système selon la revendication 10, caractérisé en ce que le signal composite comprend en outre les réponses impulsionnelles des distorsions harmoniques.

- 20 12. Système selon l'une des revendications 10 et 11, caractérisé en ce qu'il est en outre configuré pour appliquer la fonction de calcul d'impédance au signal mesuré en réponse à l'injection d'un signal exciteur $x(t)$ sous la forme d'une source de débit en un point de référence situé dans l'espace ouvert ou au niveau d'une surface plane à l'extérieur de la cavité, ce qui fournit une impédance de correction
- 25 correspondant à l'impédance acoustique induite par le dispositif d'injection (20), et en ce que le système est configuré pour appliquer ladite fonction de calcul d'impédance à la réponse enregistrée au point de référence, ce qui fournit une valeur de pression enregistrée (508), chaque mesure d'impédance au point donné de la cavité comprenant l'application de l'impédance de correction à la valeur de
- 30 pression enregistrée (508) au point donné de la cavité (30).

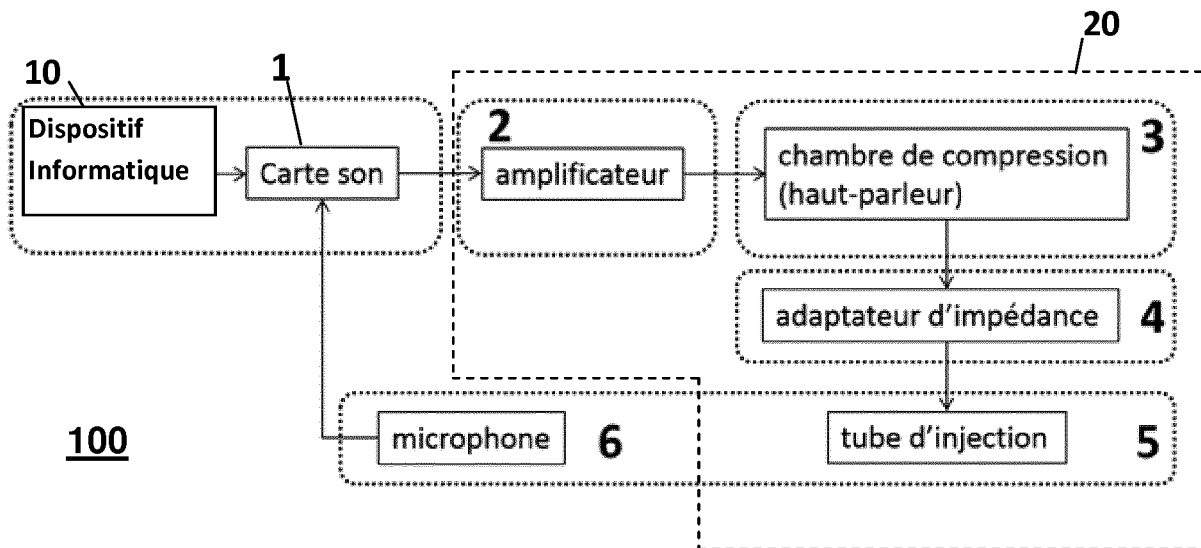
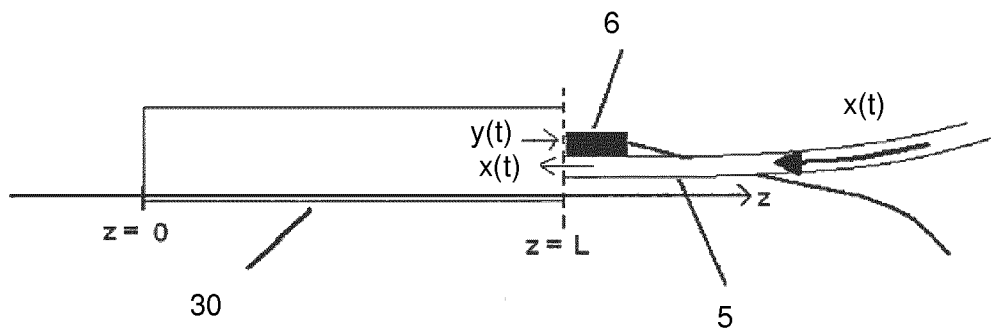
13. Système selon l'une des revendications 10 à 12, caractérisé en ce que ledit dispositif informatique est muni d'une carte son pour synthétiser le signal

excitateur $x(t)$, et en ce que le dispositif d'injection (20) comprend :

- un amplificateur (2) pour amplifier le signal exciteur synthétisé,
- un transducteur électroacoustique (3) pour générer un signal de pression acoustique à partir du signal amplifié,
- 5 - un adaptateur d'impédance (4) pour transformer un signal de pression en un signal de débit acoustique, et
- un tube d'injection (5) positionné en sortie de l'adaptateur d'impédance (4) de manière à amener la source de débit acoustique au niveau du point d'injection.

14. Système selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que
10 l'étape d'extraction de la partie linéaire de $h_{comp}(t)$ comprend l'application d'un fenêtrage temporel choisi au signal enregistré.

15. Système selon l'une des revendications 10 à 14, caractérisé en ce que le signal exciteur est un sinus glissants à fréquence instantanée exponentielle (SIGFIE).

**FIGURE 1****FIGURE 2**

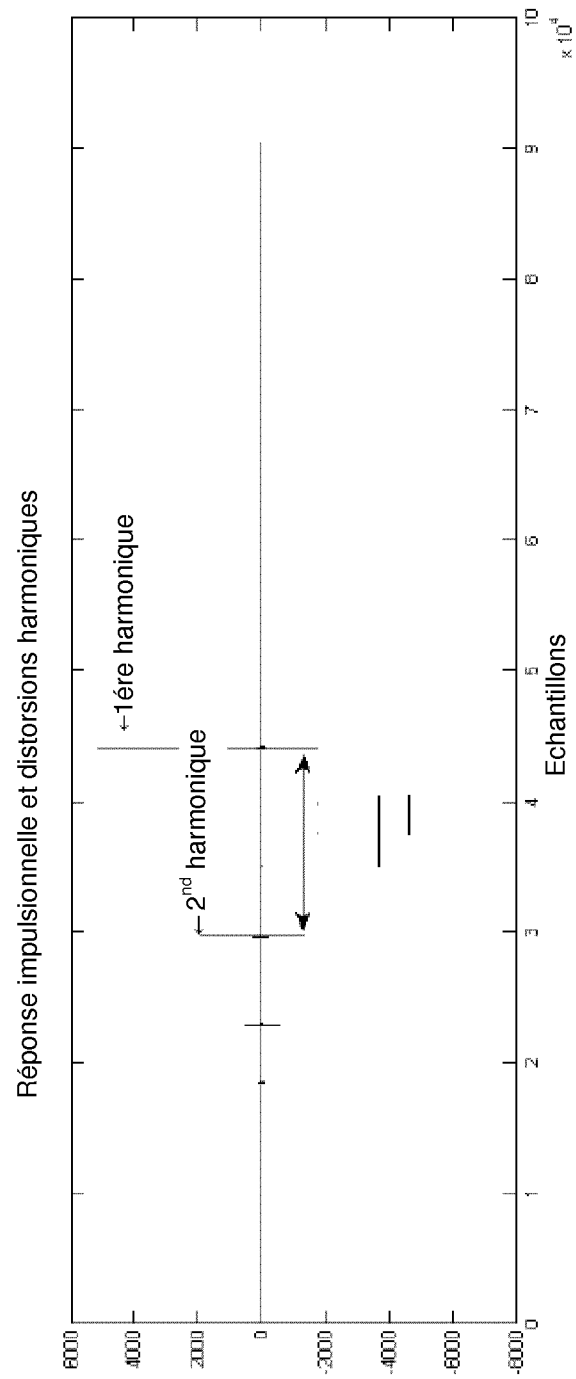
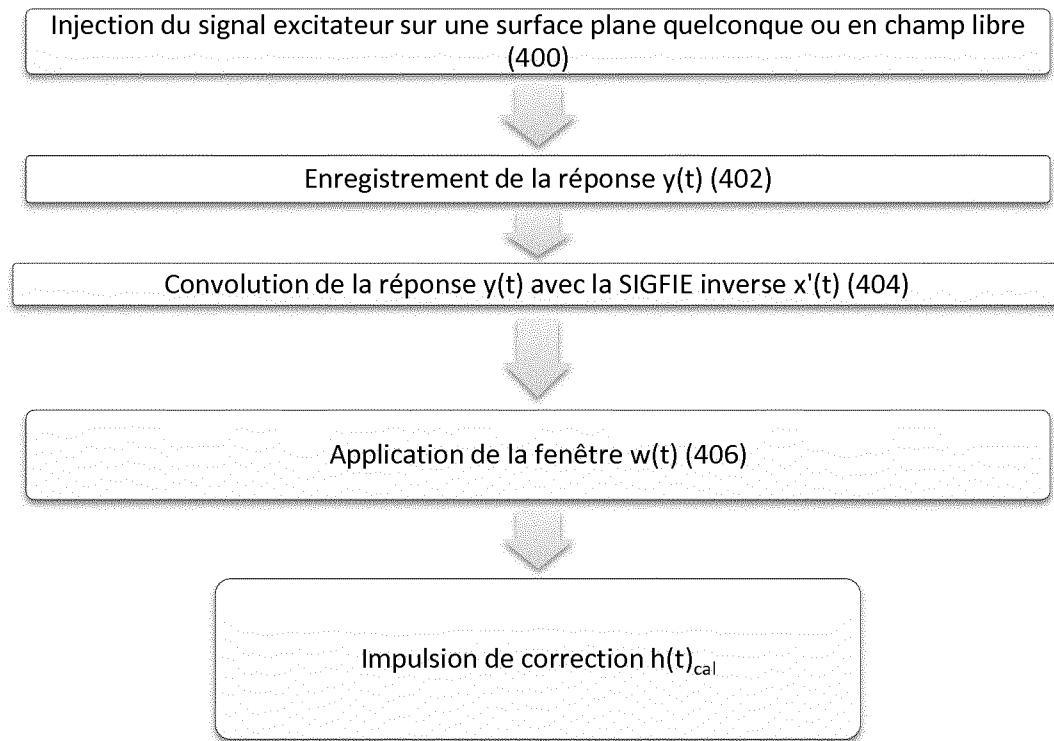
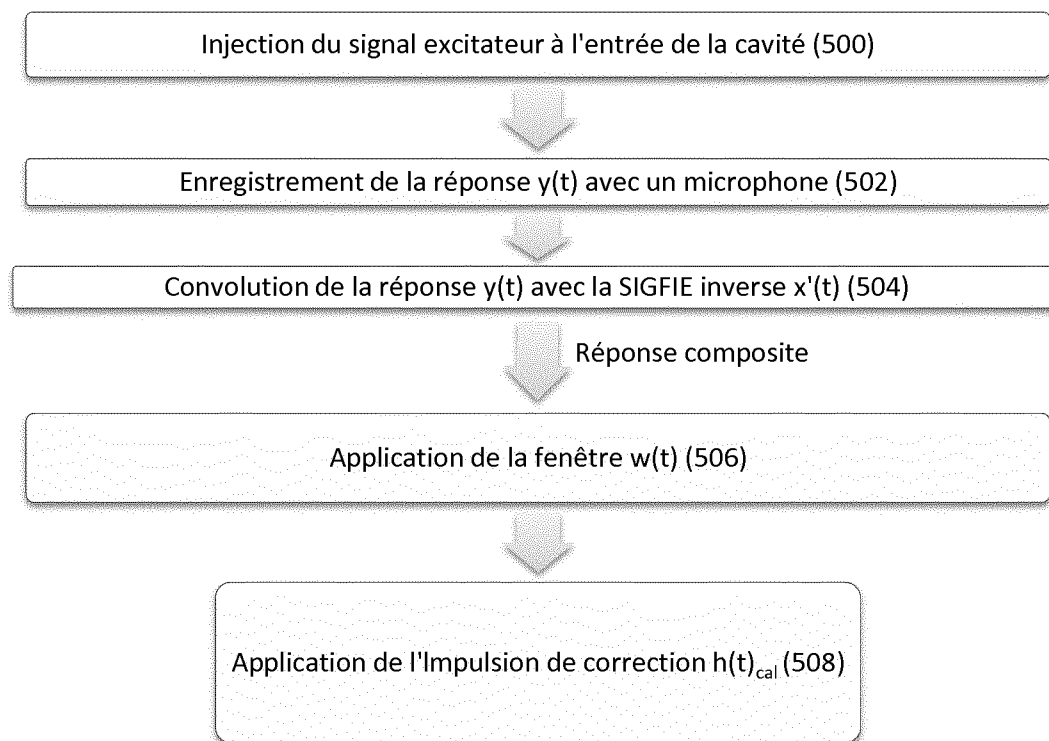


FIGURE 3

FIGURE 4

FIGURE 5

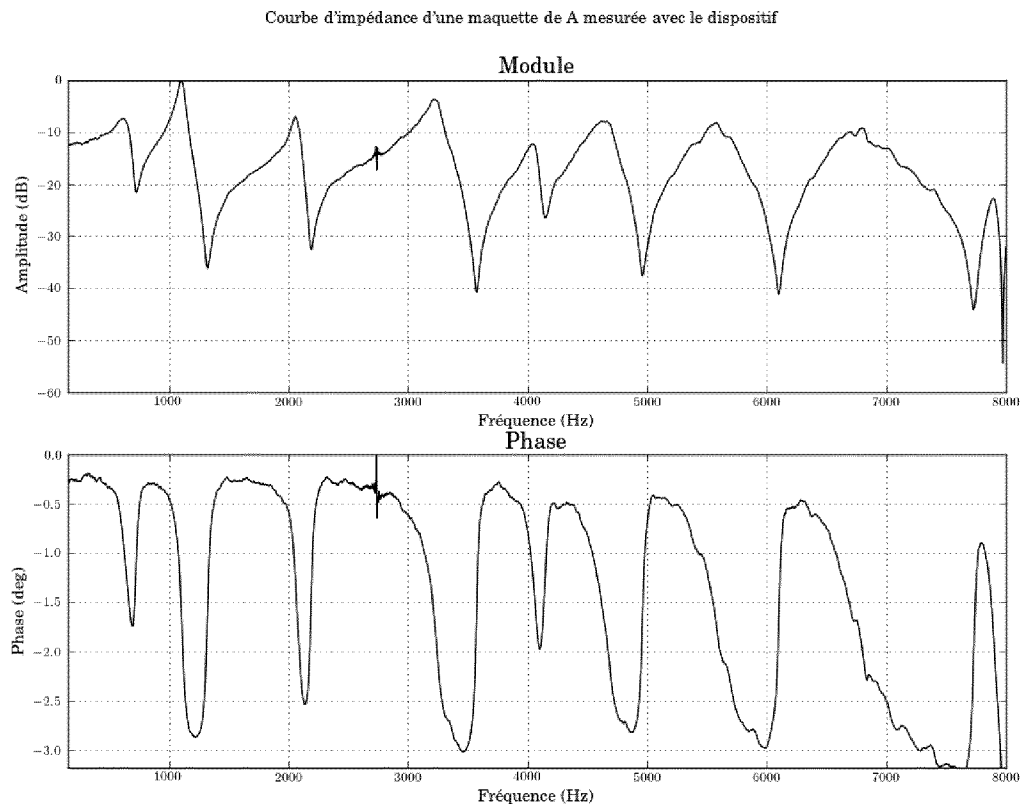


FIGURE 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2015/061454

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

INV. G01H15/00

ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01H G01N

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	WO 96/13702 A1 (UNISEARCH LTD [AU]; WOLFE JOSEPH ALBERT [AU]; SMITH JOHN ROBERT [AU];) 9 May 1996 (1996-05-09) abstract; claims 1,4,15,18; figure 2 -----	1-6,8-14
X	WO 97/20501 A2 (UNIV WASHINGTON [US]) 12 June 1997 (1997-06-12) abstract; claims 1,13,17; figures 2,6 ----- -/--	1-6,8, 10-14



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

22 September 2015

Date of mailing of the international search report

29/09/2015

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Fernandes, Paulo

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2015/061454

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	MATT SPEED ET AL: "Three-Dimensional Digital Waveguide Mesh Simulation of Cylindrical Vocal Tract Analogs", IEEE TRANSACTIONS ON AUDIO, SPEECH AND LANGUAGE PROCESSING, IEEE SERVICE CENTER, NEW YORK, NY, USA, vol. 21, no. 2, 1 February 2013 (2013-02-01), pages 449-455, XP011483880, ISSN: 1558-7916, DOI: 10.1109/TASL.2012.2224342 abstract; figure 1 Section "B. Equalization and Measurement"; page 450 -----	1,2, 4-11, 13-15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2015/061454

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO 9613702	A1	09-05-1996	NONE

WO 9720501	A2	12-06-1997	CA 2239583 A1 12-06-1997
		EP 0957764 A2 24-11-1999	
		EP 1415592 A1 06-05-2004	
		US 5792072 A 11-08-1998	
		WO 9720501 A2 12-06-1997	

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/EP2015/061454

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. G01H15/00 ADD.		
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB		
B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) G01H G01N		
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche		
Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	WO 96/13702 A1 (UNISEARCH LTD [AU]; WOLFE JOSEPH ALBERT [AU]; SMITH JOHN ROBERT [AU];) 9 mai 1996 (1996-05-09) abrégé; revendications 1,4,15,18; figure 2 -----	1-6,8-14
X	WO 97/20501 A2 (UNIV WASHINGTON [US]) 12 juin 1997 (1997-06-12) abrégé; revendications 1,13,17; figures 2,6 ----- -/-	1-6,8, 10-14
☒ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents ☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe		
* Catégories spéciales de documents cités:		
"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée) "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée "T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention "X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément "Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier "&" document qui fait partie de la même famille de brevets		
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale
22 septembre 2015		29/09/2015
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale		Fonctionnaire autorisé
Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Fernandes, Paulo

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	MATT SPEED ET AL: "Three-Dimensional Digital Waveguide Mesh Simulation of Cylindrical Vocal Tract Analogs", IEEE TRANSACTIONS ON AUDIO, SPEECH AND LANGUAGE PROCESSING, IEEE SERVICE CENTER, NEW YORK, NY, USA, vol. 21, no. 2, 1 février 2013 (2013-02-01), pages 449-455, XP011483880, ISSN: 1558-7916, DOI: 10.1109/TASL.2012.2224342 abrégé; figure 1 Section "B. Equalization and Measurement"; page 450 -----	1,2, 4-11, 13-15

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2015/061454

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
WO 9613702	A1	09-05-1996	AUCUN

WO 9720501	A2	12-06-1997	CA 2239583 A1 12-06-1997
			EP 0957764 A2 24-11-1999
			EP 1415592 A1 06-05-2004
			US 5792072 A 11-08-1998
			WO 9720501 A2 12-06-1997
