

## Chapitre 6

# Prototype de système holophonique pour la visioconférence

*Dieu seul et nous pouvons.*

*(Devise des exécuteurs)*

Dieu seul et nous pouvons: Les Très-Edifiantes et Très-Inopinées Mémoires des Pibrac de Bellerocaille  
M. Folco - Ed. du Seuil, 1991



## Sommaire

---

<b>6.1</b>	<b>Contexte de visioconférence . . . . .</b>	<b>293</b>
6.1.1	Géométrie du réseau . . . . .	293
6.1.2	Echantillonnage spatial du réseau . . . . .	295
6.1.3	Troncature du réseau . . . . .	295
6.1.4	Equation intégrale . . . . .	295
<b>6.2</b>	<b>Description du prototype . . . . .</b>	<b>296</b>
6.2.1	Restitution sonore . . . . .	296
	Choix des haut-parleurs . . . . .	296
	Caractéristiques des haut-parleurs . . . . .	298
	Réponse en fréquence de haut-parleurs . . . . .	299
	Diagramme de directivité des haut-parleurs . . . . .	299
6.2.2	Prise de son . . . . .	303
6.2.3	Traitement du signal . . . . .	303
	Mise en œuvre des sources notionelles . . . . .	305
	Correction de la phase stationnaire . . . . .	306
	Filtre d'égalisation des haut-parleurs . . . . .	307
<b>6.3</b>	<b>Expérimentations . . . . .</b>	<b>311</b>
6.3.1	Montage expérimental . . . . .	311
6.3.2	Protocole de mesure . . . . .	316
6.3.3	Chambre anéchoïque . . . . .	316
6.3.4	Studio de visioconférence . . . . .	316
6.3.5	Repliement spectral . . . . .	322
<b>6.4</b>	<b>Conclusion . . . . .</b>	<b>322</b>
	Références Bibliographiques . . . . .	327

---



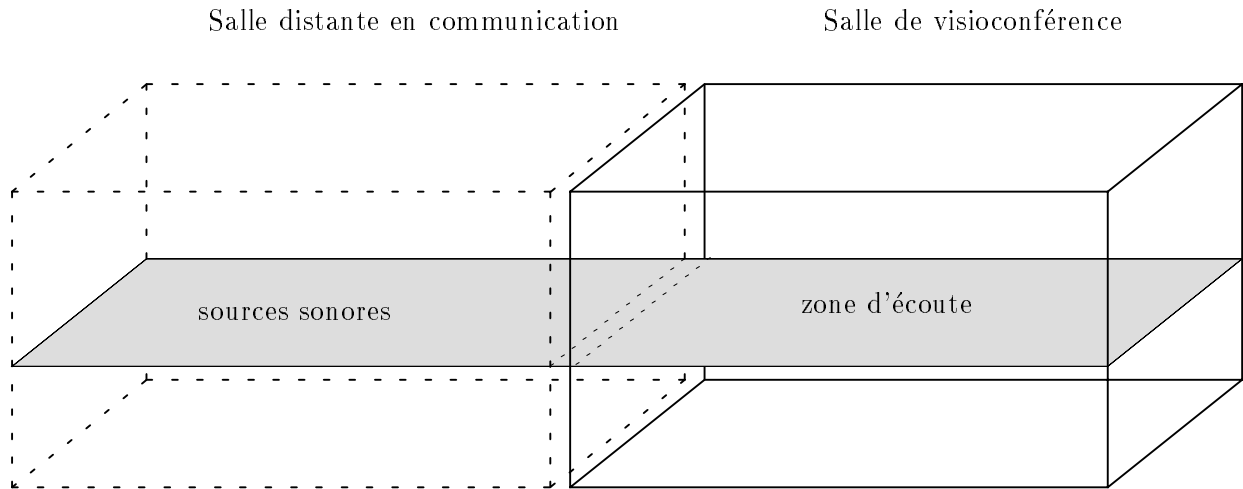


FIG. 6.1 - Spécificités du contexte de visioconférence

Au cours des trois chapitres qui précèdent, l'approche holophonique a été analysée d'un point de vue *théorique*. Le présent chapitre va montrer comment *appliquer le concept d'holophonie à un contexte de visioconférence* et mettre au point un prototype d'holophonie adapté à la prise et la restitution sonore spatialisée pour la visioconférence. Une première partie décrit ce prototype qui a été réalisé au sein du laboratoire d'Acoustique du C.N.E.T. Une fois construit, le système a été installé successivement dans une chambre anéchoïque et dans un studio de visioconférence. Les résultats d'expérimentations menées au C.N.E.T. avec ce prototype d'holophonie seront présentés en fin de chapitre.

## 6.1 Contexte de visioconférence

La conception du prototype d'holophonie prend en compte les spécificités de la situation de visioconférence à partir de l'analyse réalisée au cours des chapitres précédents (cf. Chapitres 3, 4 & 5) qui ont mis en évidence les performances et les limitations de l'holophonie.

On identifie *deux points spécifiques à la visioconférence* (cf. Fig. 6.1):

- les sources sonores — les locuteurs — et les auditeurs sont cantonnés dans un plan horizontal,
- les sources sonores n'entourent pas l'auditeur, mais appartiennent exclusivement au demi-espace situé derrière l'écran vidéo.

### 6.1.1 Géométrie du réseau

Le premier point permet d'appliquer l'approximation de la phase stationnaire (cf. Chapitre 3): au lieu d'un réseau 2D de sources secondaires, on considère donc un *réseau 1D*. D'après le second point, il n'est pas nécessaire d'entourer la zone d'écoute par un réseau fermé: puisque les sources sonores sont situées exclusivement dans le demi-espace frontal des auditeurs, on se contente d'un *réseau rectiligne* placé derrière l'écran vidéo. De plus, on sait que, dans ces conditions, les contributions des réseaux monopolaires et dipolaires sont équivalentes, ce qui nous autorise à supprimer le terme dipolaire dans les sources secondaires. Chaque source secondaire ne comporte ainsi que le *terme monopolaire*, c'est-à-dire un monopôle alimenté par un microphone à gradient de pression.

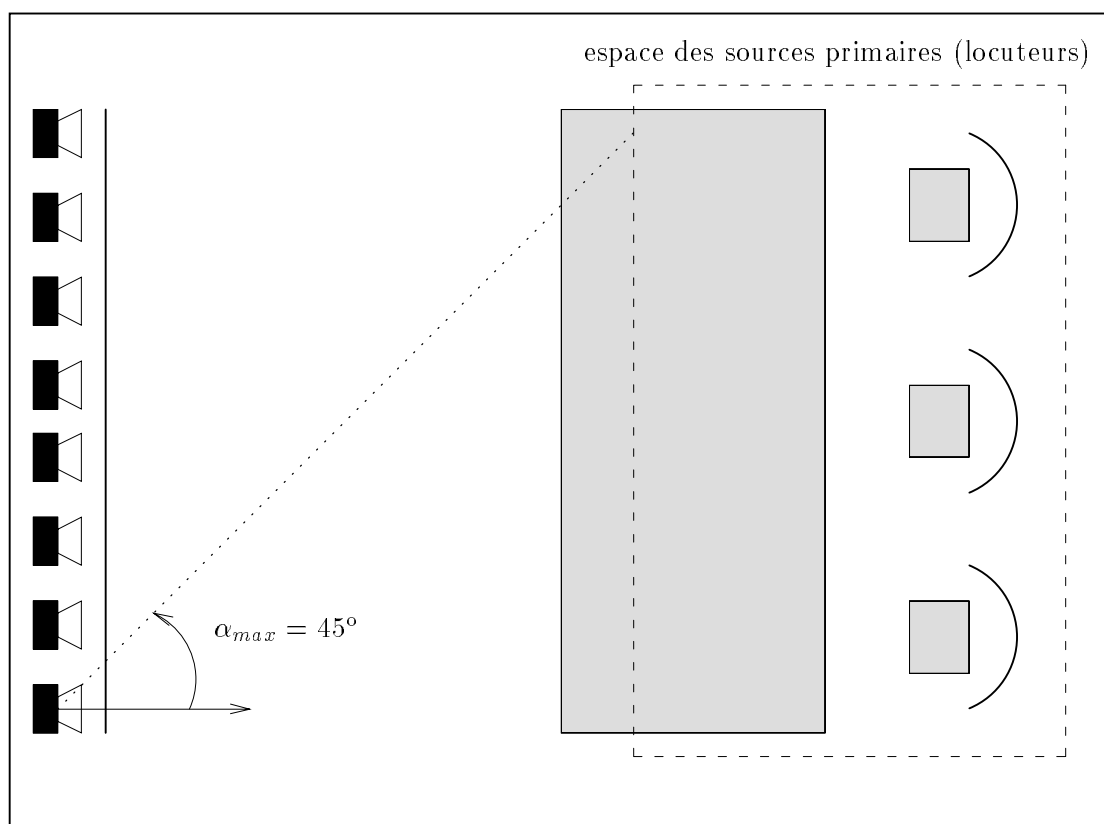


FIG. 6.2 - Angle maximal d'incidence  $\alpha_{max}$  des ondes primaires sur le réseau de sources secondaires en situation de visioconférence

### 6.1.2 Echantillonnage spatial du réseau

Le réseau rectiligne monopolaire ainsi obtenu est ensuite discrétisé avec un pas d'échantillonnage valant :

$$\Delta = 0.15 \text{ cm}$$

ce qui fixe la fréquence d'aliasing à (cf. Chapitre 4) :

$$f_{al} = \frac{c}{2\Delta} \simeq 1.1 \text{ kHz}$$

pour une onde plane se propageant parallèlement à la ligne des sources secondaires. Cependant, dans notre configuration (cf. Fig. 6.2), l'incidence des ondes primaires sur le réseau excède rarement  $45^\circ$ . Si on admet que l'angle maximal d'incidence des ondes primaires sur le réseau vaut :

$$\alpha_{max} = 45^\circ$$

la fréquence d'aliasing est relevée à (cf. Chapitre 4) :

$$f_{al} = \frac{c}{2\Delta \sin \alpha_{max}} \simeq 1.6 \text{ kHz}$$

Cette valeur est bien supérieure au seuil de 1.5 kHz qui a été identifié par les études psychoacoustiques effectuées au laboratoire d'Acoustique de l'U.T.D. comme la valeur minimale de la fréquence d'aliasing permettant de préserver la qualité de la restitution sonore, notamment en termes de localisation des sources virtuelles [Start, 1997]. Ainsi le repliement de spectre spatial se produit pour les hautes fréquences, mais il ne détériore pas sensiblement la qualité du rendu de l'image sonore. Dans la version initiale du prototype, on n'a pas cherché à réduire les effets du repliement spectral par des techniques de filtrage anti-repliement, par exemple en utilisant des microphones directifs ou en pondérant le réseau de haut-parleurs (cf. Chapitre 4). Ce point pourra être traité dans les versions ultérieures, mais il conviendra de procéder au préalable à des tests psychoacoustiques afin de quantifier les effets du repliement spectral et de déterminer s'ils sont perceptibles.

### 6.1.3 Troncature du réseau

Un réseau de  $N = 16$  haut-parleurs au total est considéré, ce qui correspond à une longueur de :

$$L = (N - 1) \times \Delta = 2.25 \text{ m.}$$

D'après les travaux menés à l'U.T.D. [Start, 1997], cette taille rend négligeables les effets de la troncature du réseau, du moins en ce qui concerne sa troncature horizontale (cf. Chapitre 5). Aucune correction des effets de troncature horizontale n'est donc envisagée pour l'instant. De même, dans la version initiale du prototype, la troncature verticale n'est pas corrigée, mais on prévoit d'intégrer la correction de la phase stationnaire dans la prochaine version et, à plus long terme, on implantera également les solutions alternatives à l'approximation de la phase stationnaire qui ont été dégagées au cours du chapitre 5. On pourra ainsi comparer les performances des différentes méthodes proposées (cf. Chapitre 5), d'un point de vue à la fois objectif et subjectif. Comme pour le repliement spectral, cette étude méritera d'être précédée d'une évaluation de l'incidence psychoacoustique de la troncature.

### 6.1.4 Equation intégrale

En résumé, l'intégrale de Kirchhoff-Helmholtz (cf. Chapitre 3) appliquée au contexte de visioconférence devient :

$$p(\vec{r}, \omega) = \frac{1}{\sqrt{j k} 2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \sqrt{\frac{\rho R}{\rho + R}} \frac{\partial p_0}{\partial y_0}(\vec{r}_0, \omega) \frac{e^{-j k R}}{2\pi R} \Big|_{y_0=z_0=0} dx_0 \quad (6.1)$$

où la pression  $p_0$  correspond à l'onde primaire induite au niveau du réseau de sources secondaires. Le repère  $(\vec{0}, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$  a été choisi de telle sorte que le réseau de sources secondaires soit une droite infinie parallèle à

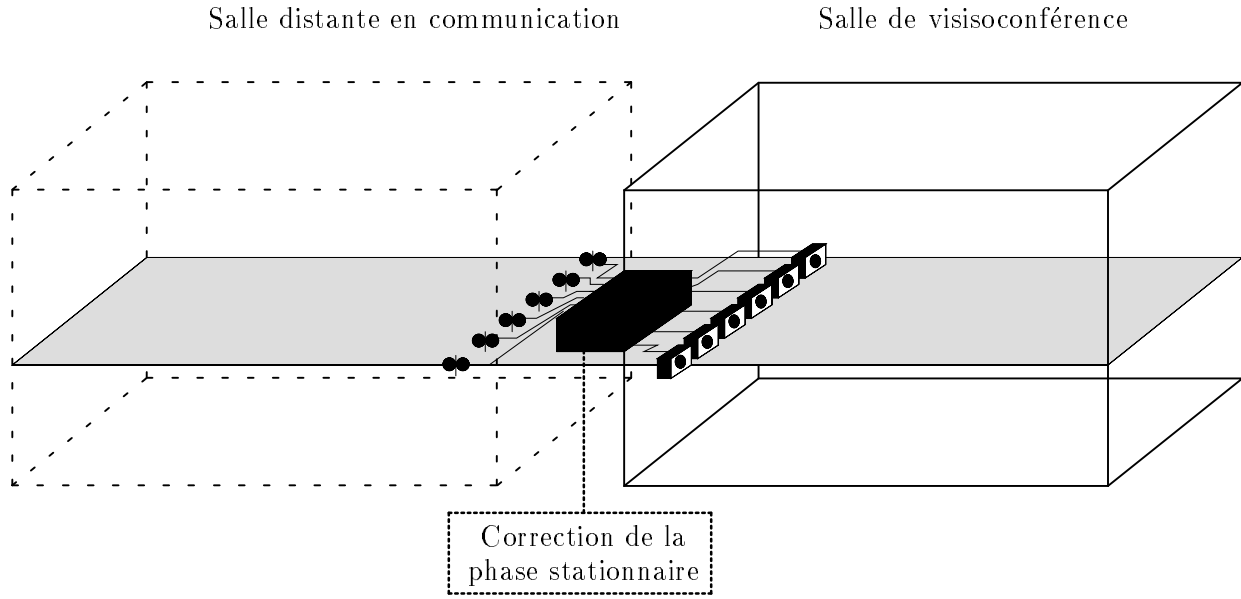


FIG. 6.3 - Système holophonique pour la visioconférence

l'axe  $\vec{x}$  passant par l'origine. On rappelle que les distances  $\rho$  et  $R$  représentent respectivement la distance séparant la source primaire d'une source secondaire et la distance séparant une source secondaire d'un point d'écoute. La position d'une source secondaire est repérée par le vecteur  $\vec{r}_0$ . On reconnaît dans l'équation 6.1 l'intégrale de Rayleigh I à laquelle on a appliqué l'approximation de la phase stationnaire.

Après échantillonnage et troncature du réseau de sources secondaires (cf. Chapitre 4 & 5), l'équation 6.1 s'écrit :

$$p(\vec{r}, \omega) = \frac{\Delta}{\sqrt{j k} 2\pi} \sum_{n=1}^N \sqrt{\frac{\rho_n R_n}{\rho_n + R_n}} \frac{\partial p_0}{\partial y_0}(\vec{r}_{0_n}, \omega) \frac{e^{-j k R_n}}{2\pi R_n} \quad (6.2)$$

avec :

$$\begin{cases} \rho_n &= |\vec{r}_{0_n} - \vec{r}_s| \\ R_n &= |\vec{r}_{0_n} - \vec{r}| \end{cases}$$

On note que les vecteurs  $\vec{r}_s$ ,  $\vec{r}_{0_n}$  et  $\vec{r}$  repèrent respectivement les positions de la source primaire, de la source secondaire indicée  $n$  et du point d'écoute. Les coordonnées d'une source secondaire sont données par :

$$\vec{r}_{0_n} \begin{cases} x_0 &= (-\frac{N+1}{2} + n) \times \Delta \\ y_0 &= 0 \\ z_0 &= 0 \end{cases}$$

L'équation 6.2 définit le résultat que nous allons chercher à mettre en œuvre (cf. Fig. 6.3).

## 6.2 Description du prototype

### 6.2.1 Restitution sonore

#### Choix des haut-parleurs

Dans la salle de visioconférence, la restitution du son est assurée par une antenne rectiligne de haut-parleurs disposés derrière l'écran vidéo (cf. Fig. 6.4). Pour le prototype, le choix des haut-parleurs s'est porté



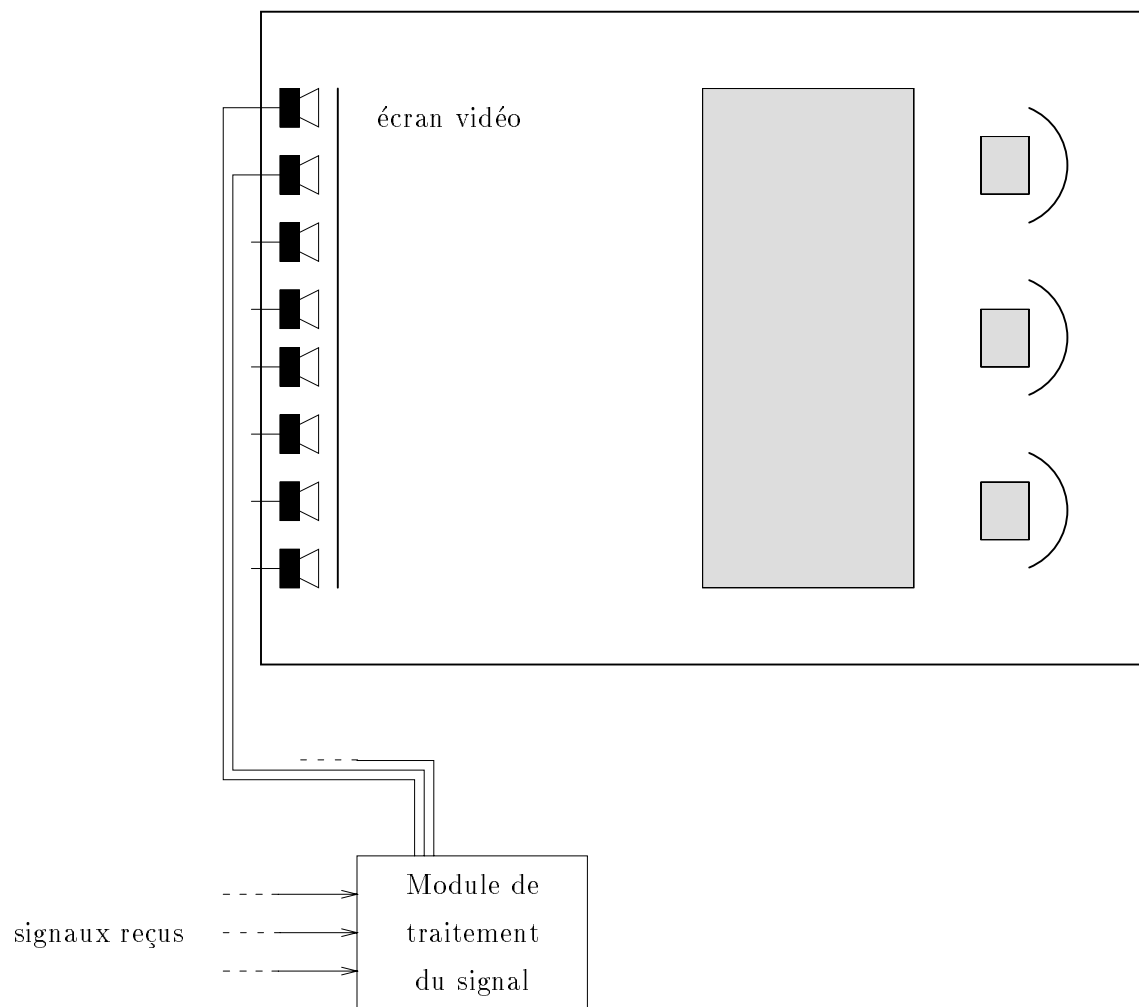
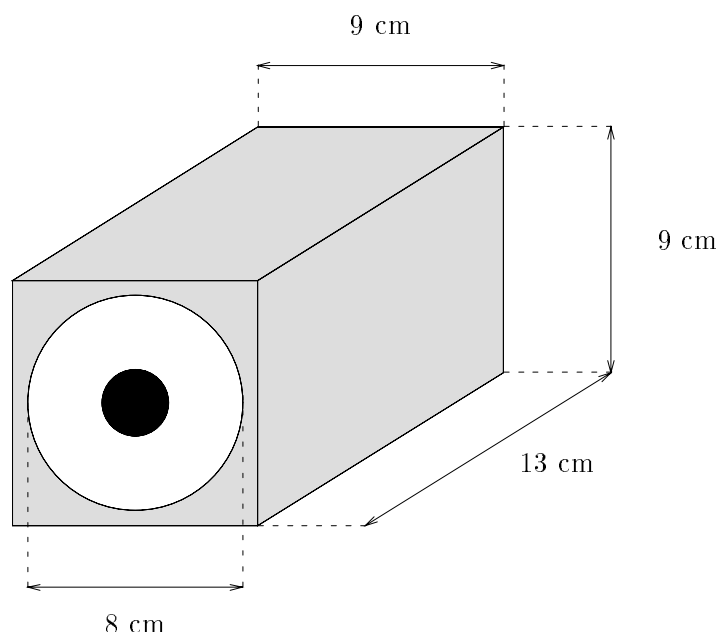


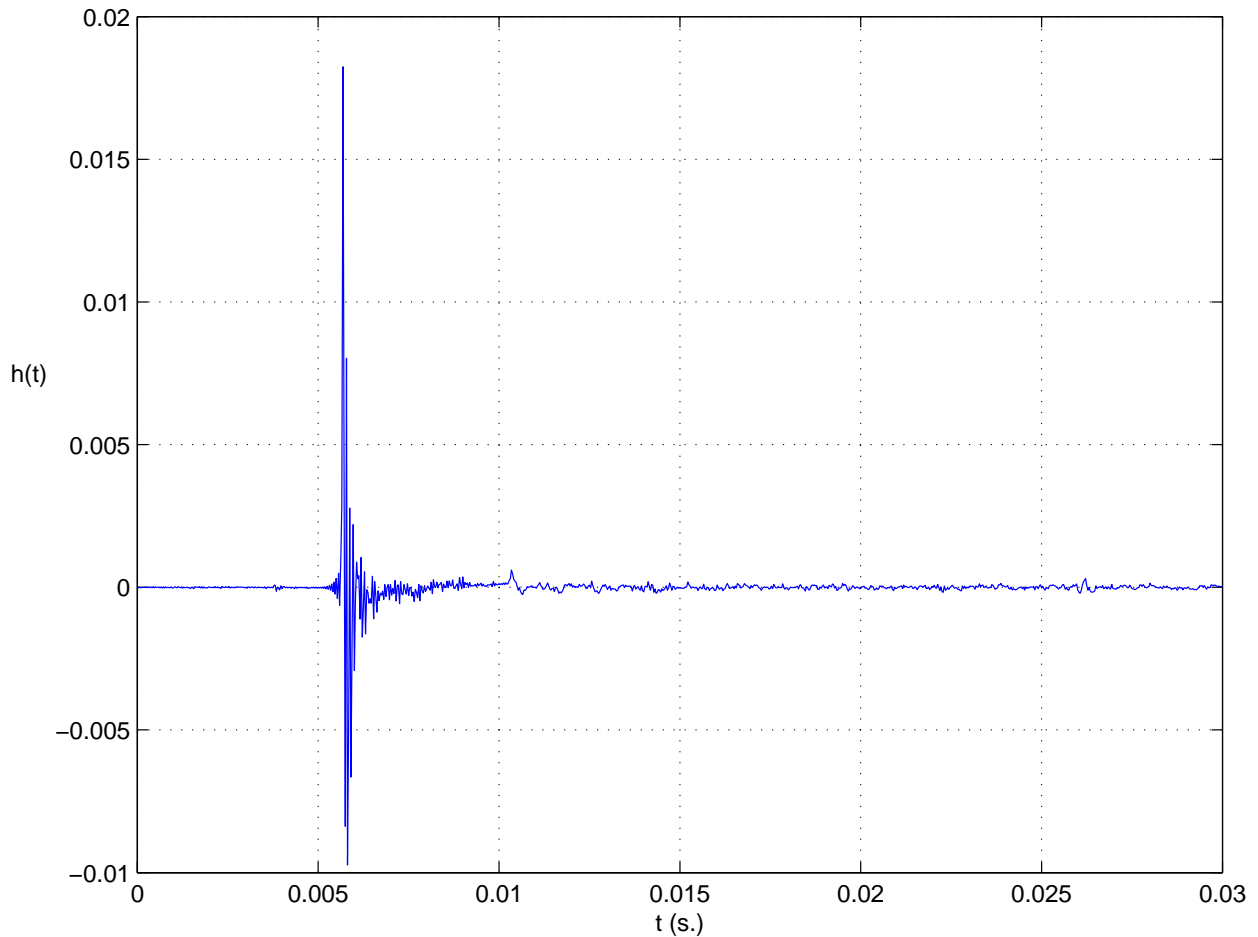
FIG. 6.4 - Système holophonique pour la visioconférence: Restitution du son


 FIG. 6.5 - Haut-parleur monté sur une enceinte close ( $V = 1$  l)

sur un modèle de la marque AUDAX (Référence: HT080G2) qui offre un excellent compromis entre la taille et l'étendue de la bande passante, attendu qu'un espacement de  $\Delta = 15$  cm entre les transducteurs impose des haut-parleurs de faibles dimensions. Or, il est très difficile de restituer les basses fréquences avec des haut-parleurs dont le diamètre de la membrane est inférieur à 10 cm. Dans le cas des haut-parleurs choisis, bien que le diamètre de leur diaphragme mesure 8 cm, leur bande passante, lorsqu'ils sont chargés par un volume  $V = 1$  l [Saliou, 1995], s'étend à [150Hz-16kHz], ce qui constitue un résultat très satisfaisant en situation de visioconférence. Ces haut-parleurs sont montés sur une enceinte close de forme parallélépipédique de volume  $V = 1$  l (cf. Fig. 6.5).

### Caractéristiques des haut-parleurs

L'ensemble des  $N = 16$  haut-parleurs a été caractérisé en chambre anéchoïque, en termes de *réponse en fréquence* et de *directivité*. La procédure a consisté à mesurer la réponse impulsionnelle de chaque haut-parleur dans le plan horizontal pour un angle d'azimut  $\varphi$  variant de  $0^\circ$  à  $350^\circ$  par pas de  $10^\circ$ . La réponse impulsionnelle du haut-parleur est mesurée au moyen du logiciel développé par la société A.P.I.A. (Acoustique Prospective Ingénierie Audio) sous le nom d'A.M.S. (APIA Measurement System). Le principe de la mesure est basé sur l'utilisation de séquences M.L.S. (Maximum Length Sequence) [Kuttruff, 1991] [Jullien *et al.*, 1984]. La figure 6.6 reproduit la réponse impulsionnelle  $h(t)$  d'un des haut-parleurs mesurée par un microphone de mesure B& K sous l'incidence de  $\varphi = 0^\circ$ . On remarque que le support de cette réponse est court, ce qui signifie que le haut-parleur se comporte en bonne approximation comme un *filtre à phase minimale*. Cette propriété est intéressante si on veut par la suite corriger la réponse en fréquence du haut-parleur. Pour égaliser la réponse en fréquence du haut-parleur, il va falloir déterminer le filtre dont la fonction de transfert correspond à l'inverse de la fonction de transfert du haut-parleur, de façon à compenser les défauts du transducteur en filtrant les signaux alimentant les haut-parleurs. Le comportement du haut-parleur à phase minimale garantit alors que son filtre inverse est causal et stable.


 FIG. 6.6 - Réponse impulsionnelle d'un haut-parleur ( $\varphi = 0^\circ$ )

### Réponse en fréquence de haut-parleurs

La figure 6.7 illustre la réponse en fréquence moyenne des haut-parleurs pour une incidence de  $\varphi = 0^\circ$ . Même si la courbe est loin d'être plate et présente plusieurs accidents, il faut noter l'excellente *homogénéité* des caractéristiques des 16 échantillons, puisque l'ensemble des réponses en fréquences tient dans une plage de quelques dB. On peut donc envisager d'égaliser la réponse des 16 haut-parleurs par un filtre unique.

### Diagramme de directivité des haut-parleurs

Les diagrammes de directivité des haut-parleurs sont représentés par bande de tiers d'octave sur les figures 6.8 et 6.9. Il s'agit des données moyennées sur les résultats obtenus pour les 16 haut-parleurs. Comme pour la réponse en fréquence, la directivité des haut-parleurs reste très homogène sur l'ensemble des  $N = 16$  échantillons. On observe que le haut-parleur présente un comportement omnidirectionnel dans les basses fréquences jusqu'à 1 kHz. Au delà de cette fréquence, il devient directif et sa directivité se renforce avec la fréquence. Du point de vue de l'holophonie, cette directivité dans les hautes fréquences est intéressante, dans la mesure où la fonction de directivité des sources intervient comme un filtre qui va limiter le spectre spatial de l'onde restituée et ainsi réduire les problèmes de repliement spectral et d'interpolation spatiale (cf. Chapitre 4).

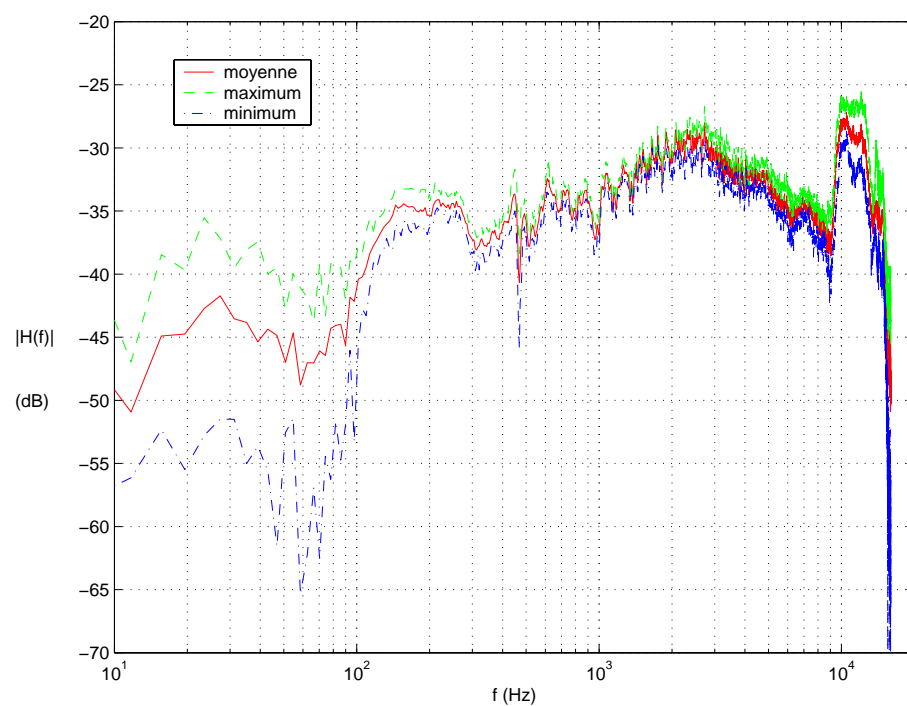
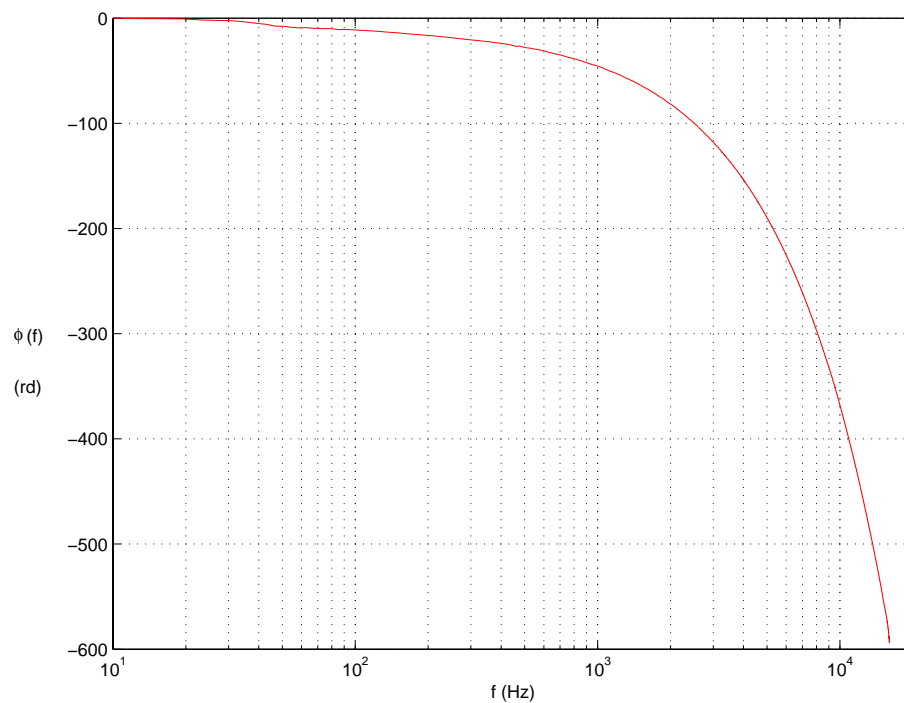

 (a) Module  $|H(f)|$ 

 (b) Phase  $\phi(f)$ 

 FIG. 6.7 - Réponse en fréquence moyenne des 16 haut-parleurs ( $\varphi = 0^\circ$ )

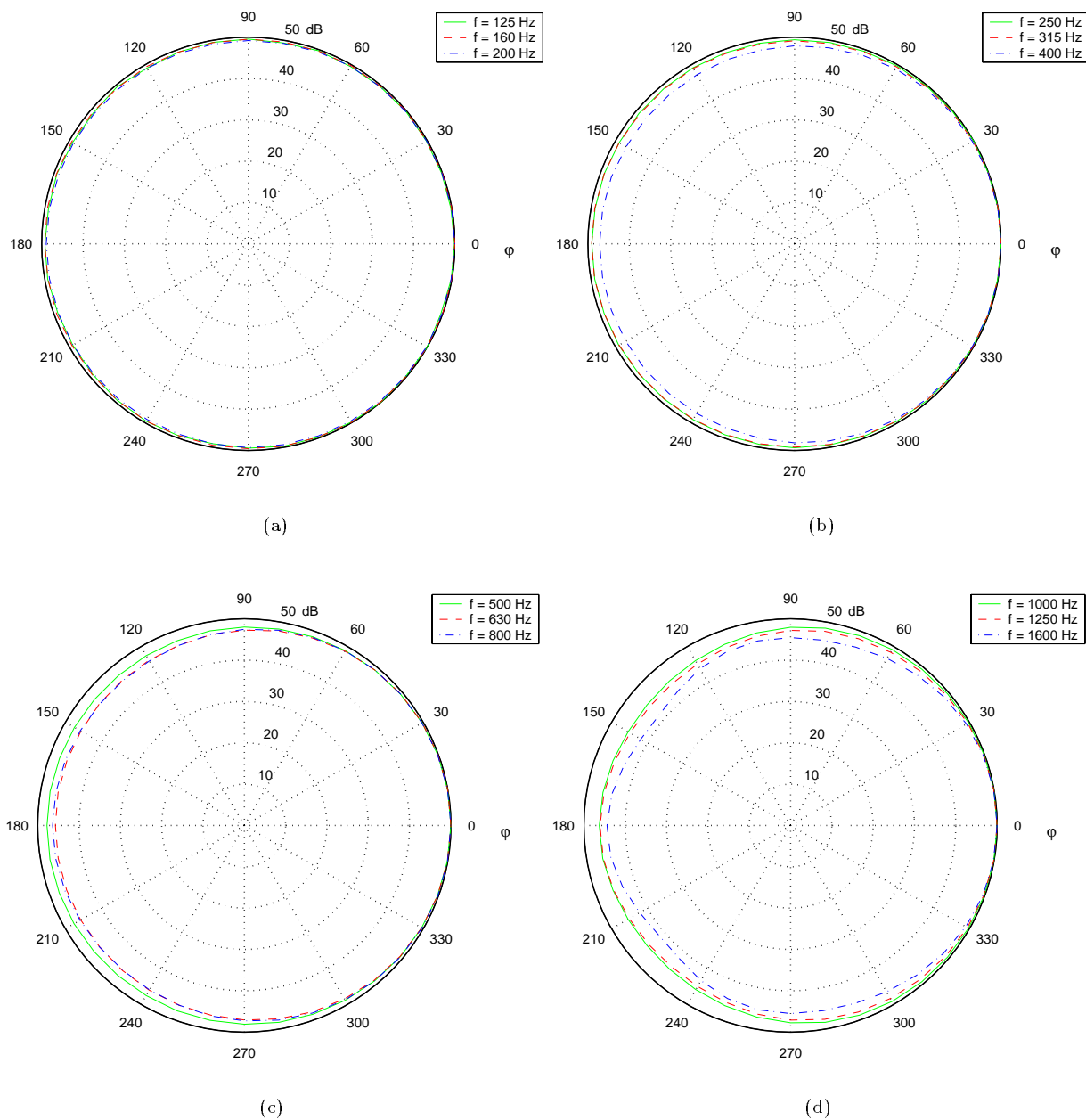


FIG. 6.8 - Diagramme de directivité moyen des 16 haut-parleurs pour les bandes de tiers d'octave de  $f = 125$  Hz à 1.6 kHz

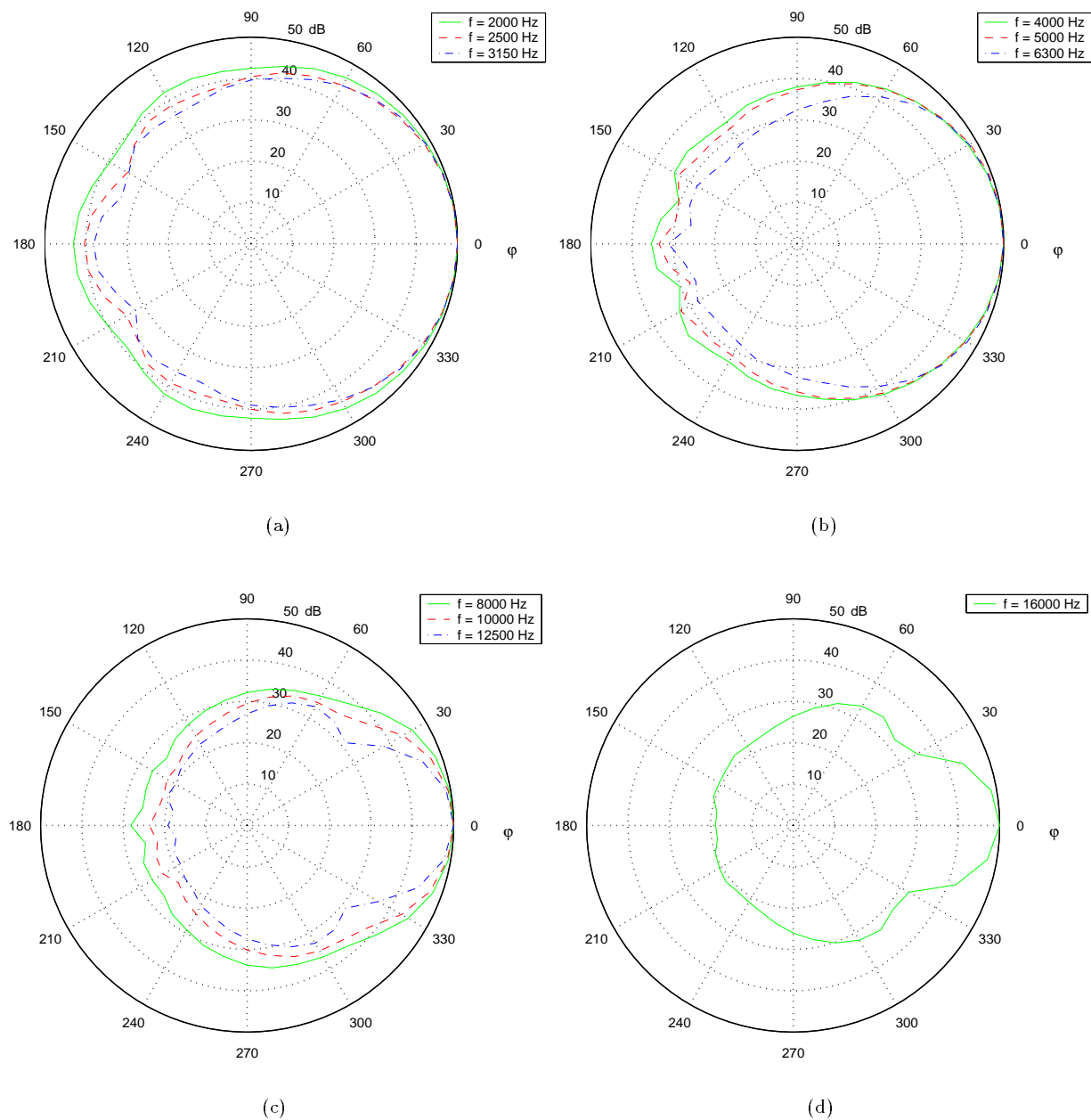


FIG. 6.9 - Diagramme de directivité moyen des 16 haut-parleurs pour les bandes de tiers d'octave de  $f = 2$  kHz à 16 kHz

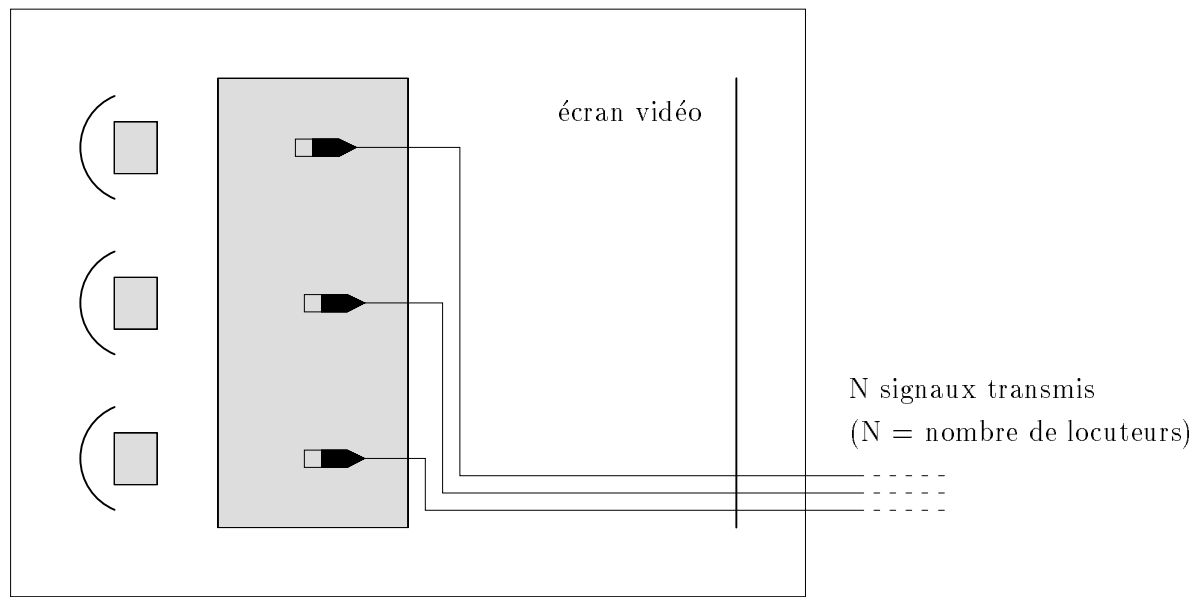


FIG. 6.10 - Système holophonique pour la visioconférence: Prise de son

### 6.2.2 Prise de son

Pour la prise de son, on se propose de mettre en œuvre le concept de source notionnelle. Au lieu de disposer une antenne de microphones derrière l'écran vidéo au voisinage de l'antenne de haut-parleurs dédiée à la restitution, on préfère enregistrer la voix des locuteurs au moyen de microphones de proximité placés devant eux sur la table de visioconférence (cf. Fig. 6.10). Outre qu'il réduit le nombre de microphones et par suite le nombre de signaux à transmettre entre les salles en communication, ce dispositif permet de minimiser le couplage entre les microphones et les haut-parleurs. Cependant il suppose que les locuteurs ne se déplacent pas et restent assis derrière la table. Cette hypothèse est raisonnable dans le contexte actuel des visioconférences, mais il faut prévoir qu'une plus grande liberté de mouvements sera souhaitée à l'avenir. En ce cas, on peut envisager d'étendre le concept de source notionnelle en assurant la prise de son par un réseau horizontal de microphones surélevés, ce qui risque toutefois de poser des problèmes de couplage entre microphones et haut-parleurs (cf. Chapitre 3). Une solution plus judicieuse du point de vue des problèmes de couplage consisterait à munir chaque locuteur d'un microphone cravate en liaison HF. Il faudrait alors identifier la position de chaque locuteur par un processus séparé — acoustique ou visuel — qui piloterait le calcul de propagation des sources notionnelles.

### 6.2.3 Traitement du signal

Dans l'absolu, un système holophonique ne requiert aucun traitement entre la prise et la restitution du son et c'est d'ailleurs un de ses avantages. Cependant, dans le cadre d'une approche simplifiée, on a vu que, pour réduire la complexité du réseau de sources secondaires, on est contraint d'intervenir sur les signaux microphoniques pour appliquer des facteurs correctifs. Le concept de source notionnelle à la prise de son introduit également des traitements. Par ailleurs, on veut corriger les défauts de réponse en fréquence des haut-parleurs par un filtre d'égalisation. Ainsi, le signal recueilli en sortie d'un microphone va subir au total trois opérations destinées à :

- simuler la propagation de la source notionnelle jusqu'au réseau de sources secondaires,
- compenser la troncature horizontale du réseau en appliquant la correction de la phase stationnaire,

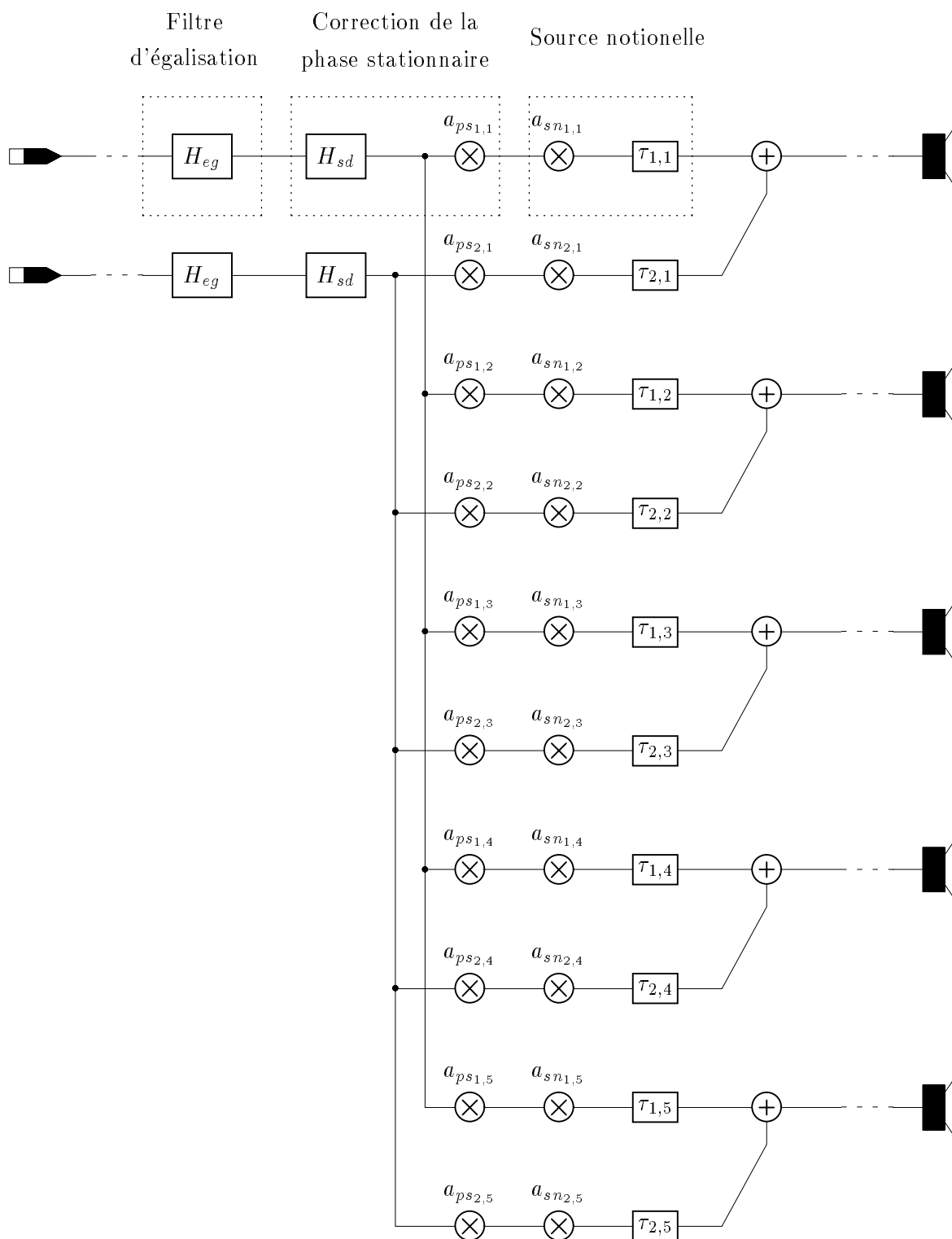


FIG. 6.11 - Synoptique du traitement appliqué aux signaux microphoniques



- corriger la réponse en fréquence des haut-parleurs au moyen d'un filtre d'égalisation.

Le synoptique du traitement est illustré sur la figure 6.11.

### Mise en œuvre des sources notionelles

Pour propager chaque signal microphonique jusqu'au réseau de sources secondaires où seraient situés les capteurs théoriques, la propagation de l'onde acoustique est modélisée par un *gain* correspondant à la divergence sphérique et un *retard* lié au temps de propagation (cf. Chapitre 3). Il faut aussi tenir compte de la réponse du microphone virtuel théorique qui est associé à la source secondaire. En l'occurrence, il s'agit d'un microphone à gradient de pression orienté perpendiculairement au plan du réseau de sources secondaires (cf. Fig. 6.3).

En présence d'un monopôle situé en  $\vec{r}_s$ , on recueillerait théoriquement aux bornes du microphone indicé  $n$  placé au point  $\vec{r}_{0_n}$  un signal de la forme (cf. Equ. 6.1):

$$\frac{\partial p_0}{\partial y_0}(\vec{r}_{0_n}, \omega) = a_s(\omega) \cos \alpha_n \frac{1 + jk\rho_n}{\rho_n} \frac{e^{jk\rho_n}}{4\pi\rho_n} \quad (6.3)$$

avec:

$$\begin{cases} \vec{\rho}_n &= \vec{r}_{0_n} - \vec{r}_s \\ \rho_n &= |\vec{\rho}_n| \\ \cos \alpha_n &= \frac{\vec{\rho}_n \cdot \vec{y}}{\rho_n} \end{cases}$$

Le signal du monopôle  $a_s(\omega)$  est obtenu en rétropropageant le signal  $p_m$  capté par le microphone réel situé en  $\vec{r}_m$  jusqu'à la position de la source notionelle:

$$a_s(\omega) = p_m(\omega) 4\pi\sigma_n e^{-jk\sigma_n} \quad (6.4)$$

où:

$$\sigma_n = |\vec{r}_m - \vec{r}_s|.$$

Le signal de sortie du microphone théorique s'exprime donc en fonction du signal  $p_m$  recueilli en sortie du capteur réel par la relation:

$$\frac{\partial p_0}{\partial y_0}(\vec{r}_{0_n}, \omega) = p_m(\omega) \cos \alpha_n \frac{1 + jk\rho_n}{\rho_n} \frac{\sigma_n}{\rho_n} e^{jk(\rho_n - \sigma_n)} \quad (6.5)$$

Au total, on identifie donc trois termes qui interviennent dans la simulation du processus de propagation entre la source notionelle et le réseau de sources secondaires:

- un gain provenant de la *divergence sphérique*:

$$a_n = \frac{\sigma_n}{\rho_n}$$

- un retard résultant du *temps de propagation*:

$$\tau_n = \frac{\rho_n - \sigma_n}{c}$$

- un troisième terme lié à la réponse du microphone théorique:

$$\cos \alpha_n \frac{1 + jk\rho_n}{\rho_n}$$

Avec l'approximation de champ lointain ( $kr_n \gg 1$ ), ce dernier terme devient:

$$\lim_{kr_n \rightarrow +\infty} \left( \cos \alpha_n \frac{1 + jk\rho_n}{\rho_n} \right) = jk \cos \alpha_n \quad (6.6)$$

Compte tenu du fait que le terme  $jk$  se simplifie avec le terme  $\frac{1}{\sqrt{jk}}$  du facteur correctif de la phase stationnaire, le comportement du microphone théorique est ainsi modélisé par un simple terme de directivité  $\cos \alpha_n$  qui ne dépend plus de la fréquence, mais uniquement de la géométrie des sources et des microphones. Dans la version initiale du prototype, on se contentera de ce modèle approché qui repose sur l'hypothèse selon laquelle les sources primaires sont situées suffisamment loin du réseau de sources secondaires. Par suite, la simulation de la propagation des sources notionelles se réduit à un gain et un retard dont les valeurs sont données par :

$$\begin{cases} a_n &= \frac{\sigma_n}{\rho_n} \cos \alpha_n \\ \tau_n &= \frac{\rho_n - \sigma_n}{c} \end{cases} \quad (6.7)$$

En ce qui concerne l'application du retard, il faut remarquer qu'on travaille sur des signaux numériques. Or, pour retarder un signal numérique, deux solutions sont possibles :

- utiliser une ligne à retard numérique classique, auquel cas il n'est possible de retarder le signal que d'un nombre entier d'échantillons,
- avoir recours aux techniques de retard fractionnaire qui, par différentes méthodes, permettent de réaliser des retards correspondant à une fraction d'échantillon [Valimaki, 1994] [Laakso *et al.*, 1994].

Les systèmes développés au laboratoire d'Acoustique de l'U.T.D. ne mettent pas en œuvre des techniques de retard fractionnaire et se contentent d'appliquer des retards tronqués à l'échantillon. Leur évaluation n'a pas mis en évidence de dégradation significative du rendu sonore. La version initiale du prototype réalisé au C.N.E.T. n'a pas non plus recours aux méthodes de retard fractionnaire. La fréquence d'échantillonnage étant de  $F_e = 32$  kHz, la troncature des retards à l'échantillon correspond à une erreur maximale de 0.03125 ms. Une telle erreur n'est pas sensible dans les basses fréquences, du moins jusqu'aux fréquences de l'ordre de  $\frac{F_e}{8} = 4$  kHz, voire  $\frac{F_e}{4} = 8$  kHz. Or, à ces fréquences, la restitution est déjà perturbée par les phénomènes de repliement spectral, ce qui rend négligeables les effets de la troncature des retards. On envisage néanmoins d'implémenter des méthodes de retard fractionnaire<sup>1</sup> dans les versions ultérieures, afin d'en valider ou non la pertinence.

### Correction de la phase stationnaire

Le facteur de correction de la phase stationnaire  $\eta_{PS}$  comprend deux termes (cf. Chapitre 3) :

- un *gain* indépendant de la fréquence, mais qui dépend de la position de la source primaire  $\vec{r}_s$  et de la position d'écoute  $\vec{r}$  :

$$a_{ps} = \sqrt{\frac{\rho_n R_n}{2\pi(\rho_n + R_n)}} \quad (6.8)$$

- un *filtre* dont la réponse en fréquence est définie par :

$$H_{ps}(f) = \sqrt{\frac{c}{j2\pi f}} \quad (6.9)$$

En outre, il faut multiplier le second terme par le facteur  $jk$  issu des sources notionelles. Il vient finalement :

$$H_{ps}(f) = \sqrt{\frac{j2\pi f}{c}} \quad (6.10)$$

On rappelle que la version initiale du prototype n'applique aucune correction de la phase stationnaire. Nous allons néanmoins décrire la procédure envisagée pour la mettre en œuvre. L'implémentation du gain se heurte au problème de la *dépendance en  $\vec{r}_s$  et  $\vec{r}$*  qui est impossible à réaliser en pratique, attendu qu'une

1. A cette occasion, on se propose d'appliquer une approche innovante mise au point au C.N.E.T. et qui utilise des filtres R.I.F. à  $N = 4$  coefficients [Täger, 1997].

seule valeur de gain peut être appliquée pour un haut-parleur donné. Toutefois, comme la prise de son utilise le concept de source notionnelle, la position de la source primaire est identifiée et fixée pour chaque signal microphonique et il est donc possible d'appliquer aux signaux microphoniques un gain qui en dépende. En revanche, pour la dépendance sur la position d'écoute, il est impossible de la prendre en compte, sauf à imposer une position d'écoute fixe, mais, quoi qu'il en soit, on ne peut pas appliquer simultanément les corrections associées à plusieurs positions d'écoute, ce qui anéantit l'atout essentiel du système, à savoir une zone d'écoute étendue. L'étude menée au chapitre 5 sur l'approximation de la phase stationnaire a cependant montré qu'on peut s'affranchir de la dépendance sur la position d'écoute en appliquant une correction définie pour une position d'écoute moyenne correspondant au centre de la zone d'écoute. On se propose de mettre en œuvre cette solution.

Quant au filtre, on se rend compte qu'il s'agit à un facteur multiplicatif près d'un *filtre semi-dérivateur* [Oldham & Spanier, 1974]. On reconnaît en effet dans sa réponse en fréquence  $H_{ps}$  (cf. Equ. 6.10), le terme:

$$\sqrt{j2\pi f} = \sqrt{j\omega}$$

qui correspond bien à une dérivation d'ordre  $\frac{1}{2}$  dans le domaine temporel, c'est-à-dire une *semi-dérivation*. Ce filtre semi-dérivateur s'implante sous la forme d'un filtre R.I.F. dont les  $N$  coefficients  $h_{sd_i}$  pour  $i$  variant de 0 à  $(N-1)$  sont donnés par:

$$\left\{ \begin{array}{lcl} h_{sd_0} & = & \sqrt{F_e} \\ h_{sd_1} & = & -\frac{\sqrt{F_e}}{2} \\ & \vdots & \\ h_{sd_i} & = & -\sqrt{F_e} \frac{\frac{1}{2} \frac{3}{2} \cdots (i-\frac{3}{2})}{2(i!)} \\ & \vdots & \\ h_{sd_{N-1}} & = & -\sqrt{F_e} \frac{\frac{1}{2} \frac{3}{2} \cdots (N-\frac{5}{2})}{2[(N-1)!]} \end{array} \right. \quad (6.11)$$

On a opté pour un filtre de longueur  $N = 64$  coefficients. La figure 6.12 reproduit le module  $A_{sd}(f)$  et la phase  $\phi_{sd}(f)$  de sa réponse en fréquence:

$$H_{sd}(f) = A_{sd}(f) e^{j\phi_{sd}(f)} \quad (6.12)$$

### Filtre d'égalisation des haut-parleurs

Egaliser la réponse en fréquence des haut-parleurs consiste à filtrer leur signal d'entrée par un filtre dont la réponse en fréquence correspond à la fonction inverse de leur réponse. Il serait possible de filtrer chaque haut-parleur par un filtre spécifique calculé à partir de sa propre réponse en fréquence, mais, étant donné l'homogénéité des caractéristiques des haut-parleurs, on préfère utiliser un filtre unique calculé à partir de la réponse en fréquence moyenne des haut-parleurs, dans le souci d'alléger le coût du traitement. Soit:

$$H_{hp}(f) = A_{hp}(f) e^{j\phi_{hp}(f)} \quad (6.13)$$

la réponse en fréquence moyenne des haut-parleurs, le filtre d'égalisation a donc pour réponse en fréquence:

$$H_{eg}(f) = \frac{1}{H_{hp}(f)} \quad (6.14)$$

On va chercher à modéliser ce filtre par un *filtre R.I.I. à phase minimale*. Cette solution, qui a été utilisée avec succès pour implanter des filtres d'égalisation dans des systèmes transauraux [Marin, 1996], donne en effet de bons résultats pour une complexité réduite. En particulier, le filtre obtenu possède une réponse impulsionnelle courte. Parmi les différentes solutions possibles, la solution à phase minimale détermine en effet le filtre dont la réponse impulsionnelle est la plus courte.

Dans un filtre à phase minimale, le module  $A_{pm}$  et la phase  $\phi_{pm}$  de sa réponse en fréquence sont liés par les relations de Bayer-Bode, c'est-à-dire que la phase s'exprime en fonction du logarithme du module par la relation:

$$\phi_{pm}(f) = v.p. \int_{-\frac{F_e}{2}}^{+\frac{F_e}{2}} \log_{10}[A_{pm}(f')] \cotg[\pi(f - f')] df' \quad (6.15)$$

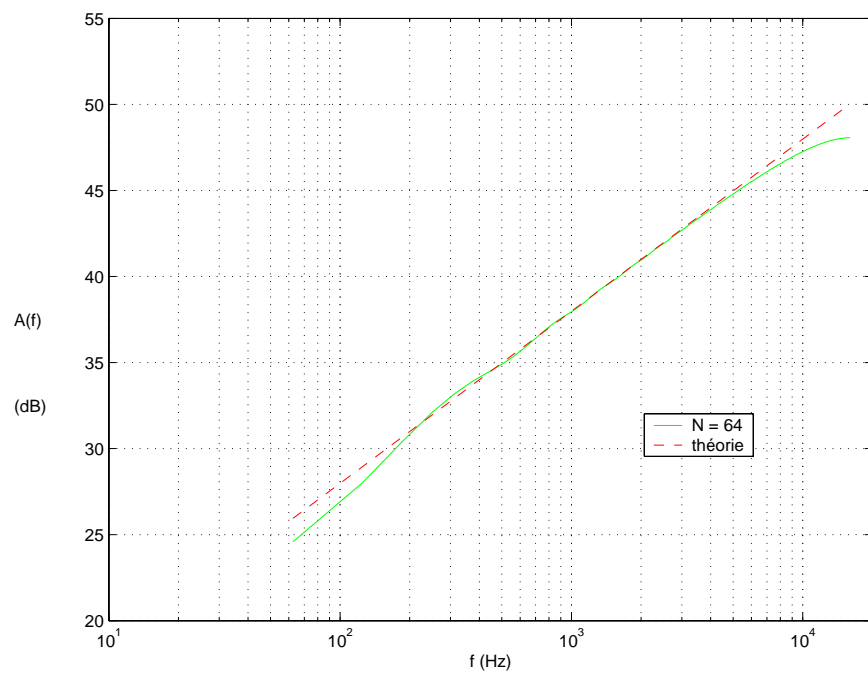
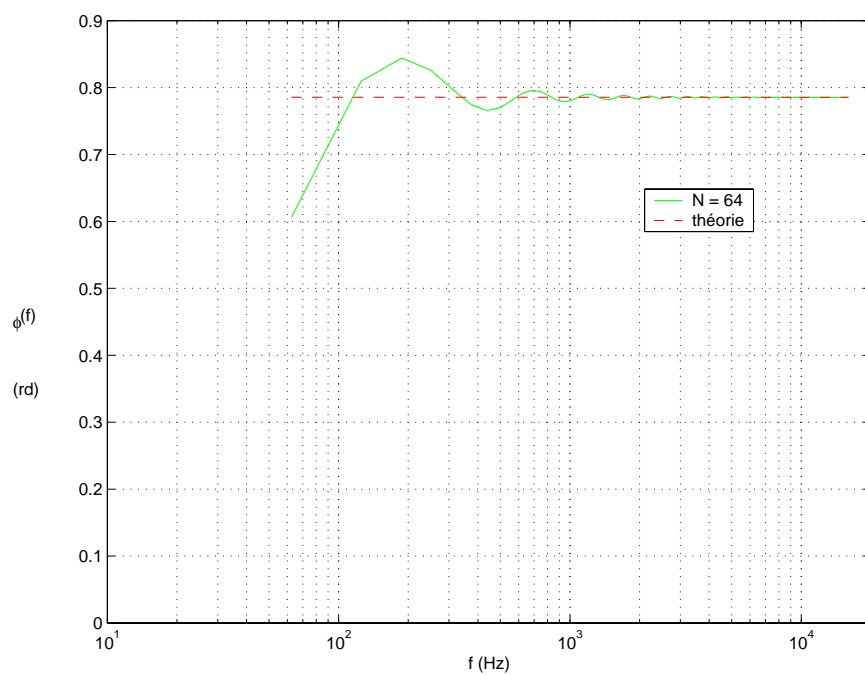
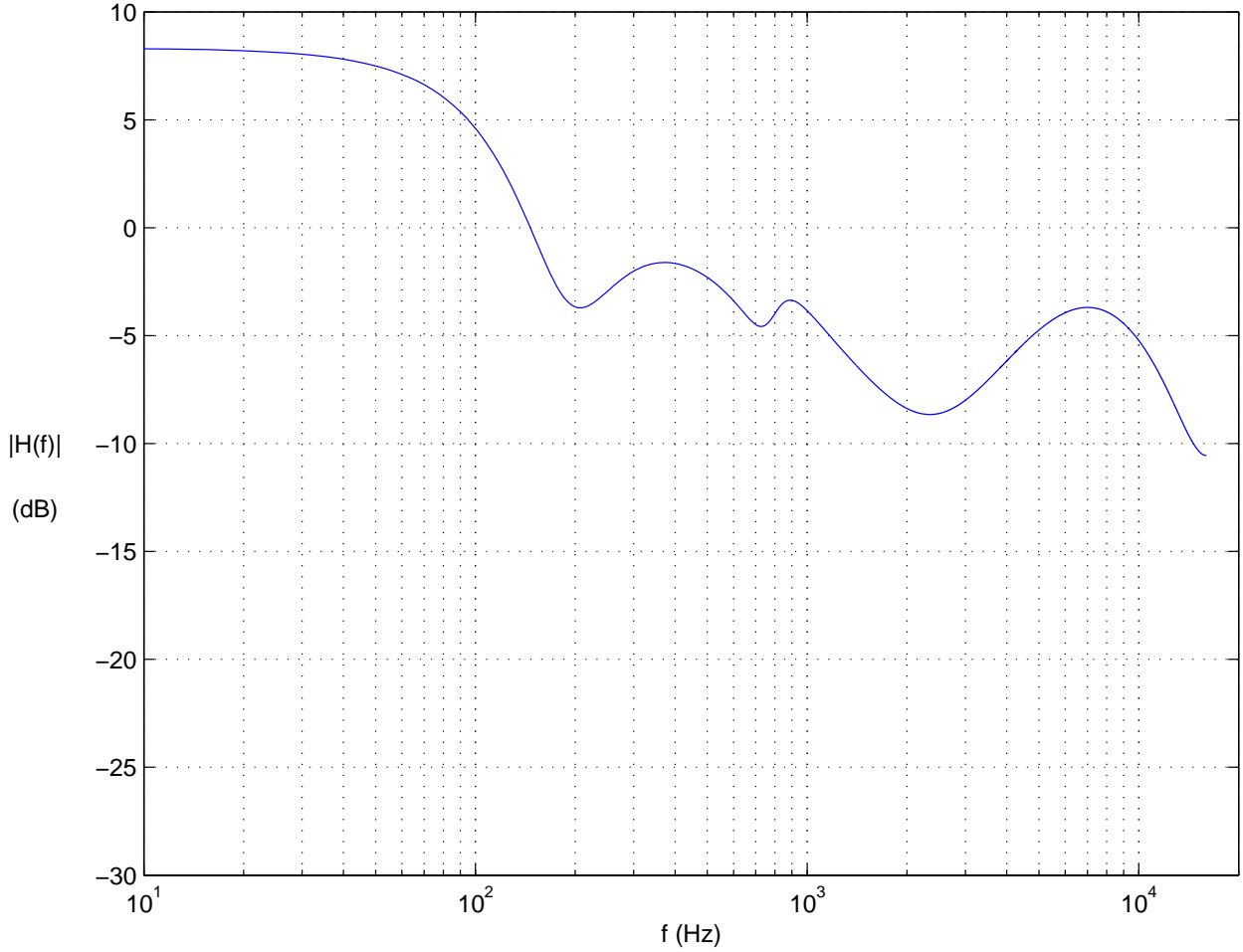

 (a) Module  $A_{sd}(f)$ 

 (b) Phase  $\phi_{sd}(f)$ 

 FIG. 6.12 - Réponse en fréquence du filtre semi-dérivateur — filtre R.I.F. à  $N = 64$  coefficients — (la réponse théorique est définie par  $H_{th}(f) = \sqrt{2\pi f}$ )


 FIG. 6.13 - Module de la réponse en fréquence du filtre d'égalisation (Filtre R.I.I. à  $N = 8$  coefficients)

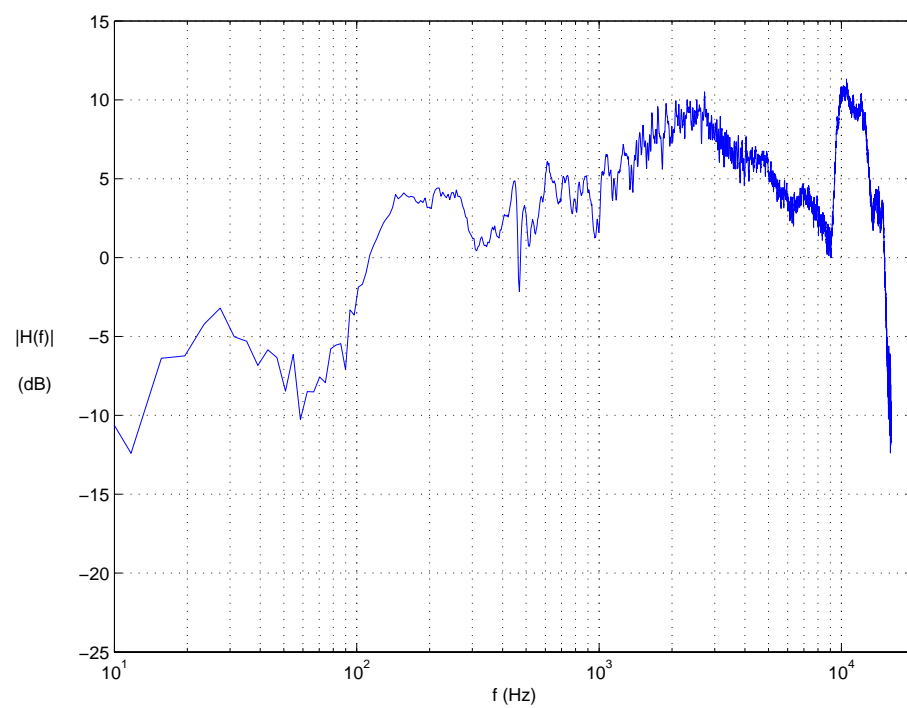
où *v.p.* désigne la valeur principale de l'intégrale [Reinhard, 1989]:

$$v.p. \int_{-\frac{F_c}{2}}^{+\frac{F_c}{2}} U(f') df' = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \left[ \int_{-\frac{F_c}{2}}^{\epsilon} U(f') df' + \int_{\epsilon}^{-\frac{F_c}{2}} U(f') df' \right] \quad (6.16)$$

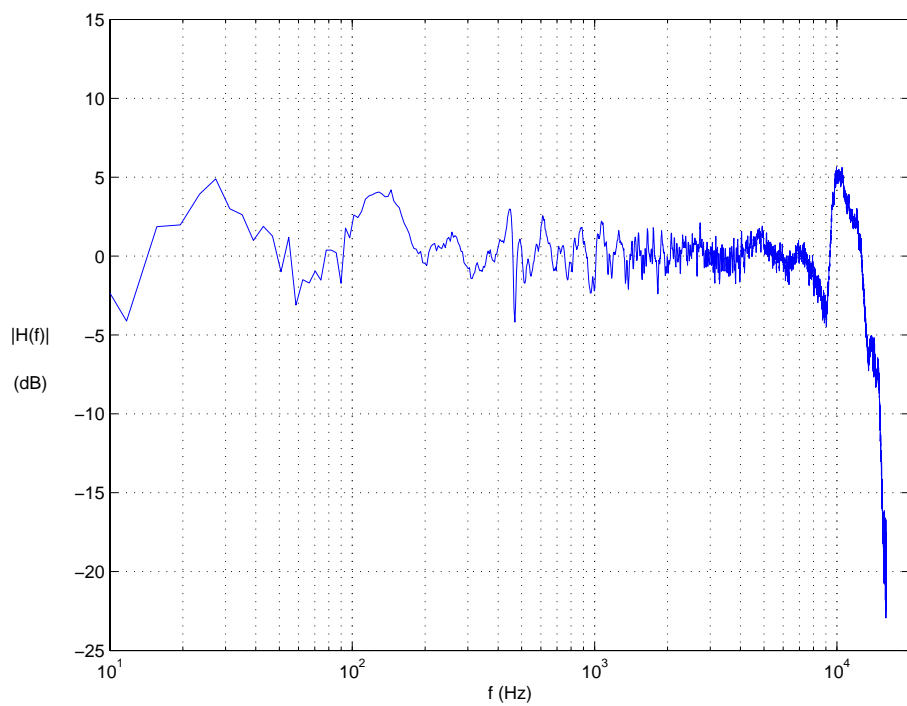
Ainsi, le filtre d'égalisation à phase minimale est uniquement défini par son module  $A_{pm}$  qui correspond à l'inverse du module de la réponse en fréquence moyenne des haut-parleurs  $A_{hp}$ :

$$A_{pm}(f) = \frac{1}{A_{hp}(f)} \quad (6.17)$$

Sa phase  $\phi_{pm}$  s'en déduit par les relations de Bayer-Bode (cf. Equ. 6.15). Ce filtre peut alors être synthétisé sous la forme d'un filtre R.I.I. par une méthode des moindres carrés. La réponse en fréquence du filtre obtenu est représentée sur la figure 6.13. La figure 6.14 reproduit la réponse en fréquence d'un haut-parleur avant et après égalisation par le filtre.



(a) Réponse non égalisée



(b) Réponse égalisée

FIG. 6.14 - Module de la réponse en fréquence moyenne des haut-parleurs avant et après égalisation

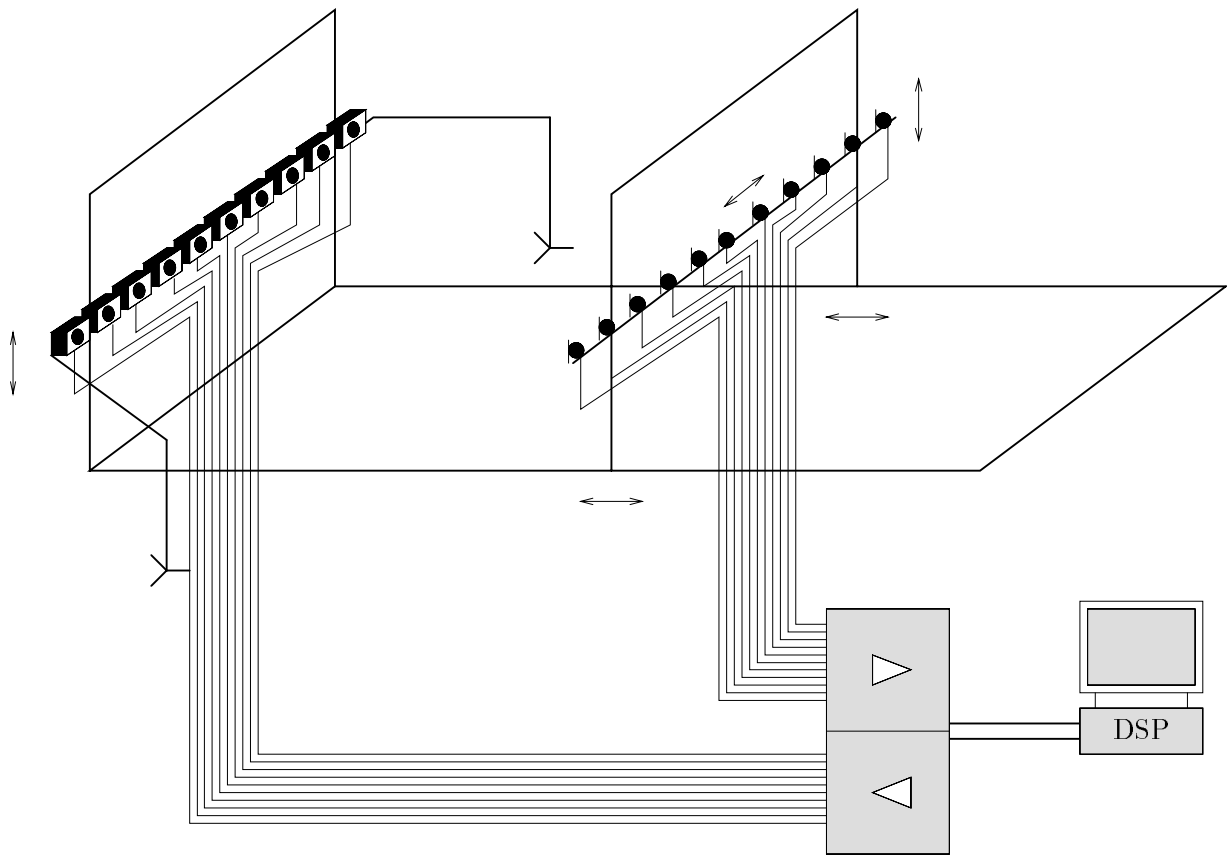


FIG. 6.15 - Système holophonique pour la visioconférence: Prototype réalisé au C.N.E.T.

## 6.3 Expérimentations

### 6.3.1 Montage expérimental

La section précédente vient de décrire un système holophonique conçu pour le contexte de visioconférence. Un prototype de ce système a été construit au C.N.E.T. afin d'évaluer le comportement d'un système réel et de déterminer ce qu'il peut apporter à la restitution du son en visioconférence.

Le prototype comprend une antenne de  $N = 16$  haut-parleurs associés à une carte DSP<sup>2</sup> dédié au traitement des signaux microphoniques (cf. Fig. 6.15). En ce qui concerne le traitement implémenté dans la carte DSP, tous les modules décrits à la section précédente ne sont pas opérationnels: la figure 6.16 reproduit le schéma du traitement effectif. Dans cette première série d'expérimentations, on s'est focalisé sur la restitution du son. C'est pourquoi aucun système de prise de son n'est connecté en entrée de la carte de traitement qui est directement alimentée par des signaux enregistrés au préalable. La prise de son est en quelque sorte simulée, encore que ce dispositif ne soit pas très éloigné du concept de source notionnelle.

Les haut-parleurs sont montés sur une barre métallique qui se décompose en trois éléments (cf. Fig. 6.15): une partie fixe et deux éléments articulés disposés à ses extrémités. Cette construction permet de varier la géométrie de l'antenne de haut-parleurs, avec en particulier la possibilité d'utiliser les antennes de Rayleigh généralisées (cf. Chapitre 3). En aval des haut-parleurs est disposée une antenne de  $N = 16$  microphones également espacés de  $\Delta = 15$  cm et qui sont destinés à caractériser l'onde synthétisée par

2. Texas Instrument 1C40

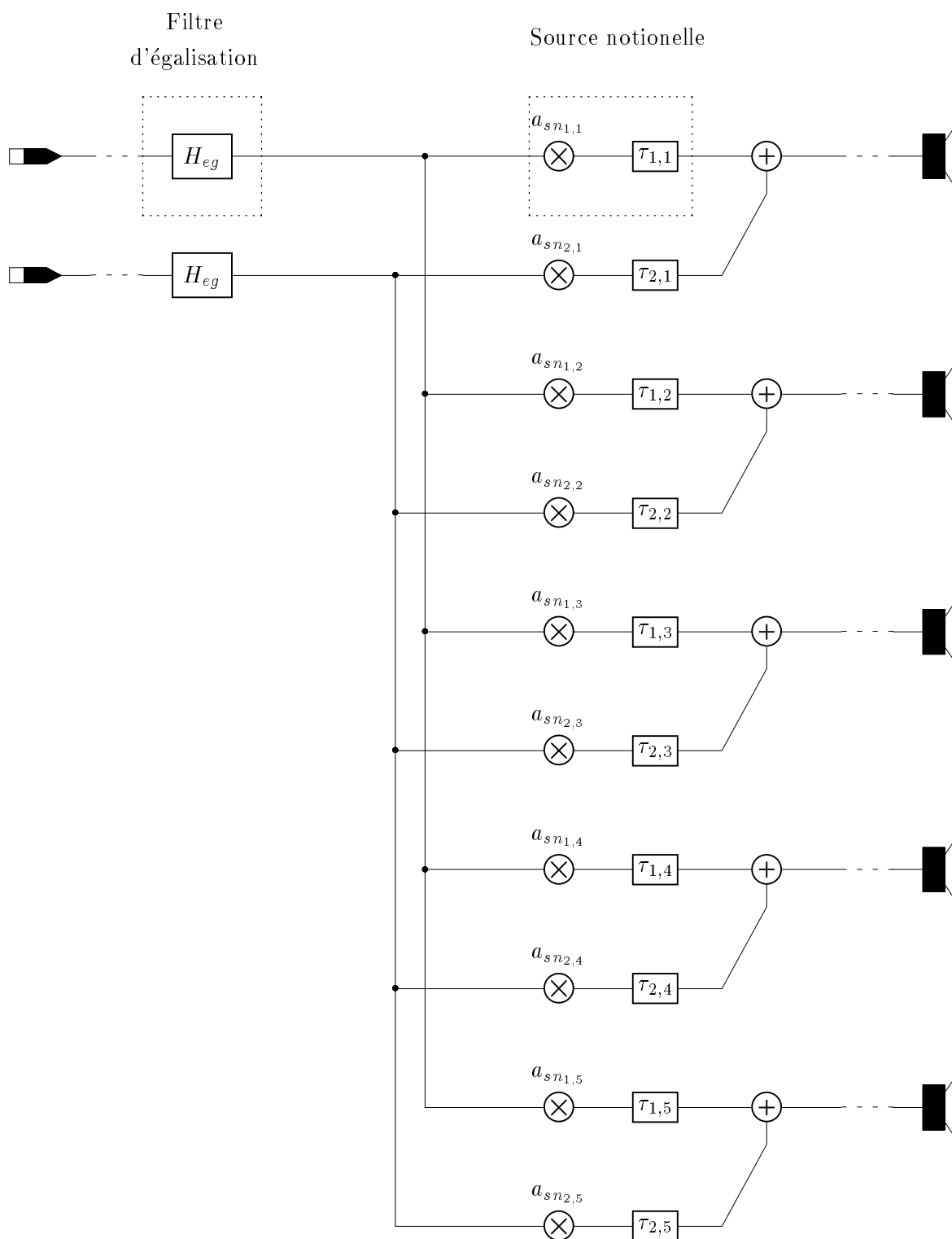
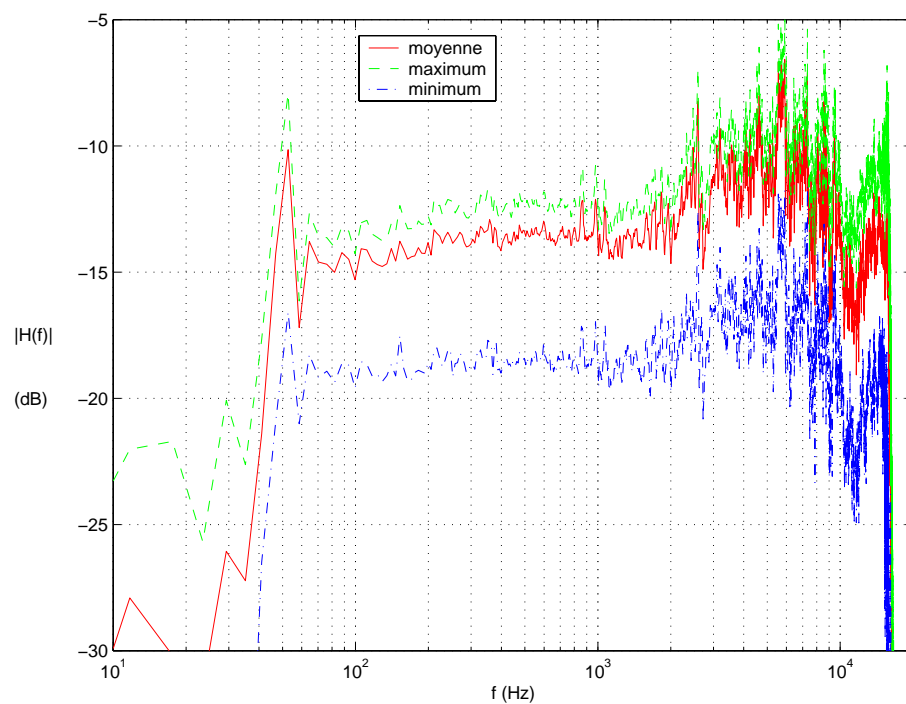
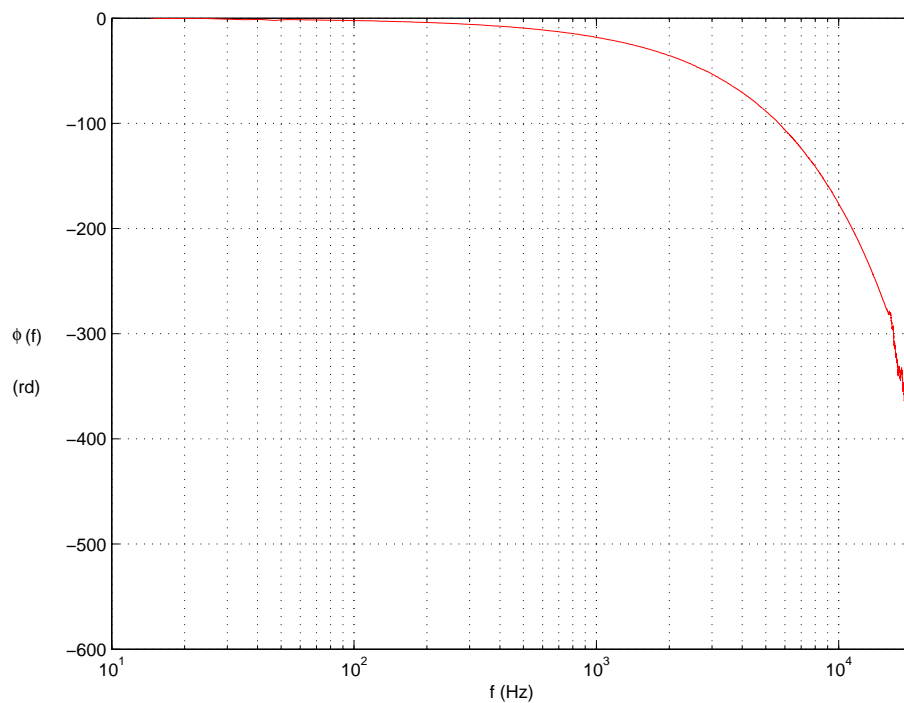


FIG. 6.16 - Prototype holophonique: Synoptique du traitement implémenté





(a) Module



(b) Phase

 FIG. 6.17 - Réponse en fréquence moyenne des 16 microphones ( $\varphi = 0^\circ$ )

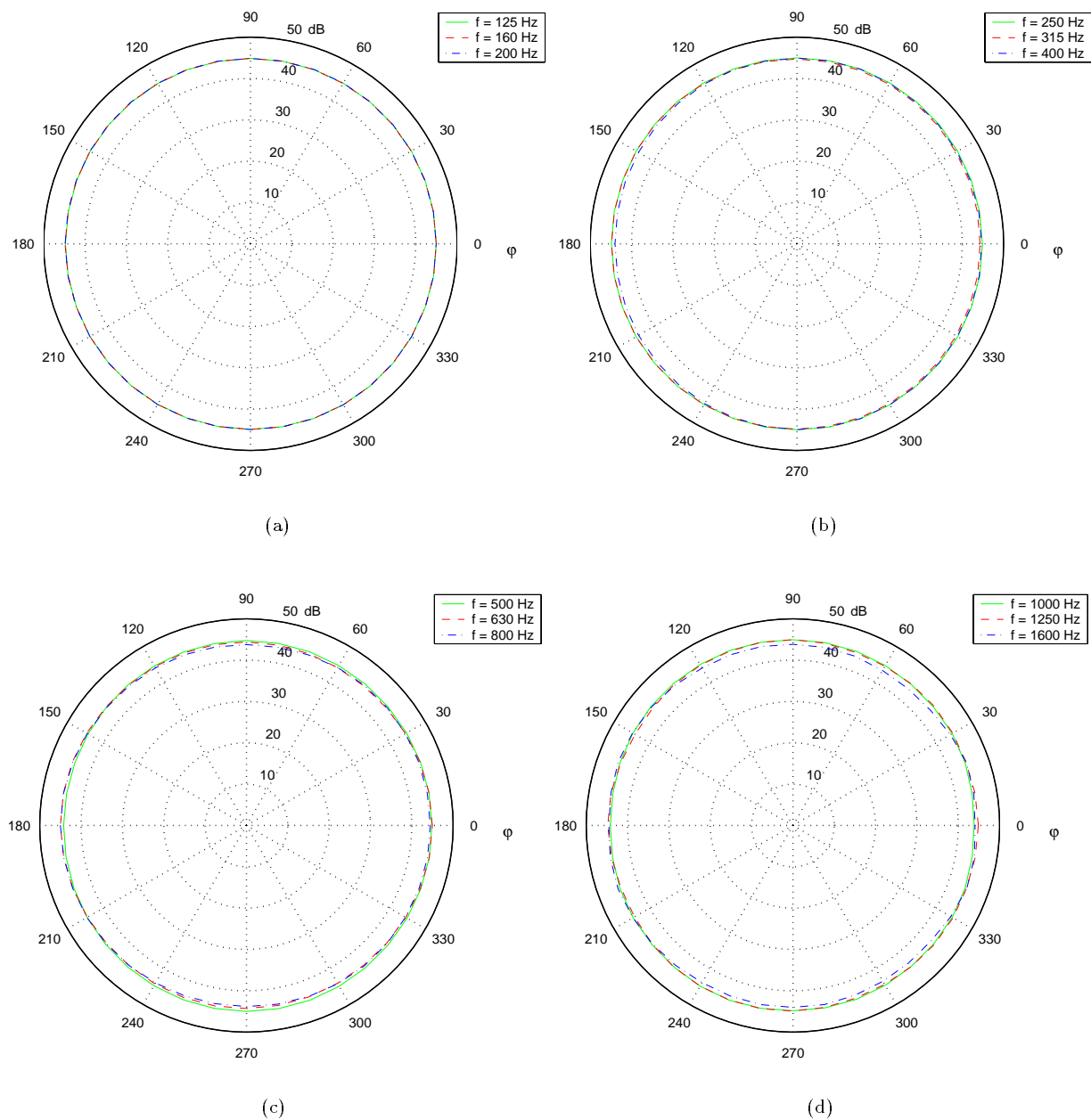


FIG. 6.18 - Diagramme de directivité moyen des 16 microphones pour les bandes de tiers d'octave de  $f = 125$  Hz à 1.6 kHz

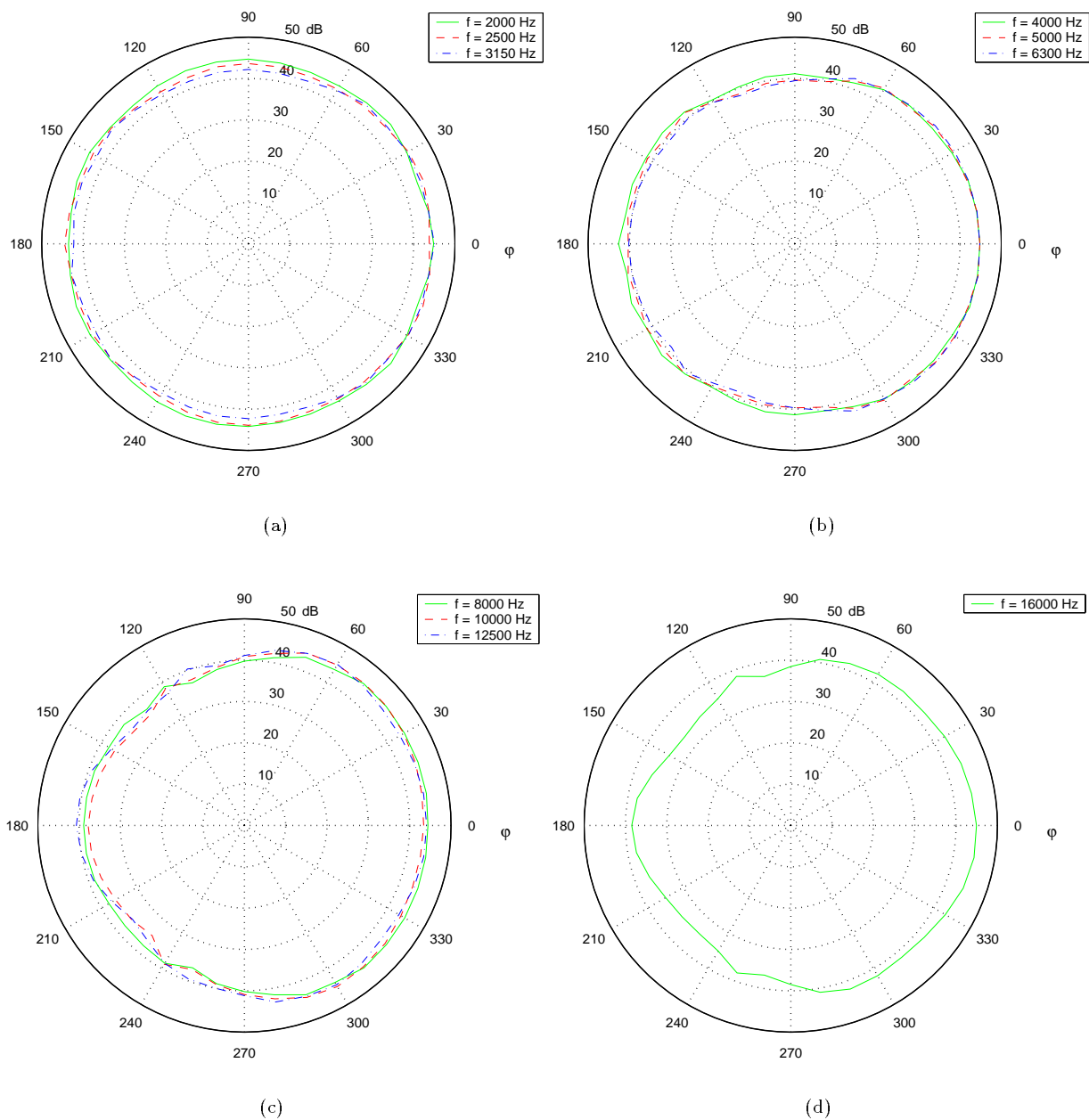


FIG. 6.19 - Diagramme de directivité moyen des 16 microphones pour les bandes de tiers d'octave de  $f = 2$  kHz à 16 kHz

l'antenne de haut-parleurs. L'antenne de microphones est légèrement décalée par rapport à celle de haut-parleurs. Les microphones sont des capsules à électret de marque Sennheiser (modèle MK4) de bande passante [100 Hz - 16 kHz] et de caractéristique omnidirective. Il s'agit de capsules de petites dimensions, puisque leur diamètre est inférieur à 5 mm. Ce sont d'ailleurs ces modèles de capsules qui sont utilisés pour les enregistrements binauraux: en ce cas, elles sont placées à l'entrée du canal auditif. Leur petite taille, associée à une bande passante étendue, les rend bien indiquées pour la conception d'antennes acoustiques. Les figures 6.17, 6.18 et 6.19 reproduisent leurs caractéristiques mesurées en chambre anéchoïque, en termes de réponse en fréquence et de diagramme de directivité. Les deux antennes de transducteurs sont disposées sur une structure mécanique qui permet de positionner précisément les haut-parleurs et les microphones, à la fois dans le plan horizontal — axes  $\vec{x}$  et  $\vec{y}$  — et en hauteur — axe  $\vec{z}$  — (cf. Fig. 6.15).

### 6.3.2 Protocole de mesure

Les mesures de caractérisation du système sont basées sur des mesures de réponses impulsionnelles à partir de séquences M.L.S., en moyennant les résultats sur plusieurs acquisitions. Les séquences MLS sont filtrées afin d'identifier leur spectre à celui d'une impulsion gaussienne (cf. Annexe F). La procédure de mesure est alors la suivante: une séquence MLS filtrée est appliquée à l'entrée de la carte DSP de traitement et les microphones enregistrent l'onde restituée par les haut-parleurs le long d'une ligne parallèle à l'antenne de haut-parleurs.

Les signaux recueillis par les  $N = 16$  microphones sont ensuite visualisés en fonction du temps, ce qui constitue la *cartographie spatio-temporelle* de l'onde synthétique. Ces images peuvent être directement comparées aux simulations numériques présentées au cours du chapitre 3, par exemple. On vérifie ainsi la concordance entre les distributions spatio-temporelles de l'onde virtuelle et de l'onde primaire qu'on cherche à synthétiser. Deux campagnes de mesures ont été menées: la première en chambre anéchoïque, la seconde dans un studio de visioconférence. La configuration des haut-parleurs et des microphones, ainsi que les positions des sources primaires qu'on a voulu simuler est illustrée sur la figure 6.20.

La prochaine étape consisterait à compléter cette caractérisation objective par des tests d'écoute.

### 6.3.3 Chambre anéchoïque

Les figures 6.21a et 6.22a reproduisent l'onde synthétisée en chambre anéchoïque par l'antenne de haut-parleurs pour une source primaire respectivement située en  $s_1$  et  $s_2$ . Cette onde peut être comparée à l'onde théorique<sup>3</sup> qui aurait été émise par un monopôle (cf. Fig. 6.21b & 6.22b).

On observe comment le front d'onde primaire est bien reconstruit par le système holophonique, quelle que soit la position de la source primaire. En arrière du front d'onde, on distingue un signal résiduel d'erreur qui résulte principalement:

- des ondes diffractées générées par la troncature du réseau de sources secondaires (cf. Chapitre 5),
- de la réponse impulsionnelle des haut-parleurs qui tend à prolonger le front d'onde synthétisé.

L'amplitude de l'onde résiduelle reste toutefois très faible en comparaison du front d'onde principal.

### 6.3.4 Studio de visioconférence

L'onde restituée par le système holophonique dans un studio de visioconférence est illustrée sur les figures 6.23 et 6.24. La reconstruction du front d'onde primaire reste correcte, mais il est maintenant suivi d'un champ réverbéré qui résulte des réflexions de l'onde synthétique sur les murs de la salle. On identifie en particulier la réflexion issue du mur situé derrière l'antenne de haut-parleurs. Il est néanmoins peu probable que la localisation des sources virtuelles soit fortement perturbée par l'effet de salle, en vertu de la loi du premier front d'onde ou effet de Haas, d'après lequel la position de la source virtuelle est jugée sur le premier front d'onde perçu par l'auditeur. Dans la mesure où ce dernier est correctement restitué par le système, la localisation des sources virtuelles n'est donc pas dégradée par la présence de réflexions. Or, la reproduction de la position et des mouvements des sources sonores constitue bien l'enjeu principal de notre système. La

---

3. On rappelle qu'il s'agit de simulations numériques

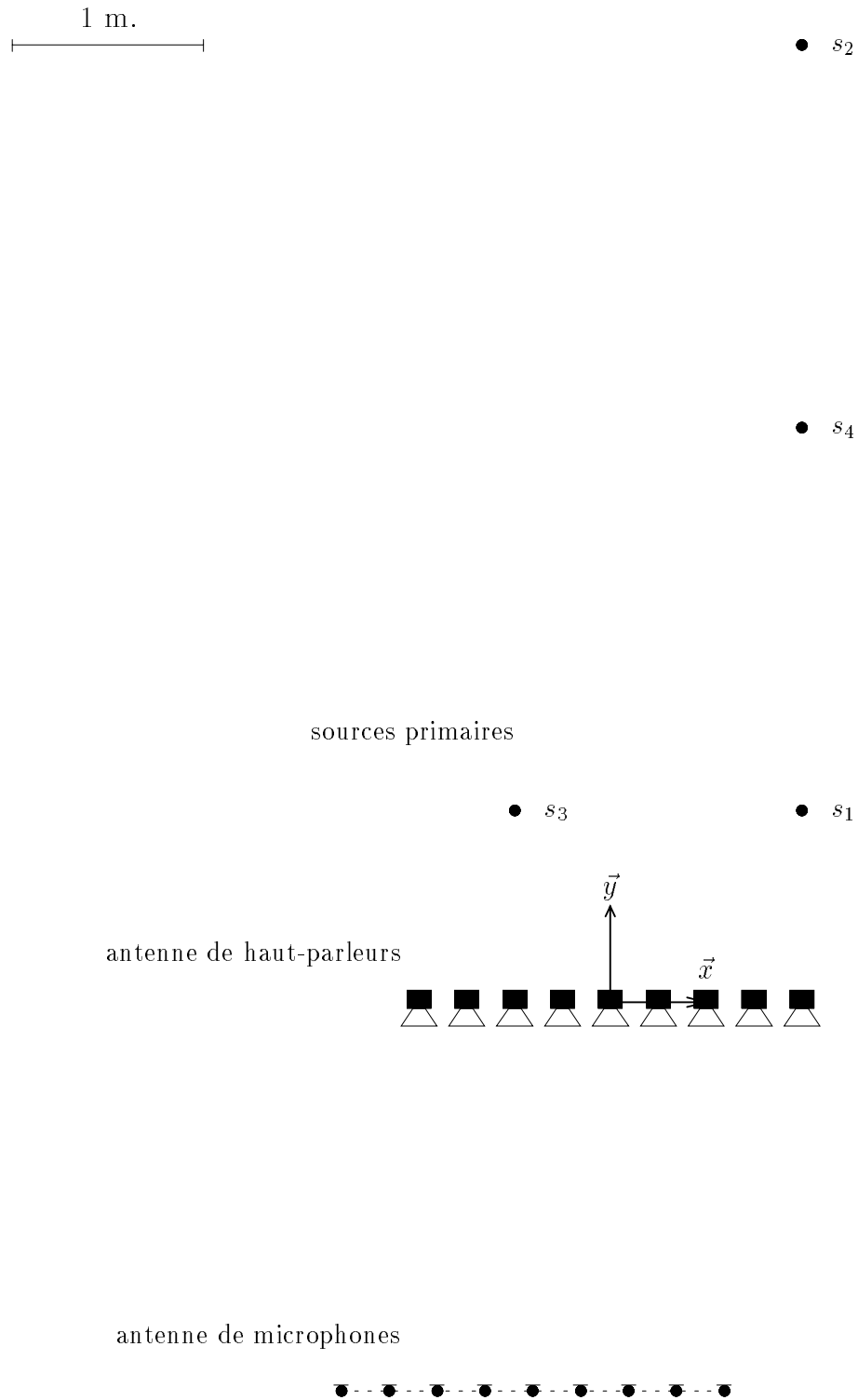
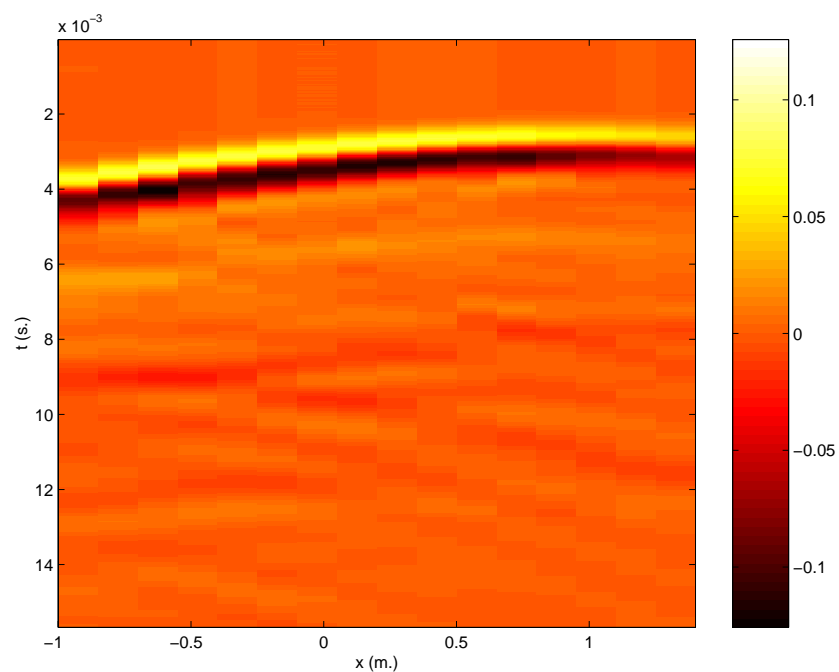
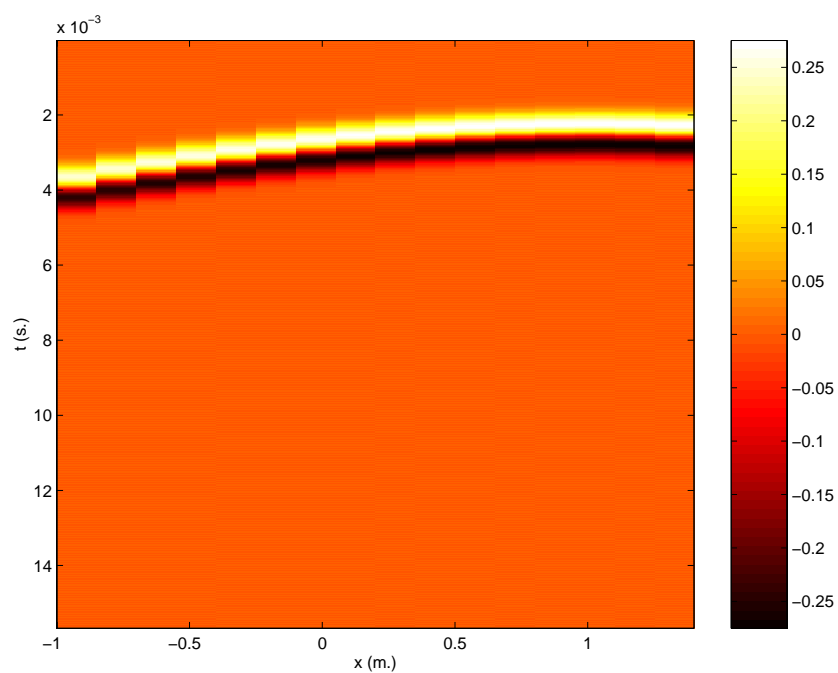


FIG. 6.20 - Configuration de mesure: Positions relatives des haut-parleurs, des microphones et des sources primaires synthétisées (sources primaires en  $s_1[1., 1., 0.]$ ,  $s_2[1., 5., 0.]$ ,  $s_3[-0.5, 1., 0.]$  ou  $s_4[1., 3., 0.]$ , antenne rectiligne de  $N = 16$  haut-parleurs espacés de  $\Delta = 0.15$  m., antenne rectiligne de  $N = 16$  microphones espacés de  $\Delta = 0.15$  m.)

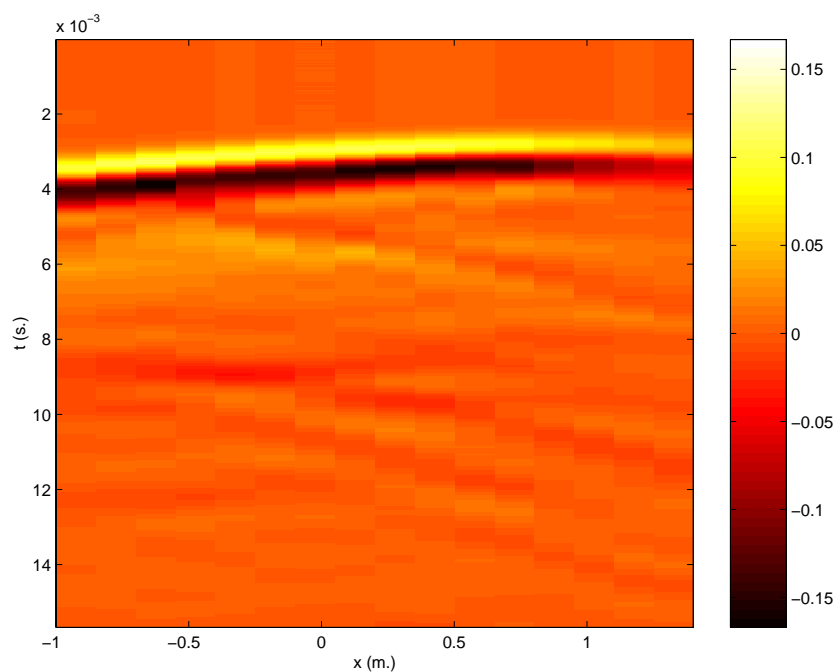


(a) Système holophonique (mesure)

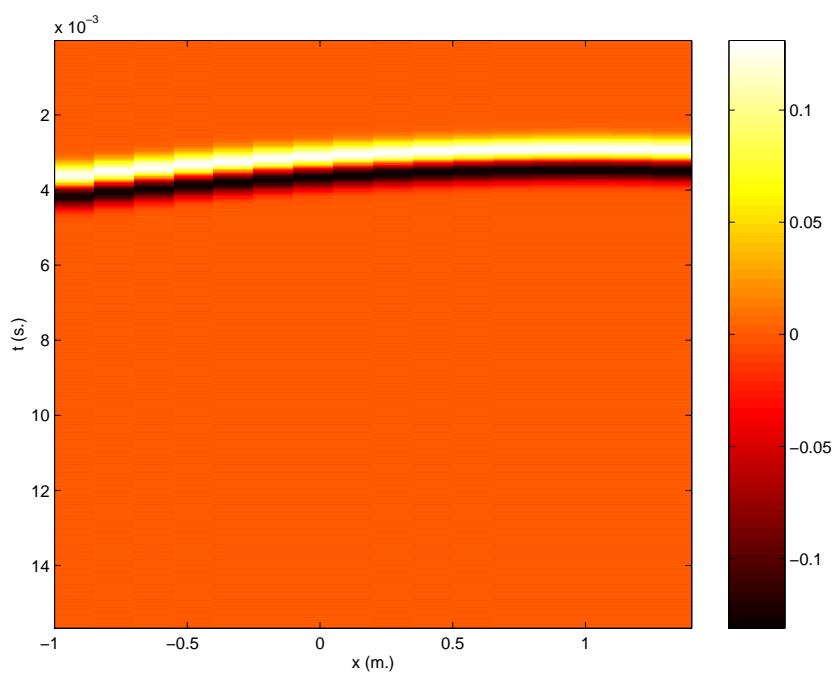


(b) Source primaire (simulation)

FIG. 6.21 - Prototype holophonique mesuré en chambre anéchoïque: Source primaire en  $s_1$  ( $f = 500$  Hz, antenne rectiligne de  $N = 16$  haut-parleurs espacés de  $\Delta = 0.15$  m., antenne rectiligne de  $N = 16$  microphones espacés de  $\Delta = 0.15$  m. en  $y = -2.63$  m., cf. Fig. 6.20, cf. Annexes E & F)

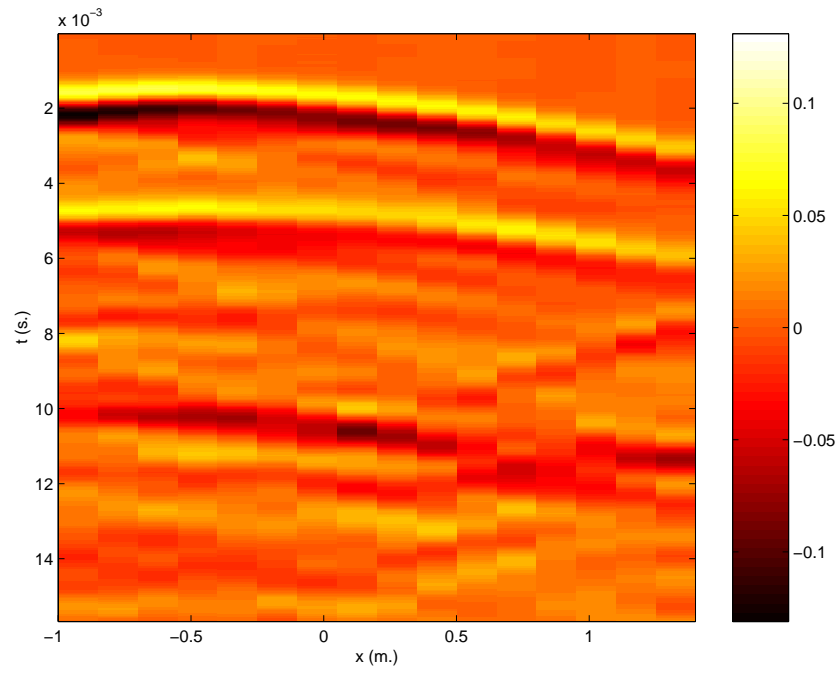


(a) Système holophonique (mesure)

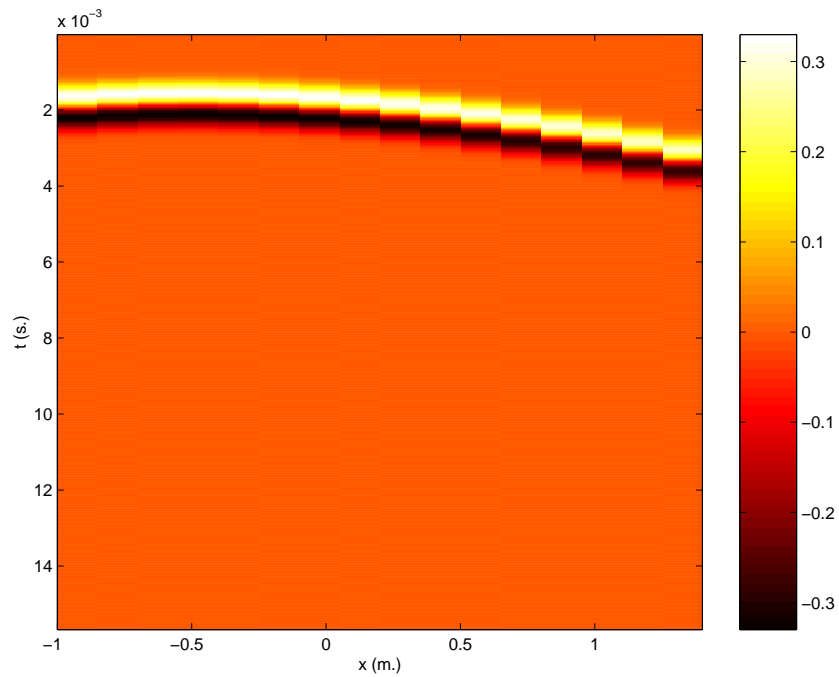


(b) Source primaire (simulation)

FIG. 6.22 - Prototype holophonique mesuré en chambre anéchoïque: Source primaire en  $s_2$  ( $f = 500$  Hz, antenne rectiligne de  $N = 16$  haut-parleurs espacés de  $\Delta = 0.15$  m., antenne rectiligne de  $N = 16$  microphones espacés de  $\Delta = 0.15$  m. en  $y = -2.63$  m., cf. Fig. 6.20, cf. Annexes E & F)



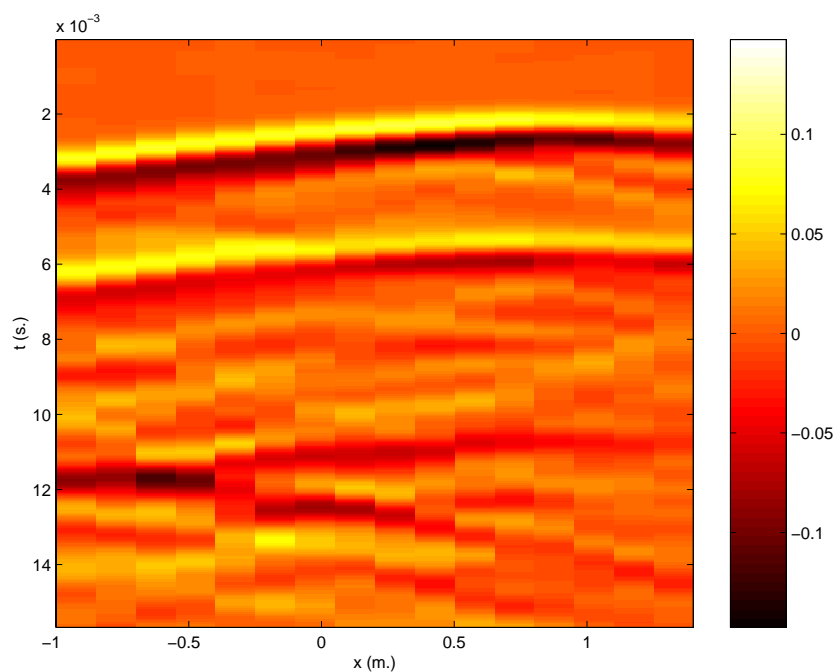
(a) Système holophonique (mesure)



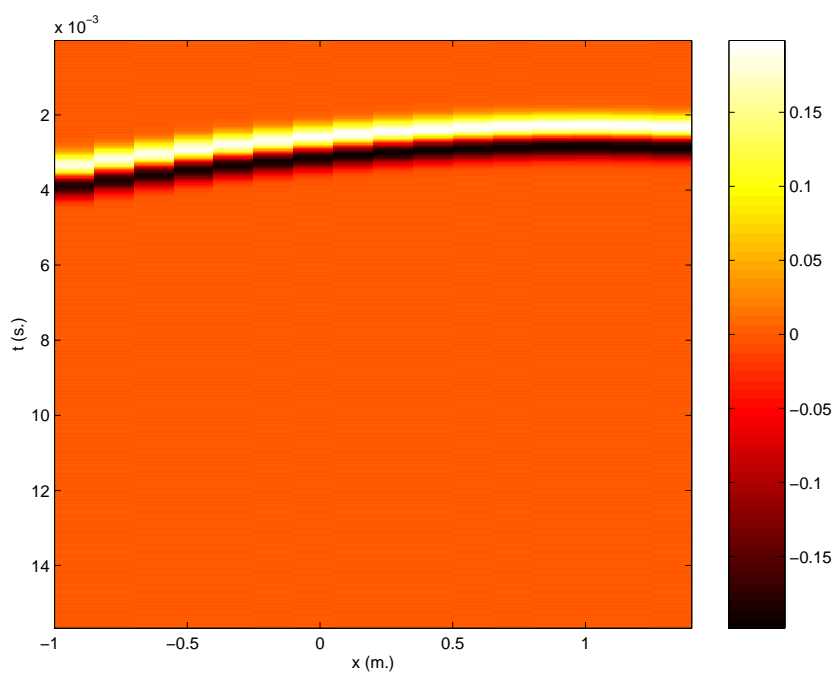
(b) Source primaire (simulation)

FIG. 6.23 - Prototype holophonique mesuré dans le studio de visioconférence: Source primaire en  $s_3$  ( $f = 500$  Hz, antenne rectiligne de  $N = 16$  haut-parleurs espacés de  $\Delta = 0.15$  m., antenne rectiligne de  $N = 16$  microphones espacés de  $\Delta = 0.15$  m. en  $y = -2.03$  m., cf. Fig. 6.20, cf. Annexes E & F)





(a) Système holophonique (mesure)



(b) Source primaire (simulation)

FIG. 6.24 - Prototype holophonique mesuré dans le studio de visioconférence: Source primaire en  $s_4$  ( $f = 500$  Hz, antenne rectiligne de  $N = 16$  haut-parleurs espacés de  $\Delta = 0.15$  m., antenne rectiligne de  $N = 16$  microphones espacés de  $\Delta = 0.15$  m. en  $y = -2.03$  m., cf. Fig. 6.20, cf. Annexes E & F)

présence des réflexions se traduit, comme dans toute situation d'écoute naturelle, par le simple ajout d'un effet de salle qui, même s'il ne correspond pas exactement à celui qui aurait été généré par la source primaire réelle, demeure *réaliste*.

### 6.3.5 Repliement spectral

Les figures 6.25 et 6.26 illustrent le phénomène de repliement spectral qui se produit lorsque la fréquence maximale contenue dans l'impulsion gaussienne est supérieure à la fréquence d'aliasing, qui vaut dans notre cas :

$$f_{al} \simeq 1.1 kHz$$

Conformément aux résultats des simulations numériques effectuées au chapitre 4, on vérifie que le repliement spectral induit un signal d'erreur résiduel survenant à la suite du front d'onde principal. On note que la reconstruction du front d'onde primaire n'est néanmoins pas affectée par le repliement spectral.

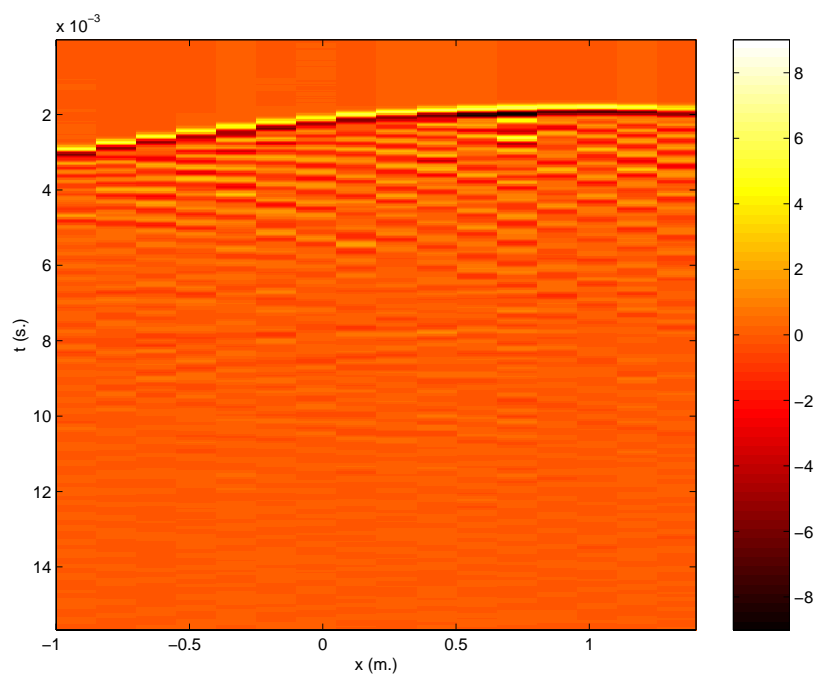
Le signal d'erreur résultant du repliement spectral peut s'interpréter comme un champ diffus, puisqu'il se compose de la superposition d'une infinité d'ondes planes issues de multiples directions. A la lumière des mesures effectuées dans le studio de visioconférence, on est en effet frappé par l'analogie entre un champ réverbéré et le signal d'erreur lié au repliement spectral. Cette idée suggère qu'à l'instar du champ reverberé, le repliement spectral ne va pas dégrader sensiblement le rendu de l'image sonore, du moins en terme de localisation des sources virtuelles. En outre, la comparaison des figures 6.24 et 6.26 montre qu'au final, l'effet de salle et l'effet du repliement spectral fusionnent en un champ diffus relativement homogène. En d'autres termes, la présence d'un effet de salle tend bien à minimiser les effets du repliement spectral, comme l'ont déjà suggéré des études antérieures [Start, 1997].

## 6.4 Conclusion

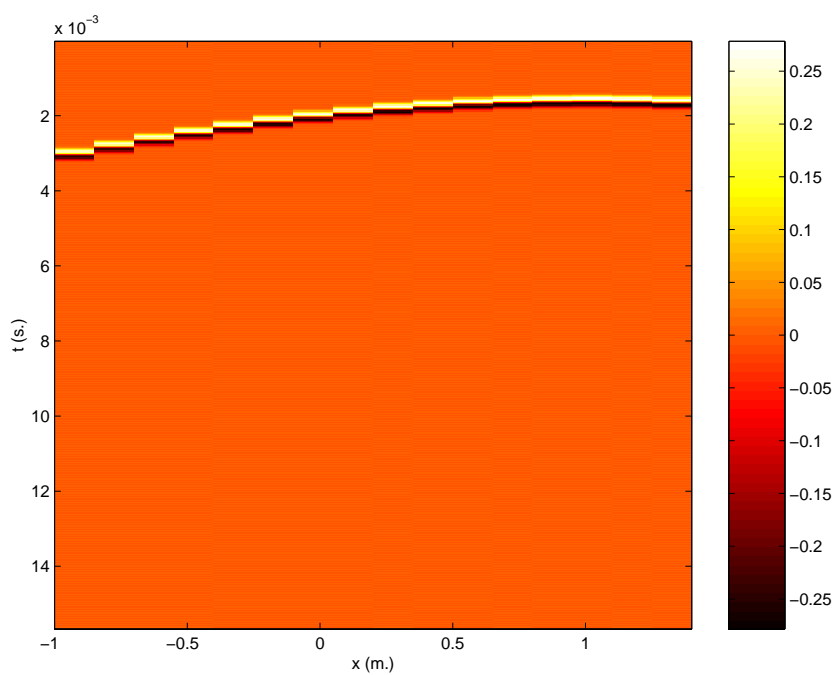
Le prototype de système holophonique mis en œuvre au C.N.E.T. a permis une première évaluation des techniques holophoniques. Bien que la version initiale du prototype qui a été testé soit relativement simplifiée par rapport au système théorique, ses performances sont remarquables en termes de reconstruction du front d'onde.

Cette première approche de caractérisation mérite cependant d'être approfondie. Il convient d'abord de définir des *critères objectifs* adaptés à la caractérisation de ce type de système. L'équipe de l'U.T.D. [Verheijen, 1997] [de Vries *et al.*, 1997] propose notamment de compléter les mesures de pression par des mesures d'intensité afin de visualiser la circulation des flux d'énergie acoustique dans l'onde synthétisée et de déterminer si elle est conforme à celle d'une onde réelle. Il serait aussi intéressant d'enregistrer l'onde restituée par les haut-parleurs par une tête artificielle utilisée pour les enregistrements binauraux, ce qui donnerait accès aux signaux perçus par un auditeur. Des signaux gauche et droite, il serait alors possible d'extraire des différences de temps I.T.D. et d'intensité I.L.D. entre les deux oreilles et on pourrait ainsi caractériser la localisation des sources virtuelles [Boone & Verheijen, 1997]. Dans le même esprit, des recherches récentes menées à l'U.T.D. ont établi une liste de critères objectifs qu'on peut rattacher aux sensations perceptives représentatives de la perception d'un auditeur [Boone & Verheijen, 1997]. L'acoustique des salles nous enseigne par exemple que le coefficient de corrélation interaurale I.A.C.C., qui correspond au maximum de la fonction d'intercorrélation entre les signaux gauche et droite mesurés sur une tête artificielle, est corrélé à la perception de la largeur apparente de la source [Start, 1997]. Cependant il semble que la largeur apparente d'une source soit mieux décrite par un nouveau critère mis en évidence à l'U.T.D. : le coefficient de modulation centrale C.M.C. Ce critère, basé sur un modèle d'interaction binaurale définie au niveau du système central, se calcule comme la profondeur de modulation de la fonction de latéralisation qui n'est autre que la fonction d'intercorrélation pondérée en fréquence [Potter, 1995]. De même, la sensation de coloration spectrale peut être associée à la profondeur de modulation du spectre interne qui correspond au spectre de l'onde incidente corrigé pour prendre en compte la réponse des filtres auditifs que constituent les bandes critiques [Start, 1997].

L'équipe de l'U.T.D. suggère également d'analyser les propriétés spatiales de l'onde synthétique en lui appliquant une transformée de Radon qui, d'une représentation spatio-temporelle d'une onde sonore quelconque  $p(x, t)$ , est capable d'extraire les ondes planes et les ondes sphériques qui le constituent, en identifiant

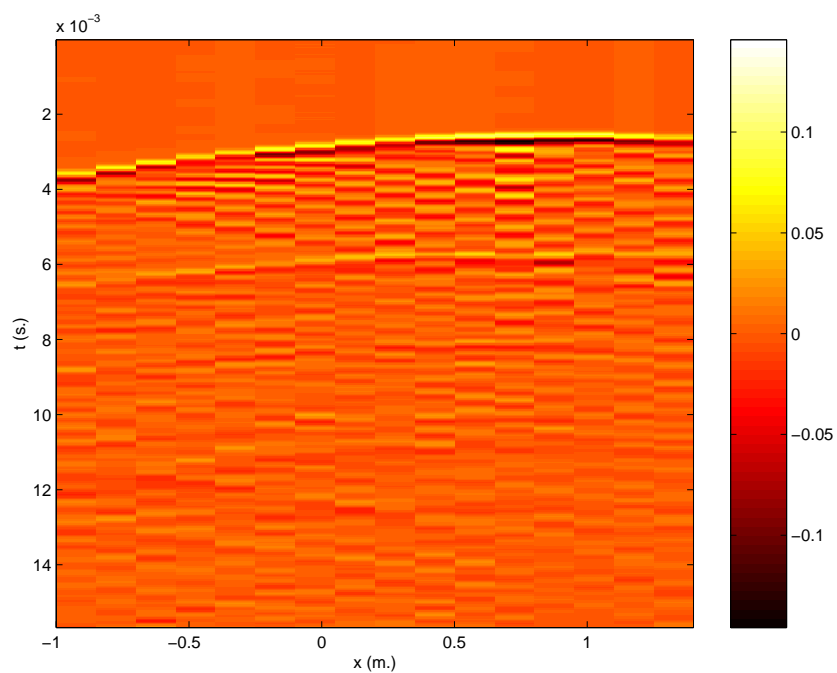


(a) Système holophonique (mesure)

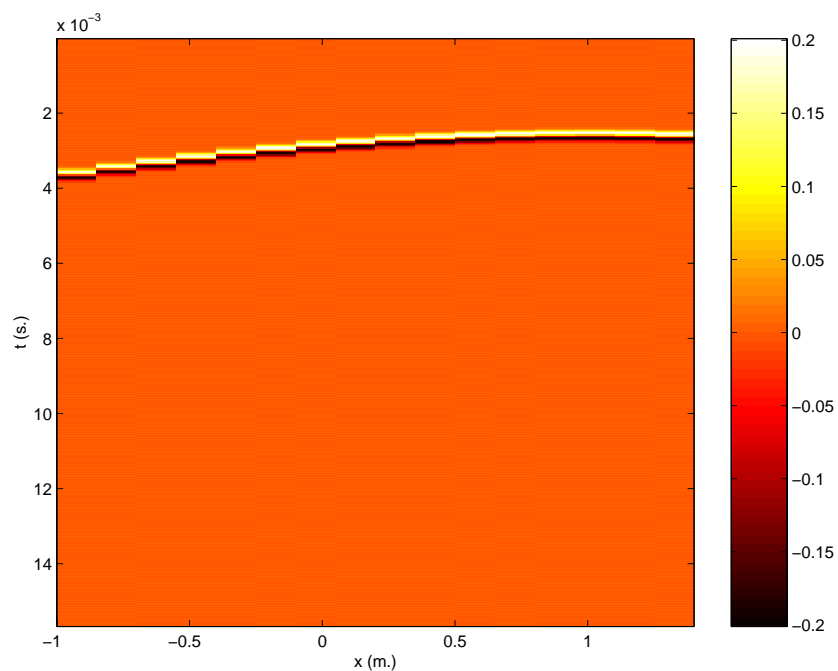


(b) Source primaire (simulation)

FIG. 6.25 - Prototype holophonique mesuré en chambre an cho ique: Phénomène de repliement spectral à la fréquence  $f = 2$  kHz (source primaire en  $s_1$ , antenne rectiligne de  $N = 16$  haut-parleurs espacés de  $\Delta = 0.15$  m., antenne rectiligne de  $N = 16$  microphones espacés de  $\Delta = 0.15$  m. en  $y = -2.63$  m., cf. Fig. 6.20, cf. Annexes E & F)



(a) Système holophonique (mesure)



(b) Source primaire (simulation)

FIG. 6.26 - Prototype holophonique mesuré dans le studio de visioconférence: Phénomène de repliement spectral à la fréquence  $f = 2$  kHz (source primaire en  $s_4$ , antenne rectiligne de  $N = 16$  haut-parleurs espacés de  $\Delta = 0.15$  m., antenne rectiligne de  $N = 16$  microphones espacés de  $\Delta = 0.15$  m. en  $y = -2.03$  m., cf. Fig. 6.20, cf. Annexes E & F)

leur direction [de Vries *et al.*, 1996] [de Vries *et al.*, 1997]. On peut ainsi mettre en évidence dans l'onde restituée par les haut-parleurs les ondes réfléchies par les différentes parois de la salle.

En complément d'une caractérisation objective du système, il convient enfin de procéder à des tests d'écoute afin :

- d'évaluer la localisation des sources virtuelles,
- de quantifier d'un point de vue perceptif les effets de la troncature et du repliement spectral,
- de comparer différentes versions du prototype,
- de déterminer ce qu'un tel système de restitution sonore spatialisée peut apporter, par rapport à d'autres solutions, en situation de visioconférence, en particulier lorsqu'il est associé à une image.



## Références Bibliographiques

- BOONE M. M. & VERHEIJEN E. N. G. (Mars 1997). Qualification of Sound Generated by Wave Field Synthesis for Audio Reproduction. *In: Proceedings of the A.E.S. 102<sup>nd</sup> Convention*.
- DE VRIES D., BERKHOUT A.J. & SONKE J.J. (Mai 1996). Array Technology for Measurement and Analysis of Sound Fields in Enclosures. *In: Proceedings of the A.E.S. 100<sup>th</sup> Convention*.
- DE VRIES D., BAAN J. & SONKE J.J. (Mars 1997). Multi-channel Wave Field Analysis as a Specification Tool for Wave Field Synthesis. *In: Proceedings of the A.E.S. 100<sup>th</sup> Convention*.
- JULLIEN J.-P., GILLOIRE A. & SALIOU A. (Novembre 1984). *Mesure des réponses impulsionnelles en acoustique*. Note technique NT/LAA/TSS/181. C.N.E.T.
- KUTTRUFF H. (1991). *Room Acoustics*. Elsevier Applied Science, Paris.
- LAAKSO T.I., VALIMAKI V., KARJALAINEN M. & LAINE U.K. (1994). *Crushing the Delay - Tools for Fractional Delay Filter Design*. Report 35. University of Technology, Faculty of Electrical Engineering, Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing, Helsinki.
- MARIN M. (Octobre 1996). *Etude de la localisation en restitution du son pour la téléconférence de haute qualité*. Ph.D. Thesis, Université du Maine, Le Mans, France.
- OLDHAM K.B. & SPANIER J. (1974). *The Fractional Calculus: Theory and Applications of Differentiation and Integration to Arbitrary Order*. Academic Press, New York and London.
- POTTER J. M. (1995). Measures for Spaciousness in Room Acoustics Based on a Binaural Strategy. *Acta Acustica*, **3**, pp. 429–443.
- REINHARD H. (1989). *Cours de Mathématiques du signal*. Dunod Université, Paris.
- SALIOU A. (1995). *Rapport interne C.N.E.T./MATRA sur le projet TOSQA*.
- START E. (1997). *Direct Sound Enhancement by Wave Field Synthesis*. Ph.D. Thesis, Faculty of Applied Physics, Delft, Pays-Bas.
- TÄGER W. (Mars 1997). *Filtres numériques pour retards fractionnaires*. Brevet 9703845. France Telecom.
- VALIMAKI V. (1994). *Fractional Delay Waveguide Modeling of Acoustic Tubes*. Report 34. University of Technology, Faculty of Electrical Engineering, Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing, Helsinki.
- VERHEIJEN E. (1997). *Sound reproduction by wave field synthesis*. Ph.D. Thesis, Faculty of Applied Physics, Delft, Pays-Bas.





## Table des Illustrations

6.1	Spécificités du contexte de visioconférence . . . . .	293
6.2	Angle maximal d'incidence $\alpha_{max}$ des ondes primaires sur le réseau de sources secondaires en situation de visioconférence . . . . .	294
6.3	Système holophonique pour la visioconférence . . . . .	296
6.4	Système holophonique pour la visioconférence: Restitution du son . . . . .	297
6.5	Haut-parleur monté sur une enceinte close ( $V = 1$ l) . . . . .	298
6.6	Réponse impulsionnelle d'un haut-parleur ( $\varphi = 0^\circ$ ) . . . . .	299
6.7	Réponse en fréquence moyenne des 16 haut-parleurs ( $\varphi = 0^\circ$ ) . . . . .	300
6.8	Diagramme de directivité moyen des 16 haut-parleurs pour les bandes de tiers d'octave de $f = 125$ Hz à 1.6 kHz . . . . .	301
6.9	Diagramme de directivité moyen des 16 haut-parleurs pour les bandes de tiers d'octave de $f = 2$ kHz à 16 kHz . . . . .	302
6.10	Système holophonique pour la visioconférence: Prise de son . . . . .	303
6.11	Synoptique du traitement appliqué aux signaux microphoniques . . . . .	304
6.12	Réponse en fréquence du filtre semi-dérivateur — filtre R.I.F. à $N = 64$ coefficients — (la réponse théorique est définie par $H_{th}(f) = \sqrt{2\pi f}$ ) . . . . .	308
6.13	Module de la réponse en fréquence du filtre d'égalisation (Filtre R.I.I. à $N = 8$ coefficients) . . . . .	309
6.14	Module de la réponse en fréquence moyenne des haut-parleurs avant et après égalisation . . . . .	310
6.15	Système holophonique pour la visioconférence: Prototype réalisé au C.N.E.T. . . . .	311
6.16	Prototype holophonique: Synoptique du traitement implémenté . . . . .	312
6.17	Réponse en fréquence moyenne des 16 microphones ( $\varphi = 0^\circ$ ) . . . . .	313
6.18	Diagramme de directivité moyen des 16 microphones pour les bandes de tiers d'octave de $f = 125$ Hz à 1.6 kHz . . . . .	314
6.19	Diagramme de directivité moyen des 16 microphones pour les bandes de tiers d'octave de $f = 2$ kHz à 16 kHz . . . . .	315
6.20	Configuration de mesure: Positions relatives des haut-parleurs, des microphones et des sources primaires synthétisées (sources primaires en $s_1[1., 1., 0.]$ , $s_2[1., 5., 0.]$ , $s_3[-0.5, 1., 0.]$ ou $s_4[1., 3., 0.]$ , antenne rectiligne de $N = 16$ haut-parleurs espacés de $\Delta = 0.15$ m., antenne rectiligne de $N = 16$ microphones espacés de $\Delta = 0.15$ m.) . . . . .	317
6.21	Prototype holophonique mesuré en chambre anéchoïque: Source primaire en $s_1$ ( $f = 500$ Hz, antenne rectiligne de $N = 16$ haut-parleurs espacés de $\Delta = 0.15$ m., antenne rectiligne de $N = 16$ microphones espacés de $\Delta = 0.15$ m. en $y = -2.63$ m., cf. Fig. 6.20, cf. Annexes E & F) . . . . .	318
6.22	Prototype holophonique mesuré en chambre anéchoïque: Source primaire en $s_2$ ( $f = 500$ Hz, antenne rectiligne de $N = 16$ haut-parleurs espacés de $\Delta = 0.15$ m., antenne rectiligne de $N = 16$ microphones espacés de $\Delta = 0.15$ m. en $y = -2.63$ m., cf. Fig. 6.20, cf. Annexes E & F) . . . . .	319
6.23	Prototype holophonique mesuré dans le studio de visioconférence: Source primaire en $s_3$ ( $f = 500$ Hz, antenne rectiligne de $N = 16$ haut-parleurs espacés de $\Delta = 0.15$ m., antenne rectiligne de $N = 16$ microphones espacés de $\Delta = 0.15$ m. en $y = -2.03$ m., cf. Fig. 6.20, cf. Annexes E & F) . . . . .	320
6.24	Prototype holophonique mesuré dans le studio de visioconférence: Source primaire en $s_4$ ( $f = 500$ Hz, antenne rectiligne de $N = 16$ haut-parleurs espacés de $\Delta = 0.15$ m., antenne rectiligne de $N = 16$ microphones espacés de $\Delta = 0.15$ m. en $y = -2.03$ m., cf. Fig. 6.20, cf. Annexes E & F) . . . . .	321
6.25	Prototype holophonique mesuré en chambre anéchoïque: Phénomène de repliement spectral à la fréquence $f = 2$ kHz (source primaire en $s_1$ , antenne rectiligne de $N = 16$ haut-parleurs espacés de $\Delta = 0.15$ m., antenne rectiligne de $N = 16$ microphones espacés de $\Delta = 0.15$ m. en $y = -2.63$ m., cf. Fig. 6.20, cf. Annexes E & F) . . . . .	323
6.26	Prototype holophonique mesuré dans le studio de visioconférence: Phénomène de repliement spectral à la fréquence $f = 2$ kHz (source primaire en $s_4$ , antenne rectiligne de $N = 16$ haut-parleurs espacés de $\Delta = 0.15$ m., antenne rectiligne de $N = 16$ microphones espacés de $\Delta = 0.15$ m. en $y = -2.03$ m., cf. Fig. 6.20, cf. Annexes E & F) . . . . .	324

