

Chapitre 3

Holophonie

Tout le monde a le droit d'être bête de temps à autre. Il ne faut pas être dépendant du jugement des autres...

Harold et Maude - Film de Hal Ashby (d'après un roman de Colin Higgins)

Sommaire

3.1	Le Principe de Huygens	99
3.1.1	Enoncé qualitatif: Concept de source secondaire	99
3.1.2	Enoncés quantitatifs: Problème aux limites	101
3.2	L'Intégrale de Kirchhoff	103
3.2.1	Spécificités de l'approche de Kirchhoff	103
3.2.2	Solution Intégrale	104
3.2.3	Interprétation des sources secondaires	104
3.2.4	Choix de la géométrie: Une approche alternative	107
3.2.5	Un cas particulier de l'Intégrale de Kirchhoff: Les Intégrales de Rayleigh	107
3.3	Application à la reproduction 3D d'un champ sonore	108
3.3.1	Principe	108
3.3.2	Sélectivité spatiale des sources de Kirchhoff	109
3.3.3	Présence d'un effet de salle	112
3.4	Vers une approche simplifiée	116
3.4.1	Approximation de la Phase Stationnaire: Distribution 1D de sources secondaires	116
	Principe	116
	Théorème de la Phase Stationnaire	117
	Point de Phase Stationnaire	120
	Facteur correctif	121
	Réseau linéaire de sources secondaires	121
3.4.2	Géométrie du réseau	124
	Remarques préliminaires	124
	Réseau circulaire	127
	Réseau carré	137
	Réseau polygonal élémentaire	140
	Conclusion	143
3.4.3	Monopôle versus Dipôle	145
	Réseau circulaire	145
	Réseau carré	147
	Réseau polygonal élémentaire	158
	Conclusion	164
3.4.4	Intégrale(s) de Rayleigh généralisée(s)	164
3.4.5	Concept de source notionnelle	164
	Multimicrophonie de proximité	164
	Processus d'extrapolation des signaux: Rétropropagation et Propagation	165
	Matrice d'encodage	166
	Sources en mouvement	167
	Intérêt des sources notionnelles	167
3.5	Conclusion	170
	Références Bibliographiques	173

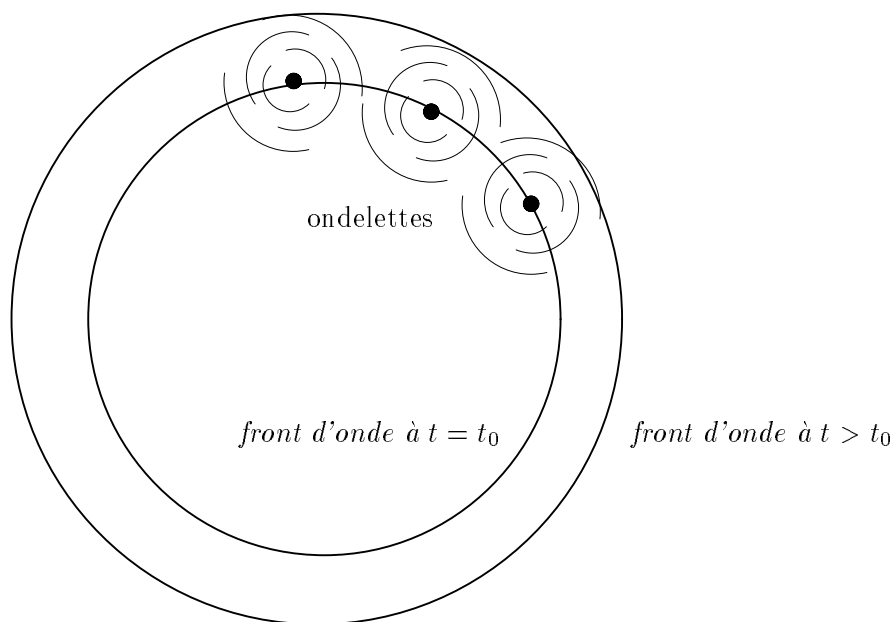


FIG. 3.1 - Principe de Huygens: le front d'onde à un instant donné est équivalent à une distribution de sources secondaires qui rayonnent chacune une ondelette et dont la superposition des contributions redonne le front d'onde aux instants ultérieurs.

Nous venons de passer en revue les différentes méthodes de spatialisation sonore: il en ressort qu'aucune des méthodes examinées ne satisfait pleinement le cahier des charges spécifié au chapitre 1, essentiellement par rapport aux contraintes imposées par le contexte de visioconférence.

On se propose donc de reposer le problème de la reproduction sonore 3D, en l'abordant du point de vue le plus général, c'est-à-dire qu'on cherche à *reproduire un champ acoustique sur une zone étendue en visant une restitution à l'identique qui préserve ses propriétés temporelles et spatiales*. De cette façon, un auditeur placé en n'importe quel point de la zone de restitution percevra les effets de spatialisation sonore *à l'instar d'une situation d'écoute réelle*.

Cette méthode générale de reproduction sonore 3D est définie par l'**holophonie**¹ qui constitue l'*équivalent acoustique de l'holographie* et qui consiste à reproduire un champ acoustique dans un volume à partir d'un enregistrement sur une surface. Comme nous allons le voir au cours de ce chapitre, l'holophonie, fondamentalement, s'inspire du Principe de Huygens et peut être exprimée à partir d'un problème aux limites de l'acoustique avec l'Intégrale de Kirchhoff.

3.1 Le Principe de Huygens

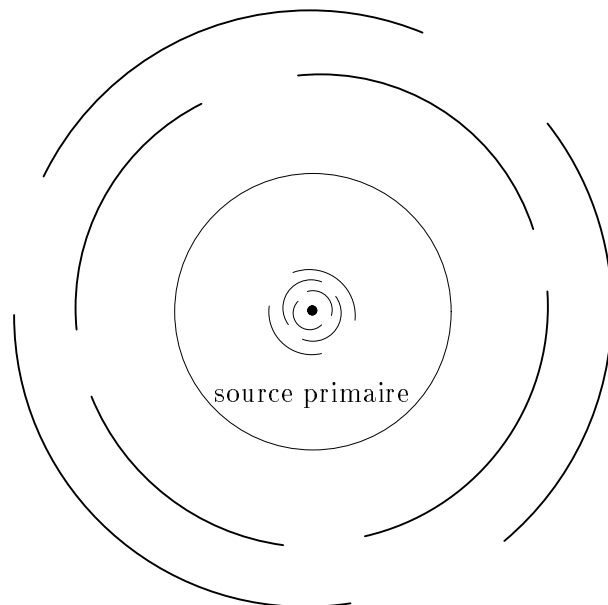
3.1.1 Enoncé qualitatif: Concept de source secondaire

Le terme d'holophonie² désigne une technique de reproduction sonore consistant à recréer un champ acoustique dans un volume à partir d'un enregistrement sur une surface, par analogie avec l'holographie et conformément au principe de Huygens [Jessel, 1973]. Au sens moderne³, le principe de Huygens exprime que le front d'onde rayonné par une source se comporte comme une distribution de sources dites *sources*

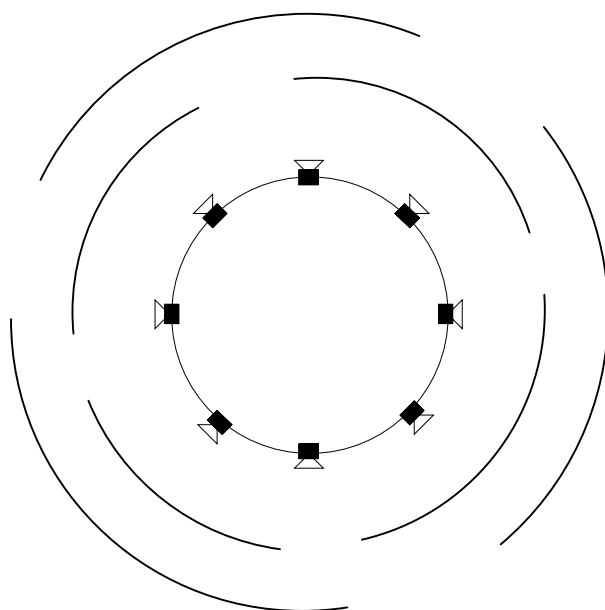
1. L'utilisation du terme "holophonie" se réfère à l'ouvrage de M. Jessel [Jessel, 1973].

2. On distingue ici l'holophonie (reproduction d'un champ acoustique sous forme *sonore* — le résultat est une "auralisation" du champ acoustique —) de l'holographie acoustique (reproduction d'un champ acoustique sous forme *graphique* — le résultat est une "visualisation" du champ acoustique —).

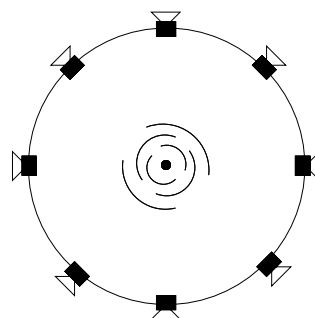
3. Depuis Huygens, des auteurs ont proposé plusieurs énoncés du principe [Nicol, 1996]. S'ils offrent des éclairages sensiblement différents du principe, ils reposent sur des idées communes qui constituent l'essence du principe.



(a) Source primaire (en l'absence de sources secondaires)



(b) Reproduction du champ primaire par une distribution de sources secondaires



(c) Annulation du champ primaire par une distribution de sources secondaires

FIG. 3.2 - Applications du Principe de Huygens

*secondaires*⁴ par opposition à la source *primaire* qui est à l'origine du front d'onde (cf. Fig. 3.1) [Nicol, 1996]. En d'autres termes, le champ induit en aval d'un front d'onde peut être vu comme le champ rayonné par une infinité de sources réparties le long de ce front d'onde. Dans ce raisonnement, les sources secondaires se substituent de façon parfaitement équivalente à la source primaire.

Ce principe tire son origine d'observations effectuées par C. Huygens au XVII^{ème} siècle sur les mécanismes de propagation d'une onde mécanique (ébranlements d'une chaîne de boulets dans une rigole). Huygens s'est en effet rendu compte que, lorsqu'une onde se propage, chaque particule du milieu de propagation se comporte, une fois qu'elle a été mise en vibration, comme une source qui à son tour rayonne une ondelette, de telle sorte que la superposition des différentes ondelettes émises par l'ensemble des particules excitées à un instant donné redonne l'onde primaire aux instants ultérieurs.

Le principe de Huygens contient en germe deux types d'applications (cf. Fig. 3.2) [Jessel, 1973]:

- la *reproduction* d'un champ acoustique (cf. Fig. 3.2b): en l'absence de la source primaire, on reproduit le champ qu'elle aurait induit, en substituant à la source primaire une distribution de sources secondaires disposées le long du front d'onde et «convenablement valuées» [Rocard, 1960],
- l'*annulation* d'un champ acoustique (cf. Fig. 3.2c): la source primaire est entourée de sources secondaires qui sont alimentées en opposition de phase de façon à générer un champ de même amplitude que le champ primaire, mais de signe opposé afin de l'annuler, cette application concerne les domaines de l'absorption active et de la réduction de bruit.

Dans ce qui suit, seule la première application nous intéresse.

3.1.2 Énoncés quantitatifs: Problème aux limites

Le concept de source secondaire constitue l'idée maîtresse du principe de Huygens, cependant la notion de source secondaire reste très vague dans l'énoncé qualitatif: ni leur nature (leur directivité notamment), ni les signaux qui doivent les alimenter n'y sont précisés... Cette indétermination a été levée par les travaux de mathématiciens et de physiciens, tels Kirchhoff ou Helmholtz, qui, au cours des XIX^{ème} et XX^{ème} siècles, se sont penchés sur le principe de Huygens pour le quantifier. Plusieurs énoncés quantitatifs du principe de Huygens ont ainsi été obtenus. Ils diffèrent par la géométrie de la distribution et la nature des sources secondaires, mais dérivent de la même idée. Si Ω désigne l'espace — de dimensions finies ou non — dans lequel rayonnent les sources primaires, on cherche à décomposer Ω en deux sous-espaces (cf. Fig. 3.3):

- un sous-espace Ω_1 , contenant les sources primaires et constituant le *domaine des sources*,
- et un sous-espace Ω_2 , ne contenant aucune source primaire et constituant le *domaine de restitution*.

L'objectif est d'exprimer le champ induit à l'intérieur de Ω_2 sans faire intervenir les sources primaires, en considérant une distribution de source secondaires réparties sur la frontière $\partial\Omega$ entre les domaines Ω_1 et Ω_2 . La décomposition de l'espace en deux sous-espaces permet de mettre à l'écart les sources primaires afin de s'en affranchir...

D'un point de vue mathématique, il s'agit d'un problème aux limites classique (cf. annexe A). En résolvant ce problème par la méthode des fonctions de Green [Barton, 1989], on montre⁵ que le signal de pression p présent à l'instant t et au point \vec{r} du domaine Ω_2 peut être exprimé à partir de l'équation intégrale suivante:

$$p(\vec{r}, t) = \iint_{\partial\Omega_0} dS_0 \vec{n} \cdot \left\{ \int_{t_1}^{t_2} dt_0 \left[g(\vec{r} - \vec{r}_0, t - t_0) \vec{\nabla}_0 p_0(\vec{r}_0, t_0) - p_0(\vec{r}_0, t_0) \vec{\nabla}_0 g(\vec{r} - \vec{r}_0, t - t_0) \right] \right\} \quad (3.1)$$

Dans l'intégrale, le vecteur \vec{r}_0 désigne la variable d'intégration et \vec{n} représente la normale unitaire à la surface $\partial\Omega$ et extérieure au domaine Ω_2 (cf. Fig. 3.3). Les bornes temporelles t_1 et t_2 correspondent respectivement à

4. Une source secondaire est définie comme une source qui n'est active qu'une fois qu'elle a été excitée par un champ incident généré par une source primaire.

5. Dans les paragraphes qui suivent, on s'est tenu à l'interprétation physique des résultats. Le lecteur est invité à consulter les développements mathématiques reportés dans les annexes A, B et C.

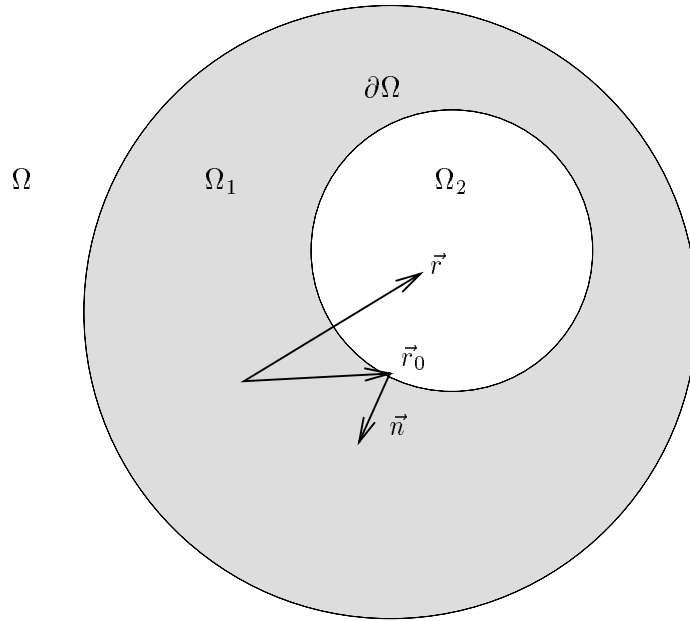


FIG. 3.3 - Décomposition de l'espace Ω en deux domaines: le domaine Ω_1 des sources primaires et le domaine Ω_2 de restitution (Dans un souci de clarté du dessin, les domaines Ω et Ω_2 sont figurés par des sphères, mais leur forme est quelconque.)

l'instant initial où on commence à observer le champ acoustique et l'instant de fin d'observation. La fonction p représente la grandeur caractéristique considérée du champ acoustique (fonction scalaire), à savoir la pression acoustique ou le potentiel des vitesses, et l'indice 0 dénote le signal présent sur $\partial\Omega$. La fonction g désigne la fonction de Green associée au problème: sans rentrer dans les détails⁶, la fonction $g(\vec{r} - \vec{r}_0, t - t_0)$ est définie mathématiquement comme la pression induite au point \vec{r} à l'instant t par un monopôle situé en \vec{r}_0 et émettant une impulsion à l'instant t_0 . D'un point de vue physique, une fonction de Green est un *opérateur de propagation* qui traduit simplement la propagation acoustique entre les points \vec{r}_0 (source secondaire) et \vec{r} (récepteur).

Dans l'équation (3.1), les deux termes de l'intégrand:

$$g(\vec{r} - \vec{r}_0, t - t_0) \vec{\nabla}_0 p_0(\vec{r}_0, t_0) \quad \text{et} \quad p_0(\vec{r}_0, t_0) \vec{\nabla}_0 g(\vec{r} - \vec{r}_0, t - t_0)$$

s'interprètent donc comme la pression induite au point \vec{r} par deux sources qui seraient situées en un point \vec{r}_0 de la surface $\partial\Omega$. Les fonctions $g(\vec{r} - \vec{r}_0, t - t_0)$ et $\vec{\nabla}_0 g(\vec{r} - \vec{r}_0, t - t_0)$ caractérisent le rayonnement de ces sources, tandis que les fonctions $p_0(\vec{r}_0, t_0)$ et $\vec{\nabla}_0 p_0(\vec{r}_0, t_0)$ correspondent aux signaux qui les alimentent: ils dépendent en effet uniquement du champ primaire incident. Par suite, l'équation intégrale (3.1) représente bien le champ $p(\vec{r}, t)$ comme le champ induit par une distribution de sources — secondaires — le long de $\partial\Omega$.

Il s'agit de la formulation mathématique la plus générale du principe de Huygens. La nature des sources secondaires et les signaux qui les alimentent y sont spécifiés sans ambiguïté. On note qu'a priori la surface $\partial\Omega$ ne coïncide pas avec un front d'onde. L'équation (3.1) a en effet une portée plus générale que le Principe de Huygens. Dans ce dernier, les sources secondaires sont distribuées le long d'un front d'onde, dans la mesure où elles sont censées *émettre simultanément*. En revanche, avec l'équation intégrale (3.1), les sources sont réparties le long d'une surface quelconque, étant donné que dans les signaux $p_0(\vec{r}_0, t_0)$ et $\vec{\nabla}_0 p_0(\vec{r}_0, t_0)$ qui les

6. La méthode de résolution par les fonctions de Green et les propriétés de ces fonctions sont exposées en annexe A.

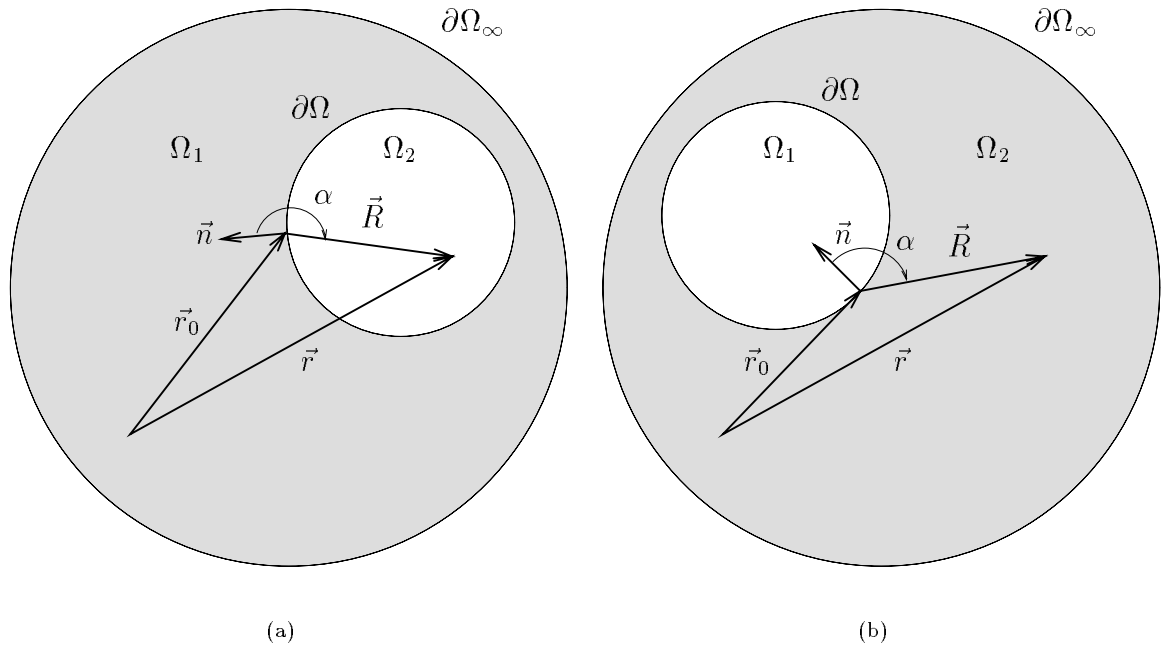


FIG. 3.4 - Géométrie du problème de Kirchhoff: La partition de l'espace Ω en deux sous-espaces peut s'effectuer de deux façons, en entourant par une surface fermée $\partial\Omega$, soit le domaine de restitution Ω_2 (a), soit le domaine des sources Ω_1 (b).

alimentent, l'information de phase est présente, c'est-à-dire que les relations temporelles entre les différentes sources secondaires sont contrôlées.

De ce résultat général se déduisent différents énoncés en fonction de la fonction de Green choisie pour résoudre le problème. Le choix de la fonction de Green est en effet *arbitraire* et, dans l'équation (3.1), on peut considérer soit la fonction de Green en *espace infini*, qui traduit une propagation dans un espace infini totalement libre, soit une autre fonction de Green vérifiant des conditions données sur la surface $\partial\Omega$. Par exemple, on peut lui imposer de s'annuler sur $\partial\Omega$, ce qui permet de simplifier l'équation (3.1). En variant les conditions limites, on obtient ainsi une grande variété de fonctions de Green qui peuvent être utilisées de façon équivalente pour résoudre le même problème. Le choix de la fonction de Green est cependant guidé par la géométrie de $\partial\Omega$. Il faut aussi remarquer que la forme de la fonction de Green détermine directement la nature du rayonnement des sources secondaires, c'est-à-dire essentiellement leur directivité.

De tout ceci, on retiendra l'idée que le principe de Huygens peut être quantifié de nombreuses façons. Parmi celles-ci, la représentation la plus utilisée est l'intégrale de *Kirchhoff* que nous allons décrire à présent.

3.2 L'Intégrale de Kirchhoff

3.2.1 Spécificités de l'approche de Kirchhoff

Dans le cadre général des problèmes aux limites (cf. Annexe A), la formulation du principe de Huygens par Kirchhoff est associée à deux choix spécifiques concernant:

- la *géométrie* du problème (cf. Fig. 3.4a): Le domaine de restitution Ω_2 , qui est exclusivement dédié à la restitution et ne contient aucune source primaire, est entouré par une *surface fermée* $\partial\Omega$.
- la fonction de Green :
Dans l'équation (3.1), on reporte l'expression de la *fonction de Green en espace libre* g_∞ donnée par

[Bruneau, 1983]:

$$g_{\infty}(\vec{r} - \vec{r}_0, t - t_0) = \frac{\delta\left(\frac{R}{c} - \tau\right)}{4\pi R} \quad (3.2)$$

avec:

$$\begin{cases} R = |\vec{R}| = |\vec{r} - \vec{r}_0|, \\ \tau = t - t_0. \end{cases}$$

On vérifie que la fonction de Green traduit bien le processus de propagation en champ libre qui correspond à un retard ($\tau = \frac{R}{c}$) et une atténuation ($\frac{1}{R}$), due à la divergence sphérique.

3.2.2 Solution Intégrale

Dans ces conditions, la pression p induite à l'intérieur du domaine Ω_2 s'écrit sous la forme (cf. annexe B):

$$\begin{aligned} p(\vec{r}, t) &= \frac{1}{4\pi} \iint_{\partial\Omega_0} dS_0 \left[\frac{\vec{\nabla}_0 p_0(\vec{r}_0, t_0) \cdot \vec{n}}{R} - \frac{\vec{R}}{R} \cdot \vec{n} \left(\frac{p_0(\vec{r}_0, t_0)}{R^2} + \frac{1}{Rc} \frac{\partial p_0(\vec{r}_0, t_0)}{\partial t_0} \right) \right]_{t_0=t-\frac{R}{c}} \quad \forall \vec{r} \in \Omega_2 \\ &= \frac{1}{4\pi} \iint_{\partial\Omega_0} dS_0 \left[\frac{\vec{\nabla}_0 p_0(\vec{r}_0, t_0) \cdot \vec{n}}{R} - \cos \alpha \left(\frac{p_0(\vec{r}_0, t_0)}{R^2} + \frac{1}{Rc} \frac{\partial p_0(\vec{r}_0, t_0)}{\partial t_0} \right) \right]_{t_0=t-\frac{R}{c}} \quad \forall \vec{r} \in \Omega_2 \end{aligned} \quad (3.3)$$

où on a posé:

$$\cos \alpha = \frac{\vec{R}}{R} \cdot \vec{n}$$

Il s'agit de la *forme temporelle* de l'intégrale de Kirchhoff, c'est-à-dire que le signal de pression p est exprimé en fonction du temps t . Il peut être exprimé en fonction de la pulsation ω , en appliquant une transformée de Fourier⁷, ce qui conduit à la *forme fréquentielle* de l'intégrale de Kirchhoff — *intégrale de Kirchhoff-Helmholtz* — :

$$p(\vec{r}, \omega) = \iint_{\partial\Omega_0} dS_0 \left[\frac{\vec{\nabla}_0 p_0(\vec{r}_0, \omega) \cdot \vec{n}}{R} - \cos \alpha (1 + jkR) \frac{p_0(\vec{r}_0, \omega)}{R} \right] \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \quad \forall \vec{r} \in \Omega_2 \quad (3.4)$$

Dans les deux cas, on peut remarquer que, d'un point de vue formel, l'intégrale de Kirchhoff s'identifie à un produit de convolution portant sur les coordonnées d'espace:

$$p(\vec{r}) = [g_1 * p_1](\vec{r}) - [g_2 * p_2](\vec{r}) \quad (3.5)$$

avec:

$$\begin{cases} g_1(\vec{r}) &= g_{\infty}(\vec{r}) \\ g_2(\vec{r}) &= \vec{\nabla} g_{\infty}(\vec{r}) \cdot \vec{n} \\ p_1(\vec{r}) &= \vec{\nabla} p_0(\vec{r}) \cdot \vec{n} \\ p_2(\vec{r}) &= p_0(\vec{r}) \end{cases}$$

3.2.3 Interprétation des sources secondaires

Comme l'équation intégrale générale (cf. Equ. 3.1), l'intégrale de Kirchhoff représente une distribution de sources secondaires, dites "sources de Kirchhoff" en l'occurrence.

Dans l'intégrand, on identifie deux types de sources:

- des *monopôles* dont l'intensité est proportionnelle au gradient de la pression $\vec{\nabla}_0 p_0 \cdot \vec{n}$:

$$\left[\frac{\vec{\nabla}_0 p_0(\vec{r}_0, t_0) \cdot \vec{n}}{R} \right]_{t_0=t-\frac{R}{c}}$$

⁷. Dans tout le document, la notation ne distingue pas les fonctions de leur transformée de Fourier, les arguments étant suffisamment explicites.

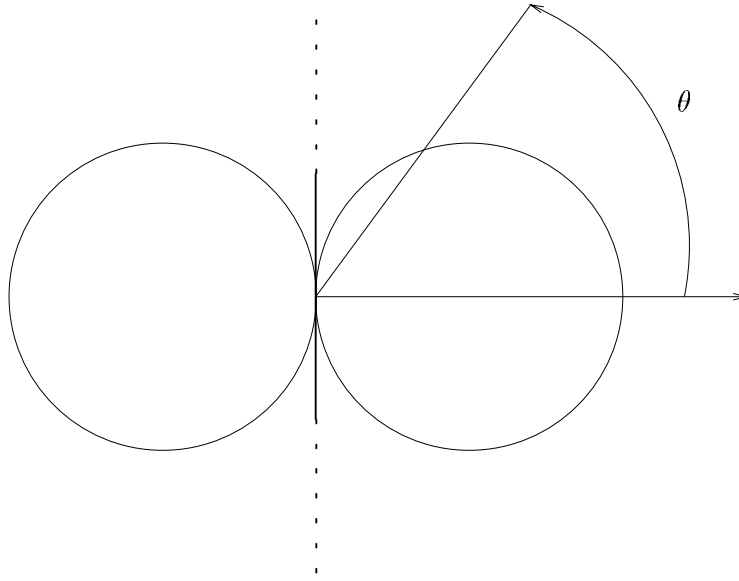


FIG. 3.5 - Directivité dipolaire: Le plan de la membrane du transducteur, qu'il s'agisse d'un microphone ou d'une source, correspond à un zéro de directivité.

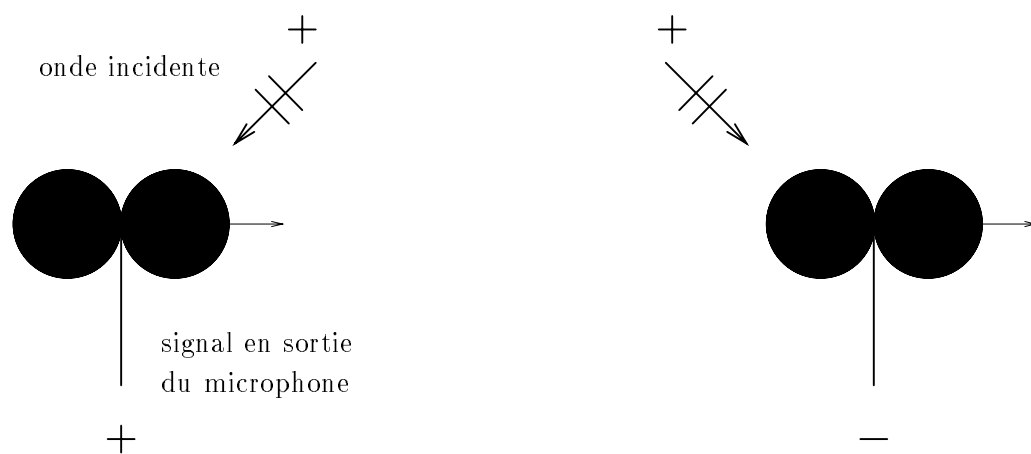
- des *dipôles* dont l'intensité est proportionnelle à la pression p_0 et à sa dérivée temporelle $\partial_{t_0} p_0$:

$$\left[\cos \alpha \left(\frac{p_0(\vec{r}_0, t_0)}{R^2} + \frac{1}{Rc} \frac{\partial p_0(\vec{r}_0, t_0)}{\partial t_0} \right) \right]_{t_0 = t - \frac{R}{c}}$$

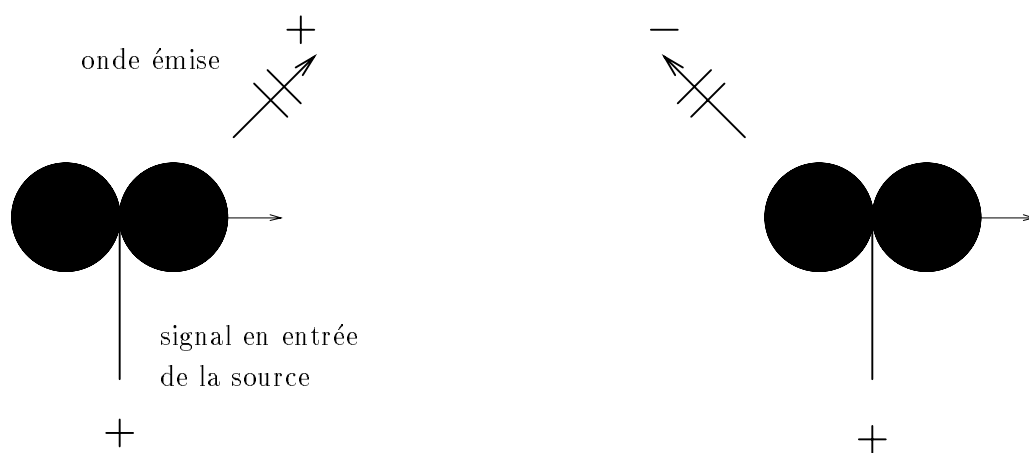
Par suite, chaque source secondaire se compose de deux sources élémentaires: une source monopolaire et une source dipolaire, qui sont alimentées en fonction de l'onde primaire incidente, captée respectivement par un microphone à gradient de pression et un microphone de pression. Il convient de noter qu'entre les capteurs et les sources, les directivités sont inversées: la source monopolaire est reliée à un microphone à gradient de pression, c'est-à-dire un microphone à directivité dipolaire, tandis que la source dipolaire est reliée à un microphone de pression, c'est-à-dire un microphone à directivité monopolaire. Il existe ainsi une parfaite symétrie entre la source monopolaire et la source dipolaire. On rappelle que le comportement monopolaire correspond à une caractéristique omnidirective, alors que le comportement dipolaire correspond à une caractéristique bidirective, c'est-à-dire que sa directivité obéit à une loi en $\cos \theta$ où l'angle θ représente l'angle avec l'axe du dipôle⁸ (cf. Fig. 3.5). En d'autres termes, le signal en sortie du microphone à gradient de pression correspond au signal de sortie du microphone de pression modulo un facteur de directivité $\cos \theta$. De même, le champ rayonné par la source dipolaire est égal à celui rayonné par la source monopolaire moyennant une pondération en $\cos \theta$. Il en résulte notamment une opposition de phase, selon que l'onde acoustique vient exciter la face avant⁹ ou arrière du microphone dipolaire (cf. Fig. 3.6). Réciproquement, les champs rayonnés par la face avant et la face arrière de la source dipolaire sont aussi en opposition de phase. L'ensemble de ces propriétés seront utiles par la suite pour comprendre le comportement des sources de Kirchhoff.

8. Cette loi rappelle une figure de huit, d'où le nom de directivité en figure de huit.

9. La face avant est repérée par la normale \vec{n} .



(a) Microphone à gradient de pression



(b) Source dipolaire

FIG. 3.6 - Relations de phase dans les signaux captés par un microphone à gradient de pression et dans l'onde émise par une source dipolaire

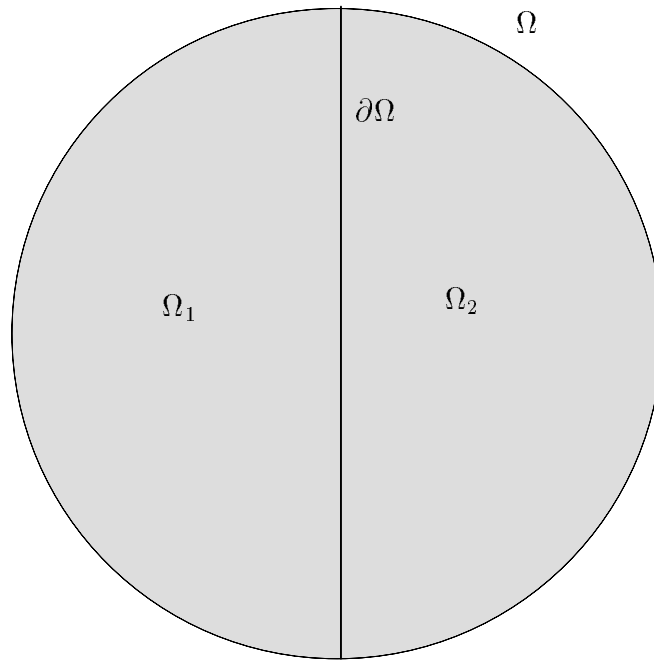


FIG. 3.7 - Géométrie du problème de Rayleigh: Le domaine des sources Ω_1 et le domaine de restitution Ω_2 sont séparés par un plan vertical.

3.2.4 Choix de la géométrie: Une approche alternative

Il existe en fait deux façons de décomposer l'espace Ω en deux sous-espaces pour constituer le domaine des sources et le domaine de restitution (cf. Fig. 3.4):

- la première consiste à entourer l'*espace de restitution* Ω_2 d'une surface fermée $\partial\Omega$ (cf. Fig. 3.4a),
- dans la seconde, c'est l'*espace des sources* Ω_1 qui est entouré par la surface $\partial\Omega$ (cf. Fig. 3.4b).

Avec la seconde partition, le domaine de restitution Ω_2 est alors limité d'une part par $\partial\Omega$ (frontière commune avec Ω_1) et par la frontière $\partial\Omega_\infty$ de l'espace Ω considéré dans sa totalité. L'intégrale définie dans l'équation (3.1) doit donc porter sur les deux surfaces $\partial\Omega$ et $\partial\Omega_\infty$, mais on considère dans un premier temps un espace Ω infini¹⁰, ce qui revient à rejeter la surface $\partial\Omega_\infty$ à l'infini en faisant tendre le rayon de la sphère à l'infini. Dans ses conditions, la contribution des sources présentes sur $\partial\Omega_\infty$ est nulle (*Hypothèse de Sommerfeld*) et l'intégrale de l'équation (3.1) porte seulement sur la surface $\partial\Omega$. Par suite, on obtient finalement la même solution intégrale que celle exprimée avec la première partition (cf. Equ. 3.4). Cependant la géométrie du problème est différente et on va voir à la section suivante qu'elle joue un rôle en vue de la reproduction d'un effet de salle.

3.2.5 Un cas particulier de l'Intégrale de Kirchhoff: Les Intégrales de Rayleigh

Pour réaliser la partition de l'espace Ω en deux sous-espaces Ω_1 et Ω_2 , le sous-espace des sources et le sous-espace de restitution, on peut, au lieu d'isoler l'un des sous-espaces en l'entourant par une surface fermée, séparer les deux espaces Ω_1 et Ω_2 par un *plan infini* — que l'on continue de désigner par $\partial\Omega$ —. En raison de cette géométrie, on applique dans l'équation intégrale générale (3.1), la fonction de Green en *espace*

¹⁰. Nous examinerons ultérieurement l'incidence d'un espace fini.

semi-infini obtenue en imposant certaines conditions sur $\partial\Omega$. Si, par exemple, le gradient de la fonction de Green s'annule sur $\partial\Omega$, l'intégrand ne comporte plus que le terme:

$$g(\vec{r} - \vec{r}_0, t - t_0) \vec{\nabla}_0 p_0(\vec{r}_0, t_0) .$$

On montre (cf. annexe C) que la fonction de Green vérifiant cette condition s'exprime simplement à partir de la fonction de Green en espace libre:

$$g(\vec{r} - \vec{r}_0, t - t_0) = 2 g_\infty(\vec{r} - \vec{r}_0, t - t_0) \quad \forall \vec{r}_0 \in \partial\Omega . \quad (3.6)$$

En reportant cette expression dans l'équation (3.1), compte tenu de l'annulation du gradient de g , on obtient la première intégrale de Rayleigh — *Rayleigh I* — (cf. annexe C):

– dans le domaine temporel

$$p(\vec{r}, t) = \frac{1}{2\pi} \iint_{\partial\Omega_0} dS_0 \left[\frac{\vec{\nabla}_0 p_0(\vec{r}_0, t_0) \cdot \vec{n}}{R} \right]_{t_0=t-\frac{R}{c}} \quad \forall \vec{r} \in \Omega_2 \quad (3.7)$$

– dans le domaine fréquentiel

$$p(\vec{r}, \omega) = \iint_{\partial\Omega_0} dS_0 \vec{\nabla}_0 p_0(\vec{r}_0, \omega) \cdot \vec{n} \frac{e^{-jkR}}{2\pi R} \quad \forall \vec{r} \in \Omega_2 \quad (3.8)$$

De façon similaire, on peut imposer non plus à son gradient, mais à la fonction de Green elle-même de s'annuler sur $\partial\Omega$. On obtient alors la seconde intégrale de Rayleigh — *Rayleigh II* — (cf. annexe C):

– dans le domaine temporel

$$p(\vec{r}, t) = -\frac{1}{2\pi} \iint_{\partial\Omega_0} dS_0 \frac{\vec{R}}{R} \cdot \vec{n} \left[\frac{p_0(\vec{r}_0, t_0)}{R^2} + \frac{1}{Rc} \frac{\partial p_0(\vec{r}_0, t_0)}{\partial t_0} \right]_{t_0=t-\frac{R}{c}} \quad \forall \vec{r} \in \Omega_2 \quad (3.9)$$

– dans le domaine fréquentiel

$$p(\vec{r}, \omega) = -\iint_{\partial\Omega_0} dS_0 \frac{\vec{R}}{R} \cdot \vec{n} [1 + jkR] p_0(\vec{r}_0, \omega) \frac{e^{-jkR}}{2\pi R^2} \quad \forall \vec{r} \in \Omega_2 \quad (3.10)$$

Ces expressions sont très proches de la formulation de Kirchhoff: les intégrales de Rayleigh sont en effet des intégrales de Kirchhoff dans lesquelles on n'a retenu que les termes des sources monopolaires — *Rayleigh I* — ou des sources dipolaires — *Rayleigh II* —. En outre il faut noter que les intégrales de Rayleigh I et II proposent deux solutions alternatives parfaitement équivalentes pour reproduire un champ sonore, ce qui implique indirectement que, *dans le cas d'une distribution planaire de sources secondaires, le champ rayonné par le réseau monopolaire est égal au champ induit par le réseau dipolaire.*

3.3 Application à la reproduction 3D d'un champ sonore

3.3.1 Principe

A partir de l'intégrale de Kirchhoff, on peut définir une méthode de reproduction sonore 3D consistant à entourer les auditeurs d'un réseau de transducteurs [Bruneau, 1983]. Il faut avoir présent à l'esprit que la notion de source secondaire comprend à la fois des *sources* — monopôles et dipôles —, qui vont restituer le champ sonore, et des *capteurs* — microphones de pression et à gradient de pression —, qui sont chargés d'enregistrer l'onde primaire incidente pour les alimenter. Comme pour les systèmes de reproduction sonore décrits au chapitre précédent (cf. Chapitre 2), on est amené à distinguer deux étapes (cf. Fig. 3.8):

- *prise de son*

A l'emplacement de chaque source secondaire, deux microphones sont disposés: un microphone de pression (microphone omnidirectif) et un microphone à gradient de pression (microphone bidirectif) qui sont respectivement destinés à l'enregistrement du signal de pression p_0 et de son gradient $\vec{\nabla}_0 p_0(\vec{r}_0, t_0) \cdot \vec{n}$.

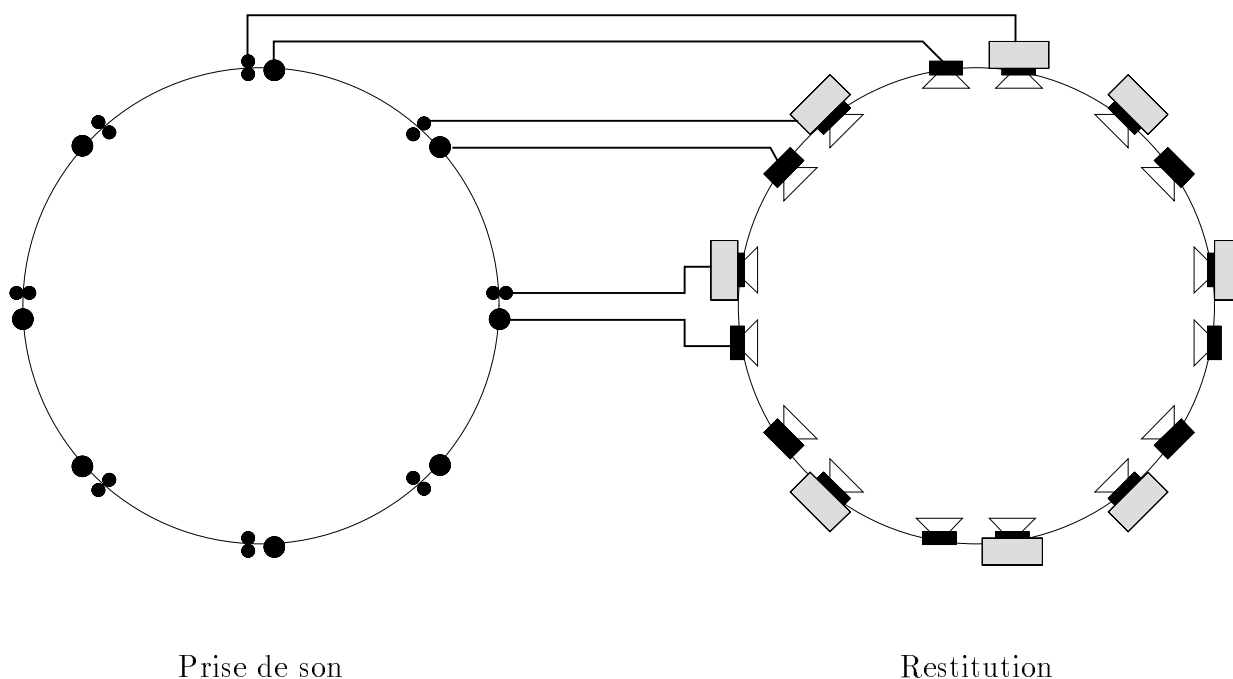


FIG. 3.8 - Principe général de la prise et restitution du son selon la méthode holophonique

- *restitution*

Chaque source secondaire est synthétisée en associant un monopôle et un dipôle qui sont respectivement matérialisés par un haut-parleur bafflé et un haut-parleur non bafflé (cf. Fig. 3.9). Les monopôles sont alimentés par les signaux captés par les microphones à gradient de pression, tandis que les dipôles sont alimentés par les signaux recueillis par les microphones de pression.

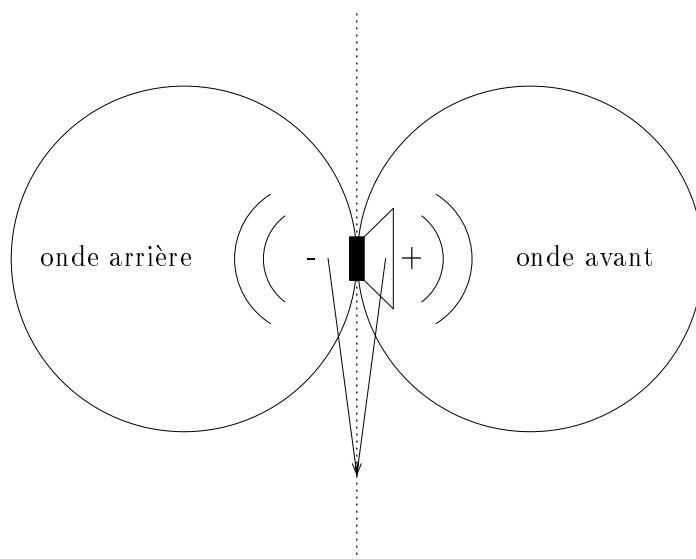
Il importe avant tout que la distribution des capteurs à la prise de son et celle des sources à la restitution respectent la même géométrie. On rappelle que cette géométrie peut être quelconque à condition qu'il s'agisse d'une surface fermée.

Par ailleurs, on se rend rapidement compte des limitations pratiques d'un tel système de reproduction. D'une part, la théorie suppose une distribution *continue* de sources secondaires, ce qui est impossible pour des raisons évidentes. On est donc amené à considérer un réseau *discret* de transducteurs, ce qui pose le problème de l'échantillonnage spatial qui sera abordé au chapitre suivant (cf. Chapitre 4). D'autre part, pour couvrir une zone d'écoute de taille raisonnable, les dimensions du réseau de transducteurs sont importantes et il en résulte un nombre prohibitif de sources secondaires, ce qui conduit en pratique à *tronquer* le réseau. Ce problème sera aussi traité ultérieurement, au chapitre 5.

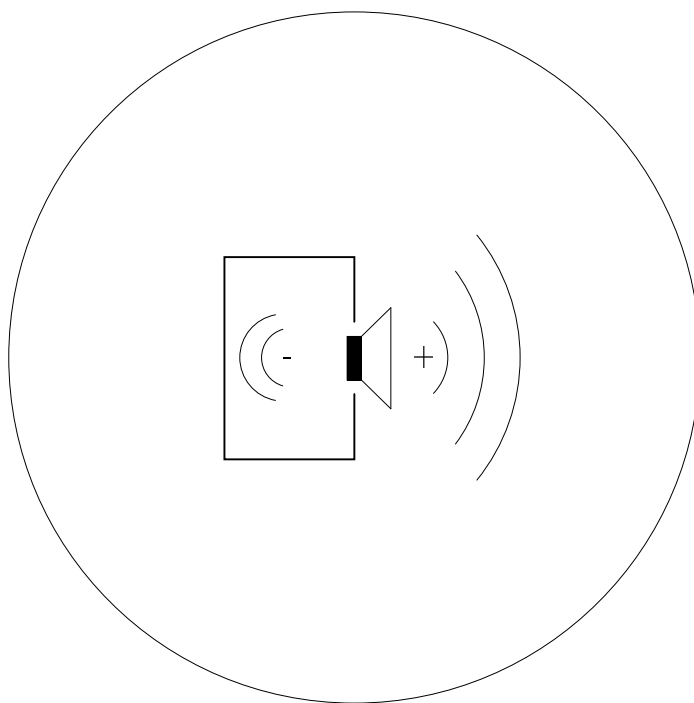
3.3.2 Sélectivité spatiale des sources de Kirchhoff

L'onde rayonnée par les sources de Kirchhoff présente une sélectivité spatiale, essentiellement du point de vue des espaces Ω_1 et Ω_2 , qui mérite d'être signalée, ne serait-ce que parce qu'elle intervient pour la reproduction de l'effet de salle.

La sélectivité spatiale des sources de Kirchhoff est à relier aux propriétés de l'intégrale de Kirchhoff. On montre en effet que l'intégrale de l'équation 3.4 s'annule dès lors qu'elle est évaluée en un point \vec{r} du domaine Ω_1 (cf. annexe B). Ce résultat signifie que le champ induit par les sources secondaires à l'intérieur de Ω_1 est *nul*. Plus précisément, l'intégrale de Kirchhoff s'annule lorsque la source primaire et le point de restitution — c'est-à-dire le point \vec{r} où est évalué la pression acoustique $p(\vec{r}, t)$ — appartiennent au même sous-espace, qu'il



(a) Source dipolaire: Haut-parleur non bafflé (les ondes avant et arrière s'annulent sur le plan de la membrane, ce qui se traduit par un phénomène de *court-circuit acoustique*)



(b) Source monopolaire: Haut-parleur monté sur une enceinte close (l'onde arrière est piégée dans l'enceinte close, ce qui supprime le court-circuit acoustique)

FIG. 3.9 - Source Monopolaire et Source Dipolaire: Approximation par un haut-parleur bafflé et un haut-parleur non bafflé

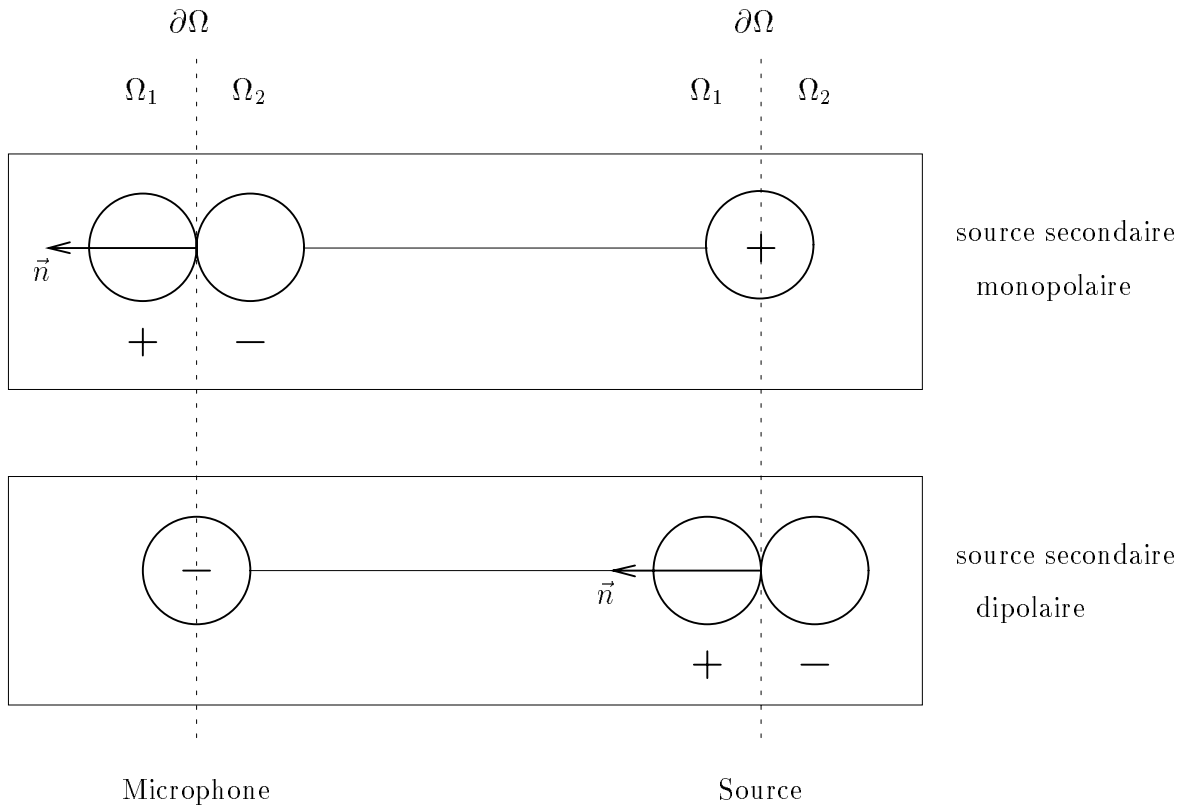


FIG. 3.10 - Source de Kirchhoff: Relations de phase entre les signaux captés par le microphone de pression et le microphone à gradient de pression d'une part et entre les signaux émis par le monopôle et le dipôle d'autre part (les dipôles sont orientés selon la normale \vec{n} , cf. Fig. 3.4)

s'agisse de Ω_1 ou Ω_2 . Cette propriété résulte d'un *jeu d'interférences entre les rayonnements des monopôles et des dipôles* qui coexistent au sein de chaque source secondaire.

Le phénomène peut être mis en évidence sur un exemple particulier de géométrie qui permet d'utiliser les propriétés des intégrales de Rayleigh. On considère que l'espace de restitution est un *cube*. Les sources secondaires sont donc distribuées sur les six faces de ce cube, c'est-à-dire que le réseau de sources secondaires se compose de six plans, chaque plan étant constitué d'un plan de monopôles et d'un plan de dipôles. On peut ainsi identifier dans chacun de ces plans, une distribution de Rayleigh, à savoir une distribution planaire de sources secondaires monopolaires ou dipolaires. Or, on a vu qu'une distribution de Rayleigh possède la propriété spécifique que le réseau de sources monopolaires et le réseau de sources dipolaires rayonnent deux ondes parfaitement identiques (cf. Section 3.2.5). Ce résultat est valable si la source primaire est située dans Ω_1 et le récepteur dans Ω_2 , il nous permet cependant de comprendre ce qui se produit lorsque la source primaire et le récepteur appartiennent au même espace, si l'on prend en compte les propriétés des directivités dipolaires, pour le microphone à gradient de pression et la source dipolaire, en s'attachant aux relations de phase qu'elles impliquent. On rappelle que, pour un microphone à gradient de pression, une onde provenant de l'arrière induit en sortie du capteur un signal électrique en opposition de phase par rapport à une onde frontale (cf. Fig. 3.6a). De même, dans le champ rayonné par un dipôle, une onde arrière est émise en opposition de phase par rapport à une onde avant (cf. Fig. 3.6b).

Appliquons ces résultats à l'une des faces du cube. On considère d'abord une source primaire située dans Ω_1 . Sachant d'une part que les sources monopolaires et dipolaires rayonnent une onde identique pour un récepteur placé dans Ω_2 et d'autre part que pour un récepteur placé symétriquement dans Ω_1 , la source

Source primaire	Récepteur	Monopôle	Dipôle
Ω_1	Ω_2	+	+
Ω_1	Ω_1	+	-
Ω_2	Ω_1	-	-
Ω_2	Ω_2	-	+

TAB. 3.1 - Relations de phase entre les ondes rayonnées par les réseaux planaires monopolaires et dipolaires pour les différentes combinaisons des positions de la source primaire et du récepteur (cf. Fig. 3.10)

dipolaire émet une onde en opposition de phase, on en déduit que, pour un récepteur situé dans Ω_1 , les ondes émises par les réseaux monopolaires et dipolaires sont aussi égales en valeur absolue, mais cette fois, elles sont en opposition de phase, de telle sorte qu'elles s'annulent (cf. Fig. 3.10). Réciproquement, si la source primaire et le récepteur sont situés dans Ω_2 , les ondes induites par les monopôles et les dipôles s'annulent également. En revanche, dès que la source primaire et le récepteur appartiennent à des espaces distincts, les ondes monopolaires et dipolaires sont en phase et s'ajoutent. L'ensemble des combinaisons est illustré dans le tableau 3.1. Ce raisonnement montre bien que le champ global rayonné par les sources de Kirchhoff est nul dès lors que la source primaire et le récepteur appartiennent au même sous-espace. On peut l'appliquer aux six faces du cube et on établit ainsi que le champ induit par les sources secondaires de Kirchhoff s'annule si la source primaire et le récepteur sont situés dans le même sous-espace, ce qui justifie a posteriori les propriétés mathématiques de l'intégrale de Kirchhoff. L'explication a été mise en évidence pour une géométrie particulière, mais elle reste valable tant que le volume Ω_2 prend la forme d'un polyèdre, pour lequel la surface $\partial\Omega$ se décompose en un nombre donné de facettes planaires. Il peut d'ailleurs être étendu par continuité à une géométrie quelconque. Il convient cependant de noter que pour une distribution de Rayleigh constituée uniquement de monopôles ou de dipôles, la discrimination entre les espaces Ω_1 et Ω_2 n'existe plus, puisqu'elle repose sur un jeu d'interférences constructrices ou destructrices entre les monopôles et les dipôles. Or, ces interférences ne peuvent plus jouer si un seul type de sources est présent. En d'autres termes, la sélectivité spatiale est une propriété spécifique aux sources de Kirchhoff.

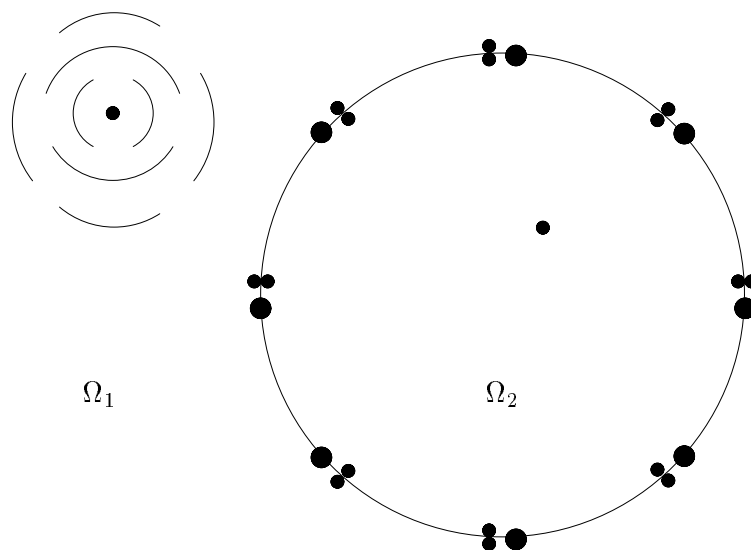
Pratiquement, la sélectivité spatiale des sources de Kirchhoff a deux conséquences fondamentales (cf. Fig. 3.11):

- en termes de prise de son (cf. Fig. 3.11a): *les sources primaires qui peuvent être présentes dans le domaine de restitution ne sont pas reproduites*, ce qui permet de s'affranchir d'éventuelles sources perturbatrices situées dans Ω_2 .
- en termes de restitution (cf. Fig. 3.11b): *le rayonnement des sources secondaires n'affecte pas le champ qui règne dans le domaine des sources*.

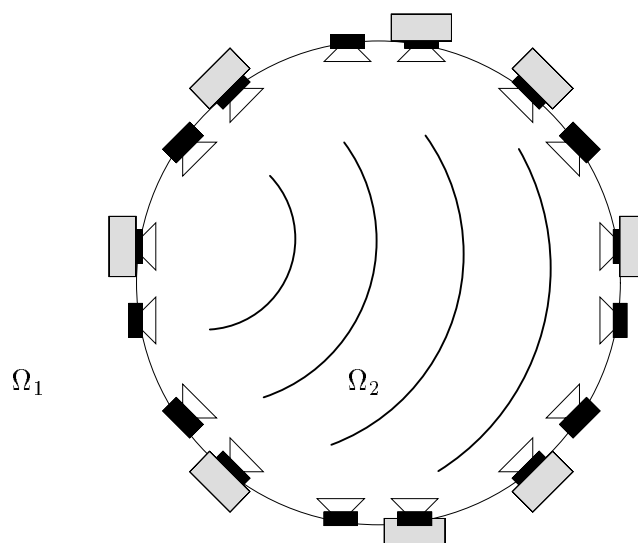
L'intérêt pratique de ces résultats est immédiat. En particulier, dans le domaine de l'*absorption active*, si on cherche par exemple à réduire le bruit rayonné par une machine, on entoure la source de bruit d'un réseau de capteurs reliés à des haut-parleurs qui génèrent une onde destinée à annuler l'onde primaire. Dans ces conditions, les sources de Kirchhoff garantissent que le champ présent dans l'espace des sources primaires n'est pas perturbé par le rayonnement des sources secondaires et, en particulier qu'il n'est pas amplifié. Par ailleurs, dans ce type d'application, microphones et haut-parleurs sont présents simultanément et il faut craindre un effet de couplage entre eux. Ce risque est minimisé grâce à la directivité *intrinsèque* des sources de Kirchhoff, pourvu que le réseau de haut-parleurs englobe celui des microphones [Mangiante, 1997]. Dans le problème qui nous concerne, la directivité des sources de Kirchhoff peut être exploitée pour la gestion de l'effet de salle à la prise de son et à la restitution...

3.3.3 Présence d'un effet de salle

Jusqu'à présent, on a considéré un espace Ω infini. Dans une salle se pose le problème de la reproduction du champ réverbéré. Les réflexions générées par les parois de la salle peuvent être vues comme issues de sources fictives désignées sous le terme de *sources images* parce qu'elles sont les images des sources primaires par rapport aux différentes surfaces réfléchissantes (cf. Fig. 3.12). Par suite, il est équivalent de considérer une source dans un espace clos et la même source associée à l'ensemble de ses sources images dans un



(a) Prise de son: Les sources primaires présentes dans le domaine de restitution Ω_2 ne sont pas reproduites.



(b) Restitution: Le champ rayonné par les sources secondaires dans l'espace des sources Ω_1 est nul.

FIG. 3.11 - Conséquences pratiques de la sélectivité spatiale des sources de Kirchhoff

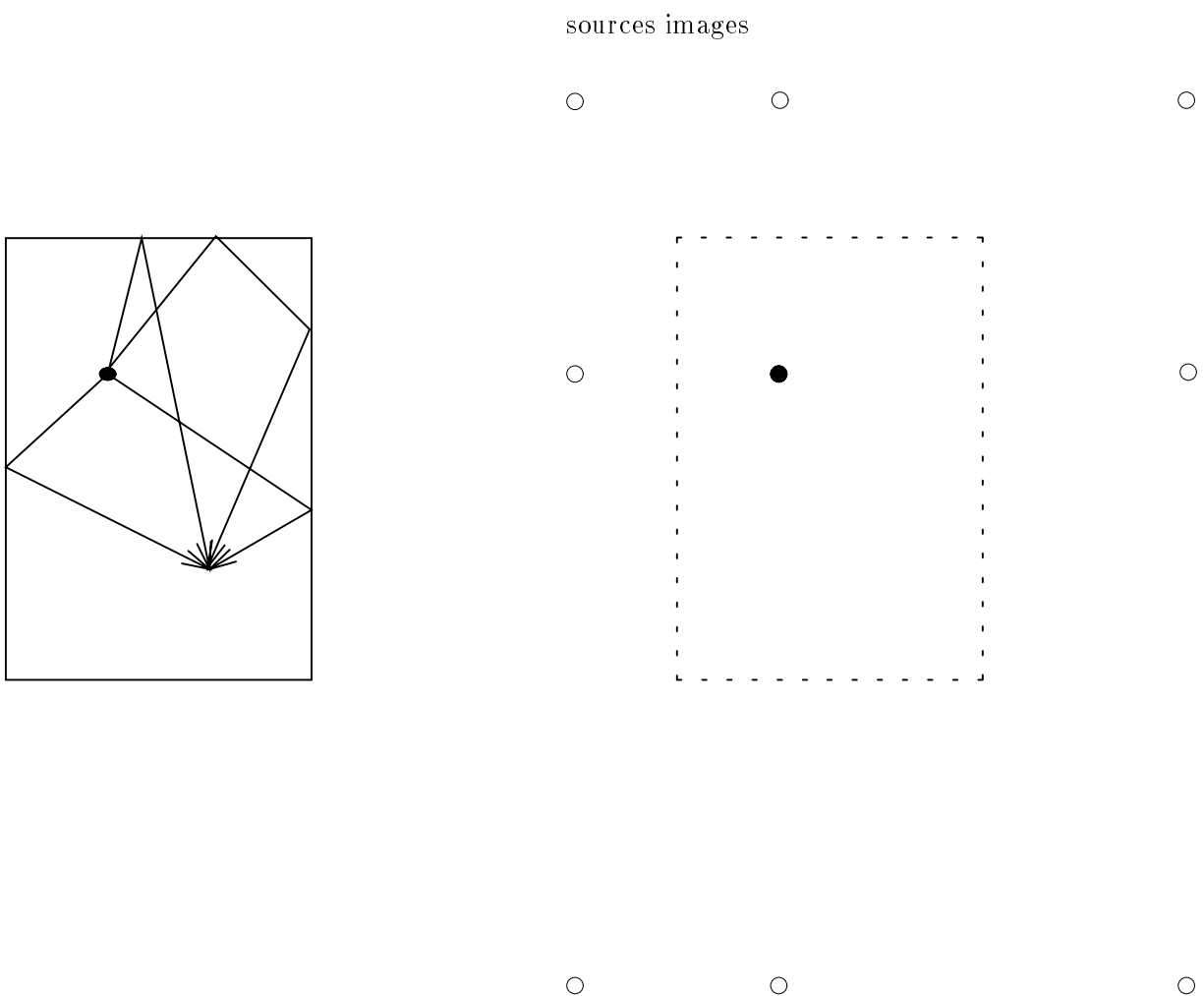


FIG. 3.12 - Problème de Kirchhoff appliqué à une salle: Modélisation d'un effet de salle par la méthode des sources images

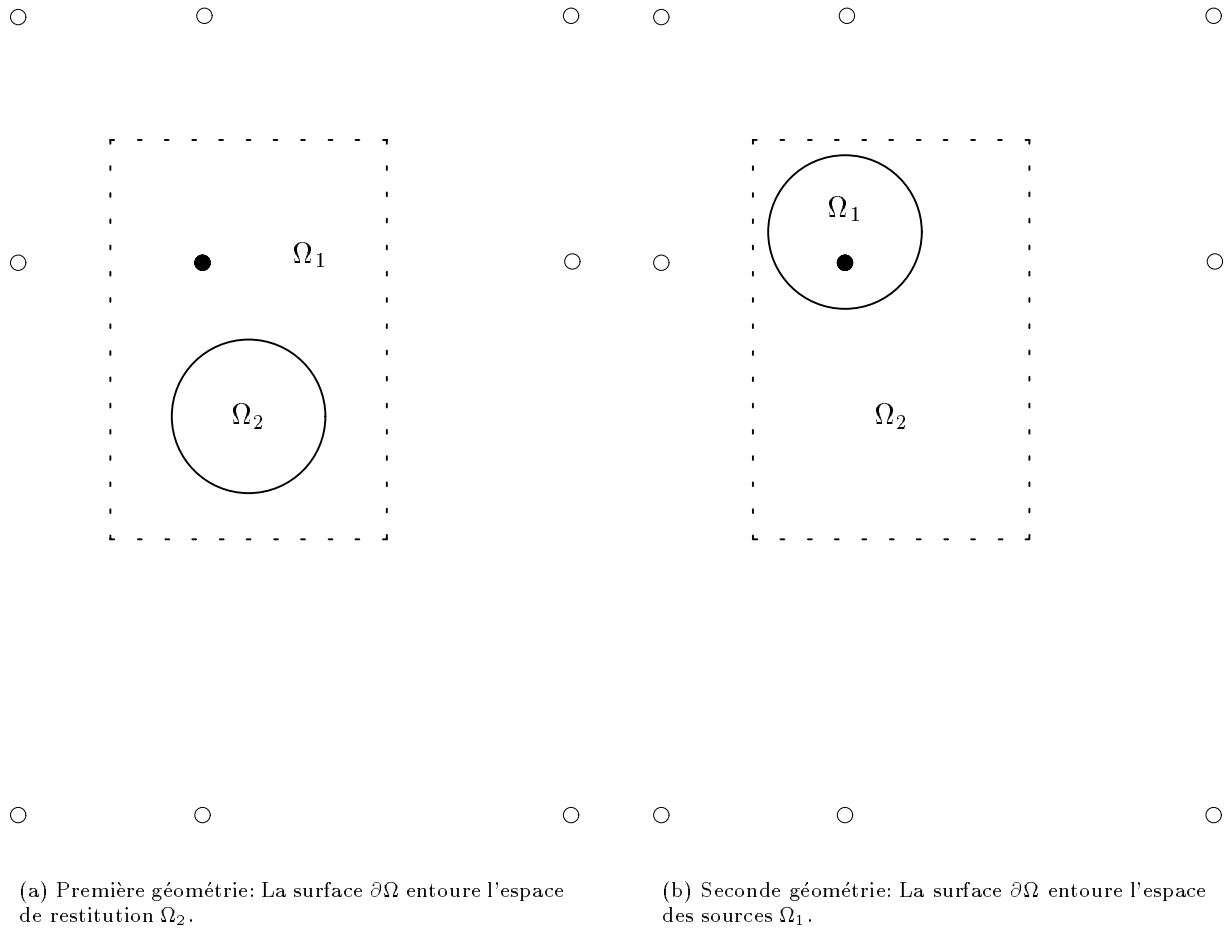


FIG. 3.13 - Problème de Kirchhoff appliqué à une salle

espace infini. En d'autres termes, on se place toujours dans un espace infini, mais on introduit des sources supplémentaires qui sont les sources images. La reproduction de l'effet de salle est alors déterminée par la prise en compte ou non de ces sources images. Or cette dernière est conditionnée par la géométrie du problème, *selon que la partition de l'espace est réalisée en entourant le domaine des sources ou le domaine de restitution*.

En effet, si la surface $\partial\Omega$ enveloppe la zone de restitution, toutes les sources — sources réelles et sources images — sont contenues à l'intérieur du domaine Ω_1 (cf. Fig. 3.13a). En ce cas, elles seront bien reproduites, puisqu'aucune d'elles n'est située dans le domaine de restitution, conformément aux propriétés de l'intégrale de Kirchhoff exposées à la section précédente. En revanche, lorsque le champ est restitué, l'onde rayonnée par les sources secondaires dans le domaine Ω_1 — domaine des sources — est nulle. Les parois de la salle de restitution ne voient aucune onde incidente et ne génèrent donc pas d'onde réverbérée. L'environnement de restitution n'intervient donc pas, c'est-à-dire que l'effet de salle du lieu de prise de son est restitué indépendamment du lieu d'écoute et ceci sans imposer de contraintes particulières sur les caractéristiques de l'environnement de restitution (chambre anéchoïque ou salle identique au lieu de prise de son).

Inversement, si la surface $\partial\Omega$ entoure le domaine de restitution, les sources images sont alors situées dans le domaine de restitution (cf. Fig. 3.13b). Elles ne sont donc pas reproduites, en vertu de la sélectivité spatiale des sources de Kirchhoff. Ainsi, malgré la présence de la salle, le champ réverbéré n'est pas pris en

compte à la prise de son. A la restitution, un effet de salle est introduit selon le “processus naturel” par le jeu des réflexions sur les parois du champ synthétisé par les sources secondaires, comme si les sources primaires étaient réellement présentes. Cet effet de salle ne dépend pas du lieu de prise de son: il est uniquement déterminé par les caractéristiques acoustiques du lieu de restitution — qu’il soit identique ou non à celui de prise de son —. On peut donc envisager d’introduire à la restitution un effet de salle totalement différent de celui de la prise de son. En particulier, dans le cas d’une restitution en environnement anéchoïque, le champ perçu ne comporte pas d’effet de salle, même si l’enregistrement a été effectué dans une salle.

Par suite, le choix de la géométrie dépend du traitement désiré pour le champ réverbéré:

- si l’on veut reproduire l’effet de salle du lieu de prise de son, la première géométrie (cf. Fig. 3.13a) s’impose,
- la seconde configuration (cf. Fig. 3.13b) permet au contraire de s’affranchir de l’environnement de prise de son et offre la possibilité d’introduire un effet de salle distinct.

3.4 Vers une approche simplifiée

La complexité de l’holophonie ne réside pas dans la *technologie matérielle*, puisqu’elle ne requiert que des microphones de pression et à gradient de pression à la prise de son et des haut-parleurs bafflés et non bafflés pour la restitution, et encore moins dans les *traitements*, pour l’unique raison qu’elle n’a recours à aucun traitement, étant donné que les microphones sont directement connectés aux haut-parleurs, sans nécessiter d’intervention intermédiaire sur les signaux (cf. Fig. 3.8). Pour l’essentiel, le travail de reconstruction est assuré au niveau *acoustique*, par le rayonnement des sources.

Si la mise en œuvre de l’holophonie peut sembler complexe, c’est plutôt en raison du *nombre* considérable de transducteurs qu’elle implique de gérer simultanément. Il faut, en effet, entièrement tapisser la surface $\partial\Omega$ de microphones à la prise de son et de haut-parleurs à la restitution. Ce point a constitué le principal frein à la mise en œuvre d’un système holophonique: alors que le principe de l’holophonie est connu depuis longtemps [Jessel, 1973], le premier exemple concret de système holophonique date seulement de la fin des années 80 [Berkhout, 1988]. Ce système, développé sous le concept de *Wavefield Synthesis*¹¹, est le résultat des recherches menées au laboratoire d’Acoustique et Sismique de l’U.T.D. [Berkhout, 1988] [Boone & Verheijen, 1993] [Boone & Verheijen, 1995] [Boone *et al.*, 1995]. Il repose sur un *travail de simplification* du réseau de transducteurs afin de se ramener à un dispositif d’un coût raisonnable, principalement en termes de *nombre de transducteurs*. Dans les lignes qui suivent, nous allons détailler les principales étapes de ce travail de simplification. Les méthodes décrites sont issues essentiellement des travaux réalisés à l’U.T.D. [Start, 1997] [Verheijen, 1997].

3.4.1 Approximation de la Phase Stationnaire: Distribution 1D de sources secondaires

Principe

L’approximation de la Phase Stationnaire vise à *réduire d’une dimension la taille de la distribution de sources secondaires*: d’un *réseau 2D* — une surface fermée pour l’Intégrale de Kirchhoff ou un plan infini pour l’Intégrale de Rayleigh —, on va se ramener à un *réseau 1D* — respectivement une ligne fermée ou une droite infinie —. Cette approximation est basée sur le fait que, dans un grand nombre d’applications, les sources sonores et les points d’écoute sont souvent situés dans le même plan horizontal. Cette situation se rencontre typiquement en contexte de visioconférence où les sources d’émission, à savoir les bouches des locuteurs, et les récepteurs, c’est-à-dire les oreilles des auditeurs, appartiennent au même plan horizontal défini par la hauteur moyenne des têtes de l’ensemble des interlocuteurs, du moins tant qu’ils restent assis¹². En d’autres termes, ce plan horizontal représente l’espace Ω où évoluent les sources primaires et les récepteurs et qui,

11. “Wavefield Synthesis” peut être traduit par “synthèse de front d’onde”.

12. Il n’est pas pour autant nécessaire de leur imposer la position assise, étant données les performances médiocres du système auditif humain en localisation dans le plan médian, c’est-à-dire selon l’axe vertical (cf. Section 2.2). La notion de plan horizontal peut donc être étendue à une mince couche horizontale dont l’épaisseur atteint une à plusieurs dizaines de centimètres.

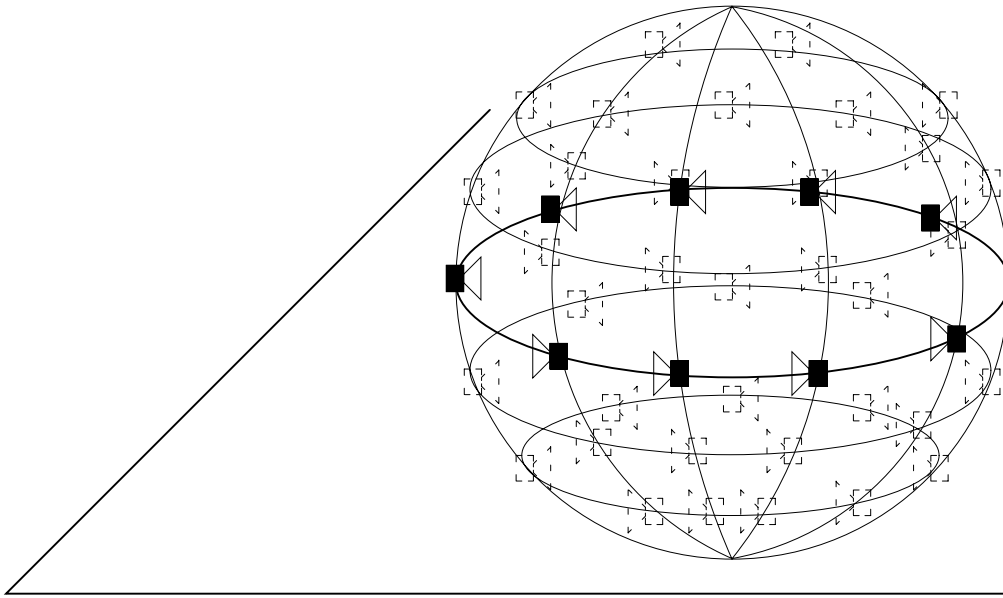


FIG. 3.14 - Approximation de la Phase Stationnaire: La distribution de sources secondaires se réduit à l'intersection de la surface $\partial\Omega$ avec le plan horizontal.

dans cette configuration, ne correspond plus à un volume (3D), mais à une surface (2D). L'espace Ω ayant été abaissé d'une dimension, il en résulte logiquement que sa frontière $\partial\Omega$ se réduise aussi d'une dimension.

D'un autre point de vue, plus physique cette fois, l'approximation de la Phase Stationnaire est basée sur l'idée que toutes les sources secondaires présentes sur $\partial\Omega$ ne contribuent pas de façon équivalente en fonction de la position de la source primaire et du récepteur et que les sources secondaires *les plus proches*, à la fois de la source primaire et du récepteur, jouent un *rôle prépondérant* dans le travail de reconstruction du champ sonore. Ainsi, si les sources primaires et les récepteurs sont cantonnés à un plan horizontal, on devine que les sources secondaires situées dans le même plan réalisent l'essentiel du travail de reconstruction, la contribution du reste des sources secondaires n'étant qu'accessoire. Cette idée suggère de ne conserver que les sources secondaires situées dans le plan horizontal, c'est-à-dire de restreindre la distribution de sources secondaires à l'intersection de la surface Ω avec le plan horizontal (cf. Fig. 3.14). Ce résultat intuitif constitue l'idée maîtresse du Théorème de la Phase Stationnaire [Murray, 1974].

Théorème de la Phase Stationnaire

Dans l'intégrale de Kirchhoff qui définit le procédé holophonique, l'onde de pression p présente au sein de Ω_2 est exprimée sous la forme d'une *intégrale double*. Grâce au Théorème de la Phase Stationnaire, il est possible d'approcher cette intégrale double par une intégrale simple (cf. Annexe D). Considérons que le domaine de restitution Ω_2 prend la forme d'une colonne verticale infinie de section quelconque (cf. Fig. 3.15). La surface $\partial\Omega$ qui entoure Ω_2 se compose de trois éléments:

- la paroi verticale (surface S),
- les deux sections horizontales qui sont situées à $z_0 = \pm\infty$ (surfaces $S_{+\infty}$ et $S_{-\infty}$).

La contribution des sources présentes sur $S_{+\infty}$ et $S_{-\infty}$ est négligeable puisque ces surfaces sont rejetées à l'infini ($z_0 \rightarrow \pm\infty$). Sur la surface restante S , la distribution de sources secondaires peut être décomposée en une juxtaposition de lignes verticales infinies. Si la pression p_L représente la pression induite par une ligne

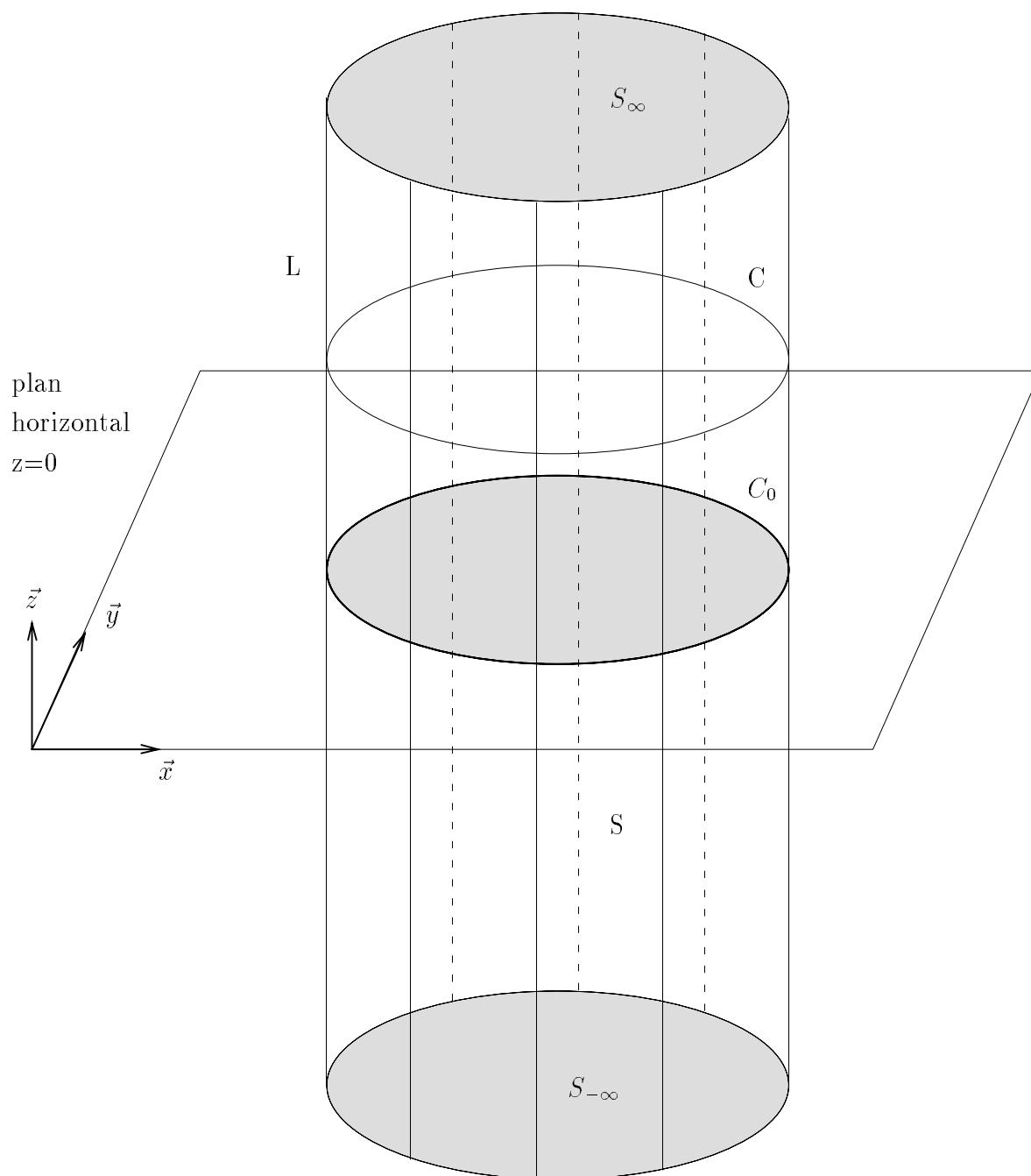


FIG. 3.15 - Approximation de la phase stationnaire: On considère un espace de restitution Ω_2 prenant la forme d'une colonne verticale infinie de section quelconque.

verticale de sources de Kirchhoff:

$$p_L(\vec{r}, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\vec{\nabla}_0 p_0(\vec{r}_0, \omega) \cdot \vec{n} + \frac{\vec{R}}{R} \cdot \vec{n} \frac{(1 + jkR)}{R} p_0(\vec{r}_0, \omega) \right] \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dz_0 \quad (3.11)$$

avec:

$$\vec{R} = \vec{r} - \vec{r}_0$$

l'intégrale de Kirchhoff — dans le domaine fréquentiel, par exemple — se réécrit alors sous la forme d'une intégrale de contour appliquée le long du bord C de la section de la colonne verticale Ω_2 (cf. Fig. 3.15):

$$p(\vec{r}, \omega) = \oint_C p_L(\vec{r}, \omega) dl \quad (3.12)$$

Afin d'expliciter le terme de phase, on modélise la source primaire par un monopôle de spectre $S_0(\omega)$:

$$p_0(\vec{r}, \omega) = S_0(\omega) \frac{e^{-jk\rho}}{4\pi\rho} \quad (3.13)$$

Dans cette expression, la variable ρ représente la distance entre la source primaire, dont la position est repérée par le vecteur \vec{r}_s , et la source secondaire en \vec{r}_0 :

$$\rho = |\vec{\rho}| = |\vec{r}_0 - \vec{r}_s|$$

La pression p_L devient:

$$p_L(\vec{r}, \omega) = S_0(\omega) \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\frac{\vec{R}}{R} \cdot \vec{n} \frac{(1 + jkR)}{R} - \frac{\vec{\rho}}{\rho} \cdot \vec{n} \frac{(1 + jk\rho)}{\rho} \right] \frac{e^{-jk(\rho+R)}}{16\pi^2\rho R} dz_0 \quad (3.14)$$

Cette intégrale est de la forme:

$$I = \int_{-\infty}^{+\infty} f(z_0) e^{j\phi(z_0)} dz_0 \quad (3.15)$$

avec:

$$f(z_0) = \frac{1}{16\pi^2\rho R} \left[\frac{\vec{R}}{R} \cdot \vec{n} \frac{(1 + jkR)}{R} - \frac{\vec{\rho}}{\rho} \cdot \vec{n} \frac{(1 + jk\rho)}{\rho} \right] \quad (3.16)$$

$$\phi(z_0) = -k(\rho + R) \quad (3.17)$$

En vertu du Théorème de la Phase Stationnaire [Murray, 1974] [Berkhout *et al.*, 1993], elle peut être approchée par la valeur de son intégrand au *point de phase stationnaire* $z_0 = z_s$, ainsi appelé parce qu'il correspond au point où la dérivée première de la phase s'annule:

$$\phi'(z_s) = 0 \quad (3.18)$$

L'approximation s'applique modulo un facteur correctif $\eta_{PS}(z_s)$ qui est donné par:

$$\eta_{PS}(z_s) = \sqrt{\frac{j2\pi}{\phi''(z_s)}} \quad (3.19)$$

Il vient finalement:

$$I \simeq \eta_{PS}(z_s) f(z_s) e^{j\theta(z_s)} \quad (3.20)$$

Cette approximation dérive des propriétés oscillatoires de l'exponentielle complexe: elle est liée au fait que, dans l'intégration, les alternances positives et négatives des oscillations s'annulent, sauf au niveau du point de phase stationnaire (cf. Annexe D). Il en résulte que l'approximation est d'autant plus fiable que la fréquence et les distances ρ et R , c'est-à-dire les trois paramètres qui déterminent le terme de phase ϕ , sont grands.

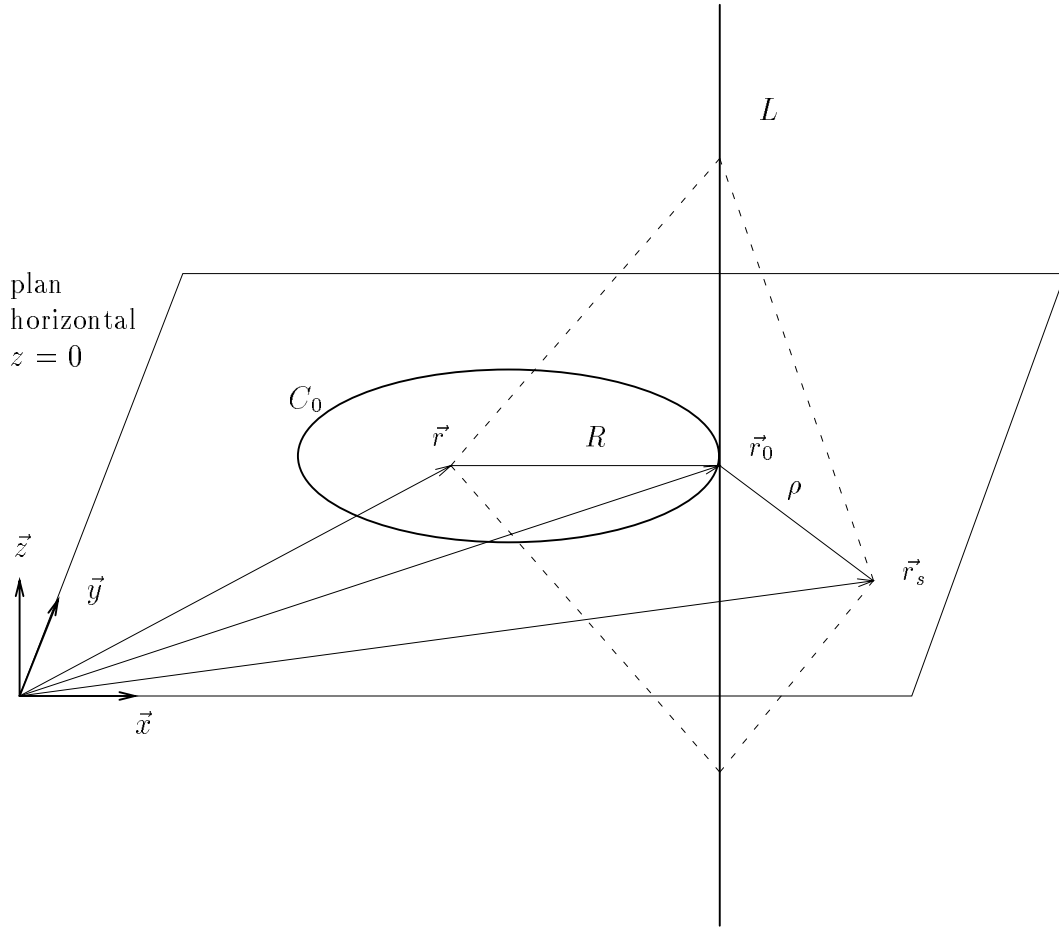


FIG. 3.16 - Point de Phase Stationnaire: Point d'intersection entre le plan horizontal et la ligne verticale infinie L considérée (cf. Fig. 3.15)

Point de Phase Stationnaire

Dans notre cas, la phase ϕ s'exprime (cf. Equ. 3.17):

$$\phi(z_0) = -k(\rho + R)$$

On rappelle que ρ représente la distance entre la source primaire et la source secondaire, et R , la distance entre la source secondaire et le point d'écoute \vec{r} . En l'occurrence, le point de phase stationnaire, qui est défini comme le point où s'annule la dérivée première de la phase, représente donc le minimum de la fonction $\phi(z_0)$, c'est-à-dire qu'il correspond au point qui minimise le trajet reliant la source primaire au point d'écoute en passant par un point de la ligne verticale infinie L considérée (cf. Fig. 3.16). Si la source primaire et le point d'écoute appartiennent au même plan horizontal, défini par l'équation $z = 0$ par convention, il est immédiat que le point de phase stationnaire est situé à l'intersection entre la ligne verticale L et ce plan horizontal, soit:

$$z_s = 0 .$$

Par suite, l'intégrale qui définit la pression induite par la ligne-source L (cf. Equ. 3.14) peut être approchée

par:

$$p_L(\vec{r}, \omega) \simeq \eta_{PS}(z_0) S_0(\omega) \left[\frac{\vec{R}}{R} \cdot \vec{n} \frac{(1 + jkR)}{R} - \frac{\vec{\rho}}{\rho} \cdot \vec{n} \frac{(1 + jk\rho)}{\rho} \right] \frac{e^{-jk(\rho+R)}}{16\pi^2 \rho R} \Big|_{z_0=0} \quad (3.21)$$

Ce résultat exprime que, dans l'infinité de sources secondaires réparties le long de la ligne-source L , la source située au point de phase stationnaire $z_0 = 0$ apporte la contribution prépondérante et qu'il est donc possible de substituer à la ligne-source, une source unique placée en ce point de phase stationnaire. Le même raisonnement est réitéré pour chaque ligne-source verticale et on remplace ainsi chacune d'elles par une source unique située à son point de phase stationnaire (cf. Fig. 3.17). Les différents points de phase stationnaire décrivent le contour C_0 de la section de la colonne verticale Ω_2 correspondant au plan horizontal $z_0 = 0$. A l'ensemble des *lignes-sources* verticales sont donc substitués des *points-sources* distribués le long du contour C_0 . En d'autres termes, la distribution 2D initiale de sources secondaires sur la surface S se réduit maintenant à un réseau linéaire le long de C_0 .

Facteur correctif

L'approximation de la Phase Stationnaire permet de substituer à chaque ligne-source un point-source, cette substitution n'est cependant correcte qu'à condition d'appliquer au signal alimentant la source un facteur de correction η_{PS} (cf. Equ. 3.16 & 3.19) qui vaut dans notre cas (cf. Annexe D):

$$\eta_{PS}(z_0) = \frac{1}{\sqrt{jk} \, 2\pi} \sqrt{\frac{\rho R}{\rho + R}} \quad (3.22)$$

Ce facteur présente deux termes:

- un premier terme qui ne dépend que de la fréquence:

$$\frac{1}{\sqrt{jk} \, 2\pi}$$

- et un second terme qui dépend des positions de la source primaire \vec{r}_s et du point d'écoute \vec{r} :

$$\sqrt{\frac{\rho R}{\rho + R}}$$

ce qui signifie qu'une valeur de correction donnée n'est valable que pour une position de source primaire associée à un point d'écoute.

En pratique, la correction de la phase stationnaire η_{PS} est donc impossible à appliquer stricto sensu. Il existe néanmoins des solutions qui permettent de la prendre en compte de façon plus ou moins approchée [Start, 1996]: ces méthodes seront présentées au chapitre 6 (cf. Section 6.2.3) qui est dédié au problème de la réalisation concrète d'un système holophonique.

Réseau linéaire de sources secondaires

En résumé, l'approximation de la Phase Stationnaire permet de ramener la distribution surfacique de sources secondaires à un réseau linéaire, sous la condition que les sources primaires et les points d'écoute restent cantonnés dans le même plan horizontal [Start, 1996] [Start, 1997] [Verheijen, 1997]. La distribution de sources secondaires initialement réparties sur la surface $\partial\Omega$ se réduit ainsi à son intersection C_0 avec le plan horizontal (cf. Fig. 3.17). Cette approximation s'applique quelle que soit la géométrie de la surface $\partial\Omega$. Dans le cas général, le réseau linéaire C_0 prend la forme d'une *courbe fermée* qui définit une *réseau curviligne* et dont l'exemple type est le cercle (cf. Fig. 3.18a). On peut aussi obtenir un réseau *polygonal* — défini à partir d'un polygone régulier ou non — qui est constitué d'une juxtaposition de réseau rectilignes élémentaires (cf. Fig. 3.18b). De même, si on applique l'approximation de la Phase Stationnaire à une intégrale de Rayleigh au lieu de l'intégrale de Kirchhoff, le plan vertical infini de sources secondaires se ramène à une droite horizontale infinie, c'est-à-dire un *réseau rectiligne* infini (cf. Fig. 3.18c).

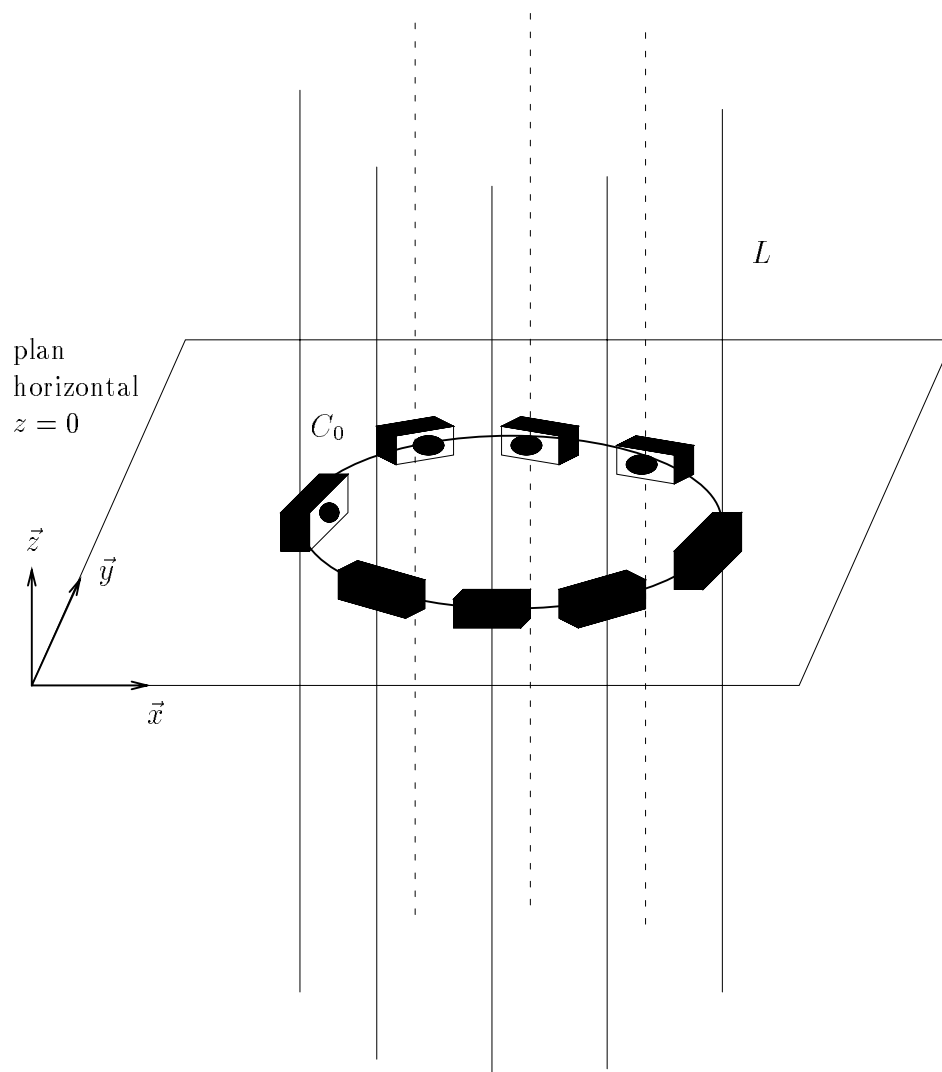
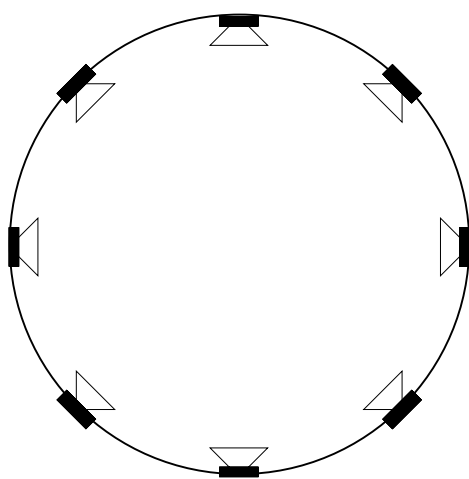
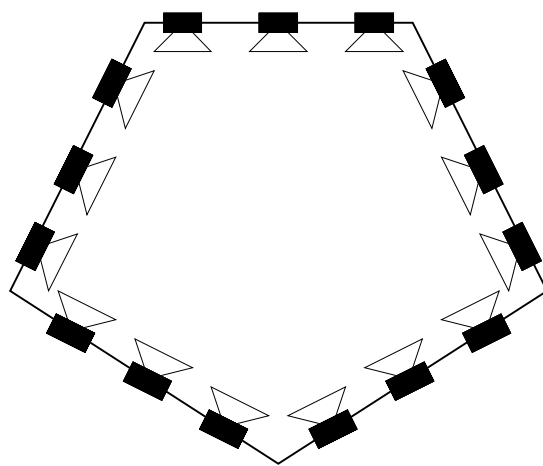


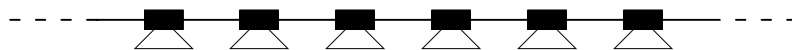
FIG. 3.17 - Approximation de la Phase Stationnaire: A chaque ligne-source verticale est substituée une source unique située à son point de phase stationnaire, ce qui ramène le réseau 2D de sources secondaires au contour 1D C_0 .



(a) Réseau curviligne: Cercle



(b) Réseau curviligne: Polygone



(c) Réseau rectiligne

FIG. 3.18 - Approximation de la Phase Stationnaire: Exemples de réseau 1D de sources secondaires

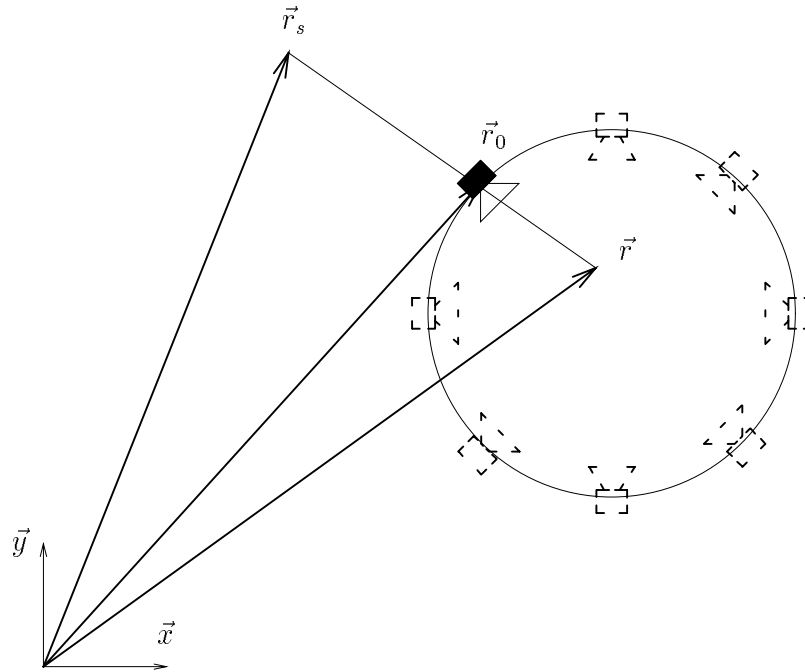


FIG. 3.19 - Théorème de la phase stationnaire appliqué au réseau 1D de sources secondaires

3.4.2 Géométrie du réseau

Remarques préliminaires

La première étape de simplification nous a conduit à une *distribution 1D de sources secondaires*, cependant la géométrie du réseau reste libre, pourvu qu'il s'agisse d'une courbe fermée. En pratique, la géométrie du réseau dépend du type d'application: le réseau de sources secondaires doit entourer l'espace où sont situés les auditeurs. Sa géométrie est donc essentiellement déterminée par la taille de la zone d'écoute, ainsi que par la forme de la salle de restitution dont elle peut éventuellement épouser le contour. La géométrie qui vient le plus spontanément à l'esprit est un *réseau circulaire* centré sur la zone d'écoute, mais l'utilisation d'antennes de haut-parleurs de forme circulaire soulève des difficultés de réalisation pratique. Aussi préfère-t-on des *géométries polygonales* qui sont obtenues en juxtaposant des éléments d'antennes rectilignes. En outre, n réseau polygonal peut être facilement adapté à la géométrie d'une salle.

Il faut bien noter que, quelles qu'elles soient, ces différentes géométries de réseau sont équivalentes, c'est-à-dire qu'elles permettent de reproduire le champ sonore aussi bien l'une que l'autre sur l'intégralité de la zone d'écoute considérée. La seule condition sur la géométrie du réseau réside dans le choix d'une *courbe fermée*. Cependant cette contrainte peut être relâchée si on reprend les résultats du Théorème de la Phase Stationnaire. Le raisonnement utilisé à la section précédente (cf. Section 3.4.1) pour une distribution surfacique de sources secondaires peut être appliqué à une distribution linéique de sources secondaires. On se rend ainsi compte que, pour une position de source primaire \vec{r}_s et un point d'écoute \vec{r} donnés, parmi l'ensemble des sources secondaires, une source secondaire contribue de façon prépondérante au travail de reconstruction: il s'agit de la source située au point de phase stationnaire, qui en l'occurrence correspond à l'intersection entre la courbe C_0 définissant le réseau de sources secondaires et la droite reliant le point \vec{r}_s au point \vec{r} (cf. Fig. 3.19). Ce point minimise en effet le trajet entre la source primaire et le point d'écoute en passant par un point de la courbe C_0 .

Par conséquent, pour une configuration fixe de source primaire et d'auditeur, on pourrait se contenter à la limite d'une seule source secondaire. Cependant, dès lors que la source primaire tourne autour de la

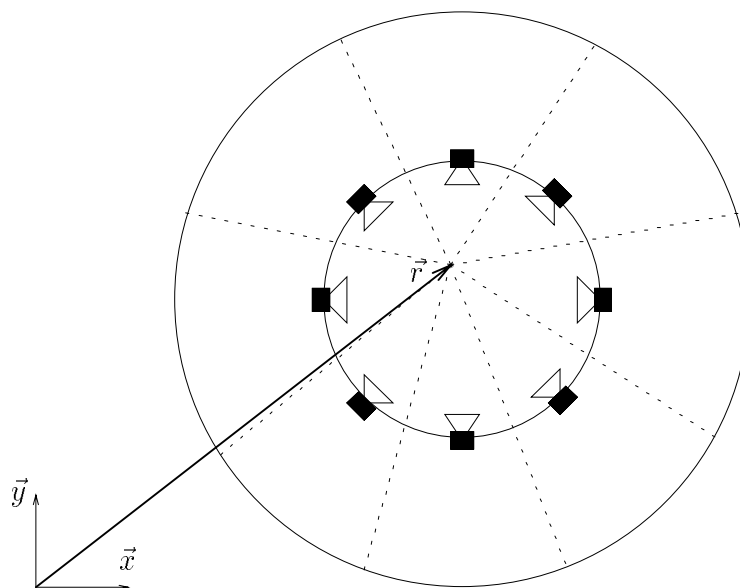


FIG. 3.20 - Décomposition de l'espace des sources primaires en zones élémentaires contrôlées par une seule source secondaire

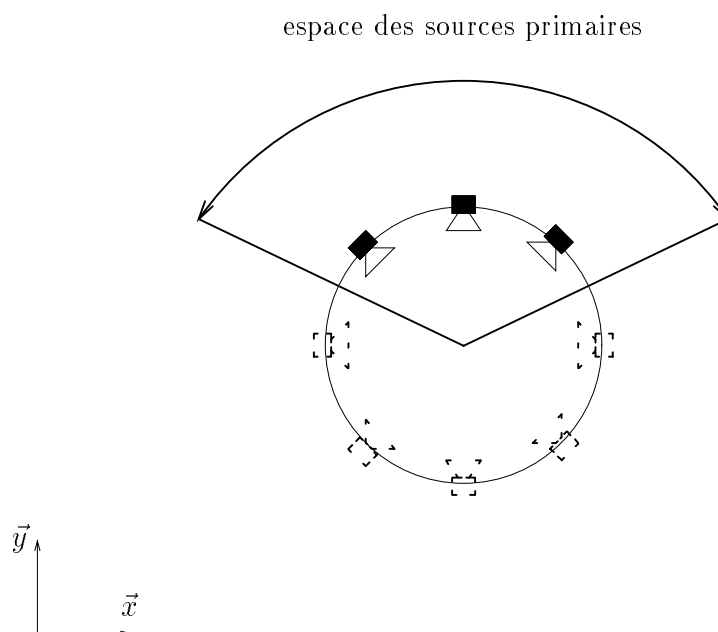


FIG. 3.21 - Restriction de l'espace des sources primaires: Réseau ouvert

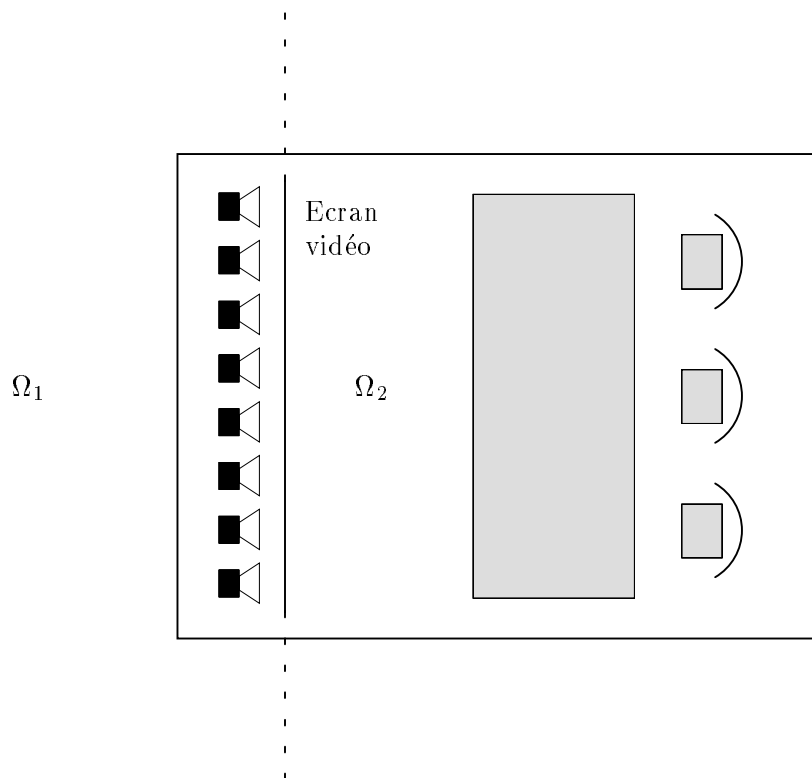


FIG. 3.22 - Restitution holophonique pour la visioconférence: Antenne rectiligne de haut-parleurs disposée derrière l'écran vidéo (l'espace des sources primaires se limite au demi-espace situé derrière l'écran vidéo)

zone d'écoute, les différentes sources secondaires interviennent à tour de rôle. De même, si plusieurs sources primaires interviennent simultanément, ou que la zone d'écoute s'étend à plusieurs auditeurs, le point de phase stationnaire décrit l'ensemble du réseau de sources secondaires, de telle sorte que toutes les sources secondaires soient sollicitées. Pratiquement, on est alors contraint d'activer simultanément l'intégralité des sources secondaires.

En résumé, chaque source secondaire contrôle de façon privilégiée la restitution sonore dans une direction donnée. On peut alors décomposer l'espace des sources primaires en plusieurs sous-espaces alloués à chacune des sources secondaires (cf. Fig. 3.20). La totalité des sources secondaires est donc nécessaire tant que les sources primaires peuvent être situées tout autour de la zone d'écoute, c'est-à-dire que *l'intérêt d'un réseau fermé réside uniquement dans la possibilité de reproduire des sources sonores dans toutes les directions*. Dès lors, si l'espace des sources primaires peut être restreint, il est possible de supprimer une partie des sources secondaires, ce qui conduit à substituer au réseau fermé un *réseau ouvert* (cf. Fig. 3.21). Par exemple, dans un contexte de visioconférence, les sources sonores appartiennent exclusivement au demi-espace situé derrière l'écran vidéo: en première approximation, on peut donc se contenter d'une antenne rectiligne de haut-parleurs parallèle à l'écran (cf. Fig. 3.22). Nous allons vérifier cette idée intuitive sur des simulations numériques¹³ basées sur des géométries non seulement circulaires, mais aussi rectilignes.

¹³. Ces simulations numériques ont été réalisées à partir de routines développées par l'auteur dans l'environnement Matlab et qui sont proposées en annexe E.

Réseau circulaire

Considérons un réseau circulaire de sources secondaires (cf. Fig. 3.23). Supposons qu'on veut synthétiser une source primaire en s_1 (cf. Fig. 3.23). Pour cette configuration, la figure 3.24 reproduit:

- d'une part, l'onde induite par la source primaire le long d'une ligne parallèle à l'axe \vec{x} (cf. Fig. 3.23),
- d'autre part, l'onde restituée par le réseau circulaire de sources secondaires le long de la même ligne.

Dans les deux cas, il s'agit d'une simulation numérique (cf. Annexe E), comme pour l'ensemble des résultats présentés tout au long de cette section. La comparaison de l'onde originale et de l'onde synthétisée montre que les sources secondaires réalisent une reconstruction parfaite du champ primaire.

Décomposons maintenant l'antenne circulaire de sources secondaires en deux sous-antennes semi-circulaires (cf. Fig. 3.25), afin d'évaluer leur contribution relative dans le travail de reconstruction sonore. La figure 3.26 reproduit l'onde synthétisée par les deux antennes semi-circulaires. Il est frappant de constater que le champ induit par l'une des sous-antennes est nul: le champ primaire est donc intégralement reconstruit par une seule sous-antenne, c'est-à-dire qu'une moitié des sources secondaires ne participe absolument pas au travail de reconstruction du champ sonore. Les sources *utiles*, au sens des sources véritablement impliquées dans le travail de reconstruction, sont les sources secondaires situées sur la moitié qui est directement en regard de la source primaire (cf. Fig. 3.25). Si on fait l'analogie avec une source lumineuse, les sources utiles appartiennent à la moitié éclairée du réseau, tandis que les sources inactives correspondent à la moitié qui reste dans l'ombre (cf. Fig. 3.27).

On peut chercher à réduire davantage le réseau de sources secondaires, en le limitant par exemple à un quart de cercle au lieu d'un demi-cercle (cf. Fig. 3.28). Sur la figure 3.29a, on se rend compte que la reconstruction n'est alors plus correcte: au front d'onde se superpose en effet un champ parasite qui prend la forme de deux ondes qui semblent émises par les deux extrémités du réseau de sources secondaires [Boone *et al.*, 1995]. On note que le fait de supprimer des sources secondaires n'altère pas directement la reconstruction du front d'onde, mais se traduit par l'apparition d'ondes additionnelles. L'explication de ce phénomène va nous permettre de mieux comprendre le processus de reconstruction de l'onde sonore qui est réalisé par les sources secondaires.

Analysons le phénomène de reconstruction en un point \vec{r} donné (cf. Fig. 3.30 & 3.31). En ce point, parviennent successivement (cf. Fig. 3.30):

- d'abord l'ondelette qui est émise par la source secondaire correspondant au point de phase stationnaire (cf. Fig. 3.30b),
- puis les ondelettes qui sont issues des sources secondaires situées de part et d'autre du point de phase stationnaire et qui parviennent au point \vec{r} avec un retard croissant et une amplitude décroissante en raison du trajet de plus en plus long que l'ondelette doit parcourir (cf. Fig. 3.30c).

On se rend compte que *seules les premières ondelettes interviennent dans la reconstruction du front d'onde primaire, c'est-à-dire que toutes les autres ondelettes forment un signal parasite résiduel qu'il faut annuler*, et on observe en effet que l'ensemble des ondelettes se combinent, en fonction de leur amplitude et de leur retard, de telle sorte qu'elles s'annulent de proche en proche, en dehors de la reconstruction de l'onde primaire (cf. Fig. 3.31). Il convient de remarquer combien l'ensemble des sources secondaires est parfaitement coordonné en amplitude et en retard de façon à ce qu'en chaque point \vec{r} de l'espace de restitution, les contributions de toutes les sources secondaires s'annulent à l'exception des sources situées au point de phase stationnaire et à son voisinage immédiat, la position de ces dernières changeant en fonction du point \vec{r} considéré. Par suite, quand on supprime une partie des sources secondaires, le travail d'annulation du signal d'erreur résiduel est incomplet et il reste les deux ondelettes émises par les sources secondaires situées aux extrémités du réseau partiel de sources secondaires et qui vont donc constituer le signal parasite observé sur la figure 3.29a. On vérifie d'ailleurs que la pression restituée par l'arc de cercle complémentaire (cf. Fig. 3.29b) ne représente rien d'autre que les deux ondes parasites en opposition de phase, ce qui met clairement en évidence le travail d'annulation de proche en proche des sources secondaires. Il en résulte bien que, lorsque la totalité du réseau de sources secondaires est prise en compte, les ondelettes parasites disparaissent complètement.

Les deux ondes résiduelles qui suivent le front d'onde primaire définissent l'erreur de reconstruction liée à la limitation du réseau de sources secondaires. Un examen attentif des résultats obtenus avec les sous-antennes semi-circulaires indiquent que deux ondes résiduelles sont aussi présentes, mais leur amplitude

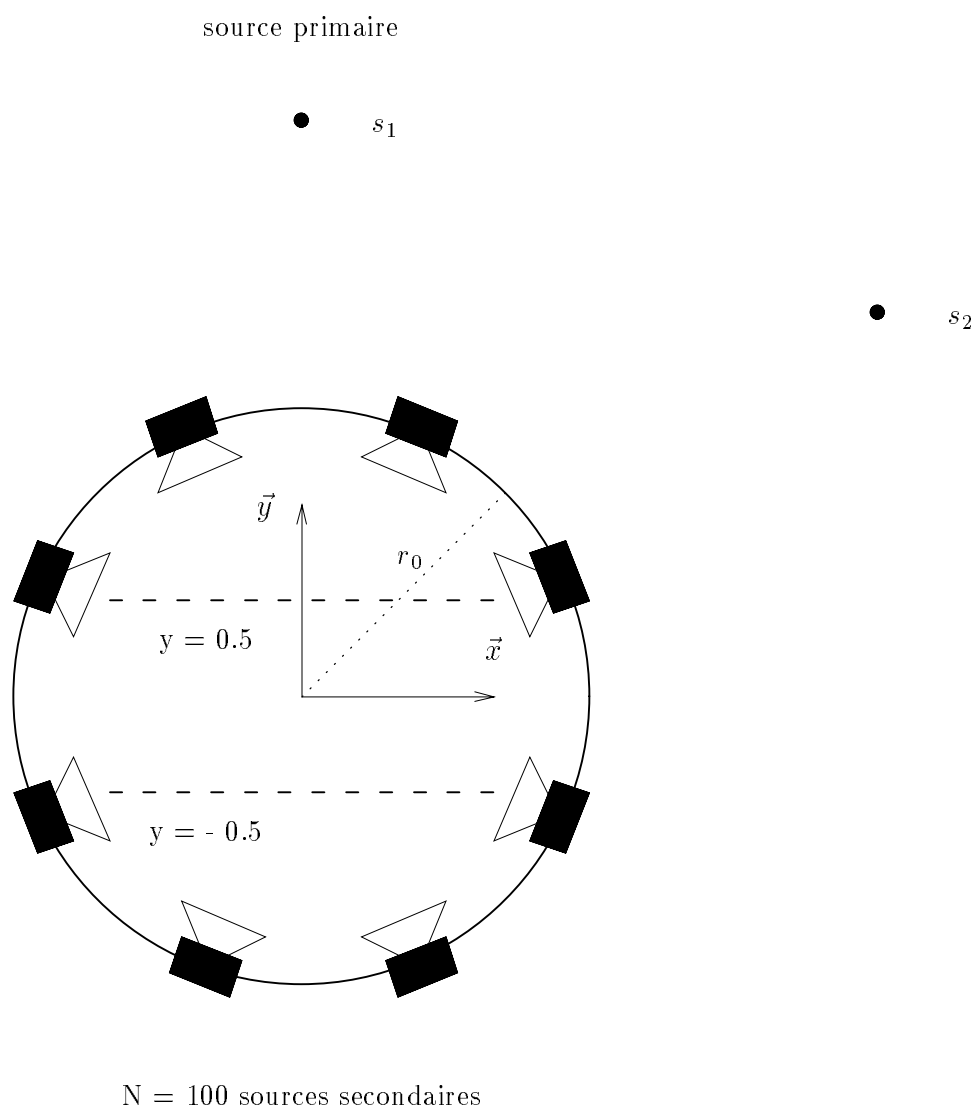


FIG. 3.23 - Réseau circulaire: Configuration des sources primaires, des sources secondaires et des récepteurs

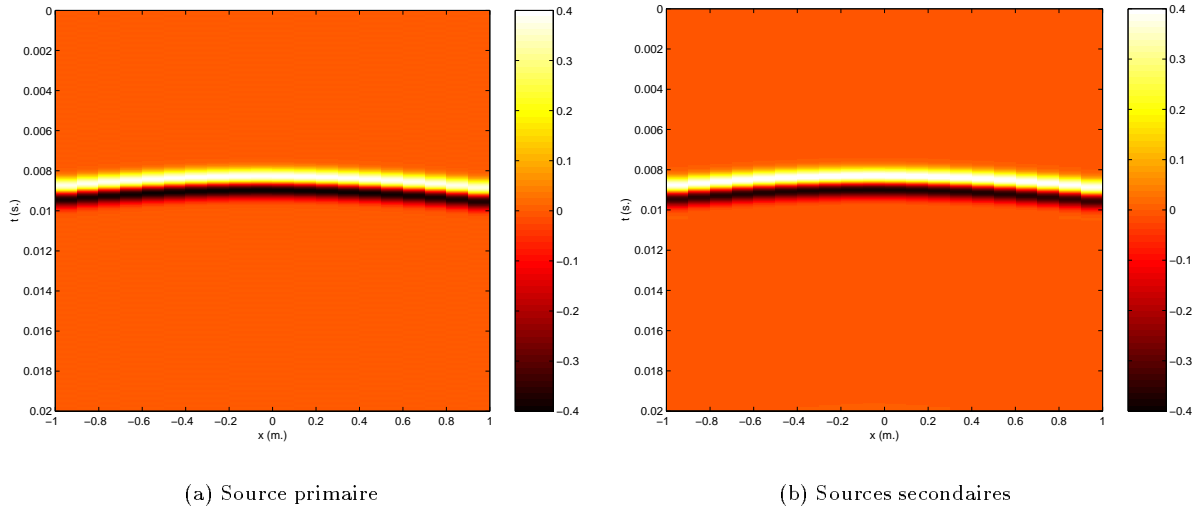


FIG. 3.24 - Réseau circulaire: Comparaison entre l'onde de pression originale et onde de pression synthétisée par les sources secondaires (la pression acoustique est représentée en fonction du temps le long d'une ligne parallèle à l'axe (O_x) en $y = 0.5$ m., la source primaire est un monopôle situé en $s_1[0., 3., 0.]$ et qui émet une impulsion gaussienne de fréquence $f = 400$ Hz, les sources secondaires sont distribuées le long d'un cercle de rayon $r_0 = 1.5$ m. et au total $N = 100$ sources secondaires sont utilisées, cf. Fig. 3.23, cf. Annexes E & F)

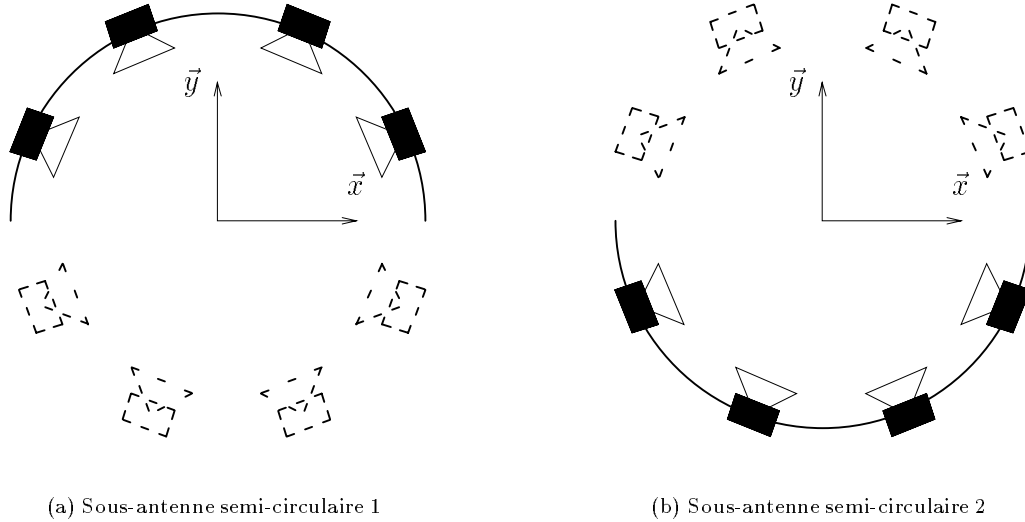


FIG. 3.25 - Décomposition du réseau circulaire en deux sous-antennes semi-circulaires

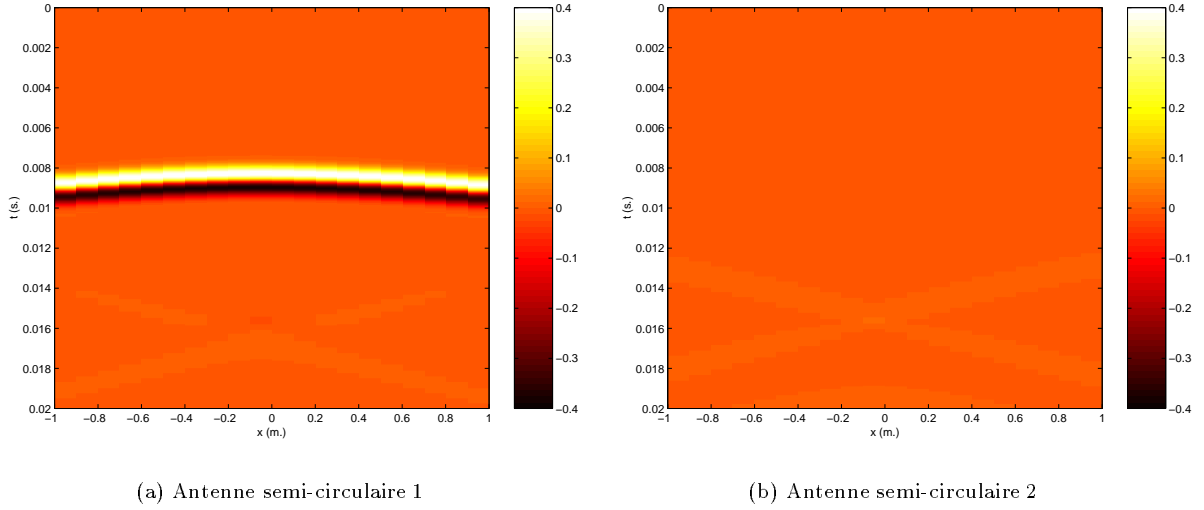


FIG. 3.26 - Réseau circulaire: Contribution relative des sous-antennes semi-circulaires (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, $r_0 = 1.5$ m. et $N = 100$, cf. Fig. 3.23 & 3.25, cf. Annexes E & F)

est si faible qu'on les devine à peine (cf. Fig. 3.26a). Dans une seconde interprétation, on peut également les identifier à des ondes diffractées résultant de la propagation de l'onde acoustique à travers l'ouverture délimitée par la taille du réseau de sources secondaires. Supprimer des sources secondaires équivaut en effet à interposer un écran acoustiquement opaque entre la source primaire et la zone de restitution. L'interprétation de l'erreur de reconstruction en termes de diffraction est surtout intéressante lorsqu'on cherche à la corriger et ce phénomène est analysé en détail dans le chapitre consacré au problème de la troncature du réseau de sources secondaires (cf. Chapitre 5).

De ce qui précède, on retient l'idée qu'il est possible de réduire le réseau circulaire. On peut le tronquer à sa moitié, auquel cas la reconstruction reste correcte, mais si on cherche à le limiter davantage, on introduit une erreur de reconstruction. Dans le premier cas, il faut cependant noter que la reconstruction réalisée par une antenne semi-circulaire ne reste correcte que pour les sources primaires dont l'azimut est voisin de $\varphi = 90^\circ$ et tant que l'auditeur demeure à l'intérieur de l'espace délimité par le demi-arc de cercle. La figure 3.32 reproduit l'onde de pression synthétisée par l'antenne semi-circulaire lorsque la source primaire est située en $s_2[3., 2, 0.]$: on vérifie que le front d'onde primaire est suivi d'une onde résiduelle d'erreur. Il convient de remarquer combien l'amplitude de ces ondes reste faible par rapport au front d'onde principal. Par ailleurs, la zone de restitution correcte est limitée à l'espace compris à l'intérieur du demi-cercle. L'onde de pression restituée à l'extérieur de ce demi-cercle pour la position initiale de la source primaire en s_1 est illustrée sur la figure 3.33 et on y relève effectivement la présence d'un signal d'erreur non nul¹⁴.

En conclusion, au delà de l'approximation de la phase stationnaire, il est encore possible de limiter davantage le réseau de sources secondaires, ce qui conduit à des *réseaux ouverts*. Il faut cependant bien garder présent à l'esprit que cette nouvelle simplification se paye par une *restriction de l'espace des sources primaires et de la zone d'écoute*, puisqu'en réduisant l'antenne circulaire à un demi-cercle, on limite l'espace des sources primaires à un demi-espace et la zone d'écoute à un demi-disque.

14. Au chapitre 5 seront décrites des méthodes pour corriger l'erreur de reconstruction due à la limitation du réseau de sources secondaires en réduisant l'amplitude de l'onde diffractée.

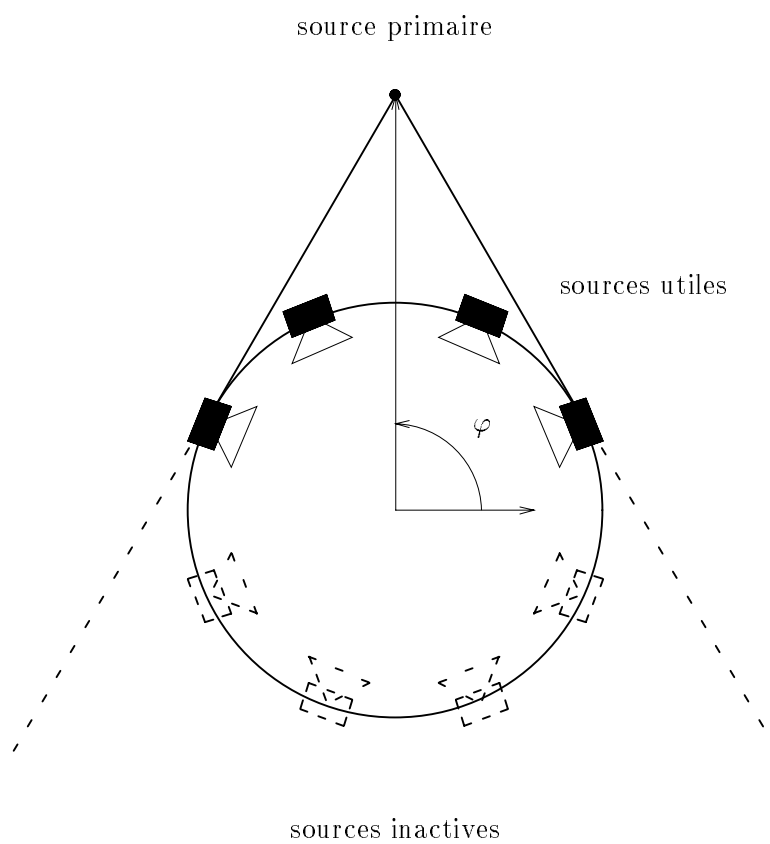
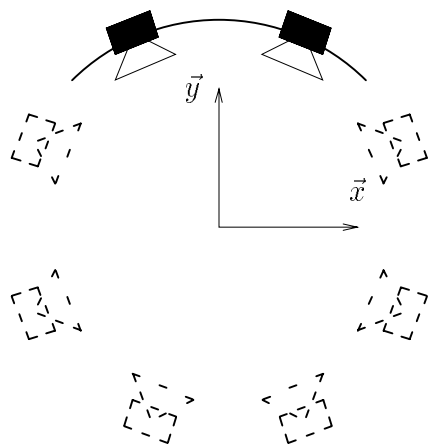
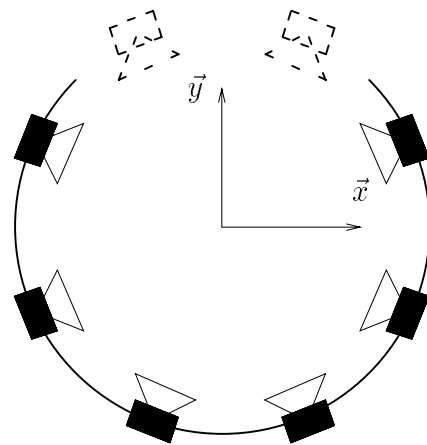


FIG. 3.27 - Synthèse du champ acoustique d'un monopôle par une antenne circulaire: Identification des sources utiles et sources inactives

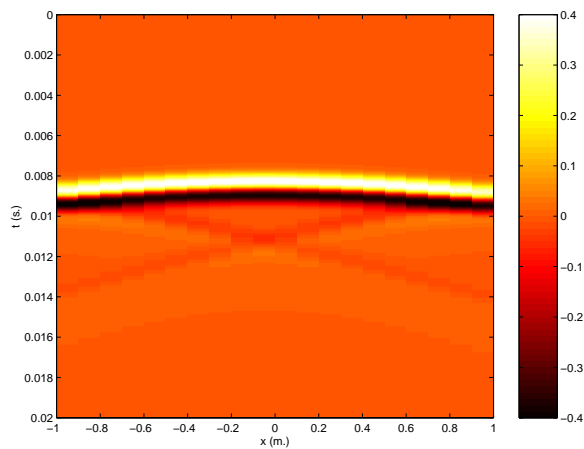


(a) Quart de cercle

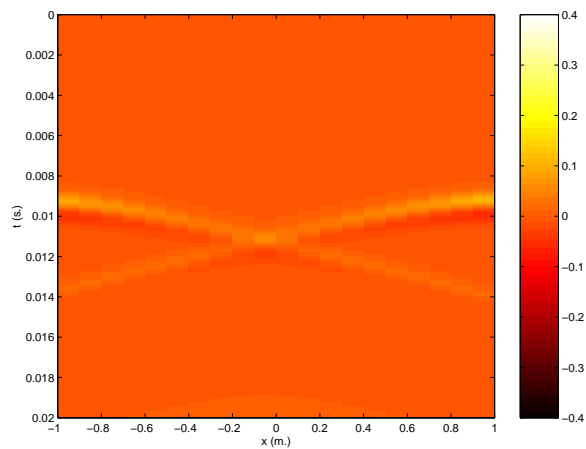


(b) Arc de cercle complémentaire

FIG. 3.28 - Réseau circulaire: Décomposition en deux sous-antennes représentant respectivement un quart du cercle et son complément

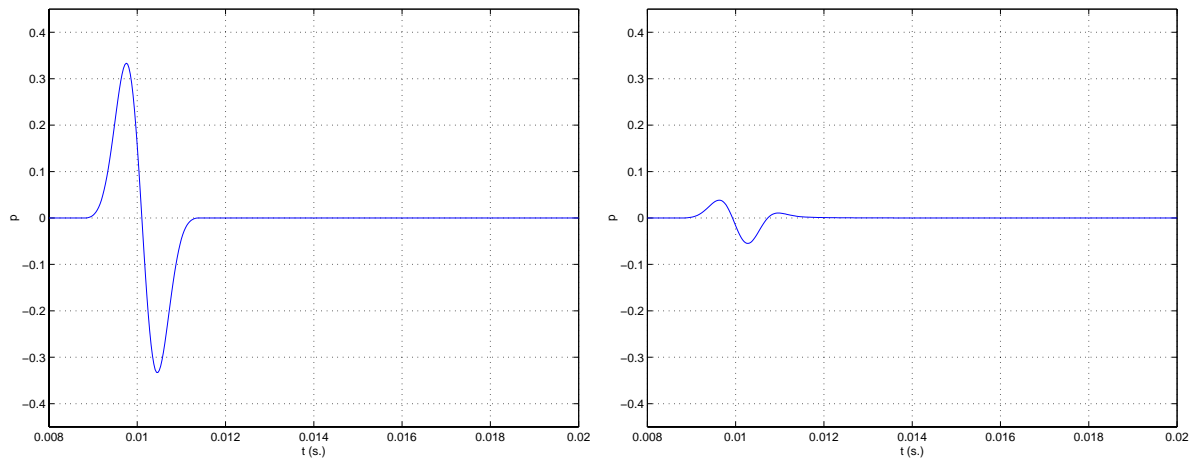


(a) Quart de cercle



(b) Arc de cercle complémentaire

FIG. 3.29 - Réseau circulaire: Contribution relative d'un quart de cercle et de son complément (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, $r_0 = 1.5$ m. et $N = 100$, cf. Fig. 3.23 & 3.28, cf. Annexes E & F)



(a) Onde Primaire

(b) Ondelette émise par la source secondaire située au point de phase stationnaire

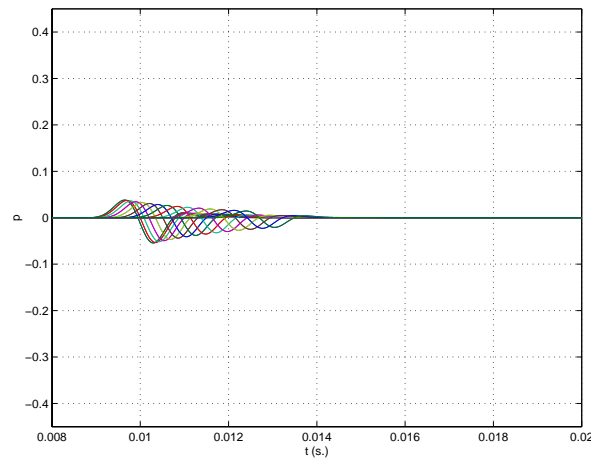
(c) Série d'ondelettes émises par des sources secondaires de plus en plus éloignées du point de phase stationnaire (contributions des $N = 30$ sources secondaires situées de part et d'autre du point de phase stationnaire)

FIG. 3.30 - Décomposition du processus de reconstruction de l'onde primaire en un point: Ondelettes émises par les sources secondaires (Récepteur en $\vec{r}[0., 0., 0.]$, source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, réseau circulaire: $r_0 = 1.5$ m. et $N = 100$, cf. Fig. 3.23, cf. Annexes E & F)

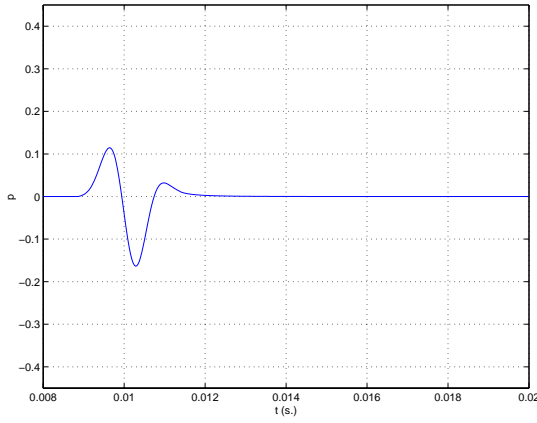
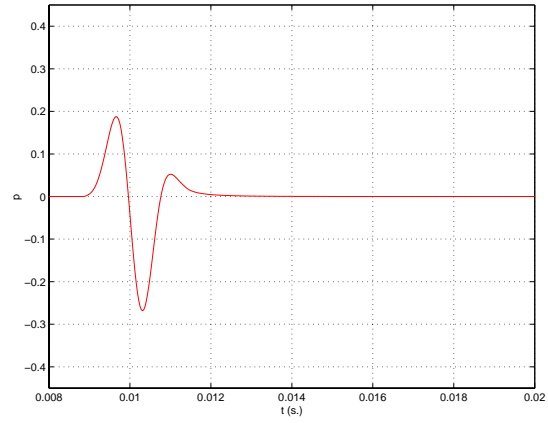
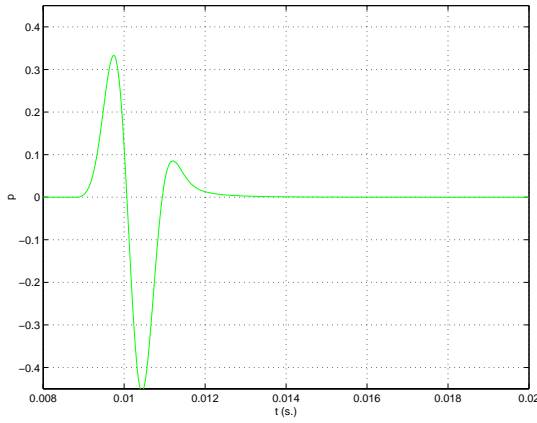
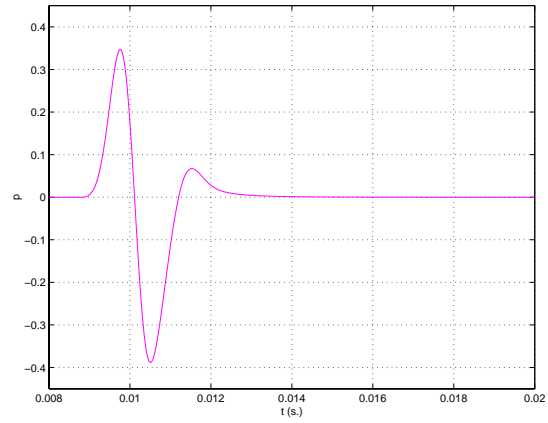
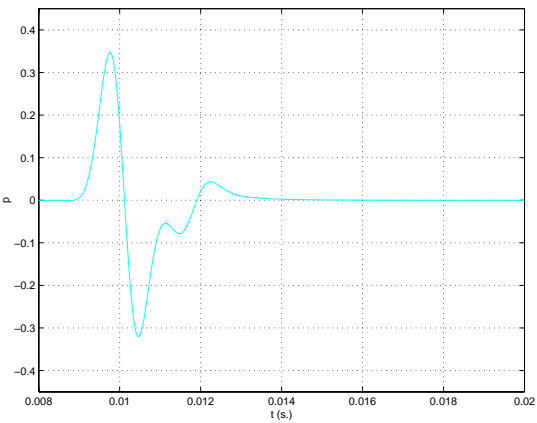
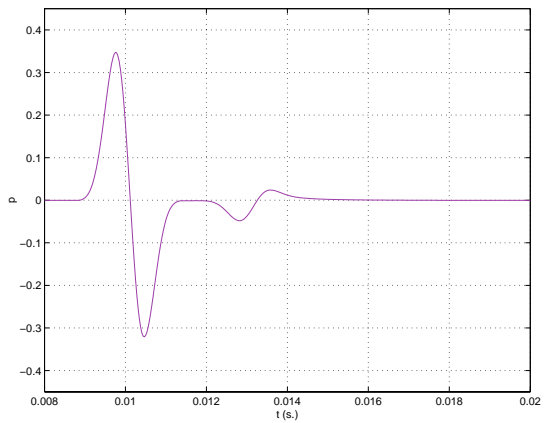

 (a) Sommation des $N = 3$ premières ondelettes

 (b) Sommation des $N = 5$ premières ondelettes

 (c) Sommation des $N = 11$ premières ondelettes

 (d) Sommation des $N = 15$ premières ondelettes

 (e) Sommation des $N = 21$ premières ondelettes

 (f) Sommation des $N = 31$ premières ondelettes

FIG. 3.31 - Décomposition du processus de reconstruction de l'onde primaire en un point: Sommation des ondelettes (Récepteur en $\vec{r}[0.,0.,0.]$, source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, réseau circulaire: $r_0 = 1.5$ m. et $N = 100$, cf. Fig. 3.23, cf. Annexes E & F)

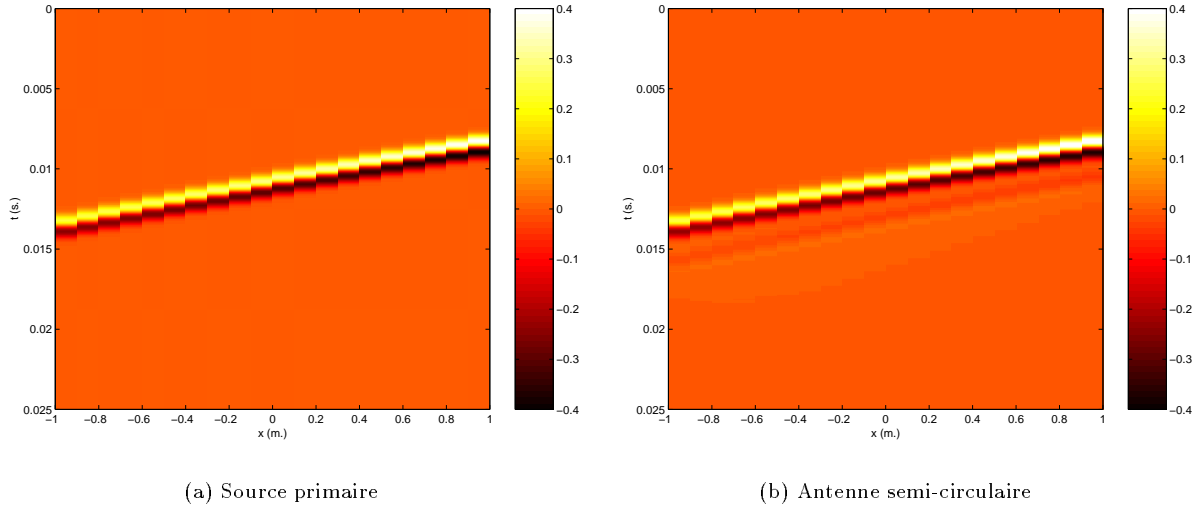


FIG. 3.32 - Réseau circulaire: Onde de pression originale et onde de pression synthétisée par l'antenne semi-circulaire 1 pour la source primaire en $s_2[3., 2., 0.]$ (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, $r_0 = 1.5$ m. et $N = 100$, cf. Fig. 3.23 & 3.25, cf. Annexes E & F)

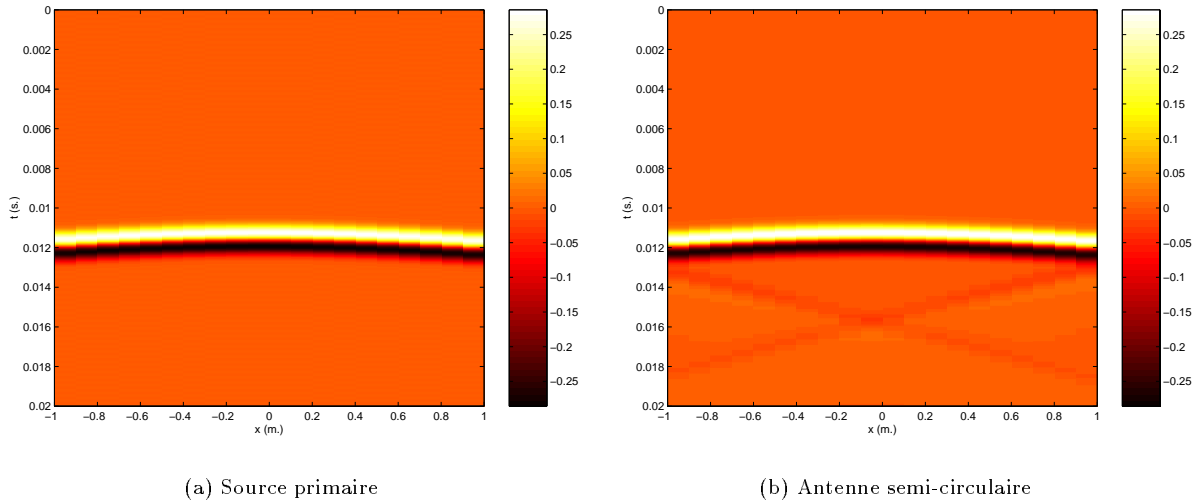


FIG. 3.33 - Réseau circulaire: Onde de pression originale et onde de pression synthétisée par l'antennes semi-circulaire 1 en $y = -0.5$ m. (source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, $r_0 = 1.5$ m. et $N = 100$, cf. Fig. 3.23 & 3.25, cf. Annexes E & F)

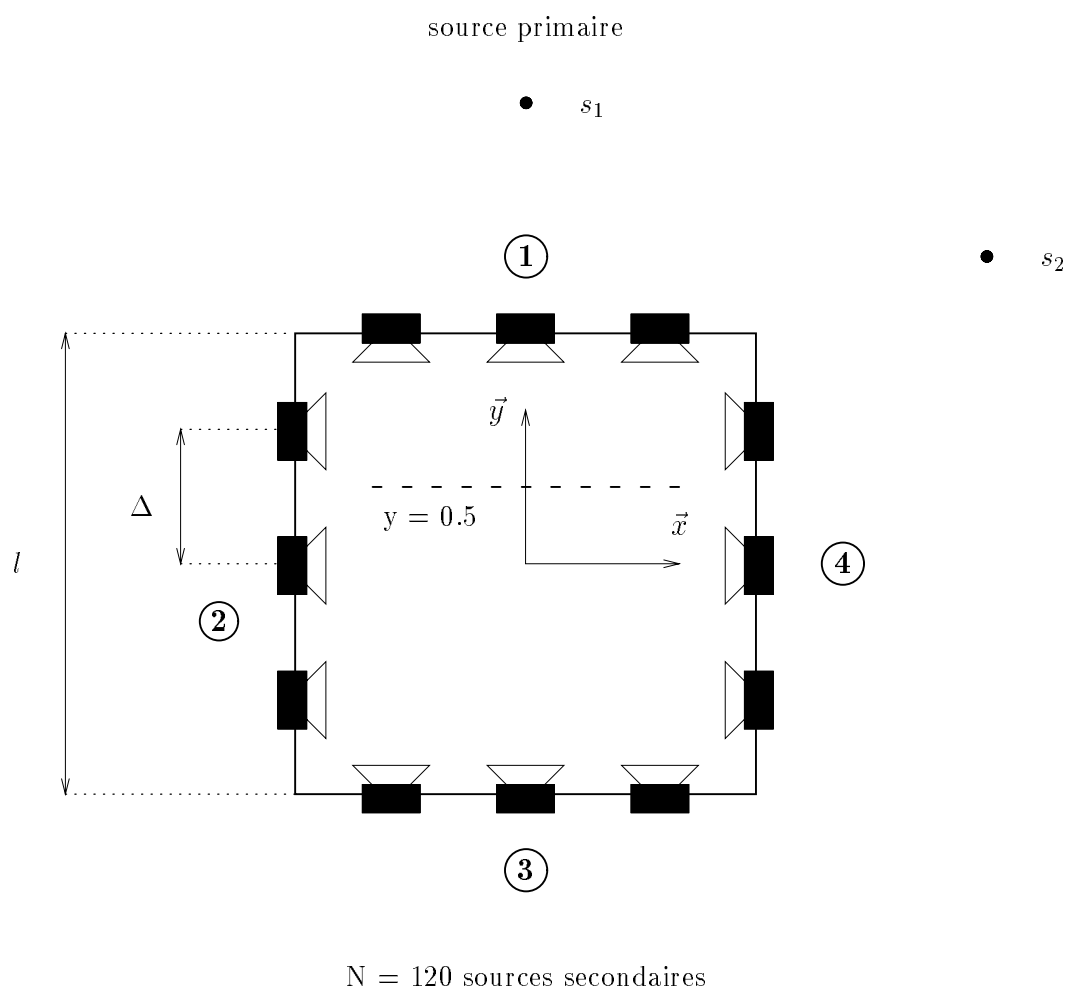


FIG. 3.34 - Réseau carré: Configuration des sources primaires, des sources secondaires et des récepteurs

Réseau carré

Après le réseau circulaire, intéressons-nous au cas d'un réseau polygonal, dont le réseau carré constitue l'un des exemples les plus simples. La disposition des sources primaires, des sources secondaires et des récepteurs est reportée sur la figure 3.34.

L'onde synthétisée par le réseau carré de sources secondaires pour simuler un monopôle situé en s_1 est représentée sur la figure 3.35. On vérifie comme pour le réseau circulaire que le front d'onde est parfaitement reconstruit par le réseau carré. La figure 3.36 isole les contributions relatives des quatre côtés du réseau (cf. Fig. 3.34). On se rend compte que le travail de reconstruction est réalisé pour l'essentiel par un seul côté, le côté 1.

On en retire plusieurs idées:

- *La reproduction du champ sonore est assurée pour l'essentiel par un seul des côtés*: dans le cas d'une source primaire située en s_1 , il s'agit du côté numéroté 1, mais, plus généralement il s'agit du côté qui s'interpose directement entre la source primaire et l'auditeur, c'est-à-dire le côté auquel appartient le point de phase stationnaire.
- Sur l'onde restituée par ce côté, le front d'onde primaire est accompagné de deux ondes parasites qui traduisent l'erreur de reconstruction et qui résultent de la réduction du réseau carré à un seul des ses côtés, comme on l'a vu précédemment pour le réseau circulaire quand il est limité à un arc de cercle.
- *Les segments adjacents au côté principal* (côtés 2 et 4 pour la source primaire en s_1) *ne sont pas directement impliqués dans le travail de reconstruction du front d'onde*, mais leur rôle se borne, de la même façon que pour l'arc de cercle complémentaire du réseau circulaire, à générer les deux ondes parasites en opposition de phase afin d'*annuler l'erreur de reconstruction* présente sur l'onde synthétisée par le segment principal.
- *L'onde induite par le segment opposé au côté principal* (côté 3 pour la source primaire en s_1) *est nulle*.

Par suite, on pourrait limiter le réseau de sources secondaires aux trois côtés numérotés 1, 2 et 4. Si on rapporte ces résultats à ceux du réseau circulaire, les côtés 1, 2 et 4 correspondent à l'antenne semi-circulaire active (1), tandis que le côté 3 s'identifie à l'antenne semi-circulaire inactive (2).

Les figures 3.37 et 3.38 reproduisent le champ obtenu pour une source primaire excentrée située en s_2 (cf. Fig. 3.34). En ce cas, le travail de reconstruction est assuré par deux côtés, les côtés numérotés 1 et 4, étant donnée la position de la source primaire qui est située dans une zone intermédiaire entre ces deux côtés. Les contributions des deux autres côtés sont quasiment nulles. Par suite, en limitant le réseau de sources secondaires aux deux côtés 1 et 4, le signal d'erreur est presque inexistant. Un réseau combinant deux éléments d'antenne rectiligne semble donc préférable à une seule antenne rectiligne [Boone *et al.*, 1995].

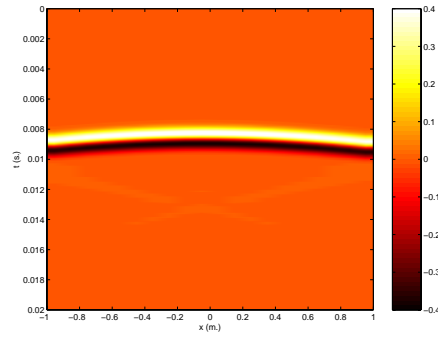


FIG. 3.35 - Réseau carré: Onde de pression synthétisée par les sources secondaires pour simuler une source primaire en s_1 (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 120$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)

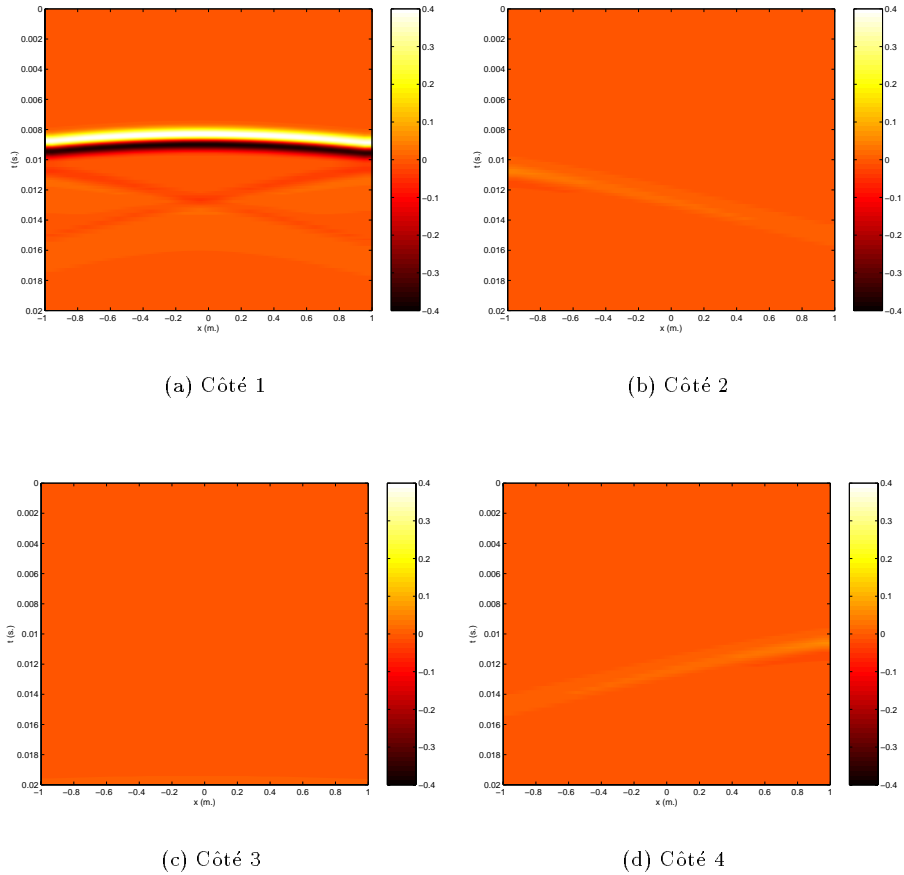


FIG. 3.36 - Réseau carré: Contributions des quatre côtés pour une source primaire centrée (source primaire en s_1 , récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 120$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)

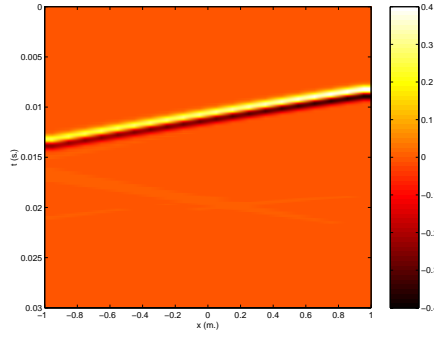
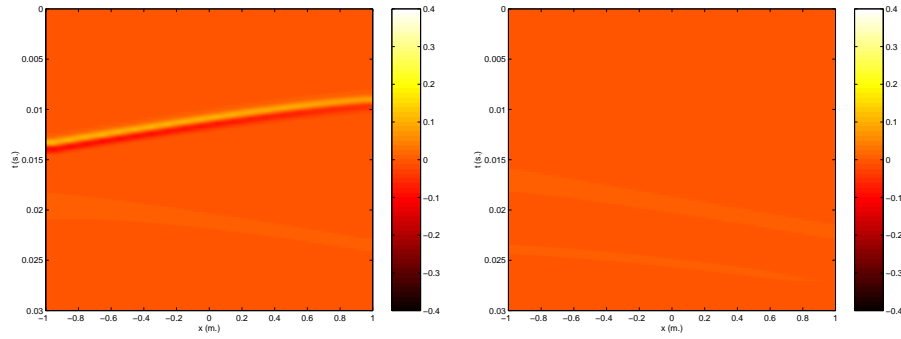
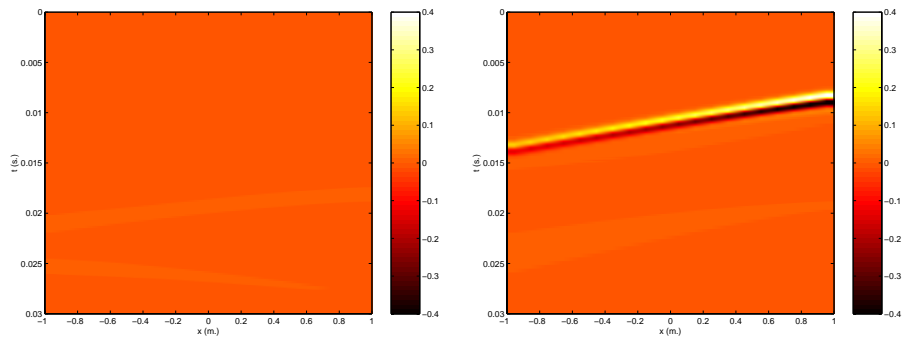


FIG. 3.37 - Réseau carré: Onde de pression synthétisée par les sources secondaires pour une source primaire excentrée (source primaire en s_2 , récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 120$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)



(a) Côté 1

(b) Côté 2



(c) Côté 3

(d) Côté 4

FIG. 3.38 - Réseau carré: Contributions des quatre côtés pour une source primaire excentrée (source primaire en s_2 , récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 120$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)

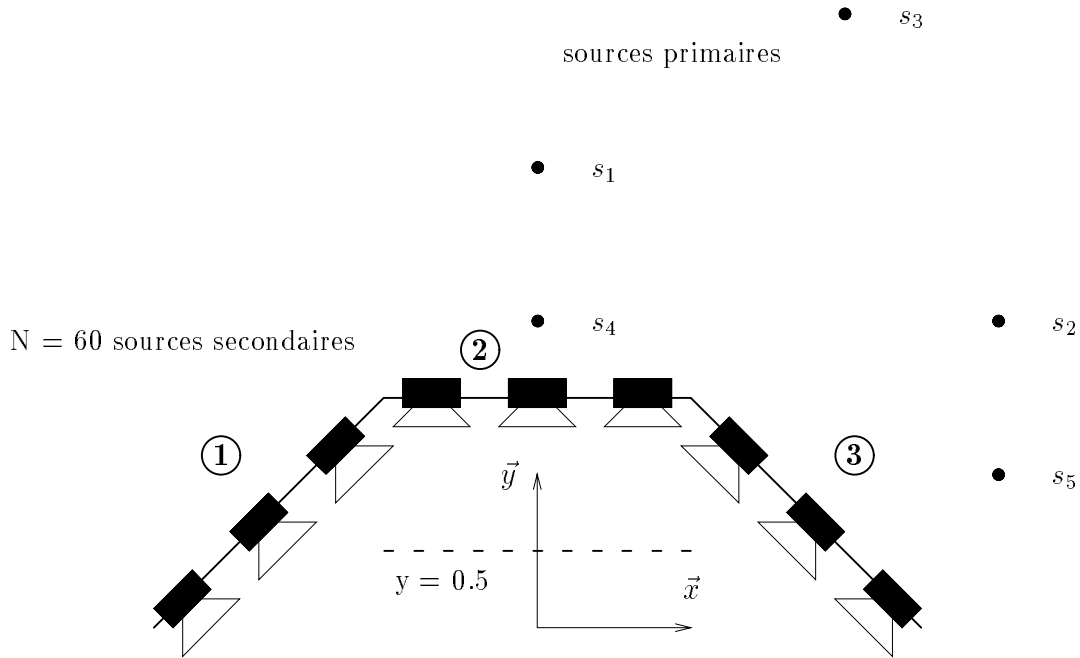


FIG. 3.39 - Réseau polygonal élémentaire (une antenne rectiligne principale — côté 2 — associée à deux antennes latérales — côtés 1 et 3 —): Configuration des sources primaires, des sources secondaires et des récepteurs

Réseau polygonal élémentaire

L'étude menée sur le réseau carré nous conduit à considérer un *réseau polygonal élémentaire* constitué de trois antennes rectilignes (cf. Fig. 3.39), dans lesquelles on identifie une antenne principale et deux antennes latérales qui sont disposées aux extrémités de l'antenne principale et dont le rôle principal est d'annuler le signal d'erreur de reconstruction de l'antenne principale [Boone *et al.*, 1995] [Start, 1996].

La figure 3.40 illustre l'onde synthétisée par les sources secondaires pour simuler une source primaire centrée en s_1 et une source excentrée en s_2 (cf. Fig. 3.39). Dans le premier cas, comme pour l'antenne semi-circulaire (cf. Fig. 3.26a), le front d'onde est parfaitement reconstruit, tandis que pour la source primaire excentrée, il est suivi d'une onde résiduelle qui traduit l'erreur de reconstruction. Pour une restitution optimale, un réseau polygonal élémentaire de ce type ne peut être raisonnablement utilisé que pour synthétiser des sources primaires situées dans le domaine directement en regard de l'antenne principale (côté 2 sur la figure 3.39). Si on désire étendre l'espace des sources primaires, il convient d'ajouter des antennes rectilignes complémentaires judicieusement disposées.

Les figures 3.41 et 3.42 comparent les contributions relatives des trois antennes rectilignes élémentaires qui constituent le réseau polygonal élémentaire pour les deux positions de source primaire s_1 et s_2 . Dans les deux cas, la reproduction du champ sonore est essentiellement assurée par une seule des trois antennes élémentaires: ce rôle est tenu par l'antenne principale pour les sources situées dans la zone centrale, mais il échoit aux sous-antennes 1 ou 3, dès que la source primaire bascule dans l'une des zones latérales. Une restitution correcte pour ces zones implique donc l'ajout d'antennes supplémentaires aux extrémités des antennes 1 et 3.

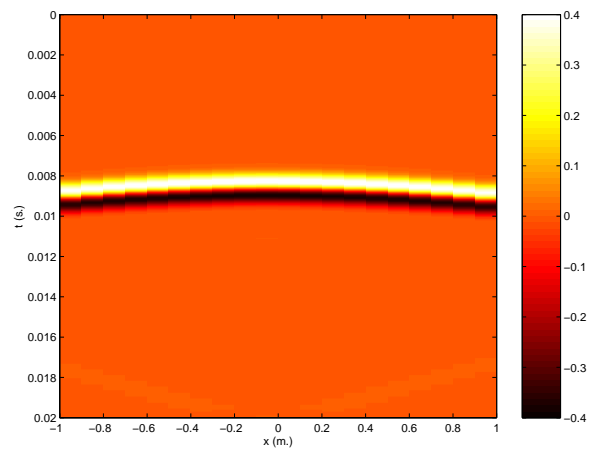
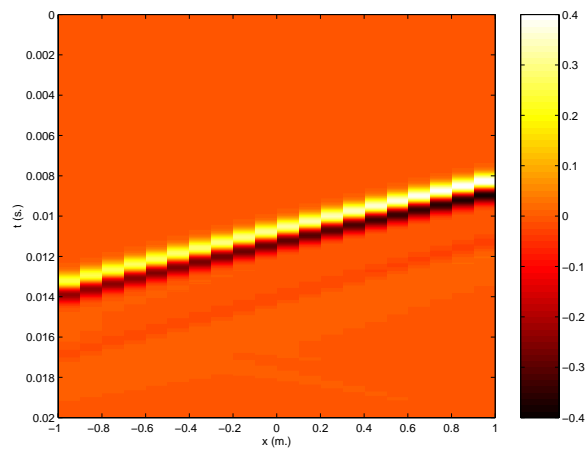
(a) Source primaire centrée (position s_1)(b) Source primaire excentrée (position s_2)

FIG. 3.40 - Réseau polygonal élémentaire: Onde de pression synthétisée par les sources secondaires (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, antenne rectiligne élémentaire de longueur $l = 2$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 61$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.39, cf. Annexes E & F)

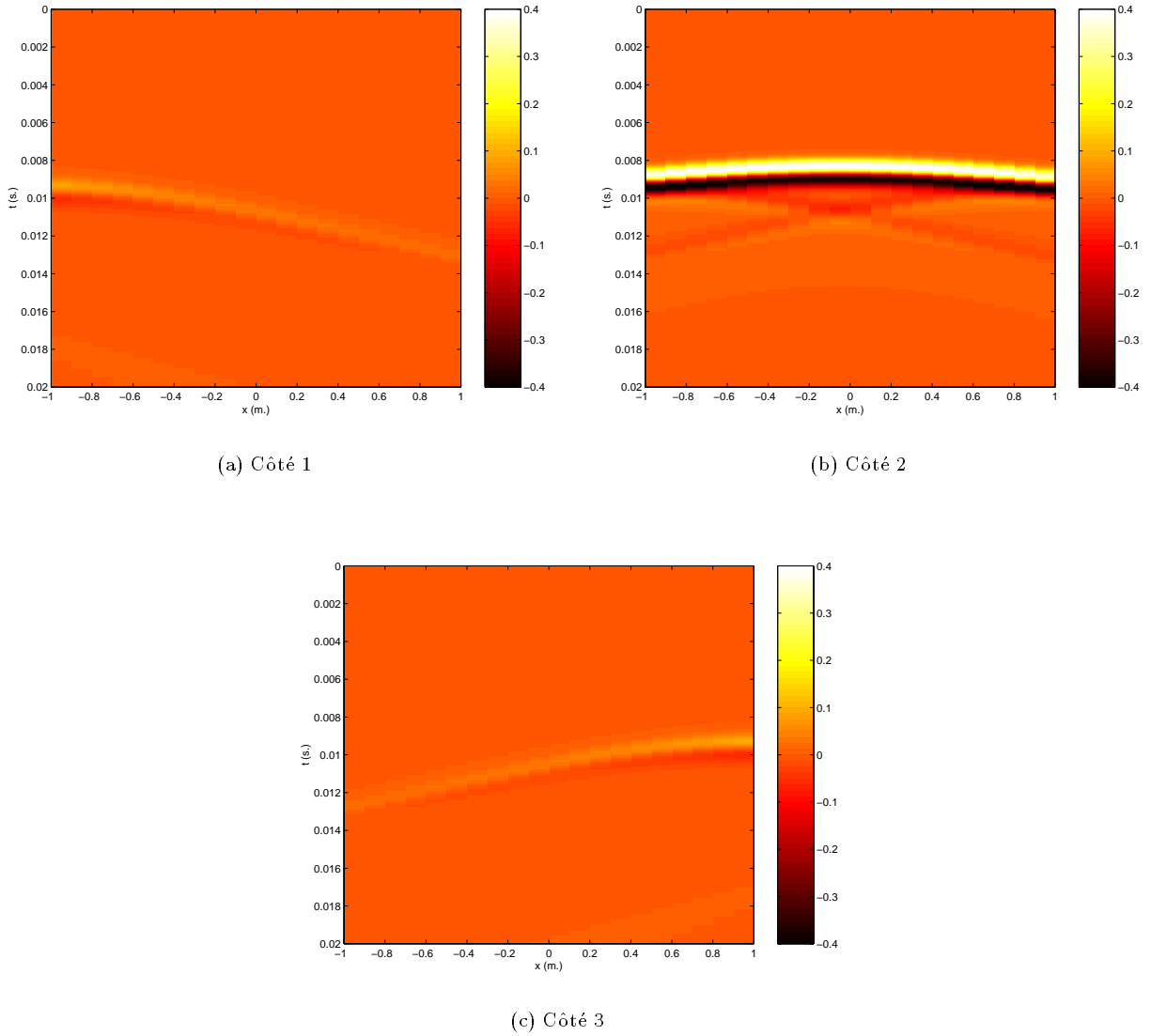


FIG. 3.41 - Réseau polygonal élémentaire: Contribution des trois antennes rectilignes élémentaires pour la source primaire en s_1 (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, antenne rectiligne élémentaire de longueur $l = 2$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 61$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.39, cf. Annexes E & F)

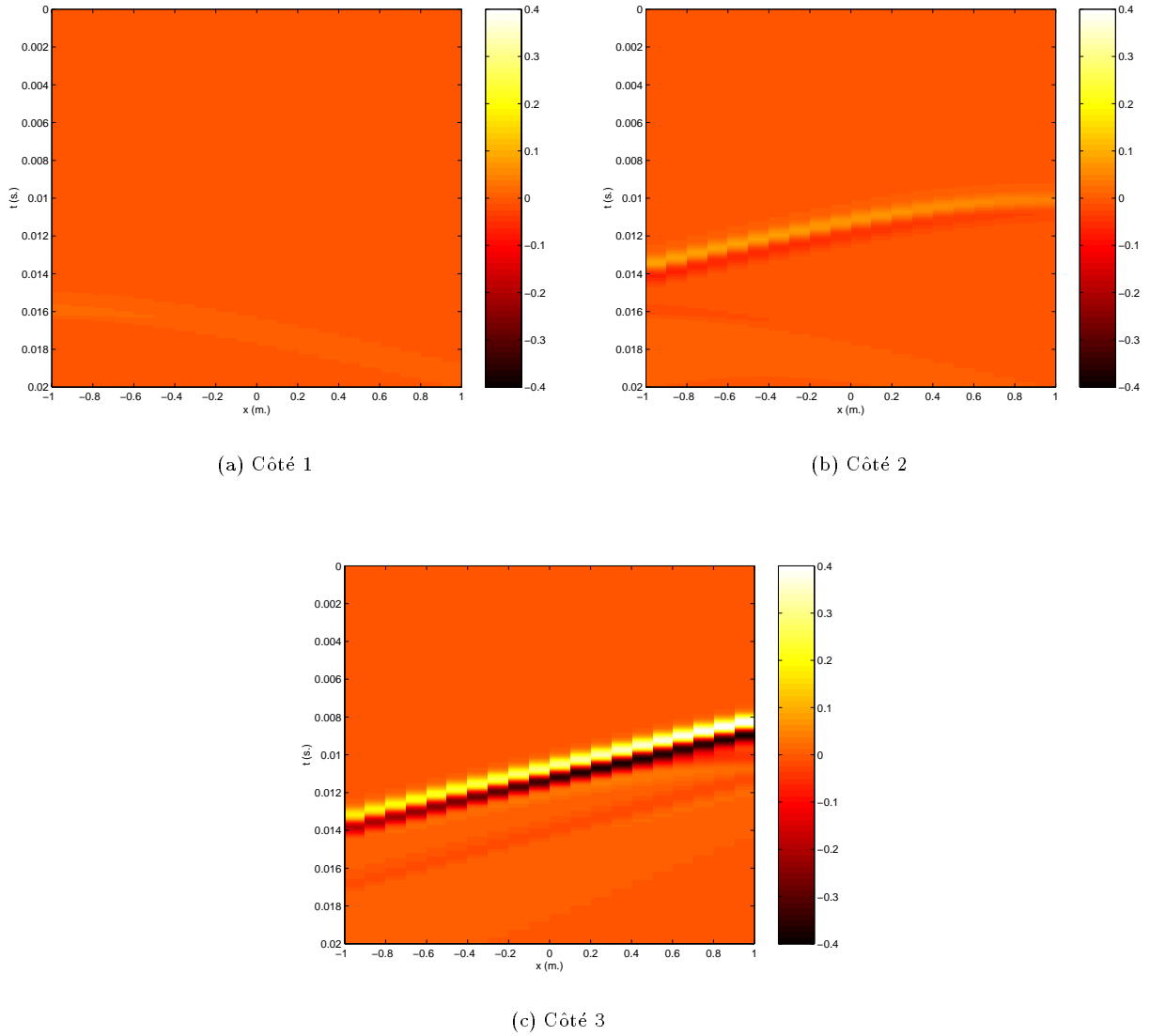


FIG. 3.42 - Réseau polygonal élémentaire: Contribution des trois antennes rectilignes élémentaires pour la source primaire en s_2 (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, antenne rectiligne élémentaire de longueur $l = 2$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 61$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.39, cf. Annexes E & F)

Conclusion

De l'ensemble des résultats présentés au cours de cette section, on retiendra l'idée qu'il est possible, en vertu du Théorème de la Phase Stationnaire, de limiter le réseau fermé de sources secondaires à un réseau ouvert, à condition de restreindre l'espace des sources primaires et la zone d'écoute. Cette idée a été illustrée sur des géométries curvilignes et rectilignes. Il appartient dès lors au concepteur d'adapter la géométrie du réseau en fonction des contraintes imposées par l'application quant à l'espace des sources primaires et la zone d'écoute.

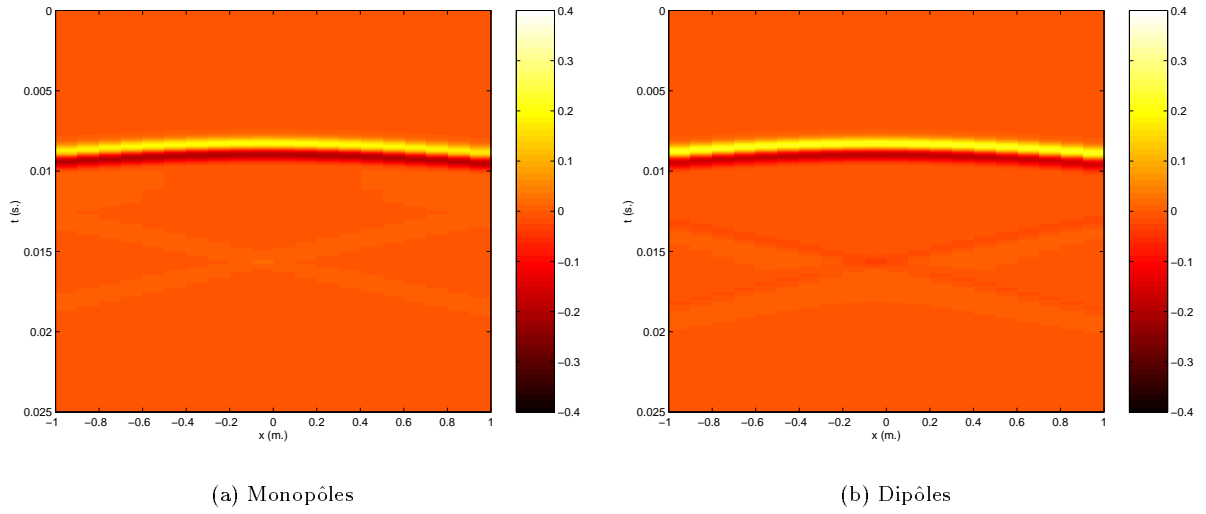


FIG. 3.43 - Réseau circulaire: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires de la sous-antenne circulaire 1 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, $r_0 = 1.5$ m. et $N = 100$, cf. Fig. 3.23 & 3.25, cf. Annexes E & F)

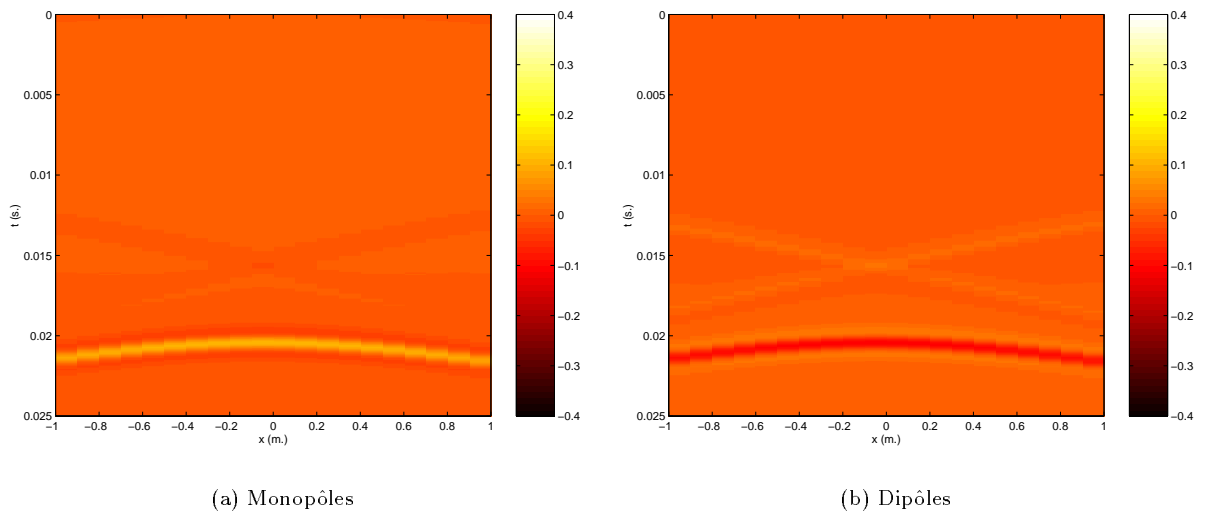


FIG. 3.44 - Réseau circulaire: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires de la sous-antenne circulaire 2 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, $r_0 = 1.5$ m. et $N = 100$, cf. Fig. 3.23 & 3.25, cf. Annexes E & F)

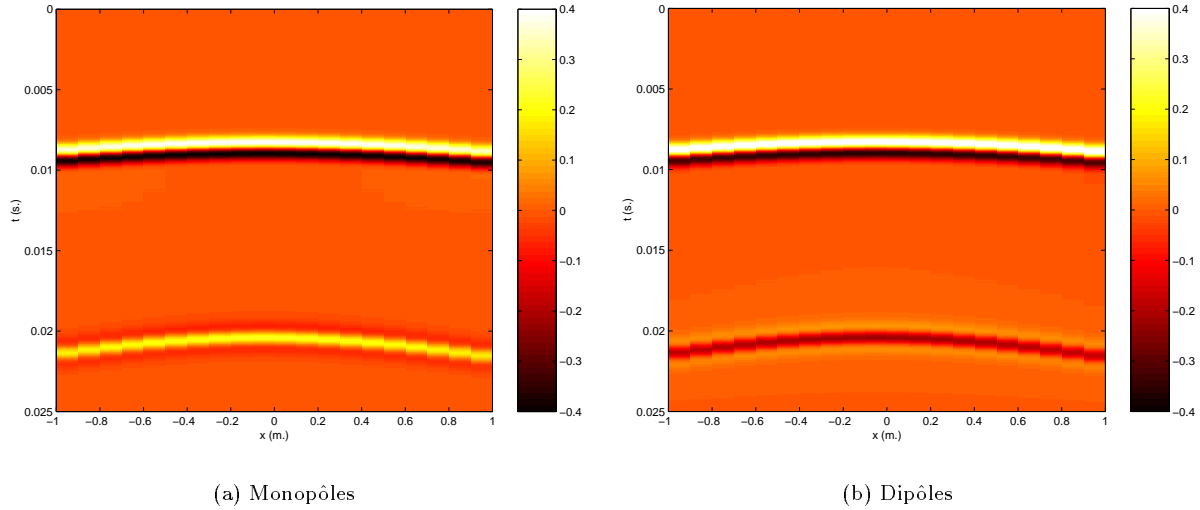


FIG. 3.45 - Réseau circulaire: Onde de pression restituée lorsque le réseau ne comporte exclusivement que des monopôles ou des dipôles (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, $r_0 = 1.5$ m. et $N = 100$, cf. Fig. 3.23 & 3.25, cf. Annexes E & F)

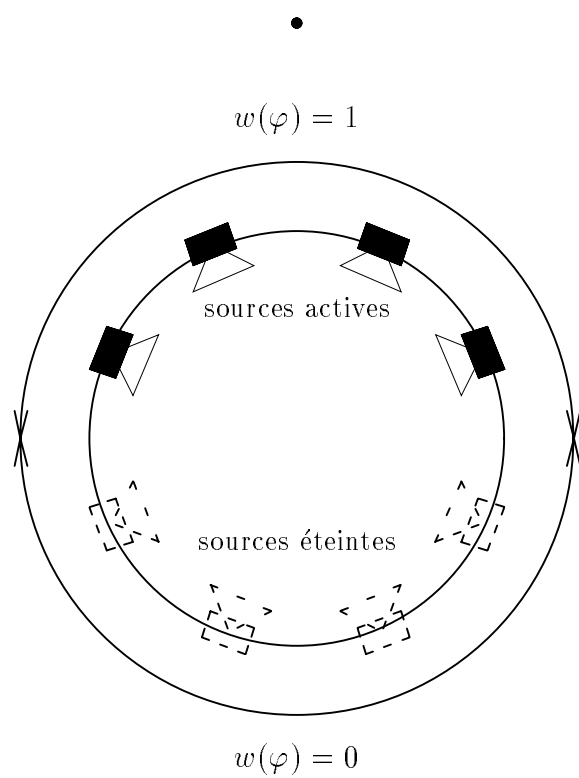
3.4.3 Monopôle versus Dipôle

Plusieurs simplifications du réseau de sources secondaires viennent d'être mises en évidence, il reste cependant que chaque source secondaire se constitue de deux sources élémentaires: une source monopolaire et une source dipolaire. Le réseau effectif de sources requiert donc en réalité un nombre de transducteurs double de celui de sources secondaires. Dans ce qui suit, nous allons comparer les contributions relatives des réseaux monopolaires et dipolaires, afin de déterminer si un seul type de sources ne suffirait pas. De manière indirecte, cette étude va nous apporter une meilleure compréhension des mécanismes de reconstruction de l'onde primaire par les sources secondaires, en expliquant en particulier certains résultats de la section précédente.

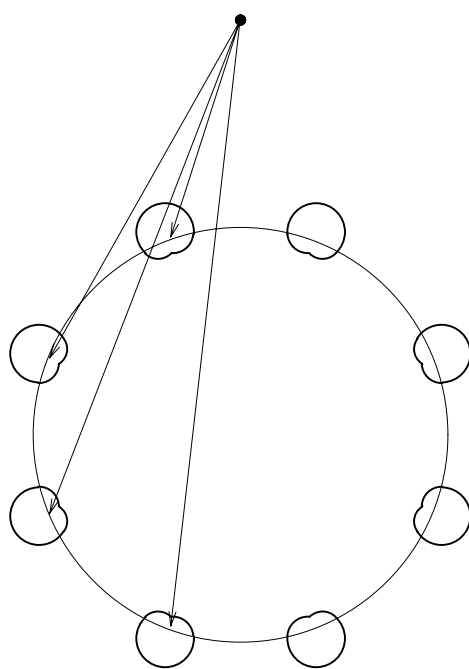
Réseau circulaire

Reprenons l'exemple du réseau circulaire décomposé en deux sous-antennes semi-circulaires (cf. Fig. 3.23 & 3.25). Les figures 3.43 et 3.44 permettent de comparer les ondes synthétisées respectivement par les réseaux monopolaires et dipolaires pour chacune des antennes semi-circulaires. On observe que, pour la première antenne semi-circulaire, les ondes restituées par les monopôles et les dipôles sont strictement identiques (cf. Fig. 3.43). Pour la seconde antenne, les contributions des monopôles et des dipôles sont aussi égaux en valeur absolue, mais ils sont en opposition de phase, de sorte qu'ils s'annulent quand on les superpose, ce qui explique que l'onde globale synthétisée par la sous-antenne 2 soit nulle (cf. Fig. 3.26b). La seconde sous-antenne ne participe donc pas à la reproduction de l'onde primaire, mais les sources qui la constituent ne sont pas pour autant inactives: elles travaillent à s'annuler entre elles, ce qui représente une dissipation inutile d'énergie. Il semble donc préférable, et ce à double titre, de ne pas les alimenter.

On remarque en outre que l'onde restituée par les réseaux monopolaires et dipolaires de la seconde antenne semi-circulaire (cf. Fig. 3.44) ne correspond pas à l'onde primaire. Le front d'onde synthétisé présente notamment un temps d'arrivée nettement supérieur à celui escompté. En première observation, il s'agit donc d'un signal d'erreur qu'il importe d'annuler, ce qui justifie que les sources monopolaires et dipolaires s'annulent entre elles pour cette sous-antenne. Plus précisément, on se rend compte que, pour l'antenne semi-circulaire 1, les sources secondaires sont placées entre la source primaire et la zone de restitution, alors que, pour l'antenne semi-circulaire 2, la zone de restitution s'interpose entre la source primaire et les sources



(a) Pondération spatiale



(b) Utilisation de microphones unidirectionnels

FIG. 3.46 - Réseau circulaire de monopôles: Pondération spatiale semi-circulaire

secondaires, ce qui signifie que les sources secondaires devraient théoriquement émettre un signal avant de l'avoir reçu. Comme les sources secondaires ne peuvent émettre qu'une fois qu'elles ont été excitées, il s'ensuit un retard inévitable dans la synthèse du front d'onde, ce qui rend inexact l'onde restituée par l'antenne semi-circulaire 2. Il est donc évident que cette antenne est physiquement incapable de synthétiser correctement le front d'onde issu d'une source primaire située en s_1 . Il est néanmoins remarquable que cet artéfact de reconstruction soit pris en compte et corrigé au niveau des sources de Kirchhoff, par le jeu des relations de phase entre les composantes monopolaires et dipolaires.

Deux idées essentielles ressortent de cette analyse:

- les contributions des réseaux monopolaires et dipolaires sont *parfaitement équivalentes*, du moins en valeur absolue, de telle sorte qu'il est possible de ne conserver qu'un seul type de sources, les monopôles ou les dipôles, à condition de doubler leur amplitude,
- cependant, dès lors qu'un seul type de sources intervient, il faut impérativement *désactiver une partie des sources secondaires*, celles pour lesquelles les monopôles et les dipôles agissent en opposition de phase: ces sources sont en effet, en vertu de la *Physique* du problème, incapables de contribuer à la synthèse du front d'onde primaire, et n'induisent donc qu'une onde parasite erronée qui, alors qu'elle est annulée par le jeu en opposition de phase des monopôles et des dipôles, n'est plus annulée lorsqu'un seul type de sources est présent, comme on le vérifie sur la figure 3.45.

Ainsi, au réseau circulaire de sources secondaires constituées de monopôles et de dipôles, on peut substituer un réseau semi-circulaire ne comportant que des monopôles (ou des dipôles), mais il est impératif d'appliquer au réseau circulaire une fenêtre de pondération spatiale semi-circulaire dont la localisation est assujettie à la position de la source primaire, afin de n'activer que la moitié éclairée du réseau (cf. Fig. 3.46a). En pratique, cette pondération spatiale ne peut pas être appliquée directement au niveau des sources, car elle implique de connaître la position des sources primaires. La façon la plus simple de la prendre en compte consiste en fait à utiliser des *microphones unidirectionnels* à la prise de son: les sources secondaires sont ainsi activées en fonction de l'angle d'incidence de l'onde primaire sur la capsule microphonique qui leur est associée, ce qui réalise bien une pondération spatiale dépendant de la position de la source primaire (cf. Fig. 3.46b).

Réseau carré

Nous allons approfondir les résultats de la section précédente obtenus pour une géométrie circulaire, à la lumière du comportement d'une géométrie rectiligne qui présente l'avantage de pouvoir être interprété à partir des propriétés des Intégrales de Rayleigh. Les figures 3.47, 3.48, 3.49 et 3.50 comparent les contributions respectives des sources monopolaires et dipolaires pour les quatre côtés du réseau carré lorsque la source primaire est située en s_1 (cf. Fig. 3.34).

A l'instar du réseau circulaire, on constate une *forte redondance entre les ondes rayonnées par les sources monopolaires et dipolaires* [Start, 1997]:

- Pour le côté 1, dont on rappelle qu'il effectue l'essentiel du travail de reconstruction, les ondes restituées par le réseau monopolaire et par le réseau dipolaire sont égales, de telle sorte qu'elles se superposent exactement (cf. Fig. 3.36a).
- Pour les côtés 2 et 4, les ondes sont partiellement en opposition de phase, aussi, lorsqu'on les somme, subsiste-t-il une onde résiduelle qui correspond à l'onde d'erreur de reconstruction du côté principal — côté 1 — (cf. Fig. 3.36b & 3.36d).
- En revanche, pour le côté 3, les ondes sont égales en valeur absolue, mais s'avèrent en opposition de phase, de telle sorte qu'elles s'annulent quand on les ajoute (cf. Fig. 3.36c).

Ces résultats s'expliquent par les propriétés des Intégrales de Rayleigh. On a en effet signalé (cf. Section 3.2.5) qu'une des conséquences des Intégrales de Rayleigh est de démontrer implicitement que, dans le cas particulier d'une distribution plane de sources secondaires, les ondes rayonnées par le réseau monopolaire et par le réseau dipolaire sont strictement égales. Plus exactement, les deux ondes sont égales en valeur absolue, mais elles ne sont en phase que si la source primaire et la zone de restitution sont disposées de

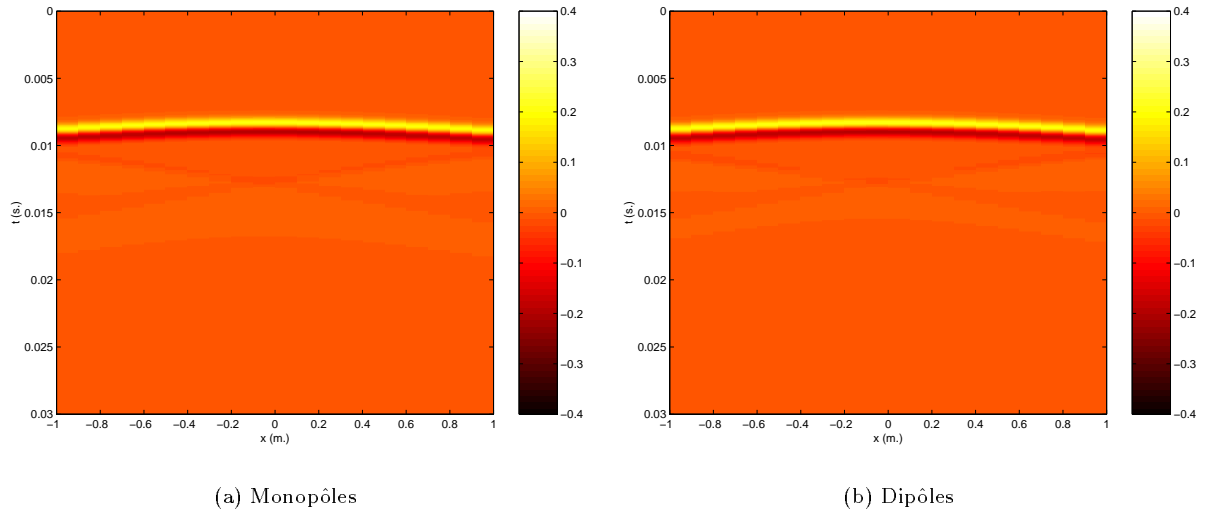


FIG. 3.47 - Réseau carré: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires du côté 1 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 124$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)

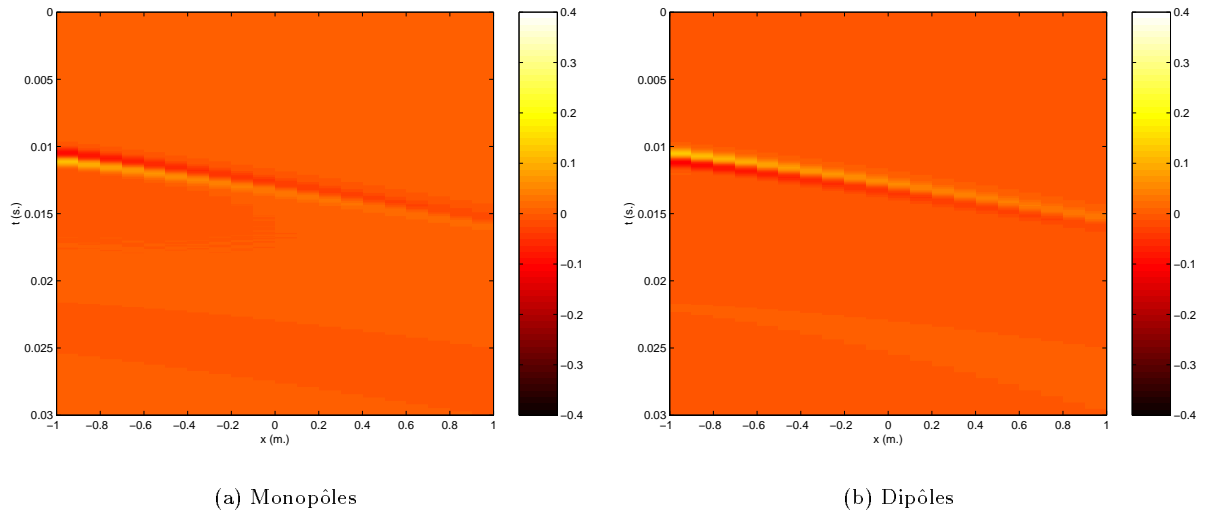


FIG. 3.48 - Réseau carré: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires du côté 2 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 124$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)

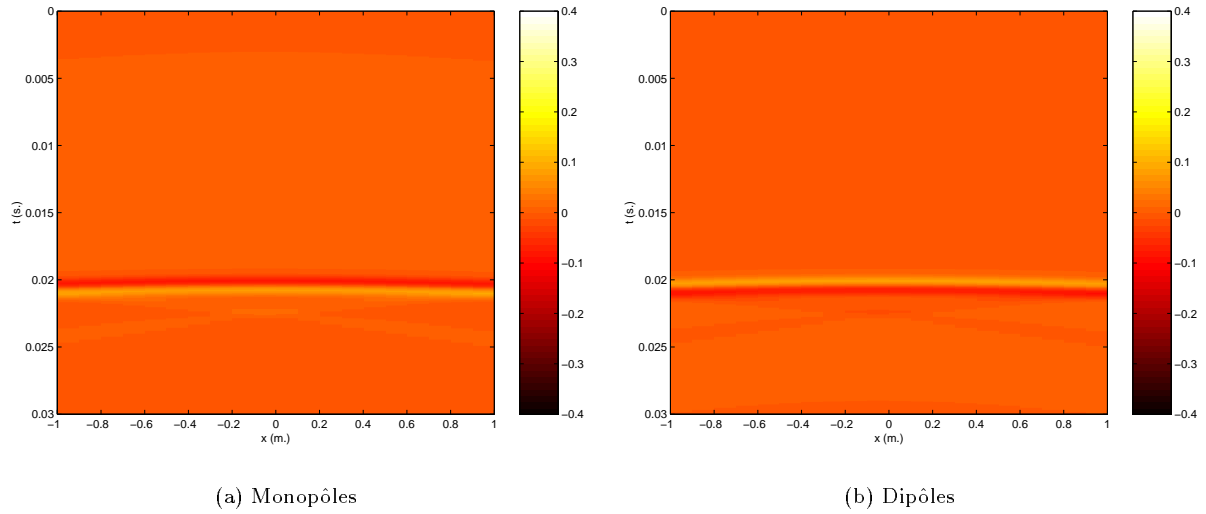


FIG. 3.49 - Réseau carré: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires du côté 3 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 124$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)

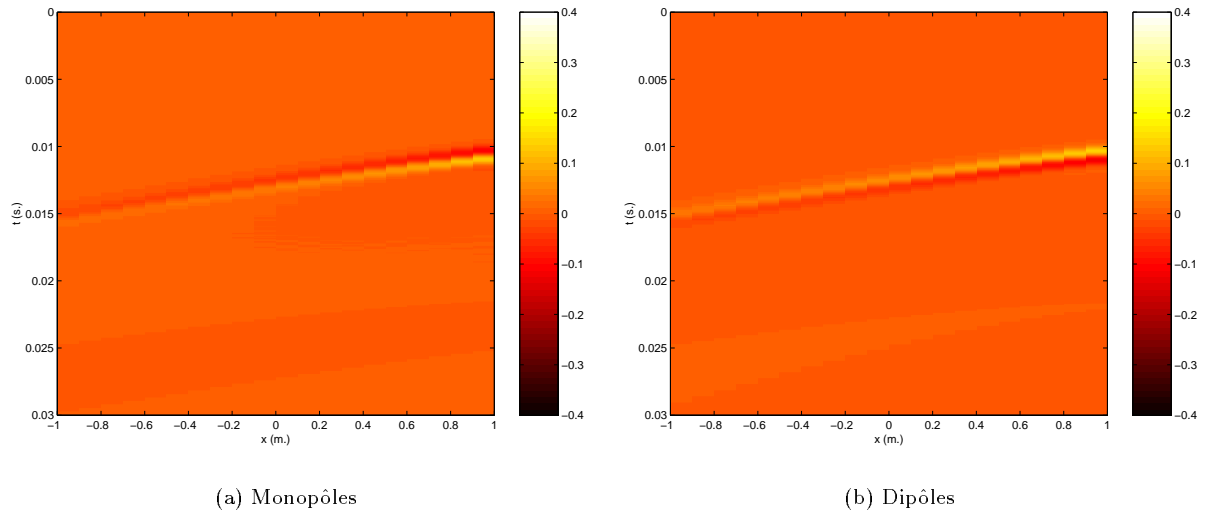


FIG. 3.50 - Réseau carré: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires du côté 4 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 124$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)

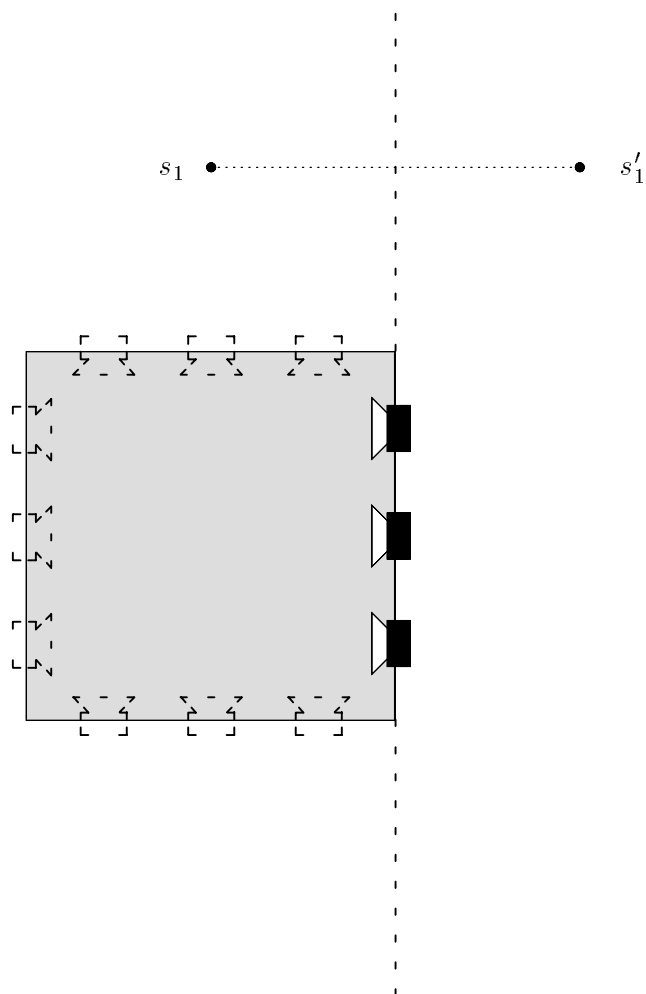


FIG. 3.51 - Simulation d'une source primaire en s_1 située en aval du réseau de sources secondaires (c'est-à-dire du même côté que la zone de restitution): Le front d'onde synthétisé correspond à celui qui aurait été émis par une source située en s'_1 , position symétrique de s_1 par rapport au plan des sources secondaires.

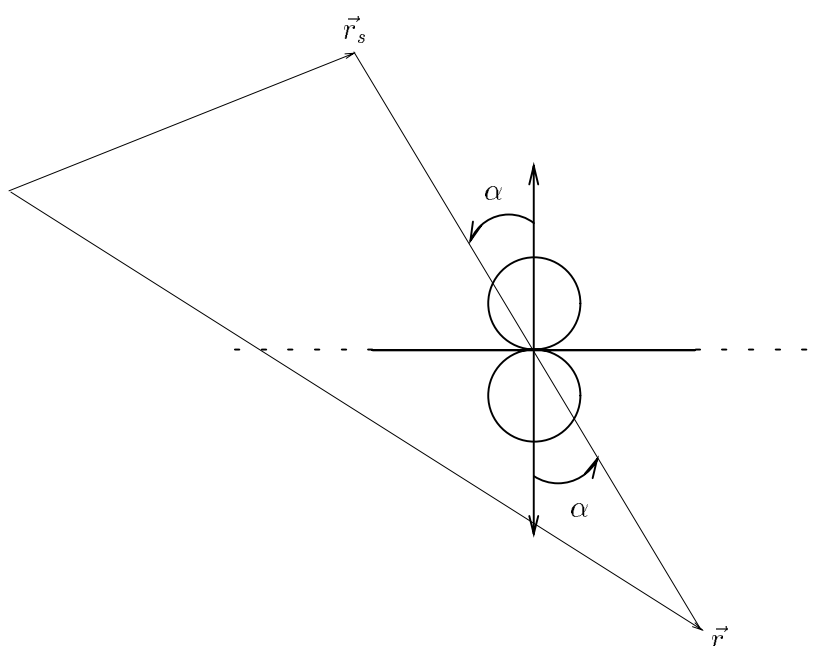


FIG. 3.52 - Source secondaire au point de phase stationnaire: Equivalence entre les ondes rayonnées par le monopôle et le dipôle en vertu de la symétrie des angles d'émission, pour le microphone bidirectionnel, et de réception, pour la source dipolaire.

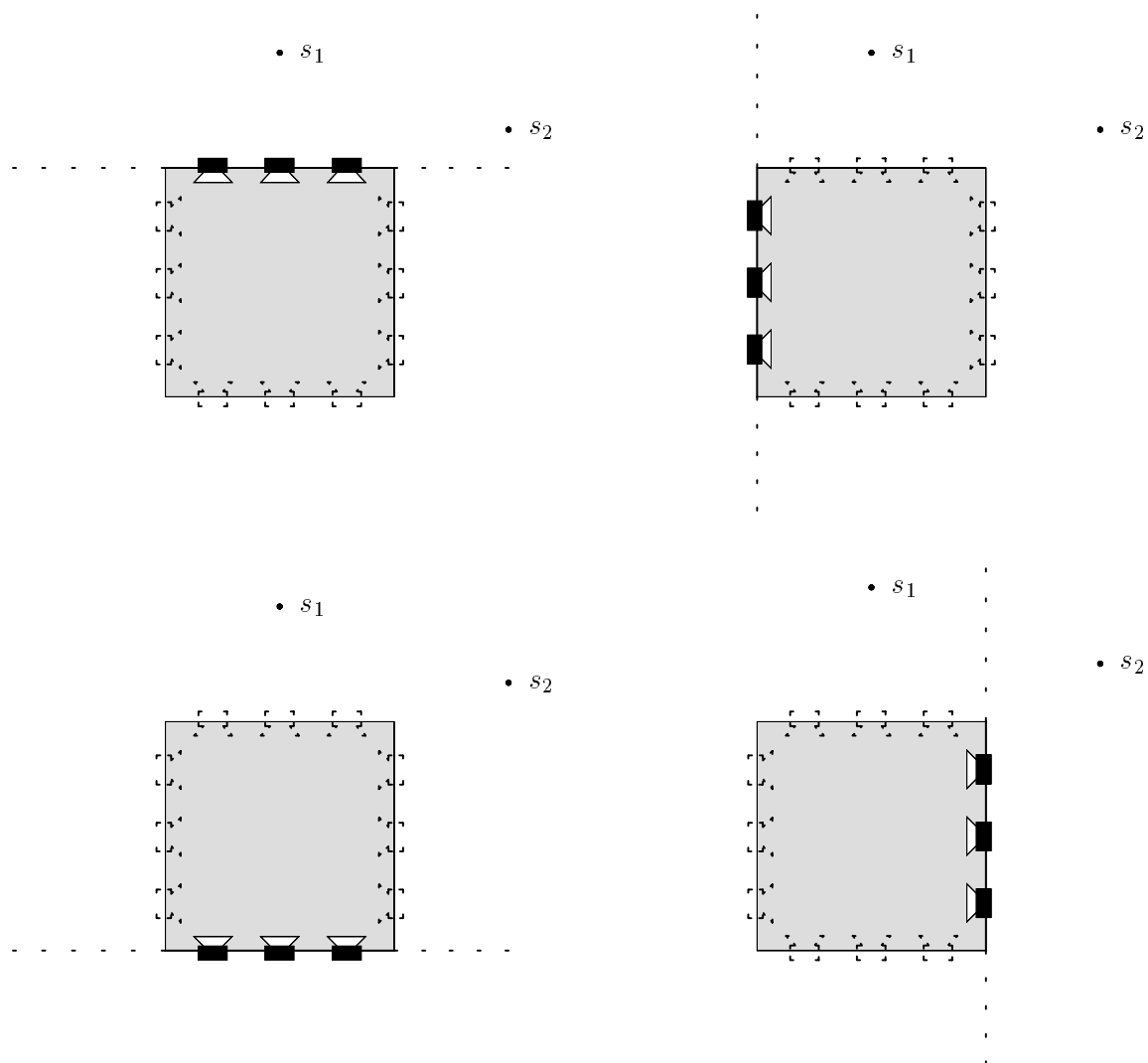


FIG. 3.53 - Distribution 1D de Rayleigh: Chaque côté du réseau carré est identifié à un segment tronqué d'une droite infinie.

part et d'autre du plan de sources secondaires (ce qui se produit uniquement pour le côté 1 si la source primaire est située en s_1). En revanche, si elles sont situées du même côté (ce qui se produit pour les côtés 2, 3 et 4 si la source primaire est située en s_1), elles sont en opposition de phase. Dans le second cas en effet, comme on l'a déjà observé sur le réseau circulaire, la position de la source primaire implique que les sources secondaires devraient émettre avant d'avoir capté l'onde primaire. Le front d'onde ne peut donc être restitué sans un retard qui résulte du temps mis par l'onde primaire pour atteindre le réseau de sources secondaires. Au final, le front d'onde est synthétisé comme s'il provenait d'une source primaire située à la position symétriquement opposée par rapport au réseau de sources secondaires (cf. Fig. 3.51). Il en résulte que le front d'onde reproduit par les sources secondaires est incorrect, d'où l'intérêt du contrôle en opposition de phase des monopôles et des dipôles afin de l'annuler.

Par ailleurs, il faut aussi se rendre compte que l'égalité entre les ondes rayonnées par les réseaux plans de monopôles et dipôles n'est parfaitement vérifiée qu'à condition de considérer une distribution *infinie* de sources secondaires. Pour un plan de dimensions finies, les contributions des réseaux monopolaire et dipolaire ne sont pas strictement égales: les ondes synthétisées par les réseaux monopolaire et dipolaire ne s'annulent donc que partiellement, de sorte qu'il subsiste une erreur résiduelle dans l'onde résultante. Un examen attentif de la géométrie du problème (cf. Fig. 3.52) indique que les ondes rayonnées par le monopôle et le dipôle constituant la source secondaire située au point de phase stationnaire sont égales, étant donné la symétrie des angles d'émission — pour le microphone bidirectionnel — et de réception — pour la source dipolaire —. En revanche, pour les autres sources secondaires, la symétrie n'existe plus: les ondes rayonnées par les monopôles et les dipôles diffèrent donc, et ce d'autant plus qu'on s'écarte du point de phase stationnaire. Par suite, dans le cas du réseau tronqué de sources secondaires, les ondes restituées par les monopôles et les dipôles peuvent être considérées comme égales en bonne approximation, tant que le point de phase stationnaire appartient au réseau. Mais, dès que le point de phase stationnaire est à l'extérieur du réseau, l'égalité entre les ondes restituées par les monopôles et les dipôles n'est plus valide. Par suite, lorsqu'on somme les contributions des monopôles et des dipôles, l'annulation ou la superposition n'est plus que partielle.

Via le Théorème de la Phase Stationnaire, ces résultats restent valables pour une distribution 1D rectiligne, et peuvent être appliqués en l'occurrence à chacun des côtés du réseau carré. On considère chaque côté comme le segment tronqué d'une droite infinie définissant une distribution 1D de Rayleigh (cf. Fig. 3.53). Pour le côté 1, la source primaire et la zone de restitution sont situées de part et d'autre du réseau de sources secondaires, par suite les contributions des monopôles et des dipôles sont en phase (cf. Fig. 3.47). De plus, pour l'ensemble des points récepteurs, le point de phase stationnaire reste contenu dans le segment de sources secondaires, ce qui signifie que l'égalité entre les ondes rayonnées par les réseaux monopolaires et dipolaires est bien vérifiée (cf. Fig. 3.36a). Pour les côtés 2, 3 et 4, en revanche, la source primaire est située du même côté du réseau de sources secondaires que la zone de restitution. Il en résulte que les ondes synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires sont en opposition de phase (cf. Fig. 3.48, 3.49 & 3.50). En outre, pour les côtés 2 et 4, le point de phase stationnaire est situé à l'extérieur du réseau de sources secondaires, de sorte que l'annulation est partielle (cf. Fig. 3.36b & 3.36d). Pour le côté 3, au contraire, le point de phase stationnaire appartient au réseau de sources secondaires, et l'annulation est quasiment parfaite (cf. Fig. 3.36c).

Les figures 3.54, 3.55, 3.56 et 3.57 illustrent les contributions respectives des sources monopolaires et dipolaires lorsque la source primaire est située en s_2 (cf. Fig. 3.34). Ces résultats confirment l'interprétation précédente, en particulier on remarque que pour le côté 4, les contributions monopolaires et dipolaires sont, cette fois, en phase attendu que la source primaire est placée en aval du réseau de sources secondaires (cf. Fig. 3.53).

De l'ensemble de ces observations, on peut conclure que les ondes rayonnées par les réseaux monopolaires et dipolaires sont fortement redondantes, et, qu'en première approximation, elles sont égales en valeur absolue. Par suite, un seul type de sources (monopôles ou dipôles) peut être utilisé. Cependant, comme deux situations se rencontrent: soit les contributions monopolaires et dipolaires sont en phase, soit elles sont en opposition de phase, quelques précautions doivent être observées:

- dans la première situation, il suffit de doubler l'amplitude des sources conservées,
- dans la seconde, il faut désactiver les sources secondaires, sinon elles génèrent un signal d'erreur qui ne peut plus être annulé par le jeu des oppositions de phase entre les monopôles et les dipôles.

La dernière situation implique une pondération spatiale du réseau de sources secondaires afin de n'activer

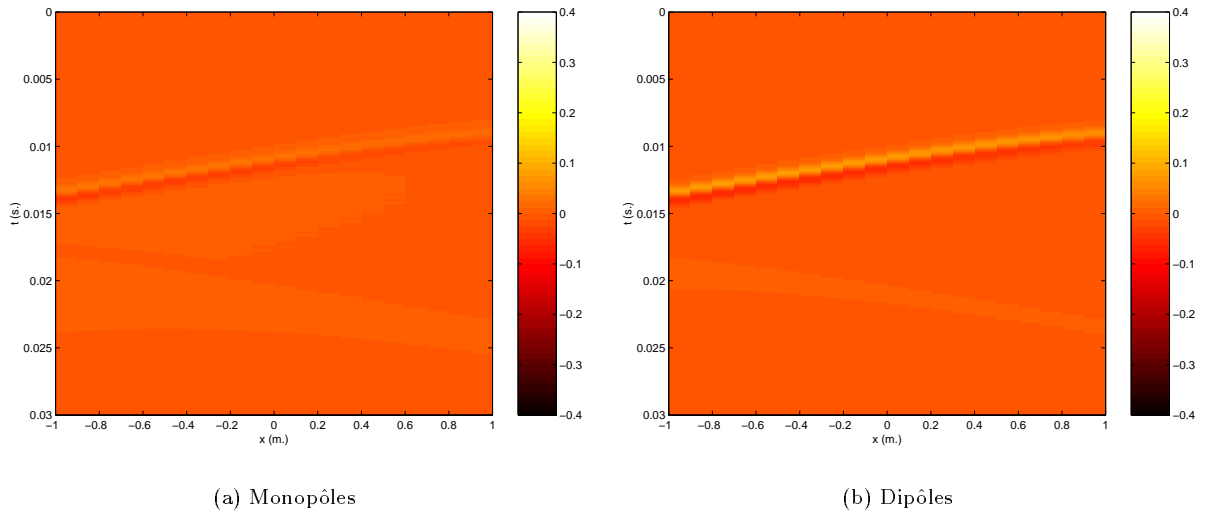


FIG. 3.54 - Réseau carré: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires du côté 1 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_2 , $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 120$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)

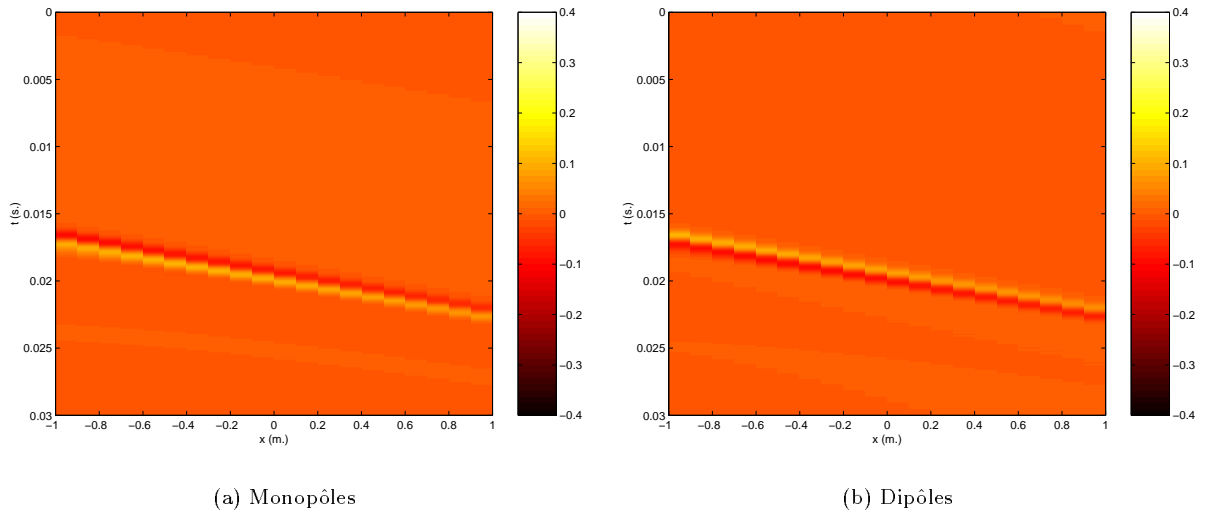


FIG. 3.55 - Réseau carré: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires du côté 2 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_2 , $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 120$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)

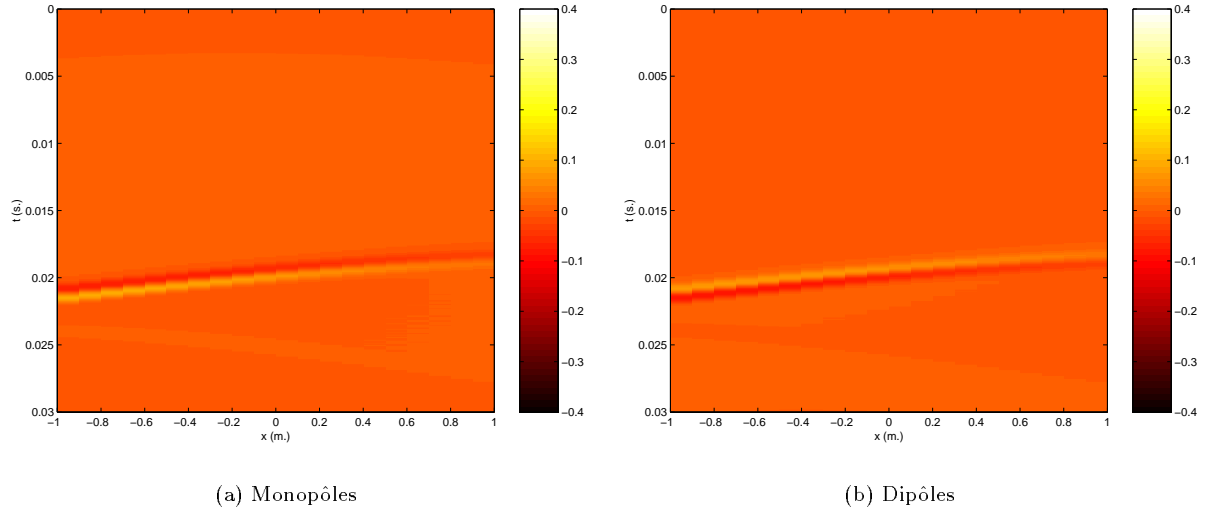


FIG. 3.56 - Réseau carré: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires du côté 3 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_2 , $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 120$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)

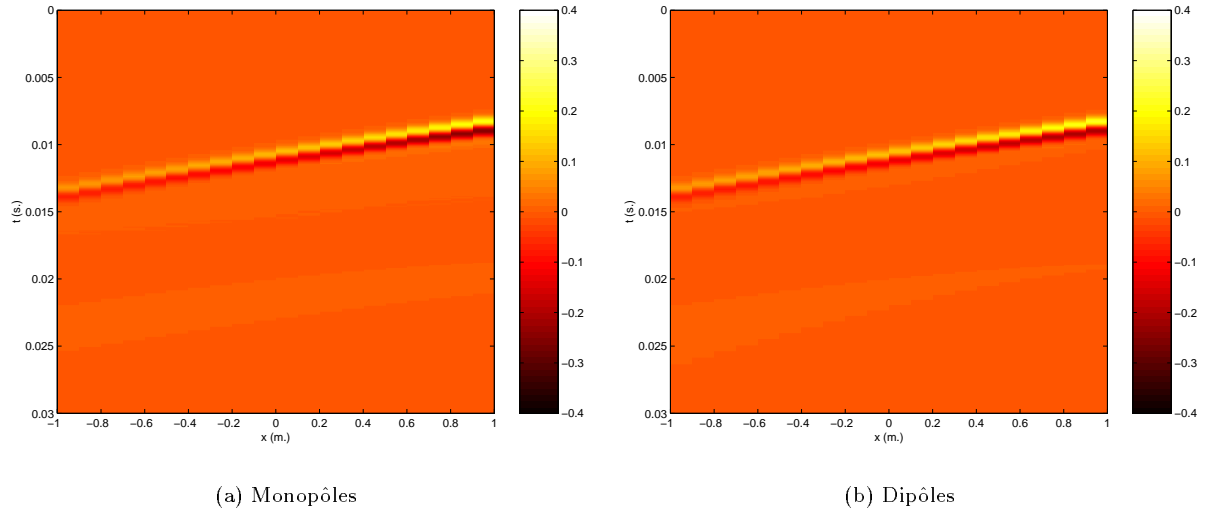


FIG. 3.57 - Réseau carré: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires du côté 4 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_2 , $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 120$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)

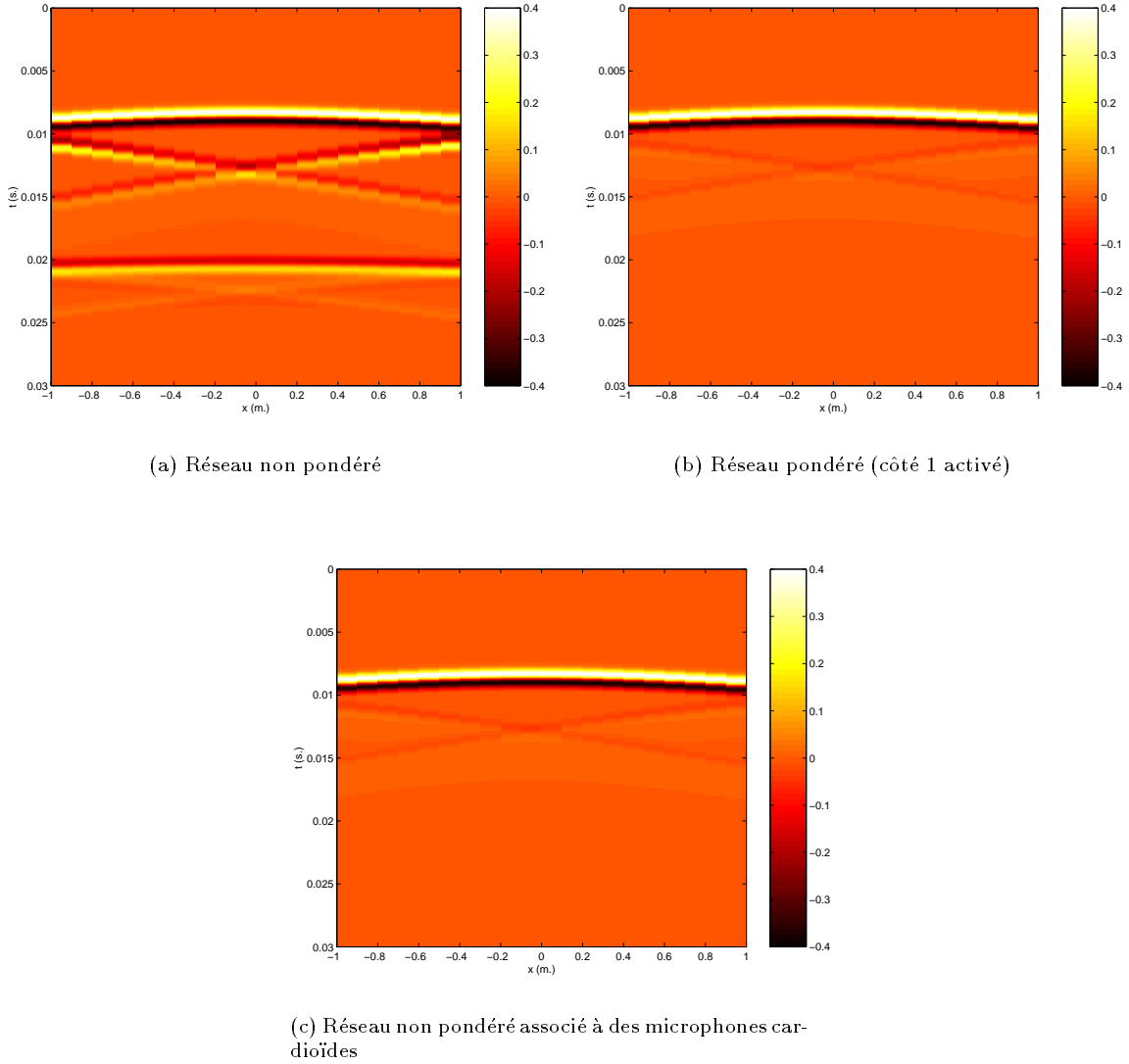
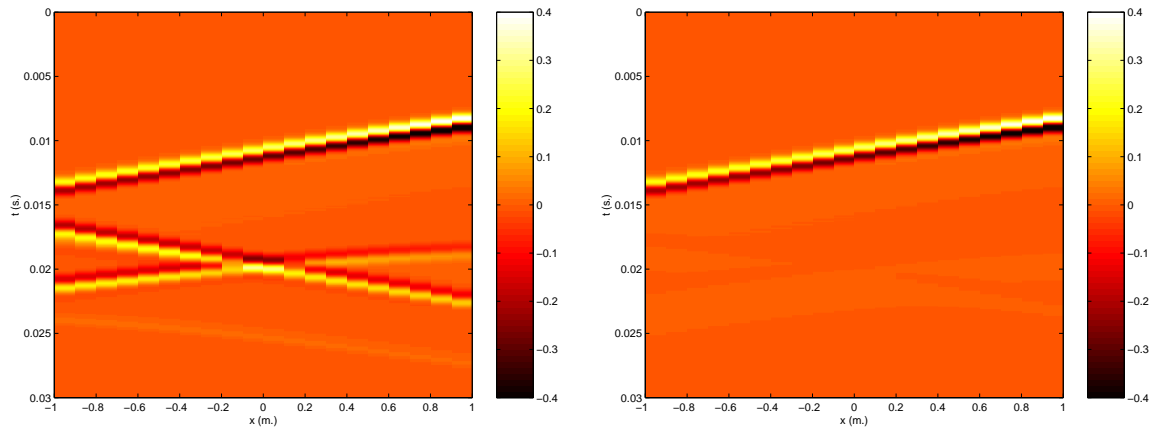
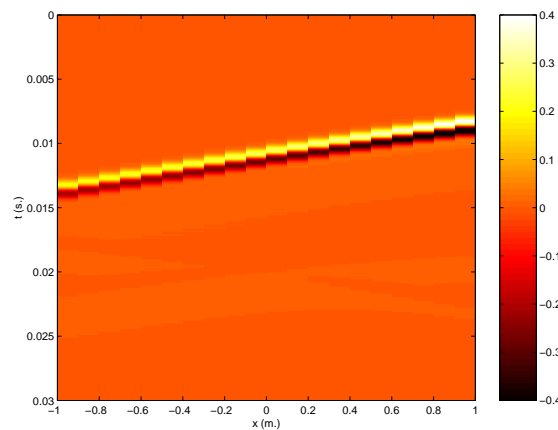


FIG. 3.58 - Réseau carré: Onde de pression synthétisée par les sources secondaires monopolaires pour la source en s_1 (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 124$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)



(a) Réseau non pondéré

(b) Réseau pondéré (côtés 1 et 4 activés)



(c) Réseau non pondéré associé à des microphones cardioïdes

FIG. 3.59 - Réseau carré: Onde de pression synthétisée par les sources secondaires monopolaires pour la source en s_2 (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 124$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)

que les sources utiles, c'est-à-dire les sources pour lesquelles monopôles et dipôles sont en phase [Verheijen *et al.*, 1997]. Ainsi, quand la source primaire est située en s_1 , seul le côté 1 doit être activé, tandis que pour la position s_2 , les côtés 1 et 4 interviennent. On se rend compte que la pondération spatiale dépend de la position de la source primaire, ce qui soulève des difficultés pratiques évidentes. Plutôt qu'une pondération directe des sources, il semble donc préférable d'introduire pour la prise de son des microphones unidirectifs dont la directivité permet de contrôler l'activation des sources secondaires en fonction de la position de la source primaire.

Les figures 3.58 et 3.59 illustrent les ondes synthétisées par différentes configurations du réseau monopolaire:

- le réseau non pondéré, dans lequel les 4 côtés fonctionnent,
- le réseau pondéré, dans lequel seuls un ou deux côtés sont activés selon la position de la source primaire,
- et le réseau non pondéré, dans lequel les sources secondaires sont alimentées par des microphones cardioïdes au lieu de microphones bidirectifs.

On observe que l'onde restituée par le réseau monopolaire non pondéré est fortement dégradée par la présence d'une onde parasite qui n'est plus annulée par les sources dipolaires. La pondération du réseau corrige parfaitement le phénomène et on constate que l'utilisation de microphones cardioïdes se substitue de façon totalement équivalente à la pondération du réseau. Il semble donc tout à fait possible d'utiliser des sources secondaires monopolaires au lieu des sources de Kirchhoff, à condition toutefois de remplacer les microphones bidirectifs par des microphones cardioïdes. Ces résultats sont appliqués à la section suivante sur l'exemple générique que constitue le réseau polygonal élémentaire.

Réseau polygonal élémentaire

Reprenons le cas du réseau polygonal élémentaire (cf. Fig. 3.39). On considère à présent un réseau constitué exclusivement de sources monopolaires. Il serait équivalent de ne considérer que des dipôles. À partir des observations précédentes, la géométrie du réseau conduit à délimiter six zones dans l'espace des sources primaires (cf. Fig. 3.60). Chacune des trois antennes rectilignes constituant le réseau polygonal décompose en effet l'espace des sources primaires en deux demi-espaces: pour l'un d'eux (c'est-à-dire celui pour lequel les sources primaires sont en amont des sources secondaires), l'élément d'antenne rectiligne intervient en tant que source *utile*, tandis que pour l'autre (correspondant aux des sources primaires en aval du réseau secondaire), il agit en tant que source perturbatrice qui induit un signal parasite d'erreur qui doit être éliminé. En combinant les six demi-espaces obtenus avec les trois éléments d'antenne, on définit six zones, pour chacune desquelles on est capable d'identifier dans le réseau de sources secondaires les éléments d'antenne à activer et à désactiver. Ainsi, chaque zone est gérée par une partie différente du réseau de sources secondaires. Par exemple, les sources primaires situées dans la zone 1 sont synthétisées uniquement par la sous-antenne 2, tandis que pour la zone 3, les sous-antennes 1 et 2 sont sollicitées. Seule la zone 2 fait intervenir simultanément les trois sous-antennes.

Les figures 3.61, 3.62, 3.63 et 3.64 reproduisent les ondes synthétisées par le réseau polygonal élémentaire exclusivement constitué de monopôles pour les quatre positions de source primaire: s_1 , s_3 , s_4 et s_5 . Les résultats obtenus avec le réseau non pondéré, pondéré et en utilisant des microphones cardioïdes sont comparés. On observe d'abord que l'amplitude de l'onde parasite résultant de l'absence des sources dipolaires reste dans l'ensemble faible, du moins pour les sources primaires situées en s_1 , s_3 et s_4 . Ce résultat provient de la géométrie ouverte du réseau: cette configuration minimise en effet le risque des situations où la source primaire est située en aval d'une partie des sources secondaires. En ce cas, la pondération spatiale du réseau n'a donc pas vraiment lieu d'être appliquée: les ondes restituées par le réseau non pondéré, pondéré ou en utilisant des microphones cardioïdes sont en effet peu différentes. En revanche, on voit que pour des positions très excentrées de source primaire, telles que la position s_5 , une onde parasite d'amplitude relativement forte, qui est induite par le côté 1, se manifeste (cf. Fig. 3.64b). Néanmoins, il est bien corrigé par la pondération du réseau, c'est-à-dire si on n'active que le côté 3, ou l'utilisation de microphones cardioïdes. L'équivalence entre la pondération du réseau de sources secondaires et l'utilisation de microphones cardioïdes est confirmée.

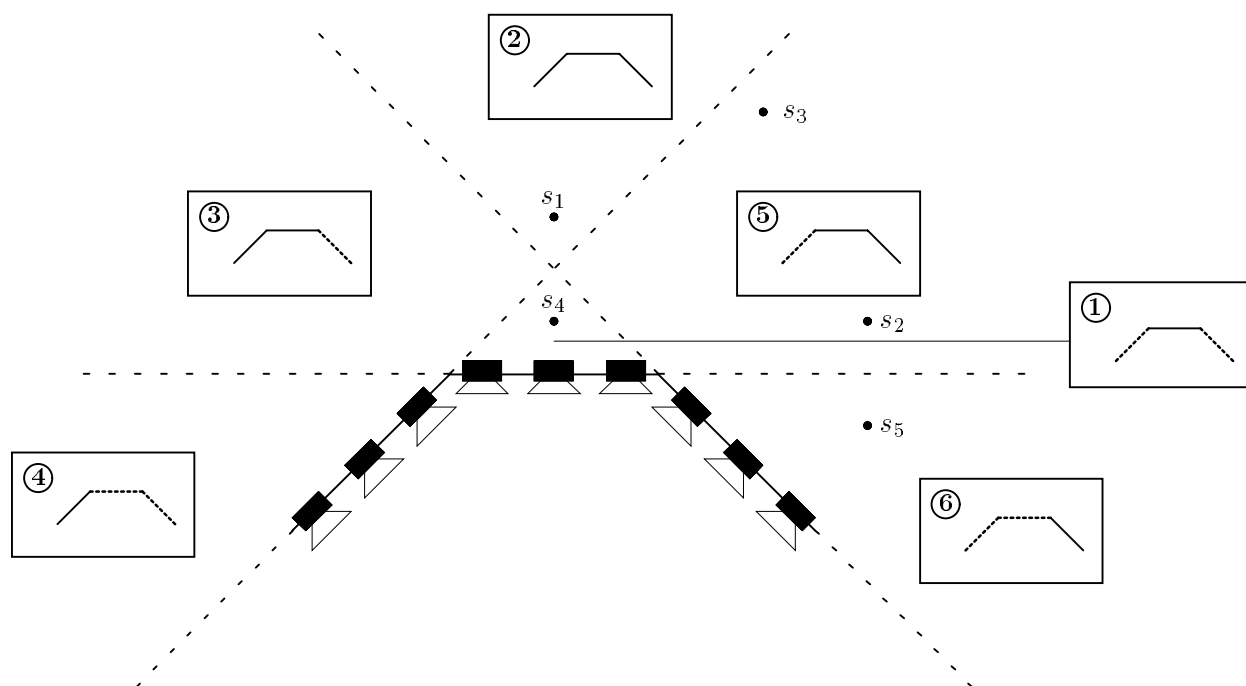


FIG. 3.60 - Réseau polygonal élémentaire: Décomposition de l'espace des sources primaires en six zones associées aux différents éléments du réseau de sources secondaires

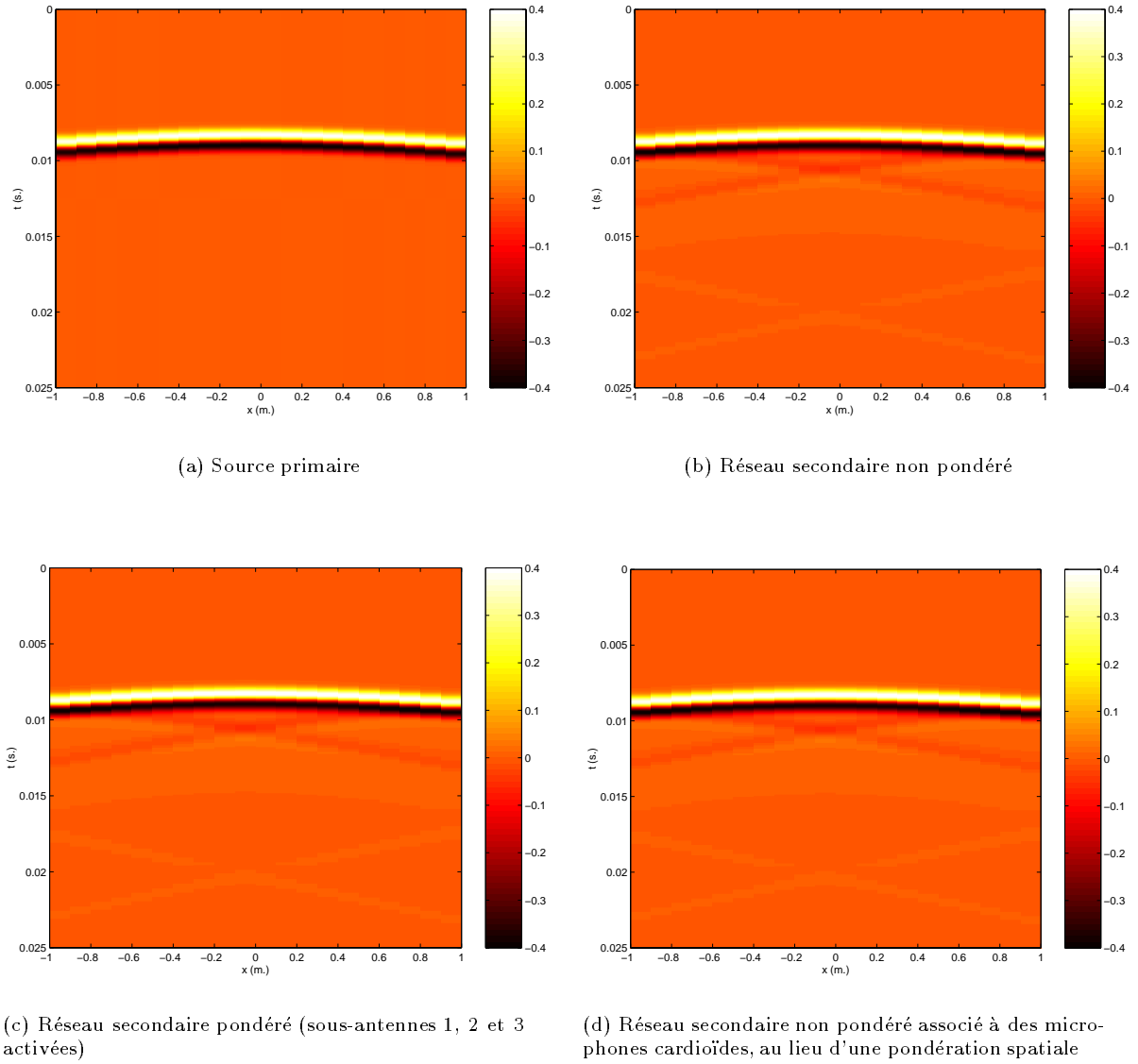
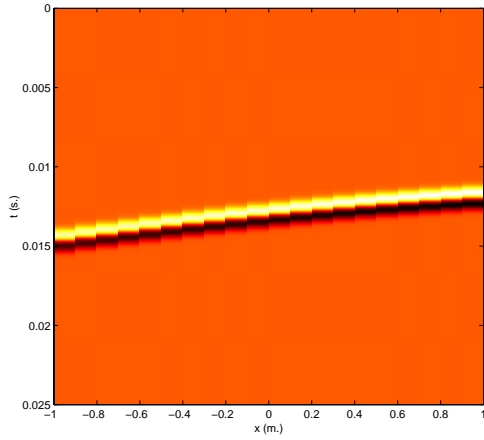
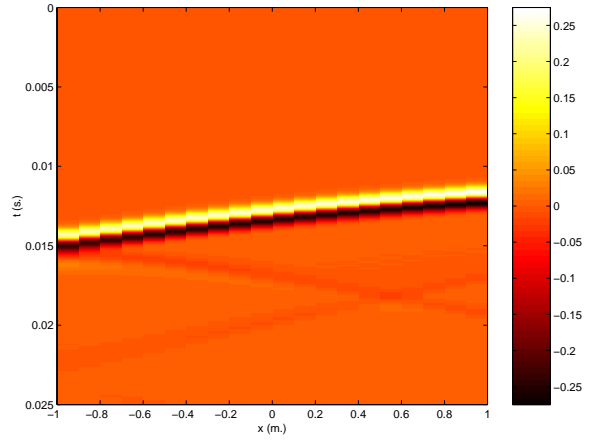


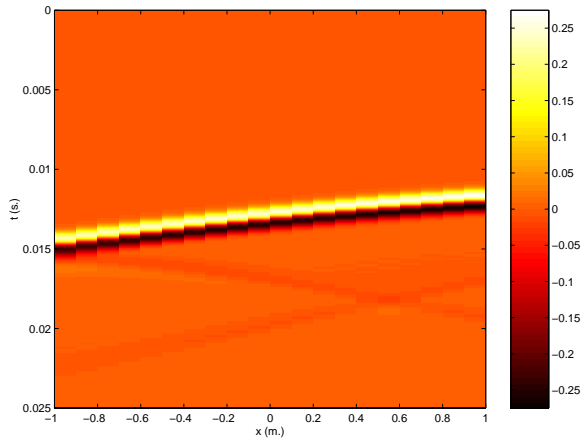
FIG. 3.61 - Réseau polygonal élémentaire: Onde de pression synthétisée par les sources monopolaires pour la source primaire en s_1 (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, antenne rectiligne élémentaire de longueur $l = 2$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 60$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.39, cf. Annexes E & F)



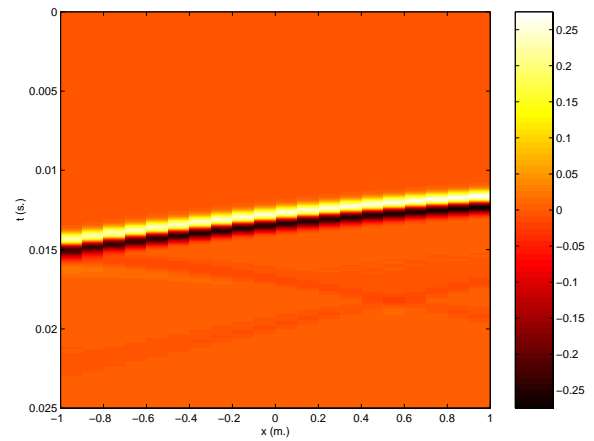
(a) Source primaire



(b) Réseau secondaire non pondéré



(c) Réseau secondaire pondéré (sous-antennes 2 et 3 activées)



(d) Réseau secondaire non pondéré associé à des microphones cardioïdes, au lieu d'une pondération spatiale

FIG. 3.62 - Réseau polygonal élémentaire: Onde de pression synthétisée par les sources monopolaires pour la source primaire en $s_3[2., 4., 0.]$ (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, antenne rectiligne élémentaire de longueur $l = 2$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 60$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.39, cf. Annexes E & F)

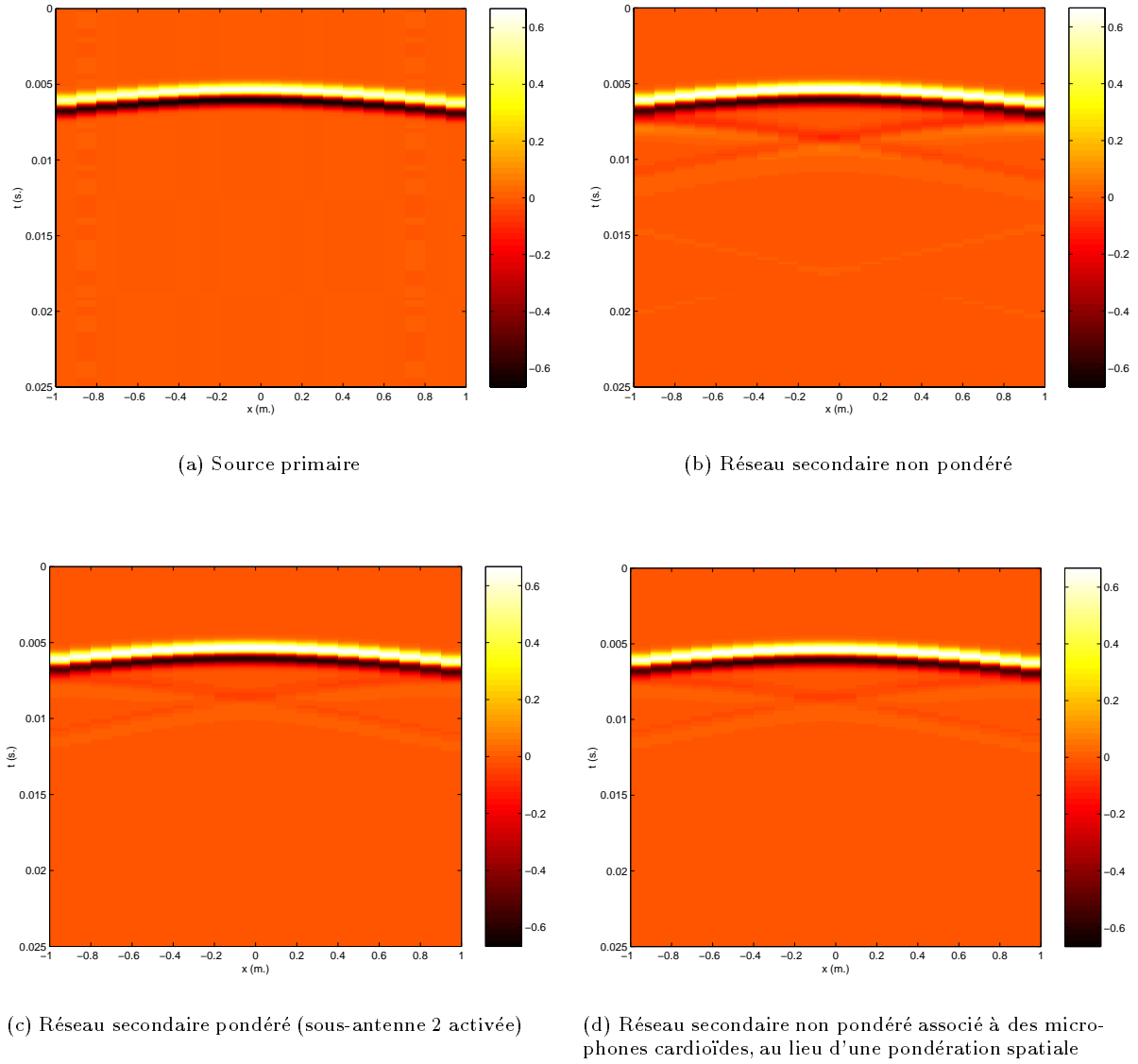
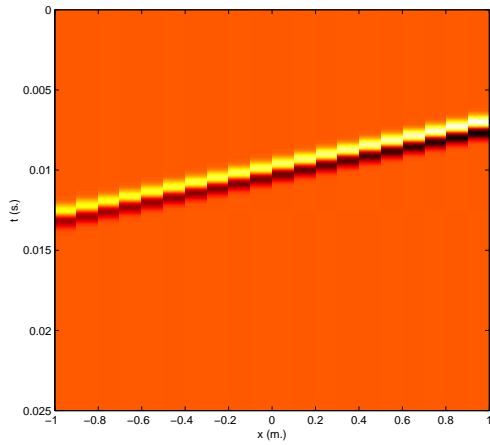
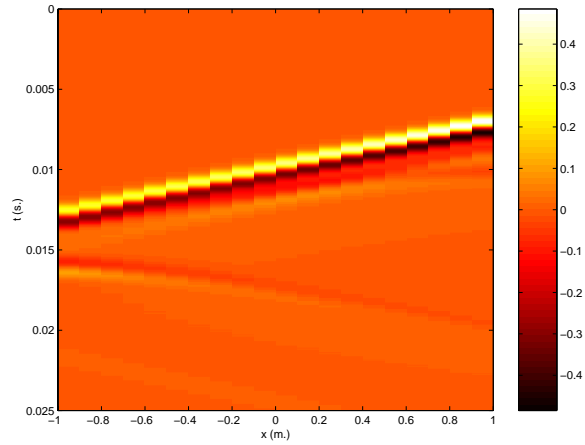


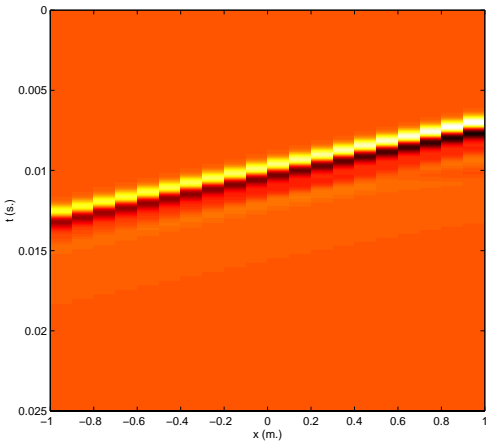
FIG. 3.63 - Réseau polygonal élémentaire: Onde de pression synthétisée par les sources monopolaires pour la source primaire en $s_4[0., 2., 0.]$ (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, antenne rectiligne élémentaire de longueur $l = 2$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 60$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.39, cf. Annexes E & F)



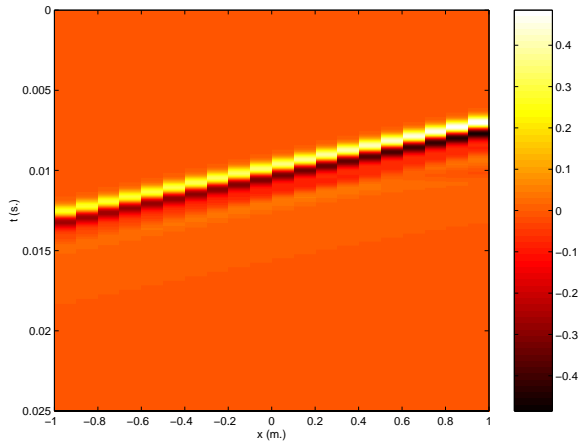
(a) Source primaire



(b) Réseau secondaire non pondéré



(c) Réseau secondaire pondéré (sous-antenne 3 activée)



(d) Réseau secondaire non pondéré associé à des microphones cardioïdes au lieu d'une pondération spatiale

FIG. 3.64 - Réseau polygonal élémentaire: Onde de pression synthétisée par les sources monopolaires pour la source primaire en $s_5[3., 1., 0.]$ (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, antenne rectiligne élémentaire de longueur $l = 2$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 60$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.39, cf. Annexes E & F)

Conclusion

La comparaison des contributions des réseaux dipolaires et monopolaires pour différentes géométries de réseaux curvilignes et rectilignes a clairement mis en évidence combien les deux réseaux sont redondants. On peut donc se contenter de réseaux constitués d'un seul type de sources. Cependant, la reproduction de l'onde primaire par un réseau exclusivement constitué de monopôles ou de dipôles n'est pas parfaite, car elle comporte un signal d'erreur qui n'est plus annulé par le jeu des interférences entre monopôles et dipôles. Ce signal d'erreur peut être réduit en pondérant les sources secondaires en fonction de la position de la source primaire. Une façon pratique de mettre en œuvre cette solution consiste à utiliser des microphones unidirectionnels pour la prise de son. Quelques règles générales relatives à la pondération spatiale du réseau ont été dégagées dans le cas de géométries rectilignes à partir des propriétés des intégrales de Rayleigh.

3.4.4 Intégrale(s) de Rayleigh généralisée(s)

L'ensemble des simplifications décrites au cours des sections précédentes conduit à définir, à partir des intégrales de Kirchhoff et de Rayleigh, une nouvelle intégrale, l'*intégrale de Rayleigh généralisée 1D* [Start, 1996] [Start, 1997], qui se définit comme:

- une intégrale **1D**, du fait qu'elle prend en compte l'*approximation de la phase stationnaire*,
- une intégrale de **Rayleigh**, attendu qu'à la prise et la restitution du son, *un seul type de transducteurs* à la fois (microphones à gradient de pression associés à des sources monopolaires ou microphones de pression associés à des sources dipolaires) est utilisé,

Mais, au lieu d'une géométrie rectiligne spécifique à Rayleigh, on préfère un réseau *curviligne* — réseau *ouvert* —, d'où l'idée d'une intégrale de Rayleigh *généralisée*.

On définit ainsi une approche intermédiaire entre les approches de Kirchhoff et Rayleigh: approche de Kirchhoff par la géométrie du réseau de sources secondaires et approche de Rayleigh par le type de sources. Par suite, il s'agit aussi bien d'une *intégrale de Kirchhoff simplifiée* que d'une *intégrale de Rayleigh améliorée*.

3.4.5 Concept de source notionnelle

D'importantes simplifications du réseau de sources secondaires viennent d'être dégagées. Il semble difficile de le réduire davantage, du moins du point de vue de la restitution sonore, si on veut préserver une zone d'écoute étendue. Néanmoins il est encore possible de le simplifier du point de vue de la *prise de son*, grâce au concept de *source notionnelle* qui a été introduit par l'équipe de l'U.T.D. [Berkhout *et al.*, 1993] [Start, 1997].

Ce concept de source notionnelle repose sur deux idées:

- *dissocier le réseau de microphones du réseau de haut-parleurs*, dans le but d'assurer une couverture optimale de la scène sonore, notamment en termes du nombre de microphones rapporté au nombre de sources sonores,
- *introduire une étape de traitement du signal* destinée à simuler une prise de son holophonique et qui consiste à propager les signaux enregistrés par les microphones de la position réelle des capteurs à l'emplacement du réseau théorique virtuel situé au niveau des haut-parleurs.

Multimicrophonie de proximité

En théorie, dans une approche holophonique rigoureuse, la prise de son est assurée par un réseau de microphones qui est l'exacte réplique du réseau de haut-parleurs destinés à la restitution. Avec le concept de source notionnelle, une approche plus classique de prise de son, qui s'inspire de la *multimicrophonie de proximité*, est préférée. Dans une configuration où les sources sonores restent à des positions fixes, chaque source est ainsi enregistrée par un microphone individuel placé à une distance de l'ordre de quelques dizaines de centimètres (cf. Fig. 3.65). Le nombre de microphones est donc égal au nombre de sources sonores, ce qui représente en général une réduction appréciable du nombre de capteurs par rapport au réseau holophonique. Chaque signal microphonique correspond en première approximation au signal émis directement par la source

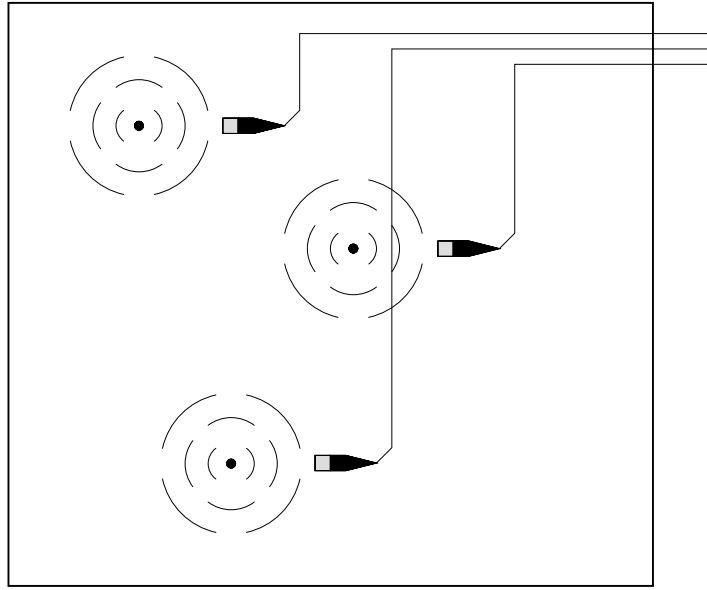


FIG. 3.65 - Multimicrophonie de proximité

primaire, abstraction faite de tout phénomène propagatif. Le microphone se substitue ainsi à la notion de source sonore et, par suite, il définit une *source notionnelle*¹⁵.

Processus d'extrapolation des signaux: Rétropropagation et Propagation

On a compris que les signaux issus des microphones ne peuvent pas alimenter directement les haut-parleurs pour reproduire l'onde primaire. A partir des signaux microphoniques, il faut simuler une prise de son holophonique, c'est-à-dire se ramener aux signaux qu'auraient enregistrés les microphones du réseau théorique disposé à l'emplacement des haut-parleurs (cf. Fig. 3.66) [Berkhout *et al.*, 1993] [Berkhout, 1988]. Dans ce but, un processus d'*extrapolation* est appliqué en aval de la prise de son. Il comporte deux étapes: une *rétropropagation* du microphone sur la source primaire suivie d'une *propagation* de la source primaire sur les sources secondaires. Le signal microphonique est d'abord rétropropagé de l'emplacement du microphone jusqu'à la position de la source primaire qui, pour cette opération, est assimilée à un monopôle. Il s'agit de compenser le temps de propagation et l'atténuation due à la divergence sphérique. Si on considère les signaux dans le domaine fréquentiel, l'opération se traduit par un déphasage et un gain. Les positions du microphone et de la source primaire étant repérées respectivement par les vecteurs \vec{r}_m et \vec{r}_s , le signal de la source primaire p_s est ainsi dérivé du signal microphonique p_m :

$$p_s(\vec{r}_s, \omega) = |\vec{r}_m - \vec{r}_s| e^{jk|\vec{r}_m - \vec{r}_s|} p_m(\vec{r}_m, \omega) \quad (3.23)$$

L'onde ramenée à l'origine de chaque source primaire est ensuite propagée jusqu'au réseau de haut-parleurs. Comme pour la rétropropagation, la propagation est modélisée par un retard et une atténuation, c'est-à-dire que les sources primaires sont assimilées à des monopôles acoustiques. Par exemple, le signal $p_0(\vec{r}_0, \omega)$ qui est destiné à alimenter le haut-parleur situé au point \vec{r}_0 s'obtient comme:

$$p_0(\vec{r}_0, \omega) = \frac{e^{-jk|\vec{r}_0 - \vec{r}_s|}}{|\vec{r}_0 - \vec{r}_s|} p_s(\vec{r}_s, \omega) \quad (3.24)$$

15. L'adjectif "notionel" est la traduction littérale de l'anglais "notional" [Berkhout *et al.*, 1993].

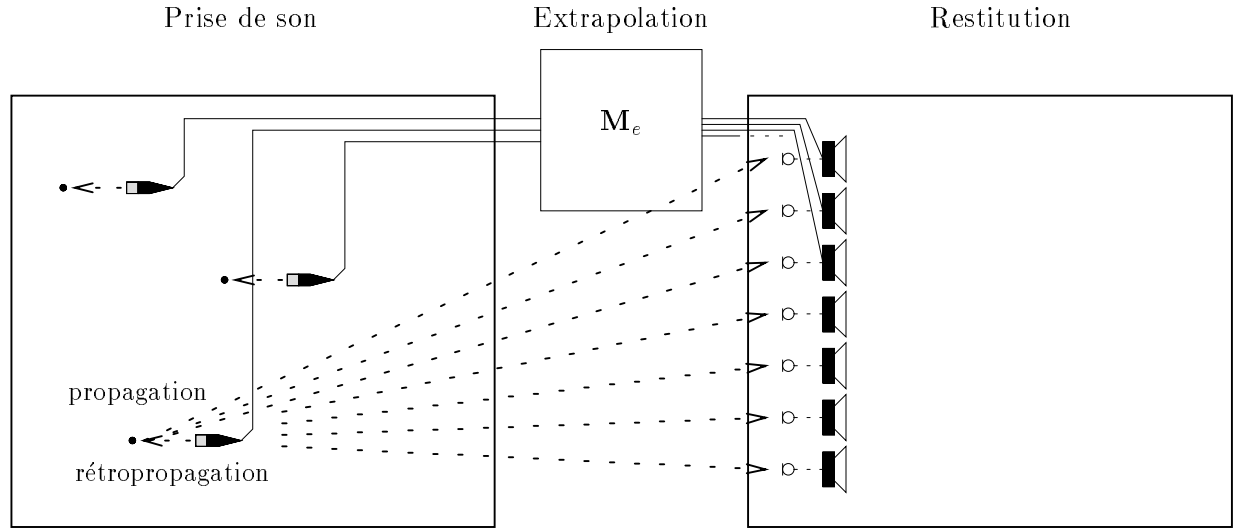


FIG. 3.66 - Processus d'extrapolation appliqué aux signaux microphoniques: Opérations de rétropropagation et propagation destinées à simuler une prise de son par un réseau holophonique

Cette relation est donnée pour un capteur théorique correspondant à un microphone de pression, c'est-à-dire un microphone omnidirectionnel. Si les capteurs possèdent une directivité décrite par une fonction $h(\varphi_0, \theta_0)$, la relation précédente devient:

$$p_0(\vec{r}_0, \omega) = h(\varphi_0, \theta_0) \frac{e^{-jk|\vec{r}_0 - \vec{r}_s|}}{|\vec{r}_0 - \vec{r}_s|} p_s(\vec{r}_s, \omega) \quad (3.25)$$

Dans le cas où plusieurs sources primaires sont présentes, il faut sommer leurs différentes contributions au niveau de chaque haut-parleur:

$$p_0(\vec{r}_0, \omega) = \sum_{i=1}^{N_s} h(\varphi_0, \theta_0) \frac{e^{-jk|\vec{r}_0 - \vec{r}_{s_i}|}}{|\vec{r}_0 - \vec{r}_{s_i}|} p_s(\vec{r}_{s_i}, \omega) \quad (3.26)$$

où la position de la i ème source est identifiée par le vecteur \vec{r}_{s_i} et N_s représente le nombre total de sources primaires. En d'autres termes, le signal alimentant un haut-parleur dépend de tous les signaux microphoniques, contrairement à une approche purement holophonique où chaque microphone n'est relié qu'à un haut-parleur.

Matrice d'encodage

Au final, dans une configuration où un ensemble de N_s sources sont enregistrées par $N_m = N_s$ microphones pour être restituées sur une antenne de N_h haut-parleurs, les signaux alimentant les N_h haut-parleurs s'expriment directement en fonction des N_m signaux microphoniques par une relation matricielle de la forme:

$$\mathbf{p}_0 = \mathbf{M}_e \mathbf{p}_m \quad (3.27)$$

avec:

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_m^T(\omega) &= [p_m(\vec{r}_{m_1}, \omega) \ p_m(\vec{r}_{m_2}, \omega) \ \cdots \ p_m(\vec{r}_{m_{N_m}}, \omega)] \\ \mathbf{p}_0^T(\omega) &= [p_0(\vec{r}_{0_1}, \omega) \ p_0(\vec{r}_{0_2}, \omega) \ \cdots \ p_0(\vec{r}_{0_{N_h}}, \omega)] \end{aligned}$$

La matrice \mathbf{M}_e est la *matrice d'encodage* des signaux qui réalise à la fois les opérations de rétropropagation et de propagation. Elle est définie par (cf. Equ. 3.23 & 3.26):

$$M_{e_{i,j}} = h(\varphi_{0_i}, \theta_{0_i}) e^{jk(|\vec{r}_{m_j} - \vec{r}_{s_j}| - |\vec{r}_{0_i} - \vec{r}_{s_j}|)} \frac{|\vec{r}_{m_j} - \vec{r}_{s_j}|}{|\vec{r}_{0_i} - \vec{r}_{s_j}|}$$

Sources en mouvement

La multimicrophonie de proximité n'est applicable qu'à des sources sonores fixes. L'approche précédente peut être néanmoins étendue au cas de sources mobiles. L'équipe de l'U.T.D. propose de couvrir l'espace des sources primaires par un réseau microphonique horizontal disposé à quelques mètres au dessus des sources sonores (cf. Fig. 3.67) [Berkhout *et al.*, 1993] [Start, 1997]. La scène sonore est décomposée en plusieurs zones élémentaires, sur chacune desquelles pointe un des microphones du réseau. La découpe de l'espace prend en compte les performances de discrimination spatiale de l'appareil auditif humain, en cherchant à adapter la résolution du découpage à celle de la perception. En particulier, comme le pouvoir de résolution spatiale du système auditif est plus élevé en azimut qu'en profondeur, il convient de définir des zones élémentaires étroites, mais profondes (cf. Fig. 3.67).

Le réseau microphonique horizontal se compose de microphones hyperdirectifs, ce qui permet de focaliser chaque microphone sur une zone élémentaire, en minimisant les interférences avec les sources sonores présentes dans les autres zones. En outre, la directivité du microphone est utile pour compenser les effets de la distance de prise de son qui est, en l'occurrence, de l'ordre de plusieurs mètres. Grâce aux microphones hyperdirectifs, le rapport signal à bruit, ainsi que le rapport entre le champ direct et le champ réverbéré sont en effet préservés, en dépit de l'éloignement des sources sonores.

Les microphones sont répartis en tolérant un recouvrement partiel de leurs lobes de directivité, en recherchant le compromis optimal entre la discrimination spatiale et l'homogénéité du rendu sonore. Un recouvrement trop faible augmente la discrimination spatiale, mais on risque d'observer d'importantes variations de niveau sonore lorsqu'une source se déplace entre plusieurs zones. Si le recouvrement entre microphones est trop fort, l'homogénéité du rendu est garantie, mais la discrimination spatiale entre les zones disparaît. Les travaux menés à l'U.T.D. préconisent un recouvrement entre lobes microphoniques adjacents à -3 dB. Le recouvrement est ajusté en jouant sur la hauteur du réseau de microphones. Cependant, dans certains cas, la hauteur des microphones est imposée par la configuration de la salle et s'avère trop grande pour réaliser une discrimination spatiale satisfaisante, compte tenu de la directivité insuffisante des microphones. Les antennes acoustiques offrent une alternative intéressante du fait de leur sélectivité spatiale pointue. On pourrait ainsi envisager de substituer au réseau de microphones une ou plusieurs antennes acoustiques dont les lobes balayeraient les différentes zones de la scène sonore (cf. Fig. 3.68).

Comme en multimicrophonie de proximité, le signal recueilli en sortie d'un microphone du réseau est assimilé au champ direct qu'aurait émis une source située au centre de la zone qu'il pointe. Si aucune source n'est présente, le signal capté est nul, mais, dès qu'une source intervient dans sa zone d'attribution, elle est retransmise en sortie du capteur modulo la directivité du microphone. Dans le cas où la source est située à la frontière entre deux zones, elle est retransmise sur deux microphones. Ce dispositif est véritablement une généralisation de la multimicrophonie de proximité à la prise de son d'une scène sonore quelconque incluant des sources fixes ou en mouvement. Le concept de source notionnelle prend alors tout son sens: chaque microphone définit une source *potentielle*, voire *virtuelle*, qui n'a pas forcément de support physique, d'où l'idée de *notion de source* ou source notionnelle. Ce dispositif de prise de son revient en fait à décomposer le champ primaire sur la base d'une distribution de sources élémentaires figurées par les sources notionnelles associées aux différents microphones.

Intérêt des sources notionnelles

L'intérêt majeur du concept de source notionnelle réside dans la *réduction du nombre de microphones* nécessaires à la prise de son: du moins le rapport entre le nombre de microphones et le nombre de sources sonores à enregistrer est-il plus optimal. En général, on se ramène à une situation où le nombre de microphones est égal au nombre de sources primaires. Le nombre de signaux à stocker ou diffuser en vue de la restitution est également réduit d'autant. On note que, contrairement à une prise de son holophonique où il existe une forte diaphonie entre les différentes voies d'enregistrement, le concept de source notionnelle réduit la

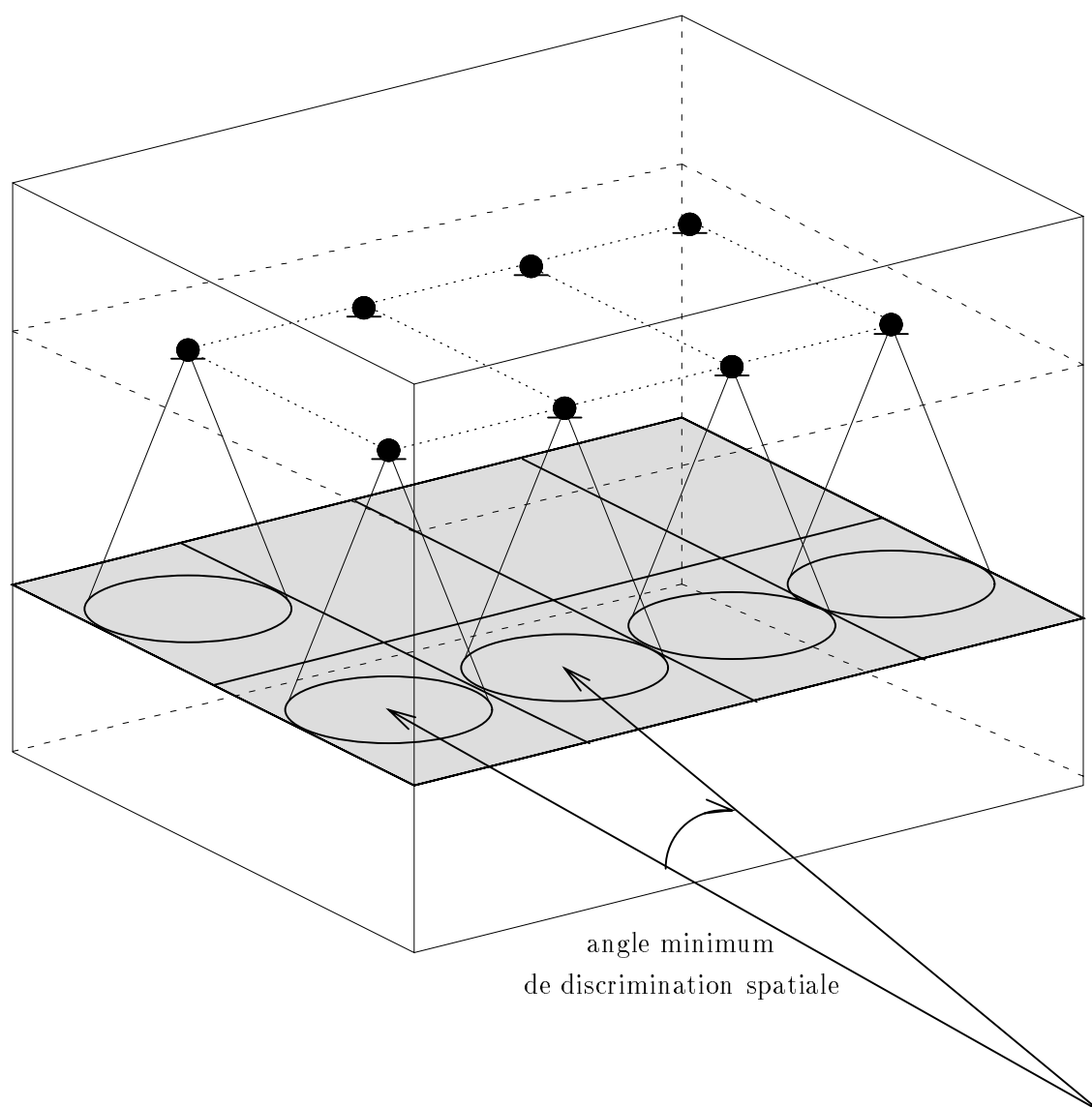


FIG. 3.67 - Concept de source notionnelle appliqué à des sources en mouvement: Couverture de la scène sonore par un réseau microphonique horizontal disposé en hauteur et dont chaque microphone pointe sur une fraction de l'espace

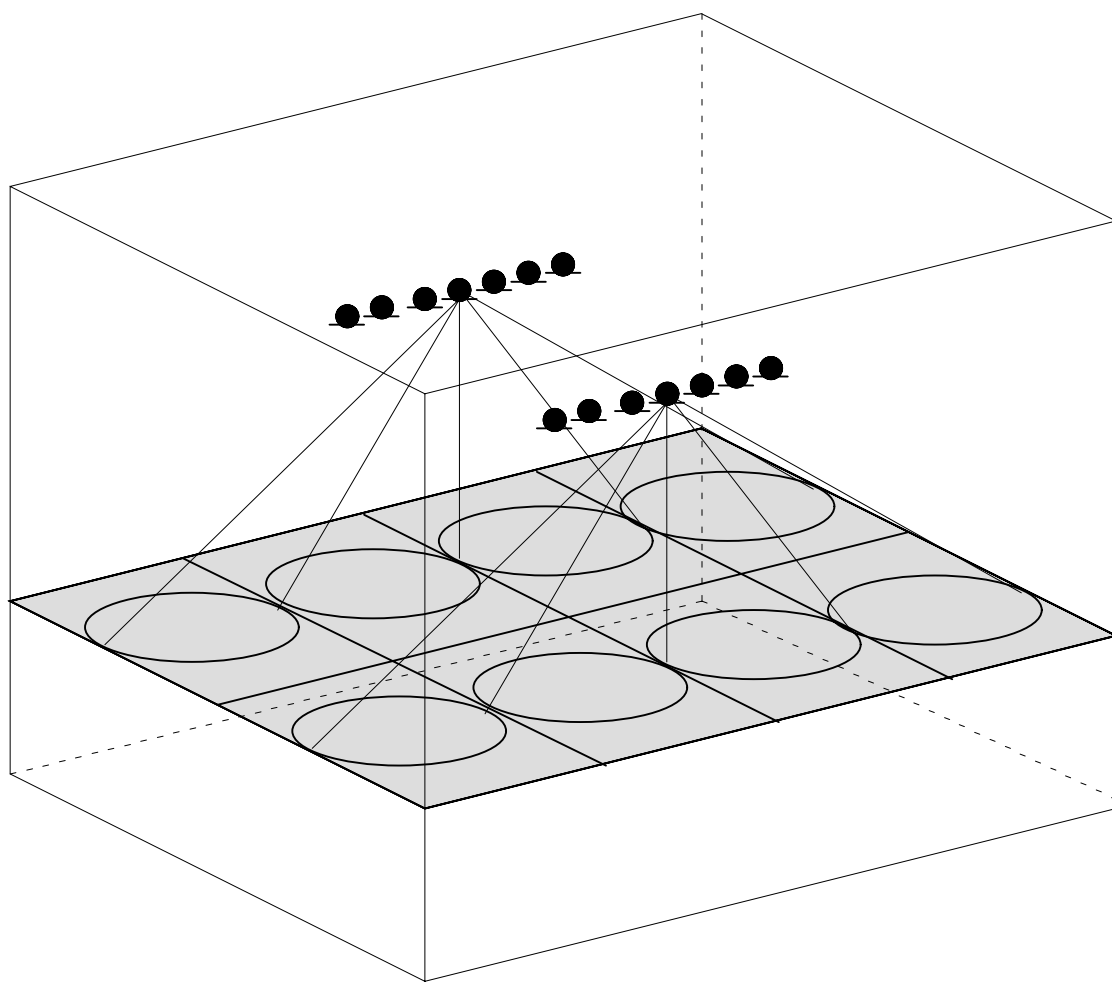


FIG. 3.68 - Couverture de la scène sonore par des antennes acoustiques dont les lobes balaient les différentes zones de la scène sonore

redondance entre les signaux enregistrés. Il est alors possible d'intervenir sur un des signaux, c'est-à-dire une des sources sonores, sans interférer sur les autres sources. Par ailleurs, du fait que les réseaux de microphones et de haut-parleurs sont spatialement dissociés, les problèmes de *couplage entre microphones et haut-parleurs*, lorsque la prise et la restitution du son sont effectuées simultanément¹⁶, sont minimisés, surtout si l'on a soin d'utiliser des microphones directifs.

Cependant, le concept de source notionnelle repose sur une approche de prise de son de proximité qui pose des problèmes d'instabilités liées aux effets de champ proche [Nicol, 1997]. Cette approche appelle aussi quelques commentaires relatifs à la restitution de l'*effet de salle* et de la *directivité des sources primaires*. En multimicrophonie de proximité, chaque microphone étant placé au voisinage immédiat des sources, l'effet de salle est masqué par le champ direct prédominant. Cette prise de son ne permet pas non plus de rendre compte de la directivité des sources primaires. Les mêmes remarques restent valables lorsque la prise de son est assurée par un réseau microphonique horizontal¹⁷, attendu qu'en utilisant des microphones hyperdirectifs, on cherche à se rapprocher des conditions d'une prise de son en champ proche. Par ailleurs, dans le processus d'extrapolation qui simule la propagation acoustique des microphones vers le réseau de haut-parleurs, les sources sonores sont modélisées par des monopôles et on considère une propagation en champ libre. Il semble néanmoins possible d'introduire dans le processus d'extrapolation des modèles de propagation plus raffinés, afin de simuler un effet de salle ou de restituer la directivité des sources. Bien entendu, l'effet de salle et la directivité des sources devront avoir été identifiés par des mesures préalables. En contrepartie, la complexité en coût de calcul du système sera considérablement augmentée.

L'équipe de l'U.T.D. suggère une méthode pour reproduire l'effet de salle [Berkhout, 1988] [de Vries *et al.*, 1994a]. Il faut distinguer dans le champ réverbéré, le champ *précoce*, c'est-à-dire les premières réflexions qui surviennent aussitôt après l'onde directe, et la réverbération *tardive*. Les premières réflexions peuvent être restituées en appliquant la *méthode des sources images* qui consiste à identifier l'onde réfléchie par une paroi à l'onde émise par une source fictive correspondant à l'image de la source originale par rapport à la surface réfléchissante. Pour reproduire les premières réflexions, il suffit donc d'étendre la distribution de sources — limitée aux sources primaires ou notionnelles — en incluant les sources images qui sont traitées à l'instar des sources réelles. De cette façon, les premières réflexions sont reproduites dans tous leurs détails (temps d'arrivée, incidence...), ce qui est important, car de nombreuses études ont établi que l'appareil auditif y est très sensible. Pour reproduire la réverbération tardive, l'équipe de l'U.T.D. propose de disposer dans la salle un couple stéréophonique¹⁸ ou un microphone ambisonique (cf. Chapitre 2) placé à plusieurs mètres des sources primaires. Les deux voies stéréophoniques ou les trois signaux ambisoniques (X,Y,Z) sont ensuite restitués sous la forme d'ondes planes issues des directions pointées par les capsules microphoniques [Boone *et al.*, 1995] [Verheijen *et al.*, 1997] [Sonke & de Vries, 1997].

Cette idée illustre le parti qu'on peut tirer du concept de source notionnelle: dès lors que la prise de son est virtualisée, il devient possible de manipuler les signaux microphoniques pour modifier la scène sonore ou introduire des corrections [Berkhout, 1988]. On peut ainsi changer la position des sources, les déplacer ou encore appliquer un effet de salle arbitraire, éventuellement différent de celui de la salle de prise de son. Si on se reporte à la section précédente (cf. Section 3.4.3), il devient aussi possible d'appliquer au réseau de haut-parleurs une pondération spatiale qui dépend de la position de la source primaire, qui est dès lors une *source notionnelle* dont la position est fixe et connue a priori. Le concept de source notionnelle s'avère également intéressant pour pallier certains problèmes soulevés par l'échantillonnage spatial ou la troncature du réseau de sources secondaires, problèmes qui vont être étudiés dans les deux chapitres qui suivent.

3.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté les principes généraux de l'holophonie. On a aussi vu comment le procédé peut être simplifié, notamment en ce qui concerne les réseaux de transducteurs nécessaires à la prise et la restitution du son. Le concept de source notionnelle met en avant le principe d'une multimicrophonie de proximité pour la prise de son, tandis que, pour la restitution, on a montré qu'à condition de limiter l'espace de prise de

16. ce qui est le cas dans tout système dédié à un service de communication...

17. Il convient de noter cependant que le réseau horizontal de microphones est capable de percevoir partiellement la directivité de sources primaires, encore ne s'agit-il que de leur directivité dans le plan vertical, qui n'est pas la directivité que l'on perçoit ordinairement dans une situation classique d'écoute.

18. Dans une prise de son classique, on a souvent recours à un tel dispositif pour recueillir l' "ambiance" de la salle.

son et la zone d'écoute, il est possible de restreindre le réseau de haut-parleurs en vertu du Théorème de la Phase Stationnaire. Il reste que deux aspects importants de la réalisation d'un système holophonique n'ont pas encore été abordés en détail: *l'échantillonnage spatial et la troncature de la distribution de sources secondaires*. Ils font l'objet des deux chapitres à venir.

Références Bibliographiques

- BARTON G. (1989). *Elements of Green's Functions and Propagation Potentials, Diffusion and Waves*. Clarendon Press, Oxford.
- BERKHOUT A. J. (1988). A Holographic Approach to Acoustic Control. *J. Audio Eng. Soc.*, **36**(12), pp. 977–995.
- BERKHOUT A. J., DE VRIES D. & VOGEL P. (1993). Acoustic Control by Wave Field Synthesis. *J. Acoust. Soc. Am.*, **93**(5), pp. 2764–2778.
- BOONE M. M. & VERHEIJEN E. N. G. (Octobre 1993). Multi-Channel Sound Reproduction Based on Wave Field Synthesis. *In: Proceedings of the A.E.S. 95th Convention*.
- BOONE M. M. & VERHEIJEN E. N. G. (Février 1995). Recording and Reproduction using Wave Field Synthesis. *In: Proceedings of the A.E.S. 98th Convention*.
- BOONE M. M., VERHEIJEN E. N. G. & VAN TOL P. F. (1995). Spatial Sound-Field Reproduction by Wave-Field Synthesis. *J. Audio Eng. Soc.*, **43**(12), pp. 1003–1011.
- BRUNEAU M. (1983). *Introduction aux théories de l'acoustique*. Université du Maine, Le Mans.
- DE VRIES D., REIJNEN A.J. & SCHONEWILLE M.A. (1994). The Wave Field Synthesis Concept Applied to Generation of Reflections and Reverberation. *In: Proceedings of the A.E.S. 96th Convention*.
- JESSEL M. (1973). *Acoustique théorique, propagation et holophonie*. Masson, Paris.
- MANGIANTE G. (Avril 1997). Contrôle actif en champ libre. *In: Actes du 4^{ème} Congrès Français d'Acoustique*, vol. 1. pp. 179–182.
- MURRAY J. D. (1974). *Asymptotic Analysis*. Clarendon Press, Oxford. Chap. 4.
- NICOL R. (1996). *A l'écoute du principe de Huygens*. Rapp. tech. D.E.A. d'Acoustique Appliquée, Université du Maine, Le Mans.
- NICOL R. (1997). *Champ proche et champ lointain: Caractérisation physique, applications à la mesure, la prise et la restitution du son (Mémoire de Probatoire Ingénieur)*. Rapp. tech. C.N.A.M., Paris.
- ROCARD Y. (1960). *Dynamique générale des vibrations*. Masson, Paris.
- SONKE J.-J. & DE VRIES D. (Mars 1997). Generation of Diffuse Reverberation by Plane Wave Synthesis. *In: Proceedings of the A.E.S. 102nd Convention*.
- START E. (1997). *Direct Sound Enhancement by Wave Field Synthesis*. Ph.D. Thesis, Faculty of Applied Physics, Delft, Pays-Bas.
- START E. W. (Mai 1996). Application of Curved Arrays in Wave Field Synthesis. *In: Proceedings of the A.E.S. 100th Convention*.
- VERHEIJEN E. (1997). *Sound reproduction by wave field synthesis*. Ph.D. Thesis, Faculty of Applied Physics, Delft, Pays-Bas.
- VERHEIJEN E. N. G., JANSEN G. & BOONE M. M. (Mars 1997). Design and Implementation of an Audio Reproduction System Based on Wave Field Synthesis. *In: Proceedings of the A.E.S. 102nd Convention*.

Table des Illustrations

3.1	Principe de Huygens: le front d'onde à un instant donné est équivalent à une distribution de sources secondaires qui rayonnent chacune une ondelette et dont la superposition des contributions redonne le front d'onde aux instants ultérieurs.	99
3.2	Applications du Principe de Huygens	100
3.3	Décomposition de l'espace Ω en deux domaines: le domaine Ω_1 des sources primaires et le domaine Ω_2 de restitution (Dans un souci de clarté du dessin, les domaines Ω et Ω_2 sont figurés par des sphères, mais leur forme est quelconque.)	102
3.4	Géométrie du problème de Kirchhoff: La partition de l'espace Ω en deux sous-espaces peut s'effectuer de deux façons, en entourant par une surface fermée $\partial\Omega$, soit le domaine de restitution Ω_2 (a), soit le domaine des sources Ω_1 (b).	103
3.5	Directivité dipolaire: Le plan de la membrane du transducteur, qu'il s'agisse d'un microphone ou d'une source, correspond à un zéro de directivité.	105
3.6	Relations de phase dans les signaux captés par un microphone à gradient de pression et dans l'onde émise par une source dipolaire	106
3.7	Géométrie du problème de Rayleigh: Le domaine des sources Ω_1 et le domaine de restitution Ω_2 sont séparés par un plan vertical.	107
3.8	Principe général de la prise et restitution du son selon la méthode holophonique	109
3.9	Source Monopolaire et Source Dipolaire: Approximation par un haut-parleur bafflé et un haut-parleur non bafflé	110
3.10	Source de Kirchhoff: Relations de phase entre les signaux captés par le microphone de pression et le microphone à gradient de pression d'une part et entre les signaux émis par le monopôle et le dipôle d'autre part (les dipôles sont orientés selon la normale \vec{n} , cf. Fig. 3.4)	111
3.11	Conséquences pratiques de la sélectivité spatiale des sources de Kirchhoff	113
3.12	Problème de Kirchhoff appliqué à une salle: Modélisation d'un effet de salle par la méthode des sources images	114
3.13	Problème de Kirchhoff appliqué à une salle	115
3.14	Approximation de la Phase Stationnaire: La distribution de sources secondaires se réduit à l'intersection de la surface $\partial\Omega$ avec le plan horizontal.	117
3.15	Approximation de la phase stationnaire: On considère un espace de restitution Ω_2 prenant la forme d'une colonne verticale infinie de section quelconque.	118
3.16	Point de Phase Stationnaire: Point d'intersection entre le plan horizontal et la ligne verticale infinie L considérée (cf. Fig. 3.15)	120
3.17	Approximation de la Phase Stationnaire: A chaque ligne-source verticale est substituée une source unique située à son point de phase stationnaire, ce qui ramène le réseau 2D de sources secondaires au contour 1D C_0	122
3.18	Approximation de la Phase Stationnaire: Exemples de réseau 1D de sources secondaires	123
3.19	Théorème de la phase stationnaire appliqué au réseau 1D de sources secondaires	124
3.20	Décomposition de l'espace des sources primaires en zones élémentaires contrôlées par une seule source secondaire	125
3.21	Restriction de l'espace des sources primaires: Réseau ouvert	125
3.22	Restitution holophonique pour la visioconférence: Antenne rectiligne de haut-parleurs disposée derrière l'écran vidéo (l'espace des sources primaires se limitent au demi-espace situé derrière l'écran vidéo)	126
3.23	Réseau circulaire: Configuration des sources primaires, des sources secondaires et des récepteurs	128

3.24 Réseau circulaire: Comparaison entre l'onde de pression originale et onde de pression synthétisée par les sources secondaires (la pression acoustique est représentée en fonction du temps le long d'une ligne parallèle à l'axe (O_x) en $y = 0.5$ m., la source primaire est un monopôle situé en $s_1[0., 3., 0.]$ et qui émet une impulsion gaussienne de fréquence $f = 400$ Hz, les sources secondaires sont distribuées le long d'un cercle de rayon $r_0 = 1.5$ m. et au total $N = 100$ sources secondaires sont utilisées, cf. Fig. 3.23, cf. Annexes E & F)	129
3.25 Décomposition du réseau circulaire en deux sous-antennes semi-circulaires	129
3.26 Réseau circulaire: Contribution relative des sous-antennes semi-circulaires (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, $r_0 = 1.5$ m. et $N = 100$, cf. Fig. 3.23 & 3.25, cf. Annexes E & F)	130
3.27 Synthèse du champ acoustique d'un monopôle par une antenne circulaire: Identification des sources utiles et sources inactives	131
3.28 Réseau circulaire: Décomposition en deux sous-antennes représentant respectivement un quart du cercle et son complément	132
3.29 Réseau circulaire: Contribution relative d'un quart de cercle et de son complément (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, $r_0 = 1.5$ m. et $N = 100$, cf. Fig. 3.23 & 3.28, cf. Annexes E & F)	132
3.30 Décomposition du processus de reconstruction de l'onde primaire en un point: Ondelettes émises par les sources secondaires (Récepteur en $\vec{r}[0., 0., 0.]$, source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, réseau circulaire: $r_0 = 1.5$ m. et $N = 100$, cf. Fig. 3.23, cf. Annexes E & F)	133
3.31 Décomposition du processus de reconstruction de l'onde primaire en un point: Somme des ondelettes (Récepteur en $\vec{r}[0., 0., 0.]$, source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, réseau circulaire: $r_0 = 1.5$ m. et $N = 100$, cf. Fig. 3.23, cf. Annexes E & F)	134
3.32 Réseau circulaire: Onde de pression originale et onde de pression synthétisée par l'antenne semi-circulaire 1 pour la source primaire en $s_2[3., 2., 0.]$ (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, $r_0 = 1.5$ m. et $N = 100$, cf. Fig. 3.23 & 3.25, cf. Annexes E & F)	135
3.33 Réseau circulaire: Onde de pression originale et onde de pression synthétisée par l'antennes semi-circulaire 1 en $y = -0.5$ m. (source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, $r_0 = 1.5$ m. et $N = 100$, cf. Fig. 3.23 & 3.25, cf. Annexes E & F)	135
3.34 Réseau carré: Configuration des sources primaires, des sources secondaires et des récepteurs	136
3.35 Réseau carré: Onde de pression synthétisée par les sources secondaires pour simuler une source primaire en s_1 (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 120$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)	138
3.36 Réseau carré: Contributions des quatre côtés pour une source primaire centrée (source primaire en s_1 , récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 120$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)	138
3.37 Réseau carré: Onde de pression synthétisée par les sources secondaires pour une source primaire excentrée (source primaire en s_2 , récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 120$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)	139
3.38 Réseau carré: Contributions des quatre côtés pour une source primaire excentrée (source primaire en s_2 , récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 120$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)	139
3.39 Réseau polygonal élémentaire (une antenne rectiligne principale — côté 2 — associée à deux antennes latérales — côtés 1 et 3 —): Configuration des sources primaires, des sources secondaires et des récepteurs	140
3.40 Réseau polygonal élémentaire: Onde de pression synthétisée par les sources secondaires (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, antenne rectiligne élémentaire de longueur $l = 2$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 61$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.39, cf. Annexes E & F)	141
3.41 Réseau polygonal élémentaire: Contribution des trois antennes rectilignes élémentaires pour la source primaire en s_1 (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, antenne rectiligne élémentaire de longueur $l = 2$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 61$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.39, cf. Annexes E & F)	142

3.42 Réseau polygonal élémentaire: Contribution des trois antennes rectilignes élémentaires pour la source primaire en s_2 (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, antenne rectiligne élémentaire de longueur $l = 2$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 61$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.39, cf. Annexes E & F)	143
3.43 Réseau circulaire: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires de la sous-antenne circulaire 1 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, $r_0 = 1.5$ m. et $N = 100$, cf. Fig. 3.23 & 3.25, cf. Annexes E & F)	144
3.44 Réseau circulaire: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires de la sous-antenne circulaire 2 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, $r_0 = 1.5$ m. et $N = 100$, cf. Fig. 3.23 & 3.25, cf. Annexes E & F)	144
3.45 Réseau circulaire: Onde de pression restituée lorsque le réseau ne comporte exclusivement que des monopôles ou des dipôles (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, $r_0 = 1.5$ m. et $N = 100$, cf. Fig. 3.23 & 3.25, cf. Annexes E & F)	145
3.46 Réseau circulaire de monopôles: Pondération spatiale semi-circulaire	146
3.47 Réseau carré: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires du côté 1 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 124$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)	148
3.48 Réseau carré: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires du côté 2 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 124$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)	148
3.49 Réseau carré: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires du côté 3 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 124$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)	149
3.50 Réseau carré: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires du côté 4 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_1 , $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 124$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)	149
3.51 Simulation d'une source primaire en s_1 située en aval du réseau de sources secondaires (c'est-à-dire du même côté que la zone de restitution): Le front d'onde synthétisé correspond à celui qui aurait été émis par une source située en s'_1 , position symétrique de s_1 par rapport au plan des sources secondaires.	150
3.52 Source secondaire au point de phase stationnaire: Equivalence entre les ondes rayonnées par le monopôle et le dipôle en vertu de la symétrie des angles d'émission, pour le microphone bidirectionnel, et de réception, pour la source dipolaire.	151
3.53 Distribution 1D de Rayleigh: Chaque côté du réseau carré est identifié à un segment tronqué d'une droite infinie.	152
3.54 Réseau carré: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires du côté 1 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_2 , $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 120$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)	154
3.55 Réseau carré: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires du côté 2 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_2 , $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 120$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)	154
3.56 Réseau carré: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires du côté 3 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_2 , $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 120$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)	155
3.57 Réseau carré: Comparaison des ondes de pression synthétisées par les réseaux monopolaires et dipolaires du côté 4 (récepteurs en $y = 0.5$ m., source primaire en s_2 , $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 120$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)	155

3.58 Réseau carré: Onde de pression synthétisée par les sources secondaires monopolaires pour la source en s_1 (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 124$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)	156
3.59 Réseau carré: Onde de pression synthétisée par les sources secondaires monopolaires pour la source en s_2 (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, carré de côté $l = 3$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 124$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.34, cf. Annexes E & F)	157
3.60 Réseau polygonal élémentaire: Décomposition de l'espace des sources primaires en six zones associées aux différents éléments du réseau de sources secondaires	159
3.61 Réseau polygonal élémentaire: Onde de pression synthétisée par les sources monopolaires pour la source primaire en s_1 (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, antenne rectiligne élémentaire de longueur $l = 2$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 60$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.39, cf. Annexes E & F)	160
3.62 Réseau polygonal élémentaire: Onde de pression synthétisée par les sources monopolaires pour la source primaire en $s_3[2., 4., 0.]$ (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, antenne rectiligne élémentaire de longueur $l = 2$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 60$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.39, cf. Annexes E & F)	161
3.63 Réseau polygonal élémentaire: Onde de pression synthétisée par les sources monopolaires pour la source primaire en $s_4[0., 2., 0.]$ (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, antenne rectiligne élémentaire de longueur $l = 2$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 60$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.39, cf. Annexes E & F)	162
3.64 Réseau polygonal élémentaire: Onde de pression synthétisée par les sources monopolaires pour la source primaire en $s_5[3., 1., 0.]$ (récepteurs en $y = 0.5$ m., $f = 400$ Hz, antenne rectiligne élémentaire de longueur $l = 2$ m., espacement entre sources secondaires de $\Delta = 0.1$ m., $N = 60$ sources secondaires au total, cf. Fig. 3.39, cf. Annexes E & F)	163
3.65 Multimicrophonie de proximité	165
3.66 Processus d'extrapolation appliqué aux signaux microphoniques: Opérations de rétropropagation et propagation destinées à simuler une prise de son par un réseau holophonique .	166
3.67 Concept de source notionnelle appliqué à des sources en mouvement: Couverture de la scène sonore par un réseau microphonique horizontal disposé en hauteur et dont chaque microphone pointe sur une fraction de l'espace	168
3.68 Couverture de la scène sonore par des antennes acoustiques dont les lobes balaient les différentes zones de la scène sonore	169
