

# COLLOQUE NATIONAL SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS



NICE du 26 au 30 AVRIL 1977

---

Commande et observation de systèmes acoustiques directifs

Gérard CAPOLINO

C. N. R. S. Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Equipe Absorbants Acoustiques Actifs  
31, chemin Joseph Aiguier, 13274 MARSEILLE Cedex 2

---

## RESUME

Les sources et les puits acoustiques sont généralement des systèmes omnidirectionnels capables d'émettre ou de recevoir des ondes sonores de forme quelconque.

Nous nous intéresserons, volontairement dans le présent exposé, au domaine du spectre audible, c'est-à-dire à des processus dont la bande passante s'étendra entre 20 Hz et 20 000 Hz et nous ferons, de plus, l'hypothèse linéaire.

On étudie théoriquement et expérimentalement les systèmes multi-sources (ou multi-puits) acoustiques qui sont invariants, scalaires ou multivariables suivant le cas.

Les conditions de directivité ou d'hyperdirectivité sont définies ainsi que la forme des commandes à partir de l'observation globale du système.

Plusieurs exemples sont donnés pour des sources acoustiques constituées par des haut-parleurs électrodynamiques et on cite également quelques applications pratiques de la directivité et de l'hyperdirectivité sonores.

## SUMMARY

Acoustic transmitters and receivers are generally omnidirectional systems used in different areas and handling different waveforms.

Acoustic processes are considered in this paper to be linear in the audio bandwidth between 20 Hz and 20 000 Hz.

Multi-systems (multi-sources and multi-sinks) are studied theoretically and experimentally, provided that some directivity and hyper-directivity data are given.

Several examples are solved for acoustic emitters composed of electrodynamic loudspeakers. Some applications for audio directivity are presented.



## Introduction

L'étude qualitative et quantitative des systèmes acoustiques directifs a fait l'objet de nombreuses publications comme : (OLSON 1973), (PFRETZCHNER & ROMERA 1974), (CANEVET 1977), (CAPOLINO 1977). Ces études montrent toutes l'intérêt acoustique de la discrétisation d'un espace sonore par un nombre fini de sources dont on fixe le diagramme de rayonnement global.

Des essais de calculs numériques (KEELER 1974), (KEMPTON 1976) montrent la reconstitution spatiale de front d'onde par des structures multi-sources dans le domaine du spectre audible. L'intérêt de la reconstitution spatiale de diagrammes polaires directifs nous a mené à une théorie simple de l'observation et de la commande de systèmes acoustiques linéaires. L'utilisation de haut-parleurs pour le spectre audible conduira à des techniques d'identification déterministes afin d'éviter des modèles analytiques trop élémentaires.

Les quelques définitions que nous donnons de la directivité et de l'hyperdirectivité sonore, sans avoir la prétention d'être exhaustives, montrent les conditions de gouvernabilité de telles sources.

Nous terminons notre exposé par des exemples concrets de systèmes acoustiques se rapportant aux hypothèses que nous avons faites en citant plusieurs applications actuelles et futures des sources directives.

## I. Théorie des processus multivariés acoustiques

### 1.1. Les systèmes acoustiques multi-sources

Considérons une surface fermée concave ou convexe ne renfermant pas de points doubles (figure 1) et une distribution continue de  $n$  sources électro-acoustiques à membrane mobile. La perpendiculaire au centre de chaque membrane étant confondue avec la normale à la surface orientée positivement vers l'extérieur.

Soit  $G$  le centre de gravité de la surface fermée  $\Sigma$ , on peut déterminer, en joignant  $G$  au  $n$  centres des membranes mobiles déjà considérés,  $n$  directions d'émission du système sonore ainsi constitué ; si on désigne par  $y_i(t)$  l'observation de la  $i^{\text{ème}}$  direction sur le cercle de centre  $G$  et de rayon  $r$  et par  $u_i(t)$  la commande de la  $i^{\text{ème}}$  membrane on peut écrire :

$$[Y_i(s)] = [H_{ij}(s)] \cdot [U_i(s)] \quad (1)$$

où  $Y_i(s)$  et  $U_i(s)$  sont respectivement les

transformées de Laplace unilatérales des observations temporelles  $y_i(t)$  et  $u_i(t)$  et  $[H_{ij}(s)]$  la matrice carrée d'ordre  $n$  de transfert.

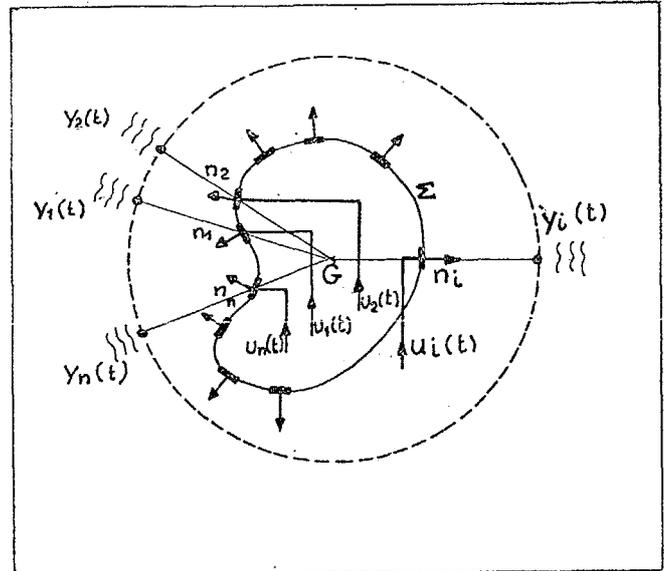


Figure 1. Configuration d'un système multi-sources.

### 1.2. Les systèmes acoustiques multi-puits

Supposons, en conservant les mêmes notations que précédemment, que nous supprimons les commandes  $u_i(t)$   $i=1,2,\dots,n$  et que les membranes soient suffisamment sensibles pour qu'elles puissent délivrer une information électrique  $s_i(t)$  sous l'excitation d'un champ sonore.

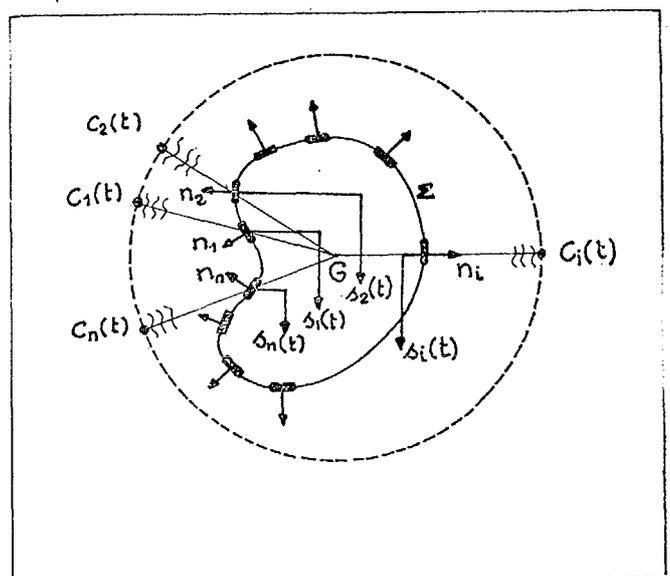


Figure 2. Configuration d'un système multi-puits

Si une source sonore, supposée ponctuelle, se déplace sur le cercle de centre  $G$  et de rayon  $r$  d'une façon discrète en émettant dans la  $i^{\text{ème}}$  direction d'obser-

variation déjà définie un champ  $C_i(t)$  nous aurons la relation :  $[S_i(s)] = [F_{ij}(s)] \cdot [C_i(s)]$  (2) où  $S_i(s)$  et  $C_i(s)$  sont respectivement les transformées de Laplace unilatérales des observations temporelles  $s_i(t)$  et  $c_i(t)$  et  $[F_{ij}(s)]$  la matrice de transfert (carrée d'ordre  $n$ ).

et 
$$\phi_{y_j u_i}(\tau) = h_{ij}(\tau) \quad (7)$$

Il est donc inutile de réaliser une déconvolution, la réponse impulsionnelle du système étant équivalente à sa fonction d'inter-corrélation sortie-entrée.

II. Identification déterministe des systèmes acoustiques

Les processus acoustiques dans le domaine des basses fréquences se prêtent bien à des identifications déterministes de deux types :

- l'analyse fréquentielle
- la méthode de corrélation

Bien que l'analyse transitoire ne soit pas rejetée complètement mais difficile de mise en oeuvre, on préfère déterminer le modèle linéaire par analyse fréquentielle en excitant le système par des signaux sinusoïdaux de fréquence constante en balayant le spectre discrètement. Dans le cas d'un système multi-sources, par exemple, on excite l'entrée  $u_i$  les  $n-1$  autres entrées étant au repos et par  $n$  mesures au points  $y_1, \dots, y_i, \dots, y_n$  on détermine les diagrammes amplitude-fréquence et phase-fréquence (Bode) des  $n$  transmittances  $H_{i1}(s), \dots, H_{ii}(s), \dots, H_{in}(s)$ . On peut alors exprimer analytiquement ces transmittances, soit par la méthode de Kardachov-Karniuchine, soit par la méthode de Dudnikov (POVY 1975).

La méthode de corrélation, si elle demande des hypothèses de départ très précises, permet d'obtenir des résultats exploitables plus directement. On excite alors les entrées  $u_i$  par des signaux aléatoires vérifiant la propriété de stationnarité et d'ergodicité de valeur moyenne nulle. La réponse du système est donnée par la relation bien connue :

$$y_j(t) = \int_0^{+\infty} u_i(t-\theta) \cdot h_{ij}(\theta) \cdot d\theta \quad (3)$$

De plus la fonction d'intercorrélation sortie-entrée a pour expression

$$\phi_{y_j u_i}(\tau) = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_0^T y_j(t) \cdot u_i(t-\tau) \cdot dt \quad (4)$$

ou encore

$$\phi_{y_j u_i}(\tau) = \int_0^{+\infty} \phi_{u_i u_i}(\tau-\theta) \cdot h_{ij}(\theta) \cdot d\theta \quad (5)$$

La connaissance de la bande passante (20 Hz - 20 000 Hz) des systèmes considérés permet d'utiliser un bruit d'excitation à spectre très étendu par rapport à cette bande passante (bruit blanc ou coloré) donc :

$$\phi_{u_i u_i}(\tau) = \delta(\tau) \quad (6)$$

Les exemples pris pour les systèmes multi-sources sont bien évidemment reproductibles pour les systèmes multi-puits, en déplaçant une source émettant un champ constant au  $n$  points  $y_1, \dots, y_i, \dots, y_n$  et en observant les sorties  $s_1, \dots, s_i, \dots, s_n$ .

III. Directivité et hyperdirectivité sonore

Les considérations d'observabilité étant établies, il s'agit de déterminer les commandes de tels systèmes lorsqu'on leur fixe des conditions de rayonnement spatial qui caractérise sa directivité.

3.1. Systèmes directifs

On dira qu'un système de  $n$  sources ( $n$  puits) est directif s'il possède au plus  $\frac{n}{2}$  directions d'observations minimales. Dans le cas de sources, par exemple, le champ mesuré aux points  $y_{L-\dots-L+\inf(\frac{n}{2})}$  devra être nul théoriquement ce qui revient à fixer, dans l'équation d'état (1) au plus  $\frac{n}{2}$  valeurs de  $y(t)$  nulles et déterminer les commandes  $U_i(s)$  en fonction de ces conditions.

3.2. Systèmes hyperdirectifs

On dira qu'un système de  $n$  sources ( $n$  puits) est hyper-directif s'il possède au moins  $\frac{n}{2}$  directions d'observations minimales.

Prenons l'exemple de puits, les sorties  $S_{L-\dots-L+\sup(\frac{n}{2})}$  devront être nulles théoriquement pour une excitation constante  $c_i$  aux points  $c_1, \dots, c_i, \dots, c_n$  ce qui revient à fixer, dans l'équation d'état (2), au moins  $\frac{n}{2}$  valeurs de  $s(t)$  nulles et déterminer les transmittances liant les sorties  $S_i(s)$  entre elles pour une excitation  $C_i(s)$  constante pour  $i = 1, \dots, n$ .



3.3. Quelques exemples de directivité multi-sources

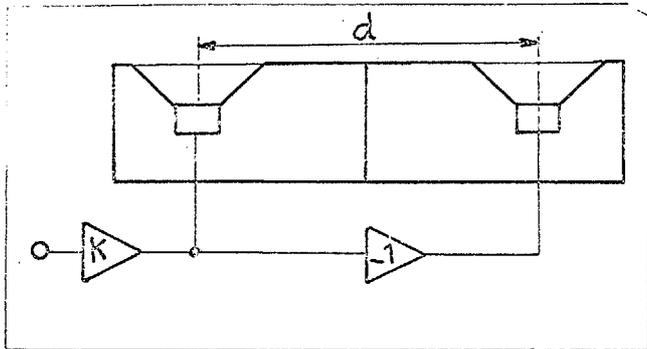


Figure 3. Représentation d'un doublet acoustique.

On considère un doublet acoustique (Fig. 3) constitué par deux haut-parleurs électrodynamiques de diamètre 12 cm dont les axes de leurs bobines mobiles sont situés à 30 cm de distance.

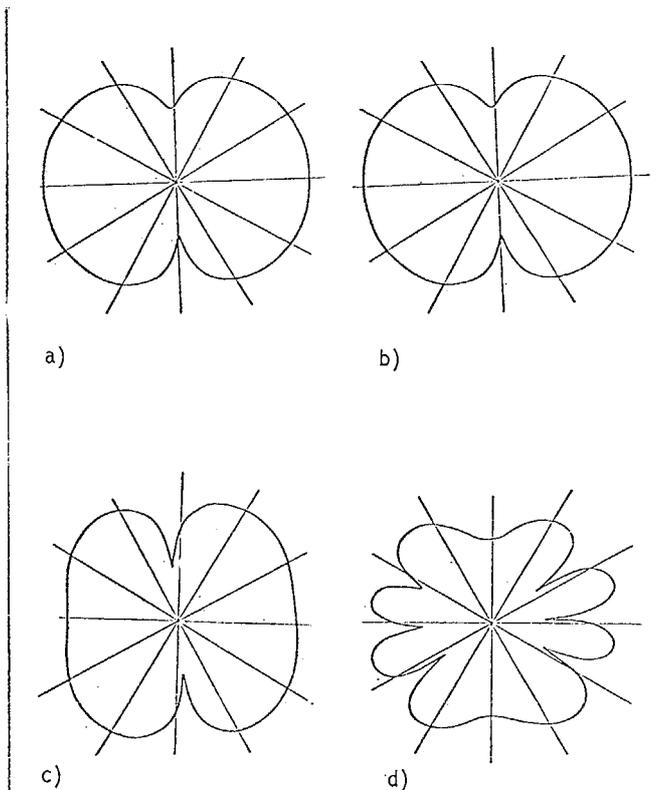


Figure 4. Diagramme de rayonnement spatial d'un doublet acoustique

- a) 200 Hz
- b) 400 Hz
- c) 1 000 Hz
- d) 2 100 Hz

La figure 4 montre les diagrammes de rayonnement de ce système pour différentes fréquences ré-

pétitives de fonctionnement.

Considérons à présent un triplet acoustique (Figure 5) constitué par trois haut-parleurs électrodynamiques de même modèle que ceux utilisés dans le doublet déjà présenté et dont les axes de leurs bobines mobiles sont alignés et situés à 15 cm de distance.

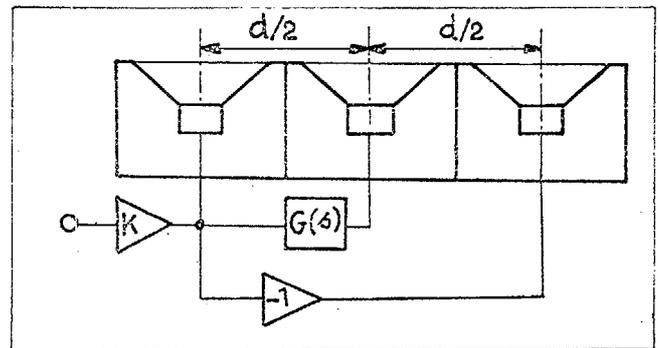


Figure 5. Représentation d'un triplet acoustique actif

En utilisant la commande indiquée figure 5 deux des haut-parleurs sont excités en doublet le troisième équilibrant la source directive.

La figure 6 montre les diagrammes de rayonnement du triplet pour différentes fréquences répétitives de fonctionnement.

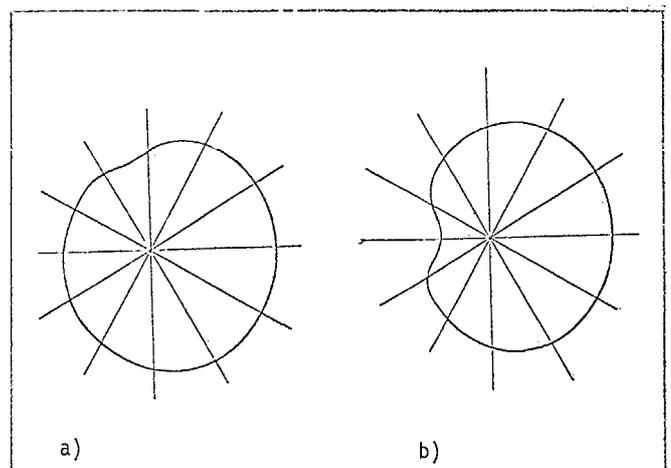


Figure 6. Diagramme de rayonnement spatial d'un triplet acoustique

- a) 200 Hz
- b) 400 Hz

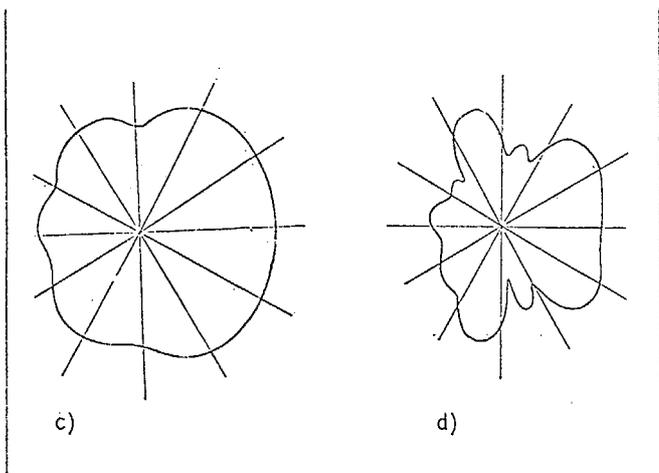


Figure 6 Diagramme de rayonnement spatial d'un triplet acoustique

c) 1 000 Hz

d) 2 100 Hz

Dans les deux exemples exposés on remarque qu'avec le type de haut-parleur utilisé, l'efficacité diminue lorsque la fréquence augmente. Cette constatation est due au fait que ces haut-parleurs sont construits de façon à avoir un rendement optimum aux environs de la fréquence de 1 kHz ; ils sont moins bien adaptés à des fonctionnements aux basses fréquences (20 Hz à 100 Hz) ou aux hautes fréquences (4 kHz à 20 kHz) du spectre audible.

#### IV. Applications

De nombreuses applications sont envisageables pour ce type de système et notamment pour leur directivité.

La reconstitution d'événements sonores dans des espaces plus ou moins restreints fait en effet appel à des sources directives. L'association multi-sources (pour la reproduction) ou multi-puits (pour l'enregistrement) permet de résoudre ces problèmes d'ambiphonie si chers aux amateurs de haute-fidélité. Ces associations permettent le contrôle de la forme des fronts d'onde et surtout de leur direction de propagation par discrétisation de l'espace avec un nombre fini et souvent restreint, de sources ou de puits.

Une application également très intéressante est celle de l'absorption active du bruit par interférences (ANGELINI & CAPOLINO) où les sources directives sont utilisées en sources de contre-bruit en restituant, lorsqu'elles sont convenablement excitées, un champ sonore neutralisant la perturbation à ré-

duire. Des expériences sur la réduction des basses fréquences dans les gaines de climatisation et de ventilation font actuellement l'objet d'une action concertée avec la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique.

#### Conclusion

La théorie de la commande et de l'observation des systèmes acoustiques a été exposée pour le domaine du spectre audible. Les applications et les exemples signalés montrent l'intérêt de la discrétisation de l'espace sonore pour la reconstitution de certains événements.

#### Bibliographie

ANGELINI & CAPOLINO

Sur le pilotage d'absorbeurs acoustiques actifs, 9<sup>th</sup> ICA Madrid (1977)

CANEVET

Absorption active spatiale par triplets acoustiques, 9<sup>th</sup> ICA Madrid (1977)

CAPOLINO

Bipole acoustique directif, 9<sup>th</sup> ICA Madrid (1977)

KEELER

Investigation of Loudspeaker arrays by numerical methods 8<sup>th</sup> ICA London (1974)

KEMPTON

The ambiguity of acoustic sources. A possibility for active control ? Journal of sound and vibration, 48 (4), p. 475-83, (1976).

OLSON

Gradient loudspeakers, J. of Eng. Soc., 21 (2), 86-93 J. of Eng. Soc., 21 (2), p. 86-93 (1973)

PFRETZCHNER & ROMERA

Cancellation of back radiation in acoustical arrays, 8<sup>th</sup> ICA London, p. 697 (1974)

POVY

Identification des processus, Dunod Université, p. 46-52 (1975)

