

## LES PROCEDES DE REPERAGE SPATIO-TEMPOREL TANT EN ACOUSTIQUE QU'EN ELECTROMAGNETISME

Bernard ESCUDIE \* - Claude GAZANHES\*\*

\* Laboratoire Traitement du Signal - CPE  
31, Place Bellecour  
69288 Lyon cedex 02

\*\*CNRS, Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique  
31, chemin Joseph-Aiguier  
13402 Marseille cedex 20

### RÉSUMÉ

En 1881 l'idée de détecter des sources sonores aériennes pour localiser des navires par temps de brouillard fut proposé aux États-Unis. Par la suite durant la 1ère Guerre Mondiale la nécessité de détecter les avions, puis les sous-marins fut à l'origine du développement de procédés de repérage spatial par voie acoustique, mettant en oeuvre l'écoute binaurale. Ce n'est qu'à partir des années 30 avec l'utilisation des microphones que vont apparaître les premiers dispositifs modernes de localisation. En 1938 un premier procédé de corrélation pour la localisation acoustique est proposé.

**INTRODUCTION** - Dans la perspective ouverte depuis 1864 par König, et par les travaux de Helmholtz, divers auteurs proposèrent des dispositifs d'analyse et de repérage spatial, liés aux propriétés de l'audition. En effet l'audition permet la réalisation d'opérations très proches de l'analyse spectrale et harmonique :

- l'identification de sons "purs", ou harmoniques, analogues aux notes musicales, en hauteur (fréquence)  $\gamma_0$ , timbre (nombre de composantes de fréquence  $\gamma_k = k\gamma_0$ ), intensité  $I(\gamma_k)$ .

- la localisation spatiale de la source par la mesure du déphasage  $\phi = 2\pi\gamma_0 d/c_0$  lié à la différence de marche  $\delta$  de l'onde reçue sur les deux pavillons d'oreille.

Ces informations sont dues à l'analyse des sons réalisée par le système auditif apte à reconnaître les sons harmoniques tels ceux relevant de la représentation de Fourier :

$$S(t) = \sum_{k=0}^{\infty} C_k \cdot e^{2i\pi \frac{k t}{T}}$$

### ABSTRACT

In 1881, directional listening systems have been proposed they permit the bearing of some source of airborne sound to be determined and they offer a possibility for the localization of ships by foggy weather. During World War I detection of airplanes and underwater targets, initiated the development of acoustical systems based on binaural listening. From 1930, with the microphone, the first modern systems of localization appear. In 1938 localization by correlation is proposed.

avec  $C_k = C_k(k/T) = |C_k| e^{i\phi_k}$ , qui détermine le timbre (existence des harmoniques de rang  $k$ ) et la hauteur ou fréquence fondamentale  $\gamma_0 = 1/T$ . Dans le cas du repérage spatial le procédé utilise l'aptitude du système auditif binaural à mesurer le retard  $\tau_0 = \delta/c_0$  ou  $e^{-i\pi\omega\tau_0}$ , c'est à dire le déphasage  $\phi(\gamma) = -2\pi\gamma_0\tau_0$

#### 1) Les procédés de repérage spatial par voie acoustique :

Dès 1881 la revue "La Lumière Électrique" faisait état du topophone Mayer réalisé aux États Unis. Le but est de repérer des sources sonores aériennes, permettant la localisation des navires par temps de brouillard. Ce procédé reconnaît la direction d'une source sonore placée sur un phare, ou sur la côte. La figure 1 représente le procédé de repérage. Deux résonateurs de type Helmholtz, R et R' sont accordés sur le son à recevoir. L'intensité reçue est maximale pour la source émettant la surface d'onde  $\Sigma$  (soit  $\alpha = 0$ ) ; la valeur reçue est inférieure pour la source dans une direction  $\alpha$



quelconque procurant les surfaces  $\Sigma_1$  et  $\Sigma_2$ . Par rotation de l'ensemble des deux récepteurs il est possible d'obtenir l'intensité maximale. Si l'un des deux tubes  $L_1, L_2$  est de longueur différente, avec une différence de marche de  $\lambda/2$ , l'intensité reçue en  $\alpha = 0$  est nulle. La méthode de repérage procède par la recherche d'un zéro, méthode plus facile à réaliser par l'audition.

En 1888 la même revue signalait l'ouvrage de M. Banaré traitant des "Routes de navigation et signaux phoniques par temps de brume" qui fait état de ces techniques ; elle propose son extension à l'écoute, et au repérage de sons sous marins. L'auteur signale l'expérience fondamentale de Colladon et Sturm sur le lac de Genève et les essais conduits en mer par la suite. Ces procédés, pour simples qu'ils puissent paraître actuellement, furent très utilisés durant les décennies suivantes.

Dès 1896 un compte rendu à l'Académie des Sciences (Paris), dû à Hardy, proposait un procédé analogue mettant en oeuvre des sources aériennes et marines et l'emploi d'une grande distance de base  $d$  entre les deux capteurs de son. La figure 2 illustre cette situation. Les deux capteurs (résonateurs, cornets....) sont placés à grande distance sur le pont du bateau. Les conduits arrivant à l'auditeur sont d'égales longueurs. Le procédé identique au précédent profite d'un écartement  $d$  grand. L'auteur propose de limiter  $d$  à  $\lambda/2$  pour les ondes audibles et note que pour  $d = (2p + 1) \lambda/2$  le son obtenu peut être annulé.

Divers procédés furent proposés, variantes du principe d'analyse mi en oeuvre dans tous ces travaux. Ils reposaient sur l'identification spectrale d'un son, et sur sa localisation spatiale. Celle-ci utilisait l'obtention d'interférences, permettant la mesure du retard caractéristique  $\tau_0$ . Le principe même des interférences acoustiques fut décrit dès 1855 par Lissajoux. L'idée d'une périodicité spatiale du champ, quoique notée ne conduit pas encore à l'emploi de la notion de fréquence spatiale :

$f_0 = 1/\lambda_0 = \gamma_0/c_0$  et d'analyse spectrale en espace. En fait le récepteur auditif réalise un filtrage sélectif en fonction de la fréquence. La structure binaurale de l'ensemble des deux récepteurs permet l'analyse harmonique en espace par comparaison de phase, ou mesure de décalage  $\tau_0$ . La mesure est sans ambiguïté tant que la distance  $d$  est inférieure ou égale à la longueur d'onde.

Ces procédés furent appliqués en Acoustique sous-marine durant le conflit 1914-1918 à la détection et à la localisation des navires par bruit rayonné, dû aux hélices. La figure 3 ci-dessous illustre la mise en oeuvre d'un doublet de capteurs A et B où par réglage des longueurs  $L$  et  $L'$  (parcourues dans l'air) on compense le retard  $\tau = \frac{d \sin \theta}{c_0}$ ,  $c_0 = 1500$  m/s.

Un tel dispositif révèle que les auteurs utilisaient un mode de raisonnement lié à l'étude des retards entre surfaces d'onde parvenant aux capteurs A et B. La démarche suivie mettait en oeuvre un raisonnement très lié à la représentation harmonique, ramenant le signal émis à une superposition d'ondes planes harmoniques en champ lointain. Divers procédés de compensation plus ou moins élaborés virent alors le jour permettant de lire directement la direction de la source détectée. La figure 4 ci-dessous représente le "compensateur" General Electric, qui permettait alors cette opération. En plus l'appareil permettait de réaliser l'opération de repérage entre trois capteurs acoustiques placés aux sommets d'un triangle, ce qui permettait de lever l'ambiguïté angulaire quant à la détermination de l'angle  $\theta$  connu à  $k\pi$  près.

Ce même principe fut aussi mis en oeuvre pour les ondes aériennes. L'appareil réalisé d'abord fut l'orthophone de Claude, représenté ci-dessus figure 5. Les deux capteurs  $O_1$  et  $O_2$  distants de  $d$  sont mobiles autour de l'axe vertical et alimentent deux conduits amenant les sons perçus aux oreilles de l'auditeur. Ce principe est applicable tant aux signaux périodiques, qu'aux signaux transitoires. Dans ce dernier cas, il n'y a pas de contraintes quant à la longueur  $O_1 O_2$  relativement à la longueur d'onde considérée, le caractère périodique n'étant plus présent. L'effet de retard différentiel entre capteurs fut mis en évidence et étudié précisément par la suite. La figure 6 met nettement en évidence les retards caractéristiques entre les différents capteurs sans mettre en évidence le caractère monochromatique de l'onde reçue. Dans le cas considéré il s'agit de signaux impulsifs, onde de détonation, dus à un canon. Le problème de la résolution angulaire se ramenait alors à celui de la résolution temporelle disponible, grâce au récepteur binaural des auditeurs. Divers essais mirent en évidence des aptitudes de résolutions angulaires allant de  $4^\circ$  à  $1,5^\circ$ .

## 2) Le développement de l'analyse spectrale et de la localisation :

Le développement des procédés d'analyse spectrale et spatiale fut fortement influencé par deux facteurs différents. Le premier fut le besoin de détection et de repérage angulaire des avions durant le conflit 1914-1918 ; le second est dû au développement rapide de la technique radioélectrique et électronique, permettant des traitements commodes des ondes et signaux acoustiques.

### a) Le développement de la localisation angulaire 1916-1918 :

Ce développement dû à la nécessité de repérer les avions survolant l'arrière du front devint un fait dès 1916. /1/. Les procédés utilisés furent de deux types. L'un d'eux dit "goniomètre acoustique", met en oeuvre plusieurs groupements de cornets placés sur deux bases orthogonales. L'écartement de l'ordre de 1,5 à 1,7m permet pour les signaux basse fréquence observés alors une résolution angulaire de 2 à 1,5°. En fait si la distance  $d \approx p \lambda / 2$  avec  $p > 2$  les effets d'ambiguïté angulaire apparaissent. Le compensateur de marche utilisé

reposait sur le même principe que celui employé en acoustique sous-marine. L'autre démarche due à J. Perrin fut de construire un véritable interféromètre, appelé alors télésitémètre Perrin formant à l'aide du récepteur binaural de l'auditeur une estimation de la position angulaire de la source en site et azimuth.

Un autre procédé d'étude mettant en oeuvre le caractère vibratoire du son est celui de la focalisation dû à R. Baillaud. Astronome de profession, il utilisa l'effet dû à un miroir sphérique ou parabolique de rayon R, et d'ouverture d grandes devant la longueur d'onde  $\lambda$ . Il parvint à mettre en évidence l'effet de diffraction lié au facteur  $d/\lambda$  pour les ondes acoustiques étudiées, ou tout au moins pour les plus aiguës. ici encore le caractère harmonique de l'onde était pris en compte pour la définition des performances. En effet la théorie ondulatoire de la diffraction conduit dans le cas d'une ouverture de diamètre d à des zéros de champ lointain liés au premier zéro de la fonction de Bessel.

### b) Le développement des procédés par l'emploi de l'électronique :

Si en 1916-18 l'état des microphones électriques ne permettait pas leur emploi dans ce type d'appareils, il n'en était plus de même 10 ou 15 ans plus tard /2/. Un tel changement de technologie allait autoriser des performances que l'auditeur, malgré son entraînement, ne pouvait pas émettre sur une longue durée. Le procédé utilisé fut d'employer des microphones non plus uniquement sensibles à la pression acoustique, mais aussi à la vitesse du fluide transmettant l'onde. La figure 7 ci-dessous représente un tel dispositif, qui utilise en plus un tube accordé en fraction de longueur d'onde. Le capteur obtenu ainsi est directif pour une bande de fréquences bien déterminée. En plus la chaîne de mesure est réalisée avec un filtre électrique ne transmettant que la bande de fréquence retenue par l'utilisateur. Les filtres sont aussi semblables que possible pour n'introduire qu'un déphasage négligeable afin de permettre une estimation précise du déphasage entre les différentes voies. Un oscilloscope en balayage (x,y) permet l'obtention d'une figure de Lissajoux fournissant l'estimation du déphasage. La figure 8 nous montre les deux microphones couplés aux filtres F1 et F2 dont les sorties sont observées en représentation (x,y) ou cartésienne. Ce procédé fournit pour des composantes harmoniques, dont une seule est isolée par les deux filtres accordés, une figure elliptique indiquant le déphasage.

### 3). L'emploi de la méthode de corrélation :

Si ce procédé était en fait celui mis en oeuvre par l'écoute binaurale, il ne fut reconnu pour tel qu'après de nombreuses études sur l'audition. En fait le procédé de corrélation pour la localisation en acoustique aérienne est dû à G. Guarella, qui breveta dès 1938 un dispositif de goniométrie acoustique /3/. Si le signal reçu  $S_2(t)$  est en avance sur le signal  $S_1(t)$  d'une quantité :

$$\tau_0 = \frac{d}{c_0} \sin \alpha_0$$

Si on forme :

$$\frac{1}{T} \int_{(\tau)} S_1(t) S_2(t - \tau) dt = \Gamma_{12}(\tau) = \Gamma_3(\tau - \tau_0)$$



$$\Gamma_s(\tau) = \frac{1}{T} \int_{(\tau)} S(t) S^*(t-\tau) dt$$

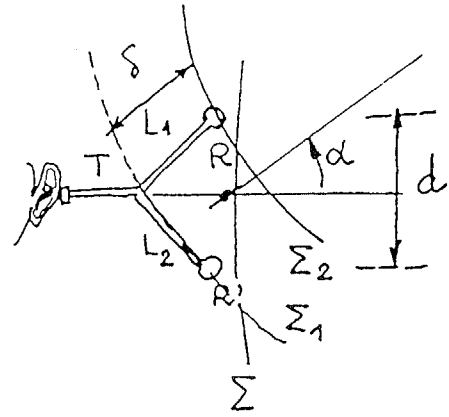
On obtient deux informations :  $\Gamma_s(0)$  puissance moyenne transportée par l'onde et  $\tau_0 = d/c_0 \sin \alpha_0$  fournissant la direction  $\alpha_0$ . Le corrélateur fonctionne en fluxmètre et en goniomètre. Pour faciliter la lecture de l'abscisse  $\tau_0$  Guanella proposa d'introduire sur l'une des voies un déphaseur de  $90^\circ$ , ce qui conduit à estimer :

$$\Gamma_{YQ}(\tau) = \frac{1}{T} \int Y(t) Q(t-\tau) dt$$

intercorrrelation entre le signal reçu  $Y = S_1(t)$  et  $Q(t)$  signal en quadrature avec  $S_2(t)$ . La fonction  $\Gamma_{YQ}(\tau)$  est nulle à l'origine. C'est le procédé proposé par Guanella pour obtenir une valeur nulle aisément repérable en angle. La figure 9 ci-contre montre la fonction d'auto-corrélation  $S(\tau)$  et la fonction d'intercorrrelation entre  $S$  et  $Q(t)$ . La figure 9b représente le résultat d'une mesure obtenue par Guanella sur un son complexe formé d'harmoniques multiples.

**Bibliographie.**

- /1/ Liénard, P., L'oeuvre acoustique de René Baillaud, astronome et la détection des avions par le son, 1915-1922. Revue d'Acoustique. 61 [1982], 98-108.
- /2/ Hemardinger, P., Pour le repérage des avions invisibles, voici les nouvelles méthodes électriques et radioélectriques. La Science et La Vie. [1940], 603-611.
- /3/ Guanella, G., cf. Correlation Techniques. F. H. Lange Liffe. Ed. London, [1967].



$$\tau_0 = \frac{d}{c_0} \sin d = \frac{\delta}{c_0}$$

Figure 1

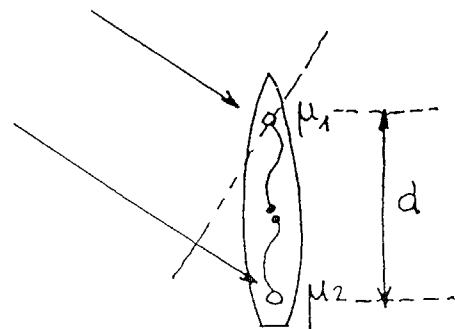


Figure 2

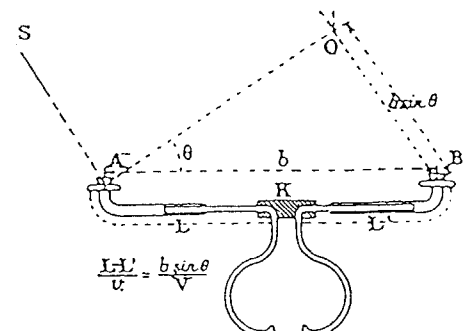


Figure 3

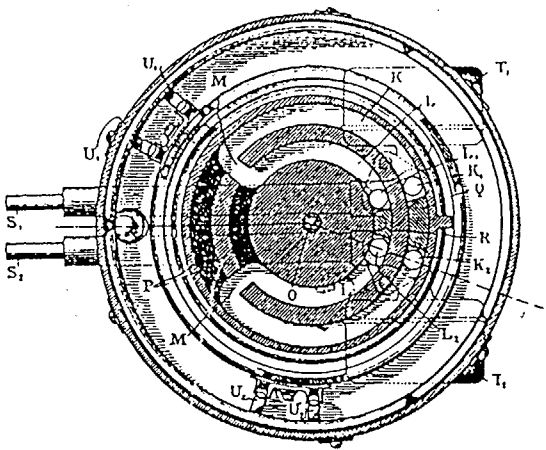


Figure 4

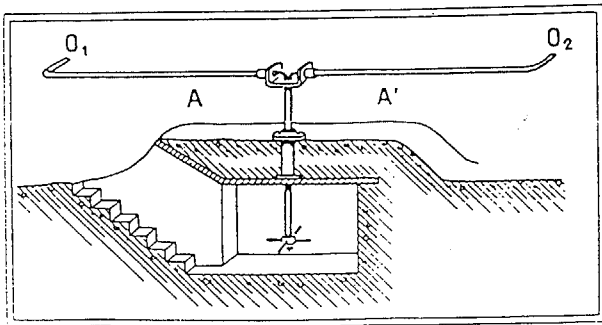


Figure 5

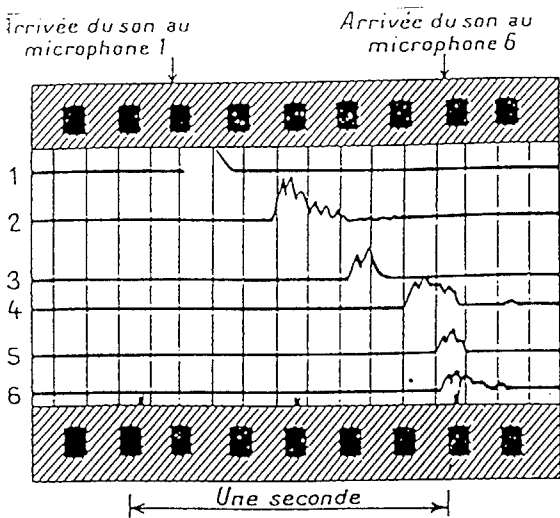


Figure 6

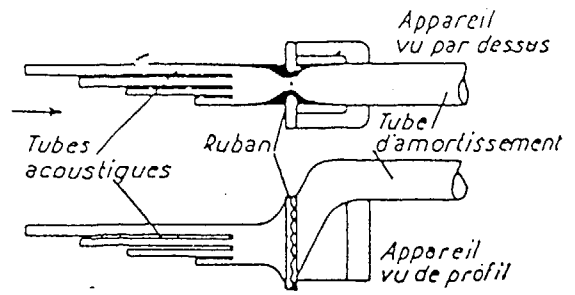


Figure 7

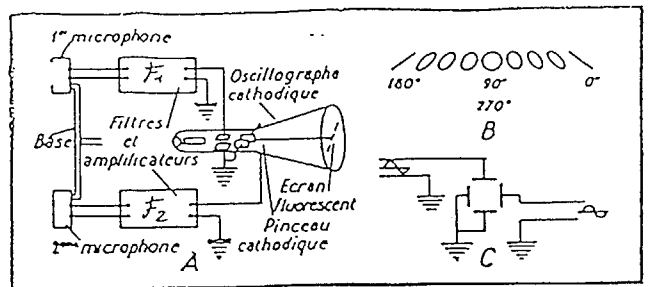
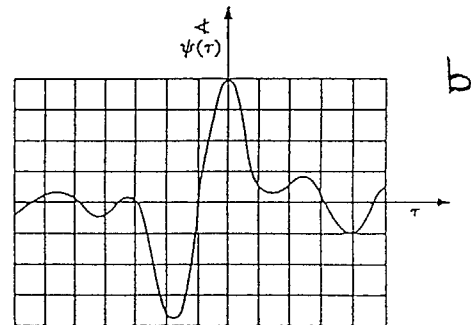
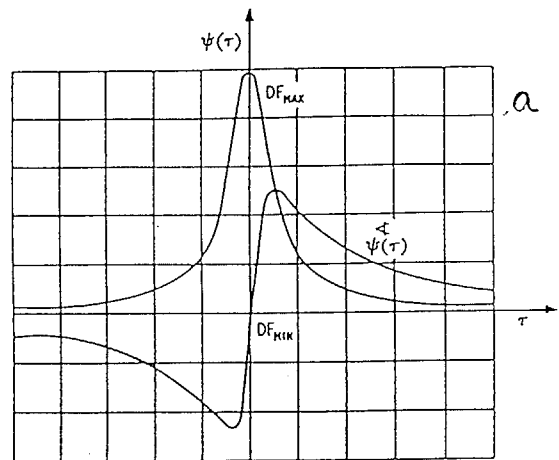


Figure 8



Incoherent noise autocorrelation symmetric and asymmetric curves (Guanella: )  
 (a) Idealised curves of the two functions  
 (b) Unsmooth autocorrelation function of a mixture of acoustic oscillations, recorded by Guanella

Figure 9