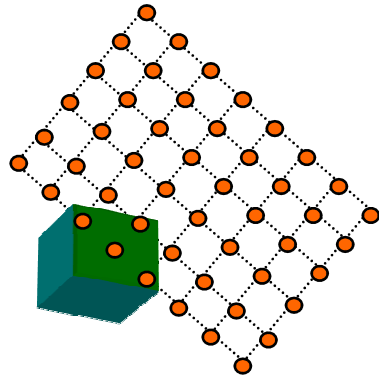


Localisation et caractérisation des sources par antennes acoustiques

Formation de voies ou beamforming

Principe des antennes linéaires

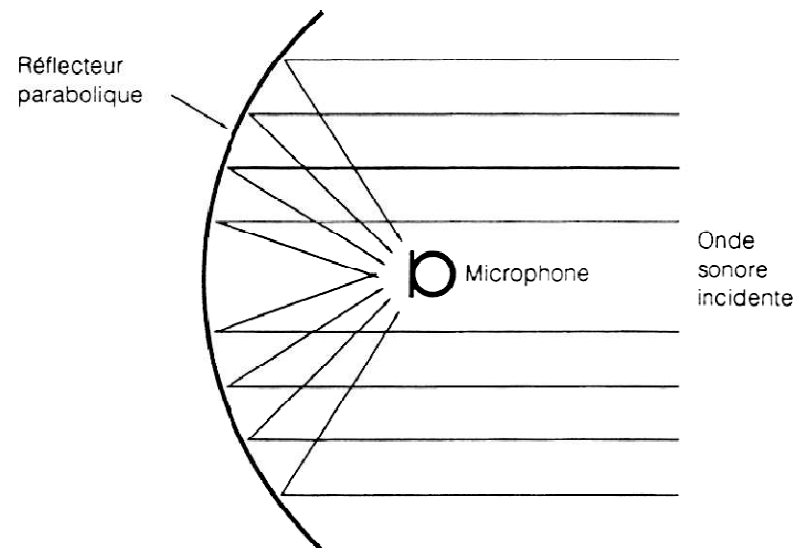


- principe du "**télescope acoustique**" (*Billinsley & Kinns, 1976*)
- **acquisition simultanée** du signal
- point de **focalisation** situé devant l'antenne

Applications :

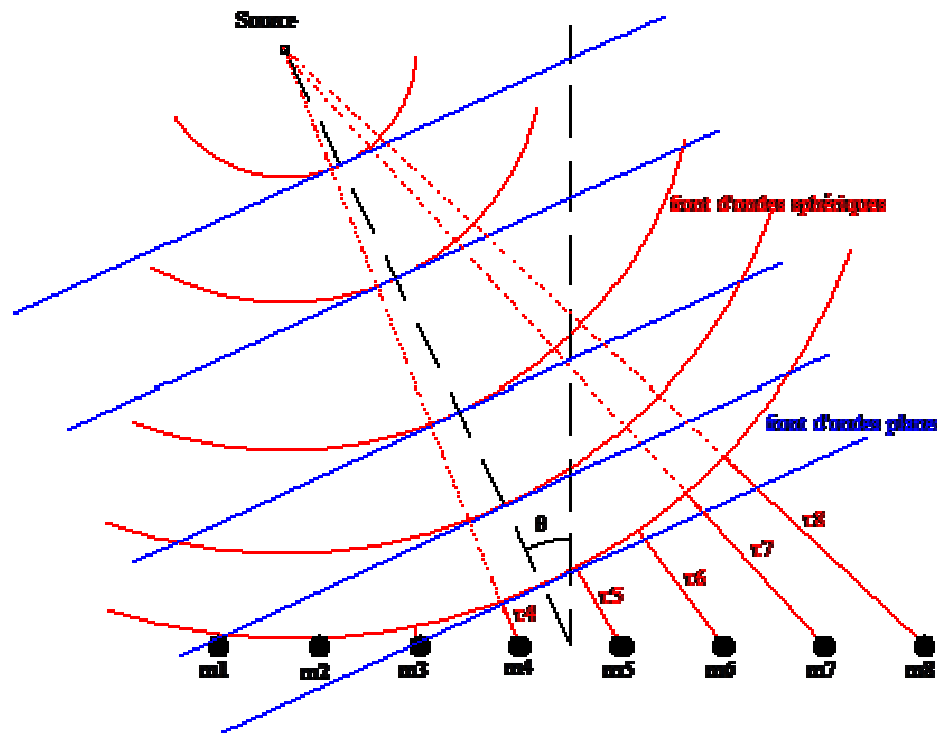
- ☐ caractérisation du **bruit de jet**
- ☐ isoler les **sources de bruit** sur les engins de transport terrestres
- ☐ analyse des contributions acoustiques présentes dans le **bruit de passage** d'un véhicule

Principe des antennes



Antenne parabolique

Formation de voies : utilisation d'un modèle de source



Champ proche : modèle en ondes sphériques

Champ lointain : modèle en ondes planes

Distance de Fresnel

$$D_F = \frac{L^2}{2\lambda}$$

L : envergure de l'antenne

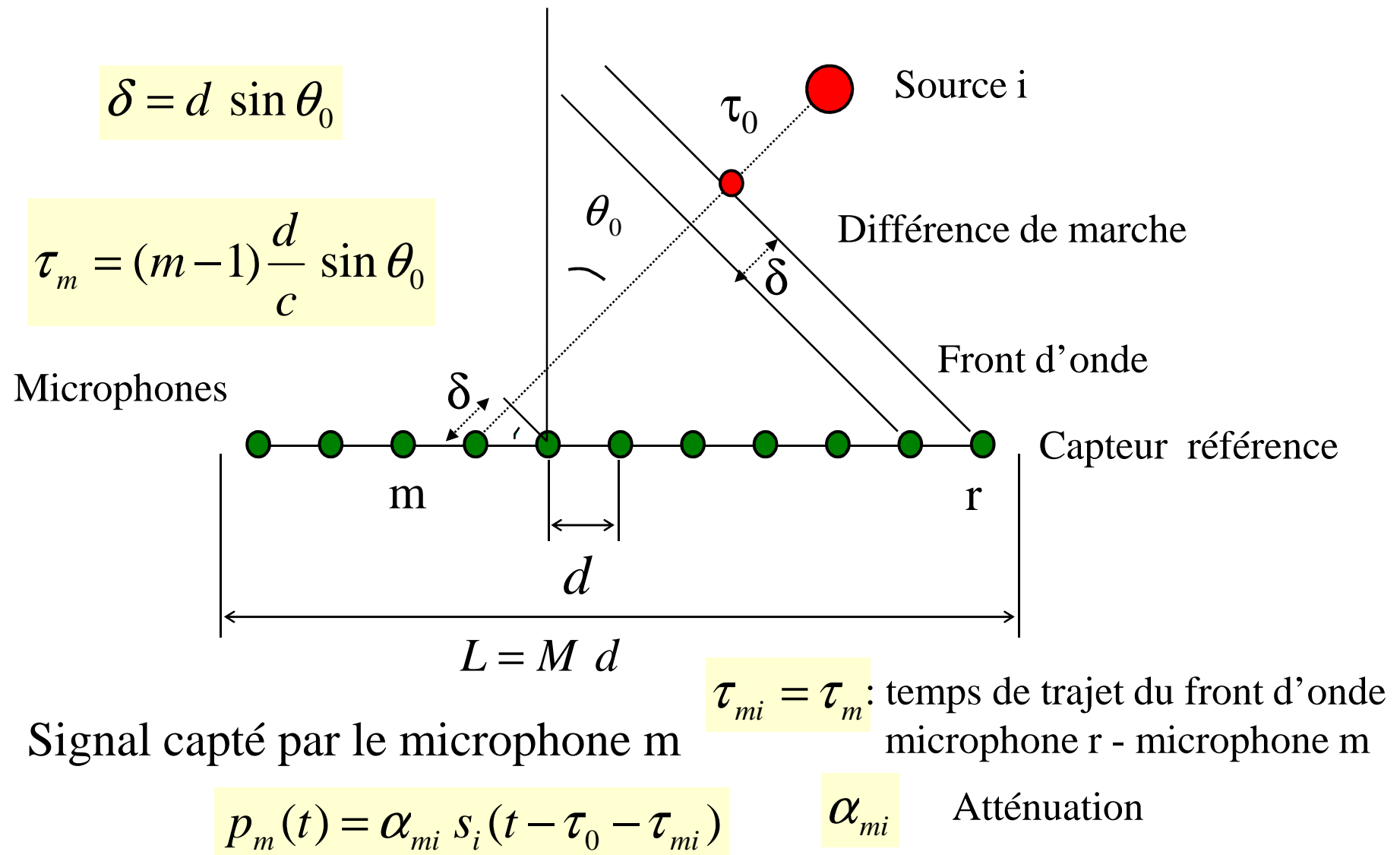
r_{mi}

Distance
source i – micro m

$$r_{mi} \leq D_F$$

$$r_{mi} > D_F$$

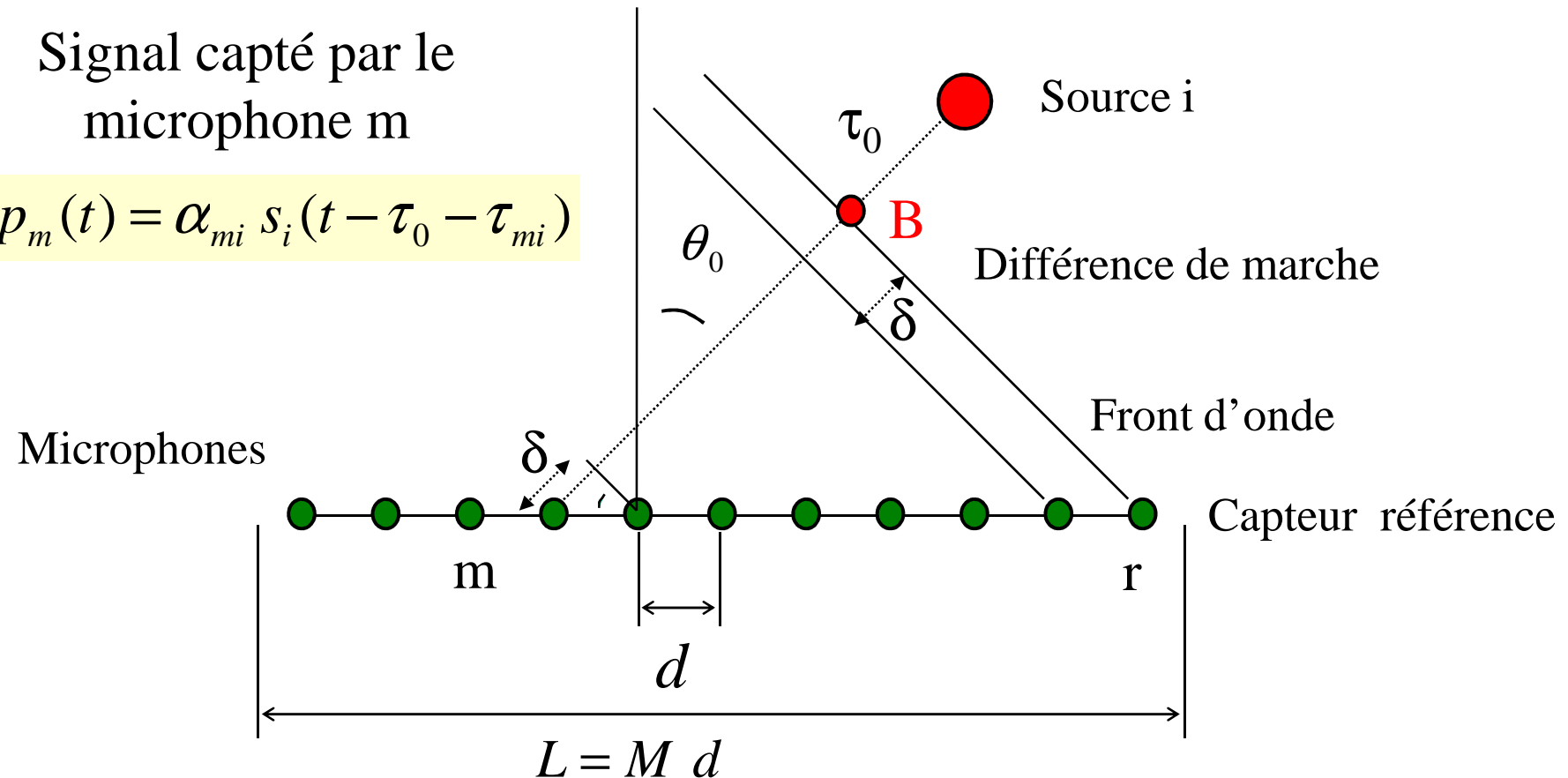
Principe des antennes linéaires



Compensation des retards

Signal capté par le microphone m

$$p_m(t) = \alpha_{mi} s_i(t - \tau_0 - \tau_{mi})$$



Signal en B

$$s_i(t - \tau_0) = \frac{1}{\alpha_{mi}} p_m(t + \tau_{mi}) = \frac{1}{\alpha_{mi}} p_m(t + (m-1) \frac{d}{c} \sin \theta_0)$$

Antennes à retard et somme

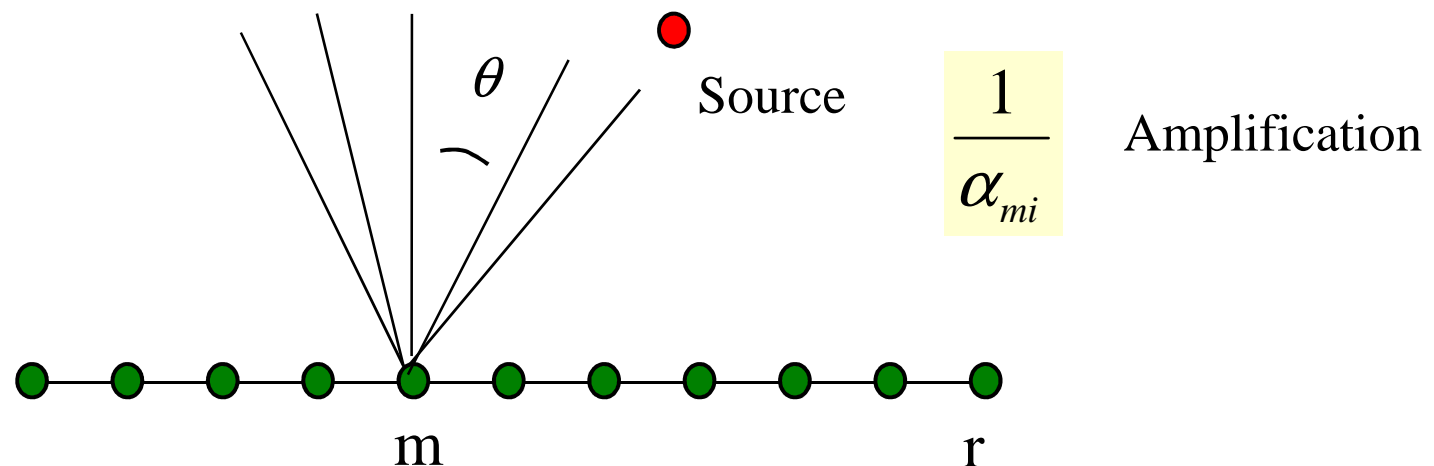
Signal capté par le microphone m $p_m(t)$

Signal source retardé

$$s_i(t - \tau_0) = \frac{1}{\alpha_{mi}} p_m(t + \tau_{mi}) = \frac{1}{\alpha_{mi}} p_m(t + (m-1) \frac{d}{c} \sin \theta_0)$$

Signal source reconstruit (focalisation en des directions θ)

$$s_i(t, \theta) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{1}{\alpha_{mi}} p_m(t + (m-1) \frac{d}{c} \sin \theta)$$



Antennes à retard et somme

Signal source retardé

$$s_i(t - \tau_0) = \frac{1}{\alpha_{mi}} p_m(t + (m-1) \frac{d}{c} \sin \theta_0) = \frac{1}{\alpha_{ri}} p_r(t)$$

$$p_m(t + (m-1) \frac{d}{c} \sin \theta_0) = \frac{\alpha_{mi}}{\alpha_{ri}} p_r(t)$$

Signal source reconstruit (focalisation en des directions θ)

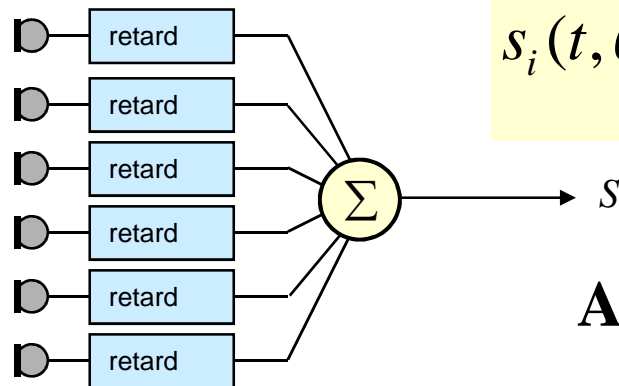
$$s_i(t, \theta) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{1}{\alpha_{mi}} p_m(t + (m-1) \frac{d}{c} \sin \theta)$$

$$s_i(t, \theta) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{1}{\alpha_{mi}} \frac{\alpha_{mi}}{\alpha_{ri}} p_r(t + (m-1) \frac{d}{c} (\sin \theta - \sin \theta_0))$$

Antennes à retard et somme : champ lointain

Approche temporelle : Signal source reconstruit
(focalisation en des directions θ)

$$s_i(t, \theta) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{1}{\alpha_{mi}} p_m \left(t + (m-1) \frac{d}{c} \sin \theta \right)$$



$$s_i(t, \theta) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{1}{\alpha_{mi}} p_m(t) * \delta \left(t + (m-1) \frac{d}{c} \sin \theta \right)$$

Approche fréquentielle :

$$S_i(f, \theta) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{1}{\alpha_{mi}} P_m(f) e^{2j\pi f (m-1) \frac{d}{c} \sin \theta}$$

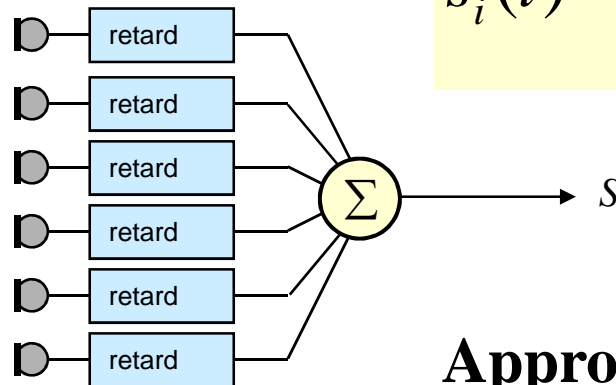
Antennes à retard et somme : champ proche

Approche temporelle

$$s_i(t) = \frac{1}{\Xi} \sum_{m=1}^M a_m p_m \left(t + \frac{r_{mi}}{c} \right)$$

$$\Xi = \sum_{m=1}^M \frac{a_m}{4\pi r_{mi}}$$

$$s_i(t) = \sum_{m=1}^M a_m p_m(t) * w_{mi}(t)$$



$$w_{mi}(t) = \frac{1}{\Xi} \delta \left(t + \frac{r_{mi}}{c} \right)$$

Approche fréquentielle

$$S_i(f) = \sum_{m=1}^M a_m P_m(f) \frac{e^{2j\pi f \frac{r_{mi}}{c}}}{\Xi} = \sum_{m=1}^M a_m P_m(f) \frac{e^{jk r_{mi}}}{\Xi}$$

Traitement en fréquence

Pression due à la source sur le microphone

$$p_m(\omega) = A_i(\omega) \frac{e^{-jk r_{mi}}}{r_{mi}} \quad \longrightarrow \quad A_i(\omega) = r_{mi} p_m(\omega) e^{+jk r_{mi}}$$

Estimation de la source : Représentation matricielle à la fréquence $f = \omega/2\pi$

$$S_i = \mathbf{w}_i^H \mathbf{p}$$

Vecteur de pointage (ou steering vector)
avec la contrainte de normalisation $\mathbf{w}_i^H \mathbf{h}_i = 1$

Et

$$\mathbf{h}_i = \begin{bmatrix} \dots \\ \exp(-jkr_{mi})/r_{mi} \\ \dots \end{bmatrix}$$



$$\mathbf{w}_i = \frac{\mathbf{u}_i}{\mathbf{u}_i^H \mathbf{h}_i}$$

Par exemple : *processeur de Bartlett* $\mathbf{u}_i = \mathbf{h}_i$

Valeur quadratique de l'estimateur

$$E[|S_i|^2] = \mathbf{w}_i^H \mathbf{G}_{pp} \mathbf{w}_i$$



Matrice interspectrale des pressions

Matrice interspectrale des pressions

Densité spectrale de puissance de la distribution de sources

$$\hat{G}_{ii} = E\{S_i S_i^*\} = E\{(\mathbf{w}_i^H \mathbf{p})(\mathbf{w}_i^H \mathbf{p})^H\} = E\{\mathbf{w}_i^H \mathbf{p} \mathbf{p}^H \mathbf{w}_i\} = \mathbf{w}_i^H \mathbf{G}_{pp} \mathbf{w}_i$$

pour laquelle on a

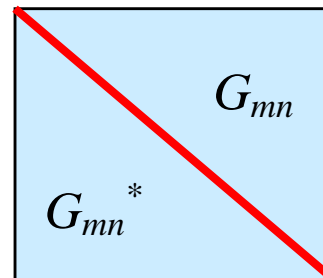
$$\mathbf{G}_{pp} = E\{\mathbf{p} \mathbf{p}^H\} = [G_{mn}^{pp}]$$

dont les éléments sont

$$G_{mn}^{pp} = E\{p_m p_n^*\} \approx (2/T) \sum_{k=1}^N p_{m,k}(\omega, T) p_{n,k}^*(\omega, T)$$

$$G_{mn}^{pp} \rightarrow \begin{cases} m = n & G_{mm}^{pp} = |G_{mm}^{pp}| & \text{réel} \\ m \neq n & G_{nm}^{pp} = G_{mn}^{pp*} & \text{complexe conjugué} \end{cases}$$

Symétrie hermitienne



$$\mathbf{G}_{pp}^H = \mathbf{G}_{pp}$$

La formation de voies est la solution d'un problème d'optimisation

On cherche à définir une **fonction coût** et à la **minimiser**

Fonction coût : écart entre la *valeur estimée* de l'amplitude de la source et sa *valeur réelle*

$$\left| \mathbf{w}_i^H \mathbf{p} - A_i \right|$$

en terme de densité spectrale de puissance

$$J = E\left\{(\mathbf{w}_i^H \mathbf{p} - A_i)(\mathbf{w}_i^H \mathbf{p} - A_i)^*\right\} = \mathbf{w}_i^H \mathbf{G}_{pp} \mathbf{w}_i - \underbrace{\mathbf{w}_i^H E\{\mathbf{p} A_i^*\}}_{\mathbf{g}_{pi}^H} - E\{\mathbf{p}^H A_i\} \mathbf{w}_i + E\{A_i^* A_i\}$$

$$J = \mathbf{w}_i^H \mathbf{G}_{pp} \mathbf{w}_i - \mathbf{w}_i^H \mathbf{g}_{pi} - \mathbf{g}_{pi}^H \mathbf{w}_i + G_{ii}$$

Trouver le minimum :

$$\frac{\partial J}{\partial \mathbf{w}_i} = 0$$

La formation de voies : méthode de Bartlett

Trouver le minimum : $\frac{\partial J}{\partial \mathbf{w}_i^H} = 0$

$$J = \mathbf{w}_i^H \mathbf{G}_{pp} \mathbf{w}_i - \mathbf{w}_i^H \mathbf{g}_{pi} - \mathbf{g}_{pi}^H \mathbf{w}_i + G_{ii}$$

Si \mathbf{G}_{pp} est une matrice hermitienne, elle est définie positive si $\mathbf{w}_i^H \mathbf{G}_{pp} \mathbf{w}_i > 0$

C'est le cas car $\hat{G}_{ii} = \mathbf{w}_i^H \mathbf{G}_{pp} \mathbf{w}_i$ alors, le minimum existe et il est unique.

$$\frac{\partial J}{\partial \mathbf{w}_i^H} = 2 \mathbf{G}_{pp} \mathbf{w}_i - 2 \mathbf{g}_{pi} = 0 \Rightarrow \mathbf{w}_i = \mathbf{G}_{pp}^{-1} \mathbf{g}_{pi}$$

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{G}_{pp} &= E\{\mathbf{A}_i \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H \mathbf{A}_i^*\} = \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H G_{ii} \\ \mathbf{g}_{pi} &= E\{\mathbf{p} \mathbf{A}_i^*\} = E\{\mathbf{h}_i \mathbf{A}_i \mathbf{A}_i^*\} = \mathbf{h}_i G_{ii} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \mathbf{w}_i = \mathbf{G}_{pp}^{-1} \mathbf{g}_{pi} = (\mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H)^{-1} \mathbf{h}_i = \frac{\mathbf{h}_i}{\mathbf{h}_i^H \mathbf{h}_i}$$

$$\mathbf{w}_i = \frac{\mathbf{h}_i}{\mathbf{h}_i^H \mathbf{h}_i}$$

La formation de voies : méthode de Capon

- Utilisation de la matrice interspectrale pour déterminer un vecteur de pointage optimal (méthode à variance minimale)

On cherche à **minimiser l'énergie** en sortie de traitement

Critère :

$$J_C = \mathbf{w}_i^H \mathbf{G}_{pp} \mathbf{w}_i$$

Contrainte :

$$\mathbf{w}_i^H \mathbf{h}_i = 1$$

Optimisation par la méthode des multiplicateurs de Lagrange:

$$J_L = \mathbf{w}_i^H \mathbf{G}_{pp} \mathbf{w}_i + \lambda (\mathbf{w}_i^H \mathbf{h}_i - 1) = 0$$

$$\frac{\partial J_L}{\partial \mathbf{w}_i^H} = 0$$

$$\frac{\partial J_L}{\partial \lambda} = 0$$

$$\frac{\partial J_L}{\partial \mathbf{w}_i^H} = 2 \mathbf{G}_{pp} \mathbf{w}_i + \lambda \mathbf{h}_i = 0 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{w}_i = -\frac{\lambda}{2} \mathbf{G}_{pp}^{-1} \mathbf{h}_i$$

La formation de voies : méthode de Capon

$$\mathbf{w}_i = -\frac{\lambda}{2} \mathbf{G}_{pp}^{-1} h_i$$

$$\frac{\partial J_L}{\partial \lambda} = 0 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{w}_i^H h_i = 1$$

$$-\frac{\lambda}{2} h_i^H \mathbf{G}_{pp}^{-1} h_i = 1 \quad \Rightarrow \quad \lambda = -\frac{2}{h_i^H \mathbf{G}_{pp}^{-1} h_i}$$

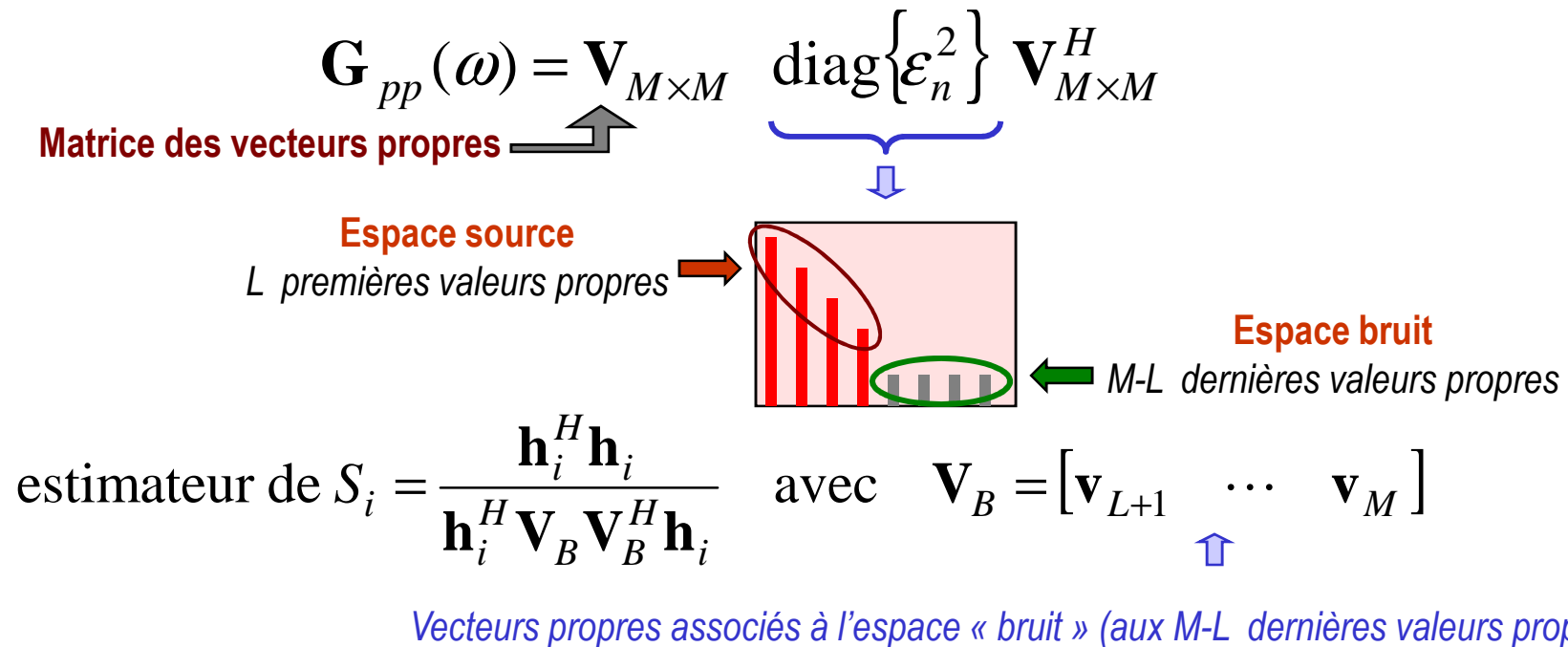
Solution de la méthode de Capon

$$\mathbf{w}_i = \frac{\mathbf{G}_{pp}^{-1} h_i}{h_i^H \mathbf{G}_{pp}^{-1} h_i}$$

Autres méthodes pour améliorer la résolution

- Méthodes « haute résolution » (algorithme MUSIC par exemple)

Décomposition en sous-espace de la matrice interspectrale
(décomposition en valeurs singulières SVD)



Antennes à retard et somme : champ lointain

Approche temporelle : Signal source reconstruit
(focalisation en des directions θ)

$$s_i(t, \theta) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{1}{\alpha_{ri}} p_r(t + (m-1) \frac{d}{c} (\sin \theta - \sin \theta_0))$$

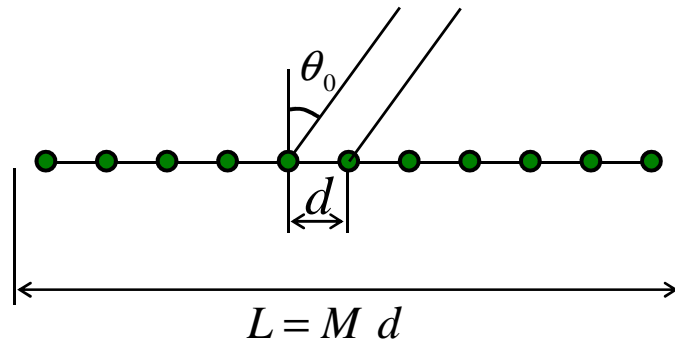
Approche fréquentielle :

$$S_i(f, \theta) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{1}{\alpha_{mi}} P_r(f) e^{2j\pi f (m-1) \frac{d}{c} (\sin \theta - \sin \theta_0)}$$

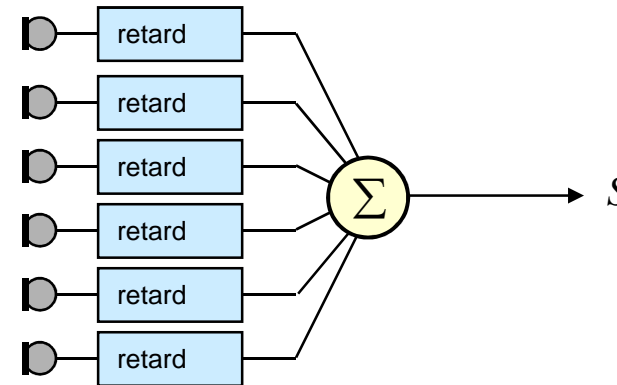
Réponse angulaire de l'antenne :

$$X(f, \theta) = \frac{S_i(f, \theta)}{P_r(f)} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{1}{\alpha_{mi}} e^{2j\pi f (m-1) \frac{d}{c} (\sin \theta - \sin \theta_0)}$$

Principe des antennes linéaires



Envergure de l'antenne $L = M d$

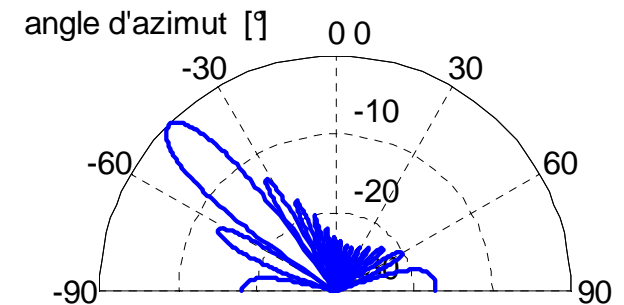


réponse angulaire en fonction de la direction θ_0

$$|S(\theta)| = A \left| \frac{\sin \left[k \frac{L}{2} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right]}{\sin \left[k \frac{d}{2} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right]} \right|$$

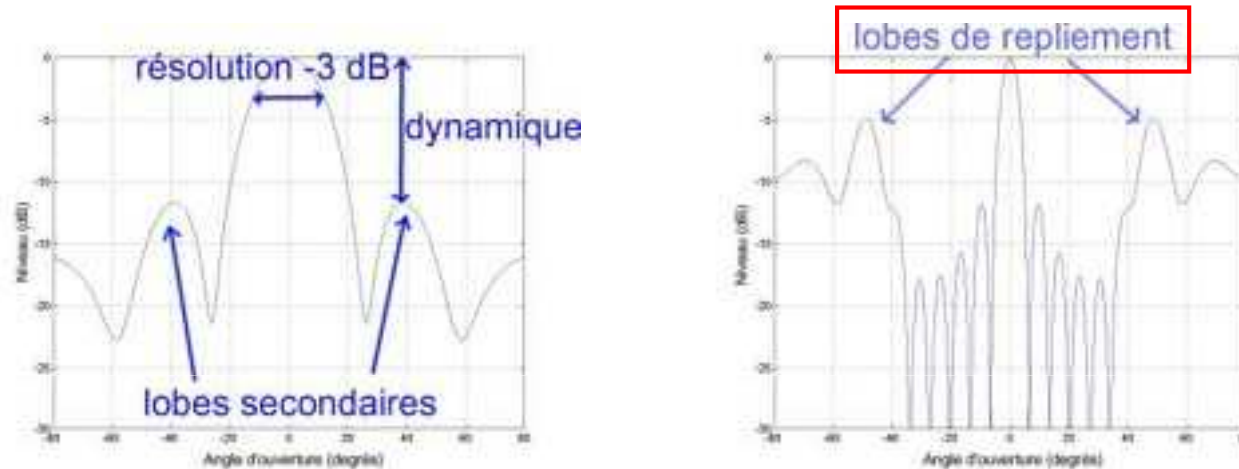
quand $d \ll \lambda/2 \Rightarrow$

$$|S(\theta)| \approx A \left| \frac{\sin \left[k \frac{L}{2} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right]}{k \frac{d}{2} (\sin \theta - \sin \theta_0)} \right|$$



Résolution et lobes secondaires

La résolution des antennes est proportionnelle à la fréquence

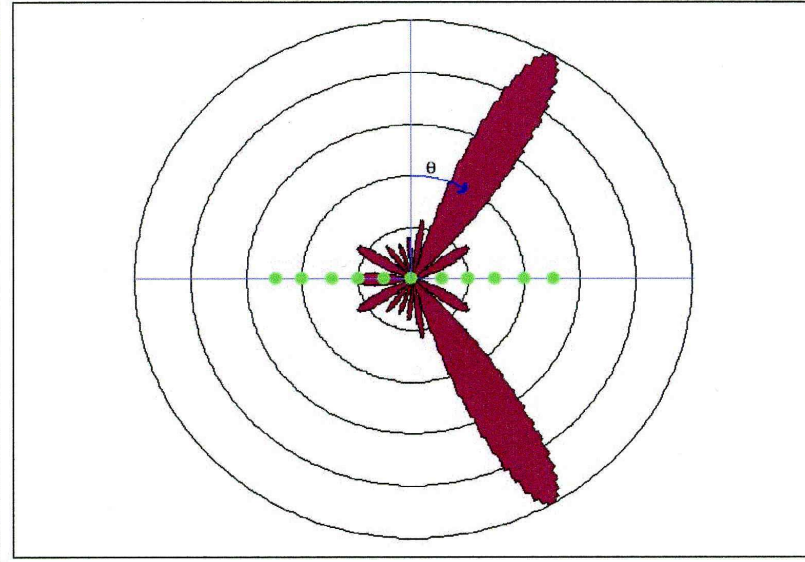
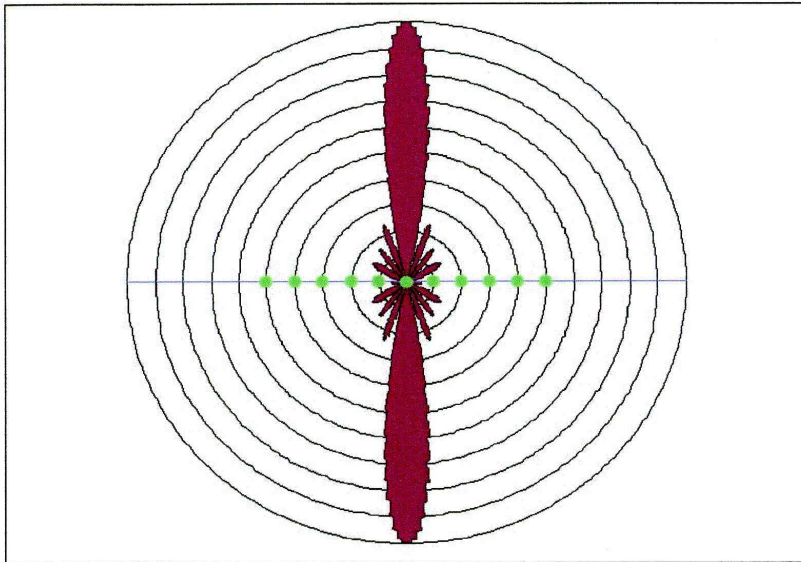
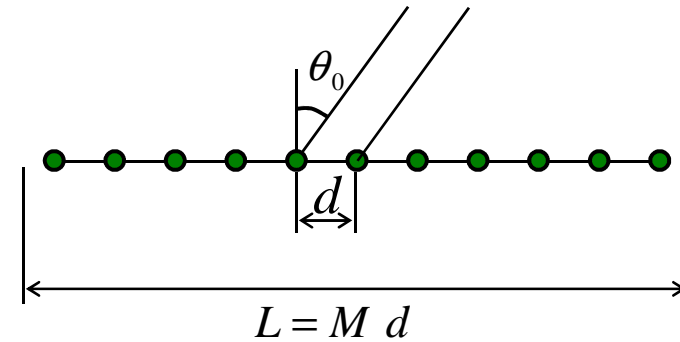


Lobe principal dont dépend la résolution de l'antenne et *lobes secondaires parasites* (à gauche) qui peuvent être atténués par une pondération des microphones de l'antenne.

Des **lobes de repliement** peuvent apparaître quand les conditions d'échantillonnage spatial ne sont plus respectées (à droite) (Doc. ACB Engineering)

Principe des antennes linéaires

$$|S(\theta)| \approx A \left| \frac{\sin \left[k \frac{L}{2} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right]}{k \frac{d}{2} (\sin \theta - \sin \theta_0)} \right|$$



L'antenne simple couche est sensible à l'onde arrière

Antennes linéaires : fréquence et envergure

Ouverture de l'antenne
(largeur du lobe principal)

dépend de $\left\{ \begin{array}{l} k = \frac{\omega}{c} \\ L \end{array} \right.$

$$kL = 2\pi \frac{L}{\lambda}$$

3 dB

$$\alpha = 1.39156$$

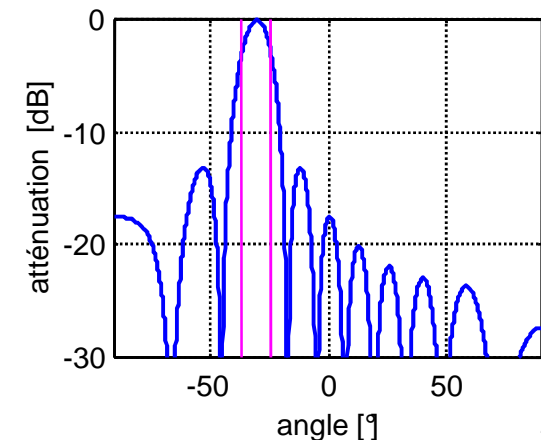
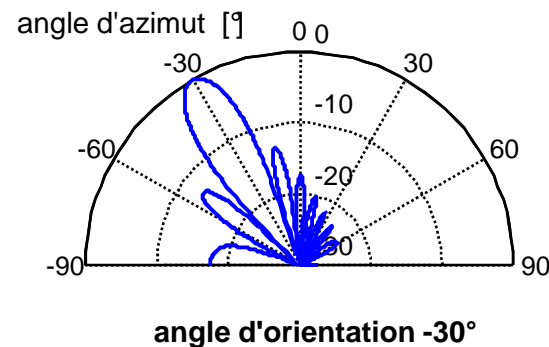
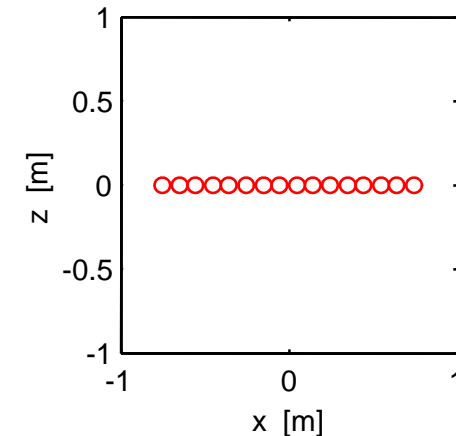
10 dB

$$\alpha = 2.31858$$

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 = \arcsin\left(\sin\theta_0 + \frac{2\alpha}{kL}\right) - \arcsin\left(\sin\theta_0 - \frac{2\alpha}{kL}\right)$$

M = 16 microphones
fréquence : **1000 Hz** ($\lambda/2 = 0.33$ m)
d = 0.10 m
L = 1.60 m
kL = 30.3

ouverture du lobe principal à -3 dB : 12.2°
ouverture du lobe principal à -10 dB : 20.5°



Antennes linéaires : fréquence et envergure

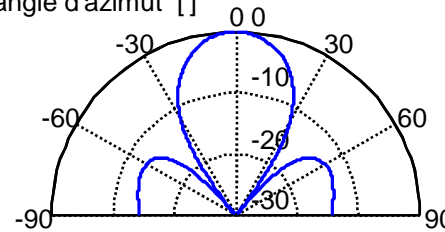
*Ouverture de l'antenne
(largeur du lobe principal)*

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 = \arcsin\left(\sin\theta_0 + \frac{2\alpha}{kL}\right) - \arcsin\left(\sin\theta_0 - \frac{2\alpha}{kL}\right)$$

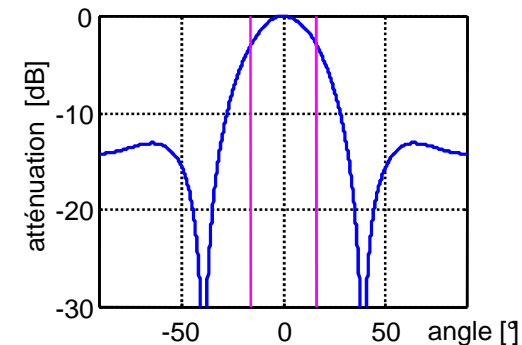
fréquence : 330 Hz

ouverture du lobe principal à -3 dB : 32.3°
ouverture du lobe principal à -10 dB : 55.2°

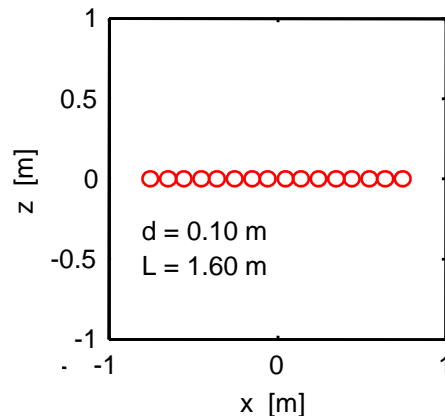
angle d'azimut [°]



angle d'orientation 0°



M = 16 microphones

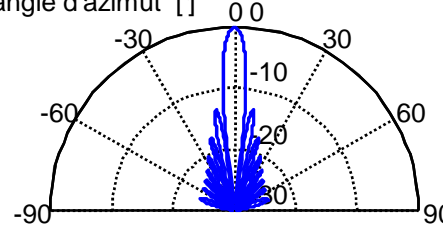


$kL = 10$

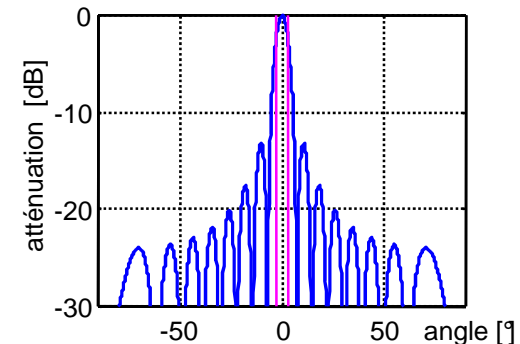
fréquence : 1650 Hz

ouverture du lobe principal à -3 dB : 6.4°
ouverture du lobe principal à -10 dB : 10.6°

angle d'azimut [°]



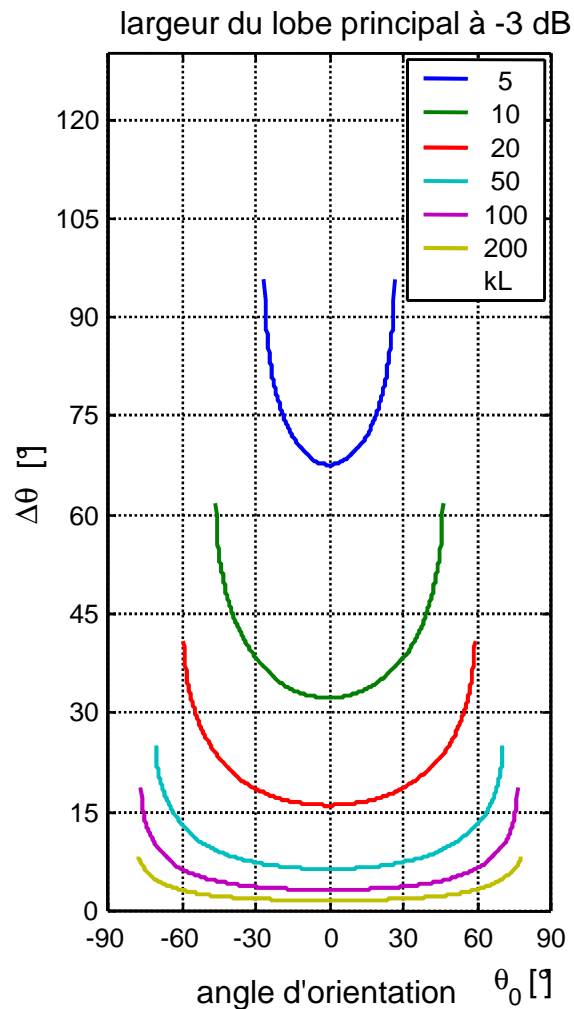
angle d'orientation 0°



Antennes linéaires : fréquence et envergure

Ouverture de l'antenne
(largeur du lobe principal)

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 = \arcsin\left(\sin\theta_0 + \frac{2\alpha}{kL}\right) - \arcsin\left(\sin\theta_0 - \frac{2\alpha}{kL}\right)$$



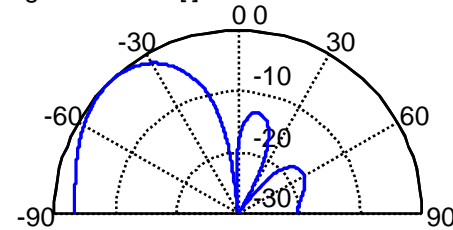
fréquence : 330 Hz

ouverture du lobe principal à -3 dB : 54.7°

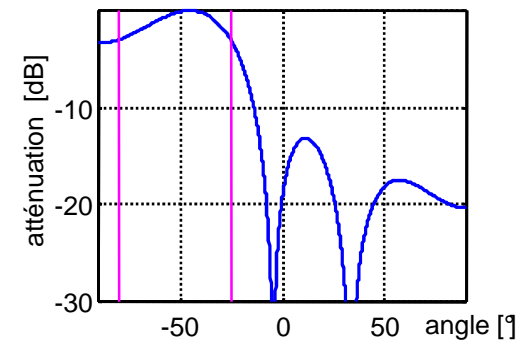
ouverture du lobe principal à -10 dB : 75.9°

angle d'azimut [°]

$kL = 10$



angle d'orientation -45°



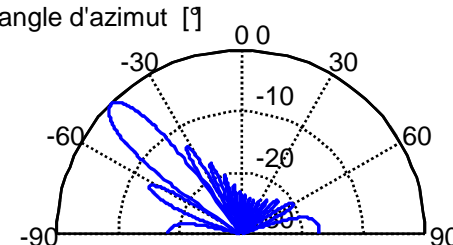
fréquence : 1650 Hz

ouverture du lobe principal à -3 dB : 9.1°

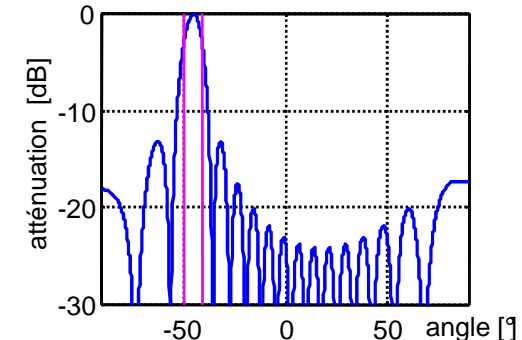
ouverture du lobe principal à -10 dB : 15.2°

angle d'azimut [°]

$kL = 50$



angle d'orientation -45°



Antennes linéaires : sous-échantillonnage

Quand la fréquence augmente, la demi-longueur d'onde acoustique devient du même ordre de grandeur que la distance entre microphones

$$\frac{\sin\left[k \frac{L}{2} (\sin \theta - \sin \theta_0)\right]}{k \frac{d}{2} (\sin \theta - \sin \theta_0)}$$

devient sensiblement plus faible que 1, ce qui conduit à **l'amplification des lobes secondaires.**

Des "**lobes de réseau**" apparaissent avant d'arriver à la limite théorique d'échantillonnage spatial $d_{\min} = \lambda/2$

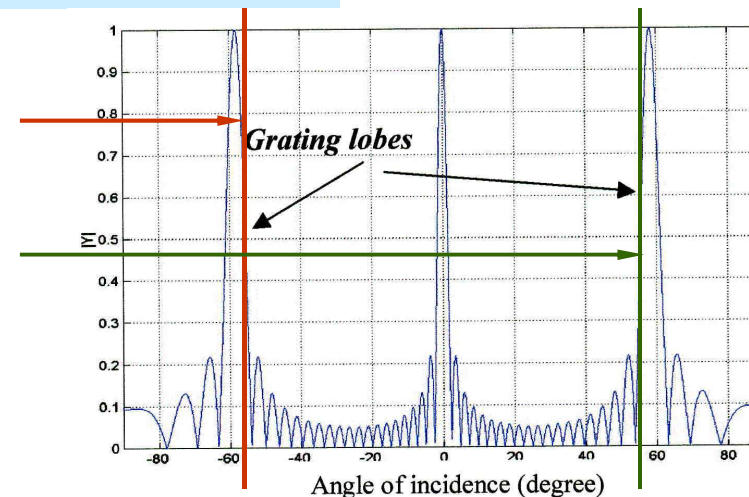
plage d'utilisation de l'antenne $[\vartheta_1 \quad \vartheta_2]$ quand $d_{\min} > \lambda/2$

$$\vartheta_1 = \arcsin\left(\sin \theta_0 - \frac{2\alpha}{kd}\right) \quad \text{quand} \quad \left|\sin \theta_0 - \frac{2\alpha}{kd}\right| < 1$$

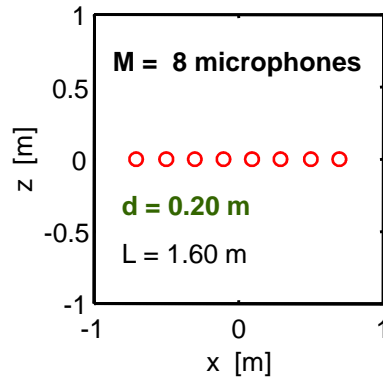
$$\vartheta_2 = \arcsin\left(\sin \theta_0 + \frac{2\alpha}{kd}\right) \quad \text{quand} \quad \left|\sin \theta_0 + \frac{2\alpha}{kd}\right| < 1$$

6 dB $\alpha = 1.89549$

10 dB $\alpha = 2.31858$



Antennes linéaires : sous-échantillonnage

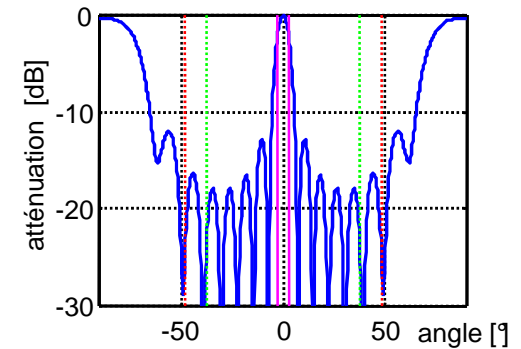
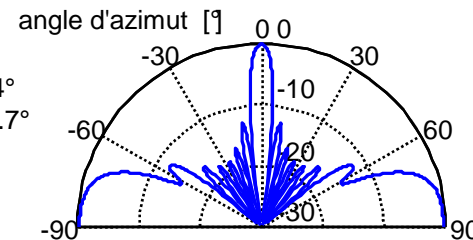
lobes de réseau pour $d_{\min} = \lambda/2$ fréquence : 1650 Hz ($\lambda / 2 = 0.20$ m) $kL = 50$ 

ouverture du lobe principal à -3 dB : 6.4°
 ouverture du lobe principal à -10 dB : 10.7°

angle d'orientation 0°

limite lobe de réseau à 6 dB : [-37.3° 37.3°]

limite lobe de réseau à 10 dB : [-47.8° 47.8°]

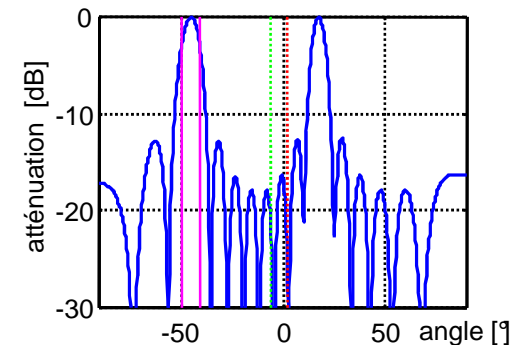
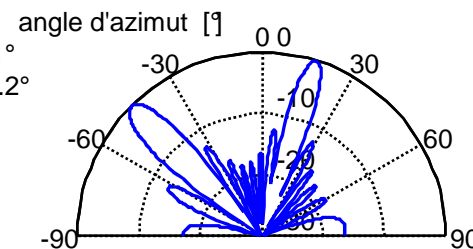


limite lobe de réseau à 6 dB : [NaN° -5.8°]

limite lobe de réseau à 10 dB : [NaN° 2.0°]

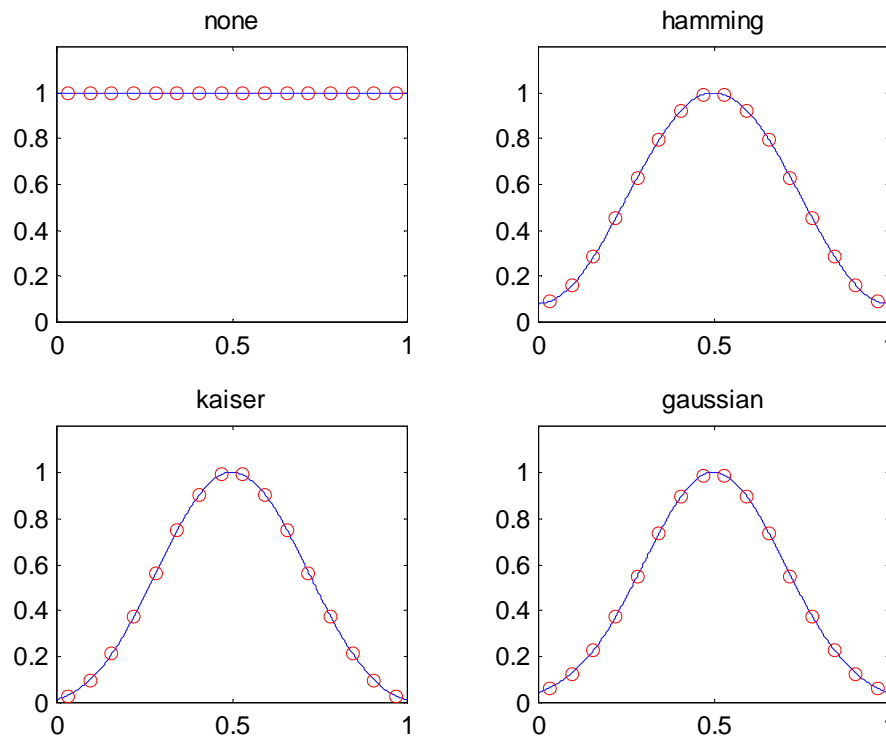
ouverture du lobe principal à -3 dB : 9.1°
 ouverture du lobe principal à -10 dB : 15.2°

angle d'orientation -45°



Antennes linéaires : fenêtre d'apodisation

Les fonctions d'apodisation sur l'envergure de l'antenne ont pour but le contrôle des lobes secondaires



Hanning : la plus populaire des fenêtres basées sur la fonction cosinus (les autres : **Hamming**, Blackman, Harris),

Kaiser-Bessel (avec facteur $\beta = 2\pi$) maximise le rapport entre l'énergie du lobe principal et celle des lobes secondaires,

Gaussienne (avec facteur $\alpha = 2.5$) supprime les lobes secondaires.

Antennes linéaires : fenêtre d'apodisation

Les fonctions d'apodisation sur l'envergure de l'antenne ont pour but le contrôle des lobes secondaires ...

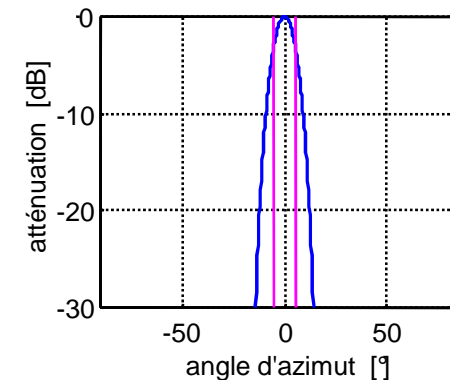
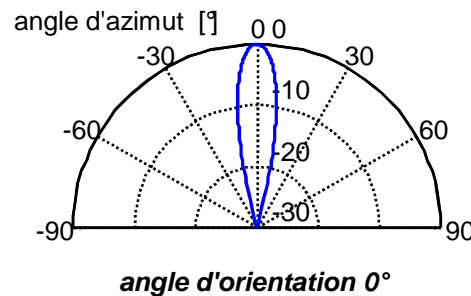
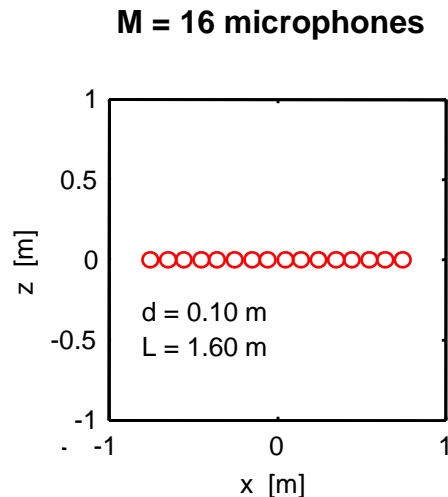
fréquence : 1650 Hz ($\lambda / 2 = 0.20$ m)

$kL = 50$

apodisation : kaiser

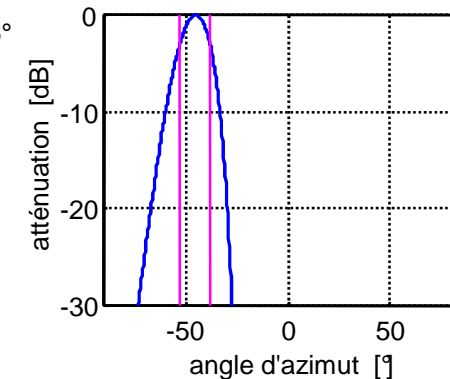
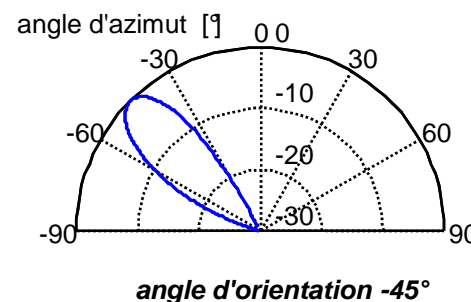
ouverture du lobe principal à -3 dB : 10.3°

ouverture du lobe principal à -10 dB : 18.2°



ouverture du lobe principal à -3 dB : 14.7°

ouverture du lobe principal à -10 dB : 26.6°



Antennes linéaires : fenêtre d'apodisation

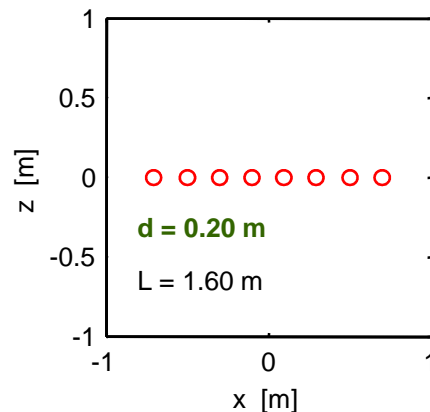
Les fonctions d'apodisation sur l'envergure de l'antenne ont pour but le contrôle des lobes secondaires ... **mais ne réduisent pas les lobes de réseau**

fréquence : 1650 Hz ($\lambda / 2 = 0.20$ m)

$kL = 50$

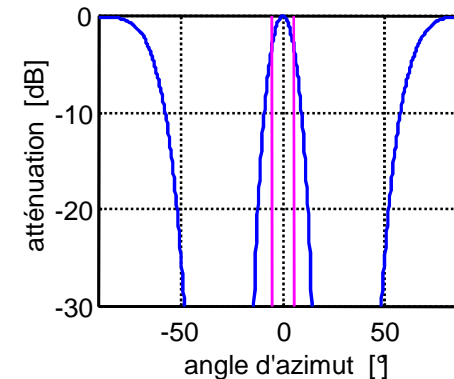
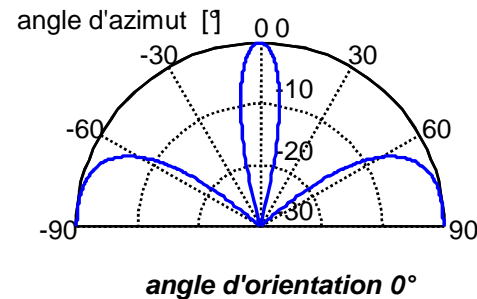
apodisation : kaiser

M = 8 microphones



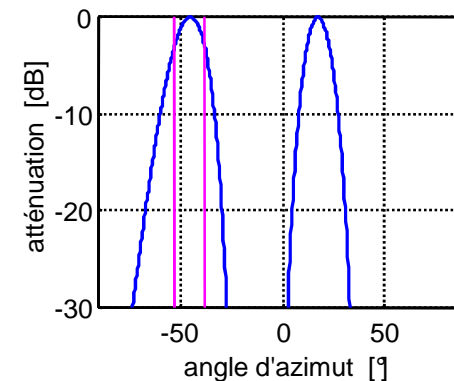
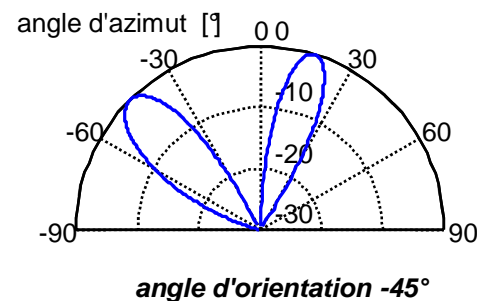
ouverture du lobe principal à -3 dB : 10.3°

ouverture du lobe principal à -10 dB : 18.2°



ouverture du lobe principal à -3 dB : 14.6°

ouverture du lobe principal à -10 dB : 26.6°

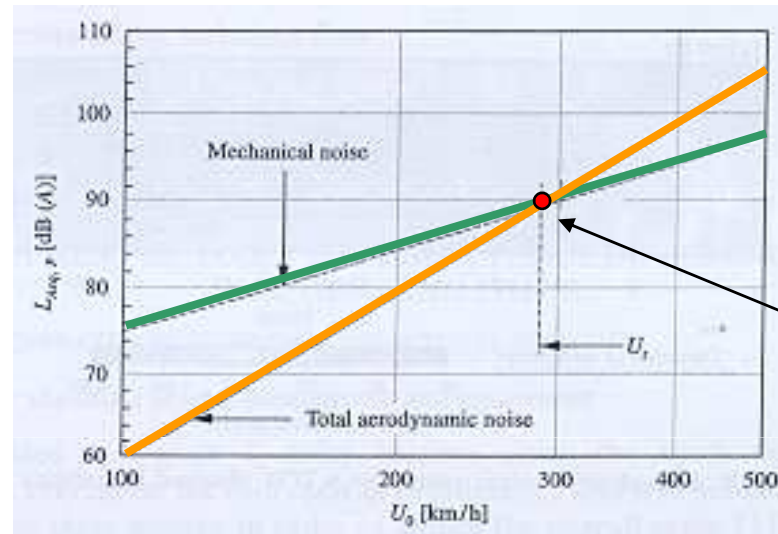


Antennes linéaires : sources mobiles

Ces antennes ont été utilisées dès les années 80 pour étudier le bruit des trains

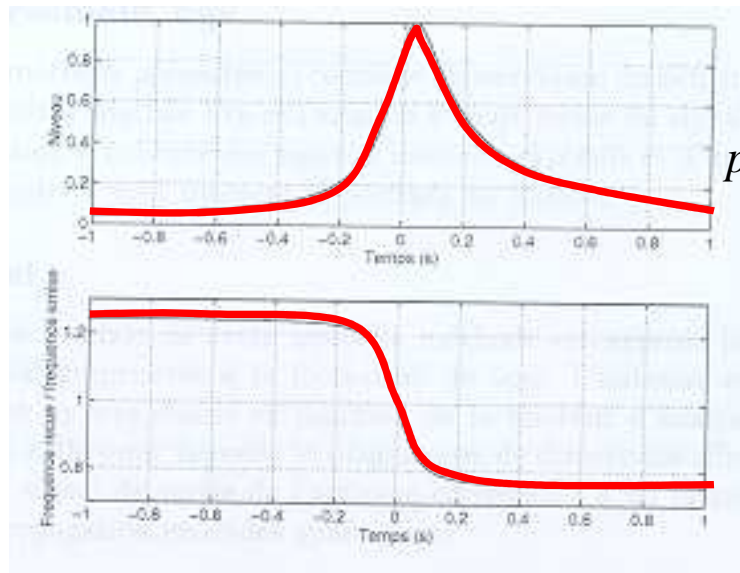
Deux types de bruits :

- un bruit **mécanique de roulement**, émis à la fois par le matériel et l'infrastructure
- un bruit **aérodynamique**, dû aux écoulements d'air autour du train



280 km/h

Effet Doppler

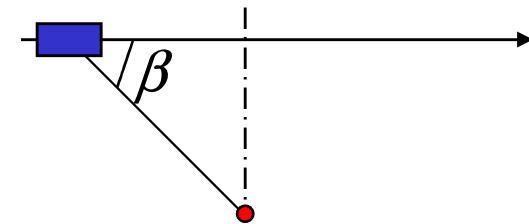


Variation d'amplitude

$$p(t) = \frac{A}{R(1 - M \cos \beta)^2} \cos\left(2\pi f\left(t - \frac{R}{c}\right)\right)$$

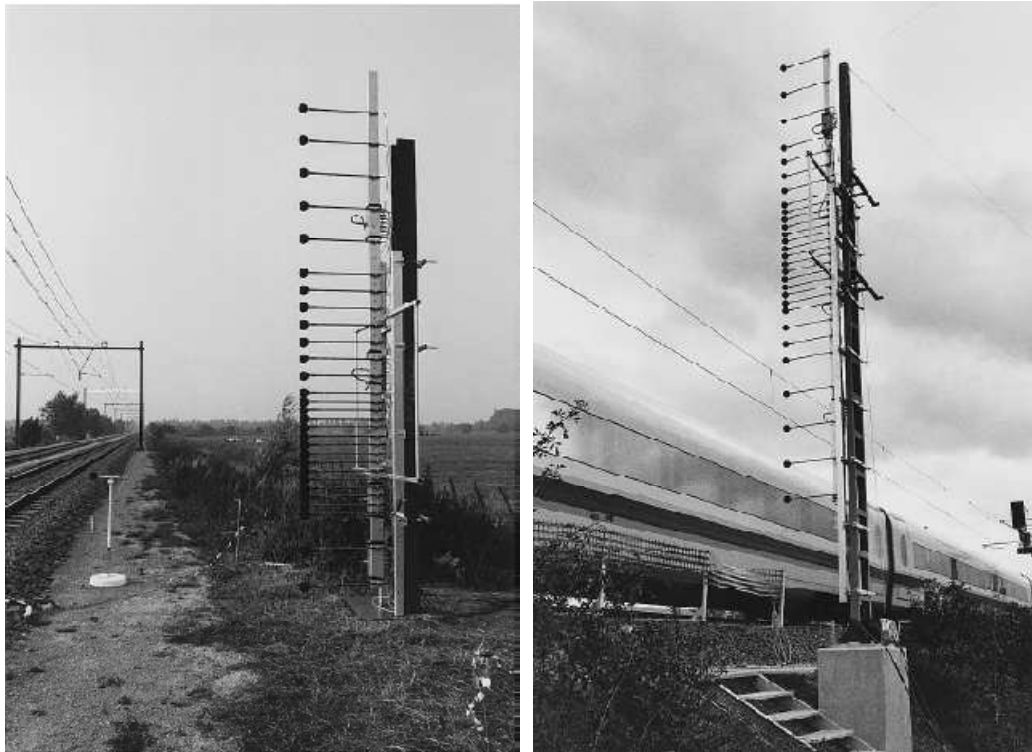
$$f_0(t) = \frac{f_0}{(1 - M \cos \beta)}$$

Fréquence instantanée

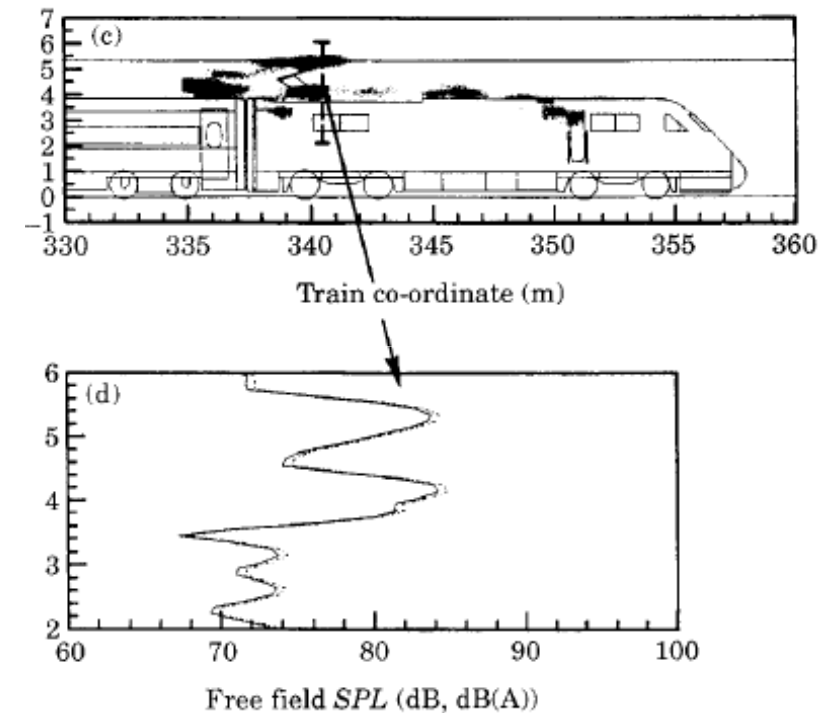


Antennes linéaires verticales

- Barsikow utilise aussi des **antennes linéaires verticales** à pas variables pour garder une résolution constante dans le gamme de fréquence [Barsikow, JSV 1986]



Antennes linéaires verticales à espacements variables des microphones



Bruit aérodynamique généré par le pantographe d'un train à 200 km/h

Niveau dans la bande 1172-1367 Hz

Antennes linéaires verticales

- La SNCF utilise en 1993 une antenne linéaire de 15 microphones horizontale pour caractériser des sources rapportées sur un train d'essai de type Corail [Poisson, Thèse, 1996].



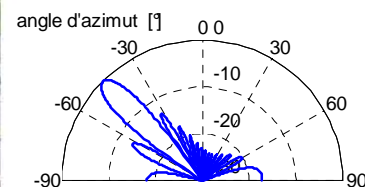
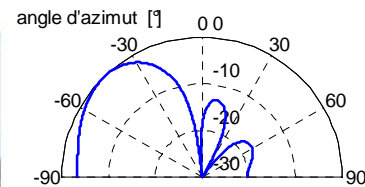
Les premiers essais réalisés sur TGV Atlantique en 1994 utilisent également une antenne verticale

Des mesures ont aussi été effectuées en Belgique sur un train Thalys à 330 km/h en 1996

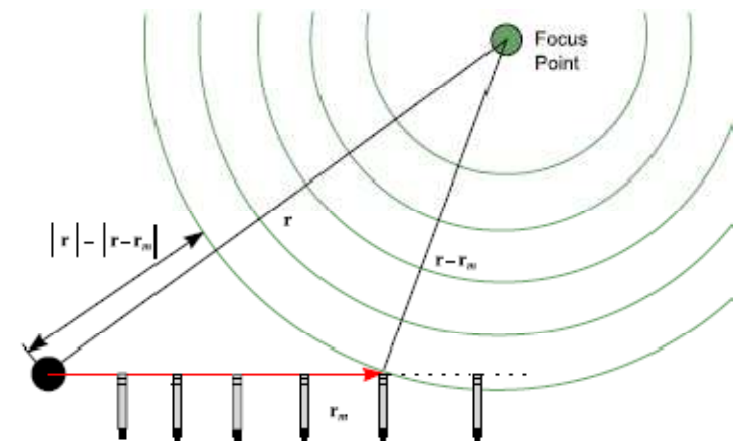
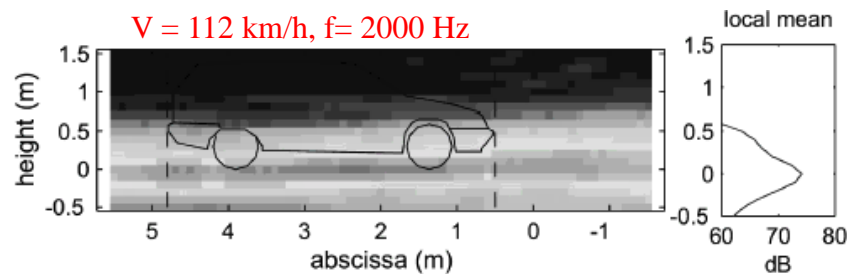
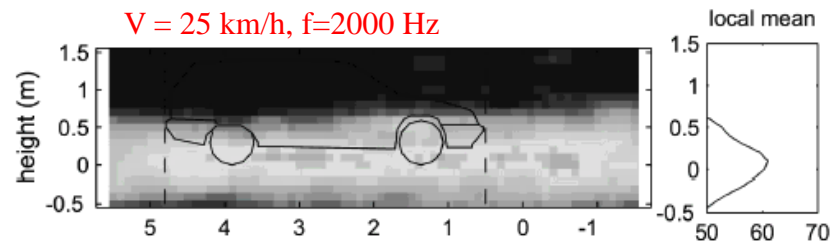


Antennes linéaires verticales : bruit de passage

Méthodes bien adaptées à l'analyse des bruits de passage



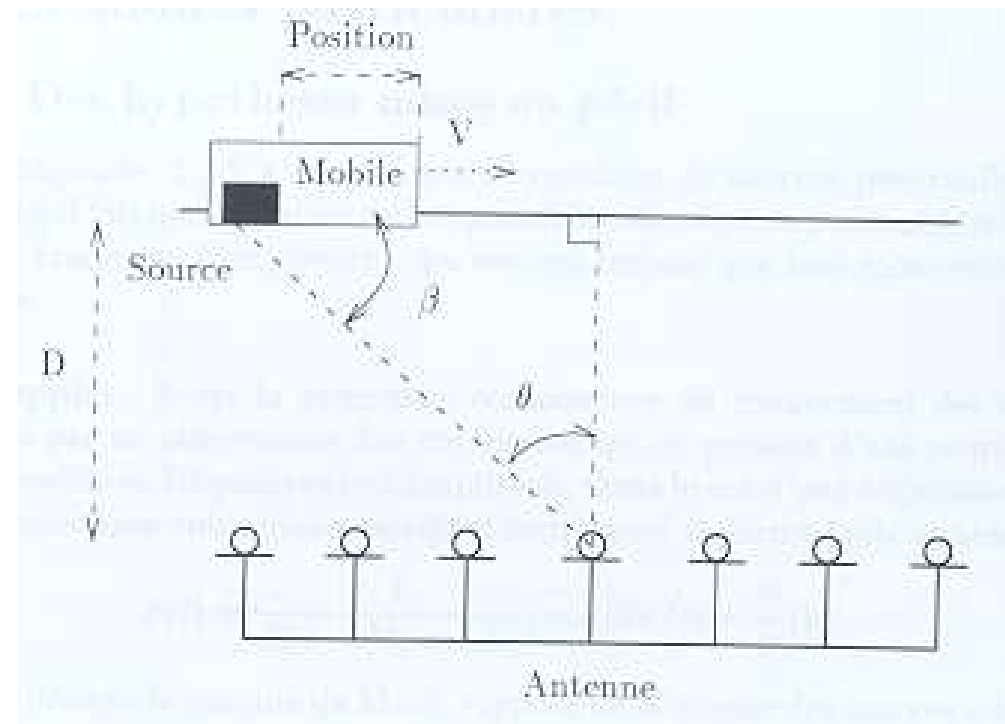
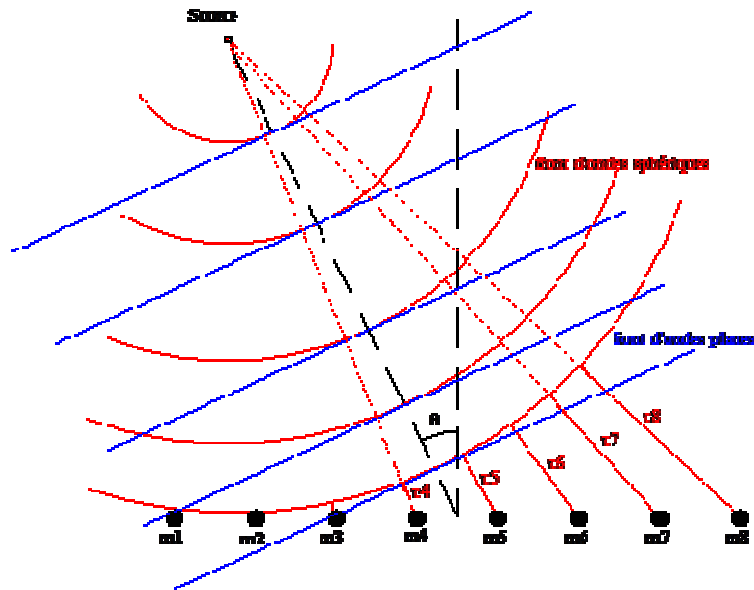
16 micro – L=1.6 m



Antennes additives linéaire (Doc. INRET)
pour l'analyse des sources mobiles.

Antennes linéaires horizontales : sources mobiles

*L'effet Doppler est corrigé en suivant le déplacement du train: **dé-dopplérisation***



Assurer le suivi d'une zone du train lors de son passage

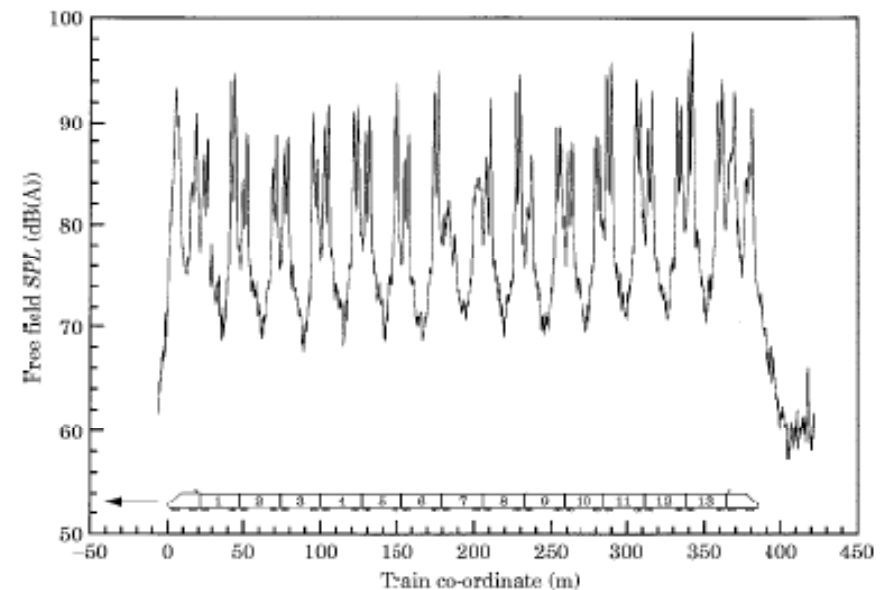
La focalisation est ajustée à chaque instant de manière à suivre la zone sélectionnée

Antennes linéaires verticales ou horizontales

Barsikow utilise des **antennes linéaires** de 15 microphones qui peuvent être orientées en position verticale ou horizontale pour localiser et identifier des sources de roue/rail [Barsikow et al, JSV 1987]



Antenne linéaire de 15 microphones espacés de 8 cm et placée à 5.7 m du centre de la voie pour travailler dans la gamme 1000-4500 Hz

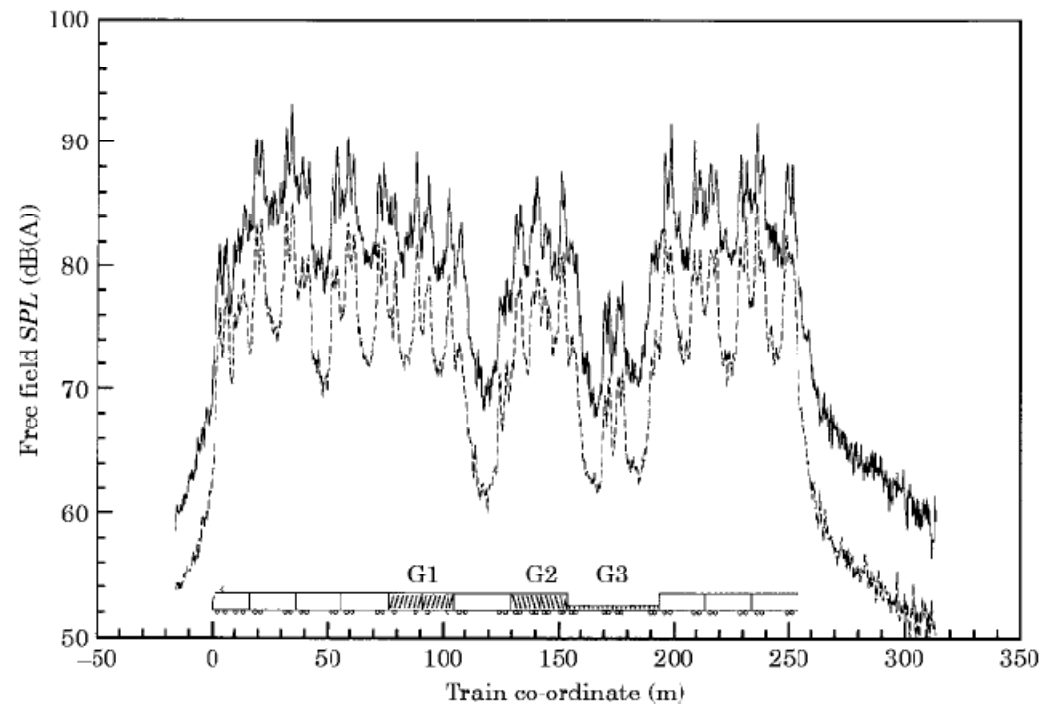


Niveau global A pour un train à 200 km/h

Le train est équipé de roues de conception différentes

Antennes linéaires verticales ou horizontales

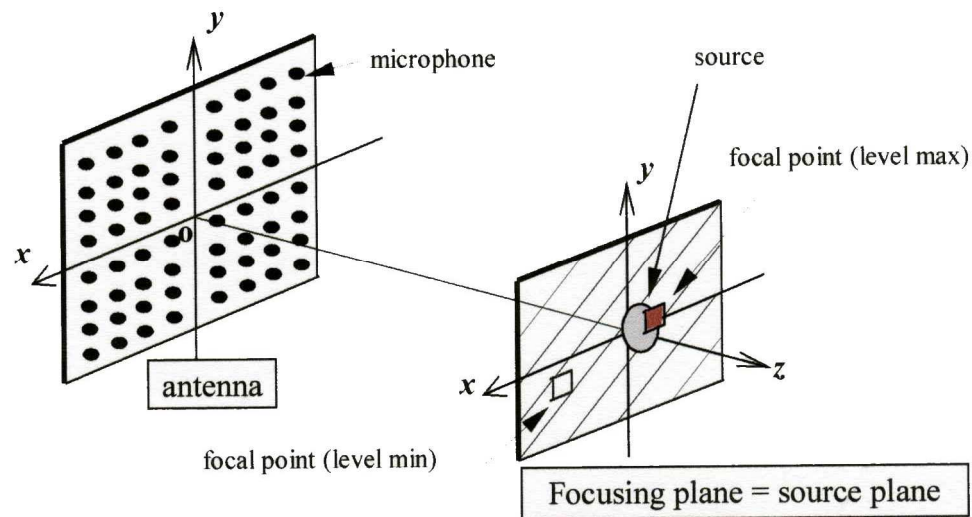
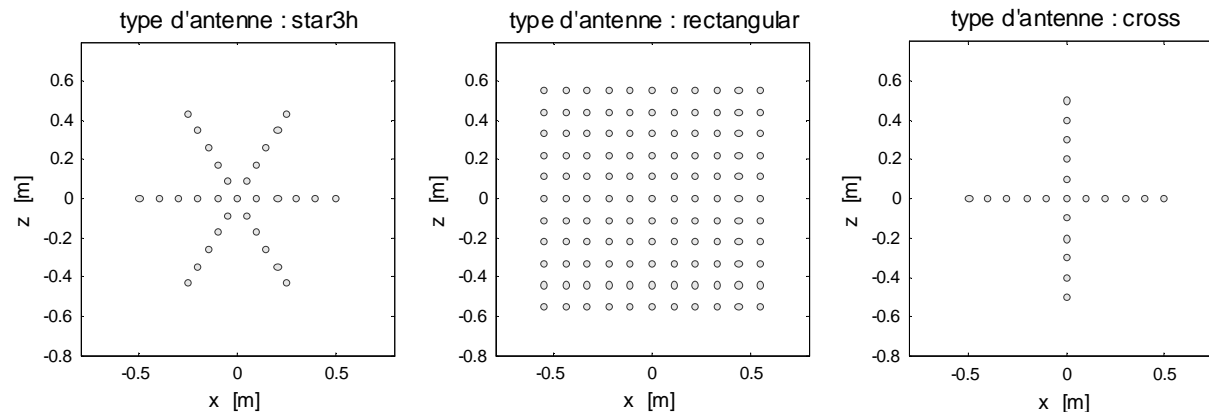
Les **antennes linéaires** horizontales peuvent être constituées de microphones d'écartements différents pour garder une même résolution sur la gamme de fréquence [Barsikow et al, JSV 1986]



Train test à 250 km/h dont les wagons comportent des roues avec différents types de frein : les niveaux (global A) les plus faibles correspondent à des freins à disque.

Antennes 2D

Les **antennes planes** sont basées sur le même principe



Sum and Delay Array : les voies sont retardées en fonction de la position du point focal, puis sommées

$$S_i(t) = \frac{1}{\sum_{j=1}^M \frac{w_j}{r_{ji}^2}} \sum_{j=1}^M \frac{w_j}{r_{ji}} p_j(t) * \delta\left(t + \frac{r_{ji}}{c}\right)$$

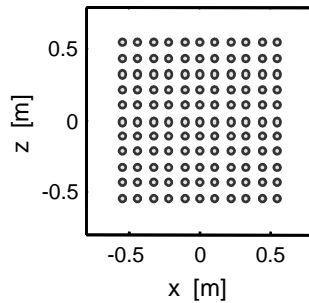
w_j fenêtre d'apodisation 37

Résolution et lobes secondaires

fréquence : 1000 Hz ($\lambda / 2 = 0.33$ m)

angle d'orientation azimuth : 0° site : 0° distance de focalisation : 10 m

type d'antenne : rectangular

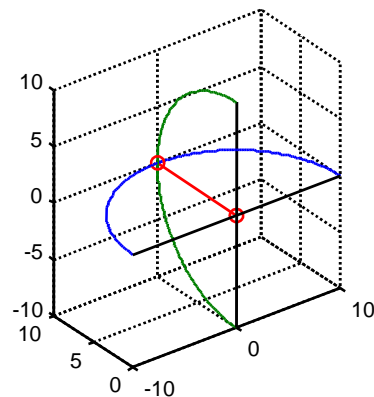


M = 121 microphones

d = 0.10 m

L = 1.10 m

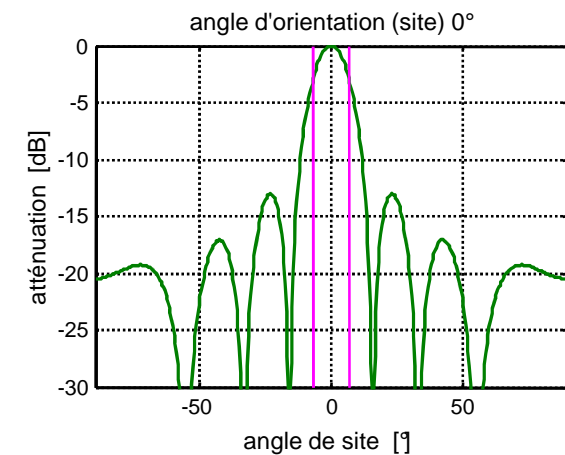
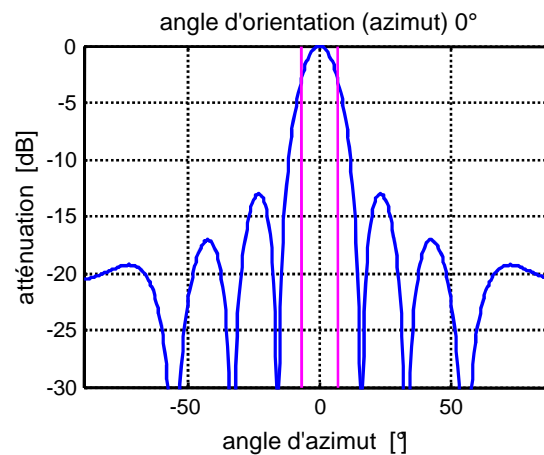
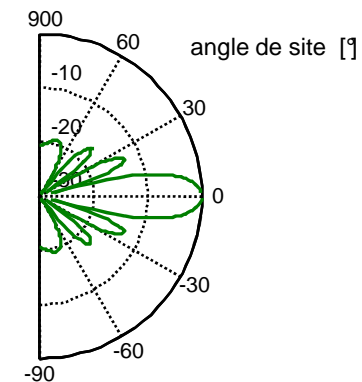
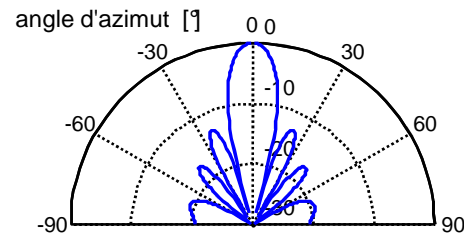
kL = 20.8



ouverture du lobe principal à -3 dB

azimut : 14.0°

site : 14.0°

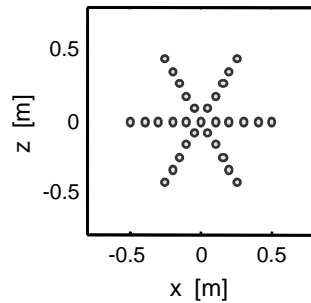


Résolution et lobes secondaires

fréquence : 1000 Hz ($\lambda / 2 = 0.33$ m)

angle d'orientation azimut : 0° site : 0° distance de focalisation : 10 m

type d'antenne : star3h

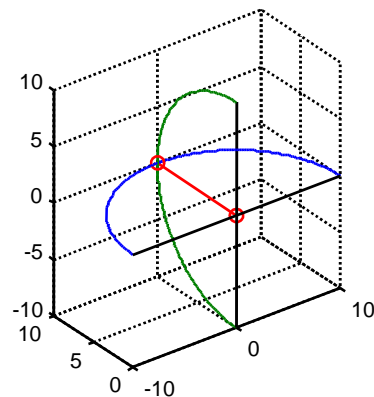


M = 31 microphones

d = 0.10 m

L = 1.10 m

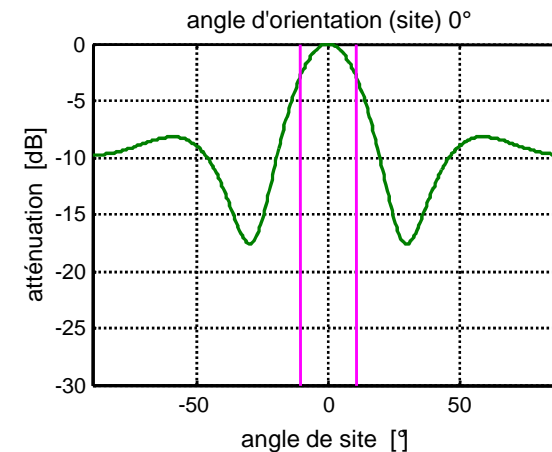
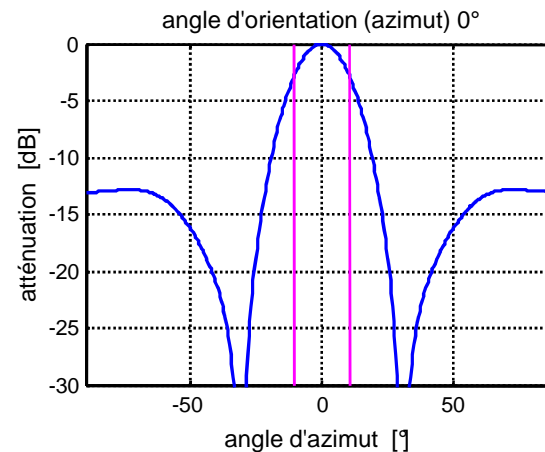
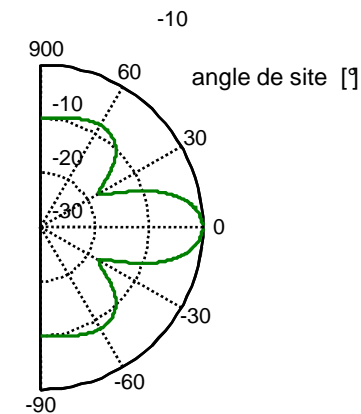
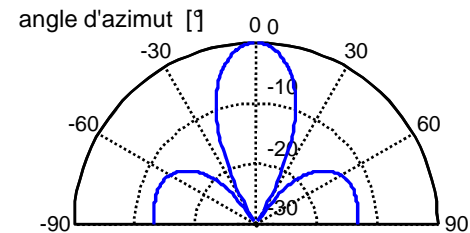
kL = 20.8



ouverture du lobe principal à -3 dB

azimut : 21.6°

site : 21.6°

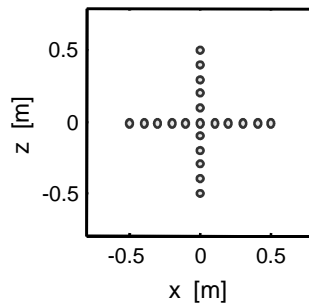


Résolution et lobes secondaires

fréquence : 1000 Hz ($\lambda / 2 = 0.33$ m)

angle d'orientation azimut : 0° site : 0° distance de focalisation : 10 m

type d'antenne : cross

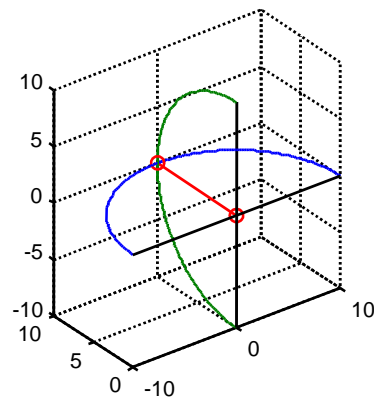


M = 21 microphones

d = 0.10 m

L = 1.10 m

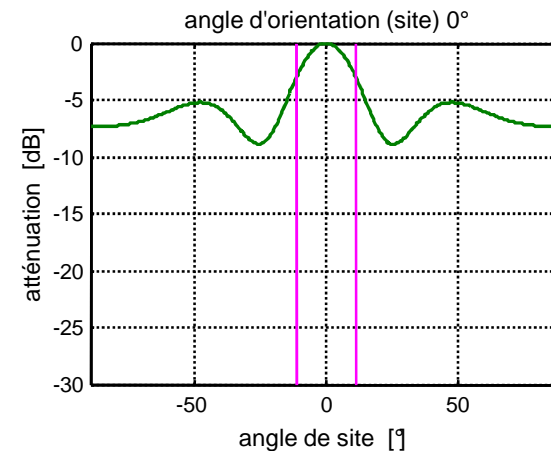
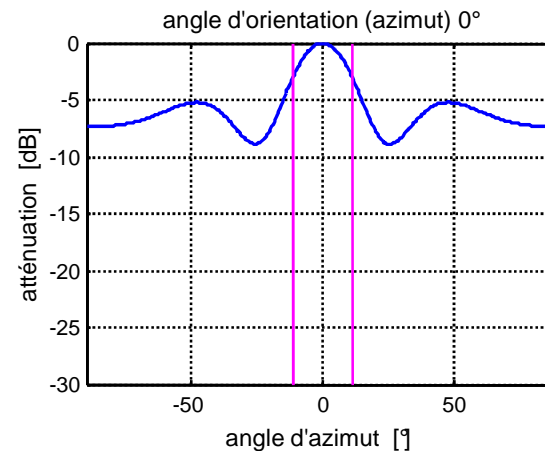
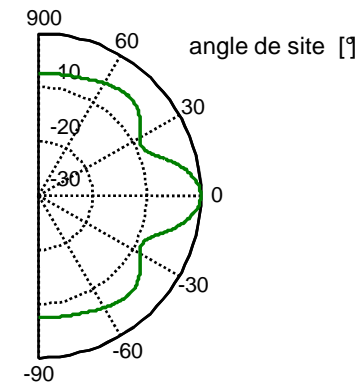
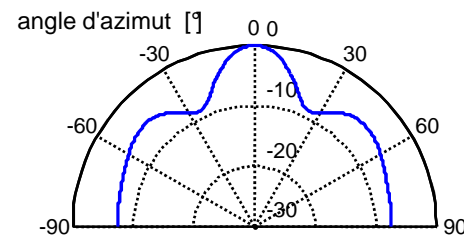
kL = 20.8



ouverture du lobe principal à -3 dB

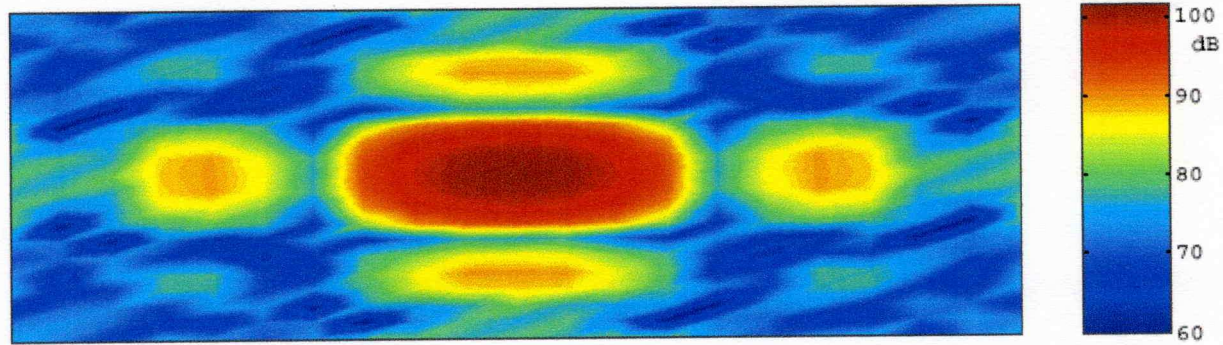
azimut : 22.5°

site : 22.5°

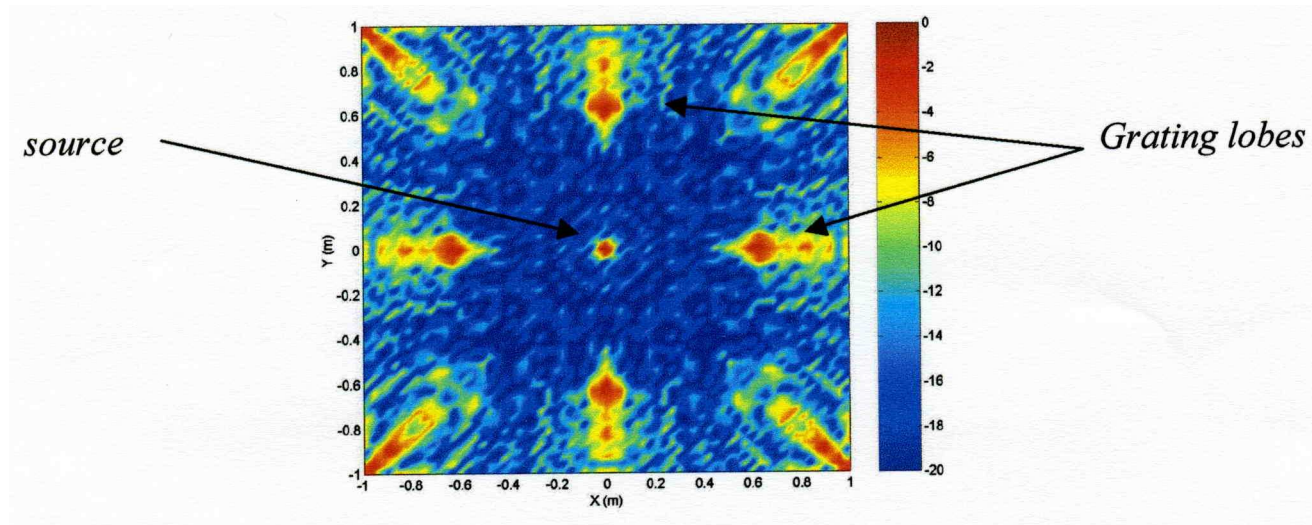


Résolution et lobes secondaires

Effet des lobes secondaires pour une source en face de l'antenne



Effet des lobes de réseau (sous échantillonnage spatial)



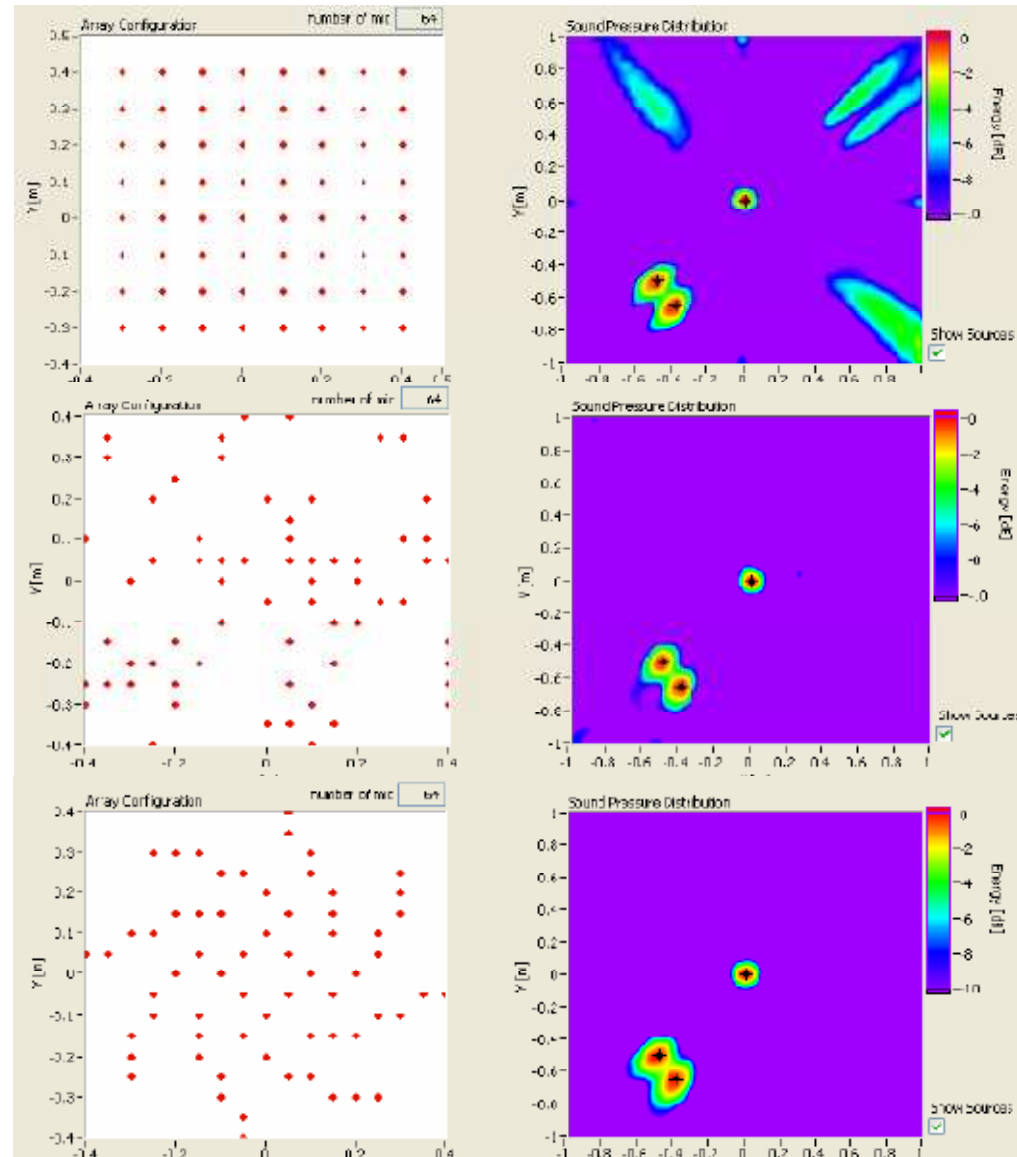
Résolution et lobes secondaires: répartition des capteurs

64 microphones

Grille régulière

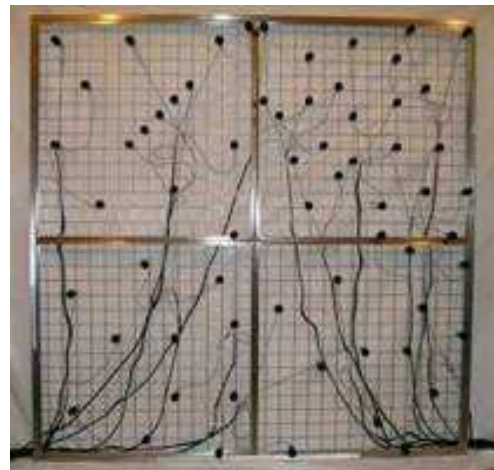
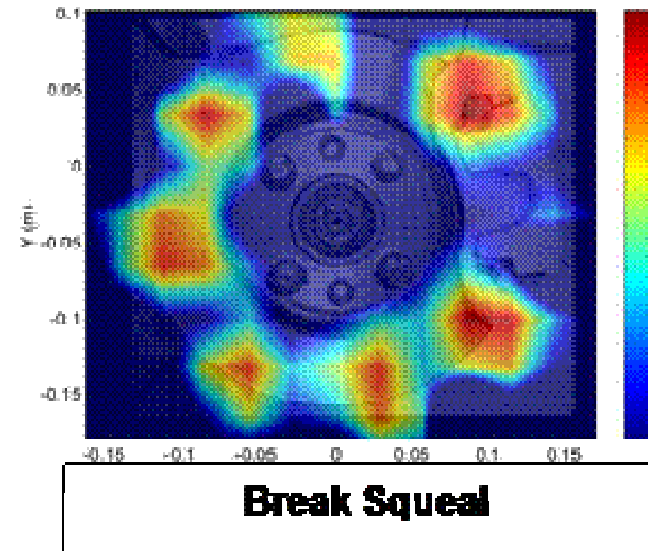
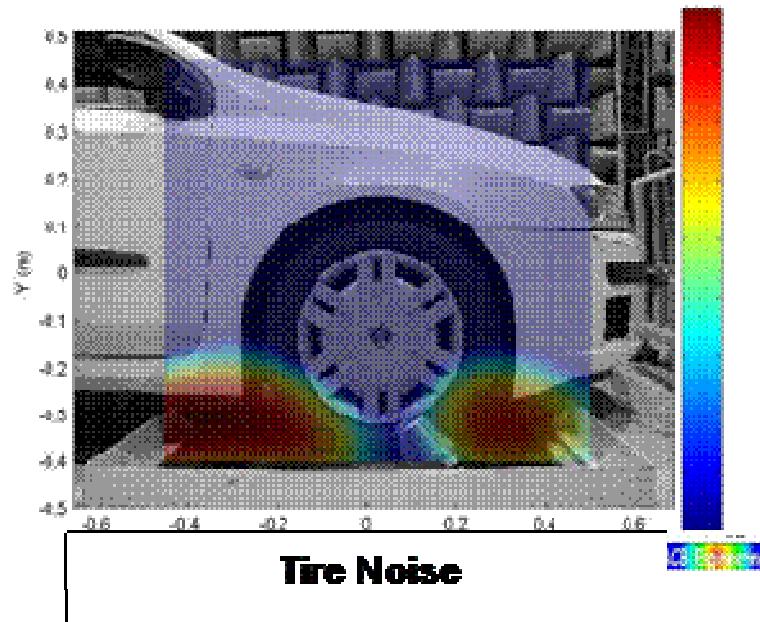
Répartition aléatoire

Arrangement en spirale



Application des méthodes de formation de voies

localisation de l'origine du bruit et aide à la compréhension des phénomènes

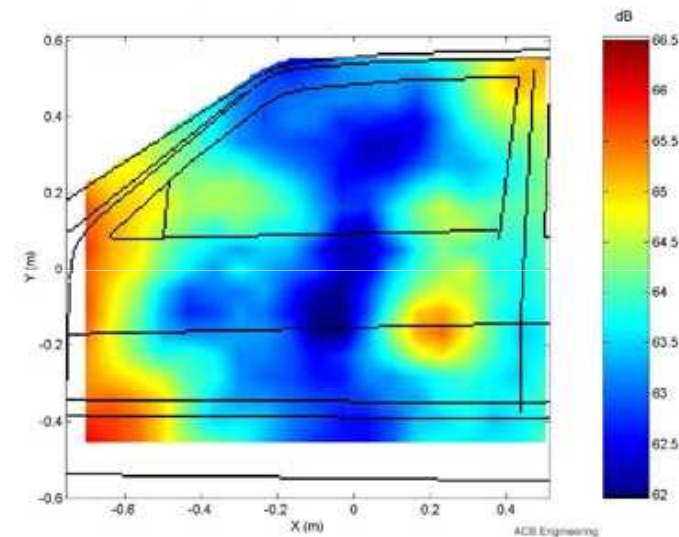


Différentes dispositions de microphones

(Doc. ACB Engineering)

Application des méthodes de formation de voies

localisation des fuites et des sources de bruit

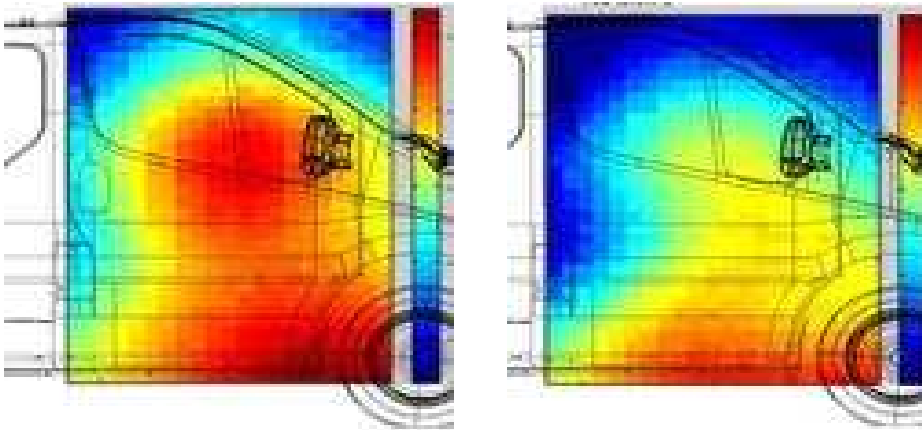


Analyse des fuite sur la porte passager au cours d'un test sur route à 150 km/h

(Doc. ACB Engineering)

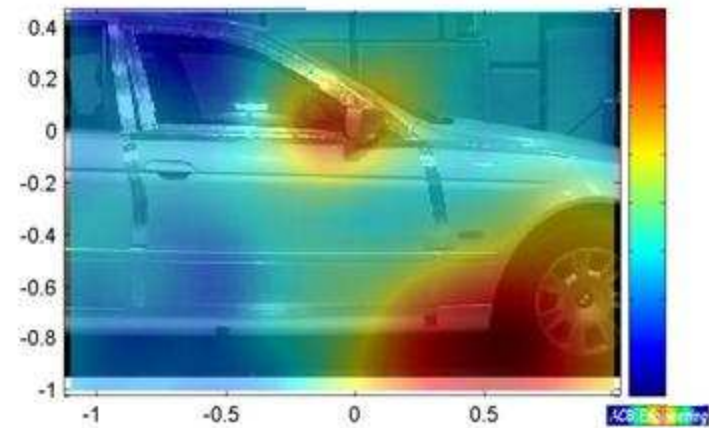
Utilisation des antennes en soufflerie

Utilisation des antennes en soufflerie



Permet de choisir entre deux configurations

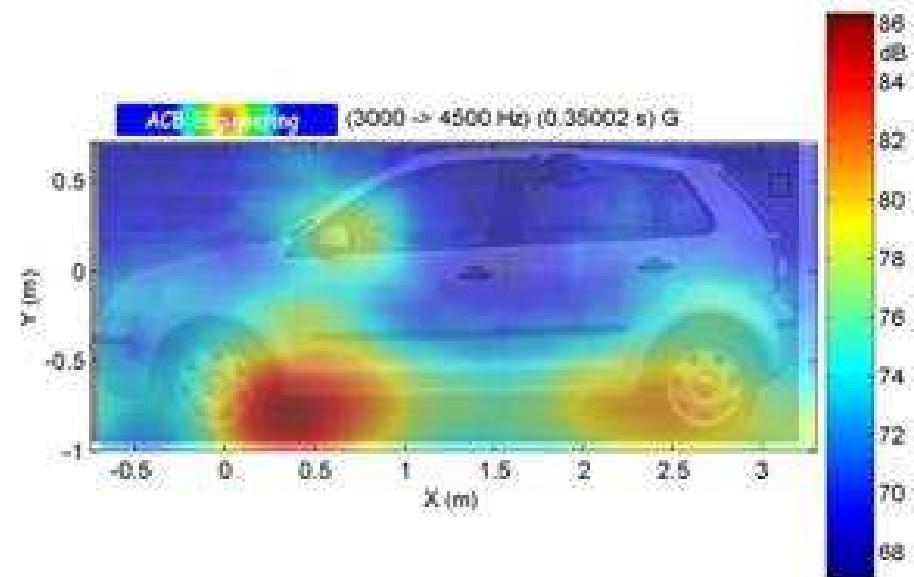
Analyse du bruit aéroacoustique généré par un rétroviseur



(Doc. ACB Engineering)

Méthodes de formation de voies : bruit de passage

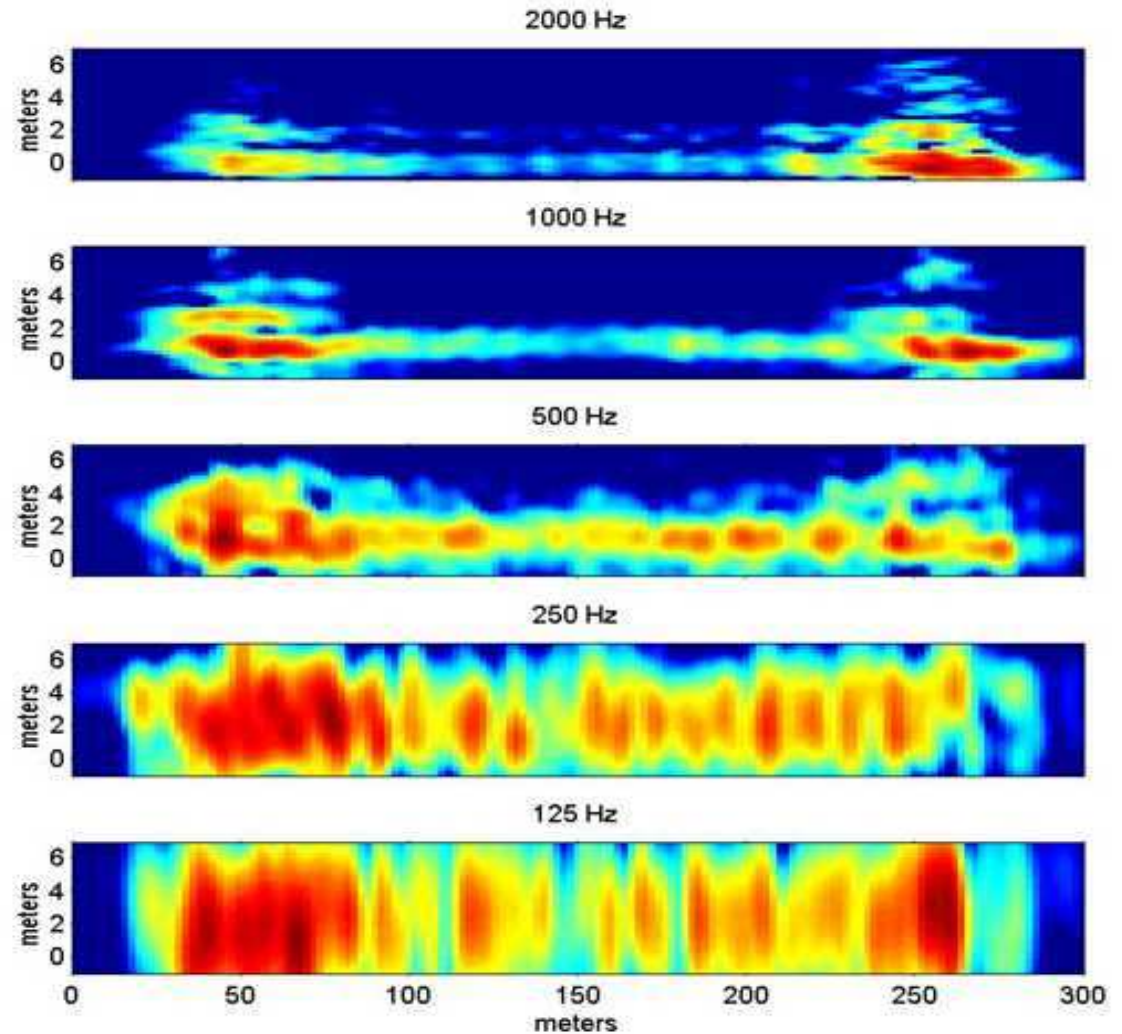
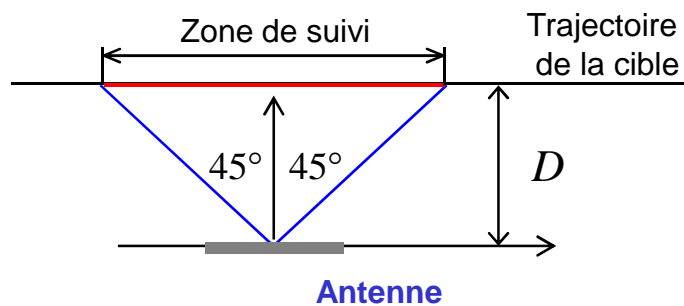
Utilisation pour l'analyse du bruit de passage



Mise en évidence du bruit de contact pneu-chaussée à 144 km/h

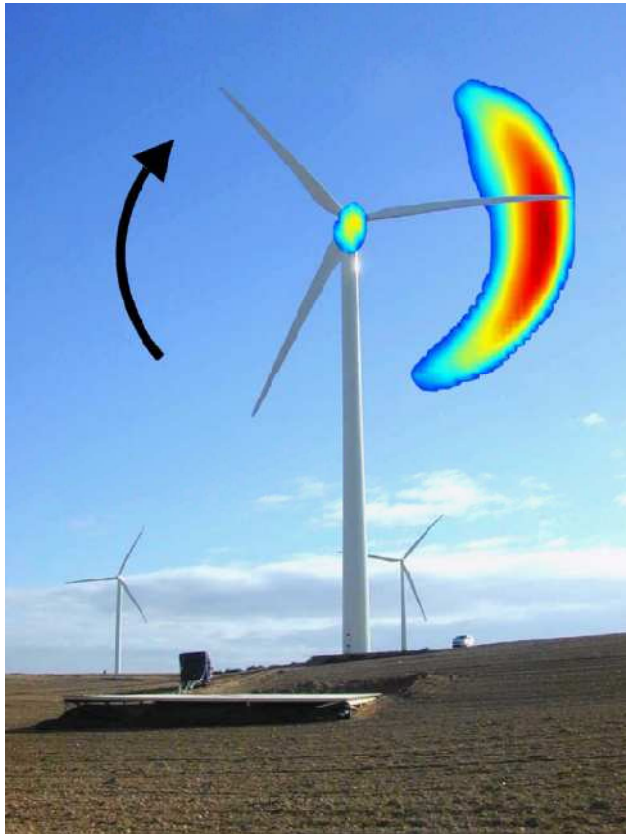
(Doc. ACB Engineering)

Sources mobiles



Résultats par bandes d'octave pour le TGV Atlantique (*Doc. SNCF*)

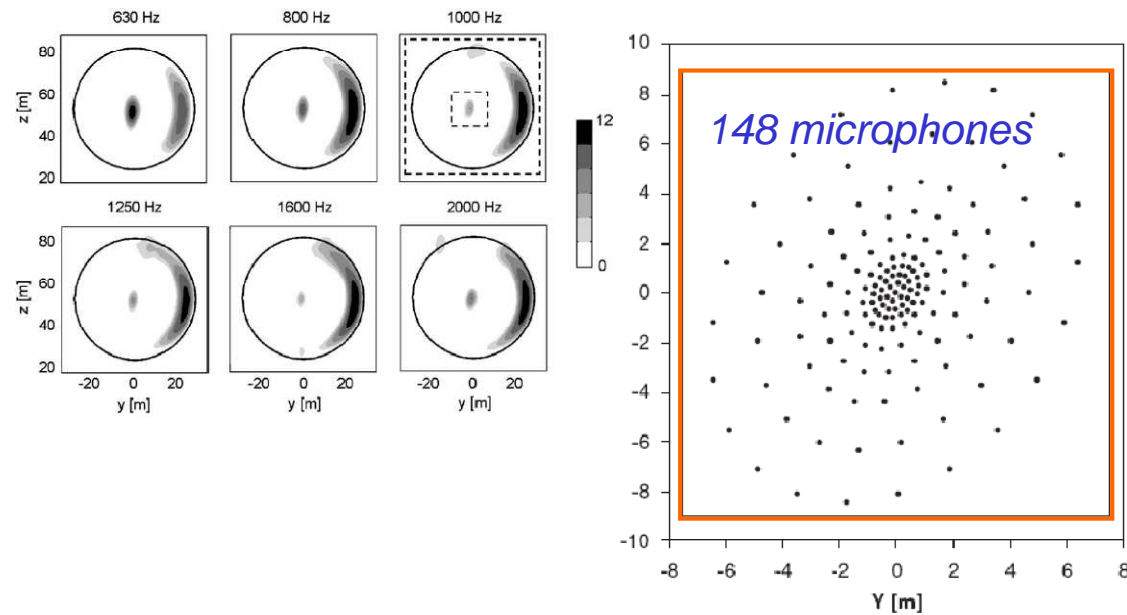
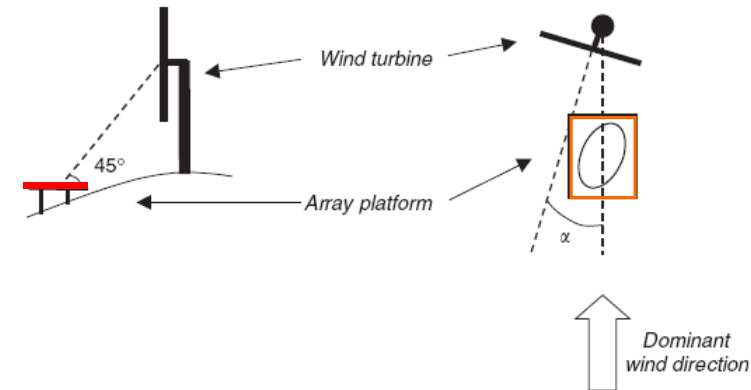
Sources mobiles : éolienne



Hauteur de la tour 53.5 m

Diamètre du rotor 58 m

Vitesse de rotation 25 tr/mn



Résultats par bandes de 1/3 d'octave (Oelermans et al, JSV 2007)

Utilisation des antennes en aéronautique

localisation des sources de bruit sur un avion au décollage chez Boeing



**Déploiement d'une très grande
antenne comportant 617 microphones**

(Doc. Boeing, Underbrink)

Utilisation des antennes en aéronautique : antennes en croix

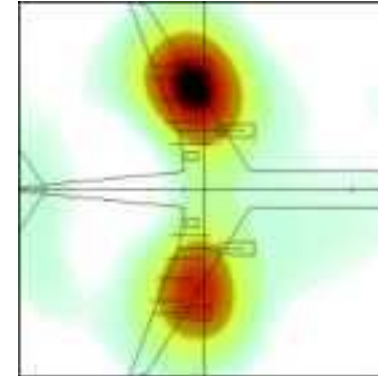
localisation des sources de bruit sur un avion au décollage



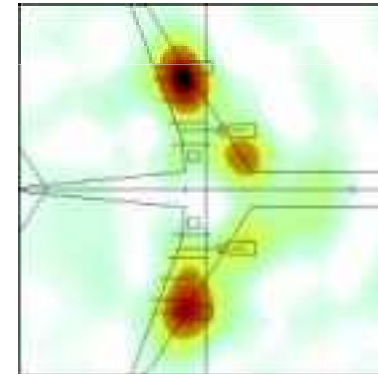
Airbus A340 survolant une antenne en croix comportant 40 microphones

(Doc. ONERA)

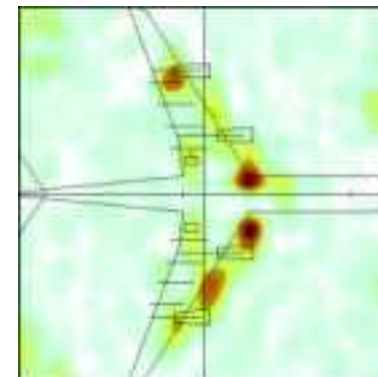
600 Hz

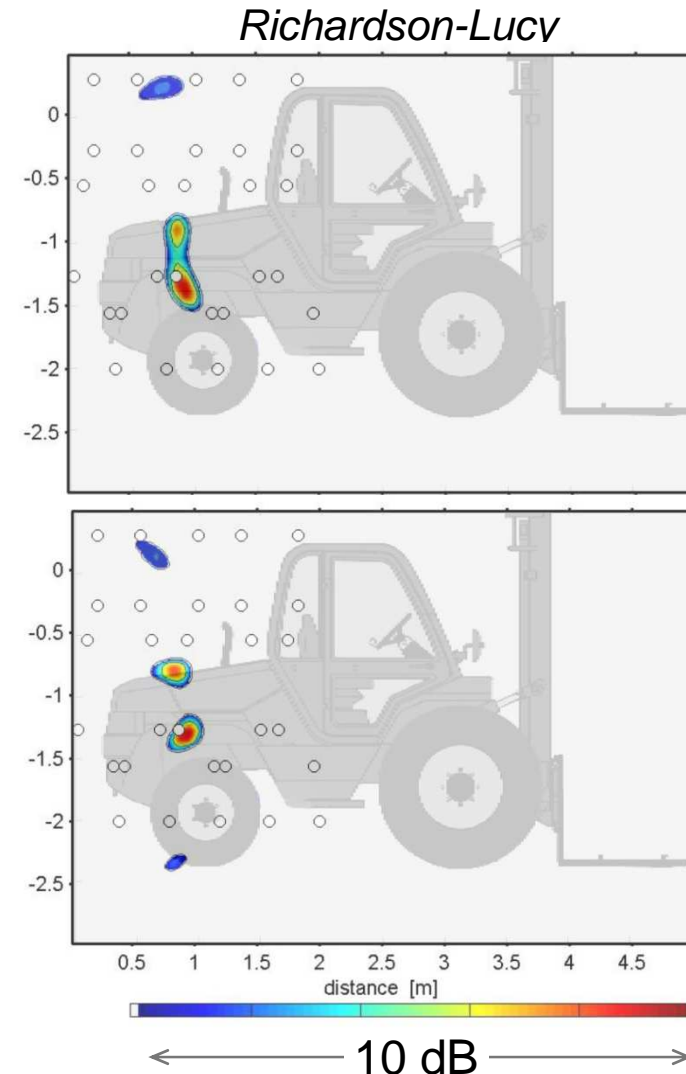
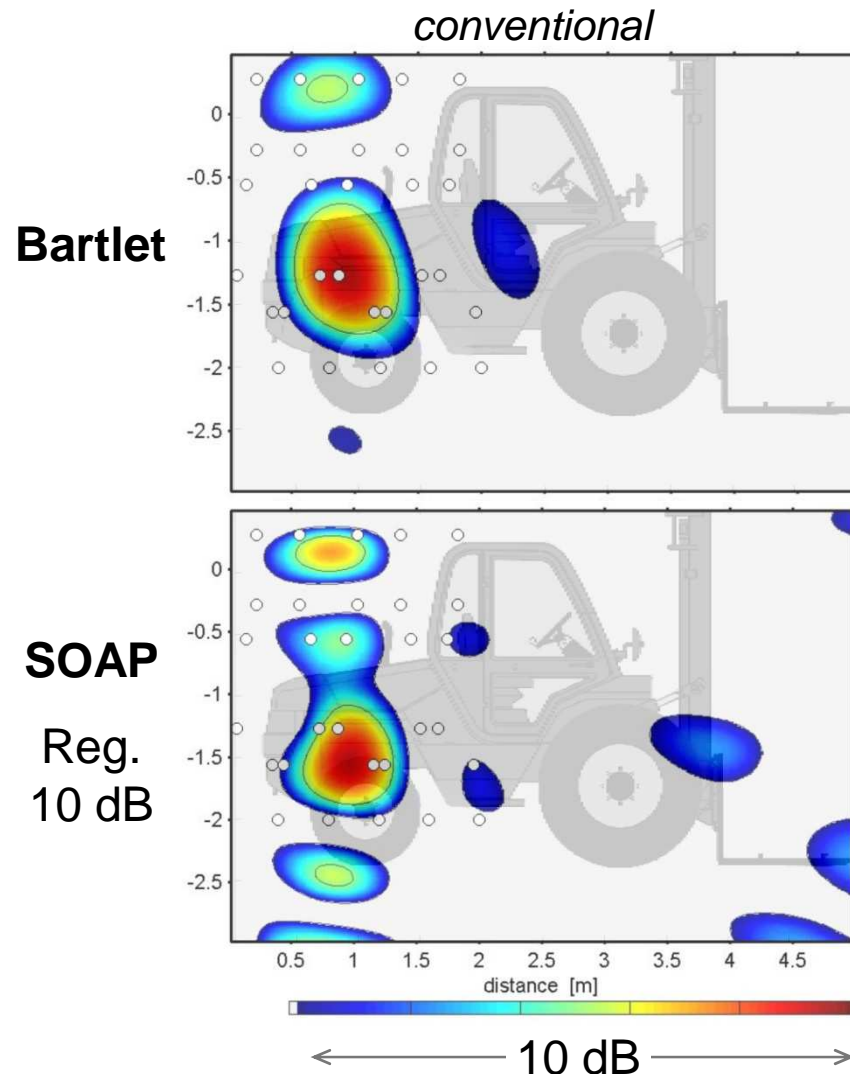


1200 Hz



2500 Hz



Exemple (voir diapositive suivante)**498 Hz**

110 mic.

4 m x 4 m

Exemple

Etude réalisée par le CETIM avec une antenne ACB Engineering et un logiciel de traitement VisualVibroAcoustics



Références

- J.J. Christensen, J. Hald, "Beamforming", Brüel & Kjaer Technical Review N°1, 1-48 (2004).
- C. Mellet, O. Coste, F. Poisson, "Localisation de sources de bruit : sources mobiles sur TGV et sources en écoulement", Journée SFA Renault-SNCF, Guyancourt, 30 novembre 2005, 13-23.
- Y. Wang, J. Li, P. Stoica, M. Sheplak, T. Nishida, "Wideband RELAX and wideband CLEAN for aeroacoustic imaging", *J. Acoust. Soc. Am.* **115** (2) (2004) 757-767.
- T.H. Brooks, W.M. Humphrey, "A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources (DAMAS) determined from phased microphone arrays", *J. Sound Vib.* **294** (2006) 856-879.
- G. Elias, "Source localization with a two-dimensional focused array : optimal processing for a cross-shaped array", Inter-Noise 95, Newport-Beach, USA, 10-12 July 1995, 1175-1178.
- P. Stoica, Z. Wang, J. Li, "Robust Capon beamforming", *IEEE Signal Processing Letters* **10** (6) (2003) 172-175.
- B. Barsikow, W.F. King III, E. Pfizenmaier, "Wheel/rail noise generated by a high-speed train investigated with a line array of microphones", *J. Sound Vib.* **118**(1) (1987) 99-122.
- B. Barsikow, "Experiences with various configurations of microphone arrays used to locate sound sources on railway trains operated by the DB AG", *J. Sound Vib.* **193**(1) (1996) 283-293.
- M.-A. Pallas, "Vertical localization of noise sources on passenger cars with a microphone array", 6th International Congress on Sound and Vibration, Copenhagen, Denmark, 5-8 July 1999, 883-890.
- K. Haddad, V. Benoit, "Localization of aeroacoustic sources all along a vehicle by means of the acoustical imaging system ANT64 in the semi-anechoic wind-tunnel Pininfarina", Euronoise 2003, Naples, Italy, 19-21 May 2003. PaperID 051.
- S. Oerlemans, P. Sijtsma, B. Mendez Lopez, "Localisation and quantification of noise sources on a wind turbine", *J. Sound Vib.* **299** (2007) 869-883.
- J.-C. Pascal, J.-F. Li, "Use of double layer beamforming antenna to identify and locate noise sources in cabins ", Euronoise 2006, Tampere (Finland), 30 May- 1 June 2006.
- J.-C. Pascal, J.-F. Li, "Resolution improvement of data-independent beamformers", Inter-Noise 2007, Istanbul (Turkey), 30 August- 2 September 2007. paper 123, 10 p.

Sites

Développement d'antennes et de logiciels

| | |
|----------------------|---|
| ACB-Engineering | http://www.acb-engineering.fr/fr/accueil.htm |
| Brüel&Kjaer | http://www.bksv.com/3805.asp |
| Gfai | http://www.acoustic-camera.com/ |
| Micro-dB | http://www.microdb.fr/ |
| VisualVibroAcoustics | http://www.VisualVibroAcoustics.com/ |

Autres sources

<http://homes.esat.kuleuven.be/~doclo/dspII/beamforming/beamforming.html>
<http://www.lnt.de/lms/research/projects/beamforming/index.php?lang=eng>
<http://www.acoustic-imaging.com/array.html>
<http://cnx.org/content/m12563/latest/>