Contrôle actif de champs acoustiques

Notions générales et applications

Philippe Herzog

C.N.R.S. UPR 7051 - Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique

21 janvier 2010

Polycopié par Emmanuel Friot

.

Présentation

Philippe HERZOG herzog@lma.cnrs-mrs.fr

- 2001 Affectation au LMA - Reproduction sonore
- 1997-2000 R&D (EPFL) - industrialisation ANC (ABB)
- 1994-1997 Ingénieur (CTTM) - Ingénierie acoustique
- 1988 Chercheur CNRS - Trandsducteurs électroacoustiques
- 1987 GAUS - Propagation extérieure
- 1987 Docteur en Acoustique - LAUM
- 1983-1986 Ingénieur (Badin-Crouzet) - Gyromètre
- 1982 Ingénieur ENSEA - électronique

Présentation

Philippe HERZOG herzog@lma.cnrs-mrs.fr

- 2001 Affectation au LMA - Reproduction sonore
- 1997-2000 R&D (EPFL) - industrialisation ANC (ABB)
- 1994-1997 Ingénieur (CTTM) - Ingénierie acoustique
- 1988 Chercheur CNRS - Trandsducteurs électroacoustiques
- 1987 GAUS - Propagation extérieure
- 1987 Docteur en Acoustique - LAUM
- 1983-1986 Ingénieur (Badin-Crouzet) - Gyromètre
- 1982 Ingénieur ENSEA - électronique

Sommaire

1. Introduction
2. Contrôle acoustique
3. Contrôle localisé
4. Champ propagatif
5. Cas industriels

Contrôle du bruit

1 Introduction

2 Contrôle acoustique

3 Contrôle localisé

4 Champ propagatif

5 Cas industriels

Sources sonores

Sources sonores

- Niveau sonore

Sources sonores

- Niveau sonore
- Contenu spectral

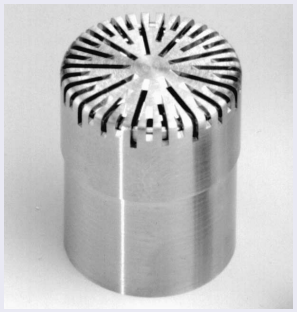
Sources sonores

- Niveau sonore
- Contenu spectral
- Durée, dynamique

Sources sonores

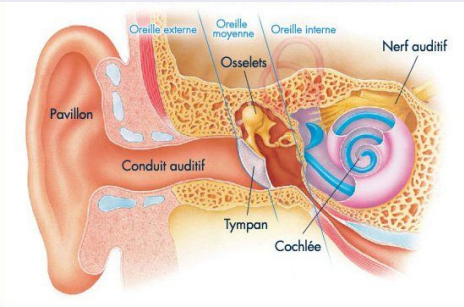
- Niveau sonore
- Contenu spectral
- Durée, dynamique
- "Qualité" (culturel)

Bruit ou Son



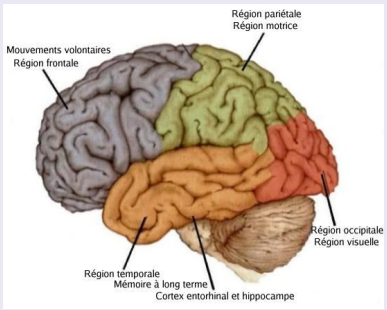
- Pression acoustique [Pa]
- Ecart par rapport à P_0
- Valeur moyenne nulle

Bruit ou Son



- Niveau SPL [dB] $\rightarrow$ sonie
- Masquage (physiologie) $\rightarrow$ timbre
- Direction (binauraal) $\rightarrow$ séparation

Bruit ou Son



- Flux auditifs
- Identification
- Agrément, gêne

Bruit ou Son

Lien mesure - perception

- Mesures normalisées
- Pondérations (A,B,C, ...)
- Réglementations (NRA)

Bruit ou Son

Lien mesure - perception

- Mesures normalisées
- Pondérations (A,B,C, ...)
- Réglementations (NRA)

Règles "générales" $\neq$ sensations "individuelles"

Réduction de la gêne acoustique

Stratégie de réduction

- Conception silencieuse (coût, difficulté)
- Eloignement (décroissance en $1/R$)
- Traitement acoustique (capot, paroi, écran, ...)

Réduction de la gêne acoustique

Stratégie de réduction

- Conception silencieuse (coût, difficulté)
- Eloignement (décroissance en $1/R$)
- Traitement acoustique (capot, paroi, écran, ...)

Absorption/transmission

- Volume partagé (Ac. des salles) : absorption
- Entre deux volumes (Ac. du bâtiment) : transmission
- Encoffrement/capotage : absorption+transmission

Matériaux absorbants

Principe

- Propagation avec contact "proche" air/solide
- Frottement (viscosité) + c/c thermique (conduction)
- Pénétration facile de l'onde acoustique

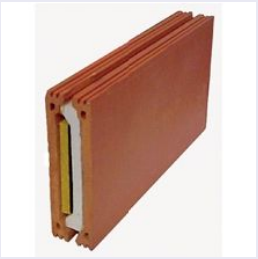
Matériaux absorbants

Principe

- Propagation avec contact "proche" air/solide
- Frottement (viscosité) + c/c thermique (conduction)
- Pénétration facile de l'onde acoustique

Contraste de propriétés : compromis réflexion / absorption

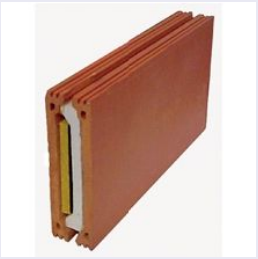
Parois isolantes



Principe

- Obstacle inerte $\Rightarrow$ pas de propagation
- Rigide aux TBF, et lourde aux MF/HF
- Résonances propres : fréquences de coïncidence

Parois isolantes



Principe

- Obstacle inerte $\Rightarrow$ pas de propagation
- Rigide aux TBF, et lourde aux MF/HF
- Résonances propres : fréquences de coïncidence

Spectre large : "loi de masse" ou multiples couches

Optimisation du traitement

Volume du problème

- Traitement "à la source"
- Paroi / écran intermédiaire
- Traitement d'une zone
- Protection individuelle

Optimisation du traitement

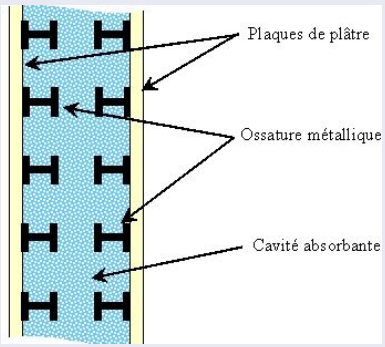
Volume du problème

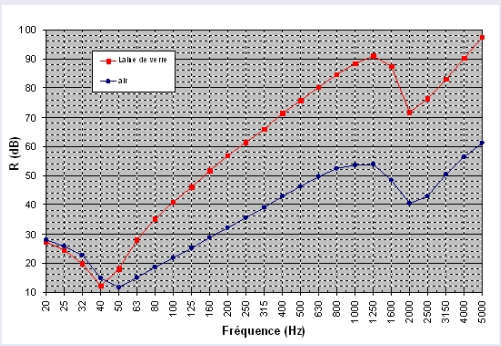
- Traitement "à la source"
- Paroi / écran intermédiaire
- Traitement d'une zone
- Protection individuelle

Actions multiples

- Découplage de machines
- Ajout d'absorption
- Capotage / cloisons

Limitations

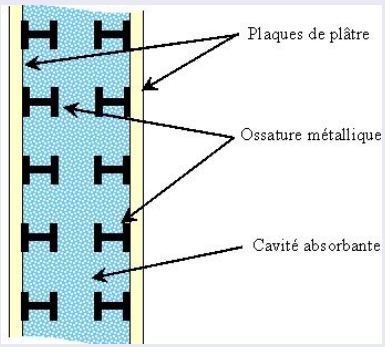


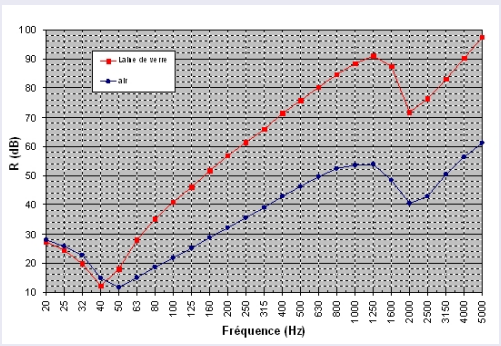


Compromis technique et économique

- Epaisseur des absorbants
- Epaisseur et poids des parois
- Coût de conception / réalisation

Limitations





Compromis technique et économique

- Epaisseur des absorbants
- Epaisseur et poids des parois
- Coût de conception / réalisation

Performances insuffisantes aux basses fréquences

Contrôle actif

Principe

- Système électro-acoustique dédié
- Modification temps-réel du champ acoustique
- Approximation discrète du problème
- Absorption/isolation "artificielle(s)"

Contrôle actif

Principe

- Système électro-acoustique dédié
- Modification temps-réel du champ acoustique
- Approximation discrète du problème
- Absorption/isolation "artificielle(s)"

Approche a priori complémentaire

- ANC seul : domaine très limité
- Ajout ANC à une solution passive
- Conception hybride active/passive

Contrôle actif

Principe

- Système électro-acoustique dédié
- Modification temps-réel du champ acoustique
- Approximation discrète du problème
- Absorption/isolation "artificielle(s)"

Approche a priori complémentaire

- ANC seul : domaine très limité
- Ajout ANC à une solution passive
- Conception hybride active/passive

Etendre les performances aux basses fréquences

LMA

Problème à 1 ddl

1 Introduction

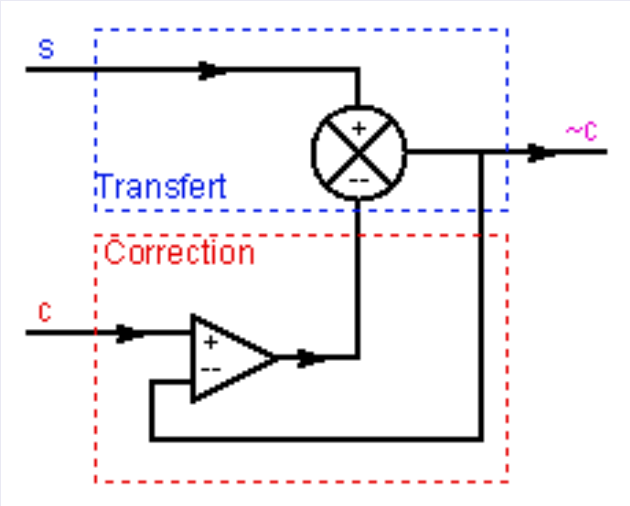
2 Contrôle acoustique

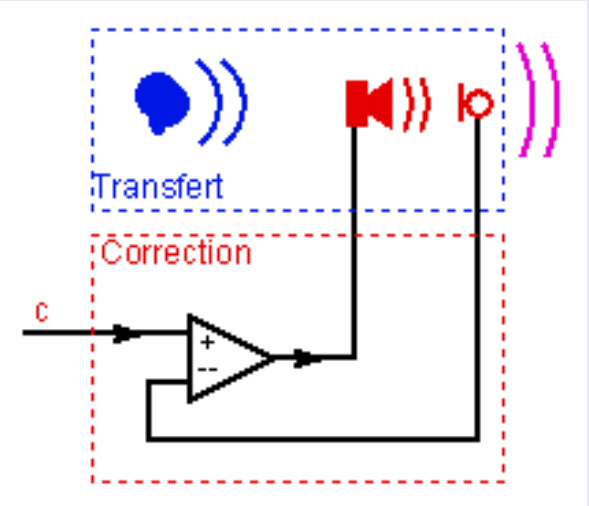
3 Contrôle localisé

4 Champ propagatif

5 Cas industriels

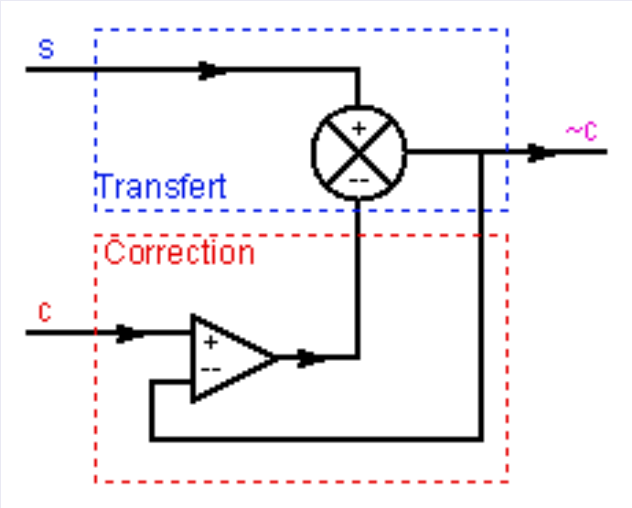
Correction d'erreur "feedback"

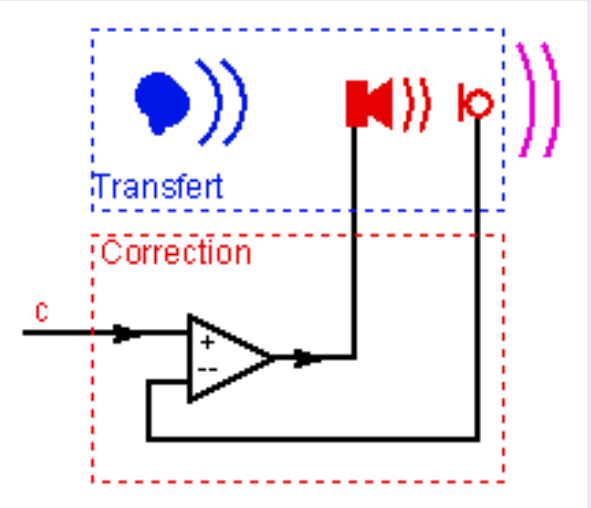




- Signal d'erreur : écart pression/consigne
- Compensation via actuateur électroacoustique
- Mesure via capteur électroacoustique

Correction d'erreur "feedback"





- Signal d'erreur : écart pression/consigne
- Compensation via actuateur électroacoustique
- Mesure via capteur électroacoustique

Performances des transducteurs électroacoustiques

Capteurs électroacoustique

Capteurs électroacoustique

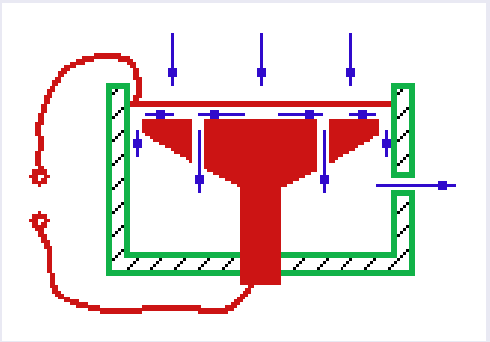
- Accéléromètre, microphone, patch, etc
- Mesure locale (voire ponctuelle)
- Signal très faible (OdG acoustique)
- Electronique de conditionnement
- Réponse fréquentielle limitée (BF)

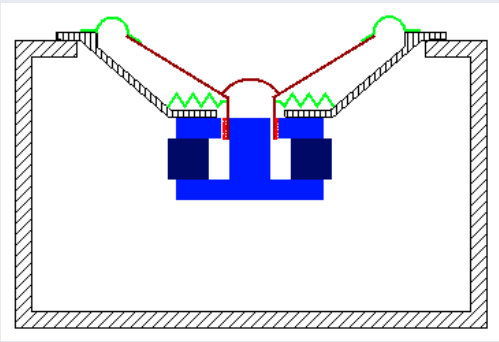
Actuateurs électroacoustiques

Actuateurs électroacoustiques

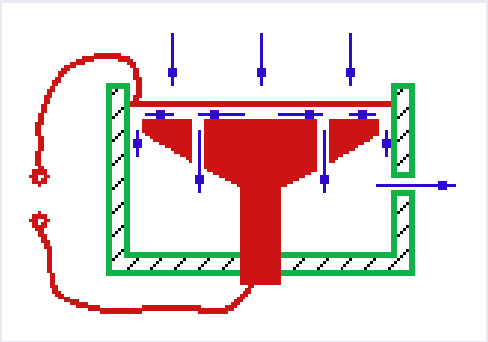
- Haut-parleur, Shaker, patch, etc
- Excitation localisée (champ proche)
- Dynamique limitée (non-linéarités)
- Puissance électrique élevée
- Réponse fréquentielle limitée et irrégulière

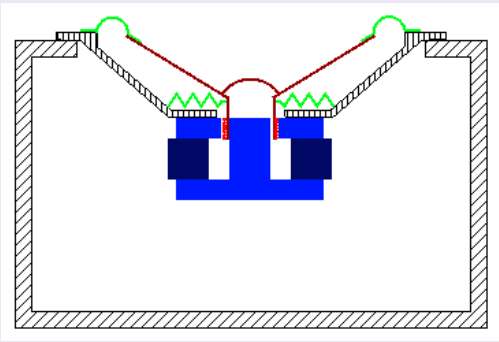
Technologies / acoustique

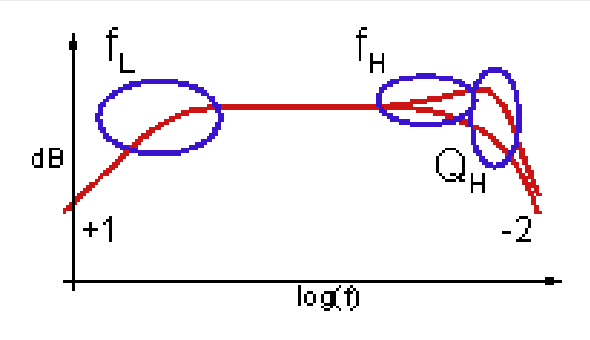


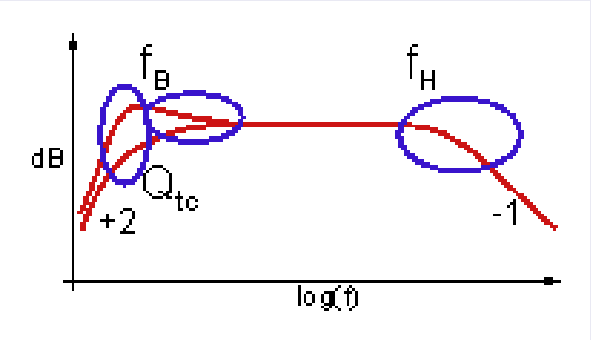


Technologies / acoustique

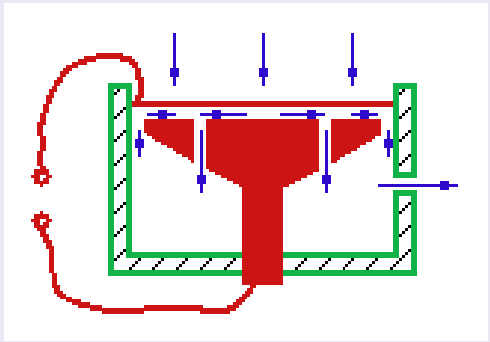


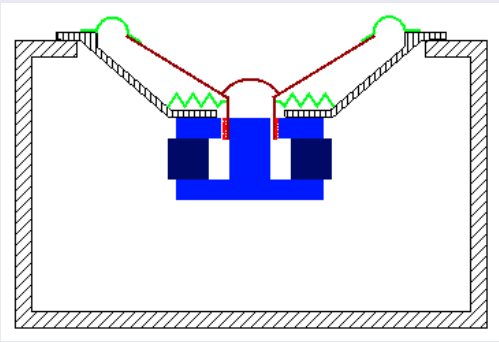


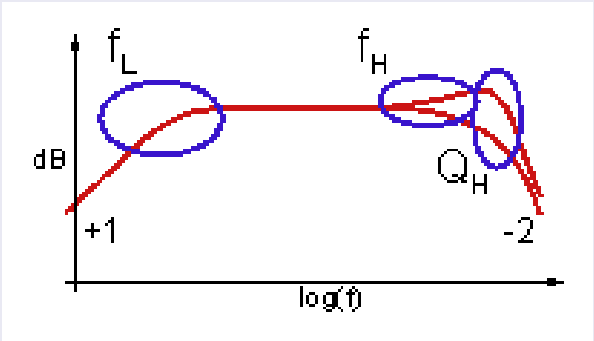


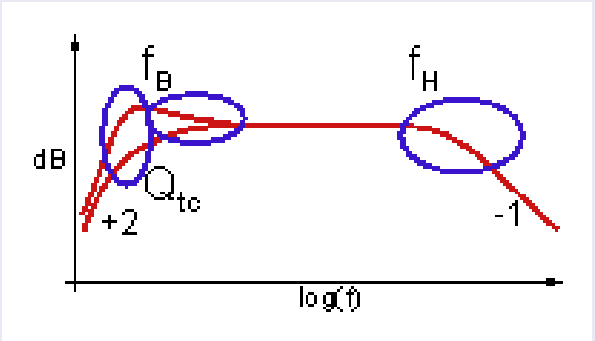


Technologies / acoustique





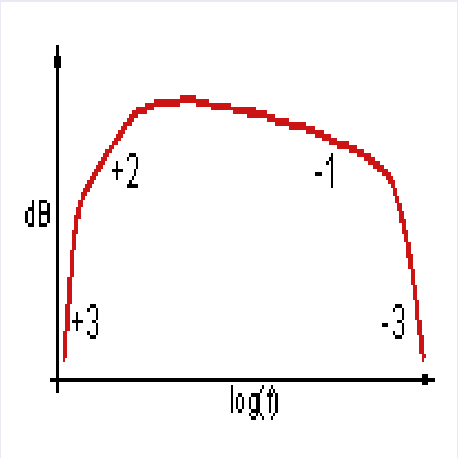




Pôles amortis d'ordre 1 ou 2 aux BF et HF

Réponse de la boucle

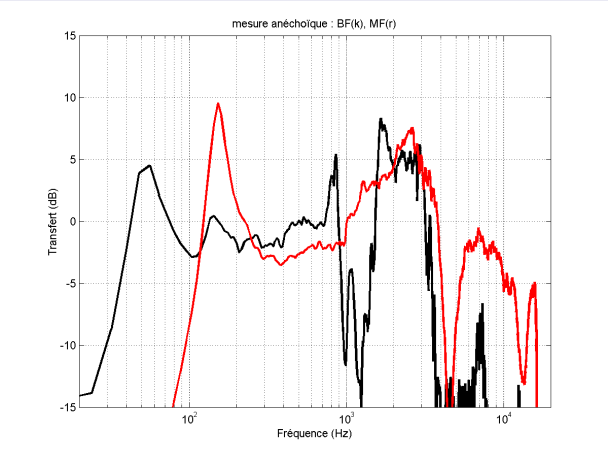
Réponse asymptotique



- Passe-bande du 6^{e} ordre
- Allure dominée par le haut-parleur
- Zone centrale du 3^{e} ordre

Réponse de la boucle

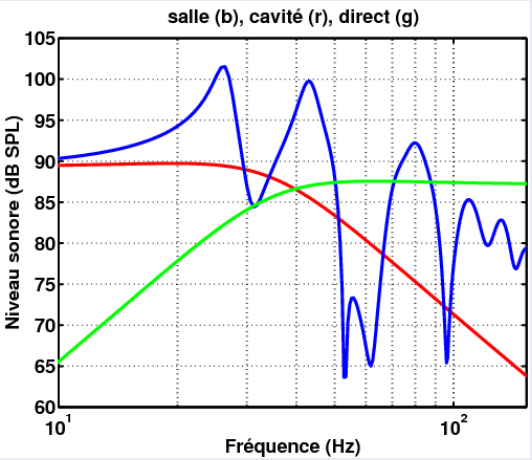
Réponse anéchoïque mesurée



- Réponse limitée (passe-bande)
- Amortissement mal contrôlé
- Multiples accidents (vibrations)

Réponse de la boucle

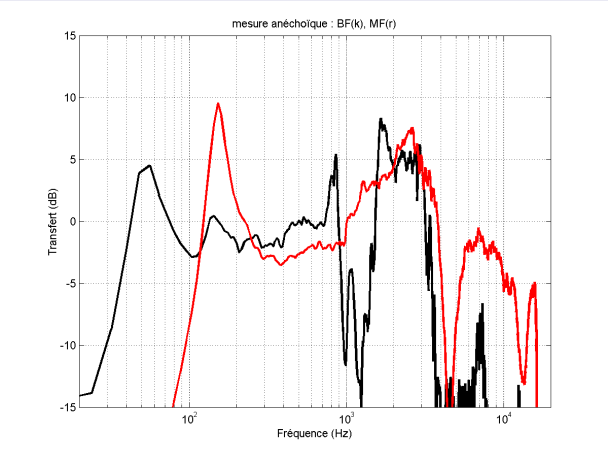
Réponse simulée en salle



- Transfert proportionnel à $p = Z_s q$
- Influence des modes de la salle
- Multiples interférences

Réponse de la boucle

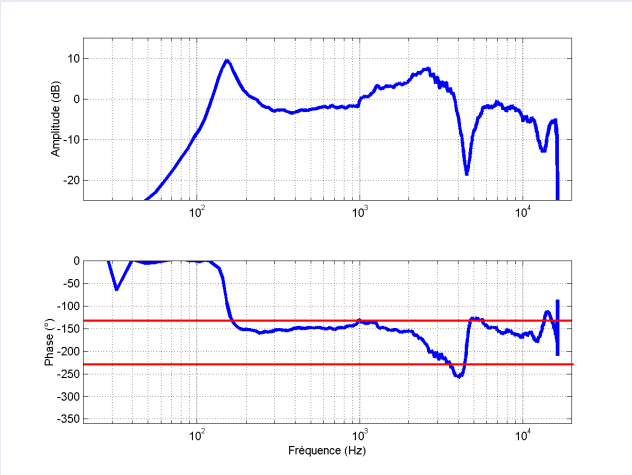
Réponse anéchoïque mesurée



- Réponse limitée (passe-bande)
- Amortissement mal contrôlé
- Multiples accidents (vibrations)

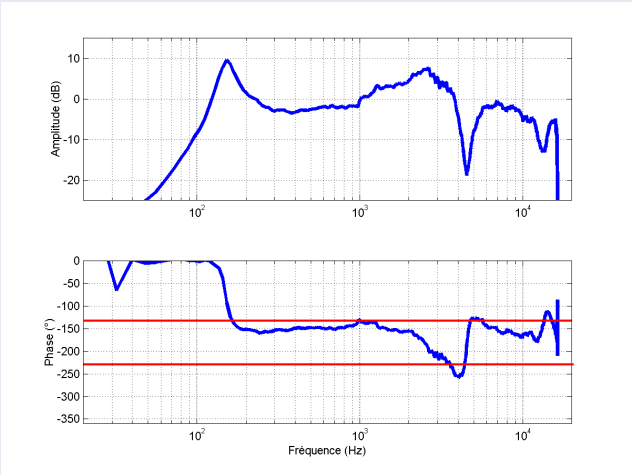
Réponse électroacoustique très irrégulière

Stabilité du contrôle feedback



- Gain rapidement variable
- Fluctuations (temp., NL)
- Marge de phase nécessaire
- Contrôle "juste" efficace

Stabilité du contrôle feedback



- Gain rapidement variable
- Fluctuations (temp., NL)
- Marge de phase nécessaire
- Contrôle "juste" efficace

Limité par le retard électroacoustique

- Choix transducteurs
- Filtre de compensation

Exemple

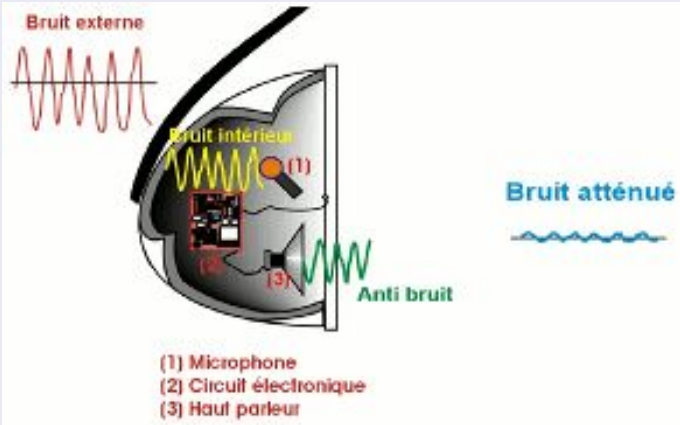
Casque anti-bruit "actif"

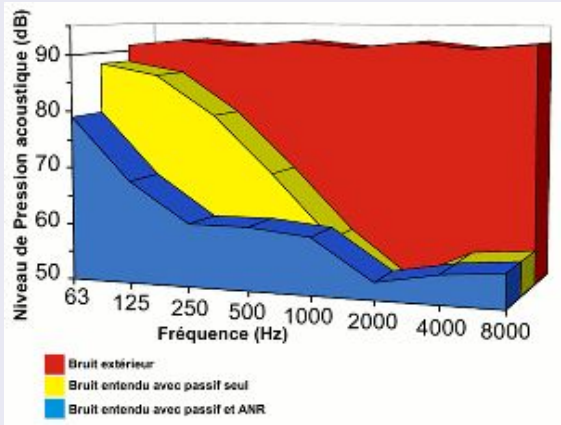
- Contrôle feedback analogique
- Brevet CNRS + spin-off du LMA
- Premier produit "ANC" sur le marché

Exemple

Casque anti-bruit "actif"

- Contrôle feedback analogique
- Brevet CNRS + spin-off du LMA
- Premier produit "ANC" sur le marché





Etat de l'art

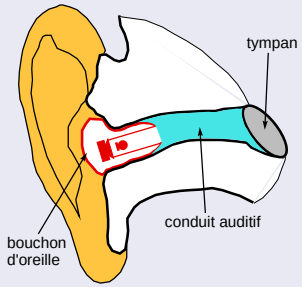
Etat de l'art

Marché en pleine croissance

- Pilotes d'avion, etc
- Travailleurs exposés
- Grand public (avion, train)

Evolutions

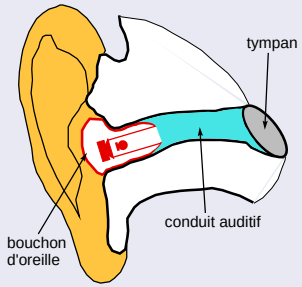
Bouchon d'oreille



- Extra- puis intra-canal
- Transducteurs miniature
- Niveaux sonores élevés
- Bande passante étendue

Evolutions

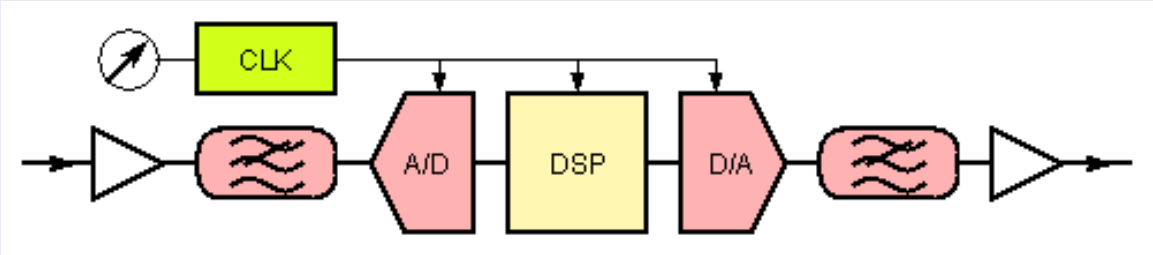
Bouchon d'oreille



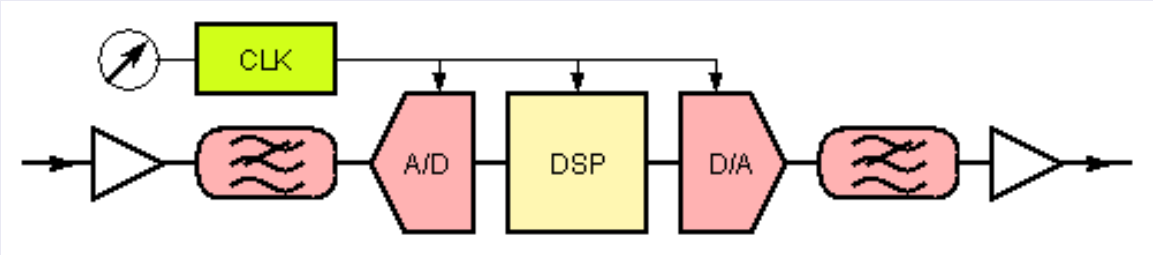
- Extra- puis intra-canal
- Transducteurs miniature
- Niveaux sonores élevés
- Bande passante étendue

- Moulages individuels
- Isolation+diffusion

Version "numérique"



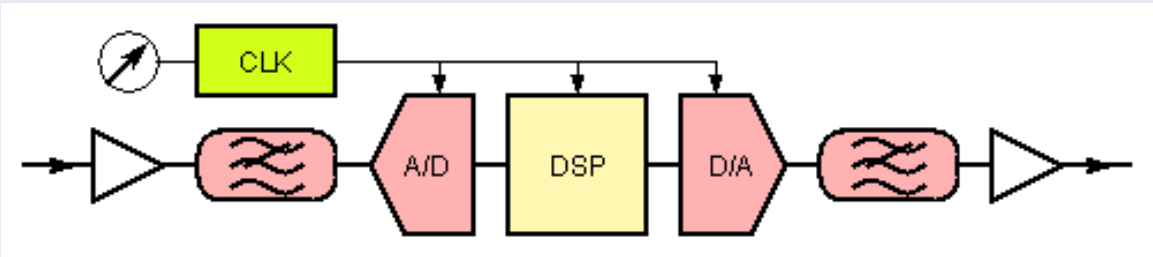
Version "numérique"



Retards supplémentaires

- Filtres anti-repliement + convertisseurs A/D/A
- Temps de calcul $\Rightarrow$ F_s élevée

Version "numérique"



Retards supplémentaires

- Filtres anti-repliement + convertisseurs A/D/A
- Temps de calcul $\Rightarrow$ F_s élevée

Optimisation

- Filtres individualisés (algorithmes spécifiques)
- Circuits rapides optimisés (ASIC dédié)

Guides à 1 ddl

1 Introduction

2 Contrôle acoustique

3 Contrôle localisé

4 Champ propagatif

5 Cas industriels

Problème de taille ...

Hypothèses implicites

- Microphone représentatif d'un volume
- Haut-parleur à couverture uniforme
- Variations simultanées dans l'espace

Problème de taille ...

Hypothèses implicites

- Microphone représentatif d'un volume
- Haut-parleur à couverture uniforme
- Variations simultanées dans l'espace

Uniformité de la pression

- Limitée à une échelle de temps et d'espace
- Configuration géométrique favorable
- Pas généralisable aux problèmes usuels

Problème de taille ...

Hypothèses implicites

- Microphone représentatif d'un volume
- Haut-parleur à couverture uniforme
- Variations simultanées dans l'espace

Uniformité de la pression

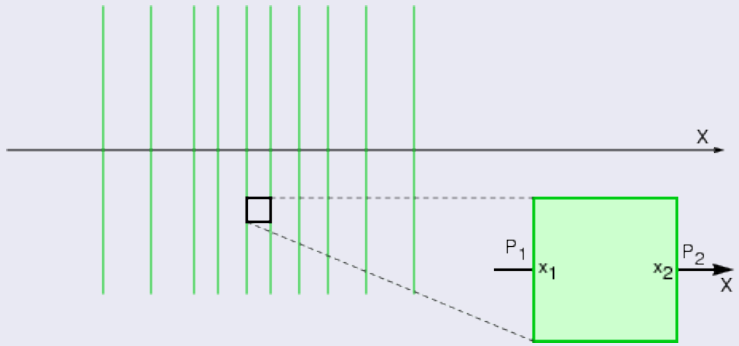
- Limitée à une échelle de temps et d'espace
- Configuration géométrique favorable
- Pas généralisable aux problèmes usuels

Tenir compte de la propagation acoustique

LMA

Onde de compression 1D

Volume infinitésimal



Dynamique dans un milieu élastique

- Forces "externes" : $P_1 \Delta S - P_2 \Delta S = M \ \partial_t x$
- Forces "internes" : $P_1 \Delta S + P_2 \Delta S = K \ (x_2 - x_1)$

Comportement limite (1D)

Propriétés "locales" du volume de matière

$$\begin{cases} \rho_0 = \lim_{(\Delta S, \Delta x \to 0)} & m/V & [\mathrm{kg.m^{-3}}] \\ \chi_s = \lim_{(\Delta S, \Delta x \to 0)} & \frac{-1}{V}(\partial_P V)_s & [\mathrm{m^2.N^{-1}}] \end{cases}$$

Comportement limite (1D)

Propriétés "locales" du volume de matière

$$\begin{cases} \rho_0 = \lim_{(\Delta S, \Delta x \to 0)} & m/V & [\mathrm{kg.m^{-3}}] \\ \chi_s = \lim_{(\Delta S, \Delta x \to 0)} & \frac{-1}{V}(\partial_P V)_s & [\mathrm{m^2.N^{-1}}] \end{cases}$$

Expression locale : système de deux EDL1 en (p, v)

$$\begin{cases} \chi_s \, \partial_t p + \partial_x v = 0 & [\mathrm{s^{-1}}] \\ \\ \rho_0 \, \partial_t v + \partial_x p = 0 & [\mathrm{kg.m^{-2}.s^{-2}}] \end{cases}$$

Formulation "équation d'onde" (1D)

EDL2 en p + EDL1 en (p, v)

$$\begin{cases} (c_0^{-2}\,\partial_{tt}^2 - \partial_{xx}^2)p = 0 & [\mathrm{kg.m^{-3}.s^{-2}}] \\ \chi_s\,\partial_t p + \partial_x v = 0 & [\mathrm{s^{-1}}] \end{cases}$$

Formulation "équation d'onde" (1D)

EDL2 en p + EDL1 en (p, v)

$$\begin{cases} (c_0^{-2}\,\partial_{tt}^2 - \partial_{xx}^2)p = 0 & [\mathrm{kg.m^{-3}.s^{-2}}] \\ \chi_s\,\partial_t p + \partial_x v = 0 & [\mathrm{s^{-1}}] \end{cases}$$

Propagation

EDL2 = Décalage simultanément en espace et en temps

Célérité : $c_0 = 1/\sqrt{\rho_0 \chi_s}$ $[\mathrm{m/s}]$

EDL1 = Phénomènes physiques associés à ce "signal"

Compressibilité : G.P. ($\chi_s \approx 1/\gamma P_0$)

Grandeurs énergétiques

Intensité acoustique

- $\overrightarrow{\mathbf{I}} = p\overrightarrow{\mathbf{v}} \quad [\mathrm{W/m^2}]$
- Densité surfacique de puissance / onde acoustique

Grandeurs énergétiques

Intensité acoustique

- $\overrightarrow{\mathbf{I}} = p\,\overrightarrow{\mathbf{v}} \quad [\mathrm{W/m^2}]$
- Densité surfacique de puissance / onde acoustique

Deux formes d'énergie

$$\left\{ \begin{array}{rcl} e_c & = & \frac{1}{2}\,\rho_0\,|\overrightarrow{\mathbf{v}}|^2 \\ e_p & = & \frac{1}{2}\,\chi_s\,p^2 \end{array} \right. \qquad [\mathrm{J.m^{-3}}]$$

Grandeurs énergétiques

Intensité acoustique

- $\overrightarrow{\mathbf{I}} = p\,\overrightarrow{\mathbf{v}} \quad [\mathrm{W/m^2}]$
- Densité surfacique de puissance / onde acoustique

Deux formes d'énergie

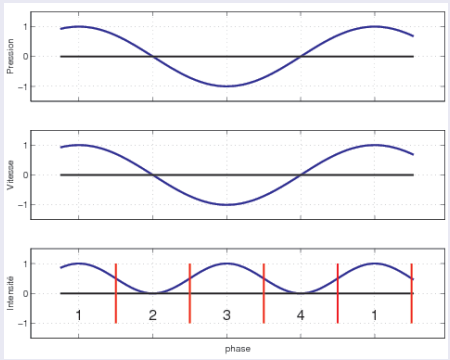
$$\begin{cases} e_c = \frac{1}{2}\,\rho_0\,|\overrightarrow{\mathbf{v}}|^2 \\ e_p = \frac{1}{2}\,\chi_s\,p^2 \end{cases} \qquad [\mathrm{J.m^{-3}}]$$

Impédance caractéristique

- $e_c = e_p \Rightarrow p/v = \rho_0 c_0 = Z_c \quad [\mathrm{kg.m^{-2}.s^{-1}}]$
- Equilibre entre les 2 formes : onde plane

Onde Plane sinusoïdale (1)

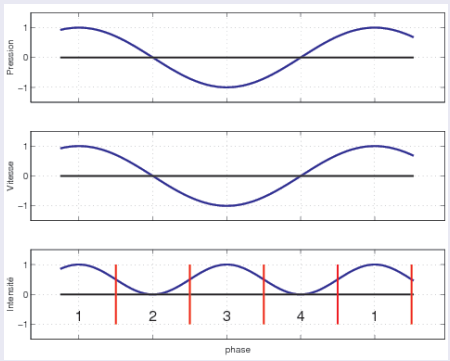
Onde propagative



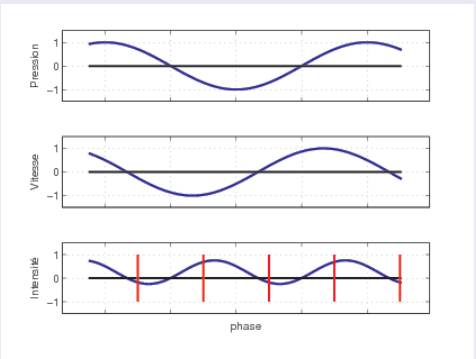
- compression $\Rightarrow$ $\Delta\, e_p$ car $I > 0$
- mouvement / aval $\Rightarrow$ $e_p \rightarrow e_c$
- détente $\Rightarrow$ $\Delta\, e_p$ car $I > 0$
- mouvement / amont $\Rightarrow$ $e_p \rightarrow e_c$

Onde Plane sinusoïdale (1)

Onde propagative



- compression $\Rightarrow$ $\Delta\, e_p$ car $I > 0$
- mouvement / aval $\Rightarrow$ $e_p \rightarrow e_c$
- détente $\Rightarrow$ $\Delta\, e_p$ car $I > 0$
- mouvement / amont $\Rightarrow$ $e_p \rightarrow e_c$



- Déphasage $\Rightarrow I < 0$ par instants
- Concentrations locales e_c ou e_p
- $P_a = \langle P(t) \rangle_T$: puissance "active"
- $\langle P_r(t) \rangle_T = 0$: puissance "réactive"

Onde Plane sinusoïdale (2)

Propagation acoustique

- Signaux à moyenne temporelle nulle
- Faibles écarts par rapport à "quasi-statique" (DL1)
- Transfert d'énergie sans déplacement moyen du milieu

Onde Plane sinusoïdale (2)

Propagation acoustique

- Signaux à moyenne temporelle nulle
- Faibles écarts par rapport à "quasi-statique" (DL1)
- Transfert d'énergie sans déplacement moyen du milieu

Echelles acoustique

- $(\Delta + k^2)p = 0$: équation de Helmholtz
- $k = \omega/c$: nombre d'onde
- $\lambda = c/f \Leftrightarrow kD = 2\pi D/\lambda$

LMA

Onde Plane sinusoïdale (2)

Propagation acoustique

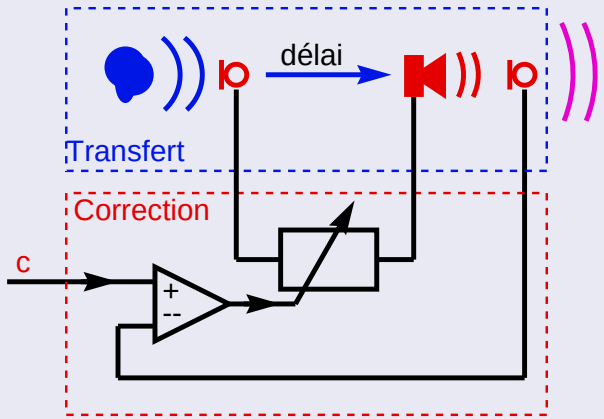
- Signaux à moyenne temporelle nulle
- Faibles écarts par rapport à "quasi-statique" (DL1)
- Transfert d'énergie sans déplacement moyen du milieu

Echelles acoustique

- $(\Delta + k^2)p = 0$: équation de Helmholtz
- $k = \omega/c$: nombre d'onde
- $\lambda = c/f \Leftrightarrow kD = 2\pi D/\lambda$
- Echelle géométrique : longueur d'onde λ

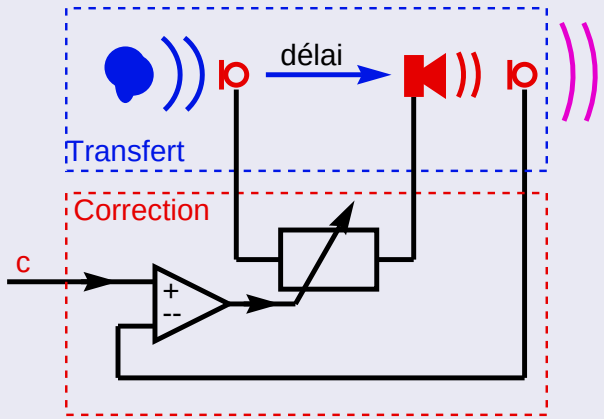
LMA

Contrôle d'un champ propagatif



- Délai de propagation
- Capteurs référence + Erreur
- Filtrage adaptatif (eg LMS)

Contrôle d'un champ propagatif

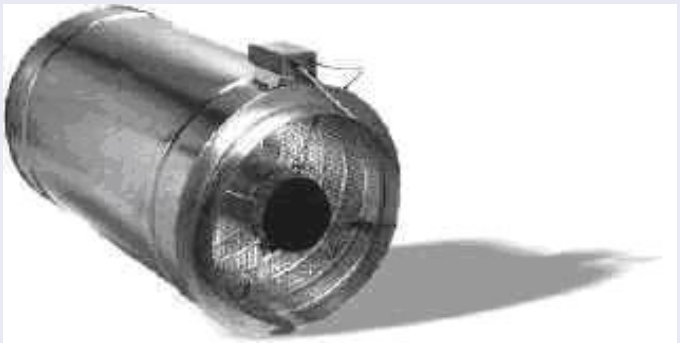


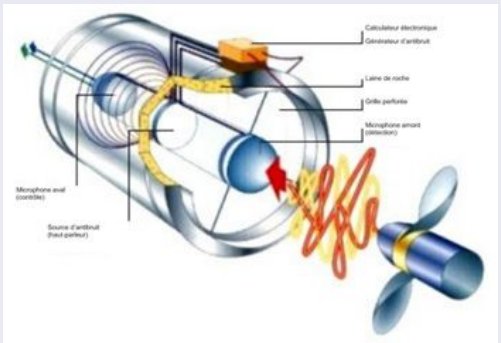
- Délai de propagation
- Capteurs référence + Erreur
- Filtrage adaptatif (eg LMS)

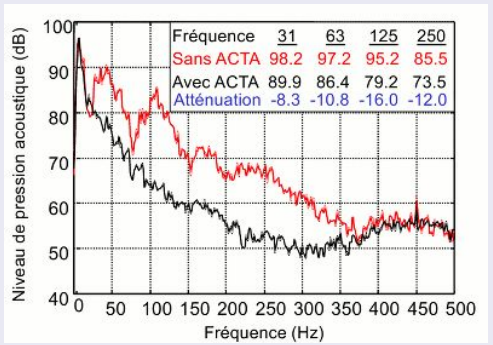
Paramétrage

- Causalité : délai contrôle < délai propagation
- τ_g analogique $\ll$ délai propagation
- Signal "périodique" : non causal
- Feedback : référence = erreur

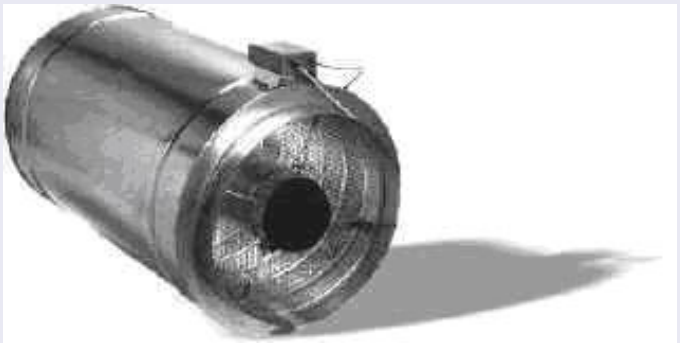
Exemple : gaine de ventilation

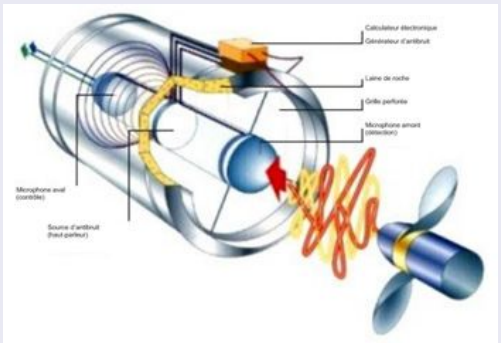


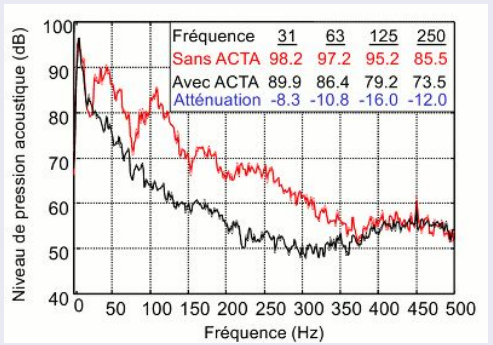




Exemple : gaine de ventilation



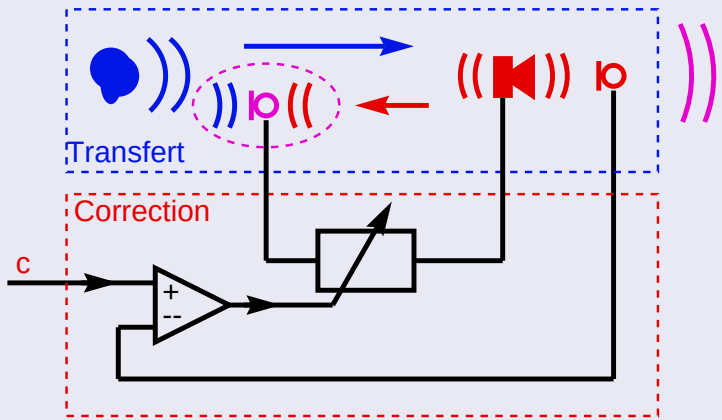




Hypothèses

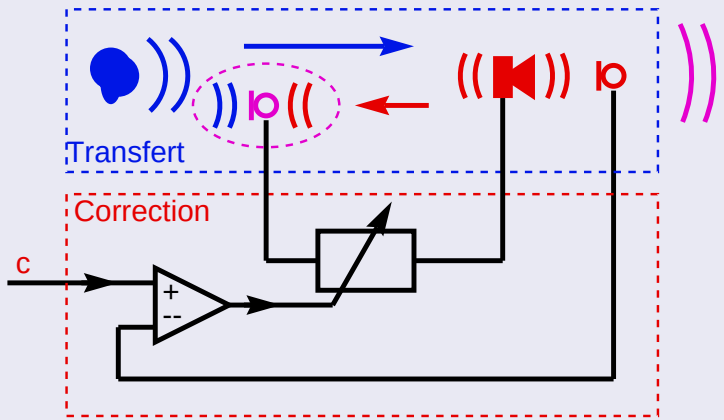
- Onde plane ("petite" section)
- Ecoulement "lent" (laminaire)
- Feedback (tonal) ou feedforward (aléatoire)

Rétro-propagation



- Référence perturbée
- Réflexion onde / amont
- Stabilité + effet de charge

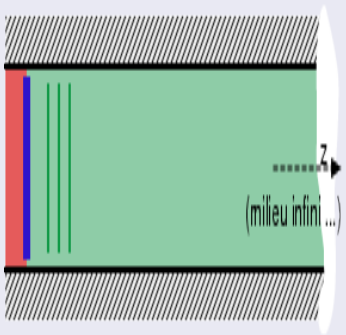
Rétro-propagation

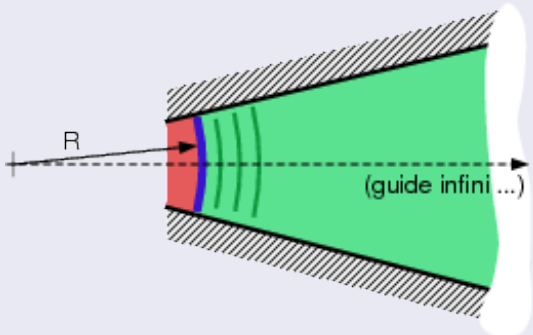


- Référence perturbée
- Réflexion onde / amont
- Stabilité + effet de charge

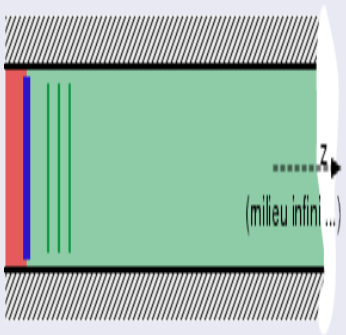
- Algorithme (correction référence)
- Capteur sélectif
- Source directionnelle

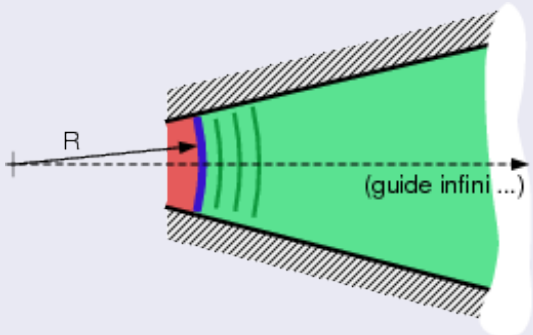
Courbure des fronts d'onde

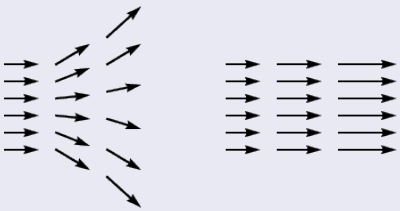




Courbure des fronts d'onde



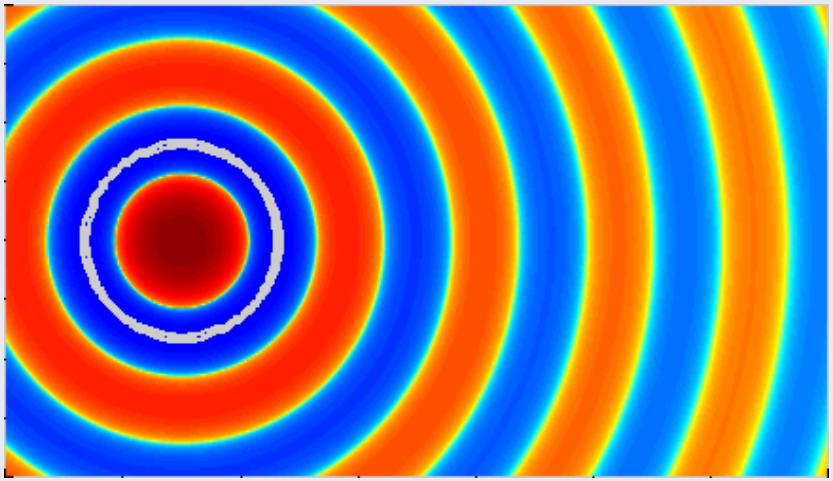




- $p = \frac{p_0}{R} e^{-jkR}$
- $v_R = \frac{[jk+\frac{1}{R}]}{j\omega\rho_0} \frac{p_0}{R} e^{-jkR}$
- $Z = \frac{Z_c}{S}[\frac{1}{1+\frac{1}{(kR)^2}} + \frac{jkR}{\|1+jkR\|^2}]$
- Champ réactif : $e_c \neq e_p$

Problème 3D aux BF

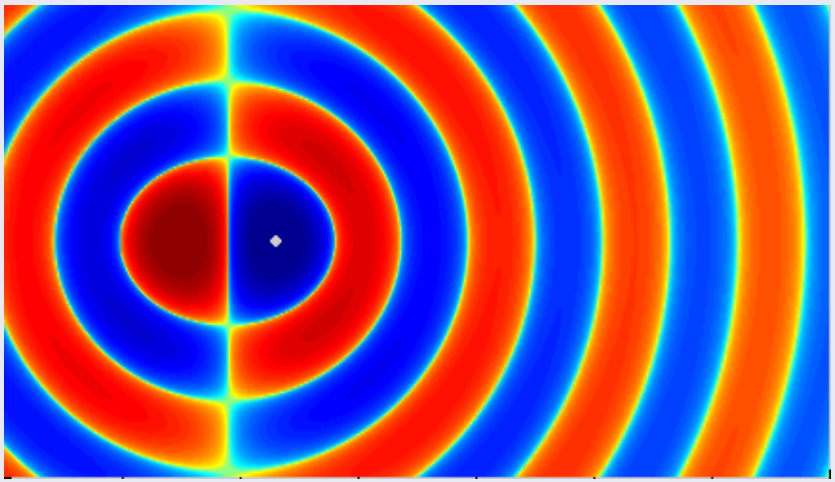
Source primaire



- Champ sphérique
- Décalage espace/temps
- Décroissance en $1/R$

Problème 3D aux BF

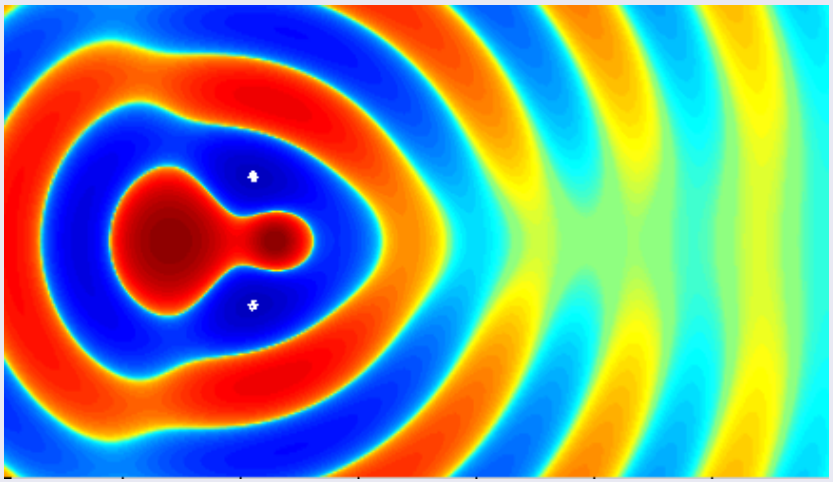
Simple opposition de phase



- Symétrie plane
- Annulation dans un plan
- Contrôle peu efficace

Problème 3D aux BF

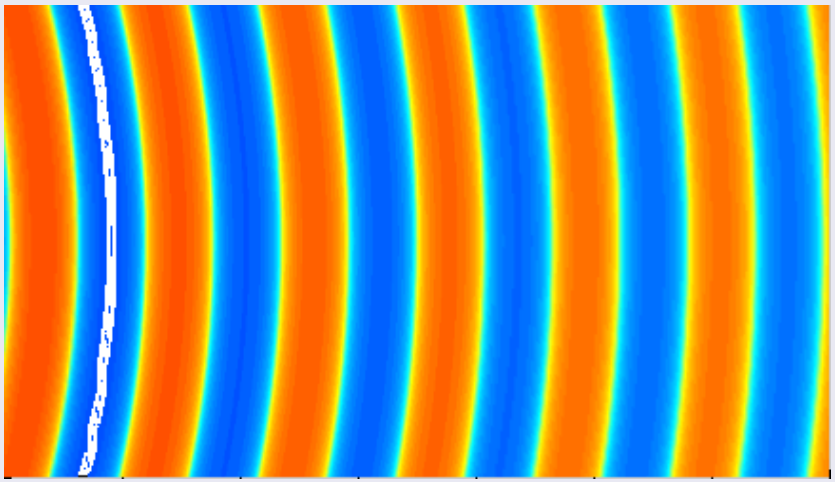
Adaptation du contrôle



- Optimisation en un point
- Réduction dans un cône
- Contrôle directionnel

Problème 3D aux BF

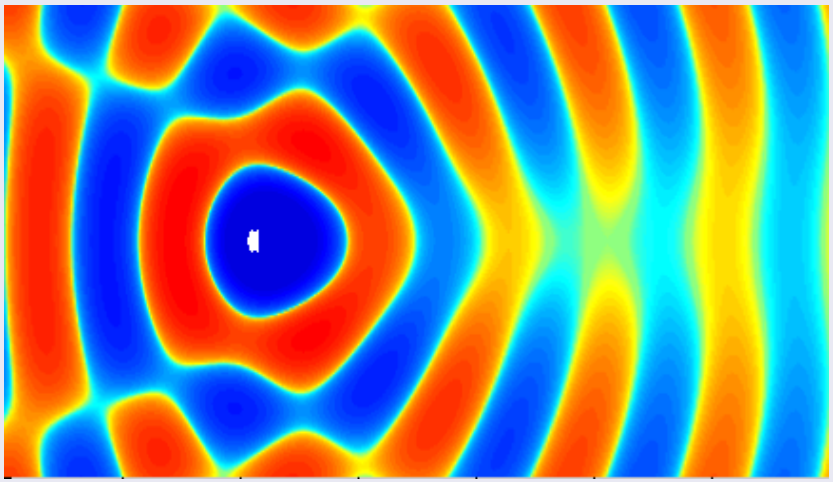
Source primaire éloignée



- Champ quasi-plan
- Décalage espace/temps
- Décroissance en $1/R$

Problème 3D aux BF

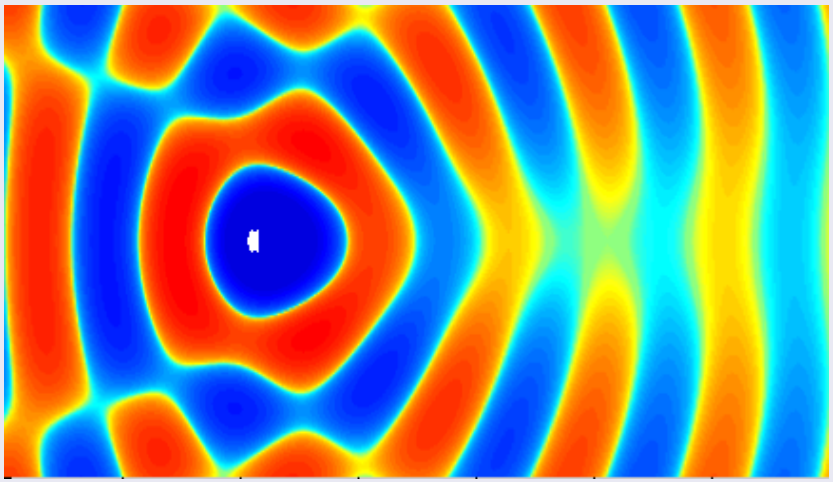
Contrôle "optimal"



- Courbures très différentes
- Décroissances différentes
- Contrôle très localisé

Problème 3D aux BF

Contrôle "optimal"

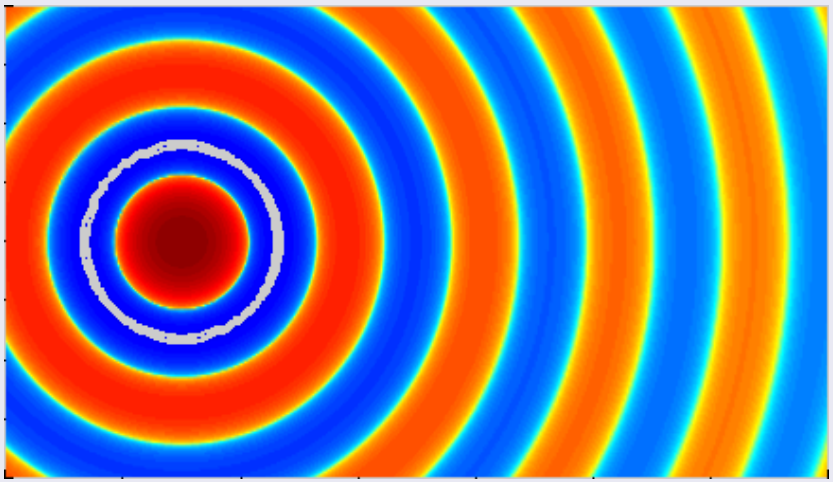


- Courbures très différentes
- Décroissances différentes
- Contrôle très localisé

Répartitions spatiales "primaire" et "secondaire" différentes

Repliement spatial

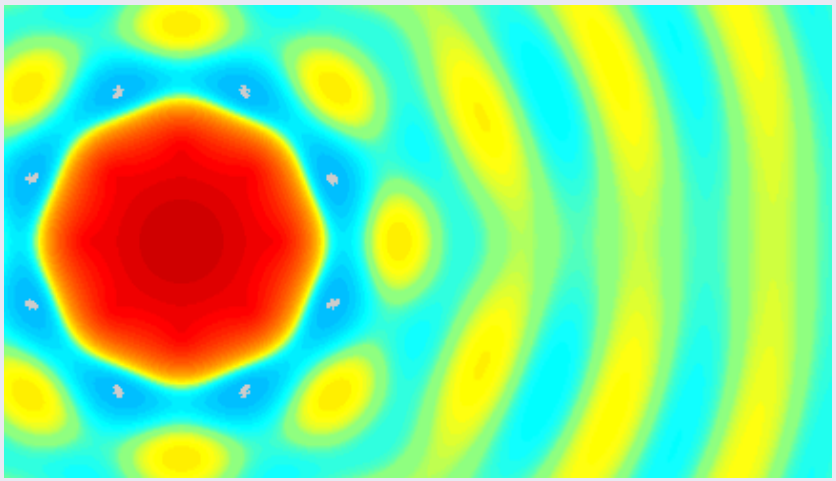
Source primaire BF



- Champ sphérique
- Décroissance en $1/R$
- Echelle spatiale $= \lambda$

Repliement spatial

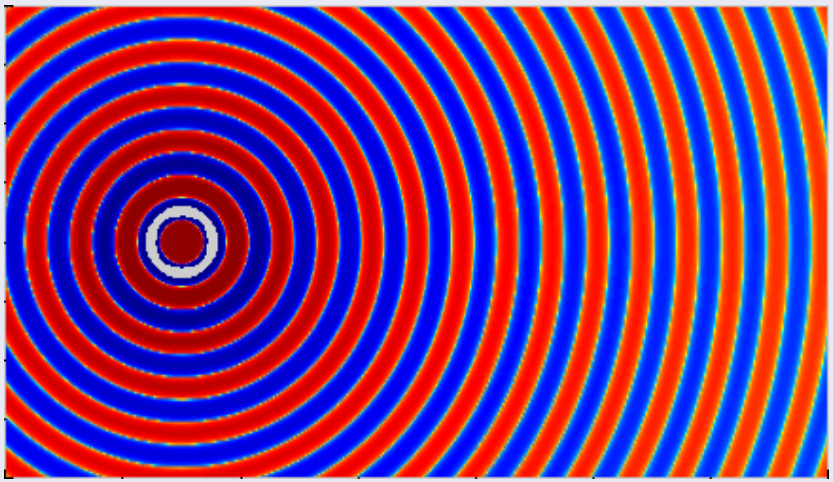
Cercle de 8 sources de contrôle



- Confinement
- Contrôle dans un plan
- Bonne approximation spatiale

Repliement spatial

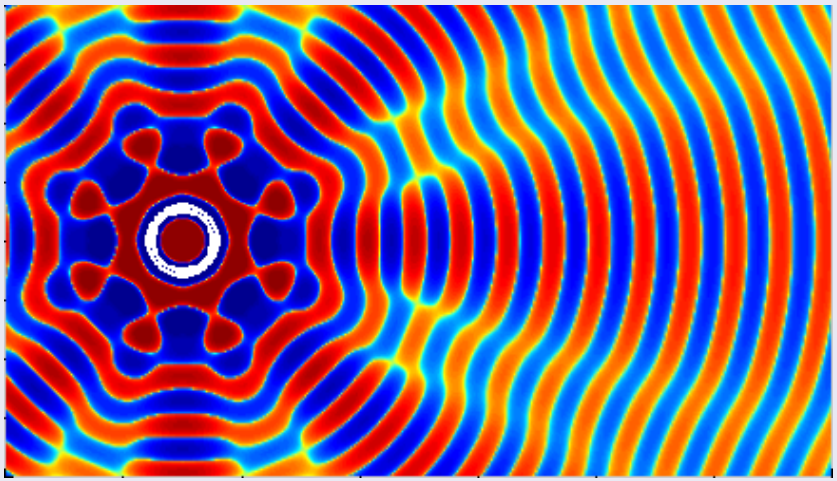
Source primaire MF



- Champ sphérique
- Décroissance en $1/R$
- Echelle spatiale plus petite

Repliement spatial

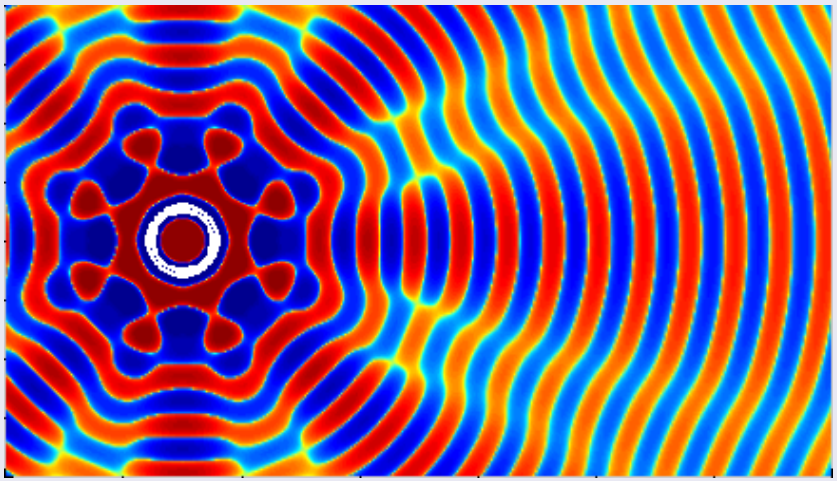
Contrôle avec les mêmes 8 sources



- Champ très interférentiel
- Quelques directions contrôlées
- Contrôle peu efficace

Repliement spatial

Contrôle avec les mêmes 8 sources



- Champ très interférentiel
- Quelques directions contrôlées
- Contrôle peu efficace

Densité de sources de contrôle directement liée à λ

Problèmes 3D à multiples DDL

1 Introduction

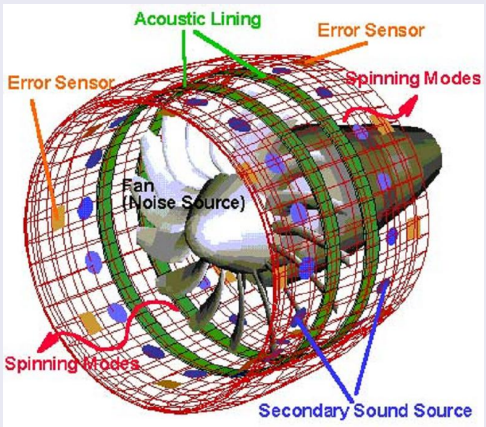
2 Contrôle acoustique

3 Contrôle localisé

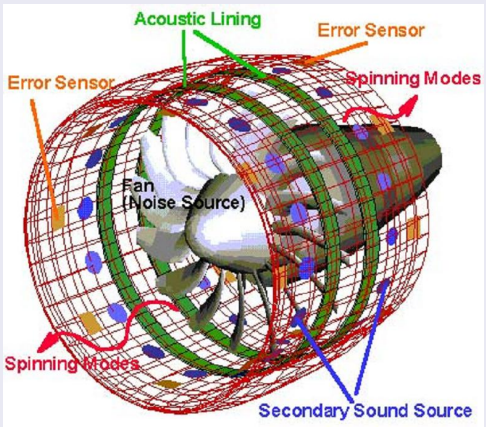
4 Champ propagatif

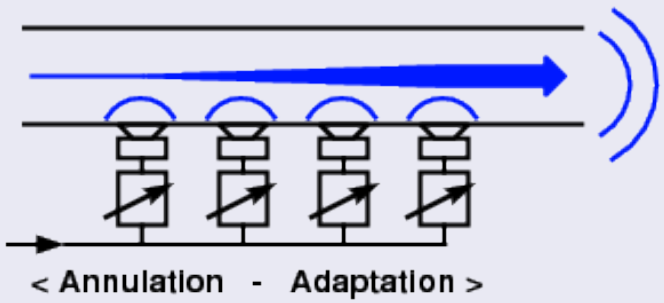
5 Cas industriels

Bruit de soufflante



Bruit de soufflante





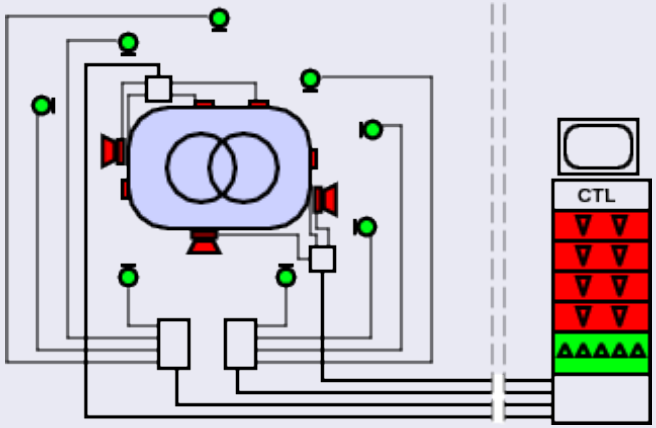
Cabine d'hélicoptère

Cabine d'hélicoptère

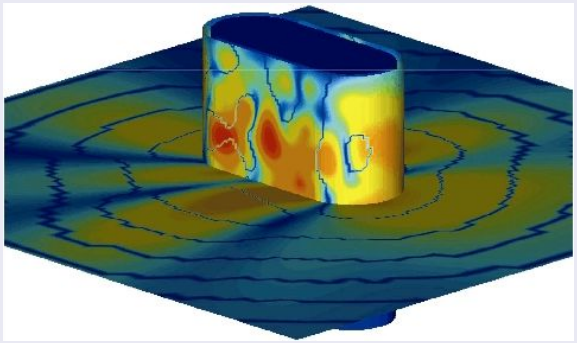
- Rotor (TBF), transmission (MF)
- Analyse perceptive : importance BF
- Contrôle multimodal

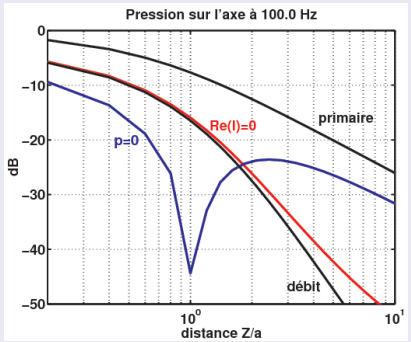
Transformateurs de transport

Transformateurs de transport



ATQ : système "commercial"



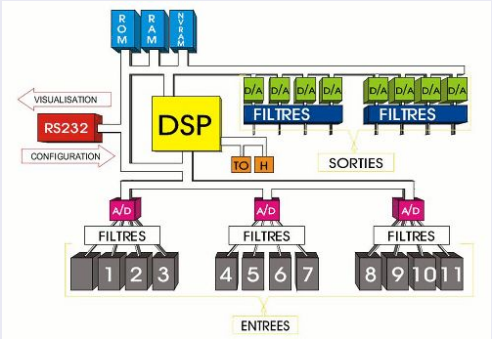


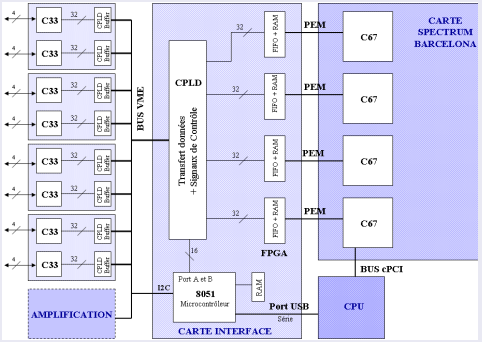
Abaisser les coûts

- Contrôle "à la source", en champ proche
- Méthodologie de conception
- Transducteurs spécifiques (RAD's)

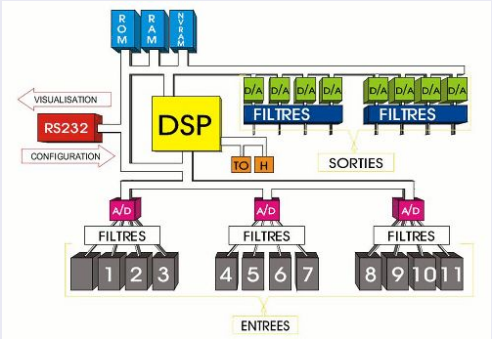
Objectif : système modulaire "scalable"

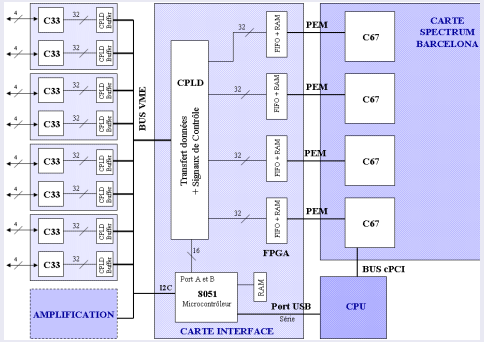
Evolution des contrôleurs





Evolution des contrôleurs

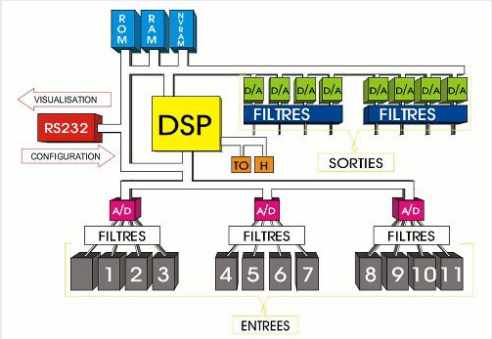


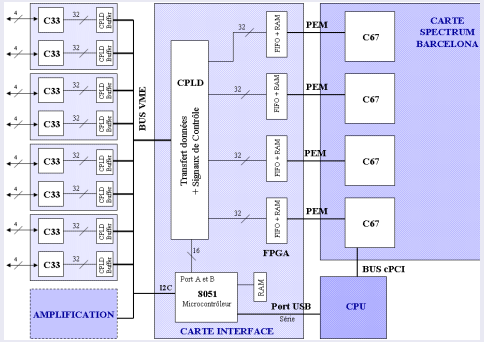


Contrôleur modulaire

- Câblage minimal (Alim/Bus)
- Architecture coopérative
- Eléments fabriqués en série

Evolution des contrôleurs



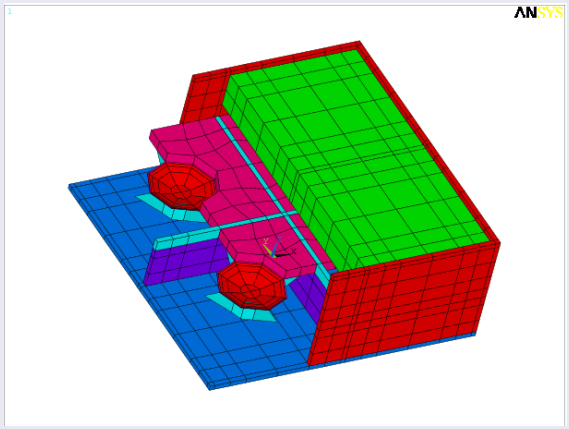


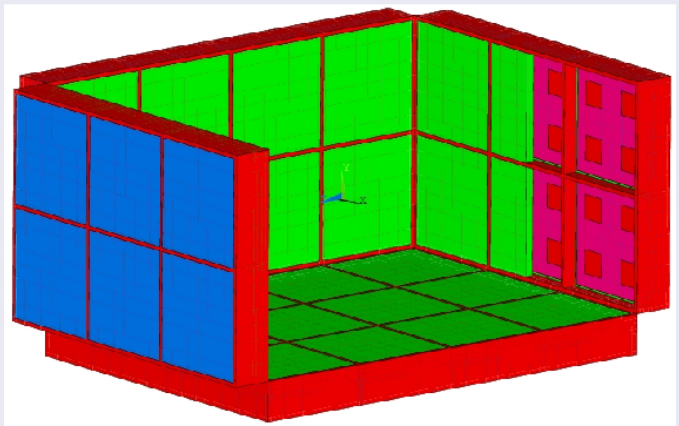
Contrôleur modulaire

- Câblage minimal (Alim/Bus)
- Architecture coopérative
- Eléments fabriqués en série
- Conception très complexe

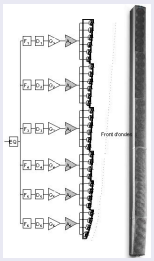
Contrôle décentralisé

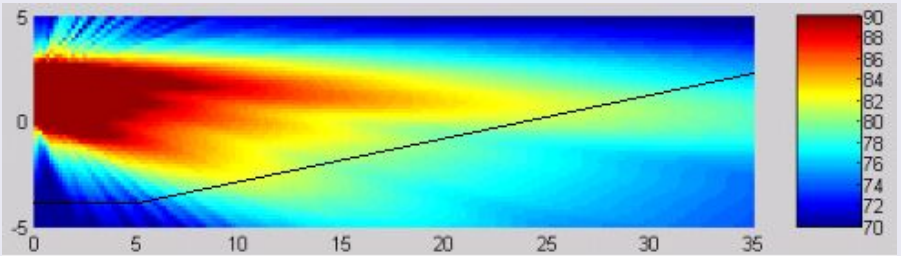
Contrôle décentralisé

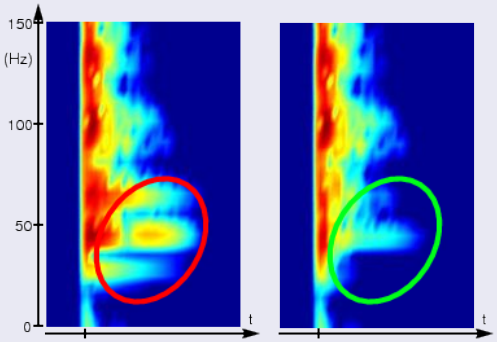




Reproduction sonore







Questions ?