

l'audiophile et la distorsion de phase

Pourquoi et comment améliorer la
réponse impulsionnelle d'un
système

Jean-Michel Le Cléac'h

Mélaudia Mars 2005

La stéréophonie

- *Procédé d'enregistrement et de reproduction du son qui utilise deux canaux en vue de diffuser un son possédant un certain relief.*
- *La stéréophonie permet une localisation spatiale des sons qui ajoute une dimension de profondeur et donne un effet naturel au son.*

<http://www.carrousel.qc.ca/biblio/fiche.asp?code=347>

Quels sont les objectifs de la stéréophonie?

- reproduire l'évènement musical ou sonore
- recréer l'ambiance sonore de la session d'enregistrement
- restituer sans déformation la perspective sonore (*) (direction, distance des instruments ...)
- respecter la dimension et la forme des instruments telle que vue par l'ingénieur du son

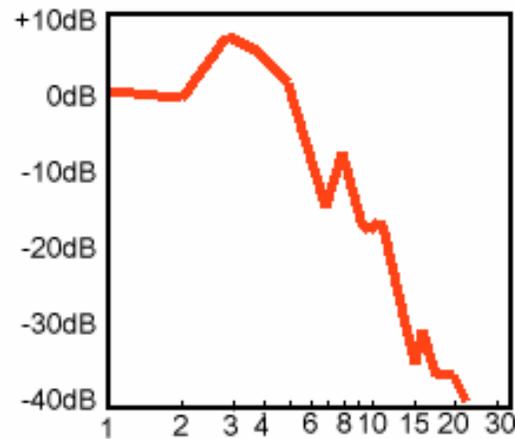
(*) ou relief sonore

Les instruments de musique sont des sources sonores complexes

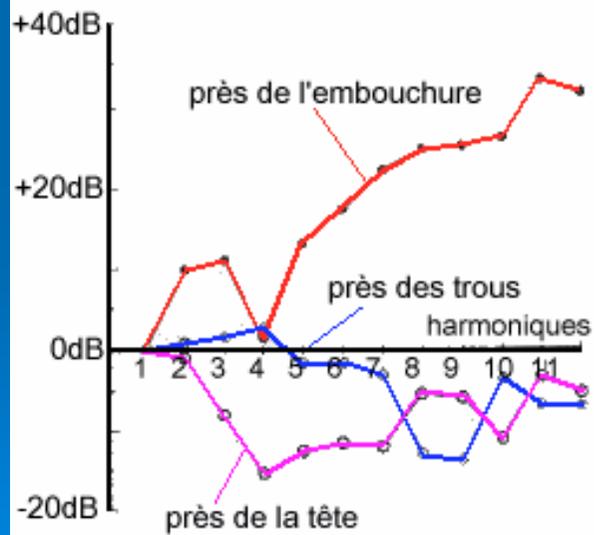
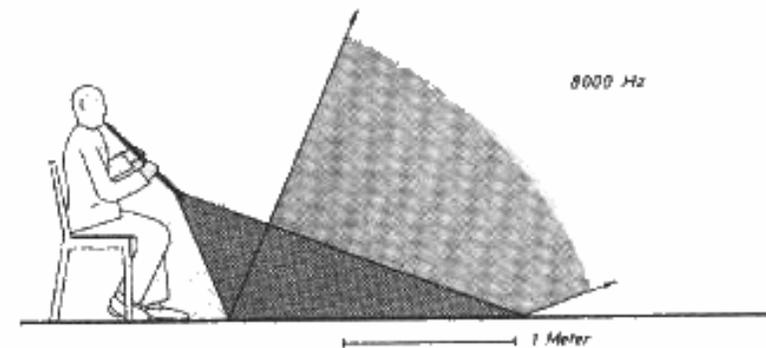
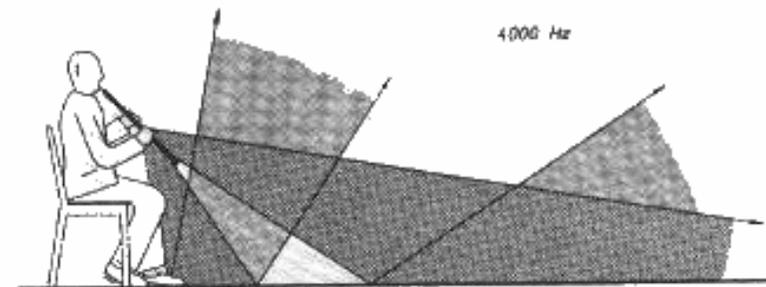
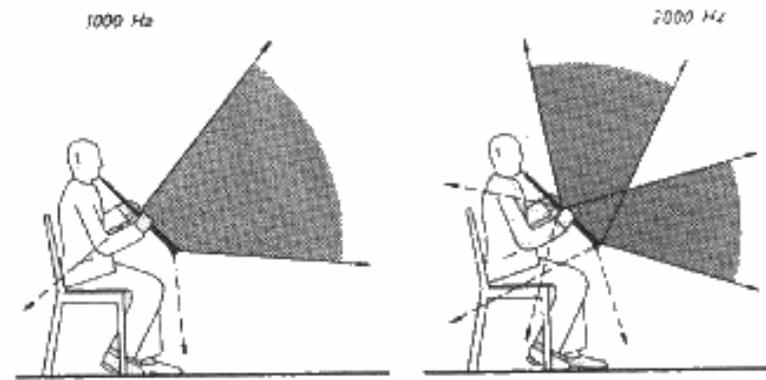
- Ce ne sont pas des sources ponctuelles
- L'émission sonore se fait depuis différentes zones de l'instrument avec des contenus fréquentiels et des directivités différentes



rayonnement des instruments: le hautbois



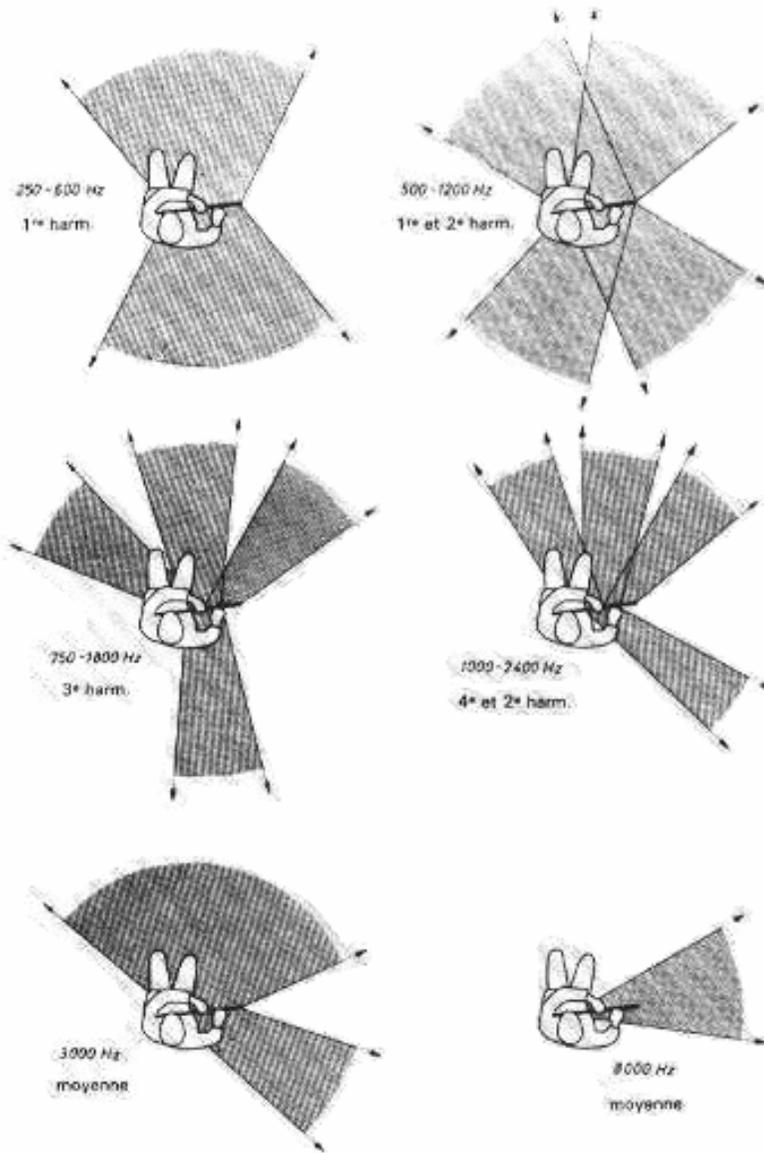
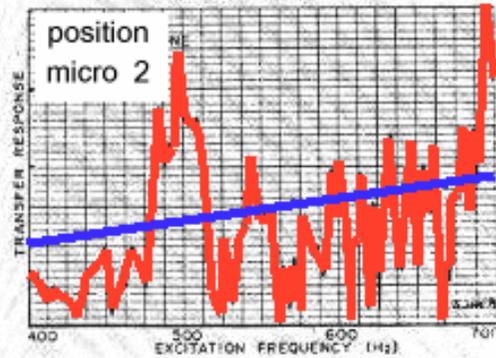
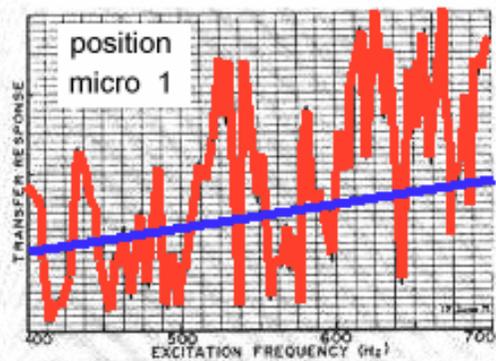
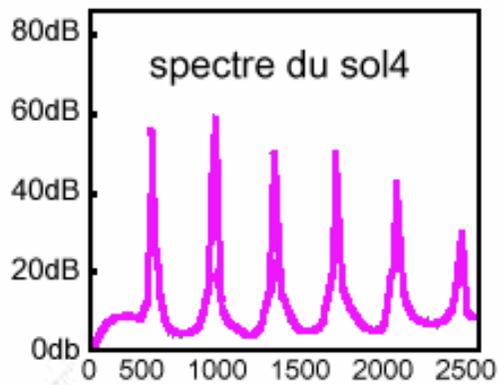
spectre moyen du hautbois



variation du spectre suivant la position

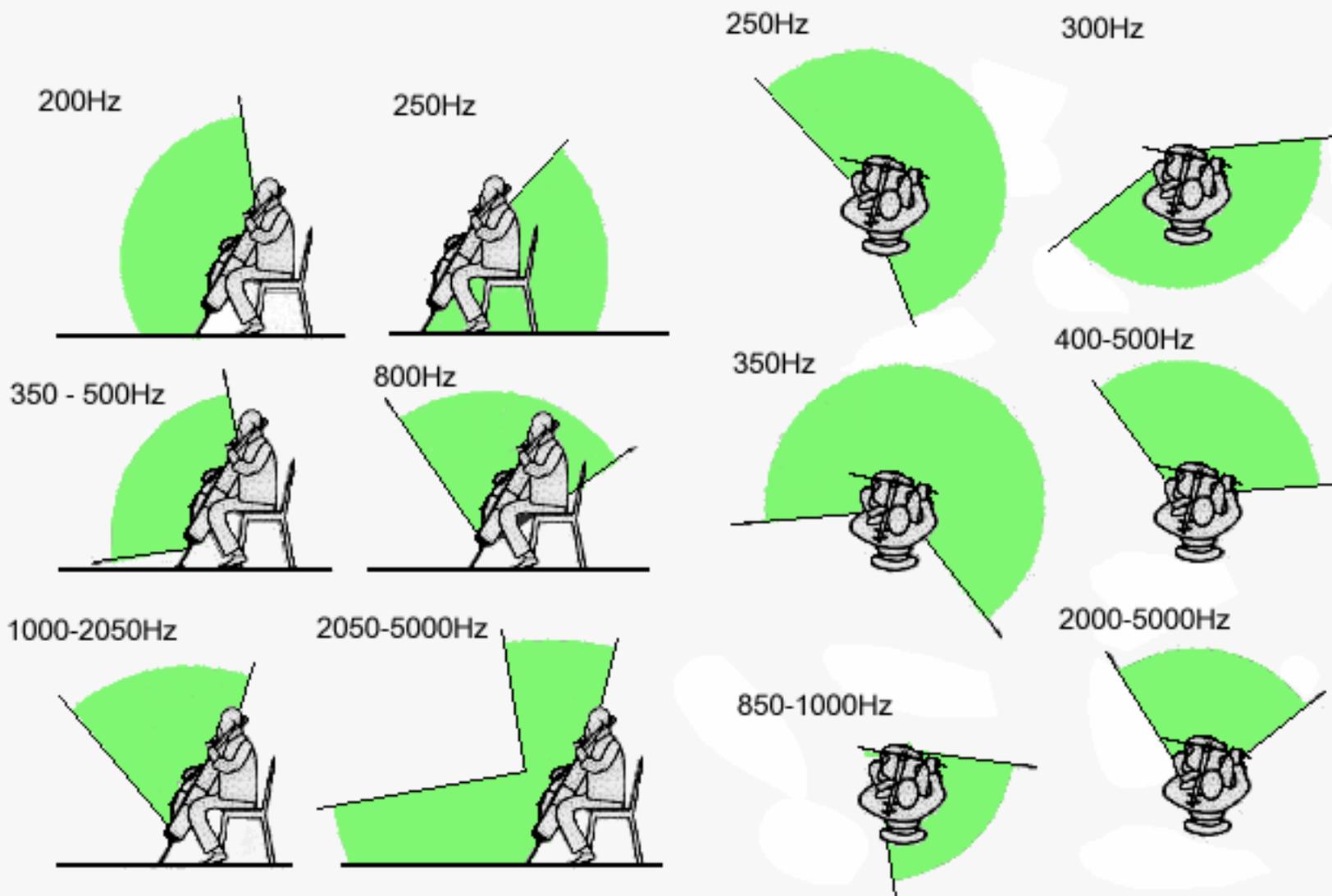
Le spectre "accidentel" du hautbois (en gros plan) ne ressemble en rien au spectre initial moyen dû à la salle (d'après Benade et Meyer).

rayonnement des instruments: la flûte



Une note jouée par la flûte (SOL 4) donne au microphone des signaux très différents selon le point de capture (d'après Benade et Meyer).

rayonnement des instruments: le violoncelle



Le rayonnement (invisible) des instruments - ici le violoncelle - disperse inégalement les notes selon les hauteurs. Sous quel axe faut-il donc placer le micro pour recueillir un timbre plausible, une image de la bonne couleur ? [d'après Meyer].

perception stéréophonique

il faut distinguer la **scène sonore** de l'**image sonore**:

(en anglais : "soundstage" et "image")

La **scène sonore** peut se définir comme la zone de laquelle semblent nous parvenir les ondes sonores lors d'une écoute.

On la caractérise surtout par son étendue en largeur et en profondeur .

La majorité des audiophiles prennent pour une qualité positive une scène sonore qui s'étale plus largement que l'espace entre les 2 enceintes

réverbération et scène sonore

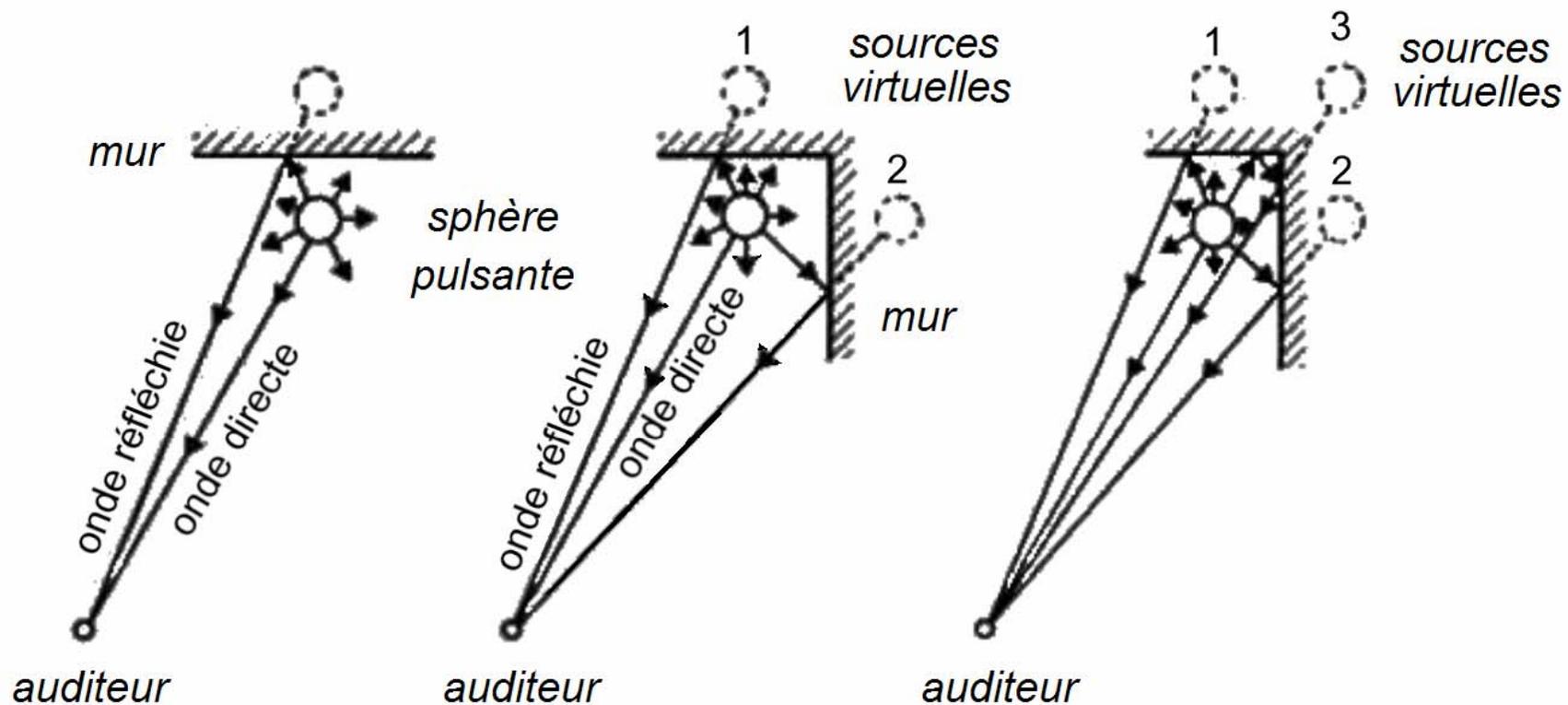
Des études montrent qu'une majorité d'auditeurs préfèrent une grande valeur du rapport:

énergie sonore réverbérée

énergie sonore de l'onde directe

L'utilisation de haut-parleurs à faible directivité dans une salle d'écoute plutôt réverbérante conduit à une réverbération forte ainsi qu'à un élargissement et un approfondissement de la scène sonore.

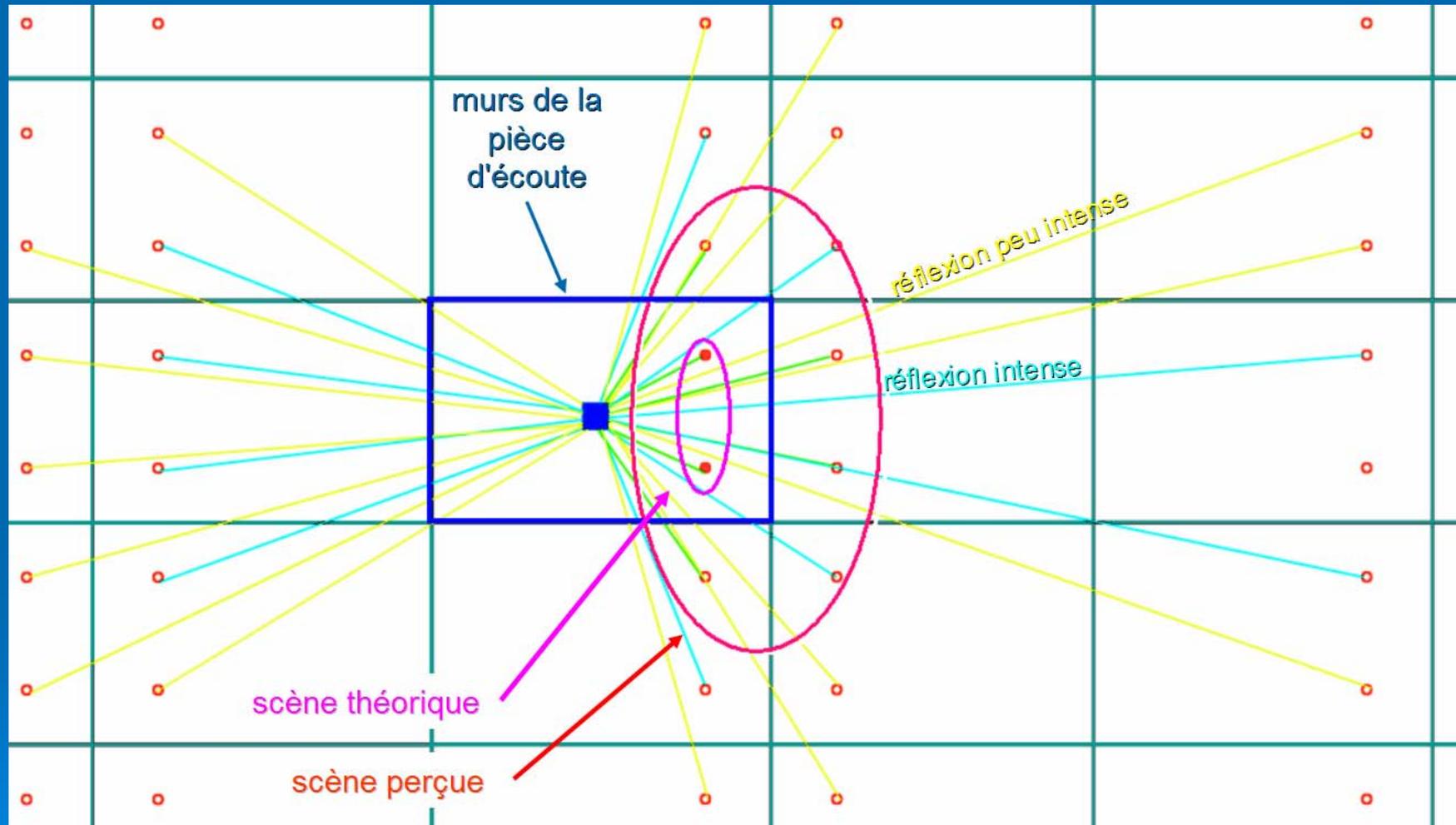
formation de sources virtuelles par réflexion sur les murs



La création de source virtuelle pour une source assimilée à une sphère pulsante placée successivement près d'une paroi, de l'intersection de deux parois et de trois parois.

Elargissement et approfondissement de la scène sonore par utilisation de haut-parleurs peu directifs dans une pièce réverbérante.

Les murs agissent comme des miroirs de symétrie qui multiplient les sources virtuelles.



● : sources réelles

○ : sources virtuelles

— : réflexions intenses

— : réflexions peu intenses

Même si l'élargissement et l'approfondissement de la scène sonore provoqués par la réverbération est généralement perçue comme plaisante, car permettant de créer une illusion de l'ambiance du concert direct, on doit toutefois admettre qu'il s'agit d'un écart à la fidélité de l'enregistrement.

L'écoute du même enregistrement avec un excellent casque est très révélatrice.

l'image sonore tridimensionnelle

selon Gordon Holt la capacité d'un système donné à fournir une image sonore correcte est à mettre en relation avec son aptitude à créer des sources virtuelles non confondues avec les enceintes acoustiques

l'image sonore se caractérise par

- distance, azimut des instruments
- distance entre les différents instruments (aération)

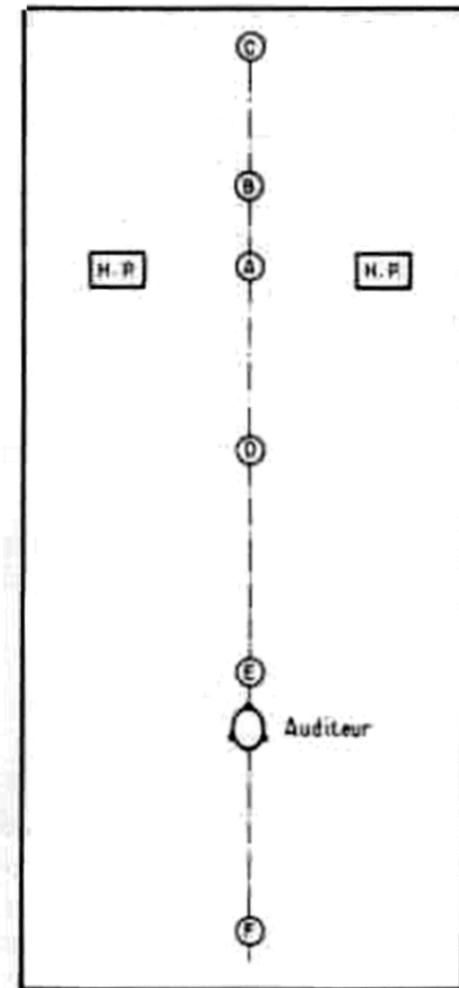


Fig. 1 : Localisation en profondeur d'une source sonore centrale. Il est démontré qu'à part la position A, il n'est pas possible de localiser en profondeur une source sonore sur un système stéréophonique courant. « Effet de profondeur » et « localisation en profondeur » ne devant pas être confondus.

Localisation des sources en audition binaurale

- Localiser une source sonore c'est identifier son azimut (plan horizontal) et sa hauteur (plan vertical), i. e. sa direction, puis la distance qui la sépare du capteur.
- Lorsque les deux oreilles reçoivent les vibrations d'un champ acoustique, des différences peuvent se présenter à trois niveaux: **intensité, phase et temps**.
- D'autres y ajouteront, voulant bien faire les choses et ne rien laisser au malencontreux hasard : l'ombre de la tête, les différences géométriques des pavillons, la fonction de transfert en amplitude des pavillons, et les réflexions par les épaules.

Pour une typologie des espaces...

Sandrine Lopez-Ferrer

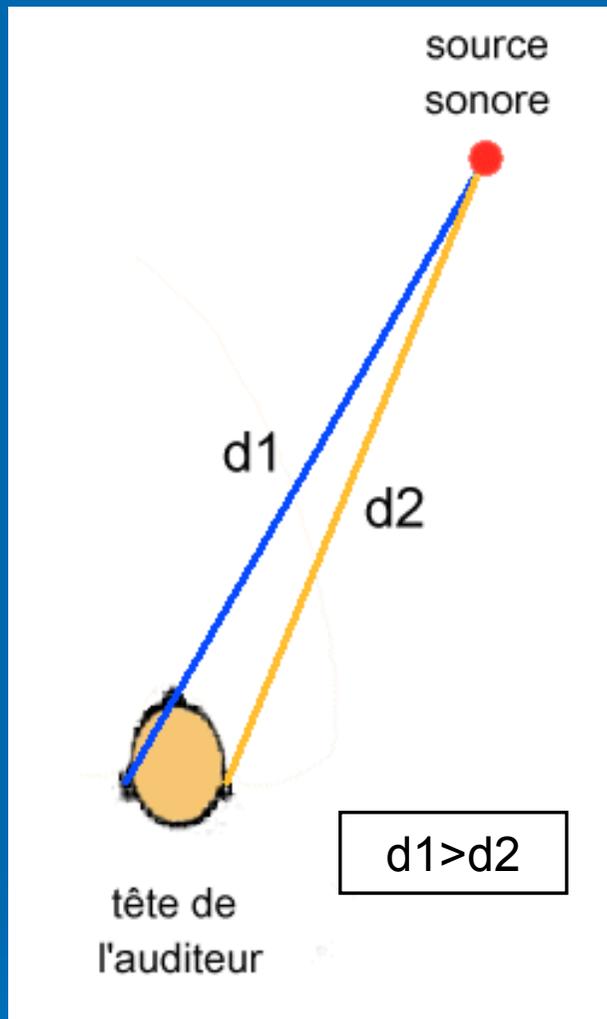
« Espace : lieu plus ou moins bien délimité où on peut situer quelque chose. »¹

Notre écoute, quant à elle, est tridimensionnelle : elle permet de localiser les sons dans un espace donné, et reconnaît la verticalité, l'horizontalité et la profondeur. L'écoute stéréophonique permet à l'auditeur de percevoir un relief sonore, une perspective sonore, la séparation des plans sonores, différents espaces, une netteté des « images mentales ».

La notion de relief sonore est intéressante car elle relève déjà de la perception globale. Nous pouvons percevoir des sources sonores dans des directions différentes. Il est important de préciser que c'est le déphasage qui permet le relief sonore et la localisation. Des ondes en phase sont des ondes qui ne sont pas décalées dans le temps. Si elles sont décalées, il y a déphasage et c'est cela qui donne le relief. On peut identifier dans l'espace.

Commentaire: Il est important de respecter la répartition des phases à l'intérieur d'un signal pour garantir une bonne reproduction du relief sonore

p://www.ina.fr/grm/outils_dev/theorique/seminaire/semi-2003/semi2.2/tele/Typologie_espace.pdf



pour un son arrivant de la gauche, ou de la droite

PHASE = 0,63 ms de différence interaurale, d'une oreille à l'autre.

INTENSITE = 0,5 dB de différence interaurale (Mills - 1958).

pour un son arrivant d'en avant, ou d'en arrière

PHASE = aucun déphasage, ou décalage.

INTENSITE = aucune différence.

Le déphasage entre les ondes sonores parvenant à chacune de nos oreilles est un des mécanismes permettant la localisation binaurale d'une source sonore

Localisation en azimut

- Sur le plan horizontal, la localisation par différence de phase a une limite à 1 500 Hz, au-dessus deux azimuts différents peuvent donner le même déphasage, et vers les 3 000 Hz ni l'intensité, ni le déphasage n'informent suffisamment pour localiser une source de façon précise (Stevens et Newman).
- Le pavillon de l'oreille intervient d'une manière progressive dans la localisation au-delà de 2 000 Hz. Il constitue un filtre en peigne et impose des maximums d'intensité et des crevasses spectrales au signal incident, dépendamment de la localisation de la source sonore et celle du capteur.

registre de fréquence

mécanisme de localisation

aigu

différence d'intensité

médium

différence d'intensité et de phase

grave

différence de phase

perception de la distance

- La sensation de distance fait référence essentiellement à trois indices : les variations d'intensité, le rapport du son direct au son réverbéré, et les modifications spectrales.
- En éloignant la source sonore, l'intensité diminue. On peut créer artificiellement la même impression en faisant varier l'intensité d'une source sonore fixe.

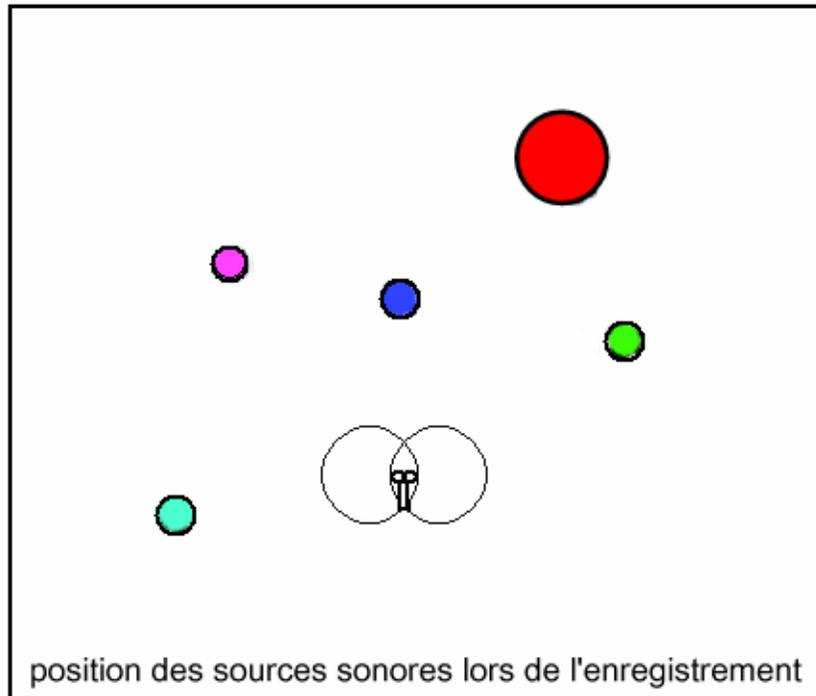


La plupart des enregistrements sont faits en stéréophonie d'amplitude (= stéréo. d'intensité).

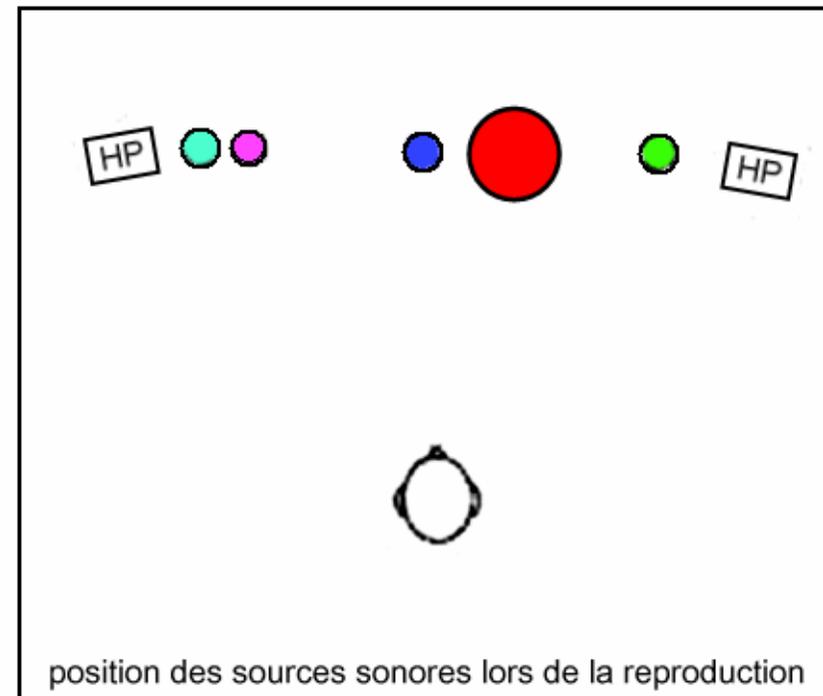
La position d'un instrument donné est définie par l'ingénieur du son par utilisation d'un "potentiomètre panoramique"

Théoriquement, lors de la reproduction, la position perçue d'un instrument ne peut pas être très éloignée d'une ligne reliant les 2 enceintes. On joue sur l'amplitude, le spectre et le filé des notes pour établir une certaine perception de la distance.

- c'est Alen Blumlein qui développa la méthode pour EMI en 1930
- voir aussi les méthodes XY, MS et stéréosonic



enregistrement en stéréophonie d'amplitude

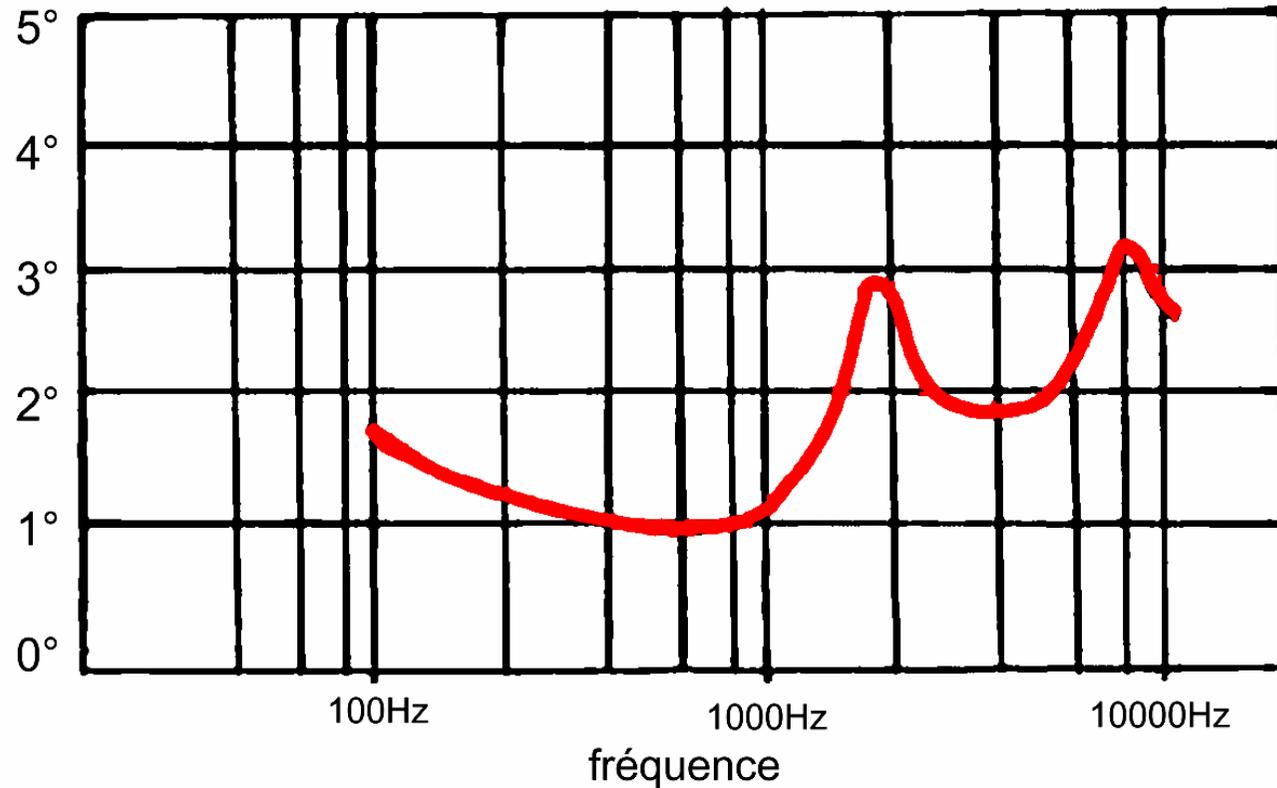


Distorsion spatiale des sources sonores existant entre la source originale et la reproduction stéréophonique conventionnelle

Psychoacoustique de la localisation des sons

- Il est bien connu que la localisation dans le plan horizontal est due principalement aux différences d'intensité et de temps entre les signaux sonores qui arrivent aux deux oreilles.
- Ce qui est moins connu, c'est que ces deux paramètres sont insuffisants pour annuler les ambiguïtés devant/derrière et pour permettre la localisation dans un plan autre que l'horizontal (haut/bas).
- De même, les seuls paramètres temps et intensité ne permettent qu'une localisation approximative, tandis que le pouvoir de localisation auditive est extrêmement précis

http://membres.lycos.fr/audioprovence/bibliographie/micro_x_y/micro_x_y.html

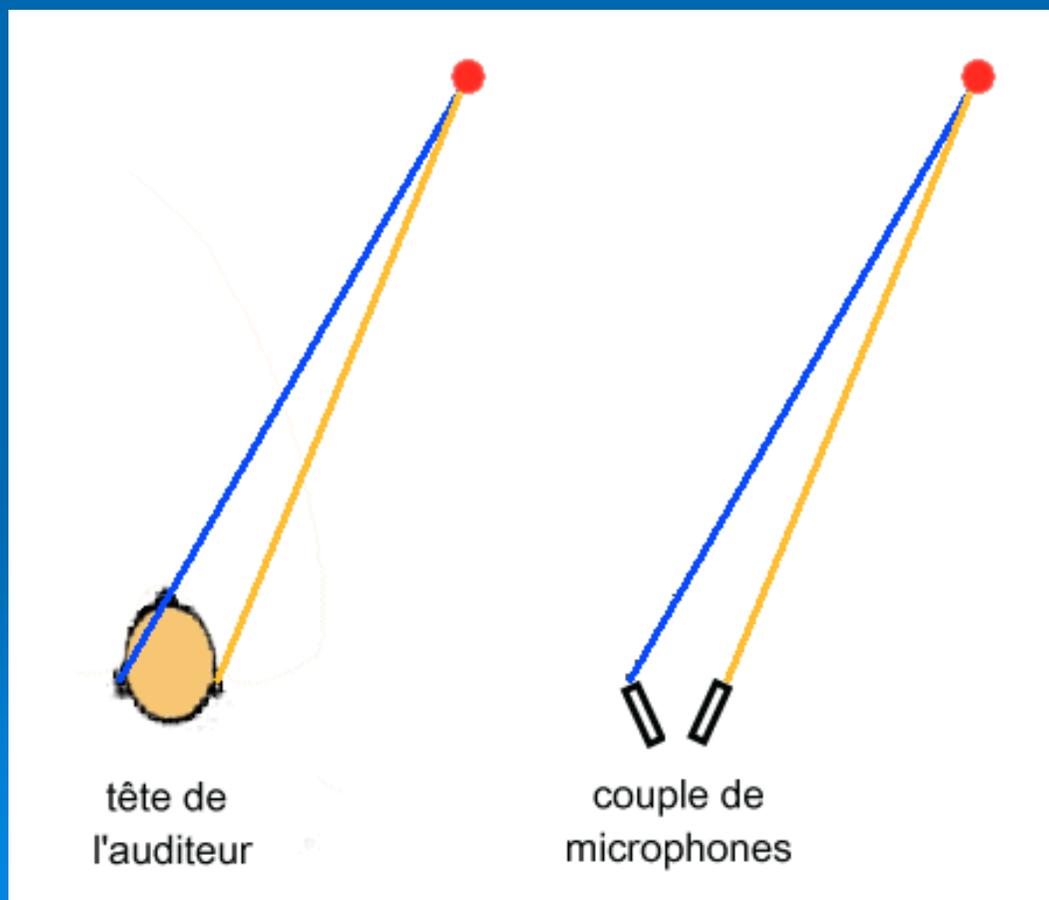


Degré de précision de la localisation latérale d'une source sonore par le système auditif humain

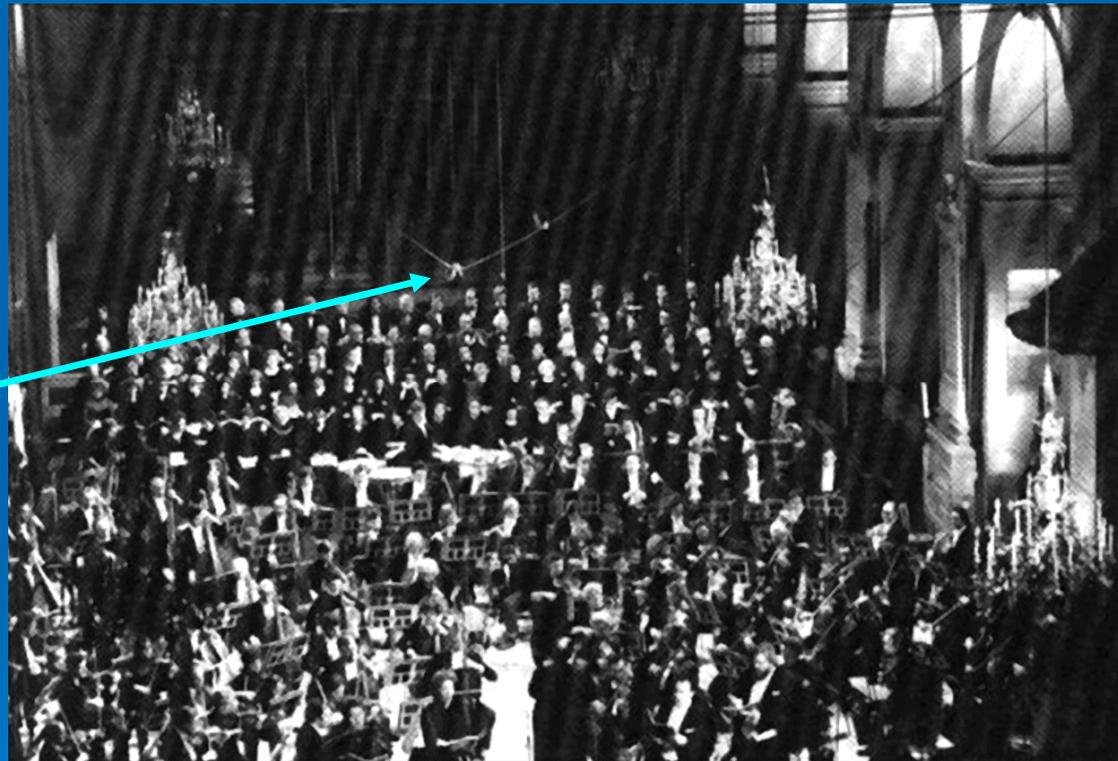
la précision de la localisation binaurale d'une source sonore en azimuth dans le plan horizontal est très grande

Enregistrements réalisés en stéréophonie de phase

En 1940, de Boer introduit la prise de son par tête artificielle qui améliore l'impression de localisation grâce à la différence d'intensité et du temps d'arrivée des signaux

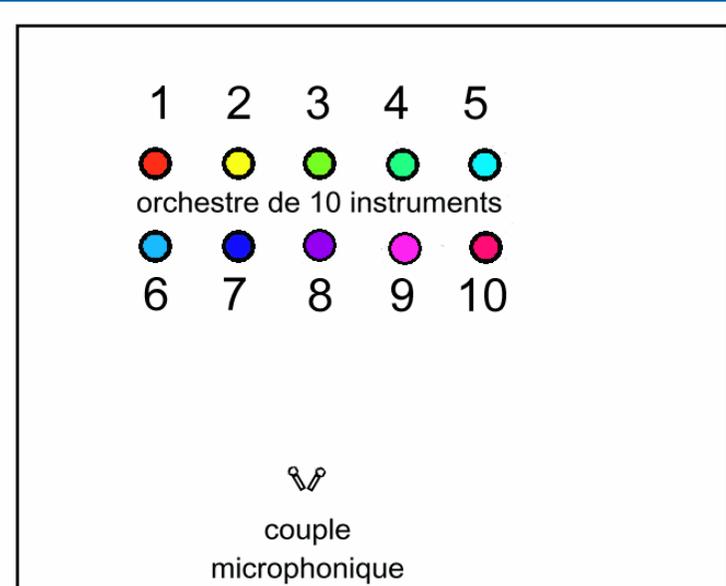


Vers la fin des années 50, les stations de radio européennes utilisent pour la diffusion des concerts des couples de microphones espacé de 15 à 30 cm et des angles variables entre les micros.

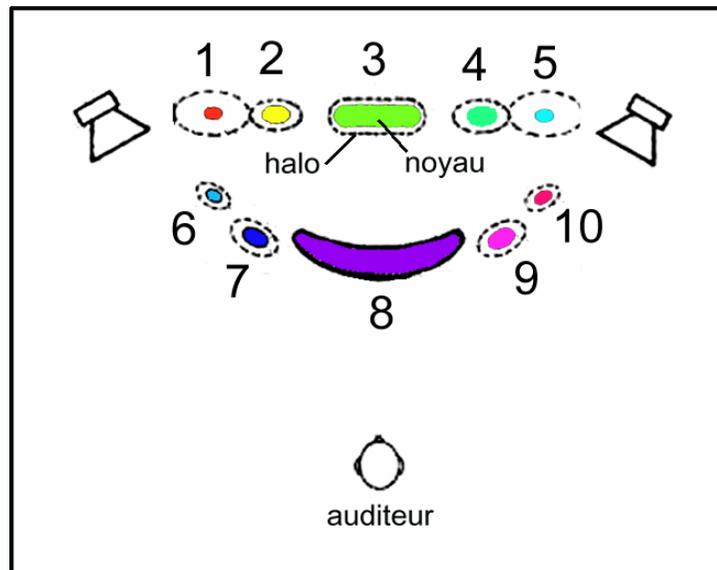


paire
microphonique

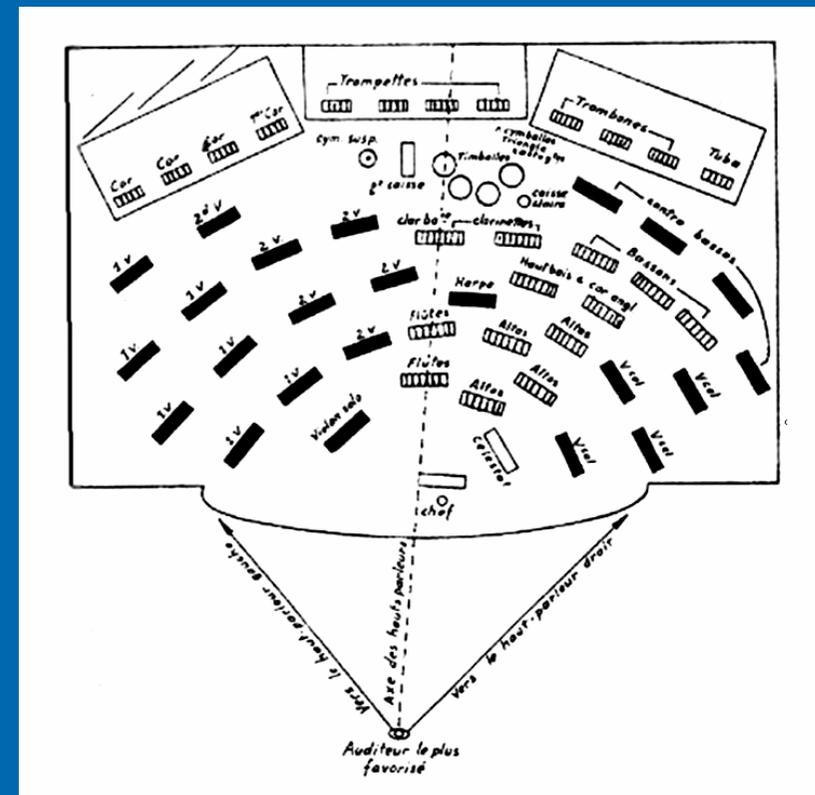
enregistrement d'un orchestre symphonique
utilisant un couple de microphones



enregistrement en stéréophonie de phase



on note la coexistence d'une distorsion de présence et d'une distorsion de perspective

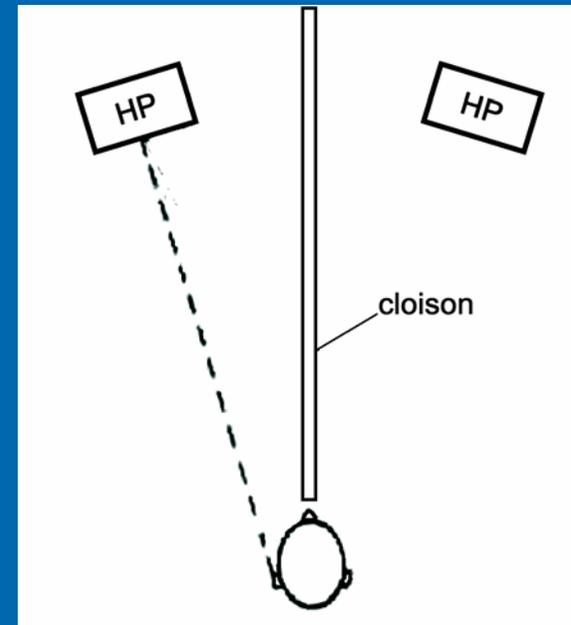
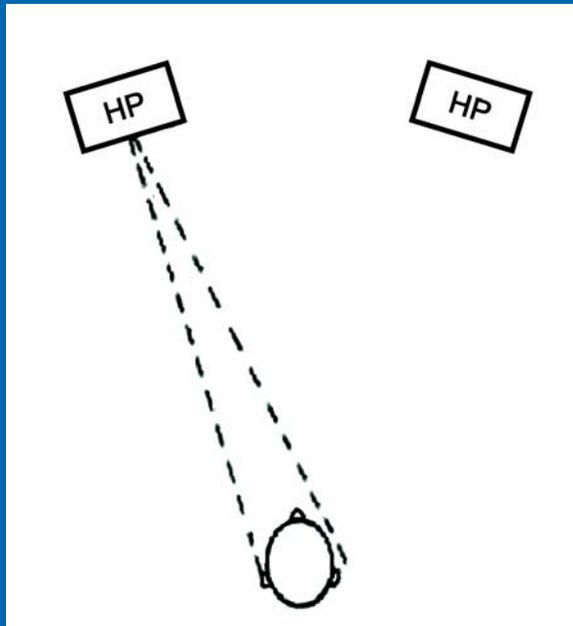


méthode d'enregistrement Charlin utilisant une tête artificielle

pour contrebalancer l'effet de distorsion de perspective sonore des enregistrements en stéréophonie de phase Charlin place les instruments sur des rangées curvilignes plus ou moins concentriques

écoute binaurale:

l'effet négatif de la diaphonie interaurale



En écoute stéréophonique sur enceintes acoustiques, l'onde émise par un des deux haut-parleurs parvient aux deux oreilles avec un certain déphasage.

Cette diaphonie interaurale perturbe la localisation des sources sonores virtuelles.

L'écoute au casque permet de s'affranchir de l'effet de diaphonie interaurale dû à l'écoute d'une enceinte.

Certains audiophiles réduisent la diaphonie interaurale en plaçant une cloison amovible suivant une médiatrice entre les 2 enceintes acoustiques .

Phase, distorsion de phase,
retard de phase, retard de
groupe et retard différentiel



phase et retard de groupe

Un même signal peut être complètement défini dans le domaine temporel comme dans le domaine fréquentiel

domaine temporel \implies domaine fréquentiel

$u(t) \implies \text{Re}(f), \text{Im}(f) \implies A(f), \varphi(f)$

partie réelle

partie imaginaire

amplitude

phase

3 définitions du retard

(parfois appelé temps de propagation)

- retard de phase
- retard de groupe
- retard différentiel (Marshall Leach)

L'expression d'une onde sinusoïdale est:

$$V(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

que l'on peut réécrire:

$$V(t) = A \cdot \sin(\omega [t + \tau])$$

$$\varphi = \omega \tau$$

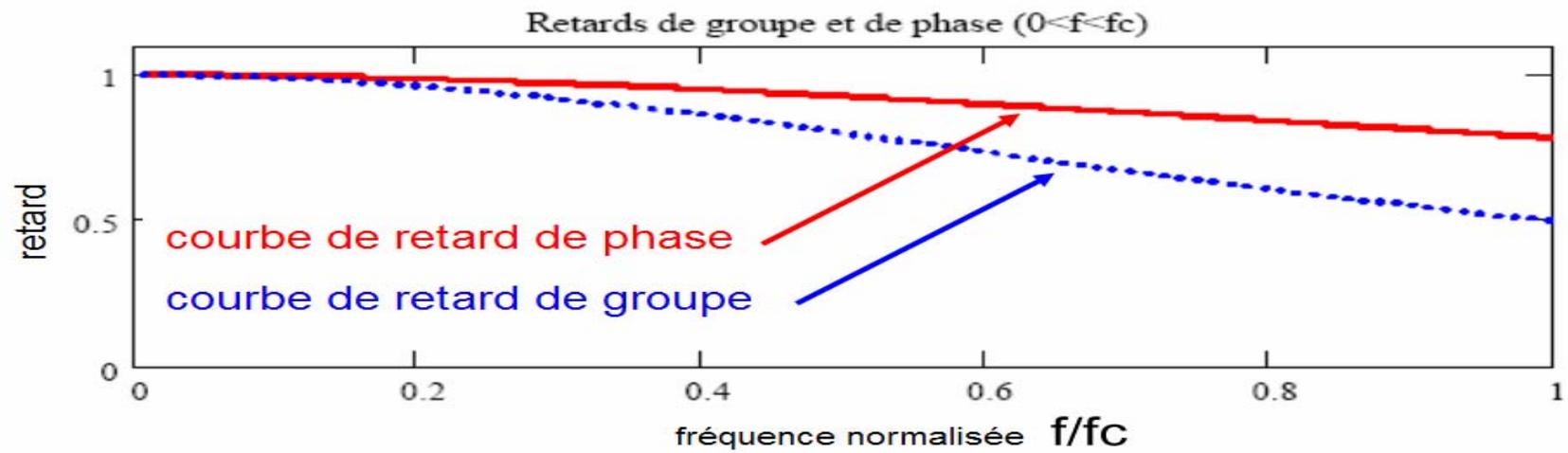
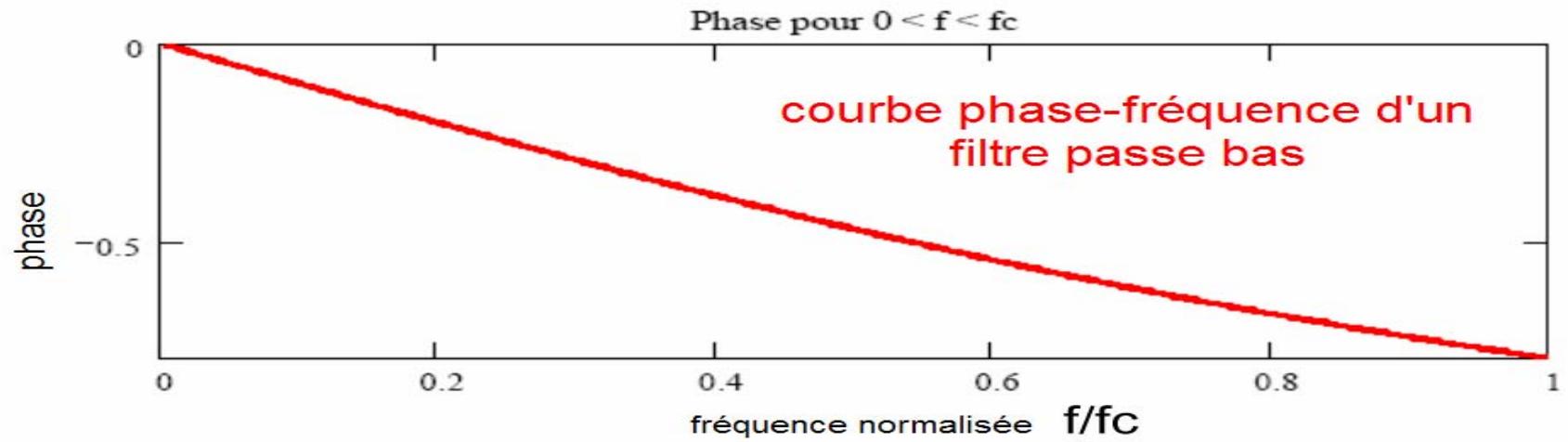
avec φ la phase, ω la pulsation ($\omega = 2\pi f$) et τ le retard

$\tau_p = \varphi / \omega$ est le retard de phase

$\tau_g = d\varphi / d\omega$ est le retard de groupe

remarque: si la phase varie linéairement avec la fréquence alors:

$$\varphi = a \cdot f \quad \text{alors} \quad \tau_p = \tau_g$$



différence entre courbe de retard de phase et courbe de retard de groupe

d'après

Attention: les courbes de phase publiées utilisent généralement une échelle logarithmique de fréquence qui rend très difficile l'analyse de la linéarité de la phase .

De plus une courbe de retard de groupe ("group delay") constante ne garantit pas que le retard temporel ("time delay") soit uniforme. Un retard temporel uniforme garantit que le retard de groupe est constant mais l'opposé n'est pas toujours vrai. En effet , l'addition d'une phase constante (65° par exemple) sur un seul haut-parleur n'aura d'influence sur la courbe de retard de groupe que dans la zone de fréquence relais, alors que la distorsion de la forme d'onde indique un retard temporel non uniforme.

(c'est pourquoi Marshall Leach introduit la notion de retard différentiel)

retard différentiel

- Marshall Leach introduit la notion de retard différentiel en affirmant que ce qui importe est le retard relatif entre une composante fréquentielle et l'enveloppe de l'onde qui la transporte"

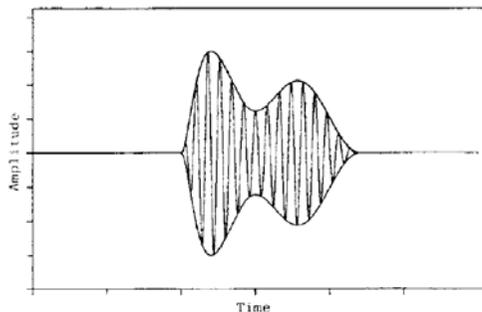


Fig. 1. Example narrow-band signal component modeled as sinusoidal signal with a amplitude envelope variation modulated on it.

J. Audio Eng. Soc., Vol. 37, No. 9, 1989 September

The transfer function of a first-order or second-order low-pass filter can be written in the form

$$F(s) = K \frac{1}{1 + a_1(s/\omega_0) + a_2(s/\omega_0)^2} \quad (7)$$

where K is the gain constant, s is the complex frequency, and $\omega_0 = 2\pi f_0$ is a normalization frequency. For a first-order transfer function, $a_1 = 1$ and $a_2 = 0$. For a second-order transfer function, $a_1 > 0$ and $a_2 = 1$.

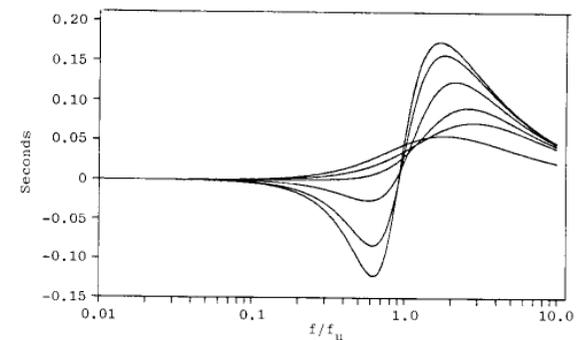


Fig. 6. Differential time-delay distortion $\Delta\tau$ in seconds versus normalized frequency f/f_u for example low-pass filter transfer functions. Upper curve for $0.1 \leq f/f_u \leq 1$ is first order, lower curves are second order in order of decreasing a_1 .

réf: "The Differential Time-Delay Distortion and Differential Phase-Shift Distortion as Measures of Phase Linearity" par Marshall Leach, JAES, Vol. 37, No.9, Septembre 1989

A mon avis il est souhaitable d'exprimer
les retards en distance équivalente

distance équivalente = vitesse du son x retard

les filtres numériques modernes offrent l'option
d'introduire les retards soit en millimètres soit
en millisecondes

outils pour l'étude de la distorsion de phase

- la transformée de Wigner-Ville

elle est basée sur l'utilisation de l'autocorrélation

- la FFT glissante (SFFT = Sliding FFT en anglais)

elle conduit aux deux représentations classiques appelées:

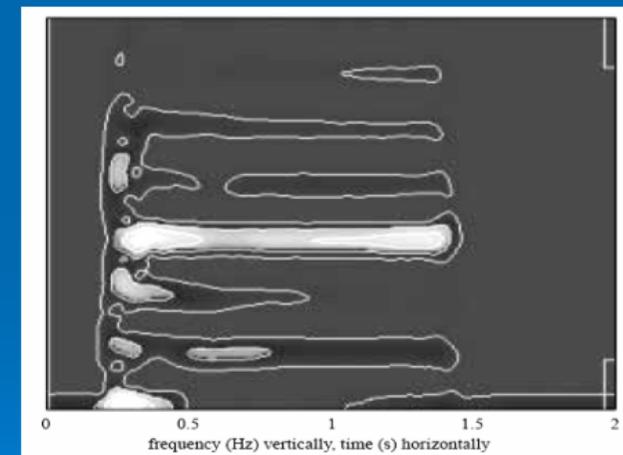
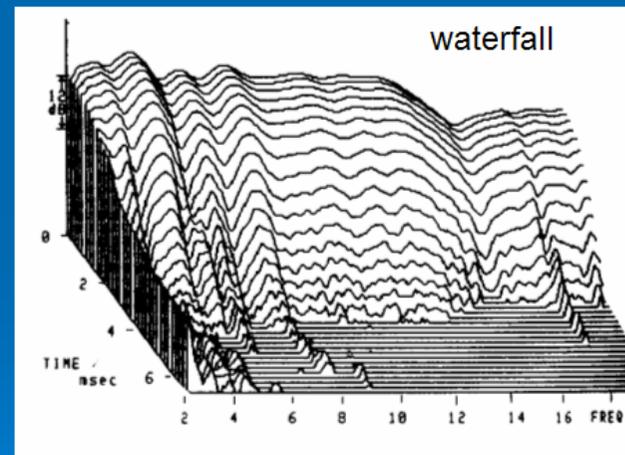
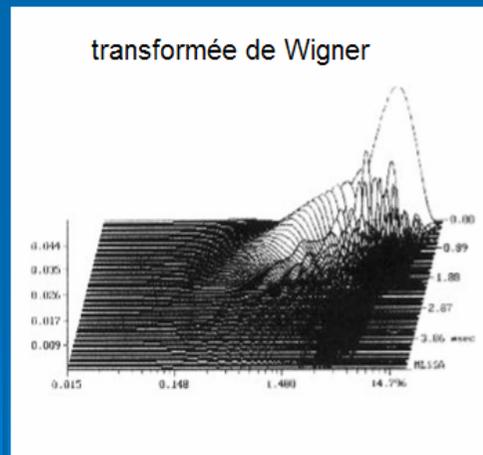
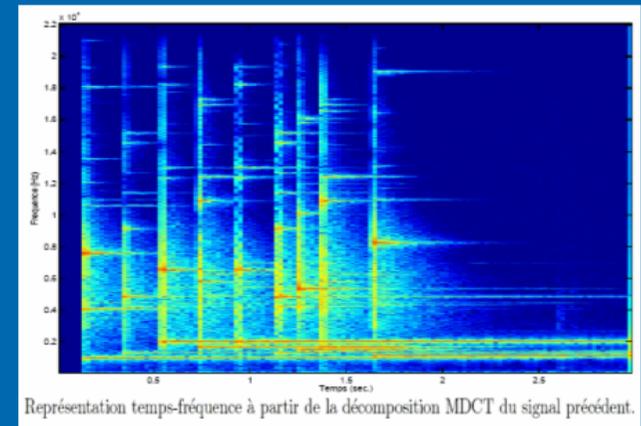
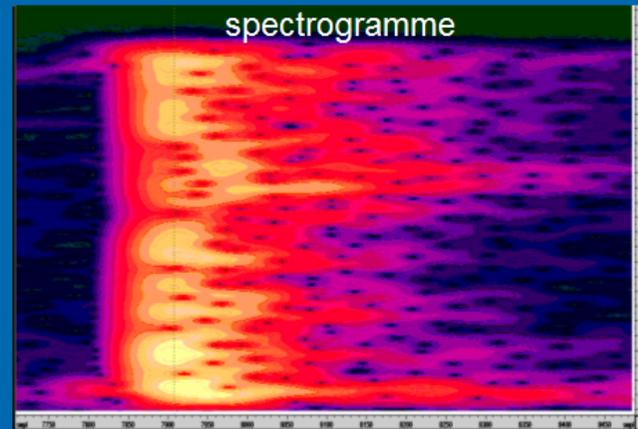
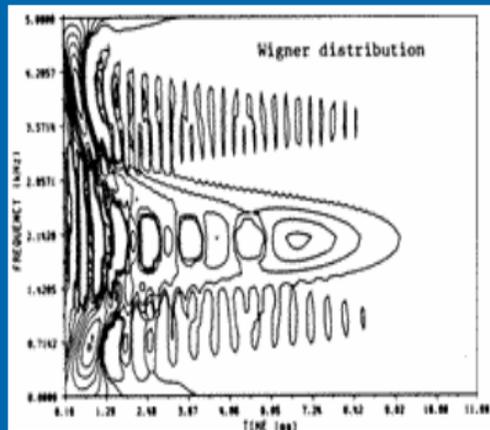
- spectrogramme

- waterfall

remarque: La présentation de type waterfall, à cause de la perspective utilisée peut masquer des creux (annulations) c'est pour cela que personnellement je préfère utiliser le spectrogramme.

- les ondelettes

représentation 3D énergie / temps / fréquence



transformée de Wigner-Ville

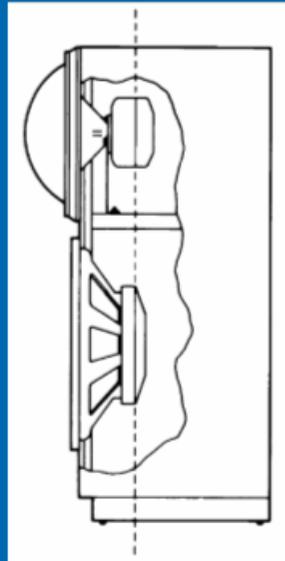
transformée de Fourier glissante

transformée par ondelettes

quelques enceintes du commerce

(ce que publient les constructeurs)

JBL Model 4430 Bi-Radial® horn



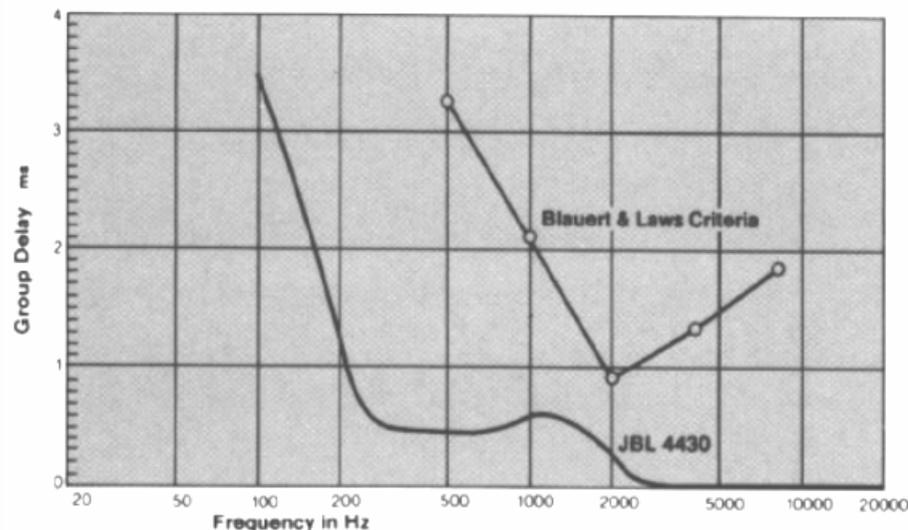
Crossover Frequency : 1 kHz

⁶A special crossover card is available for JBL electronic frequency dividing networks which will provide the appropriate crossover characteristics for biamplification. If another electronic network is used, a 12 dB/octave filter slope will provide the closest approximation.

References

- [a] P. Garde, "All-Pass Crossover Systems," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 28, pp. 575-584 (Sept. 1980).
- [b] J. Blauert, P. Laws, "Group Delay Distortions in Electroacoustical Systems," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 63, pp. 1478-1483 (May 1978).
- [c] H. Suzuki, S. Morita, T. Shindo, "On the Perception of Phase Distortion," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 28, pp. 570-574 (Sept. 1980).
- [d] R. Lee, "Is Linear Phase Worthwhile," presented at the 68th Convention of the Audio Eng. Soc., Preprint 1732 (F-4), (Mar. 1981).

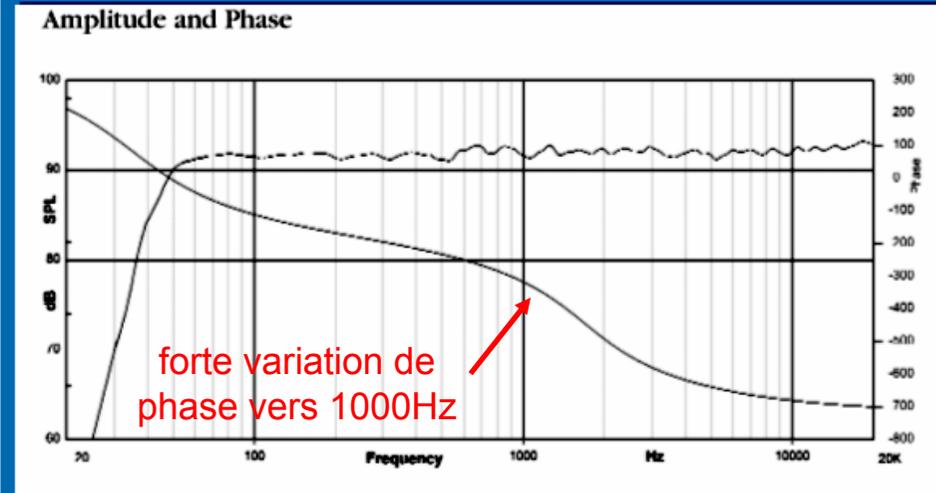
Figure 6. Group Delay vs. Blauert & Laws Criteria



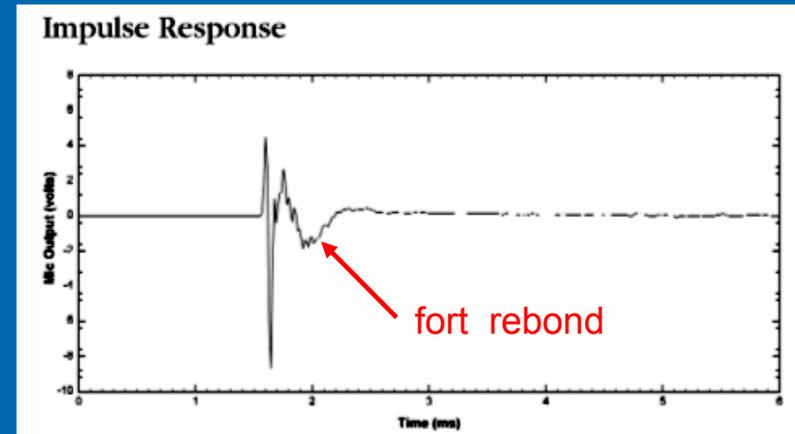
Group Delay Characteristics¹
300 Hz to 1.6 kHz: 500 μ S (\pm 100 μ S)
smoothly changing to
2.5 kHz to 20 kHz: 0 μ S (0, + 50 μ S)

commentaire: temps de propagation très peu constant malgré les dires du constructeur et comparaison avec le critère de Blauert & Laws non pertinent

LSR28P Linear Spatial Reference Bi-Amplified Monitor System

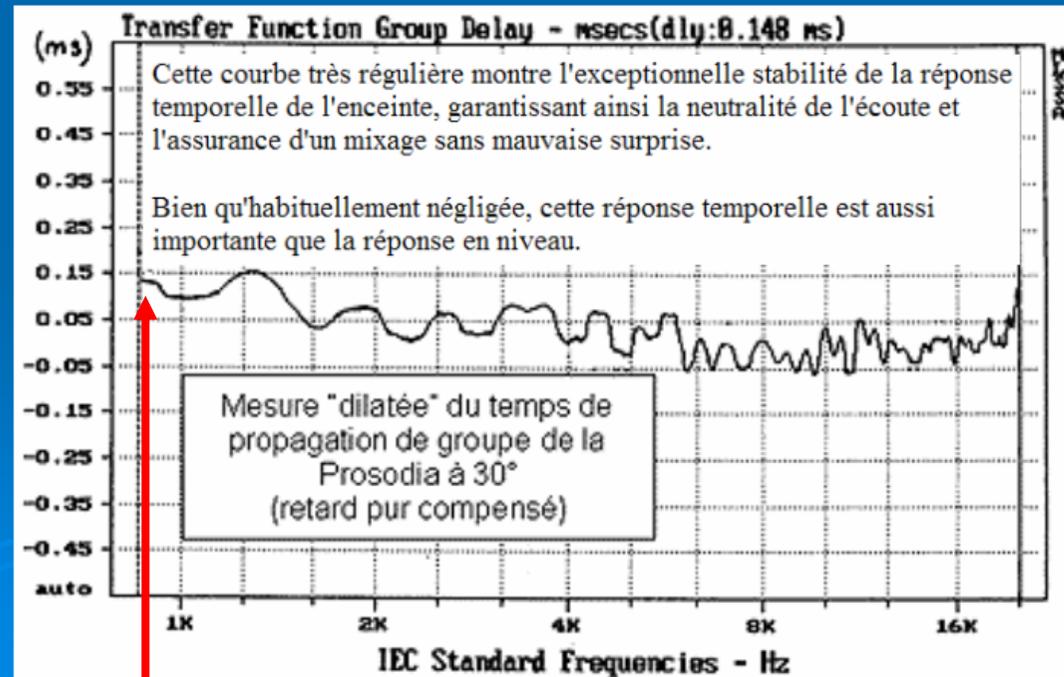
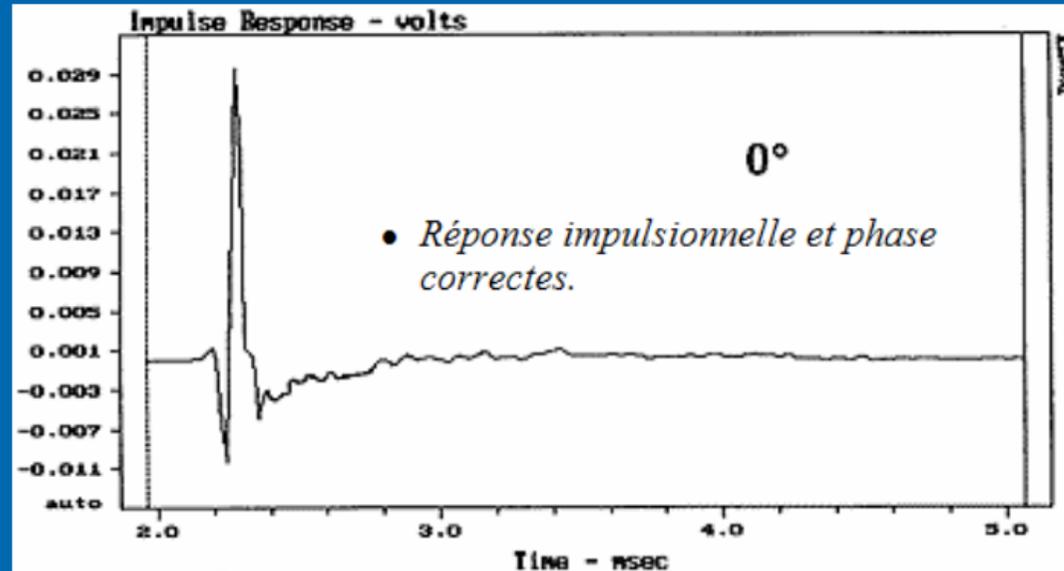


Active crossover circuitry results in a 36 dB/Octave Linkwitz-Riley Electroacoustic response between low and high frequency devices for smooth transition in both the frequency and time domains. This results in exception imaging and a lack of time smear.

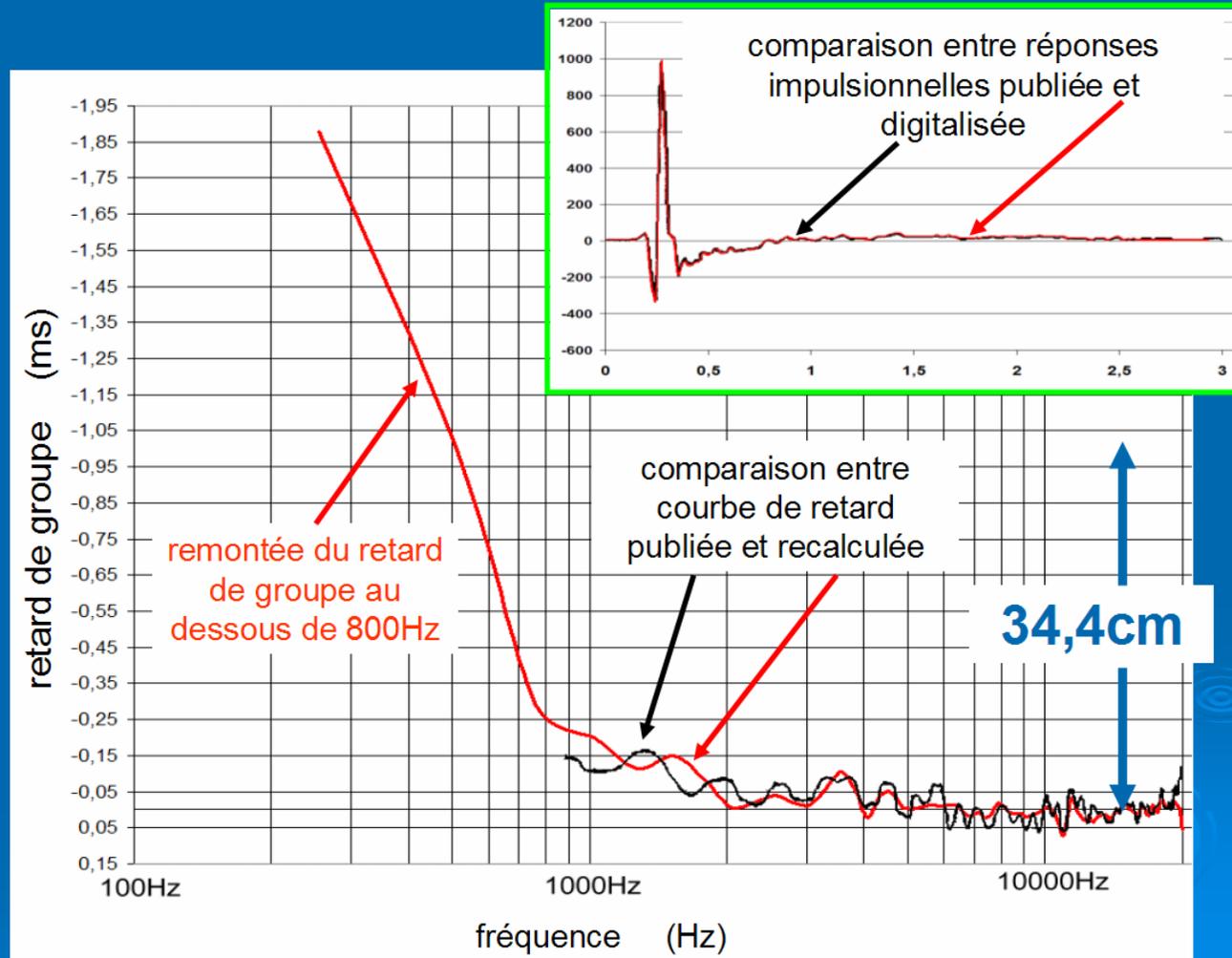


Prosodia

ENCEINTE DE CONTROLE PROSODIA :
LA REFERENCE ABSOLUE ISSUE DU LABORATOIRE
DE RECHERCHE A2t

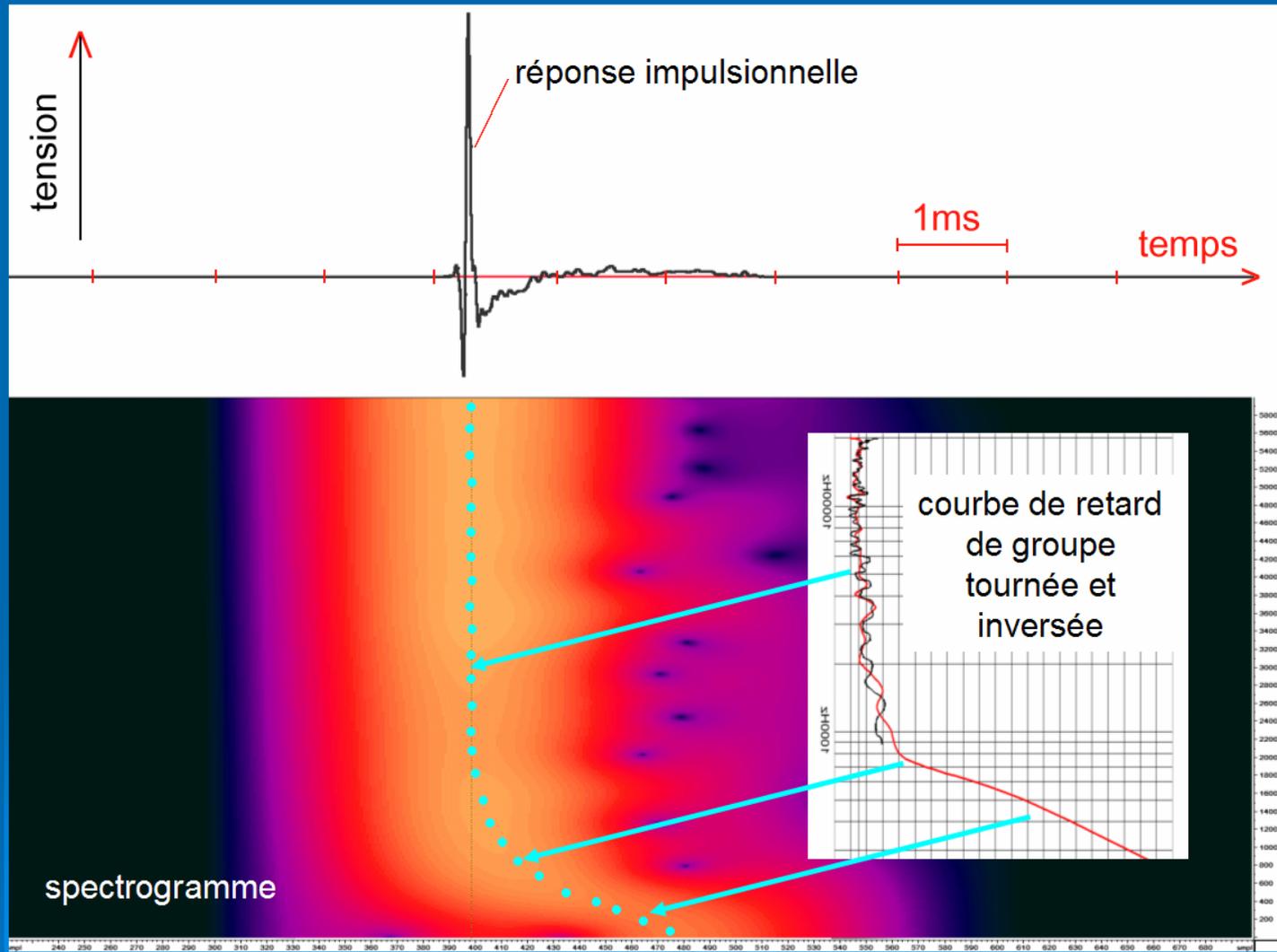


courbe coupée vers 800Hz



remarque: n'ayant pas pu disposer de la réponse impulsionnelle sous forme de fichier numérique j'ai digitalisé le graphe de la réponse impulsionnelle publiée pour en étudier la courbe de retard dérivée de la FFT.

On constate une remontée du retard au dessous de 800Hz.



Le spectrogramme peut remplacer sans problème la courbe de retard de groupe.

Sources de distorsion de phase

préamplificateurs, amplificateurs

distorsion de phase négligeable en première approche par rapport aux autres sources

filtres

charges acoustiques

pavillons et enceintes acoustiques

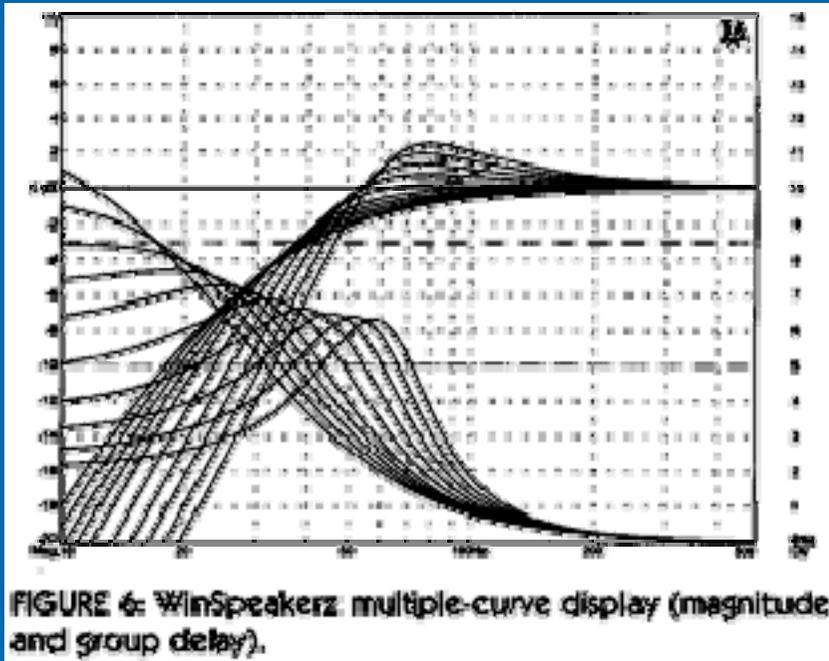
salle d'écoute

échos

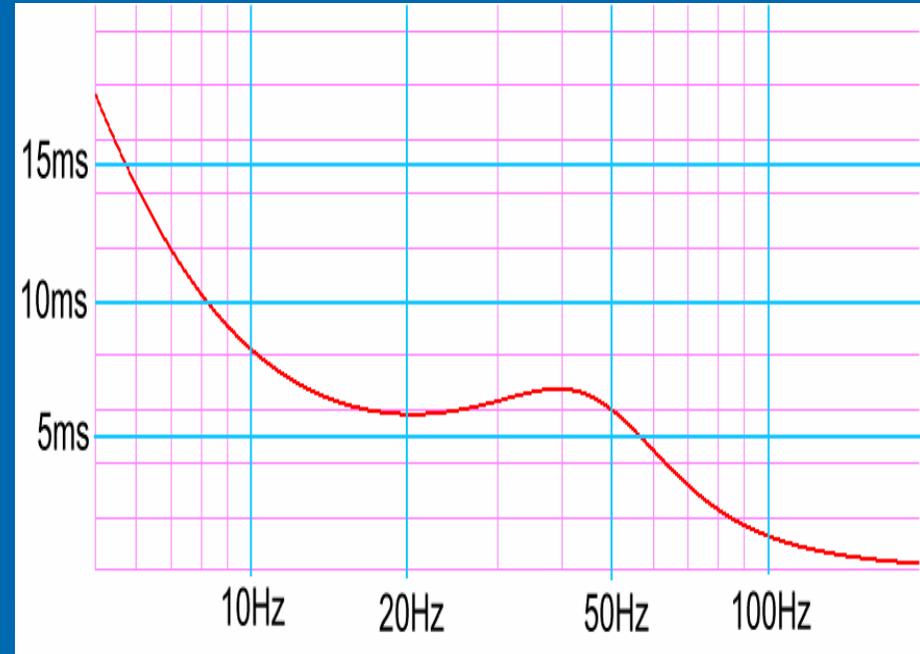
réverbération

contrairement à ce qui est parfois dit la réponse d'une salle d'écoute n'est pas à phase minimale

exemple de courbes de retard de groupe pour différentes enceintes de grave calculées avec WinSpeakerz

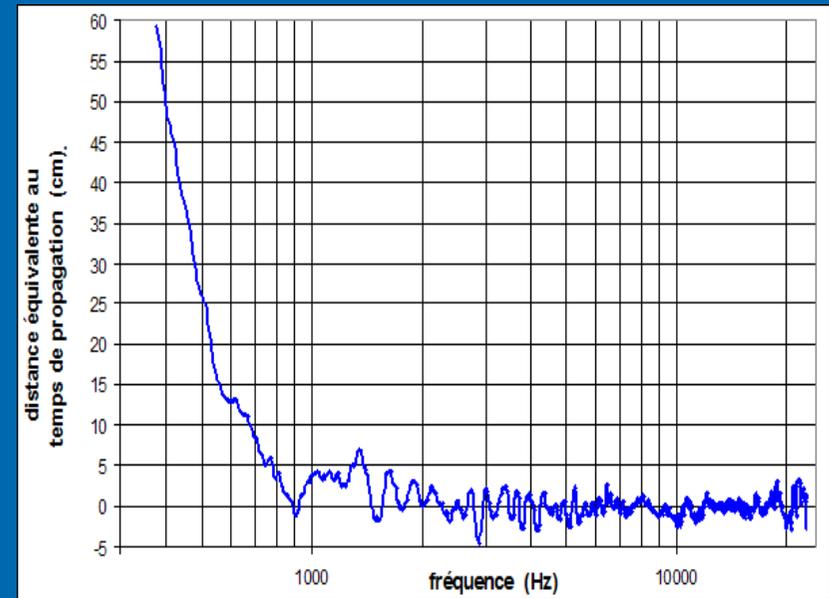
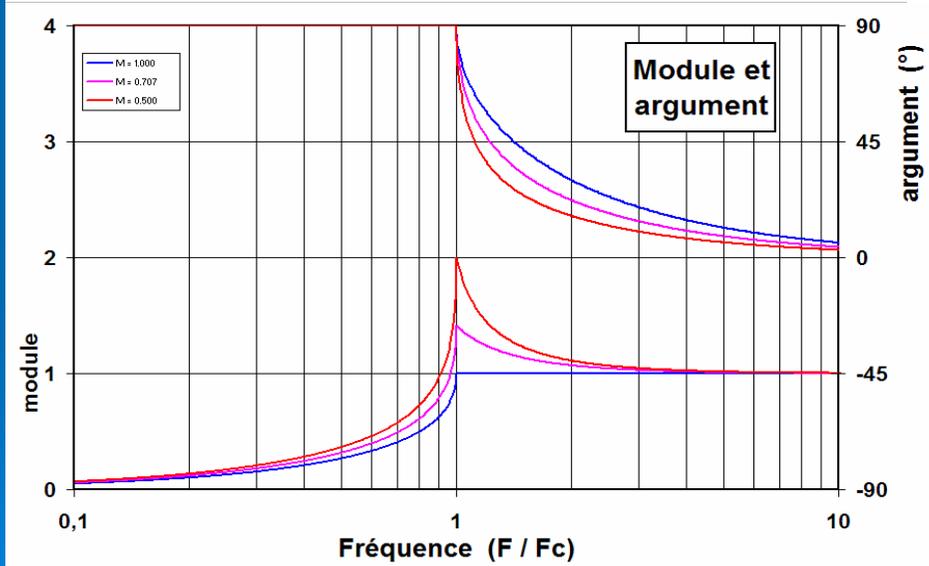
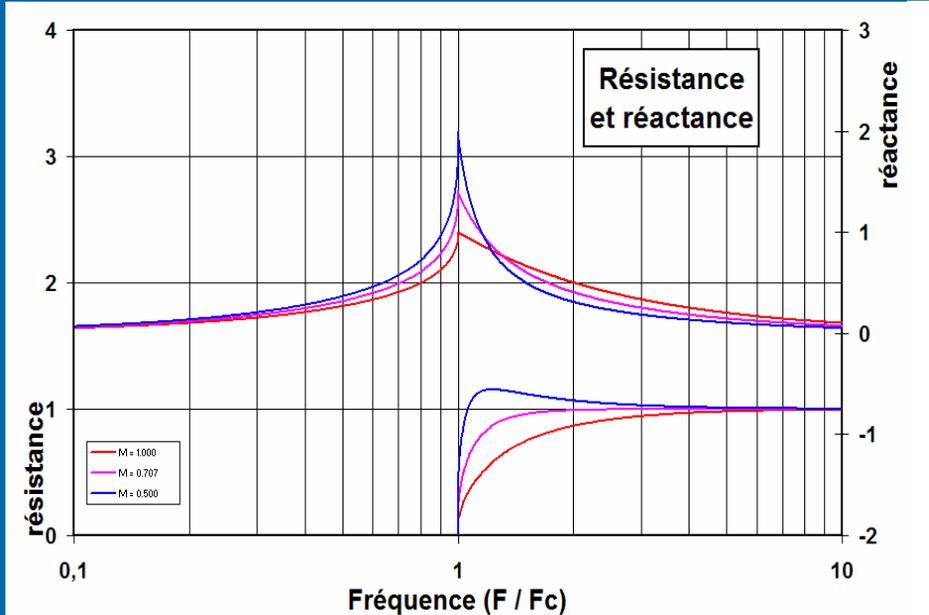


exemple d'une courbe de retard de groupe pour une enceinte bass-réflex calculée avec WinIsd



5ms = 1,72m
10ms = 3,44m
15ms = 5,16m

au dessous de 100Hz l'enceinte
acoustique est la principale source
de distorsion de phase



courbe de retard (exprimée en distance équivalente) du pavillon de $F_c = 320\text{Hz}$ construit par Marco Henry

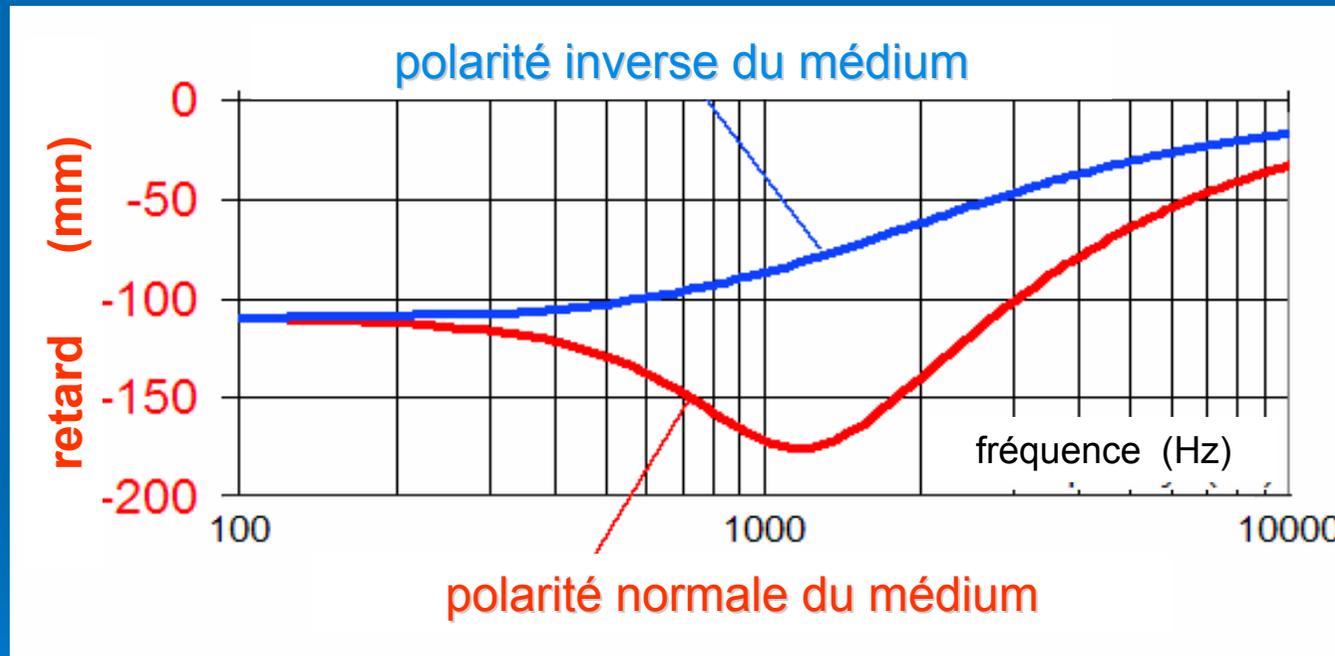
impédance acoustique des pavillons hyperboliques

L'impédance acoustique d'un pavillon est de plus en plus réactive vers sa fréquence de coupure ce qui introduit un fort déphasage et une augmentation du retard

- dans un système multivoies, inverser la polarité d'un des haut-parleurs est équivalente à ajouter 180° à la phase de toutes les composantes fréquentielles reproduites par ce haut-parleur.
- le retard différentiel équivalent à une inversion de polarité varie comme l'inverse de la fréquence:

$$\tau = \varphi / \omega = \varphi / 2\pi f.$$

➤ l'inversion de polarité d'un haut-parleur sur deux, en alternance, dans un système multivoies est souvent utilisé pour réduire la distorsion de phase et réduire la variation de la courbe de retard, spécialement dans le registre médium.



réduction de la non linéarité de la courbe de retard par inversion de polarité du haut-parleur médium-aigu d'un système à 2 voies utilisant le filtre de Butterworth du 3ème ordre

Audibilité de la distorsion de phase

- B. B. Bauer, "Audibility of Phase Shift," *Wireless World*, (Apr. 1974).
- S. P. Lipshitz, M. Pocock, and J. Vanderkooy. "On the Audibility of Midrange Phase Distortion in Audio Systems," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 30, pp. 580-595 (Sep 1982).
- R. Lee. "Is Linear Phase Worthwhile," presented at the 68th Convention of the Audio Engineering Society, Hamburg, Mar 17-20, 1981, preprint no. 1732.
- H. Suzuki. S. Morita. and T. Shindo. "On the Perception of Phase Distortion," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 28, no. 9, pp. 570-574 (Sep 1980).
- de nombreux autres, peu de travaux publiés en français

Remarque: avant la fin des années 1980 les travaux concluent pour la quasi totalité à l'inaudibilité de la distorsion de phase

On fait souvent référence au critère de Blauert et Laws comme un des arguments tendant à prouver que la distorsion de phase ne s'entend pas

Fréquence (Hz)	Seuil de retard audible (ms)	seuil de retard exprimé en périodes
8k Hz	2 ms	16 T
4k Hz	1.5 ms	6 T
2k Hz	1 ms	2 T
1k Hz	2 ms	2 T
500 Hz	3.2 ms	1.6 T

Remarque : le critère de Blauert et Laws est peu pertinent en haute-fidélité.

Le fait que des trains d'ondes émis par deux haut-parleurs semblent provenir d'une seule source ne signifie pas que la distorsion de phase n'est pas audible.

John L. Murphy
Physicist/Audio Engineer
True Audio
<http://www.trueaudio.com>

Contrairement aux études anciennes, les études récentes concluent à l'audibilité de la distorsion de phase

Un exemple très éclairant :

- L'étude par la méthode de comparaison A-B-X réalisée par David Clarke en 1981 conclue à l'inaudibilité de la distorsion de phase.
- Une étude presque semblable, menée avec la même méthodologie par Andrew Hon en 2002 arrive à une conclusion opposée.

"Some Experiments With Time." "On the audibility of phase shift."

article écrit par David L. Clark, fabricant du comparateur ABX , publié en 1981 dans la lettre d'information Hiver 1983 de Syn-Aud_Con newsletter

- Three experiments were performed which confirm the audibility of time offset in loudspeaker drivers but indicate that this audibility is due only to the frequency response aberrations resulting from the time offset. Implications of these results are discussed.
- "Hearing a difference" means being able to identify 12 correct out of 16 tries.
- Given that the response alone *can* explain time offset audibility and time delay alone *cannot* explain this audibility it seems inescapable to conclude that arrival time compensation *by itself* has no audible value.

la compensation des écarts de retard dans un système multivoies n'apporte aucun effet audible

David L. Clark (1981)

la même étude réalisée par Andrew Hon donne des résultats contraires

The ABX Phase Distortion Challenge

Can I discern a 4th order Linkwitz-Riley filter that has 360 degrees of phase rotation between high and low pass?

Using the PCABX computer program:

http://www.pcabx.com/getting_started.htm

Results

10 correct out of 13 trials which is $p < 0.05$ (4.6 percent chance of guessing so correctly) significance level for "castanet" sample, discerning unaltered reference with a digitally processed 4th Linkwitz-Riley filter at 300 Hz and 3000 Hz (a common 3-way speaker configuration).

Difference is subtle but noticeable, I believe related to the phase distortion and not to any spurious in the sample presentation. Discerning requires a fair bit of concentration and rapid switching (repeated-music test not running-music).

Andrew Hon: je peux entendre la distorsion de phase au moins sur l'enregistrement de "Castagnette" dans mon environnement acoustique familial

Andrew Hon
Andrew Hon (2002)

Audibility and Musical Understanding of Phase Distortion

by Andrew Hon
Berkeley, fall 2002

Despite early beliefs (Ohm's Phase Law in the 1800s), studies have been conducted demonstrating that phase distortion is audible, however subtle and specific to certain circumstances. However, many people claim that previous research shows phase distortion is not audible. They simply not read the more current research.

Many loudspeaker designers are guilty in this regard. My assertion is:

Depends - **Yes, phase distortion is audible under the right circumstances to certain people, but the consensus is it is rather subtle at best, especially in relation to other forms of distortion.** Phase is chaotic in reverberant environments, yes, but the direct sound is not affected by reverberation. In some situations such as choral music in a cathedral from the back of the audience, phase is totally messed up, but in most other cases it still matters!

"Andrew Hon: Oui, dans les bonnes circonstances, la distorsion de phase est audible à une partie des gens, mais le consensus est qu'au mieux ses effets sont subtiles, spécialement quand on prend en compte les autres formes de distorsion."

Andrew Hon (2002)

Subjective Impression of Phase Distortion, discussion

Andrew Hon: "4th order LR crossover have always sounded "disjointed" to me - transients sound blurred, and high frequencies don't match up with low frequencies. "

Andrew Hon: "le son des filtres du 4ème ordre de type Linkwitz-Riley m'a toujours semblé désarticulé, les transitoires sonnent brouillés et les hautes fréquences ne s'homogénéisent pas avec les basses fréquences."

Most noticeable with B&W audiophile speakers, which all use 4th order LR crossovers. The DM603 series is especially horrible sounding because the LR crossover is relatively low at 1-2kHz, whereas the DM303 series is not too bad because the LR crossover is at 4kHz, almost out of the midrange frequencies. 360 degrees of phase rotation is pretty horrible.

In the castanet sample, I listened for a subjective feel of the running notes. In LR filtered sample, the notes feel like they're stumbling over each other, while in the non-filtered sample, they are fast but liquid, flowing. 360 degrees of phase rotation at 10 kHz is 0.1 milliseconds, which seems inconsequential, but it means the source at 10 kHz would be positioned 1.356 inches closer to you, and smeared in physical location a couple inches over its full frequency spectrum. From the above diagrams, at 2 kHz, 180 degrees of phase rotation is 0.25 milliseconds.

Une excellente synthèse des travaux sur l'audibilité de la distorsion de phase : la thèse de Daisuke Koya.

University of Miami

AURAL PHASE DISTORTION DETECTION

Presented by Daisuke Koya

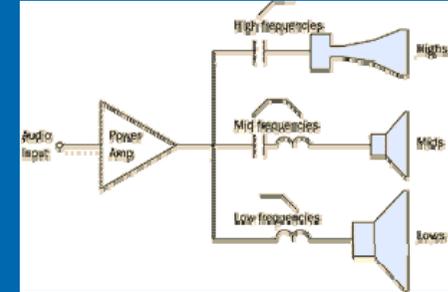
University of Miami
May, 2000

Daisuke Koya (2000)

Distorsion de phase due aux filtres pour enceintes acoustiques



Quelques préjugés concernant les filtres



"les variations de phase dues aux filtres sont peu ou pas audibles et il y a bien d'autres paramètres à prendre en compte en priorité"

"tout est déjà connu dans ce domaine, il est vain de chercher à améliorer le filtrage"

"dans cet article il est dit que les enceintes acoustiques X ont une excellente réponse impulsionnelle."

...

La quête pour un filtre parfait a débuté dans les années 1930.

Aujourd'hui, les filtres classiques les plus souvent utilisés sont ceux de Butterworth et de Linkwitz-Riley :

Stephen Butterworth a décrit la réponse des filtres qui portent son nom en 1930.

Siegfried Linkwitz et Russ Riley étaient ingénieurs chez Hewlett-Packard quand ils proposèrent leur filtre en 1976.

S. H. Linkwitz "Active Crossover Networks for Non-coincident Drivers," J. Audio Eng. Soc., vol. 24, pp. 2-8 (Jan/Feb 1976).

il ne faut pas oublier non plus les filtres de Bessel, Cauer,...

Filtres dans le domaine de l'audio professionnel:

D'après le constructeur Rane:

"Jusque dans le milieu des années 1980, le filtre de Butterworth du 3^{ème} ordre (18 dB/octave) est le plus utilisé, mais les problèmes dus à son utilisation sont bien connus et encore non résolus."

"Depuis, grâce au développement par Rane et Sundholm de filtres de Linkwitz-Riley du 4^{ème} ordre (24 dB/octave), ces problèmes sont résolus et ces filtres sont la norme actuelle."

tiré de :

<http://www.rane.com/pdf/linriley.pdf>

Effets d'un désalignement d'un système de haut-parleurs

➤ alignement géométrique

- les sources équivalentes des haut-parleurs sont alignées sur une sphère à même distance des oreilles de l'auditeur.

➤ alignement temporel

(remarque: l'appellation "time aligned" est déposée)

- nécessite l'enregistrement de la réponse impulsionnelle
- en général on aligne le début des impulsions parvenant des différents haut-parleurs filtrés



Problème de définition du début d'une impulsion

Effets d'un mauvais alignement

- les effets d'un mauvais alignement sont prévisibles et s'ajoutent à la distorsion de phase due aux filtres.
- L'analyse de l'alignement ne peut pas être séparé de celle du filtre.

Remarque: c'est ce qui m'a poussé à écrire une feuille de calcul qui permet de simuler la réponse d'un système à 3 voies en incluant les effets du filtrage et de l'alignement.

Effets classique d'un mauvais alignement

➤ effet sur les timbres

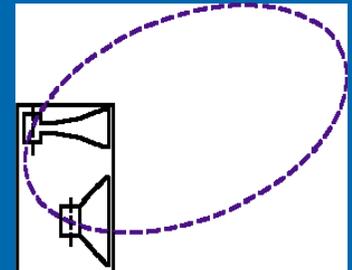
remarque : c'est l'effet le plus audible à la grande majorité des audiophiles

➤ effet sur la distribution des lobes de directivité

remarque : cet effet est surtout important dans le domaine professionnel

➤ effet sur l'image 3D

remarque: apport très positif des filtres optimisés pour une bonne réponse impulsionnelle

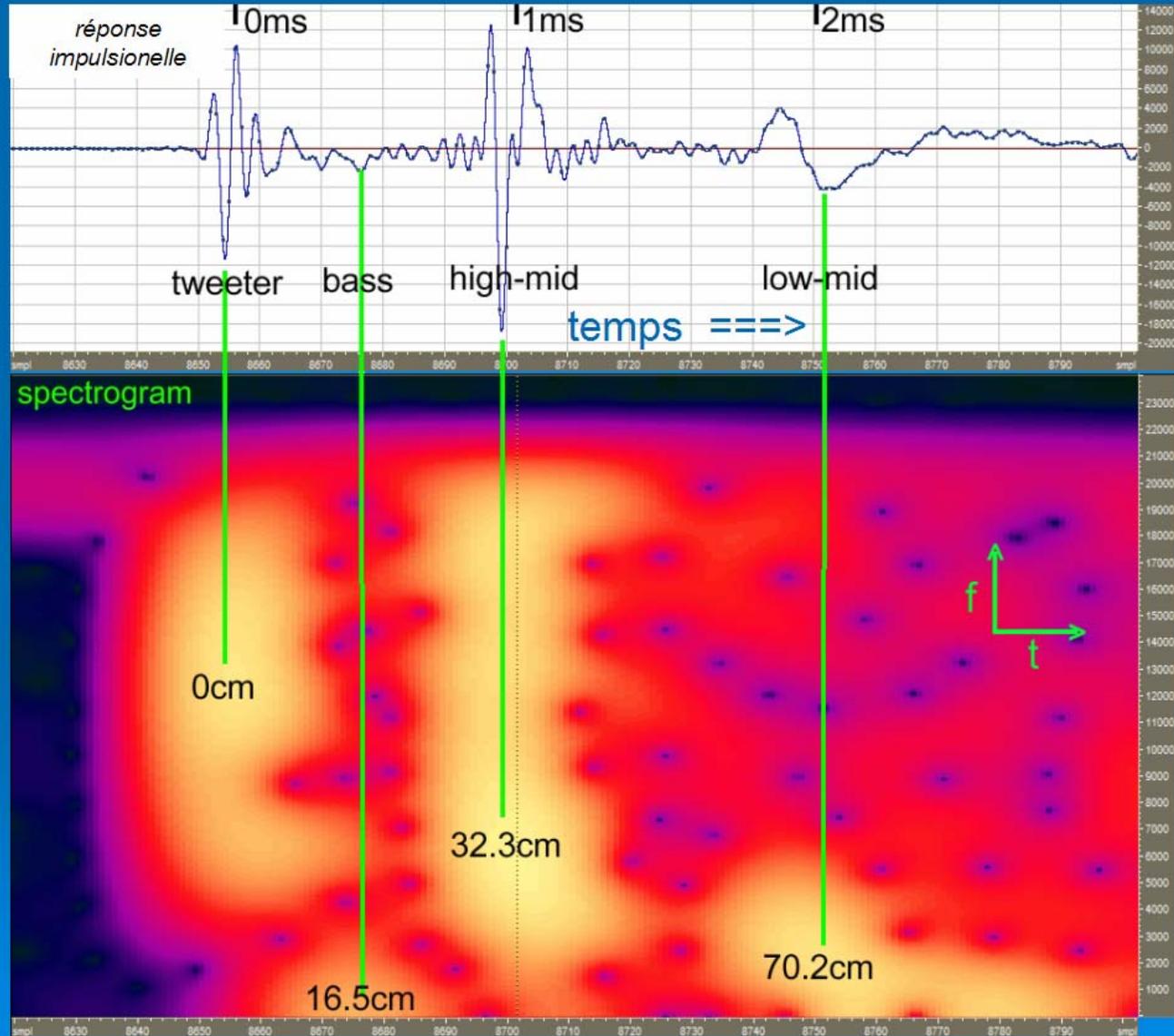
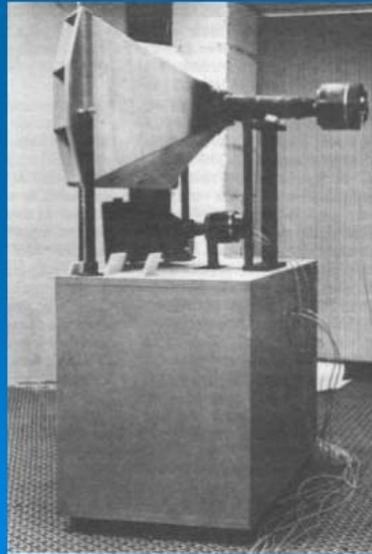
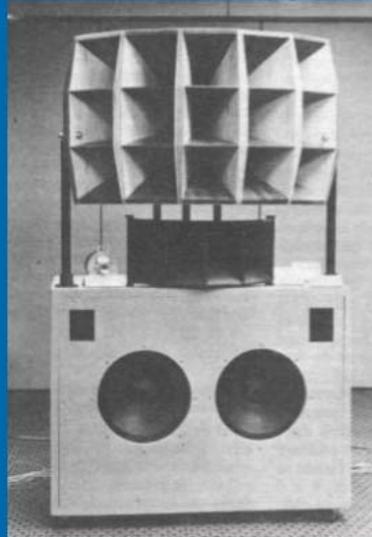


analyse et mesure de la distorsion de phase

➤ à mon avis:

l'analyse des effets de la distorsion de phase dus à un mauvais alignement des haut-parleurs et aux filtres ne peut pas être simplement effectuée par l'écoute et le relevé de la courbe de réponse niveau acoustique -fréquence

un exemple d'un excellent système du point de vue des timbres mais mal aligné: le système Onken à 4-voies

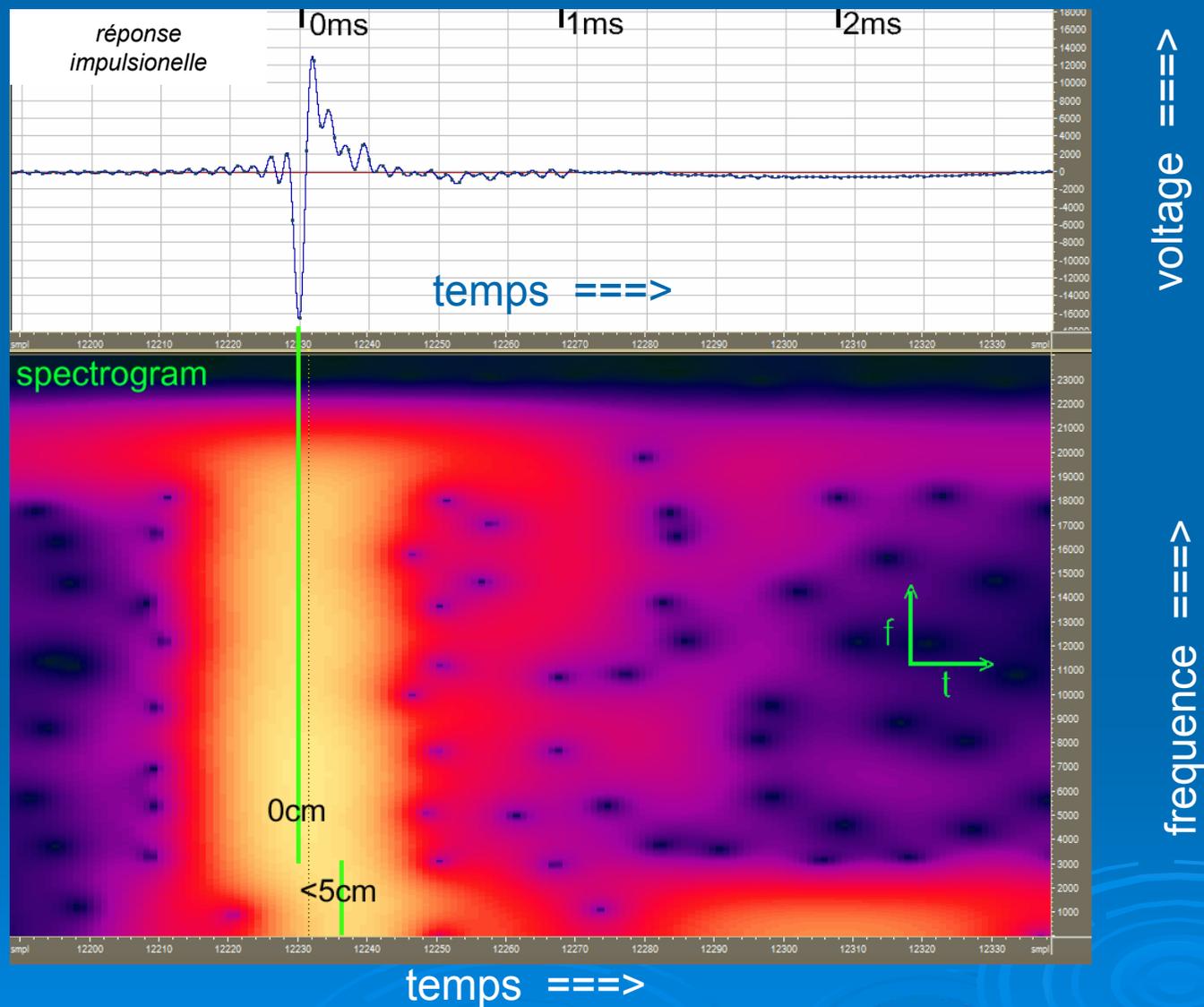


Mesures effectuées sur le système de l'association Melaudia

temps ==>

- les systèmes mal alignés et spécialement les systèmes à pavillons nécessitent d'être écoutés de loin pour que l'effet de fusion entre les voies s'effectuent
- on remarque que lorsque des auditeurs entrent dans un auditorium pour écouter un système à pavillons, ils se placent en général loin des haut-parleurs.
- les systèmes à pavillons bien alignés permettent l'écoute de proximité tout en délivrant une image sonore tridimensionnelle

un exemple de système bien aligné



Comme prévu par la simulation il n'est pas nécessaire de compenser le léger désalignement de quelques centimètres entre grave et médium-aigu sous peine de perturber la courbe niveau acoustique - fréquence.

la simulation d'un système multivoies doit prendre en compte:

pour chaque cellules de filtrage (passe-bas et passe-haut) :

type

ordre (ou pente)

fréquence de coupure

pour les différentes voies :

gain

polarité

retard additionnel

correction de phase additionnelle

La feuille de calcul de simulation d'un système à 3 voies contient les fonctions de transfert des principaux types de filtres polynomiaux classiques (Butterworth, Bessel, etc.)

expression d'un filtre passe-bas:

$$H(j\omega) = \frac{1}{a_d (j\omega)^0 + b_d (j\omega)^1 + c_d (j\omega)^2 + d_d (j\omega)^3 + \dots + d_n (j\omega)^n}$$

expression d'un filtre passe-haut:

$$H(j\omega) = \frac{(j\omega)^n}{a_d (j\omega)^0 + b_d (j\omega)^1 + c_d (j\omega)^2 + d_d (j\omega)^3 + \dots + d_n (j\omega)^n}$$

remarque: pour un filtre passe-bas d'ordre n la phase à la fréquence de coupure à -3dB est donnée par la formule:

$$\varphi = n \cdot 45^\circ$$

fonction de transfert d'un filtre

expression général = rapport de 2 polynomes complexes

$$H(j\omega) = \frac{a_n (j\omega)^0 + b_n (j\omega)^1 + c_n (j\omega)^2 + d_n (j\omega)^3 + \dots + d_n (j\omega)^n}{a_d (j\omega)^0 + b_d (j\omega)^1 + c_d (j\omega)^2 + d_d (j\omega)^3 + \dots + d_n (j\omega)^n}$$

avec :

$$j = \sqrt{-1} \qquad j^2 = -1$$

Mon but lors de la conception de cette feuille de calcul était de trouver une solution simple de filtrage permettant d'améliorer la perception de l'image sonore à l'écoute d'un systèmes multivoies .

Pour cela j'ai recherché

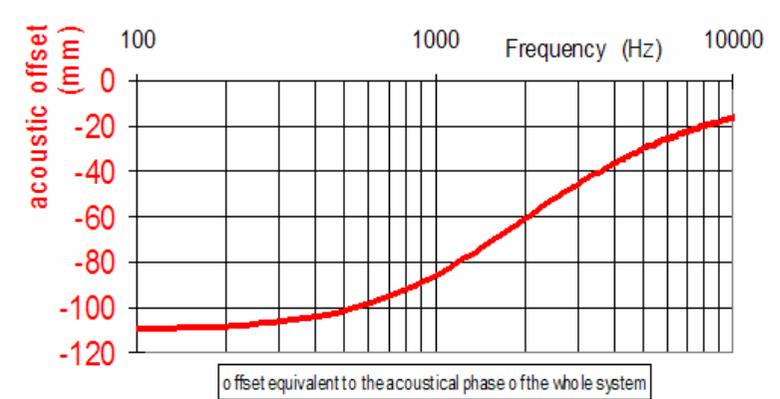
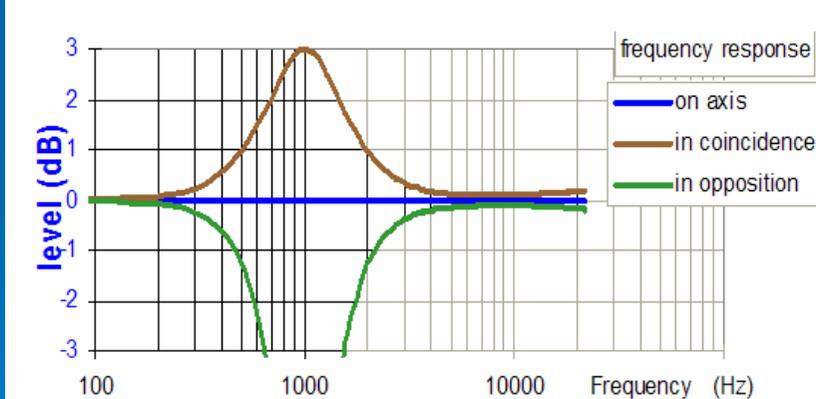
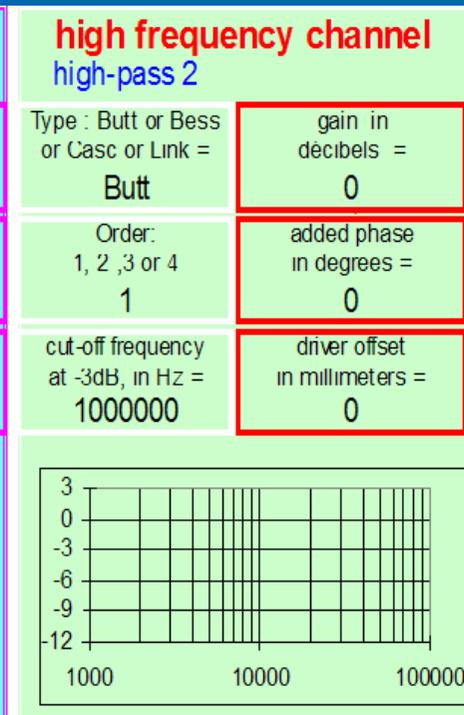
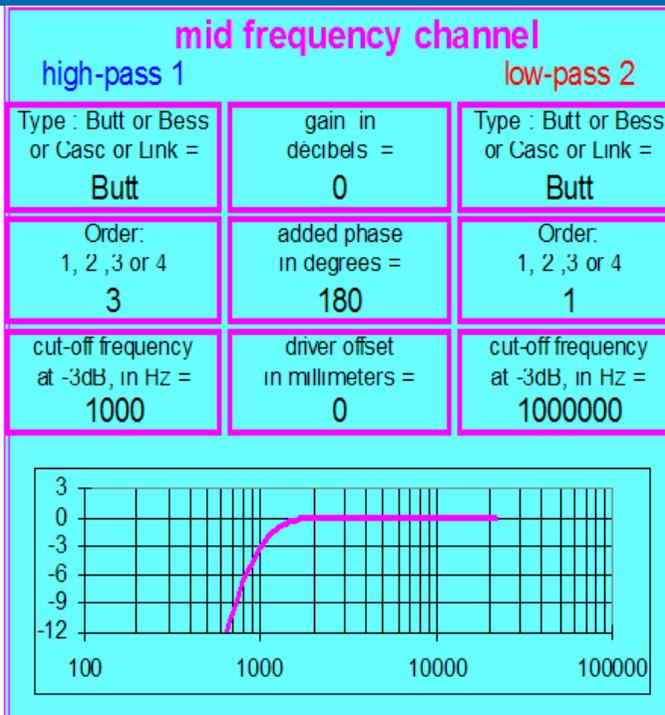
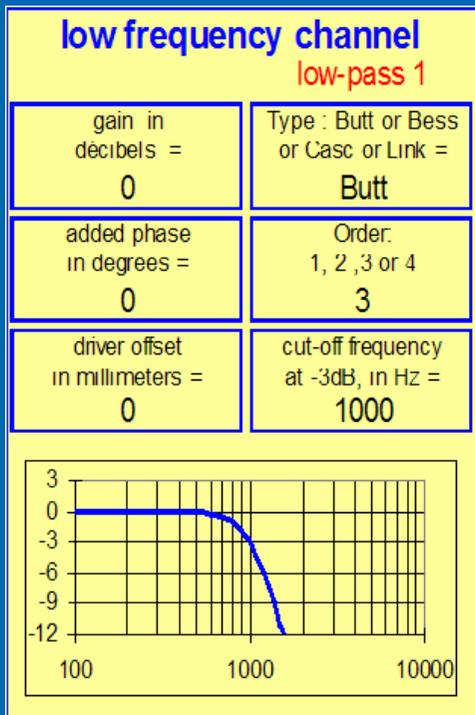
1) une excellente réponse impulsionnelle (pour l'onde directe)

ceci nécessite à la fois:

- une ondulation minimale de les courbe de réponse amplitude-fréquence
- une courbe de retard constante au dessous de 3kHz

2) une moindre signature sonore de la pièce d'écoute dans la zone de raccord entre les haut-parleurs

ceci nécessite une amplitude réduite des pics de la courbe de réponse en coïncidence



Ripple = 0,0 dB Enter your own parameters in the unprotected cells offset variation = 72 mm (f < 4kHz)

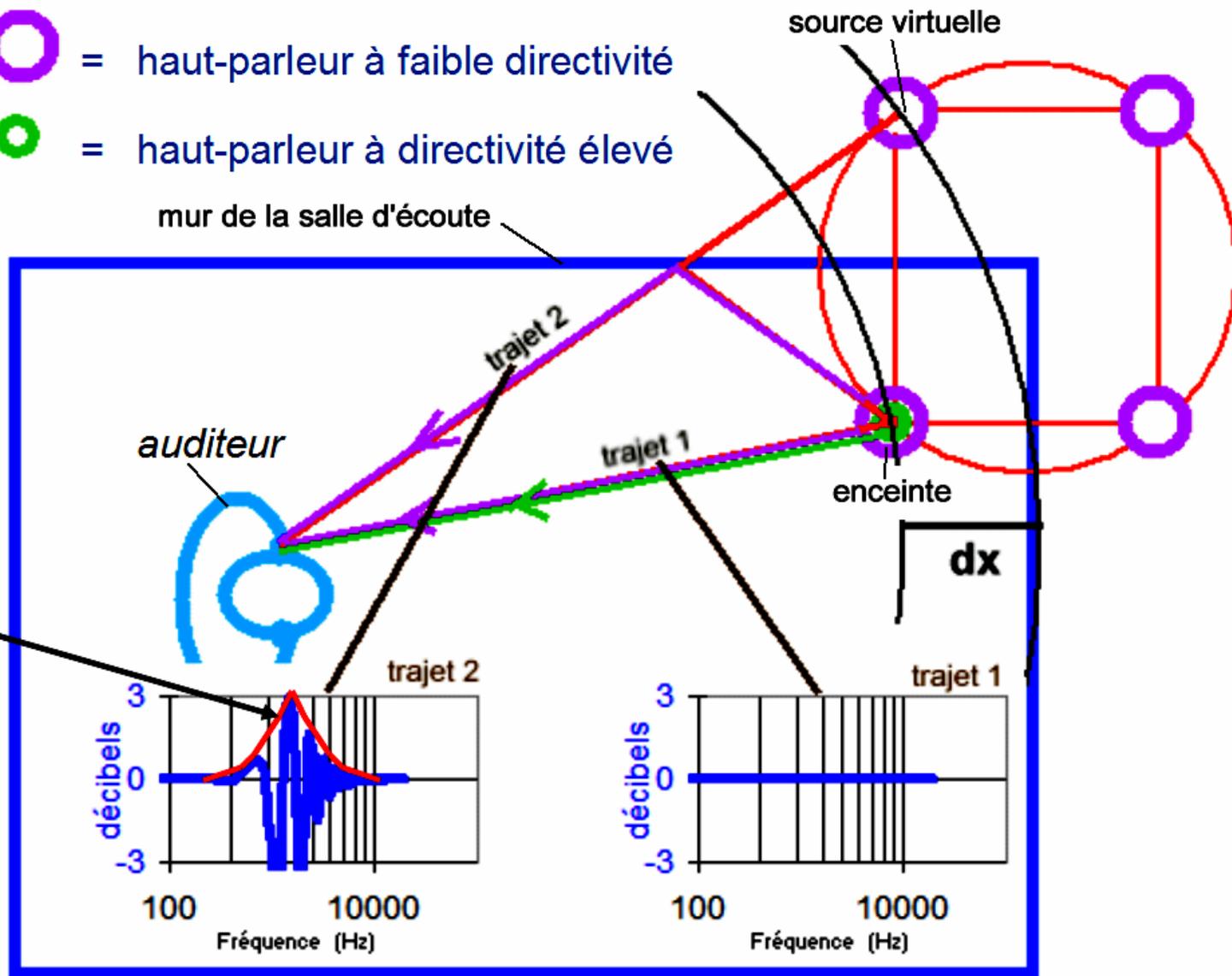
une copie d'écran de la feuille de calcul permettant la simulation d'un système à 3 voies

la courbe de réponse en coïncidence

-  = haut-parleur à faible directivité
-  = haut-parleur à directivité élevé

mur de la salle d'écoute

source virtuelle

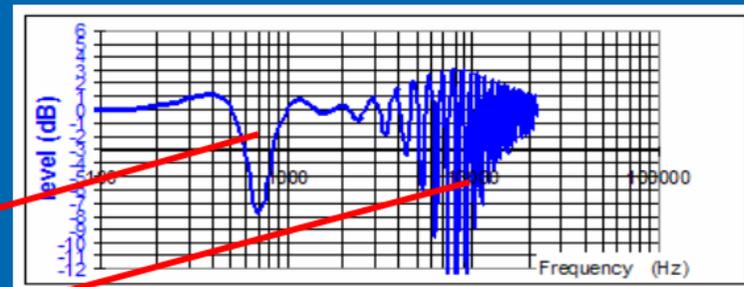
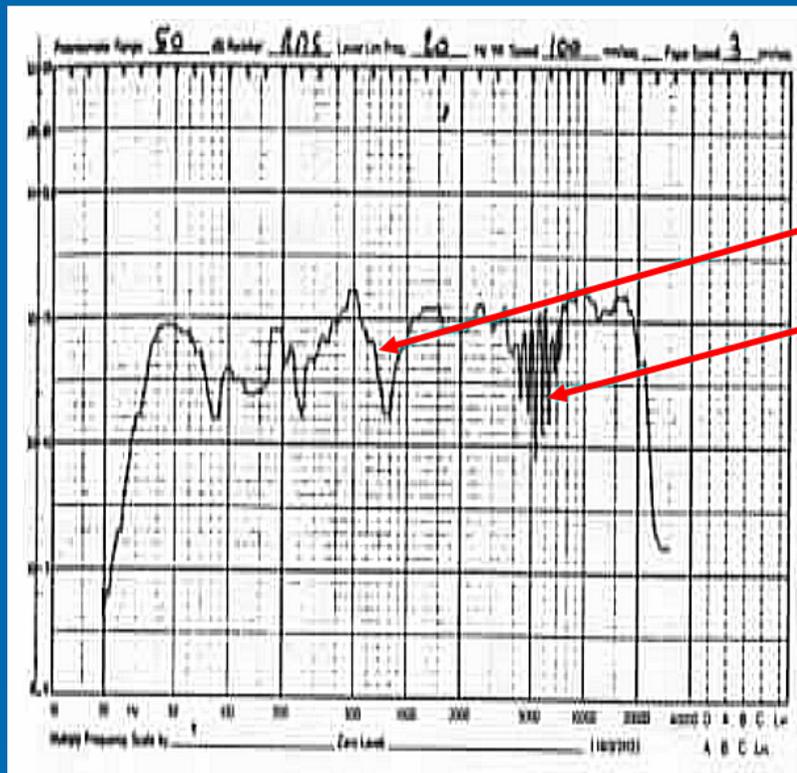


courbe de réponse en coïncidence

- la courbe de réponse en coïncidence est un outil précieux, bien que méconnu, qui permet de mieux comprendre, pour un système donné, la signature sonore d'une salle d'écoute
- dans la zone relais entre haut-parleurs, différents types de filtres donnent différentes courbes de réponse en coïncidence.

voir l'utilisation de la feuille de calcul

un exemple de simulation par la feuille de calcul : le système Onken -Iwata



résultat de la simulation par la
feuille de calcul proposée

Courbe de réponse en pression du système:

- Altec 416 + Grande Onken
- JBL2441 + pavillon Iwata-Guigue
- tweeter Fostex

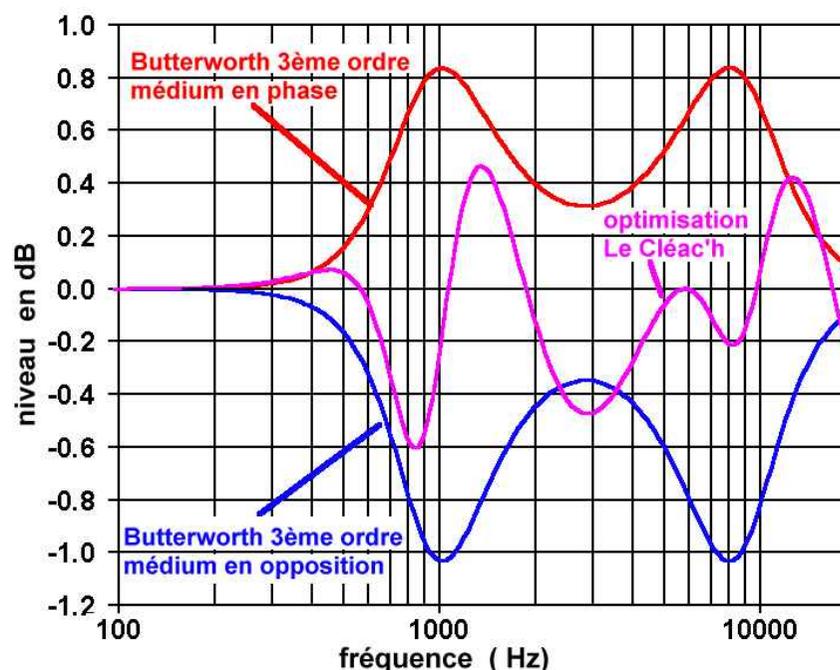
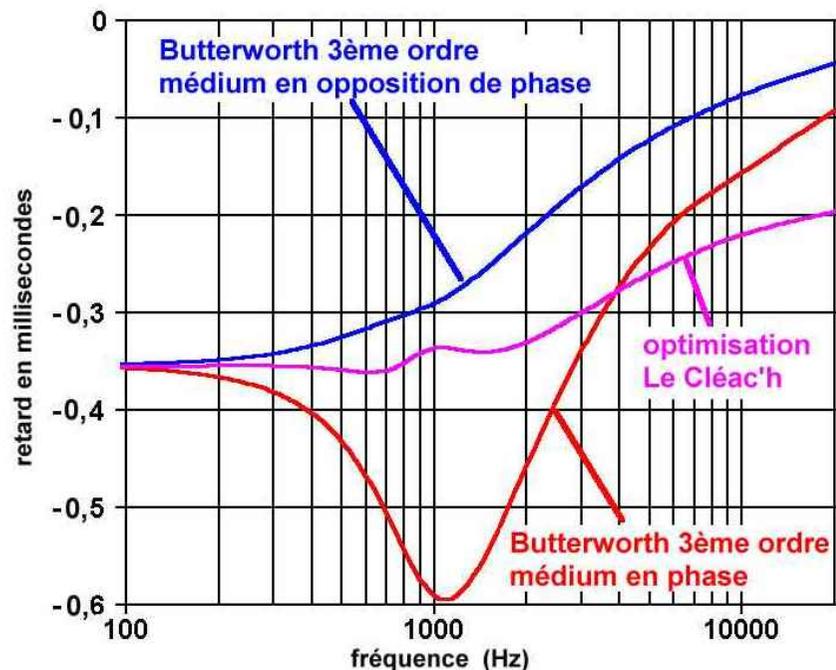


recul d'environ
35cm de la
chambre
JBL 2441

Altec 416C en enceinte Grande Onken

filtrage: $F_{c1} = 600\text{Hz}$, $F_{c2} = 6000\text{Hz}$
Butterworth 3ème ordre
HPs même polarité

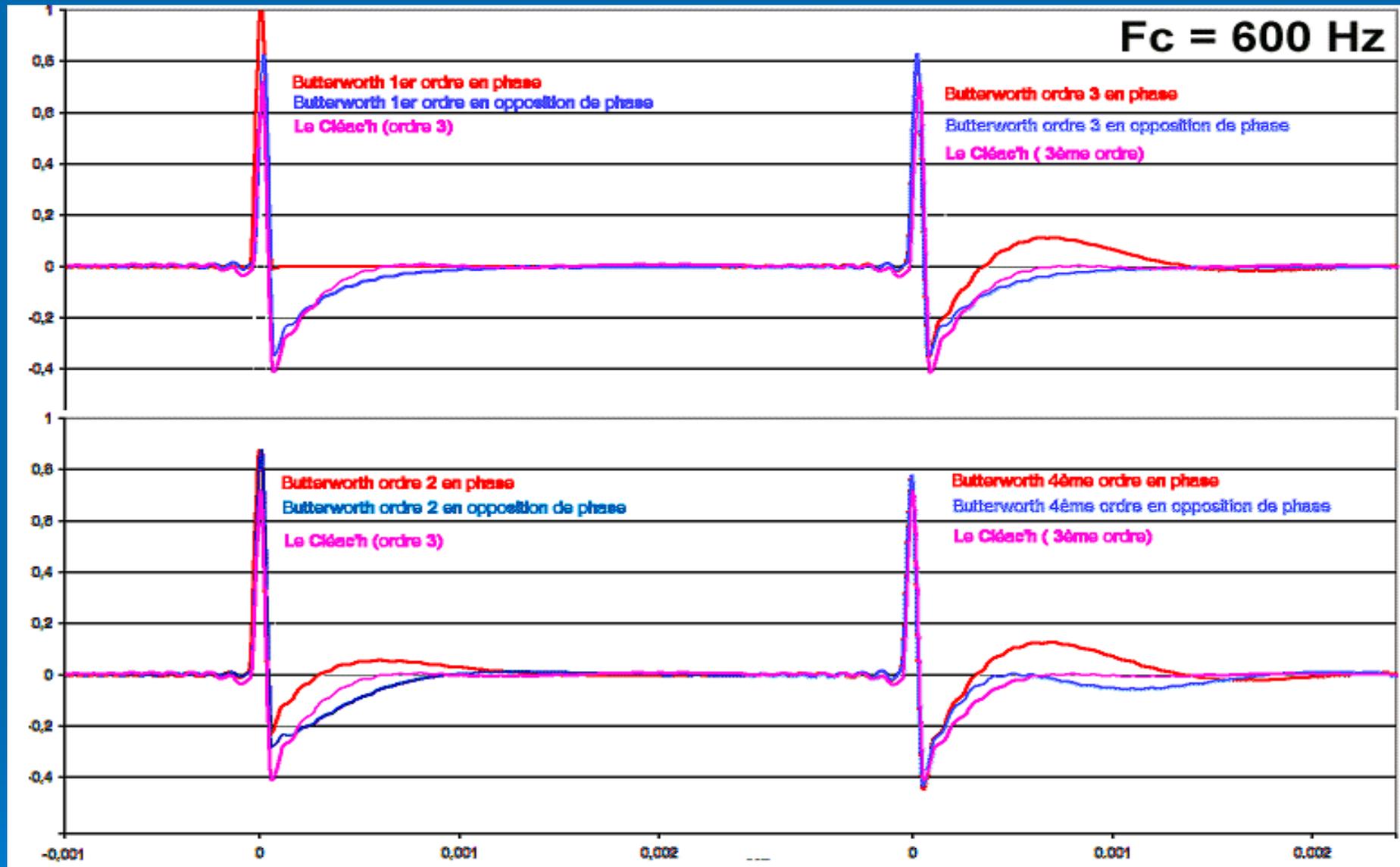
exemples de simulation par la feuille de calcul :



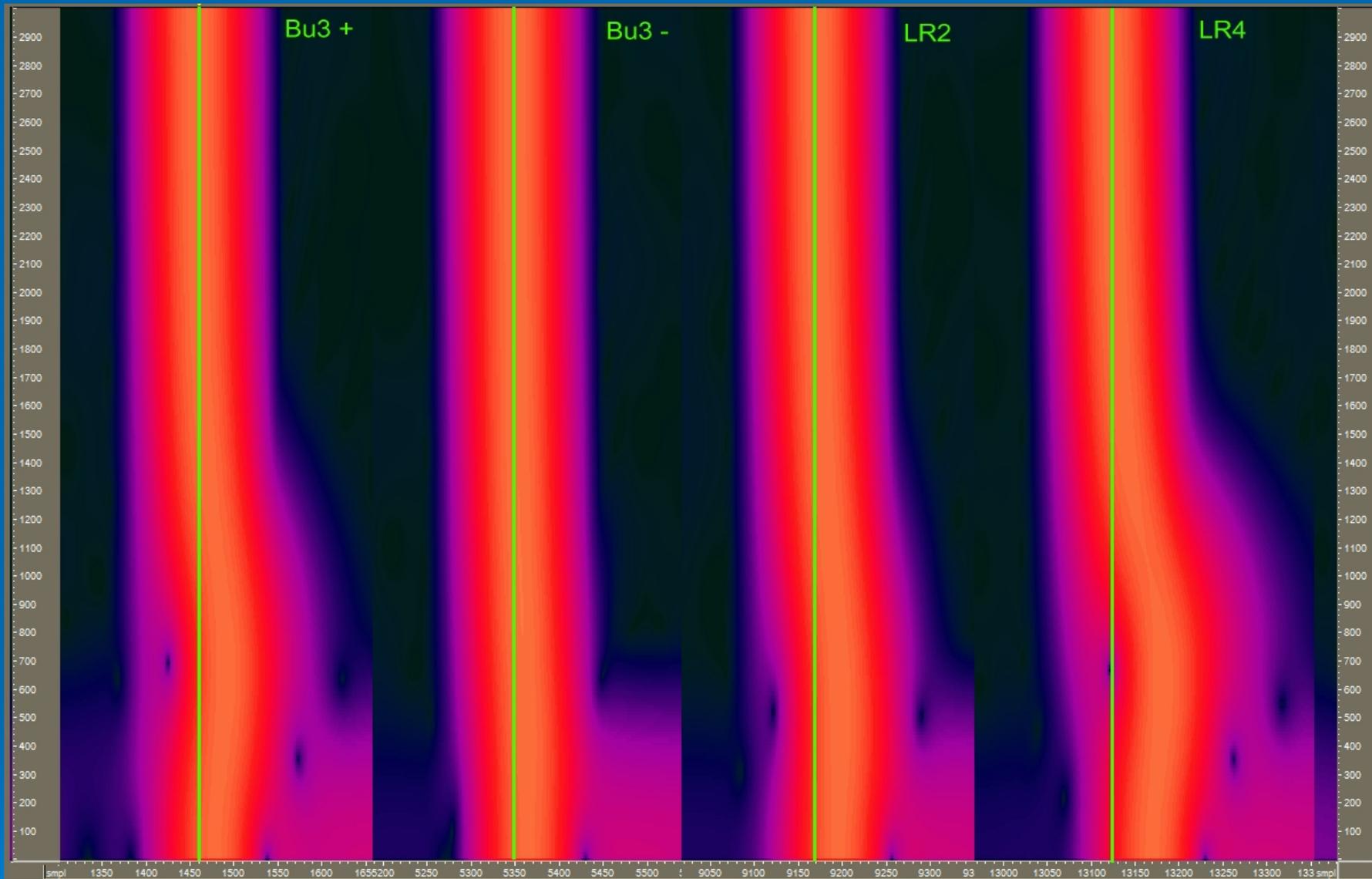
comparaison des réponses en amplitude et en phase de systèmes à 3 voies utilisant tous des filtres de Butterworth du 3ème ordre

Comparaison entre le
filtre quasioptimal du 3ème
ordre (filtre Le Cléac'h) et des
filtres classiques





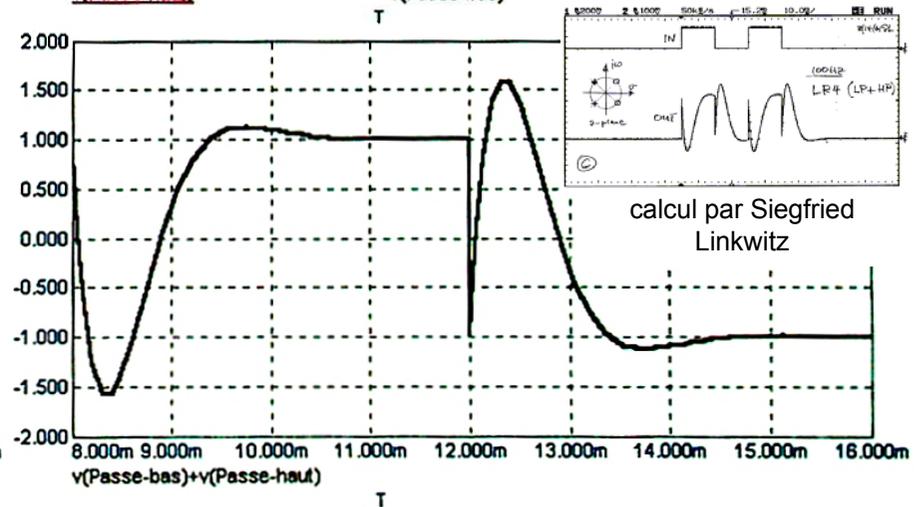
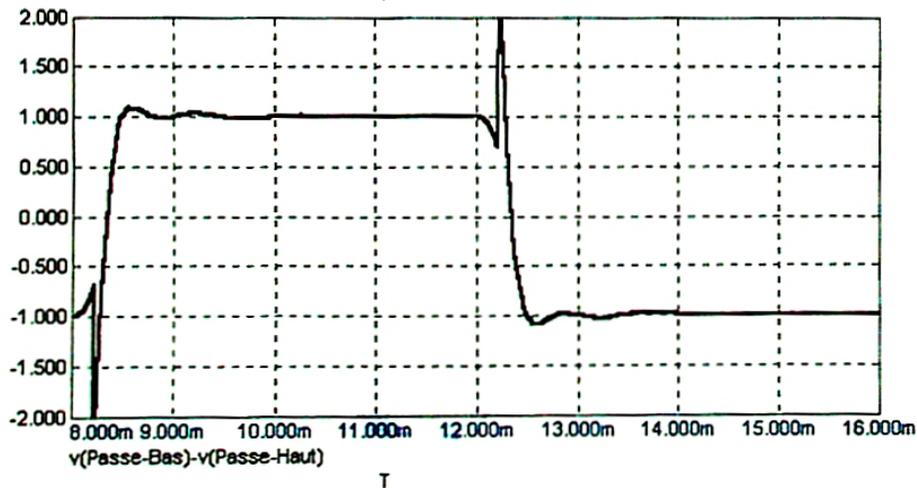
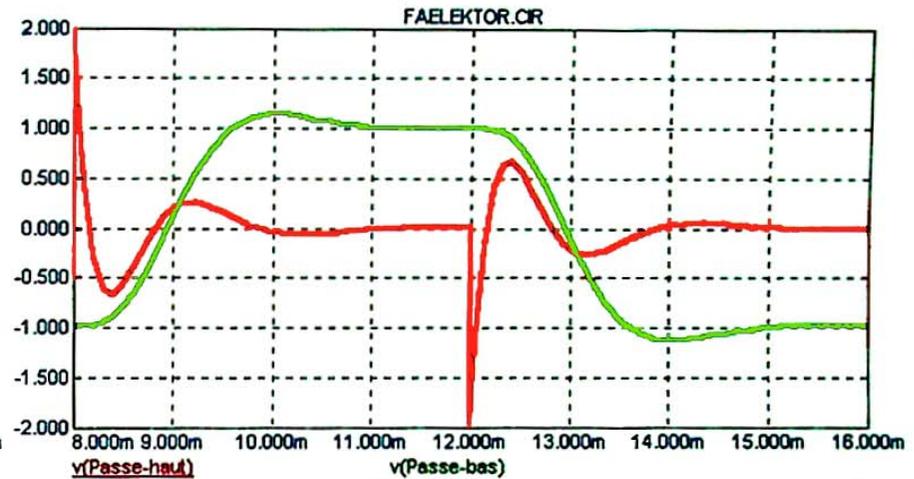
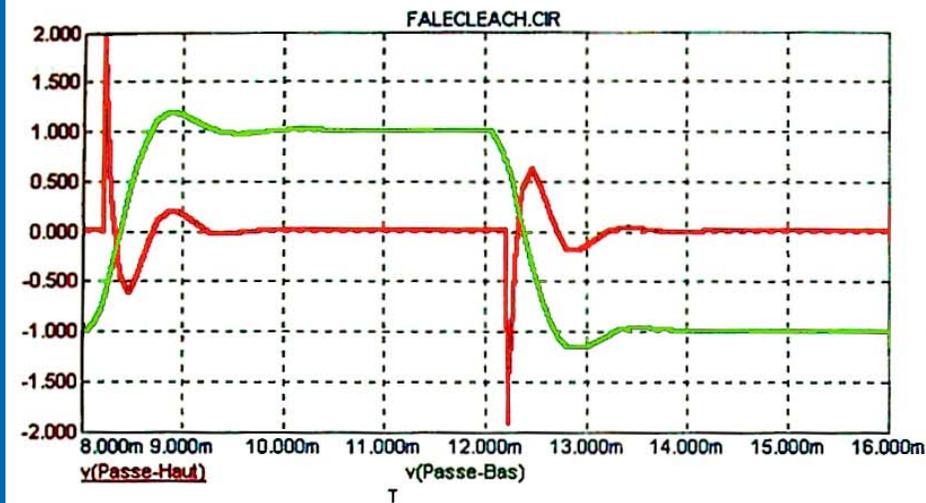
réponses impulsionnelles de systèmes à 2 voies utilisant différents filtres,
comparaison avec la méthode "Le Cléac'h"



comparaison des spectrogrammes de systèmes à 2 voies utilisant des filtres de Butterworth du 3ème ordre avec ou sans inversion de polarité du médium et des filtres de Linkwitz-Riley du 2ème ou 4ème ordre

réponse sur signaux carrés d'un système à 2 voies utilisant la méthode de filtrage "Le Cléac'h" et du même utilisant le filtrage de Linkwitz-Riley

simulation effectuée par Francis Brooke



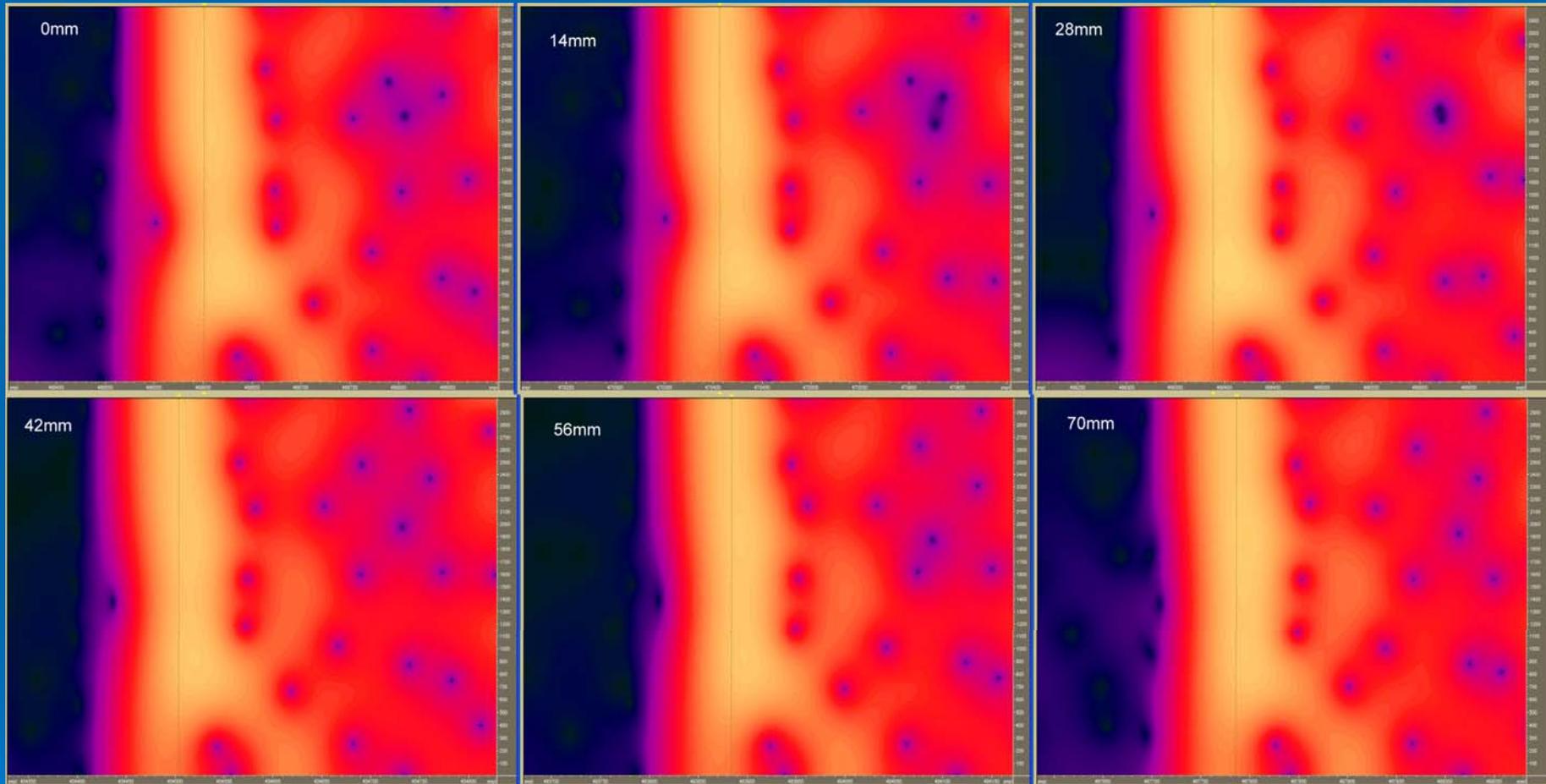
méthode Le Cléac'h

filtrage Linkwitz-Riley 4ème ordre

réglages d'un système à 2 voies selon la méthode Le Cléac'h

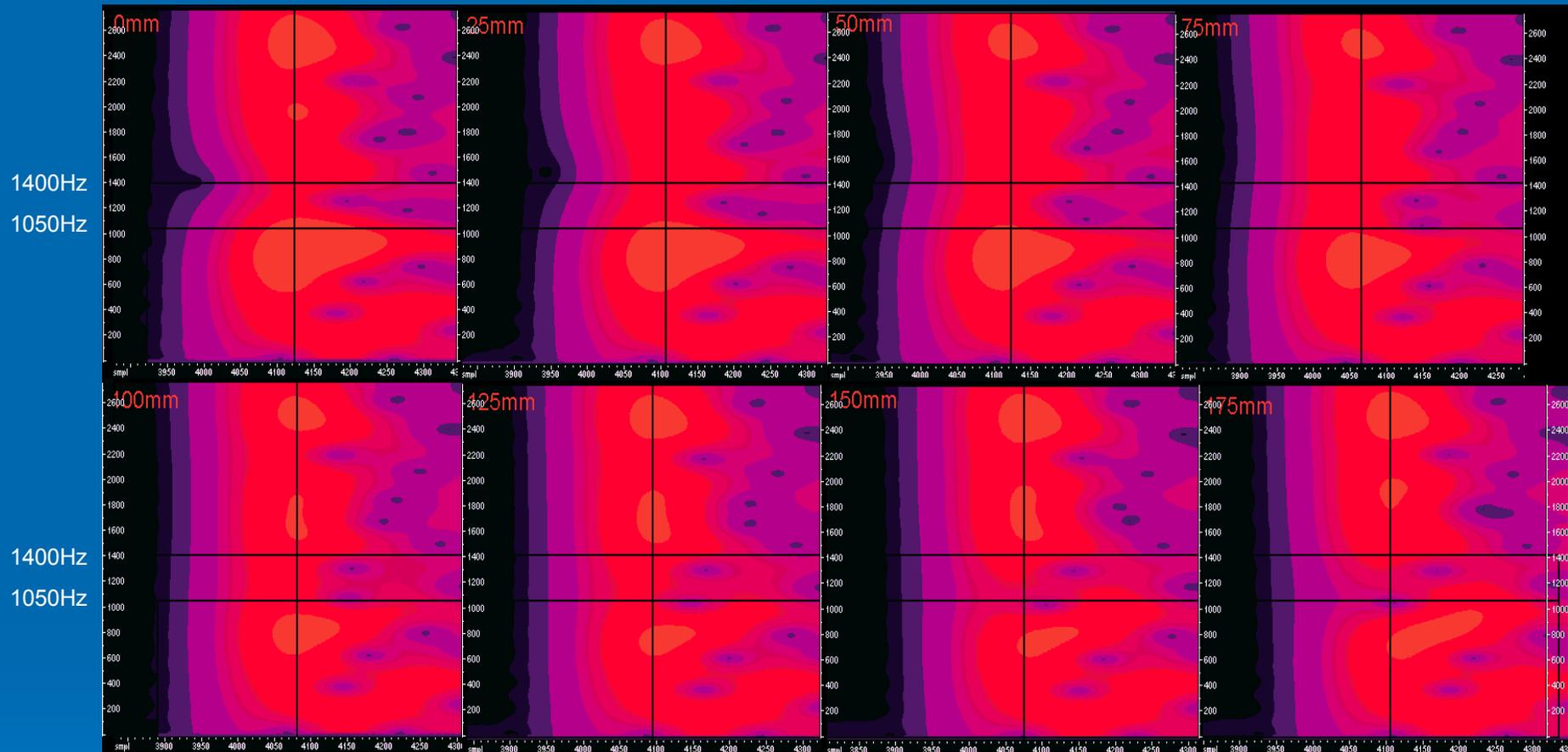
- 1.....seuls des filtres de Butterworth du 3^{ème} ordre sont utilisés.
- 2.....la fréquence de raccord F_r entre le passe-bas et le passe-haut est définie à -5dB.
- 3.....la fréquence de coupure F_l (à -3dB) du passe-bas est calculée par:
 $F_l = 0,87 \times F_r$
- 4..... la fréquence de coupure F_h (à -3dB) du passe-haut est calculée par: $F_h = 1,14 \times F_r$
- 5.....si les 2 haut-parleurs sont alignés à la même distance de l'auditeur il faut avancer le haut-parleur de grave vers l'auditeur d'une distance égale à 0,22 fois la longueur d'onde à F_r .
- 6.....la polarité du haut-parleur chargé des hautes fréquences doit être inversée.

alignement pas à pas d'un système à 2 voies utilisant la méthode de filtrage Le Cléac'h d'ordre 3



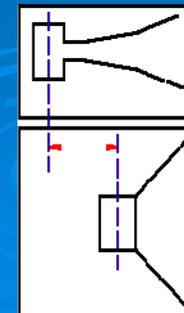
réglage du retard effectué sur le filtre numérique par pas de 14mm de 0 à 70mm

alignement pas à pas d'un système à 2 voies utilisant la méthode de filtrage Le Cléac'h d'ordre 3



réglage du retard effectué sur le filtre numérique par pas de 25mm de 0 à 175mm

dans cet exemple le retard optimal se situe à 100mm



Autres filtres à réponse impulsionnelle quasioptimale

- Ces filtres possèdent une réponse impulsionnelle meilleure que le filtre Le Cléac'h
- Basés sur des fonctions de transfert non classiques, ils n'ont toutefois pas une mise en oeuvre aussi facile.

« Un filtre quasi-Linkwitz du 3ème ordre »

par Francis Brooke:

But: obtenir un filtrage passe-bas + passe-haut pour lequel :

- la réponse en tension est quasi constante
- la courbe de retard est quasi constante.

Aucun filtre classique comme le Butterworth du 3ème ordre ou le Linkwitz-Riley du 4ème ordre ne peut être utilisés pour atteindre cet objectif. Un filtre à fonction de transfert particulière est nécessaire pour atteindre le but fixé.

Théorie: en partant d'une fonction de transfert pour un passe-bas du 3ème ordre/
$$PB = 1 / (1 + a_1 \cdot p + a_2 \cdot p^2 + a_3 \cdot p^3) \quad \text{avec} \quad p = j \cdot f / f_c$$

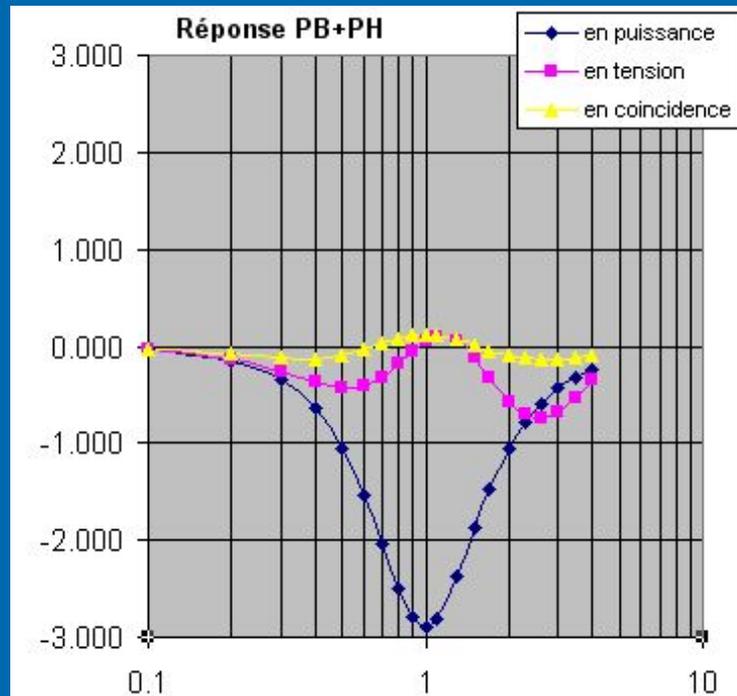
une réponse globale constante pour l'ensemble passe-bas + passe-haut nécessite que:

$$||PB|| = 1 / (1 + (f / f_c)^3) \quad \text{et} \quad ||PH|| = (f / f_c)^3 / (1 + (f / f_c)^3)$$

Il n'y a pas de solution exacte à ce problème mais une solution approchée existe pour :

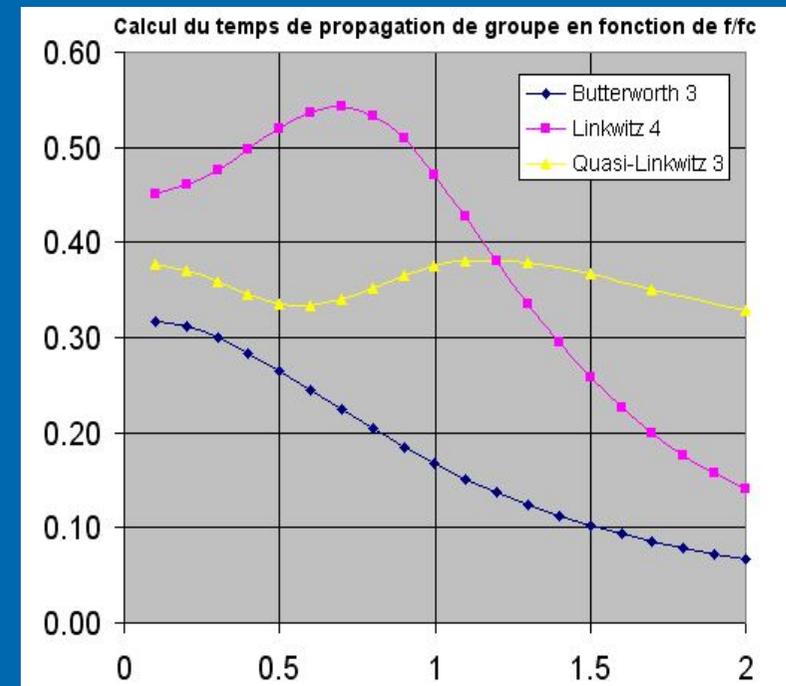
$$a_1 = 2.3732 \quad , \quad a_2 = 2.399 \quad \text{et} \quad a_3 = 0.9823$$

Ensuite, le passe-haut doit être retardé de 0,21 fois la longueur d'onde à la fréquence de coupure.



La courbe de réponse totale tension pour l'ensemble passe-bas + passe-haut (courbe jaune) tient dans un intervalle de $-0,75\text{dB}$ à $+0,09\text{ dB}$.

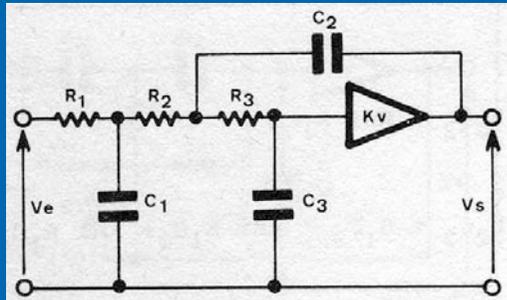
La courbe de réponse en coïncidence (module du passe-bas + module du passe-haut) varie dans un petit intervalle: de $-0,13\text{dB}$ à $+0,12\text{ dB}$.



La courbe de retard résultante (jaune) est presque constante quand on la compare aux filtres à 2 voies utilisant des filtres de Butterworth du 3^{ème} ordre ou des filtres de Linkwitz-Riley du 4^{ème} ordre.

Réalisation pratique

Passe-bas



La réalisation du passe-bas du 3ème ordre est classique

avec $R_1 = R_4 = R_3 = R$ et $K_V=1$

on obtient:

$$a_1 = R \cdot (C_1 + 3 \cdot C_3) \cdot (2\pi f_c) \quad \text{avec} \quad a_1 = 2,3732$$

$$a_2 = R_2 \cdot (C_1 + C_2) \cdot 2C_3 \cdot (2\pi f_c)^2 \quad \text{avec} \quad a_2 = 2,399$$

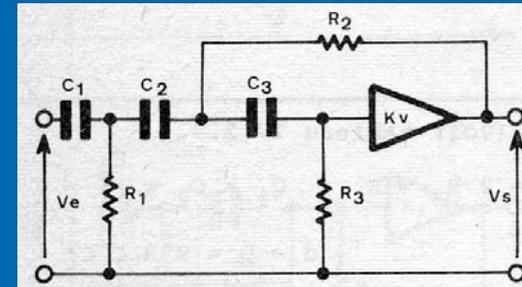
$$a_3 = R_3 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot (2\pi f_c)^3 \quad \text{avec} \quad a_3 = 0,9823$$

puis avec $C = 1 / (R \cdot 2\pi f_c)$

on obtient :

$$C_1/C = 1,332 \quad C_2/C = 2,125 \quad \text{et} \quad C_3/C = 0,347$$

Passe-haut



De manière similaire le passe-haut est réalisé avec:

$$C_1 = C_2 = C_3 = C \quad \text{et} \quad K_V=1$$

on obtient alors:

$$a_2/a_3 = C \cdot (2R_1 + 2R_2) \cdot (2\pi f_c)$$

$$a_1/a_3 = C^2 \cdot (3R_1 + R_3) \cdot R_2 \cdot (2\pi f_c)^2$$

$$1/a_3 = C^3 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot (2\pi f_c)^3$$

ensuite avec $R = 1 / (C \cdot 2\pi f_c)$

on obtient:

$$R_1 / R = 0,751 \quad R_2/R = 0,471 \quad \text{and} \quad R_3/R = 2,882$$

Francis Brooke, Lescar, France

<http://francis.audio.monsite.wanadoo.fr/>

Filtre proposé par Hervé Lebollo

- Le passe bas a une fonction de transfert :

$$(1+4p) / (1+4p+4p^2+p^3)$$

- Le passe haut a une fonction de transfert:

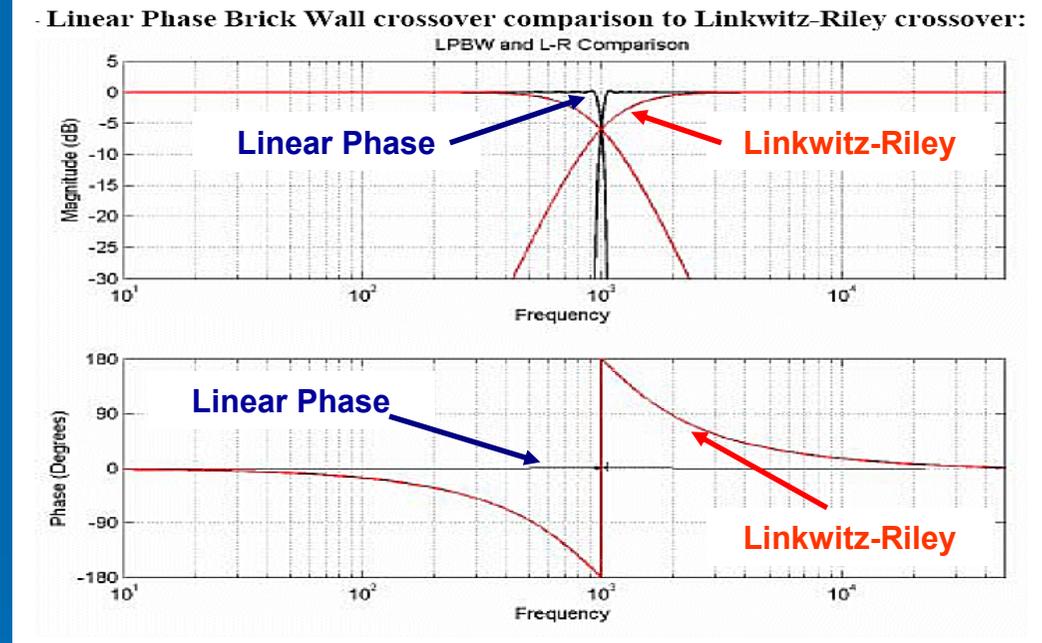
$$(p^3+4p^2) / (1+4p+4p^2+p^3)$$

le futur

alors que l'audio digital arrive maintenant à l'age adulte, on peut penser que le filtrage à réponse impulsionnelle infinie (analogique ou numérique) va tendre vers l'obsolescence.

Les méthodes de filtrage quasioptimal et d'alignement telles que celles proposées ici seront probablement remplacée rapidement par des méthodes basées sur le filtrage numérique à réponse impulsionnelle finie qui permet l'obtention d'une réponse à phase nulle et des pentes d'atténuation de plusieurs dizaines à centaines de décibels par octave.

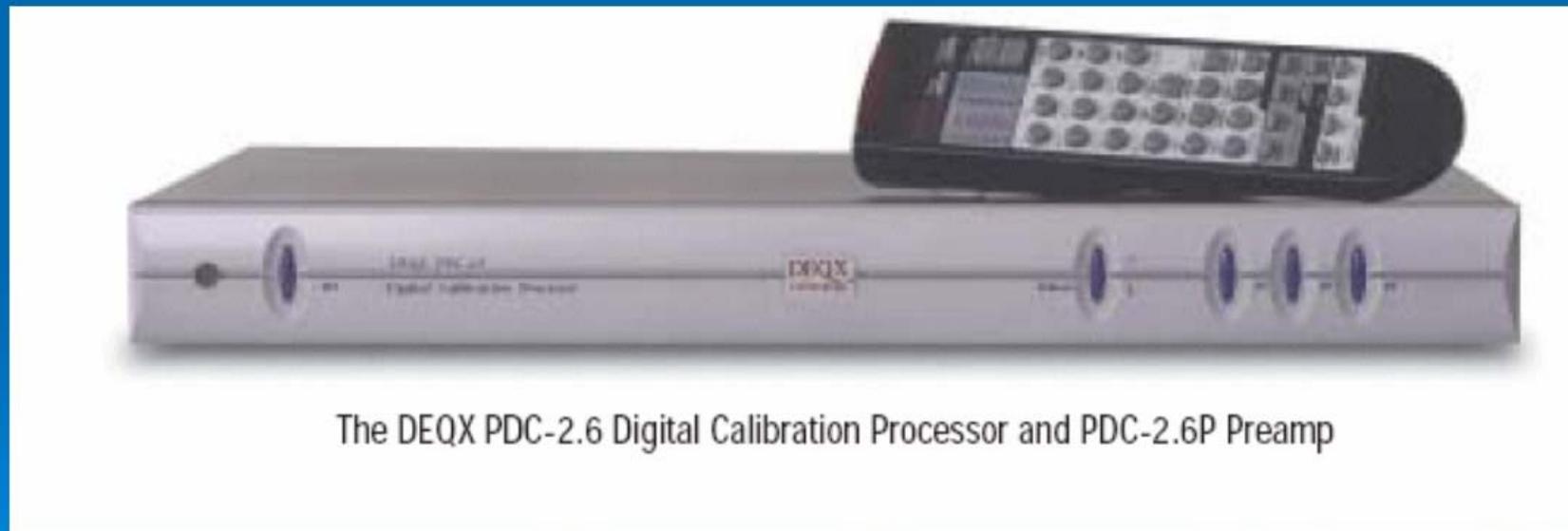
un exemple de filtre professionnel à phase linéaire utilisant des filtres numériques à réponse impulsionnelle finie



d'après "Lake Contour brick Wall filters"

<http://www.lake.com.au/proaudio>

quelques appareils haute-fidélité utilisant des filtres à phase linéaire



The DEQX PDC-2.6 Digital Calibration Processor and PDC-2.6P Preamp