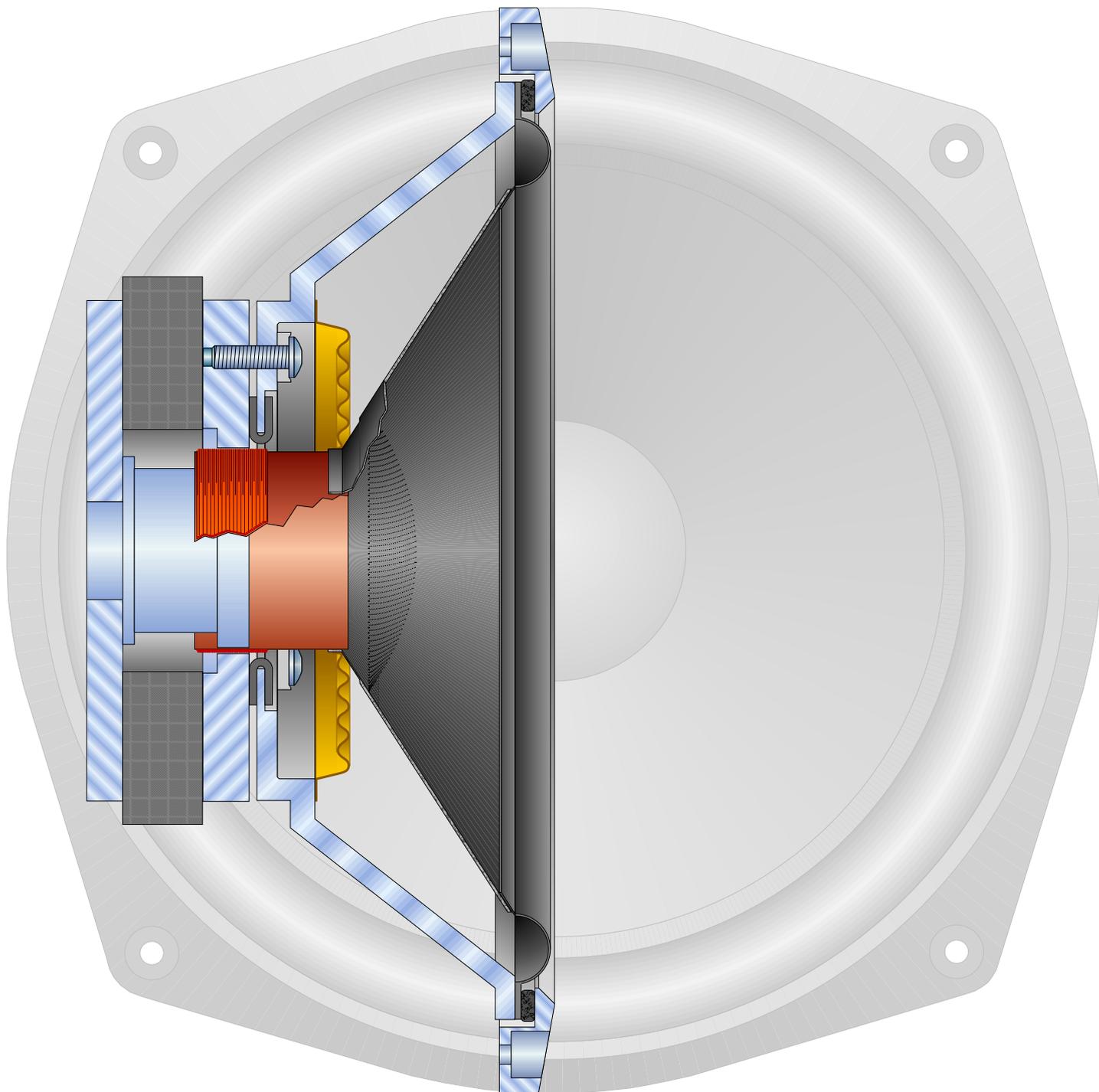


Les haut-parleurs et enceintes acoustiques

Condensé descriptif des technologies et des défis, par l'image



avril 2025

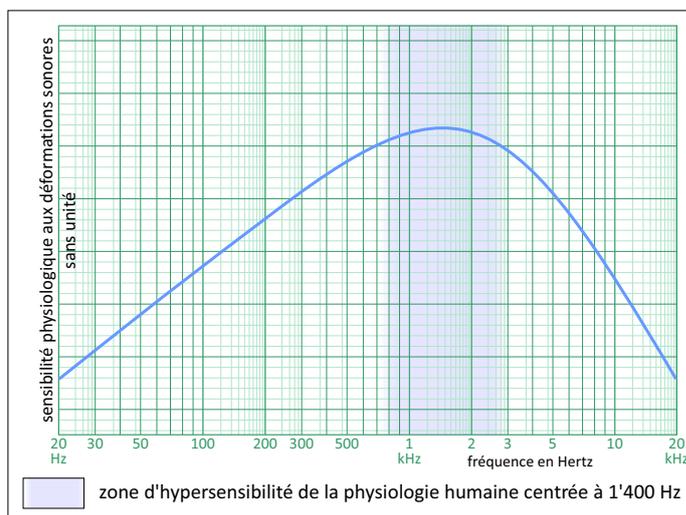
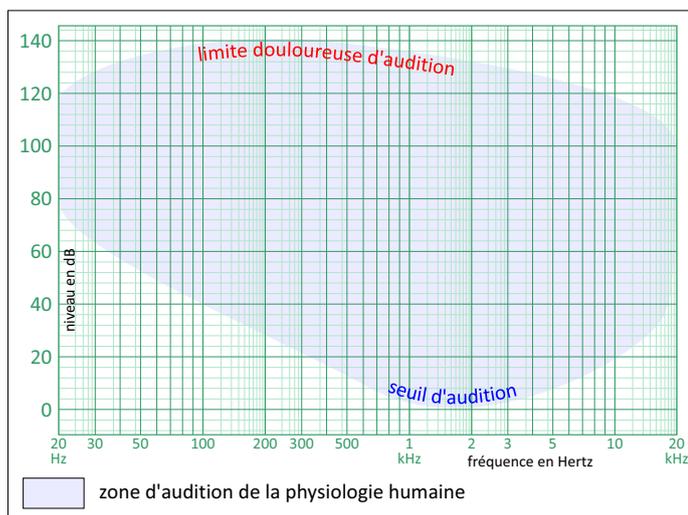
La sensibilité physiologique humaine

La sensibilité physiologique humaine est à la base de toutes les contraintes de la reproduction musicale de haute-fidélité. Cette sensibilité n'est linéaire ni en fréquence, ni en amplitude.

Entre 78 et 102 décibels (dB), un être humain âgé de 15 à 30 ans capte les signaux sonores situés entre 20 et 20'000 Hertz (Hz). Plus âgé, ses oreilles perdent quelque peu de sensibilité dans l'extrême aigu, puis au-delà de 60 ans, les sons situés en-dessus de 12 ou 14kHz sont atténués mais non supprimés.

Durant un concert, un mélomane de cet âge capte la musique avec les oreilles de son âge. Cependant, le système d'analyse de son cerveau possède des facultés meilleures que la majorité des personnes de 20 ans. C'est l'acquis culturel qui lui permet de mieux savoir écouter, même s'il entend moins bien.

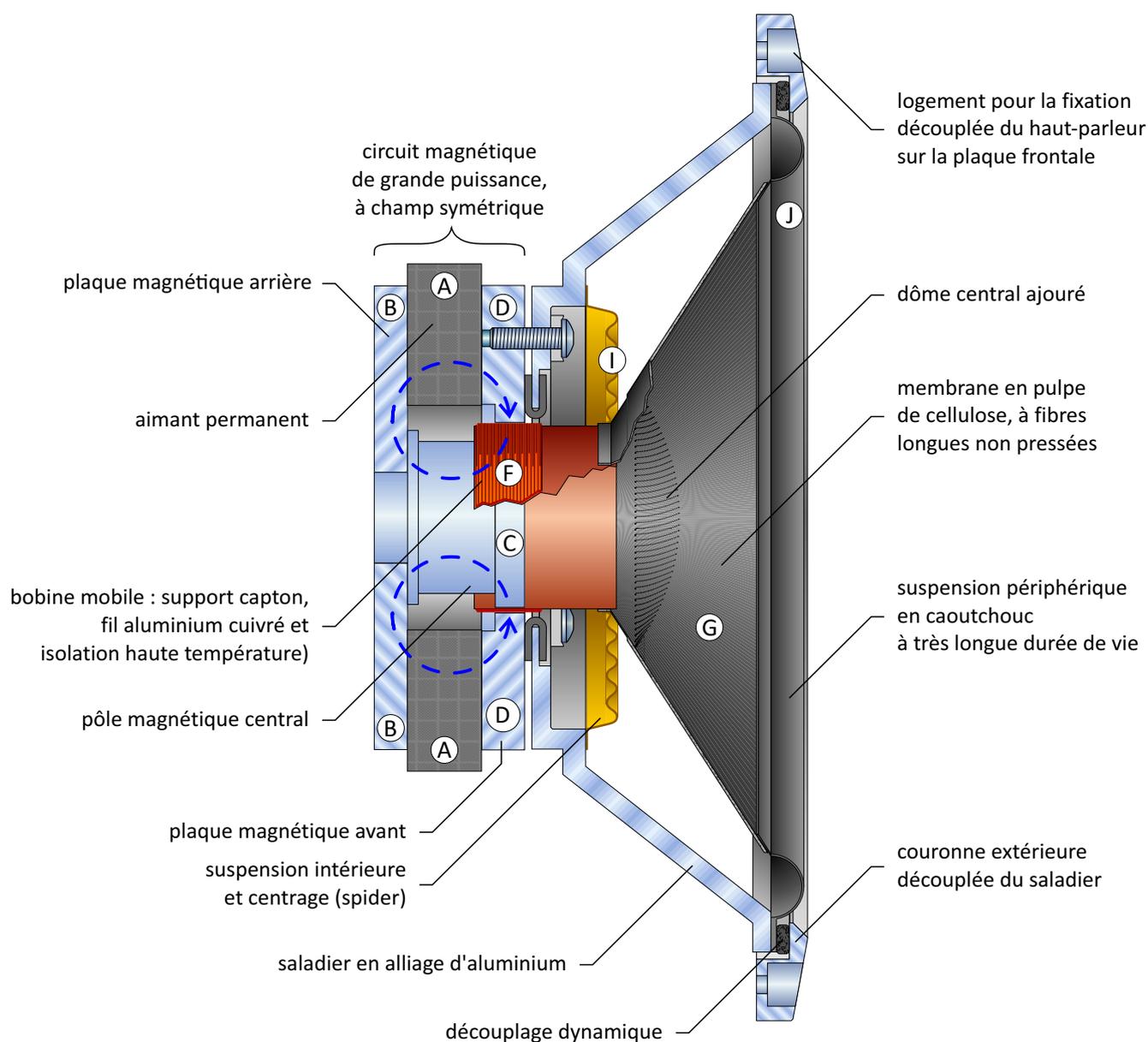
Nous pourrions dire que nous entendons par nos oreilles et nous écoutons par notre cerveau. Ou encore, les oreilles sont comparables à du hardware qui vieillit avec les années (microphones), alors que notre cerveau fonctionne grâce à un software constamment mis à jour qui se perfectionne avec l'âge (acquis culturel).



Notre sensibilité physiologique n'est donc pas linéaire en fréquence, loin de là. Il existe une zone d'hypersensibilité (zone de la parole humaine) située autour de 1'400 Hz. Cette plage de fréquence située sur 2 octaves autour de 1'400 Hz, c'est-à-dire 700 à 2'800 Hz, est une "zone sacrée" où les efforts les plus draconiens doivent être réunis pour diminuer toute forme de déformation dans la reproduction du son (distorsions, traînage et accident de directivité).

Cette plage de fréquence impose donc, dans la mesure du possible, de construire une enceinte acoustique à partir et autour d'un haut-parleur de médium. Nous demandons à ce dernier un travail d'orfèvre tout en le soumettant uniquement à un champ d'activité réduit à ces 2 seules octaves. Pour compléter la reproduction spectrale dans son entier, on ajoute un haut-parleur de grave (woofers) et un haut-parleur d'aigu (tweeter). Par conséquent, une enceinte acoustique performante doit posséder trois haut-parleurs, ni plus ni moins, dont un vrai médium.

Le principe de fonctionnement du haut-parleur



Transducteur de grave B245-5

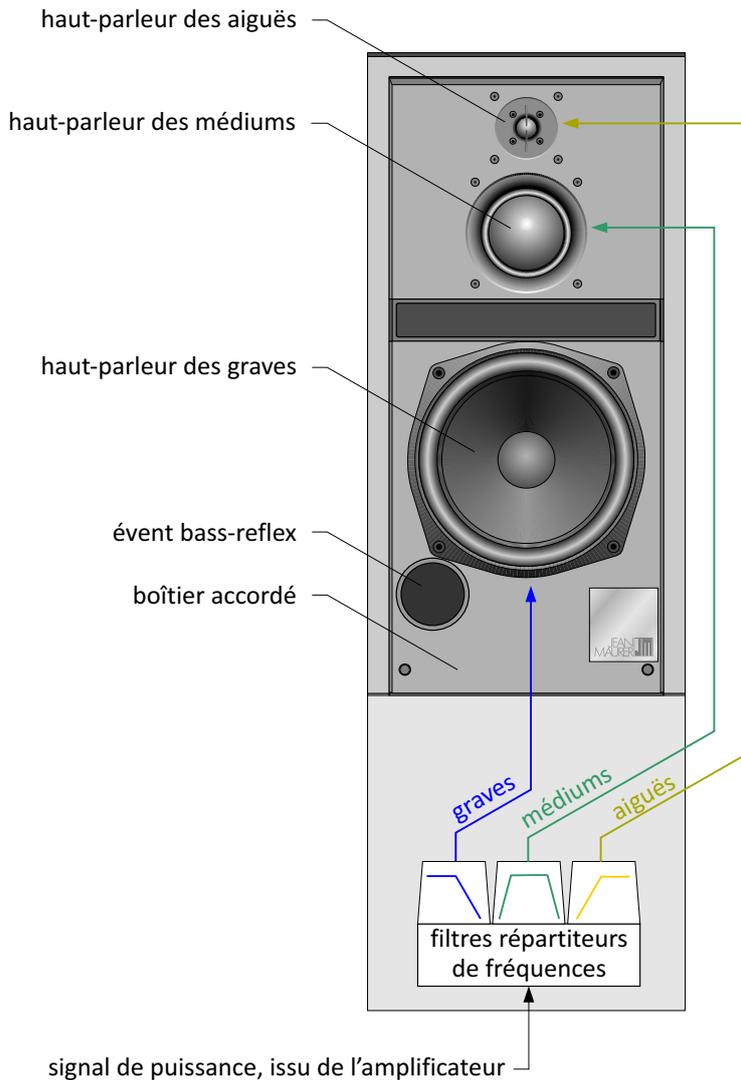
Principe de fonctionnement d'un haut-parleur

Le circuit magnétique, constitué de l'aimant ferrite circulaire A, de la pièce polaire arrière B, du noyau central C et de la pièce avant D, crée un champ magnétique très intense dans l'étroite fente circulaire, située entre D et C, appelée entrefer. La bobine mobile F et la membrane conique G sont suspendues, par les suspensions I et J, de telle sorte que cette bobine est centrée dans l'entrefer sans le toucher.

Le courant électrique venant de l'amplificateur traverse la bobine mobile et, sous l'action du champ magnétique intense de l'entrefer, va pousser en avant la membrane ou la tirer en arrière, suivant le sens de ce courant.

En se déplaçant ainsi d'avant en arrière au rythme du signal électrique (qui est l'image du son capté par le microphone à la prise de son) la musique est recréée avec plus ou moins de fidélité.

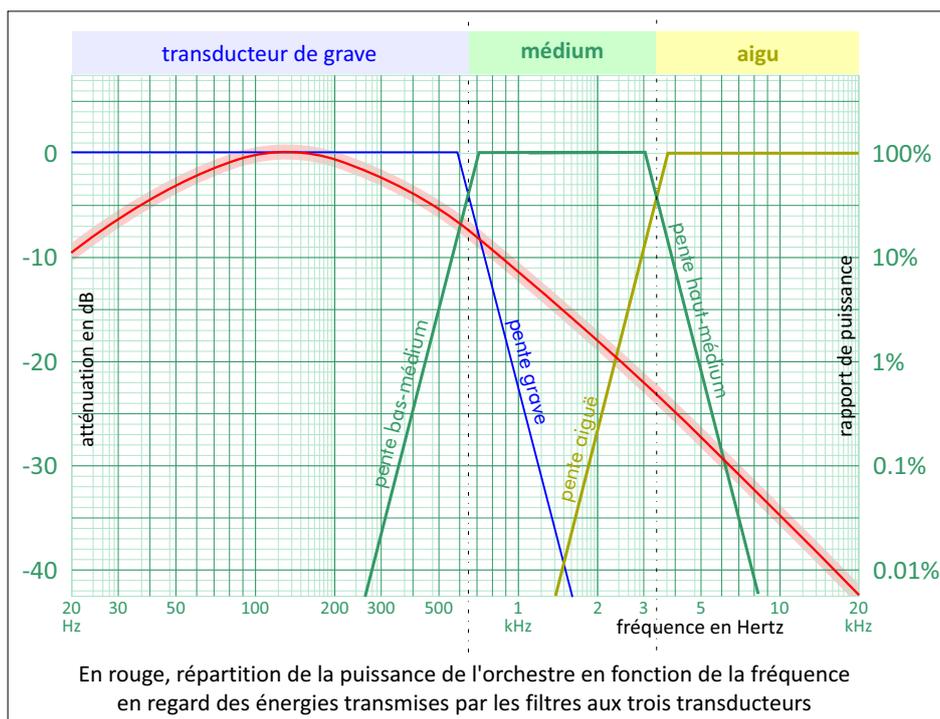
La constitution d'une enceinte acoustique et la répartition de la charge en puissance



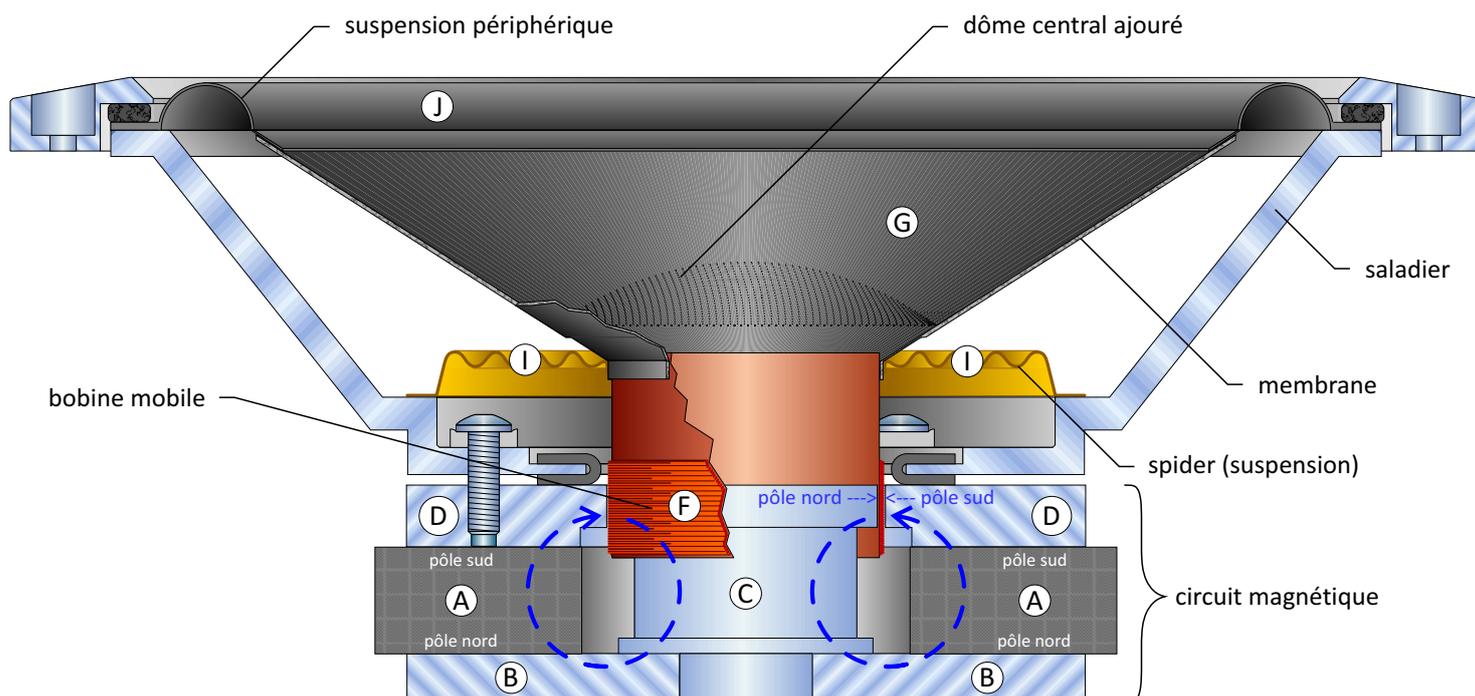
Une enceinte acoustique est constituée de trois groupes d'éléments, d'importance équivalente dans la performance globale de fidélité, à savoir :

- les haut-parleurs, ou transducteurs, qui transforment le signal électrique, venant de l'amplificateur, en mouvements mécaniques puis en sons.
- les filtres qui aiguillent ce signal électrique vers chacun des haut-parleurs, en fonction de son contenu fréquentiel.
- le ou plutôt les boîtiers de l'enceinte, qui doivent traiter l'onde acoustique arrière (sons créés par la membrane à l'intérieur de sa propre enceinte) de chacun des haut-parleurs. Ceci, afin d'éviter que cette onde arrière ne perturbe le signal sonore direct.

Dans le cas d'un orchestre symphonique, la plus grande partie de l'énergie est reproduite par le haut-parleur des graves (~80%), responsable de la profondeur de l'image musicale comme de l'épaisseur instrumentale. La plus haute fidélité de reproduction est demandée au transducteur de médium, responsable de l'intelligibilité du rendu musical. L'espace sonore est restitué par le haut-parleur d'aigu à qui l'on demande la plus grande rapidité de réaction afin de reproduire des signaux bien au-delà de 20 kHz.

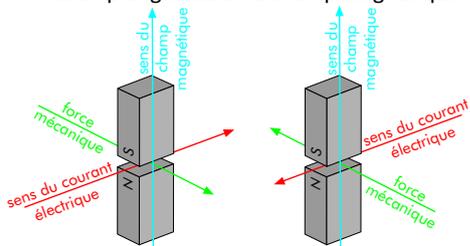


Les quatre principaux paramètres du haut-parleur



Facteur de force : $B \cdot l$

correspond au champ magnétique dans l'entrefer (fente circulaire située entre C et D) multiplié par la longueur du fil de la bobine mobile plongée dans ce champ magnétique



Tesla-mètre
(T·m)

Masse mobile : m

(communément désignée par M_{ms}) correspond à la somme des masses de la bobine mobile (F) + membrane (G) + une partie des suspensions (I+J) soit celles qui sont en mouvement



gramme
(g)

Compliance : C

(communément désignée par C_{ms}) correspond à l'élasticité des 2 suspensions: périphériques (J) + de centrage intérieur (I)



millimètre/Newton
(mm/N)

Surface : S

correspond à la surface émissive totale, soit la surface de la membrane (G) + une partie de la suspension périphérique (J)



$S = \pi \cdot r^2$
mètre²
(m²)

et **Redc** qui est la résistance en courant continu de la bobine mobile (F)

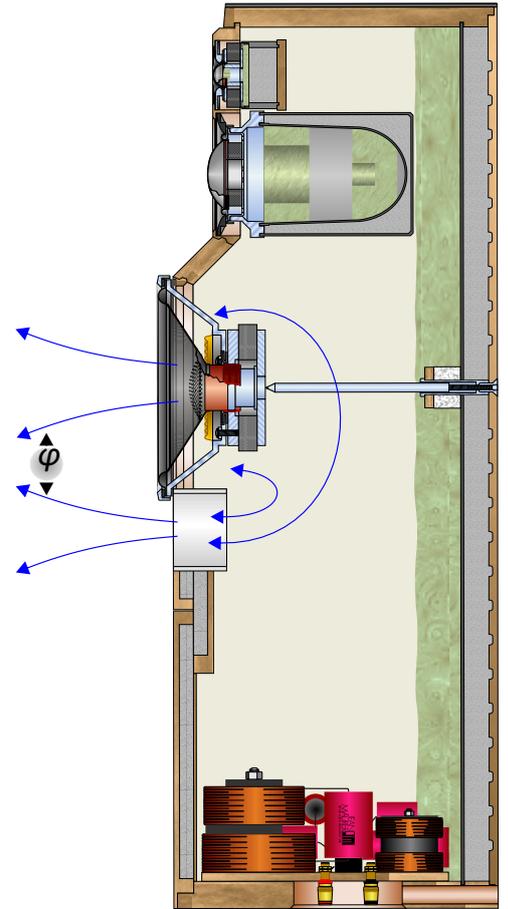
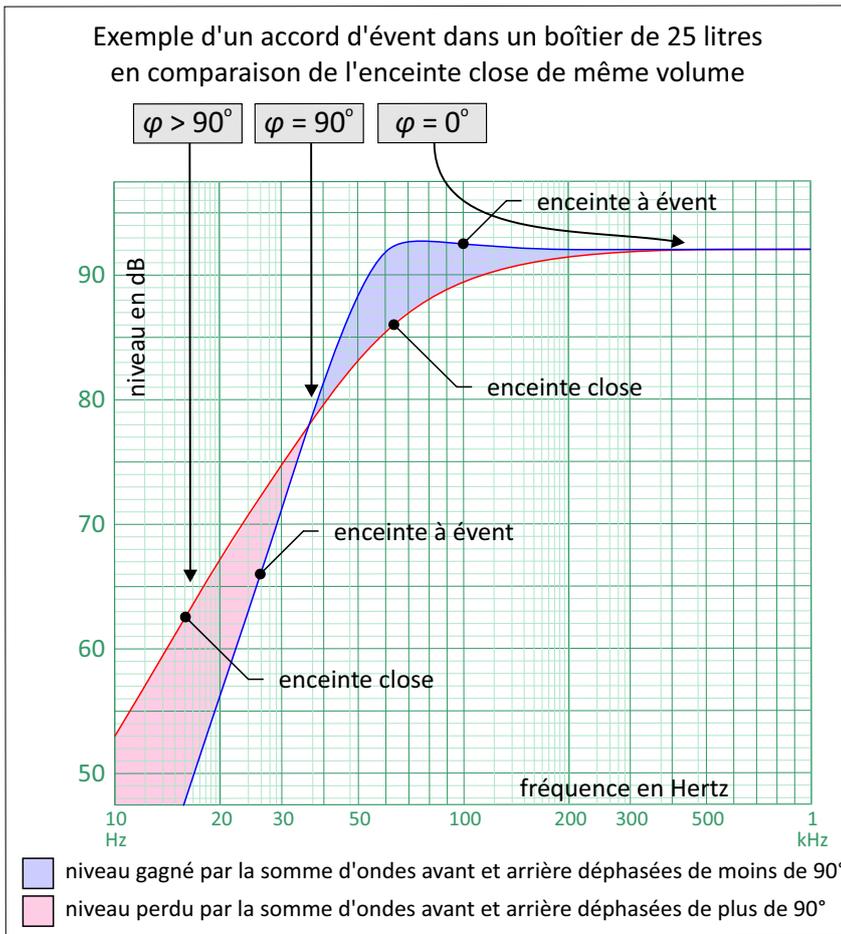
Le rendement du haut-parleur est proportionnel à :

$$\eta \approx \frac{S \cdot (B \cdot l)^2}{m^2 \cdot R_{edc}}$$

Dans cette équation, la compliance **Cms n'intervient pas**

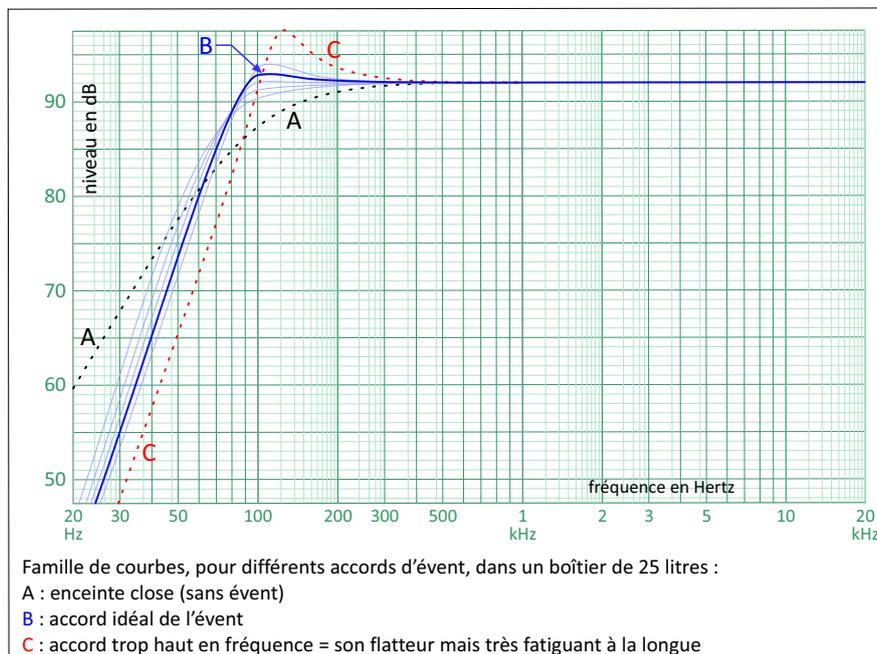
Grâce à cette formule, nous constatons que la masse mobile intervient au carré de sa valeur. Par exemple, dans le cas de notre haut-parleur B245-5, d'une masse mobile de 33 grammes, le rendement sera baissé de 6.15% (c'est-à-dire de 0.52dB) si 1 gramme de colle est gaspillé dans la fabrication de l'équipage mobile.

Le boîtier accordé par événement



Aux fréquences extrêmement basses, l'événement transmet beaucoup d'énergie aérienne (sonore) de l'intérieur vers l'extérieur du boîtier. Cette énergie, qui diminue avec l'augmentation de la fréquence, devient pratiquement nulle au-dessus de 250Hz.

Par rapport à un boîtier clos, un boîtier avec un événement bass-reflex bien calculé permet donc de récupérer une certaine quantité d'énergie de l'onde arrière du woofer pour la reporter dans la pièce d'écoute (avec une relation de phase favorable) et de diminuer les fréquences extrêmement basses, peu audibles et nocives pour le haut-parleur (avec une relation de phase défavorable). Ce système permet donc de linéariser la réponse en fréquences dans les graves.

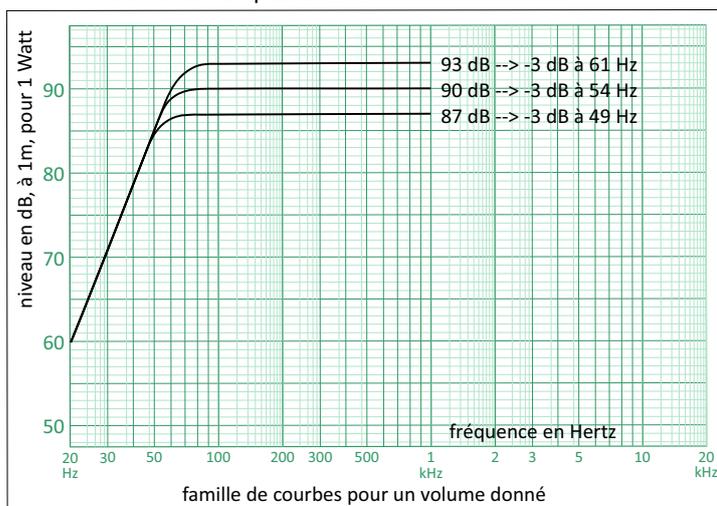


Les critères de base de la voie grave

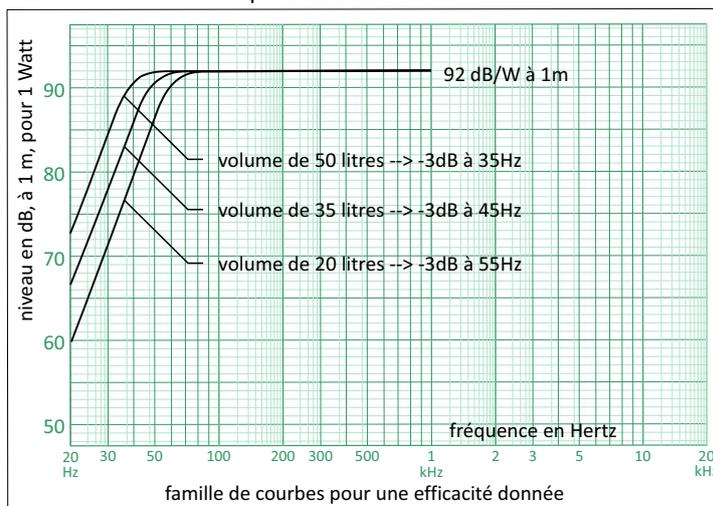
- 1- **l'efficacité** (dB/W à 1m) aussi appelé par abus de langage le rendement
- 2- **le volume** (litres) est le type de charge (volume clos, système à événement, ou à charge passive)
- 3 - **la bande passante** dans l'extrême grave

Ces trois critères de la voie grave ne peuvent déroger aux règles de la physique, c'est-à-dire :

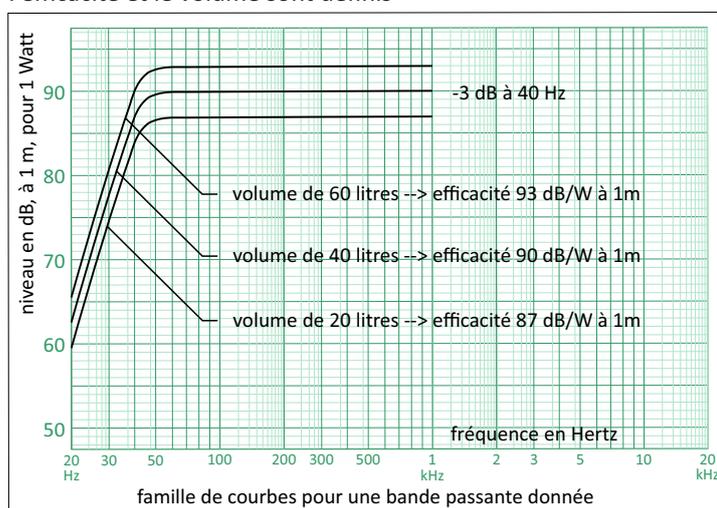
pour un volume déterminé :
l'efficacité et la bande passante sont définis



pour une efficacité déterminée :
le volume et la bande passante sont définis



pour une bande passante déterminée :
l'efficacité et le volume sont définis



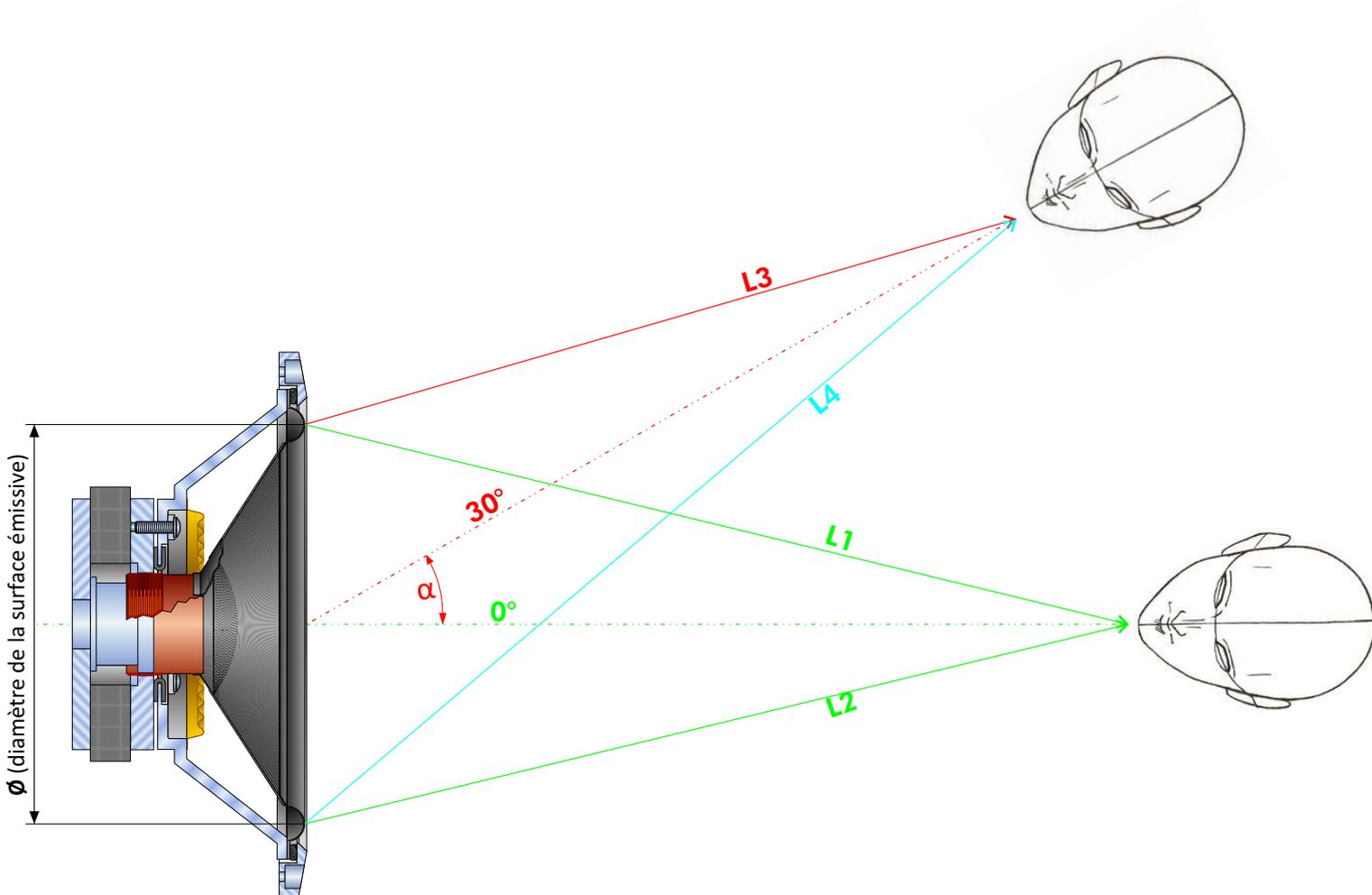
- 4- **le niveau maximum admissible** en décibels (dB)
- 5- **les autres performances musicales** (distorsions, traînage, ...)
- 6- **la fiabilité** (en limite de charge et en vieillissement)

L'origine de la directivité d'un haut-parleur

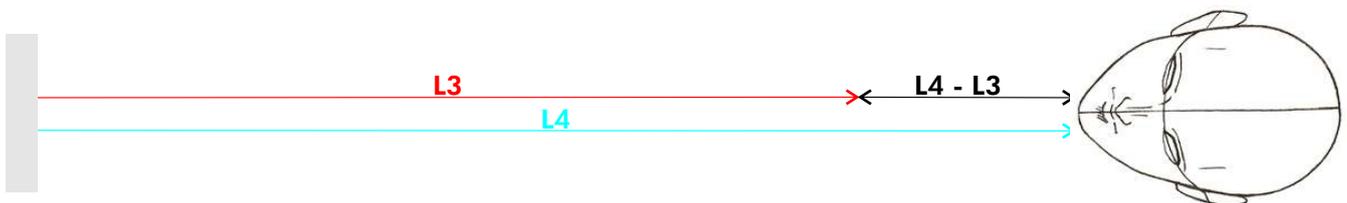
La directivité d'un haut-parleur est liée à 3 paramètres :

- 1- la dimension de sa membrane (plus précisément de sa partie émissive) soit son diamètre \varnothing (en m)
- 2- la fréquence considérée F (en Hz)
- 3- l'angle de position de l'auditeur par rapport à l'axe du haut-parleur: α (en degré)

La vitesse de propagation du son dans l'air ($V_{\text{air}}=344\text{m/s}$) est à prendre en compte dans ce phénomène



La directivité est due à la différence de longueurs dans la propagation du son depuis les différentes parties émissives de la membrane jusqu'à l'auditeur.



La directivité dans les détails

Dans le cas de l'auditeur situé dans l'axe du haut-parleur, les distances **L1** et **L2** sont équivalentes. Les sons émis par toutes les parties de la membrane arriveront en même temps jusqu'à l'auditeur.

Dans le cas d'un auditeur situé, comme dans le dessin présenté ici, avec un écart d'angle $\alpha = 30^\circ$, les distances **L3** et **L4** ne sont pas identiques. La différence de longueur (**L4** - **L3**) se traduit par un retard du signal sonore ayant parcouru la plus longue distance (**L4**) par rapport à celui issu par **L3**.

Ici, pour une membrane de \varnothing 20cm et un angle de 30° :

$$L4 - L3 = \frac{\varnothing \cdot \cos 30^\circ}{2} + \frac{\varnothing \cdot \sin 60^\circ}{2} = 0,1 \text{ m}$$

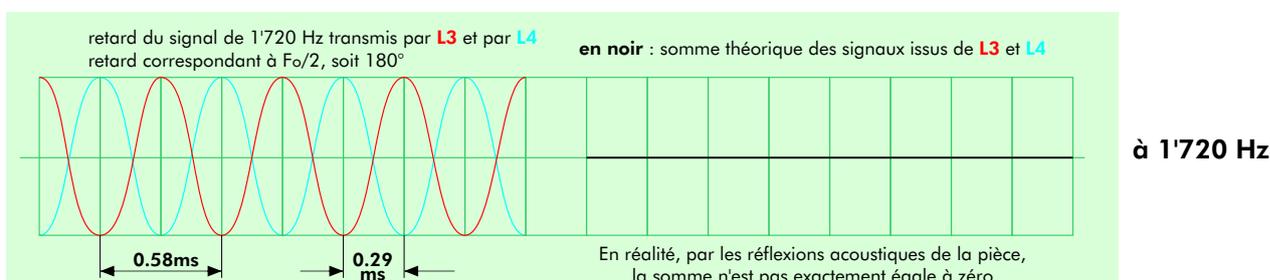
Le retard **T** consécutif à une différence de longueur de 0,1m est égal à :

$$T \text{ (s)} = \frac{L4 - L3 \text{ (m)}}{V_{\text{air}} \text{ (m/s)}} \quad \text{soit :} \quad T = \frac{0,1}{344} = 0,29 \text{ ms}$$

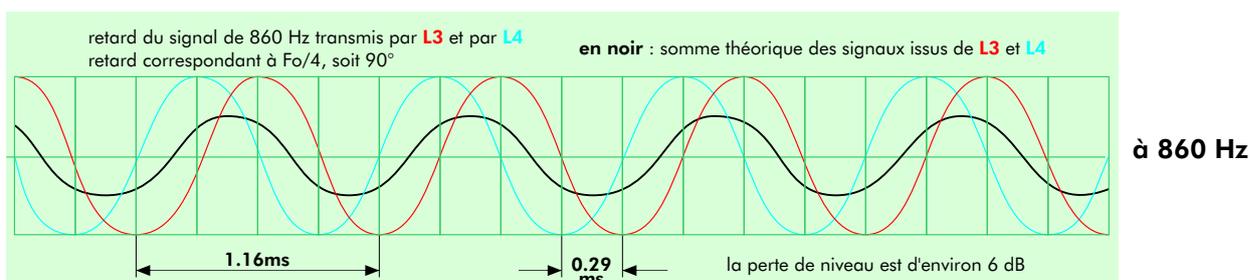
La fréquence correspondante à cette longueur d'onde de 0.1m est égale à :

$$F_0 \text{ (Hz)} = \frac{V_{\text{air}} \text{ (m/s)}}{L4 - L3 \text{ (m)}} \quad \text{soit :} \quad F_0 = \frac{344}{0,1} = 3'440 \text{ Hz}$$

Pour la reproduction d'une fréquence de 1'720 Hz (c'est à dire $F_0/2$) les signaux issus de **L3** seront annulés par ceux issus de **L4** par opposition de phase de 180° .

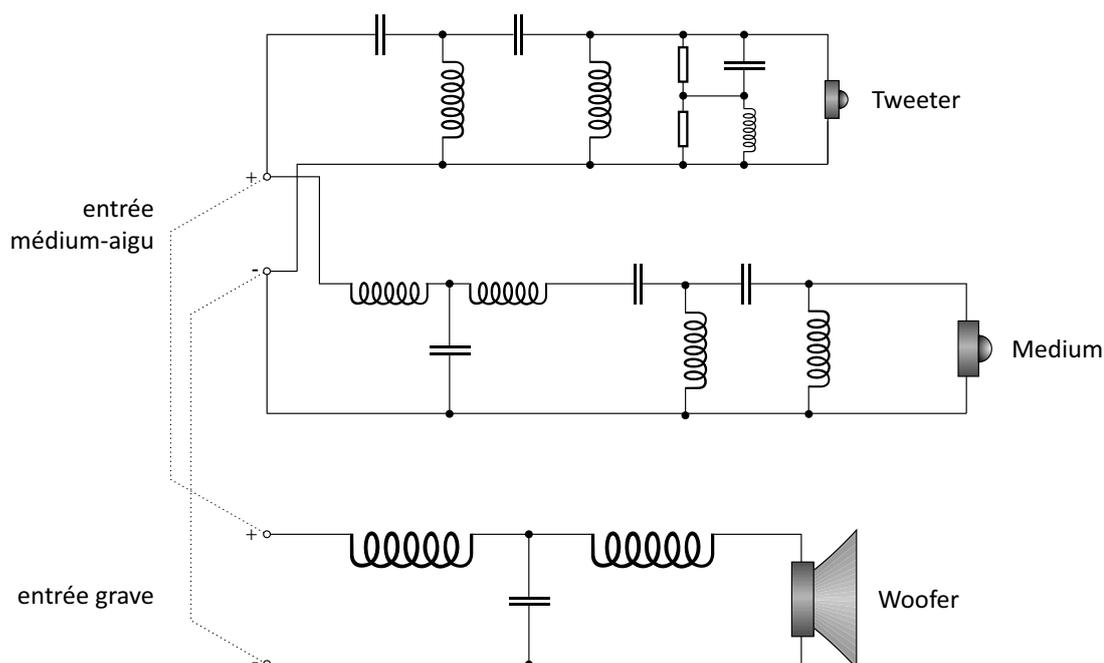


En réalité, à une fréquence correspondante à $F_0/4$ (soit 860Hz dans notre exemple) une atténuation est significative. Dans notre cas d'une membrane de 20cm et d'un angle de 30° , à partir de 860Hz une directivité est déjà non négligeable.



Le diagramme de directivité d'un haut-parleur n'est pas lié à ses qualités musicales, mais à la dimension de sa membrane : plus il est grand, plus il est directif dans le domaine de fréquences concerné.

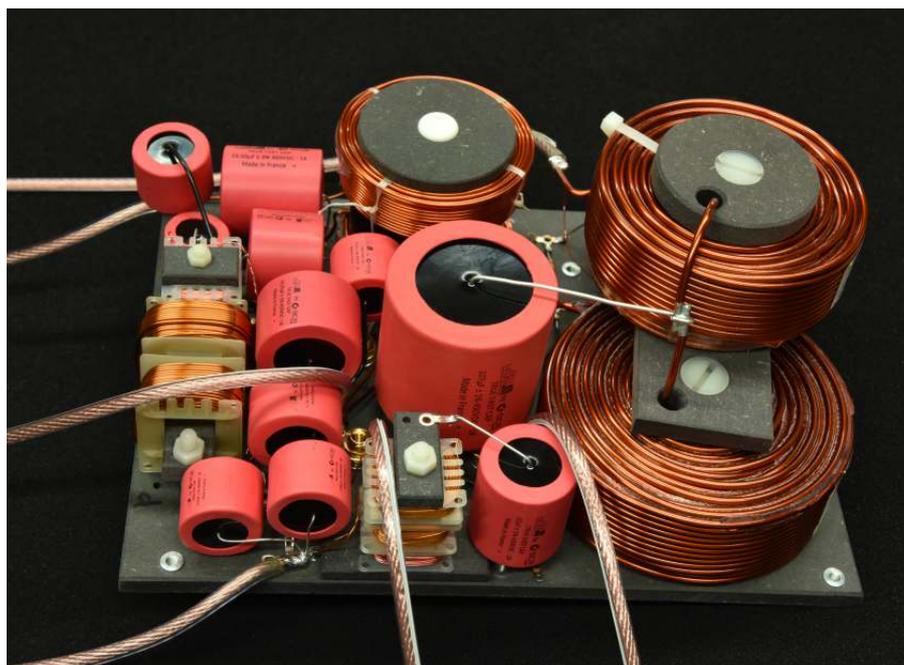
Les filtres répartiteurs LC classiques



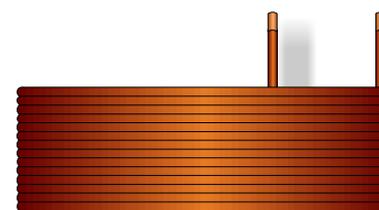
Les filtres d'aiguillages orientent les signaux en provenance de l'amplificateur vers chacun des haut-parleurs, en fonction de leur contenu fréquentiel.

Les filtres passifs de hautes performances et de fortes pentes d'atténuation présentent des avantages décisifs par rapport à tout autre système. S'ils sont constitués de bobines de self induction de forte section de cuivre et sans noyau magnétique, ainsi que de condensateurs polypropylène, de tels filtres sont insaturables, d'une grande linéarité et d'une longévité exceptionnelle.

Réalisation et composants des filtres passifs



Filtres répartiteurs à fortes pentes et faibles pertes séries, sans condensateurs chimiques et bobine sans noyaux magnétiques : 6,5 kg de composants.

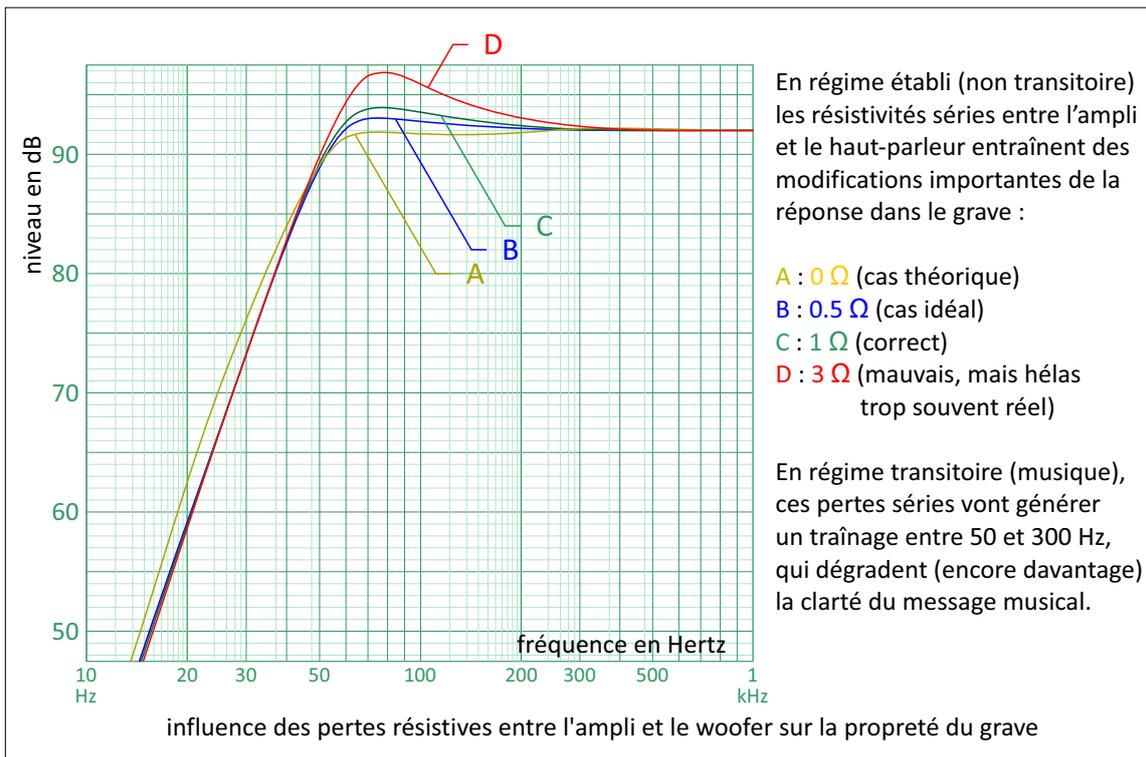


Bobine de self-induction sans noyau et à très forte section: 1,68 mH - 0,11 Ω - 3 Kg

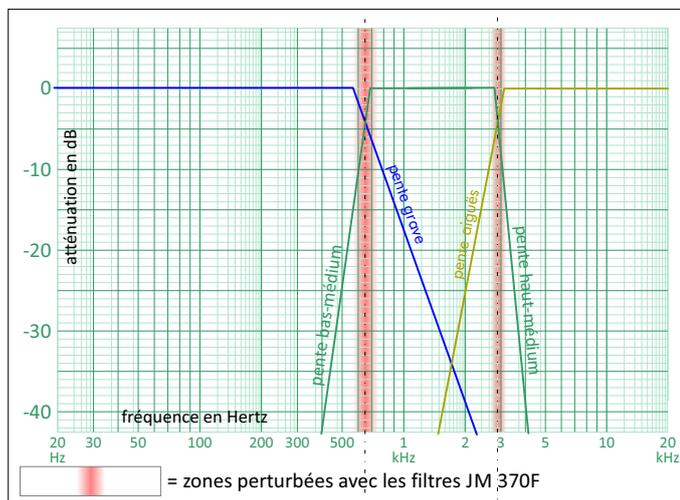
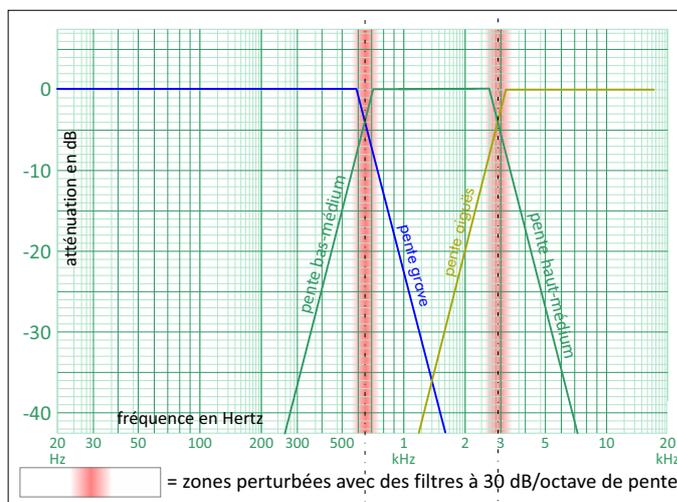
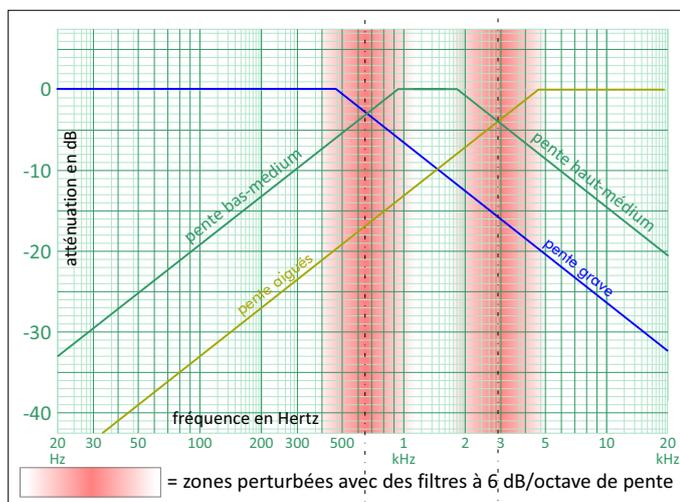


Condensateur polypropylène à grande stabilité et réponse impulsionnelle très rapide : 12.7 μ F - 3% - $\text{tg}\delta < 0,06\%$

Les pertes résistives des filtres répartiteurs et leurs conséquences



Les pentes de filtres



Les pentes des filtres déterminent les zones communes de fonctionnement des haut-parleurs. Ces zones sont évidemment perturbées par le piétinement d'un transducteur sur l'autre, transducteurs décalés géométriquement et dissemblables physiquement. Plus les pentes des filtres sont rapides, plus ces zones de recouvrement sont petites. Les plages de restitution issues d'une seule membrane seront évidemment plus propres.

L'impédance des haut-parleurs et enceintes acoustiques : une charge très complexe et un gros défi pour les amplificateurs

Une résistance, comme un corps de chauffe, est une charge simple. Le courant qu'elle demande dépend de la tension qu'on lui applique. Ce courant sera entièrement consommé et transformé en chaleur. Ceci est valable quelle que soit la forme de tension appliquée.

Un moteur électrique pour courant alternatif, ou un haut-parleur, transforme une énergie électrique en mouvement, avec un certain rendement dû aux pertes du système. La partie d'énergie perdue sera transformée en chaleur. La partie d'énergie transformée en mouvement présente une charge non résistive mais réactive pour la source de tension. Ceci implique que ce moteur, ou ce haut-parleur, va demander plus de courant que ce qu'il ne va consommer et restituer le solde à la source de tension. Cette énergie en retour se nomme force contre-électromotrice (fcem).

Selon les haut-parleurs, la demande en courant peut dépasser jusqu'à 7x l'énergie nécessaire au déplacement de la membrane. Cet excédent d'énergie doit retraverser le filtre d'aiguillage et les câbles haut-parleurs pour être repris par l'amplificateur. La proportion d'énergie excédentaire dépend du contenu du signal électrique (variation de fréquences et d'amplitudes à chaque instant donné). On peut parler de cosinus phi dynamique ($\cos \phi$).

Pour l'amplificateur, la charge du haut-parleur représente deux défis de taille :

1- Posséder une capacité suffisante en fourniture de courant, c'est-à-dire en ampères (A) et non en watts (W). Cette aptitude permettra à l'ampli de ne pas écrêter les pics de dynamiques à chaque grosse demande en courant venant de l'enceinte acoustique. Un écrêtage est non seulement très désagréable à l'écoute mais dangereux pour la santé des haut-parleurs eux-mêmes.

2- Avoir une bonne aptitude à absorber l'énergie en retour des haut-parleurs (fcem). Si ce n'est pas le cas, un rebond de courant en direction des haut-parleurs va perturber le relief musical par un effet d'écho très préjudiciable. Les creux de dynamique seront noyés dans ce retour d'énergie et les détails musicaux seront remplis de résonances très désagréables. La dynamique restituée par le système ampli/enceinte deviendra mauvaise.

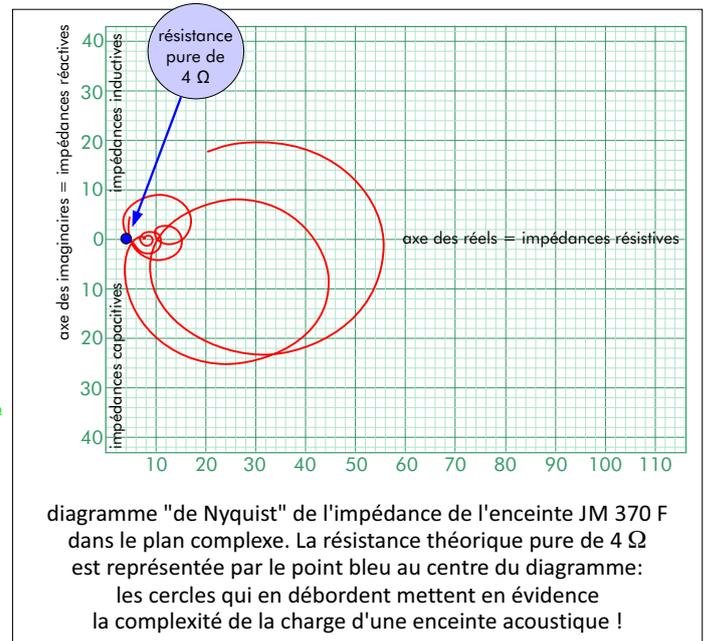
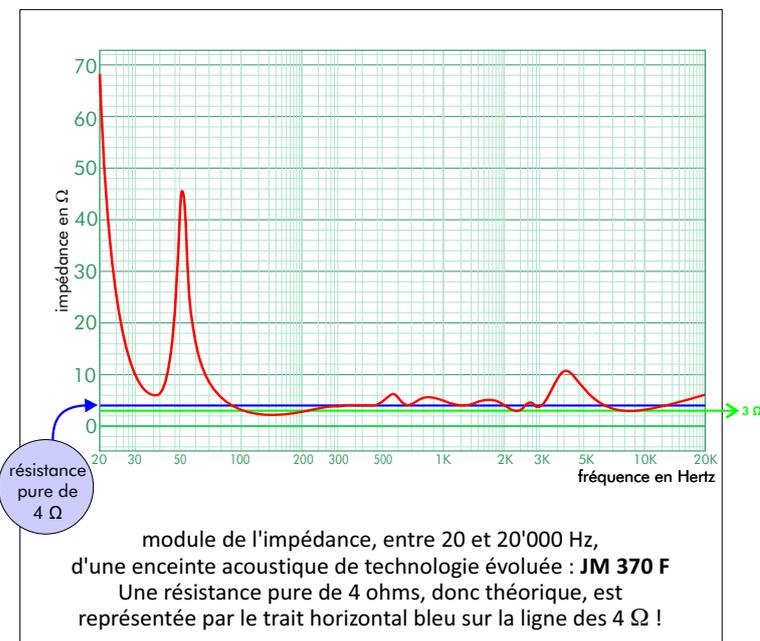
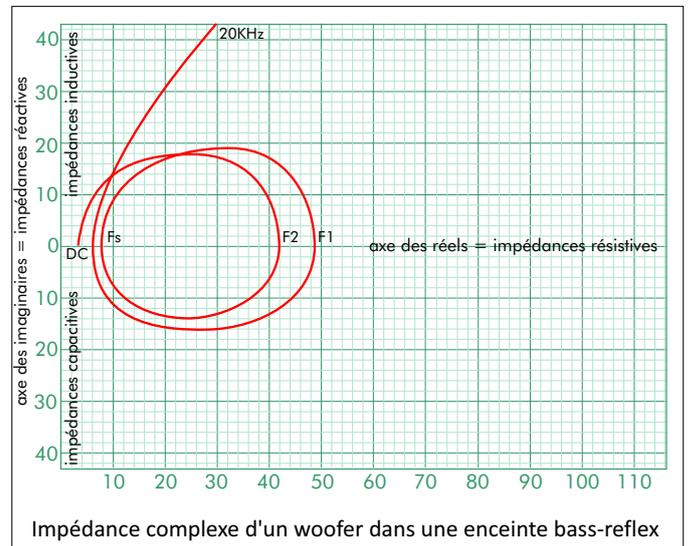
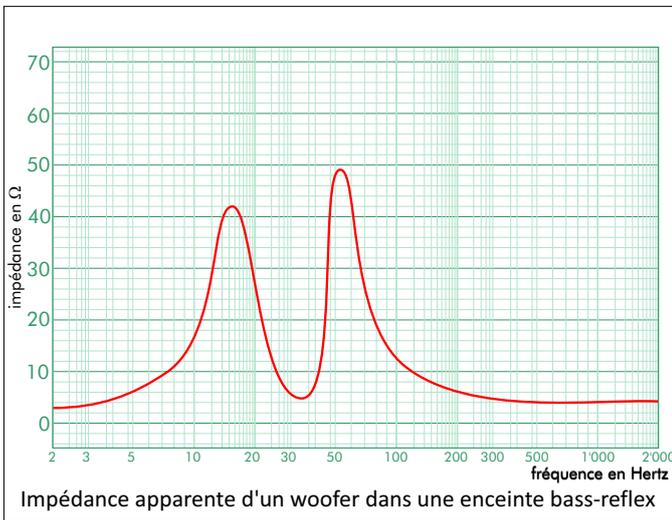
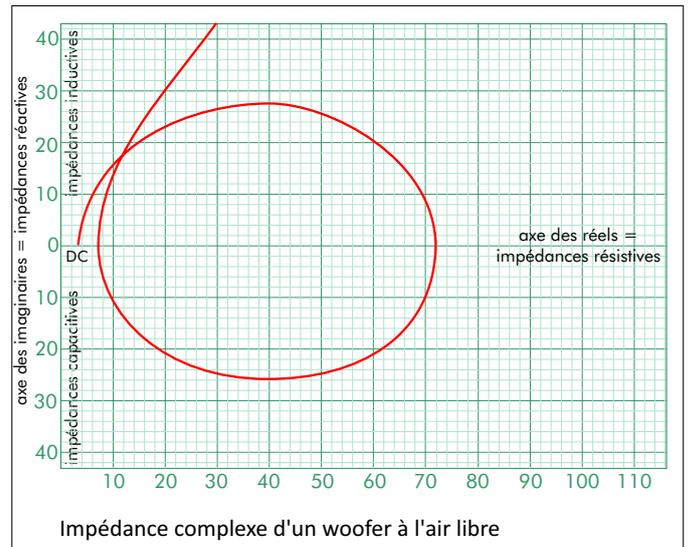
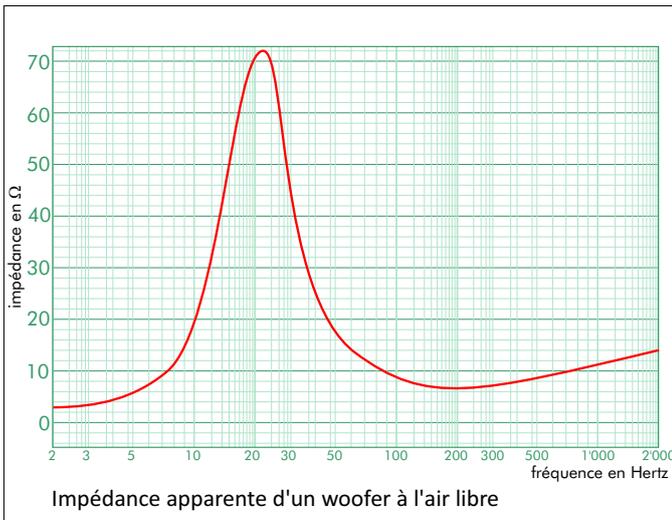
Parmi les amplificateurs à transistors, certains sont capables de fournir beaucoup de courant. Leur aptitude, par exemple, à accepter une charge résistive de 2 ohms ou moins est un gage de bonne tenue à cet égard. Les amplificateurs à transistors qui ne peuvent pas descendre en dessous de 4 ohms devraient être éliminés car leurs concepteurs n'ont pas compris ce que représente la charge d'un haut-parleur.

La reprise de courant en retour (fcem), par contre, pose beaucoup de problèmes aux sorties d'amplificateurs à transistors directs, c'est-à-dire sans transformateurs de sortie. Cette réabsorption d'énergie est alors mal maîtrisée, avec les conséquences déjà évoquées auparavant.

La technologie des amplis à tubes impose un transformateur de sortie, pour adapter l'impédance de travail des tubes à celle des haut-parleurs. C'est un élément qui est volumineux, lourd, coûteux, difficile à développer comme à fabriquer, si l'on veut en tirer d'excellentes performances. Cependant, à condition d'être très soigné, il représente un véritable cadeau pour le haut-parleur. Ce dernier pourra recevoir tout le courant désiré et retourner cette fcem qui sera court-circuitée, avec une très bonne efficacité, par le transformateur de sortie. La faible résistivité série des filtres et des câbles haut-parleurs facilite également ce retour d'énergie jusqu'à l'amplificateur.

Quelques rares amplificateurs à transistors sont pourvus de transformateurs de sortie et leur qualité peut s'approcher alors des bons amplificateurs à tubes.

L'impédance des haut-parleurs et enceintes acoustiques



Les énergies réactives du haut-parleur, tueuses de dynamique

Le relief musical est défini par l'écart d'amplitude entre une pointe et un creux de modulation. Pour être exact, c'est la dynamique, exprimée en décibels (dB).

S'il est assez facile de reproduire une pointe de dynamique, il en est tout autrement du creux qui suivra forcément, car une quantité de résidus vibratoires (mécaniques et électriques) va tendre à noyer le signal musical de faible amplitude. Pour exemple, un enregistrement d'orchestre symphonique présente facilement 60 dB de dynamique, soit un rapport de puissance de 1 à 1'000'000. Cet écart de puissance est reproduit en l'espace d'une fraction de seconde.

Des résidus parasites (vibrations dans le boîtier, échos électriques, membranes mal amorties, etc.) feront forcément suite à un fortissimo alors qu'un instant de silence ou de très faible intensité (ou simplement un creux de dynamique) est censé être reproduit à cet instant précis. On désigne aussi ces signaux qui se prolongent indécemment par "les effets de traînage". Le noeud du problème réside dans ce que l'on appelle "le respect du silence".

Dans un haut-parleur, il existe trois grandes causes de traînages:

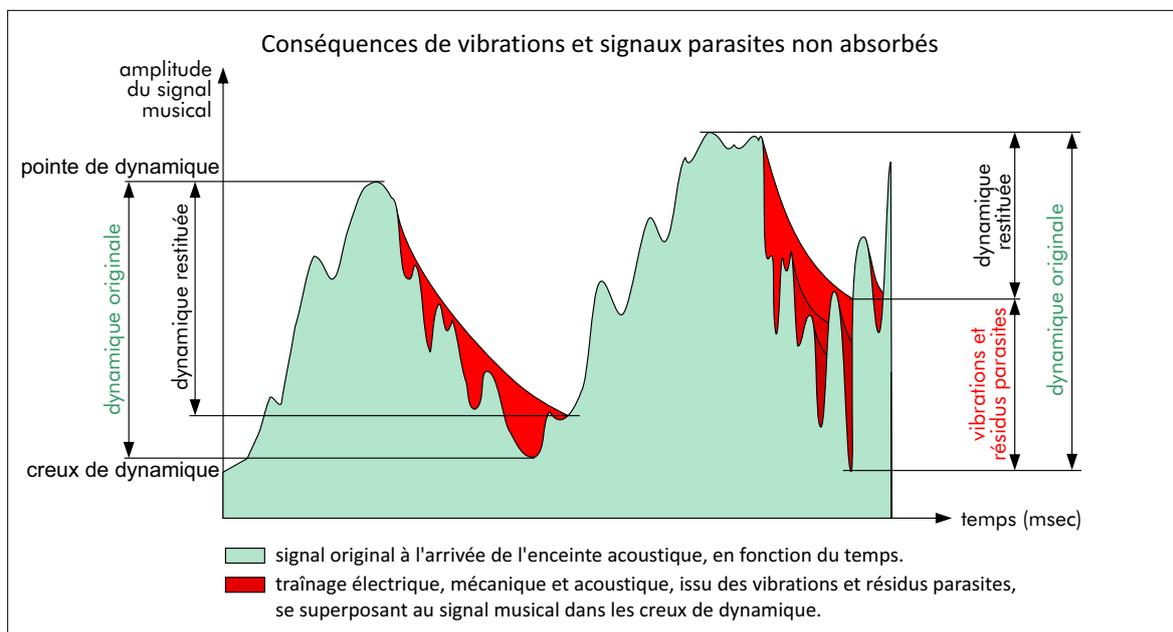
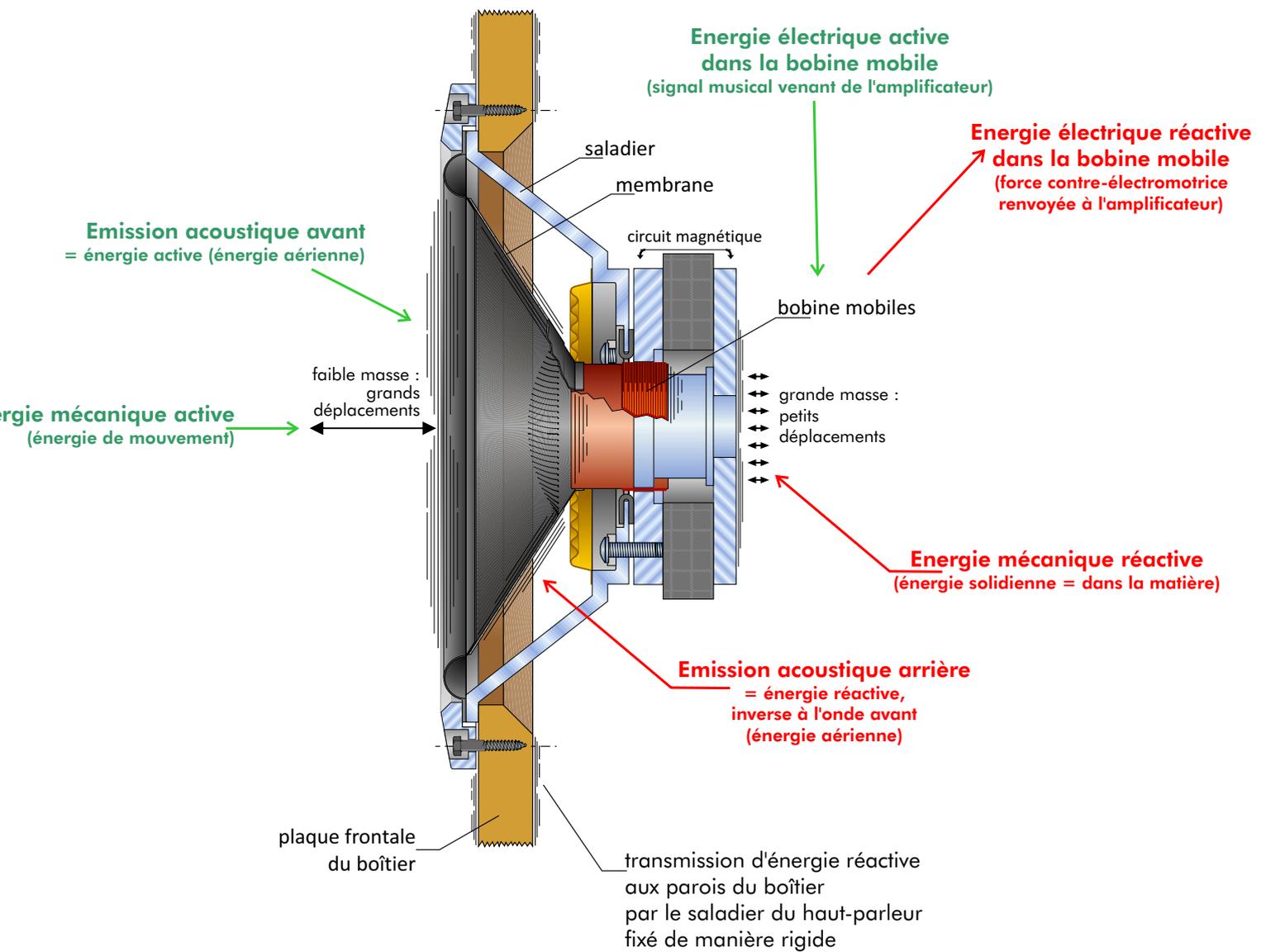
1- La force contre-électromotrice (f_{cem}) de chacun des haut-parleurs est un courant parasite inverse au signal musical électrique en provenance de l'amplificateur. Il doit être réabsorbé par l'amplificateur, le mieux possible. Si cette absorption se passe mal, il s'en suit un effet d'écho, à l'image de celui que l'on obtient en montagne en face d'une paroi rocheuse. Le message sonore d'origine est rendu inintelligible par cette réverbération. Or les transistors reprennent mal cette énergie en retour, qui rebondit donc vers les haut-parleurs et encombre tous les creux de dynamique. Si un amplificateur à tubes est doté de très bons transformateurs de sortie, c'est alors le bobinage secondaire de ces derniers qui court-circuitera ce courant parasite, avec une bonne efficacité.

2- L'énergie mécanique réactive, provoquée par le mouvement de l'équipage mobile (bobine mobile et membrane) et la masse d'air proche, donne naissance à une forme de résidu parasite. Il s'agit des vibrations mécaniques que génère le haut-parleur lui-même. Pour s'échapper, ces vibrations vont s'écouler par les branches du saladier du haut-parleur jusqu'au boîtier de l'enceinte et exciter ses différentes faces avec un effet de retard et de déformations important.

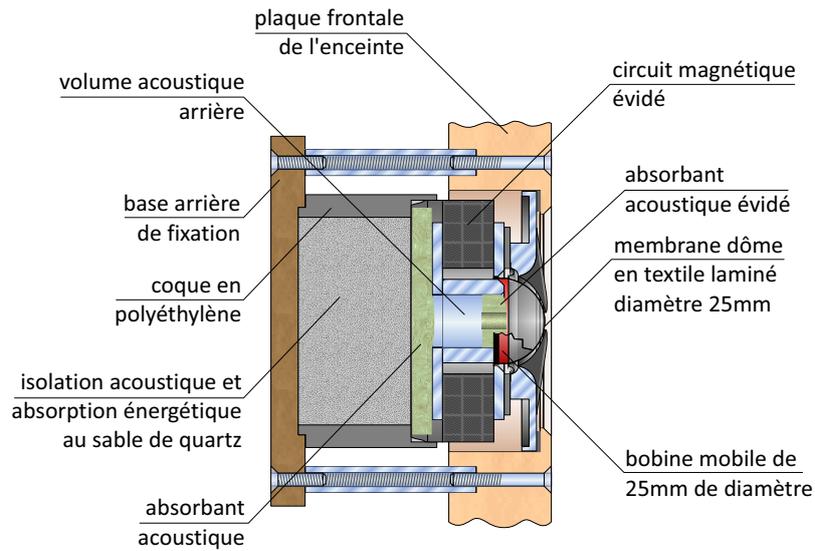
Dans les enceintes Jean Maurer, ces différents résidus sont absorbés par du sable de quartz, grâce notamment à la tige de précontrainte qui relie dynamiquement le moteur du woofer au double dos sablé à très basse fréquence de résonance. Le saladier est également découplé dynamiquement de la plaque frontale du boîtier. Pour les haut-parleurs de médium et d'aigu, c'est le sable inséré dans leur double coque qui assure ce travail.

3- Les mouvements de la membrane du haut-parleur produisent une émission sonore avant et une émission sonore arrière inverse. L'onde acoustique arrière, seule forme de signal indésirable dont tout le monde parle, est absorbée par de la laine minérale. Une partie de ce signal est reprise par l'évent bass-reflex, afin de linéariser la réponse dans les basses fréquences. En regard des deux précédentes formes d'énergies réactives, c'est celle qui présente le moins de problèmes de maîtrise vis-à-vis du respect du silence. Si le boîtier de l'enceinte est très inerte, c'est-à-dire peu résonant, le relief musical restitué sera bon. Le sable de quartz emprisonné dans le double-dos du boîtier, ainsi que, pour le modèle JM 370F dans les côtés et 2 parties frontales, participe grandement à ce résultat.

Les énergies actives et réactives du haut-parleur

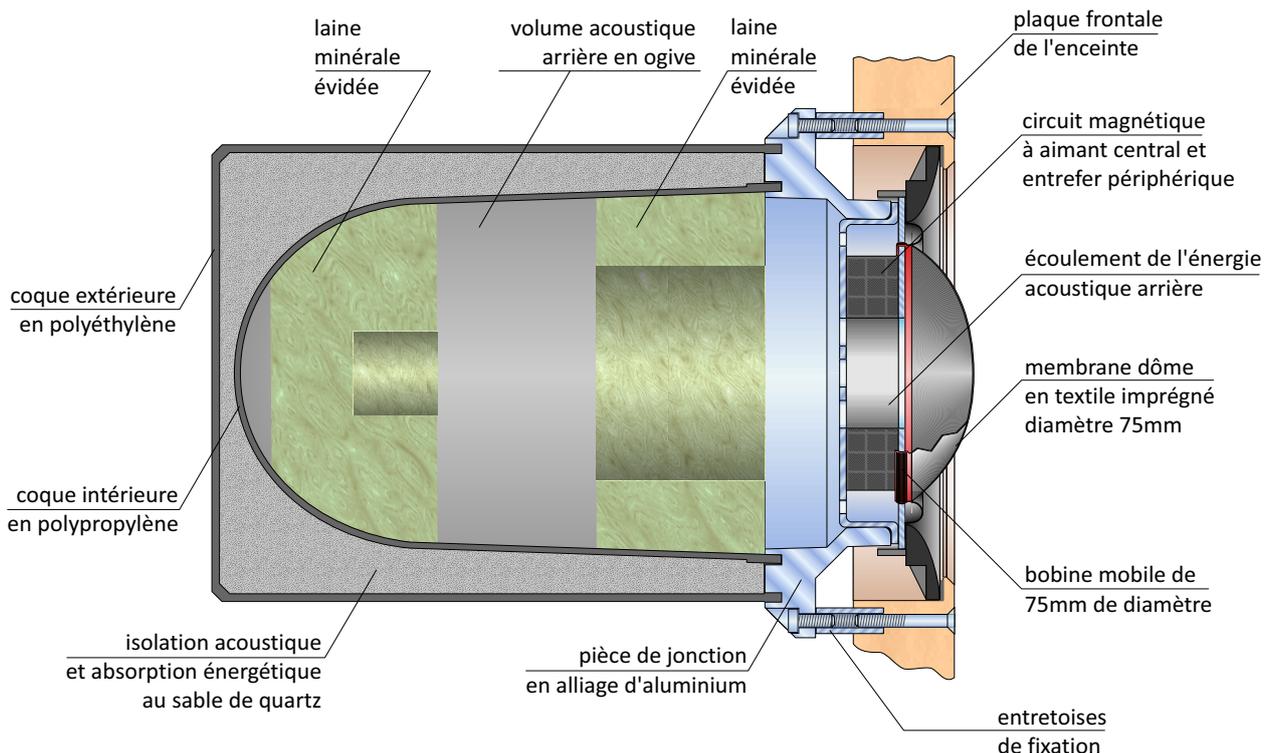


Les transducteurs de médium et d'aigu : deux enceintes introduites dans celle du grave



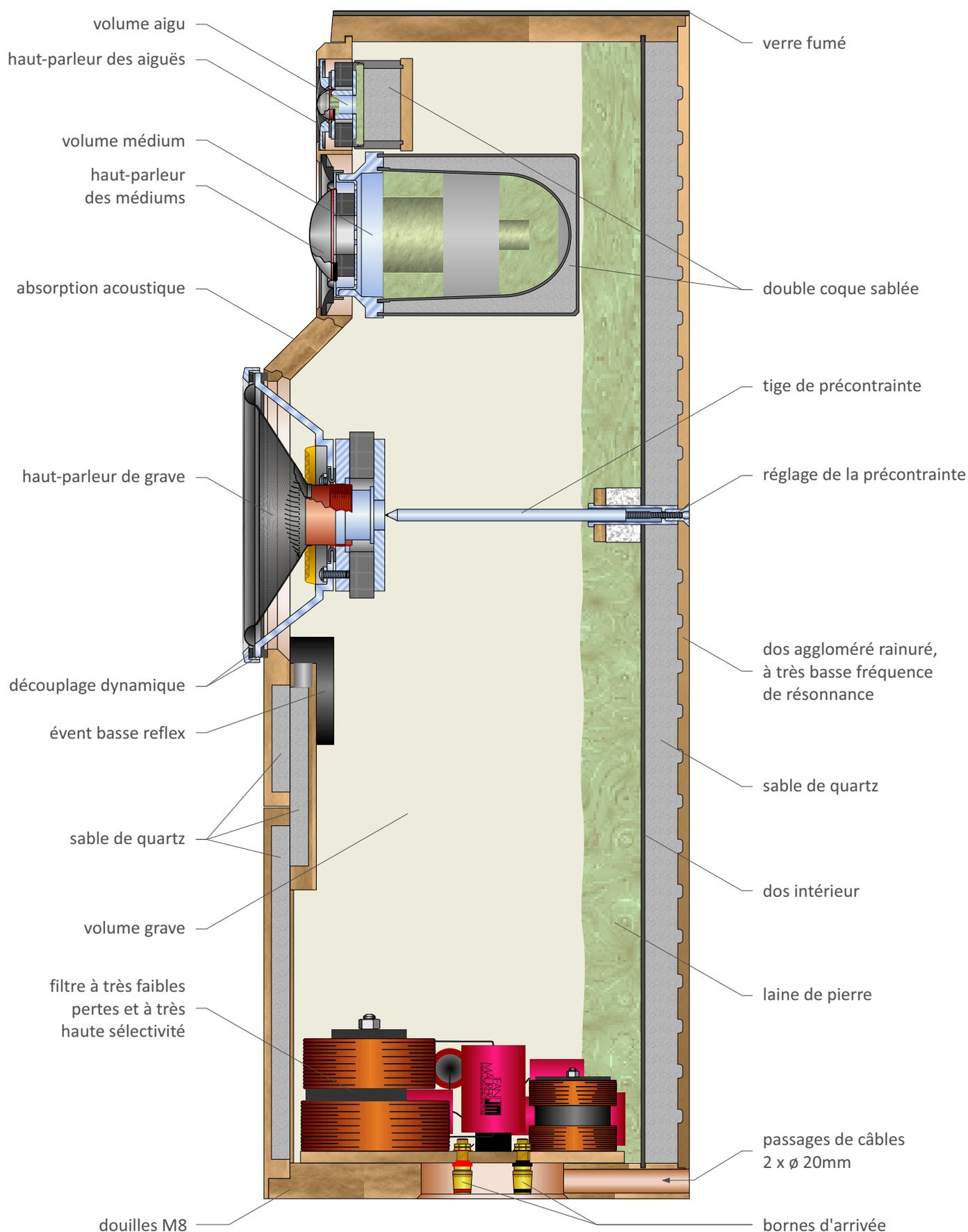
Enceinte aiguë, avec transducteur TD25-4

Chaque haut-parleur, ou transducteur, produit une onde acoustique avant et une onde arrière. L'énergie arrière d'un haut-parleur ne doit en aucun cas se mélanger avec celle d'un autre, au risque alors de perturber gravement le comportement de la membrane du voisin, avec une pollution sonore inacceptable. Un risque de destruction mécanique de l'équipage mobile du transducteur de médium ou d'aigu, par l'énergie du grave, est aussi réel. Les énergies réactives de ces deux voies (médium et aiguë) doivent aussi être traitées avec sérieux. Dans les deux cas, des masses de sable de quartz vont les stabiliser, à l'image du dos sablé pour la voie grave.

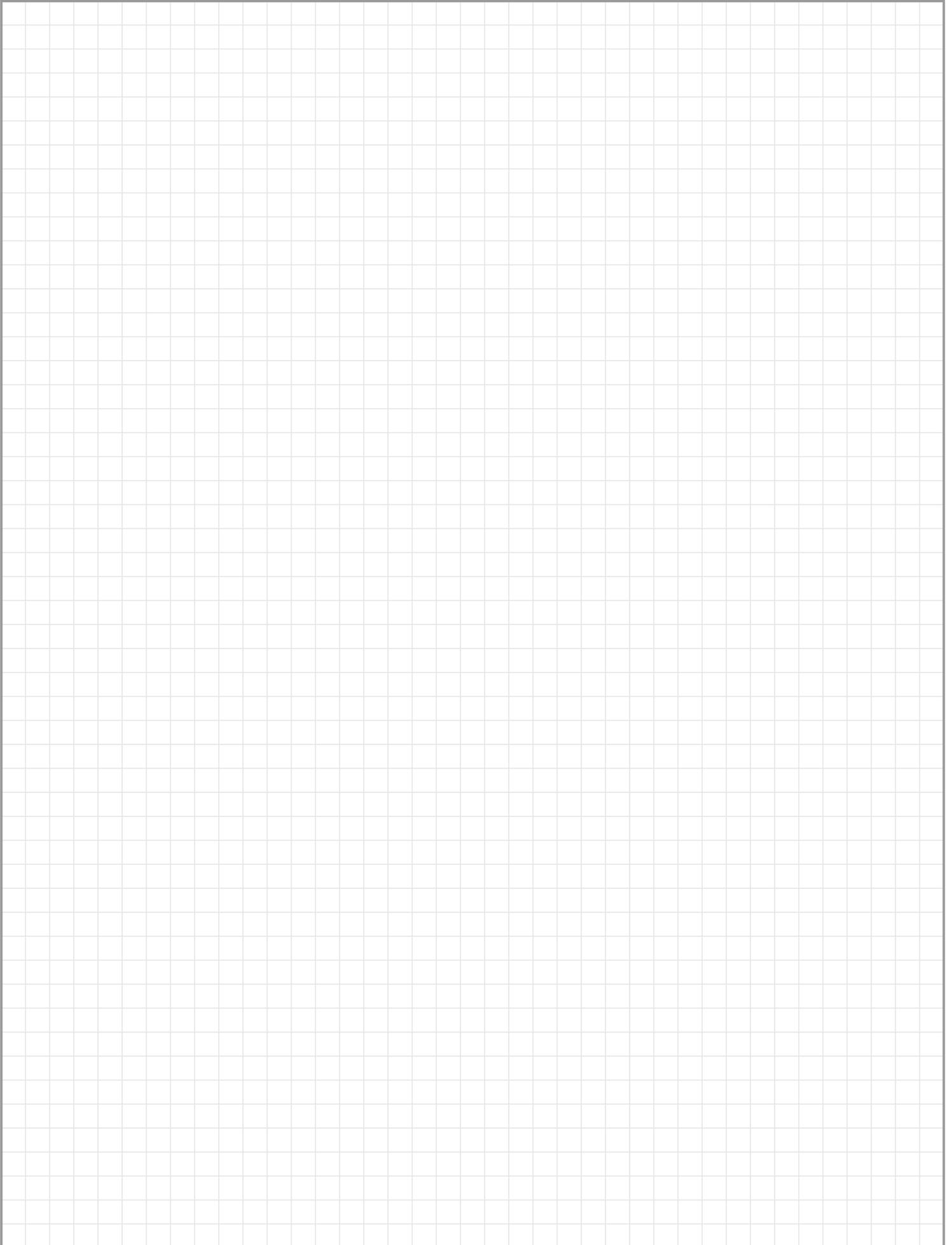


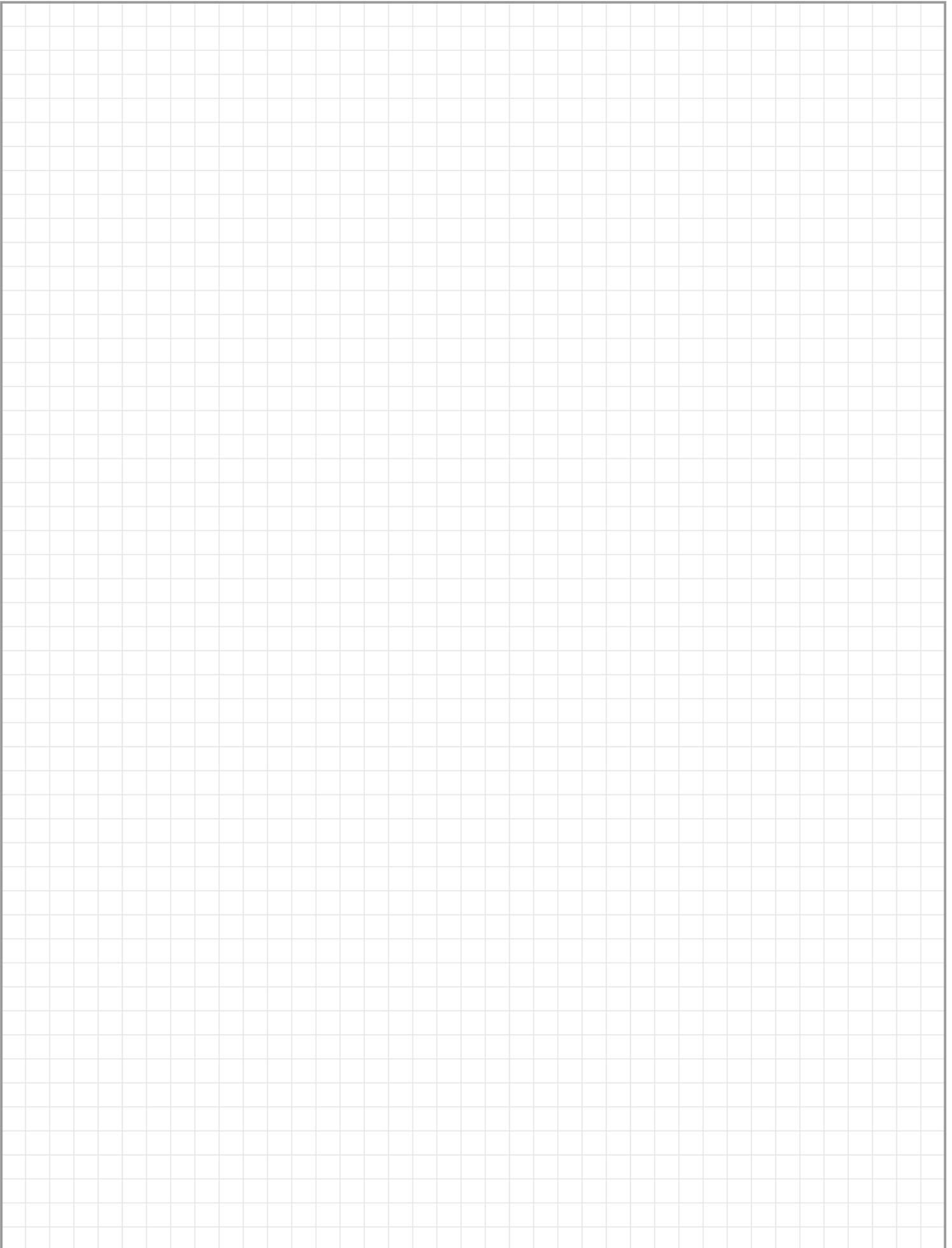
Enceinte médium, avec transducteur MD75-3

Boîtier d'enceinte acoustique à absorption d'énergies



Vue en coupe de l'enceinte acoustique Jean Maurer JM 370F





Manufacturier suisse
d'enceintes acoustiques et
d'amplificateurs à tubes d'exception

www.jeanmaurer.ch

Jean Maurer Swiss Audio Manufacture SA
Rue du Chêne 17
CH-1170 Aubonne

+41 21 808 50 60 | info@jeanmaurer.ch | www.jeanmaurer.ch