

Les écouteurs à réduction active de bruit équipent aujourd'hui une majorité des usagers des transports en commun. Les fabricants en annoncent des performances spectaculaires. Cette activité propose d'en examiner la physique, puis d'en évaluer les limites réelles.



Données :

- intensité sonore de référence $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

Document 1 – Deux mécanismes complémentaires

Un écouteur réduit le bruit extérieur de deux façons distinctes.

L'**atténuation passive** est due à l'embout qui bouche le conduit auditif : le son est arrêté par la matière, comme par un bouchon d'oreille. Elle ne nécessite aucune électronique.

La **réduction active de bruit** (RAB) est de nature ondulatoire. Un microphone capte le bruit ambiant. Un circuit électronique fabrique alors une onde sonore de même amplitude mais **en opposition de phase**, émise par le haut-parleur de l'écouteur. Les deux ondes se superposent et se propagent ensemble jusqu'au tympan : si l'opposition de phase est exacte, l'interférence est destructive et le bruit disparaît.

Document 2 – Écart à la condition d'interférence destructive

Le circuit électronique ne peut pas émettre l'anti-bruit instantanément : il le fait avec un **retard τ** .

Un retard τ sur un signal de période T correspond à un déphasage supplémentaire $2\pi \frac{\tau}{T}$. Le déphasage entre le bruit et l'anti-bruit vaut donc

$$\Delta\varphi = \pi + 2\pi \frac{\tau}{T}$$

L'opposition de phase est exacte lorsque $\tau = 0$. Sinon, on montre que l'atténuation obtenue vaut

$$A = -20 \log \left(2 \sin \frac{\pi \tau}{T} \right) \quad (\text{attention à bien être en radians})$$

Cette relation traduit simplement le fait que l'annulation est d'autant meilleure que le retard est petit devant la période. **Seul le rapport τ/T intervient.**

Lorsque τ/T dépasse $\frac{1}{6}$, l'atténuation devient négative : **le dispositif renforce le bruit au lieu de le supprimer !**

Document 3 – Le retard de l'électronique

Entre le moment où le microphone capte le bruit et celui où le haut-parleur émet l'anti-bruit, le circuit électronique a besoin d'une certaine durée pour traiter le signal. Ce retard τ est **le même à toutes les fréquences**.

Les circuits de réduction active actuels annoncent des retards de quelques dizaines de microsecondes. On adopte dans un premier temps l'hypothèse

$$\tau = 45 \mu\text{s}$$

Document 4 – Mesures en laboratoire

Mesures réalisées sur tête artificielle munie d'un microphone à l'emplacement du tympan (laboratoire SoundGuys, 2026). Toutes les valeurs sont des atténuations, exprimées en décibels.

Écouteurs intra-auriculaires avec embouts assurant l'étanchéité du conduit : *Apple AirPods Pro 3*

f (Hz)	100	200	400	600	1000	2000	3000	4000
Atténuation passive seule (dB)	1	3	10	9	15	24	38	45
Atténuation totale (dB)	42	38	39	29	34	43	44	37

Écouteur semi-intra, posé dans l'oreille sans embout : *Apple AirPods 4*

f (Hz)	100	200	600	1000	2000
Atténuation passive seule (dB)	0	0	-1	-2	2
Atténuation totale (dB)	4	16	17	18	16

Document 5 – Le plafond physiologique

Même si l'on bouchait parfaitement le conduit auditif, le son continuerait d'atteindre l'oreille interne en faisant vibrer les os et les tissus du crâne. Cette voie de contournement limite le bénéfice qu'un protecteur auditif peut réellement apporter à un être humain.

Les mesures effectuées sur des sujets réels donnent une atténuation maximale comprise **entre 40 et 46 dB**, quelle que soit la technologie employée.

La tête artificielle du document 4 est constituée de matériaux qui ne transmettent pas ce chemin osseux.

Partie A – Atténuation sonore

Dans une rame de métro, le niveau d'intensité sonore atteint 90 dB. Un voyageur porte les écouteurs avec embouts du doc 4.

1. Déterminer le niveau d'intensité sonore résiduel à 100 Hz.
2. En déduire l'intensité sonore correspondante.
3. Un fabricant annonce que ses écouteurs « bloquent 99 % de l'énergie sonore ». Montrer que cet argument correspond à une atténuation de 20 dB.
4. Quel serait le pourcentage pour les écouteurs avec embouts du doc 4 à 100 Hz ?
5. Porter un regard critique sur ce type de communication (pourquoi utiliser des pourcentages plutôt que l'atténuation en décibels ?).
6. À l'aide du document 4, préciser le rôle joué par l'embout et le domaine de fréquences dans lequel il est efficace.

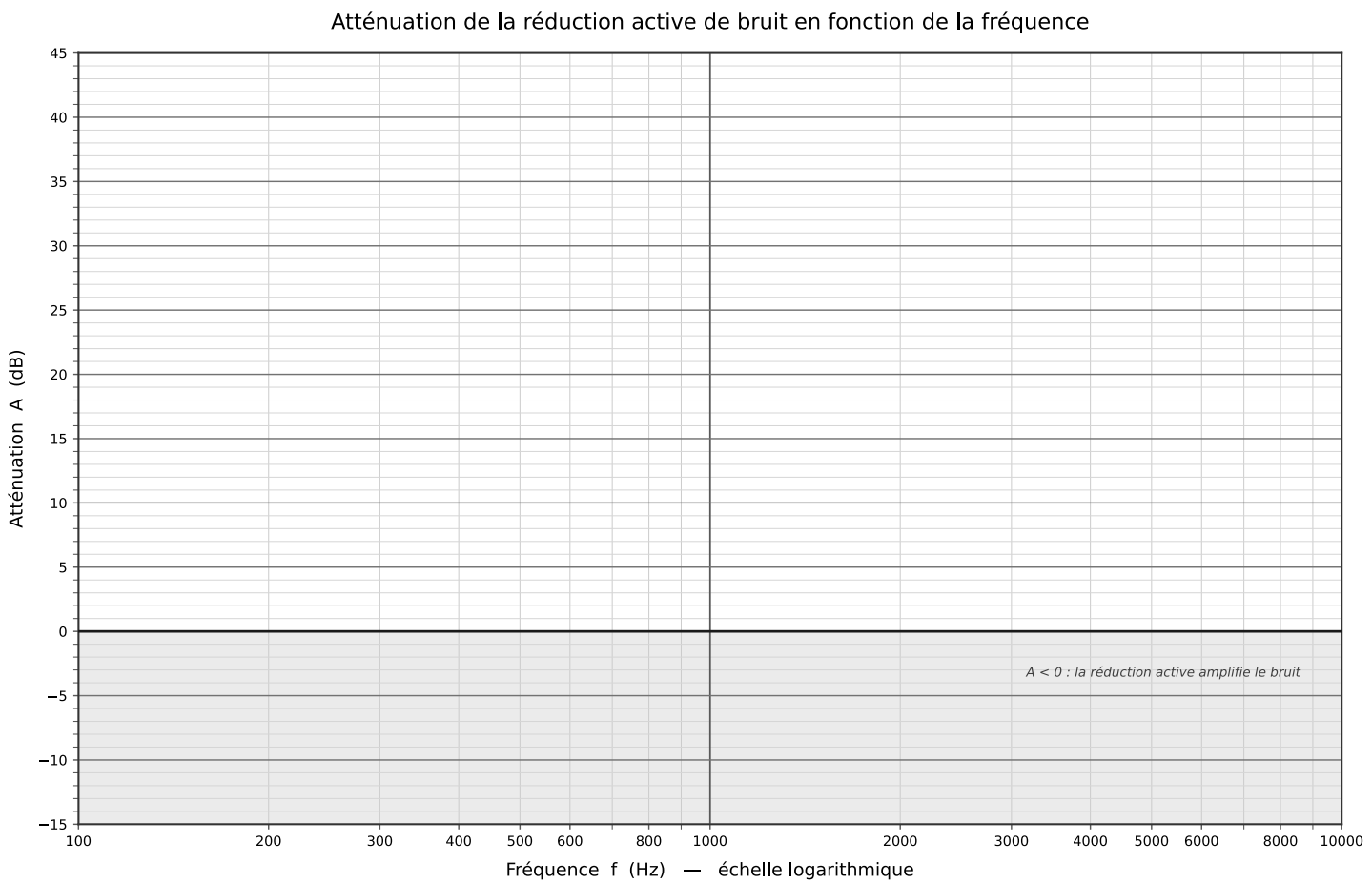
Partie B – Interférences

On s'intéresse à la réduction active à la fréquence $f = 600\text{ Hz}$.

- 7. Rappeler la relation que doit vérifier le déphasage $\Delta\varphi$ entre deux ondes de même fréquence pour qu'elles interfèrent de façon destructive.
- 8. Calculer la période T du bruit, puis le rapport τ/T .
- 9. En déduire, à l'aide du document 2, l'atténuation que la réduction active permet d'obtenir à 600 Hz selon ce modèle.
- 10. Compléter le tableau ci-dessous en utilisant la démarche des questions précédentes.

$f(\text{Hz})$	100	200	400	600	1000	2000	3000	4000
$T(\text{ms})$								
τ/T								
A prévue (dB)								

- 11. Tracer A en fonction de f ci-dessous. Décrire l'allure obtenue.



- 12. Le document 4 donne, pour les écouteurs avec embouts, l'atténuation passive seule et l'atténuation totale. L'apport de la réduction active s'obtient par différence. Compléter le tableau suivant.

$f(\text{Hz})$	100	200	400	600	1000	2000	3000	4000
Apport mesuré de la RAB (dB)								

13. Placer ces points sur le graphe de la question 11, sous forme de croix que l'on ne reliera pas entre elles.
14. Comparer les deux courbes. L'allure générale est-elle la même ? Entre 100 Hz et 2000 Hz, les mesures se situent-elles au-dessus ou au-dessous de la prévision ? Que peut-on en déduire sur l'hypothèse $\tau = 45 \mu\text{s}$?
15. À 400 Hz, l'apport mesuré de la réduction active vaut 29 dB. À l'aide du document 2, déterminer le rapport τ/T correspondant, puis la valeur réelle du retard τ .
16. Avec la valeur de τ obtenue à la question 15, déterminer la fréquence au-delà de laquelle la réduction active devrait cesser d'être efficace, c'est-à-dire telle que $\tau/T = \frac{1}{6}$. Comparer aux mesures du document 4.
17. Pour $\frac{\tau}{T} = 0,5$, calculer le déphasage $\Delta\varphi$ entre le bruit et l'anti-bruit.
Quel type d'interférence obtient-on ? En déduire que, selon le modèle du document 2, l'atténuation ne peut jamais être inférieure à -6 dB. Comparer à la mesure à 4000 Hz et conclure.
18. L'hypothèse de départ $\tau = 45 \mu\text{s}$ prévoyait que la réduction active cesse d'être efficace entre 3000 et 4000 Hz, en accord avec les mesures. Expliquer pourquoi cet accord ne suffit pas à valider cette hypothèse.

Partie C – Limites

19. Le document 4 annonce 44 dB d'atténuation à 3000 Hz pour les écouteurs avec embouts. Un constructeur concurrent annonce 55 dB sur le même banc de mesure. À l'aide du document 5, expliquer pourquoi cet écart de 11 dB ne sera pas perçu comme tel par l'utilisateur.
20. Un ouvrier travaille dans un atelier où le niveau d'intensité sonore atteint 120 dB. La réglementation impose de ramener l'exposition à 85 dB. Calculer l'atténuation nécessaire et conclure quant à la faisabilité. Reprendre le raisonnement pour un niveau de 135 dB.