

## Caractériser la propagation d'un signal sonore

Terminale Bac Pro ICCER (Grpt 1) | Physique – Signaux

### ICCER — Mise en situation

#### Acoustique des installations thermiques : bruit des équipements CVC

Dans une installation de climatisation ou de chauffage, les équipements mécaniques (CTA, pompes, compresseurs, ventilo-convecteurs) sont des sources sonores permanentes. La réglementation impose des niveaux acoustiques maximaux dans les locaux habités : **30 dB(A) dans les chambres** la nuit et **35 dB(A) dans les séjours**. Les techniciens en installation thermique doivent mesurer les niveaux sonores avec un sonomètre, calculer l'atténuation en fonction de la distance, et préconiser des solutions (encoffrement, silent-blocs, conduits flexibles) pour respecter ces limites.

#### Objectifs d'apprentissage

- Mettre en évidence la nécessité d'un milieu matériel pour la propagation du son.
- Déterminer expérimentalement la vitesse de propagation du son dans l'air ou dans l'eau.
- Exploiter la relation  $\lambda = c_{\text{son}} \times T = \frac{c_{\text{son}}}{f}$ .
- Connaître le domaine d'audition humaine (20 Hz – 20 kHz).
- Mesurer une pression acoustique et un niveau d'intensité acoustique à l'aide d'un sonomètre.
- Calculer un niveau d'intensité acoustique en dB :  $L = 10 \times \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$ .
- Étudier l'atténuation de l'intensité acoustique en fonction de la distance.

## 1. Nature d'un son – vibration mécanique dans un milieu matériel

### DÉFINITION

Un **son** est une onde mécanique produite par la vibration d'une source (corde, membrane, colonne d'air...). Cette vibration se propage dans le milieu environnant sous forme de **compressions et dilatations** successives des particules du milieu.

### PROPRIÉTÉ FONDAMENTALE

La propagation d'un son **nécessite obligatoirement un milieu matériel** (gaz, liquide ou solide). **Il n'y a pas de son dans le vide.**

### EXPÉRIENCE – CLOCHE SOUS VIDE

On place un réveil sonnant sous une cloche en verre. Lorsque l'on pompe progressivement l'air à l'intérieur de la cloche, le son devient de plus en plus faible, puis inaudible lorsque le vide est suffisant. En remettant de l'air, le son redevient audible. Cette expérience démontre que l'air (milieu matériel) est indispensable à la propagation du son.

### ONDE LONGITUDINALE

Un son est une **onde longitudinale** : les particules du milieu vibrent *dans le même sens* que la direction de propagation de l'onde (par opposition aux ondes transversales où les particules vibrent perpendiculairement à la propagation). L'onde sonore crée ainsi des zones alternées de **compression** (surpression) et de **dilatation** (dépression).

## 2. Vitesse de propagation du son

### PROPRIÉTÉ

La vitesse de propagation du son **dépend du milieu** traversé (nature, état physique, température). Elle est **indépendante de la fréquence** du son.

| Milieu     | Vitesse du son $c_{\text{son}}$ | Conditions            |
|------------|---------------------------------|-----------------------|
| Air (sec)  | $\approx 340 \text{ m/s}$       | à $20^\circ \text{C}$ |
| Air (sec)  | $\approx 331 \text{ m/s}$       | à $0^\circ \text{C}$  |
| Eau douce  | $\approx 1480 \text{ m/s}$      | à $20^\circ \text{C}$ |
| Eau de mer | $\approx 1500 \text{ m/s}$      | à $20^\circ \text{C}$ |
| Acier      | $\approx 5000 \text{ m/s}$      | —                     |
| Béton      | $\approx 3500 \text{ m/s}$      | —                     |

#### REMARQUE

Le son se propage **plus vite dans les solides et les liquides** que dans les gaz. Les molécules sont plus proches les unes des autres dans un solide ou un liquide, ce qui facilite la transmission des vibrations.

#### APPLICATIONS INDUSTRIELLES ET TECHNOLOGIQUES

- **Sonar** : mesure du temps d'aller-retour d'une impulsion sonore dans l'eau pour déterminer la profondeur ou détecter des obstacles. On utilise  $d = c_{\text{son}} \times \frac{\Delta t}{2}$ .
- **Échographie médicale** : les ultrasons ( $> 20 \text{ kHz}$ ) traversent les tissus humains à des vitesses connues ( $\sim 1540 \text{ m/s}$ ) ; les échos permettent de reconstruire une image.
- **CND (Contrôle Non Destructif)** : en aéronautique et industrie, des ultrasons sont envoyés dans les pièces métalliques pour détecter des défauts internes sans les endommager.
- **ICCER** **Détection de fuites** : les fuites de fluide frigorigène ou d'eau sous pression dans les canalisations génèrent des ultrasons détectables par un capteur acoustique de maintenance.

### 3. Fréquence, période et longueur d'onde

#### RAPPELS

- La **période**  $T$  (en secondes, s) est la durée d'un cycle complet de vibration.
- La **fréquence**  $f$  (en hertz, Hz) est le nombre de cycles par seconde :  $f = \frac{1}{T}$ .

#### LONGUEUR D'ONDE

La **longueur d'onde**  $\lambda$  (lambda, en mètres, m) est la distance parcourue par l'onde pendant une période  $T$ . C'est aussi la distance entre deux zones de compression successives.

$$\lambda = c_{\text{son}} \times T = \frac{c_{\text{son}}}{f}$$

$\lambda$  : longueur d'onde (m) |  $c_{\text{son}}$  : vitesse du son (m/s) |  $T$  : période (s) |  $f$  : fréquence (Hz)

#### APPLICATION

Un compresseur de PAC émet un son à  $f = 250$  Hz dans l'air ( $c = 340$  m/s). Calculer la longueur d'onde  $\lambda$  de ce son. Ce son est-il dans le domaine audible ?

#### EXEMPLE RÉSOLU

**Énoncé :** Un haut-parleur émet un son de fréquence  $f = 1\,000\text{ Hz}$  dans l'air à  $20\text{ °C}$  ( $c_{\text{son}} = 340\text{ m/s}$ ). Calculer la longueur d'onde  $\lambda$  et la période  $T$ .

1. Calcul de la période :

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1\,000} = 1,0 \times 10^{-3}\text{ s} = 1,0\text{ ms}$$

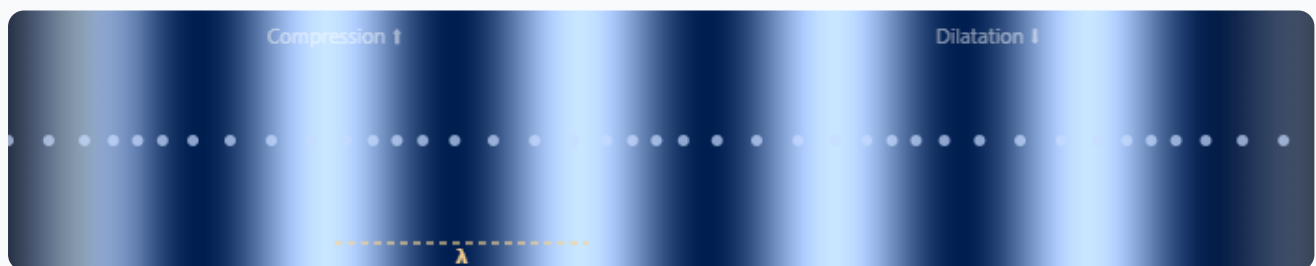
2. Calcul de la longueur d'onde :

$$\lambda = \frac{c_{\text{son}}}{f} = \frac{340}{1\,000} = 0,34\text{ m} = 34\text{ cm}$$

**Conclusion :** À  $1\text{ kHz}$ , les compressions sonores sont espacées de  $34\text{ cm}$  dans l'air.

#### 4. Animation — Propagation d'une onde sonore (compressions/dilatations)

L'animation ci-dessous représente la propagation d'une onde sonore dans l'air : les zones bleues correspondent aux compressions (surpression) et les zones sombres aux dilatations (dépression). Modifiez la fréquence pour observer l'effet sur la longueur d'onde.



**500 Hz**

Fréquence  $f$

**2.00 ms**

Période  $T$

**68.0 cm**

Longueur d'onde  $\lambda$

## 5. Domaine d'audition humaine – Infrasons et ultrasons

### DOMAINE AUDIBLE

L'oreille humaine perçoit les sons dont la fréquence est approximativement comprise entre **20 Hz et 20 000 Hz (20 kHz)**. Cette plage varie selon l'âge et l'état de santé auditive.

### DÉFINITIONS

- **Infrasons** : ondes sonores de fréquence *inférieure* à 20 Hz. Non perceptibles par l'oreille humaine, mais ressentis par le corps (vibrations).
- **Sons audibles** : de 20 Hz à 20 kHz.
- **Ultrasons** : ondes sonores de fréquence *supérieure* à 20 kHz. Non perceptibles par l'oreille humaine.

| Source / Phénomène                       | Gamme de fréquences | Domaine       |
|------------------------------------------|---------------------|---------------|
| Séismes, vagues de fond                  | < 1 Hz              | Infrasons     |
| Moteurs diesel, ventilateurs industriels | 5 – 20 Hz           | Infrasons     |
| Voix humaine (grave – aigu)              | 80 Hz – 1 100 Hz    | Sons audibles |
| Piano (étendue complète)                 | 28 Hz – 4 200 Hz    | Sons audibles |
| Ventilo-convecteur CTA                   | 100 Hz – 3 000 Hz   | Sons audibles |
| Sifflet d'arbitre                        | 2 500 – 4 000 Hz    | Sons audibles |
| Chauve-souris (détection)                | 20 kHz – 100 kHz    | Ultrasons     |
| Échographie médicale                     | 1 MHz – 20 MHz      | Ultrasons     |
| CND industriel (aéronautique)            | 0,1 MHz – 50 MHz    | Ultrasons     |

## 6. Pression acoustique et intensité sonore

### PRESSION ACOUSTIQUE

Lorsqu'une onde sonore se propage dans l'air, elle crée des **variations locales et périodiques de la pression** autour de la pression atmosphérique  $P_0$ . L'amplitude de ces variations est appelée **pression acoustique**  $p$ , exprimée en **pascals (Pa)**.

Un **microphone** est un capteur qui convertit ces variations de pression en signal électrique. Un **sonomètre** contient un microphone et affiche directement le niveau d'intensité acoustique en dB.

### INTENSITÉ SONORE

L'**intensité sonore**  $I$  est la puissance acoustique  $P_{ac}$  traversant une surface  $S$  perpendiculaire à la direction de propagation :

$$I = \frac{P_{ac}}{S}$$

$I$  : intensité sonore ( $\text{W/m}^2$ ) |  $P_{ac}$  : puissance acoustique (W) |  $S$  : surface ( $\text{m}^2$ )

### VALEURS DE RÉFÉRENCE

- **Seuil d'audition** :  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$  (à 1 kHz, pour une oreille jeune et saine). C'est la plus faible intensité perceptible par l'oreille humaine.
- **Seuil de douleur** :  $I \approx 1 \text{ W/m}^2$ , soit  $10^{12}$  fois le seuil d'audition.

### LIEN ENTRE PRESSION ET INTENSITÉ

La pression acoustique  $p$  et l'intensité  $I$  sont liées par la relation :

$$I = \frac{p^2}{\rho \cdot c_{\text{son}}}$$

où  $\rho$  est la masse volumique du milieu ( $\text{kg/m}^3$ ) et  $c_{\text{son}}$  la vitesse du son. Cette relation montre que l'intensité est proportionnelle au **carré de la pression acoustique**.

## 7. Niveau d'intensité acoustique (en décibels)

### POURQUOI UNE ÉCHELLE LOGARITHMIQUE ?

L'intensité sonore perçue par l'oreille varie dans un rapport de  $10^{12}$  entre le seuil d'audition et le seuil de douleur. Utiliser une **échelle logarithmique** permet de compresser cette très large plage en une échelle pratique de 0 à 140 dB.

### NIVEAU D'INTENSITÉ ACOUSTIQUE

Le **niveau d'intensité acoustique**  $L$  (en décibels, dB) est défini par :

$$L = 10 \times \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

$L$  : niveau d'intensité acoustique (dB) |  $I$  : intensité sonore ( $\text{W/m}^2$ ) |  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$  : intensité de référence (seuil d'audition)

### APPLICATION

Un sonomètre mesure  $L = 70 \text{ dB}$  près d'une unité extérieure de climatisation. Calculer l'intensité sonore  $I$  correspondante. ( $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ )



### LIEN MATHÉMATIQUE - FORMULE INVERSE

Si on connaît  $L$ , on retrouve  $I$  en utilisant la fonction  $10^x$  :

$$\frac{I}{I_0} = 10^{L/10} \implies I = I_0 \times 10^{L/10}$$

Chaque augmentation de

**10 dB**

correspond à une multiplication de l'intensité par

**10**

.

Chaque augmentation de

**3 dB**

correspond environ à un doublement de l'intensité.

| Niveau L (dB) | Intensité I (W/m <sup>2</sup> ) | Source / Situation                       | Risque         |
|---------------|---------------------------------|------------------------------------------|----------------|
| 0 dB          | $10^{-12}$                      | Seuil d'audition (silence absolu)        | Aucun          |
| 30 dB         | $10^{-9}$                       | Bibliothèque calme — Norme logement nuit | Aucun          |
| 35 dB         | $\sim 3 \times 10^{-9}$         | Ventilation calme — Norme séjour nuit    | Aucun          |
| 60 dB         | $10^{-6}$                       | Conversation normale                     | Aucun          |
| 75 dB         | $\sim 3,2 \times 10^{-5}$       | Ventilo-convecteur fort, aspirateur      | Faible         |
| 85 dB         | $\sim 3,2 \times 10^{-4}$       | Seuil de risque auditif                  | Seuil risque   |
| 90 dB         | $10^{-3}$                       | Compresseur frigorifique, perceuse       | Risque modéré  |
| 110 dB        | $10^{-1}$                       | Concert de rock (première rangée)        | Risque élevé   |
| 140 dB        | 100                             | Seuil de douleur, explosion proche       | Très dangereux |

**DANGER POUR L'AUDITION**

Au-delà de **85 dB**, une exposition prolongée entraîne des lésions irréversibles des cellules ciliées de la cochlée. Ces cellules ne se régénèrent pas. La surdité professionnelle est la première maladie professionnelle en France. En atelier industriel, le port de protections auditives (EPI) est obligatoire dès 80 dB et renforcé dès 85 dB (réglementation INRS).

En installation thermique, les compresseurs de climatisation, les pompes et les CTA peuvent dépasser 85-95 dB à 1 mètre.

**EXEMPLE RÉSOLU - CALCUL DE NIVEAU SONORE**

**Énoncé :** Une perceuse produit une intensité sonore  $I = 10^{-3} \text{ W/m}^2$ . Calculer le niveau d'intensité acoustique  $L$ .

**Application numérique :**

$$L = 10 \times \log\left(\frac{10^{-3}}{10^{-12}}\right) = 10 \times \log(10^9) = 10 \times 9 = 90 \text{ dB}$$

**Conclusion :**  $L = 90 \text{ dB}$ . L'utilisation de protections auditives est nécessaire.

**EXEMPLE RÉSOLU - RETROUVER  $I$  À PARTIR DE  $L$** 

**Énoncé :** Un sonomètre indique  $L = 60 \text{ dB}$ . Quelle est l'intensité sonore  $I$  ?

$$I = I_0 \times 10^{L/10} = 10^{-12} \times 10^{60/10} = 10^{-12} \times 10^6 = 10^{-6} \text{ W/m}^2$$

## 8. Atténuation du son avec la distance

### PRINCIPE

Pour une **source ponctuelle** émettant uniformément dans toutes les directions, la puissance acoustique  $P_{ac}$  se répartit sur des sphères de surface  $S = 4\pi r^2$  croissante. L'intensité diminue donc en  $1/r^2$  :

$$I(r) = \frac{P_{ac}}{4\pi r^2}$$

$$L_2 = L_1 - 20 \times \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

$L_1$  : niveau sonore à la distance  $r_1$  (dB) |  $L_2$  : niveau sonore à la distance  $r_2$  (dB) |  $r_1, r_2$  : distances à la source (m)

### APPLICATION

Une unité extérieure de PAC émet  $L_1 = 65$  dB à  $r_1 = 1$  m. Calculer le niveau sonore  $L_2$  à  $r_2 = 5$  m et à  $r_2 = 10$  m. Ces niveaux respectent-ils la limite de 35 dB(A) en séjour ?

### DÉMONSTRATION DE LA FORMULE

On part de  $I \propto 1/r^2$ , donc  $I_2/I_1 = (r_1/r_2)^2$ . En passant en décibels :

$$L_2 - L_1 = 10 \times \log\left(\frac{r_1^2}{r_2^2}\right) = -20 \times \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

### RÈGLE PRATIQUE

**Doubler la distance à la source** (source ponctuelle) provoque une diminution du niveau sonore de :

$$\Delta L = -20 \times \log(2) \approx -6 \text{ dB}$$

S'écloigner deux fois plus loin réduit le niveau sonore d'environ **6 dB**.

#### EXEMPLE RÉSOLU - APPLICATION INDUSTRIELLE

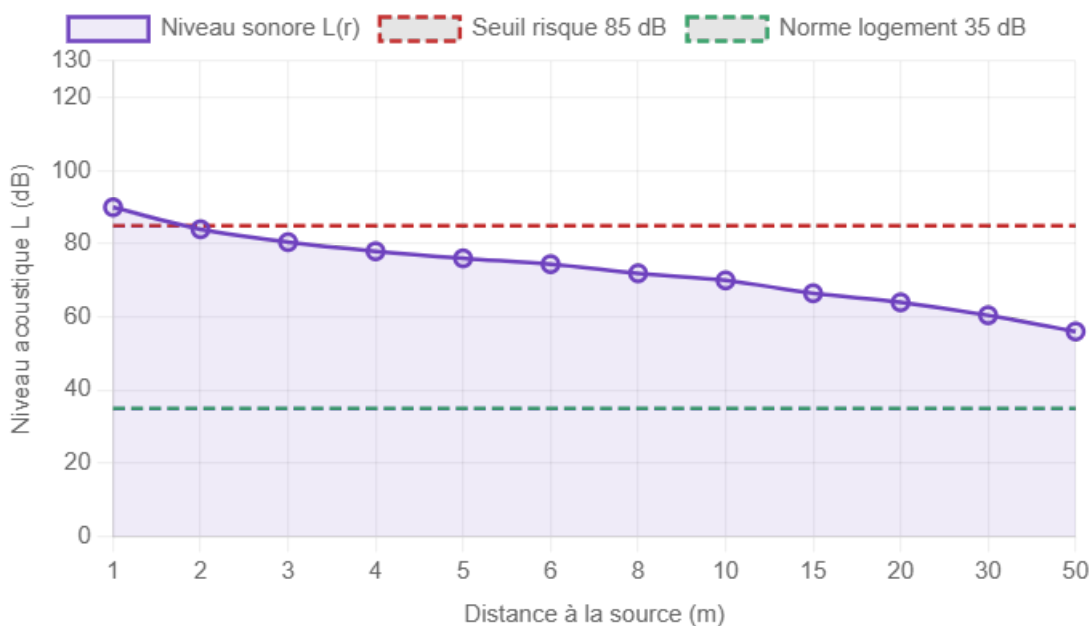
**Situation :** Une machine dans un atelier produit  $L_1 = 95$  dB à  $r_1 = 1$  m. Un opérateur travaille à  $r_2 = 4$  m. Quel est le niveau sonore reçu par l'opérateur ?

$$L_2 = 95 - 20 \times \log\left(\frac{4}{1}\right) = 95 - 20 \times 0,602 \approx 83 \text{ dB}$$

**Conclusion :** À 4 m, l'opérateur reçoit  $\approx 83$  dB, légèrement en dessous du seuil de risque de 85 dB. Pour une exposition prolongée, les protections auditives restent recommandées.

### 9. Simulateur — Atténuation sonore en fonction de la distance

Ajustez le niveau sonore à 1 m et la distance pour voir comment le niveau évolue. La ligne rouge indique le seuil de risque auditif (85 dB) et la ligne verte la norme logement (35 dB).



**90 dB**

Niveau à 1 m

**1.8 m**

Distance seuil 85 dB

**562 m**

Distance norme 35 dB

## MOYENS DE RÉDUCTION DU BRUIT EN INSTALLATION THERMIQUE

- **Éloignement** : augmenter la distance entre l'opérateur et la source (loi en  $1/r^2$ ).
- **Silent-blocs et amortisseurs de vibrations** : découplage mécanique entre le compresseur/pompe et la structure du bâtiment.
- **Conduits flexibles** : réduisent la transmission des vibrations des CTA vers les gaines rigides.
- **Encoffrement acoustique** : entourer la machine avec un capot en matériaux absorbants (laine de verre, mousse mélamine).
- **Protections individuelles (EPI)** : bouchons d'oreille ou casque antibruit (obligatoires dès 80 dB).
- **Réduction à la source** : maintenance des machines, lubrification, équilibrage des rotors.

## 10. Tableau récapitulatif – Formules et unités

| Grandeur                      | Symbole   | Formule                                                | Unité          |
|-------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------|----------------|
| Fréquence                     | $f$       | $f = 1/T$                                              | Hertz (Hz)     |
| Période                       | $T$       | $T = 1/f$                                              | Seconde (s)    |
| Longueur d'onde               | $\lambda$ | $\lambda = c_{\text{son}} \times T = c_{\text{son}}/f$ | Mètre (m)      |
| Vitesse du son (air, 20 °C)   | $c$       | $c_{\text{son}} \approx 340 \text{ m/s}$               | m/s            |
| Intensité sonore              | $I$       | $I = P_{\text{ac}}/S$                                  | $\text{W/m}^2$ |
| Niveau d'intensité acoustique | $L$       | $L = 10 \log(I/I_0)$                                   | Décibel (dB)   |
| Intensité à partir du niveau  | $I$       | $I = I_0 \times 10^{L/10}$                             | $\text{W/m}^2$ |
| Atténuation géométrique       | $L_2$     | $L_2 = L_1 - 20 \log(r_2/r_1)$                         | dB             |

### 💡 À retenir absolument

- Le son est une **onde mécanique longitudinale** qui ne se propage pas dans le vide.
- La vitesse du son dépend du milieu : **340 m/s dans l'air**, **1 500 m/s dans l'eau**, ~5 000 m/s dans l'acier.
- L'oreille humaine perçoit entre **20 Hz et 20 kHz**.
- Le niveau sonore s'exprime en **décibels (dB)** :  $L = 10 \log(I/I_0)$ , avec  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ .
- Au-delà de **85 dB**, l'exposition prolongée est dangereuse pour l'audition de façon irréversible.
- Doubler la distance à une source ponctuelle réduit le niveau sonore d'environ **6 dB**.
- En installation thermique, les équipements CVC peuvent dépasser 85-95 dB : protections EPI et encoffrement obligatoires.

## 11. Bilan — Synthèse du chapitre

### Formules essentielles

- $\lambda = c/f = c \times T$  [m]
- $f = 1/T$  [Hz]
- $L = 10 \cdot \log(I/I_0)$  [dB]
- $I = I_0 \times 10^{(L/10)}$  [ $\text{W/m}^2$ ]
- $L_2 = L_1 - 20 \cdot \log(r_2/r_1)$  [dB]
- Doublement distance  $\rightarrow -6 \text{ dB}$

### Applications professionnelles

- Sonomètre pour mesurer bruit CTA/compresseur
- Calcul distance de sécurité (85 dB)
- Atténuation par encoffrement acoustique
- EPI auditifs dès 80 dB (INRS)
- Norme logement : 30 dB chambre, 35 dB séjour
- Détection fuites par ultrasons

## 12. Mini-exercices corrigés

### Exercice 1 — Longueur d'onde d'un son émis par une CTA

Un ventilo-convecteur émet un bruit caractéristique à la fréquence  $f = 200 \text{ Hz}$  dans l'air à  $20^\circ \text{C}$  ( $c_{\text{son}} = 340 \text{ m/s}$ ).

1. Calculer la longueur d'onde  $\lambda$  de ce son.
2. Calculer sa période  $T$ .
3. Ce son est-il audible ? Indiquer à quel domaine il appartient.

### Exercice 2 — Niveau sonore d'un compresseur frigorifique

Un compresseur de PAC extérieur produit une intensité sonore mesurée à  $I = 3,16 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$  à 1 mètre. ( $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ )

1. Calculer le niveau sonore  $L$  à 1 m.
2. Des protections auditives sont-elles obligatoires pour un technicien travaillant à 1 m pendant 30 minutes ?
3. À quelle distance  $r_2$  le niveau descend-il à 85 dB (seuil de risque) ?

### Exercice 3 — Atténuation par la distance : CTA en toiture

Une CTA installée en toiture d'un immeuble produit un niveau sonore de  $L_1 = 75 \text{ dB}$  à  $r_1 = 2 \text{ m}$ . Un appartement est situé à  $r_2 = 15 \text{ m}$  de la CTA (en ligne directe).

1. Calculer le niveau sonore  $L_2$  à 15 m (en considérant la CTA comme une source ponctuelle).
2. La réglementation acoustique impose  $< 35 \text{ dB}$  dans un séjour. Cette limite est-elle respectée ?
3. De combien dB faudrait-il atténuer le niveau à la source pour respecter la norme ?

#### Exercice 4 — Calcul de I et comparaison de deux sources

Deux équipements sont installés dans le même local technique : une pompe à chaleur ( $L_{PAC} = 72$  dB) et un compresseur frigorifique ( $L_{comp} = 90$  dB). ( $I_0 = 10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>)

1. Calculer l'intensité  $I_{PAC}$  et l'intensité  $I_{comp}$ .
2. Combien de fois le compresseur est-il plus intense que la PAC ?
3. Un technicien doit intervenir 2 heures dans ce local avec un seul EPI auditif offrant une atténuation de 15 dB. Le niveau reçu est-il acceptable ( $< 85$  dB) ?

#### Exercice 5 — Choix des EPI auditifs pour un chantier d'installation thermique

Un installateur thermique installe une PAC en toiture. Il est exposé à trois sources sonores simultanées :

- Foreuse percussion :  $L_1 = 105$  dB
- Compresseur de service :  $L_2 = 88$  dB
- Bruit de fond (vent, circulation) :  $L_3 = 72$  dB

La réglementation impose une exposition  $\leq 80$  dB sur 8 heures (valeur d'action inférieure) et interdit toute exposition  $> 87$  dB sans EPI.

1. Quelle source domine le niveau sonore global ? (Justifier sans calcul détaillé.)
2. Pour protéger le technicien lors de l'utilisation de la foreuse (105 dB, durée 2h), un casque anti-bruit offrant 32 dB d'atténuation est disponible. Quel niveau reçoit-il avec ce casque ?
3. Ce casque est-il suffisant pour rester sous 80 dB ? Sous 87 dB ?
4. Des bouchons d'oreille offrent 24 dB d'atténuation. Peut-on les combiner avec le casque ? (L'atténuation combinée n'est pas la somme, mais  $\approx$  atténuation la plus forte + 5 dB.)
5. Donner deux autres mesures de prévention collective pour réduire le bruit à la source.



## Synthèse — Formules acoustiques essentielles

| Grandeur                      | Formule                                                | Unité          | Remarque                                               |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------|--------------------------------------------------------|
| Niveau d'intensité acoustique | $L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$                | dB             | $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$                         |
| Intensité depuis L            | $I = I_0 \times 10^{L/10}$                             | $\text{W/m}^2$ | Inverse de la formule dB                               |
| Atténuation par distance      | $L_2 = L_1 - 20 \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$      | dB             | Source ponctuelle en champ libre                       |
| Cumul de n sources identiques | $L_{\text{tot}} = L_1 + 10 \log(n)$                    | dB             | 2 sources identiques $\rightarrow +3 \text{ dB}$       |
| Longueur d'onde               | $\lambda = c/f$                                        | m              | $c = 340 \text{ m/s}$ dans l'air à $20^\circ \text{C}$ |
| Niveau reçu avec EPI          | $L_{\text{reçu}} = L_{\text{source}} - A_{\text{EPI}}$ | dB             | $A_{\text{EPI}}$ : atténuation en dB                   |

## Erreurs fréquentes

### ✗ Confondre intensité sonore I et niveau sonore L

I est une puissance par unité de surface ( $\text{W/m}^2$ ) ; L est une grandeur logarithmique sans dimension (dB). On ne peut pas les additionner ou les comparer directement.

*Conseil : utiliser la formule  $L = 10 \times \log(I/I_0)$  pour convertir de l'un à l'autre.*

### ✗ Additionner des décibels algébriquement

Deux sources de 60 dB ne font pas 120 dB — mais environ 63 dB. Les décibels s'additionnent par les intensités :  $I_{\text{total}} = I_1 + I_2$ , puis  $L_{\text{total}} = 10 \times \log(I_{\text{total}}/I_0)$ .

*Conseil : repasser par les intensités en  $\text{W/m}^2$  pour additionner des sources sonores.*

### ✗ Oublier que le log est en base 10

La formule  $L = 10 \times \log_{10}(I/I_0)$  utilise le logarithme en base 10 ( $\log_{10}$ ), pas le logarithme népérien ( $\ln$ ). Sur une calculatrice, utiliser la touche "log" et non "ln".

*Conseil : vérifier que  $\log(1) = 0$  et  $\log(10) = 1$  pour valider la calculatrice.*

### ✗ Croire que le son se propage dans le vide

Le son est une onde mécanique qui nécessite un milieu matériel pour se propager. Il n'y a pas de son dans le vide. La lumière (onde électromagnétique) se propage dans le vide, mais pas le son.

*Conseil : distinguer ondes mécaniques (son) et ondes électromagnétiques (lumière, radio, IR).*

**Simulation interactive**

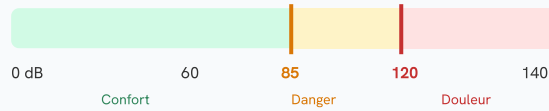
[Signal sonore](#)

---

## 08

**Caractériser la propagation d'un signal sonore**

Caractériser la propagation d'un signal sonore | Terminale Bac Pro ICCER (Grpt 1)

[Socle](#)[Standard](#)[Approfondissement](#)[Tout voir](#)[Objectifs du chapitre](#)[cliquer pour développer](#)

## Rappels du cours — formules essentielles

### Relation entre vitesse, fréquence et longueur d'onde :

$$v = \lambda \cdot f \quad \Longleftrightarrow \quad \lambda = \frac{v}{f}$$

avec  $v \approx 340$  m/s dans l'air à 20 °C,  $f$  en Hz,  $\lambda$  en m.

### Relation période-fréquence :

$$T = \frac{1}{f} \quad \Longleftrightarrow \quad f = \frac{1}{T}$$

### Niveau sonore en décibels :

$$L = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad \text{avec } I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

→ Si  $I = 10^k \cdot I_0$ , alors  $L = 10k$  dB.

### Retrouver I à partir de L :

$$I = I_0 \times 10^{L/10}$$

### Addition de sources identiques (n sources de même niveau $L_1$ ) :

$$L_{\text{total}} = L_1 + 10 \cdot \log(n)$$

### Atténuation géométrique — source ponctuelle :

$$I = \frac{P}{4\pi d^2} \quad \Longrightarrow \quad I \propto \frac{1}{d^2}$$

En niveau sonore :  $L_2 = L_1 - 20 \cdot \log\left(\frac{d_2}{d_1}\right)$

### Formule de Sabine (réverbération) :

$$T_R = \frac{0,16 \times V}{A}$$

avec  $V$  = volume de la salle ( $\text{m}^3$ ),  $A$  = surface absorbante équivalente ( $\text{m}^2$ ),  $T_R$  en secondes.

## Exercices de base

### EXERCICE 1 Calculer longueur d'onde et période — pas à pas

SOCLE

Un son de fréquence  $f = 1\,000$  Hz se propage dans l'air à  $v = 340$  m/s.

1. Compléter la formule puis calculer la longueur d'onde :

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{\boxed{\phantom{000}}}{\boxed{\phantom{000}}} = \boxed{\phantom{000}} \text{ m}$$

2. Compléter la formule puis calculer la période :

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{\boxed{\phantom{000}}} = \boxed{\phantom{000}} \text{ s}$$

3. Le domaine audible va de 20 Hz à 20 000 Hz. Entourer la bonne réponse :

- Ce son de 1 000 Hz est **audible** / **inaudible**.

Mes calculs :

---

---

---

**EXERCICE 2** Calculer un niveau sonore — QCM et calcul guidé

SOCLE

On donne :  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ . Un son a une intensité  $I = 10^{-8} \text{ W/m}^2$ .

1. Compléter le calcul du niveau sonore  $L$  :

$$L = 10 \times \log\left(\frac{I}{I_0}\right) = 10 \times \log\left(\frac{10^{-8}}{10^{-12}}\right) = 10 \times \log\left(10^{\square}\right) = 10 \times \square = \square \text{ dB}$$

2. Ce niveau de 40 dB correspond environ à :

- ☐ Un concert rock (~110 dB)
- ☐ Un appartement calme (~40 dB)
- ☐ Un moteur de tondeuse (~90 dB)

*Mes calculs :*

---

---

---

**EXERCICE 3** Retrouver l'intensité à partir du niveau sonore — pas à pas

SOCLE

Un son a un niveau sonore  $L = 80$  dB. On donne  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ .

1. Compléter le calcul :

$$I = I_0 \times 10^{L/10} = 10^{-12} \times 10^{\boxed{\phantom{00}}/10} = 10^{-12} \times 10^{\boxed{\phantom{00}}} = \boxed{\phantom{00}} \text{ W/m}^2$$

2. À 40 dB, l'intensité vaut  $I = 10^{-8} \text{ W/m}^2$ . À 80 dB, on vient de trouver  $I = 10^{-4} \text{ W/m}^2$ .

Compléter : quand le niveau passe de 40 à 80 dB (il double), l'intensité est multipliée par :

$$\frac{10^{-4}}{10^{-8}} = \boxed{\phantom{00}}$$

3. Entourer la bonne réponse : l'échelle des décibels est une échelle **linéaire** / **logarithmique**.

*Mes calculs :*

---

---

---

#### EXERCICE 4 Bruit d'un ventilateur — lecture et comparaison guidées

SOCLE

Un technicien CVC relève les niveaux sonores de deux ventilateurs :

| Ventilateur | Niveau sonore à 1 m |
|-------------|---------------------|
| Modèle A    | 55 dB               |
| Modèle B    | 70 dB               |

1. Quel ventilateur est le plus bruyant ?
2. La réglementation impose un maximum de 40 dB dans les bureaux. Compléter :

Le modèle A dépasse la limite de :  $55 - 40 = \square$  dB.

Le modèle B dépasse la limite de :  $70 - 40 = \square$  dB.

3. Les deux ventilateurs nécessitent-ils un silencieux acoustique ?

*Mes calculs :*

---

---

---



**EXERCICE 5** Vitesse du son dans différents milieux — lecture de tableau

SOCLE

La vitesse du son dépend du milieu de propagation :

| Milieu              | Vitesse du son (m/s) |
|---------------------|----------------------|
| Air (20 °C)         | 340                  |
| Eau                 | 1 500                |
| Acier               | 5 000                |
| Cuivre (tuyauterie) | 3 700                |

1. Dans quel milieu le son se propage-t-il le plus vite ?
2. Un technicien chauffagiste frappe sur une tuyauterie en acier de 50 m de long. Compléter le calcul du temps mis par le son pour parcourir cette distance :

$$t = \frac{d}{v} = \frac{\boxed{\phantom{000}}}{\boxed{\phantom{000}}} = \boxed{\phantom{000}} \text{ s}$$

3. Le son se propage-t-il plus vite dans l'air ou dans la tuyauterie ? Entourer la bonne réponse.

*Mes calculs :*

---

---

---

## EXERCICE 6 Domaine audible — classer des sons

SOCLE

Le domaine audible pour l'oreille humaine va de 20 Hz à 20 000 Hz. En dessous de 20 Hz, on parle d'**infrasons** ; au-dessus de 20 000 Hz, d'**ultrasons**.

1. Compléter le tableau en cochant la bonne case :

| Son                             | Fréquence | Infrason                 | Audible                  | Ultrason                 |
|---------------------------------|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Vibration d'un compresseur      | 12 Hz     | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Alarme incendie                 | 3 000 Hz  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Sifflement d'une chaudière      | 8 000 Hz  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Capteur de présence à ultrasons | 40 000 Hz | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Note grave d'un tuyau d'orgue   | 16 Hz     | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

2. Les vibrations d'un compresseur à 12 Hz peuvent-elles être entendues ? Peuvent-elles être ressenties par le corps ?

*Mes calculs :*

---

---

---

## EXERCICE 7 Échelle des décibels — associer bruits et niveaux

SOCLE

Un installateur thermique travaille dans différents environnements. Voici des niveaux sonores courants :

| Environnement         | Niveau sonore (dB) |
|-----------------------|--------------------|
| Chambre calme la nuit | 20 dB              |
| Bureau climatisé      | 45 dB              |
| Conversation normale  | 60 dB              |
| Perceuse à béton      | 100 dB             |
| Seuil de douleur      | 120 dB             |

1. À partir de quel niveau sonore des protections auditives sont-elles obligatoires sur un chantier ? Entourer : **80 dB / 85 dB / 100 dB**
2. La perceuse à béton dépasse-t-elle ce seuil ? Le technicien doit-il porter des bouchons d'oreilles ?
3. Un climatiseur mural émet 38 dB. Compléter : ce climatiseur est **plus bruyant / moins bruyant** qu'un bureau climatisé (45 dB).

*Mes calculs :*

---

---

---

**EXERCICE 8** Addition de deux machines identiques — calcul guidé

SOCLE

Deux pompes à chaleur identiques émettent chacune un niveau sonore de  $L_1 = 60$  dB.

Formule pour  $n$  sources identiques :  $L_{\text{total}} = L_1 + 10 \times \log(n)$

On donne :  $\log(2) = 0,301$ .

1. Compléter le calcul pour  $n = 2$  pompes :

$$L_{\text{total}} = 60 + 10 \times \log(\square) = 60 + 10 \times \square = 60 + \square = \square \text{ dB}$$

2. Le niveau total est-il le double de 60 dB (= 120 dB) ? Entourer : **Oui** / **Non**

3. Compléter : ajouter une deuxième source identique augmente le niveau de  $\square$  dB.

*Mes calculs :*

---

---

---

**EXERCICE 9 Lire un oscillogramme — période et fréquence****SOCLE**

Sur un oscilloscope, un technicien observe le signal sonore capté par un microphone placé près d'un ventilateur. Le signal est périodique et on lit :

- 5 motifs identiques occupent une durée totale de 10 ms.

1. Compléter : la période du signal est  $T = \frac{10 \text{ ms}}{\boxed{\phantom{00}}} = \boxed{\phantom{00}} \text{ ms}$ .

2. Convertir la période en secondes :  $T = \boxed{\phantom{0000}} \text{ s}$ .

3. Calculer la fréquence :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{\boxed{\phantom{0000}}} = \boxed{\phantom{000}} \text{ Hz}$$

4. Ce son est-il audible (20 Hz – 20 000 Hz) ? Est-il grave ou aigu ?

*Mes calculs :*

---

---

---

## Exercices d'application

### EXERCICE 10 Calculer longueur d'onde et période d'un son

STANDARD

Un son de fréquence  $f = 1\,000\text{ Hz}$  se propage dans l'air à  $v = 340\text{ m/s}$ .

1. Calculer la longueur d'onde  $\lambda$  de ce son.
2. Calculer la période  $T$  de ce son.
3. Ce son de  $1\,000\text{ Hz}$  est-il audible pour l'oreille humaine (domaine :  $20\text{ Hz}$  à  $20\,000\text{ Hz}$ ) ?

*Mes calculs :*

---

---

---

---

---

**EXERCICE 11** Calculer un niveau sonore et retrouver l'intensité

STANDARD

On donne :  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ .

1. Un son a une intensité  $I = 10^{-8} \text{ W/m}^2$ . Calculer le niveau sonore  $L$  en dB.
2. À quel type de bruit courant correspond ce niveau (conversation normale  $\sim 60 \text{ dB}$ , moteur tondeuse  $\sim 90 \text{ dB}$ , seuil de danger  $\sim 120 \text{ dB}$ ) ?
3. Un autre son a un niveau sonore  $L = 80 \text{ dB}$ . Calculer l'intensité  $I$  en  $\text{W/m}^2$  à l'aide de la formule  $I = I_0 \times 10^{L/10}$ .
4. Comparer les deux intensités (40 dB et 80 dB). Le niveau a doublé : l'intensité a-t-elle simplement doublé ? Conclure sur l'échelle décibel.

*Mes calculs :*

---

---

---

---

---

## EXERCICE 12 Addition de sources sonores identiques

STANDARD

Deux sources sonores identiques émettent chacune un niveau sonore  $L_1 = 70$  dB.

Formule pour  $n$  sources identiques :  $L_{\text{total}} = L_1 + 10 \cdot \log(n)$

### Méthode :

Cette formule s'applique uniquement à des sources identiques. On ne peut pas additionner directement les niveaux en dB :  $70 + 70 \neq 140$  dB !

1. Calculer le niveau total  $L_{\text{total}}$  pour  $n = 2$  sources.
2. Calculer le niveau total pour  $n = 4$  sources.
3. Que se passe-t-il lorsqu'on double le nombre de sources ? Quelle augmentation en dB cela provoque-t-il ?
4. Combien de sources faudrait-il pour obtenir un niveau total de 80 dB ?

*Mes calculs :*

---

---

---

---

---



**EXERCICE 13** Atténuation avec la distance — source ponctuelle

STANDARD

Une source sonore ponctuelle émet une puissance acoustique  $P = 0,1 \text{ W}$ .

Formule de l'intensité :  $I = \frac{P}{4\pi d^2}$  |  $L = 10 \times \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$  avec  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$

1. Calculer l'intensité  $I$  à  $d = 1 \text{ m}$ , puis à  $d = 2 \text{ m}$ , puis à  $d = 10 \text{ m}$ .
2. Calculer le niveau sonore  $L$  en dB pour chacune de ces trois distances.
3. Vérifier que doubler la distance diminue  $L$  d'environ 6 dB. Justifier ce résultat.

*Mes calculs :*

---

---

---

---

---

**EXERCICE 14** Bruit de chantier — respect du seuil réglementaire

STANDARD

Un chantier de travaux produit un bruit de  $L_1 = 95$  dB à  $d_1 = 1$  m.

La réglementation impose un niveau maximal de 85 dB à  $d_2 = 10$  m du chantier.

Loi d'atténuation :  $L_2 = L_1 - 20 \times \log\left(\frac{d_2}{d_1}\right)$

1. Calculer l'intensité  $I_1$  à 1 m à partir de  $L_1 = 95$  dB.
2. En appliquant  $I \propto 1/d^2$ , calculer l'intensité  $I_2$  à 10 m.
3. Calculer le niveau sonore  $L_2$  à 10 m. Le seuil de 85 dB est-il respecté ?
4. Vérifier avec la formule  $L_2 = L_1 - 20 \times \log(d_2/d_1)$ .

*Mes calculs :*

---

---

---

---

---

### EXERCICE 15 CTA et silencieux acoustique

STANDARD

Un technicien CVC installe une centrale de traitement d'air (CTA) pour la ventilation d'un bâtiment tertiaire. Le ventilateur de la CTA émet un bruit de  $L_{\text{source}} = 85 \text{ dB}$  à 1 m.

Les locaux traités exigent un niveau maximal de **40 dB**.

Un silencieux est installé en gaine ; il réduit le niveau de **30 dB**.

Loi d'atténuation :  $L(d) = L_1 - 20 \times \log(d)$

1. Calculer le niveau après le silencieux :  $L_{\text{après}} = L_{\text{source}} - 30 \text{ dB}$ . Ce niveau est-il suffisant pour respecter les 40 dB dans les locaux ?
2. Sans silencieux, à quelle distance minimale  $d$  le niveau atteint-il 40 dB ?
3. Avec le silencieux (niveau réduit à 55 dB à 1 m), à quelle distance le niveau atteint-il 40 dB ? Conclure sur l'utilité du silencieux.

*Mes calculs :*

---

---

---

---

---

**EXERCICE 16** Longueur d'onde dans différents milieux

STANDARD

Un son de fréquence  $f = 500 \text{ Hz}$  se propage dans l'air ( $v_{\text{air}} = 340 \text{ m/s}$ ) puis dans l'eau d'un circuit de chauffage ( $v_{\text{eau}} = 1\,500 \text{ m/s}$ ).

1. Calculer la longueur d'onde  $\lambda_{\text{air}}$  dans l'air.
2. Calculer la longueur d'onde  $\lambda_{\text{eau}}$  dans l'eau.
3. La fréquence change-t-elle lorsque le son passe de l'air à l'eau ? Justifier.
4. Comparer les deux longueurs d'onde. Dans quel milieu le son a-t-il la plus grande longueur d'onde ? Pourquoi ?

*Mes calculs :*

---

---

---

---

---

**EXERCICE 17** Bruit d'un groupe extérieur de climatisation

STANDARD

Un technicien climatisation installe un groupe extérieur qui émet un niveau sonore  $L_1 = 62$  dB à  $d_1 = 1$  m. Le voisin le plus proche se trouve à  $d_2 = 4$  m.

Loi d'atténuation :  $L_2 = L_1 - 20 \times \log\left(\frac{d_2}{d_1}\right)$

On donne :  $\log(4) = 0,602$ .

1. Calculer le niveau sonore  $L_2$  perçu par le voisin à 4 m.
2. La réglementation impose une émergence maximale de 5 dB le jour par rapport au bruit ambiant de 35 dB. Calculer le niveau maximal autorisé.
3. Le groupe extérieur respecte-t-il la réglementation ? Calculer la réduction nécessaire.
4. On installe un écran acoustique apportant une atténuation de 12 dB. Le nouveau niveau respecte-t-il la norme ?

*Mes calculs :*

---

---

---

---

---

**EXERCICE 18** Période et fréquence d'un signal — conversions

STANDARD

Compléter le tableau suivant en utilisant la relation  $f = 1/T$  :

| Signal                      | Période $T$ | Fréquence $f$ | Longueur d'onde $\lambda$ |
|-----------------------------|-------------|---------------|---------------------------|
| Son grave d'une ventilation | 10 ms       | ?             | ?                         |
| Alarme incendie             | ?           | 3 150 Hz      | ?                         |
| Son aigu d'un compresseur   | 0,25 ms     | ?             | ?                         |

On prendra  $v = 340$  m/s.

1. Calculer la fréquence et la longueur d'onde pour chaque signal.
2. Classer ces trois sons du plus grave au plus aigu.
3. Le son le plus aigu est-il toujours audible ? Justifier.

*Mes calculs :*

---

---

---

---

---

**EXERCICE 19 EPI auditifs — choix de protection****STANDARD**

Un plombier chauffagiste travaille dans une chaufferie où le bruit atteint 98 dB. Il dispose de deux types de protections auditives :

| Protection       | Atténuation |
|------------------|-------------|
| Bouchons mousse  | -20 dB      |
| Casque antibruit | -30 dB      |

1. Calculer le niveau perçu avec les bouchons mousse.
2. Calculer le niveau perçu avec le casque antibruit.
3. La durée d'exposition maximale recommandée dépend du niveau :

| Niveau (dB)   | 85 | 88 | 91 | 94 | 97  | 100  |
|---------------|----|----|----|----|-----|------|
| Durée max (h) | 8  | 4  | 2  | 1  | 0,5 | 0,25 |

Le technicien doit travailler 6 heures dans la chaufferie. Quelle protection doit-il choisir ? Justifier.

*Mes calculs :*

---

---

---

---

---

**EXERCICE 20** Intensité sonore d'un brûleur de chaudière

STANDARD

Le brûleur d'une chaudière à gaz émet une puissance acoustique  $P = 2 \times 10^{-3} \text{ W}$ .

On considère le brûleur comme une source ponctuelle.

Formules :  $I = \frac{P}{4\pi d^2}$  |  $L = 10 \times \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$  avec  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$

1. Calculer l'intensité sonore  $I$  à  $d = 0,5 \text{ m}$  (position du technicien).
2. En déduire le niveau sonore  $L$  en dB à cette distance.
3. Le technicien doit-il porter des protections auditives (seuil : 85 dB) ?
4. À quelle distance  $d$  le niveau passe-t-il en dessous de 85 dB ?

*Mes calculs :*

---

---

---

---

---



**EXERCICE 21 Réverbération d'un local technique — formule de Sabine****STANDARD**

Un local technique de chaufferie a un volume  $V = 80 \text{ m}^3$ . Ses murs sont en béton brut avec une surface absorbante équivalente  $A = 8 \text{ m}^2$ .

Formule de Sabine :  $T_R = \frac{0,16 \times V}{A}$

1. Calculer le temps de réverbération  $T_R$  du local.
2. Pour un local technique, le temps de réverbération recommandé est  $T_R \leq 0,8 \text{ s}$ . Le local est-il conforme ?
3. On pose des panneaux absorbants au plafond, ajoutant  $10 \text{ m}^2$  de surface absorbante. Calculer le nouveau temps de réverbération.
4. Le local est-il conforme après traitement ?

*Mes calculs :*

---

---

---

---

---

### EXERCICE 22 PAC en toiture — réglementation de voisinage

#### APPROFONDISSEMENT

Un installateur de pompes à chaleur pose une PAC air/air en toiture d'un immeuble. La PAC émet un niveau sonore de  $L_1 = 65$  dB à  $d_1 = 1$  m.

La réglementation impose un niveau maximal de 35 dB à la limite de propriété, à  $d = 5$  m.

Loi d'atténuation :  $L_2 = L_1 - 20 \times \log\left(\frac{d_2}{d_1}\right)$

1. Calculer le niveau sonore  $L$  à  $d = 5$  m.
2. Ce niveau respecte-t-il la réglementation (35 dB) ? Calculer l'atténuation supplémentaire nécessaire.
3. Un capot absorbant réduit le niveau à la source de 20 dB (nouveau niveau à 1 m = 45 dB). Recalculer le niveau à 5 m. La réglementation est-elle respectée ?
4. Proposer deux autres solutions techniques pour réduire le bruit d'une PAC en toiture.

*Mes calculs :*

---

---

---

---

---

---

## EXERCICE 23 Réverbération dans une salle — formule de Sabine

### APPROFONDISSEMENT

Un technicien thermique intervient dans une salle de réunion d'un bâtiment tertiaire pour optimiser le traitement acoustique.

Données : volume  $V = 200 \text{ m}^3$ , surface absorbante équivalente actuelle  $A = 50 \text{ m}^2$ .

Formule de Sabine :  $T_R = \frac{0,16 \times V}{A}$

1. Calculer le temps de réverbération actuel  $T_R$ .
2. Un temps cible de  $T_R = 0,5 \text{ s}$  est recommandé. La salle est-elle trop réverbérante ou pas assez ?
3. Calculer la surface absorbante  $A_{\text{cible}}$  nécessaire pour atteindre  $T_R = 0,5 \text{ s}$ . En déduire la surface supplémentaire à installer.

*Mes calculs :*

---

---

---

---

---

---

**Situation professionnelle** — Un technicien de maintenance énergétique réalise un diagnostic acoustique d'une chaufferie collective. La chaufferie contient 3 chaudières identiques, chacune émettant un niveau sonore de  $L_1 = 78$  dB à 1 m. La porte de la chaufferie donne sur un couloir desservant des logements. La réglementation impose un niveau inférieur à 30 dB dans les logements.

La distance de la source au logement le plus proche est de 8 m.

Données :  $\log(2) = 0,301$  ;  $\log(3) = 0,477$  ;  $\log(8) = 0,903$ .

1. Calculer le niveau sonore total  $L_{\text{total}}$  produit par les 3 chaudières fonctionnant simultanément.
2. Calculer le niveau sonore à 8 m de la source (en utilisant la loi d'atténuation avec la distance).
3. La réglementation de 30 dB dans les logements est-elle respectée ? Calculer l'atténuation supplémentaire nécessaire.
4. On installe une porte acoustique apportant une isolation de 35 dB. Montrer que cette solution permet de respecter la réglementation. Calculer la marge obtenue.
5. Le technicien propose également de poser des manchons antivibratoires sur les tuyauteries. Expliquer en quoi cette mesure complémentaire est pertinente (distinguer bruit aérien et bruit solidien).

*Mes calculs :*

---

---

---

---

---

---

**EXERCICE 25** Nuisances sonores — comparaison de pompes à chaleur (type BTS)

**APPROFONDISSEMENT**

**Situation professionnelle** — Un installateur de pompes à chaleur doit choisir entre deux modèles pour l'installation en toiture-terrasse d'un bâtiment de bureaux. Le cahier des charges impose un niveau sonore inférieur à 45 dB à 3 m de la PAC (terrasse accessible) et inférieur à 35 dB à 15 m (limite de propriété).

| Modèle    | Puissance acoustique $P$ (W) | Fréquence principale (Hz) |
|-----------|------------------------------|---------------------------|
| PAC Alpha | $5 \times 10^{-4}$           | 250                       |
| PAC Beta  | $2 \times 10^{-4}$           | 800                       |

Formules :  $I = \frac{P}{4\pi d^2}$  |  $L = 10 \times \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$  |  $\lambda = v/f$  avec  $v = 340$  m/s.

1. Pour chaque modèle, calculer l'intensité sonore et le niveau en dB à  $d = 3$  m puis à  $d = 15$  m.
2. Déterminer quel(s) modèle(s) respecte(nt) le cahier des charges aux deux distances.
3. Calculer la longueur d'onde du son émis par chaque modèle. En déduire lequel produit un son plus aigu.
4. En pratique, les sons aigus sont davantage atténués par les obstacles (murs, écrans). Rédiger un avis technique argumenté sur le choix du modèle, en intégrant les résultats des questions précédentes et les caractéristiques fréquentielles.

*Mes calculs :*

---

---

---

---

---



## EXERCICE 26 Isolation phonique d'un local technique — étude complète

### APPROFONDISSEMENT

**Situation professionnelle** — Un technicien de maintenance énergétique doit isoler acoustiquement un local technique contenant une chaudière à condensation et un circulateur. Le local est situé au sous-sol d'un immeuble d'habitation. Le bruit dans le local est de 75 dB. La réglementation impose un niveau inférieur à 30 dB dans les logements situés au-dessus.

Données : le plancher entre le local et le logement a un indice d'affaiblissement acoustique  $R = 40$  dB.

On donne :  $\log(2) = 0,301$  ;  $\log(5) = 0,699$ .

1. Le niveau transmis à travers le plancher est  $L_{\text{transmis}} = L_{\text{source}} - R$ . Calculer  $L_{\text{transmis}}$ .
2. La réglementation est-elle respectée ? Calculer l'atténuation supplémentaire nécessaire.
3. On ajoute un faux plafond suspendu avec laine minérale, apportant  $R_{\text{supp}} = 10$  dB. Calculer le nouveau niveau transmis.
4. Le circulateur transmet des vibrations aux tuyauteries (bruit solidien). Expliquer pourquoi le faux plafond seul ne suffit pas à traiter ce type de bruit. Proposer une solution complémentaire.

*Mes calculs :*

---

---

---

---

---

---

## EXERCICE 27 Dimensionnement acoustique d'une VMC double flux

### APPROFONDISSEMENT

**Situation professionnelle** — Un installateur thermique dimensionne la VMC double flux d'un bâtiment tertiaire. Le ventilateur émet un niveau sonore de 72 dB à 1 m. Le cahier des charges impose un niveau maximal de 30 dB dans les bureaux. Deux silencieux sont disponibles : un modèle S1 (-25 dB) et un modèle S2 (-35 dB).

La distance entre le ventilateur et la bouche de soufflage la plus proche est de 6 m.

On donne :  $\log(6) = 0,778$ .

1. Calculer le niveau sonore à 6 m sans silencieux en utilisant la loi d'atténuation géométrique.
2. Calculer le niveau à 6 m avec le silencieux S1, puis avec le silencieux S2.
3. Quel modèle de silencieux permet de respecter le cahier des charges ?
4. Le silencieux S2 coûte 3 fois plus cher que le S1. On peut aussi mettre deux silencieux S1 en série (les atténuations s'additionnent). Comparer les deux solutions (coût et performance). Rédiger une recommandation argumentée.

*Mes calculs :*

---

---

---

---

---

---



## EXERCICE 28 Cartographie sonore d'un chantier — sécurité des travailleurs

### APPROFONDISSEMENT

**Situation professionnelle** — Un chef de chantier doit établir une cartographie sonore pour définir les zones où les EPI auditifs sont obligatoires (seuil : 85 dB).

Le chantier comporte deux sources de bruit :

— Source 1 : marteau-piqueur,  $L_1 = 110$  dB à 1 m

— Source 2 : groupe électrogène,  $L_2 = 95$  dB à 1 m

On donne :  $\log(2) = 0,301$  ;  $\log(3) = 0,477$  ;  $\log(5) = 0,699$ .

1. Pour la source 1, calculer la distance  $d$  à laquelle le niveau tombe à 85 dB.
2. Pour la source 2, calculer la distance à laquelle le niveau tombe à 85 dB.
3. Un technicien chauffagiste travaille à 10 m du marteau-piqueur et à 5 m du groupe électrogène. Calculer le niveau de chaque source à sa position.
4. Pour estimer le niveau total, on additionne les intensités. Calculer les intensités  $I_1$  et  $I_2$  à la position du technicien, puis l'intensité totale  $I_{\text{total}}$ , et enfin le niveau total  $L_{\text{total}}$ . Le technicien doit-il porter des EPI ?

*Mes calculs :*

---

---

---

---

---

---

## EXERCICE 29 Acoustique d'une piscine couverte — Sabine et absorption

### APPROFONDISSEMENT

**Situation professionnelle** — Un ingénieur thermicien réalise le bilan acoustique du local technique d'une piscine couverte pour améliorer le confort des techniciens de maintenance. Le local contient les pompes de filtration et la PAC de chauffage de l'eau.

Données du local :

- Dimensions :  $8 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$
  - Surface absorbante actuelle :  $A = 12 \text{ m}^2$  (murs carrelés, sol béton)
  - 4 pompes identiques émettant chacune 72 dB à 1 m
  - Objectif :  $T_R \leq 0,6 \text{ s}$  et niveau total  $< 85 \text{ dB}$  à 2 m
- On donne :  $\log(2) = 0,301$  ;  $\log(4) = 0,602$ .

1. Calculer le volume du local et le temps de réverbération actuel (formule de Sabine).
2. Le temps de réverbération est-il conforme à l'objectif ?
3. Calculer la surface absorbante nécessaire pour atteindre  $T_R = 0,6 \text{ s}$ .
4. Calculer le niveau sonore total des 4 pompes fonctionnant ensemble, puis le niveau à 2 m du groupe de pompes.
5. La réduction du temps de réverbération (par ajout de matériaux absorbants) réduit-elle le niveau sonore direct ? Expliquer la différence entre champ direct et champ réverbéré.

*Mes calculs :*

---

---

---

---

---

---

## EXERCICE 30 Bilan acoustique global d'un bâtiment — synthèse (type BTS)

### APPROFONDISSEMENT

**Situation professionnelle** — Un technicien en énergies renouvelables réalise le bilan acoustique complet d'une installation de chauffage collectif comprenant :

— Une PAC air/eau en toiture : puissance acoustique  $P_{\text{PAC}} = 8 \times 10^{-4} \text{ W}$ , fréquence dominante 160 Hz

— Un local technique au sous-sol avec 2 circulateurs identiques : chacun émet 65 dB à 1 m

La limite de propriété est à 12 m de la PAC. Le logement le plus proche est à 6 m au-dessous du local technique (avec un plancher d'affaiblissement  $R = 45 \text{ dB}$ ).

Réglementation : 30 dB en logement (nuit), 35 dB en limite de propriété.

On donne :  $\log(2) = 0,301$  ;  $\log(3) = 0,477$  ;  $\log(12) = 1,079$ .

1. Calculer la longueur d'onde du son émis par la PAC dans l'air ( $v = 340 \text{ m/s}$ ). Ce son est-il grave ou aigu ?
2. Calculer l'intensité sonore de la PAC à 12 m, puis le niveau sonore correspondant. La réglementation en limite de propriété est-elle respectée ?
3. Calculer le niveau total des 2 circulateurs fonctionnant ensemble. Calculer le niveau transmis au logement à travers le plancher. La réglementation de nuit est-elle respectée ?
4. Le propriétaire envisage d'ajouter une deuxième PAC identique à côté de la première. Calculer le nouveau niveau total en limite de propriété. Commenter.
5. Rédiger une note technique synthétique (5-8 lignes) présentant les résultats et les préconisations pour rendre l'installation conforme si nécessaire.

*Mes calculs :*

---

---

---

---

---

### À retenir — Propagation d'un signal sonore

- Relation fondamentale :  $\lambda = v/f$  avec  $v \approx 340$  m/s dans l'air.
- Le niveau sonore  $L = 10 \times \log(I/I_0)$  est exprimé en décibels (dB) — échelle **logarithmique**.
- Doubler la distance à une source ponctuelle  $\rightarrow$  intensité divisée par 4  $\rightarrow$  niveau diminue de **6 dB**.
- Ajouter  $n$  sources identiques de niveau  $L_1$  :  $L_{\text{total}} = L_1 + 10 \times \log(n)$ . Doubler le nombre  $\rightarrow +3$  dB.
- La **formule de Sabine**  $T_R = 0,16V/A$  permet de calculer le temps de réverbération.
- En installation thermique : silencieux, capots absorbants et manchons antivibratoires permettent de respecter les seuils réglementaires (35–40 dB en limite de propriété).
- Seuil réglementaire pour les travailleurs : **85 dB** — au-delà, les EPI auditifs sont obligatoires.

## 08

**Caractériser la propagation d'un signal sonore**

Caractériser la propagation d'un signal sonore | Terminale Bac Pro ICCER (Grpt  
1)

Socle

Standard

Approfondissement

Tout voir



Objectifs du chapitre

[cliquer pour développer](#)**Durée**

55 minutes

**Barème**

20 points

**Documents**

Non autorisés (sauf fiche de  
formules fournie)

**Calculatrice**

Autorisée

**EXERCICE 1 Son et longueur d'onde — calculs guidés****7 points****SOCLE**

Un technicien CVC mesure le bruit émis par un compresseur de climatisation installé sur le toit d'un immeuble. Le compresseur émet un son de fréquence  $f = 500$  Hz. La vitesse du son dans l'air est  $v = 340$  m/s.

Données :  $I_0 = 10^{-12}$  W/m<sup>2</sup> | Intensité mesurée à 1 m :  $I = 10^{-3}$  W/m<sup>2</sup> |  $\log(10^n) = n$

1. Compléter la formule et calculer la longueur d'onde  $\lambda$  : (1,5 pt)

$$\lambda = \frac{v}{\boxed{\phantom{00}}} = \frac{\boxed{\phantom{00}}}{\boxed{\phantom{00}}} = \boxed{\phantom{00}} \text{ m}$$

2. Compléter la formule et calculer la période  $T$  : (1 pt)

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{\boxed{\phantom{00}}} = \boxed{\phantom{00}} \text{ s}$$

3. Le domaine audible va de 20 Hz à 20 000 Hz. Entourer la bonne réponse : (1 pt)

- Ce son est **audible** / **inaudible**.
- Il est dans le registre **grave** / **médium** / **aigu**.

4. Compléter le calcul du niveau sonore  $L$  : (2 pts)

$$L = 10 \times \log\left(\frac{I}{I_0}\right) = 10 \times \log\left(\frac{10^{-3}}{10^{-12}}\right) = 10 \times \log\left(10^{\boxed{\phantom{00}}}\right) = 10 \times \boxed{\phantom{00}} = \boxed{\phantom{00}} \text{ dB}$$

5. Le seuil de douleur est à 120 dB. Le seuil de risque professionnel est à 85 dB. Compléter : (1,5 pt)

- Le niveau de  $\boxed{\phantom{00}}$  dB est  $\boxed{\phantom{00}}$  inférieur /  $\boxed{\phantom{00}}$  supérieur au seuil de douleur.
- Le niveau de  $\boxed{\phantom{00}}$  dB est  $\boxed{\phantom{00}}$  inférieur /  $\boxed{\phantom{00}}$  supérieur au seuil de risque professionnel (85 dB).
- Le port de protections auditives est donc  $\boxed{\phantom{00}}$  obligatoire /  $\boxed{\phantom{00}}$  non obligatoire.

**EXERCICE 2** Atténuation avec la distance — calcul guidé

7 points

SOCLE

Sur un chantier, un marteau perforateur émet un niveau sonore  $L_1 = 105$  dB à  $d_1 = 1$  m.

Un installateur thermique travaille à  $d_2 = 4$  m.

Formule d'atténuation :  $\Delta L = 20 \times \log\left(\frac{d_2}{d_1}\right)$  |  $L_2 = L_1 - \Delta L$

Données :  $\log(4) = 0,602$  |  $\log(10) = 1$

1. Compléter le calcul de l'atténuation : (1,5 pt)

$$\Delta L = 20 \times \log\left(\frac{\boxed{\phantom{00}}}{\boxed{\phantom{00}}}\right) = 20 \times \log(\boxed{\phantom{00}}) = 20 \times \boxed{\phantom{00}} = \boxed{\phantom{00}} \text{ dB}$$

2. En déduire le niveau sonore  $L_2$  à 4 m : (1 pt)

$$L_2 = L_1 - \Delta L = \boxed{\phantom{00}} - \boxed{\phantom{00}} = \boxed{\phantom{00}} \text{ dB}$$

3. La réglementation impose le port de protections au-delà de 85 dB. Entourer : (1 pt)

- 93 dB est ☐ inférieur / ☐ supérieur à 85 dB.
- L'installateur **doit** / **ne doit pas** porter des protections auditives.

4. Compléter le calcul pour trouver la distance  $d_3$  où le niveau est de 85 dB : (2,5 pt)

$$\Delta L_3 = L_1 - 85 = 105 - 85 = \boxed{\phantom{00}} \text{ dB}$$

$$20 = 20 \times \log(d_3) \Rightarrow \log(d_3) = \boxed{\phantom{00}} \Rightarrow d_3 = 10^{\boxed{\phantom{00}}} = \boxed{\phantom{00}} \text{ m}$$

5. Est-il réaliste de s'éloigner à cette distance sur un chantier en intérieur ? Citer une autre solution. (1 pt)

**EXERCICE 3** Choix d'EPI auditifs — QCM et calculs simples

6 points

SOCLE

Un technicien chauffagiste travaille dans une chaufferie où le niveau sonore est de 96 dB.  
Il hésite entre deux EPI :

- **Option A** — Bouchons d'oreilles : atténuation SNR = 28 dB
- **Option B** — Casque anti-bruit : atténuation SNR = 35 dB

Formule :  $L_{\text{résultant}} = L_{\text{ambient}} - \text{SNR}$

Seuil d'action : 85 dB | Valeur limite : 87 dB

1. Compléter :  $L_A = 96 - \square = \square$  dB (1 pt)

2. Compléter :  $L_B = 96 - \square = \square$  dB (1 pt)

3. Les bouchons (68 dB) respectent-ils la valeur limite de 87 dB ? Et le seuil d'action de 85 dB ? Entourer : (1,5 pt)

- 68 dB est ☐ inférieur / ☐ supérieur à 87 dB → valeur limite **respectée** / **non respectée**
- 68 dB est ☐ inférieur / ☐ supérieur à 85 dB → seuil d'action **respecté** / **non respecté**

4. Le casque (61 dB) respecte-t-il les deux seuils ? (1 pt)

5. Quel EPI recommandez-vous ? Donner un avantage de chaque option. (1,5 pt)

**TOTAL : 20 points**



**EXERCICE 1** Bruit d'un compresseur de climatisation

7 points

STANDARD

Un technicien CVC mesure le bruit émis par un compresseur de climatisation installé sur le toit d'un immeuble de bureaux. Le compresseur émet un son de fréquence principale  $f = 500$  Hz. La vitesse du son dans l'air est  $v = 340$  m/s.

Données :

- Intensité sonore de référence :  $I_0 = 10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>
- Intensité sonore mesurée à 1 m du compresseur :  $I = 10^{-3}$  W/m<sup>2</sup>
- $\log(10^n) = n$

1. Rappeler la relation entre la longueur d'onde  $\lambda$ , la vitesse  $v$  et la fréquence  $f$ . Calculer  $\lambda$ .

(1,5 pt)

2. Calculer la période  $T$  du signal sonore. (1 pt)

3. Le domaine audible s'étend de 20 Hz à 20 000 Hz. Ce son est-il audible ? À quelle catégorie appartient-il (grave, médium, aigu) ? (1 pt)

4. Calculer le niveau sonore  $L$  en décibels à 1 m du compresseur. On rappelle :

$$L = 10 \times \log \left( \frac{I}{I_0} \right). \text{ (2 pts)}$$

5. Le seuil de douleur est à 120 dB. Le compresseur dépasse-t-il ce seuil à 1 m ? Quel risque cela représente-t-il ? (1,5 pt)

**EXERCICE 2** Atténuation sonore sur un chantier d'installation thermique**7 points****STANDARD**

Sur un chantier d'installation de chauffage, un marteau perforateur émet un niveau sonore  $L_1 = 105$  dB à une distance  $d_1 = 1$  m. Un installateur thermique travaille à une distance  $d_2 = 4$  m de la source.

On rappelle que l'atténuation due à la distance vaut :

$$\Delta L = 20 \times \log \left( \frac{d_2}{d_1} \right)$$

et le niveau sonore à la distance  $d_2$  :  $L_2 = L_1 - \Delta L$

Données :  $\log(2) = 0,301$  |  $\log(4) = 0,602$  |  $\log(8) = 0,903$  |  $\log(10) = 1$

1. Calculer l'atténuation  $\Delta L$  due à la distance entre 1 m et 4 m. (1,5 pt)
2. En déduire le niveau sonore  $L_2$  perçu par l'installateur à 4 m. (1 pt)
3. La réglementation impose le port de protections auditives au-delà de 85 dB.  
L'installateur doit-il porter des protections ? (1 pt)
4. À quelle distance minimale  $d_3$  faudrait-il se trouver pour que le niveau sonore soit inférieur ou égal à 85 dB ? (2,5 pt)
5. En pratique, est-il réaliste de s'éloigner à cette distance sur un chantier ? Quelle autre solution existe-t-il ? (1 pt)

**EXERCICE 3** Choix d'EPI auditifs

6 points

STANDARD

Un technicien chauffagiste intervient dans une chaufferie où le niveau sonore ambiant est de 96 dB (bruit de la chaudière et des brûleurs). Il doit choisir un EPI auditif parmi deux options :

- **Option A** — Bouchons d'oreilles en mousse : atténuation SNR = 28 dB
- **Option B** — Casque anti-bruit professionnel : atténuation SNR = 35 dB

On admet que le niveau sonore résultant est :  $L_{\text{résultant}} = L_{\text{ambiant}} - \text{SNR}$ .

La réglementation fixe la limite d'exposition quotidienne à 85 dB (seuil d'action) et 87 dB (valeur limite en tenant compte de l'atténuation des EPI).

1. Calculer le niveau sonore résultant avec les bouchons d'oreilles (option A). (1 pt)
2. Calculer le niveau sonore résultant avec le casque anti-bruit (option B). (1 pt)
3. Les bouchons d'oreilles permettent-ils de respecter la valeur limite de 87 dB ? Et le seuil d'action de 85 dB ? (1,5 pt)
4. Le casque anti-bruit permet-il de respecter les deux seuils ? (1 pt)
5. Quel EPI recommandez-vous ? Donner un avantage et un inconvénient de chaque option pour un technicien travaillant en chaufferie. (1,5 pt)

**TOTAL : 20 points**

## EXERCICE 1 Compresseur de climatisation — étude complète

6 points

### APPROFONDISSEMENT

Un technicien climatisation mesure le bruit d'un compresseur sur le toit d'un immeuble de bureaux. Le compresseur émet un son de fréquence  $f = 500$  Hz. Vitesse du son :

$$v = 340 \text{ m/s.}$$

$$\text{Données : } I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2 \mid I = 10^{-3} \text{ W/m}^2 \text{ à } 1 \text{ m} \mid \log(10^n) = n$$

1. Calculer la longueur d'onde  $\lambda$  et la période  $T$ . Ce son est-il audible ? Justifier. (2 pts)
2. Calculer le niveau sonore  $L$  en dB à 1 m. Comparer au seuil de douleur (120 dB) et au seuil de risque professionnel (85 dB). (2 pts)
3. Calculer l'intensité sonore correspondant au seuil de risque professionnel de 85 dB. En déduire le facteur par lequel l'intensité du compresseur dépasse ce seuil. (2 pts)

## EXERCICE 2 Nuisances sonores d'une installation CVC — problème ouvert 8 points

### APPROFONDISSEMENT

Un technicien CVC étudie les nuisances sonores d'une installation de ventilation dans un immeuble de bureaux. Le ventilateur de la CTA émet un niveau  $L_1 = 88$  dB à 1 m. Le bâtiment comporte 4 bouches de soufflage identiques dans un open space, chacune diffusant le même niveau sonore  $L_b$ .

Données :  $\log(2) = 0,301$  |  $\log(4) = 0,602$  |  $\log(5) = 0,699$

Objectif : le niveau total dans l'open space ne doit pas dépasser 45 dB.

1. Un silencieux de 25 dB est posé sur le conduit principal. Quel est le niveau après silencieux à 1 m ? (1 pt)
2. Le conduit se divise en 4 branches égales. En admettant que la puissance se répartit également entre les 4 bouches, montrer que le niveau à chaque bouche est réduit de  $10 \times \log(4) \approx 6$  dB par rapport au niveau après silencieux. Calculer  $L_b$ . (2 pts)
3. Calculer le niveau total dans l'open space produit par les 4 bouches fonctionnant simultanément. *Indication : utiliser la formule d'addition de  $n$  sources identiques.* (2 pts)
4. L'objectif de 45 dB est-il atteint ? Si non, calculer l'atténuation supplémentaire nécessaire et proposer une solution technique. (2 pts)
5. Un salarié se plaint d'un bourdonnement à 125 Hz. Calculer la longueur d'onde correspondante. Expliquer pourquoi les sons de basse fréquence sont plus difficiles à atténuer. (1 pt)

### EXERCICE 3 Réglementation acoustique et PAC — étude de cas type BTS

6 points

#### APPROFONDISSEMENT

Un installateur de pompes à chaleur doit implanter une PAC air/eau en extérieur. La PAC émet une puissance acoustique  $P = 8 \times 10^{-4} \text{ W}$ .

Réglementation : émergence maximale de 5 dB en journée et 3 dB la nuit par rapport au bruit de fond.

Le bruit de fond mesuré est de 30 dB (nuit).

Distance au voisin le plus proche :  $d = 6 \text{ m}$ .

Données :  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$  |  $\log(1,77) \approx 0,248$

1. Calculer l'intensité sonore  $I$  de la PAC à 6 m du voisin, en utilisant  $I = P/(4\pi d^2)$ . (1,5 pt)
2. En déduire le niveau sonore  $L$  en dB à 6 m. (1,5 pt)
3. Calculer l'émergence nocturne ( $L - L_{\text{fond}}$ ). La réglementation est-elle respectée la nuit (émergence max 3 dB) ? (1,5 pt)
4. Proposer et chiffrer une solution pour que l'émergence nocturne soit respectée. Préciser l'atténuation minimale nécessaire à la source. (1,5 pt)

**TOTAL : 20 points**