



POUR COMMENCER

Testez votre culture scientifique

Identifiez la bonne réponse

1. Le son se propage :

- a. dans l'air et les liquides, mais pas dans les solides
- b. dans l'espace
- c. dans l'air, les liquides et les solides

2. Plus la période d'une onde sonore est grande :

- a. plus sa fréquence est importante
- b. plus sa fréquence est faible
- c. plus son intensité est faible

3. La hauteur d'une note de musique indique si elle est :

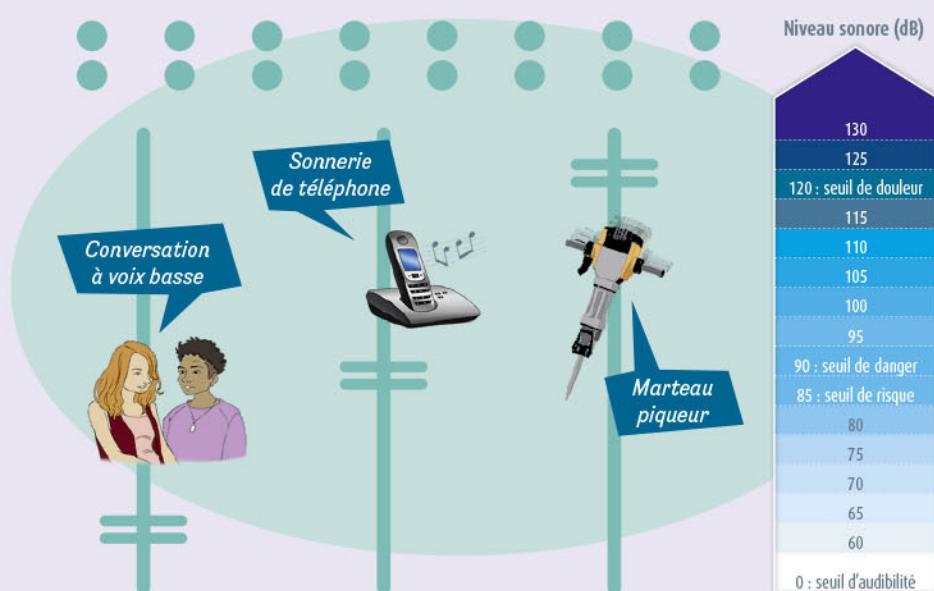
- a. grave ou aigüe
- b. majeure ou mineure
- c. juste ou fausse

4. Le piano et la guitare sont des instruments :

- a. à vent
- b. à percussion
- c. à cordes

Recherches Internet

Placez les éléments ci-dessous sur une échelle de décibels.



CHAPITRE

11

LE SON, PHÉNOMÈNE VIBRATOIRE

- UNITÉ 1** Voir les sons
- UNITÉ 2** Les harmoniques d'une note
- UNITÉ 3** Le son des instruments de musique
- UNITÉ 4** L'intensité des ondes sonores

Voir les sons

Le son est une vibration mécanique qui se propage dans divers milieux, notamment l'air ambiant.

À quoi ressemblent les sons et que peut-on déduire de leur forme ?



DOC 1 Ondes à la surface d'un liquide. Cette image a été obtenue grâce à un appareil composé d'un plateau recouvert de liquide et posé sur une enceinte. Une fois l'enceinte allumée et le liquide éclairé avec des LED de différentes couleurs, les vaguelettes produites par l'enceinte ont été photographiées.

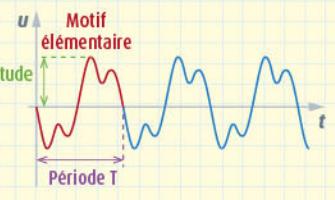
rappel

Les paramètres d'une onde

La fréquence f désigne le nombre de répétitions du motif élémentaire par seconde

et s'exprime en Hertz (Hz).
Amplitude A

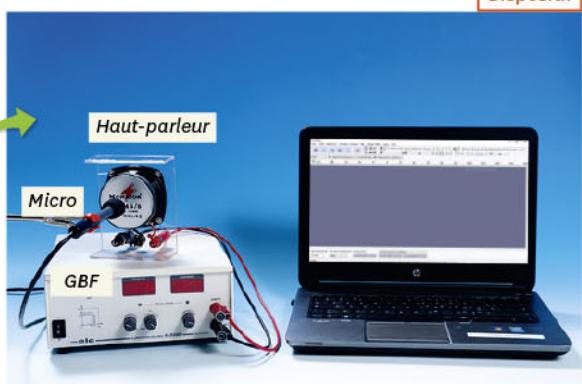
La période T est l'inverse de la fréquence: $T = \frac{1}{f}$.



UTILISATION D'AUDACITY

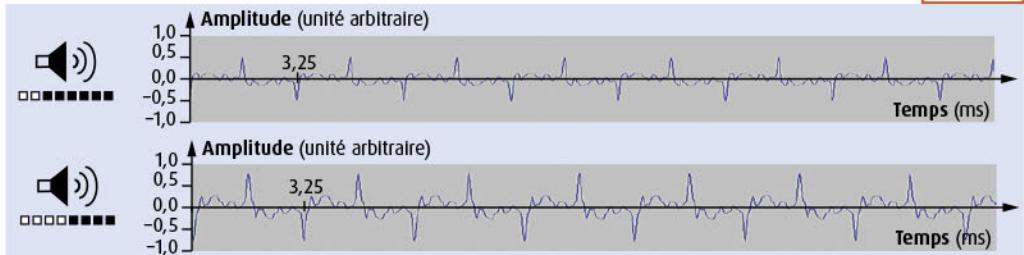
- Branchez le générateur de basses fréquences (GBF), qui produit des signaux électriques périodiques, au haut-parleur, qui va les convertir en ondes sonores.
- Branchez le micro à l'ordinateur, et placez le micro à quelques centimètres du haut-parleur.
- Ouvrez Audacity et créez un nouveau fichier.
- Réglez le GBF sur un signal carré de fréquence 440 Hz, et le volume du haut-parleur à 1/4 de son maximum.
- Enregistrez le son sur Audacity pendant cinq secondes.
- Créez un nouvelle piste d'enregistrement et répétez l'expérience en augmentant le volume du haut-parleur à la moitié de son maximum.

Dispositif



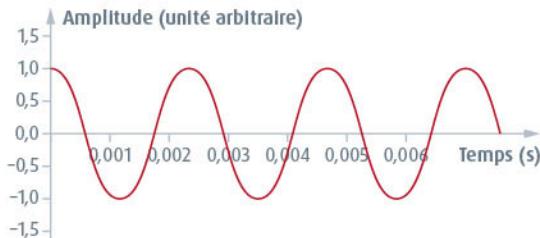
DOC 2 Enregistrer le son d'un GBF.

Résultats



**Vibrations d'un diapason au ralenti**

Un son pur est un son dont l'onde est sinusoïdale. Il peut être produit par un diapason, instrument utilisé pour accorder les voix et les instruments de musique.



DOC 3 Onde de son produite par un diapason.
Le diapason produit un son pur.

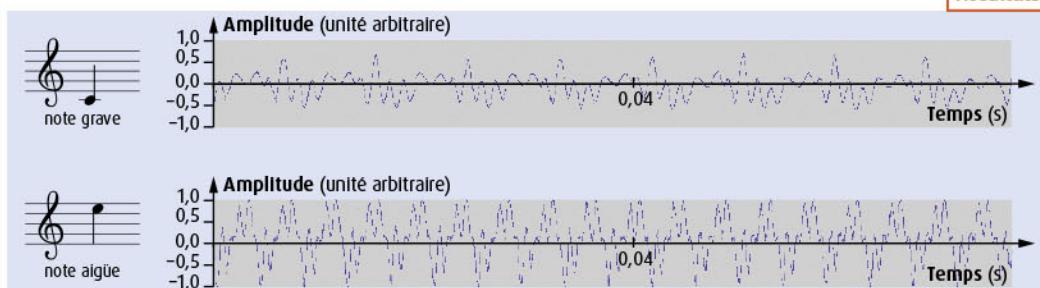
Dispositif

UTILISATION D'AUDACITY

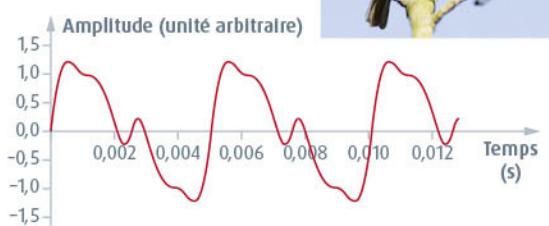
- Branchez le micro à l'ordinateur.
- Ouvrez Audacity et créez un nouveau fichier. Lancez l'enregistrement.
- Dans le micro, chantez une note grave pendant quelques secondes, puis arrêtez l'enregistrement.
- Relancez l'enregistrement sur une nouvelle piste, chantez une note aiguë pendant quelques secondes, puis arrêtez l'enregistrement.

DOC 4 Enregistrer une voix.

Résultats



Un son complexe est un son dont l'onde est périodique mais non sinusoïdale. La plupart des sons de notre environnement sont des sons complexes.

**DOC 5 Onde d'un son complexe.****ACTIVITÉ GUIDÉE**

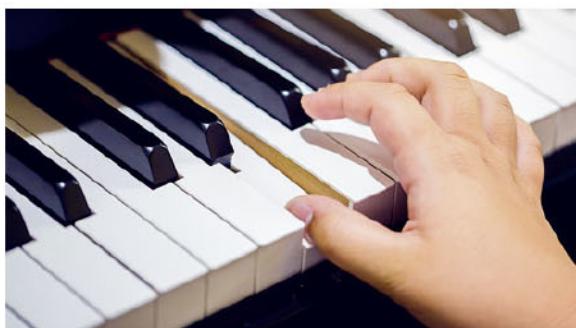
1. Décrivez les deux façons de « voir » les sons qui sont présentées dans cette unité (**DOCS 1 ET 2**).
2. Mesurez les amplitudes, périodes et fréquences des exemples de sons purs et complexes (**DOCS 3 ET 5**).
3. Déterminez si le son produit par un GBF et celui de votre voix sont des sons purs ou complexes (**DOCS 2 À 5**).
4. Définissez le lien entre puissance sonore (volume) et amplitude (**DOC. 2**).
5. Définissez le lien entre hauteur du son et fréquence (**DOC. 4**).

Les harmoniques d'une note

Les notes produites par des instruments de musique sont des sons complexes. Une même note n'aura pas le même timbre en fonction de l'instrument qui la joue.

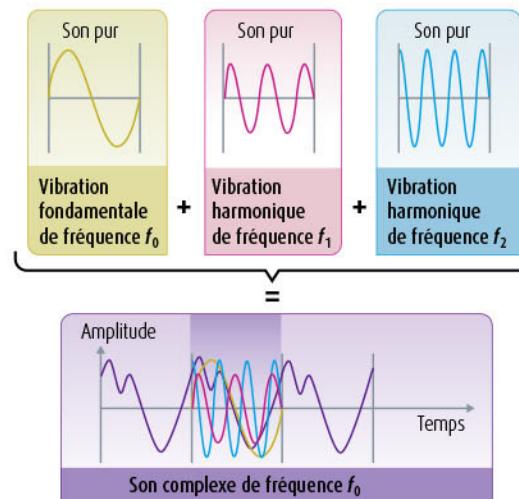
Pourquoi une même note jouée par plusieurs instruments ne sonne-t-elle pas de la même façon ?

La composition d'un son complexe



Écoute de la note au piano et au diapason

DOC 1 Une note jouée au piano.



Histoire des sciences

En 1822, le mathématicien français Joseph Fourier publie *Théorie Analytique de la Chaleur* dans lequel il présente ses résultats sur la propagation de la chaleur. Il y explique notamment que tout mouvement périodique peut être décomposé en une somme de mouvements sinusoïdaux. C'est ce qu'on appelle les séries de Fourier. Cette découverte s'applique également aux ondes sonores. Ainsi, tout son complexe peut être décomposé en une somme de sons purs. La fréquence fondamentale f_0 est la fréquence du son pur qui est identique à celle du son complexe. Les fréquences harmoniques f_1, f_2, f_3 , etc. sont les fréquences des autres sons purs.

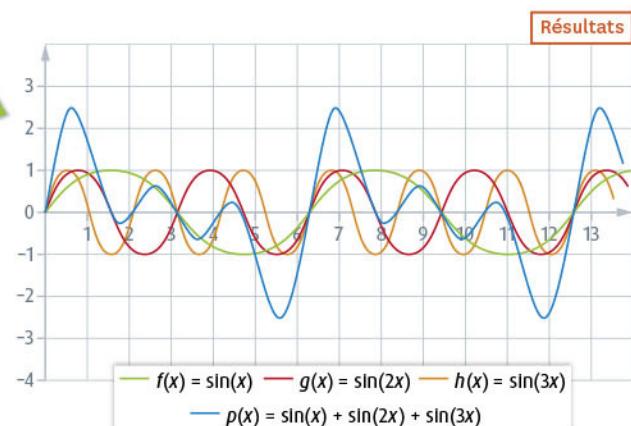
DOC 2 Les séries de Fourier et les fréquences harmoniques.

UTILISATION DE GEOGEBRA



Geogebra en ligne

- Cliquez sur « Saisie... » et rentrez, grâce au clavier de l'interface, la fonction $\sin(x)$, qui représente le fondamental.
- Rentrez ensuite les fonctions $\sin(2x)$ et $\sin(3x)$ qui représentent les harmoniques.
- Enfin, rentrez la fonction $\sin(x) + \sin(2x) + \sin(3x)$ qui représente le son complexe.
- Vous pouvez changer la couleur d'une courbe en cliquant sur les trois points à côté de sa fonction, puis sur « Propriétés », « Couleur ».



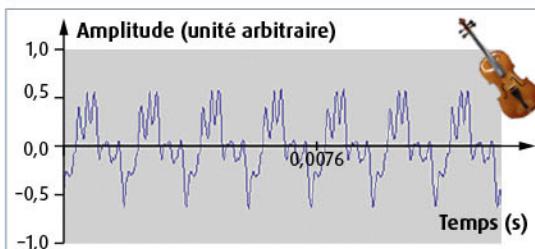
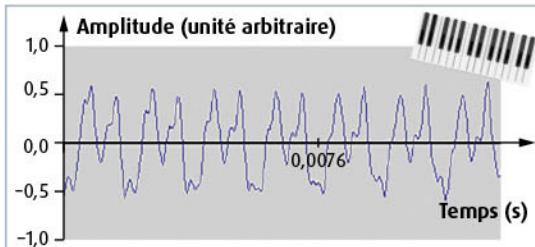
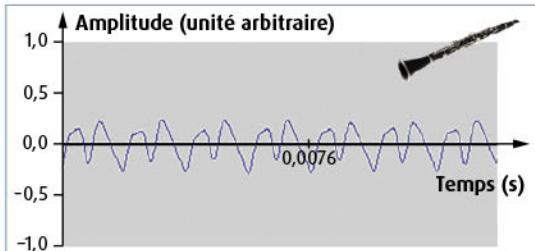
DOC 3 Décomposition d'un son complexe en sons purs.

Le timbre d'un instrument

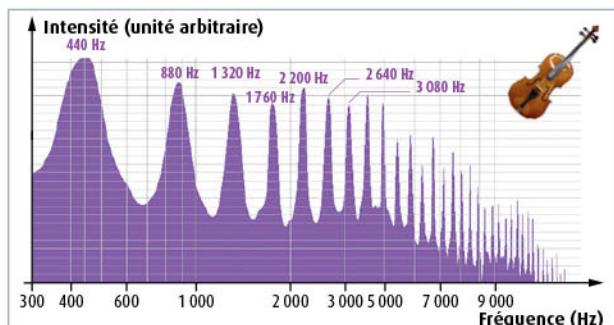
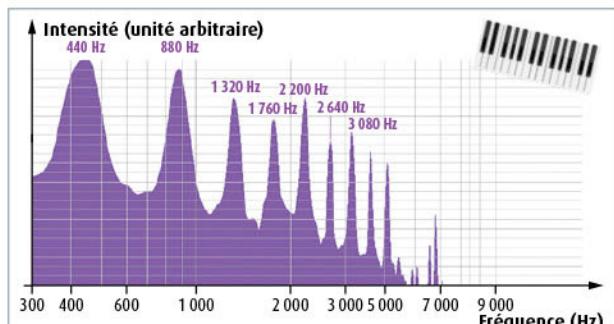
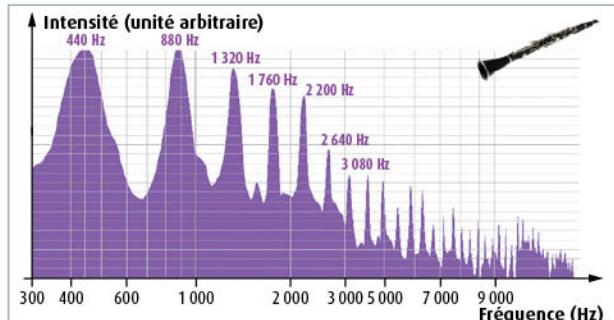
UTILISATION D'AUDACITY



Fichiers audio et protocoles



DOC 4 Pistes Audacity de la note La 440 jouée par trois instruments.



DOC 5 Spectres Audacity de la note La 440 jouée par trois instruments.

ACTIVITÉ GUIDÉE

- Déterminez si une note jouée au piano est un son pur (**doc. 1**).
- Mesurez les périodes et en déduire les fréquences de chaque courbe sur Geogebra. En calculant les différents rapports de fréquences, trouvez le lien entre fréquence fondamentale et fréquences harmoniques (**docs 2 ET 3**).
- Vérifiez que les ondes sonores produites par les trois instruments ont bien la même fréquence

fondamentale et comparez leurs timbres (la façon dont elles sonnent) et leurs aspects (**doc. 4**).

- Grâce aux fréquences des pics mesurées sur les spectres, expliquez ce que représentent ces pics (**doc. 5**).
- Comparez le nombre de pics et leurs intensités pour chaque instrument et en déduire pourquoi la même note ne sonne pas de la même façon en fonction de l'instrument qui la joue (**doc. 5**).

Le son des instruments de musique

Qu'ils soient à cordes, à vent ou à percussion, les instruments de musique produisent des sons.

Quelles caractéristiques déterminent la fréquence d'une note jouée par un instrument ?



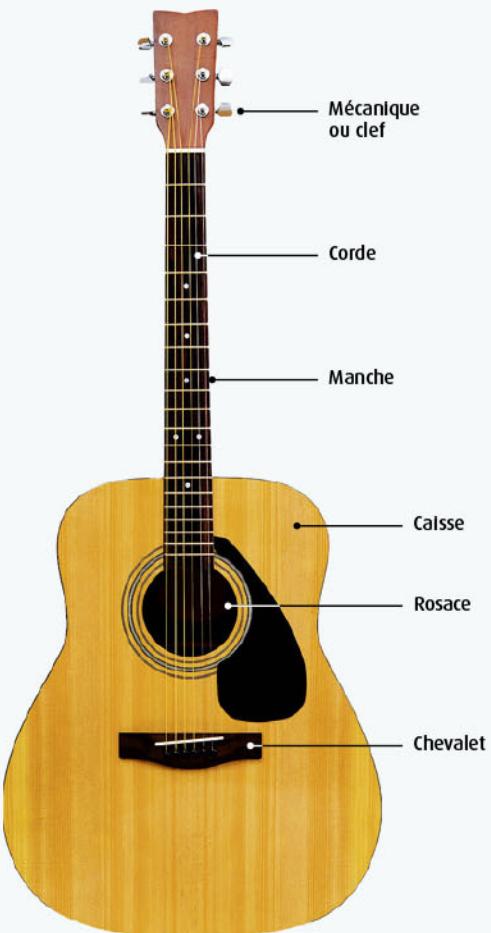
DOC 1 Les cordes d'une guitare en vibration.

Lorsqu'une corde tendue est excitée, elle vibre et produit un son. C'est ainsi que fonctionnent les instruments à cordes, comme la guitare. Cette photo a été prise en plaçant un téléphone portable dans la caisse de résonance d'une guitare.

EXPÉRIMENTATION

- Comparez l'épaisseur, et donc la masse, des différentes cordes d'une guitare.
- Pincez une corde au niveau de la rosace et écoutez le son produit.
- Modifiez la tension de la corde en tournant sa mécanique, puis pincez-la à nouveau et écoutez le son produit. Comparez-le au précédent.
- Appuyez sur cette même corde au niveau du manche, afin de modifier sa longueur, pincez-la au niveau de la rosace et écoutez le son produit. Comparez-le au précédent.

DOC 2 Les paramètres déterminant le son produit par une corde.



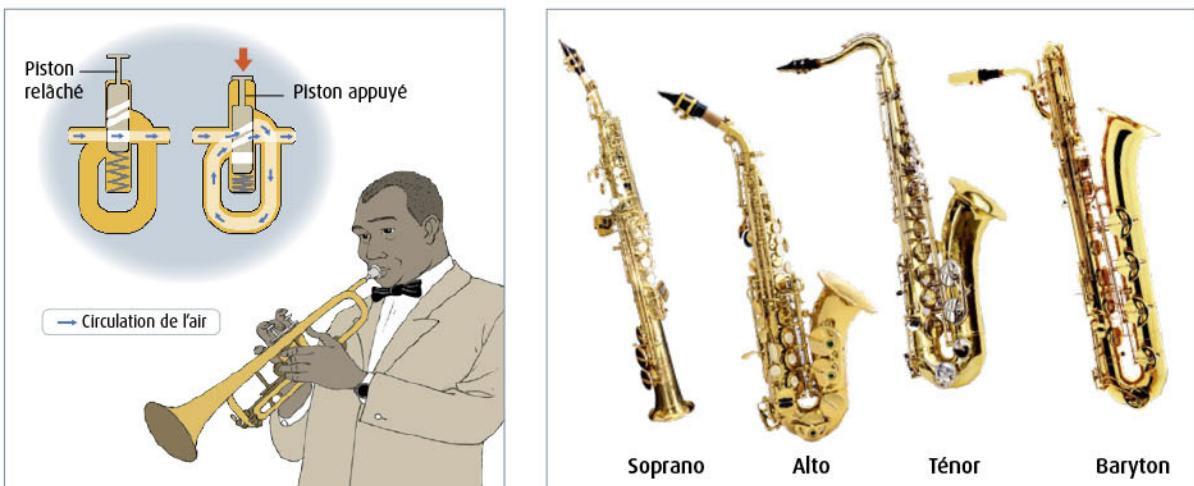
Formule permettant de calculer la fréquence fondamentale de la vibration d'une corde :

$$f_0 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

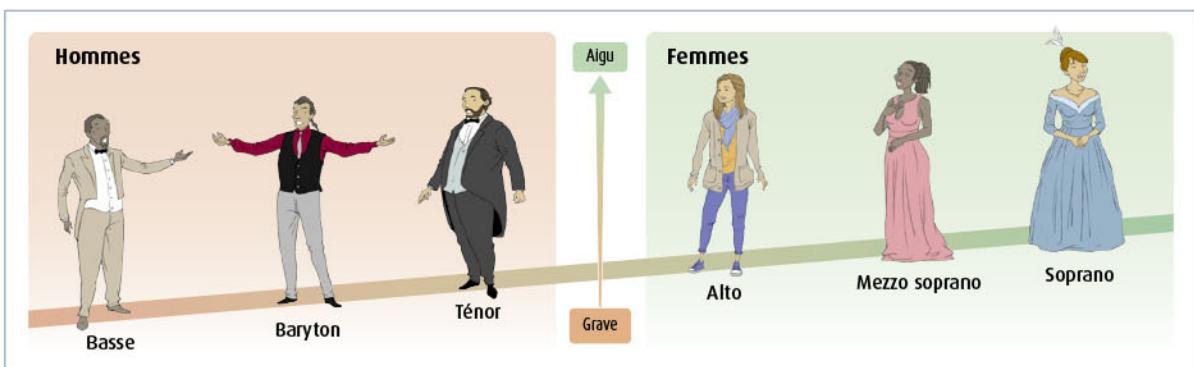
Avec

f_0 = fréquence fondamentale (Hz)
L = longueur (m)
T = tension ($\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
μ = masse linéique = $\frac{\text{masse}}{\text{longueur}}$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)

	Instruments à cordes	Instruments à vent	Instruments à percussion
Fonctionnement	Le son est produit par la vibration de cordes	Le son est produit par la vibration d'une colonne d'air	Le son est produit en frappant ou en grattant une membrane ou un matériau résonant
Exemples	Guitare, violon, piano	Saxophone, accordéon, cornemuse	Batterie, triangle, xylophone

DOC 3 Les catégories d'instruments.**DOC 4** Le fonctionnement d'une trompette.

La trompette possède trois pistons permettant de produire différentes notes selon qu'ils sont relâchés ou enfoncés.

DOC 5 Différentes tailles de saxophones.**DOC 6** Le registre des voix.**TÂCHE COMPLEXE****Mission**

Expliquez comment fonctionnent une guitare et une trompette, et pourquoi il existe de nombreuses tailles de saxophones.

Pistes de réalisation

- Identifiez les trois paramètres qui influencent le son produit par une corde de guitare.
- Déterminez à quelle catégorie d'instruments appartient la trompette, et identifiez le paramètre qui influence le son produit par une trompette.
- En comparant les noms des saxophones au registre des voix, expliquez comment la taille du saxophone influence le son qu'il produit.



L'intensité des ondes sonores

Plus un son est fort, plus son intensité est élevée. L'échelle des décibels permet de quantifier l'intensité effectivement perçue par l'oreille.

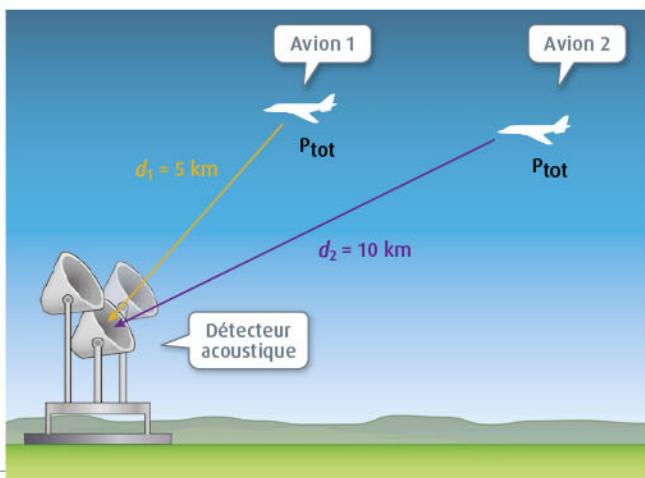
Comment mesure-t-on et exprime-t-on l'intensité sonore perçue par l'oreille ?

Puissance sonore par unité de surface



Histoire des sciences

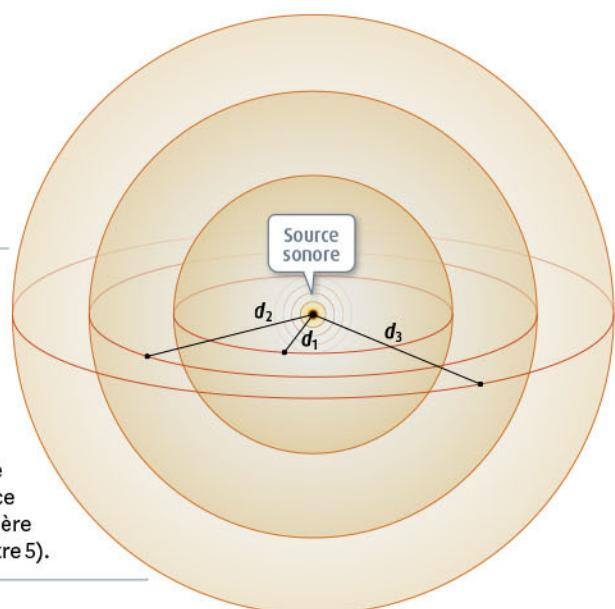
Au cours des deux Guerres mondiales, les militaires utilisaient des détecteurs acoustiques pour déterminer la direction et la distance des avions ennemis. Ces détecteurs étaient constitués de plusieurs cornets qui captaien le bruit des avions.



DOC 1 La détection acoustique durant la guerre.

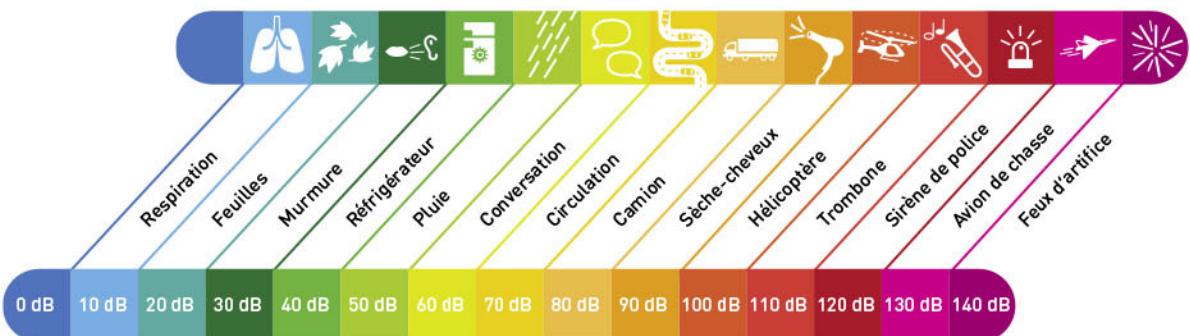
L'intensité sonore I est la puissance transportée par les ondes sonores par unité de surface. Elle s'exprime en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$. Lorsque les ondes s'éloignent de la source dans toutes les directions, la puissance totale P_{tot} émise par la source est répartie sur une sphère de rayon d , égale à la distance parcourue par les ondes.

On peut faire un parallèle entre l'intensité sonore et la puissance solaire par unité de surface. En effet, à une distance d du Soleil, la puissance solaire par unité de surface est la puissance reçue par une surface de 1 m^2 sur la sphère céleste de rayon d centrée sur le Soleil (voir unité 1, chapitre 5).



DOC 2 Définition de l'intensité acoustique.

Les décibels

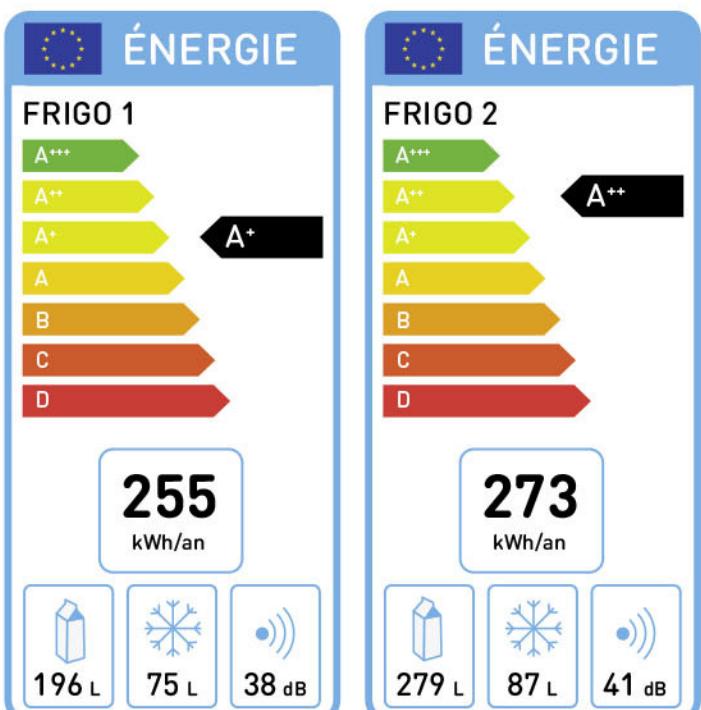


DOC 3 Échelle de décibels. Les décibels (dB) sont utilisés pour quantifier le niveau d'intensité sonore perçu par l'oreille. Plus l'intensité est élevée, plus le niveau de décibels est grand, et plus la source est bruyante.

Intensité sonore I ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	Rapport $\frac{I}{I_0}$	Niveau de décibels (dB)
1	10^{12}	120
10^{-4}	10^8	80
10^{-8}	10^4	40
10^{-12}	1	0

DOC 4 Définition des décibels.

L'intensité de référence I_0 est la plus petite intensité perceptible par l'oreille humaine: $I_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Le décibel n'est pas une unité mais la valeur logarithmique d'un rapport: $10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$.



DOC 5 Étiquettes énergie de deux réfrigérateurs. Le frigo 2 est deux fois plus bruyant que le frigo 1.

ACTIVITÉ GUIDÉE

- Exprimez l'intensité I_1 de l'avion 1 perçue par le détecteur acoustique en fonction de la puissance sonore totale P_{tot} de l'avion et de la distance d_1 . Puis exprimez l'intensité I_2 de l'avion 2 en fonction de P_{tot} et d_2 (DOCS 1 ET 4).
- Sachant que $d_2 = 2d_1$, exprimez I_1 et I_2 en fonction de d_1 et en déduire l'impact d'un doublement de la distance sur l'intensité acoustique perçue.
- Déterminez l'intensité sonore d'un réfrigérateur, d'un camion et d'une sirène de police (DOCS 3 ET 4).
- Déterminez de combien de décibels augmente le niveau sonore lorsque l'intensité acoustique double (DOC. 5).
- En déduire la différence de décibels mesurée au niveau du détecteur acoustique entre les deux avions du doc. 1.

LE SON, PHÉNOMÈNE VIBRATOIRE



1. Voir les sons > UNITÉ 1

- ▶ Un son est une vibration mécanique de l'air.
- ▶ Un **son pur** est représenté par une fonction sinusoïdale du temps, de période T et de **fréquence** $f = 1/T$. Un **son complexe** est représenté par une fonction périodique mais non sinusoïdale.

2. Les harmoniques d'une note > UNITÉ 2

- ▶ Tout signal périodique peut se décomposer en une somme de signaux sinusoïdaux (travaux de J. Fourier en 1822). Le signal périodique associé à un son composé peut ainsi se décomposer en somme de fonctions sinusoïdales dont les fréquences sont des multiples entiers, ou **harmoniques**, de la fréquence la plus basse appelée **fondamentale** (f_0).
- ▶ Le **spectre** est la représentation du son en fonction de la fréquence. On y observe une série de pics correspondant à la fréquence fondamentale (qui donne la hauteur du son) et aux fréquences harmoniques (dont le nombre et les amplitudes déterminent le **timbre** du son).

3. Le son des instruments de musique > UNITÉ 3

- ▶ La **hauteur** du son d'un instrument de musique dépend de certaines caractéristiques physiques.
Pour les cordes, les caractéristiques sont les suivantes :
 - la masse linéaire : plus elle est élevée, plus la fréquence est basse ;
 - la tension : plus elle est forte, plus la fréquence est élevée (note plus aigüe).

4. L'intensité des ondes sonores > UNITÉ 4

- ▶ La puissance sonore P (en W) est communiquée par la source du son au moment de sa production. L'**intensité sonore I** (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) perçue en un point correspond au rapport de la puissance P sur la surface S (en m^2) sur laquelle le son se répartit :

$$I = P/S$$

- ▶ Dans le cas de plusieurs sources sonores, l'intensité sonore est additive ($I = I_1 + I_2$). Mais un son deux fois plus intense n'est pas perçu par notre oreille comme deux fois plus « fort ». À cette perception sonore correspond un **niveau sonore L**, en **décibel** (dB). Il suit une progression logarithmique qui reproduit notre perception de la « force » du son.
- ▶ Le niveau sonore n'est pas additif ($L \neq L_1 + L_2$).

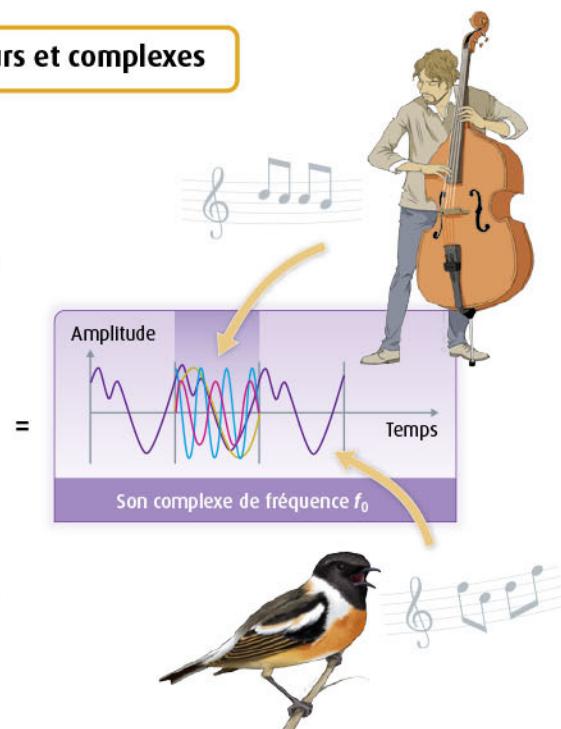
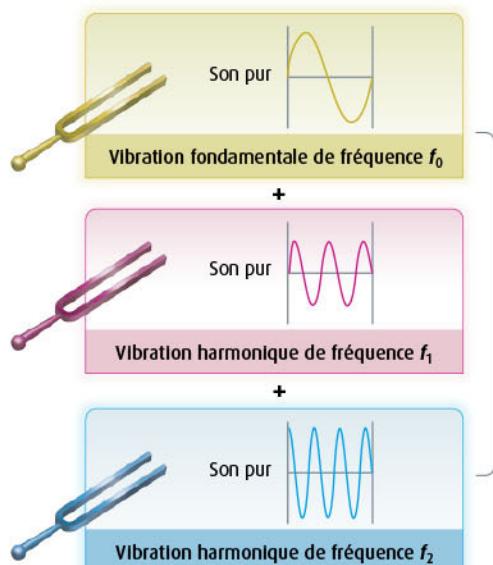
Les mots-clés du chapitre

Décibel • Fondamentale • Fréquence • Harmonique • Hauteur • Intensité sonore • Niveau sonore • Son composé • Son pur • Spectre • Timbre

► Lexique p. 251

l'essentiel par l'image

Sons purs et complexes



Le son des instruments de musique

Instrument à cordes



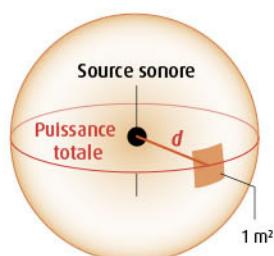
Fréquence f_0 : fonction de la longueur, de la tension et de la masse linéique de la corde

Instrument à vent



Fréquence f_0 : fonction de la longueur de la colonne d'air

Intensité sonore et décibels



Intensité sonore
à une distance d
= puissance sonore
par unité de surface

Intensité sonore I ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	Rapport (I/I_0)	Niveau de décibels (dB)
1	10^{12}	120
10^{-4}	10^8	80
10^{-8}	10^4	40
10^{-12}	1	0

$I_0 = \text{intensité de référence} = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

Niveau de décibels = niveau sonore

Tester ses savoirs

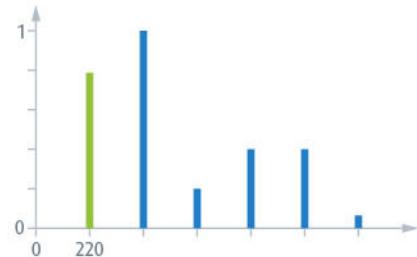
1 Vrai/Faux

Identifiez les affirmations fausses et rectifiez-les.

- Un son pur a une forme non sinusoïdale.
- Les pics du spectre d'un son complexe correspondent aux harmoniques.
- Les fréquences harmoniques sont des puissances de la fréquence fondamentale.
- Le niveau d'intensité sonore perçu est proportionnel à la puissance émise par la source.
- Un tuyau sonore de 9 cm émettra des sons plus aigus qu'un tuyau sonore de 18 cm.

2 Légender un schéma

Sur le spectre sonore d'un son complexe ci-dessous:



- Lédez l'axe des ordonnées et celui des abscisses, avec les unités.
- Indiquez ce que représente la barre verte et les barres bleues et donnez la valeur correspondant à chaque barre bleue.

3 QCM

Pour chaque proposition, identifiez la bonne réponse.

1. La hauteur d'un son est liée à:

- sa fréquence fondamentale
- son nombre d'harmoniques
- l'amplitude de ses harmoniques

2. Un son pur peut être produit par:

- une voix humaine
- un diapason
- une corde de guitare

3. Le timbre d'un instrument est défini par:

- la catégorie d'instruments à laquelle il appartient
- les harmoniques de ses notes
- uniquement la façon dont le musicien joue

4. Le geste du guitariste sur la photo ci-contre modifie:

- la tension des cordes
- la masse des cordes
- la masse linéaire des cordes
- la longueur des cordes



DOC1 Doigts appuyant sur les cordes d'une guitare.

5. Un chanteur émet une puissance sonore de 40 W.

Si le son se répartit sur une surface de 5 m^2 , l'intensité sonore alors perçue est:

- | | |
|--|--------------------------------------|
| a. $40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ | c. 8 dB |
| b. $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ | d. $8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ |

4 Question de synthèse

Expliquez, sous forme d'un paragraphe de quelques lignes et d'un schéma, ce qu'est un son complexe.

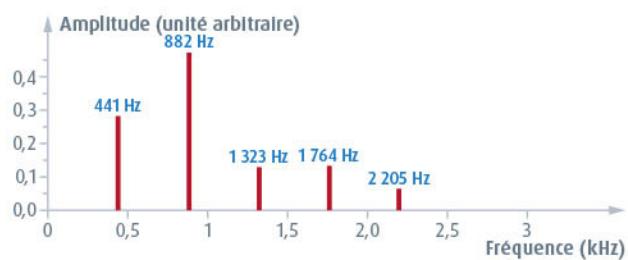
Critères de réussite

- ✓ J'ai décrit la forme d'un son complexe.
- ✓ J'ai parlé de la décomposition d'un son complexe en sons purs.
- ✓ Je me suis relu afin de vérifier l'orthographe et la ponctuation de mon texte.

5 Analyser des documents et raisonner

Accorder une clarinette

Une clarinettiste n'est pas sûre que son instrument soit bien accordé. Pour le vérifier, elle utilise deux méthodes : l'analyse de l'oscillogramme et l'analyse du spectre du La³. Si la clarinette est accordée, la fréquence fondamentale de cette note devrait être de 440 Hz.

DOC 1 Oscillogramme du La³ joué par la clarinette.DOC 2 Spectre du La³ joué par la clarinette.

QUESTIONS

- Expliquez comment l'on voit, sur l'oscillogramme et sur le spectre, que le son de la clarinette est un son complexe.
- Déterminez la fréquence fondamentale du La³ joué par la clarinette grâce à l'oscillogramme, puis au spectre.
- En déduire alors si la clarinette est accordée, et si non, si elle est un peu ou très désaccordée.

6 Calculer

Les cordes d'un piano

Pour fabriquer un instrument à cordes comme le piano, la guitare ou la harpe, il faut tendre les cordes sur un cadre. Un piano peut comporter jusqu'à 250 cordes, et chaque corde supporte une tension de l'ordre de 800 N (Newton). On rappelle l'expression de la fréquence fondamentale d'une corde en fonction de ses caractéristiques :

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad \text{Avec} \quad \begin{cases} L = \text{longueur (en m)} \\ T = \text{tension (en N)} \\ \mu = \text{masse linéique (en kg·m}^{-1}\text{)} \end{cases}$$



DOC 1 Les cordes d'un piano

QUESTIONS

- Sachant qu'une tension de 9,8 N permet de supporter 1 kg, calculez le poids que peut supporter un piano de 250 cordes.
- Calculez la masse linéique d'une corde de masse 10,5 g et de longueur 5,0 m.
- Calculez alors la longueur de cette corde qui permet de produire un Do³ de fréquence 264 Hz.

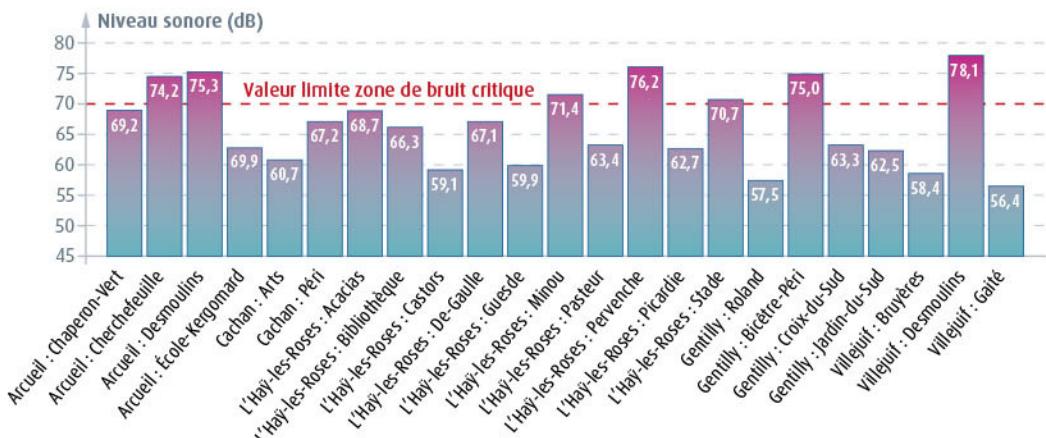
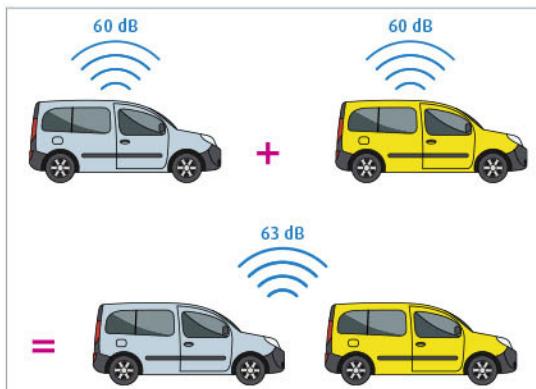
7 Analyser des données et raisonner

Le bruit de l'autoroute

Deux amies discutent du dérangement sonore produit par l'autoroute qui passe près de chez elles, notamment les jours de pluie.

L'une d'elles habite Arcueil près du site de Cherchefeuille et l'autre habite à L'Haÿ-les-Roses, près du site du Stade.

DOC 1 Addition du bruit de deux voitures.



DOC 2 Niveaux sonores moyens diurnes dans différentes villes d'Île de France.



DOC 3 Augmentation du niveau sonore due à la pluie en fonction de la fréquence.

On rappelle que l'oreille humaine perçoit des fréquences entre 20 Hz et 20 kHz.

QUESTIONS

- En analysant le document 2, justifiez le dérangement sonore ressenti par les deux amies.
- Grâce à vos connaissances, interprétez le document 1 en termes d'intensité sonore et de niveau sonore.
- Commentez alors la différence de niveau sonore entre les deux sites.
- Sur le document 3, identifiez la plage de fréquence à laquelle la pluie double au moins l'intensité sonore du bruit enregistré, puis déterminez si l'oreille humaine perçoit ce changement.

Santé

Le pouvoir destructeur du son



La Castafiore de Tintin.

Lors d'un célèbre épisode de Tintin, la cantatrice Bianca Castafiore fait exploser un verre en chantant. Cela est-il possible ? Le son est une vibration qui se propage dans un milieu, comme l'air, et peut se communiquer aux objets solides sur son passage. C'est ainsi que le son traverse les murs. Si la fréquence du son correspond à la fréquence d'oscillation propre d'un verre, celui-ci peut théoriquement entrer en résonance, c'est-à-dire vibrer de plus en plus fort jusqu'à se briser. En pratique, c'est très difficile à faire car la puissance de la voix se répartit sur les nombreux harmoniques qui la composent. En revanche, la recherche médicale s'est peut-être inspirée de l'idée. Une technique a en effet été développée pour fragmenter des calculs rénaux à l'aide d'ultrasons, émis par un haut-parleur, permettant ainsi d'éliminer ceux-ci sans intervention chirurgicale.



Pour en savoir plus
Article du magazine
Scientific American

Menez l'enquête

Déterminez la fréquence de résonance d'un verre et quelle note se rapproche le plus de cette fréquence.

Technologie

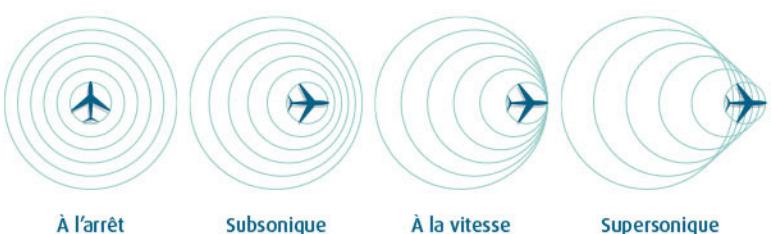
Le mur du son

Lorsqu'un bateau avance plus vite que les vagues qu'il crée, celles-ci sont confinées dans un secteur angulaire à l'arrière du bateau. Au bord de ce secteur, les vagues émises à différents instants s'accumulent, provoquant une vague d'amplitude plus importante. Le même phénomène se produit avec un avion supersonique. Comme la vague, le son est une onde, correspondant à la propagation d'une compression locale de l'air à $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



Le sillage de bateau.

Lorsque l'avion, qui provoque cette compression dans ses réacteurs, se déplace plus vite que celle-ci, les ondes émises à différents instants se superposent sur une région conique à l'arrière de l'avion. Lorsqu'un avion supersonique passe au-dessus de notre tête, nous n'entendons rien jusqu'à ce que le bord de la région conique nous atteigne. Nous entendons alors un « bang » caractéristique, lié à l'accumulation des ondes sonores sur ce cône. C'est le mur du son.



Les ondes sonores émises par un avion dans différents cas.



Pour en savoir plus
Vidéo du magazine
Sciences et Avenir

Menez l'enquête

Expliquez pourquoi ce phénomène est appelé « mur du son ».