

# Physique et perception du Son

**Alain Boudet**

Dr en Sciences Physiques

[www.spirit-science.fr](http://www.spirit-science.fr)

mai 2006

**Résumé:** *Qu'est-ce que le son? Est-ce un phénomène physique? Non, c'est un phénomène de perception par le cerveau provoqué par une source physique. Dans cet article, nous découvrons cet enchaînement de phénomènes: nature vibratoire du son, comment il est émis, comment il se propage; par quel mécanisme il est capté, entendu et perçu par le cerveau.*

## Contenu de l'article:

- Sources de sons et de bruits
- Propagation physique du son
- Perception et conscience
- Son, rayonnements et matière
- Analyse physique de l'onde sonore
- En savoir plus

Qu'est-ce que le son? Nous pouvons aborder cette question par deux attitudes. Ou bien, nous "observons" et expérimentons le phénomène du son dans ses manifestations familières. Ou bien, nous tentons de rassembler les souvenirs de nos lectures. Dans ce cas certains répondront peut-être: "Le son est une onde élastique transmise par l'air". Ne trouvez-vous pas qu'on répète une leçon apprise à l'école ou dans les livres, sans rapport avec notre vécu? Il me semble bien plus intéressant de ressentir le phénomène. **Le son est tout d'abord une sensation.** Le son se forme quand cette onde produit la sensation du son dans notre cerveau. Tant qu'il s'agit de la vibration physique, il n'y a pas de son. Nous allons examiner comment se forme cette sensation.

Lorsque nous percevons un son, nous nous rendons compte que nous le recevons par nos oreilles. Souvent, nous sommes capables de localiser et d'identifier la source du son. Ainsi, la **perception sonore** fait-elle intervenir une **source de son**, c'est-à-dire quelque chose qui produit le son, puis son acheminement jusqu'à l'**oreille**. Enfin c'est le fonctionnement du **cerveau** qui nous permet de le percevoir et d'en prendre conscience. Reprenons ces phénomènes point par point afin de les examiner en profondeur.

## Les sons sont produits par des objets vibrants



*Tambour chamanique  
avec pictogrammes S. Cavé*

Installez-vous tranquillement pour lire ce texte.  
Maintenant, écoutez le monde autour de vous!  
Qu'entendez-vous?

Nous percevons les **voix** des personnes qui nous entourent, le bruit du vent ou de la cascade, un cri, le **choc** d'un objet, le chant des oiseaux, un piano, un tambour, les bruits de l'activité humaine tels que les moteurs. Nous entendons la **musique** produite par les instruments de musique, par la radio et les CD et diffusée dans des hauts-parleurs, etc.

Le questionnement que je pose dans cet article est: **Pourquoi et comment ces sons sont-ils engendrés et émis? Qu'est-ce qui fait qu'un instrument est sonore?**

La réponse la plus directe peut nous être fournie par l'attention portée à notre propre voix. Tentons d'émettre un son soutenu, une note chantée par exemple. Si nous sommes attentifs, nous sentons des parties du corps vibrer. Cela peut être dans la poitrine, dans le ventre, dans la tête, dans la gorge. Ou ailleurs.

La voix produit des vibrations qui se répercutent dans le corps (*voir article Résonances corporelles*) parce que **la voix humaine est elle-même une vibration** engendrée par les cordes vocales. Celles-ci vibrent sous l'effet de l'intention mentale. Elles sont mises en action ainsi que le souffle, par notre volonté. Mais attention: les cordes vocales ne sont pas des cordes, ce sont des bourrelets musculaires situés dans le larynx.

Qu'en est-il des sons extérieurs à nous? Il faut soit affiner notre sensibilité, soit nous mettre dans des conditions un peu excessives pour se rendre compte que **tous les sons sont des vibrations**. Ainsi, plaçons-nous à proximité d'un **haut-parleur** qui diffuse une musique très forte, par exemple lors d'un concert rock de plein air. Nous sentons immédiatement notre ventre vibrer sous l'effet du son.

Dans un **haut-parleur**, objet issu d'une technologie avancée, c'est une **membrane** souple qui produit le son. Nous la voyons vibrer elle aussi.

Dans tous les cas, **le son a été produit par un objet qui vibre**. Ces objets sont naturels (les feuilles, la cascade), fabriqués (la peau d'un tambour, la corde d'une guitare, un tube de métal frappé), ou les cordes vocales d'un humain. Cet objet a été **mis en vibration, en oscillation**, par une sollicitation mécanique: la percussion, le frottement, l'effleurement, le souffle.



On peut s'amuser à produire des sons avec des objets de toute sorte, par exemple des bouteilles plus ou moins pleines. **La plupart des objets sont susceptibles de vibrer**, brièvement ou plus longuement, lorsqu'ils sont stimulés ou frappés d'une façon adéquate. **Si la fréquence de la vibration se situe dans le domaine audible, alors elle produit un son ou un bruit.**

**Expérience:** Voici une expérience avec une lame de scie que je fais vibrer en la coinçant dans un étau (fig. 1). Je la tire sur le côté et je la lâche. Boininininnngggg... Puis je change l'endroit de fixation. Au fur et à mesure que je descends la lame dans l'étau afin que la partie vibrante raccourcisse, je perçois des sons d'abord **graves**, puis de plus en plus **aigus** (voir article [Sensations sonores: Hauteur](#)), et enfin plus rien car les sons sont au-dessus de mon seuil perceptible (domaine des **ultra-sons**). De même, si je monte la lame de telle sorte que la partie flexible de la lame soit longue, je n'entends plus rien, même si je la vois vibrer. C'est le domaine des **infrasons**, des sons inaudibles parce que leur fréquence est située en-dessous du seuil d'audibilité (voir article [Sensations sonores: Volume](#)).

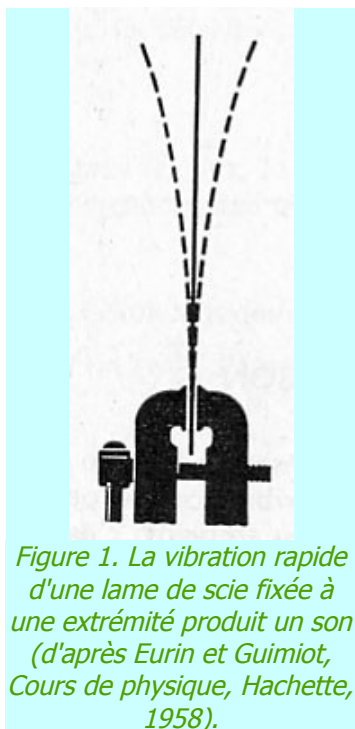


Figure 1. La vibration rapide d'une lame de scie fixée à une extrémité produit un son (d'après Eurin et Guimiot, Cours de physique, Hachette, 1958).

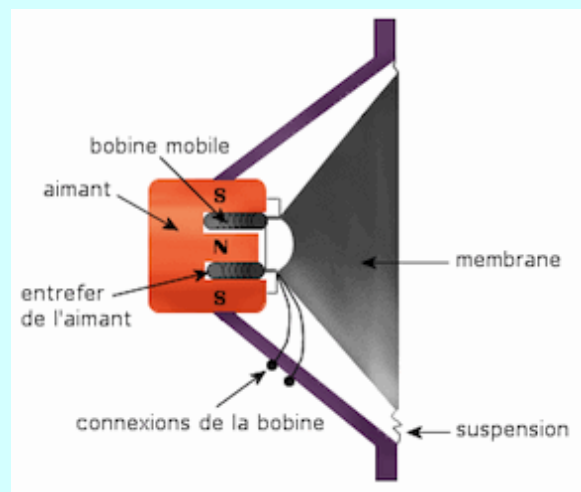
Dans le cas d'un instrument de musique tel qu'une **trompette**, quelle est la partie vibrante? C'est la colonne d'air contenue à l'intérieur de l'instrument. Elle est mise en vibration par **le souffle et les lèvres** du trompettiste. Il souffle comme s'il prononçait "ppp". En même temps, la vibration de l'air est communiquée **au corps de l'instrument** qui vibre dans son ensemble.

Dans une **clarinette**, le souffle met en vibration une fine **languette de bois** (en roseau), l'**anche**. Mais ce son est à peine audible et il prend de l'ampleur parce que tout le corps de l'instrument est mis en vibration. L'anche vibrante transmet sa vibration au corps et à la colonne d'air. Pour le **violon**, c'est l'archet qui frotte sur la corde et la met en vibration. La corde est couplée à la caisse de résonance en bois qui se met à vibrer aussi dans son ensemble. Même chose pour la **guitare** avec la différence que la corde est mise en vibration parce qu'on la pince.

Quel que soit l'instrument, à vent ou à cordes, c'est l'ensemble du corps instrumental qui vibre sous l'effet de la sollicitation. Aussi, **les caractéristiques sonores** d'un instrument dépendent à la fois de la **matière** dans laquelle il est réalisé (bronze, cuivre, bois, corne...), et de sa **forme** (caisse de résonance d'un violon, tube de la clarinette et de la trompette, épaisseur du bois ou du métal) (voir aussi [Le son créateur de formes](#))

## Fonctionnement d'un haut-parleur

Dans un **haut-parleur**, une membrane est fixée sur une bobine magnétique (un enroulement de fils électriques en **hélice** sur un cylindre). Cette bobine est mobile et peut coulisser dans les échancrures d'un aimant. Lorsqu'elle est traversée par un courant, par exemple celui qui vient d'un lecteur de CD ou d'un amplificateur, elle produit un champ magnétique qui interfère avec celui de l'aimant et l'oblige à se déplacer. Elle bouge dans l'aimant au rythme du courant électrique, entraînant la membrane. C'est la membrane qui produit finalement le son.



## Propagation physique du son

Comment le son produit par la corde du violon peut-il parvenir au tympan de notre oreille et à notre peau et devenir perceptible?

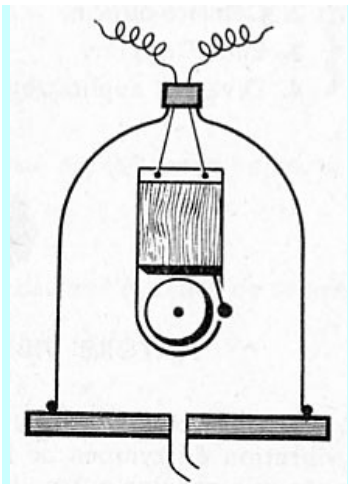


Figure 2. (d'après Eurin et Guimiot, Cours de physique, Hachette, 1958).

### Le son se propage dans l'air

**Expérience:** Pour étudier ce phénomène, des physiciens ont installé une sonnerie dans une cloche en verre dans laquelle on fait progressivement le vide avec une pompe (fig. 2). Au fur et à mesure que l'air de la cloche se raréfie, le son perçu à l'extérieur s'atténue, puis s'éteint.

C'est donc que l'air participe à la transmission du son de la sonnerie vers le tympan. **L'air est le support physique de la transmission du son.**

Comment cela se passe-t-il pour un instrument de musique? Lorsqu'un trompettiste souffle dans son instrument, l'air est mis en vibration par ses lèvres dans l'embouchure d'une trompette. Ensuite, l'air transmet sa vibration dans l'environnement jusqu'aux objets et surfaces qu'il touche. C'est ainsi que le tympan de l'oreille et la peau reçoivent la vibration de la trompette. Mais il ne s'agit pas encore d'un son, mais du souffle vibrant de l'air. Il faudra l'intervention du cerveau pour que cela devienne un son.

Le souffle d'air est quelquefois perceptible lorsqu'on passe à côté de grosses baffles de sonorisation extérieure de concerts.

Le son ne se transmet pas seulement à travers l'air, mais **aussi à travers les autres**

**gaz.**

Un autre phénomène familier est que le son est atténué par la **distance**. Plus on est loin de la source, moins on l'entend.

### Le son se propage dans les liquides et les solides

**Faites l'expérience suivante:** vous vous délassiez dans le bain et vous entendez le ruissellement de l'eau du robinet qui coule dans le bain. Plongez la tête sous l'eau (si vous lisez l'écran de votre ordinateur, je vous conseille de le poser avant). Entendez-vous encore le bruit de cascade? Plus fort? Ou moins fort? **L'eau conduit le son bien mieux que l'air.**

Il en ressort que **le son a besoin d'une substance matérielle pour se propager**, que ce soit une substance éparpillée comme les gaz ou une substance plus dense comme l'eau. Cela peut également être une **substance solide dense comme le métal ou le bois**, comme le montre l'expérience suivante:

**Observation:** Vous avez un réveil avec des aiguilles, qui fait "tic-tac". Vous le posez sur un meuble creux en bois. Le son est amplifié, ce qui montre que le son s'est propagé à travers le bois du meuble. Il est familier de constater, lorsque vous entendez les bruits de la pièce voisine, que les bruits des chaises qu'on déplace sont bien plus perceptibles que les voix des personnes qui y discutent. En effet les bruits de chaise ont été transmis par les poutres ou le sol de la maison tandis que les voix sont véhiculées par l'air. Quand Lucky Luke veut savoir si une troupe de chevaux arrive au loin, il colle son oreille sur le sol. Si c'est un train, il la colle sur le rail. Il les entend de bien plus loin. Ceci s'explique par la valeur de la vitesse de propagation du son dans la matière.

### Le son va plus vite dans la matière dense

**Observation:** Il est possible d'évaluer le temps mis par le son à se déplacer dans l'air en observant un orage. La détonation de la foudre produit simultanément un coup de tonnerre et un éclair. Or nous voyons l'éclair avant d'entendre le son, ce qui prouve que la lumière va beaucoup plus vite. Tellement vite qu'on peut considérer que l'éclair nous arrive pratiquement instantanément depuis l'endroit où il s'est produit. Le son voyage plus lentement et arrive avec quelques secondes de retard. En comptant les secondes, on peut calculer la distance à laquelle éclate l'orage.

On a pu mesurer cette vitesse dès 1738, en utilisant un canon. Elle est de l'ordre de 330 mètres par seconde dans l'air, soit **un kilomètre en 3 secondes**. Dans l'exemple de la foudre, on divise le nombre de secondes par 3 pour obtenir le nombre de kilomètres. Dans l'eau, la vitesse du son est 4,5 fois plus grande: 1500 m/s Elle est encore plus élevée dans les solides (5200 m/s dans l'acier, 3000 à 6000 m/s dans le verre). **En gros, plus la matière est dense, plus rapide est la vibration sonore.**

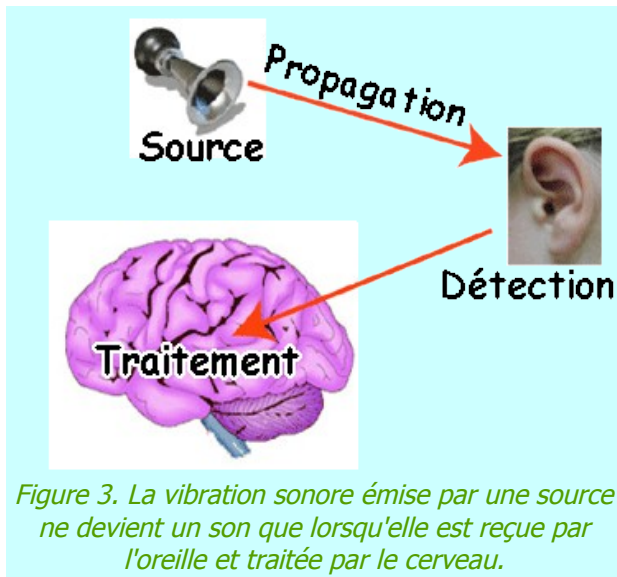
Les différences de vitesse du son selon le milieu de transmission sont responsables de **variations de sa hauteur** (pour comprendre ce qu'est la hauteur, voir l'article correspondant). Une cloche plongée dans l'eau devient plus grave. Cela produit des phénomènes amusants. Si l'on parle dans un récipient où l'on a mis de l'hélium, on a l'impression d'avoir une petite voix aigüe.

## Perception et conscience

Une vibration mécanique de la matière et de l'air qui met en branle le tympan ou le micro ne constitue pas en elle-même un son. Car c'est dans le cerveau que naît et se forme le son. **Le son n'existe pas en-dehors de notre cerveau, de nous-même.**

L'oreille recueille les vibrations de l'air, les transforme en impulsion électrique au moyen des cellules nerveuses, impulsion qui est perçue et interprétée en son par le cerveau (fig. 3). Le son est donc essentiellement une **perception**. Si l'attention se dirige vers cette perception, la perception arrive à la conscience. **Un son est un phénomène psychique, lié à la conscience des êtres vivants.**

### Psychoacoustique



Entre l'arrivée des signaux vibratoires aux oreilles et la sensation de son dans le cerveau, a lieu le phénomène de **traitement des signaux par le système nerveux**. Cela signifie que la vibration physique de l'air ne parvient pas de façon brute au cerveau. Elle est transformée.

Une constatation simple est que la gamme des vibrations est tronquée. Nous n'entendons pas les sons trop bas ou trop hauts, même si leurs vibrations parviennent à la peau ou à l'oreille. Notre système nerveux ne peut recueillir et transformer en phénomène sonore qu'une **fenêtre limitée dans les fréquences, environ de 20 à 20 000 Hertz** (voir définition du Hertz dans l'article *Sensations sonores: hauteur*), avec des variantes en fonction des individus (voir article *Sensations sonores: volume*).

Pendant, le traitement des signaux vibratoires met en action des mécanismes complexes: physiologiques, psychiques, émotionnels, cognitifs (liés à notre apprentissage et nos expériences antérieures). L'étude de ces phénomènes a donné

lieu à la science de la **psychoacoustique**. Les connaissances accumulées par cette science ont des applications aussi bien pour le diagnostic et les dysfonctionnements de l'ouïe que pour la conception des salles de concert, les techniques de reproduction des sons, et les systèmes de compression numérique pour l'enregistrement et le stockage.

*L'ouïe traite les signaux sonores pour en extraire les informations nécessaires à notre perception de l'environnement* (J.C. Risset). Dans un environnement bruyant, nous sommes capables d'extraire de façon automatique les sons qui ont un sens pour nous, comme les paroles de quelqu'un qui nous parle. Nous sommes également capables de reconnaître des formes sonores, tels que des instruments de musique. Dans une musique, l'ouïe a la faculté de séparer et distinguer des sons superposés. D'autres fois au contraire, elle fusionne en un son complexe des sons distincts.

Certains phénomènes psychiques sont à l'origine de dysfonctionnements de l'ouïe. Il existe une surdité psychologique. On a souvent dit que l'oreille n'avait pas de paupières. Toutefois le cerveau peut en faire office de façon inconsciente. Il a la possibilité de bloquer la perception de certains sons qui nous font mal psychologiquement. Il se peut que nous entendions mal certaines fréquences associées aux voix des parents si ceux-ci ont été source de traumatismes, s'il l'un frappait l'autre par exemple. C'était trop douloureux à entendre. De même des traumatismes porteurs de dévalorisation, de négation, de violence, qu'il nous est impossible d'accepter sont source de baisse de l'acuité auditive ou au contraire d'hypersensibilité.

### Le son dans la peau et les os

L'oreille n'est pas le passage obligé pour transmettre le son jusqu'au cerveau. La peau et les os sont également des voies efficaces.

Il est fréquent que des personnes ne reconnaissent pas leur voix enregistrée. C'est tout à fait normal puisque nous avons l'habitude de l'entendre non seulement par nos oreilles, mais par nos os et notre chair. Lorsqu'on effectue un audiogramme pour diagnostiquer l'audition, on teste aussi bien l'audition par l'air que l'audition par la conduction des os du crâne.

Si nous sommes immergés dans l'eau, oreilles comprises, et que nous écoutons de la musique diffusée dans l'eau, par exemple comme le propose **François Louche**, il est étonnant de constater combien **nous percevons cette musique avec clarté dans l'eau, même en nous bouchant les oreilles**. Nous la ressentons dans tout le corps (voir article *Résonances corporelles*).

## Le son intérieur

Encore plus insolite, quoique familier: nous pouvons entendre des sons **intérieurement**, soit parce que volontairement nous les chantons "mentalement", soit parce qu'ils **surgissent en nous comme une voix intérieure**. Par exemple une rengaine nous trotte dans la tête de façon inopinée. D'ailleurs comment font les compositeurs pour trouver leur musique? Ils entendent le son qui se déroule en eux, même s'ils le concrétisent immédiatement au piano, ils le sentent vibrer et le retranscrivent.

Dans le chant intérieur, il n'y a pas de vibration physique de l'air ambiant, pas d'onde sonore. Mais par similitude avec les sons produits physiquement, on peut toujours caractériser la hauteur de ces sons par leur fréquence.

La production mentale du son est la preuve que **le son est créé dans le cerveau**. Il est donc surprenant que certains ne le définissent que comme la vibration physique de l'air (phénomène physique), comme s'ils ne connaissaient pas cette expérience évidente des phénomènes psychiques.

**Résumons:** La matière vibre et émet des **vibrations** qui se **propagent** en s'atténuant avec la distance. Ces vibrations ont des plages de fréquences très étendues qui affectent notre corps, notre peau, notre oreille, et provoquent des effets sonores. Le tympan est un filtre physiologique qui ne laisse passer qu'une plage réduite de fréquences et de volume et la sensation sonore se produit lorsque l'influx nerveux arrive au cerveau. Donc **le son est une impression intérieure suscitée par une excitation extérieure**.

## Son, rayonnements et matière

Je reviens avec insistance sur le double caractère du son: il est à la fois **matériel** (physique) et **mental** (sensation, perception).

Toutefois, même s'il a quelque chose de matériel, il n'est pas un objet, on ne peut pas le toucher, il n'a ni forme ni poids. C'est un **rayonnement** et comme tous les rayonnements, il est de nature vibratoire. Il se propage.

Dans l'expérience immédiate, les perceptions que nous en recevons de nos organes des sens nous suggèrent de classer les manifestations en deux grandes catégories: les **objets** et les **rayonnements** (*voir article Matière et rayonnements*)

- Les **objets** sont caractérisés par leur forme, leur volume, leur couleur, leur poids, leur position dans l'espace, leurs déplacements, leur consistance dense, liquide, gélatineuse ou gazeuse, leur température, etc... Ils sont constitués de matière. **Les objets sont l'expression de la matière par des formes.**
- Les **rayonnements:** ce sont par exemple la lumière, les rayons X, les ondes de télécommunication de la radio, la télévision et le téléphone mobile. Également l'électricité. A l'inverse des objets, ils ne peuvent pas être touchés ni vus, on ne peut pas leur attribuer un volume, etc... Ils se propagent de façon invisible et ne manifestent leur présence que quand ils rencontrent un "obstacle", c'est-à-dire un objet avec lequel ils entrent en interaction. Par exemple l'antenne du téléphone mobile ou l'écran de cinéma.

Le son est très intimement lié à la matière, car il est provoqué et se propage par les vibrations de la matière. A tel point que **le son est capable de modeler de la matière fluide**. C'est ce qu'a montré par exemple Hans Jenny dans des expériences qu'il a nommées de la "**cymatique**". Sous l'influence de sons transmis par des plaques vibrantes, des fluides ou de la poudre prennent des formes étonnantes (*voir l'article le son et les formes*).

**Comme tous les rayonnements, le son ne se manifeste à nos sens ordinaires que s'il rencontre de la matière** (le tympan, la peau, la membrane du micro). On pourra comparer le rayonnement sonore et le mécanisme de sa perception avec la nature et la perception des couleurs (*voir article La nature de la couleur et la figure correspondante sur la perception*).

## Analyse physique de l'onde sonore

Dans une série de 3 articles, nous avons examiné de façon sensorielle les caractéristiques physiques du son: **hauteur**, **puissance**, **timbre**. Nous allons laisser de côté ici l'approche purement sensorielle et profiter de notre nouveau savoir pour comprendre un peu plus le lien entre les caractéristiques physiques du son et les impressions sonores. Pour cela, effectuons quelques expérimentations à l'aide d'un microphone et d'instruments d'analyse.

### De la vibration sonore au signal électrique

Comment fonctionne un **micro(phone)**? C'est la vibration de l'air qui met en mouvement la membrane du microphone. La vibration mécanique de la membrane est transformée en **vibration électrique**. Ensuite la vibration électrique est acheminée dans des appareils électroniques qui la traitent et la transforment, par exemple l'amplifiant ou l'enregistrent. Imaginons donc un son qui touche un micro où il est converti en signal électrique, lui-même enregistré sur un support matériel tel qu'une cassette magnétique ou un enregistreur MP3. **Le signal électrique enregistré est la reproduction (presque) fidèle de la pression de l'air sur la surface du micro.**

Lorsqu'on rejoue l'enregistrement dans un lecteur ou une chaîne hi-fi, c'est le chemin inverse qui se produit. Le signal électrique est converti en vibration de la membrane du **haut-parleur**, qui provoque les modulations de la pression de l'air ambiant, produisant l'impression sonore. Par la suite, nous allons examiner des enregistrements graphiques des courants électriques recueillis par un micro. Mais, pour la commodité de l'exposé, on peut tout aussi bien considérer qu'ils représentent le déplacement de la membrane ou la pression et l'énergie vibratoire de l'air.

La figure 4 est l'un de ces graphiques, reproduit de l'article sur le **volume**. Puisque l'onde sonore y est enregistrée intégralement en tant que variations de la pression de l'air, il doit être possible d'extraire dans ce graphique toutes les caractéristiques du son: hauteur, volume (ou puissance), timbre. C'est ce que nous allons analyser maintenant.

## Volume ou puissance

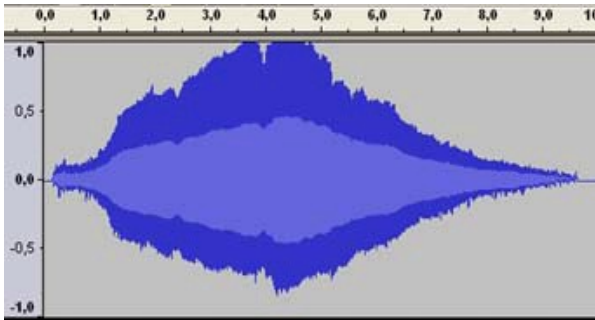


Figure 4. Son croissant et décroissant

Le caractère de volume a été examiné dans l'article [Sensations sonores: volume](#). **Le volume est relié au déploiement en hauteur de la courbe**. On comprend bien que plus le son a de force, plus la membrane du haut-parleur peut vibrer loin de part et d'autre de sa position d'équilibre, de façon similaire à une balançoire qu'on pousse de plus en plus fort.

Ainsi le son se manifeste par une alternance de surpressions et dépressions de l'air, oscillant entre des valeurs négatives et positives. C'est pourquoi la courbe évolue de part et d'autre d'une ligne zéro, qui est la ligne d'équilibre quand il n'y a pas de son.

Ce qu'on nomme le volume, ou intensité, ou puissance du son, est proportionnel à la quantité d'énergie produite par le mouvement de

la membrane et donc la vibration de l'air. Mathématiquement, l'énergie développée à un instant donné est mesurée (à un facteur constant près) par le carré de l'amplitude de la courbe à cet instant.

## Hauteur

Nous savons par l'article sur [la hauteur du son](#) que celle-ci est reliée à sa fréquence. Où donc la fréquence est-elle visible dans la courbe? Pour la débusquer, il faut agrandir la courbe sur l'échelle des temps. Tandis que l'échelle de la figure 4 nous montre les secondes, la figure 5 a été dilatée jusqu'à montrer les millièmes de secondes. On peut alors nettement distinguer les variations de la pression de part et d'autre du zéro (échelle verticale de gauche).

On constate que les variations se répètent de façon quasiment identique sur une période de temps identique. C'est la **période** répétitive ou cycle. **C'est cette répétition cyclique qui est responsable de la perception de hauteur**. La fréquence est le nombre d'occurrences de cette période en une seconde. Dans l'exemple ci-dessous, la période est d'environ  $2/1000^e$  de seconde, soit une fréquence proche de 500 Hz. Précisément, c'est un LA3 de 440 Hz.

## Retour sur le volume

Après avoir dilaté la courbe avec ce détail, le volume du son y est beaucoup moins visible. On a vu qu'il se montre dans les positions extrêmes de l'amplitude. Il ne se "soucie" pas des variations à l'intérieur d'une période. Le volume est donc figuré par la ligne de crête que j'ai figurée en vert.

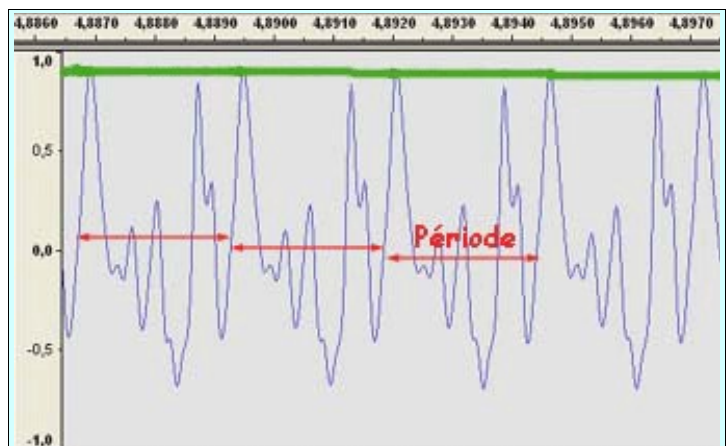


Figure 5. Courbe de variation de la pression sonore. C'est la même que celle de la figure 4 agrandie à l'échelle des millièmes de seconde. Elle montre la répétition périodique de l'onde sonore. La ligne verte supérieure donne le volume.

## Timbre

Nous savons par l'article [correspondant](#) que le timbre est dû aux harmoniques qui se superposent au son fondamental et à leur évolution dans le temps. Reste à trouver où elles se logent dans la courbe. **On va trouver le timbre à l'intérieur d'une période**, c'est-à-dire dans l'espace délimité par un des traits rouges de la figure 5. Puisque la répétition de ce motif donne la fréquence, **c'est le profil particulier d'une période qui est caractéristique du timbre**. En effet lorsqu'un son est réduit à sa composante fondamentale, l'harmonique 1, le profil est alors celui d'une courbe sinusoïdale (figure 6). Le son est dit "pur" (selon la conception de pureté du physicien, c'est-à-dire exempt d'harmoniques).

Comme les mots "**sinusoïdal**" ou "**sinus**" sont employés quelquefois à tort et à travers, je précise son sens. Le mot

"sinus" vient du latin et veut dire un "pli". Il a d'ailleurs donné le mot "sein" (qui veut dire pudiquement un pli dans le vêtement!). Mathématiquement, c'est un pli régulier et symétrique tel que celui montré sur la figure 6, qui peut seulement être étiré en largeur (ou comprimé en hauteur), et dont la véritable définition mathématique repose sur les propriétés géométriques du cercle.

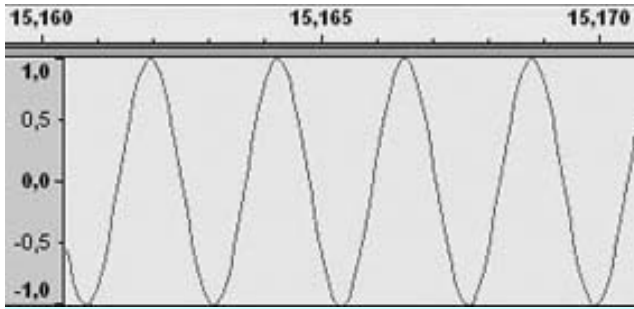


Figure 6. Son pur sinusoïdal

Il est possible de produire artificiellement des sons purs avec des générateurs de sons électroniques. L'illustration sonore sur les **harmoniques** en est un échantillon. Pour l'oreille, ce son paraît plat. Cela ne veut pas dire qu'il n'ait pas de valeur, mais l'émotion qui s'en dégage exprimera plus un aspect mécanique que la chaleur d'une voix.

Le profil d'une note telle que celle de la figure 5 est dû à la superposition des courbes sinusoïdales de chacune de ses harmoniques. Par définition, leurs fréquences sont des multiples de la fréquence fondamentale, ce qui signifie que la

période des oscillations de la deuxième harmonique est 2 fois plus courte, puis pour les suivantes 3, 4, 5, etc.. plus courtes.

Pour déterminer quelles sont les **harmoniques** qui sont présentes dans un son donné tel que celui de la figure 5, on décompose son profil. La façon la plus artisanale de le faire (et la seule possible avant l'ère de l'électronique) fait appel à des résonateurs physiques qui se mettent en résonances ou non lorsqu'on produit la note. Cela ressemble à l'exercice de résonance des cordes de piano vu dans l'article *Sensations sonores: timbre*. Or il se trouve qu'une transformation mathématique de la courbe de l'onde peut nous donner le résultat: *c'est la transformée de Fourier*. L'ordinateur la calcule très vite et l'affiche sous forme du **sonagramme**. Dans un sonagramme (figure 7), on voit le **temps** se dérouler le long de l'axe horizontal. L'axe vertical montre les **fréquences** étagées des multiples harmoniques, espacées de façon régulière, car leurs fréquences sont multiples de la fréquence de base. Enfin la **puissance** du son est indiquée par l'intensité du gris des traits.

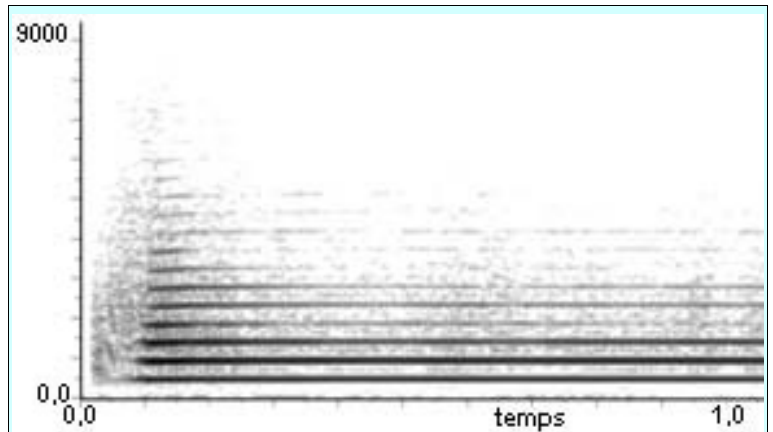


Figure 7. Exemple de sonagramme

## Perception du temps

On a donc trouvé, dans la variation de la pression en fonction du temps, les 3 caractéristiques du son: sa hauteur, son volume et son timbre. Mais alors, comment se fait-il qu'il puisse y en avoir trois, alors qu'il n'y a que 2 variables, la pression et le temps? Comment avons-nous fait? Où s'est produit la distinction?

Tout simplement parce que la hauteur et le timbre sont deux expressions différentes de la variation de pression, les variations responsables du timbre étant contenues dans une période, la hauteur étant produite par sa répétition. C'est donc bien notre perception sonore qui nous a conduit à distinguer les deux, car qui aurait eu l'idée de décomposer en deux variables une banale courbe de pression telle que la figure 5, si ce n'est pour rendre compte de notre perception? Oreille et cerveau combinés sont de puissants analyseurs.

## En savoir plus

### Articles MUSIQUE dans le site [www.spirit-science.fr](http://www.spirit-science.fr)

- **Sensations sonores.** Par l'expérience sensorielle, à travers des exemples familiers et grâce à des fichiers sonores inclus, nous découvrons les qualités physiques et musicales des sons: leur force; leur hauteur et comment elle se traduit en notes pour le musicien: le timbre. Par des illustrations visuelles et sonores, j'explique en détails les notions d'harmoniques, ce qui nous permet de comprendre comment fonctionne le chant diphonique. L'expression vocale peut profiter de ces prises de conscience et je propose quelques exercices vocaux d'applications.
  1. **Hauteur et fréquence**
  2. **Intensité**
  3. **Timbre et harmoniques**
- **Modes et gammes**
  1. **Nature et constitution.** La gamme est un condensé de mélodie qu'on peut appréhender sans connaître le solfège, par l'approche sensorielle. La notion de mode est tout aussi naturelle. Un mode, c'est ce qui reste fixe lorsqu'on change la hauteur de la mélodie. C'est une façon de diviser l'octave en échelons intermédiaires. La gamme, c'est ce qui change dans un mode lorsqu'on change la hauteur de la mélodie. Cette distinction est apparue récemment dans l'histoire musicale, en même temps que l'idée de hauteur absolue.
  2. **Défilé de modes.** Ceux qui, conditionnés par le gavage scolaire, s'imaginent que l'univers musical repose en tout et pour tout sur les modes majeur et mineur, devront réviser leur point de vue et reculer les frontières de leur esprit. La construction des modes devient un jeu surprenant et amusant. De la manière d'arranger des intervalles à l'intérieur d'une octave. Découverte de nombreux types de modes produits par des cultures créatives de notre vaste monde. Modes pentatoniques et heptatoniques. Gammes occidentales, tziganes, indiennes, contemporaines, chinoises, arabes, etc. avec illustrations sonores.
  3. **Le ton et l'intonation juste.** Pourquoi les interrogations sur la définition du ton et les intervalles constitutifs des gammes ont-elles préoccupé tant de compositeurs et musicologues depuis l'antiquité grecque? Le ton n'est-il pas une donnée absolue? Il y a des réponses techniques et mathématiques. La gamme tempérée a succédé à d'autres gammes, telles que les gammes pythagoriciennes et la gamme de Zarlino. Elle n'est qu'une mode passagère, correspondant à une époque. Sa remise en cause actuelle correspond à une phase de déconditionnement. Toutefois l'essentiel réside dans l'effet sonore qui résulte de la gamme et comment elle résonne et agit sur le corps. Les recherches actuelles tentent de trouver une intonation qui soit juste pour le corps et l'être.
- **Évolution de l'expression musicale occidentale du Moyen-Âge à nos jours.** Du plaint-chant à la polyphonie, de la monodie à l'harmonie, du modal au tonal puis à l'atonal, les formes de l'expression musicale n'ont pas cessé de s'inventer et de se réinventer tout au long de l'histoire. Dans cette évolution, c'est l'âme humaine qui s'explore sous toutes ses facettes. Quelle que soit l'époque, certaines musiques nous nourrissent, d'autres nous causent des préjudices. (Illustrations sonores)
- **Résonances sonores corporelles:** Les sons de notre environnement ne stimulent pas seulement les tympanes de nos oreilles, ils mettent en vibration certaines parties de notre corps. Toutes les parties de notre corps sont susceptibles d'être mobilisées en fonction de la hauteur et du timbre de ces sons. Apprendre à ressentir et prendre conscience de ces résonances, et plus particulièrement celles provoquées par notre propre voix chantée, est une porte essentielle pour développer d'autres dimensions subtiles de notre être.
- **La hauteur des notes de musique doit-elle être normalisée par un diapason? Les aléas historiques de la fréquence du LA.**
  1. Depuis 1953, une norme internationale recommande d'accorder les instruments de musique à la fréquence de 440 hertz pour le LA. C'est une volonté récente, car dans le passé, on ne s'intéressait qu'aux intervalles entre les notes et on ne savait pas mesurer leur fréquence.
  2. Fixer un diapason à 1 Hz près a un sens purement technique car musicalement, les notes émises par les instruments sont fluctuantes et varient avec la température et le souffle. Lorsque vous entonnez une chanson, vous ne vous souciez pas du diapason. La nécessité d'un diapason commun est apparue pour des motifs pratiques et commerciaux, afin de faciliter la musique professionnelle d'ensemble et la fabrication des instruments.
  3. Au moins jusqu'au 18<sup>e</sup> siècle, le diapason des instruments variait d'un endroit à l'autre, d'une époque à l'autre et d'un instrument à l'autre. Puis des tentatives de normalisation ont été effectuées, mais le choix des valeurs retenues a suscité des controverses, qui ne se sont pas éteintes avec la normalisation internationale de 1953.
  4. Le choix d'un diapason plus haut ou plus bas peut affecter le rendu sonore et la performance vocale des chanteurs lorsqu'il s'agit d'interpréter des œuvres écrites dans le passé. L'essentiel est l'impact émotionnel et



physique de la musique sur l'auditeur. Il résulte de paramètres complexes qui dépassent de loin la question du diapason.

- **Les sons créateurs de formes. Les sons ont-ils participé à la formation de l'univers?** Lorsqu'une plaque sur laquelle on a déposé du sable ou un liquide est soumise à une vibration ou à un son, le sable ou le liquide s'arrangent en d'extraordinaires figures géométriques. Ces figures sont segmentées en cellules symétriques d'autant plus fines et complexes que la fréquence vibratoire est élevée. Des gouttes d'eau isolées pulsent et s'organisent en polyèdres. Par ce procédé, le son est transcrit en formes. La voix humaine produit de merveilleuses figures et l'on peut suivre les formes d'une musique. Beaucoup de ces figures acoustiques sont analogues à des formes que l'on trouve dans les végétaux et les animaux, et aussi dans les planètes et les crop-circles. Se pourrait-il que le monde et la nature aient été créés par des sons, comme le rapportent les mythes de nombreuses traditions?
- **L'éducation musicale selon Willems:** L'éducation musicale doit collaborer au plein épanouissement des facultés humaines. Il ne s'agit pas de faire l'éducation musicale d'un enfant ou d'un adulte dans le but de lui fournir une occupation, un divertissement, mais pour développer en lui des éléments de vie qui sont prêts à être utilisés: la musique est l'expression de la vie.

### Autre article du site

- **Matière et rayonnements, les concepts fondamentaux de la physique.** Atomes et électrons - Mouvement des corps matériels - Ondes de lumière et ondes sonores - Quel est notre rapport avec le monde physique? La physique classique décrit le monde environnant en distinguant la matière et les ondes électromagnétiques. La matière est faite d'atomes, eux-mêmes constitués d'un noyau et d'électrons. Vers 1900, la physique semble (presque) entièrement constituée avec des théories puissantes et unificatrices englobant l'ensemble des phénomènes connus: la théorie atomique, la mécanique de Newton, la théorie électromagnétique de Maxwell, et la théorie de l'électron de Lorentz. Selon ces théories, nous vivons dans un monde continu et déterminé. Toutefois, il ne faut pas perdre de vue qu'il s'agit là de modèles qui sont une fructueuse représentation des phénomènes, en accord avec les mentalités et le contexte historique d'une époque. Ils n'excluent pas d'autres représentations. À toute époque, il y a eu des luttes entre partisans de modèles différents. Contrairement à un cliché répandu, la science ne se construit pas selon une logique paisible, mais est traversée de controverses alimentées par l'émotionnel et les égos. Y compris des abus d'autorité et des dogmes imposés qui font barrage à de nouvelles visions du monde.

### Articles accessibles sur Internet

- Articles wikipédia: [Psychoacoustique](#); [Acoustique musicale](#)
- Une vidéo sur le fonctionnement du [Haut-parleur](#)

### Article imprimé

***Son musical et perception auditive***, Jean-Claude Risset, directeur de recherche au CNRS, au Laboratoire de mécanique et d'acoustique (LMA) à Marseille. Dans "Pour la Science", Novembre 1986.

© Copyright 2006 - Alain Boudet

[www.spirit-science.fr](http://www.spirit-science.fr) - France

Tous les documents présents sur ce site sont protégés par les lois sur les droits d'auteur.

[Les publications de ce site sont identifiées par le numéro international ISSN 2430-5626](#)

**Cet article est l'aboutissement d'études, d'investigations, de compréhensions, de synthèse, de réflexions, de clarifications et de reformulation en langage simple, qui ont demandé une somme importante de travail.**

**Si vous deviez en tirer parti devant un public de lecteurs ou de spectateurs ou pour quoi que ce soit, merci de le citer.**