

	C4-3-PD-AC01 — Les ondes sonores, leurs caractéristiques et leurs déplacements.
	NOM
	PRÉNOM
	GROUPE

1 Qu'est-ce que le son ?

Lorsque vous parlez, ou que des objets sont cognés, dès que cela crée une vibration de l'air, cela produit un son.

Les sons sont émis par toute chose créant une vibration de l'air (ou de l'eau) : cordes vocales, cordes d'instruments (guitares, violons, violoncelles, pianos, ...), vibrations de lamelles soit par passage d'air soit par percussion (flute, hautbois, vibraphone), passage d'air dans un trou puis un tuyau (flute traversière, orgues), percussions de membranes (tambours, tamtam, ...) etc...

2 Caractériser le son

« Caractériser » en langage scientifique signifie décrire. Il existe différentes grandeurs physiques pour caractériser les sons.

3 Hauteur du son = fréquence

La « hauteur » du son en musique est traduite par la notion de fréquence en physique. Cela revient à classer les sons par la notion d'aigüe ou de grave.

La fréquence est notée « f » et l'unité d'une fréquence est le hertz (Hz)¹.

Il existe des multiples du Hertz : le kilohertz, le mégahertz, le gigahertz ...

GHz			MHz			kHz			Hz
Gigahertz			Mégahertz			kilohertz			Hertz
10 ⁹			10 ⁶			10 ³			10 ⁰

Vous avez de la chance, il n'y a pas de fréquences négatives !

3.1 Échelle des fréquences

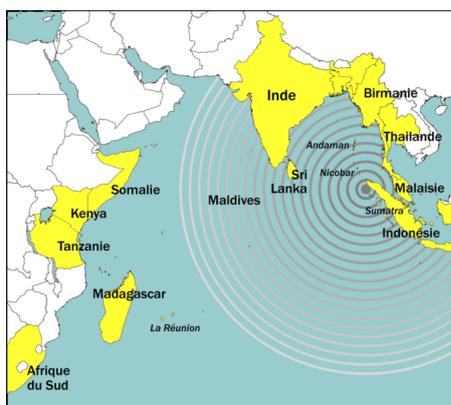
Infrasons	de 0 Hz à 20 Hz
Sons audibles	de 20 Hz à 20 kHz (20 000 Hz)
Ultrasons	de 16 kHz (16 000 Hz) à 10 MHz (10 000 000 Hz)

L'oreille humaine peut entendre, dans les meilleures conditions, des sons allant de 20 Hz à 20 000 Hz (20 kHz) ce sont les fréquences dites audibles.

2 anecdotes : certains animaux entendent des infrasons, les éléphants par exemple, voici deux situations qui l'illustrent.

1. Attention à l'écriture du Hertz il s'agit bien d'un H majuscule et d'un z minuscule !

- Le 26 décembre 2004² il y a eu un tremblement de terre sous-marin qui a provoqué un tsunami dans l'océan indien. Alors qu'environ 200 000 humains ont péri dans la catastrophe la majorité des éléphants de l'île ont survécu, car, entendant et sentant les infrasons provoqués par le tremblement de terre plusieurs heures avant l'arrivée de la lame de fond, ils commencèrent tous à fuir vers les montagnes en hauteur, les humains eux ont vu la vague peu de temps avant de se faire immerger.
- Si vous avez l'occasion enregistrez un dompteur qui donne des ordres à son éléphant, l'animal lui obéira. Une fois ceci fait, passez l'enregistrement, l'animal ne fera rien.
Pourquoi ?
L'appareil qui enregistre votre son n'enregistre qu'une partie de vos fréquences, pas toutes, aussi l'éléphant fera la différence entre l'enregistrement et la voix de l'humain.



Ici la carte montre l'épicentre du tremblement de terre.

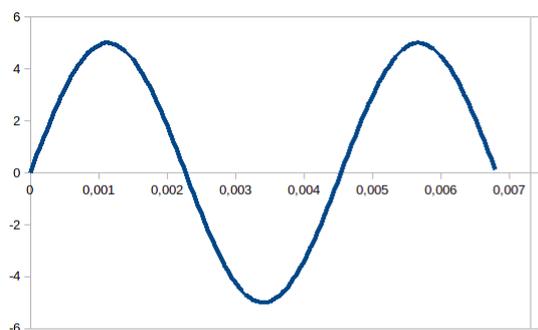
La couleur changeante des cercles concentriques montre qu'en s'éloignant du centre la puissance du tremblement de terre est de moins en moins forte.

C'est à l'occasion de cette catastrophe que de nouveaux protocoles d'alertes au tsunamis ont été étendus à la totalité de la planète et non plus seulement sur la zone pacifique.

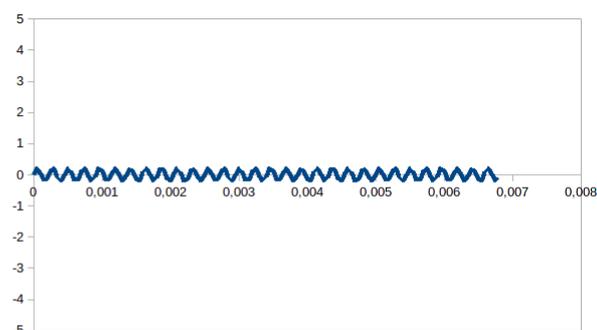
3.2 Fréquence de base (ou fondamentale en musique) et période T

La fréquence la plus basse d'un son émis est appelée sa fréquence fondamentale ou par abus de langage sa fondamentale.

Lorsque le son est pur (une seule fréquence), il n'y a qu'une fréquence fondamentale.



Fréquence fondamentale (intensité max)



9eme harmonique (intensité à 10%)

Vous aurez remarqué en comparant les deux graphiques que les oscillations sont larges (horizontalement) lorsque la fréquence est basse, et beaucoup plus serrées (toujours horizontalement) lorsque la fréquence est élevée.

Vous devez retenir qu'une fréquence est le nombre de fois où un phénomène se répète en une seconde. Son unité est le Hertz (Hz).

2. source : https://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%A9isme_et_tsunami_de_2004_dans_l'oc%C3%A9an_Indien

On peut alors définir la période (T) d'un tel signal comme étant l'écart (horizontal) temporel de la durée d'une oscillation (une vague complète sur le diagramme). L'unité de la période est la seconde (s) et il y a une relation entre période et fréquence :

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

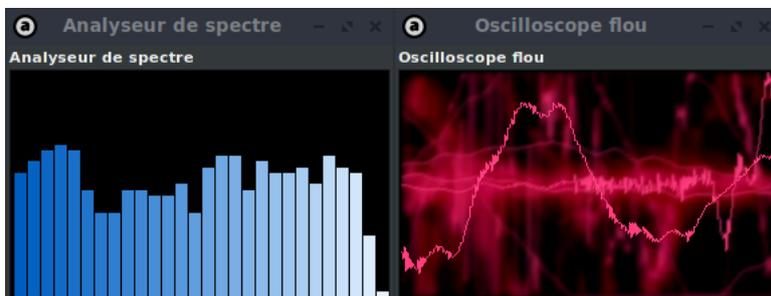
Ce qui revient à dire que $f \times T = 1$ ou encore que $T = \frac{1}{f}$

3.3 Les Harmoniques

Avez-vous remarqué que deux personnes qui chantent la même note n'ont pas le même son ? C'est dû entre autre à la présence des sons partiels harmoniques.

Un harmonique³ est un multiple de la fréquence fondamentale, par exemple : si la fondamentale est à 220 Hz (LA 3) alors le 1^{er} harmonique est 440 Hz (LA 4) le 2^e harmonique est à 660 Hz, le suivant à 880 Hz, puis 1100 Hz, 1320 Hz ... etc.

Vous connaissez cette notion si vous travaillez sur des morceaux de musique à partir d'un ordinateur (soit pour en composer, soit pour les modifier), mais aussi, de façon indirecte en utilisant les outils de visualisation quand vous écoutez de la musique via ordinateur :

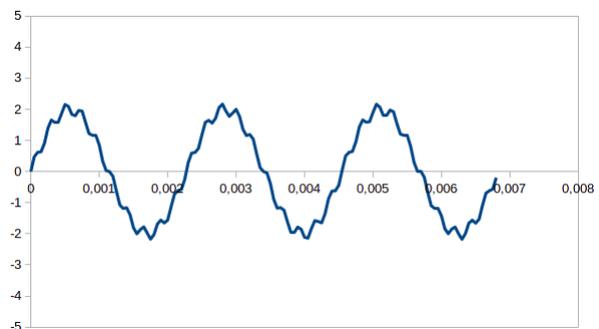


À gauche de l'image chaque pic correspond à des fréquences, plus le pic est haut, plus le partiel harmonique correspondant est fort à cette fréquence, plus je vais vers la droite du graphique, plus la fréquence est élevée. C'est un spectre de fréquences.

L'image de droite est le résultat de sortie sur un oscilloscope (flou) c'est ce qu'on appelle un oscillogramme.

Ainsi lorsque s'ajoutent les fréquences fondamentale et du 9^e harmonique vu précédemment on obtient →

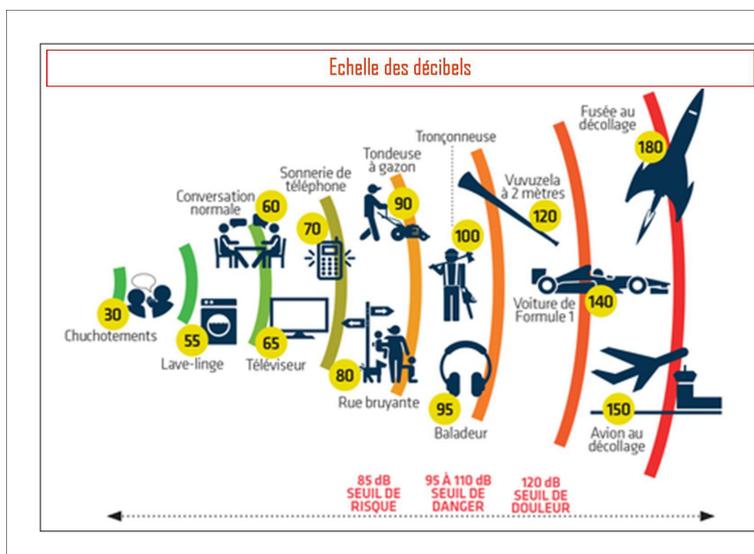
Vous aurez noté qu'on voit bien la fréquence fondamentale (oscillations lentes) et les petites variations dues au 9^e harmonique dont la fréquence est 10 fois la fréquence fondamentale.



3. harmonique est en réalité un adjectif, le terme exact étant « un partiel harmonique » ce qui fait que dans ce contexte, le substantif est masculin.

4 « Force » du son = niveau d'intensité acoustique

Le niveau d'intensité sonore est ce que vous appelez communément la « force » du son (son plus ou moins fort). L'unité de base de cette grandeur physique est le Bell (B) cependant, comme c'est une unité très importante, on utilise couramment le dixième de Bel⁴ ou déciBel (dB). L'appareil de mesure est le sonomètre. Ce niveau d'intensité est en lien avec la pression acoustique.



Notez que la zone dangereuse commence à 80 dB.

Pour information, le bruit dans les couloirs aux interclasses (mesures en plein hiver, des jours de mauvais temps) ont donné des mesures frôlant les 93 dB, c'est à dire 20 fois plus fort qu'une rue bruyante.

Vos appareils de musique modernes sont quant à eux bridés à 95 dB.

Notez aussi qu'à 120 dB est atteint le seuil de douleur avec des effets irréversibles⁵ sur vos oreilles.

Attention la mesure de l'intensité sonore en décibel est une échelle non linéaire (logarithmique) : Si à une source sonore de 60 dB vous ajoutez une autre source identique de 60 dB à côté, le son entendu ne sera pas de 120 dB mais seulement de 63 dB.

Toujours d'après le site wikipedia https://fr.wikipedia.org/wiki/Effets_du_bruit_sur_la_sant%C3%A9 les incidences du bruit sur la santé sont cause de troubles, de stress, d'accidents cardiologiques, etc. L'exposition n'a pas besoin d'être forte en intensité mais une exposition sur une durée longue et d'intensité plus faible a des effets similaires.

5 Le son se déplace

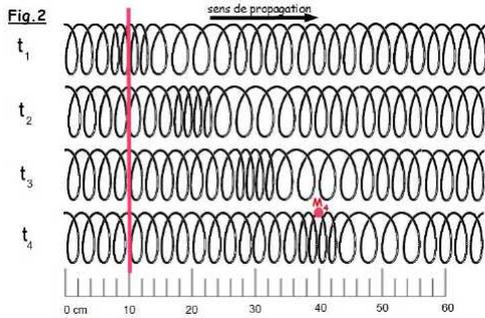
Voici deux petites expériences faites devant vous en classe avec l'aide de l'un ou l'une d'entre vous. L'une des expériences montre comment les ondes se propagent au moyen d'un classique ressort, dans l'autre un suivi informatique d'un bruit unique et permet de mesurer sa vitesse de déplacement⁶.

5.1 Expérience avec le ressort

Schéma :

4. En l'honneur de Alexander Graham Bell inventeur de l'ancêtre du téléphone.

6. Notez qu'au lycée ou plus tard vous utiliserez le terme « vitesse de propagation » pour les ondes matérielles et « célérité » pour les ondes immatérielles en lieu et place du terme « vitesse ».

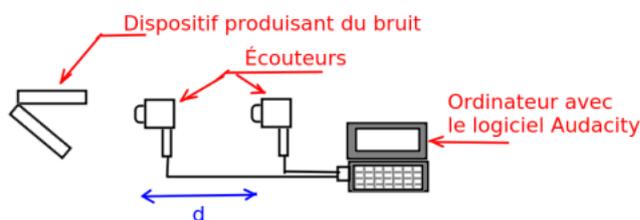


Ici le signal sonore est représentée par le pincement du ressort. Ce pincement est représenté à 4 moments différents.

Vous observez qu'au fur et à mesure du temps (de haut en bas du dessin) le pincement (spires rapprochées) se déplace vers la droite.

Ceci montre qu'il y a bien déplacement des ondes mécaniques dont font partie les ondes sonores par le déplacement de ce signal sonore simulé.

5.2 Expérience avec les 2 microphones, l'ordinateur et le logiciel Audacity



← Schéma du montage.

L'hypothèse testée dans cette expérience est que le son se déplace en ligne droite et à vitesse constante.

Dans ce but, on aligne deux microphones (écouteurs électrodynamiques) dont on connaît la distance « d » et à l'aide du logiciel audacity on enregistre le bruit puis on regarde l'écart entre les 2 pics de réception du bruit enregistré.

Résultat observé : On voit un écart entre la réception du premier et du second microphone.

5.3 Rappel de la formule de la vitesse

On supposera vrai ceci quelque soit la condition de déplacement bien que cette formule ne s'applique qu'à un déplacement rectiligne.

Soit un objet en déplacement⁷ qui se déplace d'une distance « d » en un temps « t ». On définit alors sa vitesse moyenne « v » comme le rapport de la distance par le temps :

$$v = \frac{d}{t} \quad (2)$$

Bien sûr à partir de la formule précédente on obtient deux formules dérivées : $d = v \times t$ et aussi $t = \frac{d}{v}$.

5.3.1 Applications rapides de la formule de la vitesse

1. D'après le site wikipedia : *Les records du monde du 100 mètres sont actuellement détenus par le Jamaïcain Usain Bolt avec le temps de 9,58 s, établi le 16 août 2009 [...] et par l'Américaine Florence Griffith-Joyner, créditée de 10,49 s le 16 juillet 1988 [...].*

7. sous-entendu en déplacement par rapport à un référentiel fixe (et de préférence galiléen comme vous les étudierez au lycée de façon explicite).

Calculez pour l'un et l'autre de ces deux athlètes leur vitesse moyenne respective lors des courses où furent mesurés ces records de vitesse.

.....

2. Un éclair est perçu à l'instant $t = 0$ s par une personne en ville, puis 6 s plus tard le bruit du tonnerre est entendu. En supposant que le temps entre l'éclair et la vision par l'observateur est nul, calculez la distance à laquelle se trouvait cet éclair. On donne la vitesse du son dans l'air $v = 340$ m/s.

.....

3. Un sous-marin en perdition utilise un sonar pour repérer la distance qui le sépare du bateau de sauvetage (son équipement de communication radio étant hors-service). Le commandant de bord fait utiliser le bip du sonar pour émettre « un bang », ce bang se propage jusqu'au bateau de sauvetage, rebondit dessus et retourne jusqu'au sous-marin.. Sachant que la vitesse du son (et des ultrasons) dans l'eau de mer est $v = 1\,500$ m/s et que le bateau a été estimé à 4,5 km du sous-marin, quel a été le temps de trajet du bang entre son émission et son retour ?

.....

4. Le nombre « Mach » est le rapport de la vitesse d'un objet dans un fluide (l'air par exemple) par rapport à la vitesse du son dans ce même fluide. Comme le fluide le plus connu est l'air, sa vitesse de référence est 340 m/s.

Sachant que $1\text{ m/s} = 3,6\text{ km/h}$ complétez les cases vides du tableau qui suit.

Régime de vitesse	Mach	Vitesse mini (m/s)	Vitesse mini (km/h)	Vitesse maxi (m/s)	Vitesse maxi (km/h)
subsonique	< 1	0		340	
transonique	0,8 à 1,2	270		410	
supersonique	1 à 5	340		1 710	
hypersonique	5 à 10	1 710		3 415	
hypersonique « haut »	10 à 25	3 415		8 465	
vitesse rentrée atmosphérique	> 25	8 465		N/A	N/A

TABLE 1 – Pour chaque adjectif qualifiant les vitesses ce tableau donne les vitesses limites inférieures et supérieures en m/s et km/h.

5.4 Besoin d'un milieu matériel

Dans les films « Interstellar » et « Gravity » nous avons plusieurs scènes où le besoin d'un milieu matériel pour le déplacement du son se voit.

Dans le premier cas, il y a une scène, aux alentours de 2h après le début du film où une explosion a lieu dans le vaisseau « Endurance », lorsque l'intérieur du vaisseau est filmé pendant l'explosion le bruit s'entend, mais, vu de l'autre vaisseau (Ranger 2) aucun son. Pourquoi ? Tout simplement car il n'y a pas d'air dans l'espace, le son de l'explosion d'Endurance n'a pas pu se déplacer jusqu'à Ranger 2.

Dans le 2e film, il y a deux passages où l'actrice principale, finit par rejoindre le sas de l'I.S.S. dans un premier temps, puis plus tard celui de la station spatiale chinoise. Dans les deux cas, lorsqu'elle entre dans le sas de pression, il n'y a pas d'air, tout est silencieux. Puis, au fur et à mesure que l'air remplit les sas et que la pression augmente jusqu'à une pression normale, le son se fait de plus en plus fort.

Vous avez à retenir que :

1. S'il n'y a pas de milieu matériel il n'y a pas de son ;
 2. plus la pression (ou la densité) de ce milieu est élevée, meilleure est la transmission sonore.
-

5.5 Les vitesses du son

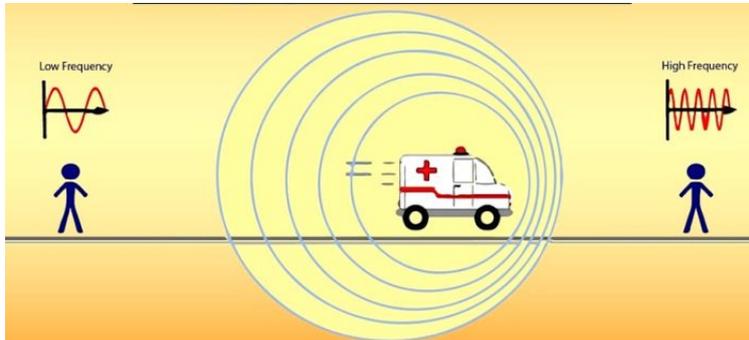
Suivant le milieu le son n'a pas la même vitesse.

Phase du milieu	Nature du milieu	Vitesse du son (m/s)
Gazeux	Dioxyde de Carbone (CO ₂)	260
Gazeux	Dioxygène (O ₂)	320
Gazeux	Air	340
Gazeux	Hélium (He)	930
Gazeux	Dihydrogène (H ₂)	1270
Liquide	Mercure (Hg)	1450
Liquide	Eau douce	1460
Liquide	Eau de mer	1520
Solide	Bois de pin	3320
Solide	Acier	5000
Solide	Verre	5500
Solide	Granite	5950

Comme vous le constatez dans le tableau : la vitesse du son change d'un milieu à un autre, et plus le milieu est dense plus cette vitesse est élevée.

5.6 L'effet Doppler — Fizeau

L'effet doppler est dû au déplacement de la source sonore par rapport au récepteur. Vous connaissez cet effet lorsqu'un véhicule d'intervention (police, pompiers, samu / smur) toute sirène hurlante s'approche de vous puis s'éloigne⁸ : le son produit par la sirène est plus aigu lorsque le véhicule s'approche de vous, puis devient plus grave lorsque le véhicule s'éloigne de vous.



Le véhicule se déplace de gauche à droite.

Le dessin montre la différence entre les ondes : plus larges à gauche, le son est plus grave, plus serrées à droite le son est plus aigu.

5.7 Les déplacements du son

Le son se déplace en ligne droite.

Le son rebondit sur des surfaces (verre, céramiques)

Le son se diffracte s'il est émis à travers un petit trou.

6 Les capteurs du son

Les deux capteurs les plus communs sont bien sûr le microphone et l'oreille.

7 Quelques utilisations du son dans la vie courante

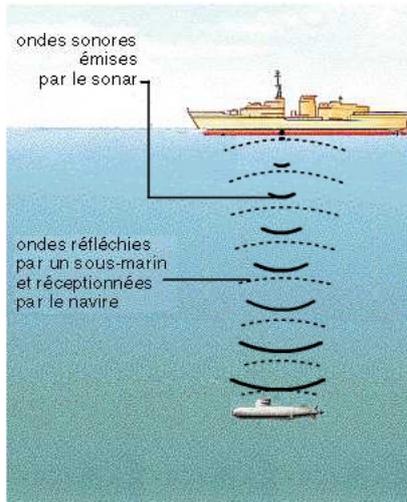
Je passerai logiquement l'utilisation des ondes sonores pour la musique car vous en avez l'habitude au quotidien.

7.1 Les signaux d'avertissement pour les personnes aveugles

Avez-vous remarqué, place Jourdan ou Dussoubs, que parfois les feux tricolores se mettent à parler ? C'est à cause de la présence de boîtiers qui s'activent dès qu'une personne aveugle s'approche avec un boîtier spécial. Ce dispositif lui indique par du son de quel côté le feu est vert pour le piéton ou bien rouge.

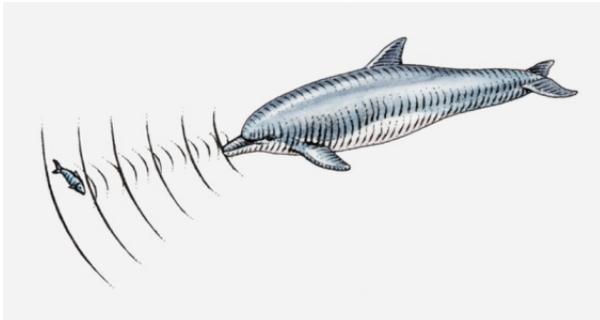
8. J'aurais pu citer aussi l'avion qui pique dans votre direction, mais c'est quand même plus rare.

7.2 Marine : Le sonar



Le sonar ou écholocalisation est un système où un émetteur à ultrasons envoie des ondes et très proche de lui se trouve un micro qui va recevoir le retour des ondes. Un ordinateur calcule ensuite la distance de l'objet qui a renvoyé le signal et modélise une image.

Ce principe est utilisé dans la marine militaire (comme dans l'image) pour trouver un autre bâtiment, ou civile pour la recherche des bancs de poissons. Cela sert aussi dans les deux cas pour obtenir une cartographie du fond marin.

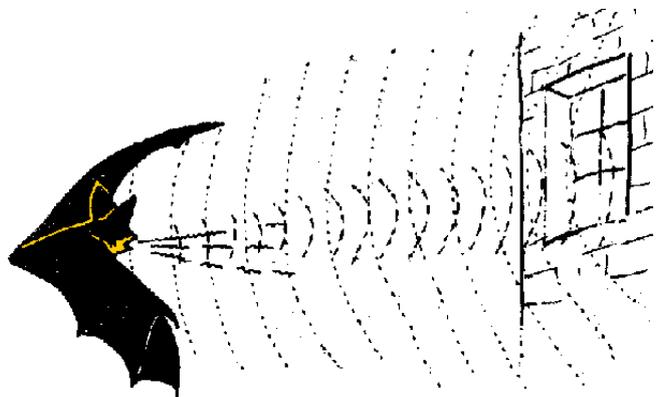


Le dauphin est l'un des rares animaux à utiliser un pourcentage plus élevé de masse cérébrale que les humains (env. 20% pour le dauphin contre 10% pour les humains en moyenne).

Dans ses capacités, le dauphin a développé un système de sonar naturel qui lui permet de détecter ses proies (entre autres).

Il est à noter que dauphins et autres cétacés comme les baleines émettent des sons et ultrasons dans l'eau qui peuvent lui permettre de communiquer avec leurs congénères à des milliers de kilomètres de distance.

La chauve-souris tout comme le dauphin est dotée d'un système d'écholocation (sonar) situé sur le bout de son (museau?) et qui lui permet de situer tout objet avec une précision énorme, y compris (et surtout) dans l'obscurité.



N'ayez jamais peur d'une chauve-souris : vous n'êtes pas son genre de nourriture et les chauve-souris buveuses de sang ne se trouvent pas sous nos contrées. De plus, leurs réflexes sont tellement rapides qu'elles pourront vous éviter en toutes circonstances.

7.3 Les radar de police



Un radar de police est un sonar terrestre qui envoie deux ondes très rapprochées à chaque détection d'un véhicule en approche. Connaissant l'intervalle de temps entre les 2 envois et les temps de réception de la 2e onde par rapport à ce qui est attendu pour une vitesse maximale, l'appareil peut calculer la vitesse du véhicule et ainsi prendre une photo du véhicule (ou pas si l'automobiliste a respecté les vitesses).

Il y a bien évidemment des erreurs dues au placement du radar, au fait qu'il soit fixe ou embarqué, etc... mais sachez qu'ils sont de plus en plus précis.



Ne prenez pas les radar pour des appareils photos pour faire des selfies rigolotes...



Quant à la tentative de détérioration ou de destruction de ces appareils, oubliez également, c'est puni par la loi :

Selon les articles 322-1, 322-2 et suivants du Code pénal, «la destruction, la détérioration ou la dégradation» d'un radar est assimilée à une dégradation de bien public – le bien public étant défini comme un bien dont l'utilisation répond aux deux critères de non-rivalité d'une part et de non-exclusivité d'autre part.

L'article 322-2 du code pénal dit que la dégradation d'un radar donne lieu à une amende de 45000€ ainsi qu'à 3 ans d'emprisonnement. La détérioration un radar « en bande », c'est-à-dire à plusieurs, alourdit la peine et expose à cinq ans d'emprisonnement et à 75 000€ d'amende.

7.4 Médecine : L'échographie

Afin de surveiller l'évolution du fœtus dans l'utérus, on utilise un appareil à échographie. Ce n'est autre qu'un sonar (micro + haut-parleur) ultrasonique qui va balayer un secteur et va recevoir des retours à chaque changement d'organe ou chaque surface qui lui renvoie un signal. Une fois les signaux reçus, un ordinateur calcule la distance et la nature de ce qui a pu être envoyé et forme une image observable sur un écran.

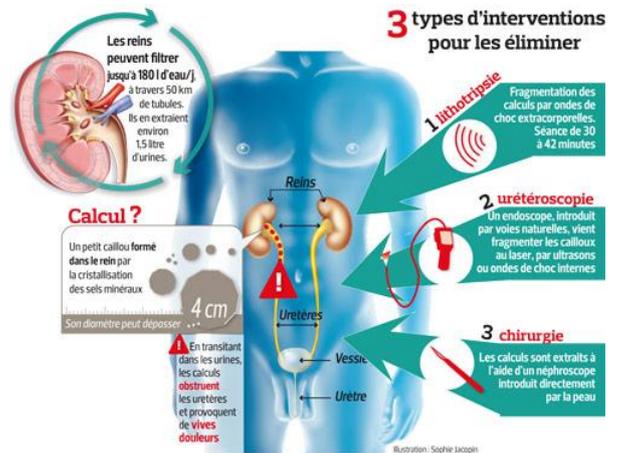


Pour que ceci fonctionne normalement il faut bien sûr qu'il n'y ait pas d'air ou de vide sur le chemin, aussi il est demandé aux futures mamans de boire beaucoup d'eau afin de remplir la vessie et permettre aux ondes ultrasonores de circuler.

7.5 Médecine : la lithotripsie

L'être humain lorsqu'il est plus vieux que vous peut développer dans les reins des calculs (pour faire simple : de petits cailloux de calcaire) qui, s'ils sont assez gros peuvent détruire les reins et empêcher le système d'évacuation par l'urine de fonctionner normalement.

La Lithotripsie est une technique qui permet de détruire ces cailloux en les bombardant d'ondes ultrasonores (ondes de choc) afin de les disloquer.



Cette méthode fonctionne bien pour les cailloux de petite taille et réduit l'intervention chirurgicale aux cas plus problématiques.