Activités de la séquence n°11
Observer grâce à la réflexion des ondes

Fiches de synthèse mobilisées :
Fiche n°3 : les ondes périodiques
Fiche n°4 : ondes acoustiques et sons musicaux
Fiche n°9 : diffraction et interférence
Fiche n°11 : réflexion, absorption et transmission

Sommaire des activités

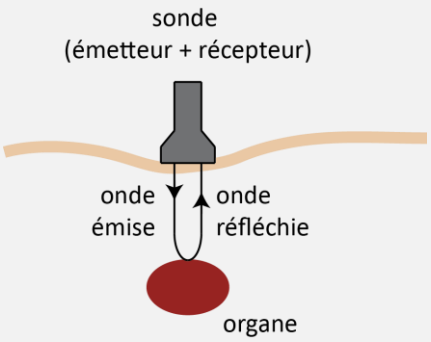
ACTIVITÉ 1 : le principe de l'échographe – *version classique* 1
ACTIVITÉ 2 : le principe de l'échographe – *version microcontrôleur* 4
ACTIVITÉ 3 : phénomènes de réflexion, de transmission et d'absorption 6
ACTIVITÉ 4 : principes physiques de l'échographie 8

ACTIVITÉ 1 : le principe de l'échographe – *version classique*

Comment détecter la présence d'un objet distant et évaluer à quelle distance il se trouve ? Cette activité propose de répondre à cette question en concevant et en utilisant un dispositif reposant sur le principe de l'échographie.

DOCUMENT 1 : le principe de l'échographe

L'échographie est une technique d'imagerie médicale non invasive qui exploite les ondes ultrasonores.
La sonde est constituée d'un émetteur et d'un récepteur d'ultrasons. Le récepteur reçoit un signal lorsque l'onde est réfléchie par un organe ou un tissu.
L'échographe permet d'évaluer à quelle distance se trouvent l'organe en exploitant l'émission et la réception d'ondes ultrasonores.



DOCUMENT 2 : piézoélectricité et émission / réception d'ultrasons

Certains matériaux possèdent la propriété de générer une tension électrique lorsqu'ils sont déformés : il s'agit de l'effet piézoélectrique direct.
Ce phénomène est réciproque : un matériau piézoélectrique, lorsqu'il est soumis à une tension électrique, se déforme proportionnellement à cette tension : c'est l'effet piézoélectrique inverse.

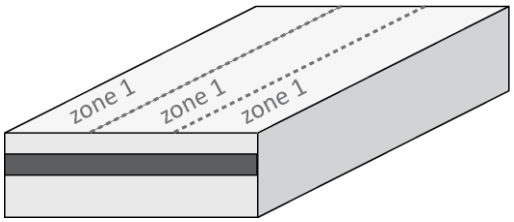
CC BY NC SA

Partie 1 : introduction au principe de l'échographie

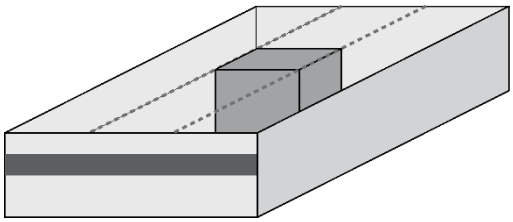
1. Sur le schéma du document 1, la sonde de l'échographe contient un émetteur et un récepteur d'ultrasons. Tous deux exploitent la piézoélectricité. Lequel exploite l'effet piézoélectrique direct ? Lequel exploite l'effet piézoélectrique inverse ? Justifier à l'aide du document 2.
2. Nommer le (les) phénomène(s) qui affectent la propagation des ultrasons depuis leur émission jusqu'à leur réception.

Partie 2 : réalisation et utilisation d'une maquette d'échographe

Afin d'illustrer le principe d'un échographe on envisage la situation suivante.
Une boîte fermée contient un petit bloc de polystyrène peint en noir disposé dans l'une des trois zones délimitées par un trait noir (et nommées 1, 2 et 3). La boîte est percée d'une fente (dans laquelle il est interdit de regarder si l'on veut être dans une situation comparable à celle de l'utilisation d'un échographe).



la boîte utilisée et ses trois zones


la boîte sans son couvercle (sachant que le bloc de polystyrène n'est pas forcément à cet endroit)

Comment savoir dans quelle zone se trouve le bloc de polystyrène et à quelle distance il a été placé sans ouvrir la boîte ni regarder dedans à travers la fente ?

1. La relation suivante permet de calculer la valeur théorique de la célérité des ondes sonores ou ultrasonores dans l'air en fonction de la température θ :
$$v_{US} = (331{,}5 + 0{,}607 \times \theta)\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$
Mesurer la température ambiante et calculer la valeur de la célérité des ultrasons donnée par cette relation.
2. Vous avez à votre disposition un émetteur et un récepteur d'US ainsi qu'un système d'acquisition qui peut être un oscilloscope ou une carte d'acquisition reliée à un ordinateur.
Rédiger le protocole de l'expérience qui vous permettra, sans soulever le couvercle, de trouver la zone dans laquelle se trouve le bloc de polystyrène ainsi que sa distance par rapport à la source d'ondes ultrasonores.
3. Après validation par le professeur, réaliser le protocole, décrire les mesures réalisées et noter leurs résultats : en particulier indiquer où se trouve le bloc (dans quelle zone et à quelle distance de la fente).
4. L'incertitude absolue de la distance mesurée à la question 4 vaut :
$$u(D) = D\sqrt{\left(\frac{u(v_{US})}{v_{US}}\right)^2 + \left(\frac{u(\tau)}{\tau}\right)^2}$$
On admet les valeurs suivantes des incertitudes
   - $u(\tau) = 6 \times 10^{-5}$ s
   - $u(v_{US}) = 2\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

   Calculer l'incertitude de la distance $u(D)$ et présenter la valeur de D avec son incertitude.
5. Citer une source d'erreur qui altère la mesure de distance.
6. Pour conclure, ouvrir la boîte et vérifier que la position du bloc est compatible avec la valeur mesurée compte-tenu de son incertitude.

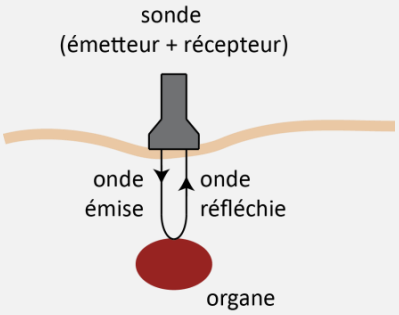
BY NC SA

ACTIVITÉ 2 : le principe de l'échographe – *version microcontrôleur*

Comment détecter la présence d'un objet distant et évaluer à quelle distance il se trouve ? Cette activité propose de répondre à cette question en concevant et en utilisant un dispositif reposant sur le principe de l'échographie.

DOCUMENT 1 : le principe de l'échographe

L'échographie est une technique d'imagerie médicale non invasive qui exploite les ondes ultrasonores.
La sonde est constituée d'un émetteur et d'un récepteur d'ultrasons. Le récepteur reçoit un signal lorsque l'onde est réfléchie par un organe ou un tissu.
L'échographe permet d'évaluer à quelle distance se trouvent l'organe en exploitant l'émission et la réception d'ondes ultrasonores.



DOCUMENT 2 : piézoélectricité et émission / réception d'ultrasons

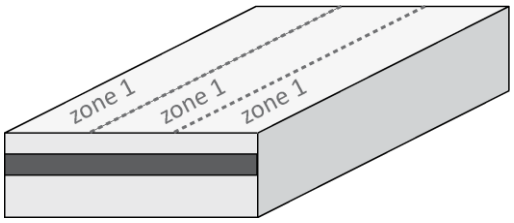
Certains matériaux possèdent la propriété de générer une tension électrique lorsqu'ils sont déformés : il s'agit de l'effet piézoélectrique direct.
Ce phénomène est réciproque : un matériau piézoélectrique, lorsqu'il est soumis à une tension électrique, se déforme proportionnellement à cette tension : c'est l'effet piézoélectrique inverse.

Partie 1 : introduction au principe de l'échographie

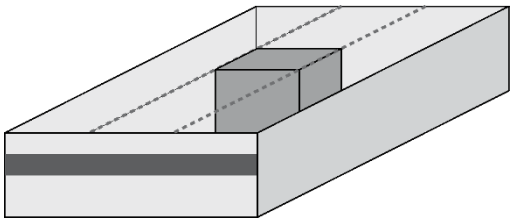
1. Sur le schéma du document 1, la sonde de l'échographe contient un émetteur et un récepteur d'ultrasons. Tous deux exploitent la piézoélectricité. Lequel exploite l'effet piézoélectrique direct ? Lequel exploite l'effet piézoélectrique inverse ? Justifier à l'aide du document 2.
2. Nommer le (les) phénomène(s) qui affectent la propagation des ultrasons depuis leur émission jusqu'à leur réception.

Partie 2 : réalisation et utilisation d'une maquette d'échographe

Afin d'illustrer le principe d'un échographe on envisage la situation suivante.
Une boîte fermée contient un petit bloc de polystyrène peint en noir disposé dans l'une des trois zones délimitées par un trait noir (et nommées 1, 2 et 3). La boîte est percée d'une fente (dans laquelle il est interdit de regarder si l'on veut être dans une situation comparable à celle de l'utilisation d'un échographe).



la boîte utilisée et ses trois zones


la boîte sans son couvercle (sachant que le bloc de polystyrène n'est pas forcément à cet endroit)

Comment savoir dans quelle zone se trouve le bloc de polystyrène et à quelle distance il a été placé sans ouvrir la boîte ni regarder dedans à travers la fente ?

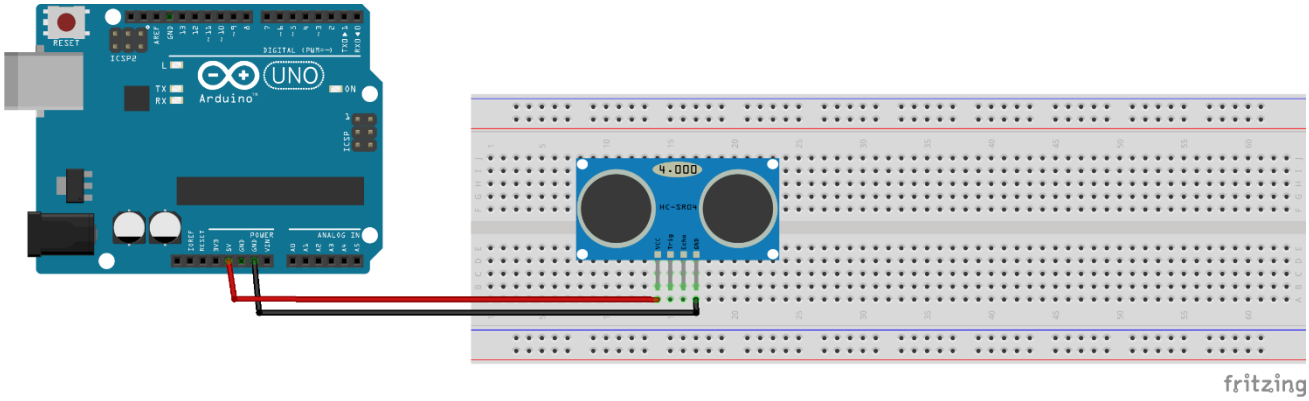
1. La relation suivante permet de calculer la valeur théorique de la célérité des ondes sonores ou ultrasonores dans l'air en fonction de la température θ :

$$v_{US} = (331{,}5 + 0{,}607 \times \theta)\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Mesurer la température ambiante et calculer la valeur de la célérité des ultrasons donnée par cette relation.

Vous avez à votre disposition un microcontrôleur relié à un ordinateur, des fils de connexion et un émetteur-récepteur d'US.

2. Ouvrir le fichier « echographe_eleve ». Utiliser les lignes 2 et 3 pour compléter le schéma de connexion du microcontrôleur.



3. Lire le programme et compléter les lignes 9 et 32.
4. Quelles sont les grandeurs qui vont être affichées à l'écran quand on ouvrira le moniteur série ?
5. Rédiger le protocole de l'expérience qui vous permettra, sans soulever le couvercle, de trouver la zone dans laquelle se trouve le bloc de polystyrène.
6. Après validation par le professeur, réaliser le protocole et indiquer où se trouve le bloc (dans quelle zone et à quelle distance de la fente). N'oubliez pas d'ouvrir le moniteur série pour l'affichage des mesures.
7. L'incertitude absolue de la distance mesurée à la question 6 vaut :

$$u(D) = D\sqrt{\left(\frac{u(v_{US})}{v_{US}}\right)^2 + \left(\frac{u(\tau)}{\tau}\right)^2}$$

On admet les valeurs suivantes des incertitudes

- $u(\tau) = 1 \times 10^{-4}$ s
- $u(v_{US}) = 2\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Calculer l'incertitude $u(D)$ et présenter la valeur de D avec son incertitude.

8. Citer une source d'erreur qui altère la mesure de distance.
9. Pour conclure, ouvrir la boîte et vérifier que la position du bloc est compatible avec la valeur mesurée compte-tenu de son incertitude.

BY NC SA

ACTIVITÉ 3 : phénomènes de réflexion, de transmission et d'absorption

Partie 1 : coefficients énergétiques de réflexion et de transmission

Les valeurs des coefficients énergétiques de réflexion et de transmission sont très importantes en échographie notamment lors d'un changement de milieu.

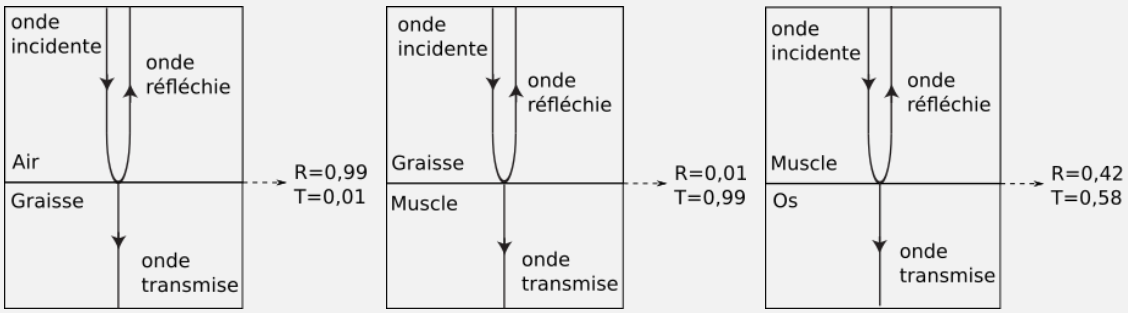
DOCUMENT 1 : gel en échographie

La valeur du coefficient énergétique de réflexion d'une interface air/peau vaut $R = 0{,}99$. Lors d'une échographie, le médecin dépose un gel entre la sonde et la peau pour éviter tout film d'air.

1. Quel problème rencontre-t-on si l'on fait une échographie sans gel ?
2. Quelle doit être la valeur du coefficient énergétique de réflexion du gel à l'interface gel/peau? Que vaudra alors son coefficient énergétique de transmission.

DOCUMENT 2 : rôle des coefficients énergétiques de réflexion et de transmission dans la distinction de différents milieux

En échographie, le médecin veut détecter correctement les interfaces, c'est-à-dire la séparation entre deux milieux différents. Il souhaite aussi parfois sonder le corps en profondeur.
Les coefficients énergétiques de réflexion R et de transmission T permettent de distinguer plus ou moins bien l'interface entre 2 milieux.
Pour une interface donnée, $R + T = 1$.
Deux milieux sont bien distincts l'un de l'autre lorsque le coefficient énergétique de réflexion de l'interface est suffisamment grand.



3. En une phrase, justifier l'égalité donnée dans le document 2 : $R + T = 1$.
4. Parmi les 3 exemples proposés dans le document 2, quelle est l'interface la plus visible en échographie ? Quelle est celle la moins visible ? Justifier vos réponses à l'aide des valeurs données dans le document 2.
5. Le coefficient énergétique de transmission est plus important dans le cas de l'interface graisse/muscle par rapport à celle muscle/os. Quel en est l'intérêt ?
6. Expliquer pourquoi tous les organes remplis d'air (tube digestif, poumons..) forment un écran difficilement pénétrable aux ultra-sons ?

BY NC SA

Partie 2 : coefficients d'absorption d'une onde acoustique par un milieu

DOCUMENT 3 : influence de la fréquence des ondes US sur l'absorption

Plus le coefficient d'absorption d'un milieu est grand moins l'onde acoustique pourra pénétrer dans le milieu.

Fréquence (MHz)	Profondeur de pénétration (cm)	Résolution (mm)
1	40	
2	20	
3	13	
5	8	
10	4	
20	2	

7. Quelle est l'influence de la fréquence sur la profondeur de pénétration ?

8. En échographie, la résolution correspond à la longueur d'onde de l'onde ultrasonore. Calculer la résolution correspondante aux différentes fréquences, noter les valeurs dans le document 3. La célérité moyenne des ondes US dans le corps humain vaut $1500\ \mathrm{m.s^{-1}}$.

9. Les échographes classiques ont 3 préréglages de fréquences :

- gamme de fréquences permettant une bonne pénétration du milieu (entre 2 et 5 MHz) ;
- gamme de fréquence permettant une bonne résolution (entre 7 et 10 MHz) ;
- gamme de fréquence permettant un compromis entre les deux (entre 5 et 7 MHz).

Un médecin souhaite observer des tendons, quelle gamme va-t-il choisir ? Quelle modification de fréquences doit-il faire pour observer les organes de l'abdomen ?

BY NC SA

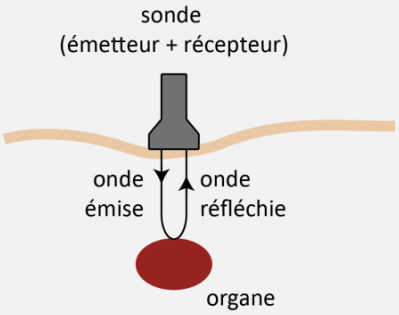
ACTIVITÉ 4 : principes physiques de l'échographie

Partie 1 : comment interpréter les niveaux de gris sur une échographie ?

DOCUMENT 1 : l'échographie, principe simplifié

L'échographie est une technique d'imagerie médicale non invasive qui exploite les ondes ultrasonores. La sonde est constituée d'un émetteur et d'un récepteur d'ultrasons. Le récepteur reçoit un signal lorsque l'onde est réfléchie par un organe ou un tissu. Celui est :

– d'autant plus intense que la surface de l'organe visé est réfléchissante ;
– d'autant plus retardé que la surface de l'organe visé est loin de la sonde.

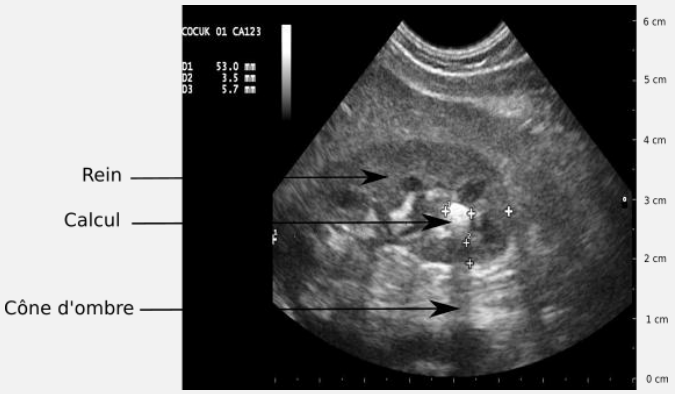


Enfin un système d'imagerie permet de reconstituer une image : les zones les plus claires correspondent aux maxima d'amplitude de l'onde réfléchie et le distances sont reconstituées grâce au retard de l'onde reçue par rapport à l'onde émise.

échographie d'un fœtus (source : https://commons.wikimedia.org/) - ©Wolfgang Moroder.

DOCUMENT 2 : échographie d'un rein affecté d'un calcul

Il arrive qu'une accumulation de calcaire, appelée « calcul », affecte le fonctionnement du rein. Les calculs peuvent être décelés à l'aide d'une échographie :



Source : www.commons.wikimedia.org © Nevit Dilmen / CC BY-SA

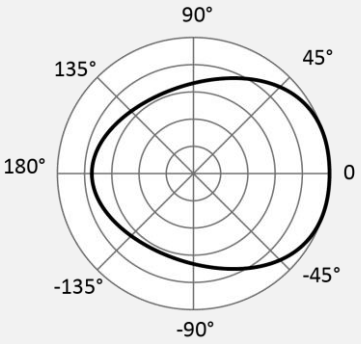
Figure 1 – échographie d'un calcul rénal

1. Quelle est la partie du corps fœtus la plus réfléchissante pour les ondes ultrasonores utilisées ? Justifier à l'aide de la photographie du document 1.
2. La réflexion des ondes ultrasonores par la partie citée à la question 1 est-elle totale ? À quoi le voit-on ?
3. Le document 2 montre l'échographie du rein d'un patient. Celle-ci permet de déceler la présence d'un calcul : quelle propriété du calcaire accumulée permet d'effectuer ce diagnostic ?
4. L'échographie du document 2 révèle la présence d'un « cône d'ombre », il s'agit d'une zone que l'échographie ne permet pas d'explorer. Quelle est l'origine de ce cône d'ombre ? On utilisera des termes choisis parmi « absorption », « réflexion » et « transmission » pour répondre.

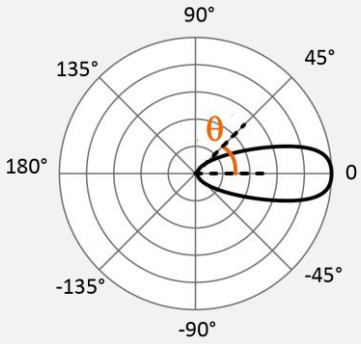
Partie 2 : pourquoi l'échographie utilise-elle des ultrasons ?

DOCUMENT 3 : diagramme de directivité d'une source d'onde sonore ou ultrasonore

Le diagramme de directivité d'une source est le tracé de l'amplitude de l'onde émise en fonction de l'angle entre les directions d'émission et de réception.
Un tel diagramme est souvent représenté dans un repère polaire dont le centre représente la position de la source.



*l'amplitude de l'onde émise est élevée dans toutes les directions : la source est **peu directive***



*l'onde est majoritairement émise dans une plage restreinte de directions : la source est **directive***

Dans le cas d'une source directive, l'angle θ représenté ci-dessus (diagramme de droite) est appelé demi-ouverture du faisceau émis.

5. Une enceinte à relier à une chaîne hi-fi doit-elle être directive ou non ? Pourquoi ?
6. Pour réaliser une échographie, a-t-on besoin d'une source plutôt directive ou non directive ? Quel en est l'intérêt ?
7. On va tracer le diagramme de directivité d'une source d'ultrasons. On dispose pour cela du matériel suivant :
   - un émetteur et un récepteur d'ultrasons ;
   - un dispositif d'acquisition (oscilloscope ou carte d'acquisition reliée à un ordinateur) ;
   - des fils de connexion ;
   - un rapporteur imprimé sur un papier grand format.

   Rédiger le protocole d'une expérience conduisant au diagramme directivité de l'émetteur d'ultrasons.
8. Une fois celle-ci validée par l'enseignant, réaliser l'expérience de la question 1. On pourra utiliser le fichier « DiagrammeDirectivite.xlsx » ou « DiagrammeDirectivite.ods » pour réaliser le tracé.
9. Le document 2 définit l'angle d'ouverture de l'émetteur. Mesurer cet angle d'ouverture pour l'émetteur d'ultrasons étudié ici.
10. Dans certaines conditions, l'angle d'ouverture s'exprime par la relation théorique :

$$\theta_{\text{théo}} = 1{,}22\frac{\lambda}{D}$$

λ étant la longueur d'onde des ondes émises et D le diamètre de l'émetteur.
Calculer l'angle théorique pour notre émetteur en admettant cette relation. Estimer sa validité en effectuant un calcul d'écart relatif entre cette valeur théorique et la valeur mesurée à la question 9.

CC BY NC SA

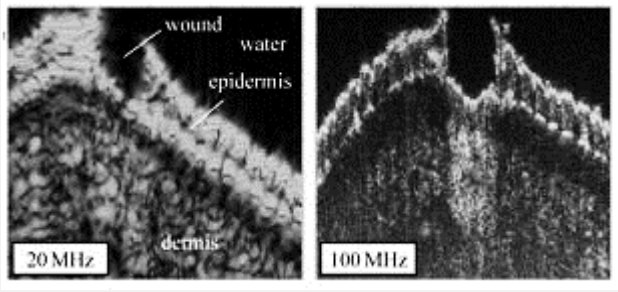
11. Le document 4 présente la technique de l'échographie haute fréquence. D'après les images, quel avantage présente cette technique ? Comment peut-on le justifier à l'aide de la relation de la question 10 ?

12. Le document 4 évoque aussi un inconvénient de l'échographie haute fréquence : lequel ? Que peut-on en déduire à propos de l'absorption des ultrasons par les tissus biologiques ?

DOCUMENT 4 : l'échographie haute fréquence

L'avantage majeur de l'échographie haute fréquence est qu'elle offre une meilleure résolution qu'une échographie conventionnelle mais cela lui fait perdre en profondeur de pénétration. C'est notamment pour cette raison que cette technique d'imagerie est principalement utilisée, à l'heure actuelle, pour l'étude du petit animal : souris, poissons, rats.

Concernant l'échographie appliquée à la peau (les ongles et les cheveux également), les applications sont nombreuses. En effet, la qualité de résolution apportée par les hautes fréquences permet de visualiser distinctement les différentes couches de la peau.



À gauche, l'échographie à 20MHz d'une peau.
À droite, l'échographie à 100MHz de la même partie de peau.

Source : https://commons.wikimedia.org/ ©Wikimavi2014