



جامعة أبو بكر بلقايد - تلمسان

Université Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen

Faculté de Technologie

Département de Génie électrique et Electronique

Laboratoire de Recherche de Génie Biomédical

**MEMOIRE DE PROJET DE FIN D'ETUDES**

pour obtenir le Diplôme de

**MASTER en GENIE BIOMEDICAL**

**Spécialité : Signaux et Images en Médecine**

présenté par : RAHOUI Ali et RAHOUI Fawzia

---

**Prothèse visuelle au moyen de deux sondes  
ultrasonores**

---

Soutenu le 02 juillet 2013 devant le Jury

Mr.	S.M. DEBBAL	<i>Prof.</i>	Université de Tlemcen	Président
Mr.	M. BENABDELAH	<i>Prof.</i>	Université de Tlemcen	Encadreur
Mr.	R. BENALI	<i>Dr.</i>	Université de Tlemcen	Examineur

Année universitaire 2012-2013

# Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Allah le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Monsieur M. BENABDELLAH, pour l'orientation, la confiance et la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené à bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à son honorable personne.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury Messieurs Sidi Mohammed DEBBAL & R. BENALI pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions,

Et aussi, à tous les professeurs, qui nous ont enseigné durant notre cursus universitaire et qui sans leurs compétences avérées, notre travail n'aurait jamais vu le jour.

Enfin, nous tenons également à remercier les étudiants de notre promotion pour leur soutien moral et leur disponibilité.

Et enfin, à toutes les personnes qui ont participé, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

# Dédicace

A nos chers Parents, qui ont veillé inlassablement et patiemment  
à notre éducation, et à qui va notre reconnaissance,

A notre aimable sœur Fatima Zohra,

A nos chers frères Mustafa et Mohammed El Amine,

Nous dédions notre travail.

## Tables des matières

Introduction générale.....	7
----------------------------	---

### **Chapitre 01 : La piézoélectricité.**

1- Introduction.....	09
2- Historique de la piézoélectricité.....	09
3- Effet piézoélectrique.....	11
3-1- L'aspect chimique de la piézoélectricité.....	11
3-2- L'aspect physique de la piézoélectricité.....	13
4- Les matériaux piézoélectriques.....	14
4-1- Les cristaux.....	15
4-2- Les céramiques.....	15
4-3- Les polymères.....	17
4-4- Les composites.....	17
5- Modes de déformation d'un matériau piézoélectrique.....	19
5-1- Modes de déformation fondamentaux.....	19
5-2- Autres modes de déformation.....	21
6- Piézoélectricité et symétries de la structure cristalline.....	21
7- Applications.....	22
7-1- Les capteurs.....	22
7-2- production d'énergie.....	23
8- Conclusion.....	28

### **Chapitre 02 : La propagation des ultrasons dans la matière.**

Introduction.....	33
1- Historique.....	33
2- L'onde acoustique.....	34
3- Nature de l'onde ultrasonore.....	34
4- Propriétés physiques.....	36
5- Interaction des ultrasons avec la matière.....	36
5-1- Principe de réflexion, transmission, réfraction, et diffusion des ultrasons .....	36
5-2- Atténuation des ultrasons.....	38
6- Paramètres de l'onde ultrasonore.....	42
6-1- Célérité et impédance.....	42
6-2- Fréquence et longueur d'onde.....	43
6-3- Pression et intensité.....	44
6-4- Faisceau ultrasonore .....	45
6-5- Faisceau d'une onde plane.....	45
6-6- Faisceau focalisé.....	47
7- la vitesse de propagation des ondes ultrasonores .....	48
8- Atténuation d'une onde US dans le corps.....	49
9- Effets biologiques des ondes ultrasonores.....	51
10- L'utilisation des ultrasons.....	51

10-1- Le repérage d'obstacles.....	51
10-2- L'utilisation industrielle.....	52
Conclusion générale.....	52
<b><i>Chapitre 03 : L'application des ultrasons en médecine</i></b>	
Introduction.....	55
1- Les nouvelles applications de l'imagerie médicale ultrasonore.....	55
2- Principe de fonctionnement de la sonde.....	56
2.1- transducteur.....	56
2.2- Conception de base.....	56
3- Applications diagnostiques .....	57
4- Produits de contraste ultrasonore.....	58
5- Historique de l'effet doppler.....	58
6- Principes de l'effet doppler.....	58
7- Les techniques à effet Doppler.....	60
8- Les modalités d'examens Doppler.....	61
8-1- Le Doppler à émission continue.....	61
8-2- Le Doppler pulsé pour les vaisseaux profonds.....	61
8-3- Le Doppler couleur.....	62
8-4- Association échotomographie et Doppler (système Duplex) .....	63
9- Autre domaines d'utilisation des ultrasons.....	63
9-1- Les ultrason en ophtalmologie.....	63
9-2- Élastographie .....	64
9-3- Densitométrie osseuse ultrasonore.....	65
10- PROPRIETES BIOLOGIQUES.....	66
10-1- Effet mécanique.....	67
10-2- Effet thermique.....	67
10-3- Effet antalgique.....	67
10-4- Effet destructeur.....	67
11- Applications en thérapie.....	68
11-1- Effets thermiques des US.....	68
11-2- Effets de cavitation.....	68
11-3- INDICATIONS.....	69
11-4- CONTRE-INDICATIONS.....	69
Conclusion .....	70
<b><i>Chapitre 04 : La cécité visuelle et Utilisation des ultrasons.</i></b>	
Introduction.....	73
1- L'œil et son fonctionnement.....	73
1-1- Composition de l'œil.....	73
1-2- Fonctionnement de l'œil : la perception d'images.....	74
2- La cécité visuelle.....	75
2-1- Définition de la cécité.....	75
2-2- La cécité visuelle dans le monde.....	76
2-3- Cécité évitable.....	76
2-4- Causes et types de cécité.....	77
2-5- Vie quotidienne des patients atteint de cécité.....	80

3- L'écholocation.....	82
3-1- L'issue de l'idée.....	82
3-2- Historique.....	83
3-3- Le principe de l'écholocation.....	85
4- Inventions à base d'ultrasons pour l'aide des patients atteints de cécité visuelle.....	86
4-1- Des lunettes à ultrasons.....	86
4-2- Le Tacit.....	87
4-3- Une canne intelligente pour aider à se déplacer.....	88
conclusion.....	89

**Chapitre 05 : La réalisation pratique de la prothèse visuelle à ultrasons.**

1- Introduction.....	92
2- Le schéma général sur ISIS.....	92
3- Explication du circuit.....	93
3-1- Le 1er bloc : circuit d'émission.....	93
3-2- Le 2ème bloc : circuit de réception.....	95
3-3- Le 3ème bloc.....	96
4- Le support informatique.....	100
4-1 ISIS.....	100
4-2 ARES.....	101
5- Conclusion.....	102

<b>Conclusion générale.....</b>	<b>104</b>
---------------------------------	------------

## **Introduction générale.**

Le vaste domaine des ultrasons fait l'objet de plusieurs sujets de recherche dans le but d'améliorer la vie quotidienne des êtres humains dans divers secteurs d'activité et d'applications générales et personnalisées.

Les applications des ultrasons sont variées :

- en médecine, avec notamment l'échographie et la thérapie par ultrasons focalisés ;
- en laboratoire (biologie, chimie, etc.) : la **sonication** est l'utilisation d'ultra-sons pour rompre les membranes cellulaires ou des agrégats moléculaires, pour nettoyer ou désinfecter du matériel, en utilisant un bain à ultrasons, par exemple ;
- dans l'industrie, par exemple, pour les essais non destructifs de matériaux, pour la coupe ou soudure des thermoplastiques (non-tissé, ruban, sangle, ), la soudure des métaux non ferreux (Cuivre/aluminium par exemple) nettoyage par U.S l'une des toutes premières applications industrielles ; en alimentaire pour la découpe des fromages, des pâtes, viandes, poissons, gâteaux à très haute vitesse et sans pertes ;
- en télémétrie, le sonar pour mesurer les distances; par exemple, dans l'industrie automobile, afin d'éviter les obstacles ;
- calcul du débit par ultrason (via le temps de transit ou effet doppler) ;
- pour certaines activités de loisir, par exemple pour créer des brouillards d'eau ;
- Les domaines d'utilisation possibles sont les sciences des matériaux, la biologie, la physique, la chimie.

***Dans notre cas d'étude, nous mettons en profit la propagation des ultrasons dans l'air et deux capteurs ultrasonores oscillants (émetteur-récepteur) à la fréquence de 40khz pour permettre à une personne atteinte de cécité visuelle de détecter grâce à un signal sonore un obstacle qui se trouve sur son chemin.***

*Les deux capteurs utilisés fonctionnent selon le principe de la piézoélectricité que nous avons essayé d'expliquer dans le premier chapitre ; puis dans les chapitres deux et trois nous avons tenté de présenter les ultrasons, leurs caractéristiques et leur utilisation en médecine, nous avons ensuite dans le quatrième chapitre présenté brièvement la cécité visuelle, l'écholocalisation et quelques créations à bases d'ultrasons pour finir avec le chapitre cinq qui aborde l'aspect pratique de notre projet de fin d'étude.*

# **Chapitre 01:**

# **La piézoélectricité**



**Chapitre02 :**  
***La propagation***  
***des ultrasons dans***  
***la matière.***

# **Chapitre03 :**

***L'application des***

***ultrasons en***

***médecine***

**Chapitre04:**  
***Cécité visuelle et***  
***utilisation des***  
***ultrasons.***

# **Chapitre 05 :**

# ***La réalisation pratique de la prothèse visuelle à ultrasons***

## **1- Introduction :**

Les matériaux intelligents s'imposent aujourd'hui dans les secteurs les plus divers, allant de la biomédecine au bâtiment et équipements sportif, la robotique ou le secteur militaire [1]. Le terme « matériau intelligent » indique généralement un matériau capable de modifier spontanément un ou plusieurs de ses propriétés physiques, par exemple sa forme, sa connectivité, sa viscoélasticité ou sa couleur, en réponse à des excitations naturelles ou provoquées venant de l'extérieur ou de l'intérieur du matériau : variations de température, contraintes mécaniques, champs électriques ou magnétiques. Le matériau va donc adapter sa réponse, signaler une modification apparue dans l'environnement et dans certains cas, provoquer une action de correction. Un matériau intelligent est sensible, adaptatif et évolutif. Il possède des fonctions qui lui permettent de se comporter comme un capteur (détecter des signaux), un actionneur (effectuer une action sur son environnement) ou parfois comme un processeur (traiter, comparer, stocker des informations). Les matériaux les plus populaires sont : les alliages à mémoire de forme (AMF), les matériaux piézoélectriques, électrostrictifs et magnétostrictifs [2].

Dans ce chapitre nous allons présenter les définitions, les propriétés associées à la piézoélectricité. Nous présenterons également les grandes familles de matériaux piézoélectriques après avoir cité les différents modes de déformation d'un matériau piézoélectrique, nous citerons quelques uns de ces applications.

## **2- Historique de la piézoélectricité :**

L'observation qualitative du phénomène piézoélectrique a été faite au milieu du XIXe siècle (1817) par un minéralogiste français l'abbé René Just Haüy (d'après ses théories cristallographiques) [3,4]. Ce fondateur de la cristallographie a en effet par ses observations de la matière (étude systématique de la morphologie générale des cristaux) apporté de grandes connaissances au niveau de la géométrie atomique des cristaux et participé à en déterminer des lois structurales.

La piézoélectricité a été mise en évidence à Paris en 1880 par les frères Pierre et Jacques Curie à cette époque ces deux frères, âgés respectivement de 21 et 25 ans, sont tous deux préparateurs à la faculté des sciences de Paris Combinant leurs connaissances de la pyroélectricité et de la structure cristalline, ils prédirent et vérifièrent l'existence de la piézoélectricité ainsi ils montrèrent que les cristaux de quartz, topaze, tourmaline, niobate de lithium, cane à sucre et sel de Rochelle génèrent une polarisation électrique sous contraintes mécaniques c'est à dire la production d'une charge électrique sous contraintes mécaniques [5,6]. Cette découverte attira immédiatement l'attention des scientifiques : le français Gabriel Lippmann (1845-1921), Prix Nobel de physique en 1908 et inventeur de la photographie couleur, démontra de son côté l'année suivante que le phénomène était réversible et déduira mathématiquement du principe fondamental de la thermodynamique la théorie des cristaux

piézoélectriques ; ainsi si des signaux électriques sont appliqués sur le cristal, celui-ci se dilate et se comprime dans une certaine direction, sa résonance mécanique favorisant les vibrations à une fréquence donnée. C'est grâce à cette dernière propriété que le quartz a atteint une telle notoriété [3,7]. Immédiatement les frères Curies confirmèrent l'existence de l'effet piézoélectrique inverse. Ils apportèrent une preuve quantitative de la réversibilité complète de la déformation électro-élasto-mécanique dans les cristaux piézoélectriques.

La piézoélectricité n'était qu'une curiosité de laboratoire mais la première guerre mondiale (1914-1918) la fit entrer dans la voie des applications pratiques. En 1917, Paul Langevin eut l'idée d'exciter des lames de quartz par un signal électrique alternatif pour créer des ultrasons ; ceux-ci, réfléchis sur la coque des sous-marins ennemis, retournent vers d'autres cristaux piézoélectriques et y font naître des tensions électriques alternatives aisées à détecter. Ce générateur d'ondes ultrasonores « Sonar » est la première utilisation conjuguée des effets piézoélectriques direct et inverse. Cependant, cette invention ne s'est pas perfectionnée jusqu'à la fin de la guerre [8,9].

Le succès du sonar a stimulé l'activité intense de développement sur toutes sortes de dispositifs piézoélectriques, résonnant et non-résonnant. Walter G. Cady, en 1918, réalisa le premier oscillateur électronique stabilisé par un cristal de quartz [3]. Il établit le schéma électrique équivalent du résonateur piézoélectrique. Dès lors, la piézoélectricité devint l'associée de l'électronique naissante. Elle permit la génération de fréquences électriques, donc d'échelles de temps, extrêmement stables.

La Seconde Guerre mondiale vit naître l'industrie moderne de la piézoélectricité. Cinquante millions de résonateurs à quartz piézoélectriques furent alors fabriqués aux États-Unis. A la même époque furent étudiés : des cristaux synthétiques, parfois décevants à l'usage ; mais surtout certaines céramiques, dites ferroélectriques, rendues anisotropes par un champ électrique au cours de leur élaboration et présentant ensuite un effet piézoélectrique intense [9].

En 1954, les zircono titanates de plomb (PZT) ont été élaborés, et se sont répandus très rapidement, car leurs propriétés supplantent de loin celles de toutes les autres familles de composés [4].

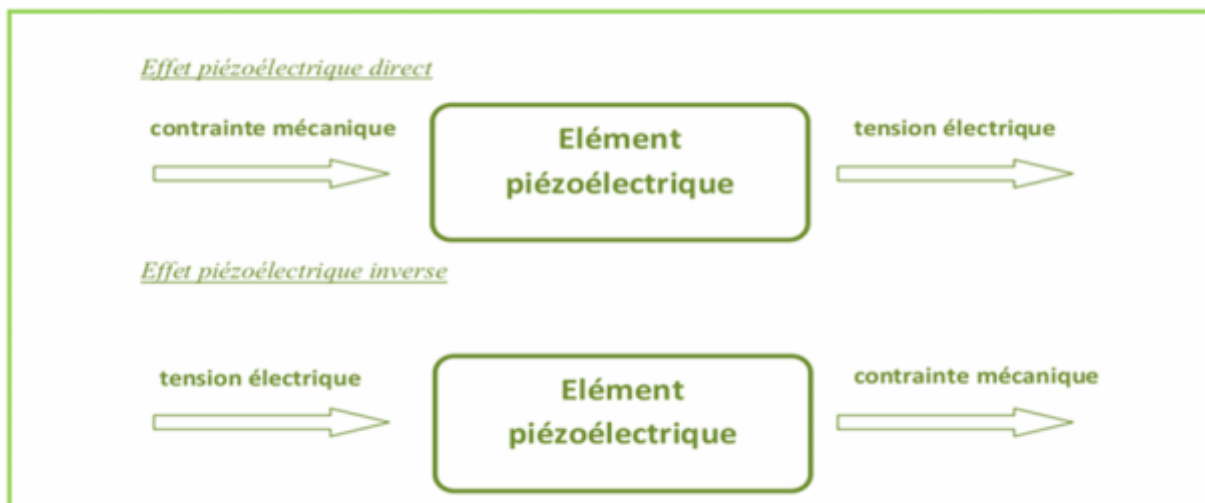
En 1969, Kawai a été le premier à découvrir les remarquables propriétés piézoélectriques du polyvinylidène difluoré (PVDF). Ce polymère piézoélectrique est le plus étudié et utilisé [10].

Depuis le début des années 80, différents nouveaux matériaux piézoélectriques ont été élaborés. En particulier les composites piézoélectriques qui ont vu jour peu après l'apparition du titanate de barium comme céramique piézoélectrique lorsque les chercheurs du Naval Research Laboratory ont voulu intégrer le titanate de barium dans une matrice de polymère afin d'obtenir un hydrophone flexible. D'autres tentatives ont consisté à combiner des poudres

de PZT avec un polymère, toujours afin d'obtenir des matériaux piézoélectriques flexibles. Les premières communications montrant le potentiel de ces matériaux pour les applications sous-marines ont déclenché l'attrait des chercheurs pour les composites piézoélectriques, notamment à Pennsylvania State University [11,12].

### **3- Effet piézoélectrique :**

La piézoélectricité, du grec "piézo" signifiant presser ou serrer [13], certains matériaux (cristaux, céramiques ou polymères) ont la propriété de se polariser sous l'influence d'une contrainte mécanique : c'est l'effet piézoélectrique direct. Cette polarisation est proportionnelle à la contrainte et change de signe avec elle. Ce phénomène est réversible : une polarisation électrique résultant de l'application d'un champ électrique entraînera une déformation du même matériau. On parle alors d'effet piézo-électrique inverse [14,15]



**Figure 01** : les effets piézoélectriques directe et inverse.

L'application d'un champ électrique variable (champ électrique alternatif) entre les faces d'un matériau piézoélectrique, va exciter une onde acoustique dans le matériau. Cette onde acoustique est la résultante d'une déformation mécanique (déformation variable) du réseau cristallin qui oscille alors à une fréquence donnée, dite fréquence de résonance et c'est typiquement l'application exploitée dans les oscillateurs à quartz [16,17].

### **3.1- L'aspect chimique de la piézoélectricité :**

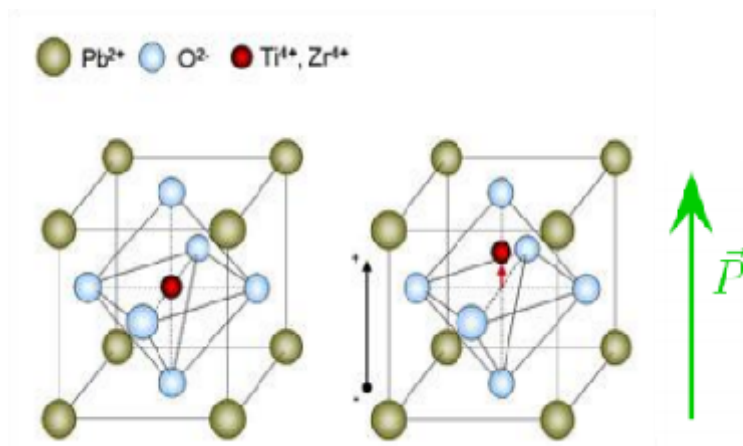
Les cristaux piézoélectrique sont composés de cations (ions de charge positive) et d'anions (ions de charge négative) génèrent un courant électrique lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique, telle qu'une pression.

Grâce à cette contrainte mécanique la structure ionique stable des cristaux est déformée, modifiant la disposition des ions. Le nuage électronique se voit donc déformé et deux

parties se forment dans les cristaux ; l'une avec majorité de charges négatives, et l'autre avec plus de charges positives. Une différence de potentiel électrique se forme, soit une tension.

La propriété qui permet à certains cristaux de produire un courant électrique est leur structure pérovskite :

En prenant l'exemple de la structure du titanate du plomb les anions oxygène forment les sommets des octaèdres tandis que les cations  $\text{Pb}^{2+}$  et  $\text{Ti}^{4+}$  occupent respectivement leur centre et les sites entre les octaèdres. La pression stimule un déplacement du cation central  $\text{Ti}^{4+}$  ce qui provoque une répartition irrégulière des charges, c'est-à-dire que dans une partie du cristal il y a plus de cation que d'anions et une déformation du nuage électronique.

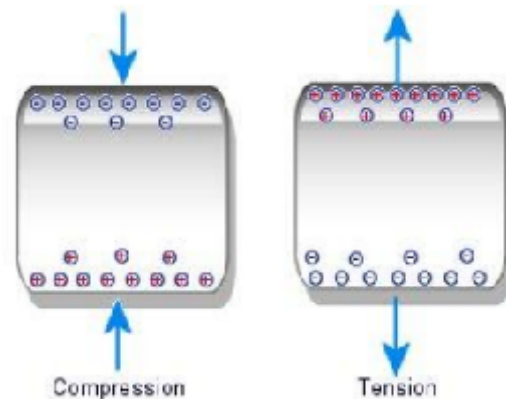


Maille cristalline d'un cristal de structure pérovskite :  $\text{PbTiO}_3$

Figure2 : la structure du titanate du plomb.

En résumé, c'est cette déformation qui crée un courant électrique avec deux pôles qui se mettent en place : le pôle positif, la partie chargée partiellement à cause des cations ; et le pôle négatif, l'autre partie qui possède une majorité d'anions.





**Figure03 : les effets piézoélectriques.**

### 3.2- L'aspect physique de la piézoélectricité:

il existe une relation entre la pression exercée sur le cristal et la tension produite selon la relation suivante :

$$U = S * P$$

- U : tension en Volts.
- P : la pression exercé sur le cristal en Pascals.
- S : constante de sensibilité.

Or, la constante de sensibilité dépend de deux choses : la constante piézoélectrique et la largeur du cristal. On a :

$$S = k * h$$

- k : constante piézoélectrique
- h : la largeur du cristal en m

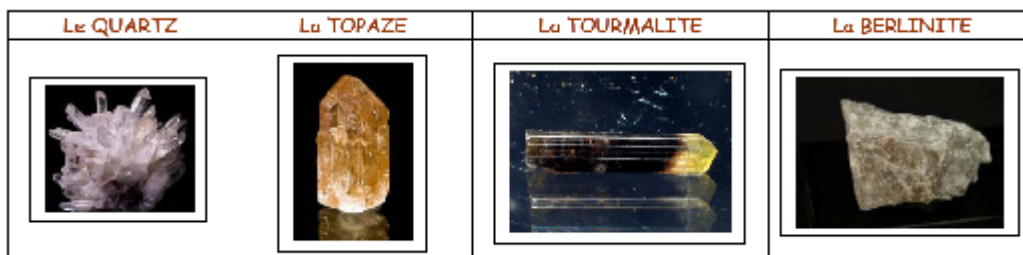
Donc on peut dire que :  $U = k * h * P$ .

La constante piézoélectrique change avec le matériau utilisé. Cette constante est obtenue à partir d'expériences rigoureuses faites par des chercheurs et laborantins. Dans le tableau ci-dessous sont présentées les constantes piézoélectriques des matériaux les plus utilisés.

Material	Piezoelectric Constant
Quartz	$d_{11} = -2.3$ $d_{14} = 0.7$
Lithium Niobate	$d_{33} = 6.0$ $d_{15} = 69.2$
Navy Type I	$d_{33} = 289$ $d_{15} = 496$
Navy Type II	$d_{33} = 374$ $d_{15} = 584$
Navy Type VI	$d_{33} = 593$ $d_{15} = 741$
Navy Type III	$d_{33} = 225$ $d_{15} = 330$
Lead Metaniobate	$d_{33} = 85$

**Tableau01** : présentation de quelques constantes de la piézoélectricité.

#### 4- Les matériaux piézoélectriques :



**Figure 04** : matériaux piézoélectriques.

Rapidement après la découverte de la piézoélectricité, plusieurs matériaux ayant cette caractéristique ont été trouvés. Néanmoins des nouveaux matériaux continuent à apparaître, toujours avec des meilleures caractéristiques et performances. Maintenant les matériaux, leurs présentations, leurs tailles, peuvent s'adapter à leurs applications pratiques et non l'inverse comme on le faisait il y a quelques années. C'est pour cela que les innovations dans le domaine de la piézoélectricité sont à l'ordre du jour.

Nous allons considérer les quatre classes principales de matériaux piézo-électriques : les cristaux qui possèdent une piézo-électricité naturelle, les céramiques, les polymères et les composites qui doivent être polarisés. Avant de les comparer, il est nécessaire de définir les deux principales grandeurs physiques qui vont caractériser ces différents matériaux :

- **ZA**, l'impédance acoustique. Celle-ci doit être la plus proche possible de celle des tissus biologiques, c'est-à-dire environ 1,5 Mra, afin que les ultrasons se transmettent bien de la sonde au corps humain.

- **kt**, le coefficient de couplage électro-acoustique. Ce paramètre, compris entre 0 et 1, caractérise l'aptitude du matériau à convertir une énergie électrique en énergie mécanique ou inversement. Il doit être le plus élevé possible.

## **4.1- Les cristaux :**

Le quartz et la tourmaline sont sans doute les cristaux naturels les mieux connus découverts respectivement par Matthias et Aurivillius en 1949.

Le cristal piézo-électrique le plus connu est le quartz mais ses propriétés sont peu attrayantes pour les applications de transducteurs médicaux : son impédance acoustique est relativement élevée et son coefficient de couplage très faible.

D'autres cristaux, tel que le niobate de lithium ( $\text{LiNbO}_3$ ) ou le tantalate de lithium ( $\text{LiTaO}_3$ ) affichent des valeurs de **kt** plus élevées. Le coût élevé et la fragilité de ces cristaux expliquent que l'on ne les retrouve que très peu dans les produits actuels.

Ils sont cependant utilisés en laboratoire dans des dispositifs à très haute résolution pour des raisons essentiellement technologiques.

Le quartz :

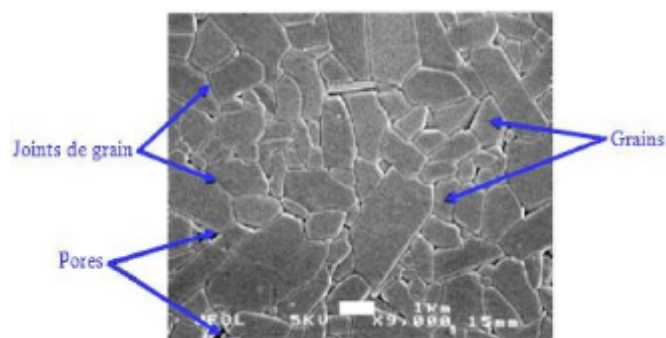
Le quartz notamment présente une combinaison unique de propriétés remarquables :

- Il est piézoélectrique.
- On peut trouver des orientations cristallographiques qui minimisent la dilatation thermique.
- Il a de très faibles pertes mécaniques, ou en d'autres termes un excellent facteur de qualité mécanique.
- Il est très stable (en température, pression etc.). Il a également une très faible solubilité dans la plupart des solvants dans des conditions ordinaires, à l'exception des solvants fluorés.
- Il est facile à usiner. Le quartz est dur, mais peu cassant.
- Il est facilement intégrable dans des dispositifs de micro- ou nanoélectronique.
- Il est naturellement abondant, et peut être fabriqué à un coût modeste avec une très bonne qualité. Parmi les monocristaux de synthèse, le quartz arrive second en quantité produite (3 000 tonnes par an en 2000), derrière le silicium.

## **4.2- Les céramiques :**

Le terme céramique évoque souvent des objets rustiques comme des poteries, des briques et des tuiles, mais le terme de céramique signifie plus généralement un solide qui n'est ni un

métal ni un polymère. Une céramique est un matériau solide de synthèse qui nécessite souvent des traitements thermiques pour son élaboration. La plupart des céramiques modernes sont préparées à partir de poudres consolidées (mise en forme) et sont densifiées par un traitement thermique (frittage). Les procédés de fabrication des céramiques sont ajustables afin de pouvoir adapter leurs propriétés diélectriques, mécaniques et piézoélectriques à la demande. La plupart des céramiques sont des matériaux polycristallins, c'est à dire comportant un grand nombre de microcristaux bien ordonnés (grains) reliés par des zones moins ordonnées (joints de grains) comme illustré dans la figure ci dessous. **(Figure 5)**

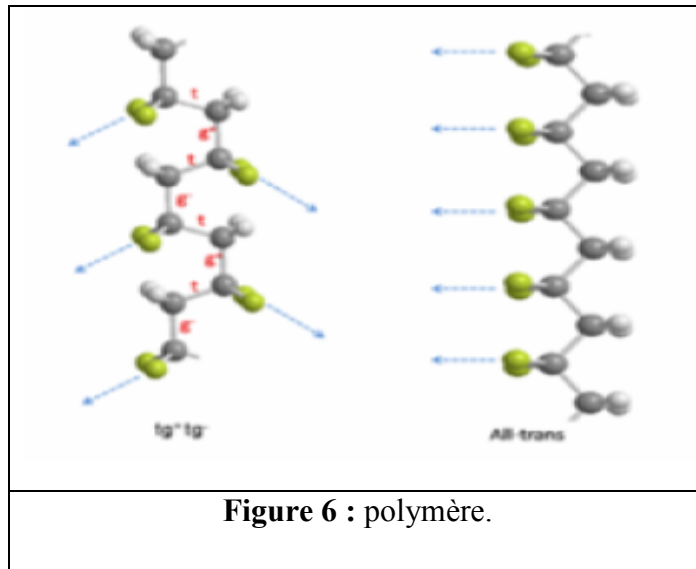


**Figure 5 :** Microstructure typique d'une surface céramique polie qui illustre les grains monocristallins, joints de grains et pores [18]

Les céramiques piézoélectriques sont apparues dans les années quarante. Par leurs coefficients piézoélectriques bien supérieurs à ceux des cristaux, elles ont permis un élargissement des applications du phénomène de piézoélectricité ils sont [19] incontestablement les matériaux les mieux adaptés à l'heure actuelle pour une utilisation échographique. Ils sont souvent utilisés tels quels mais entrent également dans la fabrication des composites que nous décrivons plus loin. Ce succès peut sembler paradoxal car, bien que les valeurs de  $kt$  soient élevées, leur impédance acoustique est bien plus élevée que celle des tissus biologiques. Il est dû au fait que ces matériaux sont d'un coût relativement faible, qu'ils sont usinables et faciles à transformer et surtout qu'ils offrent un éventail très large de performances. En effet, il existe de très nombreuses compositions différentes dont les propriétés diélectriques et mécaniques varient considérablement, de sorte que l'on trouve toujours une céramique adaptée à une application particulière.

Citons entre autres, les titanates de baryum qui sont les ancêtres des céramiques actuelles, la famille des PZT (plomb, zirconate, titanate) qui compte à elle seule cinq à six compositions différentes et qui est la plus utilisée ; les titanates de plomb qui tendent de plus en plus à concurrencer les PZT et enfin les métaniobates de plomb utilisés pour l'imagerie haute résolution.

## 4.3- Les polymères :



Certains polymères tel que le PVDF (PolyVynilDiFluorure) et des copolymères tel que le (PVDF-TrFE) peuvent acquérir des propriétés piézo-électriques. Ils se caractérisent par une faible impédance acoustique et sont donc supérieurs à ce point de vue. Cependant jusqu'à une période récente, leurs coefficients de couplage étaient bien plus faibles que ceux des céramiques. L'amélioration des procédés de fabrication et plus particulièrement ceux des copolymères a abouti à des valeurs de  $kt$  de l'ordre de la moitié de ceux obtenus avec des céramiques. Les transducteurs à base de copolymères ont aujourd'hui des performances qui s'approchent de celles des capteurs à céramiques. Ils sont essentiellement utilisés dans les dispositifs haute fréquence à cause d'avantages technologiques. Quelques barrettes expérimentales fonctionnant au dessus de 7MHz ont été réalisées, on peut les trouver dans des transducteurs pour l'échographie ophtalmologique, cutanée ou intra vasculaire. Ils se prêtent bien, en outre, à une miniaturisation des sondes.

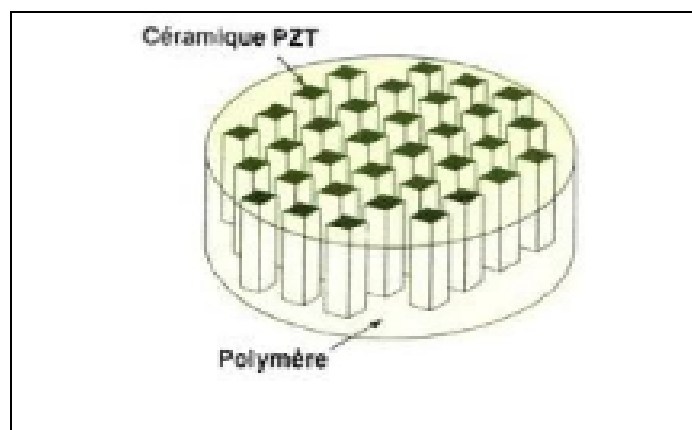
## 4.4- Les composites :

Ces matériaux, d'abord développés pour des applications sonar, ont fait leur apparition au début des années 80 et représentent l'avancée majeure dans le domaine des matériaux piézo-électriques, depuis l'apparition des PZT dans les années 60.

Le terme « composite » dans le domaine des matériaux signifie que deux ou plusieurs matériaux sont associés à l'échelle macroscopique afin de développer un matériau ayant de nouvelles propriétés [20].

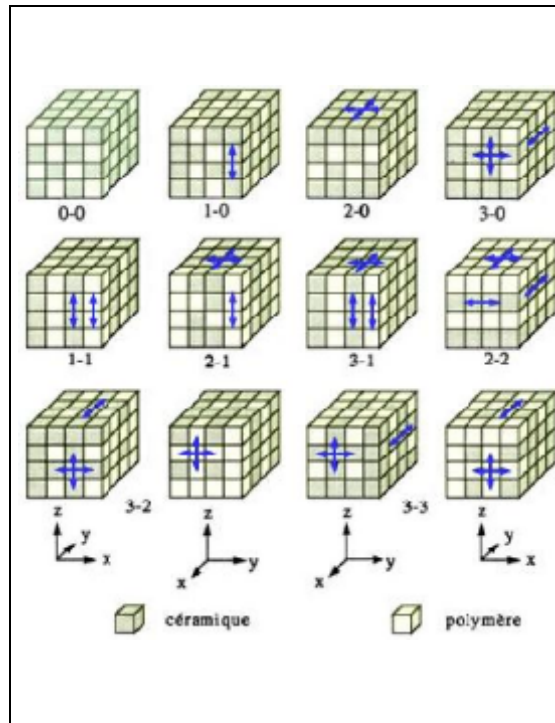
Un composite piézoélectrique, encore appelé piézocomposite par abus de langage, est la combinaison d'une céramique piézoélectrique et d'un polymère non piézoélectrique.

Leur origine provient du constat selon lequel aucun matériau existant n'avait à la fois une impédance acoustique assez faible pour bien transmettre son énergie aux tissus biologiques et une valeur de  $kt$  élevée. En effet, les céramiques souffrent d'une impédance acoustique, trop élevée et les polymères d'une valeur de  $kt$  trop faible. L'idée est donc née qu'il fallait utiliser à la fois une céramique à  $kt$  élevée, associée à un matériau passif de faible impédance acoustique de sorte que le matériau résultant ait une impédance acoustique plus faible tout en gardant un  $kt$  comparable avec celui d'une céramique.



**Figure 7 :** Vue schématique d'un piézocomposite de connectivité 1-3 [20]

Les piézocomposites ont été classés par Newnham suivant la connectivité de chacune de leurs phases et on caractérise ainsi leur structure tridimensionnelle [11]. On désigne un composite constitué de deux phases par deux entiers "i-j" qui précisent le nombre de directions suivant lesquelles chaque phase établit une liaison ou connectivité. Différentes combinaisons sont décrites sur la figure si dessous.



**Figure 08** : Schémas de connectivité pour un composite à deux phases [11]

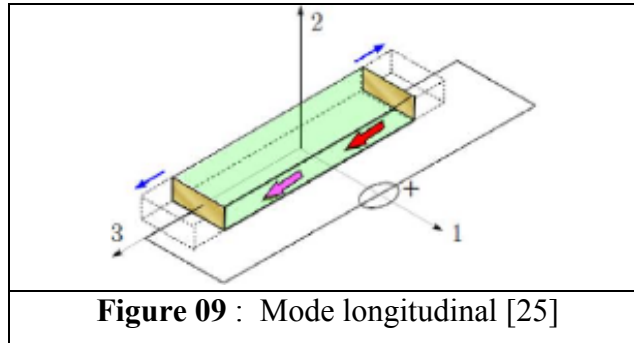
## **5- Modes de déformation d'un matériau piézoélectrique :**

Le matériau piézoélectrique se déforme dans différentes manières à différentes fréquences. Ces diverses déformations s'appellent les modes de déformation [21]. Du fait de l'anisotropie des matériaux piézoélectriques, leur déformation se fait selon une direction privilégiée sous l'action d'un champ électrique  $E$ . Une étude des propriétés de ces matériaux nécessite donc une identification des directions. D'une manière générale, une céramique piézoélectrique est référencée par un trièdre  $(o, x_1, x_2, x_3)$ . Par convention, la direction et le sens de la polarisation sont confondus avec l'axe 3, pour un mode  $\bar{e}_i$ ,  $i$  correspond à l'axe d'orientation du champ électrique appliqué et  $\bar{e}$  à l'axe de la déformation mécanique générée ( $i=1,2,3, \bar{e}=1,2,3,4,5,6$ ) [22,23,24].

### **5.1- Modes de déformation fondamentaux :**

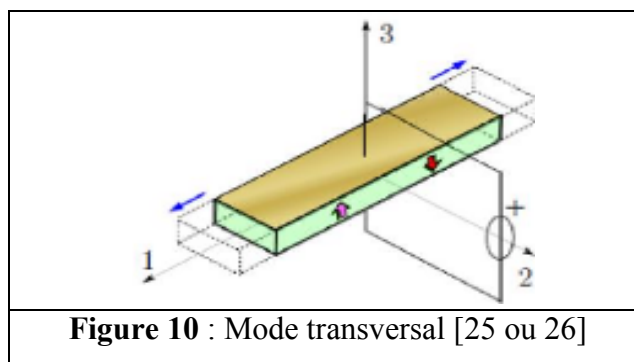
#### **5.1.1- Mode longitudinal [25] :**

Le mode longitudinale traduisant des déformations dans la même direction que l'axe du champ électrique. Ce mode possède un bon coefficient de couplage, cependant le placement des électrodes sur les surfaces vibrantes les fragilise.



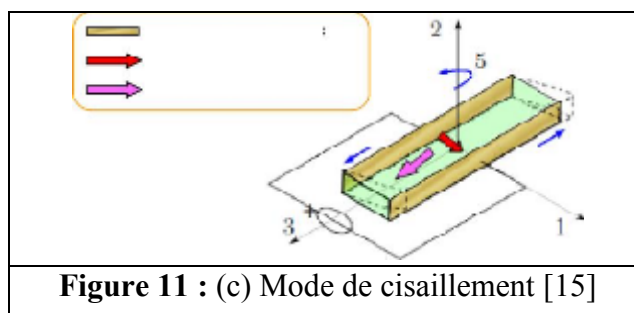
## 5.1.2- Mode transversal [25 ou 26] :

Le mode transversale traduisant des déformations perpendiculaires à l'axe du champ électrique. Dans ce mode, les électrodes ne sont pas placées sur les surfaces subissant les déformations, donc offrant l'avantage de ne pas soumettre les électrodes à la contrainte. En revanche, il possède un coefficient de couplage moindre que le mode longitudinal.



## 5.1.3- Mode cisaillement [28] :

Le mode de cisaillement traduisant des déformations perpendiculaires à la direction de polarisation ou autour d'un axe. La céramique subit alors un phénomène de torsion autour de l'axe choisi. Elle est obtenue lorsque le champ appliqué est perpendiculaire à la polarisation du matériau. Par exemple, si le champ est appliqué sur l'axe 1, la déformation se fera autour de l'axe 2 (rotation associée à l'indice 5).



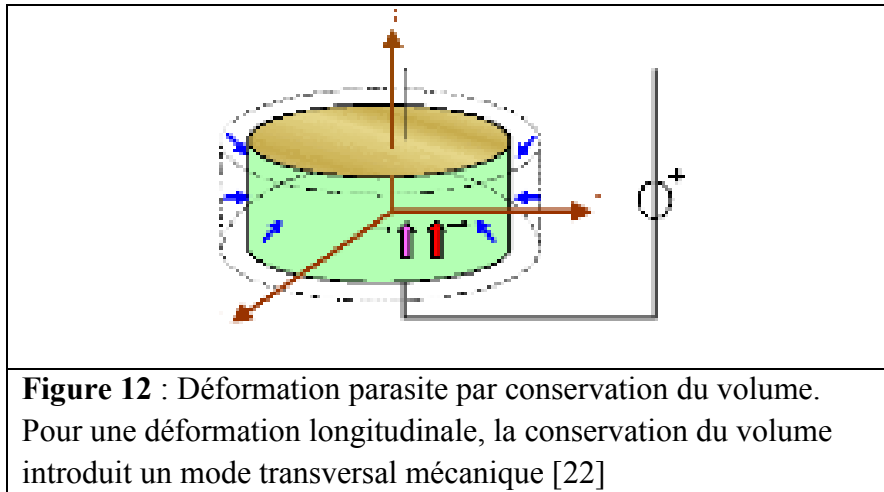


(E) : Position des électrodes Champ électrique.

(P) : Polarisation.

## **5.2- Autres modes de déformation :**

D'autres modes de déformation « parasites » résultant de la forme particulière de l'échantillon peuvent apparaître [22]. Ils sont d'origine mécanique par exemple, des déformations perpendiculaires à l'épaisseur ou d'origine électrique par déplacement dipolaire (modification des parois de blocs). En jouant sur la forme de l'échantillon (plaque, tube, ...) et sur sa polarisation (uniforme, radiale,...), une grande variété de déformations peuvent être exploitées. Il est à noter que lors de l'utilisation d'une céramique piézoélectrique, plusieurs modes interagissent simultanément. Ces modes parasites sont souvent négligés : les dimensions des structures sont choisies pour que ces hypothèses soient vérifiées. Par exemple, il est préférable de privilégier une longueur nettement supérieure à l'épaisseur pour utiliser le mode 25.



## **6-Piézoélectricité et symétries de la structure cristalline :**

L'existence de la piézoélectricité dans un cristal est liée aux symétries de la structure cristalline. En particulier, un cristal ne peut pas être piézoélectrique si sa structure possède un centre de symétrie (structure dite centrosymétrique).

De manière générale, on classe les cristaux suivant leurs symétries en 230 groupes d'espace regroupés en 32 classes cristallines. Il existe 21 classes non centrosymétriques, dont 20 sont piézoélectriques. Parmi ces classes piézoélectriques, 10 possèdent une polarisation électrique spontanée et sont dites polaires. Leur polarisation spontanée varie avec la température, ces cristaux sont donc pyroélectriques. Parmi les cristaux pyroélectriques enfin, certains sont dits

ferroélectriques et se caractérisent par le fait qu'il est possible de renverser leur polarisation électrique permanente en appliquant un fort champ électrique dans le sens opposé.

<b>32 classes cristallines</b>			
<b>20 classes piézoélectriques</b>			non piézoélectriques
<b>10 classes polaires pyroélectriques</b>		non pyroélectriques	
<b>ferroélectriques</b>	non ferroélectriques		
ex : BaTiO <sub>3</sub> , PbTiO <sub>3</sub>	ex : Tourmaline	ex : Quartz	

**Tableau 02** : différentes classes cristallines.

L'absence de centre de symétrie dans une structure s'explique parfois de manière naturelle par la géométrie. [22]

## **7- Applications :**

### **7.1- Les capteurs.**

La première application industrielle et la plus présente de nos jours des piézo -électriques est pour des capteurs, ils sont appelés transducteurs piézoélectriques. Grâce à la capacité des piézoélectriques de créer une tension dès qu'une force leur est appliquée, ils sont utilisés pour une grande variété de capteurs :

#### **❖ Accéléromètres :**

Un cylindre avec une bille et un capteur piézoélectrique sur chaque base permet de détecter le mouvement et la vitesse sur un axe. Plusieurs accéléromètres sont placés dans les systèmes pour pouvoir capter le mouvement sur tous les axes comme dans la manette de la console de jeux vidéo Wii ou dans quelques systèmes de sécurité routière.

#### **❖ Capteurs de vibration :**

Des capteurs piézoélectriques sont utilisées pour capter les vibrations qui sont aussi une action mécanique comme sur des systèmes anti cambriolage des voitures et le phonographe.

#### **❖ Capteurs de vibrations sonores :**

la première application, comme beaucoup de systèmes innovants, a été développé par l'armée. Un système qui capte des vibrations ultrasonores créés par lui même, grâce à une plaque de quartz, peut faire une image d'un environnement invisible ou lointain (en calculant le temps d'aller-retour de l'onde émise puis réfléchi) :c'est le premier sonar. De plus, ces capteurs sont utilisés pour des microphones.

## ❖ Capteurs d'impact :

Des transducteurs sont placés dans des systèmes où l'on veut calculer la force appliquée et le moment de son application comme dans des batteries (instrument de musique) électriques ou des capteurs de proximité comme dans le métro japonais ou les escaliers électriques qui s'actionnent uniquement quand les matériaux envoient un signal de présence d'un utilisateur.[29]

## 7.2- production d'énergie :

Actuellement les piézoélectriques ne sont presque pas utilisés pour la production d'électricité.

### À petite échelle :

#### ❖ Le briquet piézoélectrique :

Le briquet piézoélectrique est un exemple de création. En appuyant sur le bouton, l'élément piézoélectrique reçoit une pression.

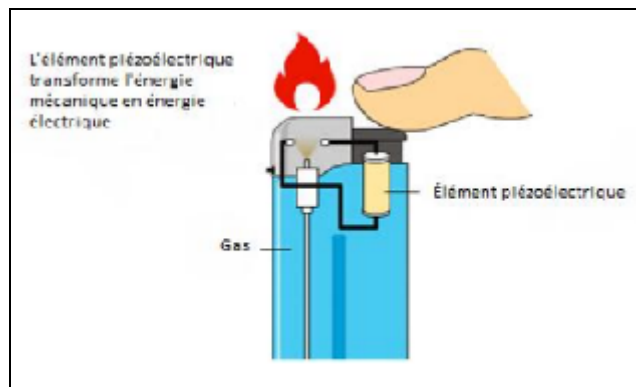
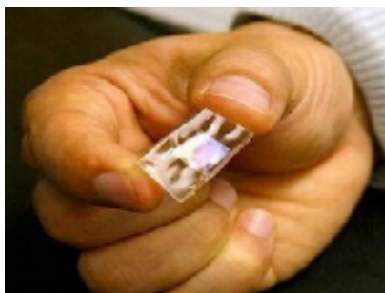


Figure 13 : Le briquet piézoélectrique[30].

#### ❖ Implants expérimentaux utilisant la piézoélectricité :

Ces implants peuvent être placés dans de nombreux endroits du corps où il y a un mouvement constant. Le mouvement respiratoire est le cas le plus clair, mais il y a beaucoup d'autres. Le cas le plus connu pour l'utilisation de cet implant est celui du pacemaker.



**Figure 14:** Un pacemaker à base de matériaux piézoélectrique[31]

### ❖ Un t-shirt pour recharger le portable :

La compagnie téléphonique Orange profite chaque année du festival de musique de Glastonbury pour lancer un produit innovant permettant de recharger son téléphone portable.

Ce t-shirt nommé "Sound Charge" est équipé d'un dispositif piézoélectrique permettant de recharger son téléphone portable à partir du son émis lors du festival.



**Figure 15 :**le Sound Charge[31]

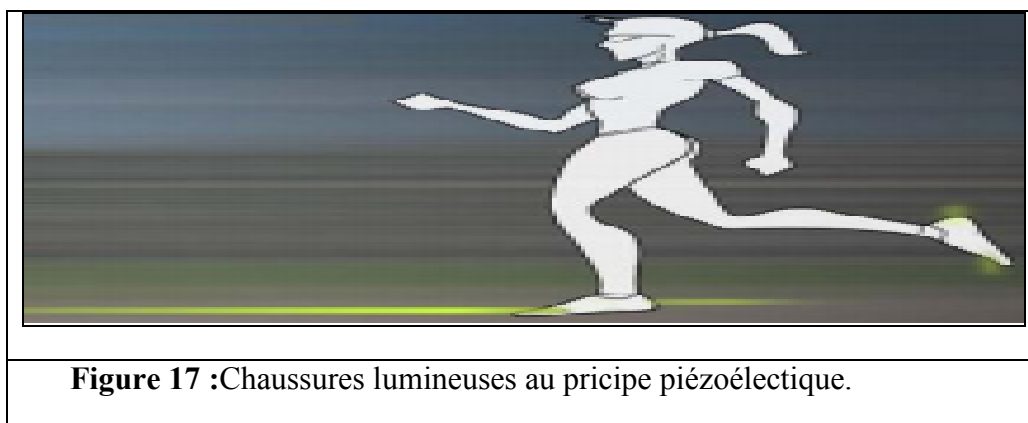
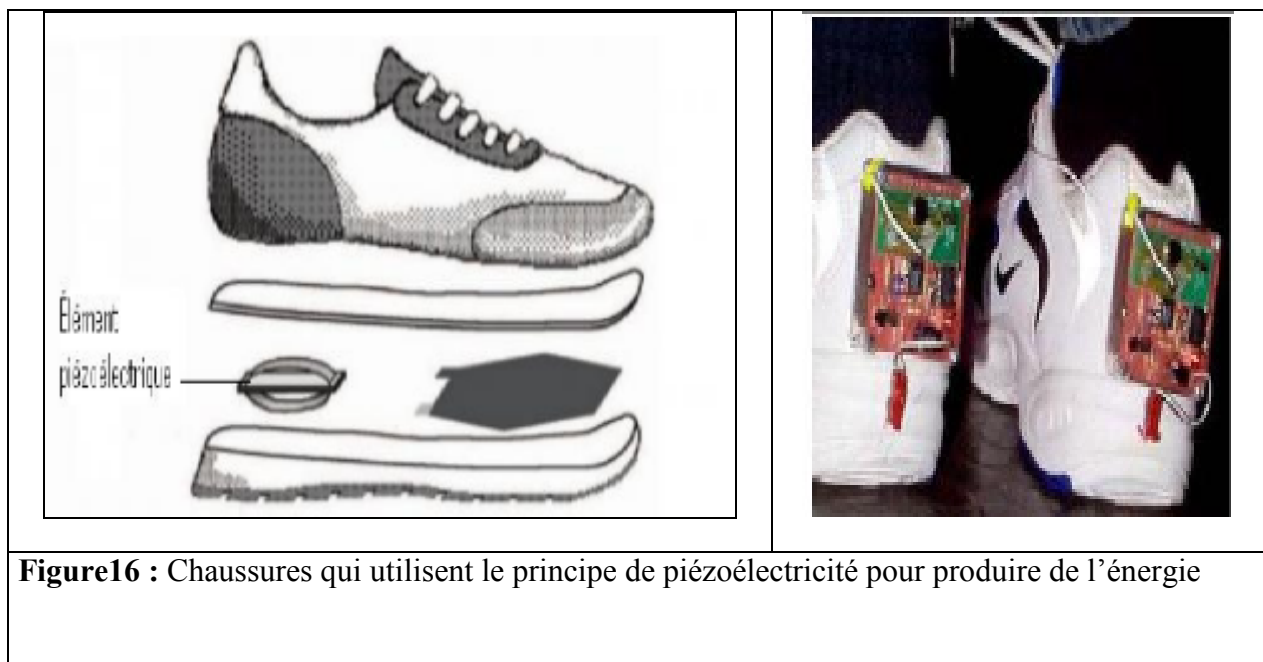
### ❖ Produire de l'énergie en marchant :

Le corps humain stocke, dissipe et peut produire une énergie considérable eu égard à la consommation de nos appareils électroniques portables habituels. Il convertit de l'énergie constamment (mouvements, respiration, chaleur...), et on peut considérer qu'il s'agit d'une énergie renouvelable, gratuite, non polluante et de durée de vie élevée (cf. figure 1.15.a). Même si, bien sûr, une faible part de cette énergie est exploitable, il semble que l'énergie associée aux mouvements du corps humain peut permettre d'approvisionner bon nombre d'applications et de réduire, voire supprimer les problèmes de recharge et de dépendance

# Chapitre 01 : La piézoélectricité

aux réseaux électriques ou aux piles. Cela requiert de convertir en électricité une partie de l'énergie dépensée, par des moyens à déterminer en fonction des ressources, des solutions technologiques envisageables et des besoins. Les dispositifs piézoélectriques permettent de convertir en électricité l'énergie des mouvements humains.

Il existe donc des chaussures pour produire de l'énergie en marchant. Un élément piézoélectrique est introduit dans les semelles d'une paire de chaussures. L'armée américaine a déjà utilisé ce système pour recharger tous les appareils électriques tels que les walkies-talkies, radios, GPS, etc. Afin de rendre les soldats électriquement indépendants.[32]



Pour rendre le trajet lumineux et clair quand il fait noir, il existe des chaussures de course équipées de polymères électroluminescents alim entés par des générateurs piézoélectriques.

Conçus par le designer industriel mexicain Alberto Villarreal, ces chaussures aident les sportifs à éclairer leurs chemins sans avoir à transporter quoi que ce soit. [31 ou 32]

## **À grande échelle :**

Même si cette source d'énergie n'est pas encore massivement exploitée à grande échelle, il existe des endroits où l'on commence à utiliser.

### **❖ Parking piézoélectrique :**

Dans la ville de Gloucester, en Angleterre, un parking de grande surface commerciale a été équipé de matériaux piézoélectriques. Cette installation permet de récupérer de l'énergie à chaque passage de véhicule et, ainsi, d'alimenter les caisses de paiement du supermarché. [30]

### **❖ Métro piézoélectrique à Tokyo :**

De même, dans le métro de Tokyo, on a équipé le sol des stations de plaques piézoélectriques qui produisent de l'énergie au passage des centaines de passagers descendant des wagons.



**Figure 18 :** Métro piézoélectrique à Tokyo [30 ou 31].

### **❖ Une autoroute électriquement autonome :**

Une recherche en Israël consiste à placer des matériaux piézoélectriques sous la surface de la route pour que l'énergie mécanique des voitures puisse être capturée et transformée en électricité. Les routes deviennent donc des sources de production d'énergie.  
Route principale d'Israël qui va du Nord au Sud du pays.



**figure 19** : Une autoroute électriquement autonome [31].

## ❖ Piste de danse autosuffisante :

À Amsterdam, Rotterdam, Londres et bientôt New York, des boîtes de nuit ont inauguré des pistes de danse qui transforment en électricité les sautilllements des danseurs. Ils alimentent ainsi une partie des spots et espèrent réduire de 30 %, voire de 60 %, leur facture d'électricité. Le sol est légèrement mobile, sur ressorts, et les vibrations sont converties en électricité grâce à des matériaux piézoélectriques .



**Figure 20** : piste de danse autosuffisante [31]

## **8- Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons expliqué le phénomène de piézoélectricité ainsi que son utilisation dans divers domaines.

Dans notre projet de fin d'étude nous avons utilisé des capteurs piézoélectriques pour la détection des obstacles.

- **Un émetteur**\_ qui fonctionne selon le l'effet inverse de la piézoélectricité ainsi chargé de transformer la grandeur électrique qui lui a été imposé en une onde mécanique.  
-génération des ultrasons d'une fréquence de 40khz-
- **Un récepteur**\_ qui recueille cette onde acoustique reflétée par un obstacle et la transforme en un courant électrique ainsi fonctionnant selon l'effet directe de la piézoélectricité.



## Références bibliographique :

- [1]- J. De Rosnay, «Les matériaux intelligents», 278<sup>e</sup> conférence de l'Université de Tous Les Savoirs, Octobre 2000.
- [2]- J. S. Harrison, Z. Ounaies, « Piezoelectric polymers», Phosphorus-containing polymers and oligomers, Vol. 3, Encyclopedia of Polymer Science and Technology, John Wiley & Sons, New York, USA, pp. 474-498.
- [3]- F. Giraud, «Modélisation causale et commande d'un actionneur piézoélectrique à onde progressive», Thèse de doctorat, Université Lille I, France, Juillet 2002.
- [4]- S. Le Dren, «Elaboration de couches épaisses piézoélectriques déposées sur substrats pour des applications microtechniques», Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, Septembre 2000.
- [5]- A. R. Streett, «Preliminary finite element modeling of a piezoelectric actuated marine propulsion fin», Master of science thesis, Rochester Institute of Technology, New York, USA, September 2006.
- [6]- PIEZOCRYST advanced sensors GMBH, [www.piezocryst.com](http://www.piezocryst.com), «Introduction to piezoelectric sensors», Austria, August 2005.
- [7]- R. Periasamy, « Shape control of composite structures with optimally placed piezoelectric patches», Master of science thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada, 2008.
- [8]- Measurement Specialties, [www.msiousa.com](http://www.msiousa.com), «Piezo film sensor-technical manual», April 1999.
- [9]- L. Delmas, «Etude et réalisation de capteurs à sortie fréquentielle en orthophosphate de gallium (GaPO<sub>4</sub>)», Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, France, Septembre 2005.
- [10]- H. Frayssignes, «Etude des effets non-linéaires et des pertes dans les moteurs ultrasonores : Introduction au problème de couplage mécanique entre les voies», Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, Novembre 2001.
- [11]- M. Wilm, «Etude et réalisation de transducteurs composites pour l'imagerie acoustique et le contrôle non-destructif», Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, France, Novembre 2004.
- [12]- A. V. Carazo, «Novel piezoelectric transducers for high voltage measurements», doctoral thesis, Universitat politècnica de catalunya, Barcelona, Spain, January 2000.
- [13]- James R. Phillips, «Piezoelectric technology primer», Albuquerque, New Mexico.
- [14]- C. Millon, «Contribution à l'étude de procédés de réalisation de structures métal/PZT/métal sur silicium pour microsystèmes piézoélectriques», Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, Juillet 2003.

- [15]- N. S. Almind, S. H. Brodersen, «MEMS PZT based accelerometer: design, fabrication and characterization», Bachelor thesis, Technical University of Denmark, Denmark, October 2007.
- [16]- E. Gaboriaud, «Etude des résonateurs piézoélectriques dans le domaine des microondes : application au filtrage», Thèse de doctorat, Université de Limoges, France, Octobre 2004.
- [17]- M. Hubain, «Capteurs de pression et de force», <http://perso.orange.fr/michel.hubain/capteurs/phys/chap-p3.htm>. (Consulté le 12.04.2013).
- [18]- A. Aydi, «Elaboration et caractérisations diélectriques de céramiques ferroélectriques et/ou relaxeur de formule  $M\text{SnO}_3\text{-NaNbO}_3$  ( $M = \text{Ba}, \text{Ca}$ ) », Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de Sfax, Tunisie, Mars 2005.
- [19]- A. Faiz, «Amortissement vibratoire et anéchoïsme par traitement non-linéaire d'éléments piézoélectriques», Thèse de doctorat, Institut National des Sciences appliquées de Lyon, France, Mai 2006.
- [20]- H. -s. Lee, «Etude et réalisation de sources acoustiques de puissance en composite piézoélectrique 1.3 pour applications thérapeutiques », Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, Février 2003.
- [21]- J. M. Gallière, P. Papet, L. Latorre, «A unified electrical SPICE model for piezoelectric transducers», IEEE, 978-1-4244-1567-0/07, pp. 138-142, 2007.
- [22]- L. Garbuio, « Etude du phénomène de lubrification électroactive à l'aide d'actionneurs piézoélectriques : application à la réduction des forces de frottement sec dans un moteur à combustion interne», Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, Juin 2006.
- [23]- C. Viguié, « Contribution au développement d'actionneurs électroactifs pour l'assistance circulatoire : application à la mise au point d'une fonction antithrombotique», Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, Décembre 2005.
- [24]- F. Pigache, «Modélisation causale en vue de la commande d'un translateur piézoélectrique plan pour une application haptique», Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, Mars 2005.
- [25]- C. Tilhac, «Développement d'architectures de filtres à base de résonateurs à ondes acoustiques de volume et contribution à l'intégration dans une technologie avancée silicium industrielle pour des applications radiofréquences», Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, France, Juillet 2007.
- [26]- A. Aydi, «Elaboration et caractérisations diélectriques de céramiques ferroélectriques et/ou relaxeur de formule  $M\text{SnO}_3\text{-NaNbO}_3$  ( $M = \text{Ba}, \text{Ca}$ ) », Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de Sfax, Tunisie, Mars 2005.
- [27]- A. Faiz, «Amortissement vibratoire et anéchoïsme par traitement non-linéaire d'éléments piézoélectriques», Thèse de doctorat, Institut National des Sciences appliquées de Lyon, France, Mai 2006.

- [28]- R. Periasamy, « Shape control of composite structures with optimally placed piézo- electric patches», Master of science thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada, 2008.
- [29][http://strasbourg.udppc.asso.fr/odpf\\_2012\\_dossier/olympiades%20piezoelectricite\\_mexico.pdf](http://strasbourg.udppc.asso.fr/odpf_2012_dossier/olympiades%20piezoelectricite_mexico.pdf)
- [30]-[www.msiousa.com](http://www.msiousa.com)
- [31][http://strasbourg.udppc.asso.fr/odpf\\_2012\\_dossier/olympiades%20piezoelectricite\\_mexico.pdf](http://strasbourg.udppc.asso.fr/odpf_2012_dossier/olympiades%20piezoelectricite_mexico.pdf)
- [32]-[http://www2.ac-lyon.fr/etab/lycees/lyc-69/descartes/IMG/pdf/Poirel\\_2\\_-\\_piezo](http://www2.ac-lyon.fr/etab/lycees/lyc-69/descartes/IMG/pdf/Poirel_2_-_piezo).

## Introduction :

Les ultrasons sont des vibrations de même nature que le son, mais de fréquence supérieure à la plus haute fréquence audible pour l'homme. Ce sont des vibrations produites dans la matière. C'est-à-dire que l'onde ultrasonore est une onde mécanique et élastique, diffusée par les gaz, les liquides, les tissus mous (chair, organes) ou les solides, dont la fréquence est supérieure à 20 000 Hz.

Dans ce chapitre nous allons tout d'abord définir les ultrasons, leurs propriétés physiques ainsi que les paramètres qui les caractérisent tels que la célérité, l'impédance la fréquence et la longueur d'onde...etc. Leurs interactions avec la matière.

## 1-Historique :

SPALLANZANI (1794) est le premier à supposer l'existence d'ultrasons.

Les chauves-souris ont toujours intrigué les chercheurs par leur capacité à voler dans les endroits sombres, voire totalement obscurs, qui ne permettent pas à l'œil de distinguer l'environnement. Leurs déplacements aisés dans le noir complet ont donc provoqué de nombreux questionnements. Au 18<sup>ème</sup> siècle SPALLANZANI et JURINE tentent de percer le mystère de ce fameux « sixième sens ». Ils font des expériences sur les chauves-souris au cours desquelles ils ferment leurs yeux avec des boules de glu ou leur brûlent avec des aiguilles chauffées au rouge afin qu'ils deviennent inutilisables et que par conséquent, les chauves-souris n'aient plus la vue. Malgré cela les deux hommes ont constaté que les chauves-souris se déplaçaient toujours avec la même aisance dans les endroits sombres. Ils ont alors poursuivi leurs recherches, cette fois-ci en bouchant les conduits auditifs des chauves-souris avec de la cire. Ils constatent alors que les animaux perdent toute perception de leur environnement.[1]

C'est en 1883 que le physiologiste anglais Francis GALTON invente un "sifflet à ultrasons". En soufflant dans ce sifflet, l'homme ne perçoit rien alors que les chiens réagissent ! Mais c'est surtout la découverte en 1880, de la piézo-électricité, par les frères Pierre et Jacques CURIE, qui a permis après 1883, de produire facilement des ultrasons et de les utiliser.

- Triplet de LANGEVIN et céramiques piézoélectriques.

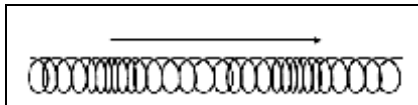
Paul LANGEVIN, le premier, eut l'idée d'appliquer à la production et à la réception d'ultrasons le phénomène de la piézo-électricité, découvert par Pierre et Jacques CURIE. Excités par un courant électrique de haute fréquence, le quartz et les autres cristaux piézo-électriques (sel de Seignette, niobate de lithium, tartrates et phosphates de potassium ou d'ammonium, etc...) vibrent mécaniquement à la même fréquence. Ces vibrations sont surtout intenses lorsqu'une des dimensions du cristal favorise la résonance : dans le mode fondamental, une lame de quartz épaisse de 2,85 mm vibre en demi-onde à la fréquence de 1 mégahertz. La même plaque vibrerait, sur des modes plus élevés, jusqu'à des fréquences hypersonores ; des lames très minces de niobate de lithium sont utilisées sur leur mode fondamental à 200, voire 400 mégahertz. Par ailleurs, à l'aide de films piézo-électriques provenant de l'évaporation d'oxyde de zinc (ZnO), on peut émettre des vibrations mécaniques allant jusqu'à plusieurs gigahertz, les longueurs d'onde associées étant de l'ordre du micromètre...

## Chapitre 02 : La propagation des ultrasons dans la matière.

En 1915, durant la première guerre mondiale, Paul LANGEVIN met au point la détection des sous-marins au moyen des ultrasons, ouvrant ainsi un champ d'applications à ces vibrations non audibles...

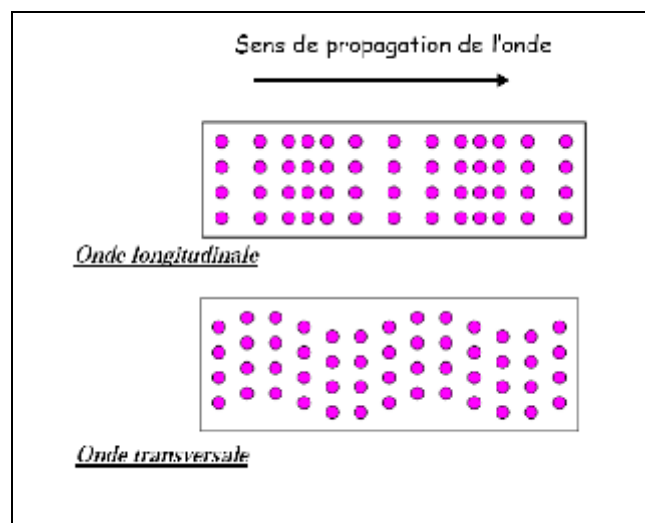
### 2- L'onde acoustique :

Le son est une perturbation d'un milieu matériel élastique en général consécutive à l'action d'une source qui impose au milieu des vibrations forcées de fréquence égale à celle de la source. .[7]



Une onde de vibration longitudinale se propageant de proche en proche dans un milieu matériel (solide , liquide , gaz). .[6]

Les sons se propagent dans les milieux élastiques, qui transmettent l'état de compression ou de dilatation de proche en proche, sans qu'il y ait transport de matière à distance.



### 3-Nature de l'onde ultrasonore :

C'est une onde inaudible qui dépasse 20khz en fréquence, acoustique, c'est-à-dire un mode de propagation de l'énergie dans un milieu matériel sans transport de matière.

L'onde ultra-sonore est une onde de pression se propageant dans un milieu élastique : variation de pression qui se déplace. Il s'agit de la propagation d'une énergie mécanique dans un milieu matériel : ce déplacement ne peut se faire dans le vide. Le milieu de propagation de l'onde ultrasonore est soumis à une succession de surpressions et de dépressions et ses particules constitutives sont alors animées d'un mouvement de va-et-vient dans l'axe de déplacement des ultrasons, de type sinusoïdal. [2]

## Chapitre 02 : La propagation des ultrasons dans la matière.

Une comparaison peut être faite avec un ressort que l'on comprime à une extrémité à une cadence donnée : ces compressions engendrent des déformations qui se propagent le long du ressort (**Figure 1**).

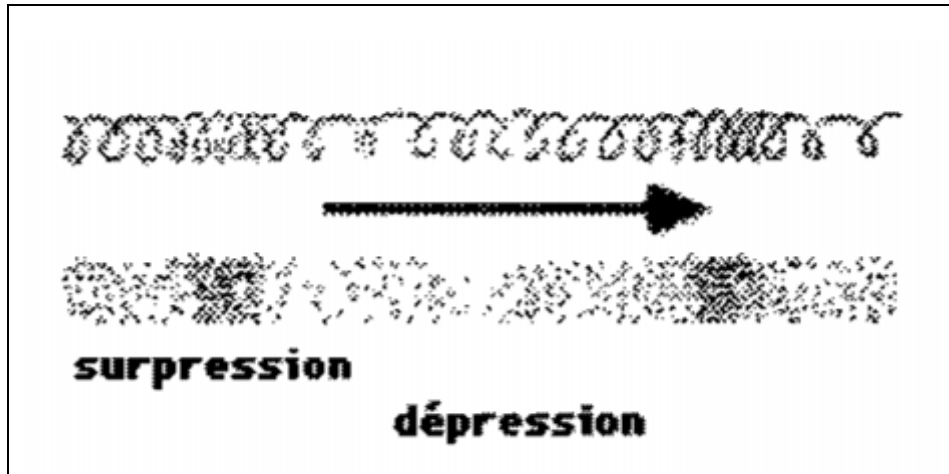


Figure 1 : Analogie avec un ressort.

Il s'agit d'une vibration longitudinale des molécules, phénomène prédominant lors de la propagation des ultrasons dans les tissus mous (**Figure 2**).

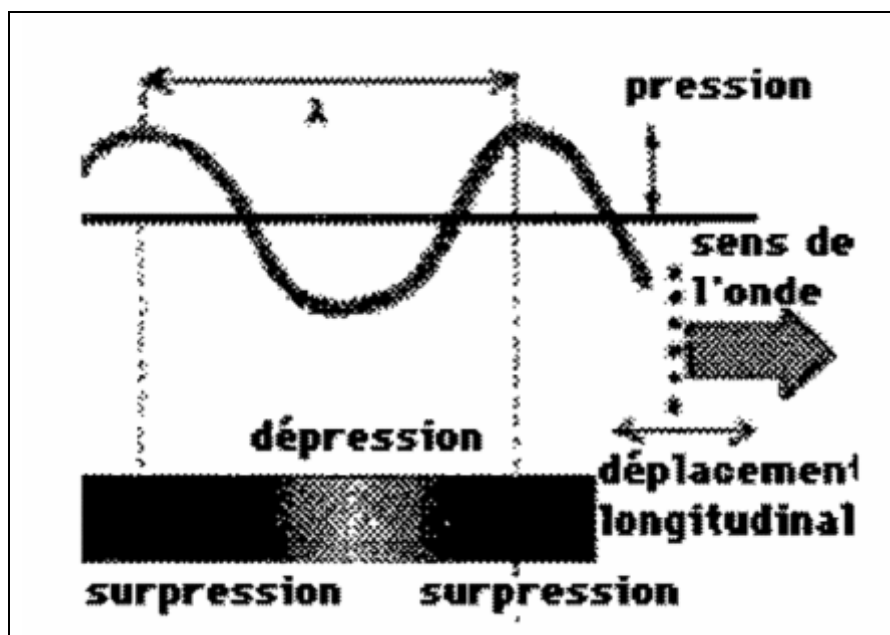
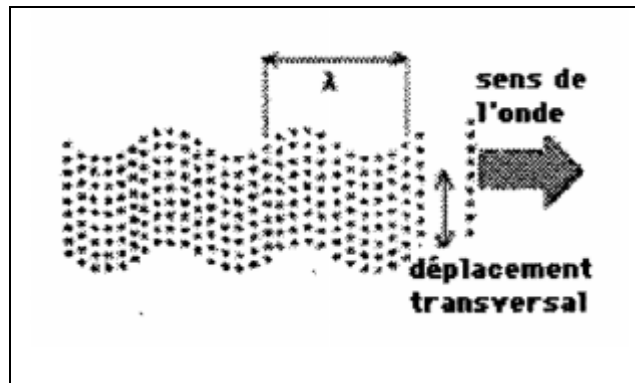


Figure 2 : Déplacement longitudinal engendré par l'onde ultrasonore.

Le front de l'onde est une surface telle qu'en tous points la vibration sonore est la même.(Figure3).



**Figure 3** : Déplacement transversal engendré par l'onde ultrasonore.

Mais dans les milieux solides, comme l'os il se forme en plus une vibration transversale (déplacements de cisaillement) perpendiculairement à l'axe de propagation des ultrasons. Cette propriété est utilisée en densitomètre ultrasonore.

#### **4- Propriétés physiques :**

Les ultrasons se propagent à une vitesse qui sera fonction de la nature du milieu, indépendamment de la fréquence de l'onde. Pour exemple, la célérité du son dans l'air n'est que de 300 m/s alors qu'elle est de 1500 m/s dans l'eau.

Dans l'organisme humain, les ultrasons vont se propager à une vitesse proche de 1500 m/s selon la nature des organes qu'ils traversent. [5]

#### **5- Interaction des ultrasons avec la matière :**

Les ondes ultrasonores, concentrées sous forme de faisceaux vont interagir avec la matière qu'elles traversent. Il se produit plusieurs phénomènes qui aboutissent à leur atténuation :

- une absorption dans les milieux homogènes.
- des réflexions, réfractions et diffusions aux changements de milieux .

##### **5.1- Principe de réflexion, transmission, réfraction, et diffusion des ultrasons :**

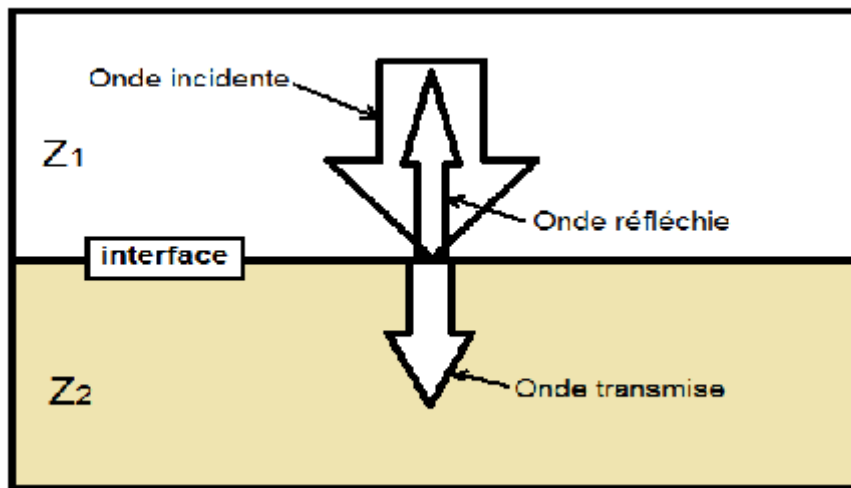
Les tissus présentent une certaine résistance au passage des ultrasons. Cette résistance, appelée **impédance** sera fonction du module d'élasticité et de la densité du milieu considéré. L'impédance est différente d'un tissu à l'autre et la limite entre 2 tissus constitue une **interface**.

## Chapitre 02 : La propagation des ultrasons dans la matière.

Une onde se propage à travers l'espace. Tout comme en optique, avec la lumière, l'onde rencontre dans son parcours, des interfaces séparant deux milieux de natures différentes.

A l'interface, l'onde se scinde en 3 : l'onde d'origine est appelée **onde incidente** ; une partie de l'énergie incidente est réfléchiée par l'interface, c'est l'**onde réfléchiée**, l'autre partie traverse l'interface, c'est l'**onde transmise**. [3]

Si l'incidence est directe (perpendiculaire à l'interface), la transmission se fait dans la même direction et le même sens que l'onde sonore, tandis que la réflexion se fait dans la même direction et dans le sens inverse. (**Figure 4**)



**Figure 4** : incidence perpendiculaire à l'interface.

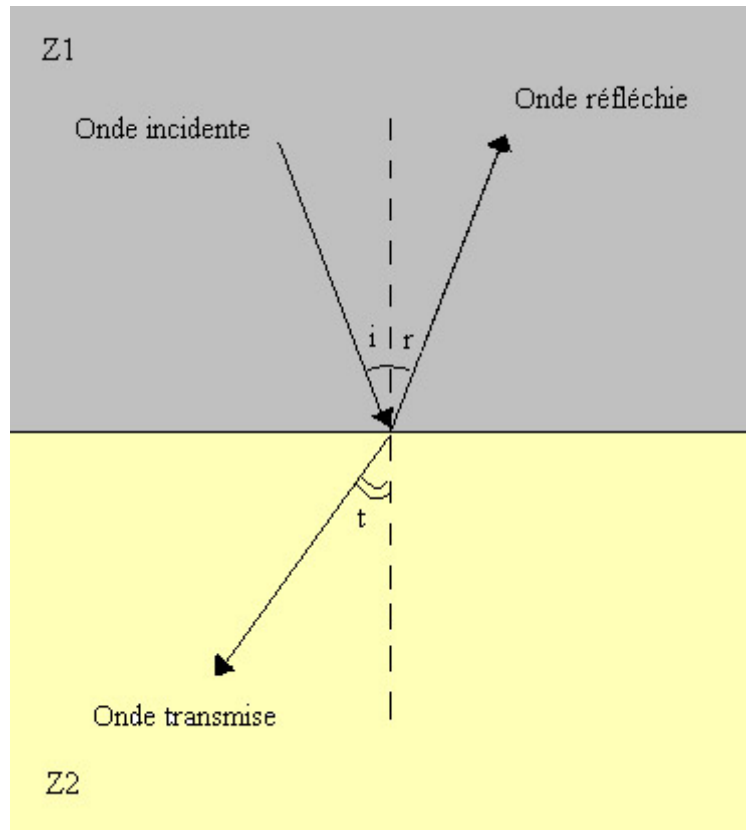
Lorsque l'onde d'incidence n'est pas perpendiculaire à l'interface :

- l'onde réfléchiée ne repart pas vers la source (sens inverse à l'incidence), mais elle est déviée d'un angle égal à celui de l'onde incidence ( $i=r$ ) par rapport à la normale ( la perpendiculaire à l'interface);
- l'onde transmise est également déviée, c'est le phénomène de **réfraction**

C'est en fonction des deux impédances  $Z1$  et  $Z2$  des deux milieux, que l'angle de réfraction et les énergies transmise et réfléchiée varient. La réflexion sera d'autant plus élevée que la différence des impédances sera importante. (**Figure 5**)

On peut noter que ces relations sont analogues aux lois de Descartes en optique, ce sont les relations de Snell.





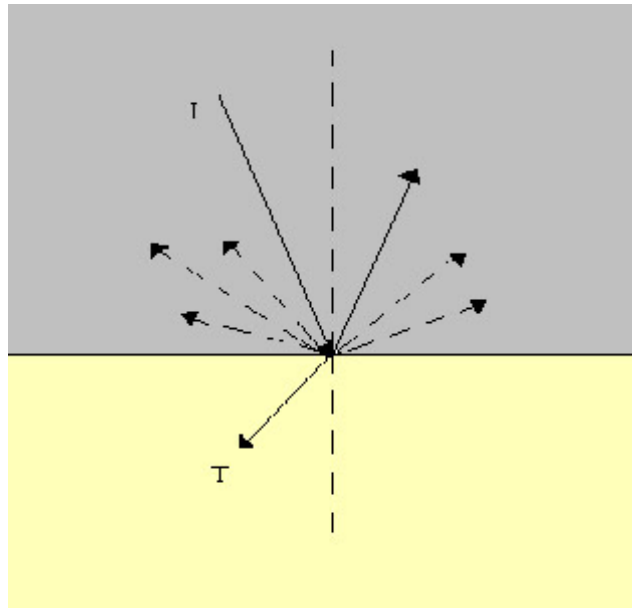
**Figure 5 :** incidence non perpendiculaire.

### **5.2-Atténuation des ultrasons :**

Au cours de son trajet, l'intensité de l'onde ultrasonore diminue rapidement dans les milieux traversés. Cette baisse est due à des phénomènes **d'atténuation** des ultrasons lors de leur pénétration dans les tissus.

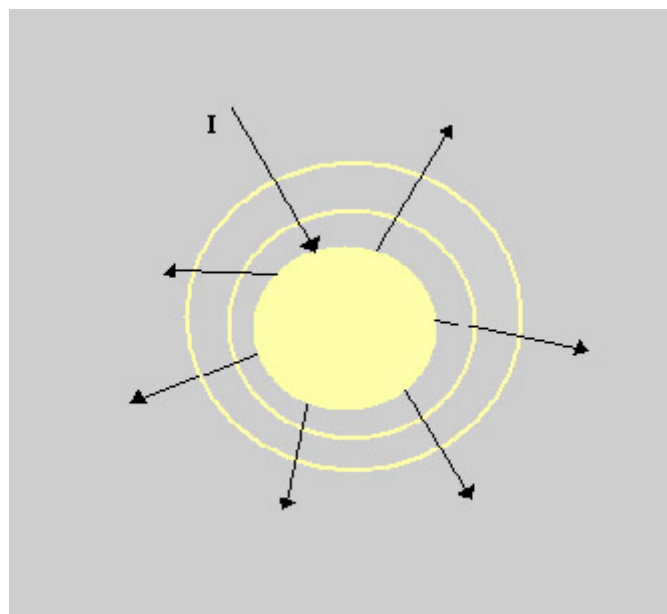
Quand l'onde incidente donne naissance à une onde réfléchie unique, **la réflexion** est alors dite **spéculaire**.

Sur des interfaces irrégulières, l'onde incidente forme de nombreuses ondes **réfléchies** dispersées en tout sens. Ce phénomène est celui de **la réflexion diffusé**, il entraîne la diminution de l'intensité de l'onde sonore. **(Figure 6)** [3]



**Figure 6 :** incidence avec des interfaces irrégulières.

Lorsque la taille de l'interface est inférieure à la longueur d'onde de l'ultrason, l'onde incidente est renvoyée dans une multitude de direction. C'est la **diffusion de l'onde ultrasonore**.(Figure 7).



**Figure 7 :** incidence avec interface qui a la taille inférieure à la longueur d'onde ultrasonore.

## Chapitre 02 : La propagation des ultrasons dans la matière.

L'atténuation dépend donc des interfaces en présence. De plus, elle dépend également de la fréquence, qui est caractéristique de l'onde ultrasonore. L'atténuation des ultrasons est d'autant plus importante si la fréquence des ultrasons augmentent.

Quand la différence de célérité des milieux est grande, l'angle de réfraction est important et l'axe de propagation de l'énergie s'écarte trop de celle du faisceau pour qu'il puisse y avoir analyse des structures profondes. (Figure 8)

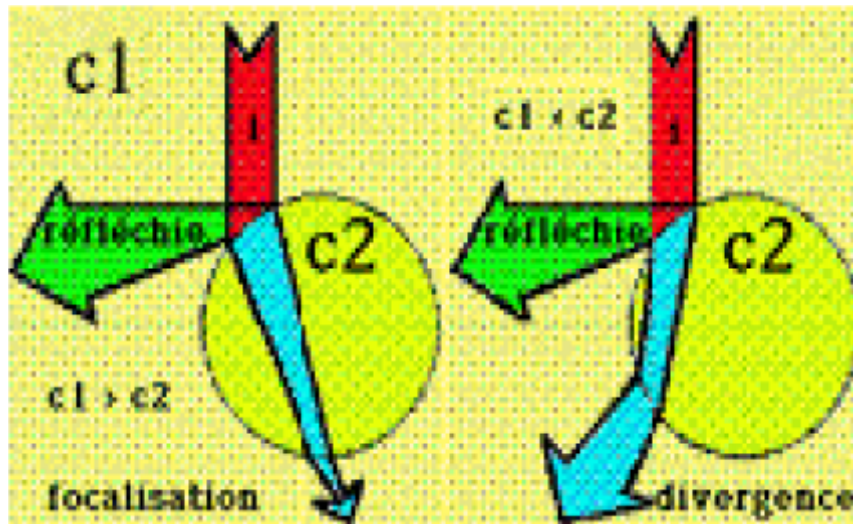


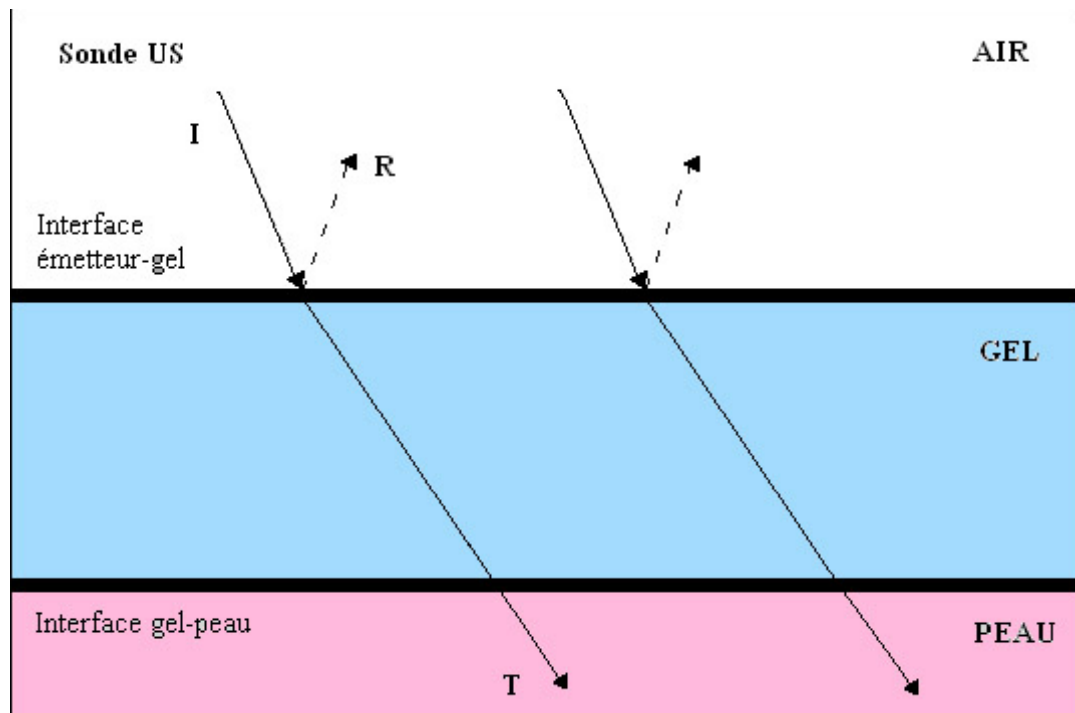
Figure 8 : Influence de la forme de l'interface sur l'angle de réfraction.

Quand l'interface est convexe (paroi d'un kyste), le faisceau transmis est non seulement réfracté mais également **focalisé**. En effet la célérité y est inférieure et le front de l'onde devient concave (retard des points latéraux).

Milieu	Fréquence Us (Mhz)	Coefficient d'atténuation (dB/cm)
Tissus mous	1	1
Tissus mous	3,5	3,5
Poumons	1	40
Poumons	2	80

### Pourquoi le médecin applique-t-il, un gel lorsqu'il effectue une échographie ?

Le contact entre la sonde et le ventre n'est pas parfait, car il existe une fine couche d'air entre la sonde et le ventre.(Figure 9)



**Figure 9** : transmission des ondes ultrasonore avec le gel.

Dans cet exemple, la valeur du coefficient de transmission T est égale à 0,1%, ce qui signifie que seulement **0,1%** de l'onde incidente est transmise à travers l'interface air-peau (en absence de gel), et que **99,9%** de l'onde incidente est réfléchi.

Il en résulte l'impossibilité d'explorer les poumons en échographie (car les poumons contiennent de l'air) et la nécessité d'appliquer un gel, dont l'impédance acoustique est proche de celle de la peau, entre les sondes utilisées et la peau, pour éviter les interfaces sonde-air et air-peau qui atténueraient considérablement le faisceau d'ultrasons.

Exemple :

Seuls 6% de l'énergie acoustique incidente sont réfléchis sur l'interface foie-rein droit ,alors que 40 % repartent vers la source au niveau de l'interface tissu mous-os. Plus marquée encore est la réflexion qui se produit lorsque l'onde rencontre une interface tissu-mous-air : la quasi-totalité de l'énergie est alors réfléchi. Ce cas se produit à la surface de la sonde ultrasonore. C'est la raison pour laquelle il faut interposer une substance entre la peau et la sonde : le gel utilisé possède une impédance acoustique intermédiaire  $Z_3$  telle que :

$$Z_3 = \sqrt{Z_1 Z_2}$$

## Chapitre 02 : La propagation des ultrasons dans la matière.

Avec  $Z_1$  = impédance proximale.

$Z_2$  = impédance distale.

$Z_3$  = impédance intermédiaire

Cette adaptation d'impédance améliore grandement la pénétration de l'énergie ultrasonore (gel adaptateur d'impédance).

Le corollaire de ce phénomène de réflexion est que l'onde transmise est d'intensité moins que celle de l'onde incidente.

### **6-Paramètres de l'onde ultrasonore :**

Plusieurs paramètres sont nécessaires pour caractériser l'onde ultrasonore :

#### **6.1-Célérité et impédance :**

La célérité de l'onde acoustique est la vitesse de propagation de la variation de pression dans le milieu : elle dépend uniquement du milieu. Le comportement d'un milieu matériel vis-à-vis des ultrasons est exprimé par une constante appelée impédance acoustique,  $Z$ .

L'impédance acoustique dépend de la masse volumique et de la compressibilité du milieu, c'est-à-dire de son aptitude à reprendre sa forme originale après déformation.

$$Z = \sqrt{\frac{\rho}{\chi}}$$

avec :  $Z$  = impédance acoustique en  $[\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}]$ .

$\chi$  = compressibilité du milieu en  $[\text{m}/\text{kg}\cdot\text{s}]$ .

$\rho$  = masse volumique en  $[\text{kg}/\text{m}^3]$

Elle est d'autant plus grande que la densité est importante et que la compressibilité est faible.

Elle traduit la plus ou moins grande aptitude d'un milieu donné à la pénétration des ultrasons et s'exprime en  $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ . Elle est faible pour l'air et très élevée pour l'os :

Le tableau 1 donne quelques valeurs de l'impédance ultrasonore pour certains milieux :

Milieu	Z en $10^6 \text{ kg}/\text{m}^2/\text{s}$
Air	0,0004
Tissus mous	1,63
Os	3,65 à 7,09

**Tableau 1**

## Chapitre 02 : La propagation des ultrasons dans la matière.

Cette impédance conditionne avec la masse volumique, et la célérité de l'onde ultrasonore :

$$C = \frac{Z}{\rho}$$

avec : C = célérité en [m/s]  
Z = impédance acoustique  
 $\rho$  = masse volumique

Le tableau 2 donne quelques exemples de célérité pour différents milieux.

Milieu	Célérité en m/s
air	343
graisse	1410-1470
foie	1535-1580
muscle	1545-1631
os	2100-4080

**Tableau 2**

Dans les tissus mous, la célérité variant peu, on considère qu'elle a une valeur moyenne de 1540 m/s : les faibles différences ne sont pas utilisées pour l'imagerie. Au niveau de l'os, la charge calcique modifie grandement la célérité ce qui autorise une approche densitométrique.

### **6.2-Fréquence et longueur d'onde :**

Les sons sont classés en quatre catégories selon leur fréquence ( f ), ou nombre de variations de pression par seconde (1 Hz = 1 cycle/s) (**Tableau 3**):

Sons	Fréquence
Infrasons	0 à 20 Hz
Sons audibles	20 Hz à 20 kHz
Ultrasons	20 kHz à 1 GHz
Hypersons	> 1 GHz

**Tableau 3**

Les ultrasons utilisés dans le diagnostic médical ont une fréquence comprise entre 1, et 10 MHz ( $10^6$  à  $10^7$  Hz).

## Chapitre 02 : La propagation des ultrasons dans la matière.

La distance séparant à un instant donné deux points du trajet de l'onde où la pression est la même (tout en variant dans le même sens) correspond à la longueur d'onde . Dans un milieu donné, elle est reliée à la fréquence par la formule :

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

avec :  $\lambda$  = longueur d'onde

$c$  = célérité (1540 m/s)

$f$  = fréquence

Elle diminue donc quand la fréquence augmente :

$$\lambda = 0,77 \text{ mm pour } f = 2 \text{ MHz}$$

$$\lambda = 0,31 \text{ mm pour } f = 5 \text{ MHz}$$

$$\lambda = 0,15 \text{ mm pour } f = 10 \text{ MHz}$$

L'onde ultrasonore dans un milieu homogène est cohérente, c'est-à-dire en phase : il n'y a pas superposition décalée de plusieurs ondes de fréquences et longueur d'onde identiques.

### **6.3-Pression et intensité :**

En chaque point, la pression acoustique varie selon la fréquence de l'onde ultrasonore. L'énergie délivrée au tissu dépend de ces variations de pression qui soumettent les particules du milieu à des mouvements vibratoires.

On appelle intensité ultrasonore l'énergie qui traverse perpendiculairement l'unité de surface pendant l'unité de temps. Elle est reliée à la pression acoustique par la formule :

$$I = \frac{p^2}{2 \rho c}$$

avec :  $p$  = pression acoustique en  $\left[10^2 \sqrt{\text{kgw/m}^4\text{s}}\right]$

$\rho$  = masse volumique

$c$  = célérité

Elle s'exprime en  $\text{W/cm}^2$  et a une valeur moyenne en échographie (échelle de gris) de  $94 \text{ mW/cm}^2$  alors qu'elle est de l'ordre de 1 à  $3 \text{ W/cm}^2$  en physiothérapie.

Les différences d'intensité s'expriment en décibels (unité relative) : si deux ondes ultrasonores ont des intensités absolues  $I_1$  et  $I_2$ , on dit que la différence de leurs niveaux d'intensité est de  $D_i$  décibels avec  $D_i = 10 \log I_2 / I_1$ . Ainsi si  $I_2 = 4I_1$ ,  $D_i = 6,02 \text{ dB}$ .

## 6.4-Faisceau ultrasonore :

L'onde ultrasonore peut se déplacer dans toutes les directions de l'espace (sifflet à ultrasons) : le front de l'onde est alors sphérique et l'on parle d'onde sphérique. (Figure 10)

Plus on est éloigné de la source ultrasonore, plus l'intensité est faible car l'énergie se répartit, la distance augmentant, sur une surface plus grande. L'intensité ultrasonore décroît donc, dans un milieu homogène comme l'inverse du carré de la distance.

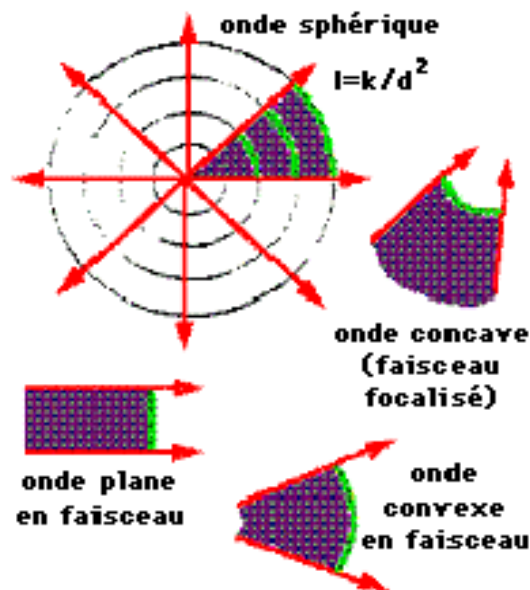


Figure 10 : Faisceau ultrasonore

## 6.5-Faisceau d'une onde plane :

La géométrie du faisceau dépend de la distance à laquelle on se place de la source, ainsi que de sa forme : il est possible de définir deux zones différentes (Figure 11).

-la zone de FRESNEL : si la source est circulaire, toute l'énergie est concentrée dans une zone cylindrique. Son diamètre  $d$  est celui de la source  $D$  et sa longueur  $L$  est donnée par la formule:

$$d = D \quad L = \frac{D^2}{4c} f$$

avec :  $d$  = diamètre de la zone en [m]

$L$  = Longueur de la zone en [m]

$D$  = diamètre de la source en [m]



## Chapitre 02 : La propagation des ultrasons dans la matière.

$c$  = célérité

$f$  = fréquence

Autrement dit, la longueur de cette zone augmente quand la fréquence augmente et quand son diamètre est majoré. C'est la partie utile du faisceau ultrasonore et l'idéal serait une grande longueur et un petit diamètre (notion de compromis). Le front d'onde y est plan.

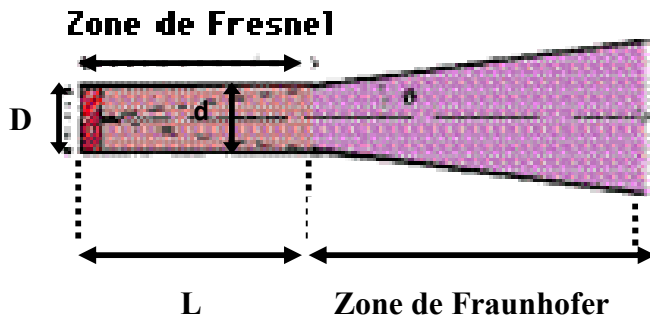


Figure 11 : Géométrie d'un faisceau d'une onde plane

-La zone de FRAUNHOFER : elle est plus éloignée de la source et sa forme est conique. Le faisceau va en s'élargissant selon un angle de divergence qui est constant. Cette divergence est inversement proportionnelle à la fréquence et au diamètre de la source :

$$\sin \theta = \frac{1.22c}{df}$$

avec :  $\theta$  = angle de divergence

$d$  = diamètre de la source

$c$  = célérité

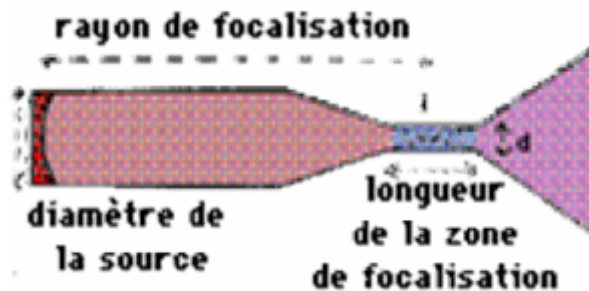
$f$  = fréquence ultrasonore

Le front d'onde est convexe dans cette zone, et il y a diminution rapide de l'intensité, car la surface sur laquelle elle se répartit augmente.

Deux paramètres conditionnent donc la géométrie du faisceau ultrasonore, la fréquence, et le diamètre de la source : quand ils augmentent, la zone de FRESNEL s'allonge et la divergence de la zone de FRAUNHOFER diminue, ce qui améliore la géométrie du faisceau.

### 6.6-Faisceau focalisé :

Il existe plusieurs moyens pour donner à l'onde un front concave et assurer ainsi sa focalisation, c'est-à-dire la concentration de son énergie sur une zone restreinte. Le moyen le plus simple est d'utiliser une source de surface concave. (**Figure 12**)



**Figure 12:** Géométrie d'un faisceau focalisé

Lorsque la source est circulaire concave, le zone focale est cylindrique d'une longueur L ,et d'un diamètre d donnés par les formules :

$$d = \frac{2.4c}{Df} \cdot F \quad , \quad l = \frac{d^2 f}{1.2c}$$

avec : d = diamètre de la zone focale

c = célérité

F = rayon de focalisation en [m]

D= diamètre de la source

f = fréquence en [1/s]

D'un point de vue plus pratique, diamètre et longueur de la zone focale varient dans le même sens or l'idéal serait d'avoir une zone de petit diamètre, la plus longue possible : la aussi notion de compromis. Le rapport  $l/d^2$  qui traduit ce compromis est proportionnel à la fréquence : les grandes fréquences autorisent une bonne focalisation.

## Chapitre 02 : La propagation des ultrasons dans la matière.

### 7-la vitesse de propagation des ondes ultrasonores :

En fait la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dépend du mode vibratoire des particules et du milieu élastique traversé ,et de sa densité  $\rho$  .

Elle est donnée par l'équation :

$$v = \sqrt{k / \rho}$$

$k$  : la constante élastique appropriée .dans le cas des gaz et des liquides  $k$  est le module d'élasticité .

Cette vitesse de propagation est lente dans l'air(330 m/s) , très rapide dans l'os(2700 m/s),et à peu près constante dans l'eau et les tissus biologiques(1540 m/s).Elle est plus lente dans le tissu adipeux que dans le foie et le muscle. [6]

La longueur d'onde  $\lambda$  d'une onde ultrasonore dans un milieu est reliée à la fréquence  $\gamma$  par l'équation :

$$v = \gamma . \lambda$$

Le tableau suivant donne quelques exemples des vitesses de propagation des ondes longitudinales et transversales dans les milieux les plus courants :

Matériau	$v_l$ :vitesse des ondes Longitudinales(en m/s) :	$v_t$ :vitesse des ondes transversales(en m/s) :
eau	1480	/
huile	1340	/
mercure	0450	/
acier	5940	3220
aluminium	6300	3100
altuglass	2680	1100

## Chapitre 02 : La propagation des ultrasons dans la matière.

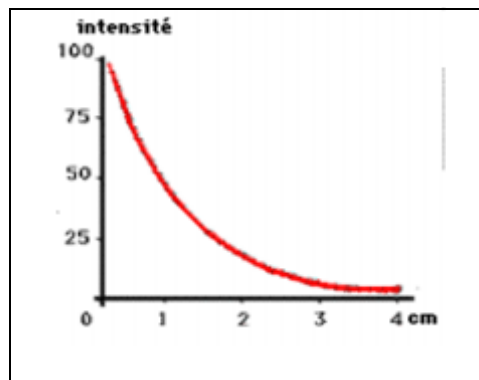
La vitesse de propagation  $V_s$  des ondes de surfaces est environ égale à 0.9 fois la vitesse de propagation des ondes transversales  $v_t : v_s = 0.9.v_t$

La vitesse de propagation des ondes de LAMB dépend non seulement des caractéristiques du matériau mais également de son épaisseur.

### **8-Atténuation d'une onde US dans le corps :**

Au total, l'énergie du faisceau ultrasonore s'épuise rapidement dans les milieux traversés et ce d'autant plus qu'ils sont hétérogènes. Cette atténuation est bien sûr le fait de l'absorption mais aussi des réflexions itératives et de la diffusion.

L'onde ultrasonore, en se propageant cède une partie de son énergie au milieu : il y a absorption de l'énergie ultrasonore et l'intensité du faisceau diminue. Cette diminution est totalement différente de celle due à l'augmentation de surface de l'onde ultrasonore et elle intervient même pour les ondes planes. **(Figure 13)**



**Figure 13** : Absorption des ultrasons dans la matière. [3]

Alors que l'absorption obéit à une loi exponentielle décroissante, l'atténuation décroît par paliers irréguliers beaucoup plus rapidement. Il faut de plus rajouter le fait que les échos que l'on cherche à recueillir doivent parcourir la même distance et aborder le même nombre d'interfaces. Si bien que les échos distaux qui reviennent sur la sonde sont particulièrement faibles! [3]

Cette absorption est liée essentiellement à des mécanismes de conduction thermique et de viscosité et ces mécanismes sont étroitement dépendant de la fréquence : les fréquences élevées provoquent de très nombreuses vibrations qui favorisent le transfert d'énergie.

Elle obéit à une loi exponentielle décroissante:

$$I = I_0 e^{-\alpha x}$$

## Chapitre 02 : La propagation des ultrasons dans la matière.

avec :  $I$  = intensité à la distance  $x$

$I_0$  = intensité initiale

$\alpha$  = coefficient d'absorption

$x$  = distance à la source

L'intensité ultrasonore décroît plus rapidement dans les premiers centimètres qu'en profondeur.

Le coefficient d'absorption qui définit le pouvoir de pénétration des ultrasons est à peu près proportionnel au carré de la fréquence ultrasonore :

$$\alpha = kf^2$$

avec :  $\alpha$  = coefficient d'absorption en dB / cm / Mhz

$k$  = constante

$f$  = fréquence ultrasonore

le tableau suivant nous donne quelques valeurs de  $\alpha$  pour différents milieux biologiques :

TISSUS	$\alpha$ en dB/cm/Mhz
Sang	0.1
Graisse	0.5
Foie	1
Muscle	1.5
Os	10
Poumon	20

**Tableau 4**

Ainsi quand la fréquence augmente, l'absorption croit : pour explorer des régions profondes telles que l'abdomen, il est nécessaire d'utiliser des fréquences basses (3,5 MHz).

Le coefficient d'absorption pour les tissus mous est en moyenne de 0,9 dB/cm/MHz.[3]

### **9-Effets biologiques des ondes ultrasonores :**

Les ondes ultrasonores ne sont pas ionisantes dans la mesure , Leur action sur la matière vivante est le fait de deux phénomènes :

- élévation thermique des tissus par absorption de l'énergie acoustique.
- cavitation par création de bulles de gaz ou de vapeur.

Ces phénomènes sont mis à profit en physiothérapie pour des traitements antalgiques et anti-inflammatoires : les intensités utilisées sont de l'ordre de 1 à 4 W/cm<sup>2</sup> en émission continue.

Des effets néfastes in vivo ont été rapportés par des auteurs anglo-saxons dans les années 70 concernant l'utilisation à visée diagnostique des ultra-sons. Ces derniers étaient accusés de léser l'oreille interne fœtale. Des expérimentations ont infirmé cette assertion.

L'intensité utilisée en échographie "échelle de gris" est de 94 mW/cm<sup>2</sup> et l'émission est pulsée:

l'énergie déposée est très faible.

En écho-doppler couleur, l'intensité est plus forte, 720 mW/cm<sup>2</sup>, la cadence des pulses est nettement augmentée (15 à 40 tirs /ligne) et la focalisation du faisceau concentre l'énergie (rapport des sections=10) : l'intensité atteint plusieurs W/cm<sup>2</sup> !!! [3]

### **10-L'utilisation des ultrasons:**

- Écholocation chez les animaux et application au sonar.
- Répulsion des nuisibles.
- Echographie et thérapies ultrasoniques (thermothérapie et sonication pour le thème SANTE).
- Télémétrie et nettoyage par sonication.
- La « sonication » est l'utilisation d'ultra-sons pour rompre les membranes des cellules, pour nettoyer ou désinfecter du matériel.

#### **10.1-Le repérage d'obstacles :**

En 1917, Langevin met au point le premier projecteur ultrasonore permettant d'obtenir des faisceaux suffisamment intenses et bien dirigés ; cet appareil est destiné à détecter les sous-marins ennemis. Le principe de cette méthode est simple : les ultrasons se réfléchissent sur un obstacle et reviennent à leur point de départ en produisant un écho : connaissant, d'une part, le temps séparant l'émission de l'onde et la réception de l'écho, d'autre part la vitesse de l'ultrason dans l'eau de mer (environ 1 500 m/s), il est facile de déduire la distance de l'obstacle dans la direction du faisceau. Cette méthode a été adaptée à d'autres problèmes : repérage d'obstacles tels que les icebergs, sondage, téléphonie sous-marine, repérage des bancs de poissons. Lors de la guerre de 1939-1945, le problème du repérage des sous-marins est redevenu d'actualité et de nombreux appareils appelés « asdics » puis « sonars » ont été construits. .[4]

### **10.2-L'utilisation industrielle :**

En métallurgie, les ultrasons sont utilisés pour le dégazage des métaux, pour la détection de défauts, pour l'usinage et la soudure de certains matériaux. Pour le perçage, un foret solidaire de la partie mobile d'un générateur d'ultrasons effectue des mouvements de va-et-vient à la fréquence des ultrasons. Bien que facilitée par la présence d'une pâte abrasive, cette opération est cependant relativement lente. Une précision de quelques micromètres est obtenue très facilement. De surcroît les matières les plus dures peuvent être percées par ce moyen.

Les ultrasons sont employés également pour l'amélioration des émulsions photographiques, la stérilisation de certains liquides, notamment du lait, la prospection de gisements minéraux, la déflagration d'explosifs commandée à distance, le nettoyage de certains corps et la soudure entre elles de matières plastiques souples ou rigides. Au point de vue médical, des succès ont déjà été obtenus dans le traitement des névralgies, de certains spasmes d'origine neurovégétative, de certaines formes d'artériosclérose. Les ultrasons ont été utilisés pour déterminer des lésions localisées de certains organes ou tissus (les ultrasons sont plus ou moins absorbés durant leur trajet à travers les tissus humains). Cette méthode d'étude a notamment été employée pour la recherche d'anomalies dans la boîte crânienne, au niveau des cordes vocales, pour l'observation de l'œil et pour des observations gynécologiques (en début de grossesse). Des cannes spéciales pour aveugles contiennent un émetteur d'ultrasons ; un récepteur recevant les ondes réfléchies par un obstacle utilise leur énergie pour la production de sons audibles. .[4]

### **Conclusion :**

Après avoir étudié les ultrasons de manière plus au moins détaillée, leurs propriétés physiques et leur interaction avec les différents types de matière, il nous sera plus aisé de comprendre le mode de fonctionnement et la logique sur lesquels est basée notre prothèse visuelle, lorsqu'il y est atténuation ou réflexion des ondes ultrasonores ...etc. Face aux obstacles de différentes natures.

### Références bibliographiques :

- [1]- <http://ultrasons.cowblog.fr/un-peu-d-histoire-2967943.html>
- [2]- <http://www.chuv.ch/rad/rad-trm-us-propphyus.pdf>
- [3]- [http://www.med.univ-rennes1.fr/cerf/edicerf/BASES/BA003\\_cv\\_rb\\_4.html](http://www.med.univ-rennes1.fr/cerf/edicerf/BASES/BA003_cv_rb_4.html)
- [4]- D. Ensminger, Ultrasonics : Fundamentals, Technology, Applications. Marcel Dekker, New York, 2de édition, 1988.
- [5]- D. Royer et E. Dieulesaint, Onde Élastiques dans les Solides - Tome 1 : Propagation Libre et Guidée. Masson, Paris, 1996.
- [6]- D. Royer et E. Dieulesaint, Onde Élastiques dans les Solides - Tome 2 : Génération, Interaction Acousto-Optique, Applications. Masson, Paris, 1999.
- [7]- Manuel de Physique de Terminale S, éditions Hachette , collection Hélios chapitre « Ondes mécaniques progressives et périodiques ».



## **Introduction :**

Les propriétés multiples des ultrasons permettent d'explorer des tissus biologiques, offrant ainsi un regard nouveau, notamment dans le domaine des diagnostics médicaux. Les ultrasons sont connus en médecine à la fois pour leurs applications diagnostiques (échographie, effet Doppler) et leurs effets thérapeutiques, notamment dans la destruction des calculs par onde de choc ou encore pour l'élimination des tumeurs par hyperthermie. Cependant, ce sont les applications diagnostiques des ultrasons qui sont les plus répandues : l'échographie, par exemple, représente aujourd'hui environ 25 % du chiffre d'affaire du marché de l'imagerie médicale.

Dans ce chapitre nous allons essayer de présenter les différents modes d'utilisation des ultrasons dans le domaine de la médecine.

## **1-Les nouvelles applications de l'imagerie médicale ultrasonore :**

Les techniques modernes d'imagerie médicale permettent de visualiser l'intérieur du corps humain de façon non-invasive et atraumatique.

Une sonde émet un faisceau ultrasonore qui se propage dans l'organisme (foie, cœur, rein, fœtus,...) et subissent une réflexion partielle (écho) à chaque variation d'impédance acoustique du milieu. Après traitement de ces différents signaux par des dispositifs électroniques et informatiques, on obtient une image en niveaux de gris de l'organe en temps réel.

Les ultrasons sont entièrement réfléchis par les os et les gaz, et ne peuvent donc pas être utilisés pour explorer le squelette ni les poumons. En revanche, l'eau propage extrêmement bien les ultrasons et quand on sait que le corps humain est composé aux  $\frac{3}{4}$  d'eau, ils sont tout à fait indiqués pour obtenir des images de qualité acceptable d'organes tels que le cœur (même en mouvement).[1]

Les propriétés multiples des ultrasons permettent d'explorer le cœur, des tissus biologiques, offrant ainsi un regard nouveau, notamment dans le domaine des diagnostics médicaux.

Les ultrasons sont connus en médecine à la fois pour leurs applications diagnostiques (échographie, effet Doppler) et leurs effets thérapeutiques, notamment dans la destruction des calculs par onde de choc ou encore pour l'élimination des tumeurs par hyperthermie.

Cependant, ce sont les applications diagnostiques des ultrasons qui sont les plus répandues : l'échographie, par exemple, représente aujourd'hui environ 25 % du chiffre d'affaire du marché de l'imagerie médicale. Depuis son apparition il y a une quarantaine d'années, plusieurs évolutions techniques n'ont cessé d'étendre les domaines d'application de ce type d'imagerie.

L'imagerie morphologique en temps réel (20 à 30 images/seconde) explore la réflectivité des tissus (relative à leur densité et leur élasticité) : c'est ce mode, dit mode "B", qui aboutit à des images codées en niveaux de gris. L'imagerie fonctionnelle (mode "Doppler"), codée en couleurs, révèle, quant à elle, la vitesse des tissus en mouvement. Elle est très utilisée pour mesurer la vitesse du sang.

## 2- Principe de fonctionnement de la sonde :

### 2.1- Transducteur :

Un transducteur est un élément qui transforme une forme d'énergie en une autre. Pour les sondes d'échographie, l'énergie électrique est convertie en ultrason et vice versa . Un microphone réalise le même type de transformation pour les sons audibles. Le transfert d'énergie utilise l'effet piézoélectrique.

Dans une sonde d'échographie, l'excitation du cristal piezoélectrique est réalisé par une impulsion électrique, à la manière d'une cloche que l'on frappe. Le cristal entre alors en **résonance** et émet des ultrasons dont la fréquence dépend de l'épaisseur du cristal. La fréquence est d'autant plus élevée que le cristal est mince. [2]

### 2.2- Conception de base :

#### ❖ Sonde :

boitier isolant de protection comprenant :

La Céramique ,l'amortisseur et l'adaptateur.(**Figure 1**).

#### ❖ Céramique (cristaux de synthèse):

- émettrice et réceptrice des US.
- caractérisée par une Fréquence de résonance ( $F_0$ ), fonction de son épaisseur et de la nature du matériau.

#### ❖ Amortisseur (placé en arrière):

- amortit les vibrations de la céramique.
- absorbe le rayonnement émis en arrière.

#### ❖ Adaptateur d'Impédance :

- Z proche des tissus biologiques.
- rôle de protection de la céramique, isole la peau.
- non conducteur. [2]

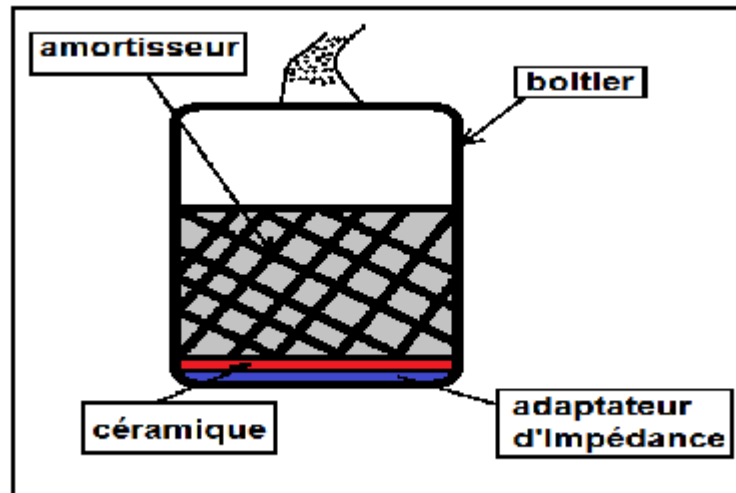


Figure 1 : conception d'une sonde

### 3-Applications diagnostiques :

On distingue schématiquement quatre grands domaines d'application de routine des ultrasons en diagnostic médical :

- l'imagerie des tissus peu mobiles et directement accessibles à travers la peau : c'est le cas par exemple de l'utérus, du foie, des voies biliaires, des reins, de la rate, des seins, et de la thyroïde ...
- l'exploration des structures en mouvement, comme le cœur et le sang circulant, qui repose sur l'utilisation de techniques combinant échographie rapide, techniques Doppler et enregistrement du mouvement des structures en mode temps-mouvement (ou T.M.).
- l'échographie par voie endocavitaire lorsqu'il est nécessaire de rapprocher le capteur de la région à explorer pour gagner en résolution, ou pour éviter de traverser des structures osseuses ou gazeuses. On utilise pour cela des capteurs miniaturisés et de fréquence ultrasonore relativement élevée.
- les applications nouvelles qui relèvent d'équipes spécialisées, comme l'échographie-Doppler cérébrale, l'échographie avec produits de contraste, l'échographie 3D, l'échographie interventionnelle avec guidage de ponctions ou de gestes thérapeutiques, l'imagerie ultrasonore paramétrique ...

### **4- Produits de contraste ultrasonore :**

Plusieurs compagnies pharmaceutiques développent des microbulles de gaz encapsulé, d'un diamètre de quelques microns, qui peuvent être injectées par voie intraveineuse. Ces microbulles constituent un moyen de contraste, car le gaz est un puissant réflecteur des ultrasons.

Les applications majeures envisagées sont nombreuses :

- l'étude de la vascularisation des tissus.
- la caractérisation de certaines tumeurs.
- l'exploration de la fonction cardiaque et du flux coronaire.
- l'étude des shunts entre le cœur droit et le cœur gauche, etc.

Dans l'avenir on envisage d'utiliser ces microbulles pour transporter des molécules à visée thérapeutique. Celles-ci pourraient être délivrées localement par rupture des microbulles dans un champ ultrasonore de moyenne puissance.

De plus, on tente de fabriquer des produits de contraste ciblés, capables de reconnaître des sites de fixation spécifiques dans l'organisme. Ces produits pourraient véhiculer des médicaments qui seraient alors libérés in situ par irradiation ultrasonore.

### **5- Historique de l'effet doppler :**

Cet effet fut découvert par un physicien autrichien, Christian DOPPLER . En 1842 il publia un article décrivant ce phénomène et 3 ans plus tard une expérience confirma sa théorie : 15 trompettistes furent placés dans un train et les expérimentateurs se placèrent au bord de la voie. Quand le train arriva, les trompettes retentirent et la hauteur des sons émis sembla diminuer quand le train fut passé comme l'avait prédit DOPPLER. Les premières études sur les ultrasons n'étaient pas appliquées à la médecine, mais visaient à permettre la détection des sous-marins à l'occasion de la Première Guerre mondiale.

En 1951, deux britanniques, le médecin J.J. WILD et l'électronicien J. REID, présentèrent à la communauté médicale un nouvel appareil : l'échographe. Il était destiné à la recherche des tumeurs cérébrales mais fera carrière dans l'obstétrique. L'usage en obstétrique date du début des années 1970 avec les appareils permettant de capter les bruits du cœur fœtal.

### **6-Principes de l'effet doppler :**

La vélocimétrie Doppler à ultrasons (UDV) mesure la vitesse par un sondage du milieu à l'aide d'une onde acoustique à très haute fréquence (ultra-sons)  $f \sim 1 \text{ MHz}$  .

Cette méthode ne fonctionne que dans les liquides, l'impédance acoustique étant infinie pour ces longueurs d'onde dans les gaz.

Les caractéristiques de cette méthode sont :

## Chapitre 03 : Application des ultrasons en médecine.

- technique non invasive.
- fonctionne dans les liquides transparents ou non.
- ⇒utilisation en échographie médicale (fluide : sang).
- ne nécessite pas d'étalonnage.
- réponse linéaire.
- donne accès à une composante de vitesse.
- mesure selon une direction (1D).
- Peu couteuse. [2]

Il est nécessaire d'appliquer un gel entre l'émetteur et la paroi du milieu à explorer pour empêcher la rupture d'impédance liée à l'air.

Un examen Doppler vasculaire se pratique au moyen d'une sonde Doppler, ou l'angle entre le flux, et l'axe de la sonde doit être inférieur à  $60^\circ$ , et surtout il est indispensable de connaître l'orientation de la vitesse, pour estimer son amplitude, la sonde émet donc des ultrasons à une fréquence précise, en direction de l'artère à étudier. Ces ultrasons viennent "percuter" les hématies en mouvement, or la taille des hématies est inférieure à la longueur d'onde des ultrasons utilisés. Il se produit donc un phénomène de diffusion.

L'énergie rétro-diffusée par les hématies, revient vers la sonde qui va mesurer la fréquence des ondes réfléchies. Cette nouvelle fréquence sera différente de celle des ultrasons émis en raison de l'effet Doppler qui intervient 2 fois: d'abord entre la sonde (émetteur fixe) et les hématies (récepteurs mobiles), puis de nouveau entre ces dernières (émettrices mobiles) et la sonde (récepteur fixe), l'analyse de la variation de la fréquence des ondes réfléchies, permet de déterminer la vitesse du sang dans les vaisseaux : ce procédé s'appelle vélocimétrie Doppler. (Figure 2)

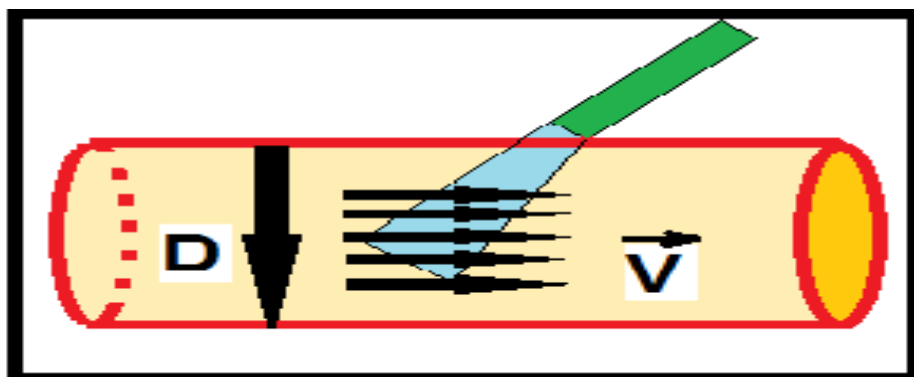


Figure 2 : Schéma du principe de l'effet doppler. [2]

Écoulement laminaire :

- vitesses stables.
- profil concentrique régulier. [2]

$$\text{Débit : } dV/dt = S \cdot (dx/dt) = S \cdot V \text{ avec } S = \pi \cdot D^2/4$$

### **7- Les techniques à effet Doppler :**

La variation de fréquence  $\Delta F$ , par effet Doppler entre les ultrasons incidents (fréquence  $F$ ) et les ultrasons réfléchis (fréquence  $F'$ ) par les globules rouges du sang en mouvement, permet de détecter la vitesse  $v$  de ces derniers en appliquant la formule :  $\Delta F = F - F' = 2F v \cos\theta / c$ , dans laquelle :

-  $c$  est la vitesse des ultrasons

-  $\cos\theta$  l'angle moyen entre l'axe d'émission-réception d'ultrasons et l'axe du vecteur vitesse.

Les vitesses normales d'écoulement du sang étant comprises entre 0 et 150 cm s<sup>-1</sup>, et la fréquence des ultrasons  $F$  variant de 2 à 10 MHz selon le domaine d'application, la variation de fréquence  $\Delta F$  est comprise entre 0 et 10 kHz, c'est-à-dire qu'elle se situe dans la gamme des fréquences audibles.

Lors de la réflexion des ultrasons sur un ensemble de particules en mouvement, le signal dû à l'effet Doppler est composé de signaux de différentes fréquences  $\Delta F_i$ , correspondant aux différentes vitesses  $v_i$  des réflecteurs présents dans le volume de mesure. Le signal Doppler  $\Delta F$  présente donc un certain spectre de fréquences qui pourra être détecté par un analyseur de spectre. Chaque signal Doppler correspondant à une vitesse déterminée est alors détecté avec une amplitude qui dépend du nombre de particules ayant cette vitesse, à un instant donné, dans l'artère. On démontre aisément qu'en cas d'écoulement parabolique chaque fréquence (ou vitesse) est détectée avec le même niveau énergétique, car il y a le même nombre de particules dans chaque tranche de vitesse. Par contre, si l'écoulement présente un profil non parabolique, cette relation n'est plus vraie : en particulier, en cas d'écoulement turbulent, l'instabilité du spectre est caractéristique et permet de graduer le degré de turbulence, et indirectement de connaître le pourcentage de réduction du calibre du vaisseau.

Le traitement électronique du signal Doppler se fait essentiellement de deux manières différentes :

- On peut rechercher la fréquence moyenne du spectre, ce qui fournit directement une information sur la moyenne des vitesses le long de la section, c'est-à-dire une donnée proportionnelle au débit instantané.
- On enregistre l'évolution du spectre au cours du temps, afin de conserver toutes les informations contenues dans le signal d'origine et caractériser ainsi les écoulements non paraboliques. [13,14].

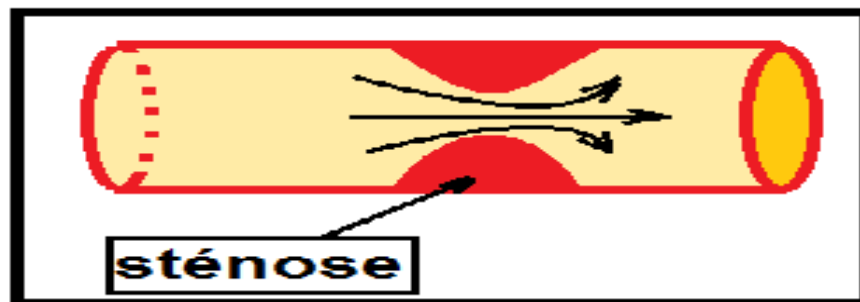
### **8- Les modalités d'examens Doppler :**

Il existe plusieurs types d'examens Doppler :

#### **8.1-Le Doppler à émission continue :**

Les appareils à émission continue, dans lesquels le capteur est constitué d'une céramique émettrice, qui transmet en permanence un signal ultrasonore dans le milieu, et d'une céramique réceptrice qui détecte les signaux réfléchis. Ces appareils ont été largement utilisés pour l'exploration de vaisseaux superficiels, faciles à identifier (vaisseaux du cou et des membres en particulier). Ils sont reliés soit à un enregistreur graphique pour l'enregistrement des courbes de vitesse, soit à un système d'analyse spectrale, suivant le mode de traitement du signal Doppler utilisé. Cette technique donne l'évolution dans le temps de la vitesse des globules rouges : on obtient une courbe de vélocité. L'aspect de cette courbe évolue en fonction des territoires explorés et des pathologies rencontrées. Elle permet de détecter les varices, des séquelles après une phlébite, les sténoses (**Figure 3**), les troubles de la circulation cérébrale... [13]

Les appareils à émission continue sont peu onéreux et faciles à mettre en œuvre ; ils sont cependant limités lorsque les vaisseaux à explorer sont profonds ou lorsque plusieurs vaisseaux peuvent se superposer dans l'axe du capteur.



**Figure 3** : Ecoulement turbulent causé par une sténose. [2]

Écoulement turbulent :

- accélération des vitesses au centre.
- ralentissement et turbulences en périphérie.

#### **8.2- Le Doppler pulsé pour les vaisseaux profonds :**

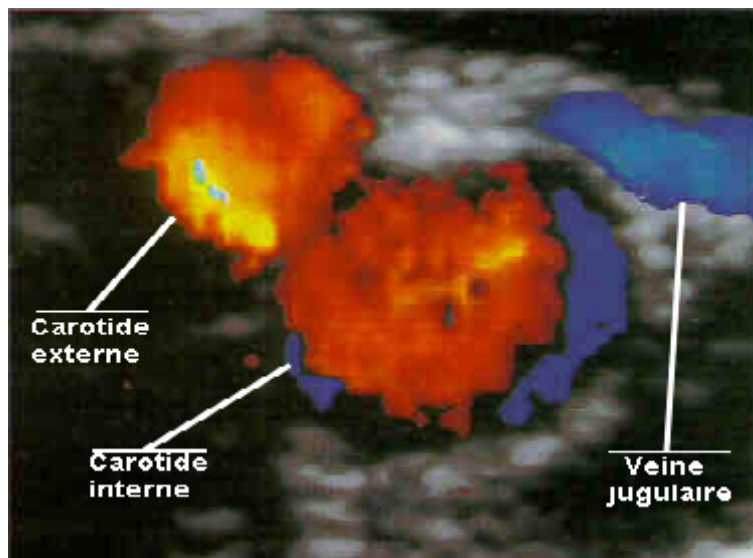
Les appareils à émission pulsée émettent une brève impulsion, comme en échographie, puis le transducteur devient récepteur et détecte le signal réfléchi en fonction de la profondeur. Une porte électronique permet de sélectionner le signal correspondant à la région à explorer et

évite la superposition d'informations provenant de cibles placées en avant ou en arrière. Il existe des systèmes Doppler multiportes, qui explorent la circulation à plusieurs profondeurs simultanément. Les appareils Doppler pulsé sont très utilisés dans l'exploration de la circulation abdominale (aorte abdominale, artères rénales) et intracrânienne, ainsi que pour étudier les flux intracardiaques. Ils sont à la base des systèmes d'imagerie du sang circulant par Doppler couleur. [14]

### **8.3- Le Doppler couleur :**

En utilisant un système Doppler pulsé multiporte, il est possible d'étudier la circulation à plusieurs profondeurs simultanément. Si on translate rapidement la ligne de visée Doppler, on peut effectuer une cartographie des flux sanguins. Un code de couleurs permet de présenter par exemple en rouge le sang qui se déplace vers le capteur (effet Doppler positif) et en bleu le sang qui s'éloigne du capteur (effet Doppler négatif) (**Figure 4**). L'intensité de la couleur est fonction de l'amplitude du vecteur vitesse. On peut ainsi superposer sur une même coupe, en échelle de gris, les structures cardiaques ou vasculaires, et en échelle colorée les vitesses d'écoulement sanguin. Une variante consiste à moduler l'échelle de couleur par l'énergie du signal Doppler et non pas par la valeur de la variation de fréquence Doppler. [13,14]

Cette « angiographie à ultrasons » est extrêmement importante pour les diagnostics de malformations cardiaques chez le nouveau-né, l'étude des valvulopathies acquises en cardiologie adulte, l'exploration des maladies vasculaires et la recherche d'anomalies de la circulation chez le fœtus ou dans les tumeurs. Ces appareils se généralisent de plus en plus en raison de leur intérêt diagnostique majeur.



**Figure 4 :** Coupe transversale du tronc carotidien en échographie "couleur".



## 8.4-Association échotomographie et Doppler (système Duplex) :

L'exploration du flux dans les vaisseaux profonds ou dans les cavités cardiaques est difficile sans un repérage anatomique précis. Cette investigation devient alors possible grâce à l'utilisation d'un système Doppler pulsé, couplé à un échographe à balayage mécanique ou électronique (**Figure 5**). Certains éléments du capteur sont alors utilisés en alternance, pour l'imagerie et l'exploration Doppler. Après avoir repéré les structures cardiaques ou vasculaires sur l'image échographique, on positionne dans cette image la ligne de visée et la fenêtre d'exploration Doppler. Ce système combiné permet de connaître simultanément le calibre des vaisseaux ou de l'orifice cardiaque, étudié et la vitesse du sang, et donc de calculer le débit sanguin à travers la peau, ou d'effectuer une corrélation entre les perturbations hémodynamiques et les anomalies morphologiques. [14]

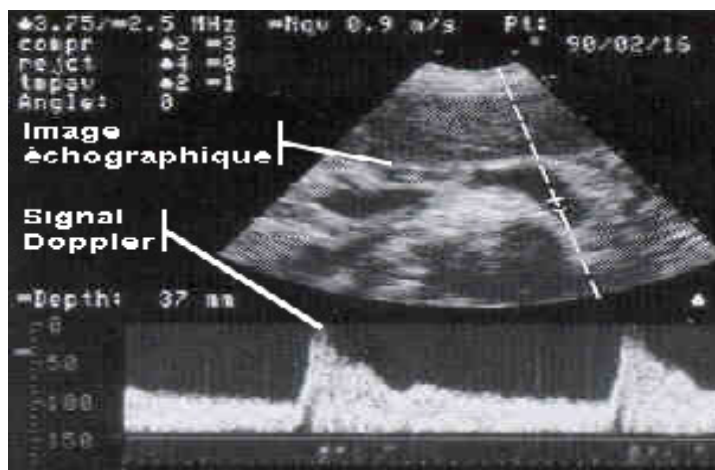
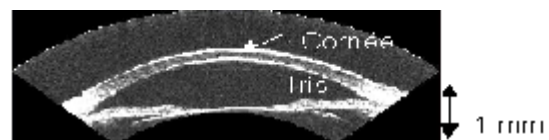


Figure 5 : visualisation Duplex d'un vaisseau artériel .

## 9-Autre domaines d'utilisation des ultrasons :

### 9.1-Les ultrason en ophtalmologie :

La résolution des images est plus fine lorsque la fréquence des ondes ultrasonores augmente. Toutefois, la transparence aux ultrasons des tissus biologiques décroît très rapidement lorsque la fréquence des ondes augmente. Des fréquences ultrasonores comprises entre 2 et 15 MHz sont habituellement utilisées chez l'homme, pour des résolutions au mieux de l'ordre de quelques centaines de microns. [9]



**Figure 6 :** Imagerie échographique de l'œil à haute fréquence. Image de la partie superficielle du globe oculaire (en haut à droite), et représentation de 3D de la courbure de la cornée (en bas à droite).

Dans les 20 dernières années, des progrès importants ont été réalisés dans la conception et la fabrication de capteurs en matériaux piézo-composites ou polymères. Les capteurs ont ainsi gagné en sensibilité, en largeur de bande et en densité d'éléments. Certains sont miniatures, d'autres résonnent à haute fréquence, entre 20 et 100 MHz. De nouvelles applications se sont développées comme l'exploration des organes par voie endocavitaire ou l'imagerie de l'œil (**Figure 6**) et de la peau (**Figure 7**) avec des résolutions spatiales pouvant atteindre quelques dizaines de microns. Le progrès des calculateurs et des séquences d'acquisition volumique a permis l'obtention d'images 3D spectaculaires, principalement dans le domaine de l'obstétrique.

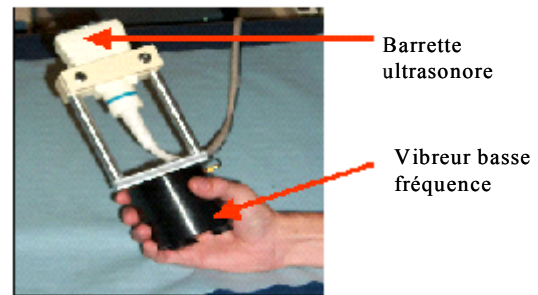


**Figure 7 :** Empreinte digitale. Image obtenue avec un capteur de 20 MHz.

### **9.2-Élastographie :**

L'élastographie ultrasonore est une nouvelle technique permettant de réaliser une imagerie quantitative des paramètres élastiques des tissus. Cette technique consiste à détecter la déformation des tissus lorsqu'ils sont soumis à une contrainte externe ou à des vibrations internes d'origine physiologique comme les contractions cardiaques. Elle vise ainsi à compléter par une mesure quantitative la palpation effectuée par le médecin pour dépister la présence d'un nodule dur. Ce geste médical simple est souvent le premier geste pratiqué dans le dépistage d'un certain nombre de cancers, par exemple les cancers du sein ou de la prostate. (**Figure 8**).

En réalité, la palpation est un geste qui permet une évaluation subjective de la rigidité des tissus, c'est-à-dire de leur module d'Young. L'élastographie met en œuvre des techniques d'inter-corrélation entre images échographiques successives pour suivre la déformation des tissus et former une cartographie du module de rigidité (module d'Young) tissulaire. [5,6]

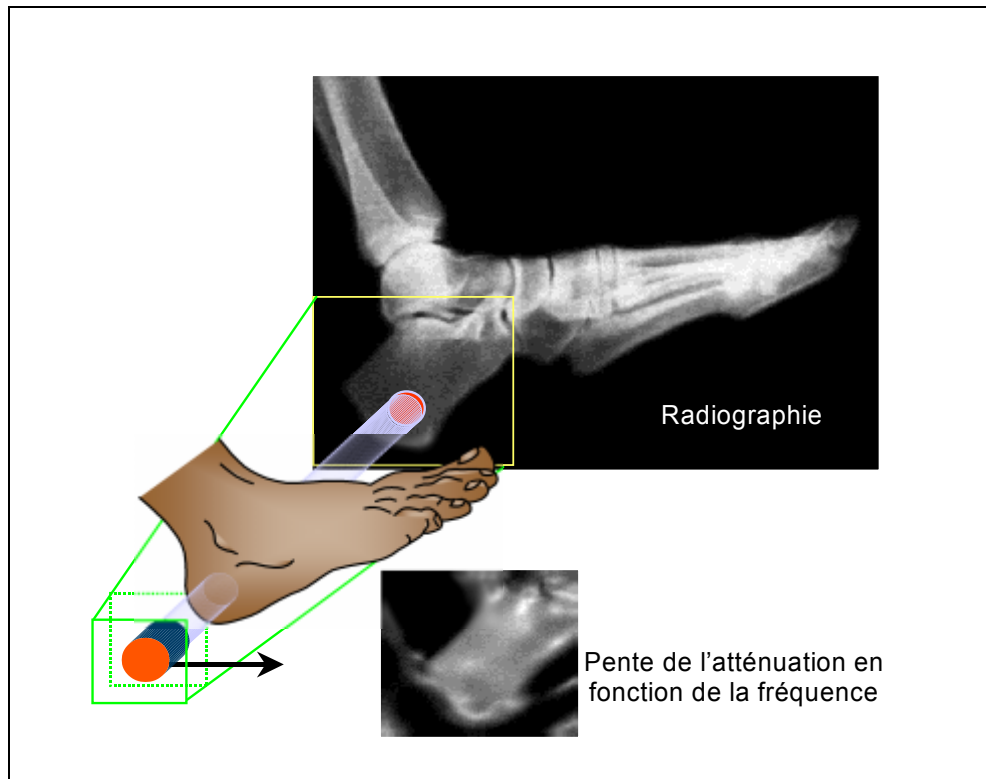


**Figure 8 :** Exemple de prototype de sonde réalisée au LOA, utilisée pour le dépistage du cancer du sein par élastographie. La sonde échographique conventionnelle est montée sur un système vibrant à basse fréquence pour générer une onde de cisaillement dans les tissus. L'imagerie d'élasticité des tissus peut être réalisé en même temps qu'un examen échographique classique.

### **9.3-Densitométrie osseuse ultrasonore :**

La densitométrie osseuse est aussi connue sous le nom d'ostéodensitométrie ou encore d'absorptiométrie biphotonique, ces propriétés peuvent se révéler très intéressantes car elles sont reliées à la densité, et à la résistance osseuse. En particulier, les ondes se propagent moins vite, mais elles sont aussi moins atténuées lorsque l'os est peu dense. C'est ce que l'on observe chez des sujets atteints d'ostéoporose, pour lesquels les os sont devenus si poreux qu'ils finissent par se fracturer spontanément. Les paramètres acoustiques tels que l'atténuation ou la vitesse des ultrasons sont utilisés pour la prédiction du risque de fracture. La densitométrie osseuse ultrasonore regroupe l'ensemble des techniques ultrasonores utilisées pour évaluer la résistance du squelette et prédire le risque de fracture. **(Figure 9).**

Le principe de mesure des propriétés acoustiques de l'os repose sur la transmission d'une onde ultrasonore de basse fréquence (de 250 kHz à 1,25 MHz selon la technique et le site de mesure) à travers l'os ou le long de sa surface corticale. Il suffit pour cela de disposer au moins deux capteurs (un émetteur et un récepteur) soit de part et d'autre du site squelettique mesuré (transmission transverse), soit le long de sa surface (transmission axiale). Il s'agit donc d'une mesure en transmission, ce qui différencie la densitométrie ultrasonore osseuse des autres applications diagnostiques ultrasonores qui fonctionnent en réflexion selon le principe de l'échographie. [7]



**Figure 9 :** Illustration de l'imagerie osseuse par transmission transverse. L'image du talon obtenue à partir de la mesure de la pente de la droite d'atténuation en fonction de la fréquence est ici comparée à la radiographie standard à rayons X.

L'ostéoporose est une maladie diffuse du squelette caractérisée par une masse osseuse basse et des altérations de la micro-architecture du tissu osseux conduisant à une augmentation de la fragilité osseuse et de la susceptibilité aux fractures. Les méthodes de référence reposent sur l'absorption de rayons X par le tissu osseux. D'introduction récente, les méthodes ultrasonores voient leur place au sein de l'arsenal des techniques d'évaluation osseuse croître régulièrement, et ce pour plusieurs raisons : d'une part parce qu'il s'agit d'une technique au coût modéré, sans irradiation et aux résultats cliniques indiscutablement prometteurs, d'autre part parce que les ultrasons, en tant qu'ondes élastiques, ont le potentiel d'apporter une information précieuse sur des facteurs osseux, tels que sa densité, sa micro-architecture ou l'élasticité du tissu, qui déterminent sa résistance. L'examen quantitatif ultrasonore, à l'instar de la densitométrie à rayons X, se prête bien au dépistage à l'échelle d'une population des sujets à risque de fracture comme aux mesures répétées pour le suivi des sujets au cours du temps. [8]

### **10-PROPRIETES BIOLOGIQUES :**

Les effets des ultrasons ne sont pas encore complètement élucidés mais il est clair, cependant, qu'ils ont des effets sur les tissus organiques. On remarque que l'énergie mécanique est convertie en énergie thermique. [10]

### **10.1-Effet mécanique :**

Les vibrations provoquent dans les tissus des compressions alternées à des expansions selon une périodicité correspondant à leur fréquence, ce qui cause des variations de pression. Cet effet mécanique provoque de véritables micromassages qui peuvent aboutir à une dilacération des fibres du tissu conjonctif. Cet effet est appelé, effet fibrolytique ou sclérolytique, mis à profit dans le traitement des adhérences et des cicatrices. [12]

### **10.2-Effet thermique :**

La mesure de la température de la peau et du tissu sous-jacent montre qu'elle augmente au niveau du territoire soumis aux vibrations ultrasonores. Elle s'accompagne évidemment d'une vasodilatation. Simultanément à cette augmentation de la température, se produit une modification de la perméabilité des membranes. L'effet thermique, résulte des frictions moléculaires provoquées par les vibrations. La modification de perméabilité des membranes, s'explique par ces mobilisations moléculaires.

Les réactions thermiques se produisent essentiellement aux sites de réflexion (c'est à dire aux niveaux des plans de séparation). Du fait des différences de coefficients d'absorption, des réflexions et des interférences, la production de chaleur dans le champ d'action des ultrasons n'est pas homogène. On compense cette absence d'homogénéité par un déplacement continu du projecteur.

Il y a production de chaleur en particulier dans le tissu osseux, les cartilages, les tendons, le tissu musculaire et la peau. [10,11,12]

### **10.3-Effet antalgique :**

La conductibilité nerveuse peut subir un ralentissement voire une interruption momentanée. Ceci s'expliquerait par une dépolarisation des fibres nerveuses afférentes due à l'effet thermique.

Par contre l'effet des ultrasons sur le système nerveux central est assez néfaste. Il apparaît que le système nerveux central est très sensible aux ultrasons, on peut observer des lésions allant de la tuméfaction du cylindraxe à la destruction complète. Dans certains cas, il y a un accroissement de la sécrétion de sérotonine, dont la signification reste obscure.

### **10.4-Effet destructeur :**

L'application des ultrasons, non plus sur un tissu humain, mais in vitro, fait apparaître, à condition d'augmenter considérablement la puissance par cm<sup>2</sup>, un effet destructeur important, avec libération de bulles gazeuses dans les tissus : c'est le phénomène de cavitation.

## 11-Applications en thérapie :

### 11.1-Effets thermiques des US :

- Atténuation : transfert d'énergie au milieu.
- Seulement pour des énergies importantes, bien supérieures à celles du diagnostic.
- En application continue, pour des puissances supérieures à 160 dB et une fréquence de 1 MHz on peut avoir des effets thermiques utilisables
- Utilisation en dermatologie et rhumatologie. [4]

### 11.2-Effets de cavitation :

- Utilisation d'un gradient de pression pour provoquer des déchirures dans les tissus.
- 10 W/cm<sup>2</sup> ® passage à l'état gazeux des gaz dissous (loi de Henry).
- Création de nombreuses bulles onde de choc = 1000 atm.
- Application : lithotripsie extra-corporelle. [4]

La puissance et la durée de traitement varie en fonction du siège et de la nature de la lésion (ces valeurs sont données à titre indicatives, elles doivent être adaptées au patient) :

	Puissance (W/cm <sup>2</sup> )	Temps d'application (sec)
Superficielle et aiguë	0.5	60
Superficielle et chronique	0.8 à 1	70
Profonde et aiguë	1 à 1.2	80
Profonde et chronique	1.5	90

**Tableau[4]**

Si on utilise la forme pulsée, on peut doubler la puissance. Sous eau, également, on double la puissance.

Le temps de traitement, quant à lui, dépend de la surface à traiter et de l'ERA de la tête de l'ultrason.

$$\text{Temps de traitement} = (\text{surface à traiter} / \text{ERA}) \times \text{temps d'application.}$$

Si on doit traiter une lésion profonde et chronique d'une surface de 25 cm<sup>2</sup>, avec une tête d'US de 5 cm<sup>2</sup> il faudra :  $(25 / 5) \times 90 = 7.30$  min de traitement.

Les critères d'utilisation sont, en effet, la puissance, la fréquence, la durée, la modulation {continu (stable) ou pulsé (labile)}. Le choix dépend des circonstances.

Ainsi, on utilise une fréquence de 3 mégacycles pour les applications superficielles, tandis qu'un mégacycle servira aux applications plus profondes.

## Chapitre 03 : Application des ultrasons en médecine.

---

Si on prévoit une interface relativement superficielle comme au voisinage d'un os superficiel, on évitera une puissance trop forte, de peur de déclencher des phénomènes de cavitation, par accumulation excessive d'énergie.

Lors de l'application des U.S., il faut y associer une mobilisation passive puis active de la zone traitée. Cette mobilisation permet d'utiliser de façon optimale les modifications bénéfiques thermo-induites des propriétés mécaniques du collagène.

### **11.3- INDICATIONS :**

- L'arthrose (gonarthrose, coxarthrose).
- Les capsulites, les raideurs articulaires.
- Cicatrices et adhérences, chéloïde.
- D'autres rhumatismes abarticulaires, comme les tendinopathies.
- Les séquelles fibreuses des entorses et lésions musculaires.
- Les douleurs post-zostériennes.
- La maladie de Dupuytren.

### **11.4- CONTRE-INDICATIONS :**

Les ultrasons ne doivent jamais être utilisés :

- sur les cartilages de conjugaison (chez l'enfant ).
- sur les gonades.
- sur un utérus gravide.
- sur des métastases.
- sur un matériel d'ostéosynthèse scellé.

Il faut se méfier de leur application sur des phénomènes inflammatoires et infectieux aigus (en tout cas pas en continu), zones mal vascularisées, greffes récentes et fractures non consolidées.

Les ultrasons ont certaines potentialités destructrices. Leur emploi surtout en statique, impose une certaine prudence. Cela peut entraîner une destruction tissulaire, d'abord marquée à la peau, surtout si l'énergie est trop forte et la durée d'application trop longue, (cela n'est pas une raison pour minimiser exagérément l'intensité ou le temps d'application). Il faut, bien entendu, surveiller l'échauffement thermique qui est parallèle à la capacité destructrice des ultrasons.

## Chapitre 03 : Application des ultrasons en médecine.

---

L'accident est rare, l'incident est plus fréquent: mauvaise tolérance, douleur, accentuation des contractures (préférer les formes pulsées), certains malades peuvent ressentir une certaine excitation, parfois une tendance à l'insomnie.

Sur des hématomes et des zones inflammatoires, les ultrasons peuvent produire de véritables collections purulentes, septiques ou non. Donc, il sera déconseillé de faire des US en traumatologie fraîche, tant que l'hématome et / ou l'œdème ne sont pas résorbés.

De même, on évitera de faire des U.S. sur la tête et sur le tronc. Pour le traitement des rachialgies, on préférera au champ thermique ultrasonore ou électromagnétique, utiliser des courants électriques qui sont plus efficaces et présentent moins de contre-indications.

### **Cas particulier :**

En continu, l'action antalgique des U.S. est obtenue grâce à la chaleur qui provoque une élévation du seuil douloureux. Cet effet est perdu, en pulsé.

Mais nous pouvons faire un U.S. en pulsé qui associe les effets sclérololytiques et antalgiques, à condition d'utiliser des U.S. pulsés à 50 Hz (souvent  $\frac{1}{2}$ ). En effet, une vibration mécanique à une fréquence de 50 Hz produit une antalgie.

Cette modalité thérapeutique donne des résultats particulièrement intéressants sur les tendinopathies, les séquelles fibreuses traumatiques, les capsulites et les raideurs articulaires.

A l'heure actuelle, les progrès technologiques permettent d'obtenir, en temps réel, des images échographiques bidimensionnelles où la couleur vient compléter l'information des images en niveaux de gris en précisant le sens de circulation du sang dans le tissu investigué.

Les échographes permettent également d'associer l'image et le son en combinant l'échographie et le Doppler, c'est le système Duplex. En outre, l'imagerie en 3D est en passe d'effectuer une percée très importante dans le monde médical.

### **Conclusion :**

L'utilisation des ultrasons en médecine s'accroît de jour en jour du fait qu'elle comporte moins d'effets secondaires par rapport aux autres techniques se basant, par exemple, sur les rayons x, les rayons Gamma...etc. vont-ils –les ultrasons- totalement les remplacer dans un futur proche ? Cette question se pose de nos jours, par les chercheurs et médecins, et seul l'avenir pourra nous répondre avec certitude.



### Références bibliographiques :

- [1]- <http://www.cnrs.fr/cw/fr/pres/compress/transversales/vivant/art3.pdf>
- [2]- [https://facmed.univ-rennes1.fr/wkf/stock/RENNES20110331095543cpiszkorUS\\_PACES\\_2010-2011.pdf](https://facmed.univ-rennes1.fr/wkf/stock/RENNES20110331095543cpiszkorUS_PACES_2010-2011.pdf):
- [3]- <http://users.teledisnet.be/web/edi01731/ultrasons.htm>
- [4]- <https://facmed.univ-rennes1.fr/wkf/stock/RENNES20090317042111cpiszkorUS2009.pdf>
- [5]- <http://www.creatis.insa-lyon.fr/site/fr/Recrutement/39079>
- [6]- <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2006ISAL0070/these.pdf>
- [7][http://www.doctissimo.fr/html/sante/principalespatho/sa\\_1024\\_densitometrie\\_oss.htm](http://www.doctissimo.fr/html/sante/principalespatho/sa_1024_densitometrie_oss.htm)
- [8]- <http://www.kup.at/kup/pdf/Meno4-2002-CH-20.pdf>
- [9]- <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0181551205811155>
- [10]- M. Hogenkamp, E. Milttelmeijer ; La thérapie interférentielle ; Enraf-Monius, Pays-Bas, 1988.
- [11]- R.Hoogland ; Ultrasonothérapie ; Enraf-Monius, Pays-Bas, 1988.
- [12]- F. van den Bouwhuijsen, V. Maassen ; Thérapie par ondes courtes pulsées continues ; Enraf-Monius, Pays-Bas, 1988.
- [13]- Léandre Pourcelot, L'Examen Doppler des vaisseaux périphériques, Paris, In vivo, 1982
- [14]- Pourcelot L. et Descotes J., « *Effet Doppler et mesure du débit sanguin* », C R Acad Sc. Paris, n° 261, 1965, p. 253-6

## Introduction :

De tout temps, la vue s'est imposée comme étant le sens le plus utilisé par les êtres vivants afin de se repérer dans l'environnement. Cependant, la vie nous a prouvé que son utilisation n'est pas indispensable à une adaptation correcte au milieu de vie. En preuve les exemples bien distincts que sont l'aveugle et la chauve-souris qui, bien que cette dernière soit dotée de la vue, se déplacent tous deux sans utiliser leurs yeux.

Peut-on s'inspirer de certains êtres vivants qui vivent à l'aise sans voir? Peut-on s'adapter à son environnement sans utiliser la vue ?

Pour répondre à tous ses questions dans ce chapitre, nous allons dans un premier temps expliquer le fonctionnement de l'œil, puis la cécité visuelle ses causes et ses catégories, ensuite nous allons présenter l'écholocation et son utilisation à travers l'histoire pour en finir avec quelques inventions qui visent à aider les patients atteints de cécité visuelle à se déplacer avec plus d'autonomie, se basant sur un principe semblable au notre.

## 1-L'œil et son fonctionnement :

Rien de plus naturel que la vision... et pourtant ! Le fait de capter la lumière et de la transformer en un scénario visuel sensé, présente d'énormes difficultés techniques.

L'œil doit d'abord obtenir une image du monde extérieur parfaitement au point sur la rétine, ce qui demande un système optique élaboré (composé de la cornée, du cristallin et du diaphragme irien). Ensuite le système nerveux (rétine, voies visuelles et cerveau) doit transmettre fidèlement cette image depuis l'œil jusqu'au cerveau. Enfin, ce dernier doit réélaborer les informations reçues pour les faire émerger sous la forme d'une image.

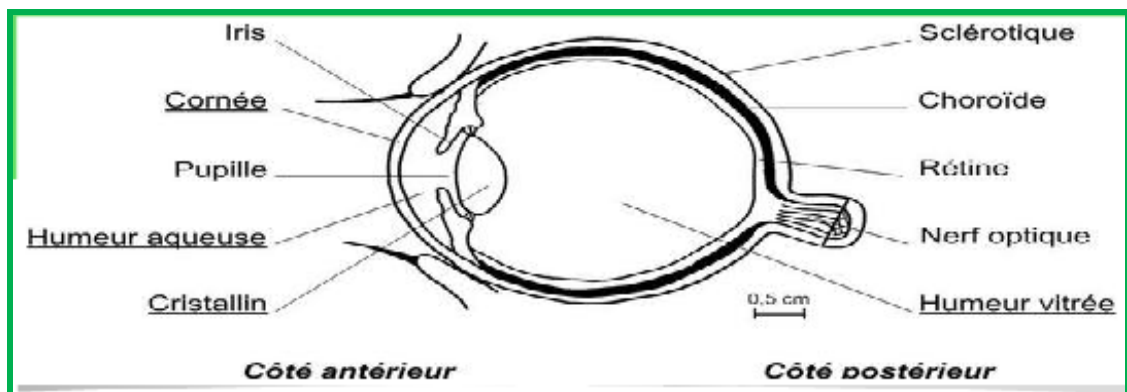


Figure 01 : La composition de l'œil [1 ]

### 1.1-Composition de l'œil :

Pour recevoir les rayons, l'œil est équipé d'un appareil optique complet :

**La cornée :** c'est une sorte de fenêtre, par laquelle la lumière provenant de l'extérieur pénètre dans notre organisme. Elle joue un rôle très important dans la focalisation de la lumière sur la

rétine car c'est elle qui permet la réception de la lumière nécessaire à la production d'une image. C'est pourquoi elle doit toujours être parfaitement propre et transparente. La fermeture régulière des paupières et la sécrétion lacrymale maintiennent la surface de la cornée sans impuretés. Elle est séparée de l'iris par l'humeur aqueuse qui a pour but de maintenir la forme du globe oculaire mais aussi de nourrir la cornée qui ne dispose d'aucun vaisseau sanguin pour l'irriguer.

**L'iris** : sert de diaphragme : il s'ouvre ou se ferme pour laisser passer plus ou moins de lumière. Il est constitué de deux groupes de muscles : l'un composé de fibres radiales (disposées comme les rayons d'une roue) qui élargissent la pupille - située en l'espace libre de son centre ; l'autre, comportant des fibres circulaires, qui la rétrécissent. Ces deux actions permettent de modifier le diamètre de la pupille et donc de réguler la quantité de lumière entrant dans l'œil (comparaison avec le diaphragme d'un appareil photo qui détermine le diamètre de l'objectif).

**Le cristallin** : La principale tâche du cristallin est de permettre les ajustements nécessaires à la focalisation des objets à toutes les distances. Cette focalisation s'effectue par un changement de courbure, soit par une mise sous tension, soit par un relâchement des tendons qui fixent le cristallin à la paroi interne du globe oculaire. Le cristallin se bombe pour focaliser les objets de près et devient plus plat pour rendre nets ceux situés au loin.

**La rétine** : épaisse d'un quart de millimètre, est constituée de trois couches de neurones. Elle est maintenue contre la paroi de l'œil par le corps vitré qui garantit la rigidité du globe. La lumière arrive sur la rétine et une image inversée de l'objet s'y forme. C'est elle qui contient les neurones nécessaires à la transmission d'énergie au cerveau qui interprétera les informations reçues et permettra la perception visuelle de l'image. [2]

### **1.2-Fonctionnement de l'œil : la perception d'images :**

La rétine est constituée de trois couches de neurones. La couche la plus externe comporte des photorécepteurs (neurones sensitifs sensibles à la lumière). Ces photorécepteurs sont situés dans la fovéa (fovéa : région centrale de la macula ; macula : région centrale de la rétine, proche de l'axe optique) et sont de deux types différents :

Environ 5 millions de cônes : séparés en trois types, chacun étant plus sensible à une couleur qu'aux autres. C'est de ce découpage de l'image en 3 couleurs primaires que vient la vision des couleurs. Ils sont donc utilisés pour une vision diurne ou colorée.

Environ 120 millions de bâtonnets : plus sensibles à la lumière et sont donc stimulés pour une vision nocturne.

En réaction à la lumière, une modification chimique transforme l'énergie lumineuse en énergie électrique qui est transmise au cerveau grâce aux cellules ganglionnaires contenues dans la couche la plus interne de la rétine, en passant par le nerf optique.

C'est le cerveau qui réalise ensuite la partie la plus complexe de regroupement de toutes ces informations pour former une image mentale en couleur de notre environnement.

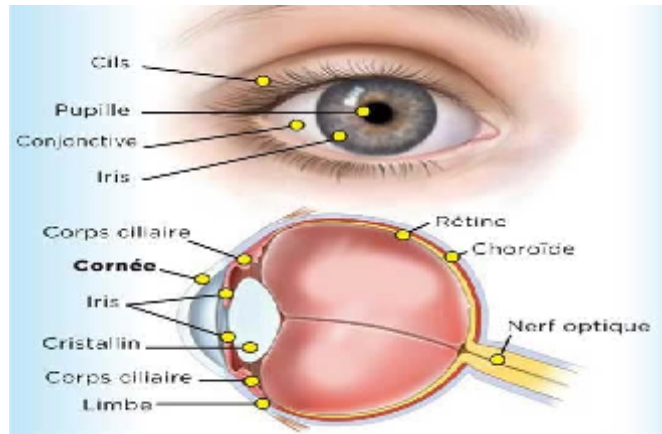
En conclusion, la lumière issue de l'objet traverse la cornée et l'humeur aqueuse puis franchit la pupille dont le diamètre varie suivant la luminosité. Elle traverse ensuite le cristallin et le corps vitré puis atteint la rétine. L'ensemble des milieux transparents équivaut à une lentille convergente. L'œil donne d'un objet éclairé une image renversée sur la rétine.

Lorsque l'on modifie la distance « objet lentille », il faut modifier la distance « objet écran » pour obtenir une image nette. Dans l'œil, on ne peut pas modifier cette distance mais la distance focale de l'œil peut varier, un œil sans anomalies voit toujours une image nette : l'œil s'accommode grâce à des petits muscles qui contractent ou étirent le cristallin.

L'œil donne d'un objet éclairé une image renversée sur la rétine. Des messages sont alors transmis au cerveau par l'intermédiaire du nerf optique. Le cerveau traite les informations qu'il reçoit et l'objet est vu redressé. [3]

### 2-La cécité visuelle :

#### 2.1-Définition de la cécité :



**Figure 02 :** Composition de l'œil humaine

La cécité est le fait d'être aveugle, totalement ou partiellement, quelle qu'en soit la cause et que cet état soit ou non réversible. On estime à 40 millions le nombre d'aveugles dans le monde.

La cécité peut être totale ou partielle (c'est l'amblyopie), présente dès la naissance, ou survenir au cours de la vie, être définitive ou passagère. Les causes de cécité sont très nombreuses et varient selon les parties du monde : dans les pays industrialisés, en dehors des maladies congénitales et des traumatismes, c'est une complication du diabète sucré, la rétinopathie diabétique ; dans les pays en développement, la cause principale est une maladie parasitaire, le trachome.

### 2.2-La cécité visuelle dans le monde :

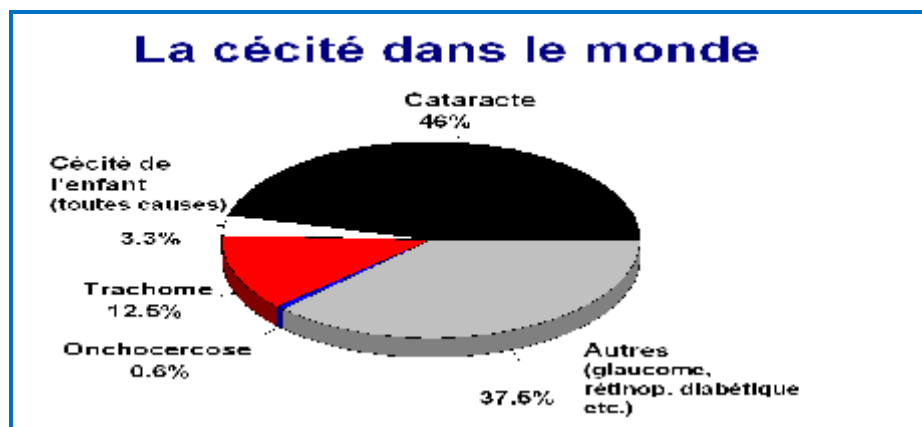


Figure 03 : la cécité dans le monde.[5]

On estime aujourd'hui à 180 millions le nombre de gens qui souffrent de handicap visuel dans le monde. Sur ce total, près de 45 millions sont aveugles et, de ce fait même, ne peuvent se déplacer sans aide. Ils ont généralement besoin d'un appui sur le plan professionnel et/ou social.

La perte de vision comporte d'énormes souffrances pour les personnes touchées et leur famille. C'est aussi un problème de santé publique et un problème socio-économique pour les pays, notamment ceux qui sont en développement, où vivent 9 aveugles sur 10. En fait, près de 60% d'eux se trouvent en Afrique subsaharienne, en Chine et en Inde.

Plus de 50% des 45 millions d'aveugles du monde souffrent de cataracte. Les autres souffrent pour l'essentiel de maladies comme le glaucome, le trachome, l'onchocercose (également connue sous le nom de cécité des rivières) ou de différentes pathologies entraînant une cécité de l'enfant.

Malgré une cinquantaine d'années d'efforts qui ont débuté avec des activités organisées de lutte contre le trachome, la charge mondiale de la cécité ne cesse de s'accroître essentiellement en raison de la croissance démographique et du vieillissement. Si des ressources supplémentaires ne sont pas mobilisées de toute urgence et si des efforts ne sont pas faits pour freiner cette tendance, la charge mondiale de la cécité risque de doubler d'ici 2020 et ce sont les pays en développement qui supporteront le plus lourd fardeau. [4,5]

### 2.3- Cécité évitable :

Selon des estimations de l'Organisation Mondiale de la Santé, environ 80% des cas de cécité dans le monde sont évitables : soit ils sont la conséquence de pathologies qui auraient pu être évitées ou maîtrisées si les connaissances et les interventions disponibles avaient été appliquées à temps (par exemple pour le trachome et la cécité des rivières), soit ils peuvent être soignés et la vision peut être rétablie (par exemple pour la cataracte).

Des progrès notables ont déjà été réalisés dans la prévention de la cécité évitable grâce à des efforts individuels de la communauté internationale, notamment ceux de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) et de ses Etats Membres, d'autres institutions du système des Nations Unies, d'organisations non gouvernementales (ONG) et du secteur privé. [6]

## 2.4-Causes et types de cécité :

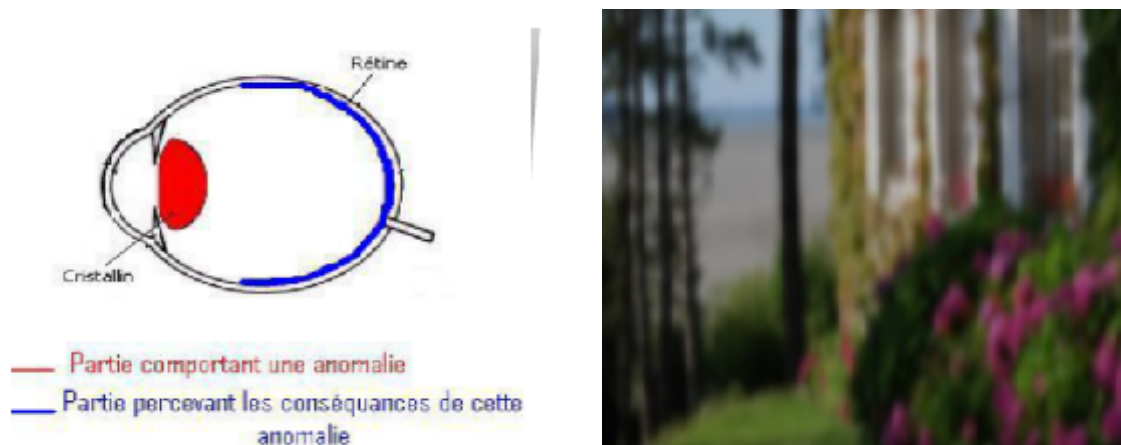
Il existe 5 catégories de déficiences visuelles, mais seules trois d'entre elles correspondent à la notion de cécité :

- **Catégorie I** : La déficience visuelle profonde. En pratique, le sujet compte les doigts à 1 mètre.
- **Catégorie II** : La cécité presque totale. En pratique, le sujet voit bouger la main à 1 mètre.
- **Catégorie III** : La cécité absolue. Pas de perception lumineuse, à fortiori absence de l'œil. [7]

### ❖ Les causes de la cécité :

#### a-La cataracte :

La cataracte est la première cause de cécité dans le monde, à l'origine de 40 % des cas. Elle entraîne plus de 400 000 opérations chaque année.



**Figure 04** : La cataracte lésion et vision. [1,8]

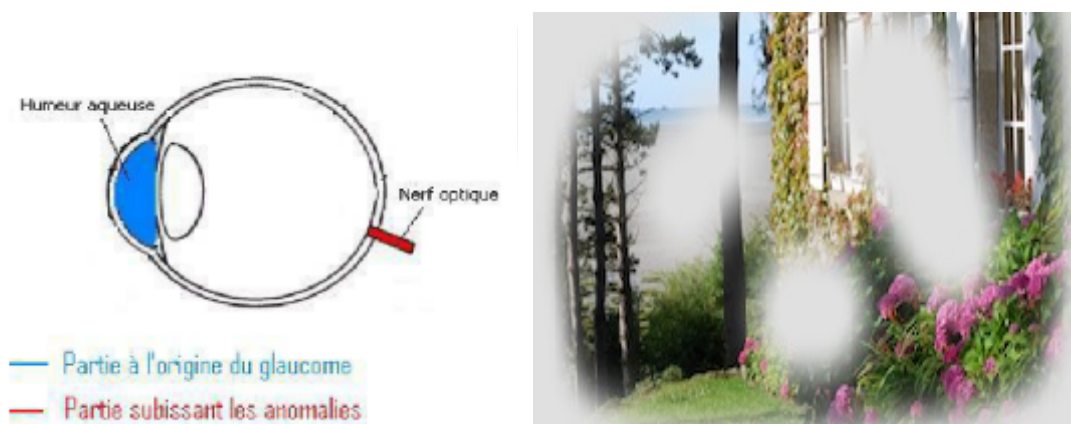
La cataracte correspond à l'opacité du cristallin de l'œil empêchant la formation d'une image claire sur la rétine. Elle est le plus souvent due à l'âge car le cristallin vieillit mal et s'opacifie avec le temps. Mais il existe aussi la cataracte congénitale qui est présente dès la naissance, la cataracte traumatique due à un choc sur l'œil et la cataracte médicamenteuse, liée à la prise de cortisone par exemple.

Elle se caractérise principalement par une baisse de l'acuité visuelle, ou encore par des éblouissements importants la nuit, la perception de halos ou d'étoiles autour des sources de lumière, et enfin l'altération de la vision des couleurs.

On ne peut la soigner que par intervention chirurgicale. Celle-ci consiste à injecter dans l'œil une lentille pliable (un cristallin artificiel) qui remplacera le cristallin naturel. Le cristallin

naturel est réduit en petits morceaux par des ultrasons à l'intérieur de l'œil et est ensuite aspiré à travers une incision de 3 mm. Il arrive parfois qu'une cataracte secondaire se manifeste après cette intervention, due à des cellules qui ont échappées au nettoyage de la capsule de la lentille pliable, provoquant une seconde opacification du cristallin. Ceci est cependant rare. [9]

### **b-Le glaucome est la troisième cause de cécité mondiale :**



**Figure 05 :** Le glaucome lésion et vision.[1,8]

Il existe deux principaux types de glaucomes, le glaucome à angle fermé (très douloureux) et celui à angle ouvert (asymptomatique). Le glaucome à angle ouvert est le plus fréquent.

Un glaucome entraîne une destruction lente du nerf optique. Il se caractérise par une hausse de la pression intraoculaire mais peut aussi être causé par d'autres facteurs tels qu'une faible circulation du sang qui affecte le nerf optique situé à l'arrière de l'œil. Il perd lentement une partie de sa fonction nerveuse, réduisant lentement et sans douleur le champ de vision, en commençant par la vision périphérique.

L'origine du glaucome n'est pas connue mais il est souvent associé à l'âge, à la myopie, à des antécédents familiaux, ou encore à des accidents (crise cardiaque, accident vasculaire cérébral).

Certains médicaments peuvent aussi favoriser l'apparition du glaucome (stéroïdes).

Il existe deux sortes de glaucome : le glaucome à angle ouvert. On n'en remarque aucun symptôme avant que la maladie soit très avancée. La perte visuelle étant irrémédiable, des tests glaucome indolores et rapides sont la seule solution de déceler cette maladie. Le glaucome à angle fermé se manifeste par l'apparition soudaine et persistante d'une forte douleur à un œil, accompagnée d'une modification de la vision. Il faut alors se rendre immédiatement chez un spécialiste ou aux urgences.

Pour ces deux cas, si les gouttes ou les médicaments allant jusqu'aux traitements lasers, ne sont pas effectués correctement ou à temps, une cécité complète peut arriver. [9,8]

### c-la rétrospective diabétique :



**Figure 06 :** La rétrospective diabétique lésion et vision. [1,8]

Le diabète peut provoquer une cécité partielle qui peut devenir totale.

Les petits vaisseaux sanguins qui alimentent la rétine de l'œil s'affaiblissent. La personne atteinte commence à voir floue gênée par l'apparition de tâches noires. Cependant, la rétinopathie diabétique proliférant, stade supérieur, conduit ces petits vaisseaux sanguins à s'obstruer jusqu'à se boucher. D'autres vaisseaux sanguins anormaux viennent alors les remplacer. Etant plus fragiles, ils explosent et entravent les visions. Des tissus cicatriciels se forment et réduisent la surface de la rétine. Celle-ci peut même se détacher de la partie postérieure de l'œil, pouvant entraîner alors une cécité complète.[9]

### d-La DMLA :



**Figure 07 :** vision pour les patients atteints de DMLA.[8]

La Dégénérescence Maculaire Liée à l'Age est la maladie ophtalmologique la plus répandue dans les pays industrialisés. Elle atteint la rétine centrale, ce qui se traduit par une déformation des lignes puis par l'apparition d'une tâche centrale permanente.



### ❖ Les autres causes de cécité sont les suivantes :

- **L'onchocercose**, une maladie parasitaire due à l'infection de la peau et des yeux par un ver, *Onchocerca volvulus* (30 millions de personnes atteintes, dont 1 million sont aveugles).
- **La kératomalacie**, mort progressive de la cornée, provoquée par un dessèchement extrême de la conjonctive et de la cornée liée à une carence majeure en vitamine A.
- **Le ptérygion**, épaissement de la conjonctive favorisé par les expositions au soleil, au vent et aux intempéries, fréquentes dans les pays tropicaux. [9]

### 2.5- Vie quotidienne des patients atteints de cécité :

Le quotidien des aveugles est encore difficile, mais de nombreux moyens sont mis en œuvre pour réduire la dépendance aux autres et leur ouvrir les portes d'activités qui leur étaient autrefois interdites.

### ❖ Les déplacements :

Les déplacements, particulièrement en ville, sont un des moments de la vie quotidienne où le handicap des non-voyants se fait le plus durement ressentir. Ils peuvent se déplacer seuls, munis d'une canne blanche qui est utilisée en balayant l'espace au sol pour repérer d'éventuels obstacles. Mais la canne blanche ne permet pas de détecter les obstacles situés en hauteur (le rétroviseur d'un camion à hauteur de visage, par exemple), ni de trouver immédiatement une porte. Les chiens-guides d'aveugle sont très précieux pour les déplacements, car ils préviennent de tous les obstacles, même en hauteur, et savent anticiper ; leur accès dans les lieux publics est autorisé ; ils restent malheureusement très onéreux.

### ❖ Lecture et écriture :

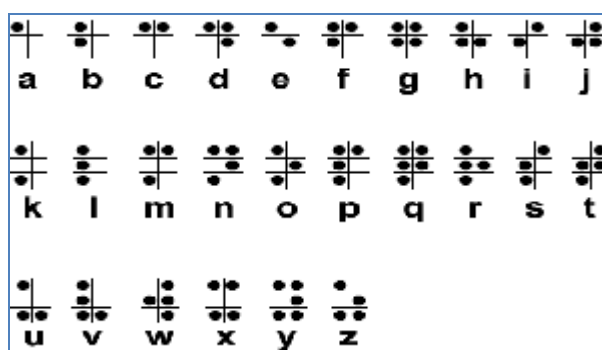


Figure 08: Alphabet braille.

Chez les personnes qui ont une acuité visuelle faible, la lecture en caractères d'imprimerie est possible, grâce à l'utilisation de loupes ou d'un vidéo-agrandisseur (une caméra filme le texte et le projette agrandi sur un écran vidéo). En outre, de plus en plus de livres et de revues sont maintenant imprimés en gros caractères. Sur ordinateur, il existe des logiciels qui agrandissent caractères et dessins. [8]

Pour les personnes aveugles, on trouve des logiciels de synthèse vocale, qui transforment un texte affiché sur un écran en voix synthétique (de même, il existe des calculatrices qui parlent) ; il existe également des livres ou des magazines enregistrés sur cassettes. Cependant, l'alphabet braille, qui fait appel au relief (chaque signe est traduit en points lus avec les doigts) demeure un outil indispensable. L'inconvénient des ouvrages en braille est qu'ils sont très volumineux, car imprimés sur du papier cartonné très épais.

Il existe des machines à écrire en braille ; il est aussi possible aujourd'hui de traduire sur ordinateur des caractères d'imprimerie en braille et inversement, puis d'imprimer le texte sous l'une ou l'autre forme. On peut encore numériser un texte avec un scanner, puis le traduire soit en synthèse vocale, soit en gros caractères, soit en braille. [9]

### ❖ Le braille :

On doit à Louis Braille (1809-1852), professeur à l'Institution royale des jeunes aveugles, lui-même aveugle depuis l'âge de 3 ans, l'invention de l'alphabet pour non-voyants. Le principe est le suivant : tout signe s'inscrit dans un rectangle de deux colonnes de trois points en relief. Chaque assemblage de points forme une lettre, un chiffre, un symbole mathématique ou une note de musique. On écrit en braille avec un poinçon, en utilisant un guide-main, sorte de plaque de tôle très fine ajourée d'espaces linéaires, ou à la machine ; on le lit en palpant les reliefs avec les doigts. Il en existe une version sténographique. [10,8]

### ❖ Scolarité et travail :

Les enfants malvoyants doivent être scolarisés, dans la mesure du possible, pour une meilleure intégration, dans des écoles non spécialisées, avec, si nécessaire, un encadrement et des aménagements particuliers.

Il existe aussi des écoles spécialisées. Les professions qui leur sont les plus accessibles sont la musique, la kinésithérapie, l'informatique (avec un clavier normal ou un clavier en braille, et un système vocal de lecture).

Difficile pour les non-voyants, elle doit être soutenue par une rééducation pour une utilisation optimale des aides proposées : aide optique, repérage sur certains appareils (micro-ondes sonores, cuillère doseuse pour la cuisine, thermomètre parlant). Une bonne rééducation est axée sur l'utilisation des autres sens (toucher, ouïe) pour pallier les insuffisances de la vision et permettre d'acquérir autonomie et confiance en soi. [11,8]

### ❖ Les loisirs pour malvoyants :

Certains musées accueillent les personnes aveugles, en leur proposant des œuvres accompagnées d'un commentaire en gros caractères ou en braille, ou des dessins gaufrés. Au cinéma, un nouveau procédé, l'audio vision, permet d'incorporer dans les silences de la bande des commentaires sur l'action, les décors et les personnages. Ce procédé, encore récent, est proposé dans peu de salles, mais l'accueil favorable qu'il a rencontré laisse espérer un développement prochain.[12,8]

### 3-L'écholocation :

#### 3.1-L'issue de l'idée :

L'idée de l'écholocation est inspirée par le mode de vie et le comportement des chauves-souris, qui est l'un des mammifères les plus méconnus de la planète. Objet de fantasmes et de fausses croyances, elle a cependant fasciné les plus grands génies de l'histoire et obsède encore aujourd'hui scientifiques et militaires.

#### **-Comment vivent-elles?**

Les chauves-souris (appelées chiroptères) sont des mammifères dont les membres antérieurs allongés portent des membranes formant ainsi des ailes ce qui leur permet de voler et ainsi de se déplacer en toute liberté.

À quelques exceptions près, toutes les chauves-souris sont nocturnes. Pendant la journée, les animaux se reposent dans divers lieux de perchage, tels que les grottes, les crevasses, les arbres creux, le feuillage, les abris ménagés sous les pierres, ou l'écorce, et dans des bâtiments.

Leurs mœurs nocturnes procurent aux chauves-souris beaucoup d'avantages: la concurrence est réduite pour la recherche de nourriture, le risque d'attaque par des prédateurs est diminué, la lutte contre la chaleur et la déshydratation (importante chez les chauves-souris) du fait de leur surface cutanée énorme par rapport à leur taille est facilitée.

Quelques espèces vivent en solitaires, mais la plupart sont grégaires (petits groupes composés d'un seul mâle et d'une dizaine de femelles assemblées)

Certaines espèces de chauves-souris des zones tempérées sont migratrices, et l'on a enregistré des déplacements de près de 1600km entre leurs quartiers d'été et d'hiver.

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, la chauve souris n'est pas aveugle. Certaines espèces de chauves souris insectivores possèdent des yeux qui ne sont pas apparent, et certaines voient même très bien. Il existe des espèces de chauves souris qui voient mieux que d'autres. Et certaines d'entre-elles possèdent de gros yeux très développés à l'inverse de d'autres qui ont possèdent des petits peu développés.

Plutôt à leur système d'écholocation pour se diriger et pour s'alimenter. Elles peuvent utiliser la vue uniquement pour distinguer le jour et la nuit. Une grande partie des chauves souris possède donc ce système qui peut être considéré comme un sixième sens et qui leur permet la nuit de "voir avec les oreilles". Ce système correspond à une sorte de "radar". En effet, elles émettent des cris inaudibles par l'homme par la bouche ou par les narines et reçoivent ces sons par les oreilles qui servent de récepteurs. [13]

### -Pourquoi cet animal utilise-t-il des ultrasons plutôt que sa vue ?

Une équipe de chercheurs allemands et américains a découvert que la rétine de ces chauves souris ne contenait pas seulement des bâtonnets mais aussi des cônes( photorécepteurs nécessaires à la vision des couleurs et à la précision de la vision diurne). Mais malgré tout les chauve-souris ont développé leur système d'écholocation, parce qu'elles se nourrissent en volant, d'insectes parfois minuscules. En effet, il leur faudrait posséder une vue exceptionnellement perfectionnée pour pouvoir les apercevoir. C'est donc un choix alimentaire qui l'a forcé à trouver un moyen plus efficace que sa vue pour réussir à s'alimenter facilement. Selon les spécialistes, les chiroptères emploieraient l'écholocation depuis au moins cinquante millions d'années.[13]

### 3.2-Historique :

Un point d'histoire :



**Figure 09 :** (Louis Jurine, 1798)

“ Chez les chauves souris, la vue n'est pas indispensable pour se diriger. L'ouïe semble remplacer la vue pour leur permettre de détecter les objets et leur fournir des informations pour se déplacer et éviter les obstacles.”

## a- Un premier pas vers l'écholocation:



La capacité des chauves souris à se déplacer dans le noir le plus total a toujours intrigué les chercheurs du monde entier.

En effet, comment un animal comme celui-ci peut-il voler sans encombre là où l'Homme ne peut rien distinguer de par ses propres yeux. Louis Jurine (médecin et chirurgien suisse) et Lazzaro Spallanzani (biologiste italien) furent les premiers à tenter de résoudre ce mystère, c'était au 18<sup>ème</sup> siècle.

NB : L'expérience est détaillée dans le 2<sup>ème</sup> chapitre : propagation des ultrasons dans la matière "historique".

**Figure10 :**  
Lazzaro  
Spallanzani

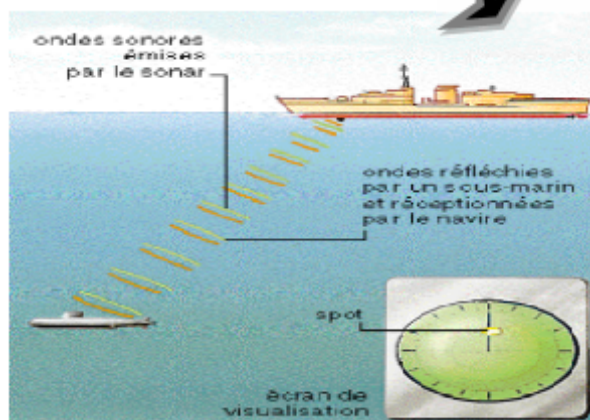
C'est alors qu'il demanda de l'aide à un chercheur français qui, pour boucher de manière hermétique les oreilles des chauves souris va utiliser de l'amidon. Ils refirent alors l'expérience et celles-ci restent au sol. Les deux confrères établirent alors que les chauves-souris voyaient avec leurs oreilles, ce qui fut jugé aberrant par la communauté des chercheurs de l'époque.[14,13]

## b- L'aboutissement des recherches:

En 1913, seulement 5 jours après le naufrage du Titanic, Lewis Fry Richardson, un mathématicien britannique, eut l'idée d'un système permettant de détecter les icebergs grâce à l'écho des ultrasons.



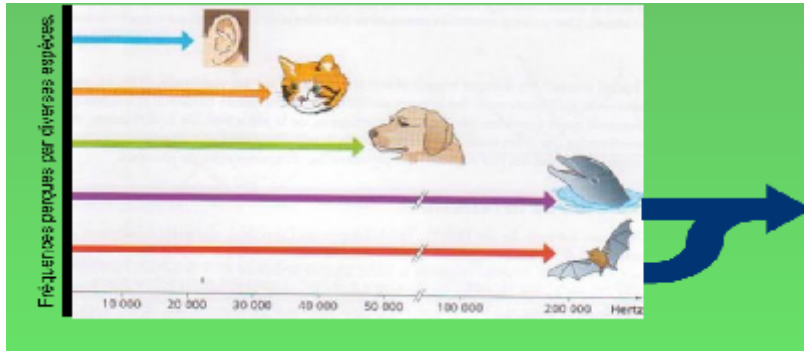
**Figure 11 :** le Titanic



**Figure 12 :** le sonar

Ce fut la première ébauche du sonar finalement mis au point par Langevin au cours de la Première guerre mondiale. Cette invention a permis de vérifier et d'expliquer les découvertes de Jurine et spallanzini.

## 3.3- Le principe de l'écholocation :



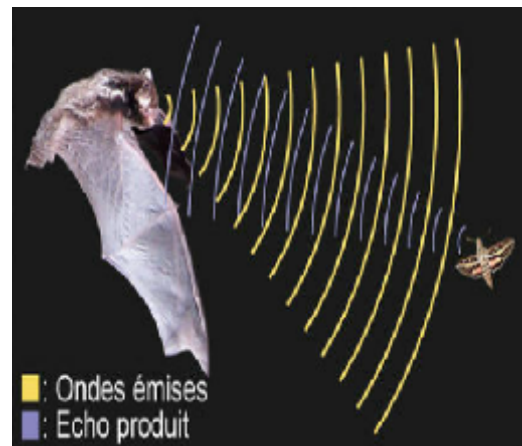
Seules les espèces capables de percevoir et d'émettre des sons d'une fréquence

**supérieure à 70 kHz**

peuvent utiliser un système de "sonar biologique"

**Figure 13 :** les fréquences perceptibles par divers espèces.[14]

Les sons que les chauves-souris émettent sont créés par un puissant courant d'air qui provient du larynx. La fréquence de ces ondes sonores est supérieure à 20 kHz, donc il s'agit d'ultrasons. Ils se propagent dans l'air jusqu'à ce qu'ils rencontrent un obstacle. Les ondes ultrasonores butant sur une proie, ou tout autre obstacle sont alors réfléchies. Les ondes nées de cette réflexion forment l'écho des ultrasons. Cet écho est ensuite capté par les oreilles de l'animal et analysé par son cerveau. Ainsi les chauves souris peuvent, grâce à ce système d'écholocation (ou écholocalisation), repérer un fil de 0,008 mm dans l'obscurité la plus totale.



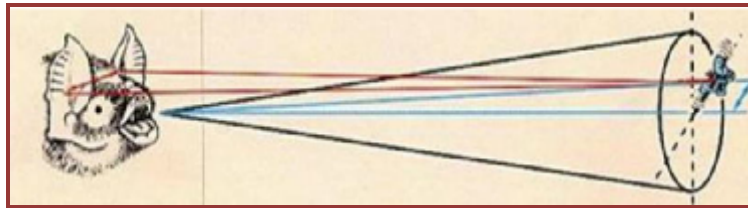
**Figure 14 :** l'écholocation chez les chauves-souris

En effet, on peut déterminer de manière rapide la distance séparant la chauve souris de l'obstacle qu'elle a détecté en connaissant uniquement la vitesse des ondes ultrasonores dans l'air et la durée séparant l'émission de la salve ultrasonore et la réception de l'onde réfléchie. Soient  $t$  la durée séparant l'émission de la salve ultrasonore de la réception de l'onde réfléchie,  $v$  la vitesse des ultra-sons dans l'air (341 m.s-1) et  $d$  la distance séparant la chauve-souris de l'obstacle; on peut écrire la relation suivante :

$$d=vt/2$$

Cependant, c'est sans aucun calcul que les chauves souris connaissent la distance qui les sépare d'un obstacle ou d'une proie. Elles analysent simplement le temps qui s'écoule entre l'émission du son et la réception de l'écho ultrasonore. Evidemment plus le temps séparant ces deux dates est long, plus la distance qui les sépare est longue (et vis-versa). Mais ce n'est pas la seule information accessible. Les chiroptères sont munis de deux oreilles qui leur permettent de déterminer la direction de la cible en mesurant l'écart entre les deux réceptions

(celle de l'oreille droite et de l'oreille gauche). Elles peuvent également, grâce à l'intensité de l'écho reçu et à sa durée, connaître la taille de l'objet, car plus la cible est petite, moins elle réfléchit de son (et inversement). De plus, une grande cible produit un écho plus long au fur et à mesure de la réception en provenance des parties de plus en plus éloignées de la cible (et inversement). Autrement dit, si la cible est grande, alors il y aura plus d'ondes ultrasonores réfléchies et donc, la chauve-souris recevra un écho plus long.[15,16]



**Figure 15 :** Schéma représentant l'analyse de la direction d'un obstacle détecté par le système d'écholocation chez les chauves souris.

### **4-Inventions à base d'ultrasons pour l'aide des patients atteints de cécité visuelle.**

#### **4.1-Des lunettes à ultrasons :**



**Figure 16 :** Des lunettes à ultrasons.

C'est une innovation technologique de pointe qui nous vient en droite ligne d'Espagne et plus particulièrement de l'Universidad Carlos III située à Madrid : des lunettes à ultrasons pourraient aider les personnes confrontées à un handicap visuel à se déplacer d'une façon plus autonome et plus sûre.

Le principe de fonctionnement est le suivant : deux petites caméras sont installées sur un casque à réalité virtuelle qui rappelle la forme bien connue des lunettes de soleil. Ce « casque-lunette » est interconnecté à un petit ordinateur, le dispositif ainsi constitué scanne la zone qui se trouve devant la personne qui le porte.

## Chapitre 04 : Cécité visuelle et Utilisation des ultrasons.

Ces lunettes à ultrasons affichent alors toutes les informations pertinentes concernant l'environnement et ceci sous la forme de contours avec code de couleur ( ce qui, paraît-il, si vous avez vu le film, donne une vision de style... Terminator, ).

Les informations pertinentes ainsi affichées permettent à l'utilisateur de connaître la distance, la forme des objets qui sont traditionnellement difficile à voir ou à interpréter pour une personne malvoyante.

En effet, ce sont souvent des problèmes de contraste et d'évaluation des distances qui viennent aggraver le déficit de vision d'une personne malvoyante, problèmes qui trouvent ici une solution grâce aux informations générées par ces lunettes à ultrasons.

Le professeur Ricardo Vergaz de l'Electronics Technology Department de l'Universidad Carlos III qui dirige l'équipe de recherche a fait savoir que les lunettes à ultrasons sont actuellement cours d'évaluation et de test au sein d'un groupe de patients.

En fonction des résultats qui seront obtenus et qui devaient être connus avant la fin de l'année 2013, des améliorations pourraient être effectivement apportées ce qui devrait permettre, comme l'espère les chercheurs impliqués dans ce projet, de peut-être prévoir une production commerciale destinée aux malvoyants de ces fameuses lunettes à ultrasons.[17]

### 4.2- Le Tacit :

Le gant à ultrasons pour diriger les aveugles :



**Figure 17 :** Le Tacit.

Tacit, voilà le nom original du projet qui a permis de concevoir un gant à ultrasons qui aide les aveugles et les malvoyants à se diriger avec une plus grande autonomie et aisance.

Basé sur la même philosophie que l'informatique libre dite « open source » le code de Tacit ainsi que la liste des matériaux devant être utilisés sont mis gratuitement à disponibilité du grand public sur l'internet, ce qui vous permettra bien évidemment, de construire vous même le gant Tacit ou bien de le commander déjà monté.



## Chapitre 04 : Cécité visuelle et Utilisation des ultrasons.

Les éléments contenus dans le gant Tacit comprend principalement des capteurs ultrasoniques, des microcontrôleurs et des moteurs. L'ensemble du dispositif est géré par un mini-processeur Arduino.

Lorsque le porteur malvoyant ou aveugle du gant Tacit se déplace, les capteurs ultrasoniques détectent l'ensemble des éléments qui sont présents autour de lui.

Ce sont les microcontrôleurs qui sont chargés de calculer la distance entre la personne et les éléments détectés.

Les moteurs présents dans le gant à ultrasons s'activent alors au niveau du poignet pour créer un feedback qui indique à l'utilisateur handicapé les obstacles à contourner et les itinéraires à suivre.

Coté énergie, le gant à ultrasons Tacit est doté d'une batterie rechargeable de 9 volts

Ce projet a été imaginé par le designer Steve Hoefler qui en toute modestie précise toutefois qu'il s'agit d'un prototype qui n'est pas encore parfait et qui peut encore largement être amélioré. Il cite d'ailleurs sur le site internet, dédié au gant Tacit, qu'il est possible de diminuer la taille du gant et d'améliorer le type de batterie à utiliser pour une plus grande autonomie et miniaturisation.

Il faut donc être conscient que le gant Tacit est toujours un projet qui, même s'il est fortement abouti doit, et sera encore, l'objet d'améliorations importantes.

L'intelligence du Designer Steve Hoefler est de laisser l'ensemble de ses plans, schémas et codes en libre accès sur Internet . Il est donc possible à toute personne qui le désire d'améliorer le gant Tacit et de s'inscrire dans ce grand projet devant permettre à la personne handicapée soit aveugle ou malvoyante d'utiliser un gant à ultrasons pour augmenter son autonomie et faciliter ses déplacements. C'est cela même l'essence du projet Tacit.[18]

### **4.3-Une canne intelligente pour aider à se déplacer :**



Figure 18 : canne intelligente à ultrasons

## Chapitre 04 : Cécité visuelle et Utilisation des ultrasons.

---

Une nouvelle canne « intelligente » développée par des étudiants de l'Université Central Michigan semble être le premier pas pour aider les personnes aveugles à se déplacer de façon autonome.

Cette canne utilise la radio identification radios (RFID) pour détecter les obstacles et en alerter l'utilisateur afin de simplifier sa marche. Équipé d'un capteur à ultrasons, la canne fonctionne avec un système de navigation (GPS) dans un sac porté par l'utilisateur et à l'aide de balise RFID balisant le chemin.

Un haut-parleur sur le sac alerte l'utilisateur des éventuels obstacles et indique à la personne où se diriger. Un système de vibration via un gant est aussi disponible pour les personnes malentendante.

«Nous sommes les premiers à envisager l'utilisation de la technologie RFID à l'extérieur, » a dit Kumar Yelamarthi, professeur assistant d'ingénierie et chef de projet. «Ce projet a commencé afin d'apprendre aux élèves à voir et à comprendre les façons que dont l'ingénierie peut être utilisé pour le bien de tous. Nous voulions faire quelque chose qui pourrait aider les gens et rendre notre campus plus accessible. »

Des premiers tests ont été effectués avec des bénévoles qui l'ont utilisé sur le campus avec des retours plutôt positifs.

Evidemment, l'utilisation des balises le rend difficilement transposable à grande échelle ou à court terme mais le projet a un potentiel immense.[ 19,20].

### **Conclusion :**

Ce chapitre nous a rapproché de l'idée sur laquelle est basée notre étude théorique qui est l'utilisation des ultrasons pour se diriger dans un environnement plus perceptible que visible et cela à travers l'étude du cas de la chauve souris, un animal qui a fait le choix de se passer de son sens visuel en développant des capacités que l'homme ne peut acquérir naturellement.

Après avoir étudié la cécité visuelle et compris la gravité de la situation que vivent les patients touchés par cette dernière, aussi en citons quelques inventions qui visent à leur porter le maximum d'aide nous avons été encore plus motivés à terminer notre modeste étude qui pour but de permettre l'adaptation de l'individu grâce à des avancées techniques.

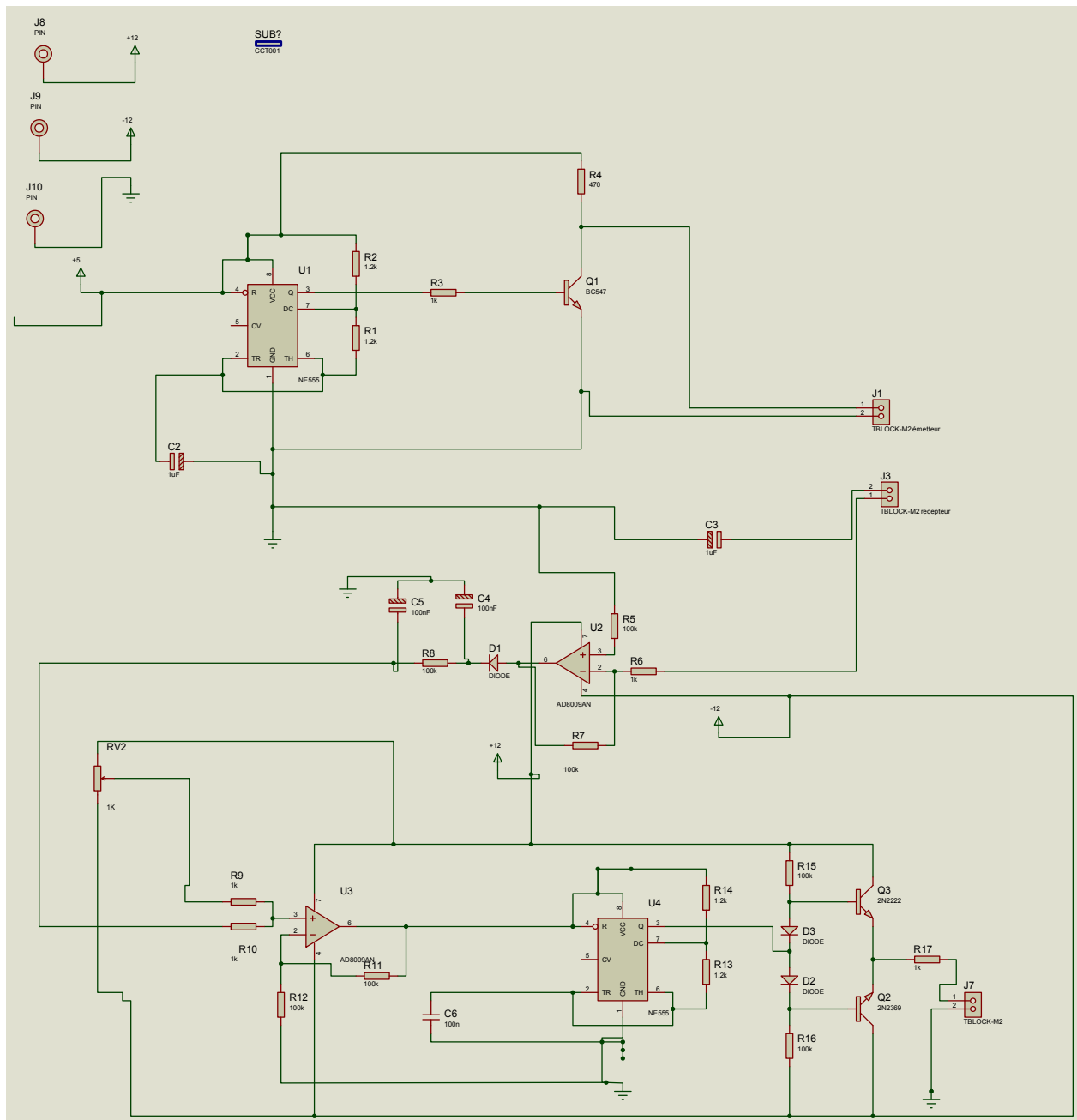
### Références bibliographiques :

- [1]- [http://2010tpe44.wix.com/cecite-ultrasons#!\\_1---a-les-causes](http://2010tpe44.wix.com/cecite-ultrasons#!_1---a-les-causes)
- [2]- <http://www.optic-emoi.fr/sante.html>
- [3]- [fr.wikibooks.org/wiki/...images/L'œil\\_et\\_la\\_perception\\_de\\_la\\_neteté](http://fr.wikibooks.org/wiki/...images/L'œil_et_la_perception_de_la_neteté)
- [4]- [www.cehjournal.org/french/download/soc\\_01\\_01\\_006.pdf](http://www.cehjournal.org/french/download/soc_01_01_006.pdf)
- [5]- <https://apps.who.int/inf-fs/fr/am213.html>
- [6]- [http://www.irrp.asso.fr/?page\\_id=357](http://www.irrp.asso.fr/?page_id=357)
- [7]- [sante.lefigaro.fr](http://sante.lefigaro.fr) › Santé › Maladie.
- [8]- <http://www.who.int/blindness/causes/priority/fr/index1.html>
- [9]- <http://www.mebraille.ch/N321/les-causes-de-cecite.html>
- [10]- [louisbrailleschool.org/ban.pdf](http://louisbrailleschool.org/ban.pdf)
- [11]- <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs282/fr/>
- [12]- [http://www.avh.asso.fr/rubriques/association/maladies\\_vue.php](http://www.avh.asso.fr/rubriques/association/maladies_vue.php)
- [13]- Gunnell,G & Simmons,N (2005) Fossil evidence and the origine of bats, Journal of mammalian evolution, Vol.12
- [14]- Ibanez,C et al. (2001) Bat predation on nocturnally migrating birds, PNAS Vol.98(17)
- [15]- Jones,G & Holderied,MW (2007) Bat echolocation calls : adaptation and convergent evolution, Proceedings of the Royal Society 274, p.905-912
- [16]- ones,G. & Teeling,EC. (2006) The evolution of echolocation in bats, Trends in ecology and evolution, Vol.21(3)
- [17]- <http://fr.ubergizmo.com/2012/05/lunettes-ultrason-handicapes-visuels/>
- [18]- <http://www.gizmag.com/tacit-wrist-mounted-sonar/19580/>
- [19]- <http://www.hacavie.com/nouvelles/articles/une-canne-intelligente-pour-aider-a-se-deplacer/>
- [20]- <http://www.meilleurs-monte-escalier.com/actualites/la-canne-intelligente-pour-les-personnes-agees>.

## 1-Introduction :

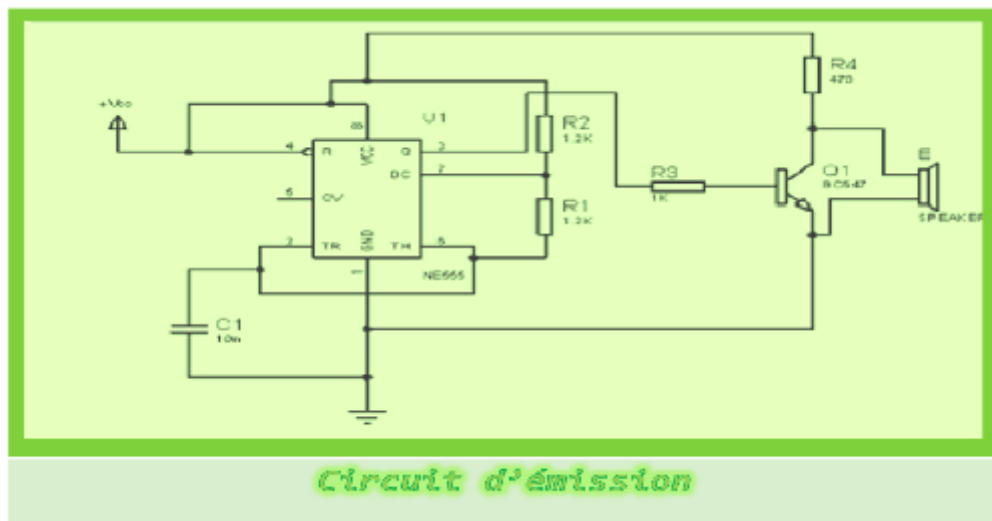
Après avoir détaillé dans les chapitres précédents le phénomène de la piézoélectricité, sur lequel est basé le fonctionnement des capteurs que nous avons utilisé lors de la réalisation pratique, ainsi que les ultrasons, leur interaction avec la matière et leur utilisation dans le domaine médical, il est finalement temps de passer à l'étude pratique et l'explication de chaque étape de la réalisation de notre prothèse visuelle à base de deux sondes ultrasonores.

## 2-Le schéma général :



## 3- Explication du circuit :

### 3.1-Le 1<sup>er</sup> bloc : circuit d'émission :



**Figure 01** : circuit émetteur.

Le premier étage représente un oscillateur conçu avec le circuit intégré NE555 alimenté en 12V, qui permet dans une configuration donnée (voir le schéma Figure 1) de fournir un signal sinusoïdal de fréquence 40KHz, ce dernier va être transformé en une onde mécanique (ultrasonore US) à travers un émetteur ultrasonore **E (figure 10)** de type piézoélectrique, fonctionnant aux alentours de la fréquence de résonance mécanique de 40kHz. La vitesse et l'atténuation de cette onde US sont reliées aux paramètres physiques du milieu qu'elle traverse (l'air dans notre cas). Le transistor Q1(BC547) est utilisé comme un amplificateur de puissance.

Les composants électroniques utilisés sont :

- Une capacité de 10n.
- Une résistance de 470Ω.
- Une résistance de 1.2kΩ et une résistance variable que nous avons utilisé au lieu d'une deuxième résistance de 1.2k vu la sensibilité des capteurs utilisés à la fréquence exacte de 40khz.
- Un transistor Q1(BC547).
- Le temporisateur NE555 (Timer 555) :

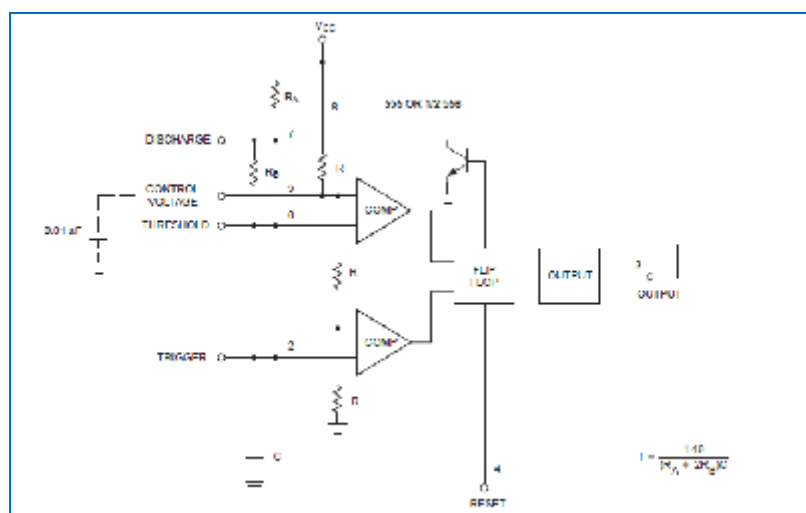
Le NE555 (plus couramment nommé 555) est un circuit intégré utilisé pour la temporisation ou en mode multivibrateur. Le NE555 a été créé en 1970 par Hans R. Camenzind et commercialisé en 1971 par Signetics.

Ce composant est toujours utilisé de nos jours en raison de sa facilité d'utilisation, son faible coût et sa stabilité. Un milliard d'unités sont fabriquées par an.

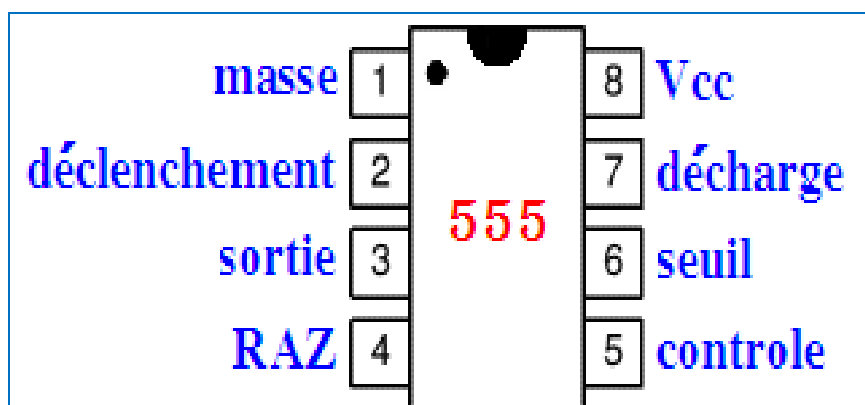
Le NE555 contient 23 transistors, 2 diodes et 16 résistances.

Ce temporisateur de 8 broches spécialisé dans la production de signaux **Figure 3**

Il peut être facilement configuré (avec des composants externes) pour fonctionner en mode monostable ou astable dont la fréquence d'oscillation est facilement ajustable, par des composants externes. Afin d'être très exactement à la fréquence de résonance de la paire des transducteurs.[1]



**Figure 02 :** Schéma de câblage du NE555 de Philips Semiconductors[1 ou 2]



**Figure 03 :** Symbole schématique du 555[2]

N	Nom	Description
1	Masse	Masse
2	Déclenchement	Gâchette, ancre de la temporisation
3	Sortie	Signal de sortie
4	RAZ	Remise à zéro, interruption de la temporisation
5	Controle	Accès à la référence interne (2/3 de VCC)
6	Seuil	Signal la fin de la temporisation lorsque la tension dépasse 2/3 de VCC
7	Décharge	Borne servant à décharger le condensateur de temporisation
8	Vcc	Tension d'alimentation, généralement entre 5 et 15V

**Tableau 01 :** le rôle des différentes pattes du NE555[2]

Les valeurs des résistances et du condensateur permettent de fixer la fréquence et le rapport cyclique :

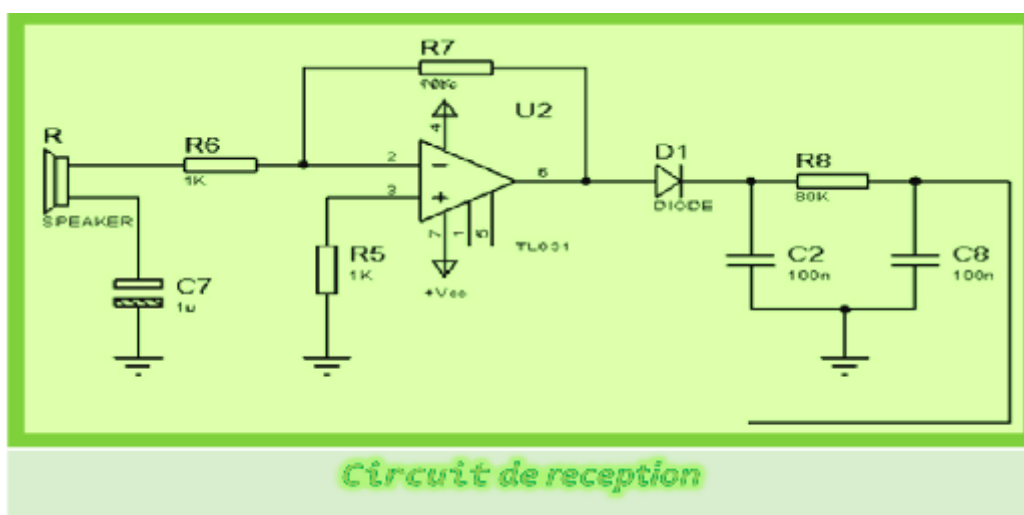
$$F = \frac{1,44}{(R_a + 2R_b) C}$$

**Dans notre cas :**

En sortie (3), on obtient un signal (oscillatoire) dont la fréquence dépend des résistances R1 et R2 et de la capacité du condensateur C1 (Figure 1).

$$F = \frac{1,44}{(R1 + 2R2) C1} = \frac{1,44}{(1,2 + 2 \cdot 1,2) \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-9}} = 40000 \text{ Hz} = 40 \text{ KHz.}$$

**3.2- Le 2ème bloc : circuit de réception :**



**Figure 04 :** circuit recepueur.

Le deuxième étage comporte comme premier élément un capteur piézoélectrique utilisé comme récepteur. Le signal d'écho reçu par ce transducteur peut être vu comme étant une onde porteuse modulée en amplitude, suite aux échos réfléchis par l'obstacle rencontré.

Nous optons pour une démodulation d'amplitude de l'onde porteuse réfléchiée. Pour cela, nous utilisons un détecteur linéaire d'enveloppe composé :

- de l'amplificateur U2 de type TL031 monté en amplificateur inverseur avec gain :

$$AU_2 = \left(1 + \frac{R_7}{R_6}\right) = \left(1 + \frac{10k\Omega}{1k\Omega}\right) = 11.$$

- de la diode D1, de la résistance R8 et des condensateurs C2, C8, représentant le détecteur d'enveloppe (la composante continue).

### 3.3-Le 3<sup>ème</sup> bloc :

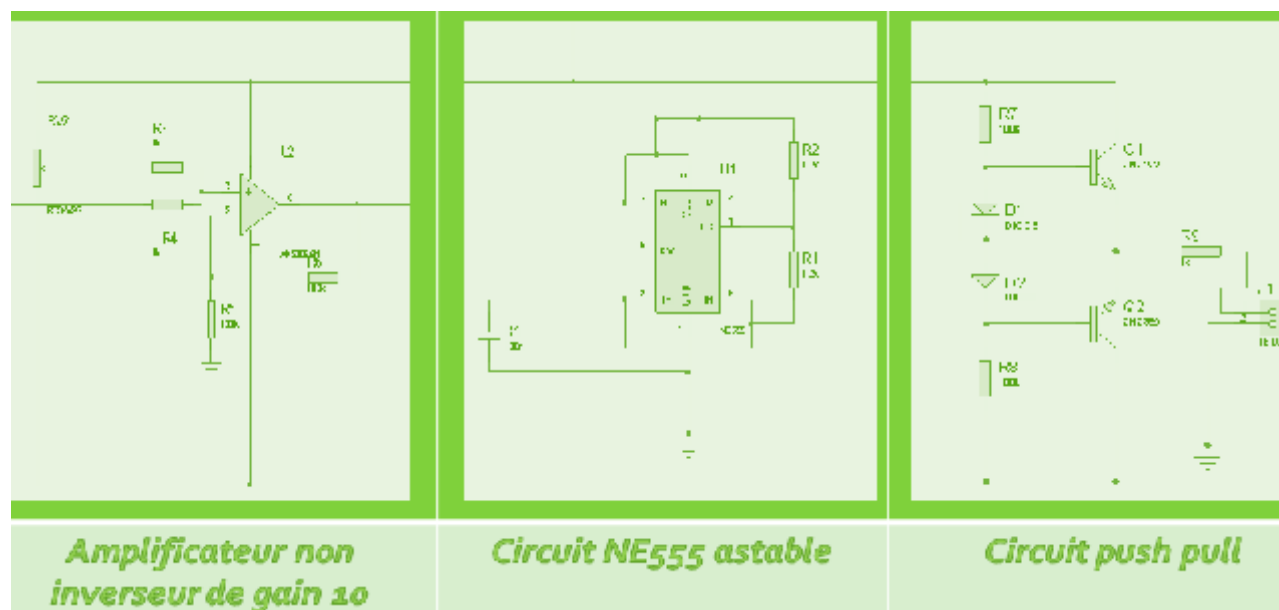


Figure 05

Après la réception, nous avons implémenté un amplificateur non inverseur de gain 11, permettant également le réglage de la composante continue par le potentiomètre RV2 dont les pôles extrêmes sont reliés respectivement à l'alimentation positive et négative.

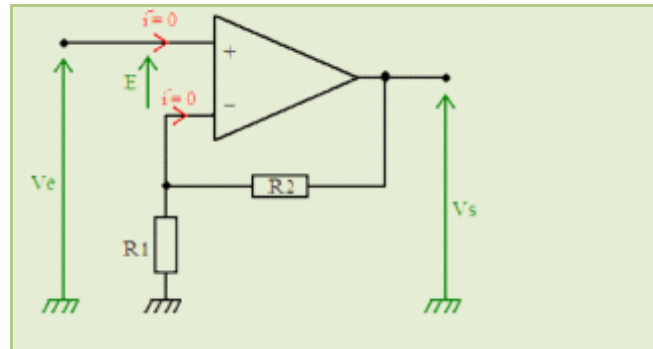
La sortie de cet amplificateur servira d'alimentation à un NE555 configuré pour vibrer à une fréquence sonore ; celle-ci est transformée en un courant alimentant un haut-parleur moyennant un étage de puissance du type push-pull construit avec les transistors Q1 (2N2218A) et Q2 (2N2497), deux diodes D1 et D2, et trois résistances R7, R8 et R9.

Le haut-parleur émet un son perceptible par le patient, dès qu'il y est un obstacle dans le champ de captage.



## ❖ Fiche récapitulative de l'amplificateur non-inverseur :

### Schéma :



**Figure06 : Amplificateur non inverseur**

### Formule :

- $V_e$  : la tension d'entrée
- $V_s$  : la tension de sortie
- $R_1$  et  $R_2$  : résistances.

$$V_s = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \times V_e$$

### Remarques :

L'amplitude de  $V_s$  est supérieur à celle de  $V_e$  (c'est pour cela qu'il est "**non-inverseur**")  
La résistance en entrée du montage est **infinie**. Donc le courant d'entrée est nul.

### Comment calculer $V_s$ en fonction de $V_e$ :

Avec ce **montage non-inverseur** on est dans une *application linéaire* de l'Amplificateur opérationnel que nous considérons comme parfait, on peut donc dire que  $E = 0V$ .

Ainsi, on peut en déduire que  $V^+ = V^-$ .

Maintenant, on va essayer de déterminer les valeurs de  $V_+$  et de  $V_-$  de ce montage amplificateur non-inverseur.

Je pense qu'il est facile de deviner que  $V_+$  est égal à  $V_e$ .

Pour calculer  $V_-$ , il faut connaître la formule du diviseur de tension, ce qui permet de donner l'équation suivante :

$$V_- = V_s \times \left( \frac{R_1}{(R_1 + R_2)} \right)$$

Comme l'ont saisi que  $V_+ = V_-$ , on peut ainsi dire:

$$V_e = V_s \times \left( \frac{R_1}{(R_1 + R_2)} \right)$$

En transformant cette équation (*en passant les R de l'autre côté de l'égalité*), on en déduit la formule finale de l'amplificateur non-inverseur:

$$V_s = V_e \times \left( \frac{(R_1 + R_2)}{R_1} \right)$$

Qui peut s'écrire aussi sous cette forme:

$$V_s = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \times V_e$$

Dans les deux cas de figure on voit bien que la sortie ne peut pas être inversée, d'où le nom du montage : **amplificateur non inverseur**.

### ❖ Fiche récapitulative du circuit push pull classe B :

Push pull : Littéralement cela veut dire "tirer et pousser". Cela sert en amplification audio. C'est un amplificateur de classe B utilise deux transistors complémentaires, de type NPN dans la branche supérieure et de type PNP dans la branche inférieure.

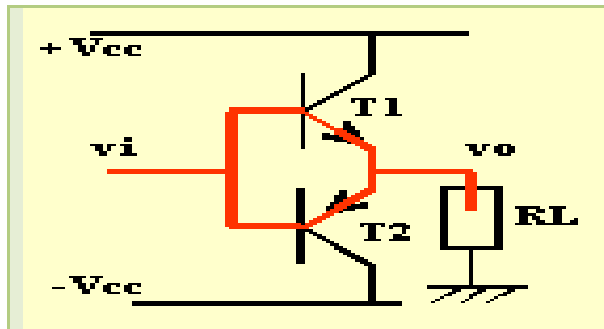


Figure 07 : Montage push pull simplifier[3]

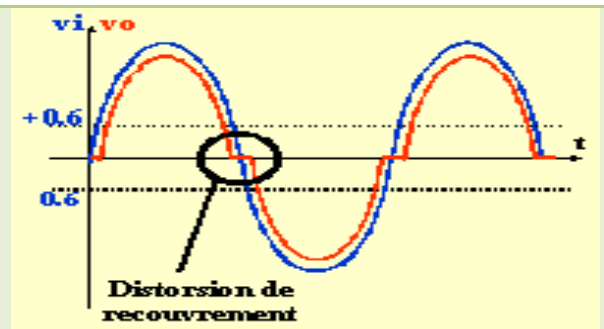


Figure 08 : Graphe de performance du montage push pull simplifier[3]

- L'alternance positive est véhiculée par le transistor NPN (du haut)
- L'alternance négative est véhiculée par le transistor PNP (du bas)

En remarque une déformation du signal de sortie (figure 08) qui est appelée "**distorsion de recouvrement**"

Cette distorsion du signal de sortie est bien entendu gênante, pour obtenir un fonctionnement "correct" de l'amplificateur il est nécessaire de la supprimer. [4]

Pour cela on a procédé à une modification ainsi on a met en œuvre **deux diodes et** résistances qui assurent leur polarisation ainsi que deux autres résistances ; Ces résistances devront restées de faible valeur par rapport à la charge puisqu'elles contribuent à la résistance de sortie du montage et, en tant que telles, elles limitent éventuellement l'amplitude maximale du signal de sortie.

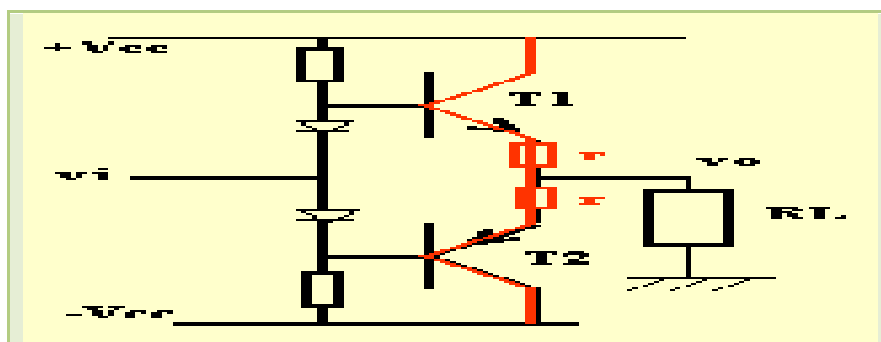


Figure 09 : montage push pull final[3]



**Figure 10** : les capteurs piézoélectriques .

### **4-Le support informatique :**

Parallèlement à la réalisation pratique, nous avons fait appel à l'outil informatique qui nous a été indispensable et nous a permis d'avancer avec plus de confiance.

**Proteus** était le support qui nous a accompagné durant toutes les étapes de notre projet de fin d'étude, éditée par la société Labcenter Electronics, il est composé de deux logiciels principaux : ISIS et ARES

Cette suite de logiciel nous a, non seulement permet de faire la simulation donc aidé à visualiser le signal de sortie au niveau de quelques blocs, mais aussi de dessiner notre schémas électrique et réaliser le circuit imprimé en 2D puis voir son apparence finale en 3D. Pour cela nous avons utilisé **Proteus**

Cette suite logicielle est très connue dans le domaine de l'électronique. De nombreuses entreprises et organismes de formation (incluant lycée et université) l'utilisent. Outre la popularité de l'outil, Proteus possède d'autres avantages :

- Pack contenant des logiciels faciles et rapides à comprendre et utiliser.
- Le support technique est performant.
- L'outil de création de prototype virtuel permet de réduire les coûts matériel et logiciel lors de la conception d'un projet.

### **4.1-ISIS :**

Le logiciel ISIS de Proteus est principalement connu pour éditer des schémas électriques. Par ailleurs, le logiciel permet également de simuler ces schémas ; ce qui permet de déceler certaines erreurs dès l'étape de conception. Indirectement, les circuits électriques conçus grâce à ce logiciel peuvent être utilisés dans des documentations, car le logiciel permet de contrôler la majorité de l'aspect graphique des circuits.

### 4.2-ARES :

Le logiciel ARES est un outil d'édition et de routage qui complètement parfaitement ISIS. Un schéma électrique réalisé sur ISIS peut alors être importé facilement sur ARES pour réaliser le PCB de la carte électronique. Bien que l'édition d'un circuit imprimé soit plus efficace lorsqu'elle est réalisée manuellement, ce logiciel permet de placer automatiquement les composants et de réaliser le routage automatiquement.

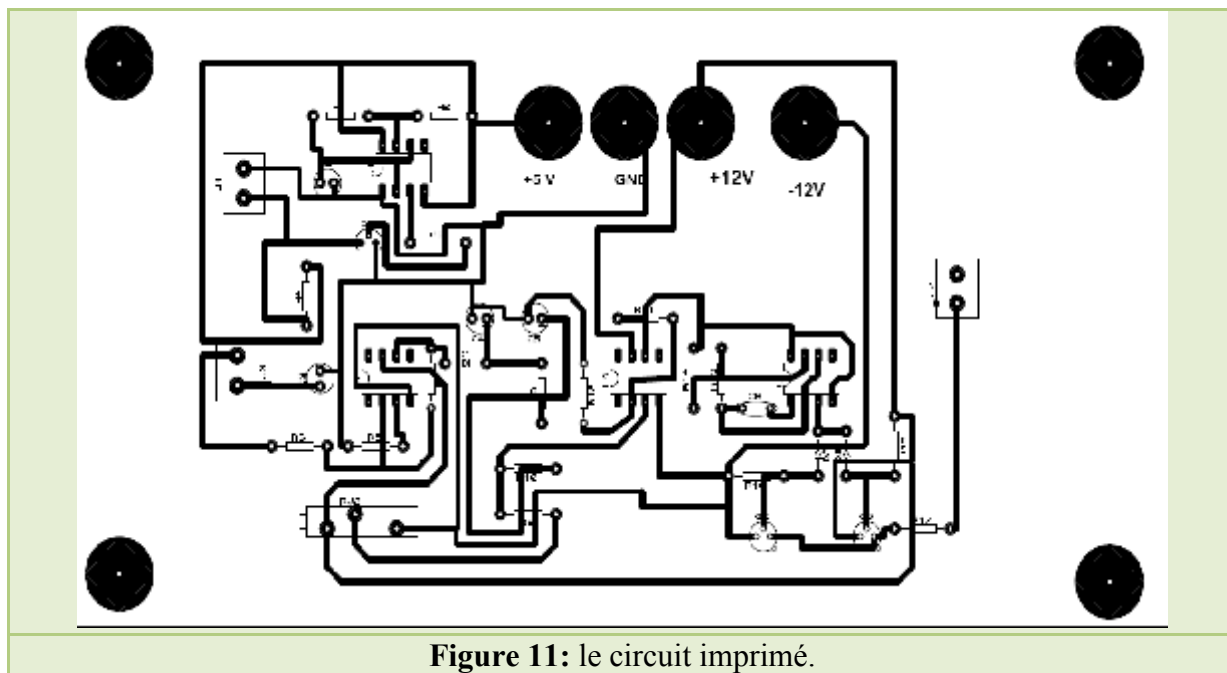


Figure 11: le circuit imprimé.

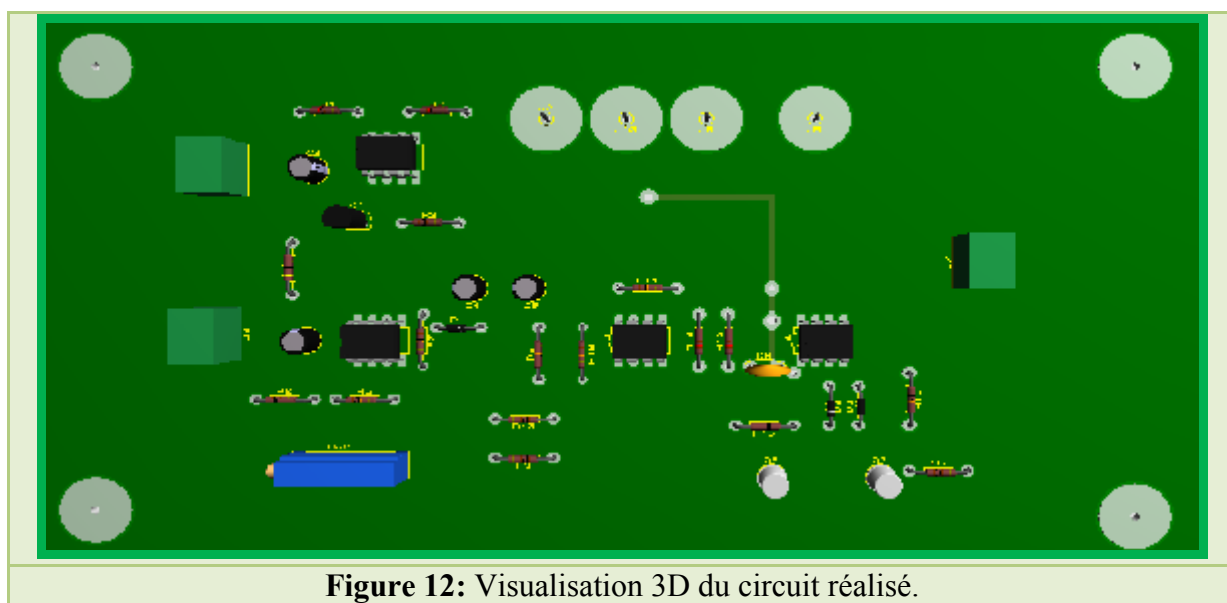


Figure 12: Visualisation 3D du circuit réalisé.

### **5-Conclusion :**

Ce que nous avons pu conclure après avoir effectué l'expérience avec le circuit électronique réalisé, c'est qu'il était possible de détecter l'obstacle qui se trouvait près des sondes ultrasonores *quelle que soit sa nature*, et cela a fonctionné avec succès. Mais le seul problème qui s'est posé fut la distance minimale selon laquelle le haut-parleur devrait émettre un son alertant le patient, car une fréquence ultrasonore de 40Khz était insuffisante pour les grandes distances ; cependant, les capteurs que nous avons à notre disposition ne peuvent pas capter une fréquence qui lui est supérieure.

### **Références bibliographiques :**

- [1]- <http://www.unitechelectronics.com/NE-555.htm>
- [2]- <http://www.extpdf.com/cours-ne555-pdf.html>
- [3]- Pascal Bareau, « Amplificateurs », Techniques de l'ingénieur – Électronique, éd. Techniques de l'ingénieur, Paris, novembre 2001.
- [4]- <http://www.physique.ens-cachan.fr/laboratoire/experiences/fichiers/pushpull.pdf>

### **Conclusion générale :**

La vie quotidienne des patients atteints de cécité visuelle est souvent pénible du fait de leur dépendance d'autrui et de l'impossibilité d'effectuer certains actes naturels, acquis, de la vie courante.

Des moyens liés aux technologies modernes se développent aujourd'hui pour leur permettre d'acquérir une plus grande autonomie. *Et, c'est exactement l'objectif de notre projet de fin d'études qui vise à leur apporter une aide, en mettant en œuvre une prothèse visuelle au moyen de deux sondes ultrasonores.*

La prothèse visuelle conçue, montée et testée, reste rudimentaire et didactique, mais pourrait être améliorée dans ses performances, et miniaturisée dans la perspective d'une production élargie à l'échelle industrielle et mise à disposition des non-voyants.

Cette prothèse peut être montée sur canne, sur la ceinture ou portée en médaillon et même fixée sur lunette de soleil.



## ملخص:

يهدف مشروع البحث هذا إلى تقديم العناصر النظرية والعملية المؤدية إلى تصميم وتركيب جهاز اصطناعي يساعد لكشف الحواجز و ذلك باستخدام اثنين من أجهزة الاستشعار بالموجات فوق الصوتية.

ويستند مبدأ عمله على جهاز ارسال مسؤول عن إنتاج الموجات الفوق الصوتية التي تنعكس ادا ما واجهت حاجزا قريبا منه و ذلك نحو جهاز الاستقبال الذي يقوم بتحويلها إلى أخرى كهربائية بهدف تغذية الدارة الكهربائية الموائية ومسؤولة عن خلق الصوت ينيه المريض المصاب بالعمى بالعقبات المحيطة به .

هدفنا النهائي هو اختبار القدرة على إنتاج جهاز موثوق به لتنبية وتوجيه المكفوفين في تنقلاتهم.

## Résumé :

*Le présent projet de fin d'étude se propose de présenter les éléments théoriques et pratiques devant aboutir à la conception et au montage d'une prothèse visuelle au moyen de deux sondes ultrasonores.*

*Le principe repose sur un émetteur permettant de produire des ondes acoustiques, qui se reflètent lorsqu'elles rencontrent un obstacle qui lui est proche, et un récepteur qui transforme ces ondes ultrasonores en une grandeur électrique alimentant les blocs chargés d'émettre un son alertant le patient atteint de cécité visuelle d'un obstacle immédiat ou environnant.*

*L'objectif final est de tester la capacité de produire un appareil fiable permettant d'alerter et d'orienter les non-voyants dans leurs déplacements.*

## Abstract:

*This research project aims to present the theoretical and practical elements leading to the design and of a visual prosthesis using two ultrasonic sensors.*

*The principle is based on a transmitter responsible for generating acoustic waves which are reflected when they encounter an obstacle close to it, and a receiver that converts the ultrasonic waves into an electrical magnitude that supplies the blocks responsible for emitting sound alerting blind patient about an immediate or surrounding obstacle.*

*The ultimate goal is to test the ability to produce a reliable device to alert and guide the blinds in their travels.*