



Les matériaux piézoélectriques

Constitution propriétés et applications

Guy Feuillard

Laboratoire GREMAN UMR 7347 INSA Centre Val de Loire



1

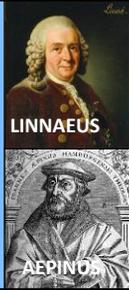
PLAN

- **Introduction**
- **Piézoélectricité -Ferroélectricité**
- **Equations de la piézoélectricité**
- **Applications**
- **Conclusion**

2

Découverte de la piézoélectricité

Pyroélectricité – étudiée
vers 1750



Piézoélectricité – Travaux
précurseurs vers 1820



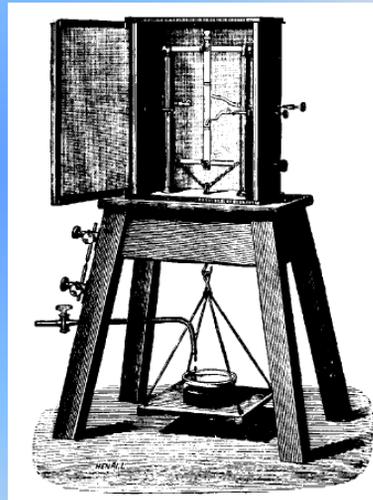
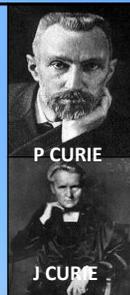
3

Découverte de l'effet piézoélectrique

Curie découvre que sous l'action de pressions ou de tractions,
certains cristaux s'électrisent.

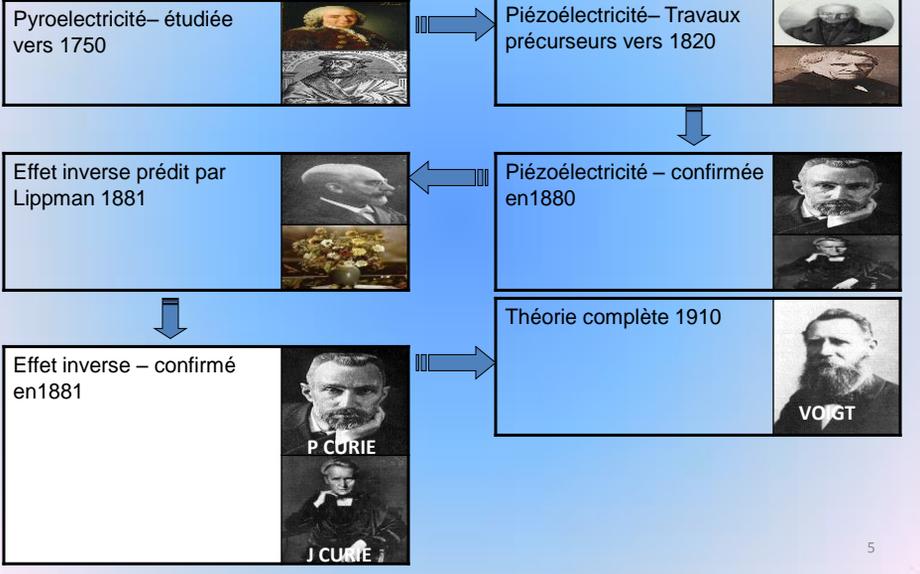


Piézoélectricité –
observation expérimentale
en 1880

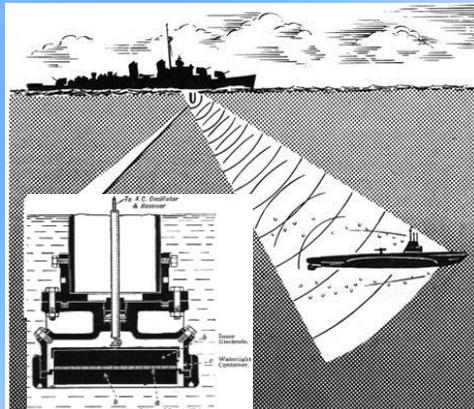


4

Découverte de l'effet piézoélectrique



**La première application est aussi française :
le SONAR inventé par Paul Langevin
pendant la 1^{ère} guerre mondiale**

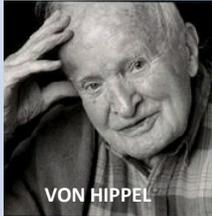


Transducteur Quartz type sandwich



Seconde guerre mondiale et après

Piézoélectricité artificielle présente dans certaines céramiques en particulier le Titanate de Barium



VON HIPPEL

XCVI. *Theory of Barium Titanate.*—Part I.

By A. F. DEVONSHIRE,
H. H. Wills Physical Laboratory, University of Bristol*.

[Received July 29, 1949.]

SUMMARY.

The theory of the dielectric and crystallographic properties of barium titanate is considered. By expanding the free energy as a function of polarization and strain and making reasonable assumptions about the coefficients, it is found possible to account for the various crystal transitions. Calculations are made of the dielectric constants, crystal strains, internal energy, and self polarization as functions of temperature. Finally relations are obtained between the coefficients in the free energy and the ionic force constants. These are used to estimate some of the coefficients which are not completely determined by experimental data.

High dielectric constant ceramics

A. von Hippel, R. C. Breckenridge,
F. G. Chesley, and Laszlo Tisza

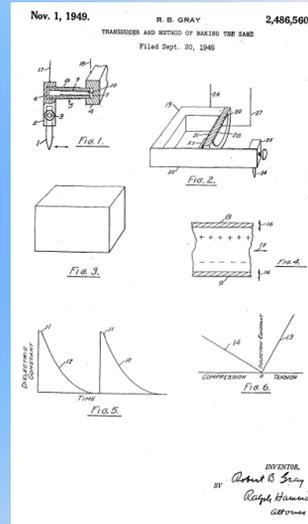
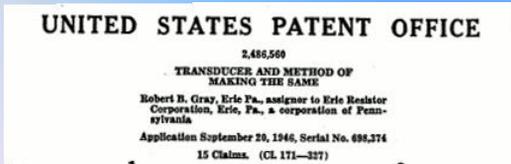
LABORATORY FOR INSULATION RESEARCH, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY,
CAMBRIDGE, MASS.

Results of an investigation are presented in this paper on titanium dioxide and the alkaline earth titanates, including some mixtures and solid solutions of the barium and titanium compounds. Dielectric measurements over a wide range of frequencies, temperatures, and voltages, and thermal expansion and x-ray studies have yielded a rather complete picture of the properties and usefulness of these titania ceramics. Barium titanate and the

barium-strontium titanate solid solutions prove to be a very class of ferroelectric materials. Their peculiar dielectric behavior was first noted by the Titanium Alloy Manufacturing Company, and this behavior proved to be connected with a lattice transition from pseudocubic to cubic. Additional maxima have been found in the dielectric characteristics which correspond to transitions of the second order. These maxima are being studied further.

Développement des céramiques

En 1949 Brevet US
Erie Resistor Corporation pour le premier transducteur à base de céramique piézoélectrique.



Les titanates zirconates de plomb PZT

Piezoelectric Properties of Lead Zirconate-Lead Titanate Solid-Solution Ceramics*

B. JAFFE, R. S. ROTH, AND S. MARZULLO
National Bureau of Standards, Washington, D. C.
(Received March 3, 1954)

J. Appl. Phys. **25**, 809 (1954)



Hans Jaffe

- Très forte activité piézoélectrique
- Large gamme de température 450 °C
- Facile à polariser
- Propriétés versatiles



Céramiques PZT
(www.fujicera.co.jp)

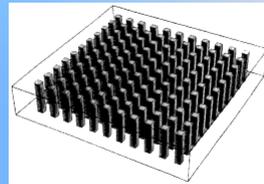
9



Essor des Technologies de fabrication Amélioration des performances

1978 : matériaux composites

R.E. Newnham, D.P. Skinner, L.E. Cross, *Connectivity and piezoelectric-pyroelectric composites*, *Materials Research Bulletin*, Volume 13, Issue 5, May 1978, Pages 525-536

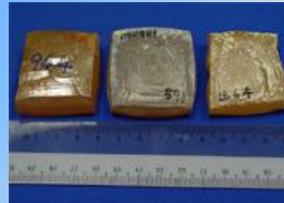


<http://www.ndt.net/article/v06n08/fleury/fig1.gif>

Années 90 Monocristaux piézoélectriques à propriétés géantes

Jun Kuwata, Kenji Uchino, and Shoichiro Nomura, *Phase Transitions in the Pb(ZnInNbM)O₃-PbTiO₃ System*, *Ferroelectrics*, vol. 37, pp. 579-582, 1981

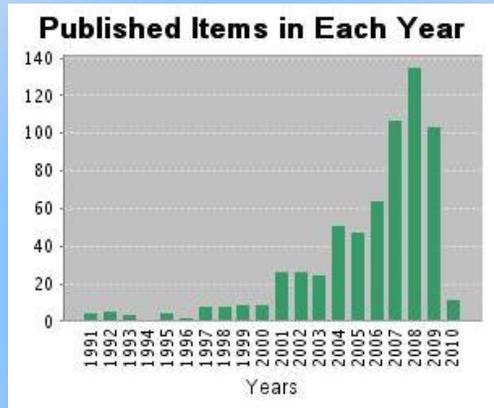
T. R. Shout, Z.P. Chang, N. Kim and S. Markgraf, *Dielectric Behavior of single Crystals Near the (1-x)Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ (x)PbTiO₃ Morphotropic Phase Boundary*, *Ferroelectr. Let.*, vol. 12, pp. 63-69, 1990.



<http://www.microfine-piezo.com/>

10

Années 2000 : Céramiques sans plomb



DIRECTIVE 2002/95/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL
of 27 January 2003
on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment

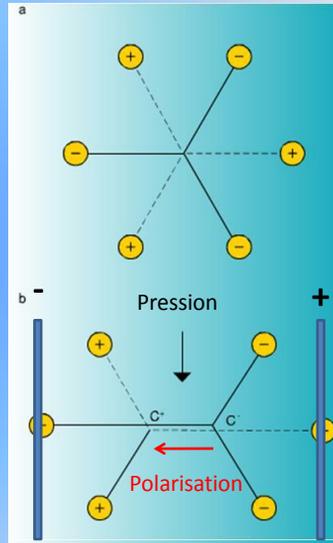
11

Piézoélectricité et ferroélectricité

12

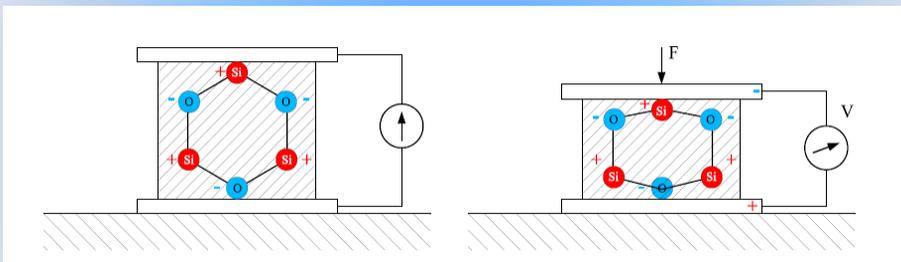
Pourquoi dans certains matériaux ?

La piézoélectricité
apparaît dans les
cristaux sans centre de
symétrie



13

Cas du Quartz Apparition de charges



14

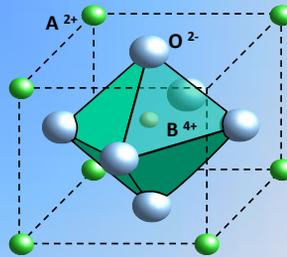
Piézoélectricité et ferroélectricité

Définition d'un matériau Ferroélectrique

Une phase d'un matériau est dite ferroélectrique si pour cette phase la polarisation spontanée peut être réorientée entre plusieurs directions d'équilibre par un champ électrique externe

famille des pérovskites ABO_3

•**Ferroélectricité** : le vecteur polarisation peut être inversé par application d'un champ électrique externe



15

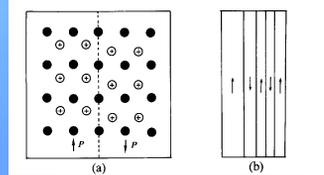
Propriétés utiles

- Forte constante diélectrique sur une large gamme de température et de fréquence.
- constantes piézo-électriques élevées (1000 X plus grand que le quartz).
- effets pyro-electric élevés (100 plus grand que la Tourmaline).
- propriétés non linéaires du comportement électromécanique, Permittivité et indices de réfraction ajustable par application d'un champ électrique
- matériaux électrostrictifs

16

Caractéristiques des ferroélectriques

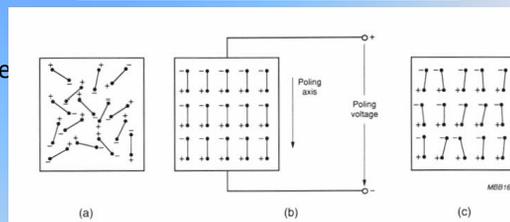
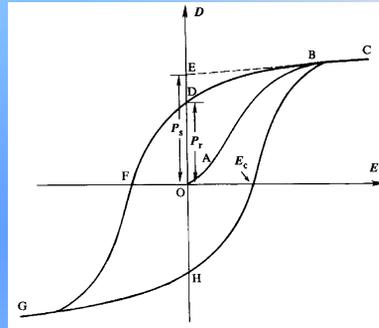
- Existence de **domaines** : régions de l'espace où les dipôles électriques sont alignés dans la même direction.
- Origine ? : systèmes poly-domaines minimisent l'énergie libre.
- Observation en lumière polarisée.



17

Caractéristiques des ferroélectriques

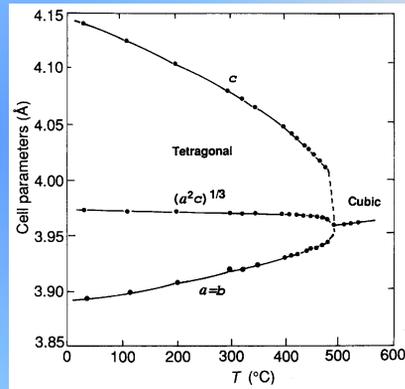
- **Cycle d'hystérésis**
 - P_s : polarisation spontanée
 - P_r : polarisation rémanente
 - Déformation permanente d
 - E_c : champ coercitif
- \Rightarrow Orientation des domaines ferroélectriques
 - Facilité avec la température
- \Rightarrow piézoélectricité en volume



18

Caractéristiques des ferroélectriques

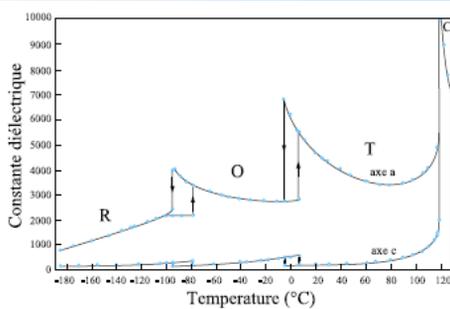
- **Température de Curie** : perte de l'effet ferroélectrique
 - $T < T_c$ maille tétragonale $a = b \neq c$
 - $T > T_c$ maille cubique.
- 120°C (BaTiO_3) $< T_c < 500^\circ\text{C}$ (PZT)



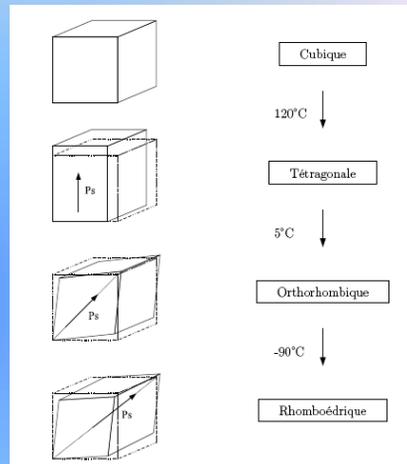
Dépendance en température des paramètres de maille pour une céramique de PbTiO_3

19

Évolution avec la température



Variation thermique de la permittivité diélectrique du monocristal de BaTiO_3 polarisé suivant [001]



Direction de polarisation électrique selon la structure cristalline du cristal BaTiO_3 .

20

Céramiques ferroélectriques de type pérovskite

- Structure générique : ABO_3
 - A ions 2+ aux sommets de la maille
 - B ion 4+ au centre de la maille
 - O ions oxygène 2- au centre de chaque face
- Exemples de compositions
 - $PbTiO_3$, $PbZrO_3$, $KNbO_3$...
 - $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ (**PZT**) Système binaire
 - $(Pb_yCa_{1-y})(Zr_xTi_{1-x})O_3$ Substitution d'éléments

Compound	Symmetry at room temperature	Lattice parameters at 20°C			Transition temperature (°C) (to cubic phase)
		a = b (Å)	c/a	z	
BaTiO ₃	tetragonal	3.992	1.010		120 [†]
SrTiO ₃	cubic	3.905	–		–220
CaTiO ₃	orthorhombic	3.827*	0.999	90° 40'	1260
PbTiO ₃	tetragonal	3.905	1.063		490 [†]
CdTiO ₃	orthorhombic	3.791*	1.004	91° 10'	
PbZrO ₃	orthorhombic	4.159*	0.988	90°	232
PbHfO ₃	orthorhombic	4.136*	0.991	90°	215
KNbO ₃	orthorhombic	4.038	0.983	90° 15'	435 [†]
NaNbO ₃	orthorhombic	3.914*	0.991	90° 41'	640
AgNbO ₃	orthorhombic	3.944*	0.993	90° 34'	550
KTaO ₃	cubic	3.989	–		–260 [†]
NaTaO ₃	orthorhombic	3.890*	0.998	90° 29'	470
AgTaO ₃	orthorhombic	3.931	0.992	90° 21'	485

*Described by using monoclinic axes here.
[†]Ferroelectric Curie point is the same temperature.

21

Equations de la piézoélectricité

Equations de la piézoélectricité

- piézo-électricité
 - Couplage entre T, S et D, E.
 - dérive de l'écriture des potentiels thermodynamiques
- F est une différentielle totale exacte
- s^E tenseur des flexibilités
- d tenseur piézoélectrique
- ϵ^T tenseur diélectrique

$$F = U - S_\alpha T_\alpha - E_i D_i \quad \alpha \text{ variant de } 1 \text{ à } 6 \text{ et } i \text{ de } 1 \text{ à } 3$$

U	Energie interne du système
$S_\alpha T_\alpha$	Energie mécanique du système
$E_i D_i$	Energie électrique du système

$$dS_\alpha = \left[\frac{\partial S_\alpha}{\partial T_\beta} \right]_E dT_\beta + \left[\frac{\partial S_\alpha}{\partial E_i} \right]_T dE_i$$

$$dD_i = \left[\frac{\partial D_i}{\partial T_\alpha} \right]_E dT_\alpha + \left[\frac{\partial D_i}{\partial E_j} \right]_T dE_j$$

$$dS_\alpha = s_{\alpha\beta}^E dT_\beta + d'_{i\alpha} dE_i$$

$$dD_i = d_{i\alpha} dT_\alpha + \epsilon_{ij}^T dE_j$$

23

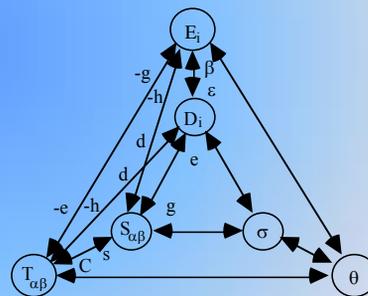
- domaine linéaire : tenseurs élastique, électrique et piézo-électrique constants l'intégration du système

• ⇒ Equations constitutives

$$S_\alpha = s_{\alpha\beta}^E T_\beta + d'_{i\alpha} E_i$$

$$D_i = d_{i\alpha} T_\alpha + \epsilon_{ij}^T E_j$$

- Ensemble des relations et coefficients liant les grandeurs mécaniques, électriques et thermodynamiques



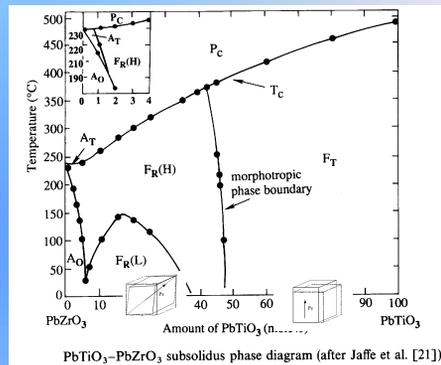
24

Propriétés des céramiques

- Coefficient piézoélectrique d_{33} \Rightarrow • 400-500 pC/N ou pm/V
- Coefficient de couplage \Rightarrow • Mode épaisseur $\approx 0,5$
- Constante diélectrique \Rightarrow • $200 < \epsilon < 1500$
- Facteur de qualité \Rightarrow • $50 < Q < 2500$
- Constantes d'élasticité (vitesse) \Rightarrow • $C_{33} \approx 140$ GPa
– Vitesse ≈ 4500 m/s
- Masse volumique \Rightarrow • $7500 < \rho < 7800$ kg/m³

Cas de la structure $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ titanate zirconate de plomb (Jaffe 1954)

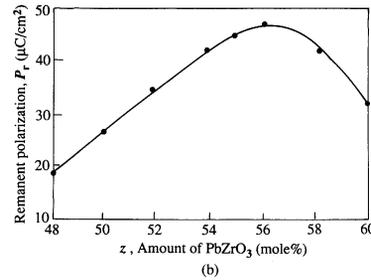
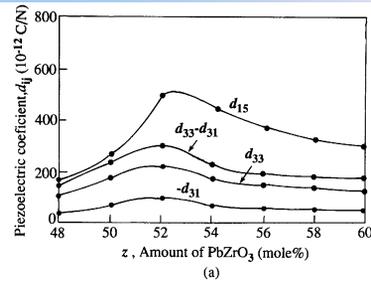
- $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ Structure pérovskite
- Ion Ti^{4+} remplacé par Zr^{4+}
 - $0 < x < 100\%$
 - Zr^{4+} se substitue de manière aléatoire à Ti^{4+}
- Pseudo diagramme de phase binaire
 - $\text{PbZrO}_3 - \text{PbTiO}_3$
 - Frontière morphotrope (47% de PbTiO_3)



Composé	Symétrie à température ambiante	Paramètre de maille à 20°C		Température de transition (°C) (vers la phase cubique)
		a (Å)	c/a	
PbTiO ₃	Tetragonal	3,905	1,063	490
PbZrO ₃	Orthorhombique	4,159	0,988	232

Structure des PZT : $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$

- Propriétés piézoélectriques à la frontière
 - Polarisation rémanente
 - Coefficients piézoélectriques

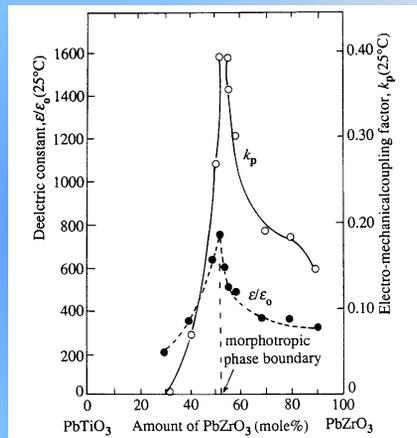


Variations des coefficients piézoélectriques et de la polarisation rémanente au voisinage de la frontière morphotrope

27

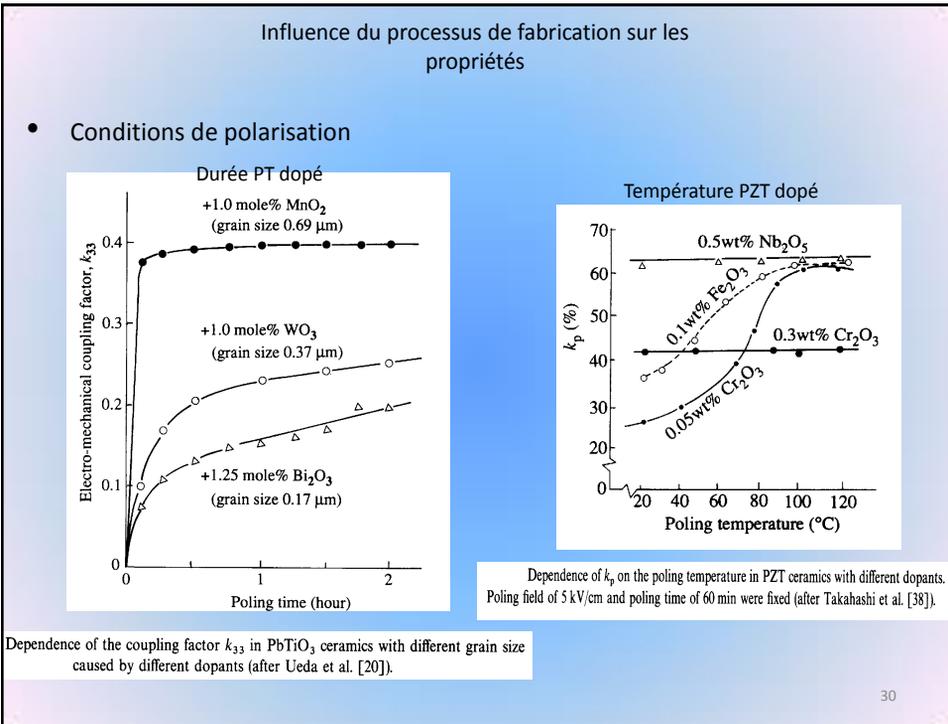
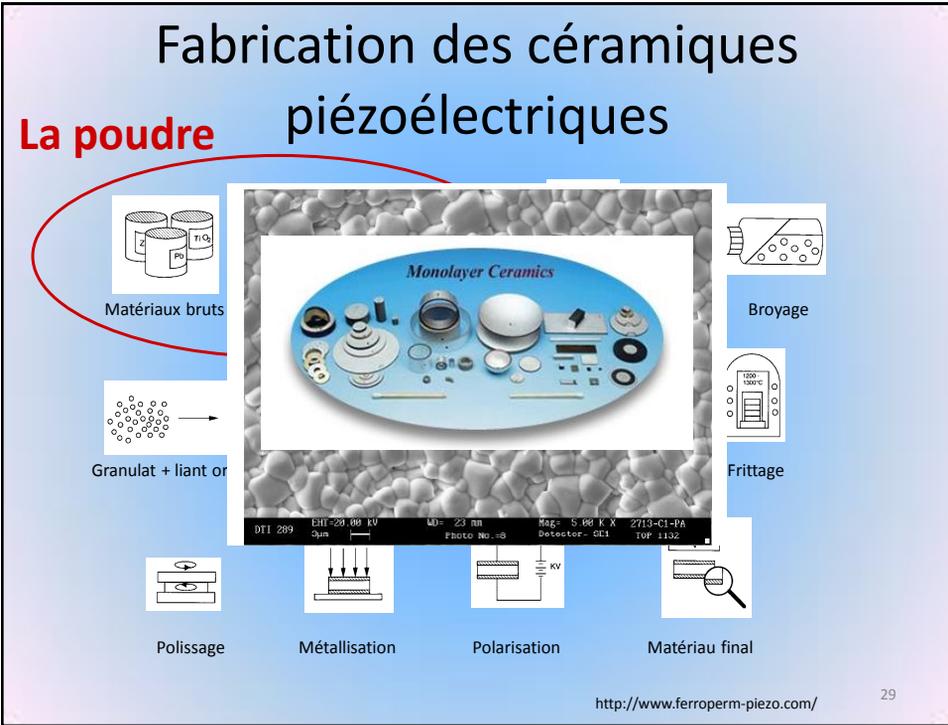
Propriétés piézoélectriques globales

- Couplage élevé
- Constante diélectrique élevée



Dépendance de la constante diélectrique et du coefficient de couplage en fonction de la composition

28



Applications

31

Effet inverse : Actionneur ...

- Haut parleur
- Sonar
- Actionneurs
- Moteurs

Applications de la piézoélectricité

Deux effets

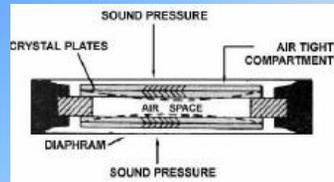
- Horloge, filtrage en électronique
- Capteurs fonctionnalisés
- Ultrasons Médecine & industrie

Effet direct : capteurs

- Microphones
- Accelerometres
- Hydrophones
- Récupération d'énergie
- Capteurs ...

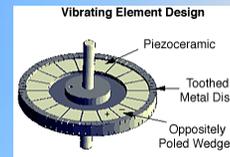
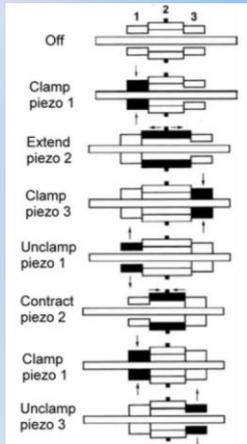
32

Produire / capter du son



33

Moteurs piézoélectriques



34

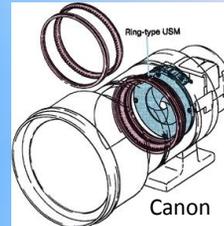
Applications

Montres



Seiko

Optique



Canon

Main characteristics

- Couple élevé
- Vitesse lente
- Faible consommation
- Très compact

Robotique



Micro mécanique

35



Secteur automobile

Capteurs

- Accéléromètres
- stabilité (gyroscope)
- pression
- niveau de fluide
- Radar
- Capteurs de chocs



Moteur

- Soupapes
- injecteurs
- Pompes

Structures actives

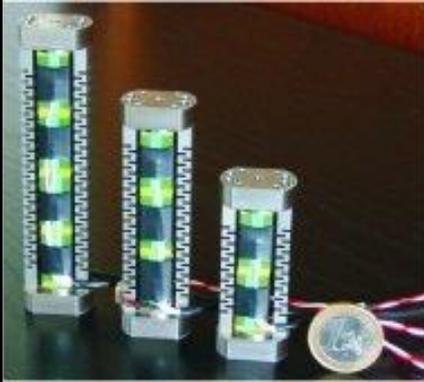
- Diagnostique
- Réduction du bruit
- Contrôle antivibratoire

Actuateurs

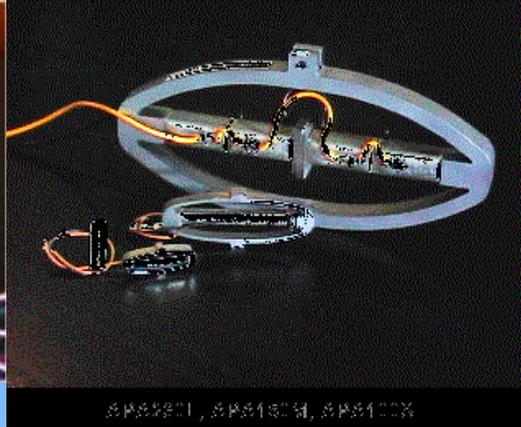
- Moteurs
- Linéaire, rotation

36

Actuateurs



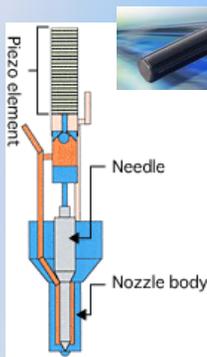
**Linéaires
(multicouches)**



**Amplifiés
mécaniquement**

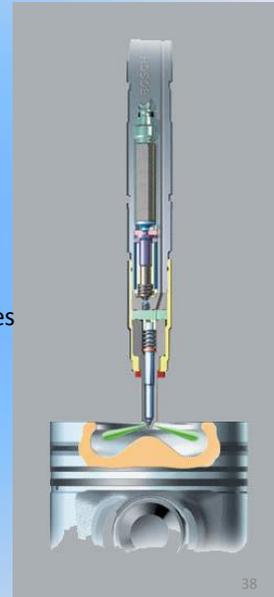
37

Injecteurs Diesel



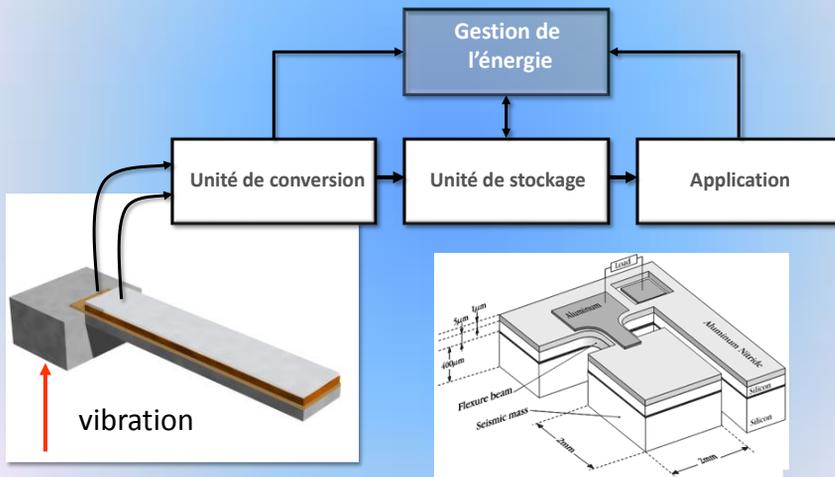
Avantages principaux

- Faibles dimensions
- Très rapide : injections multiples
- Consommation <
- Pollution <



38

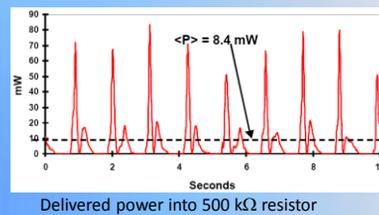
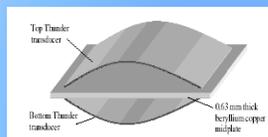
Récupération d'énergie



39

- Récupération de l'énergie humaine – [Shenck2001]

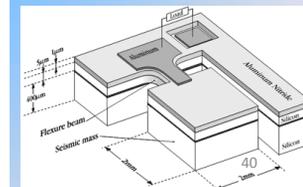
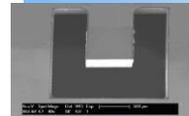
- PZT bimorphe
- Puissance : **8.4 mW**



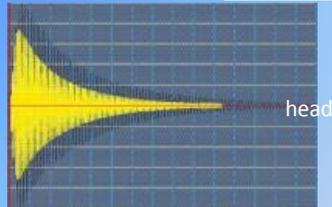
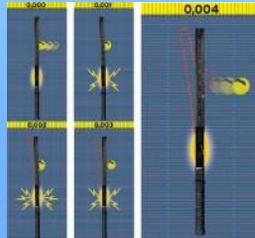
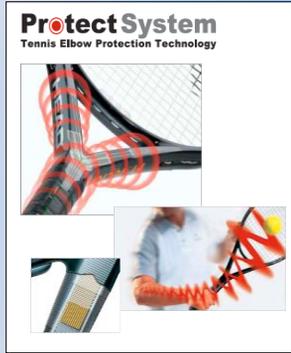
Delivered power into 500 kΩ resistor

- Microsystèmes [Marzencki2007]

- Substrat silicium
- Unimorphe: 1.5mm x 0.75mm
- Matériaux piézoélectrique : AlN or PZT
- Puissance suffisante pour alimenter un capteur sans fils émettant toutes les 60s



Amortissement : contrôle de vibration

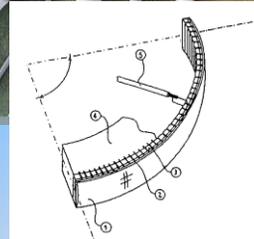
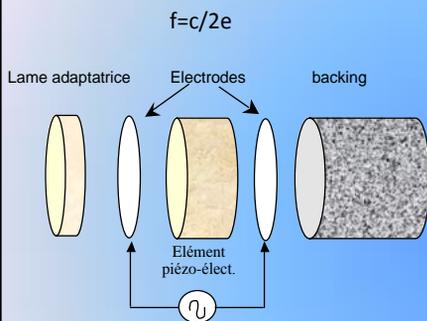


Dissipation sous forme de chaleur

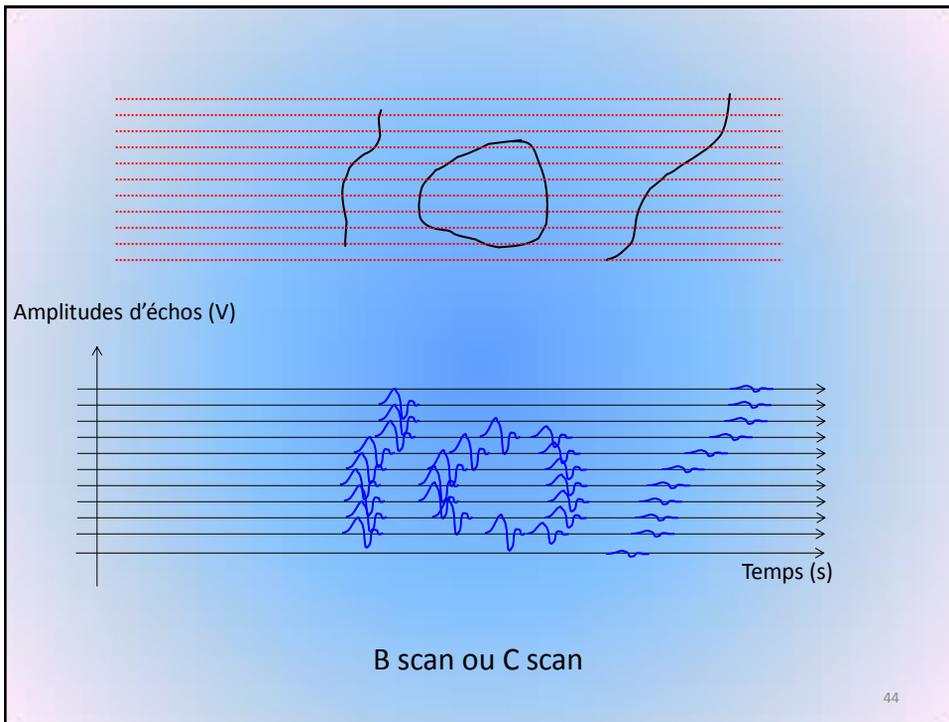
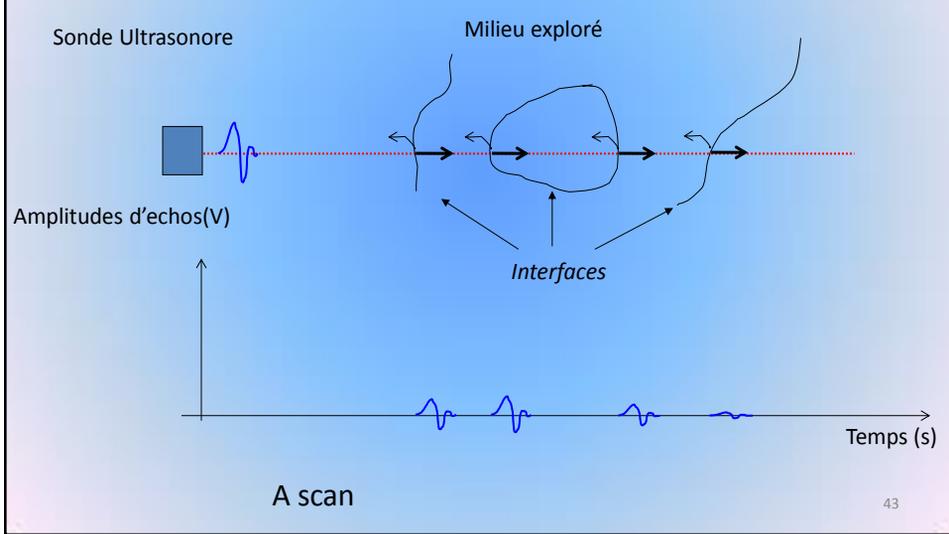
Ski, snow board, golf ...

41

Transducteurs ultrasonores: produire et détecter des ondes ultrasonores

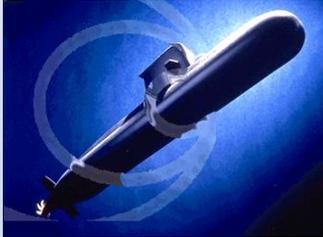


FORMATION D'UNE IMAGE ECHOGRAPHIQUE

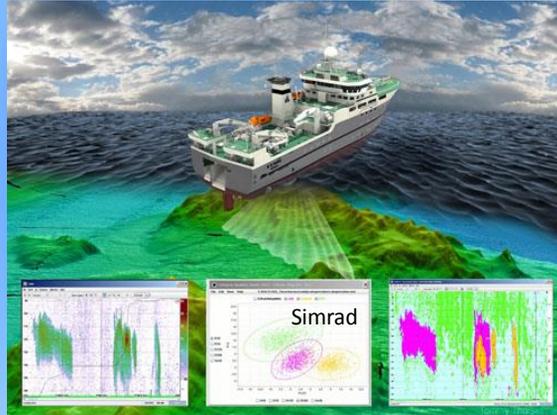


Acoustique sous marine

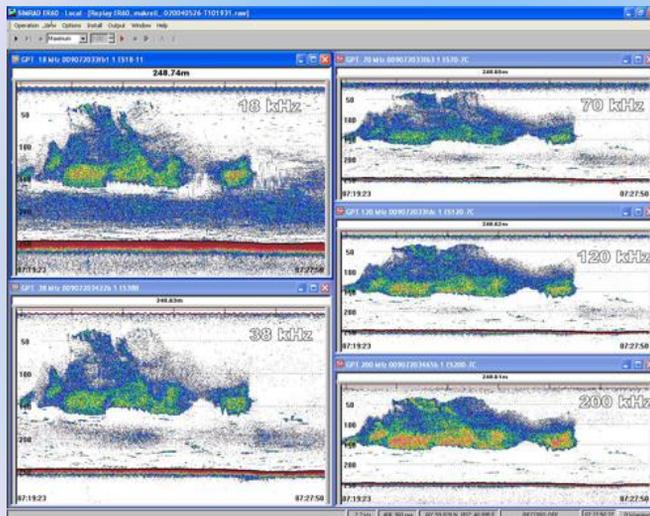
SONAR



Pêche, océanographie



Pêche



Populations de maquereaux.

Applications médicales

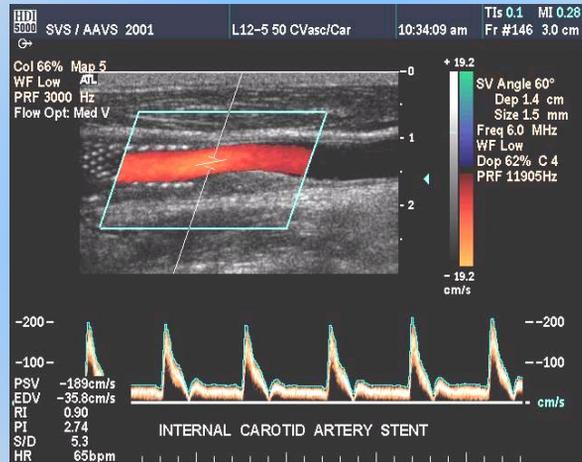


Colonne vertébrale
foetus



Coeur de foetus

Image Doppler



49

Imagerie 3D avec reconstruction de surfaces

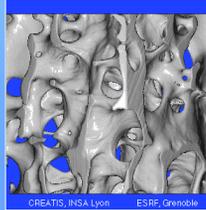


50

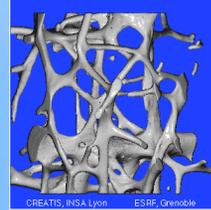
Suivi décalcification osseuse



Vertèbre 4x4x4 mm³ - Résolution 6.65 µm



Femme 33 ans



Femme 72 ans



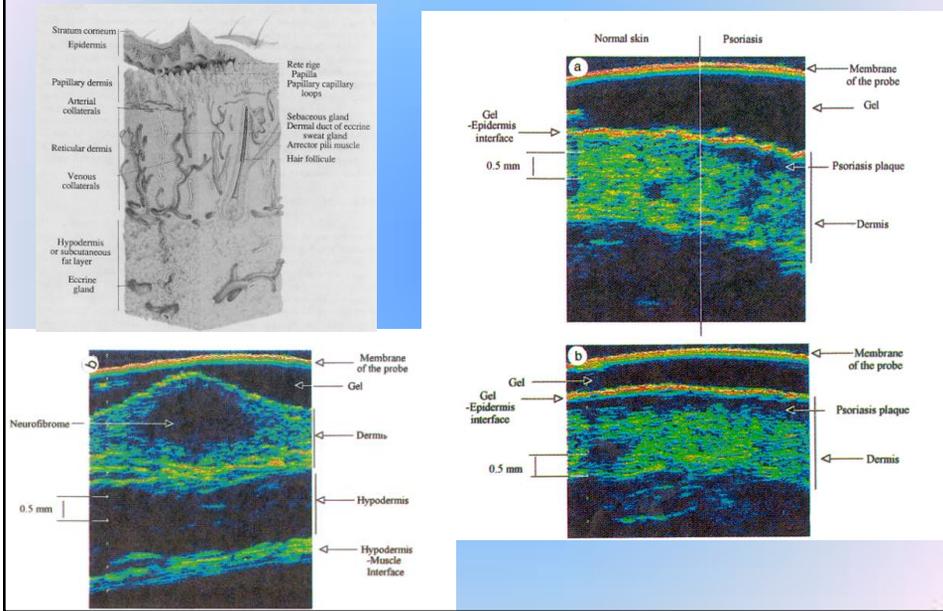
Echographie haute résolution



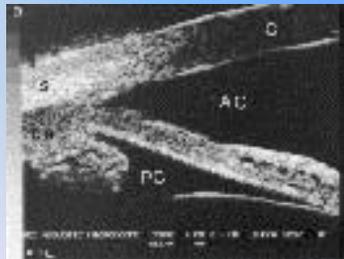
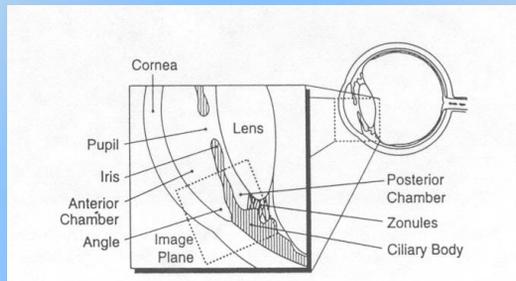
Applications :

- peau (psoriasis, cancérologie ...)
- segment antérieur de l'œil (glaucome, greffes de cornée, tumeurs...)
- petit animal : expérimentation

Echographie de la peau



Echographie de l'oeil



Applications cliniques

- Gynécologie obstétrique (foetus)
- Abdomen (rein, foie ...)
- Cardiologie
- Vasculaire (artère)
- Thyroïde
- Muscles et tendons
- Ophtalmologie etc. ...

55

Applications thérapeutiques : effets des ultrasons de puissance sur les tissus biologiques

Chauffage

Les frictions (atténuation) durant la propagation des ondes transforment l'énergie acoustique en chaleur.

Cavitation

Quand des petites bulles de gaz sont soumises à une onde de pression, elle se mettent à osciller et à implorer pour de forts niveaux de puissance : possibilité de détruire des milieux biologiques.

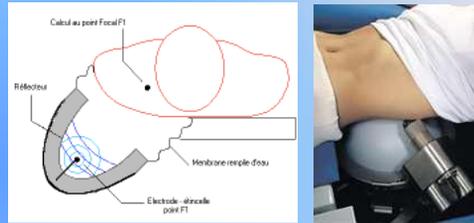
Ondes de choc

Une onde acoustique très brève et intense est appelée onde de choc (ex. : explosion) : une telle onde peut détruire des objets (objets solides).

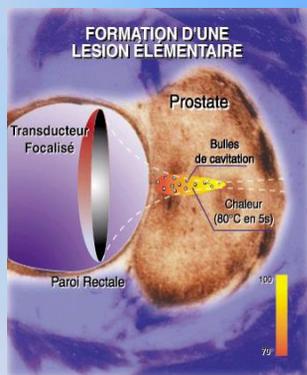
56

LITHOTRIPSIE

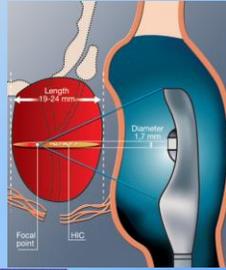
- Ondes de choc
- Destruction de calculs



Chirurgie Ultrasonore Ultrasons de forte intensité : Brûle les tumeurs cancéreuses

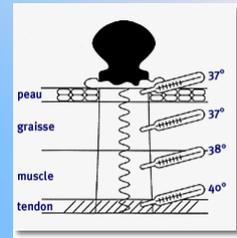


Systèmes: Imagerie & thérapie ultrasonore

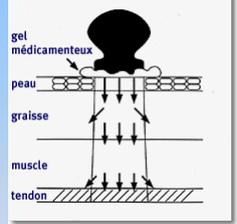


PHYSIOTHERAPIE

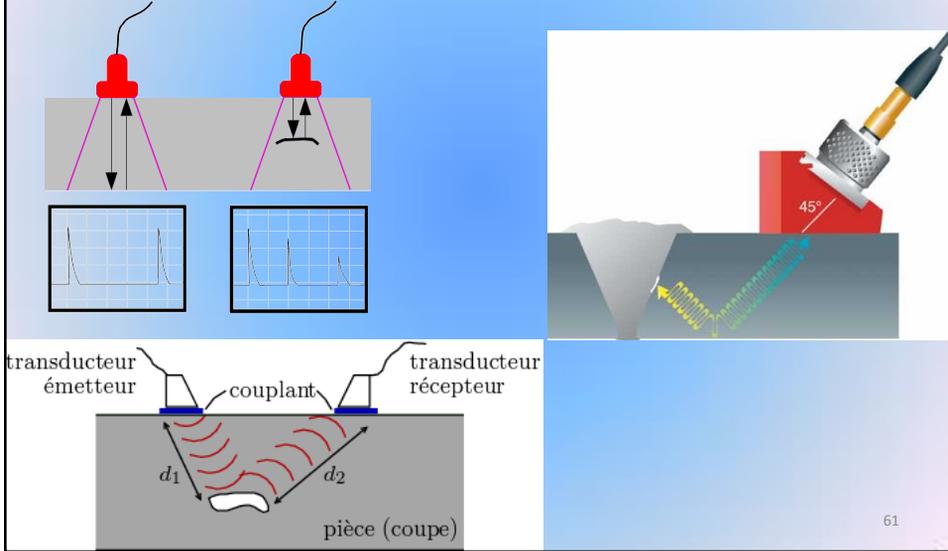
Effets thermiques



Sonophorese

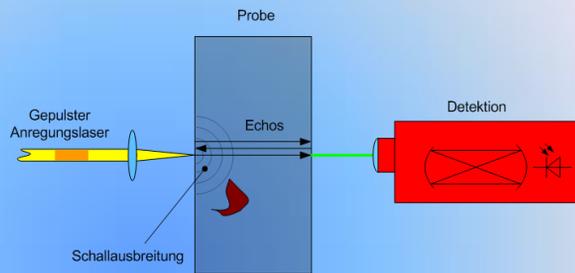


Contrôle non-destructif (CND) par ultrasons



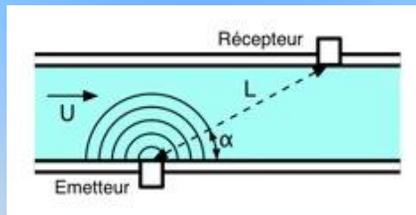
Applications CND ultrasons

INDUSTRIES
 Aéronautique
 Nucléaire
 Pétrolière
 Métallurgie
 Automobile
 Trains & rails ...



Débimétrie industrielle / pétrolière

Précision: 0.1%

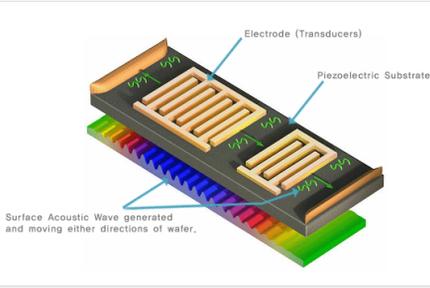


63

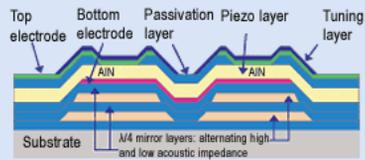
Electronique

Filtres à ondes de surface

Filtres à ondes de volume :

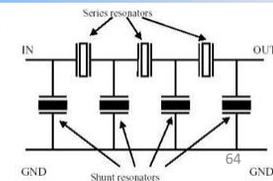


2 | Section through BAW filter



2 EPCOS manufactures these filters in BAW SMR (solidly mounted resonator) technology. Several BAW SMR process steps closely resemble semiconductor fabrication.

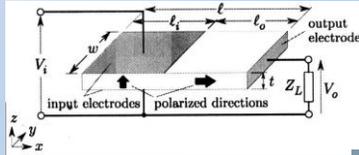
Communications sans fil
 Traitement du signal
 Applications temps fréquence (GPS)



Electronique

Transformateurs

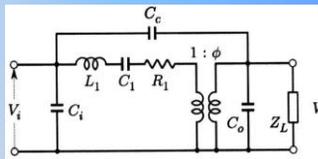
C.A. Rosen 1956



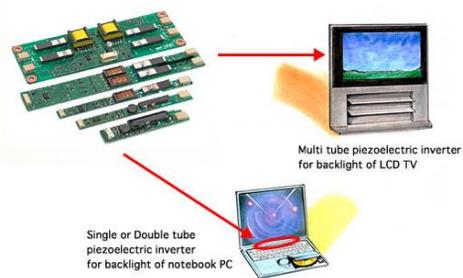
Matériaux:

Céramiques

Applications :

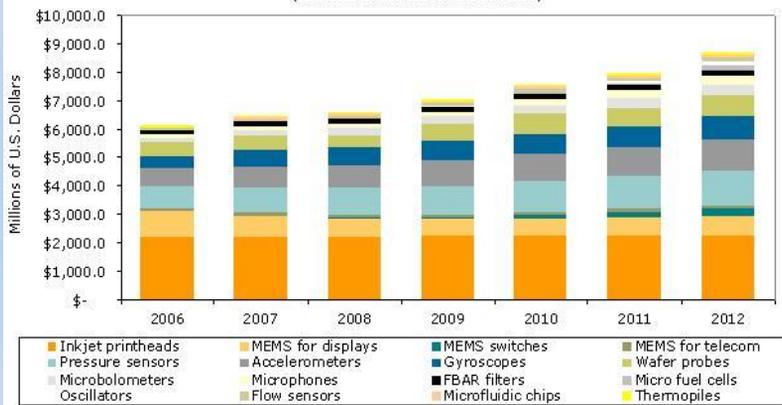


Piezoelectric Inverter Applications



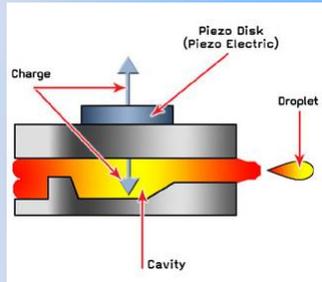
Microsystèmes

Global MEMS Revenue Forecast by Device 2006-2012
(Revenue in Millions of U.S. Dollars)

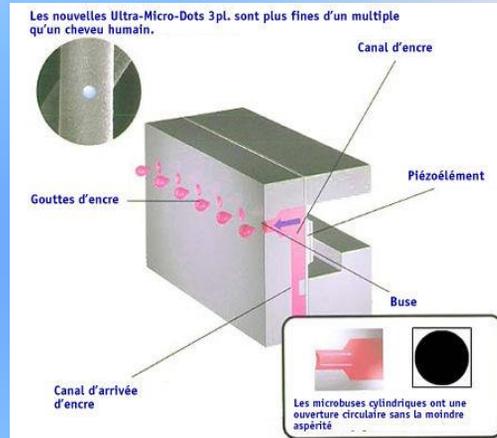


Source: iSuppli Corp., August 2008

Imprimante à jet d'encre



<http://www.okistreet.fi/encyclo/printer/tech/piezo.asp>



http://www.epson.ch/fileadmin/content/images/piezo_2_fr_high.jpg

67

Conclusions

- Aujourd'hui les matériaux piézoélectriques sont présents dans un très grand nombre d'applications **capteurs, actuateurs, transducteurs** .
- Elles couvrent un très grand nombre de domaines d'activités : des **microsystèmes** à la **microélectronique** en passant par la **médecine** et l'industrie **nucléaire** ou **aéronautique**.
- Les matériaux piézoélectriques sont **souvent cachés** mais **essentiels** dans de nombreuses applications

68