

Dalles piézoélectriques



Khabouze Mehdi

Scei:10006

Plan de la présentation:

- 1 Introduction et problématique.
- 2 La piézoélectricité et ses applications.
- 3 Propriétés des piézo-cristaux.
- 4 Modélisation, optimisation et Simulation numérique.
- 5 Prototype et Étapes de réalisation.
- 6 Conclusions et perspectives.

Problématique:



Enjeux énergétiques :
flambée des prix, pénuries.

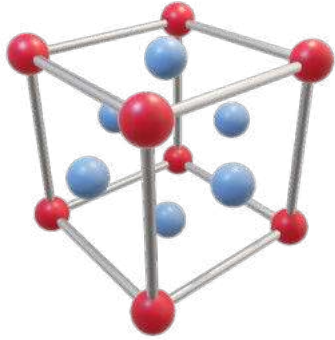
Solution éco-responsable:
La marche

Innovation piézoélectrique:
récupération de l'énergie
piétonnière.

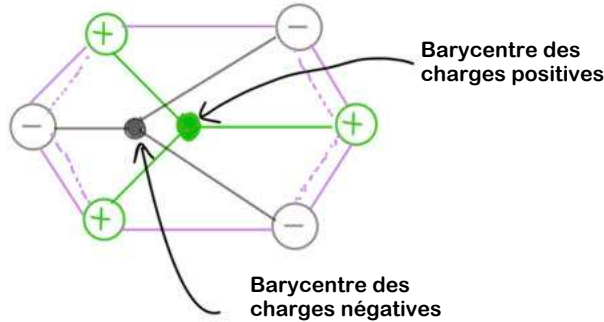
La piézoélectricité et ses applications



Qu'est ce que la Piézoélectricité ?



Déformation mécanique
de la maille



Décalage des barycentres
des charges positives et
négatives



Piézoélectricité



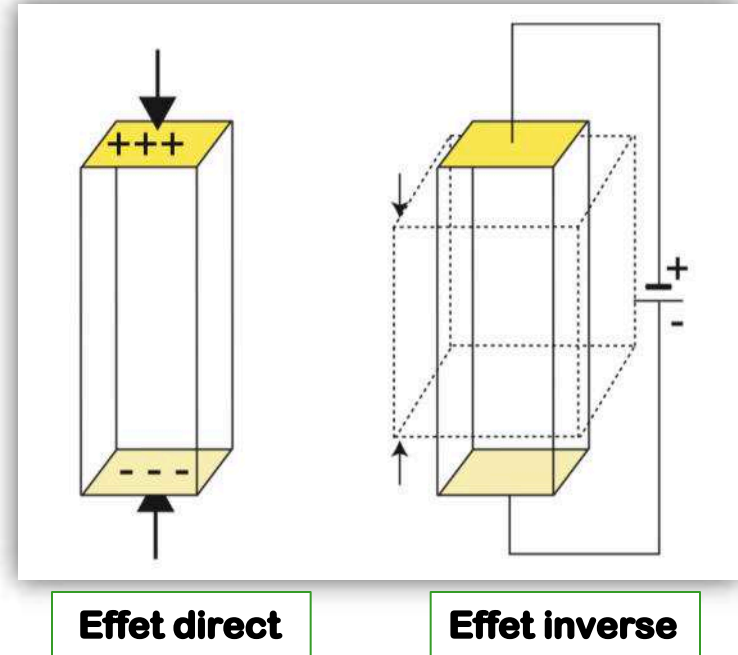
Qu'est ce que l'effet Piézoélectrique ?



Générer un champ électrique suite à une contrainte mécanique.



Transformer une énergie électrique en une énergie mécanique.



Effet direct

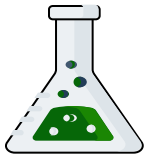
Effet inverse

Figure 1: Schématisation de l'effet piézoélectrique direct et inverse sur un barreau muni d'électrodes

Chronologie

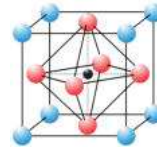
1880

Découverte
de la
piézoélectricité



1952

Découverte
du
PZT



2009



Applications de la piézoélectricité

<https://french.alibaba.com>



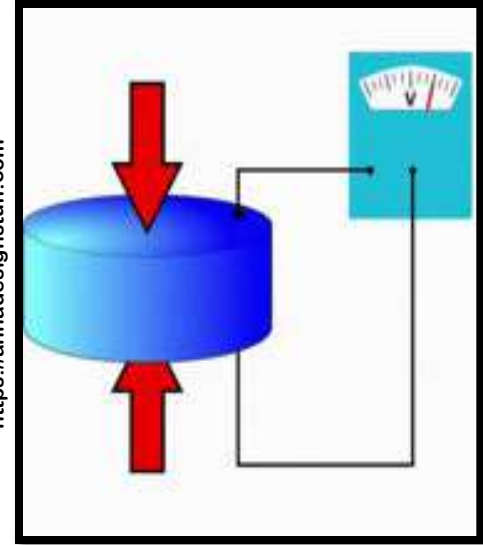
Actionneurs

<http://piezoelectricite.over-blog.com/2014/05/conclusion.html>



Générateurs

<https://annadesignstuff.com>

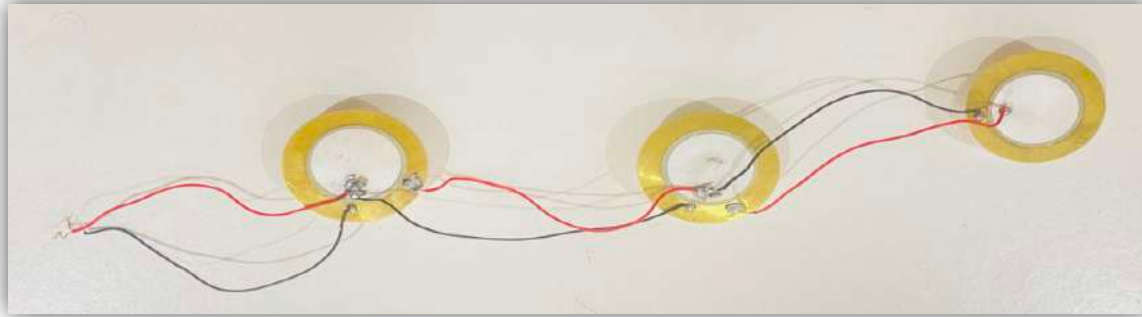


Capteurs

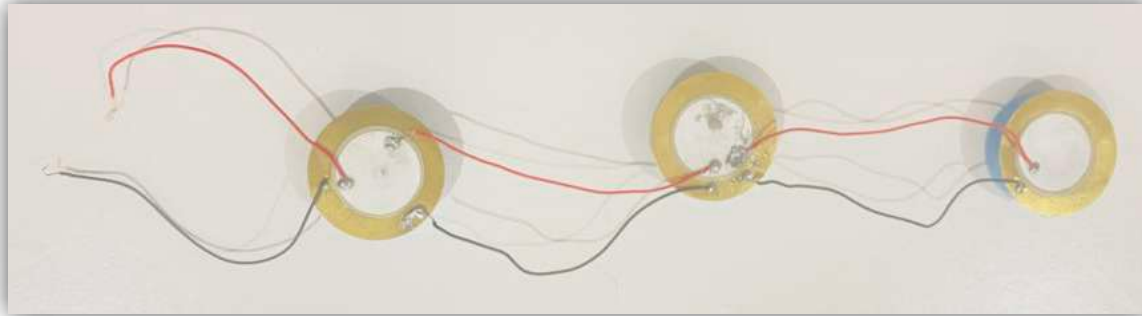
Propriétés piézoélectriques



Montages Piézoélectriques

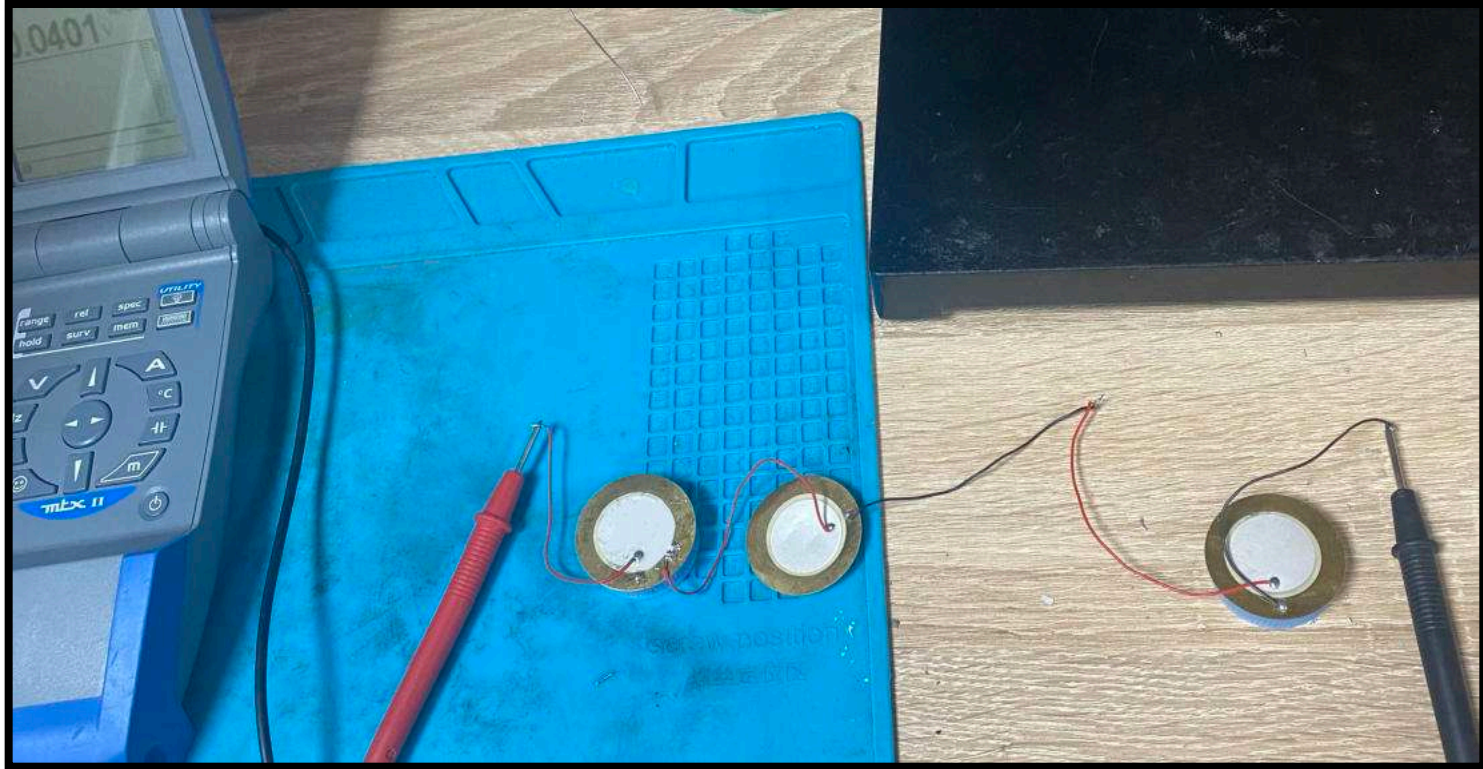


Montage en série

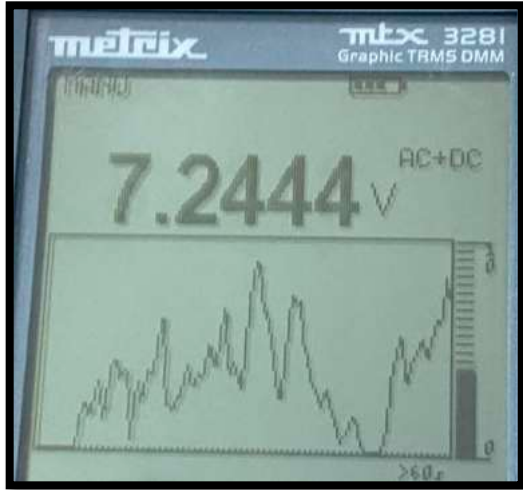


Montage en parallèle

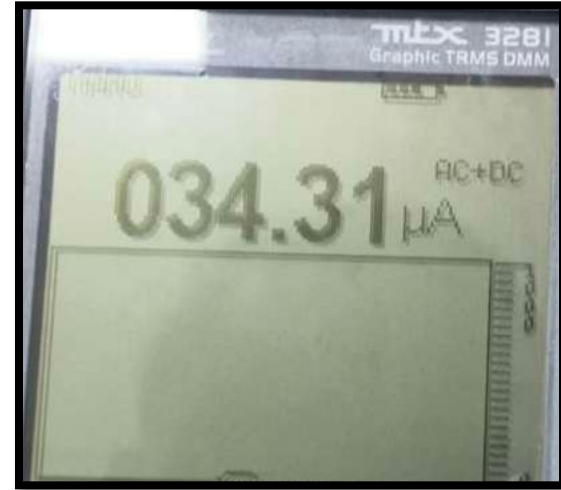
Montage en série



Montage en série

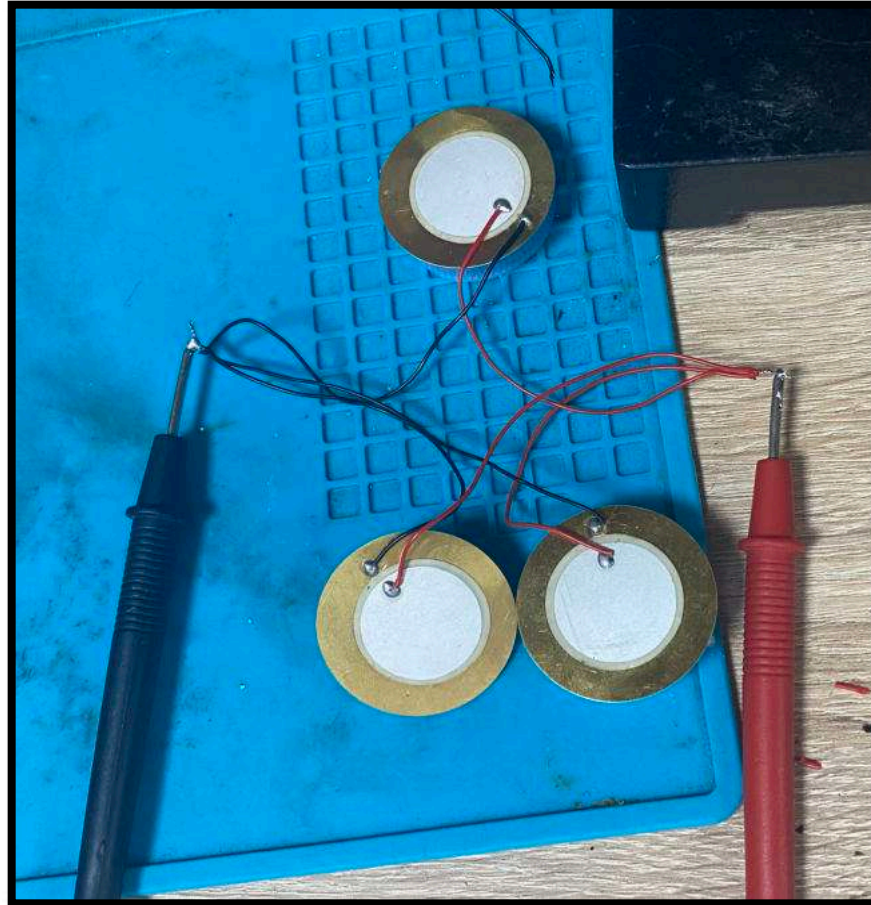


Courbe indiquant la tension (V) générée en fonction du temps (s)

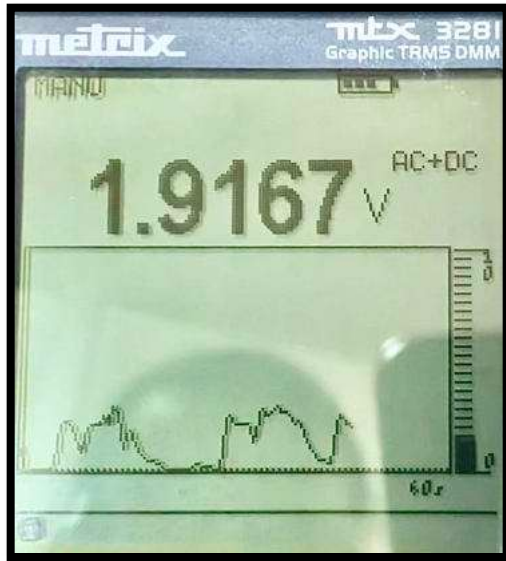


Courbe illustrant l'intensité du courant (μA) en fonction du temps(s)

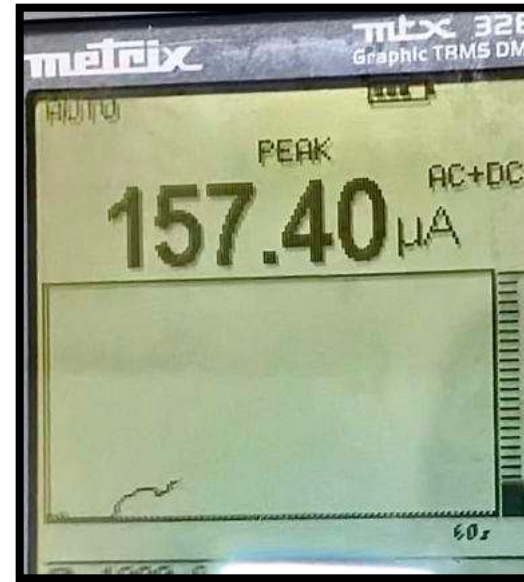
Montage en parallèle



Montage en parallèle



Courbe indiquant la tension (V) générée en fonction du temps (s)



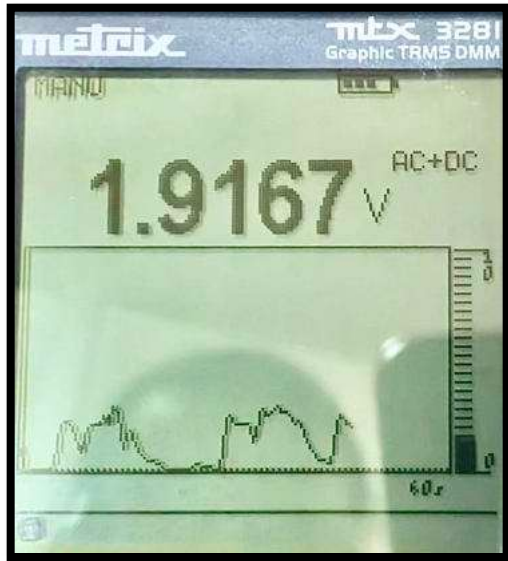
Courbe illustrant l'intensité du courant (µA) en fonction du temps(s)

Comparaison des montages

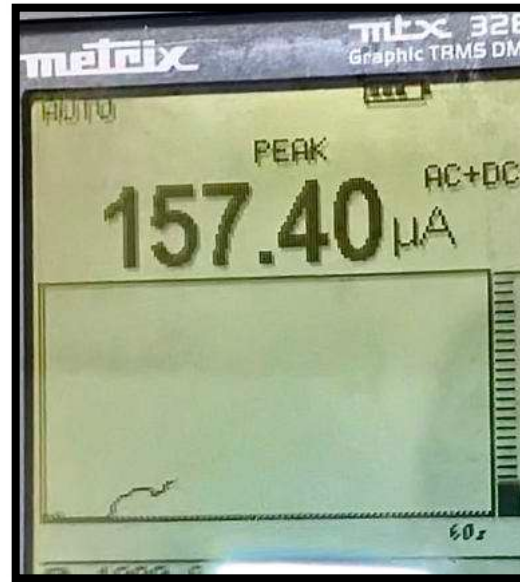
	Courant	Tension
Montage en parallèle	✓	✗
Montage en série	✗	✓

↗
Selon
le besoin
optimisation

Montage en parallèle

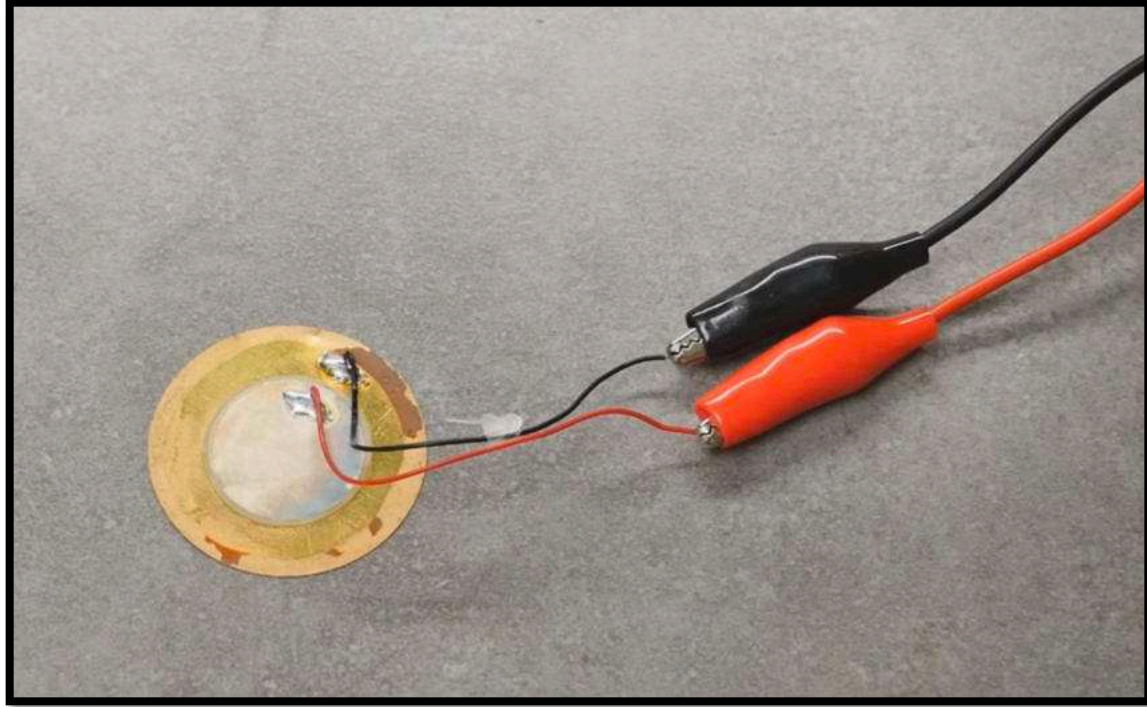


Courbe indiquant la tension (V) générée en fonction du temps (s)



Courbe illustrant l'intensité du courant (μ A) en fonction du temps(s)

L'effet piézoélectrique inverse

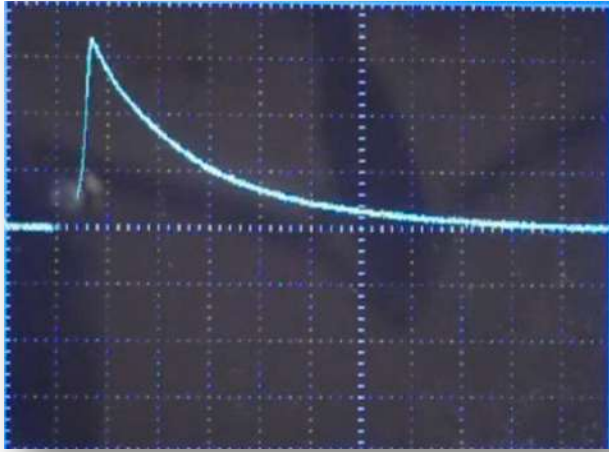


Buzz

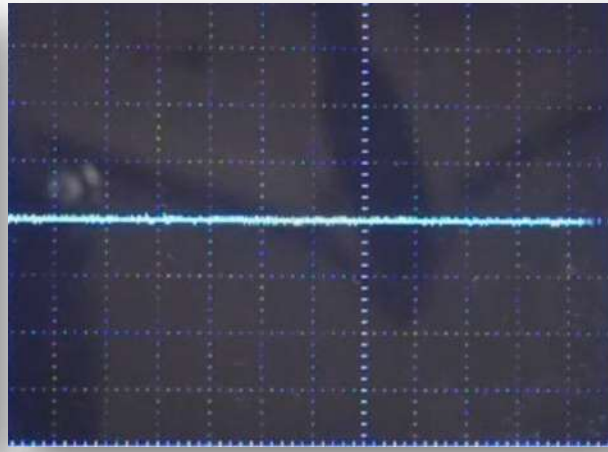
Capteur piézoélectrique mis sous tension

Est-ce-que cette tension
électrique dure tout le temps
ou seulement pendant l'instant
de la déformation ?

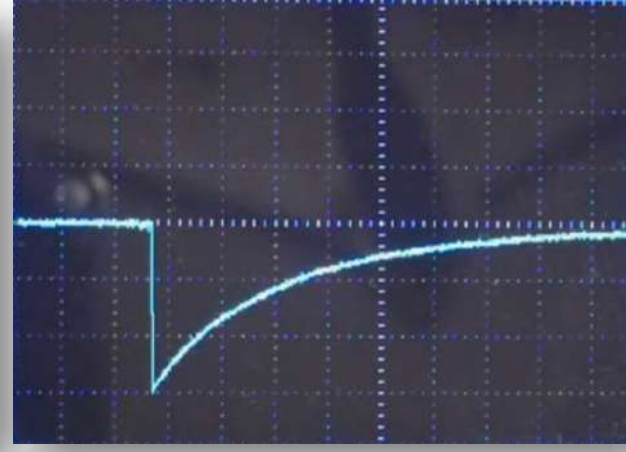
Expérience 1



Application d'une pression
→ un pic de tension puis une chute à zéro.



Conservation de la pression
→ annulation de tension



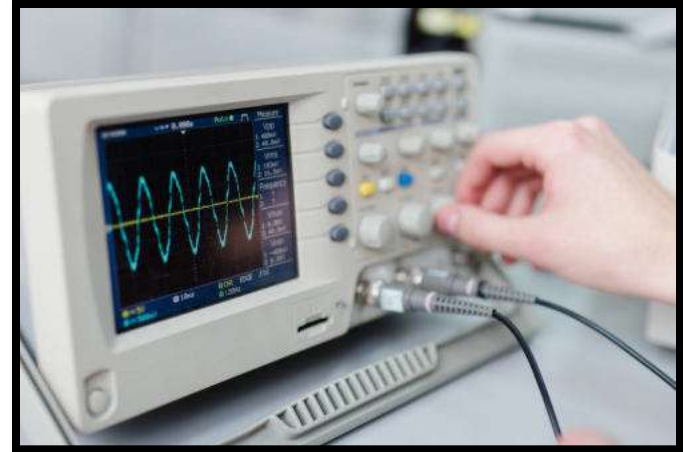
Relâchement de la pression
→ une tension négative apparaît mais s'amortie pour retomber à zéro.

Conclusion de l'expérience 1

- La polarisation électrique ne dure que pendant le court temps de la déformation du capteur.
- Une fois qu'il est déformé, le capteur cesserait d'être polarisé.

Hypothèse

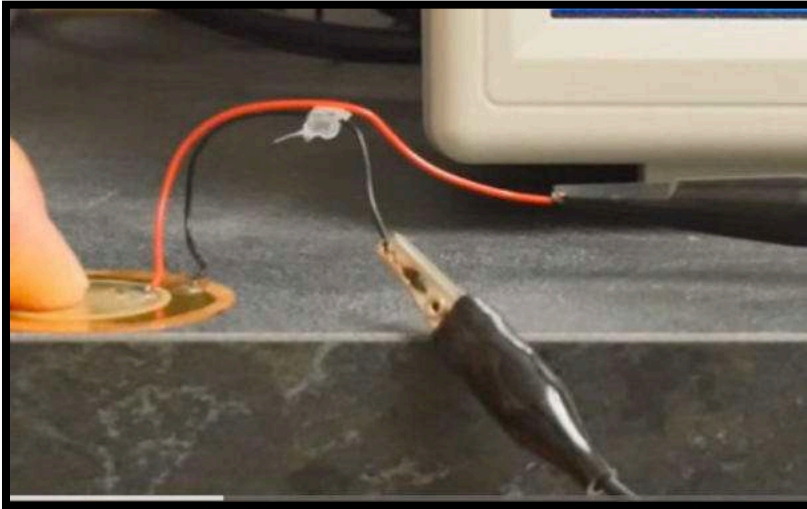
La tension revient à zéro à cause du faible courant consommé par l'oscilloscope pour mesurer la tension.



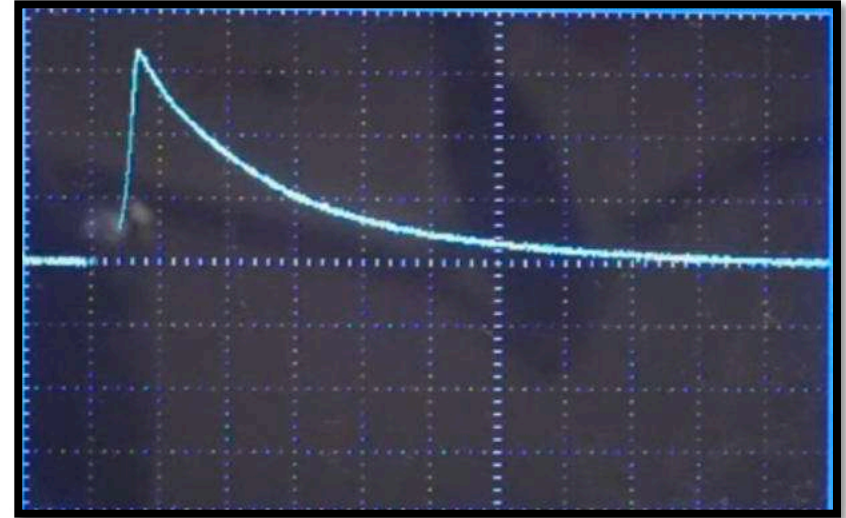
Oscilloscope numérique ¹

1 : d'après le site <https://knowhow.distrelec.com/fr/electronique/guide-produit-guide-etape-par-etape-comment-choisir-un-oscilloscope/>

Preuve de l'hypothèse



Maintenir la pression sur le capteur puis
Brancher la sonde de l'oscilloscope



Une tension apparaît

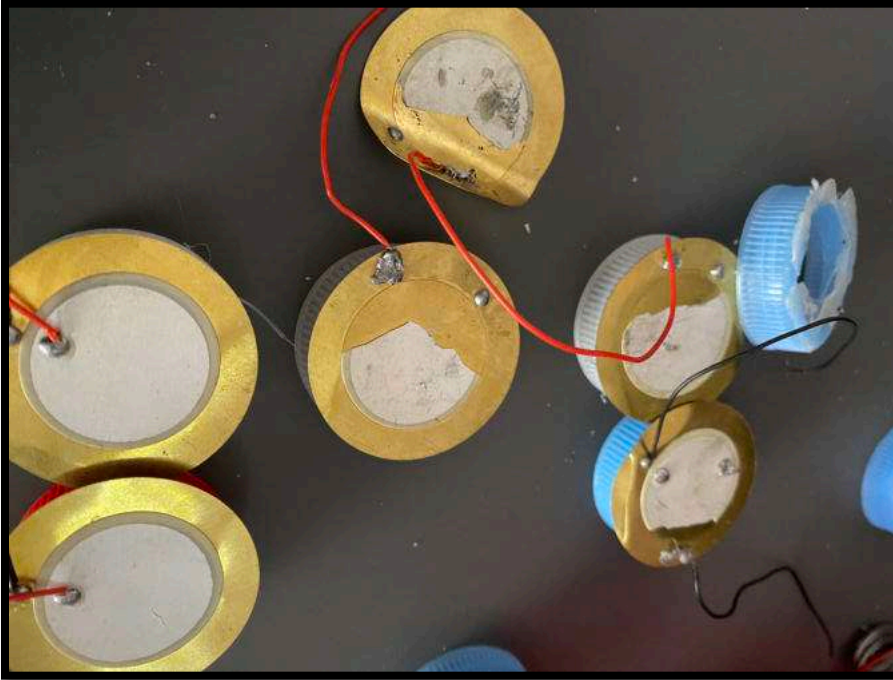


La tension a persisté tout le temps où le capteur était déformé



La tension est amortie à cause de l'oscilloscope

La fragilité des capteurs



- Faible résistance à la température.
- Faible résistance aux chocs.

Modélisation et optimisation



Modélisation du capteur



Masse (m)

Soumise à l'accélération de pesanteur

$$\vec{g} = -g \vec{e}_y$$

Modélisation de la rigidité



Ressort



Relation entre la force
appliquée et le déplacement



La constante k du ressort détermine la rigidité
du système piézoélectrique.

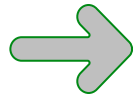
L'effet piézoélectrique inverse



Amortisseur

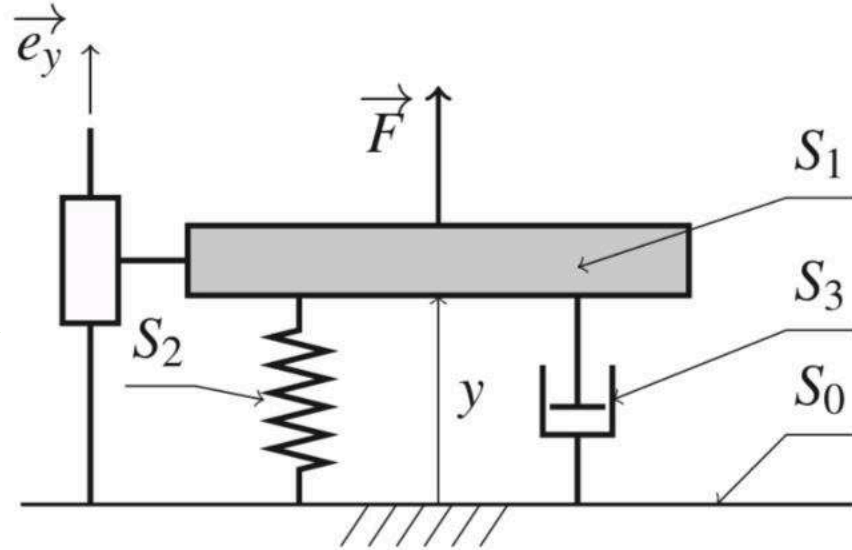


Les pertes énergétiques :
frottements, dissipations
internes.



Les coefficients d'amortissement μ déterminent
l'amortissement de la tension aux bornes du
capteur piézoélectrique. Avec: $\mu = \mu_e + \mu_m$

Modélisation d'un générateur piézoélectrique



Système masse-ressort-amortisseur

Équation différentielle

- On suppose une sollicitation finie du générateur: $\vec{F}(t) = f(t)\vec{e}_y$
- On admet que le système obéit à l'équation suivante :

$$m\ddot{u}(t) + \mu\dot{u}(t) + ku(t) = f(t)$$

où $u = y - y_0$

$u(0) = u_0 \in \mathbb{R}$ et $\dot{u}(0) = \dot{u}_0 \in \mathbb{R}$.

Résolution de l'équation différentielle

- On suppose que:

$$\frac{\mu}{2m} < \sqrt{\frac{k}{m}}$$

- Les racines de l'équation caractéristique sont :

$$r_{1,2} = \frac{-\mu}{2m} \pm \frac{i\sqrt{4Km - \mu^2}}{2m}$$

Résolution de l'équation différentielle

La solution s'écrit :

$$u(t) = e^{-\alpha t} (\lambda_1 \cos(\beta t) + \lambda_2 \sin(\beta t))$$

Avec: $\alpha = \frac{\mu}{2m}$; $\beta = \frac{\sqrt{4Km - \mu^2}}{2m}$

Etude énergétique



Soit E_0 l'énergie mécanique initiale.
Donc :

$$E_0 = \frac{1}{2}m\dot{u}_0^2 + \frac{1}{2}ku_0^2$$



L'énergie fournie au capteur
correspond au travail induit par la
force F :

$$E_m = \int_0^{+\infty} f(t)\dot{u}(t) dt$$



l'énergie électrique produite par
le générateur correspond à celle
dissipée dans l'amortisseur.

$$E_e = \int_0^{+\infty} \mu_e (\dot{u}(t))^2 dt$$

Efficacité

On définit l'efficacité du générateur par:

$$\mathcal{E}_{ff} = \frac{E_e}{E_0 + E_m} = \frac{\mu_e}{\mu}$$



Optimisation

- Soit P_e la puissance électrique moyenne effective récupérée :

$$P_e = -\mu_e \frac{f_0}{2 \left(\mu^2 - m + \frac{k}{\omega^2} \right)}$$

Pour quelle pulsation ω ,
 P_e est-elle maximale ?

Avec une étude de fonction du dénominateur, on trouve:

$$\omega_{\max} = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Optimisation

Quelle masse m doit-on appliquer sur l'extrémité du capteur afin d'optimiser la conversion d'énergie?



D'après la question précédente :

$$m = \frac{K}{\omega^2} = 50 \text{ g}$$

Visioconférence

Bonjour,

Je réalise une thèse sur les absorbeurs piézoélectrique au sein de PYTHEAS et je me propose de vous aider pour votre projet.

Je suis normalement disponible [à partir de mercredi](#) pour une visio [à 19h](#), si cela vous convient, pourriez-vous m'envoyer un lien zoom ? Pourriez-vous me décrire votre projet et vos besoins, les questions que vous souhaiteriez m'adresser en amont de notre réunion afin que je puisse y répondre au mieux.

Bon courage pour les concours qui approchent,

Floriane Peyrouse



100 impasse des Houillères
ZA Le Pontet
13590 Meyreuil - France

Floriane PEYROUSE 

PhD Student

PYTHEAS Technology

+33 7 86 04 40 53 // +33 1 30 08 95 95

floriane.peyrouse@pytheas-technology.com

Simulation numérique



Équations de la piézoélectricité

$$\begin{cases} S = s^E T + {}^t d E \\ D = d T + \epsilon^T E \end{cases}$$

- D déplacement électrique (Coulomb.m⁻²)
- E champ électrique (V.m⁻¹)
- T contrainte (N.m⁻²)
- S déformation
- ϵ^T permittivité (constante diélectrique)
- s^E compliance (m².N⁻¹)
- d constante piézoélectrique (m.V⁻¹)

Matrices ⚠



<https://blog.nextias.com/piezoelectricity>

Équations piézoélectriques simplifiées

- On considère les termes relatifs à la direction de polarisation en négligeant les autres:

$$\begin{cases} S_3 = s_{33}^E T_3 + d_{33} E_3 \\ D_3 = d_{33} T_3 + \epsilon_{33}^T E_3 \end{cases}$$

Équations (quasi-statique)

- On intègre ces équations sur le domaine complet du matériau avec 1 ddl* :

$$\begin{cases} F = K_p x + \alpha V \\ Q = \alpha x - C_0 V \end{cases}$$

- F chargement appliqué (N)
- x déplacement de l'extrémité du piézo (m)
- Q charge électrique sur la surface encastrée (Coulomb)
- V tension aux bornes du piézo (V)
- C_0 capacité bloquée (aussi notée C_b)
- α facteur de transformation électromécanique
- K_p raideur de l'élément piézo en circuit fermé (aussi notée K_{cc})

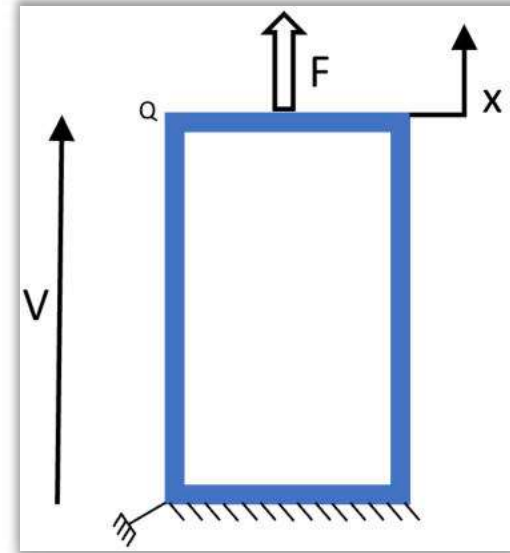


Schéma du modèle quasi statique

* : ddl = degré de liberté (le sens de polarisation)

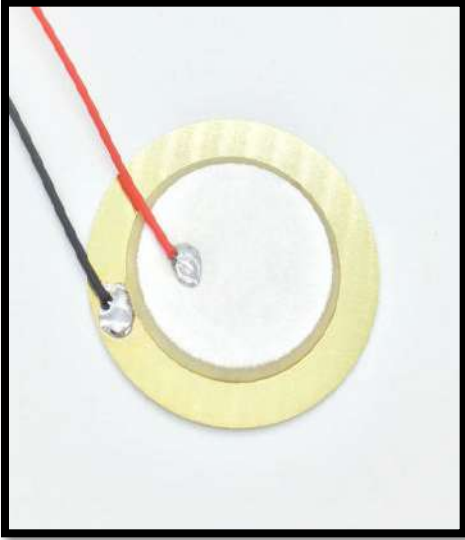
Cas des céramiques

- Pour une céramique fine d'aire A et d'épaisseur e , les paramètres représentatifs sont :

$$K_p = \frac{A}{s_{33}^E e}, \alpha = \frac{d_{33}}{s_{33}^E} \frac{A}{e}$$

- K_p raideur de l'élément piézo en circuit fermé (aussi notée K_{cc})
- d constante piézoélectrique (m.V^{-1})
- α facteur de transformation électromécanique
- s_{33}^E compliance ($\text{m}^2.\text{N}^{-1}$)

Comparaison de 3 piézo-céramiques



PZT

<https://www.azonano.com/>



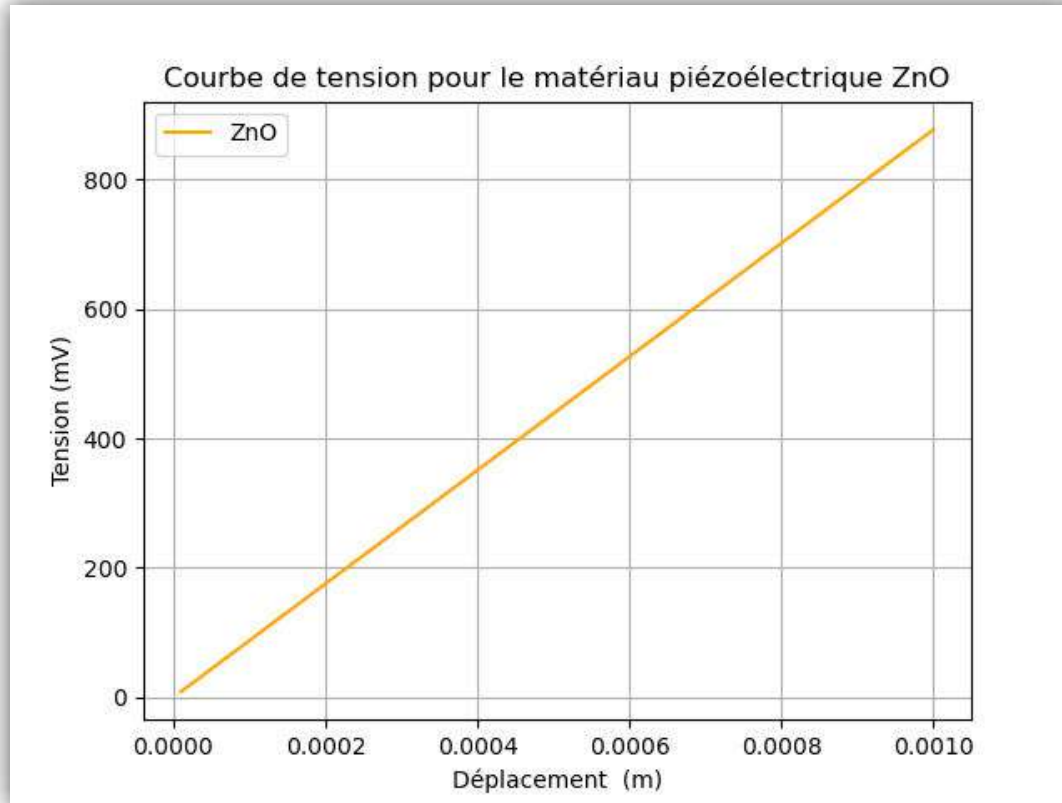
ZnO

<https://en.wikipedia.org/>

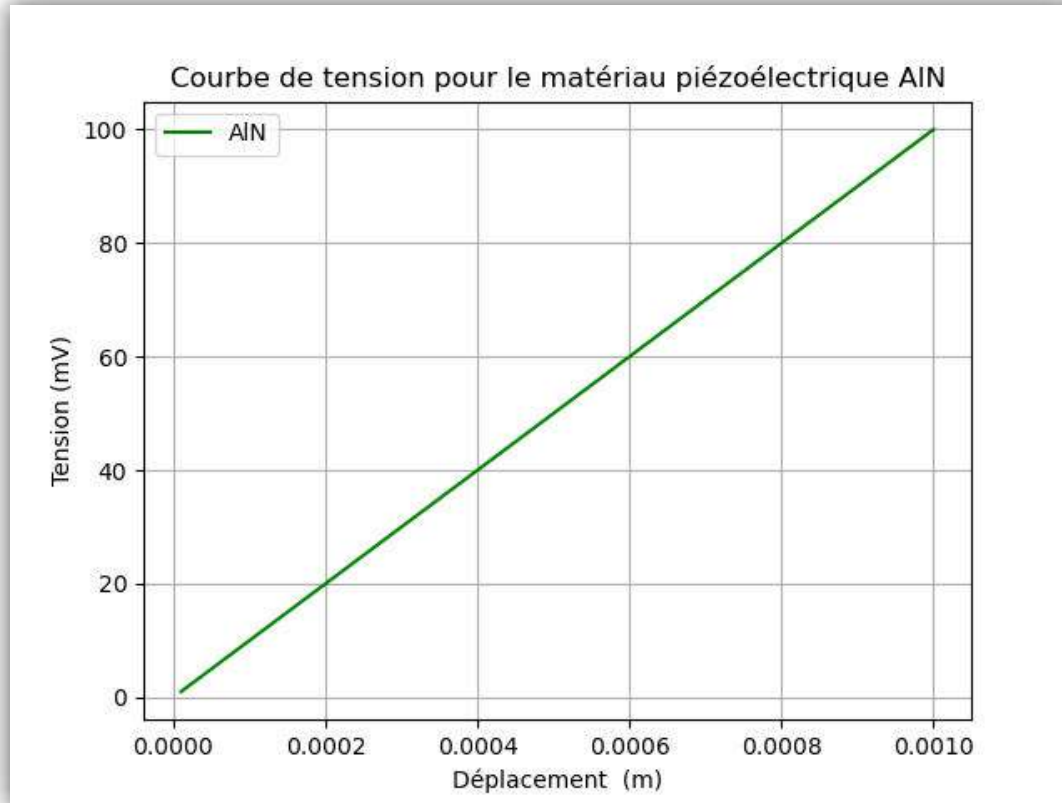


AlN

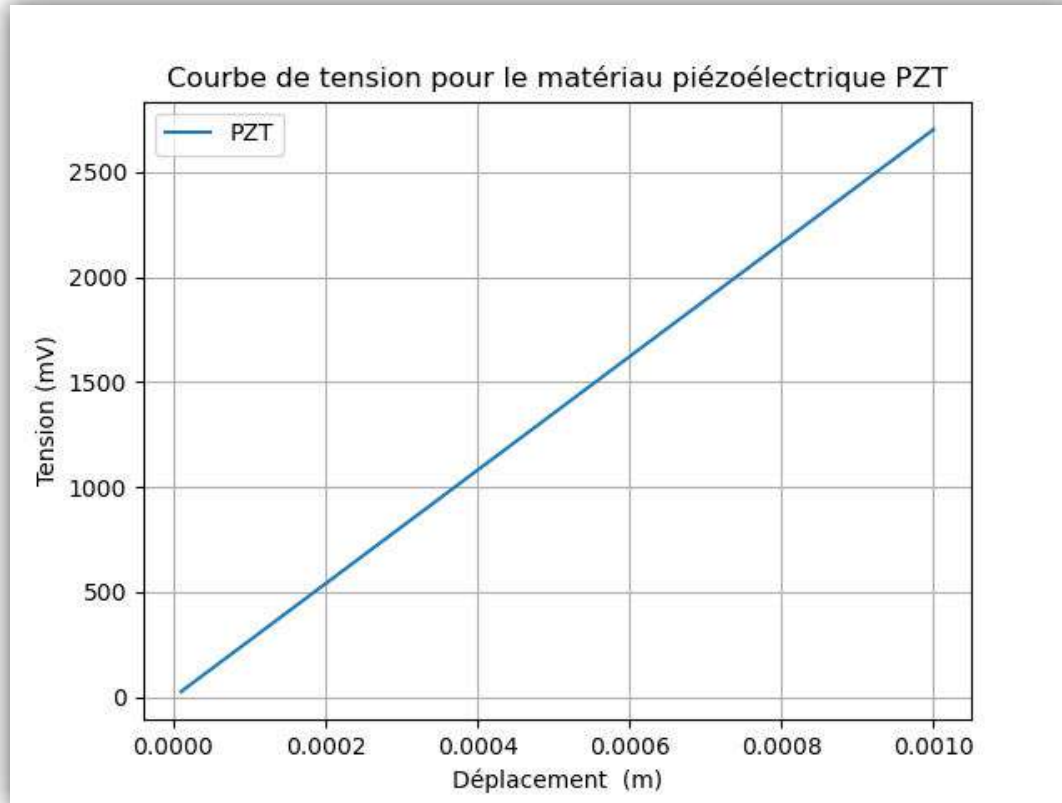
Réponse du ZnO



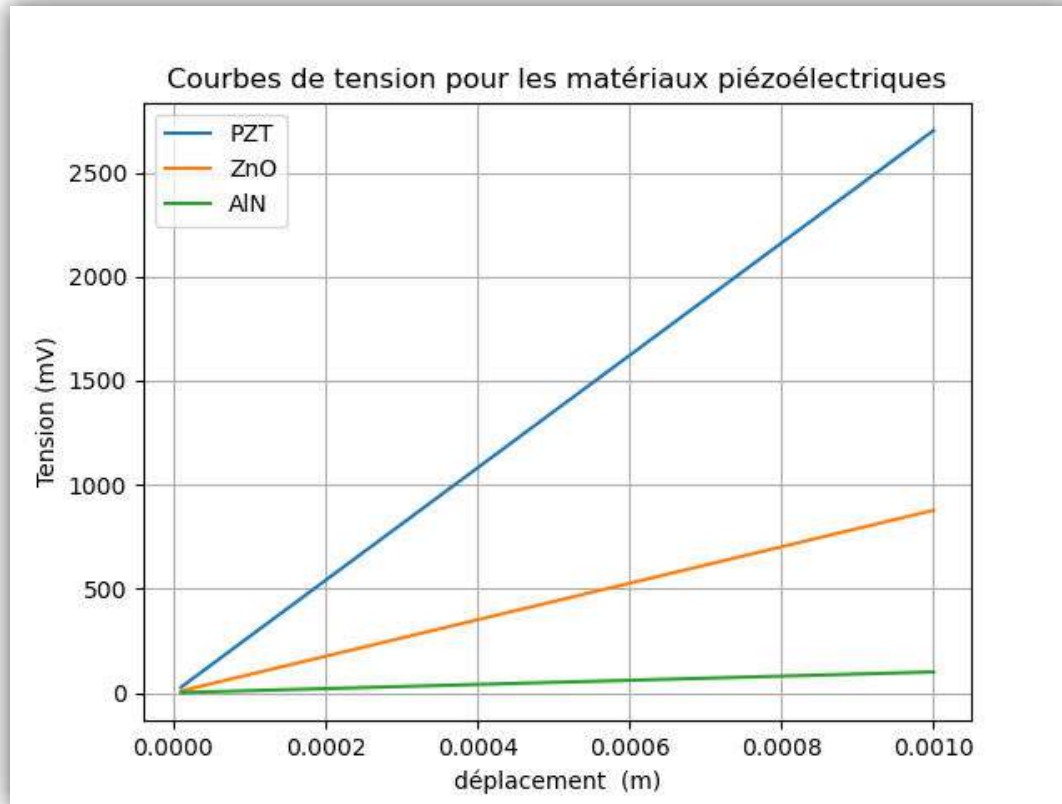
Réponse du AlN



Réponse du PZT

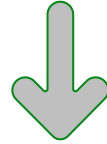


Réponse des 3 piézo-matériaux



Analyse des résultats

Une pente plus élevée de la courbe du PZT



Une réponse plus sensible du PZT aux variations de déplacement

En effet :

- Le PZT a un paramètre de charge piézoélectrique (d_{33}) élevé donc une meilleure conversion d'énergie.
- Le PZT a une rigidité électromécanique (S_{33}) plus faible donc une meilleure flexibilité .



Prototypage

Étapes de réalisation

Conception et spécifications

Matériel nécessaire

schéma électrique

Assemblage

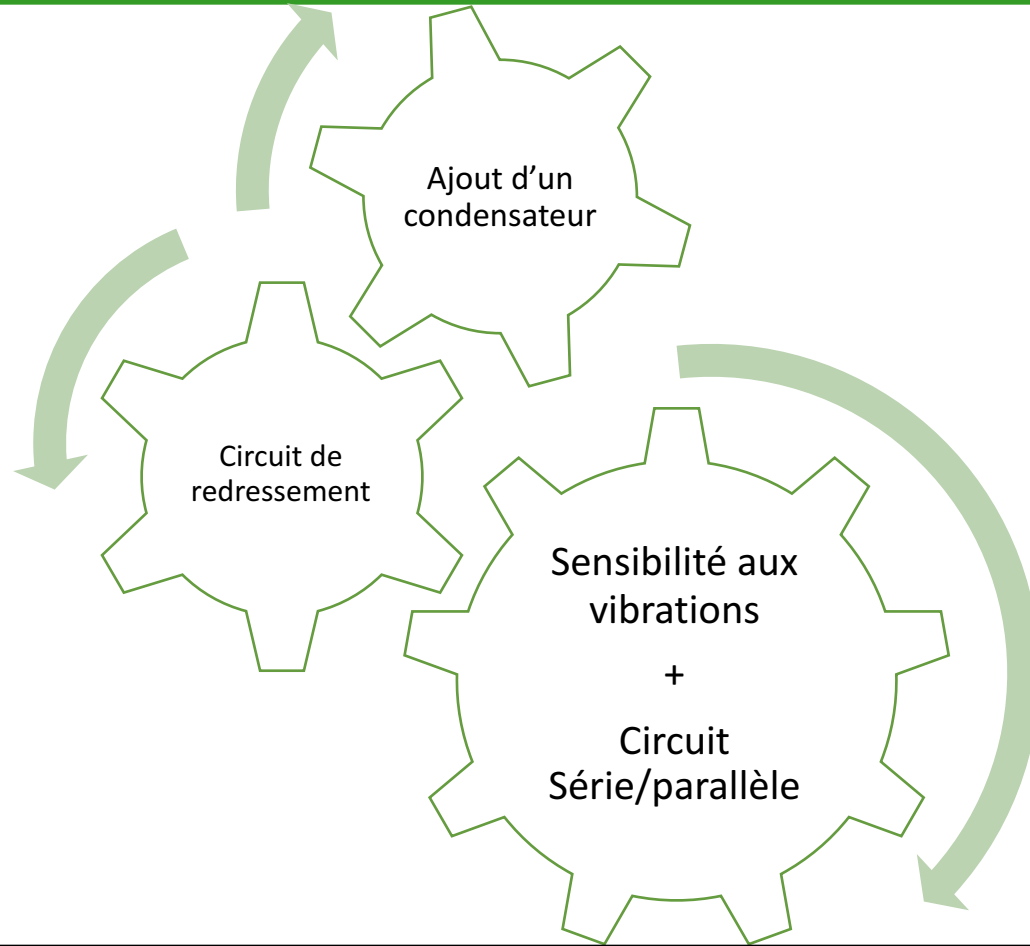
Tests

Évaluation et validation



<http://piezoelectricite.over-blog.com/2014/05/conclusion.html>

Conception et spécifications



System
X ~~Comp~~

Matériel nécessaire



Planche de bois
(30 cm x 30 cm)



Verre carré
(30 cm x 30 cm)



15 capteurs PZT
35mm



Condensateur
220 μ F – 63V



4 diodes N4148



Mini-interrupteur



Batterie Li-ion
rechargeable
18650 3,6 V
3400 mAh



Porte-pile 18650



8 Led



Gommes adhésives



Tubes de colle



Bouchons de
bouteille

Schéma électrique

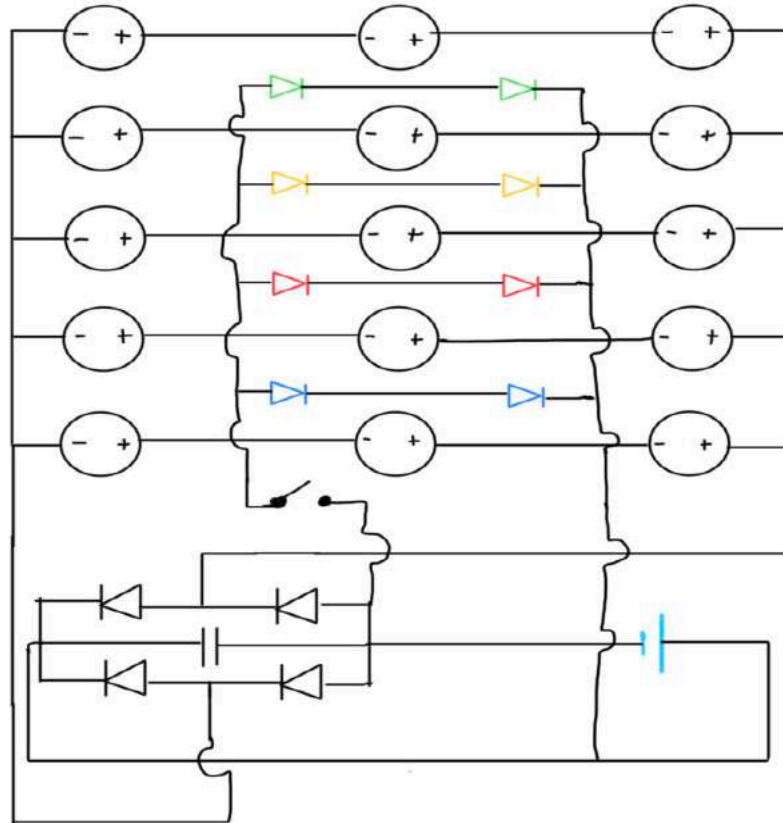
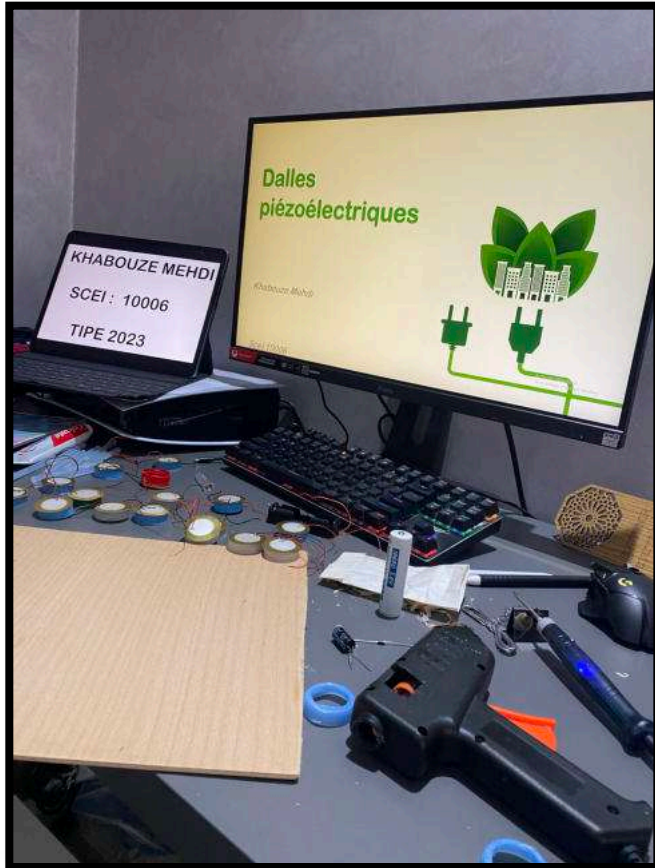
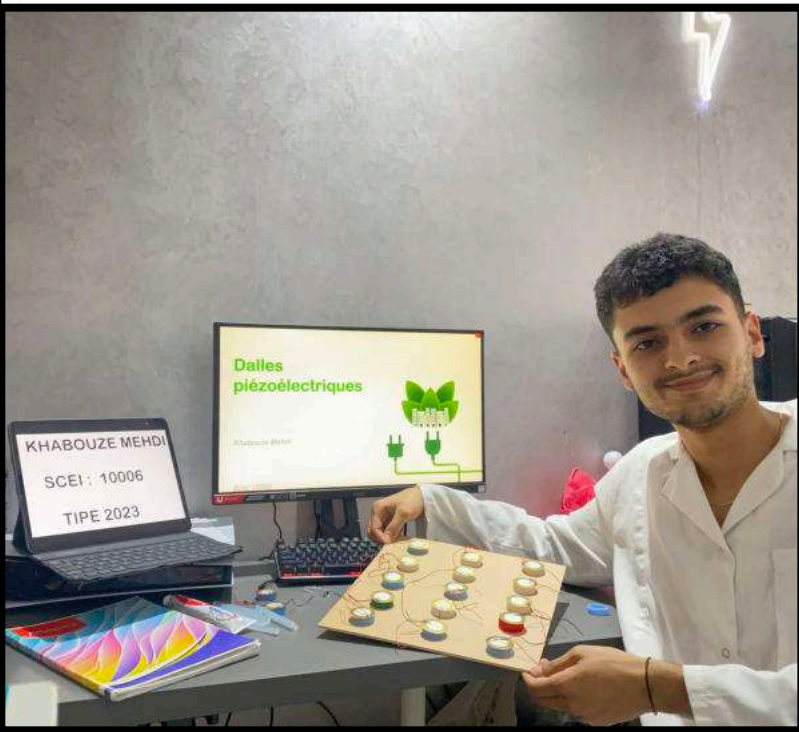


Schéma électrique de la dalle.

Assemblage



Assemblage



Dalle assemblée

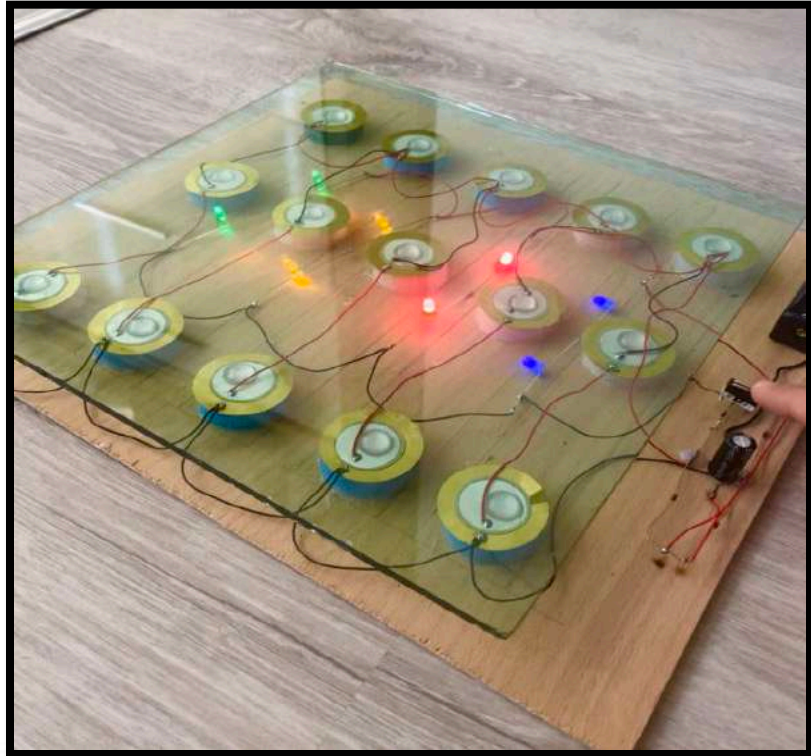


Tests

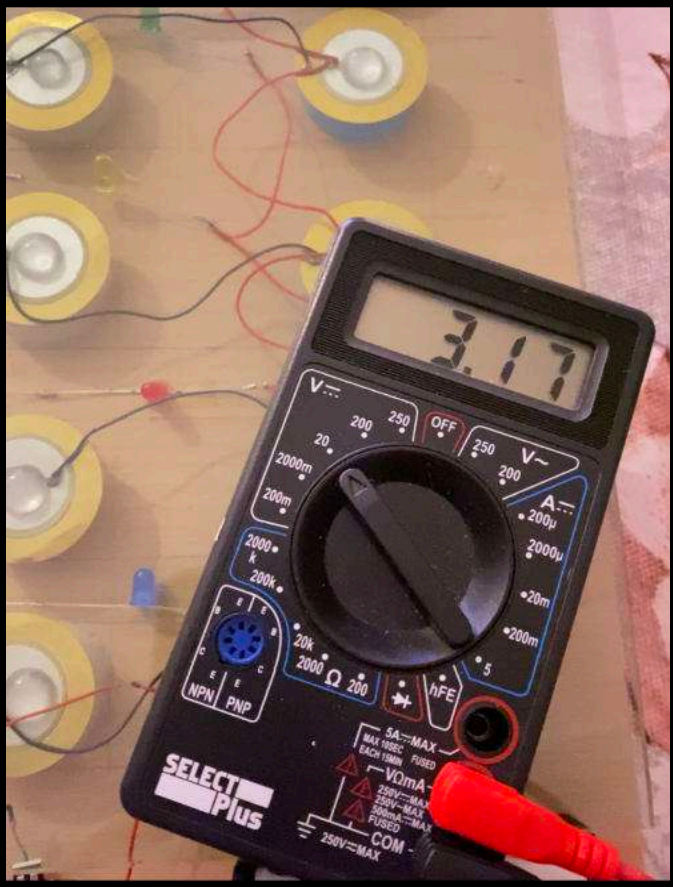
Application d'une force (700 N)



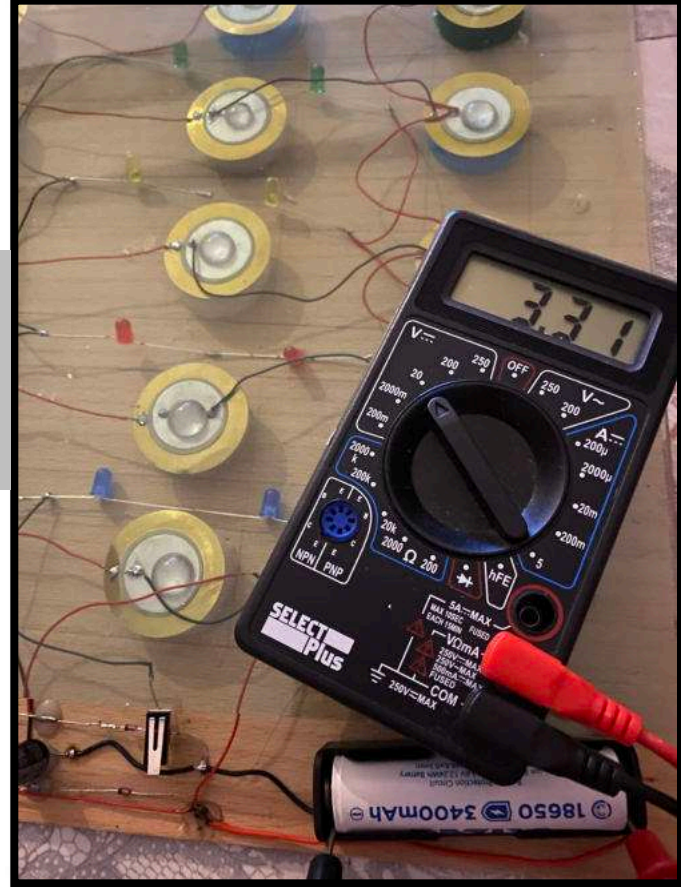
Allumage des led (sans batterie)



Tests



Rechargement
de la batterie
après 1h30 de
marche.



Etank donné que je pratique le sport
régulièrement j'ai pu profiter pour faire de
ma date mon STEP.

Évaluation et validation

- Faible différence de tension de 0,14 volts après la recharge.
- La capacité de conversion d'énergie de la dalle piézoélectrique est limitée.
- Des améliorations ou des ajustements sont nécessaires pour optimiser l'efficacité de conversion d'énergie.

et du développement

Reste faible
Les PZT et l'application
le dév de ce système
C'est certain d'obtenir
des millions
devenir promoteur et voir
dans le sens écologique

Energies propres



Conclusion et perspectives

Conclusion et perspectives

- Étude des propriétés piézoélectriques, modélisation et optimisation de l'effet piézoélectrique.
- Simulation numérique pour sélectionner le matériau le plus adapté à la dalle.
- Faible recharge de la batterie du prototype, nécessitant des améliorations.
- Perspectives prometteuses pour répondre aux besoins énergétiques.



Merci pour
votre
attention

Annexe 1: calcul de l'efficacité

$$\begin{aligned} E_m &= \int_0^{+\infty} f(t) \dot{u}(t) dt = \int_0^{+\infty} [m\ddot{u}(t) + \mu\dot{u}(t) + ku(t)] \dot{u}(t) dt \\ &= \int_0^{+\infty} m\ddot{u}(t)\dot{u}(t) + \mu\dot{u}^2(t) + ku(t)\dot{u}(t) dt \\ &= \frac{m}{2} [\dot{u}^2(t)]_0^{+\infty} + \mu \int_0^{+\infty} \dot{u}^2(t) dt + \frac{k}{2} [u^2(t)]_0^{+\infty} \\ &= -\frac{m}{2} \dot{u}_0^2 - \frac{k}{2} u_0^2 + \frac{\mu}{\mu_e} E_e \end{aligned}$$

$$E_m = -E_0 + \frac{\mu}{\mu_e} E_e$$

$$\text{D'où : } \frac{E_e}{E_0 + E_m} = \frac{\mu_e}{\mu}$$

Extrait d'un corrigé de l'UPSTI

Annexe 2: courbe ZnO

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # Paramètres des capteurs
5 A = np.pi * ((35 * 10**(-3))**2)      # aire
6 e = 0.00001                            # épaisseur
7
8 # Paramètres piézoélectriques pour le ZnO
9 D33_zno = 11.4 * (10**(-10))           # Paramètre de charge piézoélectrique pour le ZnO
10 S33_zno = 12 * (10**(-10))             # Paramètre de rigidité électromécanique pour le ZnO
11
12 # On suppose que tous les capteurs subissent le même effort F en newton
13 force = 700
14
15 # Définition de la plage de valeurs pour le déplacement d'extrémité des capteurs
16 x = np.linspace(0.00001, 0.001)
17
18 # On définit les constantes C
19 C = A / e
20
21 # Calcule des valeurs correspondantes de la tension pour le ZnO en utilisant la formule F
22 voltage_zno = abs((force - (C * x / S33_zno)) / ((D33_zno * C) / S33_zno))*0.001
23
24 # Tracage de la courbe ZnO avec une couleur bleue
25 plt.plot(x, voltage_zno, color='orange', label='ZnO')
26
27 # Configuration du graphique
28 plt.xlabel('Déplacement (m)')
29 plt.ylabel('Tension (mV)')
30 plt.title('Courbe de tension pour le matériau piézoélectrique ZnO')
31 plt.legend()
32 plt.grid(True)
33
34 # Affichage du graphique
35 plt.show()
36
```

Code python pour le traçage de la courbe du ZnO

Annexe 3: courbe AlN

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # Paramètres des capteurs
5 A = np.pi * ((35 * 10**(-3))**2)      # aire
6 e = 0.00001                             # épaisseur
7
8 # Paramètres piézoélectriques pour l'AlN
9 D33_ain = 3.7 * (10**(-10)) # Paramètre de charge piézoélectrique pour l'AlN
10 S33_ain = 265 * (10**(-10)) # Paramètre de rigidité électromécanique pour l'AlN
11
12 # On suppose que tous les capteurs subissent le même effort F en newton
13 force = 700
14
15 # Définition de la plage de valeurs pour le déplacement d'extrémité des capteurs
16 x = np.linspace(0.00001, 0.001)
17
18 # On définit les constantes C
19 C = A / e
20
21 # Calcule des valeurs correspondantes de la tension pour l'AlN en utilisant la formule F
22 voltage_ain = abs((force - (C * x / S33_ain)) / ((D33_ain * C) / S33_ain))*0.001
23
24 # Tracage de la courbe AlN avec une couleur verte
25 plt.plot(x, voltage_ain, color='green', label='AlN')
26
27 # Configuration du graphique
28 plt.xlabel('Déplacement (m)')
29 plt.ylabel('Tension (mV)')
30 plt.title('Courbe de tension pour le matériau piézoélectrique AlN')
31 plt.legend()
32 plt.grid(True)
33
34 # Affichage du graphique
35 plt.show()
36
```

Code python pour le traçage de la courbe du AlN

Annexe 4: courbe PZT

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # Paramètres des capteurs
5 A = np.pi * ((35 * 10**(-3))**2)      # aire
6 e = 0.00001                             # épaisseur
7
8 # Paramètres piézoélectriques pour le PZT
9 D33_pzt = 100 * (10**(-10)) # Paramètre de charge piézoélectrique pour le PZT
10 S33_pzt = 22.7 * (10**(-10)) # Paramètre de rigidité électromécanique pour le PZT
11
12 # On suppose que tous les capteurs subissent le même effort F en newton
13 force = 700
14
15 # Définition de la plage de valeurs pour le déplacement d'extrémité des capteurs
16 x = np.linspace(0.00001, 0.001)
17
18 # On définit les constantes C
19 C = A / e
20
21 # Calcule des valeurs correspondantes de la tension pour le PZT en utilisant la formule F
22 voltage_pzt = abs((force - (C * x / S33_pzt)) / ((D33_pzt * C) / S33_pzt))*0.001
23
24 # Tracage de la courbe PZT avec une couleur rouge
25 plt.plot(x, voltage_pzt, color='blue', label='PZT')
26
27 # Configuration du graphique
28 plt.xlabel('Déplacement (m)')
29 plt.ylabel('Tension (mV)')
30 plt.title('Courbe de tension pour le matériau piézoélectrique PZT')
31 plt.legend()
32 plt.grid(True)
33
34 # Affichage du graphique
35 plt.show()
36
```

Code python pour le traçage de la courbe du PZT

Annexe 5: les 3 courbes

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # Paramètres des capteurs
5 A = np.pi * ((35 * 10**(-3))**2) # aire
6 e = 0.00001 # épaisseur
7
8 # Paramètres piézoélectriques pour chaque matériau
9 D33_pzt = 100 * (10**(-10)) # Paramètre de charge piézoélectrique pour le PZT
10 S33_pzt = 22.7 * (10**(-10)) # Paramètre de rigidité électromécanique pour le PZT
11
12 D33_zno = 11.4 * (10**(-10)) # Paramètre de charge piézoélectrique pour le ZnO
13 S33_zno = 12 * (10**(-10)) # Paramètre de rigidité électromécanique pour le ZnO
14
15 D33_ain = 3.7 * (10**(-10)) # Paramètre de charge piézoélectrique pour l'AlN
16 S33_ain = 265 * (10**(-10)) # Paramètre de rigidité électromécanique pour l'AlN
17
18 # On suppose que tous les capteurs subissent le même effort F en newton
19 force = 700
20
21 # Définition de la plage de valeurs pour le déplacement d'extrémité des capteurs
22 x = np.linspace(0.00001, 0.001)
23
24 # On définit les constantes C
25 C = A / e
26
27 # Calcule des valeurs correspondantes de la tension pour chaque matériau en utilisant la formule
28 voltage_pzt = abs((force - (C * x / S33_pzt)) / ((D33_pzt * C) / S33_pzt))*0.001
29 voltage_zno = abs((force - (C * x / S33_zno)) / ((D33_zno * C) / S33_zno))*0.001
30 voltage_ain = abs((force - (C * x / S33_ain)) / ((D33_ain * C) / S33_ain))*0.001
31
32 # Tracage des courbes
33 plt.plot(x, voltage_pzt, label='PZT')
34 plt.plot(x, voltage_zno, label='ZnO')
35 plt.plot(x, voltage_ain, label='AlN')
36
37 # Configuration du graphique
38 plt.xlabel('déplacement (m)')
39 plt.ylabel('Tension (mV)')
40 plt.title('Courbes de tension pour les matériaux piézoélectriques')
41 plt.legend()
42 plt.grid(True)
43
44 # Affichage du graphique
45 plt.show()
46
```

Code python pour le traçage de la courbe des 3 courbes.

