

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكتروني
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière : Électronique
Spécialité : Microélectronique

Présenté par

MEDJEROUB Brahim

&

MOKRETARI Mahfoud

Etude et simulation sur logiciel comsol et logiciel matlab de modèles d'accéléromètres piézoélectriques

Proposé par : Mr. BOUNEMRI AMMAR

Année Universitaire 2022-2023

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma reconnaissance.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma gratitude à mon encadreur monsieur Bounemri Ammar pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses conseils qui ont contribué à améliorer mes connaissances.

Je désire aussi remercier les enseignants du cycle master en microélectronique, qui m'ont fourni les outils nécessaires à la réussite de mes études universitaires

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers les amis et les collègues durant mes études et dans mon lieu de travail qui m'ont apportés leur support moral et intellectuel tout au long de mes démarches.

Enfin je tiens à témoigner toute ma gratitude à ma famille surtout mes deux filles Safa et Marwa ainsi que ma femme .

Je finirais sans oublier ma mère, mes chères sœurs et frères pour leurs supports.

Merci

ap no u!01 anod aauaw auuoq u} noN
snoN suopJawaa auuosaad aq30Jd
nod el anod J!0/xe aawu •awQld!p
wepuad el prusa!anue' srm xnao snou
sou sweuîtasua sou sanBQ1100 wo syuBedwoooe
np (un/ eu eu }atuwa satu xnap aeî05su Amir et
na!suow aunoq!A. aetuww e!su sal anw
armowoad

Toute notre gratitude et considération



Merci

aoe'!pya

Toute notre gratitude et considération nous
moturons! au bonjour! A. uanoq na! suow
sal an b aetuww !A. uanoq na! suow
Amir et su05aeî xnap satu atuwaJ eu eu '/un(np saaqwaw
wo snou sanBQ1100 sou sweuî!asua sou 'sauv
snou xnao srm 'anue!prusa el wepuad syuBedwcme
•awqd!p aawu J!0/xe nod el nod JOP!e
aq30Jd auuosaad suo!0Jawaa snoN
u} auuoq aauaw anod u!01 ap no
qui a participer de notre soutenance.

aoe'!pya

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I

1.1 Introduction à l'accéléromètre

1.2 Opération fondamentale

1.3 Principe de fonctionnement d'un accéléromètre

1-4 Technique de conversion d'un mouvement mécanique en signal électrique

1-5 Théorie de la piézoélectricité

1- 5-1 Le phénomène de la piézoélectricité

1-5-2 Application pratique des matériaux piézoélectriques

1-5-3 Modélisation mathématique du phénomène piézoélectrique

1-5-4 Relations entre les différentes grandeurs physiques

Conclusion

chpitrell

2.1 Introduction

2.2 introduction au logiciel de simulation Comsol

2.2.1 Interface du logiciel comsol

Conclusion

Chpitrelll

3.1 Introduction

3.2 Simulation du comportement de la masse sismique en fonction de l'accélération appliquée

3.3 Simulation du déplacement de la masse sismique en fonction de l'accélération appliquée, pour différents matériaux piézoélectriques

3.4 Simulation du potentiel électrique sur les faces en regard de la masse sismique en fonction de l'accélération appliquée, pour différents matériaux piézoélectriques.

3.4.1 Accélération appliquée dans le sens inverse de l'axe z.

3.4.2 Accélération appliquée dans le sens de l'axe z.

Conclusion

CONCLUSION GENERAL

BIBIOGRAPHIE

Le tableau suivant résume les définitions des différentes grandeurs physiques.

Liste des figure

Figure 1-1 : Schéma de l'équivalent mécanique d'un accéléromètre.

Figure 1-2 : Structure en poutre de l'accéléromètre.

Figure 1-3 : Distribution du potentiel électrique sur la masse sismique
(force du haut vers le bas)

Figure 1-4 : Distribution du potentiel électrique sur la masse sismique
(Force du bas vers le haut)

Figure 1-5 : Relations entre grandeurs physiques dans un matériau
piézoélectrique

Figure 1-6 : Cumule de charges sur un matériau piézoélectrique (effet direct)

Figure 1-7 : Dessin schématique d'une structure poutre-masse à double appui
(a) vue de dessus ; (b) vue en coupe

Figure 2-1 : Interface graphique au lancement du logiciel Comsol

Figure 2-2 : Icones de modélisation de la structure

Figure 2-3 : Icône du choix de l'espace dimensionnel de travail.

Figure 2-4 : L'icône géométrie et son menu déroulant

Figure 2-5 : Icône du choix du matériau.

Figure 2-7 : Choix de l'étude physique appropriée au problème posé.

Figure 2-8 : Choix de l'étude

Figure 2-9 : Structures micrométriques des accéléromètres

Figure 2-10 : Emplacement de la contrainte de fixation sur l'accéléromètre
poutre suspendue : (a) support gauche ; (b) support droit

Figure 2-11 : Emplacement des contraintes de fixation de la structure "étoile"

Figure 2-12 : Technique de prise de mesure d'un potentiel par sonde sur un point (a) accéléromètre en poutre ; (b) accéléromètre en "étoile"

Figure 3.1 : Illustration du déplacement de la masse sismique sous l'effet de l'accélération : accéléromètre à poutre suspendue

Figure 3.2 : Illustration du déplacement de la masse sismique sous l'effet de l'accélération : accéléromètre en bloc suspendu

Figure 3.3 : Déplacement en μm de l'accéléromètre en poutre, en fonction de l'accélération, pour différents matériaux piézoélectriques.

Figure 3.4 : Déplacement en μm de l'accéléromètre en bloc, en fonction de l'accélération, pour différents matériaux piézoélectriques.

Figure 3.5 : Déplacement de l'accéléromètre en bloc, simulé en utilisant le Polyvinylidène fluorure

Figure 3.6 : Déplacement de l'accéléromètre en poutre, pour différents matériaux, simulé sous logiciel Matlab

Figure 3.7 : Déplacement de la masse sismique en fonction de l'accélération simulé sous Matlab.

Les microaccéléromètres sont des dispositifs utilisés dans divers domaines pour la mesure de l'accélération. En général le circuit de mesure associé est caractérisé par le composant électrique condensateur. La capacité associée à ce condensateur est formée par une électrode fixe et une électrode mobile. L'électrode mobile fait partie intégrante de la masse sismique, qui n'est autre qu'une partie de l'accéléromètre. La masse sismique subit les effets de l'accélération. Il en résulte un déplacement de cette masse sismique. Un circuit de conditionnement autour de cette capacité est utilisé pour la mesure de l'accélération. Dans le cadre de notre travail nous avons choisi de travailler avec des matériaux piézoélectriques pour édifier la masse sismique est utiliser la caractéristique du matériau, qui est la piézoélectricité, pour mesurer le signal électrique image de l'accélération. Notre choix s'est porté sur deux structures, une poutre horizontale (la masse sismique) suspendue par deux autres poutres, mais de dimensions inférieures à celle de la masse sismique est une deuxième structure configurée selon un parallélepède suspendu à quatre bras (poutre) en L. Le logiciel de simulation utilisé est le consol ainsi que le matlab.

L'organisation de ce mémoire a été conçu comme suit :

- Le premier chapitre qui donne un aperçu sur la théorie de base des accéléromètres.
- Le deuxième chapitre qui clarifie les étapes de modélisation des accéléromètres sous le logiciel consol.
- Le troisième chapitre qui présente les résultats de la simulation et leur analyse.
- En fin de mémoire une conclusion générale est présentée.

1.1 Introduction à l'accéléromètre

Les capteurs d'accélération [1] ou communément nommés les accéléromètres, sont devenus des composants essentiels dans le domaine de l'électromécanique. S'étendant des applications industrielles vers l'électronique grand public, ces dispositifs ont trouvés une large gamme d'applications. Les mesures de l'accélération fournissent des informations importantes sur le mouvement et l'orientation d'un objet. L'accélération représente le taux de changement de vitesse mesuré en unités de mètre par seconde au carré (m/s^2). Elle est décrite en termes de "g" qui est l'accélération due à la gravité au niveau de la mer ($9.81 m/s^2$).

1.2 Opération fondamentale

Le fonctionnement fondamental de l'accéléromètre est régi par la seconde loi de Newton dont l'équation est :

$$\Sigma \vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (1.1)$$

Où \vec{F} représente la force imminente sur l'objet de masse m subissant une accélération \vec{a} .

En clair, une force nette frappant une masse entraînera une accélération proportionnelle (ou l'inverse). De cette façon, l'accélération devient une métrique importante dans l'analyse d'un système. La connaissance des paramètres intrinsèques d'un objet (masse) et de son état (accélération mesurée) fournit un aperçu quantifiable de l'environnement externe qui est utile dans la prise de décision et le contrôle.

1.3 Principe de fonctionnement d'un accéléromètre

Le principe de fonctionnement d'un accéléromètre peut être expliqué par un amortisseur à coefficient d'amortissement (b), attaché à la masse sismique en

parallèle avec un ressort de coefficient de rappel (k), représenté sur le schéma d'un accéléromètre en figure 1-1. Lorsqu'une accélération externe est appliquée au capteur, la masse d'épreuve se déplace en fonction de l'accélération appliquée en raison de l'inertie. Ce système masse-ressort amorti à force appliquée constitue un système mécanique classique du second ordre (équation 1-2).

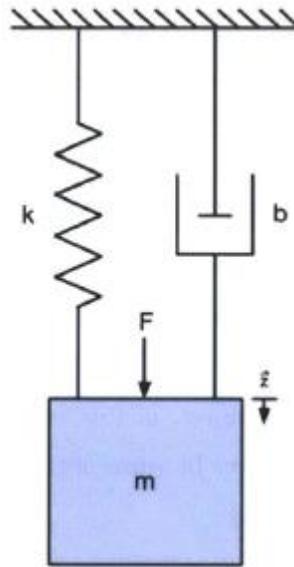


Figure 1-1 : Schéma de l'équivalent mécanique d'un accéléromètre.

L'équation régissant la dynamique de ce système est donnée par l'expression suivante :

$$\sum \vec{F} = \text{Force appliquée} + \text{Force rappel} + \text{Force amortissement} \quad (1.2)$$

$$m\vec{a} = \text{Force appliquée} - k.z - b.\frac{dz}{dt}$$

$$\text{Force appliquée} = m.\frac{d}{dt}\left(\frac{dz}{dt}\right) + k.z + b.\frac{dz}{dt}$$

Le paramètre z définit le déplacement selon l'axe z , dans ce cas de figure.

On peut réécrire cette équation sous forme d'une fonction de transfert $H(w)$ en utilisant les notions de la transformée de Laplace. Cette configuration est utile

pour connaître le comportement de la masse sismique en fonction de la fréquence, puisque $H(w)$ s'écrira sous la forme :

$$\frac{Z(s)}{F(s)} = \frac{1}{s^2 + \frac{b}{m}s + \frac{k}{m}} \quad (1.3)$$

En comparant avec la fonction standard du second ordre qui s'écrit :

$$\frac{\text{Output}(s)}{\text{input}(s)} = \frac{\text{Gain}}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} + \omega_r^2} \quad (1.4)$$

avec

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ qui représente la fréquence propre du système}$$

et

$$Q = \frac{\sqrt{k \cdot m}}{b} \text{ qui représente le facteur de qualité}$$

Ces paramètres sont importants pour les applications de l'accéléromètre dans les études des tremblements de terre ou en général dans le cadre des vibrations.

1-4 Technique de conversion d'un mouvement mécanique en signal électrique

Pour les dispositifs tel que les accéléromètres, les techniques piézoélectriques, piézorésistives et capacitives sont le plus souvent utilisées pour convertir le mouvement mécanique en un signal électrique.

La technique utilisée dans le cadre de notre travail se base sur la technique piézoélectrique. L'une des structures de base de l'accéléromètre utilisé, qu'on a nommé accéléromètre en poutre, est représentée en figure 1-2.

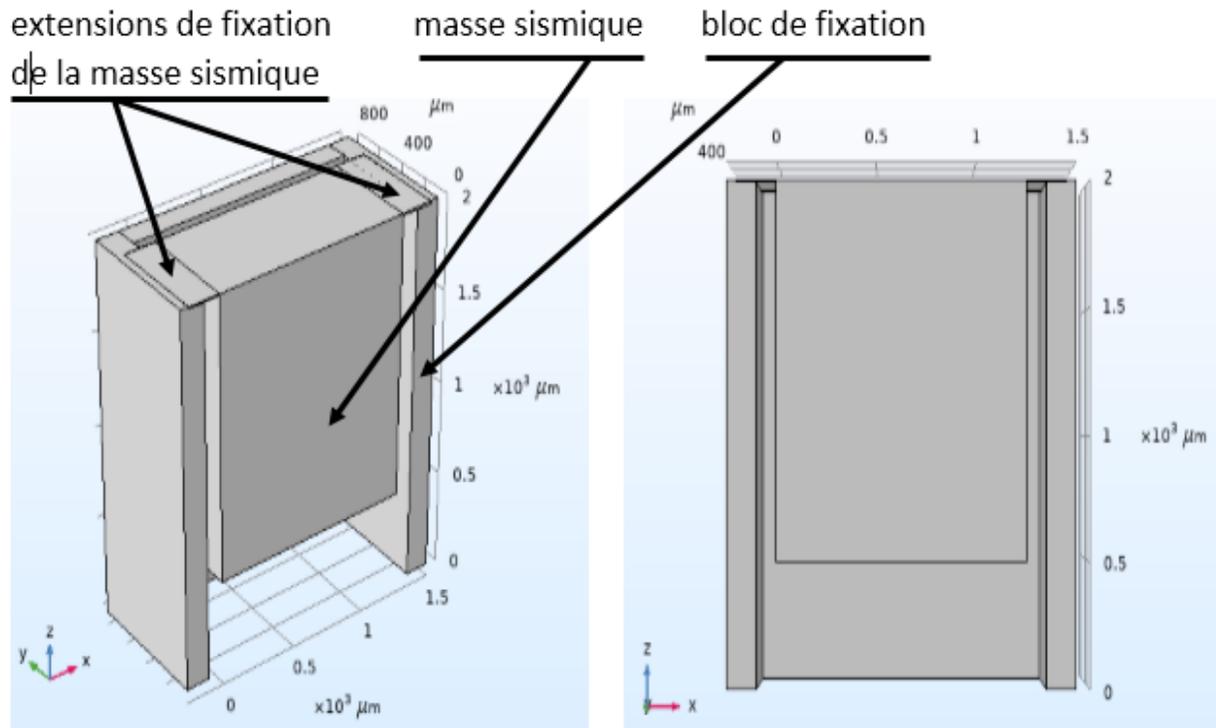


Figure 1-2 : Structure en poutre de l'accéléromètre.

La masse sismique est une poutre suspendue. Elle est retenue par deux extensions au bloc de fixation. Ces dernières jouent le rôle du ressort de rappel illustré dans le schéma analogique mécanique de l'accéléromètre. Le bloc de fixation permet le mouvement de va et vient, selon le sens de l'accélération appliquée, de la masse sismique.

La masse sismique et les extensions sont conçus en matériau piézoélectrique. Lorsque une force est appliquée, sur la masse sismique, et grâce à la caractéristique du matériau (la piézoélectricité) il y a naissance d'une différence de potentielle entre les faces en regard de la masse (figure 1-3). Le mouvement mécanique est ainsi converti en tension électrique.

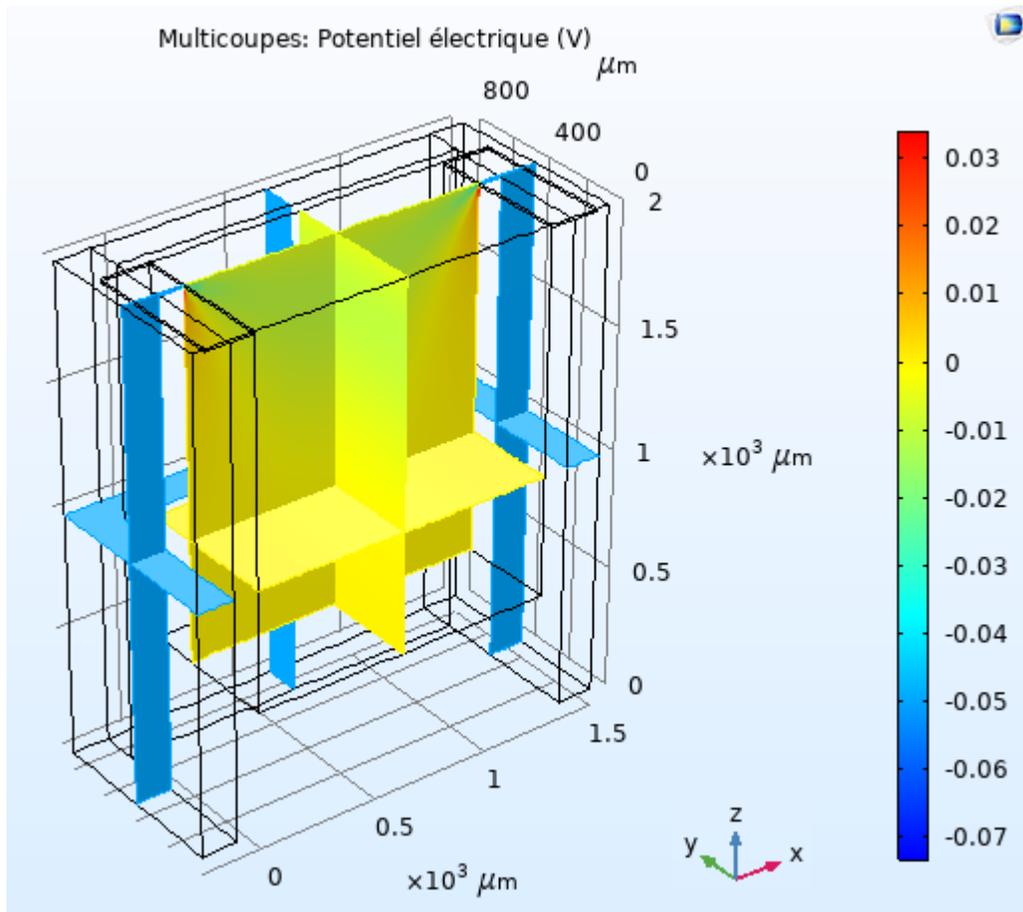


Figure 1-3 : Distribution du potentiel électrique sur la masse sismique (force du haut vers le bas)

Dans le cas de l'illustration en figure 1-3, la force est appliquée sur la surface supérieure de la masse sismique ce qui engendre un potentiel décroissant de la surface supérieure vers la surface inférieure. On remarque que le potentiel est négatif. Une inversion de la force (du bas vers le haut) entraînera la naissance d'un potentiel positif (figure 1-4)

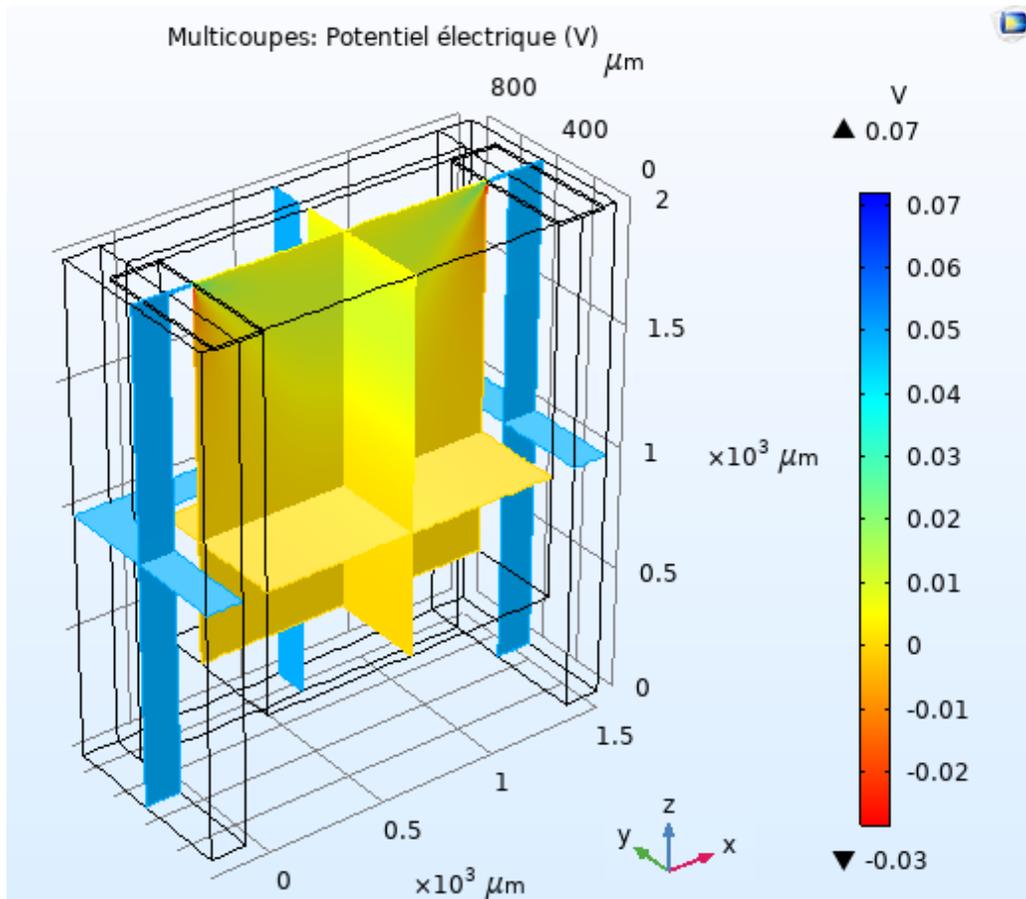


Figure 1-4 : Distribution du potentiel électrique sur la masse sismique
(Force du bas vers le haut)

1-5 Théorie de la piézoélectricité

1- 5-1 Le phénomène de la piézoélectricité

L'effet piézoélectrique [2] correspond à l'apparition de charges électriques sous l'influence d'une contrainte mécanique.

Il existe deux effets piézoélectriques :

- ✓ l'effet piézoélectrique direct, qui fut découvert par les frères Jacques et Pierre Curie en 1880, et qui correspond à l'apparition de charges sous une contrainte.

- ✓ l'effet piézoélectrique inverse, qui correspond à une déformation du matériau lorsqu'on applique un champ électrique dans le matériau.
Ce second effet fut proposé par Lippmann en 1881, et fut vérifié expérimentalement par les frères Curie la même année.

1-5-2 Application pratique des matériaux piézoélectriques

- L'effet piézoélectrique direct permet d'utiliser les matériaux piézoélectriques comme capteurs, puisque on peut récupérer de l'information sous la forme d'une tension sur la déformation de la structure mécanique.
- l'effet piézoélectrique inverse permet d'utiliser les matériaux piézoélectriques comme actionneurs, puisqu'à l'aide d'une tension on va pouvoir déformer des matériaux, et créer ainsi des moteurs piézoélectriques, des émetteurs ultrasonores, des outils de positionnement de précision...

1-5-3 Modélisation mathématique du phénomène piézoélectrique

- L'effet piézoélectrique direct est l'apparition de charges lorsque le matériau est soumis à une contrainte. Ces charges sont proportionnelles à la contrainte, et s'inversent lorsqu'on inverse le sens de la contrainte.

De ce fait, l'effet piézoélectrique direct se traduit par l'équation 1.5 suivante :

$$D = d.T \quad (1.5)$$

T est appelée la contrainte ou pression exercée sur les faces du matériau

(N.m⁻² : Newton divisé par mètre carré)

D est appelée l'induction électrique ou polarisation électrique

(C.m⁻² : Coulomb divisé mètre carré)

d est appelé constante piézoélectrique du matériau ou constante piézoélectrique ($m.V^{-1}$: mètre divisé par Volt)

- L'effet piézoélectrique inverse se traduit par une déformation du matériau sous l'application d'un champ électrique (ou d'une tension).

De ce fait, l'effet piézoélectrique inverse se traduit par l'équation 1.6 suivante :

$$S = d.E \quad (1.6)$$

E est appelé le champ électrique ($V.m^{-1}$: Volt divisé par mètre)

S est appelée la déformation (sans unité)

On sait qu'une déformation δ peut être formulée par $\delta = (L - L_0)/L_0$ tel que L_0 représente la longueur initiale du matériau et que L représente sa longueur après déformation.

La piézoélectricité, étant un effet sensible au champ électrique, ne peut se produire que dans des diélectriques et des semi-conducteurs (des matériaux où peut exister le phénomène E).

Aux deux effets précédents se superposent deux autres effets, liés au :

- phénomène d'élasticité du matériau (*puisque lors de l'application d'une tension entre ses faces il se déforme donc il est élastique*).

- propriétés diélectriques du matériau (*puisque sans l'existence de cette propriété il n'y a pas de phénomène de piézoélectricité*)

Ces deux effets se traduisent par les équations respectives suivantes :

$$S = s.T \quad (1.7)$$

$$D = \epsilon.E \quad (1.8)$$

Le tableau suivant résume les définitions des différentes grandeurs physiques.

<i>Grandeur physique</i>	<i>Symbole</i>	<i>Unité</i>
Contrainte	T	N.m ⁻²
Déformation	S	Sans unité
Champ électrique	E	V.m ⁻¹
Induction électrique	D	C.m ⁻²
Souplesse (ou élasticité)	s	m ² .N ⁻¹
Constante piézoélectrique	d	m.V ⁻¹
Permittivité électrique	ε	F.m ⁻¹

Tableau 1.1 : Grandeur physique intervenant dans la théorie de la piézoélectricité

1-5-4 Relations entre les différentes grandeurs physiques

La figure 1-5 ci-dessous, résume les relations entre les différentes grandeurs physiques dans un matériau piézoélectrique.

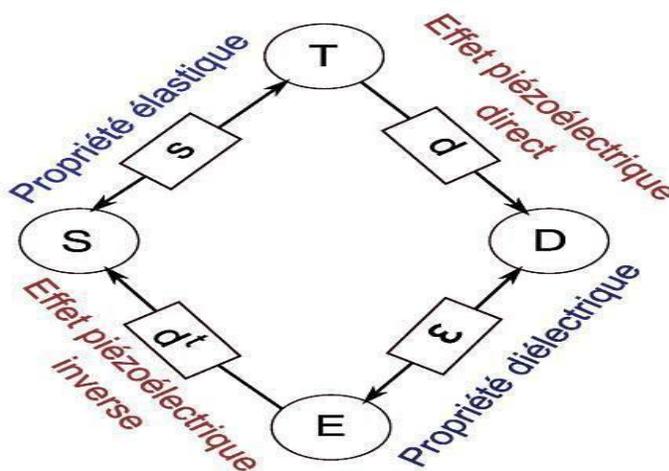


Figure 1-5 : Relations entre grandeurs physiques dans un matériau piézoélectrique

Cette figure nous permet d'écrire les relations fondamentales de la piézoélectricité :

$$S = s^E \cdot T + d^t \cdot E$$

$$D = d \cdot T + \epsilon^T \cdot E \tag{1.9}$$

La souplesse s est notée avec un indice E , puisqu'elle est mesurée lorsque E est nul.

La permittivité électrique ϵ est notée avec un indice T , puisqu'elle est mesurée lorsque la contrainte dans le matériau est nulle.

S et T sont des tenseurs.

D et E sont des tenseurs d'ordre 0 que l'on assimilera à des vecteurs.

L'exposant t correspond à la transposée du tenseur.

Les coefficients s , d et ϵ sont représentés dans le cas général par les expressions suivantes :

$$s = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{22} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{13} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(s_{11} - s_{12}) \end{bmatrix} \quad d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{bmatrix}$$

La souplesse s s'exprime sous la forme d'un tenseur 6 x 6.

Les coefficients piézoélectriques d sous la forme d'un tenseur 6 x 3

La permittivité électrique sous la forme d'un tenseur 3 x 3.

1-5-5 Relation tension électrique (V) - force appliquée (F)

La relation tension électrique force appliquée peut être exprimée sous forme d'équation en se basant sur :

- L'expression de la polarisation interne P_i

$$P_i = d \cdot P = d \cdot (F/S) \quad (1.10)$$

avec P la pression générée sur la surface S (du matériau) par la force F

- L'expression de la polarisation interne

$$P_i = Q/S \quad (1.11)$$

avec Q la quantité de charge cumulée sur les surfaces en regard du matériau subissant une pression P .

Le matériau pouvant être modélisé par un condensateur de capacité C (figure 1-6)

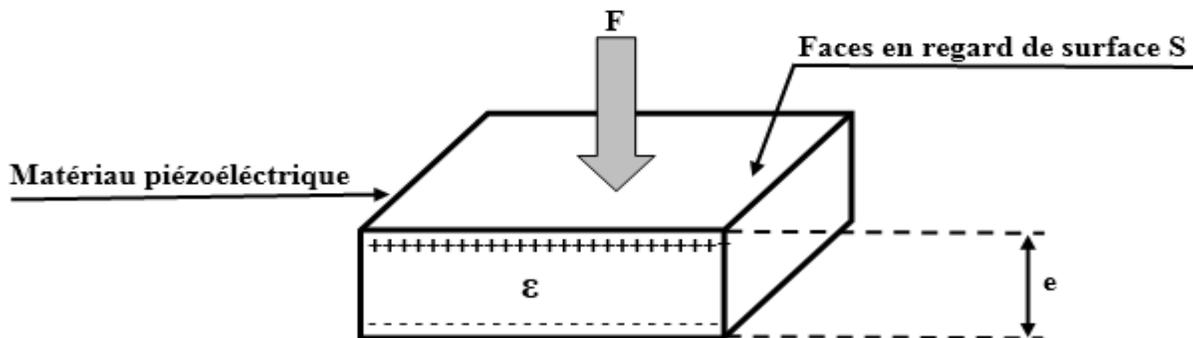


Figure 1-6 : Cumule de charges sur un matériau piézoélectrique (effet direct)

Les équations (1.10) et (1.11) nous permettent d'écrire :

$$d \cdot F = Q \quad (1.12)$$

$$\text{comme } Q = C \cdot V \quad (1.13)$$

$$\text{alors } d \cdot F = C \cdot V = \frac{\epsilon \cdot S}{e} \cdot V$$

d'où

$$V = \frac{e \cdot d}{S \cdot \epsilon} \cdot F \quad (1.14)$$

Le facteur (e/S) est un facteur géométrique et le facteur (d/ϵ) est un facteur caractéristique du matériau.

Les variations de V en fonction de F sont linéaires, $V=f(F)$ est une droite.

1-6 Théorie des structures mécaniques.

La théorie des structures mécaniques discutée dans ce sous chapitre touche la poutre à double serrage avec une masse centrale [3] qui représente les modèles étudiés dans ce mémoire. L'objectif est de donner l'expression de déplacement de la poutre à double serrage avec une masse centrale.

La structure de deux poutres encastrées supportant une masse centrale est souvent utilisée pour les capteurs inertiels tels que les accéléromètres et les gyroscopes. Un dessin schématique de la structure est illustré à la figure 1-7.

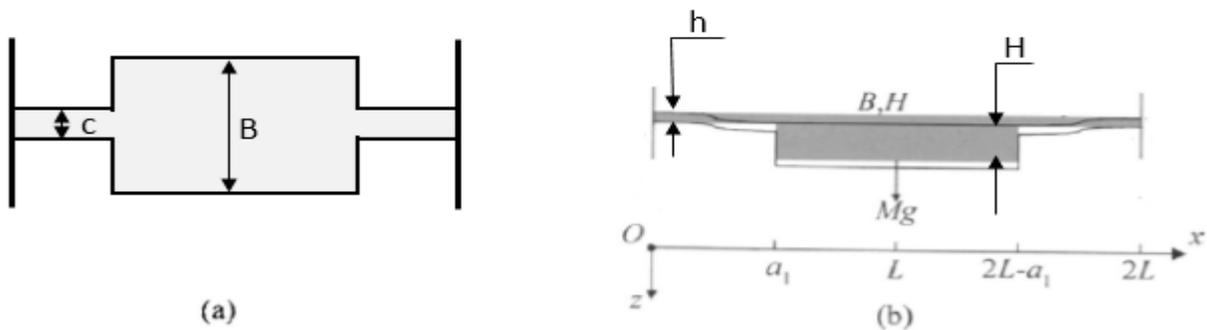


Figure 1-7 : Dessin schématique d'une structure poutre-masse à double appui (a) vue de dessus ; (b) vue en coupe

Comme condition typique, la masse centrale est beaucoup plus large et/ou plus épaisse que les poutres, de sorte que la flexion de la masse peut être négligeable (c'est-à-dire que dans le cas où il n'y a aucune accélération, selon l'axe z, la poutre est au niveau $z = 0$). Si le chargement de la structure poutre-masse est son propre poids dans la direction z, le déplacement de la masse ressemble à un piston en raison de la symétrie de la structure dans les directions x et y (ici axe perpendiculaire au repère x, z). En considérant que la masse des poutres soit beaucoup plus petite que celle de la masse centrale, le déplacement z, de la masse centrale, sera exprimé par l'équation suivante [3] :

$$z(a_1) = \frac{M \cdot g \cdot a_1^3}{2 \cdot E \cdot c \cdot h^3} \quad (1.15)$$

E étant le module de Young du matériau utilisé pour la conception de la poutre.

Conclusion

Les notions fondamentales pour l'étude faite dans ce mémoire, ont été exposées en introduisant la théorie de la piézoélectricité permettant d'aboutir au signal électrique image du déplacement de la masse sismique sous l'effet d'une accélération qui lui est appliquée. La mécanique des solides quand a elle nous a permis de donner l'équation du déplacement de la masse. Ces équations vont nous permettre de faire une analyse du comportement de l'accéléromètre lors de sa simulation et de conclure quant aux données de sa conception.

2.1 Introduction

La construction des structures illustrant les accéléromètres étudiés dans ce mémoire vont être clarifiées dans ce chapitre. Le logiciel de simulation utilisé dans ce contexte est le comsol multi-physics. C'est un logiciel de simulation utilisé dans tous les domaines de la physiques d'où l'appellation multi-physics [4].

2.2 introduction au logiciel de simulation Comsol

Comsol multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques.

Avec ce logiciel on va donc exécuter un programme informatique sur un ordinateur en vue de simuler un phénomène physique réel et complexe (c'est la simulation numérique). La méthode utilisée est nommée méthodes des éléments finis (MEF, ou FEM pour *finite element method* en anglais), elle sert à résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles. Celles-ci peuvent par exemple représenter analytiquement le comportement dynamique de certains systèmes physiques.

La méthode des éléments finis [5], fait partie des outils de mathématiques appliquées. Il s'agit de mettre en place, à l'aide des principes hérités de la formulation variationnelle ou formulation faible, un algorithme discret mathématique permettant de rechercher une solution approchée d'une équation aux dérivées partielles (ou EDP) sur un domaine compact avec conditions aux bords et/ou dans l'intérieur du compact. On parle couramment de conditions de type Dirichlet (valeurs aux bords) ou Neumann (gradients aux bords) ou de Robin (relation gradient/valeurs sur le bord).

2.2.1 Interface du logiciel comsol

La figure 2.1, illustre l'interface de travail au lancement du logiciel Comsol.

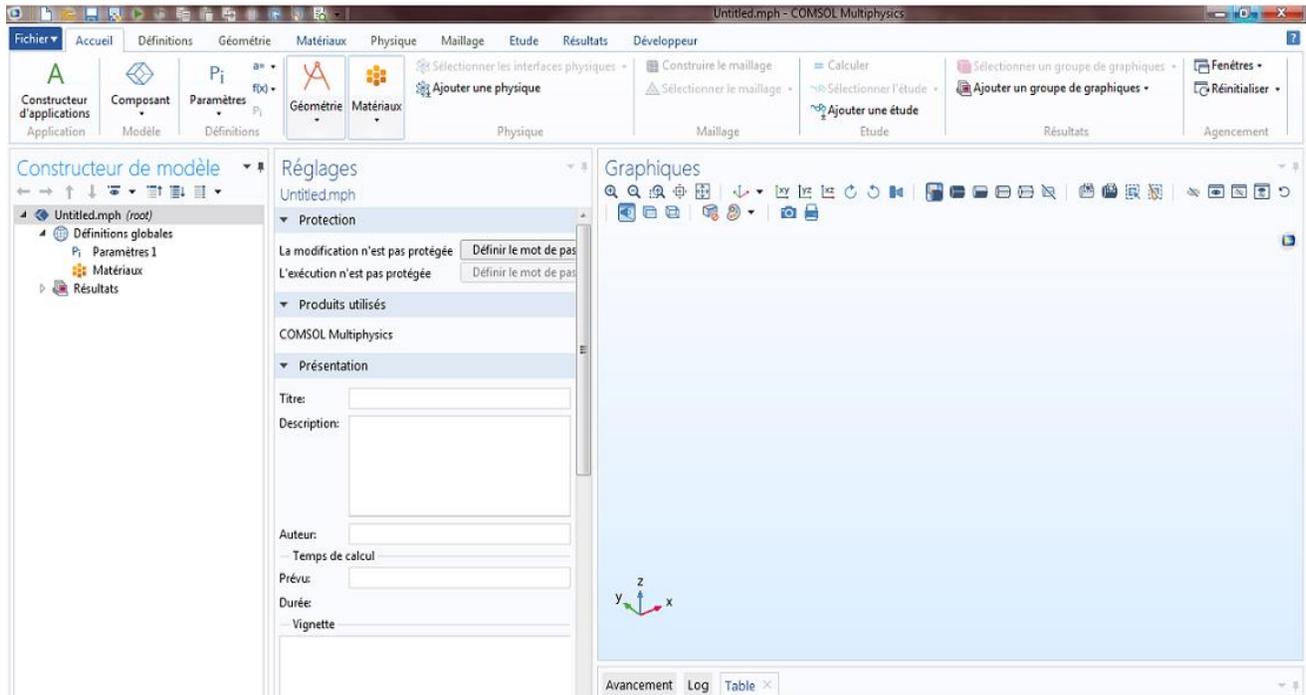


Figure 2-1 : Interface graphique au lancement du logiciel Comsol

- Une fenêtre constructeur du modèle qui permet de construire le modèle dans les domaines géométrique (structure), physique (équations de traitement du modèle), matériau (matériaux utilisés pour la structure), maillage (type de découpage de l'espace servant à affiner la solution du problème considéré) et étude (type d'étude choisie pour le traitement et l'établissement des résultats).
- Une fenêtre de réglages où apparaissent toutes les initialisations correspondantes à l'état apparaissant dans la fenêtre de construction du modèle.
- Une fenêtre graphique où apparaît la géométrie édifiée par l'utilisateur, le maillage choisi, les résultats (phénomènes physiques, trace de courbe, résultats).

Un zoom sur la partie supérieure de l'interface fait apparaître un ensemble d'icônes (figure 2.2) qui correspondent aux actions suivantes :



Figure 2-2 : Icones de modélisation de la structure

a/ L'icône composant

Cette icône permet de choisir l'espace de travail une dimension (x), deux dimensions (x,y) et trois dimensions (x,y,z). Son menu déroulant est comme suit (figure 2.3) :

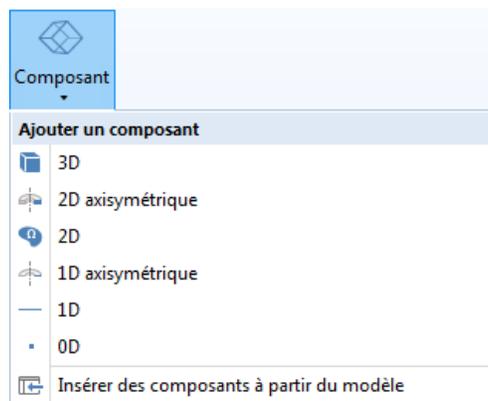


Figure 2-3 : Icône du choix de l'espace dimensionnel de travail.

Dans le cadre de ce travail le choix s'est porté sur une structure à deux dimensions (2D).

b/ L'icône géométrie

Cette icône permet d'utiliser un ensemble de formes géométriques, pour la construction de la structure étudiée. Elle prend forme au niveau de la fenêtre constructeur du modèle une fois l'espace de travail sélectionné (figure 2.4). Son menu déroulant contient l'ensemble des figures géométriques utilisées pour la construction.

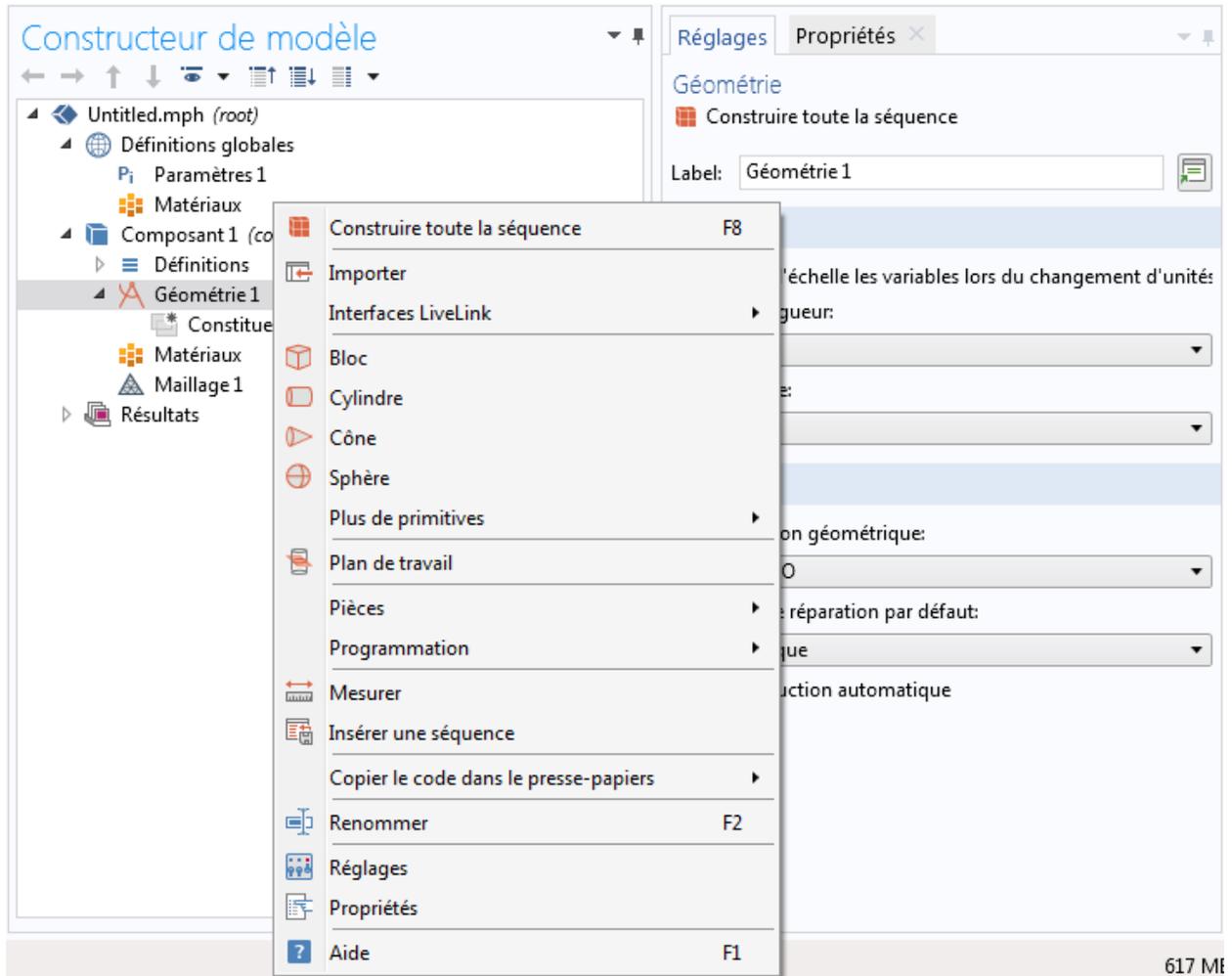


Figure 2-4 : L'icône géométrie et son menu déroulant

c/ L'icône matériau

Cette icône, qui apparaît au niveau de la fenêtre de constructeur du modèle lorsque l'espace de travail est sélectionnée permet de choisir le matériau formant les différentes parties de la structure. Le Comsol possède une bibliothèque intégrée que l'utilisateur pourra utiliser pour ce choix (figure 2.5). Il existe aussi un choix de matériau par spécification du domaine physique.

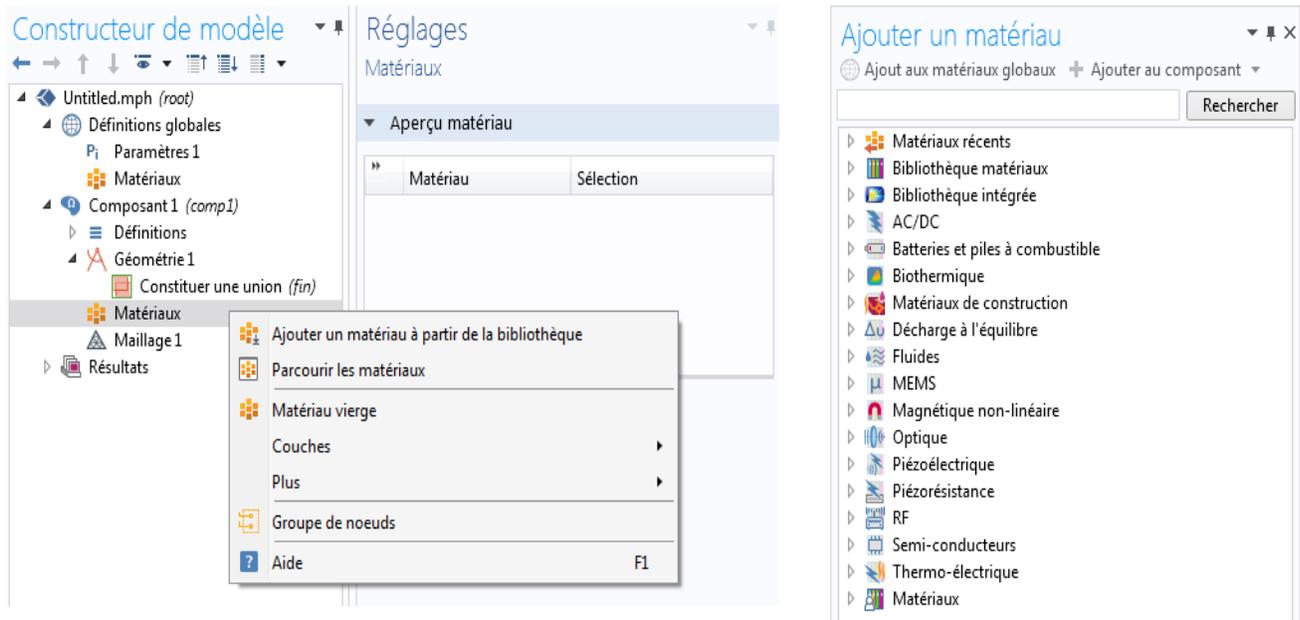


Figure 2-5 : Icône du choix du matériau.

d/ L'icône Maillage

Cette icône, qui apparaît aussi lors de la sélection de l'espace de travail, dans la fenêtre constructeur du modèle, permet le choix du maillage à utiliser (figure 2.6a). On rappelle que le maillage est la discrétisation spatiale d'un milieu continu, ou aussi, une modélisation géométrique d'un domaine par des éléments proportionnés fins et bien définis. L'objet d'un maillage est de procéder à une simplification d'un système par un modèle représentant ce système et, éventuellement, son environnement (le milieu), dans l'optique de simulations de calculs ou de représentations graphiques [6]. La figure 2.6b (l'image de la structure est en mode paysage), illustre la décomposition de l'espace et de la structure par un maillage formé de cellules en triangle libre adopté sur la structure

simulée dans le contexte de ce travail. Plus le maillage est affiné plus le temps de calcul pour la résolution des équations différentielles définissant la dynamique de la structure est long, car la précision sur les calculs augmentent.

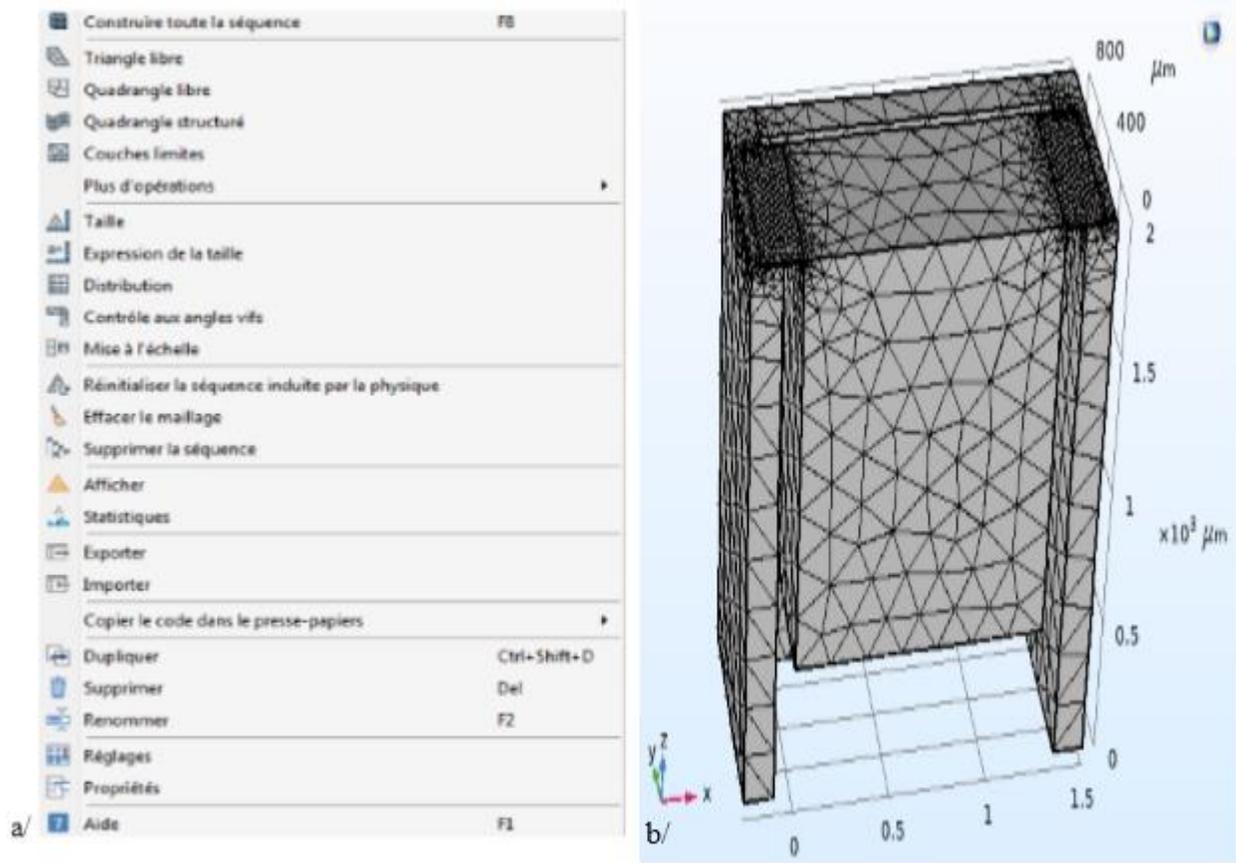


Figure 2-6 : (a) Type de maillage, (b) Maillage adopté, triangle libre de taille Normale

e/ L'icône Ajouter une physique

Cette icône, permet le choix du domaine physique utilisé pour résoudre le problème posé. Dans le cas de ce travail on est en présence d'une structure, donc on a un élément mécanique (dans le sens d'objet) et on est en présence de phénomènes tant mécaniques (déplacement, force), qu'électrique (différence de

potentiel électrique). Notre étude doit donc se faire dans le domaine de l'électromécanique- dispositifs piézoélectrique. En sélection l'icône ajouter une physique un menu de choix apparait (figure 2.7). L'utilisateur pourra choisir la physique appropriée à son étude dans la panoplie des modules proposes (Acoustique, Transport des espèces, Electrochimie, etc...).

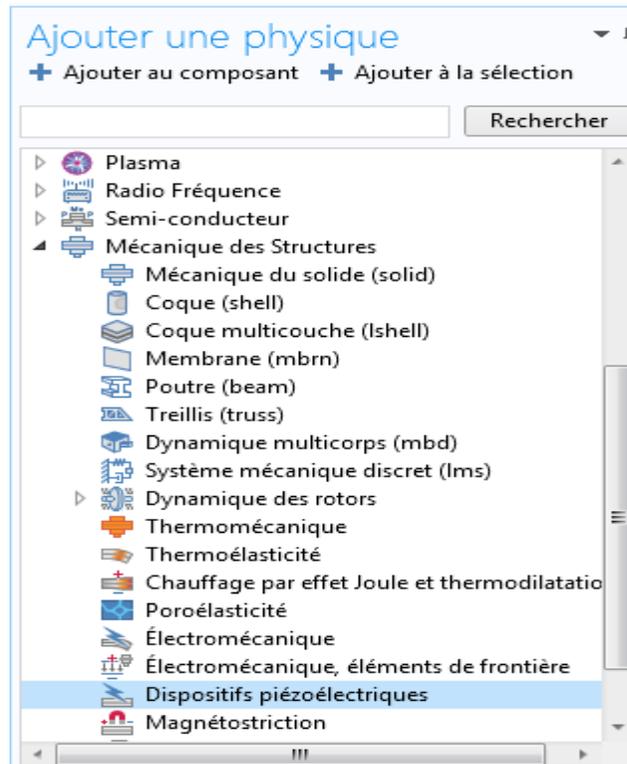


Figure 2-7 : Choix de l'étude physique appropriée au problème posé.

f/ L'icône Etude

Cette icone, permet de sélectionner l'étude envisagée, c'est-à-dire le domaine ou doit se faire la résolution des équations différentielles régissant la dynamique du système posé afin d'avoir les résultats du problème posé (figure 2.8).

Dans le cadre de ce travail l'étude stationnaire a été choisie. Notre objectif étant de simulé le comportement structural et de faire des mesures sur des grandeurs électriques, cette étude est suffisante.

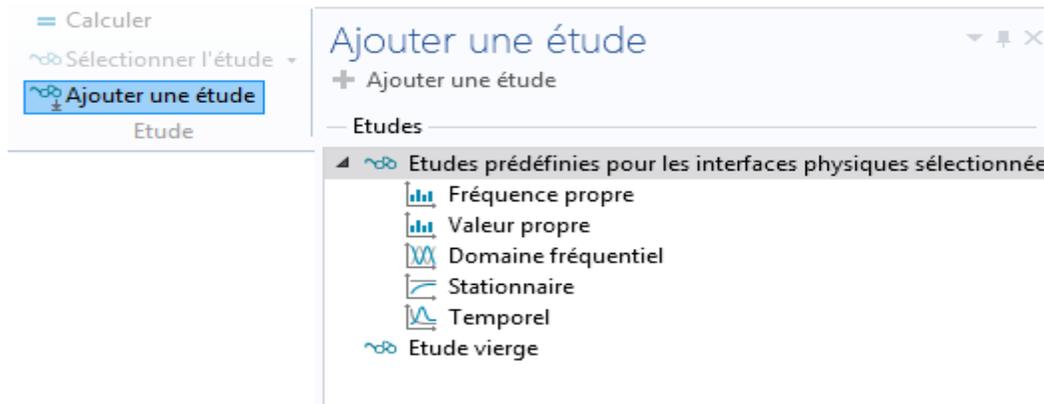
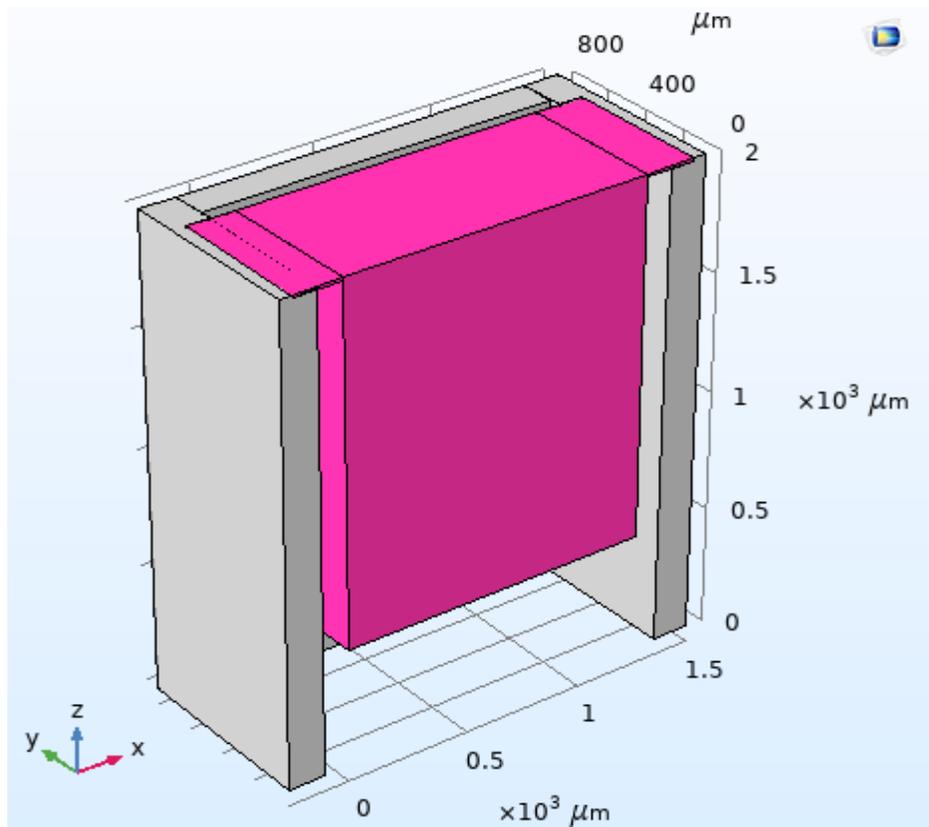


Figure 2-8 : Choix de l'étude

2.2.2 Construction de la structure simulée.

Les structures simulées sont des structures à trois dimensions établies selon des figures géométriques simples qui sont des blocs. Les structures d'accéléromètres étudiées sont illustrées en (figure 2.9) :



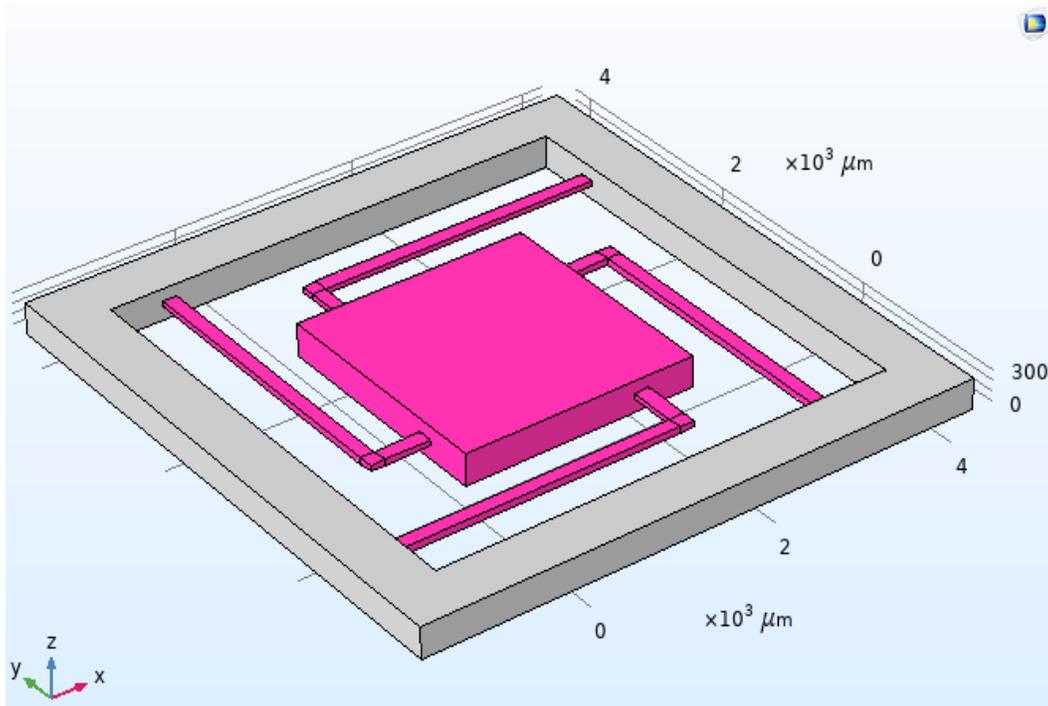


Figure 2-9 : Structures micrométriques des accéléromètres

Les masses sismiques sont conçues en utilisant des matériaux piézoélectriques, en majorité ceux stockés au niveau de la bibliothèque matériaux piézoélectriques du logiciel comsol.

a/ Contrainte de fixation

Les masses sismiques seront soumises, lors de la simulation, à des forces de l'ordre de $(\text{masse} \cdot \text{gravité} \cdot n)$, avec n variant de 0 à 20). Cet état nécessite donc une fixation de la masse sismique tout en gardant la possibilité pour cette dernière d'être affectée par la force qu'elle subit (mouvement de déplacement). L'emplacement des fixations utilisées sur les accéléromètres sont clarifiées sur la figure 2.10, pour l'accéléromètre poutre suspendue.

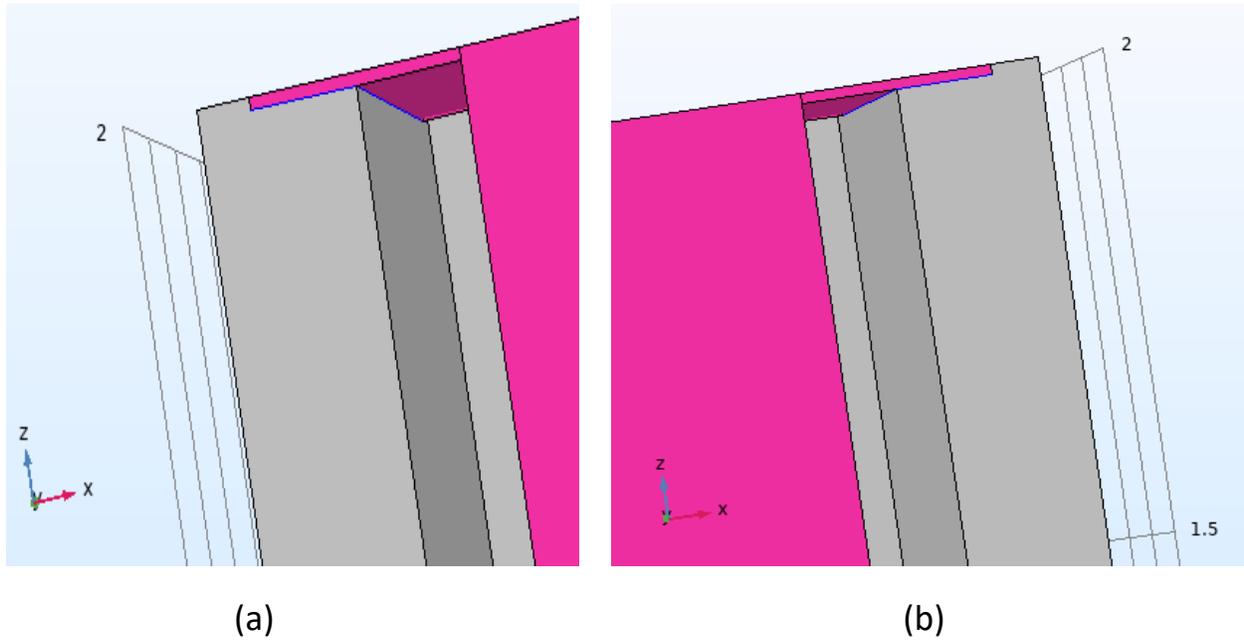


Figure 2-10 : Emplacement de la contrainte de fixation sur l'accéléromètre poutre suspendue : (a) support gauche ; (b) support droit

Pour l'accéléromètre " en étoile" (bloc) les fixations sont établies au niveau de chaque fin de poutre avec le châssis. Dans ce cas il y a quatre fixations (figure 2.11).

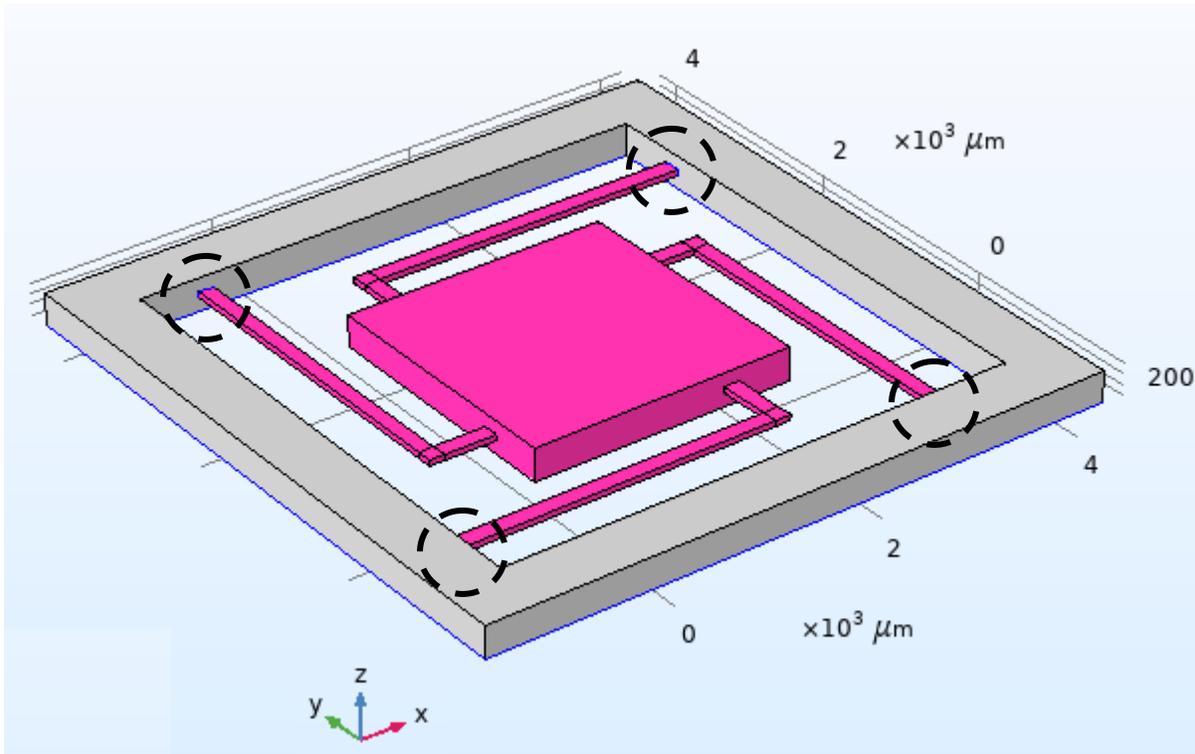


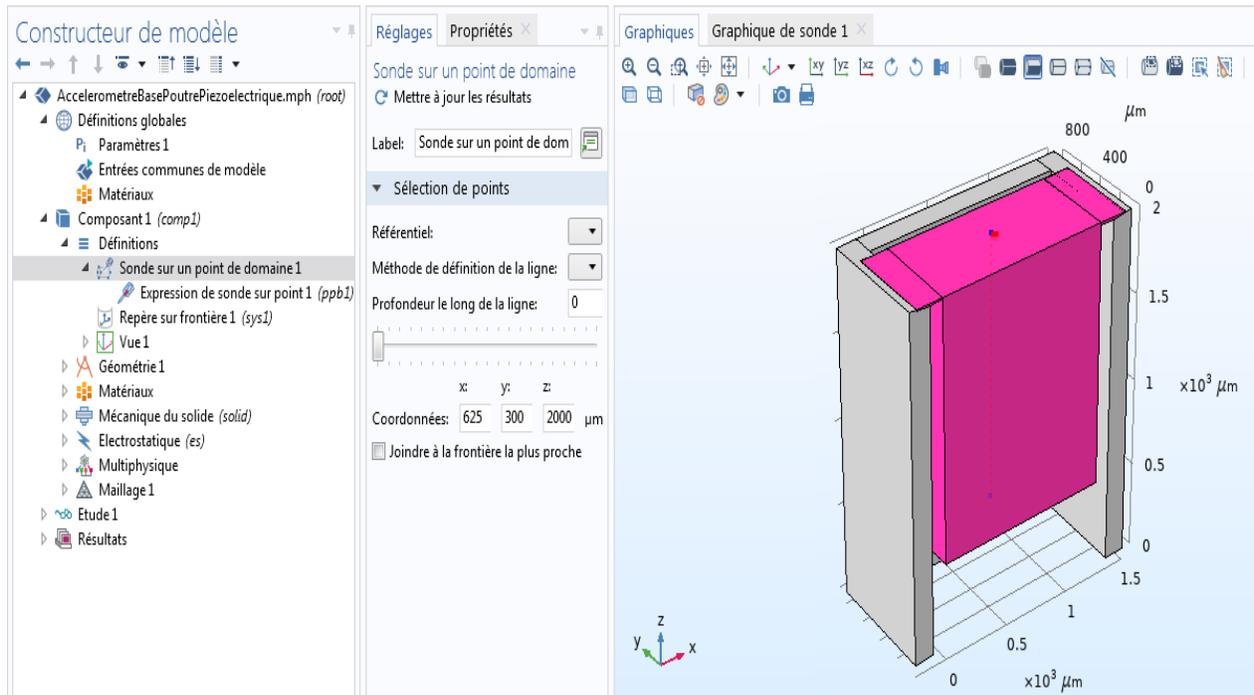
Figure 2-11 : Emplacement des contraintes de fixation de la structure "étoile"

Le châssis est lui-même fixe au niveau de sa base inférieure.

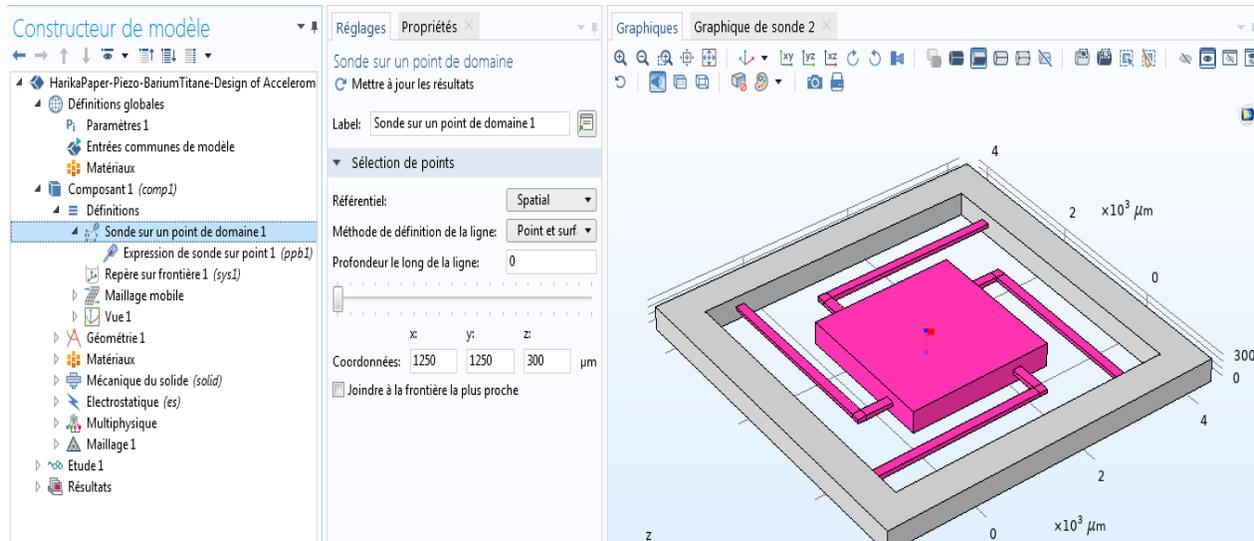
b/ Technique de mesure du potentiel

Nous utilisons dans ce cas une prise de mesure par la technique dite sonde sur un point de domaine (figure 2-12)

Chapitre II Modélisation de l'accéléromètre sous consol 5.3



(a)



(b)

Figure 2-12 : Technique de prise de mesure d'un potentiel par sonde sur un point
(a) accéléromètre en poutre ; (b) accéléromètre en "étoile"

Conclusion

Les étapes de conception des accéléromètres, dont l'étude a été envisagée dans ce mémoire, ont été établies dans ce chapitre. Le chapitre suivant se base sur cette conception pour simuler et analyser les résultats de l'étude.

3.1 Introduction

Dans ce chapitre sera exposée la simulation des deux modèles d'accéléromètres mentionnés dans le chapitre précédent. On simulera le déplacement de la masse sismique sous l'action de l'accélération, on vérifiera la résistance à la traction ultime (UTS : ultimate tensile strength en anglais) du matériau utilisé dans la conception de la masse sismique et on simulera le potentiel généré en fonction de l'accélération. Tous ces résultats se feront pour différents matériaux piézoélectriques contenus dans la bibliothèque de comsol.

3.2 Simulation du comportement de la masse sismique en fonction de l'accélération appliquée.

Les figures (3.1 et 3.2) suivantes illustrent le déplacement des deux modèles d'accéléromètres utilisés. Le PZT-4 (Titanate de zirconite de plomb, piézocéramique) étant le matériau utilisé pour la conception de la masse sismique dans chacun des cas.

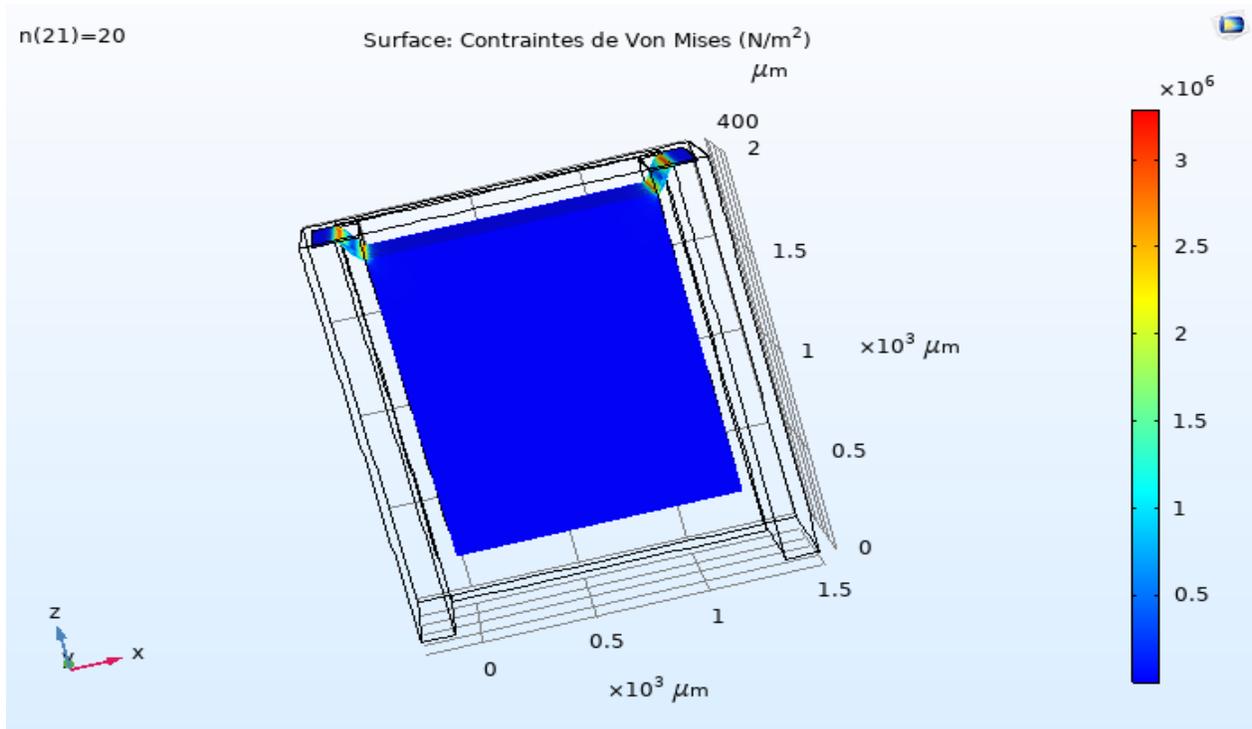


Figure 3.1 : Illustration du déplacement de la masse sismique sous l'effet de l'accélération : accéléromètre a poutre suspendue

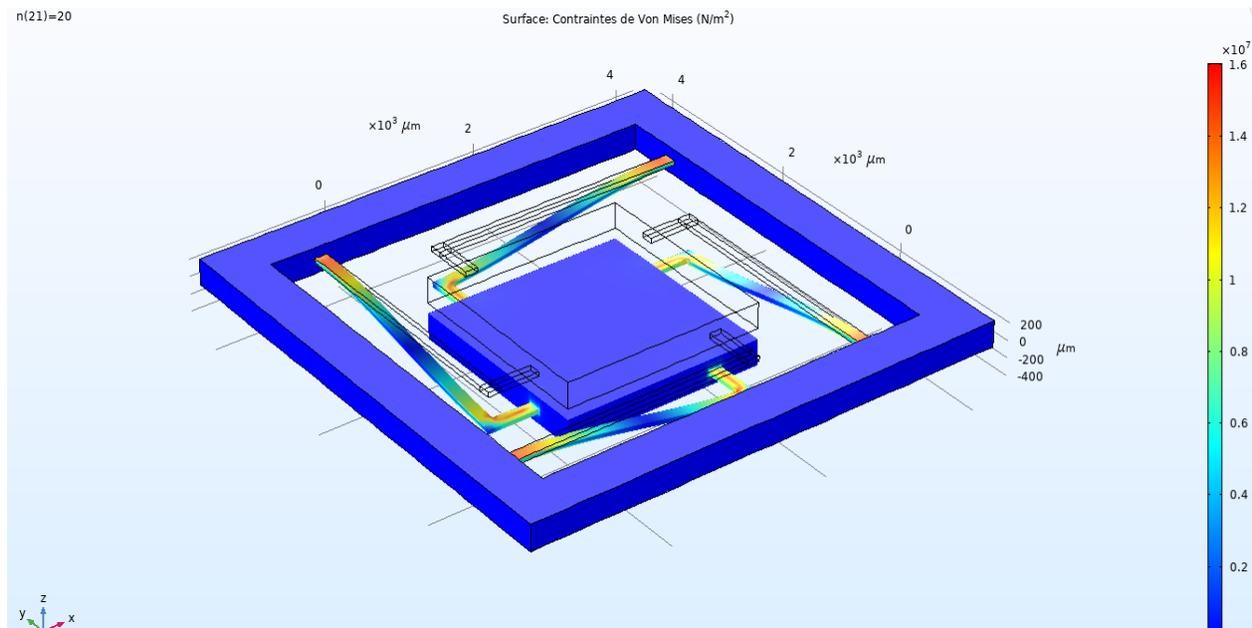


Figure 3.2 : Illustration du déplacement de la masse sismique sous l'effet de l'accélération : accéléromètre en bloc suspendu

La force est appliquée dans le sens inverse de l'axe z, donc du haut vers le bas. Dans le cadre de la simulation avec comsol, la donnée correspondante à la force est une pression, équivalente au rapport force sur surface. A partir de la simulation du déplacement de la masse sismique, sous l'effet de l'accélération, on peut donc lire la valeur de la résistance à la traction. On constate que le maximum de cette contrainte s'établi au niveau des extrémités des poutres de soutien de la masse sismique. Pour une accélération de 20*g nous avons alors les résultats établies dans le tableau ci-dessous (Tableau 3-1)

Modèle	Résistance a la traction ultime du matériau PZT-4 (MPa)	Résultats de simulation (MPa)
Poutre	123.2	3.3
Bloc		16

Tableau 3-1 : Résistance à la traction ultime

(Valeur maximum et valeur en simulation)

On constate que pour les modèles choisis les valeurs de la résistance à la traction ultime sont nettement inférieures à la valeur du matériau. On peut donc dire que le modèle subit la force due à l'accélération sans dommages.

L'extension de cette étude a été faite sur différents matériaux piézoélectriques disponibles dans la bibliothèque du comsol. Les résultats sont rassemblés dans le tableau suivant (Tableau 3-2), pour une accélération maximum de 20*g.

Materiau	UTS (MPa)	UTS-Poutre (MPa)	UTS- Bloc (MPa)
PZT-4	123.2	3.3	16
Lithium Tantalate	4000→7000	3.5	17
Barium Titanate	21.0	2.5	15
Zinc Oxide	100→150	2.5	12
Gallium Arsenide	15	2.5	10
Aluminum Nitride	197	1.8	7
Polyvinylidene (PVDF)	35→50	0.8	4

Tableau 3-2 : UTS pour les types d'accéléromètres étudiés selon le matériau

Les résultats obtenus en simulation montre clairement que la résistance à la traction, pour les deux modèles, sont nettement inférieures aux valeurs maximum correspondantes à celle du matériau. Sous l'effet d'une accélération pouvant atteindre 20*g, les modèles ne subiront aucune fracture au niveau des poutres de suspension. Ils sont donc acceptables du point de vue résistance mécanique.

3.3 Simulation du déplacement de la masse sismique en fonction de l'accélération appliquée, pour différents matériaux piézoélectriques.

Les figures 3.3 et 3.4 illustrent le déplacement de la masse sismique pour différents matériaux piézoélectriques utilisés dans sa conception, respectivement pour l'accéléromètre sous forme de poutre suspendue et pour l'accéléromètre sous forme de bloc parallélépipède. La masse volumique (ρ) du matériau est mentionnée.

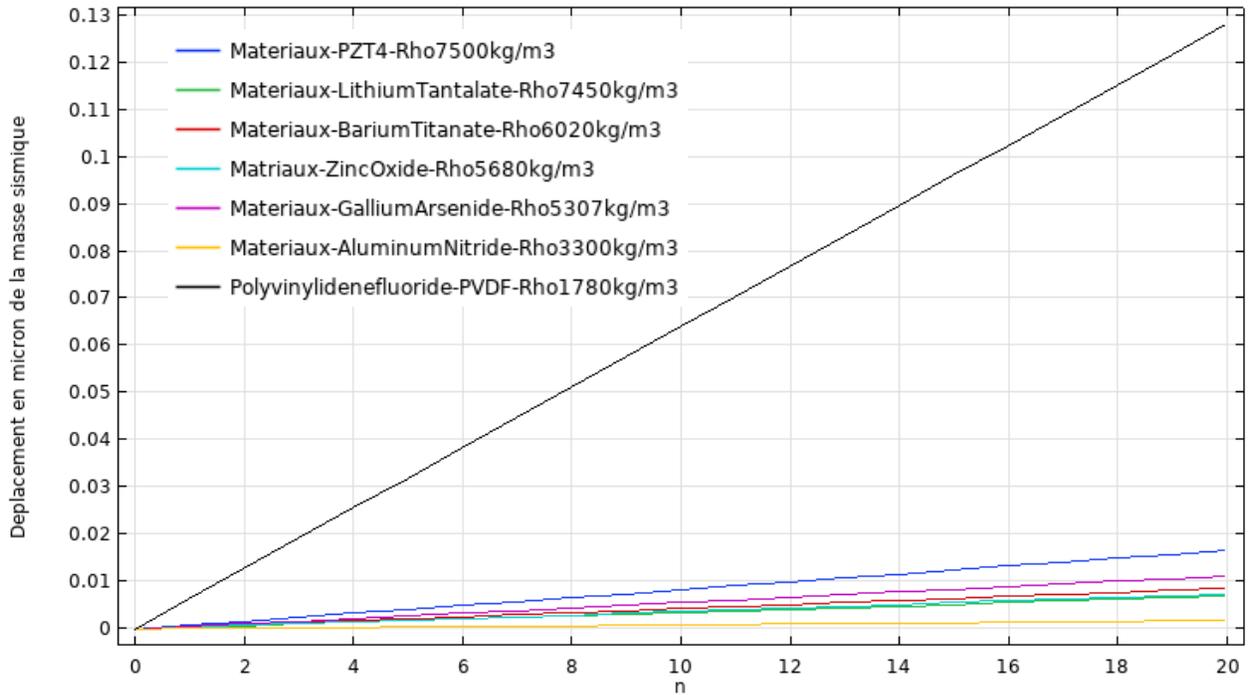


Figure 3.3 : Déplacement en μm de l'accéléromètre en poutre, en fonction de l'accélération, pour différents matériaux piézoélectriques.

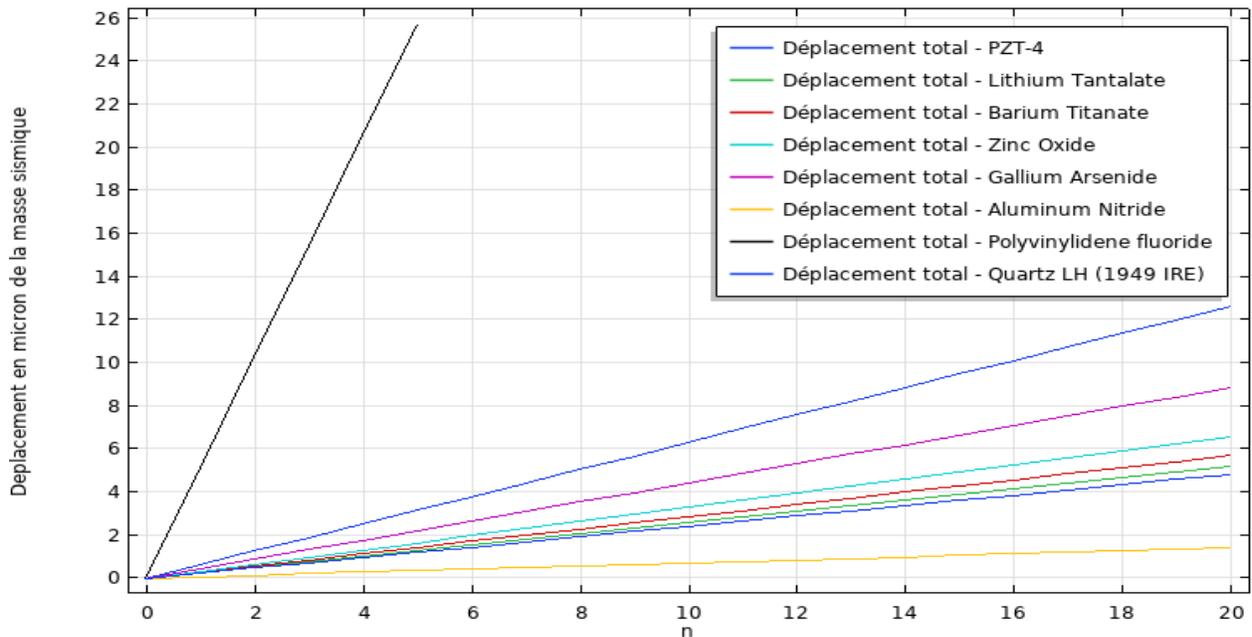


Figure 3.4 : Déplacement en μm de l'accéléromètre en bloc, en fonction de l'accélération, pour différents matériaux piézoélectriques.

L'illustration suivante (Figure 3.5) détail le déplacement de l'accéléromètre lorsque ce dernier est conçu en utilisant le matériau Polyvinylidene fluoride

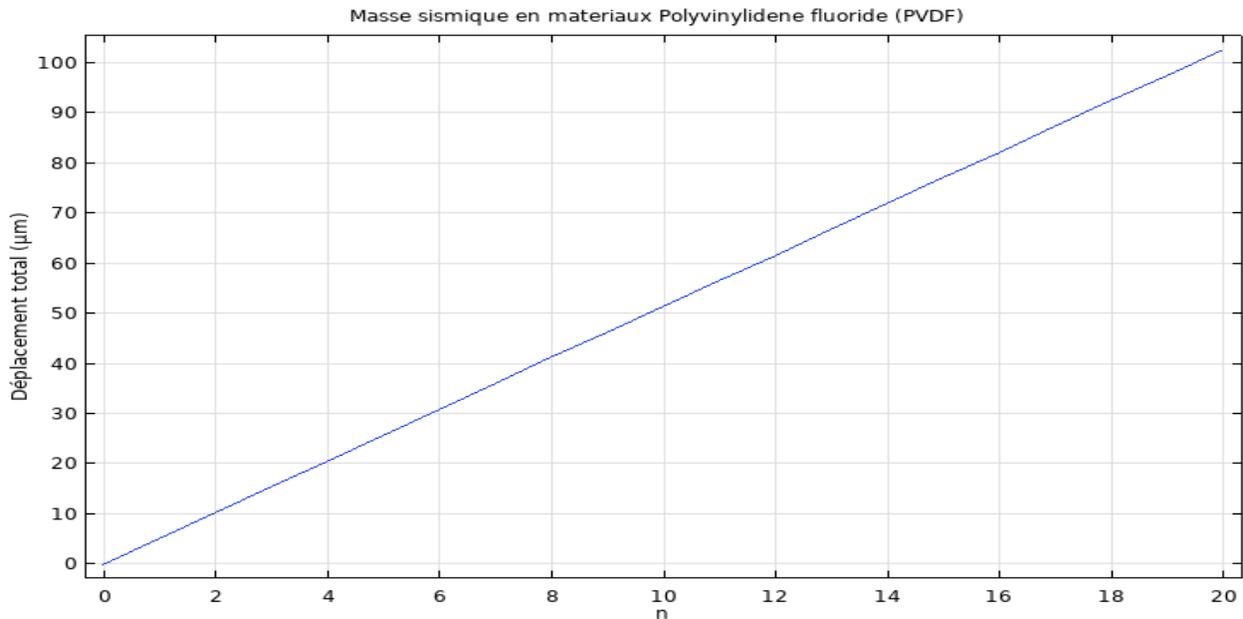


Figure 3.5 : Déplacement de l'accéléromètre en bloc, simulé en utilisant le Polyvinylidene fluoride

Nous avons repris l'équation (1.15) exprimant le déplacement de l'accéléromètre en poutre suspendue :

$$z(a_1) = \frac{M.g.a_1^3}{2.E.c.h^3}$$

et nous l'avons simulée en utilisant le logiciel Matlab. Les résultats (figure 3.6) concordent avec ceux de la figure 3.3

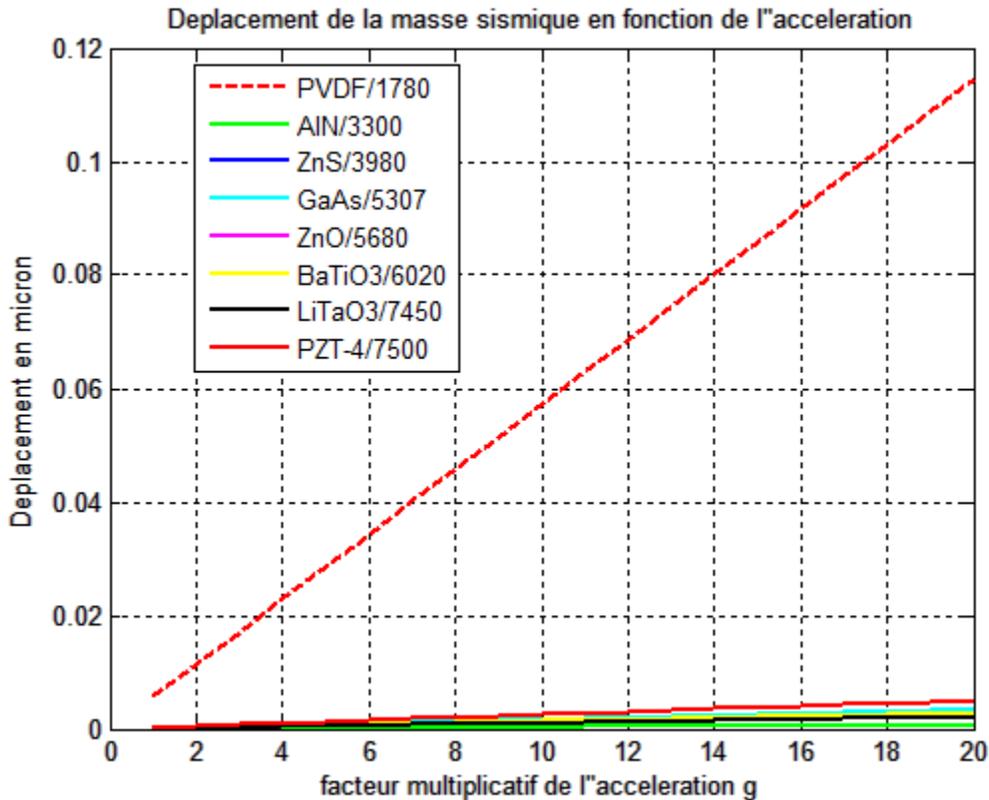


Figure 3.6 : Déplacement de l'accéléromètre en poutre, pour différents matériaux, simulé sous logiciel Matlab

Le déplacement, sous l'effet de la pression (force/surface), est dépendant du coefficient de Young (E) du matériau (Tableau 3-3). Ce facteur étant au dénominateur, plus il décroît plus le déplacement croît. Ceci est bien illustré sur les illustrations (figures 3.3, 3.4 et 3.6)

Matériau	PVDF	PZT-4	GaAs	BaTiO3	ZnO	LiTaO3	AIN
Coefficient de Young ($\times 10^9$ Pa)	1.2	115	119	164	211	275	389

Tableau 3-3 : Coefficient de Young des différents matériaux piézoélectriques simulés

Le facteur de Young est donc le facteur le plus important sur lequel on peut se baser pour pouvoir estimer le déplacement de la masse sismique sous l'effet de l'accélération. On peut aussi se baser sur le facteur défini par le rapport (Tableau 3-4 : masse volumique du matériau/coefficient de Young du matériau) pour pouvoir estimer la variation du déplacement. Plus ce rapport est élevé plus le déplacement est important. La figure 3.7, sur laquelle le matériau PVDF est omis volontairement (ceci nous permet d'avoir un tracé du déplacement avec une échelle adéquate), nous permet de constater clairement cette remarque.

Matériau	PZT-4	GaAs	BaTiO3	ZnO	LiTaO3	AlN
$(\rho/E) \times 10^{-9}$	65	44	36	26	27	8.48

Tableau 3-4 : Rapport (ρ/E) pour différents matériaux simulés.

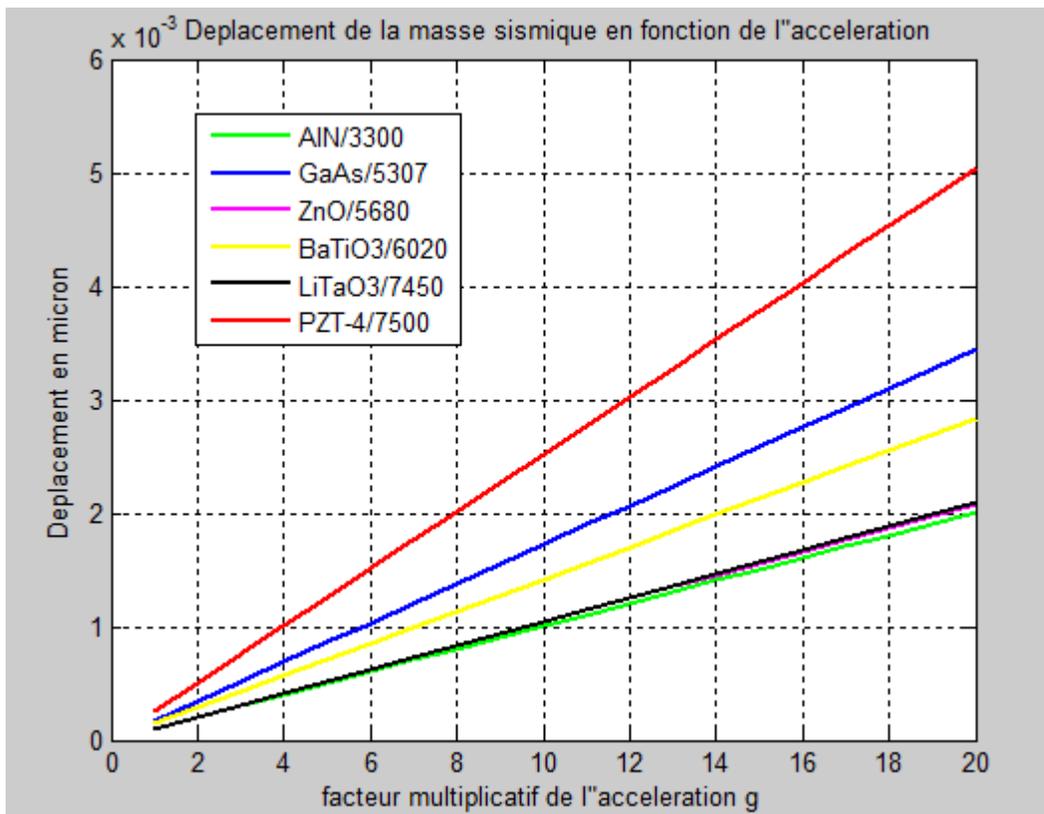


Figure 3.7 : Déplacement de la masse sismique en fonction de l'accélération simulé sous Matlab.

En général l'accélération peut changer de sens. Pour cela on a simulé les déplacements, sur consol, pour les deux modèles d'accéléromètre choisis. Les figures 3.8 et 3.9 illustrent le changement de sens. Les figures 3.10 et 3.11 illustrent les variations du déplacement en fonction de l'accélération.

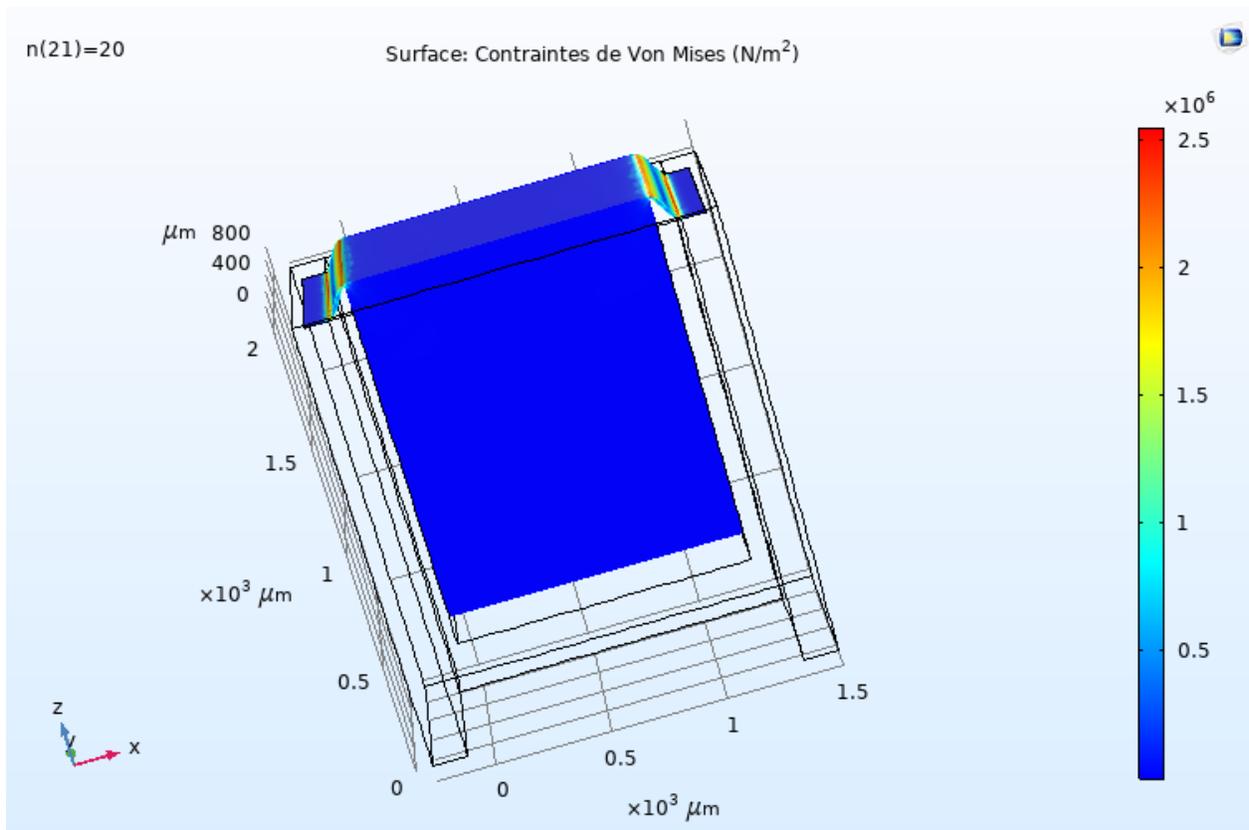


Figure 3.8 : Déplacement de l'accéléromètre en poutre avec une force dans le sens de l'axe z

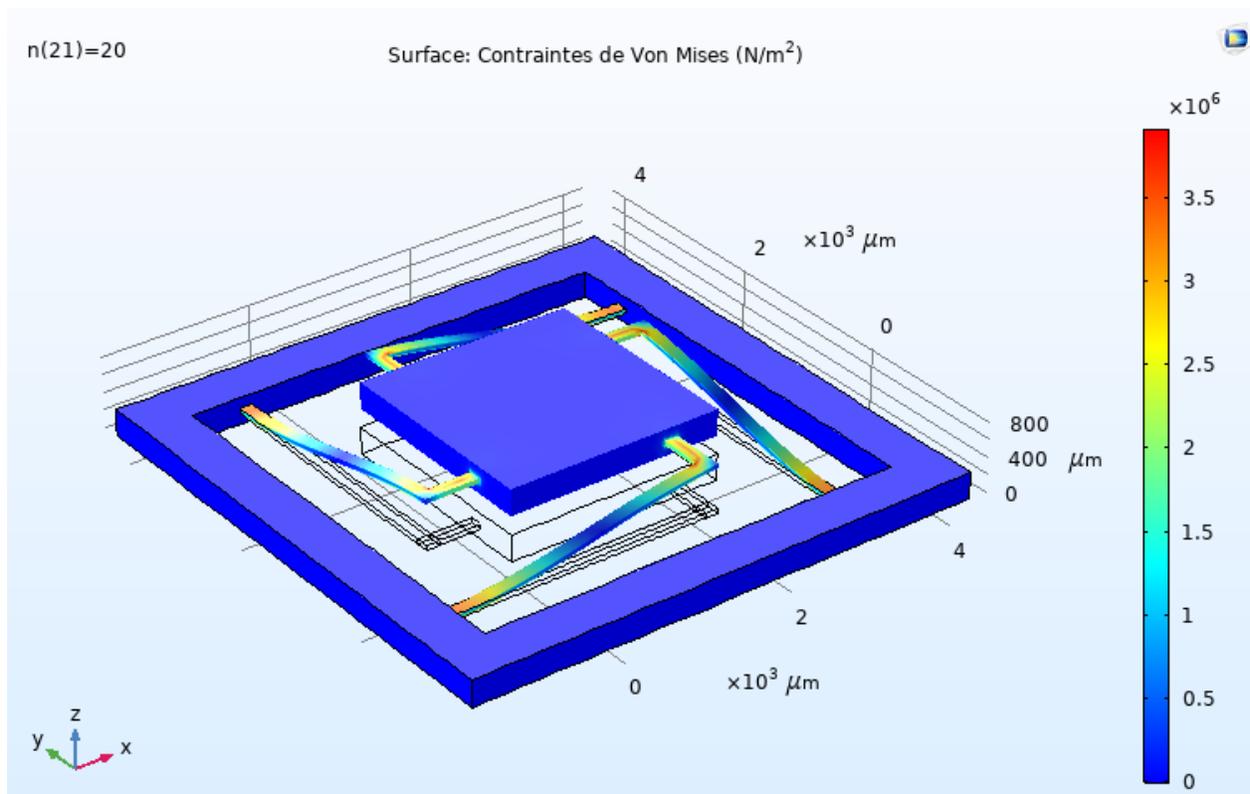


Figure 3.9 : Déplacement de l'accéléromètre en bloc avec une force dans le sens de l'axe z

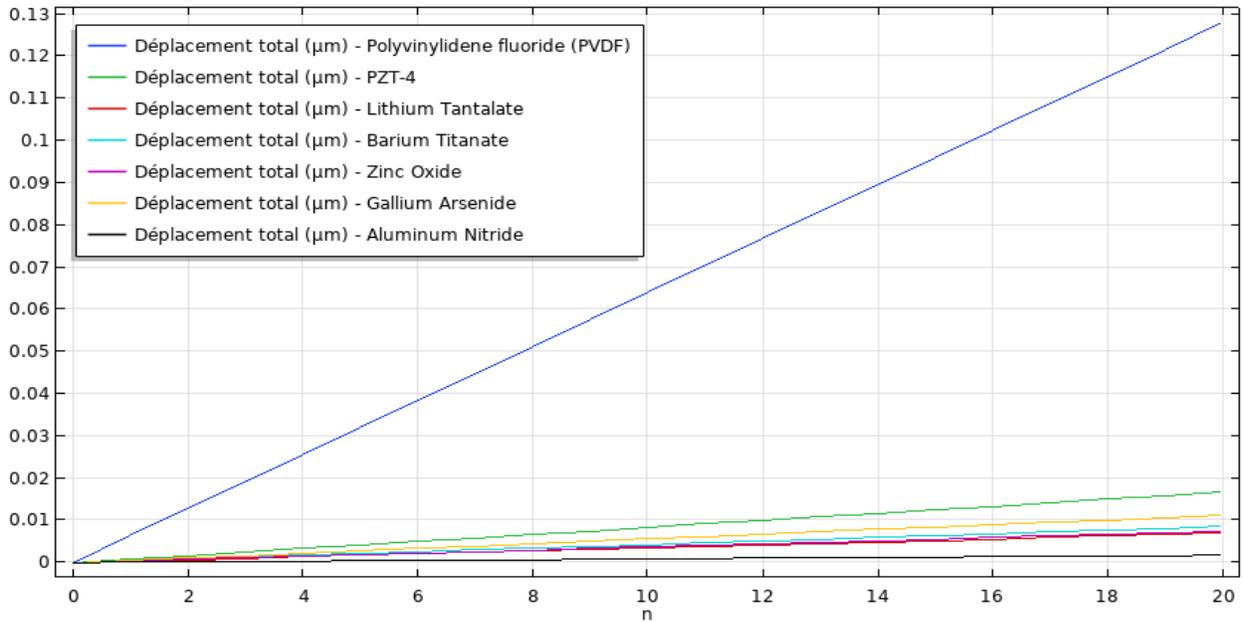


Figure 3.10 : Variations du déplacement en μm , en fonction de l'accélération, pour l'accéléromètre en poutre

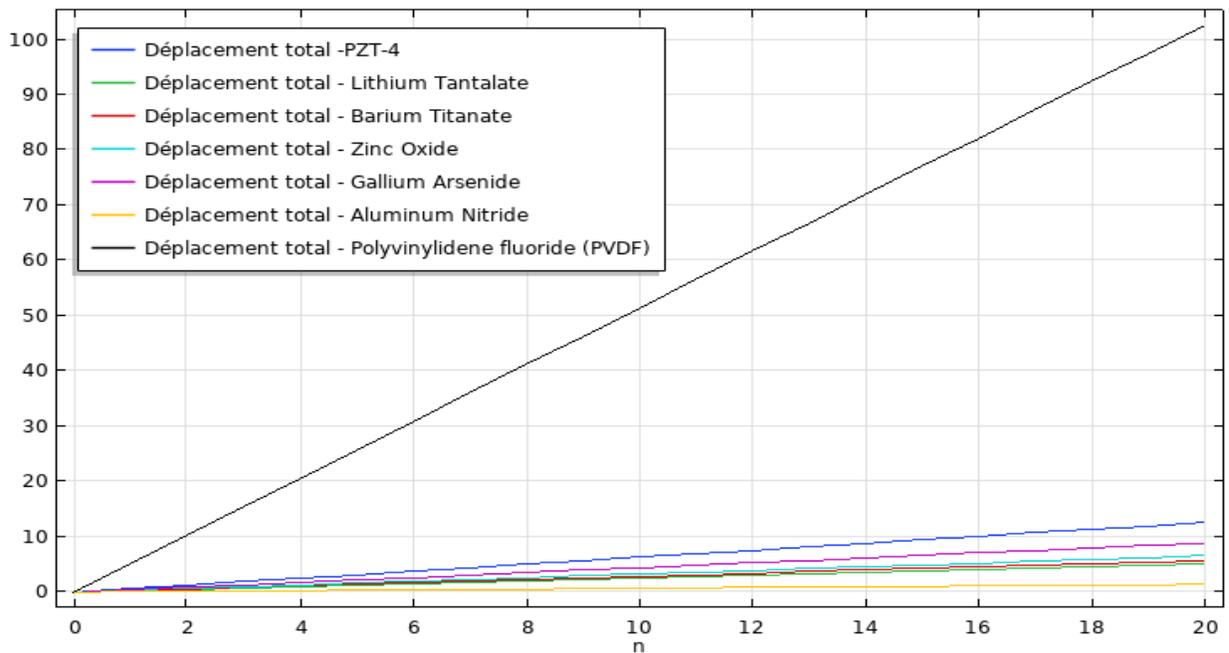


Figure 3.11 : Variations du déplacement en μm , en fonction de l'accélération, pour l'accéléromètre en bloc

Les résultats laissent apparaître nettement que dans le cas de l'accéléromètre en bloc le déplacement est nettement plus important que celui de l'accéléromètre en poutre. Ceci s'explique en premier lieu par le fait que la masse du bloc est bien plus petite que celle de la poutre et en second lieu que le bloc possède un type de suspension moins rigide que celui de la poutre. Ce type d'étude, déplacement de la masse sismique, est en général fait dans le cadre de l'utilisation d'un système de mesure électrique basé sur la notion de variation de la capacité d'un condensateur pour établir un signal électrique image du déplacement et par conséquent déduire la mesure de l'accélération à laquelle est soumis l'accéléromètre. En effet connaissant le déplacement maximum, par simulation, on peut donc établir un bloc fixé à une distance "légèrement" supérieure à ce déplacement. Sur ce bloc on fixe une électrode, dite électrode fixe, et forme le condensateur, l'électrode mobile étant fixée sur le bloc mobile subissant l'action de l'accélération. Une telle conception peut être illustrée comme suit (figure 3.12), en se basant sur l'accéléromètre en bloc (le bloc de fixation étant omis délibérément).

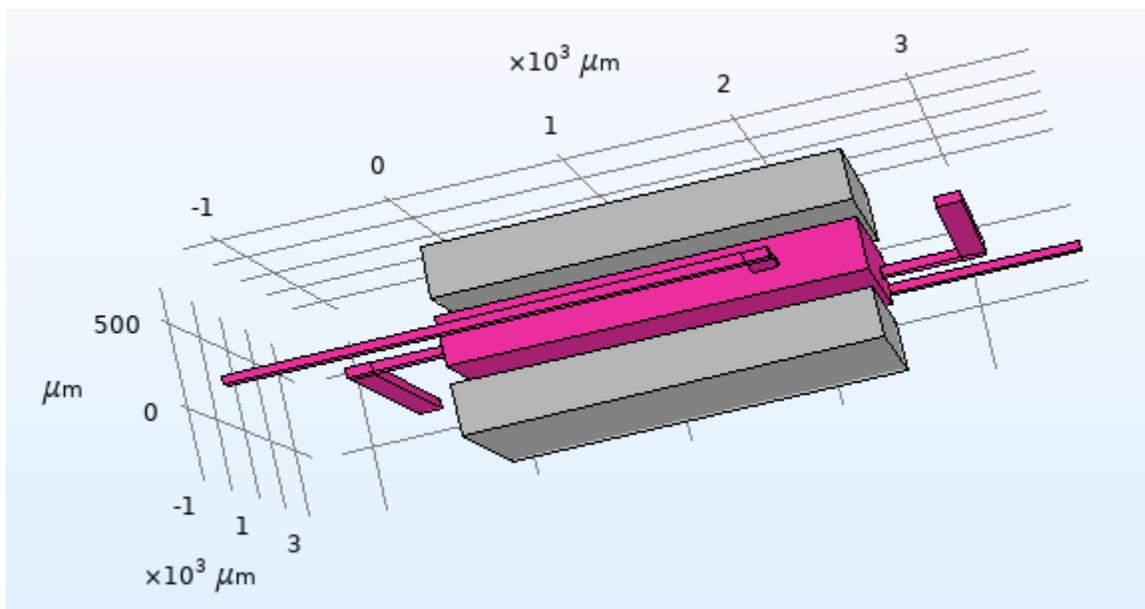


Figure 3.12 : Structure en bloc pour un système de mesure capacitif.

3.4 Simulation du potentiel électrique sur les faces en regard de la masse sismique en fonction de l'accélération appliquée, pour différents matériaux piézoélectriques.

3.4.1 Accélération appliquée dans le sens inverse de l'axe z.

Dans le cadre de ce travail, la technique de mesure du potentiel électrique sur les faces en regard de la masse sismique en fonction de l'accélération appliquée, pour différents matériaux piézoélectriques, est établie en utilisant la notion de sonde sur un point du domaine. La figure 3.13 illustre cette notion

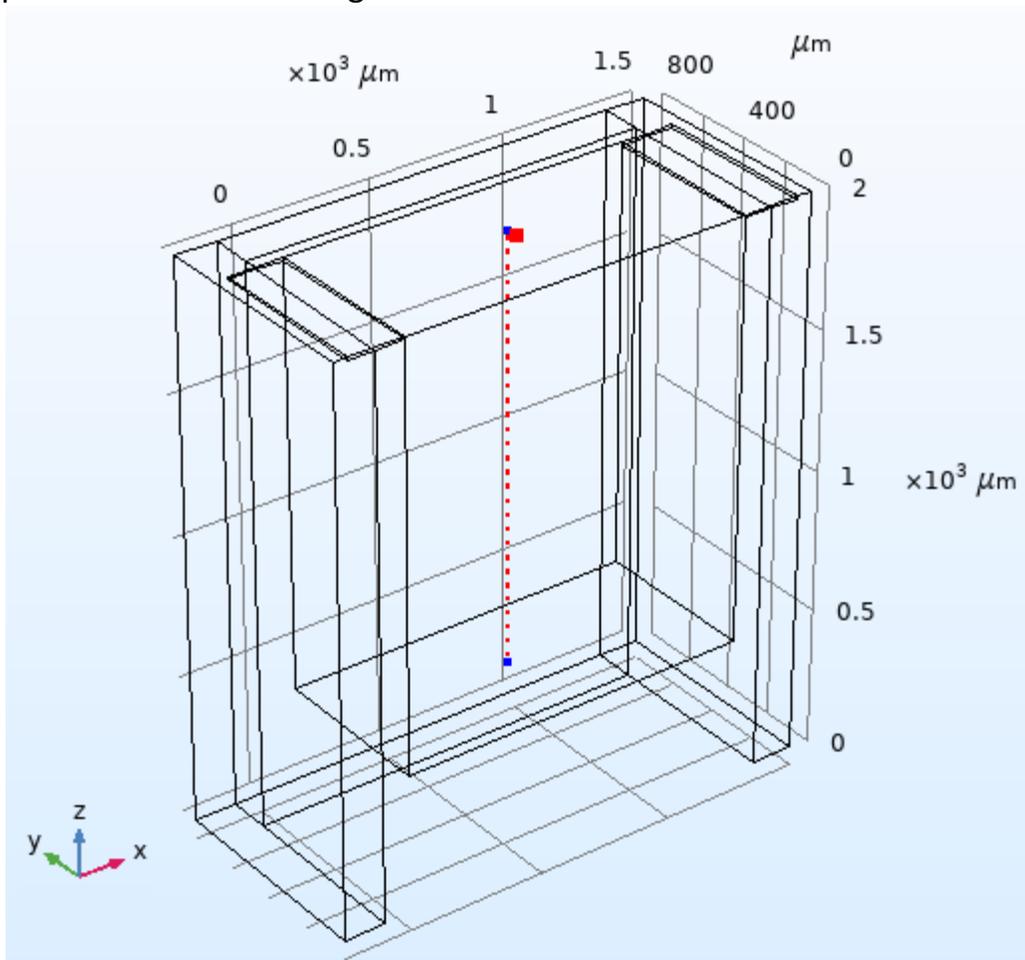


Figure 3.13 : Technique de la sonde sur un point du domaine pour la mesure d'un potentiel électrique sur les faces en regard de la masse sismique

La mesure du potentiel se fait entre la face supérieure et la face inférieure. La face supérieure représente le potentiel positif et la face inférieure représente le potentiel de masse (0 V).

Les mesures du potentiel, pour différents matériaux, dans le cadre de l'accéléromètre en poutre sont illustrées sur les figures 3.14, 3.15 t 3.16. Ces résultats correspondent, respectivement à une force inverse selon l'axe z.

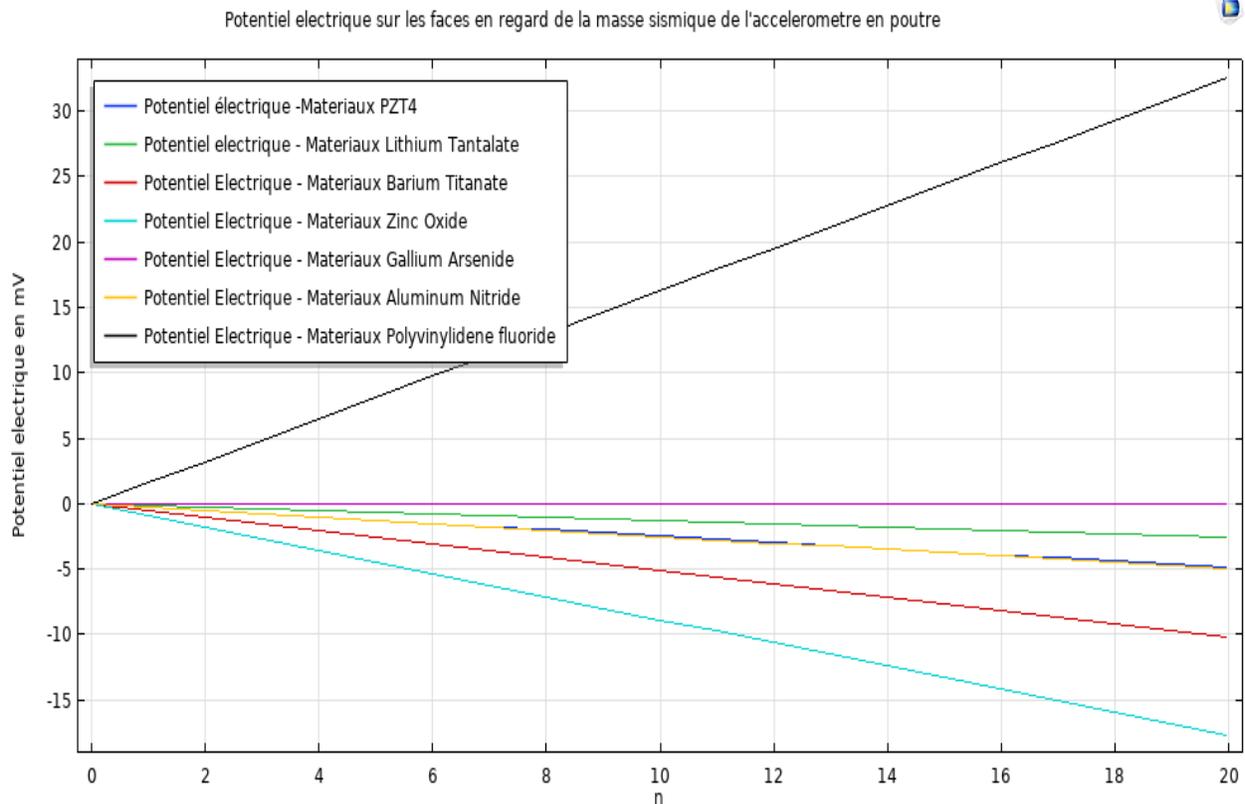


Figure 3.14 : Variation du potentiel électrique, pour différents matériaux dans le cadre de l'accéléromètre en poutre, en fonction de l'accélération

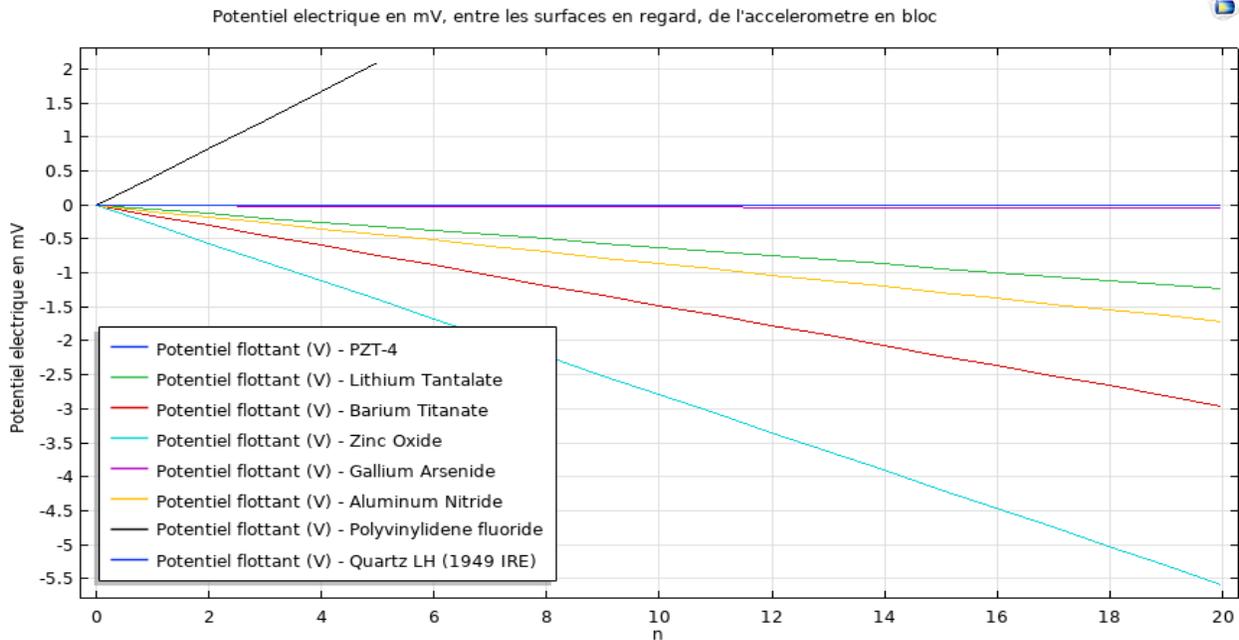


Figure 3.15 : Variation du potentiel électrique, pour différents matériaux dans le cadre de l'accéléromètre en bloc, en fonction de l'accélération

La figure 3.16 est utilisée pour une illustration correcte du potentiel généré par l'utilisation du matériau en PVDF, cas de l'accéléromètre en bloc.

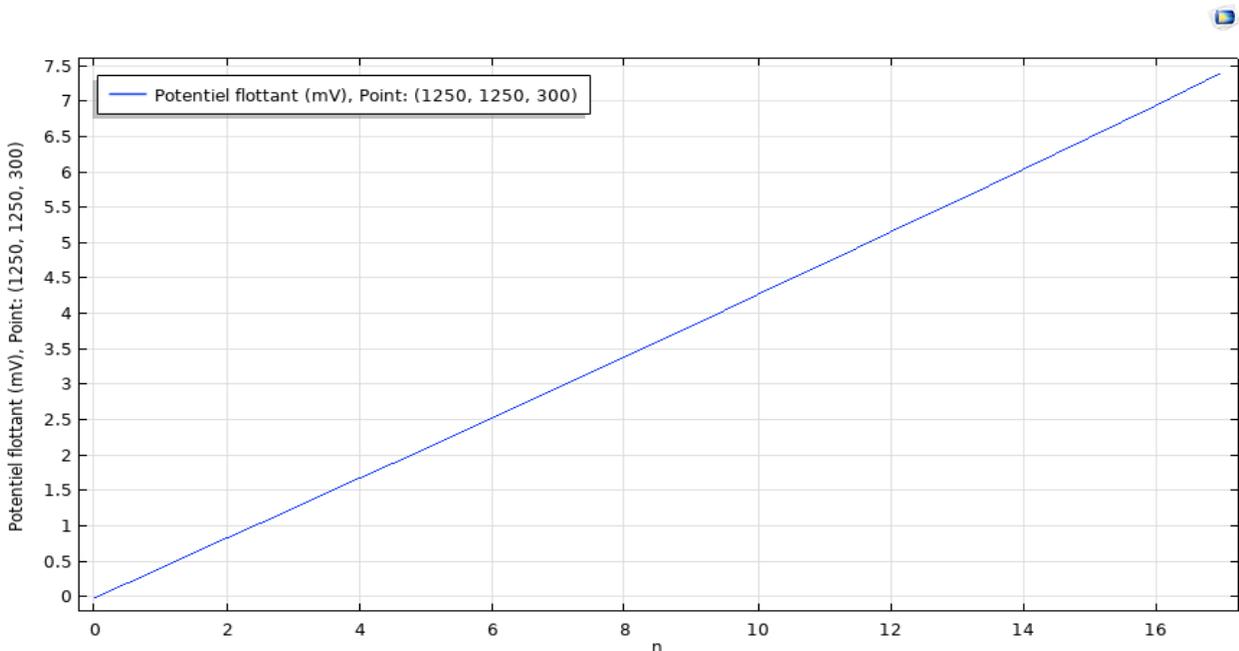


Figure 3.16 : Variation du potentiel électrique, pour le matériau PVDF, dans le cadre de l'accéléromètre en bloc, en fonction de l'accélération

3.4.2 Accélération appliquée dans le sens de l'axe z.

Le potentiel électrique dans le cas de l'accéléromètre en poutre est illustré en figure 3.17

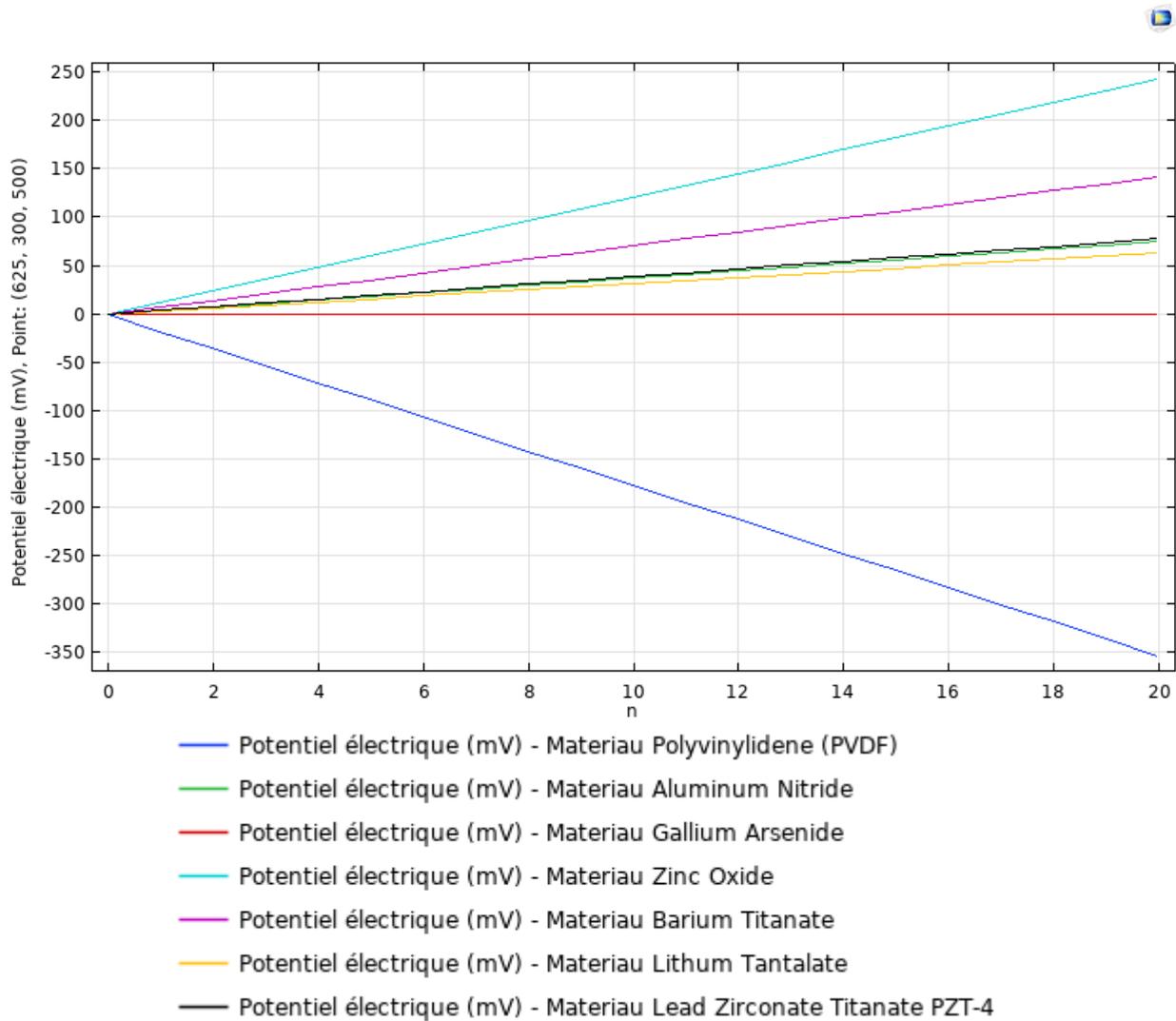


Figure 3.17 : Potentiel électrique, cas de l'accéléromètre en poutre

Celui de l'accéléromètre en bloc est illustré sur la figure 3.18 suivante :

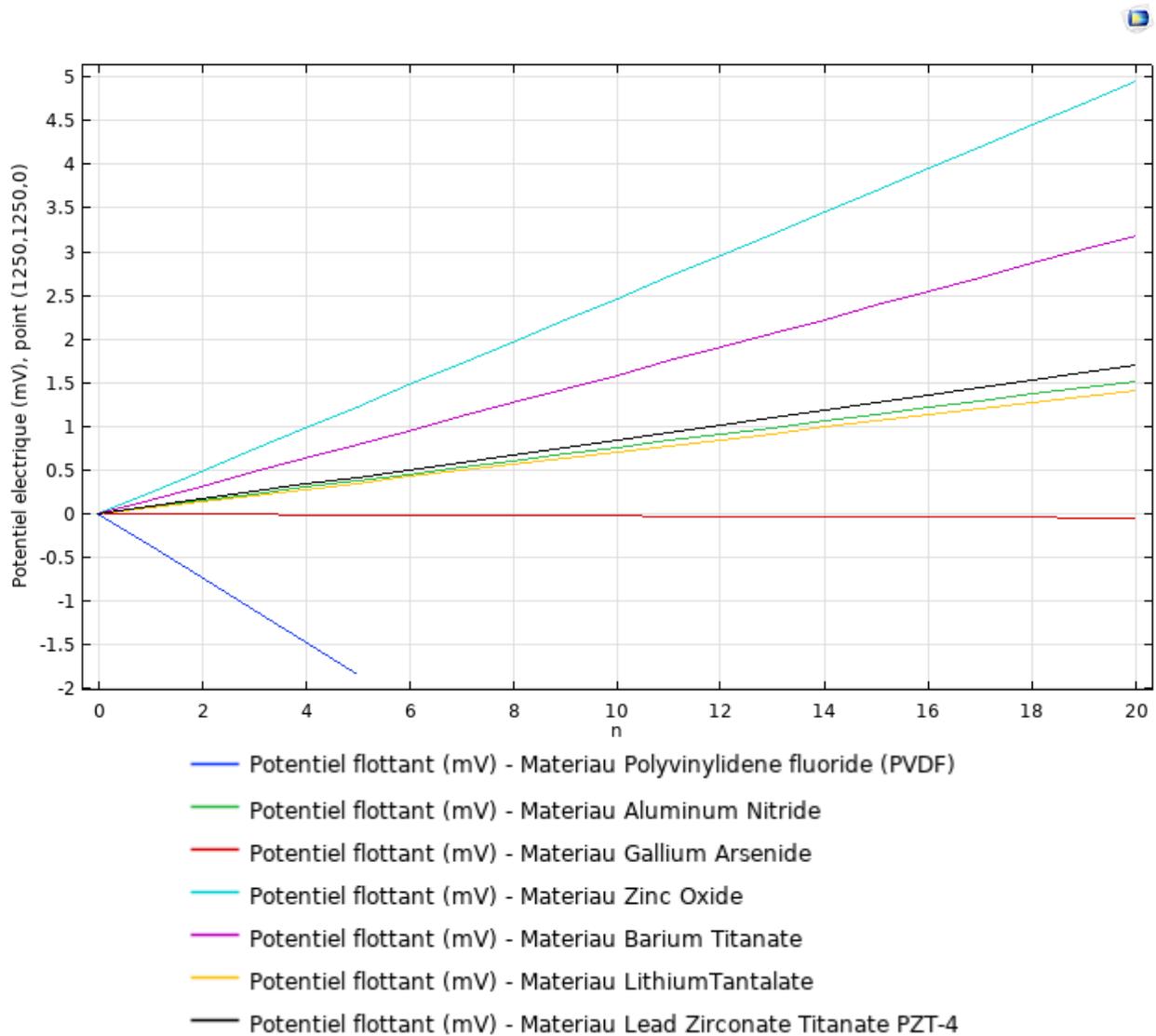


Figure 3.18 : Potentiel électrique, cas de l'accéléromètre en bloc

Une illustration spécifique au matériau polyvinylidene fluoride (PVDF) permet de visualiser plus clairement les variations du potentiel électrique lorsque la masse sismique de l'accéléromètre, en bloc, est conçue avec ce matériau, est présentée en figure 3.19

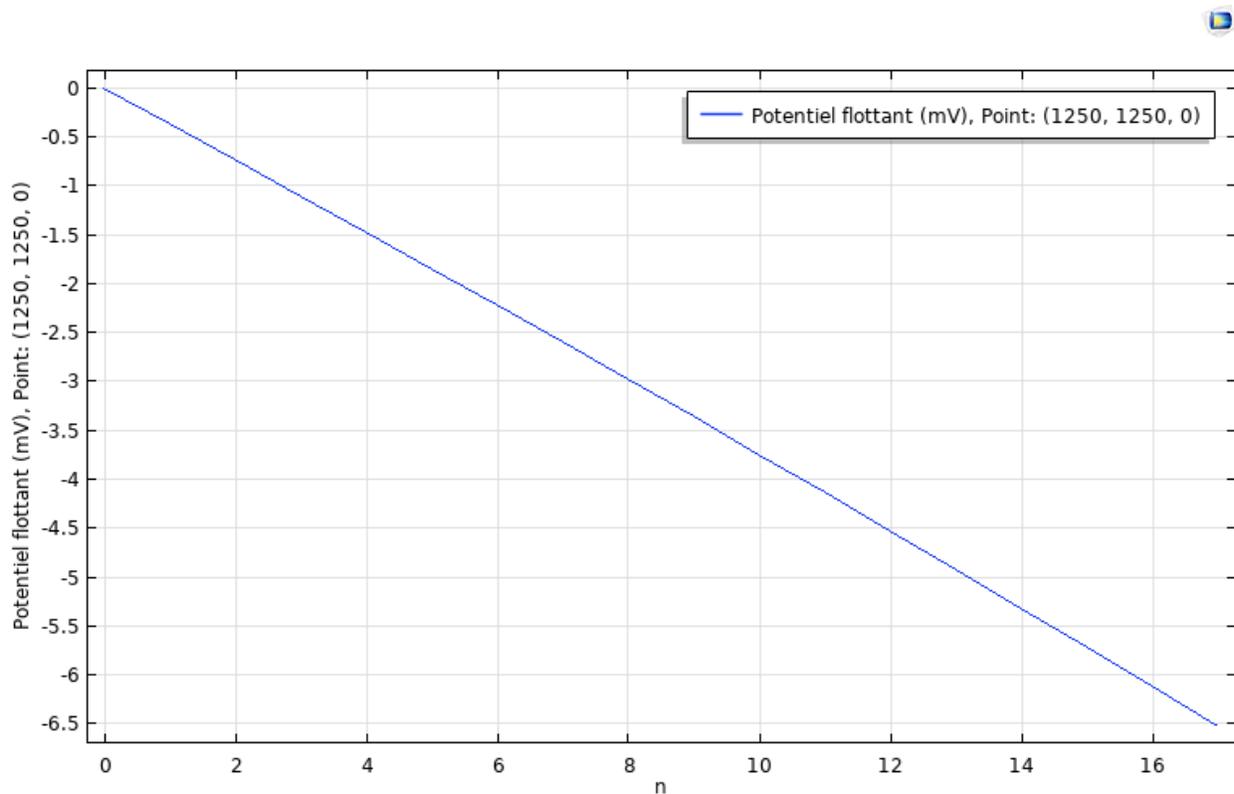


Figure 3.19 : Potentiel électrique, de l'accéléromètre en bloc, lorsque la masse sismique est conçue en polyvinylidene fluoride (PVDF)

Une comparaison des résultats au niveau du potentiel électrique montre clairement que les variations de cet état électrique sont inversées (en signe) selon le sens de l'application de la force. Cette grandeur électrique peut donc nous renseigner sur le sens de l'accélération, en considérant un matériau spécifique et pas nécessairement tous les matériaux. En considérant le matériau polyvinylidene fluoride (PVDF) on remarque bien que lorsque la force est en inverse à l'axe z, ce potentiel est positif (figure 3.16). Par contre il est négatif (figure 3.19) lorsque la force est dans le sens de l'axe z. De plus ce matériau a un comportement inverse par rapport aux matériaux utilisés car il possède un facteur $eS33$ négatif (-0.027 C/m^2), dans la direction de l'axe z, exprimée par la matrice de couplage suivante (Tablau3-4) :

Chapitre III Simulation des modèles, résultats et analyses

Matrice de couplage des différents matériaux utilisés en simulation

{eES11, eES21, eES31, eES12, eES22, eES32, eES13, eES23, eES33, eES14, eES24, eES34, eES15, eES25, eES35, eES16, eES26, eES36} (eES numéro de ligne – numéro de colonne)

PZT-4

0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	12.7179[C/m ²]	0[C/m ²]
0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	12.7179[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]
-5.20279[C/m ²]	-5.20279[C/m ²]	15.0804[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]

LiTantalate

0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	2.59576[C/m ²]	-1.58923[C/m ²]
-1.58923[C/m ²]	1.58923[C/m ²]	0[C/m ²]	2.59576[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]
0.0821598[C/m ²]	0.0821598[C/m ²]	1.88197[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]

BaTitanate

0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	21.3043[C/m ²]	0[C/m ²]
0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	21.3043[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]
-2.69289[C/m ²]	-2.69289[C/m ²]	3.65468[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]

Zinc Oxide

0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	-0.480508[C/m ²]	0[C/m ²]
0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	-0.480508[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]
-0.567005[C/m ²]	-0.567005[C/m ²]	1.32044[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]

GaArsenide

0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	0.139785[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]
0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	0.139785[C/m ²]	0[C/m ²]
0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	0.139785[C/m ²]

AlNitride

0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	-0.48[C/m ²]	0[C/m ²]
0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	-0.48[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]
-0.58[C/m ²]	-0.58[C/m ²]	1.55[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]

PVDF

0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]
0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]
0.024[C/m ²]	0.001[C/m ²]	-0.027[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]	0[C/m ²]

Tableau3-4 : Matrice de couplage des différents matériaux utilisés en simulation

Conclusion

Les résultats obtenus en simulation, variations linéaires du déplacement de l'accéléromètre sous l'action de l'accélération, concordent avec la formulation théorique de la mécanique des solides. Le potentiel électrique généré entre les faces de la masse sismique utilisée pour la conception de l'accéléromètre est lui aussi linéaire en fonction de la force (accélération). Le coefficient de la matrice de couplage e_{ES33} , dans la direction de l'axe z , direction d'application de l'accélération est un coefficient important ayant une influence directe sur le signe du potentiel électrique en fonction du sens de la force.

CONCLUSION GENERALE

Le travail entamé dans ce mémoire a été réalisé et les objectifs atteints. L'étude et la simulation sous logiciel comsol et matlab, pour éventuellement une conception, de deux modèles d'accéléromètres utilisant des matériaux piézoélectriques différents a abouti à des résultats dans le domaine du déplacement de la masse sismique permettant l'analyse de la résistance à la traction et par conséquent déduire si les modèles sont résistants ou non à la contrainte qui leur est imposée par l'accélération qu'ils subissent. La technique de la sonde sur un point du domaine pour la mesure d'un potentiel électrique sur les faces en regard de la masse sismique a été utilisée sous logiciel comsol, elle permet d'avoir le signal électrique image de l'accélération. Les valeurs du potentiel obtenues sont dans le domaine du millivolt, unité acceptable dans ce domaine de mesures.

Bibliographie

- [1] : B.R.Kruses
Dielectric sensing of silicon accelerometers
Master of electrical and engineering in electrical engineering and computer Science
Department of Electrical Engineering and computer science
August 23, 2013, Massachusetts Institute of Technology
- [2] : A.BOUNEMRI
Matériaux Intelligents, Cours Master 2, Faculté de Technologie, Département
d'électronique, Université Blida 1, 2019-2020
- [3] : MINHANG BAO
Analysis and Design Principles of MEMS Devices – Chapter 2
2005 Elsevier B.V.
- [4] : COMSOL MULTIPHYSICS
Model Library Version 5.4
- [5] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Methode_des_éléments_finis_-2023
- [6] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Maillage_-2023