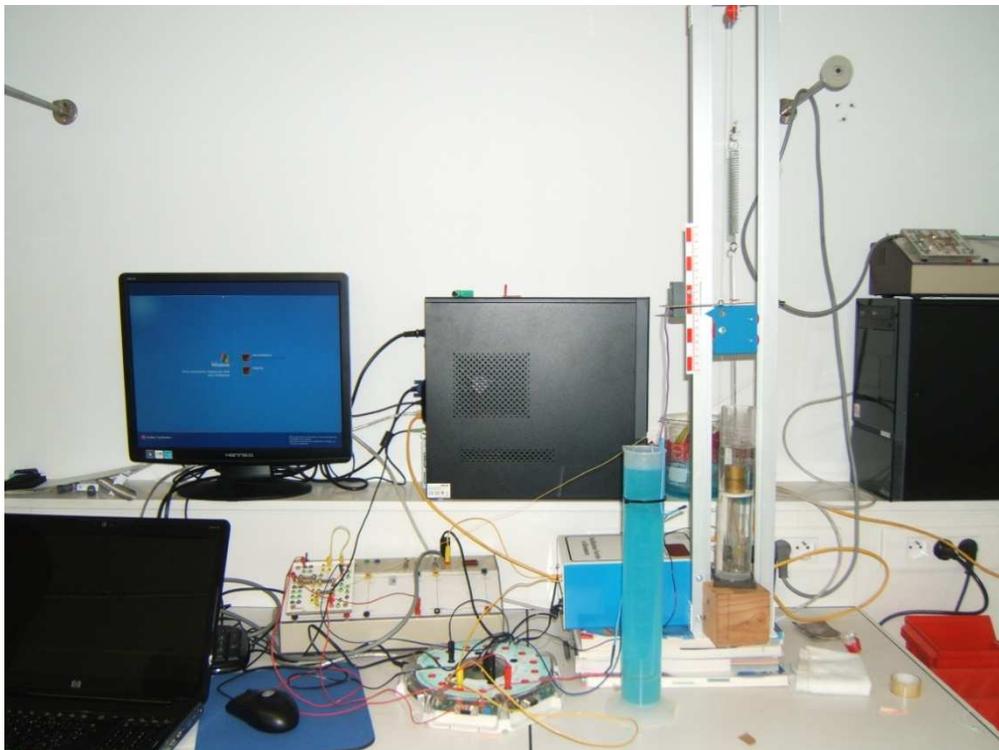


*Projet de Physique P6-3*  
*STPI/P6-3/2011*

**Equiper le TP oscillateur harmonique d'une  
mesure optique du déphasage. Mesure et  
comparaison avec la théorie.**



**Etudiants :**

**Agathe BRANCHU**

**Meriem BERRADA**

**Jeremy COCHAIN**

**Elise NAVARRE**

**Yuting SONG**

**Haotin LI**

**Enseignant-responsable du projet :**

**Jérôme Yon**



Date de remise du rapport : **18/06/2001**

Référence du projet : **STPI/P6-3/2011 N39.**

Intitulé du projet : ***Equiper le TP oscillateur harmonique d'une mesure optique du déphasage. Mesure et comparaison avec la théorie.***

Type de projet : ***expérimental/modélisation***

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

***Ce projet a pour objectif d'équiper d'une mesure optique du déphasage l'oscillateur harmonique. En outre, il est demandé d'améliorer l'actuel dispositif de mesure.***

***Il convient aussi de réaliser une étude théorique du déphasage ainsi qu'un document synthétique à ce sujet.***

Mots-clefs du projet (4 maxi) : ***Oscillateur harmonique - fourche optique - accéléromètre***

## TABLE DES MATIERES

1. Introduction .....	8
2. Méthodologie / Organisation du travail.....	9
3. Travail réalisé et résultats .....	11
3.1. Présentation du projet et étude théorique.....	11
3.1.1. Présentation.....	11
3.1.2. Mise en équation.....	12
3.1.3. Etude théorique.....	13
3.2. Recensement des méthodes de mesure et améliorations techniques. ....	14
3.2.1. Moyens existants pour la mesure du déphasage.....	14
3.2.2. Mesure de position : accéléromètre.....	15
3.2.3. Dispositifs de mesure optique choisis.....	16
3.3. Analyse des résultats liés au déphasage.....	17
3.3.1. Mode opératoire .....	17
3.3.2. Résultats.....	19
3.3.3. Discussions par rapport aux prédictions théorique.....	20
3.4. Analyse des résultats de l'accéléromètre .....	22
3.4.1. Généralités.....	22
3.4.2. Détermination des caractéristiques. ....	22
3.4.3. Mise en place du montage. ....	24
3.4.4. Mesures et exploitation .....	24
3.4.5. Conclusion sur le capteur.....	26
4. Document Synthétique. Que faire de plus avec l'oscillateur harmonique : le déphasage.....	27
5. Conclusions et perspectives .....	29
6. Bibliographie .....	31
7. Annexes.....	32
7.1. Détails des calculs pour l'obtention du déphasage.....	32
7.2. Code Silab .....	34
7.3. Documentation technique de l'accéléromètre. ....	35
7.4. Propositions de sujets de projets (en lien ou pas avec le projet réalisé).....	47



## NOTATIONS, ACRONYMES

MEMS: micro-electro-mechanical-system

$\Phi$ : déphasage total

$\varphi$  (vide): déphasage à vide

$\varphi$  (ressort) : déphasage du ressort

$A_x(f)$  amplitude des oscillations de la partie inférieure du ressort.



## Remerciement

Nous tenons à remercier particulièrement M.Yon aussi bien pour ses explications vivantes et claires que pour ses conseils précieux tout au long du projet.  
Nous souhaitons aussi remercier M.Clevers pour ses apports expérimentaux.  
Et pour finir nous remercions M. Corentin du CORIA pour son aide ponctuel mais essentiel.



## 1. INTRODUCTION

Savez-vous ce qui permet aux avions furtifs américains d'être indétectables? Les antennes en phase dont ils sont recouverts, qui déphasent à  $180^\circ$  les signaux des radars. Ce système est aussi utilisé par les casques anti-bruits, le signal sonore extérieur est annulé par superposition du même signal en inversion de phase. Les exemples de l'utilisation du déphasage dans la technologie moderne sont variés, on pourrait citer la musique de phase (déphasage acoustique) expérimentée par Terry Riley et Steeve Reich, la technique de l'IRM (déphasage magnétique) ou encore le déphasage photonique qui permet à la lumière du laser de lire les Cds.

Le but de ce projet est de déterminer une manière simple et visuelle d'isoler et d'étudier le déphasage. En utilisant le montage du TP sur les oscillations mécaniques de STPI1 qui a pour but d'étudier le phénomène de résonance, nous mettons en évidence à l'aide de deux méthodes, le déphasage engendré par un ressort. Cette étude étant complémentaire de celle faite par les STPI1 sur le gain, il est proposé un document synthétique détaillant nos études de déphasage afin de montrer le potentiel expérimental d'un oscillateur harmonique.

En outre, nous présentons aussi des propositions d'améliorations du TP préexistant.



## 2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Les premières étapes à réaliser au commencement d'un projet sont les suivantes :

- Analyse des objectifs
- Prise en compte du temps disponible
- Prise en compte des ressources affectables.

Les objectifs du projet nous ont été présentés par M.Yon et sont les suivants :

- Reprendre le TP et y ajouter l'étude théorique du déphasage.
- Etudier les différentes approches expérimentales possibles autorisant la mesure du déphasage.
- En retenant la méthode la plus adaptée, s'équiper du dispositif nécessaire.
- Prévoir la méthode de détermination du déphasage sur Synchronie.
- Refaire le TP en ajoutant cette mesure de déphasage.
- Adapter le dispositif utilisé pour améliorer au maximum la qualité des mesures.
- Réaliser un document synthétique traitant de la mesure du déphasage qui pourra être distribué en complément du TP aux STPI1.

Concernant le temps disponible, la date de fin du projet était fixée à fin Juin. Nous avons sur la période Février-Juin une séance en salle par semaine. Nous avons ajouté à cette dernière plusieurs créneaux de recherche à domicile ainsi que des réunions collectives.

Enfin concernant les ressources disponibles, l'équipe projet est constituée de 6 membres. Nous avons choisi de nous répartir en plusieurs groupes de travail chacun orienté vers un ensemble d'objectifs voisins.

D'un côté le groupe d'Agathe, d'Elise et de Yuting s'est plus concentré sur les aspects expérimentaux et liés au déphasage. D'autre part, Jérémy, Meriem et Haotin se sont penchés sur la partie théorique puis sur l'amélioration du dispositif de mesure.



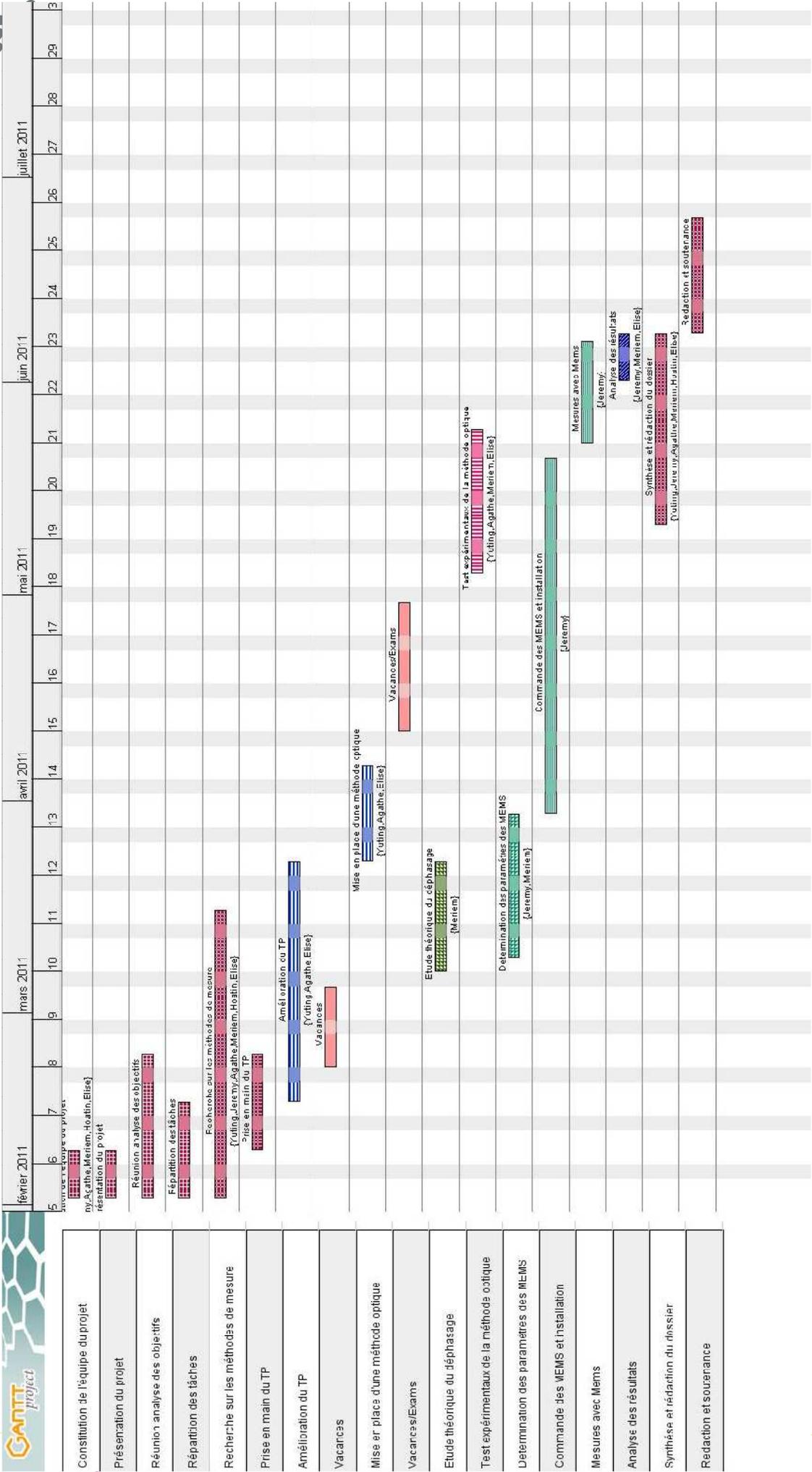
Ces groupes étaient, bien entendu, non étanches et ils ont évolué au cours du projet.

L'organisation des tâches est décrite dans l'emploi du temps projet. Ci-après est présenté l'emploi du temps de type GANTT.

(de gauche à droite : Meriem, Elise, Agathe, Yuting, Jeremy, Haotin)

Pour ce qui est de la méthodologie à proprement parler, nous avons adopté une démarche scientifique s'appuyant à la fois sur l'expérimentation et sur la théorie. D'une part, l'aspect expérimental a été très présent car l'objet de notre projet est un TP, donc une expérimentation. Et, d'autre part, l'aspect théorique a lui aussi été très présent pour anticiper les résultats de nos mesures mais aussi pour dimensionner les améliorations que nous avons apportées au montage.





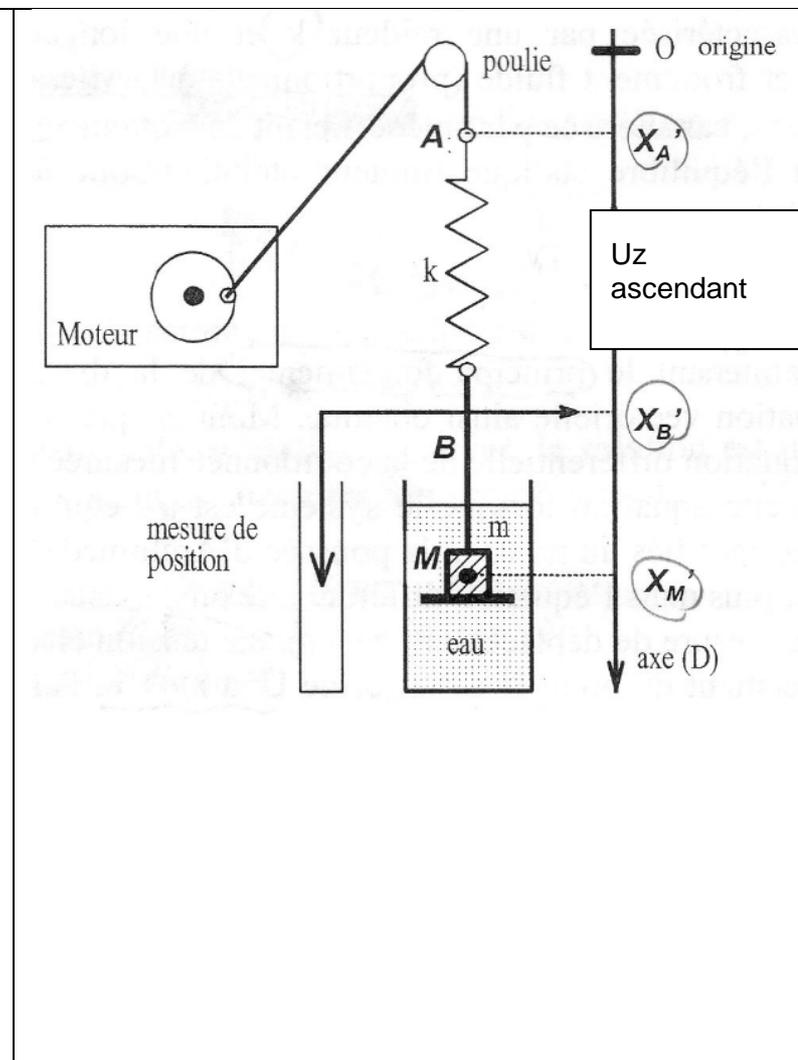
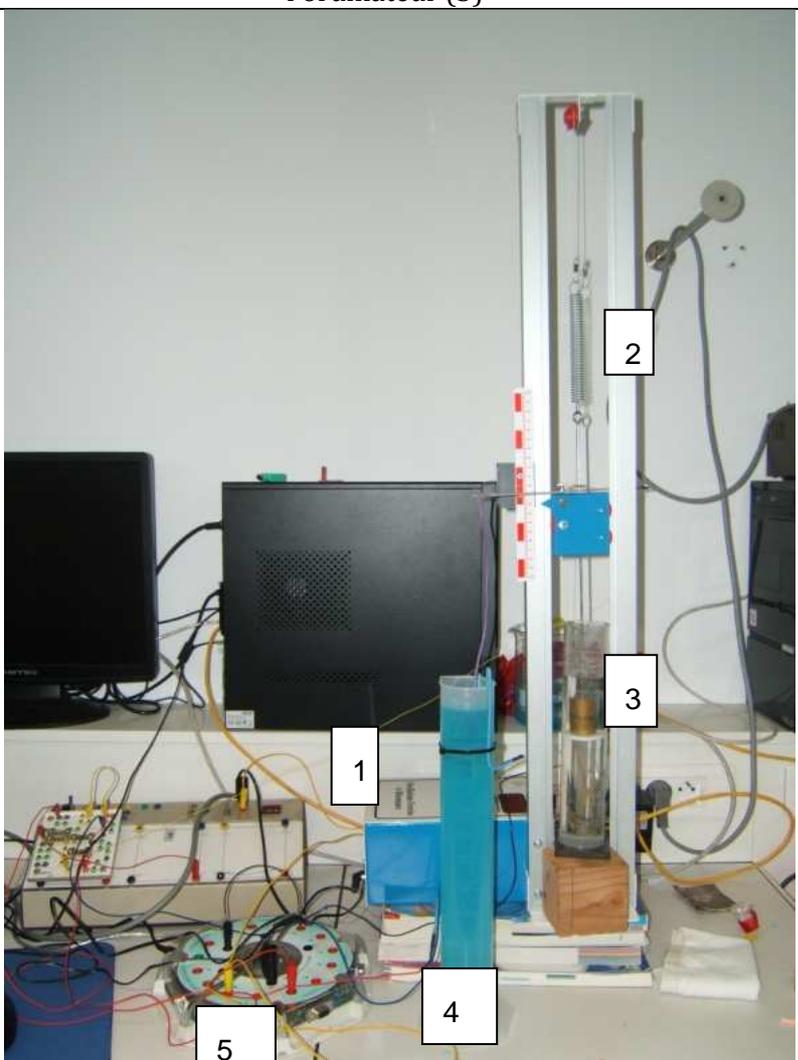
### 3. TRAVAIL REALISE ET RESULTATS

#### 3.1. Présentation du projet et étude théorique.

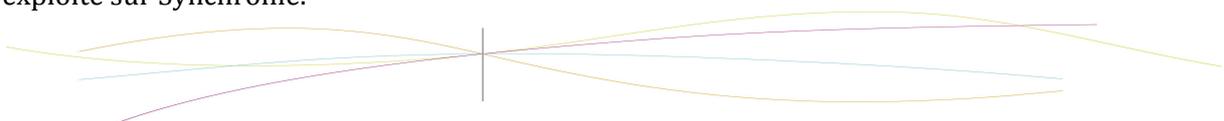
##### 3.1.1. Présentation

Le dispositif de mesure utilisé dans le projet est composé de cinq organes principaux :

- Un moteur de fréquence modulable allant de 0 à 3Hz. (1)
- Un ressort de constante  $k$  relié dans sa partie supérieure au moteur (2)
- Une masse  $m$  reliée à la partie inférieure du ressort(3)
- Une solution électrolytique au Sulfate de Cuivre où plongent des électrodes dont une est reliée rigidement à la masse. Cette solution rend possible la mesure de la position de la masse.(4)
- Une table d'acquisition reliée d'une part, à la solution électrolytique et d'autre part à l'ordinateur (5)



Le moteur de fréquence variable excite de manière sinusoïdale et périodique le ressort dans sa partie supérieure. Cette excitation entraîne une oscillation de la masse liée à la partie inférieure du ressort. Cette oscillation mécanique est transformée en tension électrique au niveau de la solution électrolytique. Ensuite, ce signal numérique traverse la table d'acquisition et est exploité sur Synchronie.



### 3.1.2. Mise en équation

Référenciel : terrestre supposé galiléen. Repère cartésien :  $(\vec{U}_x, \vec{U}_y, \vec{U}_z)$ .  
Forces :

1. Poids  $\vec{f}_g = mg\vec{U}_x$
2. Poussée d'Archimède :  $\vec{f}_a = -\rho Vg\vec{U}_x$
3. Force de frottements fluide :  $\vec{f} = -\mu\vec{v}$
4.  $\vec{T}_0$  la tension à l'équilibre et  $\vec{T}(t)$  la tension à un instant t quelconque.

On a en statique  $\vec{f}_g + \vec{f}_a + \vec{T}_0 = \vec{0}$  (1)

En dynamique  $\vec{f}_g + \vec{f}_a + \vec{T}(t) + \vec{f} = m\ddot{y}(t)\vec{U}_x$  (2)

Faisant (2)-(1) :

$$\vec{T}(t) - \vec{T}_0 + \vec{f} = m\ddot{y}(t)\vec{U}_x \quad (3)$$

On note  $l_0$  la longueur à l'équilibre et  $l_{vide}$  la longueur en l'absence de masse.

$$\begin{aligned} \vec{T}(t) &= -k(l(t) - l_{vide})\vec{U}_x \\ \vec{T}_0 &= -k(l_0 - l_{vide})\vec{U}_x \end{aligned}$$

D'où

$$\vec{T}(t) - \vec{T}_0 = -k(l(t) - l_0)\vec{U}_x$$

On obtient alors en projetant sur l'axe :

$$-k(l(t) - l_0) - \mu\dot{y}(t) = m\ddot{y}(t) \quad (4)$$

Comme

$$l(t) = [y(t) - x(t)] + l_0$$

L'équation(4) devient

$$-k[y(t) - x(t) + l_0 - l_0] - \mu\dot{y}(t) = m\ddot{y}(t)$$

D'où finalement :

$$m\ddot{y}(t) + \mu\dot{y}(t) + ky(t) = kx(t)$$

Qui est égale à :

$$y''(t) + \frac{\omega_0}{Q}y'(t) + \omega_0^2y(t) = \omega_0^2x(t) \quad (E).$$

k constante de raideur du ressort, m masse du solide,  $\nu$  coefficient de viscosité du fluide

$\omega_0$  la pulsation propre  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$

Q le facteur qualité  $Q = \frac{\sqrt{km}}{\nu}$

$x(t)$  la fonction d'entrée

$y(t)$  la fonction de sortie



### 3.1.3. Etude théorique

$$(E) \quad y''(t) + \frac{\omega_0}{Q} \cdot y'(t) + \omega_0^2 \cdot y(t) = \omega_0^2 \cdot x(t);$$

C'est une équation différentielle linéaire d'ordre 2 avec second membre, donc la solution générale sera de la forme :

$$y_g(t) = y_{ho}(t) + y_{part}(t)$$

La solution particulière:

$$y_{part} = \cos(\omega t + \varphi)$$

On passe à la forme complexe :

$$y_g(t) = Y e^{(j\omega t + \varphi)} \Rightarrow y_g(t) = Y e^{j \cdot \varphi} \cdot e^{j \cdot \omega t} \Rightarrow y_g(t) = y_c \cdot e^{j \cdot \omega t}$$

avec  $y_c$  l'amplitude de l'oscillation

$\varphi$  le déphasage

En annexe est présenté le détail du calcul réalisé en Maple pour l'obtention du déphasage. Ces étapes considérées nous obtenons :

$$\varphi = \begin{cases} -\arctan\left(\frac{\omega_0 \omega}{Q(\omega - \omega_0^2)}\right) & \omega < \omega_0 \\ \pi - \arctan\left(\frac{\omega_0 \omega}{Q(\omega - \omega_0^2)}\right) & \omega > \omega_0 \end{cases}$$



### 3.2. Recensement des méthodes de mesure et améliorations techniques.

#### 3.2.1. Moyens existants pour la mesure du déphasage

##### 1.1.1.1 Méthode de la Diode

Pour mesurer le déphasage induit par le ressort il nous fallait un dispositif capable de relever le signal donné par le moteur, nous avons utilisé le fait que l'excitation est donnée par un ergot fixé sur le disque à la sortie du moteur.

L'année précédente, nous avons utilisé des diodes montées sur des fourches pour un TP qui mesurait l'accélération d'un curseur sur un banc à coussin d'air.

Nous avons donc adapté l'une de ces fourches à notre montage et placé un morceau de carton sur le périmètre du disque de manière à interrompre le signal de la diode relativement à la fréquence du moteur.

Cette méthode s'est révélée concluante et plutôt simple à mettre en place pour des TP futurs, car elle s'adapte facilement au montage existant et est peu coûteuse.

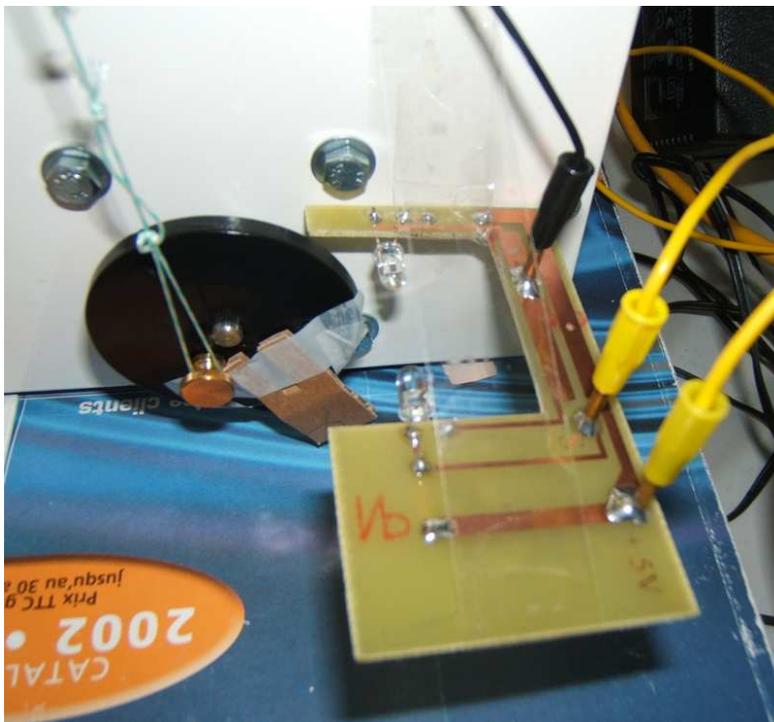


Figure 1 : fourche optique

Mesure du déphasage grâce à la vidéo numérique.

#### 1) Dispositif nécessaire :

- montage expérimental inchangé : moteur, support, poulie, ressort, masses, éprouvette
- webcam ou caméscope numérique
- logiciel qui permet d'extraire des informations à partir d'une vidéo, c'est-à-dire un logiciel de traitement vidéo à des fins scientifique : REGAVI
- logiciel de traitement de résultats expérimentaux : REGRESSI
- règle de 30 cm
- ruban adhésif d'une couleur vive



2) Mode d'emploi :

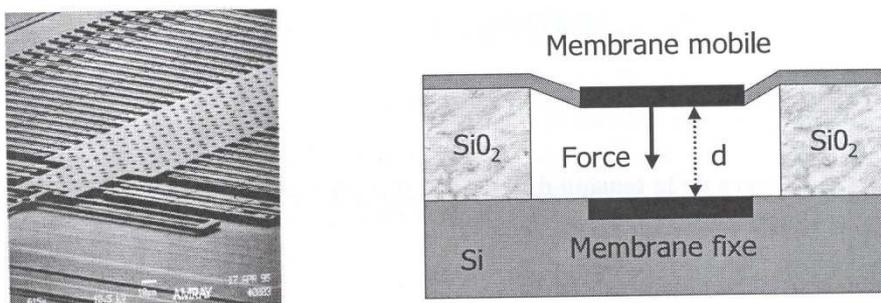
- Placer un morceau de ruban adhésif à l'extrémité du ressort et un autre sur la rondelle rotative du moteur. Ces deux morceaux constituent nos points mobiles, nous allons chercher à enregistrer leurs positions successives.
- Installer une caméra reliée à un ordinateur face au dispositif expérimental. Les deux points mobiles doivent être dans le champ de la caméra.
- Placer la règle sur un mur derrière le dispositif expérimental. Elle doit être dans le champ de la caméra car elle constitue un repère d'échelle.
- Mettre le dispositif en marche et enregistrer une vidéo.
- Réaliser le traitement de cette vidéo à l'aide du logiciel REGAVI : décomposer la vidéo image par image. Sur chaque image, repérer les positions des deux points. Nous obtenons alors les différentes positions des points en fonction du temps.
- Transférer les données issues de la vidéo vers le logiciel REGRESSI : tracer les courbes représentant les positions respectives des points en fonction du temps. Nous obtenons donc des courbes représentant le mouvement des points. Nous pouvons donc les utiliser pour obtenir le déphasage qui existe entre ces deux systèmes mécaniques.

**3.2.2. Mesure de position : accéléromètre**

Une autre voie de mesure de la position qui pourrait se substituer à l'utilisation de la solution électrolytique est l'utilisation d'accéléromètre.

Un capteur accélérométrique envisageable est du type MEMS (Micro-Electro-Mechanical-System), il s'agit d'un capteur électromécanique réalisé à l'aide des technologies de l'électronique intégré sur Silicium.

Le principe de la mesure d'accélération repose sur le déplacement d'une membrane mobile de masse très faible et de la détection de celui-ci par effet capacitif. La valeur de la capacité du condensateur, constitué d'une plaque fixe et de la membrane mobile, est directement reliée à la distance les séparant.



*Image par microscopie électronique à balayage d'un accéléromètre à MEMS et coupe schématique.*

Ce capteur fixé à notre masse nous permettrait de mesurer l'accélération de la partie inférieure du guide –et par extension sa position. De ce fait, il pourrait remplacer la solution électrolytique qui induit actuellement de nombreux frottements.



### 3.2.3. Dispositifs de mesure optique choisis

#### 1.1.1.3 Abandon du domaine CCD

Notre projet de physique a pour but de mesurer le déphasage observé au cours du TP « oscillateur harmonique ». Nous devons donc toujours garder à l'esprit que la méthode mise en place pourrait être reprise par les élèves de STPI. Or, même si nous sommes capables, au cours de ce projet, de réaliser la mesure du déphasage grâce à la vidéo numérique, il serait plus difficile de l'envisager à l'échelle de la promotion des STPI 1. En effet, le dispositif est cher : le budget pour équiper chaque poste d'une caméra numérique est conséquent. De plus, l'étape d'enregistrement et de traitement de la vidéo est longue et prendrait beaucoup de temps aux élèves pendant un TP.

#### 1.1.1.4 Choix de la fourche optique

##### 1. Principe:

Nous souhaitons obtenir un signal relatif à la fréquence du moteur, pour ce faire, nous avons installé une pièce de carton sur le périmètre du disque à la sortie du moteur (qui transmet l'excitation au ressort), ainsi qu'une diode montée sur une fourche, stable par rapport au sol, et reliée elle aussi à l'ordinateur. À chaque fois que l'ergot de carton passe dans la fourche, le signal est nul et on obtient ainsi une série de pics périodiques sur la courbe relevée sous synchronie.

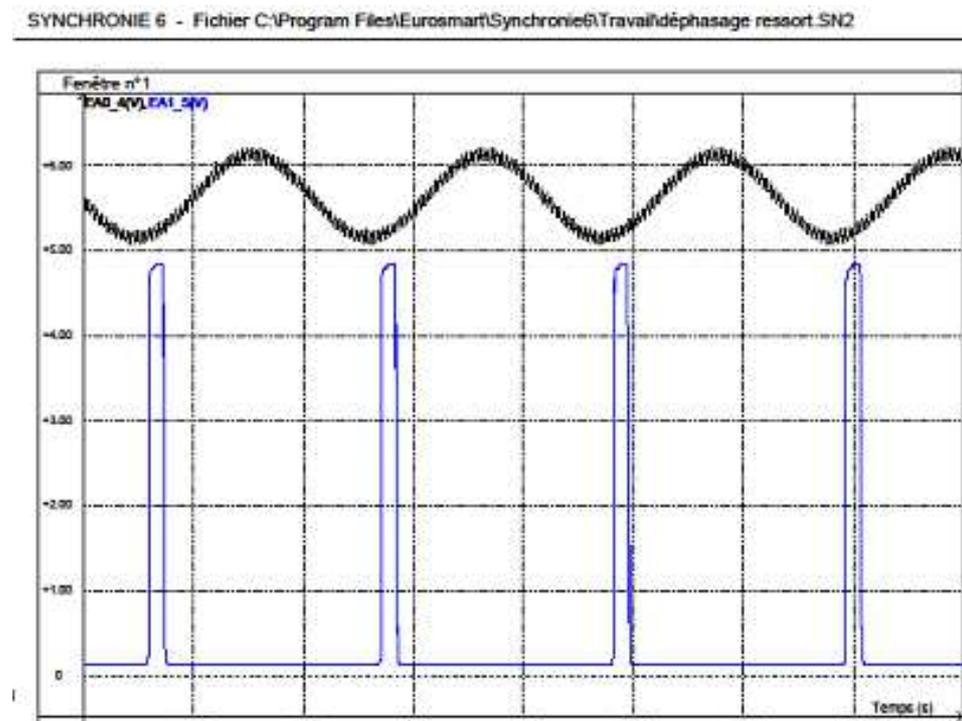
Ce signal s'affiche en parallèle de celui existant, sinusoïdal et relatif au mouvement de la tige dans la solution ionique.

On peut ainsi mesurer le déphasage entre les deux signaux en fonction de la fréquence du moteur, en vérifiant préalablement que le maximum de la courbe sinusoïdale correspond à l'ordonnée minimale de la position du ressort.

##### 2. Montage:

La diode émettrice est reliée à une tension de 5V, la diode réceptrice au périphérique d'acquisition de l'ordinateur et le circuit à une masse.

Figure 2 : courbe supérieure : acquisition de la position ; courbe inférieure : réponse de la fourche optique



### 3.3. Analyse des résultats liés au déphasage

#### 3.3.1. Mode opératoire

Comment obtenir le déphasage à partir du montage ?

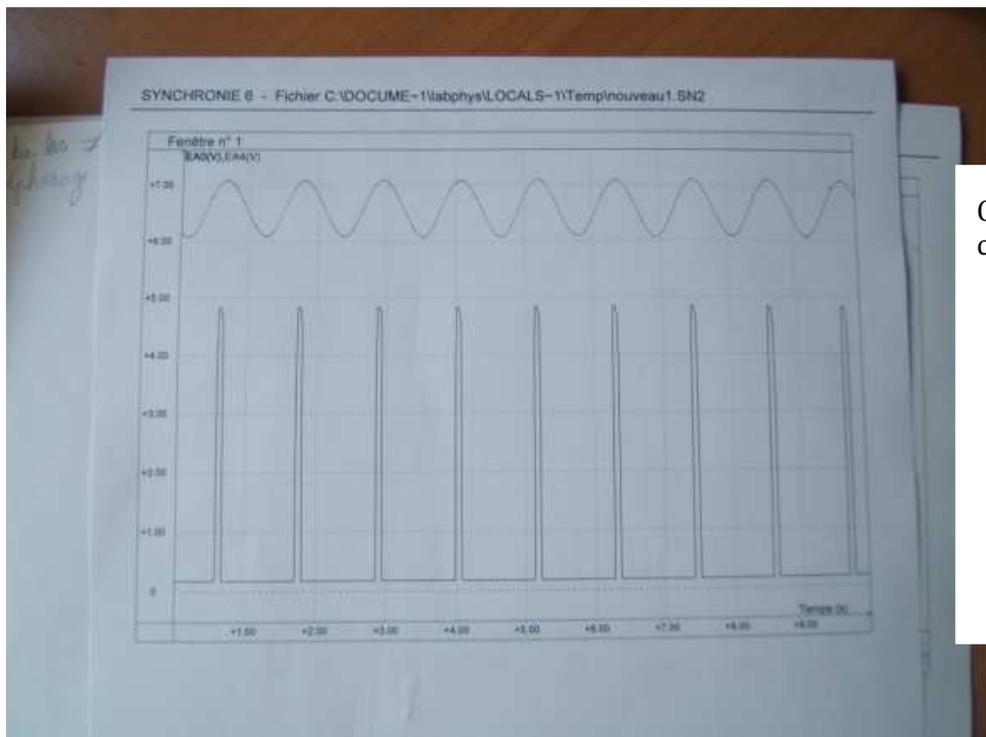
##### 1.1.1.5 La mesure du déphasage à vide

Avant toute acquisition, nous devons faire attention au déphasage qui existe à vide (c'est-à-dire sans ressort) entre le moteur et le système d'acquisition. En effet, à vide le moteur et la masse (sans ressort) sont en décalage : l'instant où le moteur passe devant la diode ne correspond pas à l'instant où la masse est à sa position maximale.

Nous devons donc mesurer ce déphasage à vide pour chaque fréquence. Nous allons appeler ce déphasage à vide  $\varphi(\text{vide})$ .

##### 1.1.1.6 La mesure du déphasage avec le ressort :

Nous plaçons un ressort et une masse sur le système et nous lançons l'acquisition sur Synchronie. Nous obtenons deux courbes comme le montre la photo :



Ces deux courbes correspondent :

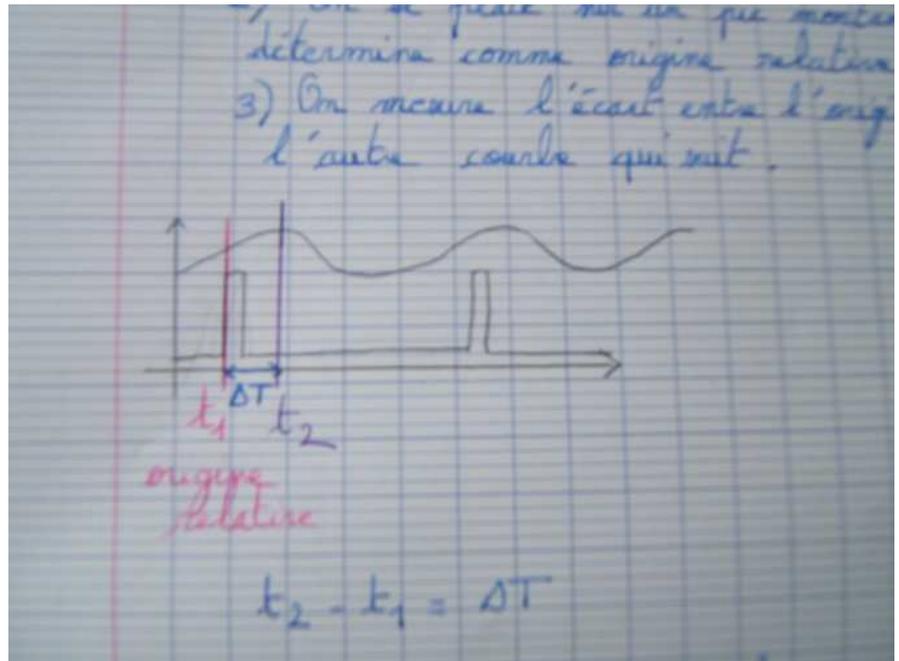
- au signal au niveau du ressort (courbe supérieure)
- au signal au niveau du moteur (courbe inférieure)

Figure 3: courbes des signaux obtenus en sortie du moteur et en pour la partie inférieure du ressort.



Exploitation des courbes.

- 1) On zoome
- 2) On se place sur un pic montant que l'on détermine comme notre origine relative de temps.
- 3) On mesure l'écart entre l'origine et le pic qui vient juste après de l'autre courbe :



On a donc  $t_2 - t_1 = dt$

Imaginons que la courbe se déplace d'une période : cela signifie que le déphasage est de  $2\pi$

$$\Phi(\text{ressort}) = 2\pi$$

On peut donc faire une règle de 3 :  $(\varphi(\text{ressort})/2\pi) = dt/T$

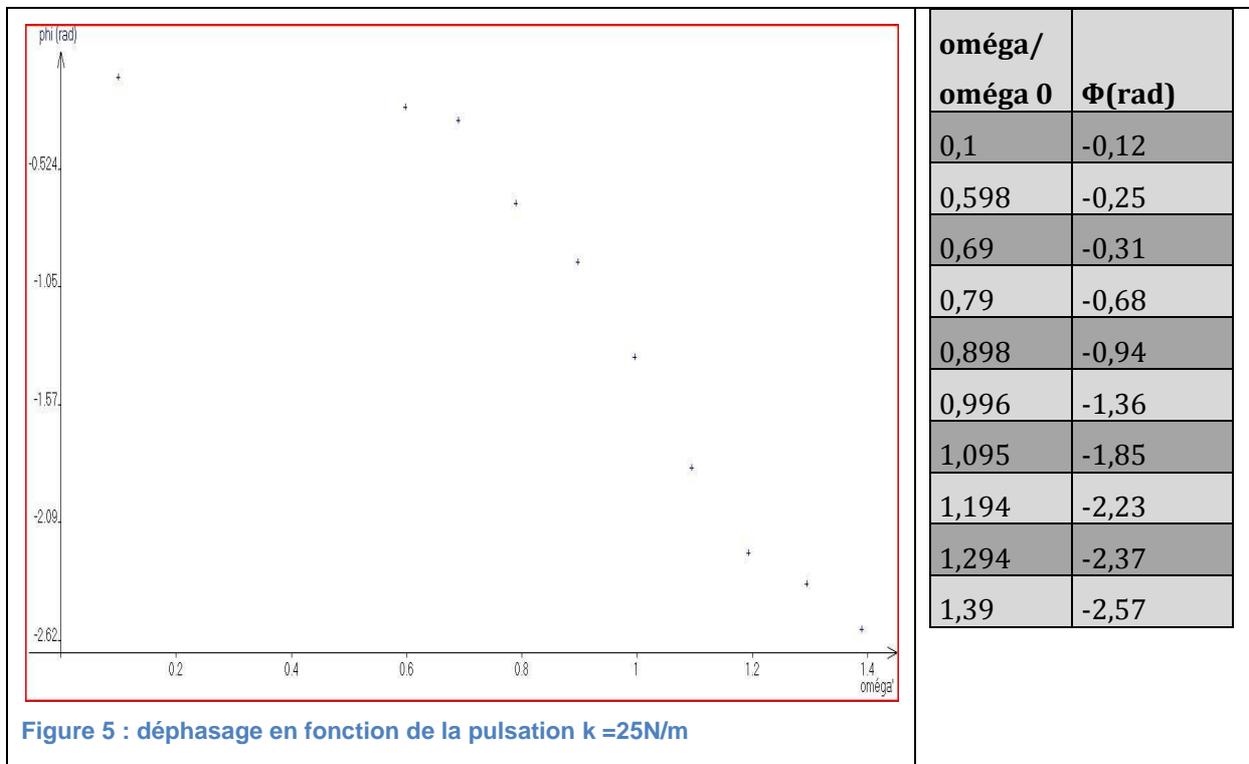
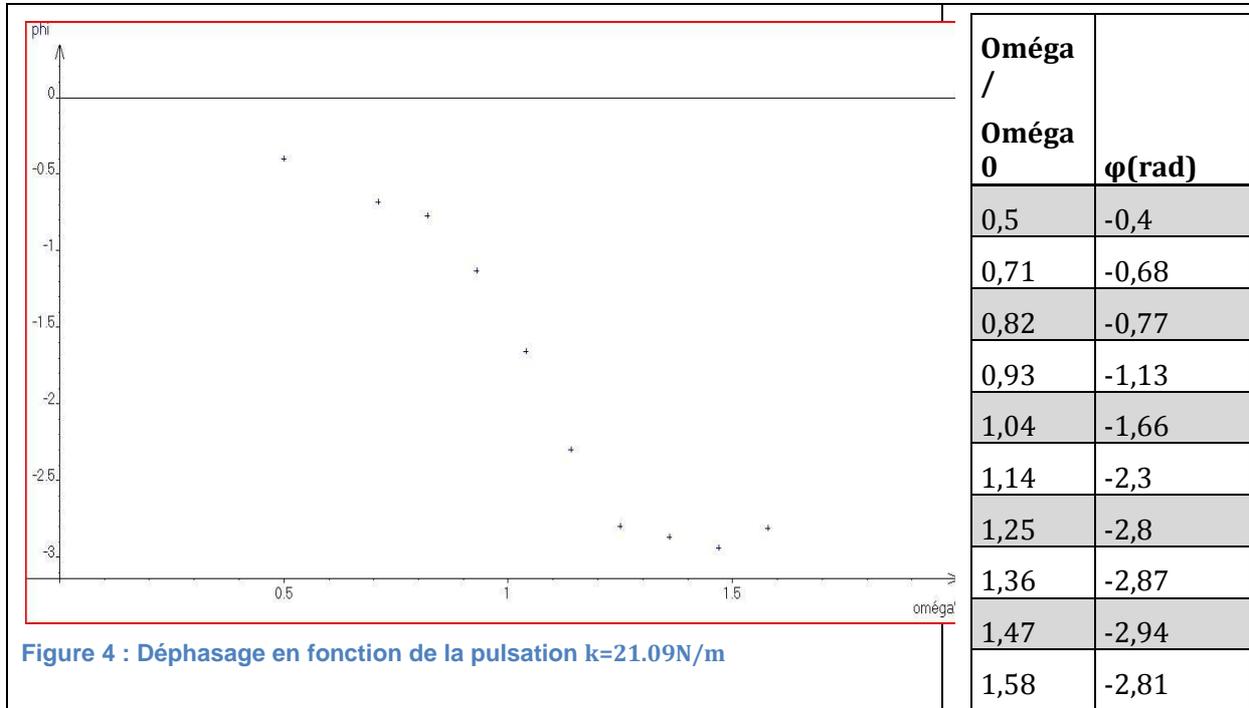
- 4) On fait varier la fréquence et on mesure pour chaque fréquence le déphasage  $\varphi(\text{ressort})$
- 5) Pour obtenir le déphasage on enlève le déphasage à vide pour chaque fréquence du déphasage du ressort :  
 $\Phi = \varphi(\text{ressort}) - \varphi(\text{vide})$



### 3.3.2. Résultats

#### 1.1.1.7 Résultats expérimentaux et comparaison avec la théorie :

Nous avons pris des mesures avec plusieurs ressorts pour une masse de 0.1kg



### 3.3.3. Discussions par rapport aux prédictions théorique

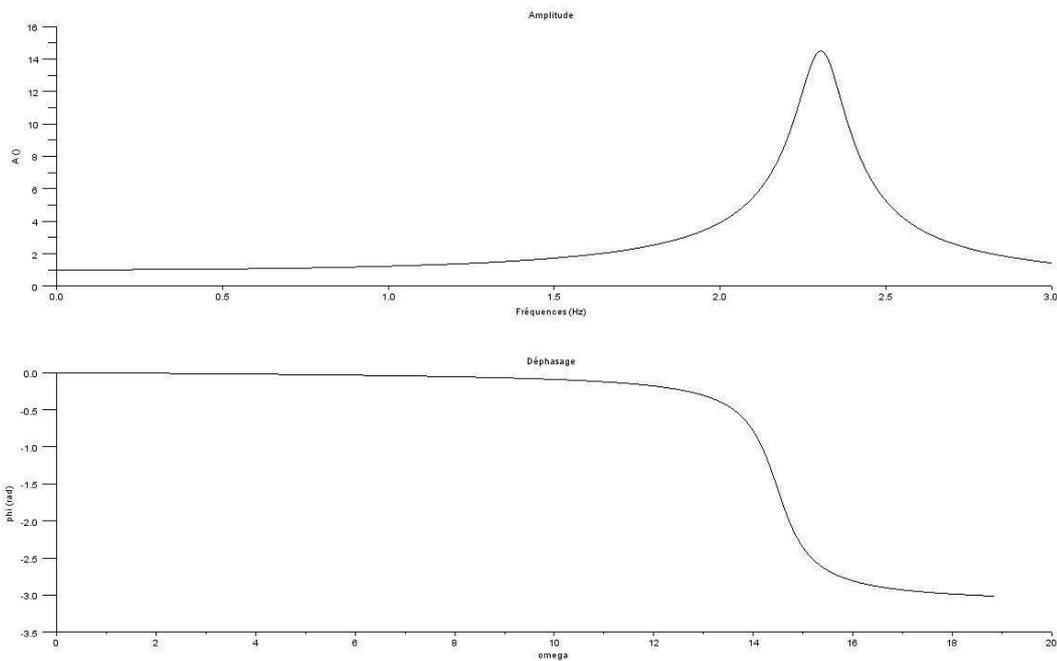
Pour pouvoir comparer avec la théorie, nous devons connaître Q le facteur de qualité de nos ressorts. Nous les avons déterminés expérimentalement en utilisant la méthode du décrement logarithmique.

Pour le ressort  $k=21.09\text{N/m}$  nous avons  $Q=26.5$ .

Pour le ressort  $k=25\text{N/m}$  nous avons  $Q= 28.1$ .

Nous sommes dans le cas où  $Q > \frac{\sqrt{2}}{2}$ .

Nous devrions donc obtenir pour chaque ressort les courbes suivantes :



Nous avons réalisé plusieurs superpositions en faisant varier le facteur qualité de la courbe théorique. Le facteur de qualité de l'acquisition est de  $Q = 26.5$ .

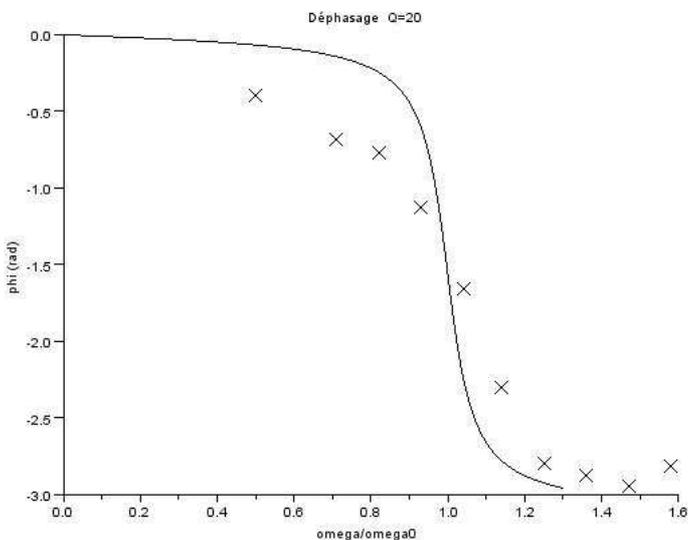


Figure 6 : déphasage pour q(théorique) = 20

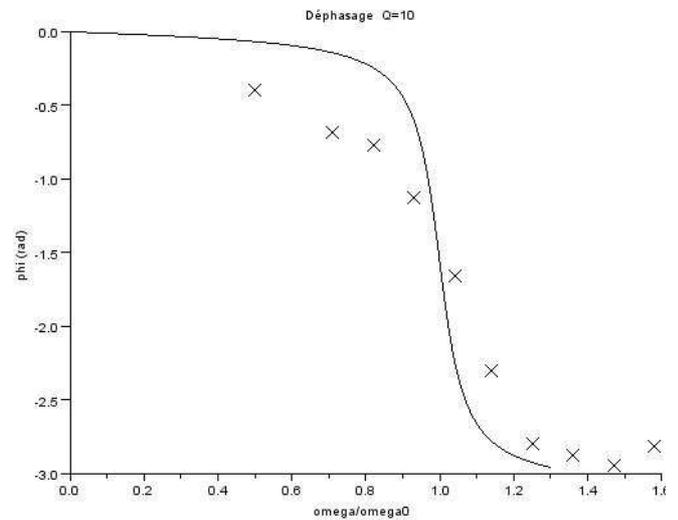
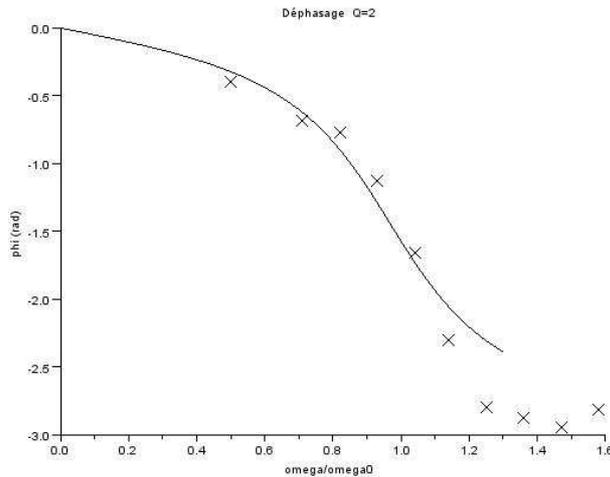


Figure 7 : déphasage pour q(théorique) = 10



Nous constatons que les mesures théoriques et expérimentales s'accordent. En effet, quand  $\omega/\omega_0=1$ ,  $\Phi \approx -1.57$  c'est-à-dire  $-\frac{\pi}{2}$ .

On constate également que :

- ⇒ quand  $\omega/\omega_0 \approx \infty$   
 $\Phi$  tend vers  $-3.14$  c'est-à-dire  $-\pi$
- ⇒ quand  $\omega/\omega_0 = 0$   
 $\Phi$  tend vers  $0$

Figure 8 : déphasage pour  $q(\text{théorique}) = 2$

Néanmoins, le modèle expérimental ne colle pas tout à fait au modèle théorique. Cet écart est principalement dû aux imprécisions expérimentales : pour chaque mesure du déphasage, nous devons relever l'écart de temps à l'aide du réticule c'est-à-dire à la main. Or cette méthode manque de précision. De plus, la mesure du facteur de qualité (Q) manque aussi de précision car elle est réalisée, cette fois encore en utilisant le réticule.

### 1.1.1.8 Critiques sur la méthode de mesure du déphasage et améliorations à apporter :

Nous pouvons émettre plusieurs critiques sur la méthode de mesure du déphasage que nous avons élaborée.

Tout d'abord, cette méthode de mesure est longue. En effet, plusieurs étapes sont nécessaires pour déterminer le déphasage. Il faut d'abord trouver le déphasage à vide pour chaque fréquence, puis le déphasage avec le ressort. Nous devons également connaître les constantes de raideur (k) des ressorts utilisés, c'est-à-dire mesurer de manière expérimentale ces constantes de raideur. Pour pouvoir comparer avec la théorie, la mesure du facteur de qualité (Q) est aussi nécessaire : nous devons donc faire un décrément logarithmique.

Puis, cette méthode manque de précision : pour déterminer l'écart entre le signal du moteur et le signal du ressort, nous utilisons le réticule de Synchronie. Nous le faisons donc à la main. Cette méthode n'est pas rigoureuse car elle dépend du facteur humain.

Enfin, nous ne pouvons pas obtenir directement sur le graphe le déphasage : nous devons le calculer grâce à l'écart de temps obtenu (voir formule).

Pour améliorer cette méthode de mesure, il faudrait réaliser un programme informatique calculant directement le déphasage à partir des écarts de temps. En effet, pour réaliser nos mesures nous avons principalement utilisé le logiciel Excel mais nous avons dû rentrer un grand nombre de formules dans les feuilles de calculs.



### 3.4. Analyse des résultats de l'accéléromètre

#### 3.4.1. Généralités

Une autre possibilité pour mesurer l'évolution de la position de notre système au cours du temps est l'utilisation d'accéléromètres. Ces capteurs fixés à un système permettent une mesure indirecte de cette dernière. Elle peut être notamment obtenue via la mesure de l'accélération suivie d'une intégration numérique. L'utilisation de ces capteurs est courante puisqu'elle se retrouve dans les téléphones portables de nouvelle génération.

Les principaux avantages de ces capteurs sont les suivants :

- Encombrement très faible
- Intégration sur la même puce du capteur et de son électronique de traitement
- Peu coûteux par rapport à d'autres systèmes de mesure.
- Faible consommation électrique : quelques (mW).

#### 3.4.2. Détermination des caractéristiques.

Afin de choisir un capteur adapté il convient de déterminer plusieurs de ses caractéristiques. Ses principales caractéristiques sont les suivantes :

- Gamme de fréquence
- Gamme d'accélération
- Sensibilité

Concernant la gamme de fréquence il faut au moins qu'elle inclut les fréquences de notre moteur, i.e. de 0 à 2,5Hz.

Concernant la gamme d'accélération, il nous faut pour celle-ci déterminer le maximum de l'accélération toutes fréquences confondues. Pour cela, il est nécessaire de repérer les maxima que peut subir notre appareil pour chaque fréquence puis de sélectionner le majorant de ces valeurs. Nous avons déterminé les accélérations théoriques en partant de l'expression générale d'une évolution de position sinusoïdale qui est celle modélisant les positions de notre système.

$$x(t) = A_x(f) \sin(2\pi f t + \Phi)$$

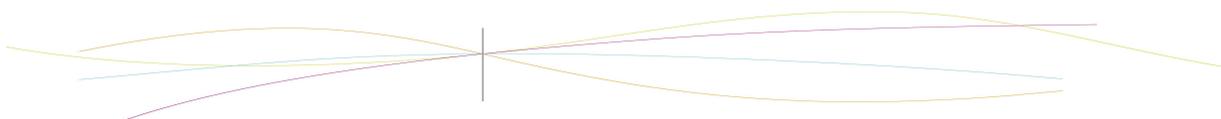
Avec A(f) l'amplitude.

En dérivant deux fois, nous obtenons l'évolution de l'accélération au cours du temps.

$$a(t) = (2\pi f)^2 \cdot A_x(f) \cdot \sin(2\pi f t + \Phi) = A_a(f) \sin(2\pi f t + \Phi)$$

Puis nous avons tracé la courbe des modules de  $a(t)$  en fonction de la fréquence  $a = f(f)$ .

Cette courbe, présentée ci-dessous, permet de connaître l'accélération maximale.



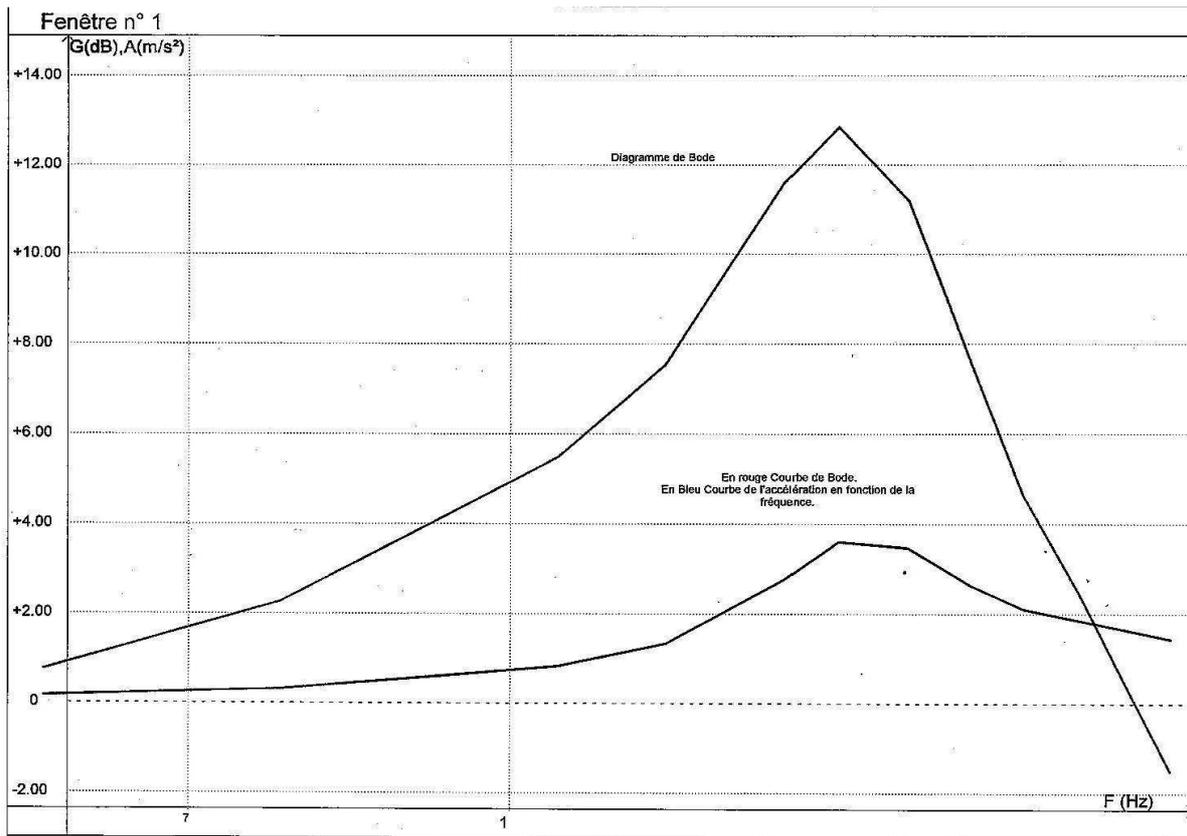


Figure 9 : courbe de bode et d'accélération (k=21.2N/m)

Elle est tracée en parallèle de la Courbe de Bode. On remarque un même aspect général de ces deux courbes qui s'explique par le coefficient  $(2\pi f)^2$  ajouté à l'amplitude pour la courbe d'accélération.

On observe un maximum d'accélération légèrement inférieur à  $4\text{m/s}^2$ . Ce qui nous donne la gamme minimale de l'accéléromètre souhaitée de +/-0,5g.

Concernant la sensibilité, il faut que l'accéléromètre délivre une tension suffisante pour qu'elle puisse être convenablement mesurable avec l'acquisition de Synchronie, i.e. de l'ordre du Volt.

Cependant, une tension peut aussi être rehaussée par l'ajout de circuit électronique.

Ces différentes caractéristiques connues, il a été possible de débiter la recherche de composants. Après de nombreuses recherches, nous avons conclu que le composant répondant le mieux à notre cahier des charges est le composant ADXL103 utilisé à l'INSA de Rennes pour des TP de 1<sup>ère</sup> année.

La documentation technique est fournie en annexe.



### 3.4.3. Mise en place du montage.

Le composant ADXL103 n'avait pas de connectiques lorsque nous l'avons reçu. Il ne pouvait pas être monté tel quel. Il a été nécessaire de souder des connectiques à base de fils de cuivre sur 4 de ses entrées.

Une fois les connectiques opérationnelles et après quelques tests, nous avons adapté le capteur à notre montage.

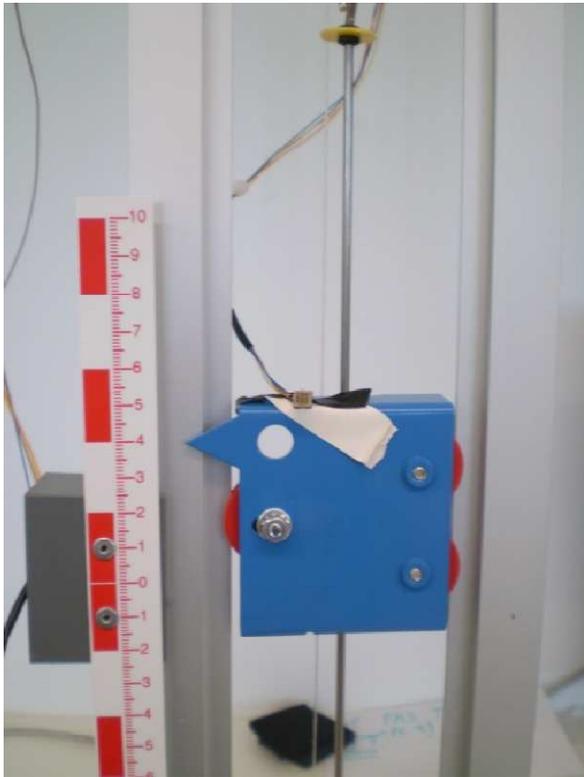


Figure 10 : accéléromètre sur le montage

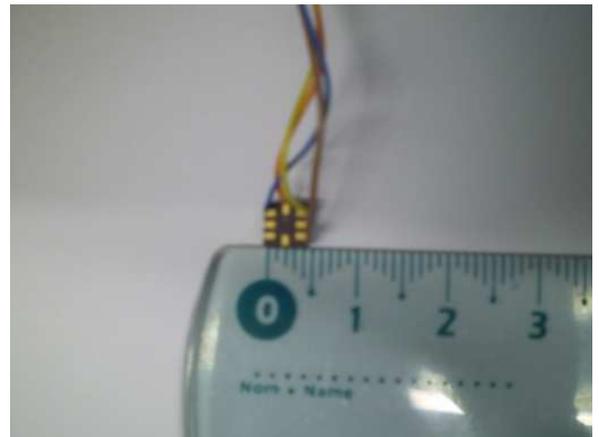


Figure 11 accéléromètre

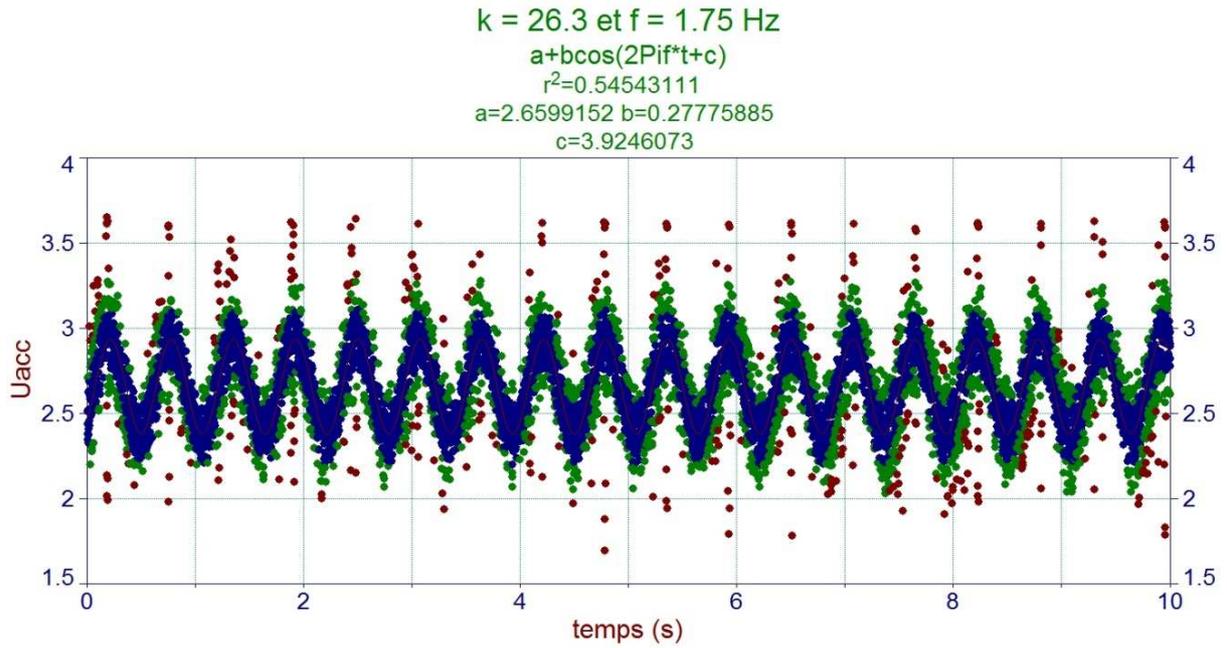
Il est à remarquer que la structure verticale utilisée pour permettre la mesure avec la solution électrolytique pourra être retirée si le capteur accélérométrique est adopté. Cela permettra de diminuer notablement les bruits parasites.

### 3.4.4. Mesures et exploitation

Le montage étant opérationnel, les tests du capteur ont pu commencer.

Nos acquisitions montrent un bruit parasite important. Ces derniers sont dus principalement aux composants électroniques à proximité du capteur mais aussi à la table d'acquisition. Cependant, lors d'acquisitions à forte fréquence (circa 1.75Hz) le bruit moins fort, autorise une modélisation. La courbe d'accélération obtenue ainsi que la modélisation sont présentées ci-dessous.





On remarque que, faisant abstraction du bruit, notre signal s'apparente à un signal sinusoïdal.

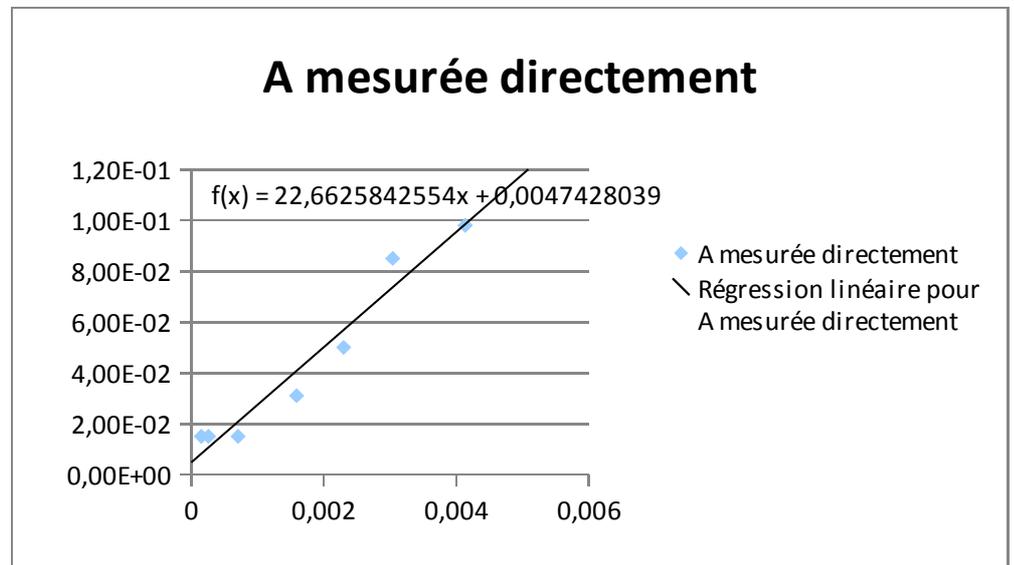
Le paramètre nous intéressant en première approche est b. Il correspond, en effet, à l'amplitude de l'accélération. Ce paramètre nous permet d'accéder à l'amplitude de la position  $A_x(f)$  par :

$$A_x(f) = \frac{b}{(2\pi f)^2}$$

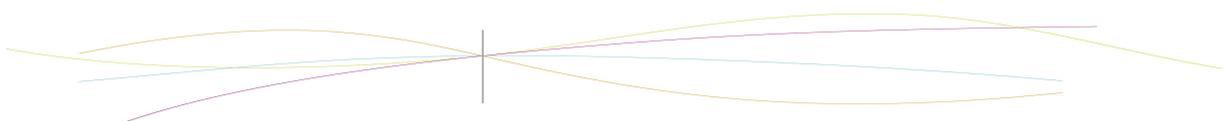
Ensuite, nous avons tracé la courbe :

$$A_x = \frac{b}{(2\pi f)^2} \cdot f$$

Le caractère linéaire de cette courbe valide la mesure en amplitude de notre capteur.



Cette courbe peut aussi être utilisée afin de déterminer l'amplitude des oscillations lorsque l'on connaît l'amplitude des accélérations.



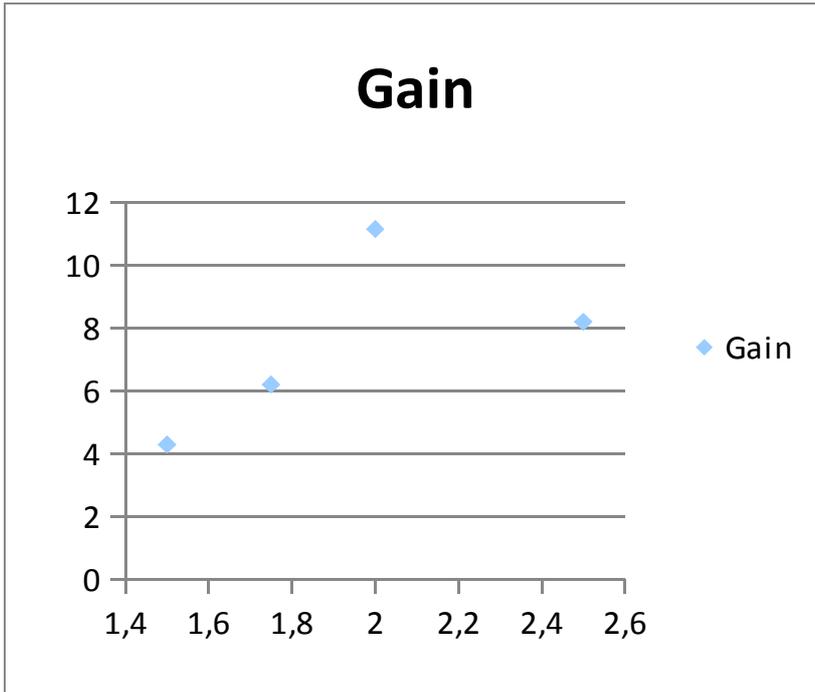
D'autre part, nous avons tracé la courbe de Gain à partir des Amplitudes mesurées à l'accéléromètre.

Les points expérimentaux sont obtenus par :

$$\text{Gain} = 20\log(A_x(f) / A_{\text{vide}})$$

Avec  $A_{\text{vide}}$  l'amplitude des oscillations pour la partie supérieure du ressort.

$A_{\text{vide}}$  est, en pratique, obtenu en remplaçant le ressort par un fil et en mesure l'amplitude.



Cette courbe de même allure générale que celle obtenue avec la méthode de mesure électrolytique, valide de nouveau notre capteur.

### 3.4.5. Conclusion sur le capteur

A la vue des différentes acquisitions réalisées avec ce capteur, nous pouvons en déduire qu'il est un élément de mesure crédible pour ce TP.

Cependant, concernant les améliorations il sera nécessaire d'installer un système réduisant les nuisances de bruit pour obtenir de meilleurs acquisitions. A cet effet, nous proposons la mise en place d'un filtre passe bas.



#### 4. DOCUMENT SYNTHETIQUE. QUE FAIRE DE PLUS AVEC L'OSCILLATEUR HARMONIQUE : LE DEPHASAGE.

En partant de l'équation 
$$y''(t) + \frac{\omega_0}{Q} \cdot y'(t) + \omega_0^2 \cdot y(t) = \omega_0^2 \cdot x(t)$$

A partir de laquelle vous avez réalisé une étude d'amplitude, il est aussi possible de réaliser une étude théorique du déphasage. Là où vous avez étudié l'amplitude de la fonction de sortie y, on peut également procéder à une étude de l'argument de cette dernière. Tout calcul fait, on obtient la formule de la valeur théorique du déphasage engendré par le ressort:

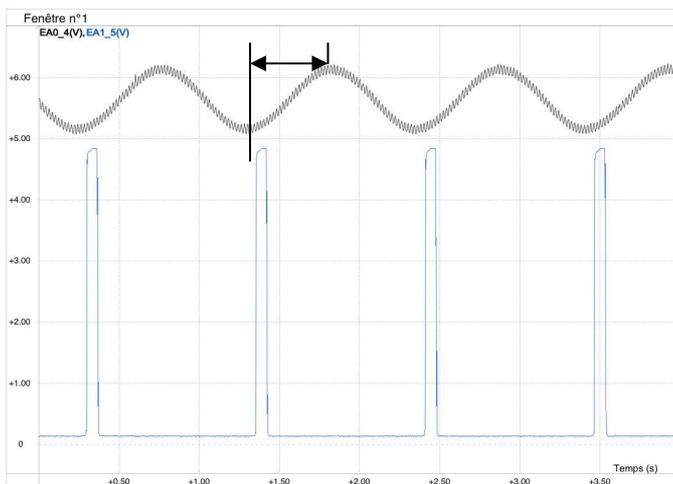
$$\varphi = \begin{cases} -\arctan\left(\frac{\omega_0 \omega}{Q(\omega - \omega_0^2)}\right) & \omega < \omega_0 \\ \pi - \arctan\left(\frac{\omega_0 \omega}{Q(\omega - \omega_0^2)}\right) & \omega > \omega_0 \end{cases}$$

Il est aussi possible d'étudier expérimentalement ce déphasage. Pour ce faire, on équipe le montage d'une diode montée sur une fourche qui permet de fixer un signal directement à la sortie du moteur.



D'autre part, on relève la position de la partie inférieure du ressort via la solution électrolytique.

Ces deux courbes relevées sous synchronie vous sont présentées ci-après.



Le déphasage phi s'obtient en relevant l'écart relatif de temps dt entre le pic des deux courbes à l'aide du curseur.

On relève pour chaque fréquence le déphasage sans le ressort, puis avec le ressort à l'aide de la formule:  $\phi = dt/T$  avec  $T = 1/f$

On calcule ensuite  $\phi(\text{total}) = \phi(\text{ressort}) - \phi(\text{vide})$

Puis on trace la courbe de phi(total) en fonction de la fréquence.

Il ne reste qu'à superposer et comparer la courbe théorique et la courbe expérimentale.



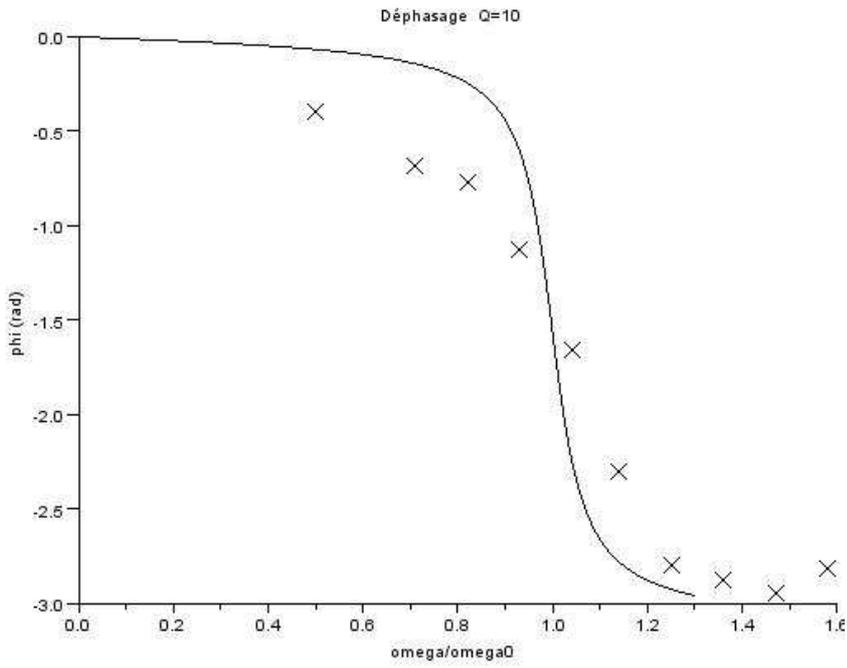


Figure 13 : déphasage pour q =10

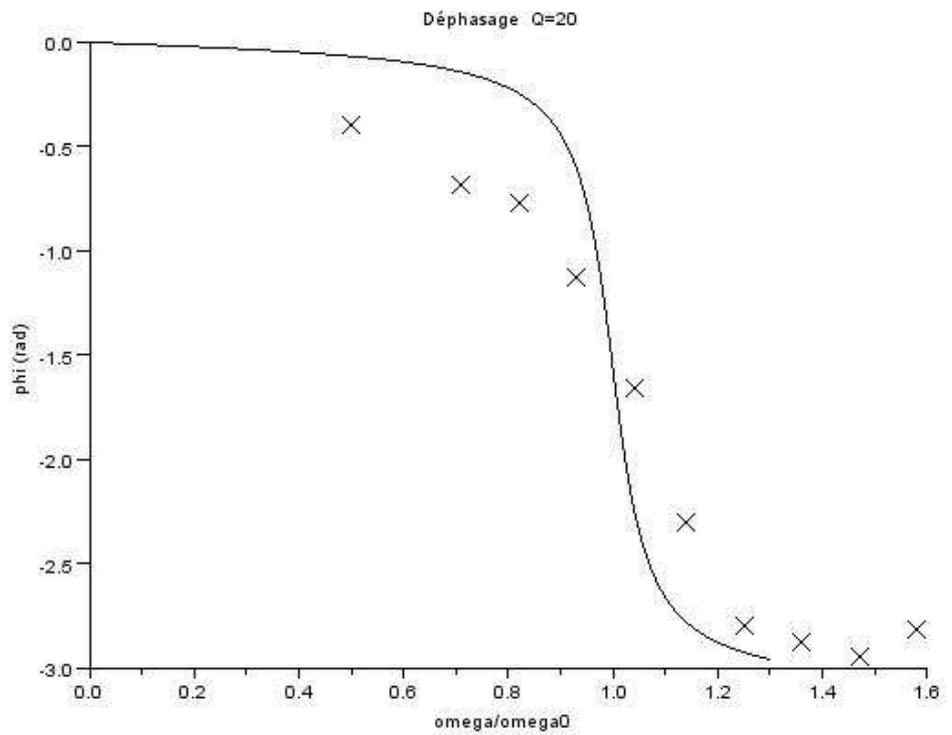


Figure 14 : déphasage pour q = 20



## 5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Au cours de ce projet, nous avons repris le TP « oscillateur harmonique » pour y ajouter une mesure du déphasage. Nous avons tout d'abord fait une étude théorique de ce déphasage. Puis, nous avons étudié les différentes approches expérimentales qui nous permettaient de mesurer le déphasage. Parmi ces approches expérimentales, nous avons retenu celle de la fourche à diodes car c'était celle qui se prêtait le mieux à notre dispositif. Ensuite, nous avons cherché des méthodes pour obtenir le déphasage sur Synchronie à partir de la fourche à diode. Quand notre dispositif de mesure a été opérationnel, nous avons commencé à prendre des mesures et à les traiter. Globalement, nous pouvons dire que nos objectifs de début de projet sont atteints car nous avons réussi à installer un dispositif de mesure de déphasage sur le dispositif existant.

En parallèle de l'étude du dispositif de la fourche à diodes, nous nous sommes aussi penchés sur l'étude des accéléromètres. Ces capteurs étant désormais très répandus, il nous a fallu une longue étude de caractérisation des propriétés afin de choisir celui qui était le mieux adapté à notre montage. Une fois le capteur adapté à notre dispositif, il nous a permis de mesurer l'accélération de notre ressort par une autre voie que celle jusqu'alors utilisée.

Si nous devions continuer ce projet, nous pourrions nous pencher sur deux points. D'une part, nous pourrions imaginer une poursuite de projet orientée vers une approche de programmation informatique. Il s'agirait de mettre en place une interface informatique nous permettant d'obtenir directement le déphasage à partir du système de mesure, sans avoir à analyser les courbes et à faire des calculs. D'autre part, nous pourrions imaginer une poursuite de projet orientée vers une approche électronique. Nous pourrions continuer l'étude de l'accéléromètre et déterminer un système réduisant les nuisances de bruit.

Ce projet a été enrichissant dans notre formation d'ingénieurs.

Tout d'abord, il nous a permis de mieux appréhender la gestion de projet. Nous avons appris à travailler en groupe, c'est-à-dire à travailler à plusieurs sur un projet de plusieurs mois. Nous avons vu que chaque personne a des compétences diverses. Pour bien mener le projet, il faut réussir à conjuguer toutes ces compétences pour en tirer le meilleur. Cependant, chaque personne a aussi des volontés différentes. Il faut donc écouter et tenir compte du point de vue des autres. Parfois, il n'a pas été simple de se dire que les idées des autres membres du groupe étaient meilleures. Mais ce sont les débats qui créent la richesse du travail en groupe. De plus, notre groupe était composé de quatre élèves francophones et de deux élèves chinois. Les élèves francophones étaient issus de section classique, ils n'avaient donc pas l'habitude de travailler avec des élèves non-francophones. Ce projet leur a montré qu'il fallait faire preuve de patience, c'est-à-dire expliquer certains termes, parler doucement, parfois utiliser l'anglais. Les élèves francophones ont réalisé que les étudiants chinois ont beaucoup de mérite car c'est difficile pour eux d'étudier en utilisant une autre langue et un autre alphabet que leur langue maternelle. En outre, ce groupe « international » nous a montré que la façon de gérer un projet diffère en fonction de la culture. Ce point est d'ailleurs bénéfique pour notre future carrière professionnelle : nous avons réalisé qu'il faut s'adapter à la culture de nos collègues et parfois remettre en question notre propre vision des choses.

Ensuite, ce projet a été bénéfique d'un point de vue scientifique. Il nous a permis d'acquérir des connaissances et d'étudier des domaines auxquels nous ne nous serions pas intéressés sans ce projet. Puis, nous avons vu que nos cours ne constituaient nos uniques ressources. En effet, ceux-ci nous permettent d'acquérir une culture et des bases scientifiques, mais, pour réaliser un tel projet, nous avons dû effectuer des recherches, sortir des méthodes et connaissances scolaires pour réfléchir à des solutions et approfondir nos connaissances.



Enfin, c'est la première fois que nous avons passé autant de temps sur un TP! Souvent, pendant les séances de travaux pratiques, les élèves protestent car les dispositifs expérimentaux ne fonctionnent pas aussi bien que prévu. Mais, nous nous sommes rendu compte qu'il est très difficile de mettre en place un dispositif expérimental qui fonctionne et soit utilisable par les élèves. Nous serons certainement plus indulgents à l'avenir lors des séances de travaux pratiques!



## 6. BIBLIOGRAPHIE

Cours d'électronique de STPI1 de l'INSA de Rouen

TP conversion analogique/numérique de l'INSA de Rennes

Documentation technique ANALOGIC DEVICES sur le capteur ADXL103.

Aide Maple

Jean-Marie BREBEC : *H Prépa tout en un: Physique MPSI, PCSI, PTSI*, Hachette Supérieur, 2009



## 7. ANNEXES

### 7.1. Détails des calculs pour l'obtention du déphasage

$$\begin{aligned}
 & \left[ \begin{aligned}
 > y := t \rightarrow Y \cdot \exp(i \cdot (\omega \cdot t + \varphi)); \\
 & \qquad \qquad \qquad y := t \rightarrow Y e^{i(\omega t + \varphi)} \\
 > restart : E := y''(t) + \frac{\omega_0}{Q} \cdot y'(t) + \omega_0^2 \cdot y(t) = \omega_0^2 \cdot x(t); \\
 & \quad \text{subs}(x(t) = A \cdot \exp(i \cdot \omega \cdot t), y(t) = Y \cdot \exp(i \cdot (\omega \cdot t + \varphi)), E); \\
 & \qquad \qquad \qquad E := \frac{d^2}{dt^2} y(t) + \frac{\omega_0 \left( \frac{d}{dt} y(t) \right)}{Q} + \omega_0^2 y(t) = \omega_0^2 x(t)
 \end{aligned} \right. \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\left[ \begin{aligned}
 & \frac{\partial^2}{\partial t^2} (Y e^{i(\omega t + \varphi)}) + \frac{\omega_0 \left( \frac{\partial}{\partial t} (Y e^{i(\omega t + \varphi)}) \right)}{Q} + \omega_0^2 Y e^{i(\omega t + \varphi)} = \omega_0^2 A e^{i\omega t} \quad (2)
 \end{aligned} \right.$$

$$\begin{aligned}
 & \left[ \begin{aligned}
 > d := \frac{\partial}{\partial t} (Y e^{i(\omega t + \varphi)}) = \text{diff}(y(t), t); \\
 & \qquad \qquad \qquad d := I Y \omega e^{i(\omega t + \varphi)} = \frac{d}{dt} y(t) \quad (3)
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[ \begin{aligned}
 > c := \frac{\partial^2}{\partial t^2} (Y e^{i(\omega t + \varphi)}) = \text{diff}(y(t), [\$2]); \\
 & \qquad \qquad \qquad c := -Y \omega^2 e^{i(\omega t + \varphi)} = \frac{d^2}{dt^2} y(t) \quad (4)
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[ \begin{aligned}
 > E := -Y \omega^2 e^{i(\omega t + \varphi)} + \frac{\omega_0 (I Y \omega e^{i(\omega t + \varphi)})}{Q} + \omega_0^2 Y e^{i(\omega t + \varphi)} = \omega_0^2 A e^{i\omega t}; \\
 & \qquad \qquad \qquad E := -Y \omega^2 e^{i(\omega t + \varphi)} + \frac{I \omega_0 Y \omega e^{i(\omega t + \varphi)}}{Q} + \omega_0^2 Y e^{i(\omega t + \varphi)} = \omega_0^2 A e^{i\omega t} \quad (5)
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[ \begin{aligned}
 > F := \text{simplify}(E); \\
 & \qquad \qquad \qquad F := \frac{Y e^{i(\omega t + \varphi)} (-\omega^2 Q + I \omega_0 \omega + \omega_0^2 Q)}{Q} = \omega_0^2 A e^{i\omega t} \quad (6)
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[ \begin{aligned}
 > y_c := Y \cdot \exp(j \cdot \varphi); \\
 & \qquad \qquad \qquad Y e^{i\varphi} \quad (7)
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

Si on remplace  $y_c$  dans F l'équation devient :

$$\begin{aligned}
 & \left[ \begin{aligned}
 > G := y_c = \frac{\omega_0^2 A \cdot Q}{-\omega \cdot Q + \omega \cdot \omega_0 \cdot j + \omega_0^2 \cdot Q}; \\
 & \qquad \qquad \qquad G := Y e^{i\varphi} = \frac{\omega_0^2 A Q}{-\omega Q + I \omega_0 \omega + \omega_0^2 Q} \quad (8)
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[ \begin{aligned}
 > \text{evalc}(G); \\
 & \qquad \qquad \qquad (9)
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

$$Y \cos(\varphi) + I Y \sin(\varphi) = \frac{\omega_0^2 A Q (-\omega Q + \omega_0^2 Q)}{(-\omega Q + \omega_0^2 Q)^2 + \omega_0^2 \omega^2} - \frac{I \omega_0^3 A Q \omega}{(-\omega Q + \omega_0^2 Q)^2 + \omega_0^2 \omega^2} \quad (9)$$

$$\text{> } \text{restart : déphasage} := \omega \rightarrow \arctan \left( \frac{\omega_0^3 A Q \omega}{\omega_0^2 A Q (-\omega Q + \omega_0^2 Q)} \right);$$

$$\text{déphasage} := \omega \rightarrow \arctan \left( \frac{\omega_0^3 A Q \omega}{\omega_0^2 A Q (-\omega Q + \omega_0^2 Q)} \right) \quad (10)$$

$$\text{> } \text{simplify}(\text{déphasage}(\omega));$$

$$-\arctan \left( \frac{\omega_0 \omega}{Q (\omega - \omega_0^2)} \right) \quad (11)$$

On rappelle que l'argument de  $x+iy$  vaut :

$\arctan(y/x)$  si  $x > 0$

$\pi + \arctan(y/x)$  si  $x < 0$

$$\text{Donc le déphasage vaut : } \varphi = \begin{cases} -\arctan \left( \frac{\omega_0 \omega}{Q (\omega - \omega_0^2)} \right) & \omega < \omega_0 \\ \pi - \arctan \left( \frac{\omega_0 \omega}{Q (\omega - \omega_0^2)} \right) & \omega > \omega_0 \end{cases}$$



## 7.2. Code Silab

```

0001 clear
0002
0003 NomFichierSource='dephasage.txt';
0004 k=21;
0005 m=100E-3;
0006 lambda=0.1;
0007 Fmax=3;
0008
0009 //determination des paramètres du modèle

0010 Q=10;
0011 omega0=sqrt(k/m);
0012
0013 //Lecture Fichier

0014 DATA=fscanfMat(NomFichierSource);
0015 phiTab=DATA(:,1);
0016 RapOmega=DATA(:,2);
0017
0018 //Calcul théorie

0019 FTheoTab=linspace(0,Fmax,500)';
0020 omegaTab=2*pi*FTheoTab;
0021 ATheoTab=((ones(omegaTab)-(omegaTab/omega0).^2).^2+(omegaTab/omega0/Q).^2).^(-0.5);
0022 for i=1:500
0023 tmp=omegaTab(i)/omega0;
0024 if omegaTab(i)<omega0 then
0025 phiTheoTab(i)=-atan(tmp/(Q*(1-tmp^2)));
0026 else
0027 phiTheoTab(i)=-pi-atan(tmp/(Q*(1-tmp^2)));
0028 end
0029 end
0030 clf
0031
0032 //subplot(2,1,2)
0033
0034 plot2d(RapOmega,phiTab,-2)
0035 plot2d(2*pi*FTheoTab/omega0,phiTheoTab,1)
0036 xtitle('Déphasage Q=10','omega/omega0','phi (rad)');
0037
0038 //Export=[FTheoTab ATheoTab phiTheoTab];

0039 //fprintfMat('FichierTheorique.txt',Export);

```



7.3. Documentation technique de l'accéléromètre.



Precision  $\pm 1.7 g$  Single-/Dual-Axis  
iMEMS® Accelerometer

**ADXL103/ADXL203**

**FEATURES**

- High performance, single-/dual-axis accelerometer on a single IC chip
- 5 mm × 5 mm × 2 mm LCC package
- 1 mg resolution at 60 Hz
- Low power: 700  $\mu A$  at  $V_s = 5 V$  (typical)
- High zero g bias stability
- High sensitivity accuracy
- 40°C to +125°C temperature range
- X and Y axes aligned to within 0.1° (typical)
- BW adjustment with a single capacitor
- Single-supply operation
- 3500 g shock survival
- RoHS-compliant
- Compatible with Sn/Pb- and Pb-free solder processes
- Qualified for automotive applications

**APPLICATIONS**

- Vehicle dynamic control (VDC)/electronic stability program (ESP) systems
- Electronic chassis control
- Electronic braking
- Platform stabilization/leveling
- Navigation
- Alarms and motion detectors
- High accuracy, 2-axis tilt sensing

**GENERAL DESCRIPTION**

The ADXL103/ADXL203 are high precision, low power, complete single- and dual-axis accelerometers with signal conditioned voltage outputs, all on a single, monolithic IC. The ADXL103/ADXL203 measure acceleration with a full-scale range of  $\pm 1.7 g$ . The ADXL103/ADXL203 can measure both dynamic acceleration (for example, vibration) and static acceleration (for example, gravity).

The typical noise floor is 110  $\mu g/\sqrt{Hz}$ , allowing signals below 1 mg (0.06° of inclination) to be resolved in tilt sensing applications using narrow bandwidths (<60 Hz).

The user selects the bandwidth of the accelerometer using Capacitor  $C_x$  and Capacitor  $C_y$  at the  $X_{OUT}$  and  $Y_{OUT}$  pins. Bandwidths of 0.5 Hz to 2.5 kHz may be selected to suit the application.

The ADXL103 and ADXL203 are available in 5 mm × 5 mm × 2 mm, 8-pad hermetic LCC packages.

**FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM**

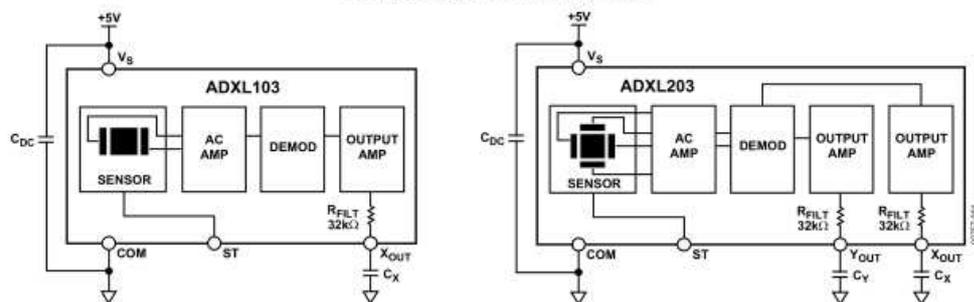


Figure 1.

Rev. C  
Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.



**ADXL103/ADXL203**

**TABLE OF CONTENTS**

Features .....	1	Power Supply Decoupling .....	10
Applications.....	1	Setting the Bandwidth Using $C_x$ and $C_y$ .....	10
General Description.....	1	Self Test .....	10
Specifications.....	3	Design Trade-Offs for Selecting Filter Characteristics: The Noise/BW Trade-Off.....	10
Absolute Maximum Ratings.....	4	Using the ADXL103/ADXL203 with Operating Voltages Other than 5 V .....	11
ESD Caution.....	4	Using the ADXL203 as a Dual-Axis Tilt Sensor .....	11
Pin Configurations and Function Descriptions .....	5	Outline Dimensions .....	12
Typical Performance Characteristics .....	6	Ordering Guide .....	12
Theory of Operation .....	9	Automotive Products .....	12
Performance .....	9		
Applications.....	10		

**REVISION HISTORY**

<b>5/10—Rev. B to Rev. C</b>	
Changes to Figure 24 Caption.....	12
Added Automotive Products Section .....	12
<b>4/10—Rev. A to Rev. B</b>	
Changes to Features Section.....	1
Updated Outline Dimensions .....	12
Changes to Ordering Guide .....	12
<b>2/06—Rev. 0 to Rev. A</b>	
Changes to Features.....	1
Changes to Table 1 .....	3
Changes to Figure 2 .....	4
Changes to Figure 3 and Figure 4.....	5
Changes to the Performance Section .....	9
<b>4/04—Revision 0: Initial Version</b>	



**ADXL103/ADXL203**

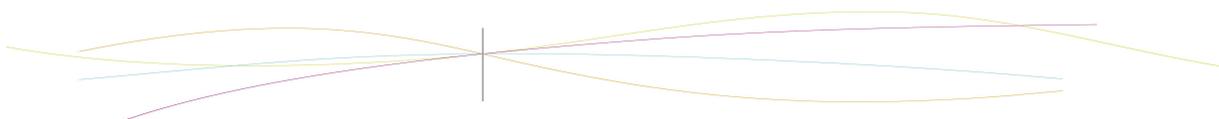
**SPECIFICATIONS**

T<sub>A</sub> = -40°C to +125°C, V<sub>S</sub> = 5 V, C<sub>X</sub> = C<sub>Y</sub> = 0.1 μF, acceleration = 0 g, unless otherwise noted.

**Table 1.**

Parameter	Conditions	Min <sup>1</sup>	Typ	Max <sup>1</sup>	Unit
<b>SENSOR INPUT</b>	Each axis				
Measurement Range <sup>2</sup>		±1.7			g
Nonlinearity	% of full scale		±0.2	±1.25	%
Package Alignment Error			±1		Degrees
Alignment Error (ADXL203)	X sensor to Y sensor		±0.1		Degrees
Cross-Axis Sensitivity			±1.5	±3	%
<b>SENSITIVITY (RATIOMETRIC)<sup>3</sup></b>	Each axis				
Sensitivity at X <sub>OUT</sub> , Y <sub>OUT</sub>	V <sub>S</sub> = 5 V	960	1000	1040	mV/g
Sensitivity Change Due to Temperature <sup>4</sup>	V <sub>S</sub> = 5 V		±0.3		%
<b>ZERO g BIAS LEVEL (RATIOMETRIC)</b>	Each axis				
0 g Voltage at X <sub>OUT</sub> , Y <sub>OUT</sub>	V <sub>S</sub> = 5 V	2.4	2.5	2.6	V
Initial 0 g Output Deviation from Ideal	V <sub>S</sub> = 5 V, 25°C		±25		mg
0 g Offset vs. Temperature			±0.1	±0.8	mg/°C
<b>NOISE PERFORMANCE</b>					
Output Noise	<4 kHz, V <sub>S</sub> = 5 V		1	3	mV rms
Noise Density			110		μg/√Hz rms
<b>FREQUENCY RESPONSE<sup>5</sup></b>					
C <sub>X</sub> , C <sub>Y</sub> Range <sup>6</sup>		0.002		10	μF
R <sub>FILT</sub> Tolerance		24	32	40	kΩ
Sensor Resonant Frequency			5.5		kHz
<b>SELF TEST<sup>7</sup></b>					
Logic Input Low				1	V
Logic Input High		4			V
ST Input Resistance to Ground		30	50		kΩ
Output Change at X <sub>OUT</sub> , Y <sub>OUT</sub>	Self Test 0 to Self Test 1	450	750	1100	mV
<b>OUTPUT AMPLIFIER</b>					
Output Swing Low	No load	0.05	0.2		V
Output Swing High	No load		4.5	4.8	V
<b>POWER SUPPLY</b>					
Operating Voltage Range		3		6	V
Quiescent Supply Current			0.7	1.1	mA
Turn-On Time <sup>8</sup>			20		ms

<sup>1</sup> All minimum and maximum specifications are guaranteed. Typical specifications are not guaranteed.  
<sup>2</sup> Guaranteed by measurement of initial offset and sensitivity.  
<sup>3</sup> Sensitivity is essentially ratiometric to V<sub>S</sub>. For V<sub>S</sub> = 4.75 V to 5.25 V, sensitivity is 186 mV/V/g to 215 mV/V/g.  
<sup>4</sup> Defined as the output change from ambient-to-maximum temperature or ambient-to-minimum temperature.  
<sup>5</sup> Actual frequency response controlled by user-supplied external capacitor (C<sub>X</sub>, C<sub>Y</sub>).  
<sup>6</sup> Bandwidth = 1/(2 × π × 32 kΩ × C). For C<sub>X</sub>, C<sub>Y</sub> = 0.002 μF, bandwidth = 2500 Hz. For C<sub>X</sub>, C<sub>Y</sub> = 10 μF, bandwidth = 0.5 Hz. Minimum/maximum values are not tested.  
<sup>7</sup> Self-test response changes cubically with V<sub>S</sub>.  
<sup>8</sup> Larger values of C<sub>X</sub>, C<sub>Y</sub> increase turn-on time. Turn-on time is approximately 160 × C<sub>X</sub> or C<sub>Y</sub> + 4 ms, where C<sub>X</sub>, C<sub>Y</sub> are in μF.



## ADXL103/ADXL203

### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Table 2.

Parameter	Rating
Acceleration (Any Axis, Unpowered)	3500 g
Acceleration (Any Axis, Powered)	3500 g
Drop Test (Concrete Surface)	1.2 m
V <sub>s</sub>	-0.3 V to +7.0 V
All Other Pins	(COM - 0.3 V) to (V <sub>s</sub> + 0.3 V)
Output Short-Circuit Duration (Any Pin to Common)	Indefinite
Temperature Range (Powered)	-55°C to +125°C
Temperature Range (Storage)	-65°C to +150°C

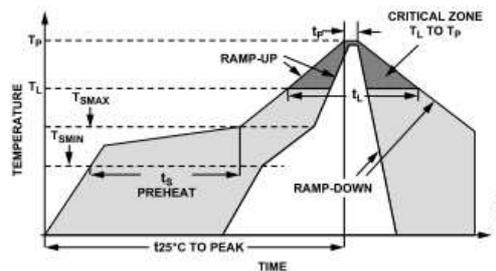
Stresses above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only; functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational section of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

Table 3. Package Characteristics

Package Type	$\theta_{JA}$	$\theta_{JC}$	Device Weight
8-Lead CLCC	120°C/W	20°C/W	<1.0 gram

### ESD CAUTION

ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Electrostatic charges as high as 4000 V readily accumulate on the human body and test equipment and can discharge without detection. Although this product features proprietary ESD protection circuitry, permanent damage may occur on devices subjected to high energy electrostatic discharges. Therefore, proper ESD precautions are recommended to avoid performance degradation or loss of functionality.



Profile Feature	Condition	
	Sn63/Pb37	Pb-Free
Average Ramp Rate (T <sub>L</sub> to T <sub>P</sub> )	3°C/second max	
Preheat		
• Minimum Temperature (T <sub>SMIN</sub> )	100°C	150°C
• Maximum Temperature (T <sub>SMAX</sub> )	150°C	200°C
• Time (T <sub>SMIN</sub> to T <sub>SMAX</sub> ) (t <sub>s</sub> )	60 to 120 seconds	60 to 150 seconds
T <sub>SMAX</sub> to T <sub>L</sub>		
• Ramp-Up Rate	3°C/second	
Time Maintained above Liquidous (T <sub>L</sub> )		
• Liquidous Temperature (T <sub>L</sub> )	183°C	217°C
• Time (t <sub>r</sub> )	60 to 150 seconds	60 to 150 seconds
Peak Temperature (T <sub>P</sub> )	240°C + 0°C/-5°C	260°C + 0°C/-5°C
Time Within 5°C of Actual Peak Temperature (t <sub>r</sub> )	10 to 30 seconds	20 to 40 seconds
Ramp-Down Rate	6°C/second max	
Time 25°C to Peak Temperature	6 minutes max	8 minutes max

Figure 2. Recommended Soldering Profile



**ADXL103/ADXL203**

**PIN CONFIGURATIONS AND FUNCTION DESCRIPTIONS**

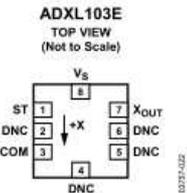


Figure 3. ADXL103 Pin Configuration

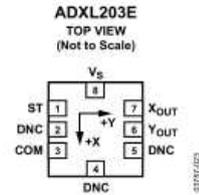


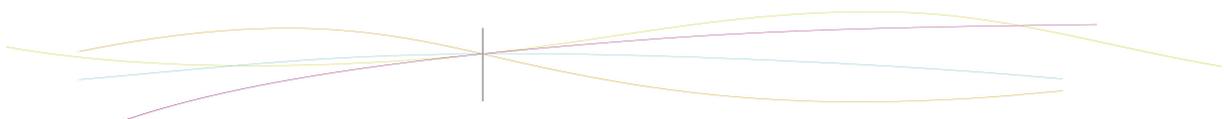
Figure 4. ADXL203 Pin Configuration

**Table 4. ADXL103 Pin Function Descriptions**

Pin No.	Mnemonic	Description
1	ST	Self Test
2	DNC	Do Not Connect
3	COM	Common
4	DNC	Do Not Connect
5	DNC	Do Not Connect
6	DNC	Do Not Connect
7	X <sub>OUT</sub>	X Channel Output
8	V <sub>S</sub>	3 V to 6 V

**Table 5. ADXL203 Pin Function Descriptions**

Pin No.	Mnemonic	Description
1	ST	Self Test
2	DNC	Do Not Connect
3	COM	Common
4	DNC	Do Not Connect
5	DNC	Do Not Connect
6	Y <sub>OUT</sub>	Y Channel Output
7	X <sub>OUT</sub>	X Channel Output
8	V <sub>S</sub>	3 V to 6 V



**ADXL103/ADXL203**

**TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS**

V<sub>s</sub> = 5 V for all graphs, unless otherwise noted.

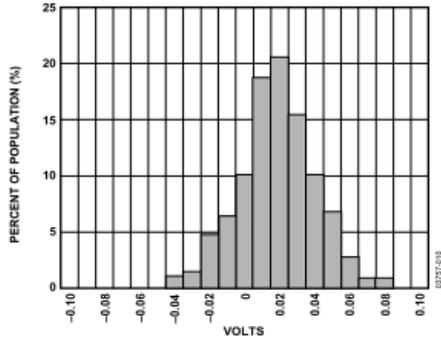


Figure 5. X-Axis Zero g Bias Deviation from Ideal at 25°C

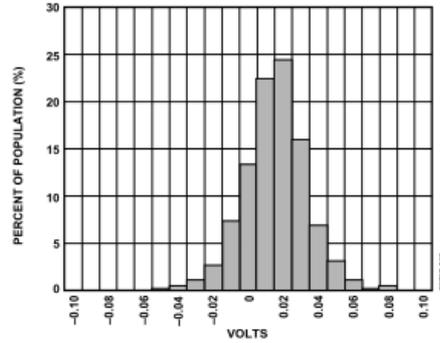


Figure 8. Y-Axis Zero g Bias Deviation from Ideal at 25°C

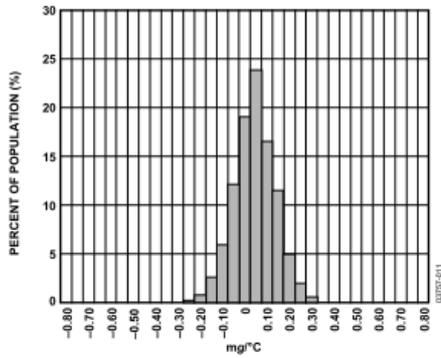


Figure 6. X-Axis Zero g Bias Tempco

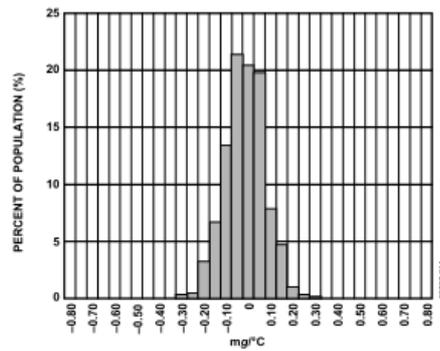


Figure 9. Y-Axis Zero g Bias Tempco

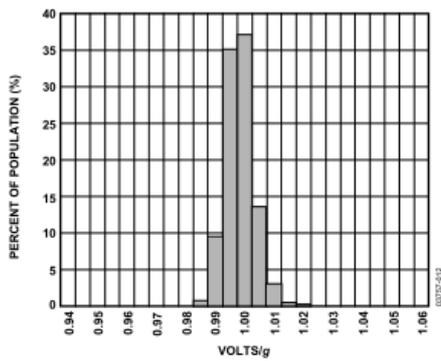


Figure 7. X-Axis Sensitivity at 25°C

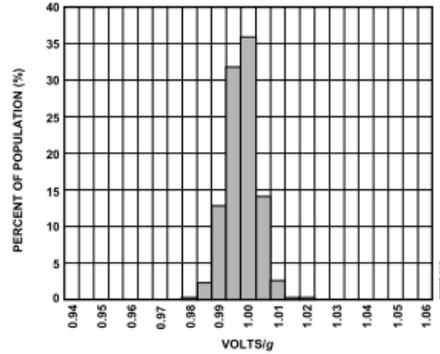


Figure 10. Y-Axis Sensitivity at 25°C



**ADXL103/ADXL203**

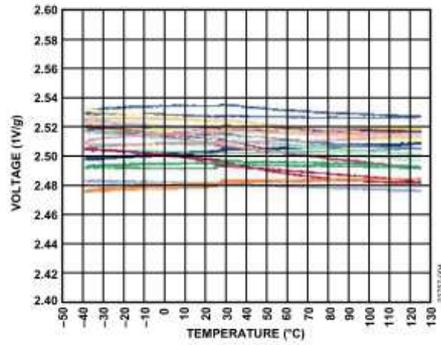


Figure 11. Zero g Bias vs. Temperature; Parts Soldered to PCB

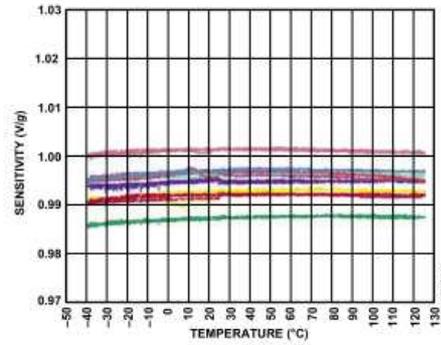


Figure 14. Sensitivity vs. Temperature; Parts Soldered to PCB

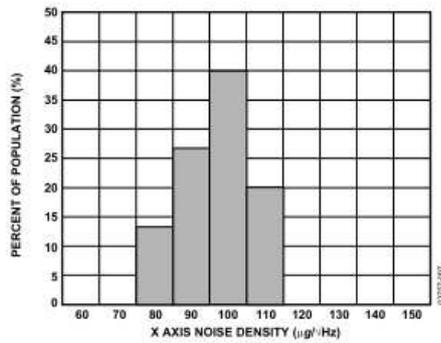


Figure 12. X-Axis Noise Density at 25°C

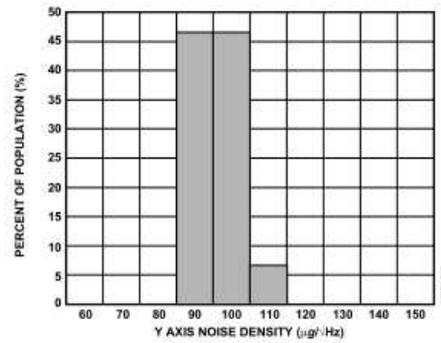


Figure 15. Y-Axis Noise Density at 25°C

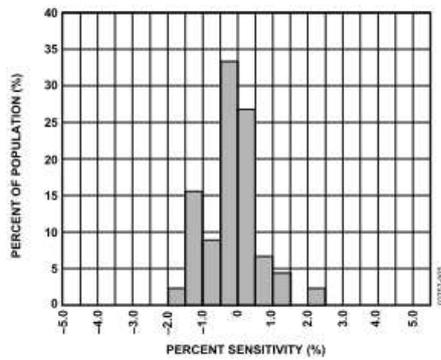


Figure 13. Z vs. X Cross-Axis Sensitivity

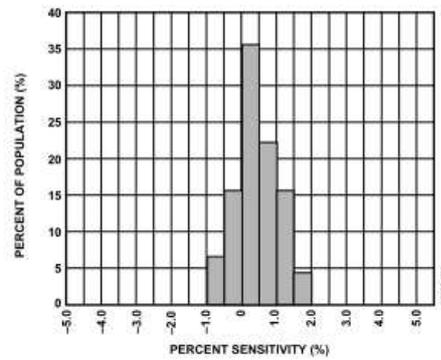


Figure 16. Z vs. Y Cross-Axis Sensitivity



**ADXL103/ADXL203**

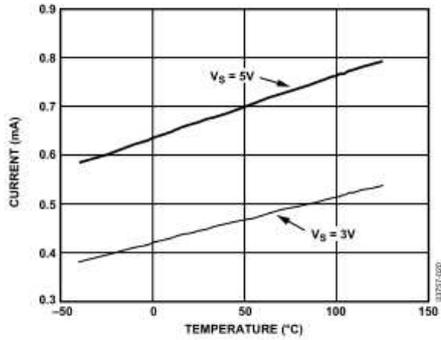


Figure 17. Supply Current vs. Temperature

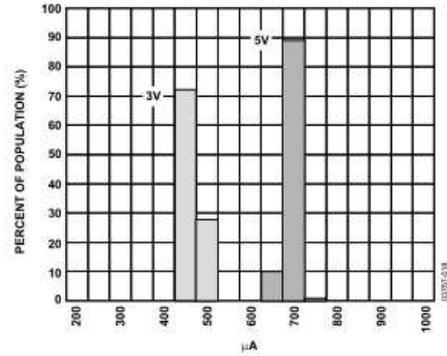


Figure 20. Supply Current at 25°C

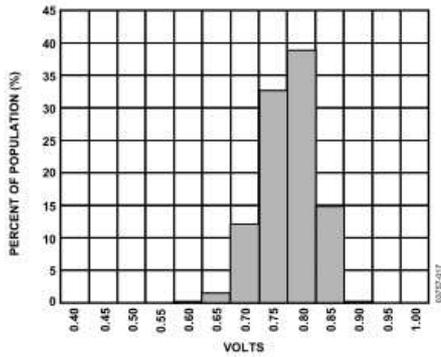


Figure 18. X-Axis Self-Test Response at 25°C

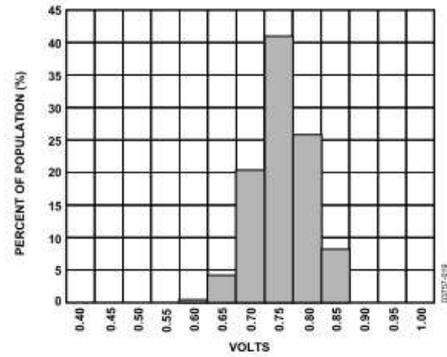


Figure 21. Y-Axis Self-Test Response at 25°C

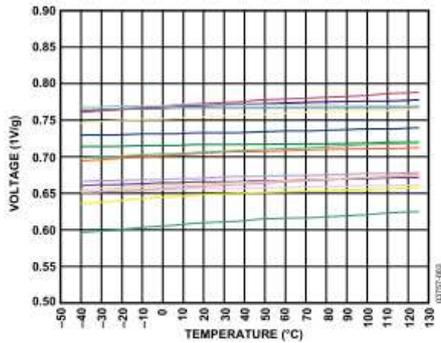


Figure 19. Self-Test Response vs. Temperature

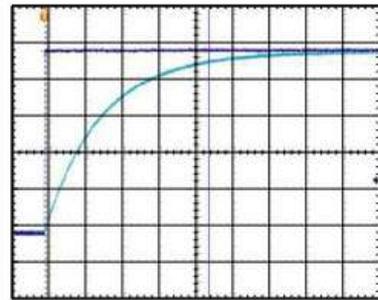


Figure 22. Turn-On Time –  $C_x, C_T = 0.1 \mu F$ , Time Scale = 2 ms/div



**ADXL103/ADXL203**

**THEORY OF OPERATION**

The ADXL103/ADXL203 are complete acceleration measurement systems on a single, monolithic IC. The ADXL103 is a single-axis accelerometer, and the ADXL203 is a dual-axis accelerometer. Both parts contain a polysilicon surface-micromachined sensor and signal conditioning circuitry to implement an open-loop acceleration measurement architecture. The output signals are analog voltages proportional to acceleration. The ADXL103/ADXL203 are capable of measuring both positive and negative accelerations to at least  $\pm 1.7 g$ . The accelerometer can measure static acceleration forces such as gravity, allowing it to be used as a tilt sensor.

The sensor is a surface-micromachined polysilicon structure built on top of the silicon wafer. Polysilicon springs suspend the structure over the surface of the wafer and provide a resistance against acceleration forces. Deflection of the structure is measured using a differential capacitor that consists of independent fixed plates and plates attached to the moving mass. The fixed plates are driven by 180° out-of-phase square waves. Acceleration deflects the beam and unbalances the differential capacitor, resulting in an output square wave whose amplitude is proportional to acceleration. Phase-sensitive demodulation techniques are then used to rectify the signal and determine the direction of the acceleration.

The output of the demodulator is amplified and brought off-chip through a 32 kΩ resistor. At this point, the user can set the signal bandwidth of the device by adding a capacitor. This filtering improves measurement resolution and helps prevent aliasing.

**PERFORMANCE**

Rather than using additional temperature compensation circuitry, innovative design techniques have been used to ensure that high performance is built in. As a result, there is essentially no quantization error or non-monotonic behavior, and temperature hysteresis is very low (typically less than 10 mg over the  $-40^{\circ}C$  to  $+125^{\circ}C$  temperature range).

Figure 11 shows the 0 g output performance of eight parts (x and y axes) over a  $-40^{\circ}C$  to  $+125^{\circ}C$  temperature range.

Figure 14 demonstrates the typical sensitivity shift over temperature for  $V_s = 5 V$ . Sensitivity stability is optimized for  $V_s = 5 V$  but is still very good over the specified range; it is typically better than  $\pm 1\%$  over temperature at  $V_s = 3 V$ .

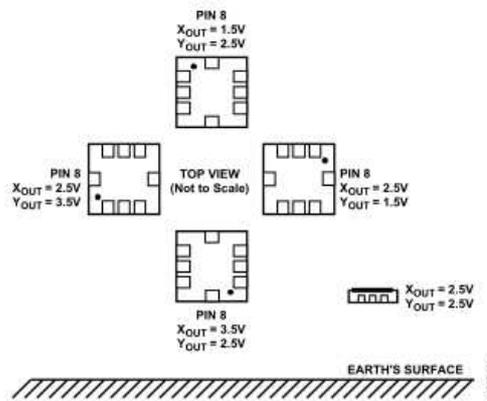


Figure 23. Output Response vs. Orientation



## ADXL103/ADXL203

### APPLICATIONS

#### POWER SUPPLY DECOUPLING

For most applications, a single 0.1 μF capacitor, C<sub>DC</sub>, adequately decouples the accelerometer from noise on the power supply. However in some cases, particularly where noise is present at the 140 kHz internal clock frequency (or any harmonic thereof), noise on the supply can cause interference on the ADXL103/ADXL203 output. If additional decoupling is needed, a 100 Ω (or smaller) resistor or ferrite beads can be inserted in the supply line of the ADXL103/ADXL203. Additionally, a larger bulk bypass capacitor (in the 1 μF to 22 μF range) can be added in parallel to C<sub>DC</sub>.

#### SETTING THE BANDWIDTH USING C<sub>X</sub> AND C<sub>Y</sub>

The ADXL103/ADXL203 has provisions for band limiting the X<sub>OUT</sub> and Y<sub>OUT</sub> pins. Capacitors must be added at these pins to implement low-pass filtering for antialiasing and noise reduction. The equation for the 3 dB bandwidth is

$$F_{-3dB} = 1/(2\pi(32\text{ k}\Omega) \times C_{(X,Y)})$$

or more simply,

$$F_{-3dB} = 5 \mu\text{F}/C_{(X,Y)}$$

The tolerance of the internal resistor (R<sub>FILT</sub>) can vary typically as much as ±25% of its nominal value (32 kΩ); thus, the bandwidth varies accordingly. A minimum capacitance of 2000 pF for C<sub>X</sub> and C<sub>Y</sub> is required in all cases.

**Table 6. Filter Capacitor Selection, C<sub>X</sub> and C<sub>Y</sub>**

Bandwidth (Hz)	Capacitor (μF)
1	4.7
10	0.47
50	0.10
100	0.05
200	0.027
500	0.01

#### SELF TEST

The ST pin controls the self-test feature. When this pin is set to V<sub>S</sub>, an electrostatic force is exerted on the beam of the accelerometer. The resulting movement of the beam allows the user to test if the accelerometer is functional. The typical change in output is 750 mg (corresponding to 750 mV). This pin can be left open-circuit or connected to common in normal use.

The ST pin should never be exposed to voltage greater than V<sub>S</sub> + 0.3 V. If the system design is such that this condition cannot be guaranteed (that is, multiple supply voltages are present), a low V<sub>F</sub> clamping diode between ST and V<sub>S</sub> is recommended.

#### DESIGN TRADE-OFFS FOR SELECTING FILTER CHARACTERISTICS: THE NOISE/BW TRADE-OFF

The accelerometer bandwidth selected ultimately determines the measurement resolution (smallest detectable acceleration). Filtering can be used to lower the noise floor, improving the resolution of the accelerometer. Resolution is dependent on the analog filter bandwidth at X<sub>OUT</sub> and Y<sub>OUT</sub>.

The output of the ADXL103/ADXL203 has a typical bandwidth of 2.5 kHz. The user must filter the signal at this point to limit aliasing errors. The analog bandwidth must be no more than half the analog-to-digital sampling frequency to minimize aliasing. The analog bandwidth can be further decreased to reduce noise and improve resolution.

The ADXL103/ADXL203 noise has the characteristics of white Gaussian noise, which contributes equally at all frequencies and is described in terms of μg/√Hz (that is, the noise is proportional to the square root of the accelerometer bandwidth). The user should limit bandwidth to the lowest frequency needed by the application to maximize the resolution and dynamic range of the accelerometer.

With the single pole roll-off characteristic, the typical noise of the ADXL103/ADXL203 is determined by

$$\text{rmsNoise} = (110 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}) \times (\sqrt{\text{BW} \times 1.6})$$

At 100 Hz, the noise is

$$\text{rmsNoise} = (110 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}) \times (\sqrt{100 \times 1.6}) = 1.4 \text{ mg}$$

Often, the peak value of the noise is desired. Peak-to-peak noise can only be estimated by statistical methods. Table 7 is useful for estimating the probabilities of exceeding various peak values, given the rms value.

**Table 7. Estimation of Peak-to-Peak Noise**

Peak-to-Peak Value	% of Time That Noise Exceeds Nominal Peak-to-Peak Value
2 × rms	32
4 × rms	4.6
6 × rms	0.27
8 × rms	0.006



**ADXL103/ADXL203**

Peak-to-peak noise values give the best estimate of the uncertainty in a single measurement; peak-to-peak noise is estimated by  $6 \times \text{rms}$ . Table 8 gives the typical noise output of the ADXL103/ADXL203 for various  $C_x$  and  $C_y$  values.

**Table 8. Filter Capacitor Selection ( $C_x, C_y$ )**

Bandwidth (Hz)	$C_x, C_y$ ( $\mu\text{F}$ )	RMS Noise (mg)	Peak-to-Peak Noise Estimate (mg)
10	0.47	0.4	2.6
50	0.1	1.0	6
100	0.047	1.4	8.4
500	0.01	3.1	18.7

**USING THE ADXL103/ADXL203 WITH OPERATING VOLTAGES OTHER THAN 5 V**

The ADXL103/ADXL203 is tested and specified at  $V_s = 5 \text{ V}$ ; however, it can be powered with  $V_s$  as low as 3 V or as high as 6 V. Some performance parameters change as the supply voltage is varied.

The ADXL103/ADXL203 output is ratiometric, so the output sensitivity (or scale factor) varies proportionally to supply voltage. At  $V_s = 3 \text{ V}$  the output sensitivity is typically 560 mV/g.

The zero g bias output is also ratiometric, so the zero g output is nominally equal to  $V_s/2$  at all supply voltages.

The output noise is not ratiometric but is absolute in volts; therefore, the noise density decreases as the supply voltage increases. This is because the scale factor (mV/g) increases while the noise voltage remains constant. At  $V_s = 3 \text{ V}$ , the noise density is typically 190  $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ .

Self-test response in g is roughly proportional to the square of the supply voltage. However, when ratiometricity of sensitivity is factored in with supply voltage, self-test response in volts is roughly proportional to the cube of the supply voltage. So at  $V_s = 3 \text{ V}$ , the self-test response is approximately equivalent to 150 mV or equivalent to 270 mg (typical).

The supply current decreases as the supply voltage decreases. Typical current consumption at  $V_{\text{DD}} = 3 \text{ V}$  is 450  $\mu\text{A}$ .

**USING THE ADXL203 AS A DUAL-AXIS TILT SENSOR**

One of the most popular applications of the ADXL203 is tilt measurement. An accelerometer uses the force of gravity as an input vector to determine the orientation of an object in space.

An accelerometer is most sensitive to tilt when its sensitive axis is perpendicular to the force of gravity, that is, parallel to the earth's surface. At this orientation, its sensitivity to changes in tilt is highest. When the accelerometer is oriented on axis to gravity, that is, near its +1 g or -1 g reading, the change in output acceleration per degree of tilt is negligible. When the accelerometer is perpendicular to gravity, its output changes nearly 17.5 mg per degree of tilt. At 45°, its output changes at only 12.2 mg per degree, and resolution declines.

**Dual-Axis Tilt Sensor: Converting Acceleration to Tilt**

When the accelerometer is oriented so both its x axis and y axis are parallel to the earth's surface, it can be used as a 2-axis tilt sensor with a roll axis and a pitch axis. Once the output signal from the accelerometer has been converted to an acceleration that varies between -1 g and +1 g, the output tilt in degrees is calculated as follows:

$$PITCH = ASIN(A_x/1 \text{ g})$$

$$ROLL = ASIN(A_y/1 \text{ g})$$

Be sure to account for overranges. It is possible for the accelerometers to output a signal greater than  $\pm 1 \text{ g}$  due to vibration, shock, or other accelerations.



**ADXL103/ADXL203**

**OUTLINE DIMENSIONS**

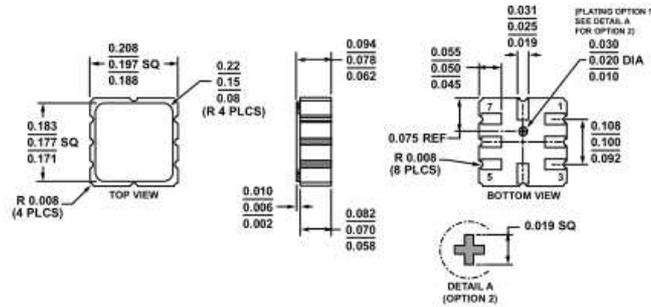


Figure 24. 8-Terminal Ceramic Leadless Chip Carrier [LCC] (E-8-1)  
Dimensions shown in inches

**ORDERING GUIDE**

Model <sup>1,2</sup>	Number of Axes	Specified Voltage (V)	Temperature Range	Package Description	Package Option
ADXL103CE	1	5	-40°C to +125°C	8-Terminal Ceramic LCC <sup>3</sup>	E-8-1
ADXL103CE-REEL	1	5	-40°C to +125°C	8-Terminal Ceramic LCC <sup>3</sup>	E-8-1
ADXL103WCEZB	1	5	-40°C to +125°C	8-Terminal Ceramic LCC	E-8-1
ADXL103WCEZB-REEL	1	5	-40°C to +125°C	8-Terminal Ceramic LCC	E-8-1
ADXL203CE	2	5	-40°C to +125°C	8-Terminal Ceramic LCC <sup>3</sup>	E-8-1
ADXL203CE-REEL	2	5	-40°C to +125°C	8-Terminal Ceramic LCC <sup>3</sup>	E-8-1
ADXL203WCEZB	2	5	-40°C to +125°C	8-Terminal Ceramic LCC	E-8-1
ADXL203WCEZB-REEL	2	5	-40°C to +125°C	8-Terminal Ceramic LCC	E-8-1
ADXL203EB				Evaluation Board	

<sup>1</sup> Z = RoHS Compliant Part.

<sup>2</sup> W = Qualified for Automotive Applications.

<sup>3</sup> Lead finish, Gold over nickel over tungsten.

**AUTOMOTIVE PRODUCTS**

The ADXL103W and ADXL203W models are available with controlled manufacturing to support the quality and reliability requirements of automotive applications. Note that these automotive models may have specifications that differ from the commercial models; therefore, designers should review the Specifications section of this data sheet carefully. Only the automotive grade products shown are available for use in automotive applications. Contact your local Analog Devices account representative for specific product ordering information and to obtain the specific Automotive Reliability reports for these models.



#### 7.4. Propositions de sujets de projets (en lien ou pas avec le projet réalisé)

Chimie verte : Les « Green » polymères : pouvons-nous synthétiser des polymères avec d'autres sources que le pétrole ?

Ce projet serait à la fois documentaire et expérimental : les élèves pourraient s'intéresser aux green polymères qui existent déjà (partie documentaire) mais aussi synthétiser au laboratoire leurs propres polymères (par exemple, synthétiser un polymère biodégradable à partir de l'amidon de pomme de terre). Ils pourraient ensuite comparer la biodégradabilité, la résistance, l'imperméabilité des polymères synthétisés avec d'autres polymères couramment utilisés.

