

Régis Barillé

La physique avec son téléphone portable

Licence
BUT
Écoles
d'ingénieurs

Expériences de physique
avec le téléphone portable
comme instrument de mesure



ellipses

I. Les capteurs du téléphone portable

Ce premier chapitre décrit les capteurs présents dans le téléphone, leurs principes de fonctionnement et leur interface. Les capteurs sont tous interfacés avec un choix d'applications gratuites ou payantes, sur les plateformes de téléchargements (Google Play store, Amazon Appstore, F-Droid, App store, ...) que ce soit sous les systèmes opératoires Android ou iOS. Les différents capteurs peuvent fonctionner simultanément. Le modèle du téléphone aura ses limites en termes de nombres de capteurs et en termes de résolutions des capteurs. Les modèles haut de gamme par exemple contiennent un capteur de pression que n'ont pas les modèles bas de gamme.

I.1 Présentation des capteurs

Les applications SensorLog (iPhone), AndroSensor (Android) (figure 1), ou PASCO's SPARKvue (iPhone et Android) permettent d'accéder aux données brutes des capteurs internes du téléphone portable. Pour commencer à découvrir les axes du téléphone, il faut ouvrir l'application (AndroSensor) et voir en temps réel les données de l'accéléromètre, comme le montre la figure 1.

Par exemple sur un Samsung S10 en ouvrant le clavier de téléphone et en composant *#0*# on accède au mode de diagnostic secret. On peut visualiser tous les capteurs du téléphone.

Les capteurs sont les suivant :

1. Accéléromètre
2. Capteur gyroscope
3. Magnétomètre (Boussole)
4. GPS (Global Positioning System)
5. Caméra
6. Capteur de proximité
7. Microphone
8. Capteur d'empreinte digitale
9. Capteur pedomètre
10. Capteur de pression (Baromètre)
11. Capteur de lumière ambiante
12. Capteur de température ambiante
13. Capteur d'humidité de l'air

I. Les capteurs du téléphone portable

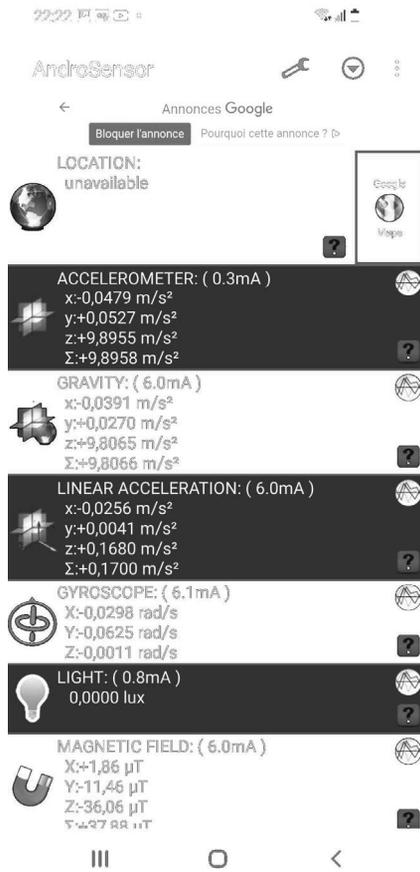


Fig. 1 : Liste des mesures permises avec l'application Androsensor 5

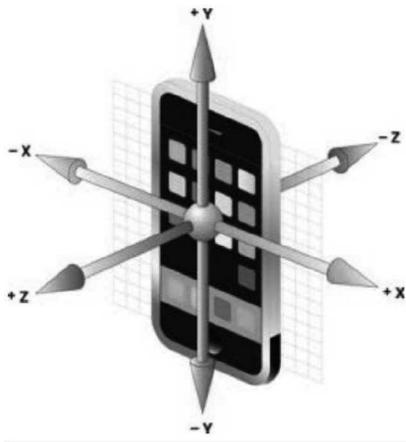


Fig. 2 : Orientation des axes du téléphone portable pour les mesures

I.2 Accéléromètre

Un accéléromètre détecte l'accélération, les vibrations et l'inclinaison pour déterminer le mouvement et l'orientation exacte le long des trois axes (x , y , z) (Fig. 2). Les applications du téléphone utilisent par exemple ce capteur pour déterminer si le téléphone est en orientation portrait ou paysage.

Il peut également dire si l'écran du téléphone est orienté vers le haut ou vers le bas. L'accéléromètre peut également détecter la vitesse à laquelle le téléphone se déplace dans n'importe quelle direction linéaire de l'espace.

On peut explorer l'effet de l'orientation du téléphone portable sur les données acquises et tenter de déterminer les axes du téléphone portable. Par exemple, on peut orienter le téléphone afin que le bord inférieur touche la surface de la table. Le graphique de la figure 3, aide à déterminer l'accélération lue par l'accéléromètre. Avec les valeurs lues par l'application on voit que $a_x = a_z = 0$ and $a_y = -1g$. On peut ainsi vérifier que l'axe y du téléphone portable court le long du téléphone. Les axes x et z peuvent se déterminer de la même manière.

On peut imaginer un accéléromètre comme un bloc entouré de 4 ressorts (fig. 3).

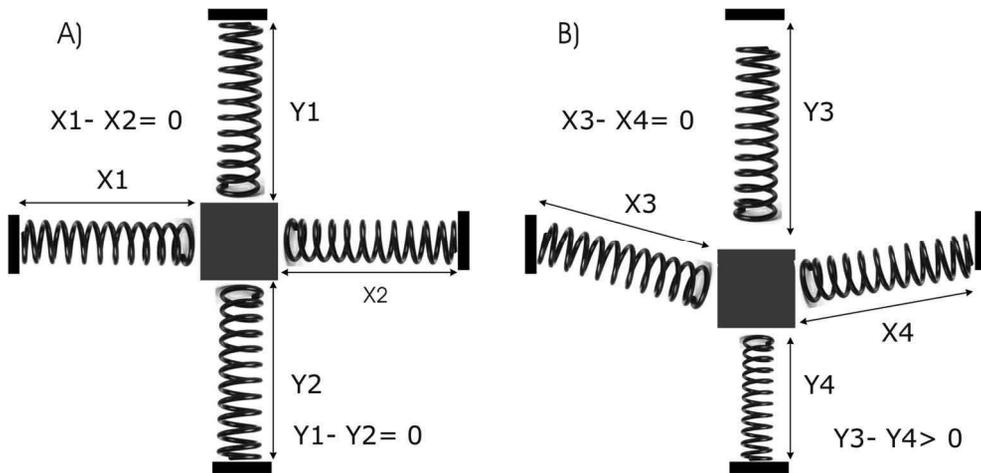


Fig. 3 : Modèle décrivant le fonctionnement d'un accéléromètre. a) le téléphone est posé à plat sur la table, b) le téléphone est redressé verticalement sur la table. La masse mobile bouge vers le bas.

L'accéléromètre du téléphone portable est composé de ressorts rattachés à une masse centrale, orientés le long des différents axes d'orientation du téléphone décrits précédemment x , y et z (fig. 3).

Si le téléphone est tenu verticalement, le poids de la masse du téléphone fera lire la valeur $-1g$ le long de l'axe y . Si, cependant, il est placé à plat, le ressort le long de l'axe y ne s'allongera pas et le ressort affichera une valeur de $0g$ (fig. 4).

I. Les capteurs du téléphone portable

ACCELEROMETER: (0.3mA) x:-0,2394 m/s ² y:+9,9291 m/s ² z:+0,2083 m/s ² Σ:+9,9342 m/s ²	ACCELEROMETER: (0.3mA) x:+0,0215 m/s ² y:+0,0215 m/s ² z:+9,8836 m/s ² Σ:+9,8836 m/s ²
GRAVITY: (6.0mA) x:-0,2609 m/s ² y:+9,8019 m/s ² z:+0,1591 m/s ² Σ:+9,8067 m/s ²	GRAVITY: (6.0mA) x:+0,0080 m/s ² y:+0,0442 m/s ² z:+9,8065 m/s ² Σ:+9,8066 m/s ²
LINEAR ACCELERATION: (6.0mA) x:0,0432 m/s ² y:+0,0985 m/s ² z:-0,3746 m/s ² Σ:+0,3897 m/s ²	LINEAR ACCELERATION: (6.0mA) x:+0,0135 m/s ² y:-0,0227 m/s ² z:+0,0770 m/s ² Σ:+0,0814 m/s ²

a)

b)

Fig. 4 : Valeur de l'accélération suivant les 2 position du téléphone. a) horizontalement à plat sur la table, b) tenu verticalement.

La figure 5 montre comment la masse dans la version simplifiée du modèle de l'accéléromètre est remplacée par une masse libre liée à la puce de l'accéléromètre uniquement par des bras en silicium équivalent à des ressorts.

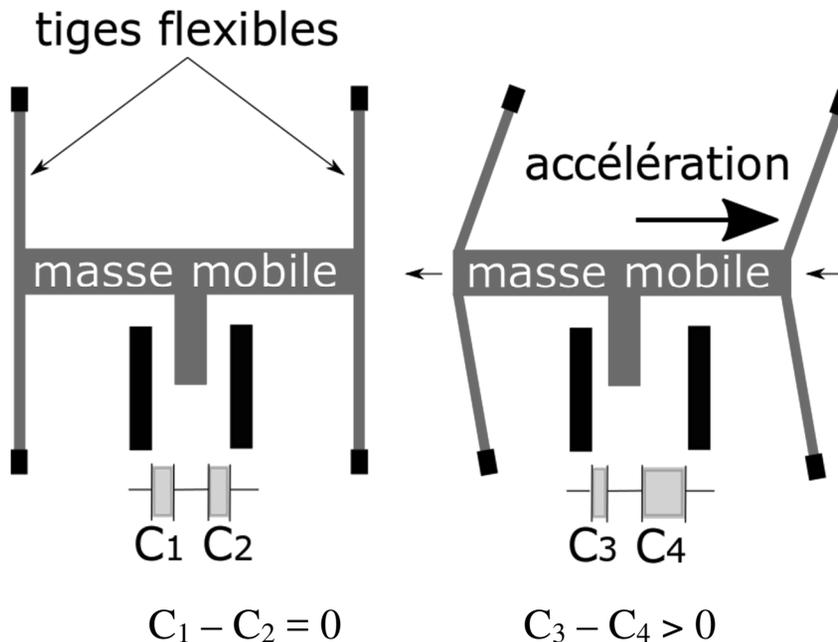


Fig. 5 : Modèle de fonctionnement du système micro-électromécanique (MEMS).

La puce de l'accéléromètre est fabriquée avec un système micro-électromécanique (MEMS) et se trouve à l'intérieur du boîtier du téléphone portable (fig. 6). L'orientation de l'appareil est convertie en un signal numérique utilisant des condensateurs variables, où la position des « dents » fixées à la masse libre par rapport au boîtier de l'accéléromètre détermine le courant traversant l'appareil. Un logiciel convertit la sortie de courant pour une lecture de l'accéléromètre.

On peut examiner la réponse d'une triple plaque de condensateurs différentiels (deux condensateurs en série qui partagent une plaque commune). Un condensateur différentiel à trois plaques évite le problème de la réponse non linéaire qui se produirait dans un condensateur à deux plaques avec plaques mobiles. Dans un tel cas, la capacitance (quand la séparation des plaques diminue d'une petite distance Δ) s'écrit comme :

$$C = \frac{\varepsilon A}{d - \Delta} = \frac{\varepsilon A}{d \left(1 - \frac{\Delta}{d}\right)} = \frac{\varepsilon A}{d} \left(1 + \frac{\Delta}{d} + \left(\frac{\Delta}{d}\right)^2\right)$$

Le problème de la dépendance non linéaire de Δ sur C (terme quadratique) peut être minimisé si on prend le condensateur différentiel à trois plaques. En considérant la différence de capacité entre deux condensateurs adjacents qui partagent une plaque médiane qui se déplace d'une petite distance Δ , on obtient :

$$C_{bas} - C_{haut} = \frac{\varepsilon A}{d - \Delta} - \frac{\varepsilon A}{d + \Delta} \simeq \frac{\varepsilon A}{d} \left(1 + \frac{\Delta}{d} + \left(\frac{\Delta}{d}\right)^2 - 1 + \frac{\Delta}{d} - \left(\frac{\Delta}{d}\right)^2\right) = \frac{\varepsilon A}{d} \left(\frac{2\Delta}{d}\right)$$

Il est nécessaire d'utiliser dans le calcul la relation : $\frac{1}{(x+y)} \approx 1 - \frac{y}{x} + \left(\frac{y}{x}\right)^2$ si y est beaucoup plus petit que x .

On considère que le changement entre les deux plaques est beaucoup plus petit que la distance de départ et on peut donc approximer la relation par une série de Taylor. Le terme quadratique donne une réponse non-linéaire et introduit une petite différence par rapport aux valeurs si on avait une fonction linéaire.

Résolution sur la mesure

La figure 7 montre la variation en fonction du temps des coordonnées Z et Y de l'accélération d'un téléphone posé à plat. On voit que l'amplitude du signal au repos est comparable pour les coordonnées Z et Y. Les mesures effectuées ont donné comme erreurs standards pour les coordonnées X : $30 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}^2$, Y = $400 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}^2$, Z = $2 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$. Les signaux de tension analogiques provenant des accéléromètres sont transmis à des convertisseurs analogiques/numériques (ADC), un pour chaque axe, qui échantillonnent les tensions jusqu'à 100 fois par seconde. Ces échantillons sont numérisés avec une résolution de 12 à 16 bits comme par exemple le Bosch Sensortec BMA-423 (12 bits), ou le BMA 280 (16 bits) utilisé dans l'iPhone 6s.

I. Les capteurs du téléphone portable

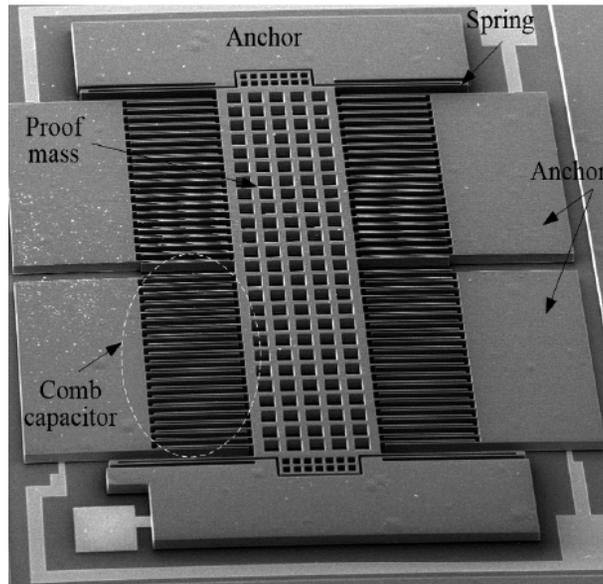


Fig. 6 : Puce micro-électromécanique (MEMS) fabriquée en silicium d'un accéléromètre [1].

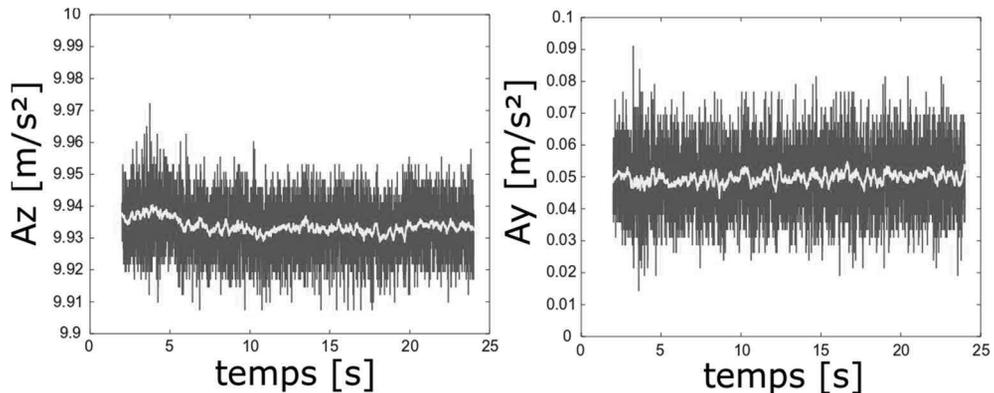


Fig. 7 : Mesure en fonction du temps des coordonnées Z et Y de l'accéléromètre posé à plat sur une table.

La sensibilité de mesure des accéléromètres MEMS est déterminée par la résolution des ADC et l'amplitude $\pm g$ de la sortie analogique. Pour un téléphone portable généralement réglé sur une amplitude de $\pm 2 g$ avec un convertisseur (ADC) de 14 bits, si 0-g est défini au milieu de la plage du convertisseur numérique analogique, alors avec 1 bit alloué au signe de la valeur mesurée, la résolution est de $1 g = 13$ bits (par exemple 8191 niveaux) pour une résolution (bit le moins significatif (LSB)) de $0,122 \text{ mg/LSB}$ or avec $1 g = 980 \text{ cm/s}^2$, $1 \text{ LSB} = 0,12 \text{ cm/s}^2$.

Un convertisseur ADC de 12 bits donne $0,488 \text{ mg/LSB}$ ou $0,48 \text{ cm/s}^2$.

Le capteur d'accélération tri-axial digital BMA-280 (2 mm x 2 mm) a une résolution numérique de 14 bits avec une résolution de 0.244 mg et une sensibilité de 4096 LSB/g pour une plage de mesure de ± 2 g. La bande passante va de 8 Hz - 500 Hz.

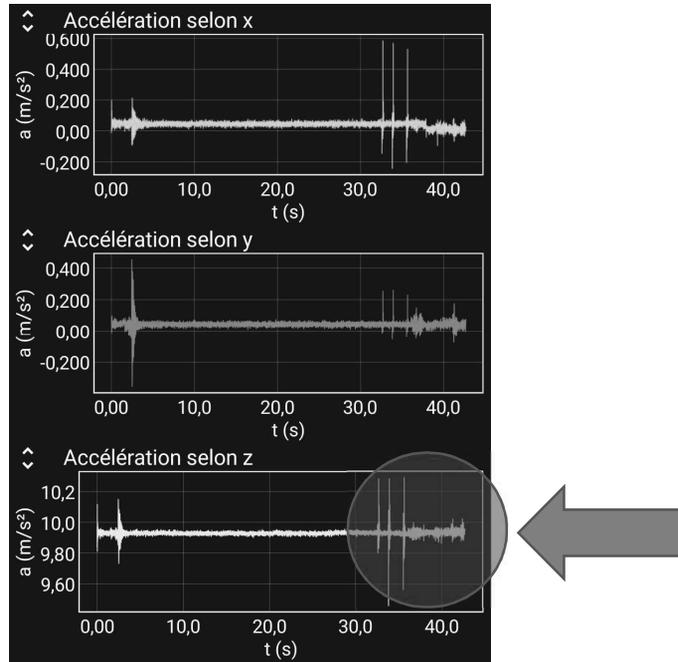


Fig. 7 : Acquisition des signaux de l'accéléromètre suivant les 3 axes. On voit qu'en tapant légèrement sur la face du téléphone provoque une variation brusque du signal. Le téléphone peut de cette manière être utilisée comme sismomètre.

Applications possibles pour téléphone

Sensor Kinetics Pro (Android et iOS) exporte les données de l'accéléromètre et d'autres données du capteur prises en charge sous forme de fichiers « .csv ». L'accélération locale est mesurée à $0,01 \text{ m/s}^2$ à une cadence de 30 Hz et offre un affichage graphique en temps réel des trois composantes de l'accélération du système.

➤ Physics Toolbox Sensor Suite (Android et iOS) est une collection de 20 fonctions de capteurs différents dans une seule application. Toutes les données des capteurs peuvent être enregistrées en appuyant sur un bouton. Les données peuvent être enregistrées dans un fichier « .csv » et transférées par mel ou partagées dans le cloud. En cliquant sur l'icône dans chaque mode il est possible d'obtenir des informations sur le nom du capteur, le fournisseur et le taux de collecte de données actuel, en plus d'une description du type de données collectées par le capteur, son principe de fonctionnement physique et les liens vers des ressources supplémentaires, notamment des pages Web et des vidéos illustrant son fonctionnement. Le modèle

Android permet de régler la cadence d'affichage de 420 Hz à 5 Hz. L'iOS du modèle fonctionne en mode fixe avec une cadence d'environ 200 Hz [2].

➤ MRE Acceleration meter (Android ; Programmation MRE) L'affichage numérique montre la composante verticale locale le long de l'axe Z actuel du téléphone portable à quatre chiffres en m/s^2 .

➤ Accelerometer : g-force meter (Android) fournit un affichage numérique pour 0.01 « unités g » (par exemple $0.1 m/s^2$) des lectures moyenne, maximale et minimale ainsi qu'un affichage graphique montrant le temps d'observation écoulé et l'accélération à 0.01 g.

➤ Accelerometer Meter (Android) fournit un affichage à 0.01 m/s^2 et la cadence d'échantillonnage peut être modifiée à l'aide d'un curseur de lent à rapide de 0.5 à 0.03 seconde.

L'enregistrement des données exportées peut être enregistré dans un fichier « .csv ».

➤ Accelerometer (iOS). L'application donne l'affichage en temps réel de l'accéléromètre avec exportation des données. La mesure de la cadence peut être modifiée avec un curseur de 1 à 30 Hz. Les unités sont mesurées et affichées à 0.001 g. L'application permet également d'exporter des fichiers « .csv ».

SparkVue (iOS) permet la journalisation des données et l'envoi d'e-mails avec un fichier .csv. L'affichage de l'accélération offre des mesures réglables à $0,1 m/s^2$.

I.3 Gyroscopie

Le gyroscopie fournit également des détails d'orientation et de directions comme haut/bas et gauche/droite, mais avec une plus grande précision comme par exemple l'inclinaison de l'appareil. C'est avec cette mesure qu'il diffère de l'accéléromètre. Le gyroscopie peut également mesurer la rotation, alors que l'accéléromètre ne le peut pas.

Le gyroscopie utilise un capteur de vibration avec un diapason accordable dans lequel une paire de broches sont faites pour résonner à leur fréquence naturelle (fig. 8).

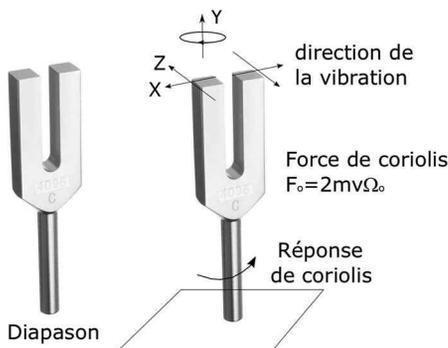


Fig. 8 : Mesure de la réponse au positionnement du gyroscopie avec un diapason.