



HAL
open science

Études quantitatives des accélérations d'inertie avec un smartphone Partie 2: accélération d'entraînement

Nicolas Combe, Renaud Mathevet, Patrice Marchou, Charlotte Fabre, Nabil Lamrani

► To cite this version:

Nicolas Combe, Renaud Mathevet, Patrice Marchou, Charlotte Fabre, Nabil Lamrani. Études quantitatives des accélérations d'inertie avec un smartphone Partie 2: accélération d'entraînement. Le Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie, 2023. hal-04226913

HAL Id: hal-04226913

<https://hal.science/hal-04226913>

Submitted on 4 Oct 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Études quantitatives des accélérations d'inertie avec un smartphone

Partie 2 : accélération d'entraînement⁽¹⁾

par Nicolas COMBE, Renaud MATHEVET⁽²⁾

Université Paul Sabatier - 31062 Toulouse
nicolas.combe@cemes.fr

Patrice MARCHOU⁽²⁾

Académie de Toulouse

Charlotte FABRE⁽²⁾

Lycée Déodat de Séverac - 31300 Toulouse

et Nabil LAMRANI⁽²⁾

Collège Claude Nougaro - 31200 Toulouse

A PRÈS UN PREMIER ARTICLE sur la mesure de l'accélération de Coriolis, nous décrivons dans cette deuxième partie une étude expérimentale de l'accélération d'entraînement. Cet article propose une expérience quantitative mesurant à la fois la composante radiale et, ce qui est plus original, la composante orthoradiale de l'accélération d'entraînement.

Les expériences permettant de mesurer les accélérations d'inertie d'entraînement sont plus faciles à mettre en œuvre que celles portant sur l'accélération de Coriolis. De précédentes études ont notamment montré comment mesurer la composante radiale de l'accélération d'entraînement, colinéaire et opposée à la force centrifuge [1-2]. L'utilisation des capteurs des smartphones facilite grandement la mise en œuvre de ces expériences. Dans le but de compléter notre précédent article sur l'accélération de Coriolis, nous proposons de décrire ici cette expérience simple et montrer comment l'utilisation du smartphone permet non seulement de mesurer quantitativement la composante radiale, mais aussi la composante orthoradiale de l'accélération d'entraînement rarement mise en évidence dans les travaux pratiques.

1. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

L'expérience proposée consiste à placer un smartphone sur un plateau tournant.

(1) **NDLR** : la partie 1 de cet article est parue dans *Le Bup* n° 1050 [3].

(2) Groupe recherche-formation « Smartphone instrument de mesure »
Institut de recherche sur l'enseignement des sciences de Toulouse
<https://ires.univ-tlse3.fr/sim>

À l'aide de l'application *Phyphox*, les accélérations et les vitesses angulaires, mesurées par les capteurs du smartphone en rotation, sont enregistrées en fonction de la position de l'appareil sur le plateau. Nous avons utilisé une platine de tourne-disque vinyle, mais tout autre plateau tournant peut être choisi. Avant de débiter l'expérience, il convient de s'assurer de l'horizontalité et de la planéité du plateau. Pour éviter son éjection du plateau, il peut être pertinent de fixer le smartphone sur la platine par un ruban adhésif. La figure 1 présente une photo de l'expérience.



Figure 1 - Photo de l'expérience, détermination de la position du capteur d'accélération.

2. MODÈLE THÉORIQUE

La figure 2 présente un schéma du dispositif expérimental utilisé. Les expériences durant de l'ordre de quelques dizaines de secondes, le référentiel terrestre (R) peut être considéré comme galiléen.

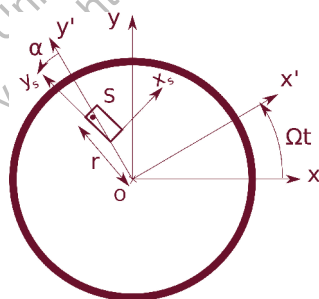


Figure 2 - Schéma du smartphone posé sur une platine de tourne-disque.

Soit le référentiel (R') lié à la platine du tourne-disque et Ω le vecteur rotation de (R') par rapport à (R). Soit $(Oxyz)$ et $(Ox'y'z')$ des repères fixes respectivement dans (R) et (R') et $(\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z)$ et $(\mathbf{e}_{x'}, \mathbf{e}_{y'}, \mathbf{e}_{z'})$ les bases unitaires orthonormées associées. Oz et Oz' sont confondus avec l'axe de rotation de la platine.

Le smartphone est immobile dans le référentiel (R'). Le capteur d'accélération (dont le principe est décrit dans [3]) donne les accélérations dans trois directions

(x_s, y_s, z_s) liées à la coque du smartphone. L'axe z_s du smartphone est supposé parallèle aux axes Oz et Oz' si bien que $\mathbf{\Omega} = \mathbf{\Omega} \mathbf{e}_z$. Soit l'angle $\alpha = (\text{O}y' \text{O}y_s)$.

Nous considérons comme système le capteur d'accélération du smartphone supposé ponctuel et situé au point S à une distance $r = OS$. La relation entre les accélérations du point S dans les référentiels (R) et (R') s'écrit :

$$\mathbf{a}(S)|_R = \mathbf{a}(S)|_{R'} + \mathbf{a}_{ie} + \mathbf{a}_{ic}$$

avec \mathbf{a}_{ie} et \mathbf{a}_{ic} les accélérations d'inertie d'entraînement et de Coriolis. Puisque le smartphone et donc ses capteurs sont immobiles dans (R') , $\mathbf{a}(S)|_{R'} = \mathbf{0}$ et $\mathbf{a}_{ic} = \mathbf{0}$.

L'accélération dans le référentiel (R) , c'est-à-dire, l'accélération mesurée *via* les accéléromètres du smartphone, est égale à l'accélération d'entraînement :

$$\mathbf{a}(S)|_R = \mathbf{a}_{ie}$$

L'accélération d'inertie d'entraînement en un point S est donnée par :

$$\mathbf{a}_{ie} = \frac{d\mathbf{\Omega}}{dt} \wedge \mathbf{OS} + \mathbf{\Omega} \wedge (\mathbf{\Omega} \wedge \mathbf{OS}) = -\dot{\Omega} r \mathbf{e}_{x'} - \Omega^2 r \mathbf{e}_{y'}$$

L'expérience décrite ci-dessous consiste à mesurer les accélérations orthoradiale et radiale à l'aide des accéléromètres du smartphone dans (R) et à les comparer respectivement à $\dot{\Omega} r$ et $\Omega^2 r$ où Ω est mesuré par les gyromètres.

3. MISE EN ŒUVRE EXPÉRIMENTALE

3.1. Position du capteur d'accélération

Nous commençons par déterminer la position du capteur d'accélération du smartphone. Pour ce faire, le smartphone est placé sur le tourne-disque en rotation et l'accélération est mesurée au moyen de l'application *Phyphox*. Nous répétons cette expérience en déplaçant successivement le smartphone jusqu'à obtenir une accélération mesurée nulle sur les axes x_s et y_s : le capteur d'accélération du smartphone est alors positionné sur l'axe de rotation du tourne-disque. Cette position est repérée en plaçant par exemple une feuille adhésive sur l'écran du téléphone et en pointant la position de l'axe de rotation avec une incertitude de l'ordre de quelques millimètres pour un travail soigné (cf. figure 1, page ci-contre).

3.2. Accélérations mesurées par le smartphone

Le smartphone est ensuite placé dans une autre position sur la platine (cf. figure 2, page ci-contre) et la distance r entre l'axe de rotation de la platine et le capteur d'accélération est mesurée au millimètre près à l'aide d'un réglet. L'application *Phyphox* est paramétrée pour enregistrer simultanément les données des capteurs d'accélération et gyroscopiques. Un grand soin est pris pour positionner le smartphone de manière à

annuler (autant que faire se peut) l'angle α . Pour $\alpha = 0$, (Oy) est confondu avec (Oy') et les composantes de l'accélération mesurées selon x_s et y_s correspondent respectivement aux composantes orthoradiale et radiale. Puisque l'axe (Oz_s) est parallèle à l'axe (Oz) de (R) , la composante ω_{z_s} du vecteur rotation mesurée par le smartphone selon (Oz_s) permet d'en déduire le vecteur rotation Ω de (R') par rapport à (R) $\Omega = \omega_{z_s} \mathbf{e}_{z_s}$.

3.3. Protocole expérimental

Dans de nombreux protocoles [4], la platine (ou son équivalent) est mise en rotation et l'accélération radiale est mesurée en fonction du carré de la vitesse de rotation et de la distance du capteur. Nous proposons une procédure un peu différente.

L'enregistrement des données est déclenché alors que la platine est au repos. La platine est mise en mouvement à la main (sans moteur) jusqu'à une vitesse angulaire de l'ordre d'un tour par seconde, elle est ensuite freinée, également à la main, de sorte que l'arrêt se produise en quelques secondes. Plusieurs lancements puis freinages sont effectués à la suite sans arrêter l'enregistrement. L'intérêt de ce protocole est d'induire des variations significatives de la vitesse angulaire ω_{z_s} ce qui permet de mesurer à la fois les composantes radiale et orthoradiale de l'accélération d'entraînement.

3.4. Résultats

Les figures 3A et 3B (cf. page ci-contre) montrent les composantes $a_{x_s} = \mathbf{a}|_R \cdot \mathbf{e}_{x_s}$ et $a_{y_s} = \mathbf{a}|_R \cdot \mathbf{e}_{y_s}$ de l'accélération mesurée par le smartphone et la composante ω_{z_s} vitesse angulaire selon z_s en fonction du temps pour trois lancements et freinages successifs.

La figure 4A (cf. page ci-contre) est l'analyse classique de l'accélération d'entraînement. L'accélération radiale a_{y_s} est représentée en fonction de $\omega_{z_s}^2$ pour deux positions du smartphone $r_1 = 8,9 \pm 0,2$ cm et $r_2 = 19,5 \pm 0,2$ cm. Les incertitudes sur les distances r_1 et r_2 tiennent compte à la fois de l'incertitude de lecture sur le réglet et de l'incertitude sur la position du capteur déterminé préalablement.

La figure 4A (cf. page ci-contre) rend bien compte d'une accélération radiale a_{y_s} variant linéairement avec $\omega_{z_s}^2$: une régression linéaire donne respectivement $r_{1\text{exp}} = 8,753 \pm 0,003$ cm et $r_{2\text{exp}} = 19,516 \pm 0,006$ cm compatible, aux incertitudes près, avec les mesures effectuées au réglet.

La figure 4B (cf. page ci-contre) présente l'accélération orthoradiale a_{x_s} selon x_s en fonction de la dérivée $\frac{d\omega_{z_s}}{dt} = \dot{\Omega}$ de la vitesse angulaire. Cette dernière a été obtenue par différence finie puis nous avons effectué une moyenne glissante sur vingt points pour limiter le bruit généré par la dérivation numérique. Pour $r_1 = 8,9$ cm, nous retrouvons à nouveau une variation linéaire comme prédit par l'expression théorique dont la valeur absolue de la pente $8,72 \pm 0,03$ cm est à nouveau en bon accord

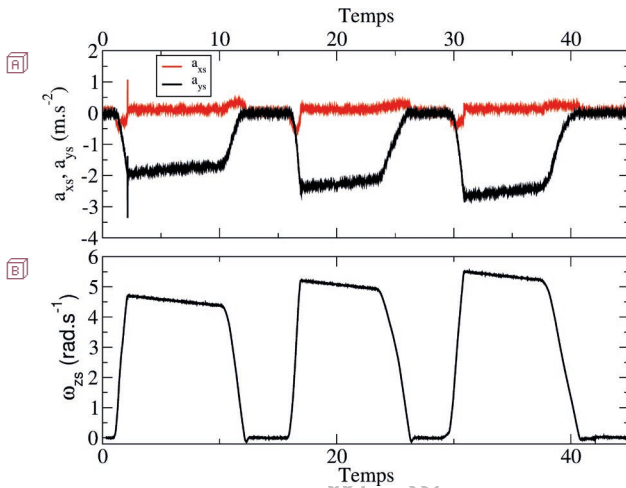


Figure 3 - (a) Accélération d'entraînement a_{x_s} (rouge) et a_{y_s} (noir) mesurées en fonction du temps et **(b)** vitesse angulaire ω_{z_s} en fonction du temps. Expérience pour $r_1 = 8,9$ cm.

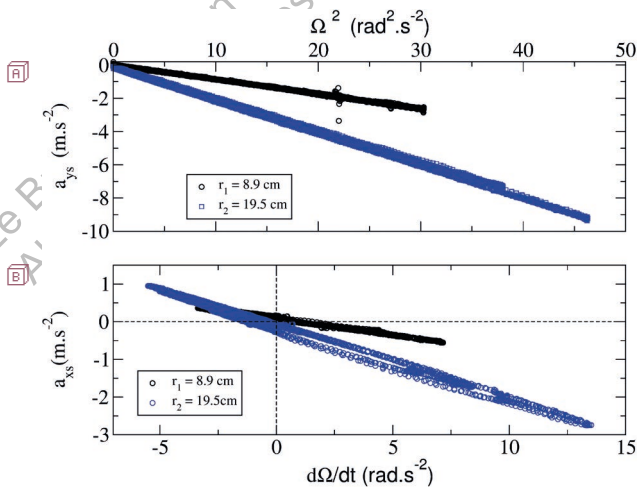


Figure 4 - (a) Accélérations mesurée a_{y_s} en fonction du carré de la vitesse angulaire pour $r_1 = 8,9$ cm (noir) et $r_2 = 19,5$ cm (bleu) - **(b)** Accélération mesurée a_{x_s} en fonction de $d\Omega/dt$.

avec la distance entre le capteur d'accélération et l'axe de rotation mesurée au réglelet $r_1 = 8,9 \pm 0,2$ cm.

Pour $r_2 = 19,5$ cm, la variation linéaire est entachée d'une dispersion des points plus significative et présente une allure elliptique. Une régression linéaire donne un coefficient de $19,42 \pm 0,03$ cm à nouveau en bon accord avec la distance $r_2 = 19,5 \pm 0,2$ cm mesurée au réglelet. Si ce résultat est en soi globalement satisfaisant, il est possible d'aller un peu plus loin dans l'analyse.

3.5. Positionnement du smartphone

L'apparition de formes elliptiques dans la figure 4B (cf. page précédente) a pour cause un angle α (cf. figure 2 pages précédentes) non rigoureusement nul.

Si l'angle α , un des paramètres du positionnement, n'est pas nul, les composantes de l'accélération mesurées selon x_s et y_s ne correspondent plus aux composantes orthoradiale et radiale :

$$\begin{aligned} a_{x'} &= \cos(\alpha) a_x - \sin(\alpha) a_y, \\ a_{y'} &= \sin(\alpha) a_x + \cos(\alpha) a_y. \end{aligned} \quad (1)$$

L'accélération radiale a une composante selon x_s , significative même pour un angle α de l'ordre du degré. Cela est confirmé par la valeur non nulle de $a_{x'}$ lorsque ω_z est maximum et quasiment constant comme observé sur la figure 5A, cf. page ci-contre) par exemple entre 12 et 17 s (expérience pour $r_2 = 19,5$ cm). Nous avons déterminé le paramètre α en minimisant la somme des carrés des résidus lors de l'ajustement affine de $a_{x'}$ en fonction de $\dot{\Omega}$.

La minimisation donne des angles $\alpha = -0,02$ rad pour $r_1 = 8,9$ cm et $\alpha = 0,02$ rad pour $r_2 = 19,5$ cm, soit des erreurs d'alignement tout à fait raisonnables de l'ordre de 1° . La figure 5B (cf. page ci-contre) montre le détail de l'accélération orthoradiale $a_{x'}$ corrigée dont la valeur s'annule bien lorsque ω_z est maximum et quasiment constant. Les figures 6A et 6B (cf. page ci-contre) présentent l'accélération radiale $a_{y'}$ et orthoradiale $a_{x'}$ corrigées en fonction de ω_z^2 et $\frac{d\omega_z}{dt} = \dot{\Omega}$. La dispersion des points est réduite par rapport aux données brutes de la figure 4 (cf. page précédente). Les pentes des régressions linéaires ne sont pas significativement modifiées : les valeurs obtenues diffèrent de moins de 0,1 % par rapport à l'analyse de la figure 4 (cf. page précédente).

Signalons pour finir que nous avons effectué ces expériences avec différents smartphones et présenté ici nos meilleurs résultats. Avec un autre smartphone, nous avons obtenu un décalage systématique dans la détermination de r_{exp} que nous avons attribué à un problème d'étalonnage des accéléromètres et/ou des gyromètres.

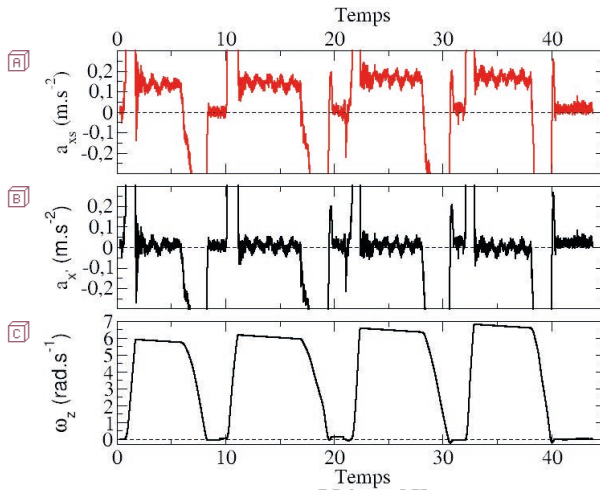


Figure 5 - (a) et (b) Détail de l'accélération a_r et a_x en fonction du temps -
 (c) Vitesse angulaire ω_z en fonction du temps.
 Expérience pour $r_2 = 19,5$ cm.

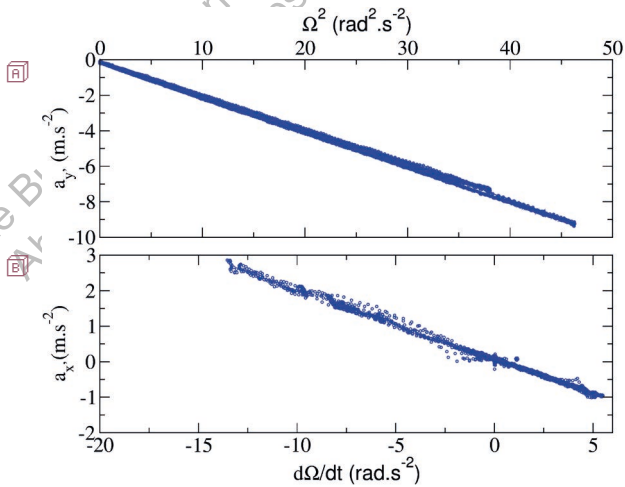


Figure 6 - (a) Accélérations radiale a_y en fonction du carré de la vitesse angulaire pour $r_2 = 19,5$ cm - (b) Accélération orthoradiale a_x en fonction de $d\Omega/dt$.

CONCLUSION

Dans cet article en deux parties, nous avons étudié quantitativement, avec des moyens couramment disponibles dans les laboratoires de TP, l'ensemble des accélérations d'inertie à l'aide d'un smartphone. L'accord entre les grandeurs mesurées et les modélisations proposées est de l'ordre de quelques pourcents. Ces résultats nous semblent convaincants et à même de rendre plus concret ce chapitre si difficile pour nos étudiants de première année post-baccalauréat.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. Collignon, «Force centrifuge : expériences à vitesse de rotation réduite», *Bull. Un. Phys.*, vol. 69, n° 575, p. 1115-1117, juin 1975.
- [2] T. Lewowski, L. Lewowska and P. Mazur, "Measurement of the effect of Coriolis and centrifugal forces on the trajectory of a body in a rotating frame", *Eur. J. Phys.*, vol. 20, n° 2, p. 109-116, 1999.
- [3] N. Combe, R. Mathevet, P. Marchou, C. Fabre et N. Lamrani, «Études quantitatives des accélérations d'inertie avec un smartphone - Partie 1 : accélération de Coriolis», *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 117, n° 1050, p. 51-63, janvier 2023.
- [4] G. Organtini, *Physics Experiments with Arduino and Smartphones*, Springer, 2021.



Nicolas COMBE

Enseignant chercheur
Université Paul Sabatier
Toulouse (Haute-Garonne)



Renaud MATHEVET

Enseignant chercheur
Université Paul Sabatier
Toulouse (Haute-Garonne)



Patrice MARCHOU

IA-IPR honoraire
Toulouse (Haute-Garonne)



Charlotte FABRE

Professeur PCSI
Lycée Déodat de Séverac
Toulouse (Haute-Garonne)



Nabil LAMRANI

Professeur
Collège Claude Nougaro
Toulouse (Haute-Garonne)