

# Pendule à la maison avec un smartphone

par **Charlotte FABRE**<sup>(1)</sup>

Lycée Déodat-de-Séverac - 31300 Toulouse  
charlotte.fabre@ac-toulouse.fr

**Nabil LAMRANI**<sup>(1)</sup>

Collège Claude Nougaro - 31200 Toulouse

**Patrice MARCHOU**<sup>(1)</sup>

Toulouse

et **Renaud MATHEVET**<sup>(1)(2)</sup>

LNCMI - Université Toulouse III - 31400 Toulouse

**D**ANS LE CONTEXTE sanitaire particulier du premier confinement relatif à la Covid-19 au printemps 2020, l'usage des smartphones s'est répandu pour pratiquer la physique expérimentale à la maison [1-2]. Nous avons ainsi proposé à des étudiants de première année de CPGE (Classe préparatoire aux grandes écoles) l'étude a priori très classique d'une pendule. Notre objectif était toutefois ambitieux du point de vue pédagogique et visait à initier les étudiants à une démarche expérimentale approfondie. En effet, l'abondance et la qualité des données permettent une analyse quantitative poussée sous Python qui permet de discuter des effets au-delà de l'approximation harmonique. Après une présentation du dispositif, de sa modélisation et des différentes données du problème, nous détaillerons l'exploitation progressivement raffinée des mesures que nous avons mise en place. Dans une seconde partie, nous proposons une réflexion critique sur ce qui fut pour nous une première expérience en pédagogie expérimentale à distance ainsi que les progrès réalisés l'année suivante dans un contexte moins contraint.

## 1. PRÉSENTATION DU DISPOSITIF

### 1.1. Conception de l'expérience

Le montage que les étudiants avaient à faire eux-mêmes est présenté sur la figure 1A (cf. page ci-après). Il est réalisable avec du matériel courant. Un smartphone est glissé dans une enveloppe, éventuellement de papier bulle, puis accroché par deux fils parallèles à un support fixe, comme une tringle à rideaux. Les fils sont aussi longs que possible (un à deux mètres).

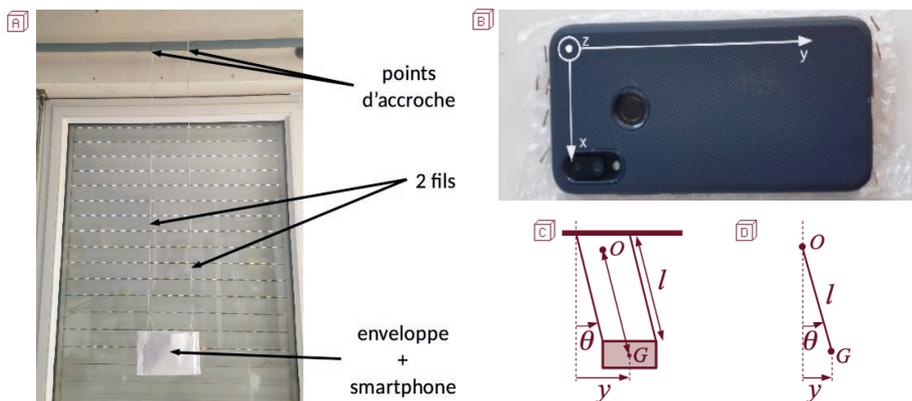
(1) Groupe recherche-formation « Smartphone instrument de mesure »

Institut de recherche sur l'enseignement des sciences de Toulouse  
<https://ires.univ-tlse3.fr/sim/>

(2) Laboratoire national des champs magnétiques intenses (LNCMI-CNRS)

UGA, UPS, INSA, EMFL - 31400 Toulouse et 38042 Grenoble

Le système {enveloppe + smartphone} oscille de profil pour limiter la traînée aérodynamique. On note  $\theta$  l'angle que fait le pendule avec la verticale et, en accord avec la désignation des capteurs dans le smartphone,  $y$  le déplacement horizontal (cf. figures 1B et 1C).



**Figure 1** - (A) Photo du montage - (B) Axe de l'accéléromètre - (C) Schéma du système et notations utilisées.  $G$  désigne le centre de gravité du système {enveloppe + smartphone} (rectangle gris). Le système est en translation circulaire : tous les points décrivent des cercles de rayon  $OG=l$ . (D) Modèle du système sous forme de pendule simple.

## 1.2. Acquisition et données brutes

L'application *Phyphox* [3] est utilisée ici, car elle permet de piloter très facilement le smartphone à distance depuis un ordinateur. On écarte le système {enveloppe + smartphone} de sa position d'équilibre d'un petit angle  $\theta_0$  par rapport à la verticale et on le lâche sans vitesse initiale. La principale difficulté est de limiter les oscillations hors du plan vertical. On pourra à cet effet, attacher le système en position initiale avec un fil de couture que l'on coupera avec des ciseaux. Typiquement, on écarte de  $y_0 = 5$  cm soit  $\theta_0$  de l'ordre de  $3^\circ$  pour une longueur de fil d'un mètre environ. L'acquisition est lancée après quelques secondes pour laisser les mouvements parasites s'atténuer.

Les données brutes sont représentées sur la figure 2 (cf. page ci-contre). L'accélération selon  $y$  est la plus pertinente. Par construction, la dissipation dans le système est faible et l'on peut acquérir des centaines d'oscillations avant d'observer une décroissance significative de l'amplitude du mouvement. Nous sommes donc idéalement dans le cas d'un oscillateur faiblement amorti.

## 1.3. Modèle théorique

Une spécificité de la suspension à deux fils est que le système est en translation circulaire : tous les points du système ont des trajectoires circulaires de centres distincts

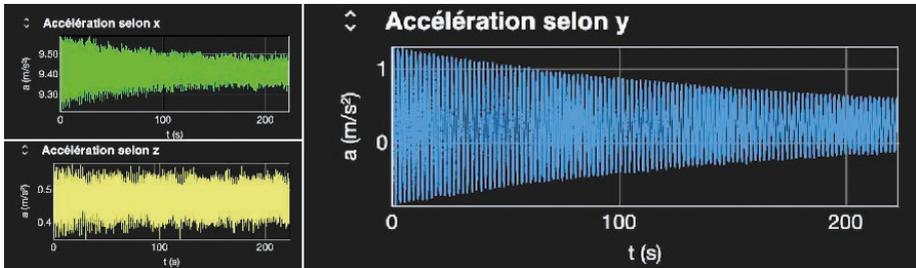


Figure 2 - Données brutes acquises avec l'application *PhyPhox* (copie d'écran).

et de rayons égaux à  $l$  la longueur des fils. Ils ont alors même vecteur vitesse et même accélération. Ainsi, l'étude se ramène à celle d'un pendule simple constitué d'une masse ponctuelle, placée en  $G$ , égale à la masse du système et tournant autour d'un point  $O$  fictif tel que  $OG = l$  (cf. figure 1D, page ci-contre).

La mise en équation est très classique [4] et conduit à l'équation non linéaire d'un oscillateur amorti par frottements visqueux :

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{d\theta}{dt} + \omega_0^2 \sin(\theta) = 0 \quad (1)$$

où  $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$  désigne la pulsation propre et  $Q$  le facteur de qualité. Il est de l'ordre de quelques centaines ici et difficile à déterminer quantitativement. Nous le prendrons comme un paramètre ajustable du problème.

Étant donné qu'avec les conditions initiales choisies l'angle  $\theta$  reste petit, il est d'usage de linéariser l'équation du mouvement en assimilant  $\sin(\theta)$  à  $\theta$  :

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{d\theta}{dt} + \omega_0^2 \theta = 0. \quad (2)$$

C'est l'équation d'un oscillateur harmonique amorti dont la solution est :

$$\theta(t) = \theta_0 e^{-t/\tau} \cos\left(\frac{2\pi}{T_0} t + \varphi\right) \quad (3)$$

en notant le temps d'amortissement de l'amplitude  $\tau = \frac{QT_0}{\pi}$  et en identifiant la pseudo-période à la période propre  $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$  du fait de la grande valeur du facteur de qualité.

L'objectif proposé aux élèves est de déterminer la pseudo-période  $T_0$  avec la meilleure précision possible et d'évaluer la pertinence du modèle.

## 2. EXPLOITATION DES DONNÉES

### 2.1. Principe

L'application *PhyPhox* permet d'importer très facilement les données au format

.csv afin de les exploiter dans un programme Python [5]. Parmi les trois accélérations enregistrées par le capteur, nous ne considérerons que l'accélération selon  $y$ . Dans le cas des petites oscillations, on peut négliger les termes d'ordre 3 en  $\theta$  dans l'accélération. De plus, le faible amortissement permet de négliger les termes en  $\frac{1}{\tau}$  devant ceux en  $\omega_0$  dans les dérivées successives de  $\theta$  donné dans l'équation (3). Avec ces considérations, il vient :

$$a_y(t) = l \frac{d^2 \theta}{dt^2} \cos(\theta) - l \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2 \sin(\theta) \approx l \frac{d^2 \theta}{dt^2} \approx -l \left( \frac{2\pi}{T_0} \right)^2 \theta_0 e^{-t/\tau} \cos\left( \frac{2\pi}{T_0} t + \varphi \right). \quad (4)$$

Ainsi, l'accélération selon  $y$  est proportionnelle à  $\theta(t)$  et donc de même période.

Plusieurs méthodes sont couramment employées pour estimer  $T_0$  :

- ◆ On peut prendre la FFT de l'enregistrement et pointer le maximum du pic. Cependant, le signal n'étant pas périodique à cause du terme d'amortissement, il n'y a aucune raison que le maximum du pic de FFT coïncide avec la fréquence propre. Cela fournit toutefois une première estimation avec une précision relative de l'ordre de la largeur relative du pic :  $1/Q$ .
- ◆ On peut mesurer la durée  $T_N$  d'un grand nombre  $N$  de pseudo-périodes et estimer  $T_0$ . La précision relative est légèrement meilleure, car, pour peu que l'enregistrement soit suffisamment long, le nombre  $N$  d'oscillations d'amplitude notable est de l'ordre de  $Q$ . Mais, comme le rapport signal sur bruit et la dynamique des capteurs sont excellents, on peut pointer les passages par zéro avec une précision accrue (cf. *infra*).

Ces deux procédures sont toutefois entachées d'un biais conceptuel : elles admettent les hypothèses du modèle comme *a priori* vérifiées. Cependant, avec l'excellente qualité et l'abondance des mesures que fournissent les smartphones, il est dommage de se limiter à ces deux méthodes. Un des buts pédagogiques recherchés en exploitant au mieux les données est ainsi d'inverser la tendance quasi unanimement répandue chez les étudiants qui consiste à penser que les données expérimentales doivent vérifier le modèle du cours et non que le modèle doit rendre compte des mesures à disposition.

## 2.2. Mesure de la pseudo-période

Le modèle (équation 4) prédit des passages par zéro de l'accélération  $a_y(t)$ , régulièrement espacés, toutes les demi-pseudo-périodes. Le pointé des passages de  $a_y(t)$  par zéro fournit donc une méthode directe pour déterminer  $T_0$  [6].

### 2.2.1. Correction de ligne de base

Avant toute chose, pour minimiser un biais éventuel, il convient de recentrer  $a_y$  autour de zéro (correction de ligne de base ou d'*offset*). On élimine quelques points de mesures en début et fin d'enregistrement pour conserver un nombre quasi entier de périodes. On en calcule la valeur moyenne que l'on soustrait à l'enregistrement.

Ensuite, la démarche que nous avons proposée aux étudiants pour mesurer la pseudo-période commence par un algorithme intuitif et simple à mettre en œuvre sous *Python*. On obtient une première estimation de  $T_0$  et on prend conscience des limites de l'algorithme utilisé. Un autre, plus performant, mais plus sophistiqué est alors mis en place. Il permet de révéler des détails plus fins dans les données. On implémente ainsi un, voire plusieurs allers-retours entre analyse des données et modélisation.

### 2.2.2. Méthode d'ordre 0

Le premier algorithme implémenté consiste à créer un tableau de signe de l'accélération que nous noterons symboliquement  $s[i] = \text{Signe}(a_y[i])$  l'indice  $i$  correspondant au temps d'acquisition  $t_i$ . Puis de former la différence  $d[i] = s[i+1] - s[i]$  qui n'est non nulle que si l'accélération change de signe entre  $t_{i+1}$  et  $t_i$ . On repère les indices  $k$  pour lesquels  $d[k] \neq 0$  pour déterminer les instants de passage par zéro notés  $t_k$ .

Le résultat est... catastrophique ! En effet, à cause du bruit inhérent aux capteurs, on observe une multitude de passages par zéro à chaque instants  $t_k$  (cf. figure 3B).

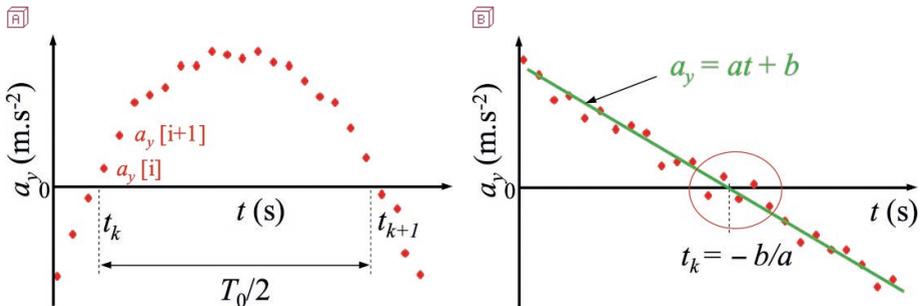


Figure 3 - (A) Dans un cas idéal, l'instant  $t_k$  de passage de l'accélération  $a_y$  par zéro est estimé par le changement de signe de  $a_y$ . (B) À cause du bruit des capteurs  $a_y$  change plusieurs fois de signe (cercle rouge). On peut isoler quelques dizaines de points autour de chaque bloc de passages par zéro et leur appliquer une modélisation affine. On déduit  $t_k$  des paramètres de l'ajustement.

Une première façon de contourner le problème est d'utiliser l'estimation de la pseudo-période par la FFT initiale. On prend pour  $t_1$  l'instant du premier passage par zéro. On sélectionne ensuite pour  $t_2$  le premier passage par zéro qui dépasse  $t_1$  d'un quart de période estimée, par exemple. On recommence ensuite récursivement.

Ce premier échec relatif est donc instructif : il confronte à l'abondance des données et au bruit d'acquisition. Plusieurs raffinements sont alors laissés à l'initiative des étudiants les plus à l'aise en *Python*. On peut, par exemple, isoler les blocs de points autour des passages par zéro et en faire ensuite la moyenne. Poursuivant dans cette direction on peut suggérer d'appliquer préalablement une moyenne glissante à tout l'enregistrement. On aboutit naturellement à la notion de filtrage que l'on réinvestit du

cours d'électronique [7]. En pratique, on réduit le bruit en tirant parti du suréchantillonnage procuré par les capteurs (plusieurs centaines de points par période).

Nous proposons une approche différente qui va nous donner l'occasion de remobiliser la notion d'approximation locale.

### 2.2.3. Méthode d'ordre 1

Autour du passage par zéro, l'accélération  $a_y$  varie localement de façon linéaire avec le temps. On extrait un segment d'une vingtaine de points (à optimiser) de part et d'autre de chaque  $t_k$  identifié précédemment. On applique à ce sous-échantillon un ajustement affine  $a_y = at + b$  dont on tire une meilleure estimation de l'instant de passage par zéro  $t_k = -b/a$  (cf. figure 3B et [5]). Là encore, les élèves les plus avancés pourront prendre davantage de points et faire un ajustement d'ordre supérieur (cubique par exemple) puisque le développement limité des fonctions trigonométriques est connu.

En poussant le raisonnement à la limite, on peut, comme cela est proposé par de nombreux logiciels réalisable en *Python* et couramment fait, ajuster l'équation (3) sur l'ensemble de l'enregistrement. Cette méthode nous semble avoir plusieurs inconvénients :

- ◆ on pose là encore le modèle comme vérifié *a priori* ;
- ◆ les algorithmes utilisés sont très complexes et fonctionnent comme des boîtes noires, de surcroît assez instables pour ce problème particulier ;
- ◆ nous montrons dans [7] que malgré un accord global paraissant satisfaisant, une analyse détaillée (méthode des résidus, cf. *infra*) montre que le modèle est en défaut. C'est pourquoi nous ne la proposons pas dans ce TP.

Les méthodes mises en place nous fournissent donc une liste de plusieurs centaines d'instants de passages  $t_k$  de l'accélération  $a_y$  par zéro qu'il convient d'interpréter. Là encore, nous mettons en place plusieurs procédures de complexité croissante.

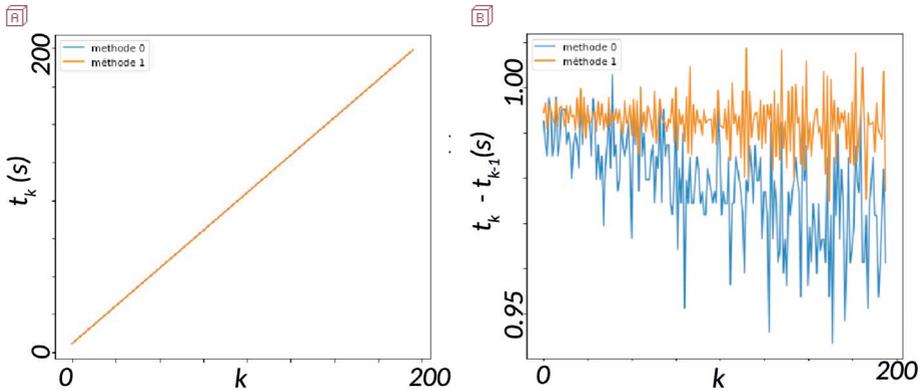
## 2.3. Exploitation des résultats

### 2.3.1. Discussion d'ordre 0

La demi-période est la différence de deux instants de passage par zéro successifs. L'application directe de cette définition est illustrée sur la figure 4B (cf. page ci-contre).

Nous constatons que l'ajustement affine (méthode d'ordre 1) permet une réduction du bruit notable qui reste toutefois sensible. Pour chaque méthode nous avons un grand nombre d'estimations de  $T_0/2$  auquel nous pouvons appliquer un traitement statistique.

Les valeurs de la demi-pseudo-période obtenues sont globalement compatibles entre elles et avec celle déduite de la première analyse par FFT ( $T_0/2 = 0,9686$  s dont,



**Figure 4** - L'abscisse  $k$  désigne le rang dans le tableau - (A) Instants de passage de l'accélération  $a_y$  par zéro - (B) Différence de deux instants de passage par zéro successifs comme estimation de la demi-pseudo-période  $T_0/2$ .

	Méthode 0	Méthode 1
$\frac{T_0}{2}$ (s)	$0,9758 \pm 0,0112$	$0,9922 \pm 0,0058$

**Tableau 1**

on l'a dit, il est difficile d'estimer l'incertitude). Les valeurs des écarts-types confirment quantitativement l'amélioration apportée par la méthode 1.

### 2.3.2. Confrontation au modèle

De  $\frac{T_0}{2} = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$  et de la valeur de  $g$  au millième près ( $g = 9,804 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  à Toulouse) nous pouvons déterminer la valeur de la longueur des fils  $l$  dans le cadre du modèle :  $l_{\text{mod}} = 0,9778 \pm 0,0041 \text{ m}$ . Nous avons une incertitude-type de 4 mm bien inférieure aux dimensions du smartphone. La mesure de la longueur des fils entre les deux nœuds d'accroche des fils (du bas de la tringle au haut de l'enveloppe) donne  $l_{\text{géo}} = 0,955 \pm 0,002 \text{ m}$ . Ces deux valeurs diffèrent seulement de 2 %, mais, mesurées avec une précision relative de l'ordre du millième, elles sont très significativement différentes.

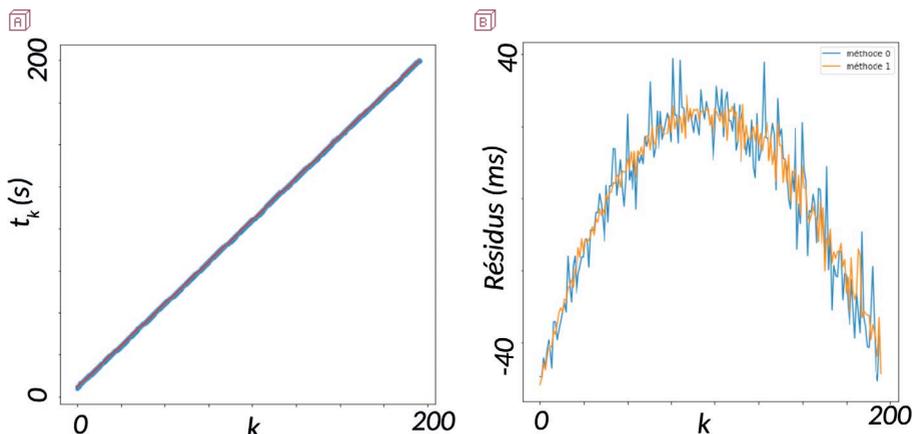
Quelle est l'origine de cet écart ? Le modèle ou la mesure ? Nous verrons que le modèle est effectivement mis en défaut, mais à l'échelle du pour mille. C'est donc du côté expérimental que se situe la difficulté. Nous avons dû inspecter minutieusement notre expérience pour identifier que le problème vient de la partie haute de la suspension. Sur la tringle cylindrique, le point autour duquel le fil oscille n'est pas le nœud du fil que nous avons fait un peu lâche au bas de la tringle, mais les points, diamétra-

lement opposés, où le fil quitte le contact d'avec la tringle. De cette observation nous corrigeons la longueur du fil à  $l_{géo} = 0,975 \pm 0,003$  m qui est alors compatible avec la valeur issue du modèle. Notons que nous avons dû accroître l'incertitude sur  $l_{géo}$  car la zone de contact du fil avec la tringle est moins bien définie que le nœud sur le fil. Un soin tout particulier à cet aspect de la suspension a été apporté dans [7].

La figure 4B (cf. page précédente) est tout de même assez bruitée : en procédant par différence sur une courbe on calcule une approximation locale de sa dérivée. On peut comprendre ce phénomène à la lumière des connaissances acquises sur le filtrage. En termes d'analyse de Fourier, dériver correspond à multiplier par  $\omega$  (et déphaser de  $\pi/2$ ) ce qui amplifie le bruit à haute fréquence. La détermination directe de la demi-période de la sorte n'est donc pas la méthode la plus élégante.

### 2.3.3. Discussion d'ordre 1

Il est plus judicieux de réaliser une modélisation affine des instants de passage par zéro qui au contraire moyenne le bruit sur l'ensemble de la durée d'acquisition. Sur la figure 5A l'ajustement semble parfait ce qui est confirmé par les indicateurs statistiques habituels ( $R^2$  et  $\chi^2$ ). Toutefois, n'oublions pas que les données sont d'excellente qualité et permettent de travailler à l'échelle de 0,1 %. L'accord visuel est très insuffisant : sur un écran d'ordinateur, il y a de l'ordre d'un millier de pixels par ligne et par colonne, un écart d'un pixel est donc significatif et... totalement imperceptible.



**Figure 5** - L'abscisse  $k$  désigne le rang dans le tableau - **A**) Ajustement affine des instants de passage par zéro - **B**) Résidus des ajustements. On observe clairement une structure dans les résidus.

Nous faisons alors calculer aux étudiants les résidus de l'ajustement auxquels nous avons systématiquement recours. Les résidus sont définis comme la différence entre la valeur effectivement mesurée et la valeur prédite par le modèle. Ceux-ci sont repré-

sentés sur la figure 5B (cf. page ci-contre). Ils présentent très clairement une structure parabolique, non aléatoire. L'effet est faible, une centaine de millisecondes sur quelques centaines de secondes, mais significatif. Il est de l'ordre du millième. Il faut alors retourner au modèle, se rappeler l'étape de linéarisation et constater que c'est précisément l'ordre de grandeur des termes négligés.

L'objectif de ce TP est atteint, les étudiants peuvent prendre conscience de la notion d'approximation harmonique en mettant en évidence une légère déviation par rapport au modèle du cours.

### 2.3.4. Discussion d'ordre 2

Pour aller plus loin, dans le cadre d'un TIPE<sup>(3)</sup> par exemple, on peut résoudre l'équation non linéaire du mouvement. Les solutions, même en absence de frottements, font intervenir des fonctions spéciales ce qui n'est pas abordable à ce niveau. Nous proposons dans [7] une simulation numérique qui démontre que la dissipation comporte elle aussi une composante non linéaire (traînée aérodynamique proportionnelle au carré de la vitesse).

De façon plus adaptée au niveau de ce type de classe, on peut admettre qu'un traitement perturbatif conduit à la formule de Borda [8] :

$$T(\theta_m) = T_0 \left( 1 + \frac{\theta_m^2}{16} \right). \quad (5)$$

C'est la correction de la période du pendule à l'ordre le plus bas en fonction de l'amplitude d'oscillation  $\theta_m$ . Comme l'amplitude d'oscillation décroît avec le temps à cause de la dissipation, cela entraîne une diminution de la pseudo-période avec le temps, compatible avec l'effet observé. L'ordre de grandeur est aussi correct : avec une amplitude initiale de l'ordre du dixième de radian, la correction de Borda est de l'ordre du millième. Nous n'irons pas plus loin.

Remarquons pour finir que, par symétrie, la correction de la période est nécessairement quadratique en amplitude. Toute imperfection du montage, comme par exemple un non-parallélisme des fils de suspension, surajoute à la correction de Borda provenant de la linéarisation du  $\sin \theta$  [7].

### 2.3.5. Démarche expérimentale

Cette discussion nous semble à même de bien mettre en évidence quelques principes propres à une véritable démarche expérimentale. En premier lieu, on se rend compte de l'importance de la quantité et de la qualité des données disponibles.

(3) L'épreuve TIPE (Travaux d'initiative personnelle encadrés) est une épreuve orale des concours de CPGE (Classe préparatoire aux grandes écoles) où les étudiants présentent un projet réalisé sur un an voir un an et demi.

Ensuite, le soin apporté à en extraire le maximum d'information, sans surinterpréter pour autant, est très gratifiant : on obtient non seulement une excellente modélisation à l'approximation harmonique, mais encore on ouvre de nouvelles pistes pour aller au-delà. Enfin, du point de vue de la démarche expérimentale elle-même, on prend conscience qu'il s'agit de proposer un modèle pour rendre compte des données et non de vérifier par les mesures une théorie supposée vraie *a priori*. Une discussion rapide s'arrêtant à l'ajustement linéaire des données (cf. figures 4A et 5A) conclurait à une validation éclatante du « modèle du cours » alors que, comme le montre cette analyse plus approfondie, celui-ci est mis en défaut par les mesures. À quelques pour mille seulement il est vrai, le modèle du cours capture donc bien l'essentiel du phénomène. Mais l'écart est indiscutablement significatif. Et, loin de contredire le message du cours, il ouvre vers toute une physique riche, subtile et enthousiasmante. Il n'y a pas de modèle bon en soi, mais seulement un modèle adapté à la précision des mesures dont on dispose. Chaque avancée technologique accroît cette précision et en retour enrichit la physique d'effets nouveaux à démêler.

### 3. RETOUR PÉDAGOGIQUE

#### 3.1. Première expérience pédagogique (confinement mars 2020)

##### 3.1.1. Contexte pédagogique

Ce TP, sur lequel nous travaillions depuis quelque temps déjà, a été expérimenté par l'une d'entre nous (Charlotte Fabre) avec des étudiants de première année de CPGE. La mise en place s'est faite un peu dans la précipitation à l'occasion du confinement de mars 2020. Il s'agissait de proposer aux étudiants une pause expérimentale parmi tous les cours théoriques en distanciel. Le TP était facultatif et le travail à faire consistait à :

- ◆ réaliser le pendule ;
- ◆ exploiter le programme *Python* fourni.

En plus de la mesure de la pseudo-période présentée ci-dessus, il comportait aussi le tracé du portrait de phase et des énergies cinétiques, potentielles et mécaniques, notions au programme de première année de CPGE. Le choix de rendre le TP facultatif s'est fait naturellement dans ce contexte particulier où une partie des étudiants était déjà en difficulté.

##### 3.1.2. Retour des étudiants

Parmi les quarante-cinq étudiants de la classe, une dizaine seulement a réalisé le TP en entier. Une autre dizaine a construit le pendule sans aller jusqu'à l'exploitation. Le reste de la classe n'a pas fait le TP, invoquant le manque de temps et le retard pris par ailleurs dans l'acquisition des connaissances du cours.

De manière générale, le retour des étudiants a été globalement positif et ceux qui ont fait ce TP jusqu'au bout sont satisfaits de voir qu'avec deux bouts de ficelle, une feuille de papier et un smartphone, on peut aller loin dans le raisonnement et la démarche scientifique.

### 3.1.3. Retour de l'enseignante et pistes d'amélioration

L'expérience pédagogique ne fut toutefois pas totalement satisfaisante. D'une part, nous avons choisi de fournir un programme *Python* clé en main, car nous pensions qu'un TP en distanciel moins guidé à ce niveau aurait eu raison des plus motivés. Outre la surcharge de travail pour l'enseignante, l'exploitation des données s'est révélée décevante. Le caractère un peu «presse-bouton» ne nous a pas permis d'apprécier la démarche scientifique propre à chaque étudiant.

D'autre part, force est de constater qu'une faible fraction des étudiants s'est finalement réellement emparée de cette activité *a priori* innovante, attractive et ludique. La période particulière du confinement était compliquée pour une grande majorité d'entre eux qui prenait du retard sur les notions de cours. Ce TP original a été perçu non comme une ouverture, mais comme une charge de travail supplémentaire.

Ensuite, les interactions entre les étudiants et l'enseignante ont été insuffisantes. Les discussions allers-retours, facilitées en présentiel, n'ont pu être menées de manière optimale dans le contexte du confinement et des cours en visioconférence. Même si en majorité les étudiants étaient satisfaits, nous sommes sceptiques quant à leur compréhension globale de la démarche et de la portée de cette expérience et son exploitation.

## 3.2. Deuxième expérience pédagogique (février 2021)

Fort de ces retours, le TP a été de nouveau proposé dans un contexte plus favorable durant l'année scolaire 2020-2021. Le texte du TP<sup>(4)</sup> a été revu à cette occasion pour plus de clarté dans les demandes tandis que le programme *Python* d'exploitation des données est resté quasiment inchangé. Cette fois-ci, les étudiants avaient l'obligation de le réaliser seul ou en binôme et devaient rédiger un compte-rendu comportant une partie théorique menant à l'équation (4), une photo du dispositif, les exploitations des courbes faites grâce au programme *Python* fourni ainsi qu'un commentaire critique sur les résultats obtenus.

Ce TP avait plusieurs objectifs pédagogiques :

- ◆ asseoir les notions théoriques sur l'équation du pendule et son approximation harmonique déjà vue un certain nombre de fois pendant le cours de mécanique ;
- ◆ faire une expérience à la maison et faire pratiquer le langage *Python* ;

(4) Ce TP est disponible sur le site de l'UdPPC.

- ◆ leur faire découvrir l'application *Phyphox* et travailler la démarche scientifique pour initier les attendus de l'épreuve des TIPE.

Le contexte plus favorable a permis plus d'allers-retours entre l'enseignante et les étudiants pour décortiquer le programme *Python* avant utilisation, pour « déboguer » certaines erreurs du programme, et enfin pour faire un bilan global après correction des comptes-rendus.

Un sondage a également été réalisé pour savoir comment a été perçu le TP par les étudiants avant le bilan final fait en classe.

### 3.2.1. Retour des étudiants

Le retour des étudiants est globalement positif ou très positif pour 95 % des étudiants et près des deux tiers ont déjà ou pensent réutiliser leur smartphone pour leur TIPE. Les étudiants ont pris plaisir à faire de la physique autrement. Ils étaient majoritairement en binôme (vingt-six sur quarante-deux) et se sont répartis les tâches de travail théorique, de construction du pendule et d'exploitation.

Certains, à l'aise avec l'outil informatique, ont trouvé dommage de ne pas construire eux-mêmes le programme *Python* en collaboration avec l'enseignement d'informatique.

Les principales difficultés rencontrées par les étudiants ont été la compréhension du programme *Python* ainsi que la détermination de l'équation (4) nécessitant de négliger certains termes d'ordre 2 ou 3. Ils ont majoritairement compris que les résidus obtenus mettaient en évidence la non-linéarité de l'équation du pendule.

### 3.2.2. Retour de l'enseignante

Après une proposition de ce TP décevante la première année, cette deuxième tentative est bien plus satisfaisante. Les différents objectifs pédagogiques visés ont été globalement atteints.

En effet, concernant la partie théorique, l'équation du pendule a été assez bien établie. La simplification des termes d'ordre supérieur à 2 pour déterminer l'équation (4) a cependant été réalisée de manière incomplète ou non réalisée. Cette manipulation n'est pas encore naturelle chez des étudiants de première année qui découvrent les développements limités et le sujet du TP ne les guidait pas pour réaliser ces opérations.

Concernant l'expérience et l'exploitation grâce au programme *Python*, certains étudiants n'ont pas pris une durée suffisante d'acquisition et d'autres ont rencontré des problèmes dans l'exécution du programme. L'application *Phyphox* a néanmoins été bien prise en main par les étudiants et, comme on l'a dit, certains s'en sont servi à nouveau lors de premières expériences pour leur TIPE. La grande hétérogénéité de la

classe concernant l'outil informatique a mis en lumière des étudiants très à l'aise avec le programme tandis que d'autres avaient beaucoup plus de mal à le comprendre voire même simplement à l'utiliser.

De plus, la lecture des comptes-rendus révèle encore quelques lacunes dans l'analyse critique des résultats. En effet, un trop faible nombre d'étudiants compare les périodes obtenues par les deux méthodes avec la période attendue en mesurant la longueur des fils. Les incertitudes, bien qu'explicitement calculées par le programme *Python*, n'apparaissent pas dans les comptes-rendus. Enfin, trop peu d'étudiants expliquent clairement la mise en évidence du non-isochronisme des oscillations ou proposent d'autres types de frottements possibles non pris en compte dans l'équation (solide et/ou aérodynamique). Malgré cela, quelques bons comptes-rendus montrent des étudiants pratiquant la démarche scientifique, ce qui est de bon augure pour la suite.

### 3.2.3. Pistes d'amélioration

Avec cette nouvelle expérience plus réussie, nous proposerons le TP à nouveau, d'autant plus que les nouveaux programmes de physique de PCSI (Physique, chimie et sciences de l'ingénieur) font apparaître des capacités numériques à acquérir en sciences physiques, comme mettre en évidence le non-isochronisme des oscillations. En outre, ce TP, proposé en milieu de deuxième semestre de la première année, permet une première approche des attendus des TIPE et montre ainsi aux étudiants qu'il est possible de faire de la belle physique avec une démarche scientifique complète en utilisant peu de matériel.

Idéalement, ce TP devrait faire l'objet d'un projet interdisciplinaire informatique-physique de long terme visant à former à la démarche scientifique par la synergie de compétences en physique expérimentale et en programmation. À partir d'un programme à compléter, les étudiants devraient coder eux-mêmes en s'appuyant sur des plateformes collaboratives (GoogleCollab, Jupyter...), et donc s'appropriier, les principaux algorithmes de traitement du signal. Nul doute que des solutions originales émergeraient à cette occasion.

## CONCLUSION

L'exploitation de la mesure des petites oscillations d'un pendule avec un smartphone peut être sans trop de difficultés poussée au-delà de l'approximation harmonique et permet de mettre en évidence des non-linéarités. Elle peut donner lieu à un TP riche permettant des allers-retours entre modélisation et analyse quantitative des mesures propres à une démarche scientifique véritable.

Cette expérience a toute sa place dans les nouveaux programmes de CPGE et au niveau post-bac en général. Elle peut tout de même être envisagée du point de vue

énergétique et sans entrer dans la discussion des non-linéarités en enseignement de spécialité de Terminale.

Une première mise en place dans les conditions particulières du premier confinement de mars 2020 n'a pas été totalement satisfaisante. La deuxième tentative l'a été bien plus. Nous avons proposé quelques pistes pédagogiques à approfondir pour améliorer le TP et procurer aux étudiants un réel apport en termes de connaissance, de démarche et d'interprétation pour leur formation scientifique [9].

Enfin, l'expérience illustrée ici n'est qu'un minuscule aperçu de toute la richesse qu'apportent les smartphones dont les capteurs intégrés peuvent être exploités de bien des manières dans de nombreuses expériences plus ou moins classiques [1-2, 10].

## BIBLIOGRAPHIE ET NETOGRAPHIE

- [1] Demi-journée Science à distance proposée par l'UdPPC :  
[http://bupdoc.udppc.asso.fr/consultation/article-bup.php?ID\\_fiche=23286](http://bupdoc.udppc.asso.fr/consultation/article-bup.php?ID_fiche=23286)
- [2] U. Delabre, *Smartphonique - Expériences de physique avec un smartphone*, Dunod, juin 2019.
- [3] Phyphox : <https://phyphox.org>
- [4] J.-Ph. Pérez et O. Pujol, *Mécanique : fondements et applications*, 7<sup>e</sup> édition, Dunod, février 2022.
- [5] Programme Python avec Google Collab :  
[https://colab.research.google.com/drive/1PopfluCn\\_jhmQQbUYNEwEoFcrZDIK4xV?usp=sharing](https://colab.research.google.com/drive/1PopfluCn_jhmQQbUYNEwEoFcrZDIK4xV?usp=sharing)
- [6] R. Duffait, « Étude expérimentale des oscillateurs mécaniques », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 98, n° 867 (1), p. 1307-1338, octobre 2004.
- [7] “Quantitative analysis of a smartphone pendulum beyond linear approximation: a lockdown practical homework” :  
[https://ires.univ-tlse3.fr/sim/wp-content/uploads/sites/35/2022/02/Pendulum\\_V3.pdf](https://ires.univ-tlse3.fr/sim/wp-content/uploads/sites/35/2022/02/Pendulum_V3.pdf)
- [8] C. Jai et K. Caiveau, « Étude d'oscillations non linéaires avec un smartphone : période et portrait de phase », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 115, n° 1034, p. 573-586, mai 2021.  
Voir la bibliographie et netographie de cet article et plus particulièrement la référence [14].
- [9] J.-F. Parmentier et Q. Vicens, *4 scénarios pour enseigner ou former à distance*, Dunod, juillet 2020 :  
<https://latelierduformateur.fr/4-scenarios-pedagogiques-pour-enseigner-ou-former-a-distance/>

[10] Le groupe IRES SIM, «Smartphone instrument de mesure» :  
<https://ires.univ-tlse3.fr/sim/>

### Complément de l'article

*Cet article comporte un complément nommé :*

◆ *TP Phyphox - Pendule avec votre smartphone.*

*Il est disponible sur le site de l'UdPPC sous la forme d'un fichier zippé 10420309.*



**Charlotte FABRE**  
*Professeure en CPGE*  
Lycée Déodat de Séverac  
Toulouse (Haute-Garonne)



**Nabil LAMRANI**  
*Professeur*  
Collège Claude Nougaro  
Toulouse (Haute-Garonne)



**Patrice MARCHOU**  
*IA-IPR honoraire*  
Toulouse (Haute-Garonne)



**Renaud MATHEVET**  
*Maître de conférences*  
LNCCI  
Université Toulouse III  
Toulouse (Haute-Garonne)