

Smartphone instrument de mesure

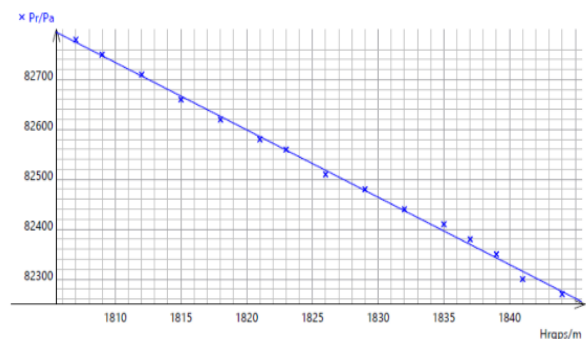
Le Groupe IRES SIM travaille sur l'usage des smartphones pour enseigner les sciences et faire des sciences : acquisition (et traitement) de données expérimentales, pratiques pédagogiques envisageables avec l'« instrument de mesure » smartphone s'appuyant, entre autres, sur des données collectées dans l'environnement quotidien.

Sortie au ski

Lors de sorties au ski nous avons utilisé les capteurs d'un smartphone pour effectuer plusieurs séries de mesures des grandeurs pression, accélération et vitesse angulaire. La donnée GPS altitude a également été enregistrée. L'application utilisée est Phyphox.

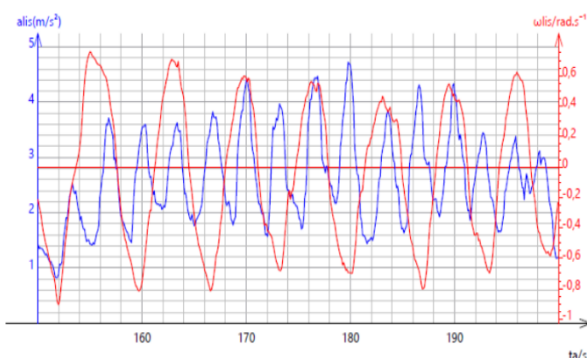
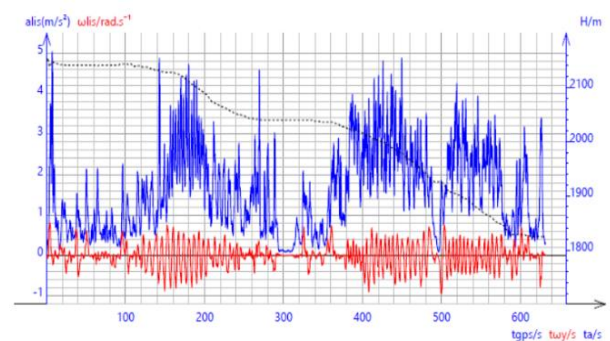
1) Montée en télésiège

Les données expérimentales sont en accord avec une modélisation affine de la variation de la pression atmosphérique en fonction de l'altitude. Le capteur de pression a une précision telle qu'il permet d'envisager de faire effectuer les mesures à des lycéens lors de variations d'altitude de quelques mètres. Hormis la mise en évidence simple d'une loi fondamentale, le traitement des données permet de déterminer l'ordre de grandeur de la masse volumique de l'air dans la zone de mesure.



2) Descente en ski (1)

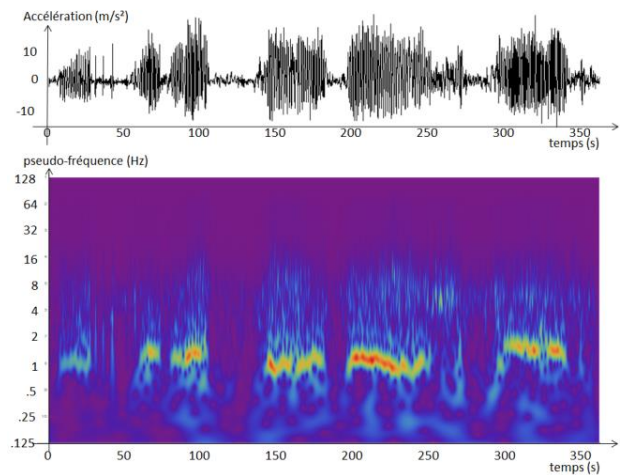
Le smartphone est placé dans la poche du skieur, axe de mesure « parallèle » à la colonne vertébrale. Sont représentées en fonction du temps, après lissage : en pointillés l'altitude, en bleu la norme a de l'accélération du skieur, en rouge la vitesse angulaire ω autour de l'axe de mesure du smartphone, ω est considérée comme étant la vitesse angulaire du skieur. L'acquisition des données pourrait être demandée à des étudiants en vue d'une exploitation pédagogique en cours de mécanique.



Pendant l'intervalle de temps considéré sur le graphe ci-contre la « période » de la vitesse angulaire ω (6,6 s) est le double de celle de l'accélération a . Proposition d'interprétation : $\omega > 0$ virage à gauche, $\omega < 0$ virage à droite... $\omega = 0$ changement de carres. Les valeurs extrêmes de la vitesse angulaire correspondent aux valeurs maximales de l'accélération $a = \sqrt{a_T^2 + a_N^2}$, à ces instants la composante normale a_N de l'accélération est maximale, la prise de carre est maximale.

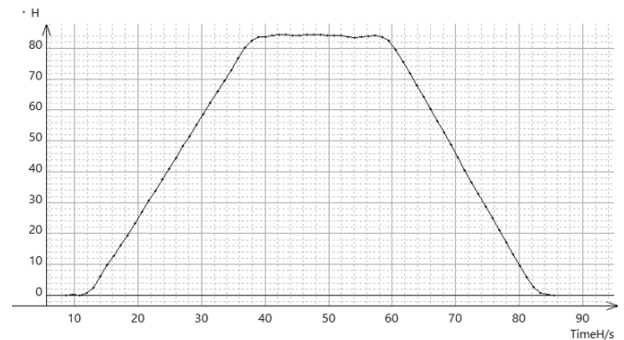
3) Descente en ski (2)

Les mouvements effectués lors d'une descente à ski présentent une certaine « périodicité » pendant des plages de durée finie dans le temps. A un niveau post-bac, il y a là une occasion de sensibiliser les étudiants aux difficultés de l'analyse « temps-fréquence » trop souvent escamotés par l'utilisation intuitive d'une transformée de Fourier à court terme telle qu'utilisée dans la fonction FFT des oscilloscopes numériques. Nous avons analysé les signaux par transformée en ondelettes qui ont été introduites par Yves Meyer et lui ont valu le prix Abel l'an passé. L'expérience a été répétée avec d'autres acquisitions telles que la montée/descente des escaliers et les différentes allures d'un cheval.



Mouvement d'une cabine d'ascenseur

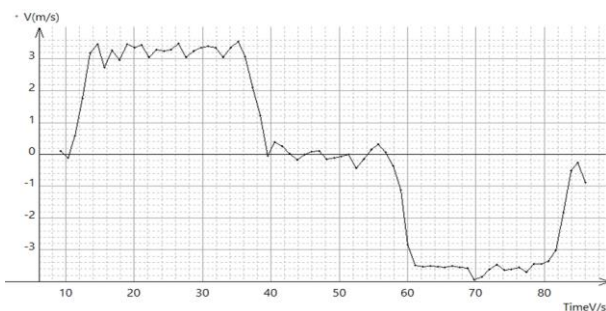
La cabine effectue un aller-retour entre le hall d'entrée et le dernier étage d'un hôtel. Ci-contre exemple de données recueillies avec le module Elevator de l'application Phyphox. L'application détermine la hauteur H de la cabine, par la formule du nivellement barométrique, à partir de la mesure de la pression atmosphérique. Il faut savoir que de nombreux smartphones ne possèdent pas de capteur de pression en revanche ils sont tous équipés d'un accéléromètre.



1) Une proposition d'activité expérimentale

Prévoir l'allure du graphe représentant l'accélération en fonction du temps d'une cabine d'ascenseur qui effectue un aller-retour entre le hall d'entrée et le dernier étage d'un immeuble sans arrêt intermédiaire, hormis au dernier étage. Mesurer l'accélération à l'aide de l'accéléromètre d'un smartphone posé sur le sol de la cabine en utilisant une application dédiée (Phyphox, Physics Toolbox...). Confronter la prévision initiale aux données expérimentales (voir 3). Décrire les différentes phases du mouvement.

2) Résolution de problème 1



La cabine de l'ascenseur se déplace entre le hall d'entrée et le dernier étage d'un hôtel.

La vitesse de l'ascenseur est déterminée à l'aide d'un smartphone posé sur le sol de la cabine. Pour cela on utilise une application dédiée.

Le smartphone affiche le graphe ci-contre. Il représente la valeur de la vitesse de la cabine en fonction du temps lors d'une montée et d'une descente. Combien d'étages

possède cet hôtel ?

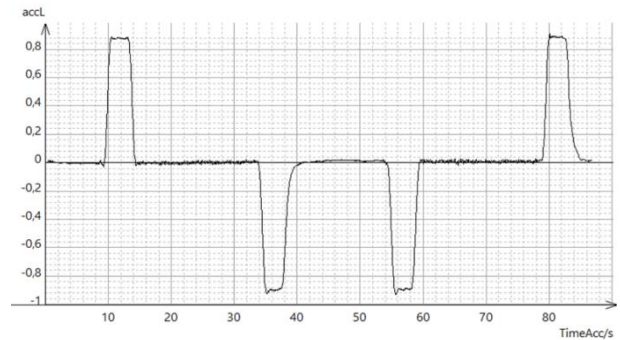
3) Résolution de problème 2

La cabine de l'ascenseur se déplace entre le hall d'entrée et le dernier étage d'un hôtel.

L'accélération de l'ascenseur est mesurée à l'aide de l'accéléromètre présent dans un smartphone posé sur le sol de la cabine. Une application (Phyphox) permet d'enregistrer les données.

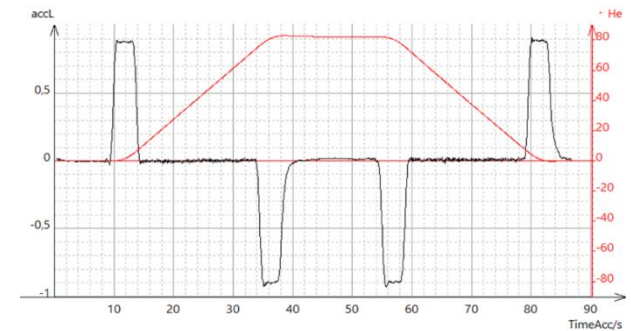
Le graphe ci-contre représente la valeur de l'accélération de la cabine en fonction du temps lors d'une montée et d'une descente.

Combien d'étages possède cet hôtel ?



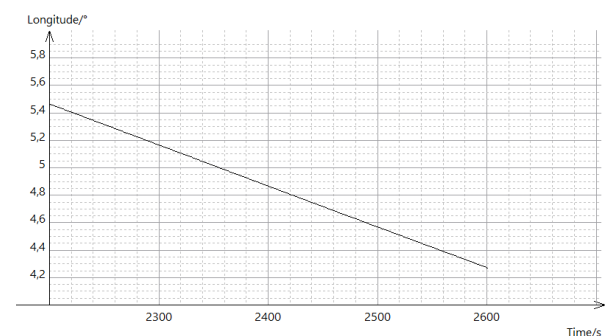
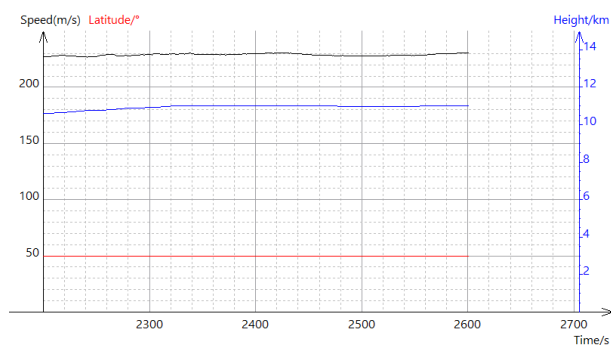
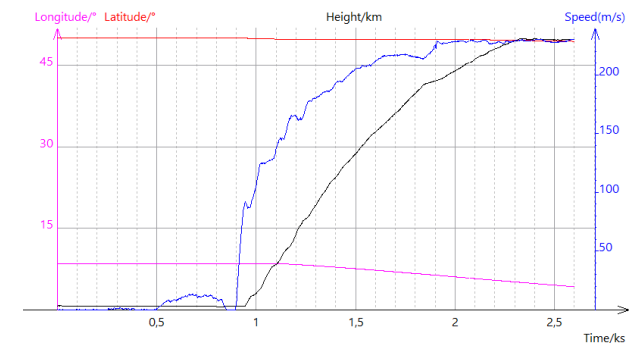
4) Résolution de problème 3

Détermination de la hauteur H_e de la cabine par intégration numérique. Comparaison avec l'application de la formule du nivellement barométrique aux mesures de la pression atmosphérique.



Mouvement d'un avion

En avion, avec un smartphone en « mode avion », la réception GPS est active lorsqu'on se trouve proche d'un hublot. Ci-contre les données collectées pendant 43 minutes à partir de la mise en mouvement de l'avion au sol. L'objectif était initialement de mesurer la vitesse au décollage et la vitesse maximale atteinte par l'appareil. Les données contiennent également une information inattendue : l'ordre de grandeur du rayon de la Terre !



Pendant les 300 dernières secondes de l'enregistrement le mouvement est uniforme, la latitude et l'altitude sont quasi constantes, la trajectoire de l'appareil se confond avec un arc de parallèle intercepté par un l'angle correspondant à la variation de la longitude. Soit une trajectoire distante de 4400 km de l'axe de rotation de la Terre. Compte tenu de la valeur (moyenne) de la latitude ($49,5^\circ$) nous obtenons une valeur de 6800 km pour le rayon de la Terre, à comparer aux 6400 km attendus. A priori l'excès de 7% est significatif au regard de la précision/exactitude des données GPS. Un examen attentif indique que la latitude n'est pas constante, elle diminue légèrement lors du mouvement, un rapide calcul montre que cela ne suffit pas pour expliquer les 7% d'excès pour la valeur du rayon de la Terre. Est-ce qu'il faut affiner le modèle ? Est-ce que le

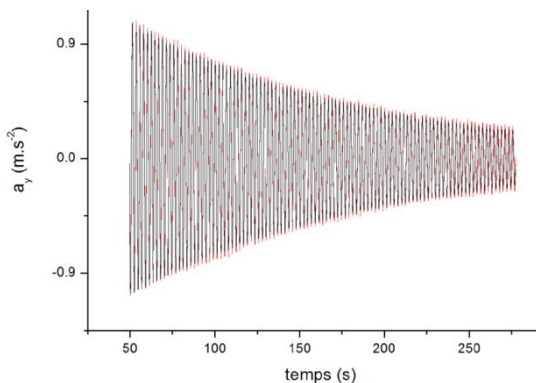
traitement des données GPS n'est pas de bonne qualité à cause, par exemple, d'un manque de précision de l'horloge interne du smartphone ?

Oscillations d'un pendule

Nous avons réalisé une série d'expériences afin d'évaluer le potentiel métrologique des capteurs d'accélération des smartphones en poussant au maximum l'analyse des données. Le public étudiant visé est ici typiquement postbac : Licence Universitaire ou classes préparatoires. L'application utilisée est Phyphox.



1) Oscillations d'un pendule

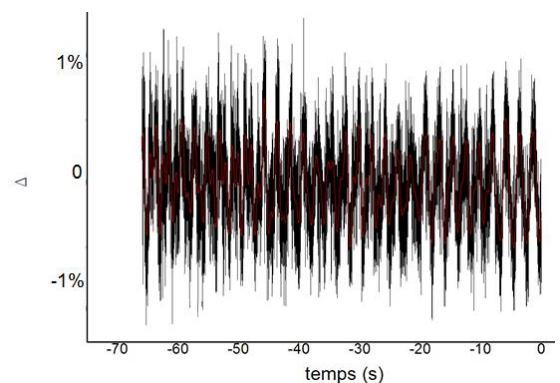


Le smartphone est placé dans une nacelle constituée par une enveloppe bulle suspendue à ses extrémités par deux fils d'un mètre environ. Pour obtenir un mouvement bien plan du pendule, le système est maintenu à une dizaine de degrés de la verticale par un fil. On coupe le fil puis on déclenche à distance l'enregistrement par le smartphone depuis un ordinateur portable. Les données recueillies sont d'excellente qualité. Elles permettent de mettre en évidence le caractère anharmonique du pendule simple, même pour des oscillations d'amplitude inférieure à 10° (voir ci-contre un ajustement avec

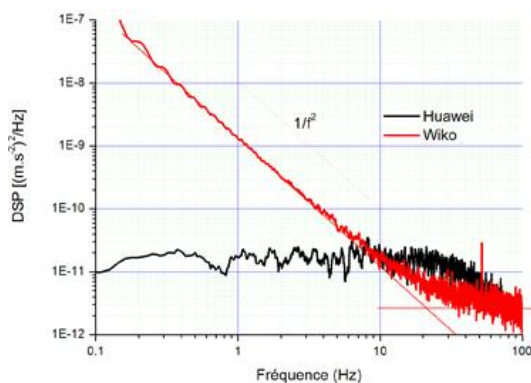
la correction de Borda). La précision relative de la mesure d'accélération est de l'ordre de 0.1%

2) Avec deux smartphones

Nous avons ensuite placé deux smartphones de marque différente dans la nacelle à titre de comparaison. L'analyse a mis en évidence une différence de l'ordre de 1% sur les valeurs absolues des accélérations mesurées par les deux smartphones. L'expérience pourrait facilement être répétée à l'échelle d'une classe pour obtenir une valeur statistique. Cela permettrait d'introduire la notion délicate d'exactitude (différence à la valeur vraie) d'une mesure.



3) Analyse du bruit



Nous avons enfin comparé le bruit des deux smartphones. L'avantage est de pouvoir travailler en classe sur des échantillons de plusieurs centaines de milliers de mesures que l'étudiant peut réaliser lui-même et rapidement. Bonne surprise, les deux smartphones ont des comportements très différents. Sur une dizaine de secondes l'un a un comportement franchement Gaussien tandis que l'autre ne l'est pas du tout (bruit en $1/f$). Cela est confirmé par une analyse en variance d'Allan.

En conclusion, l'expérience apparemment toute simple des oscillations d'un pendule peut donner lieu à une analyse très poussée des données tant du point de vue de la modélisation que de l'analyse statistique. Elle permet de plus de sensibiliser les étudiants aux incertitudes sur des données concrètes, facilement réalisables, de façon assez ludique, avec leur propre smartphone qui leur est si familier.

Chronophotographies en Cycle 3

Nous inspirant des séances n°2 et n°3 de la ressource Eduscol [1] dont nous adaptons le scénario pédagogique, nous proposons à trois classes d'élèves de 6^{ème} de réaliser des chronophotographies via l'application *Motion Shot*. Nous cherchons à faire émerger d'éventuels erreurs de représentation concernant la nature et les types de mouvements au programme du cycle 3 dans le cadre de l'enseignement de Sciences et Technologies.

1) *Le contrat didactique*

Vous observez une joggeuse passer.
En étudiant le mouvement de la hanche de la joggeuse par rapport au sol, comment appelleriez-vous cette trajectoire ?



Une trajectoire circulaire. Une trajectoire rectiligne. Une trajectoire curviligne.

Les élèves sont initiés lors d'une première séance aux différents types (circulaire, rectiligne ou plus généralement curviligne) et aux différentes natures (uniforme, accélérée, ralentie) de mouvement, via un module *Tactiléo* disponible dans les ressources numériques de la banque de ressources numériques éducatives (BRNE) [2] (initialement prévu pour des élèves de cycle 4). La séance suivante, par îlots, les élèves ont pour objectif de réaliser leurs propres chronophotographies, dont ils annoncent, avant leur capture via le smartphone, un projet de réalisation sur lequel ils s'engagent (ex : rectiligne accéléré). Choissant un sujet (ballon, cerceau, leur propre corps) ils disposent d'un smartphone et d'un large espace (cour, plateau sportif ...) pour réaliser leurs captures en procédant par essais-

erreurs en toute liberté.

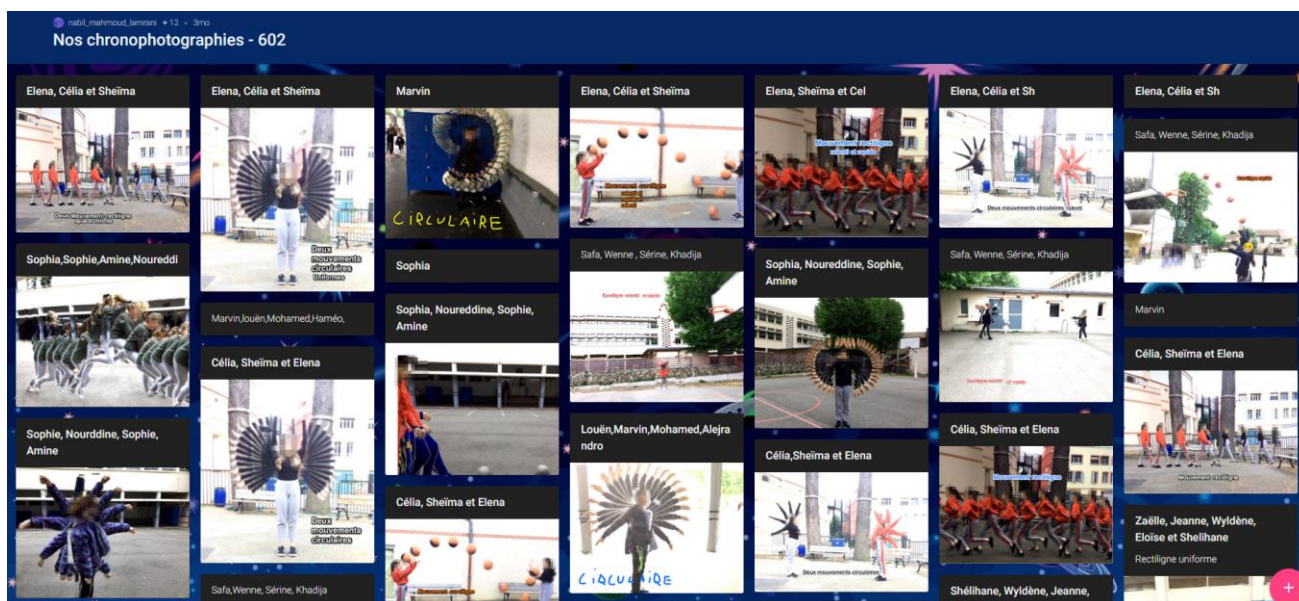
2) *Exemples et discussions.*

L'activité fait très vite émerger les erreurs de représentation des élèves entre la perception que chacun peut avoir d'un mouvement qu'il pense réaliser et le modèle qui est raisonnable d'utiliser pour le décrire. Ci-contre, un groupe d'élèves cherchant à réaliser et capturer la chronophotographie d'un mouvement se voulant circulaire et uniforme. Seule la confrontation avec la chronophotographie réalisée convaincra ce groupe d'élèves que la rotation du ballon de football autour de l'épaule de leur camarade ne se fait pas à une distance constante.



Ici, l'exemple d'un contrat rempli par un groupe d'élèves visant à réaliser le mouvement « curviligne ralenti puis accéléré » d'un ballon de basket. Cet exemple riche permet alors d'aborder avec ce groupe de niveau plus avancé la notion de phases d'un mouvement, d'enrichir leur vocabulaire en abordant le mouvement parabolique et de remédier à leur confusion entre leur notion de « rapidité » (comparaison entre normes de vitesses) et de mouvement « accéléré » (croissance de la norme de la vitesse).

3) Partage des chronophotographies et remédiation.



L'ensemble des chronophotographies de la classe est partagé via la plateforme collaborative *Padlet*. Cette mise en commun permet de revenir à distance, lors d'une ultime séance de remédiation, sur les erreurs de représentation des différents groupes, de les valoriser et d'apprécier l'évolution de leurs perceptions des différents types et natures de mouvements. La notion de modèle se dégage alors naturellement des trois remédiations réalisées dans les trois classes.

En conclusion, cet usage qualitatif de la chronophotographie permet par son approche kinesthésique de palier, de différencier et d'enrichir très finement la perception des mouvements de types et de nature différents par les élèves et ceux très tôt dans leurs apprentissages. Par la rapidité de l'acquisition des chronophotographies et le caractère libre et ludique de l'activité, les élèves expérimentent avec plaisir et recommencent volontiers leurs essais. Leurs smartphones servent ici tour à tour d'outil d'évaluation (Tactileo), d'outil d'acquisition (chronophotographies) et de partage avec remédiation (Padlet).

[1] http://cache.media.eduscol.education.fr/file/Mouvement/43/4/RA16_C3_SCTE_Sequences_mouvement_etapes-1-4-DM_614434.pdf

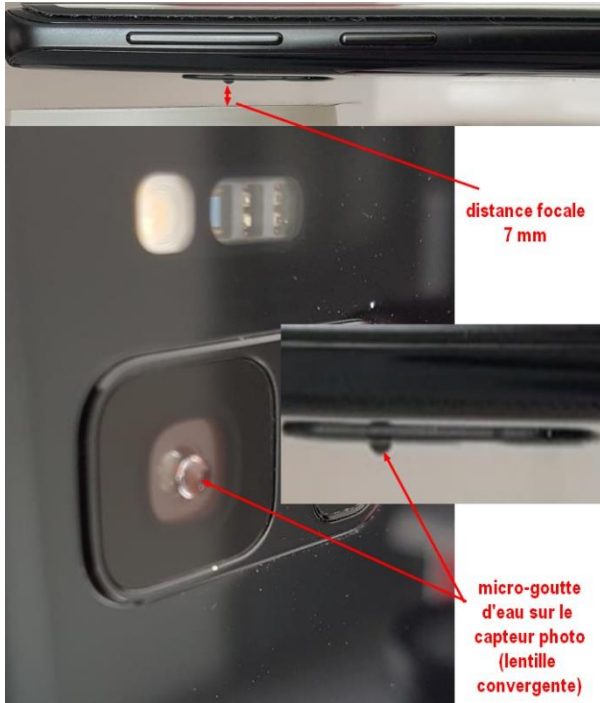
[2] <https://edu.tactileo.fr>

Remarque : cette activité a été réalisée au Collège Claude Nougaro de Toulouse, préfigurateur du numérique de 2015 à 2018 où chaque élève et enseignants a été équipé d'un équipement individuel mobile de type Ipad.

Notion d'échelle et microscopie – Sciences de la vie et de la terre

L'utilisation du smartphone comme microscope favorise l'appréhension de la notion d'échelle par les élèves, notamment en collège. On s'appuie ici sur des connaissances acquises dans l'enseignement des mathématiques sur les grandeurs, les mesures et la proportionnalité.

1) Dispositif



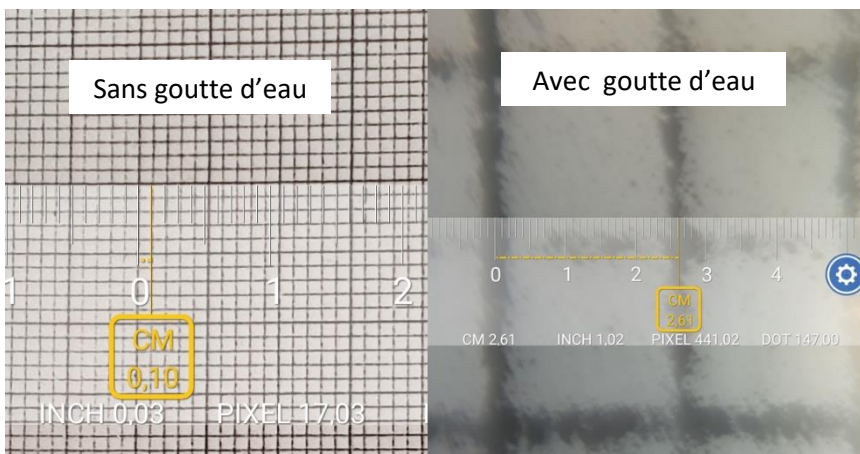
Nous utilisons une goutte d'eau déposée à l'aide d'une pipette ou avec la pointe du doigt sur le capteur photo du smartphone. La goutte adhère au capteur grâce à la propriété de tension de surface.

Remarque : Si le capteur est parfaitement propre (surface hydrophile) la goutte a tendance à s'étaler, il convient donc, par exemple, de passer son doigt sur le capteur avant de déposer la goutte (surface hydrophobe).



La calotte sphérique formée par la goutte correspond à une lentille convergente (indice de réfraction $n=1.33$), plus la goutte est petite avec un rayon de courbure faible, plus la distance focale sera petite et le grossissement important.

2) Calcul du grossissement – Notion d'échelle



Nous n'utilisons pas le zoom numérique du smartphone pour la prise de vue. Le papier millimétré est photographié sans goutte d'eau, l'appareil est placé à environ à 10 cm. Puis le même papier millimétré est photographié avec une goutte d'eau, l'appareil est placé entre 3 et 8 mm de distance selon la taille de la goutte.

Nous mesurons ensuite le quadrillage sur l'écran du smartphone avec une règle graduée d'écran, transparente et superposable aux images de la galerie. On peut en déduire le grossissement.

Remarque : Le grossissement dépendant de la taille de la goutte, il faudra refaire l'étalonnage à chaque nouvelle goutte d'eau. Nous avons essayé de conserver le papier millimétré pour les prises de vue mais le quadrillage est souvent difficile à voir nettement.



Règle d'écran
NeedJava
PEGI 3

Application de règle d'écran pour Android, gratuite

3) Observations microscopiques – De la taille de l'image grossie au calcul de la taille réel de l'objet

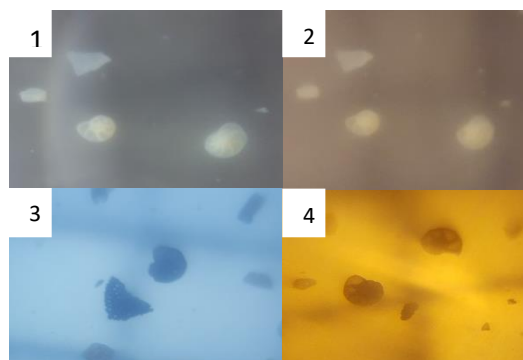


31) Observation de pollen – calcul de la taille réelle

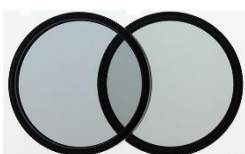
Nous avons observé et photographié du pollen de fleur sans goutte (1), avec la goutte (2) et un éclairage led blanc par-dessus (2a) ou par-dessous (2b) après avoir déposé le pollen sur une lame en verre. En fonction de l'étalonnage du grossissement (cf § 2), nous avons pu calculer la taille réelle des grains de pollen à partir des mesures avec la règle sur l'image.

32) Observation de sable à foraminifères – test d'éclairage

Nous avons observé et photographié du sable à foraminifères avec la goutte dans plusieurs conditions d'éclairage led : par-dessus (1 jaune et 2 blanc) et par-dessous (3 blanc et 4 jaune). *Remarque : Pour l'éclairage par-dessous, il faut utiliser un gobelet retourné pour déposer la lame. Il doit être sablé pour laisser passer la lumière et limiter la réflexion.*



33) Observation de lames minces de roches – Polariseur-Analyseur



Nous avons placé un polariseur entre la source lumineuse et la lame mince puis photographié les lames (ligne LPNA = lumière polarisée non analysée) puis refait une série de photographies après avoir ajouté un analyseur (ligne LPA = lumière polarisée analysée) entre la lame mince et le smartphone.

	Granite	Micaschiste	Andésite
LPNA			
LPA			

En conclusion, l'utilisation du smartphone comme instrument d'observation grossissant (loupe ou microscope) est pertinente de par sa mobilité et sa facilité d'usage. Le pouvoir de grossissement bien qu'inférieur aux instruments classiques présents dans les classes est honorable (20 à 40 fois). Les limites demeurent dans la qualité de l'éclairage et la qualité des photos, variable d'un smartphone à l'autre.

Smartphone sur une platine de « tourne-disque 45 tours »

A- Détermination de la vitesse angulaire ω de rotation du système {smartphone + platine}

Deux méthodes sont exposées ci-dessous, avec les gyromètres d'abord, les accéléromètres ensuite.

1) Méthode utilisant les gyromètres de l'appareil

C'est la méthode qui vient immédiatement à l'esprit si le smartphone est doté de ce type de capteur.

On pose l'appareil sur le plateau du tourne-disque dont l'horizontalité a été réglée avec une application « niveau à bulle ».

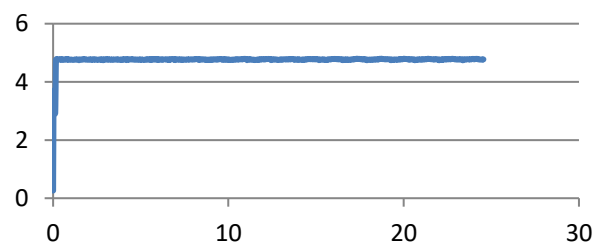
L'application « PhyPhox » enregistre les vitesses angulaires selon les 3 axes Ox, Oy et Oz du smartphone posé sur le plateau en rotation. Quelques lignes de valeurs relevées figurent sur l'extrait de tableau Excel ci-contre.

1	Time (s)	Gyroscop e x (rad/s)	Gyroscop e y (rad/s)	Gyroscop e z (rad/s)	Absolute (rad/s)
24	0,21488	-0,15669	-0,10049	-4,76353	4,767163
25	0,224949	-0,15455	-0,09988	-4,76017	4,763723
26	0,234953	-0,1518	-0,10018	-4,76292	4,766387
27	0,244871	-0,14936	-0,10263	-4,76567	4,769109
28	0,254984	-0,14997	-0,1014	-4,76505	4,768492
29	0,26499	-0,14936	-0,09927	-4,76597	4,769344
30	0,274917	-0,14936	-0,10201	-4,76658	4,770012
31	0,285006	-0,15211	-0,10201	-4,76902	4,77254
32	0,296691	-0,15424	-0,09743	-4,76872	4,772208
33	0,305036	-0,15211	-0,09713	-4,76689	4,770302
34	0,314953	-0,15241	-0,09957	-4,76475	4,768226

Comme attendu, la composante essentielle est sur la verticale Oz (*perpendiculaire à l'appareil posé à plat sur le plateau*).

La moyenne obtenue pour la norme de la vitesse angulaire est $\omega = 4,77 \pm 0,04$ rad/s soit $45,6 \pm 0,4$ tours/min.

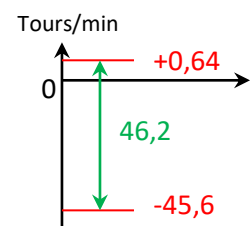
Absolute (rad/s)



En fait la vitesse de rotation mesurée du smartphone immobile n'est pas nulle : il y a un décalage (offset ou « erreur de zéro ») qui doit être corrigé.

On le détermine en enregistrant la vitesse angulaire de l'appareil posé à plat sur le tourne-disque arrêté.

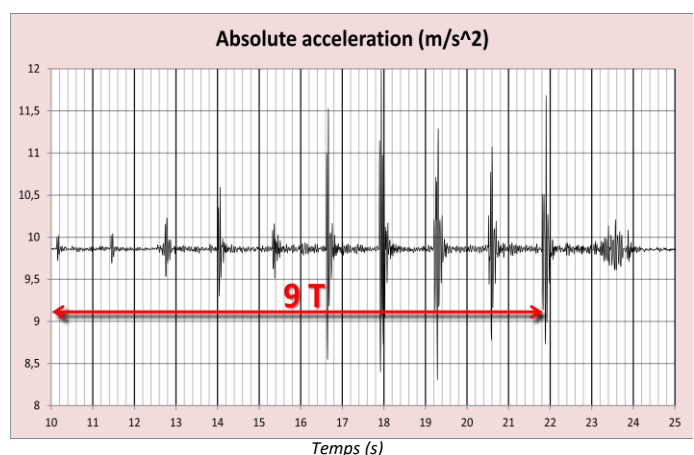
On obtient $0,067 \pm 0,0083$ rad/s soit $0,64 \pm 0,08$ tours/min de décalage.



Comme l'enregistrement (*colonnes de l'enregistrement du §1*) donne une vitesse de rotation algébrique négative et un offset positif on a le schéma ci-contre donnant une vitesse angulaire de $46,2 \pm 0,6$ tours/min.

2) Méthode utilisant les accéléromètres de l'appareil

Ils sont tellement sensibles qu'ils réagissent au moindre frottement sur l'appareil. Il suffit donc, dans cette méthode, de provoquer ce léger frottement du smartphone sur une languette de papier par exemple, fixée à la partie fixe du tourne-disque.



Sur le graphe ci-dessus, obtenu sur une durée de 15 secondes on voit les effets des frottements de courte durée enregistrés autour de la valeur de l'accélération de la pesanteur locale ($9,8 \text{ m/s}^2$).

En comptant $0,2 \text{ s}$ d'incertitude sur la durée de $9T$ on trouve $T = 1,29 \pm 0,02 \text{ s}$ donc une vitesse de rotation de $46,5 \pm 0,7 \text{ tours/min}$. Par cette méthode on retrouve une valeur compatible avec la première valeur mesurée.

Remarque pédagogique : Cette étude est exploitable pour une résolution de problème ou pour construire un problème plus progressif. Le signe de la composante selon Oz de la vitesse angulaire permet de sensibiliser les étudiants à son caractère vectoriel.

B- Mesure de l'accélération radiale

Pour comparer l'accélération radiale mesurée à sa valeur attendue il faut connaître le rayon R de la trajectoire circulaire des accéléromètres rassemblés dans un espace suffisamment faible pour être assimilable à un point noté O par la suite.

1) Détermination statique des directions et sens des axes Ox , Oy et Oz des accéléromètres

On lance l'application « accéléromètre avec g » et on pose le smartphone sur une table horizontale

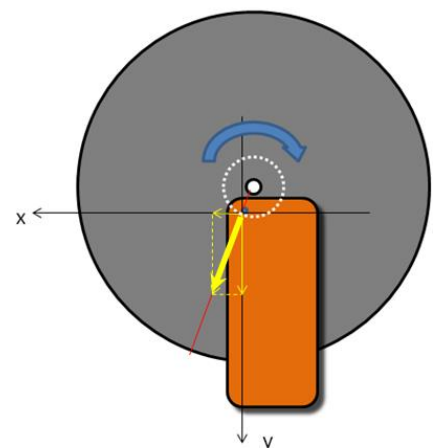
- « Sur le dos » (écran vers le haut): on lit la valeur de g positive donc Oz est orienté vers l'arrière de l'écran
- « sur le côté gauche » (en le tenant) : on lit la valeur de g positive donc Ox est orienté vers le côté gauche de l'écran
- « sur sa base » (en le tenant) : on lit la valeur de g positive donc Oy est orienté vers le bas de l'écran.

Pour chacune de ces trois positions une seule des trois composantes est sensiblement différente de zéro.

2) Localisation des accéléromètres dans le smartphone

Les accéléromètres se trouvent localisés à l'intersection O de Ox , Oy et Oz .

On procède par tâtonnement en positionnant le smartphone jusqu'à ce que l'enregistrement montre l'une des deux composantes a_x ou a_y nulle (a_z restant égale à g car l'appareil est posé horizontalement sur le plateau donc avec l'axe Oz vertical).



Lorsque Ox passe par le centre de rotation alors $a_y = 0$ et a_x est l'accélération en jaune sur la figure 1 et vice versa pour la figure 2.

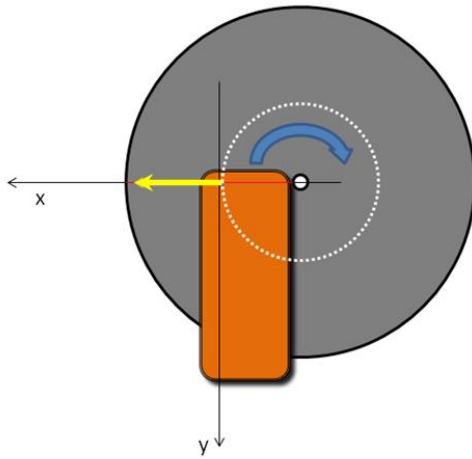


Figure 1

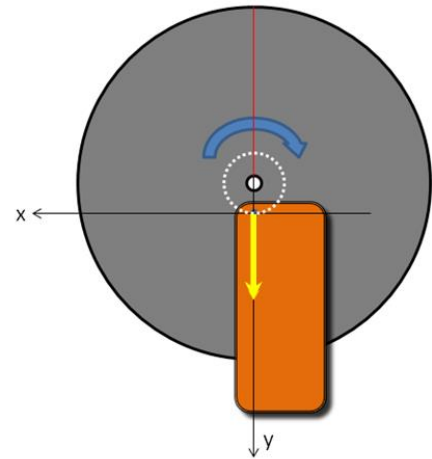
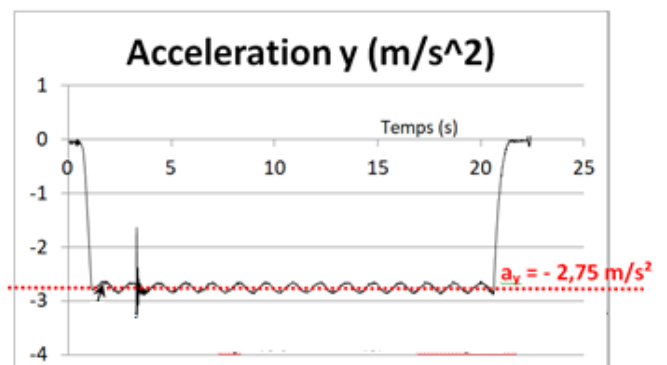
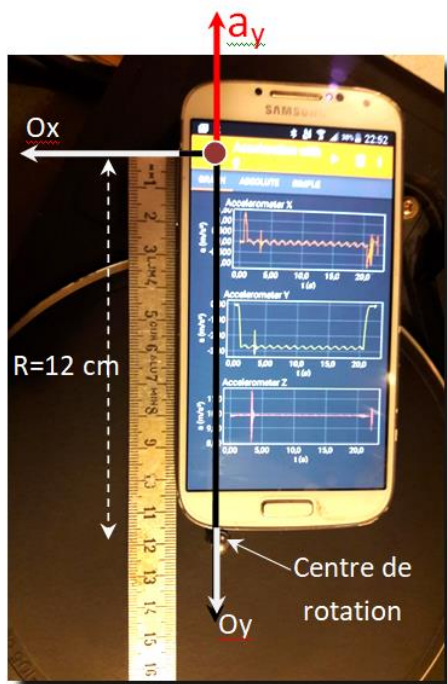


Figure 2

On remarque que l'accélération est centrifuge dans les trois situations car associée à la force d'inertie d'entraînement subie par les accéléromètres dans le référentiel du smartphone en rotation.

3) Vérification de l'expression de l'accélération centrale

Comme on le note sur la photographie de l'expérience ci-dessous, on prend la distance à l'axe la plus grande possible puis on procède à l'enregistrement ci-contre.



A l'aide de la vitesse angulaire $\omega = 4,77 \pm 0,04$ rad/s du tourne-disque obtenue au paragraphe A et du rayon de $12 \pm 0,4$ cm choisi, on calcule l'accélération radiale selon Oy :

$$a_y = \omega^2 R = 2,73 \pm 0,11 \text{ m/s}^2$$

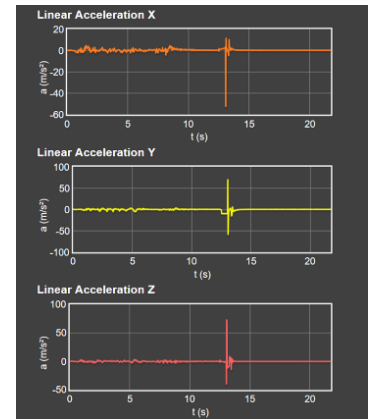
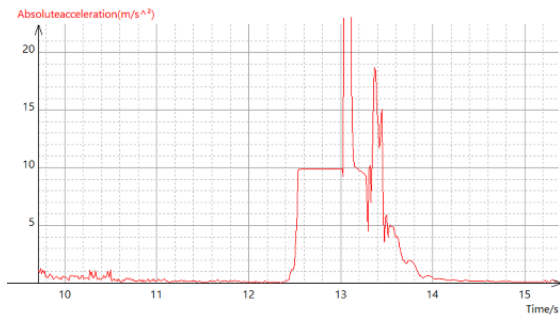
en accord avec la valeur absolue de l'accélération mesurée par l'accéléromètre.

Remarque pédagogique : Cette étude est exploitable pour une résolution de problème ou pour construire un problème plus progressif.

Chute d'un smartphone

A quelle vitesse l'appareil arrive-t-il au sol ? De quelle hauteur est-il tombé ?

Lors d'une séance de TD l'expérience a été réalisée devant les étudiants, le smartphone étant lâché sans vitesse initiale. L'enregistrement des données fournies par les accéléromètres est suivi sur grand écran. Le traitement dans un tableur permet d'obtenir le graphe ci-dessous sur lequel on lit la norme de l'accélération du smartphone pendant la chute ainsi que la durée de chute.



Le TD étant placé en amont du cours de mécanique, l'objectif poursuivi, au-delà des réponses au questionnement initial, est l'introduction des relations entre grandeurs cinématiques. Cette démarche, dans laquelle on part de l'accélération pour remonter à la trajectoire par intégration plutôt que l'inverse, est peu conventionnelle en cinématique. Elle présente au moins un intérêt, celui de captiver un auditoire qui n' imagine pas a priori que son objet HighTech favori puisse fournir des données quantitatives.

Lors de cette séance les étudiants ont utilisé leur propre smartphone pour répondre à une question sur la nature du mouvement à l'aide du logiciel IQuiz qui permet de recueillir et de présenter les réponses à des questions ouvertes.