

Protocoles et méthodes PSE
Horloge planétaire
Basile Weyl – Maud Kocher – Promotion 137

Notre PSE consistait en l'élaboration d'une horloge précise à la minute en utilisant la rotation de la Terre et adaptable à une autre planète. Après avoir étudié différents systèmes fonctionnant grâce à la rotation de la Terre, le plus précis et le seul capable de réellement répondre à ce problème avec le temps et les moyens dont nous disposions s'est avéré être le pendule de Foucault, que nous avons choisi de réaliser.

Matériel nécessaire pour toute notre étude :

- Une boule la plus dense possible.
La nôtre : acier, 20 cm de diamètre, 30 kg, taraudée pour accueillir une futur vis pour la fixer, 936 euros, réalisée par l'entreprise GREM à Paris.
- Une corde à piano monofibre avec un palet en acier soudé à l'une de ses extrémités, de la largeur du taraudage de la boule en acier.
La nôtre : inox, 100 m de long (à choisir en fonction de votre hauteur de pendule et de votre marge d'erreur), 1.8 mm de diamètre, fournie par filinox.com, référence 007236, 90 euros, palet de 6mm de large et environ 4mm de hauteur.
- Une vis assez grosse percée sur toute sa longueur en son milieu correspondant à la taille du taraudage de la boule.
La nôtre : M8 de 6 cm de longueur percée d'un trou de 2 mm de diamètre.
- Une plaque d'acier d'au moins 1 cm d'épaisseur percée en son milieu avec un trou légèrement plus large que le diamètre de la corde à piano, une vis proche du trou avec une rondelle en vue d'écraser la corde en sortie du trou (fonction de serre-câble) et 4 taraudages pour la fixer à la structure fixe.
La nôtre : rectangle de 1 cm d'épaisseur, trou de 2mm de diamètre, 7cm de large sur 12 cm de long avec une vis à 1,5 cm du trou, et 4 taraudages correspondants à la taille des pas de vis norcans.
- Un lot de norcans de tailles différentes pouvant s'adapter à la configuration du lieu pour faire une structure, vis, écrous, équerres et clef à laine correspondants.
Nous avons utilisé 12 norcans de 20 cm à 2m.
- Un lieu contenant un trou assez haut pour y pendre le pendule et un sol avec repère rectangulaire en vue du traitement vidéo.
Le nôtre : milieu de cage d'escalier sur 7 étages avec un sol carrelé.
- Une caméra quelconque de téléphone portable.
Le nôtre : modèle de téléphone Xiaomi redmi Note 7.
- Un ordinateur muni du logiciel de traitement vidéo Tracker et d'Excel.

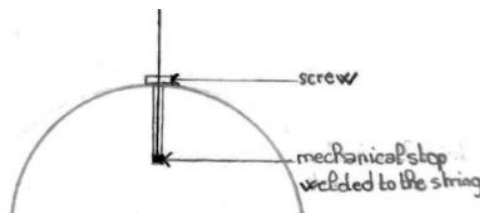
Protocole n° 1 : Montage de notre pendule

Un des éléments fondamentaux de notre montage est la symétrie du système. Cette symétrie est particulièrement difficile à imposer au niveau des points de fixation entre les différentes parties du pendule : fixation boule d'acier/corde à piano et corde à piano/structure fixe.

- **Fixation boule en acier/corde à piano :**

Même si choisir de tarauder notre boule en acier et y visser une vis avec anneau avant d'effectuer un nœud avec notre corde à piano autour de cet anneau pourrait être le plus intuitif, cette méthode de fixation n'est pas la plus symétrique. Afin de s'assurer de la bonne tenue de notre boule dense, le choix qui s'est imposé à nous a été de percer une vis M8 de 60 mm de longueur sur toute sa longueur en son centre. Le diamètre du trou est de 2.0 mm afin d'y laisser coulisser la corde à piano de 1.8 mm de diamètre sans laisser trop de jeu. On soude également un palet en ferraille de 6 mm de diamètre et d'environ 4 mm d'épaisseur qui servira de butée à un des bouts de la corde à piano. On insère l'extrémité libre de la corde à piano dans le trou de la vis en la faisant entrer côté pas de vis et en la faisant remonter dans toute la longueur de la vis jusqu'à ce qu'elle ressorte par le milieu de la tête de vis. On tire sur la corde jusqu'à la faire passer entièrement dans la vis et jusqu'à ce que le palet soudé à l'autre extrémité de la corde se retrouve bloqué en butée contre l'entrée du trou à l'extrémité du pas de vis. La fixation boule en acier/corde à piano est effectuée.

Schéma du mode de fixation boule en acier/corde à piano



- **Fixation corde à piano/plaque d'acier serre-câble :**

Le dernier point pour lequel la symétrie doit être particulièrement soignée est le point d'attache entre la corde et la structure. Pour optimiser ce paramètre et faciliter l'accrochage de notre pendule, nous avons choisi de réaliser une plaque en acier jouant le rôle de serre-câble indépendante de la structure, qui sera ensuite fixée aux norcans. Notre plaque est un pavé d'acier approximatif de 1 cm d'épaisseur, 7 cm de large et 12 cm de long, percé en son milieu d'un trou de 2 mm de diamètre en vue d'y faire coulisser la corde. On insère l'extrémité libre de la corde (l'autre extrémité étant soudée au palet et entourée de la vis) dans le trou par-dessous la plaque d'acier du côté opposé à celui duquel dépassent la tête de vis et la rondelle serre-câble. On fait coulisser la corde de manière à conserver la longueur de corde qui correspondra à la hauteur de notre pendule entre la boule et la plaque (le nôtre fait 18.9 m de hauteur). On passe l'extrémité de la corde sortant du trou au-dessus de la plaque sous la rondelle, puis on l'écrase sous la rondelle en serrant la vis (serre-câble). La fixation corde à piano/plaque d'acier serre-câble est effectuée.

Schéma du mode de fixation corde à piano/plaque d'acier serre-câble vu de dessus

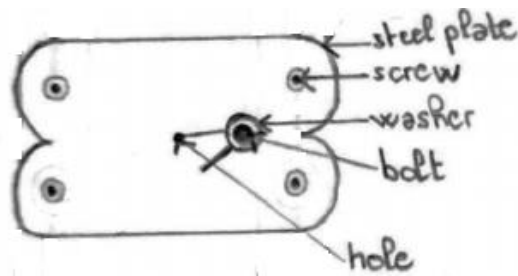
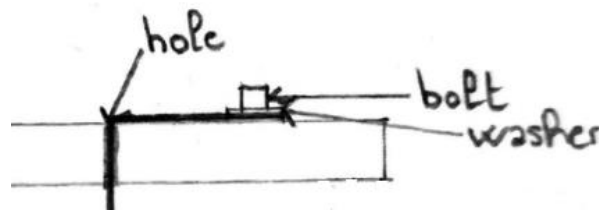


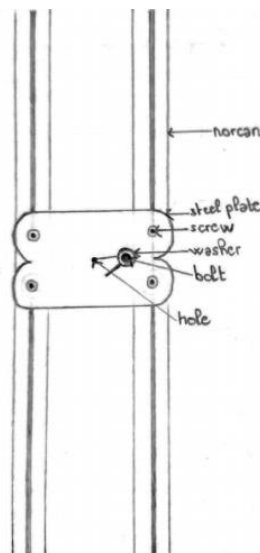
Schéma du mode de fixation corde à piano/plaque d'acier serre-câble vu de profil



- **Fixation plaque d'acier serre-câble/structure en norcans :**

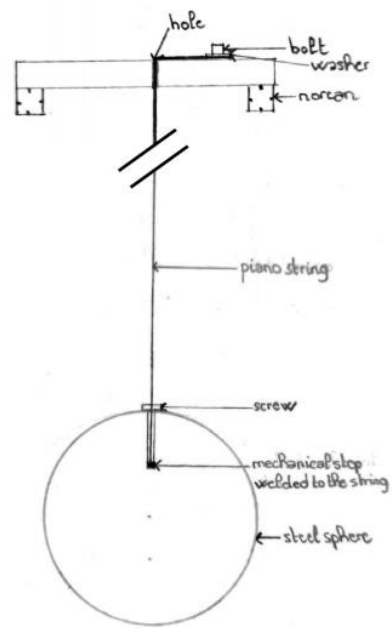
Maintenant que nos deux points critiques de fixation boule/corde et corde/plaque d'acier sont symétriques, nous n'avons plus qu'à fixer la plaque d'acier au-dessus d'un gouffre où faire pendre notre pendule. Les norcans sont idéaux pour créer une structure qui s'adapte parfaitement à la configuration du lieu. Il suffit donc de fixer plusieurs norcans perpendiculairement les uns aux autres sur différents points d'attache fixes disponibles sur le lieu afin de s'assurer que la structure restera parfaitement fixe et ne bougera pas avec les oscillations du pendule. Il reste enfin à fixer la plaque d'acier sur les norcans en disposant des vis et des écrous à norcans dans les taraudages de la plaque. La fixation plaque d'acier serre-câble/structure en norcans est effectuée.

Schéma du mode de fixation plaque d'acier serre-câble/structure en norcans vu de dessus



Notre pendule est désormais entièrement monté et près à être étudié !

Schéma de tous les éléments du pendule assemblés



Photos du haut de notre pendule vu de dessus et de côté

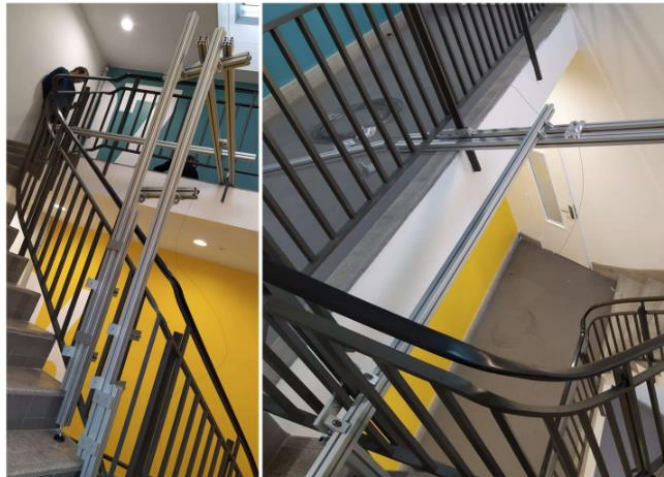
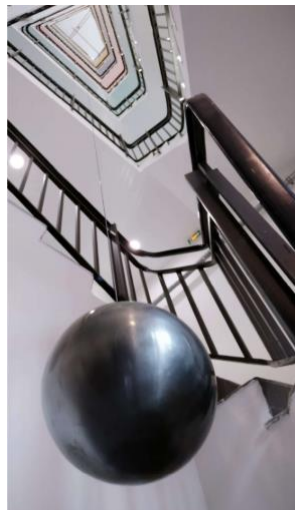


Photo du bas de notre pendule vu de dessous



Protocole n°2 : Mise en mouvement du pendule et acquisition numérique

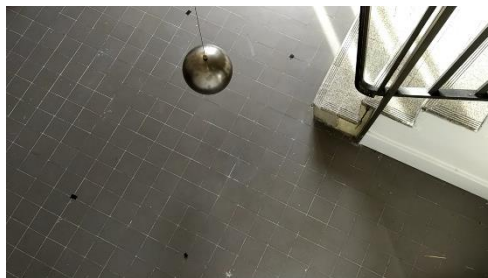
- **Enregistrement vidéo :**

On place un téléphone ou toute autre caméra (nous n'avons pas besoin d'une grosse fréquence d'acquisition car les oscillations du pendule sont lentes) légèrement au-dessus de la boule, en la surplombant, tout en s'assurant que le repère rectangulaire sur le sol entre dans l'objectif, l'idéal étant que la hauteur de la boule par rapport au sol soit la plus faible possible de manière à éviter les erreurs de parallaxe lors du pointage vidéo à venir. On lance alors l'enregistrement vidéo.

- **Mise en mouvement du pendule :**

Une fois l'enregistrement vidéo lancé, on peut se rendre auprès de la boule afin d'initier le mouvement du pendule. On pourrait simplement écarter la corde de la verticale en prenant la boule en main avant de la lâcher, mais la façon la plus précise de lâcher la boule sans introduire d'artéfacts dus à la façon dont on la prend en main reste de se munir d'une ficelle, que l'on tend de part et d'autre de la boule à l'horizontale et de l'utiliser pour écarter la corde à piano de la verticale. Une autre personne devra alors, une fois la position de lancement adoptée, s'approcher de la ficelle avec un briquet afin de la brûler : la boule est alors libérée de la ficelle et commence son mouvement d'oscillation. On arrête l'enregistrement vidéo après une dizaine d'oscillations du pendule.

Image extraite d'un enregistrement vidéo des oscillations du pendule



- **Suivi de l'évolution de la rotation du plan d'oscillation du pendule autour de son point de fixation au cours du temps :**

Le but de notre projet étant de suivre l'écoulement du temps en suivant l'évolution de la rotation du plan d'oscillation du pendule, on se doit d'effectuer un pointage vidéo à des temps différents afin de suivre l'évolution de l'angle entre la position du plan d'oscillation au temps t et sa position initiale. Ainsi, sans changer l'emplacement du téléphone entre deux prises de vidéo et sans déplacer le marquage au sol, on effectue de nouveaux enregistrements vidéo au cours du temps sur une dizaine d'oscillations. Nous avons choisi d'effectuer deux nouveaux enregistrements vidéo, après 1h30, puis après 3h30 d'oscillations.

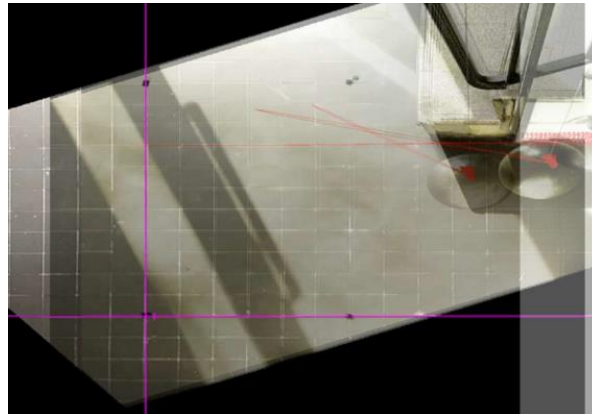
Protocole n°3 : traitement des vidéos

- **Utilisation du logiciel de traitement vidéo Tracker :**

Pour évaluer précisément l'évolution de la rotation du plan d'oscillation du pendule autour de son point d'attache, on utilise un logiciel de pointage vidéo, nous permettant, pour un temps donné (donc un enregistrement vidéo donné), de corriger les effets de perspective dus au fait que la prise de vidéo ne peut pas s'effectuer exactement au milieu de l'oscillation du pendule (passage de la corde à chaque oscillation) mais qu'elle est plutôt effectuée de côté, grâce au repère rectangulaire

placé sur le sol (le carrelage pour nous), mais aussi de pointer la position de la boule sur chaque image contenue dans la vidéo au cours du temps.

Superposition des 3 plans d'oscillation (t=0h, t=1h30, t=3h30) repérés par pointage vidéo des 3 trajectoires de la boule grâce au logiciel Tracker



Le logiciel nous a donc bien permis de repérer les plans d'oscillation du pendule aux trois temps t=0h, t=1h30 et t=3h30.

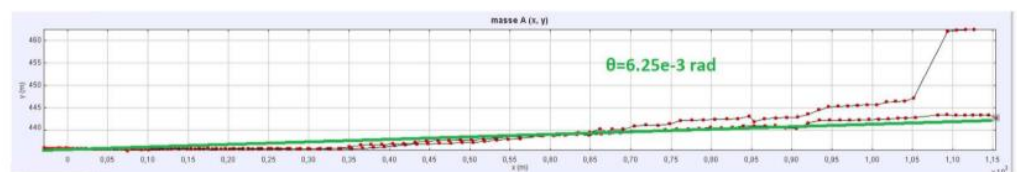
- **Exportation et traitement des données sur le logiciel Excel :**

Grâce aux données des positions de la boule au cours du temps au sein d'une même vidéo dans le repère orthonormé défini grâce au carrelage, nous pouvons calculer l'angle précis parcouru par ce plan d'oscillation entre t=0h et t=1h30, puis entre t=0h et t=3h30 en exportant ces données sur Excel. En effectuant un tracé de la coordonnée y de la boule en fonction de sa coordonnée x, et en effectuant une régression linéaire sur cette courbe, on déduit facilement l'angle du plan d'oscillation du pendule au temps t d'acquisition de la vidéo par rapport à l'axe des abscisse (axe horizontal sur la photo ci-dessus). Pour cela nous effectuons simplement le calcul :

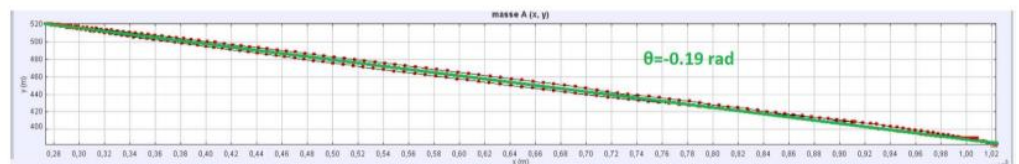
$$\Theta = \arctan\left(\frac{y_{max} - y_{min}}{x_{max} - x_{min}}\right)$$

Graphs permettant la déduction de l'évolution de la rotation du plan d'oscillation du pendule au cours du temps

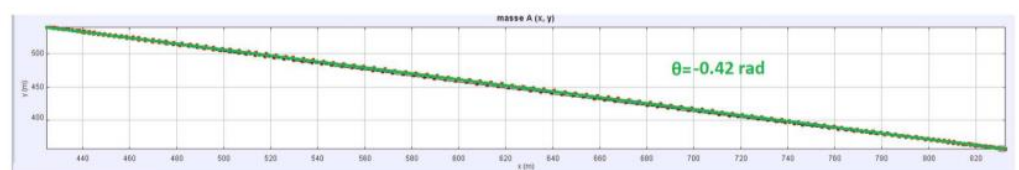
Angle at t=0:



Angle at t=1h30:



Angle at t=3h30:



Protocole n°4 : Simulation de l'évolution de l'angle du plan d'oscillation du pendule avec le temps

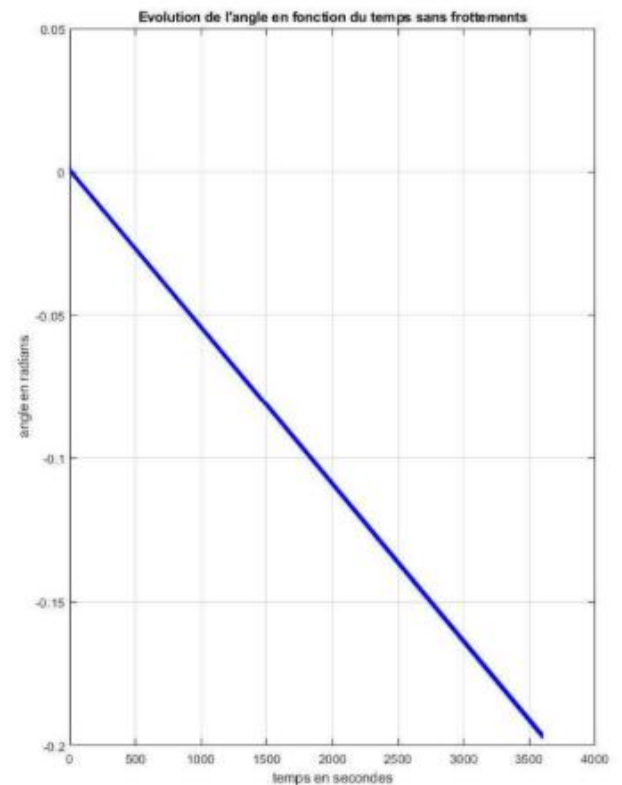
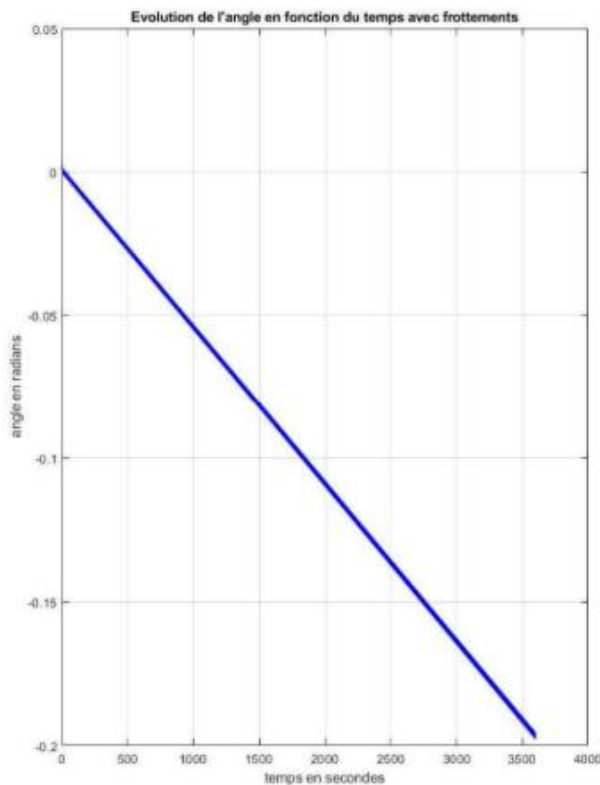
- **Simulation avec le logiciel Matlab**

Afin de vérifier l'adéquation entre les résultats expérimentaux et la rotation théorique du plan d'oscillation du pendule, on peut modéliser l'évolution de la rotation du pendule au cours du temps grâce au logiciel Matlab.

Il suffit pour cela d'entrer l'équation correspondant à l'application du principe fondamental de la dynamique à la boule dans la direction horizontale en considérant le poids de la boule, son accélération, et surtout l'accélération de Coriolis responsable de la rotation du plan d'oscillation du pendule autour de son point d'attache. On résout numériquement cette équation en utilisant la fonction ode45 qui permet de résoudre des équations du second degré non linéaires.

On obtient alors l'évolution des coordonnées théoriques de la boule au cours du temps, et en appliquant la même relation que décrite précédemment pour le traitement des données expérimentales, on en déduit l'évolution de l'angle du plan d'oscillation du pendule au cours du temps. Les frottements de l'air peuvent ou non être pris en compte, mais leur influence est négligeable sur la rotation du plan d'oscillation du pendule comme l'ont montré nos simulations :

Graphs issus des simulations numériques de l'évolution de la rotation du plan d'oscillation du pendule avec le temps en prenant en compte (gauche) ou non (droite) les frottements avec l'air



On peut alors vérifier la validité théorique du modèle utilisé par corrélation avec les résultats expérimentaux !