RÉGION ACADÉMIQUE
BOURGOGNE
FRANCHE-COMTÉ

MINISTÈRE
DE L'ÉDUCATION NATIONALE
MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR,
DE LA RECHERCHE
ET DE L'INNOVATION

www.sciencesalecole.org

Galilée Today

Collège Marie Noël de Joigny

Concours C.Génial 2021

Elèves

Toni	BENEDETTO
Manon	BETTSTATTER
Mathilde	CHAMBOURG
Loann	DESCHAMPS
Yanis	FERSITI
Côme	FORGEARD
Sofiane	FUENTES
Selma	FUENTES
Sofia	MARCHAND
Ewan	MARCOS
Tiago	MARCOS
Sacha	RAMEAU

Encadrants

Lucile	FAVREAU
François	THOMAS

Sommaire

Introduction …….P 3

Problématique …….P 3

I - Galilée et son plan incliné ……P 4

1) Galilée en quelques lignes
2) La célèbre expérience du plan incliné

II - Tests et mesures préliminaires …….P 6

1) La chute verticale
2) Notre plan incliné et nos premières mesures

III - L'expérience revisitée ……..P 8

1) Pointage Vidéo
2) Utilisation d'interrupteurs mécaniques
3) Utilisation d'interrupteurs magnétiques
4) Mesures réalisées avec les interrupteurs magnétiques

IV - Perspectives ……..P 17

1) Capteurs lumineux
2) Kit de diffusion

Conclusion ……..P 19

Remerciements ……..P 19

Annexes ……P 20

Introduction

Le projet a été réalisé dans le cadre d'un atelier scientifique où une dizaine d'élèves de la sixième à la troisième se sont réunis chaque mardi midi.

L'idée de « Galilée Today » nous est venue grâce à la participation à un autre concours scientifique, « Ramène ta science » ;

Les élèves se sont alors posé la question de savoir comment nous pourrions conduire la célèbre expérience du plan incliné de Galilée avec les moyens d'aujourd'hui.

A chaque fin de séance, les élèves ont noté dans un journal de bord les avancées de la semaine.

Chaque mardi, nous guidions les élèves en leur présentant oralement les axes de travail de leur groupe. Ne connaissant pas à l'avance les difficultés qu'ils rencontreraient, le travail prévu prenait parfois une toute autre tournure…

Ces projets ont été initiés lors de l'année scolaire 2019 – 2020. Cependant, suite à la crise sanitaire traversée par notre pays et à la fermeture temporaire des établissements scolaires, nous n'avons pas pu mener le projet « Galilée Today » à son terme.

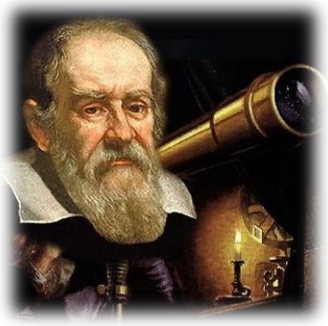
Nous avons donc décidé de travailler à nouveau sur ce projet à la rentrée de septembre 2020 afin de pouvoir le présenter au concours C.Génial 2021.

Problématique

Comment reproduire la célèbre expérience du plan incliné de Galilée avec les moyens d'aujourd'hui ?

I – Galilée et son plan incliné

1 – Galilée en quelques lignes



Galilée
Source : http://www.2amii.org/upmc/2017-S3_JEUDI_PM/THOMASSET/Galil%C3%A9e.html

Galilée était un savant italien du 17ème siècle. Il est né à Pise le 15 février 1564 et mort près de Florence, le 8 janvier 1642. Il est connu pour de nombreux travaux en physique. Il est notamment l'inventeur de la première lunette astronomique qui lui a permis d'observer les cratères de la Lune et de découvrir les quatre plus gros satellites de Jupiter. Il est également connu pour ses découvertes en mécanique, dont la découverte de la loi qui régit la chute des corps que nous allons détailler dans la suite de ce dossier. Il a enfin soutenu Copernic dans la vision du système solaire, ce qui lui a valu d'être jugé par l'Église.

2 – La célèbre expérience du plan incliné de Galilée

Au tout début du 17ème siècle, Galilée a cherché à percer le mystère de la chute des corps. Premièrement, il avait remarqué, en faisant tomber des pierres du haut de la tour de Pise, que tout objet en chute libre subissait une accélération. La question était ensuite de connaître la loi suivie par cette accélération. Comme n'importe quel scientifique depuis la nuit des temps, Galilée a émis une hypothèse : cette accélération serait régulière et proportionnelle au temps.

Son intuition était la bonne et sera confirmée plus tard par un autre scientifique bien connu appelé Isaac Newton.

Le mouvement de chute d'un corps est bien trop rapide pour être étudié en détail. C'est pourquoi Galilée a choisi de ralentir le mouvement en utilisant un plan incliné. S'il n'y a pas de frottement, l'expérience est en effet similaire.

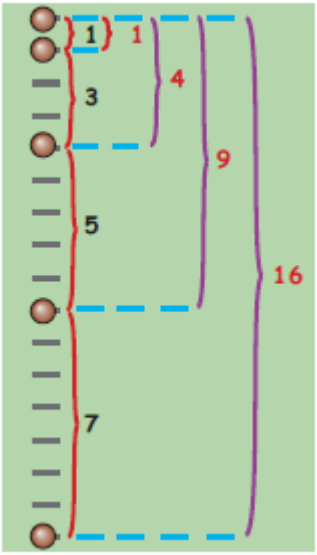
Ainsi, pour montrer le lien entre la distance parcourue par un corps et le temps, il décide de faire rouler une bille sur un plan incliné. Cependant, ceci nécessite un moyen de mesure du temps… ce dont il ne dispose pas à l'époque. Il va donc disposer des clochettes tout au long de son plan incliné.

Source : https://catalogo.museogalileo.it/

Le plan incliné de Galilée – Cinq clochettes sont disposées tout au long du trajet.

Ainsi, dès que la bille passera sous une clochette, elle la fera tinter. Galilée ayant une formation de musicien, il va se servir de son oreille pour mesurer le temps. On se rend déjà compte que la précision de cette méthode n'est pas optimale, et qu'elle pourra être modernisée et améliorée.

Il va écouter les tintements des clochettes et les disposer de telle manière que les tintements soient réguliers dans le temps ; c'est-à-dire de façon à ce qu'il s'écoule la même durée entre deux tintements. L'unité de distance étant définie au départ comme la distance entre les deux premières clochettes, Galilée se rend compte que le tintement est régulier lorsque les clochettes sont espacées de 1, puis 3, puis 5 (etc…) unités de distance. Galilée appellera cela la « loi des nombres impairs ». En termes plus modernes, il se rend compte que la distance totale parcourue par la bille est proportionnelle au carré du temps.



La distance entre les deux premières clochettes correspond à l'unité de distance.

1 unité de distance est parcourue pendant 1 intervalle de temps.

4 unités de distance sont parcourues pendant 2 intervalles de temps, etc…

On peut écrire la relation mathématique entre la distance parcourue, notée d, et la durée du parcours, notée t :

$$\boxed{d = \beta \times t^2}$$

La lettre grecque β (« bêta ») est le coefficient de proportionnalité entre d et t^2.

Nos professeurs nous ont expliqué qu'il est possible de calculer le coefficient β. On peut alors montrer qu'il est égal à :

$$\beta = g \times \frac{\sin(\alpha)}{2}$$

Avec g = 9.81 $N.kg^{-1}$ l'accélération de la pesanteur terrestre et α est l'inclinaison par rapport à l'horizontale du plan incliné sur lequel la bille roule.

Pour vérifier que nos mesures sont en accord avec les mesures réalisées par Galilée, nous pourrons aussi vérifier que le rapport entre deux distances d_1 et d_2 parcourues par la bille est égal au rapport entre les durées de parcours correspondantes t_1 et t_2 au carré :

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{t_1^2}{t_2^2}$$

II – Tests et mesures préliminaires

1 - La chute verticale

Pour comprendre pourquoi Galilée a choisi d'utiliser un plan incliné, nous avons expérimenté par nous-même la chute verticale d'une bille. Nous avons essayé de mesurer le temps de chute verticale de la bille d'une hauteur de 2m avec un chronomètre. Nous nous sommes alors rendu compte que la bille mettait environ 0,40 secondes pour parcourir cette distance. Ceci était effectivement bien trop rapide. Nous avons tout de suite mieux compris le choix de Galilée à l'époque.

Mesure du temps de chute verticale d'une bille ; Hauteur : 2 m.

2 – Notre plan incliné et nos premières mesures

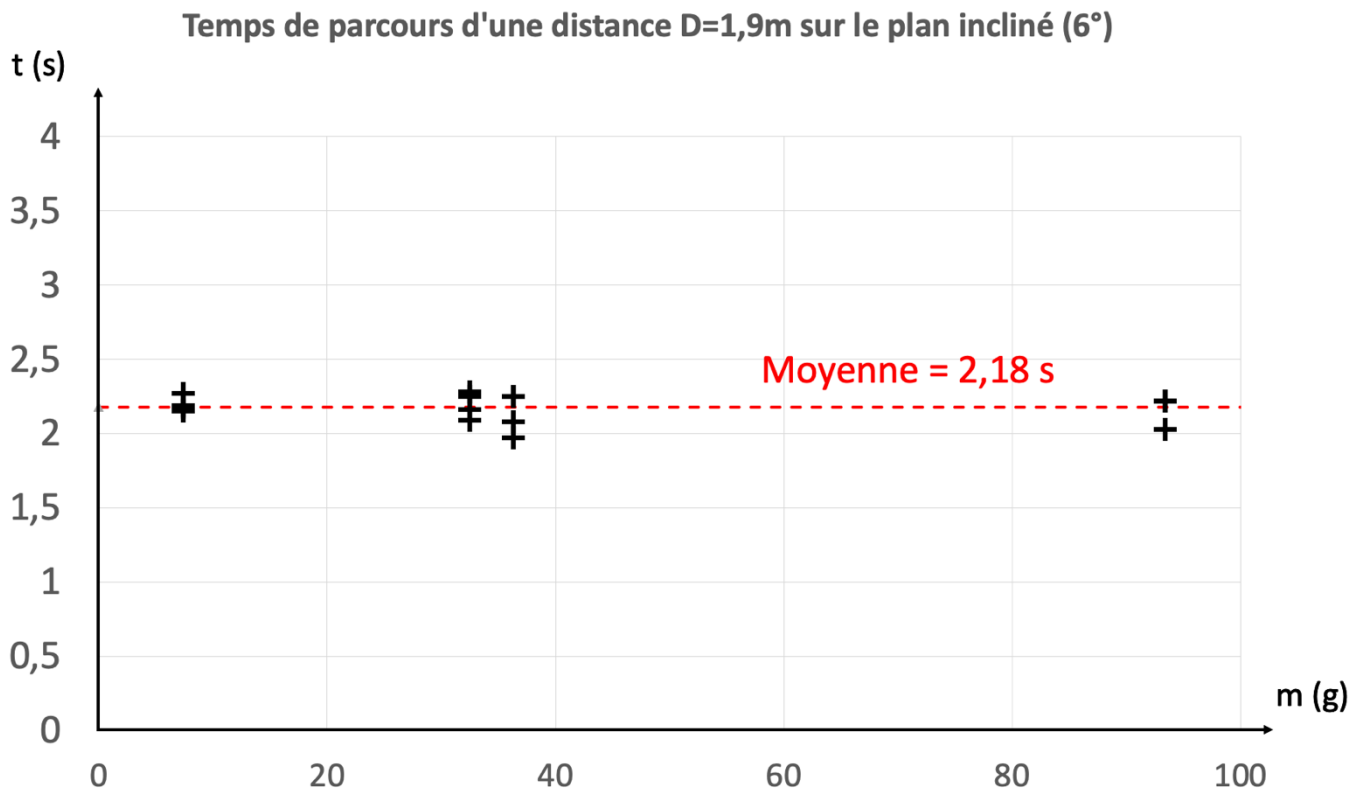
Pour disposer d'un plan incliné, nous avons utilisé une rigole en aluminium (assez légère pour le déplacement du matériel le jour du concours, même si nous allons finalement présenter notre projet par visioconférence) de 2 mètres de long.

Dans un premier temps, nous avons voulu étudier le mouvement de la bille sur notre plan incliné : Quel est le temps mis par la bille pour parcourir le plan incliné ? Est-ce suffisamment lent ? Quels paramètres influencent ce temps ?

Nous avons donc mesuré le temps mis par plusieurs billes de masse différente pour parcourir notre plan incliné. Quatre billes de taille similaire ont été utilisées. Les masses des billes m ont été mesurées à l'aide d'une balance électronique et les résultats sont dans le tableau ci-dessous :

Bille 1	Bille 2	Bille 3	Bille 4
$m_1 = 7{,}4\ g$	$m_2 = 32{,}5\ g$	$m_3 = 36{,}3\ g$	$m_4 = 93{,}4\ g$

Avec ces billes, nous avons réalisé plusieurs séries d'expériences (voir Annexe 5) qui nous ont permis de tester l'influence de la masse de la bille sur le temps de parcours du plan incliné, mais aussi l'influence de l'angle d'inclinaison du plan.



Sur cette courbe, nous avons représenté le temps de parcours d'une distance D = 1,9m sur le plan incliné lorsque l'angle d'inclinaison vaut 6°. On remarque que les valeurs obtenues sont très proches quelle que soit la masse. Nous avons donc calculé la valeur moyenne qui vaut t = 2,18 s et qui est proche de la valeur théorique.

Nous avons ainsi constaté que le temps mis par les différentes billes avec un angle identique change peu selon la bille. La masse de la bille n'a donc pas d'influence sur le mouvement. Cependant, comme le montrent nos mesures en annexe, nous avons remarqué que plus l'angle est élevé, plus le temps mis par la bille est court. La bille est donc plus rapide lorsque le plan est plus incliné.

III – L'expérience revisitée

1 – Pointage vidéo

Pour reproduire l'expérience du plan incliné de Galilée et retrouver que l'accélération de la bille est proportionnelle au temps, nous avons dans un premier temps pensé à utiliser la technique du pointage vidéo. Cette technique est utilisée au lycée pour l'étude des mouvements. Il suffit de réaliser une vidéo du mouvement de la bille sur le plan incliné et de traiter cette vidéo image par image à l'aide d'un logiciel spécifique. Nous pouvons alors obtenir une image du mouvement et réaliser de nombreux calculs liés à ce mouvement.

Nous avons alors préparé la « scène » de notre vidéo. Pour que la vidéo d'un mouvement soit réussie, il faut veiller à respecter plusieurs points :

- Disposer d'un fond relativement neutre ;
- Faire en sorte que l'objet en mouvement soit bien visible (c'est pourquoi nous avons décidé de peindre notre bille en rouge) ;
- Éclairer la scène avec une lampe à filament. En effet, avec des néons, on risque de voir un clignotement sur la vidéo.
- Ne pas oublier de mettre un étalon, qui permettra au logiciel de reconnaître les distances lors du traitement de la vidéo ;
- Disposer un fil à plomb pour indiquer la verticale ; cela permet de régler correctement l'appareil qui permet de filmer.

« Scène » de notre vidéo – On y retrouve notre plan incliné, le fil à plomb, l'étalon (règle jaune) et la scène est éclairé par un spot.

Après plusieurs vidéos tournées, à l'aide d'un appareil photo sur pieds en mode vidéo, nous nous sommes rendu compte que la bille avait un mouvement étrangement lent. Tout d'abord, nous avons cru que la peinture appliquée sur la bille était responsable de frottements ralentissant la bille. Après une étude plus approfondie, il s'est avérée que notre bille avait un défaut de fabrication, ce qui la ralentissait considérablement. Nous avons alors réalisé une nouvelle vidéo avec une bille similaire, mais sans ce défaut. Le nombre d'images enregistrées par seconde choisi était de 50.

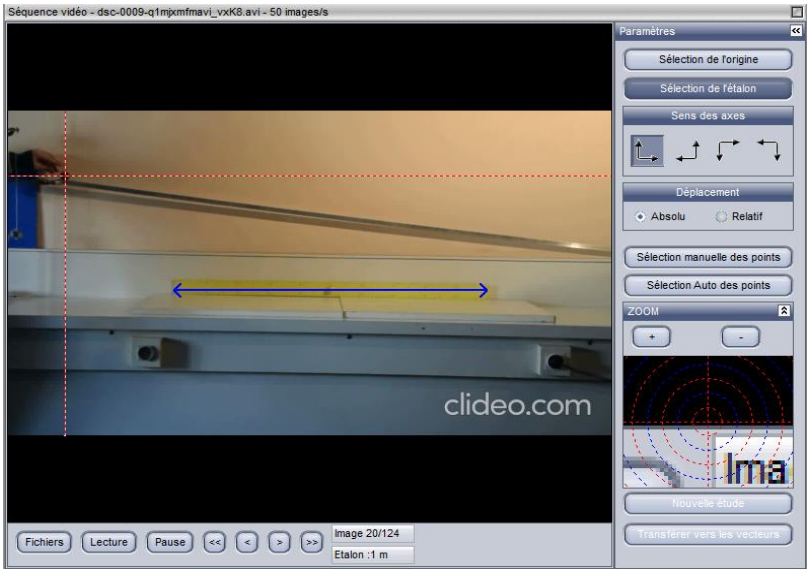
Une fois la vidéo tournée, il a fallu la rogner (pour ne garder que l'essentiel, c'est-à-dire le mouvement de la bille sur le plan) et transformer son format. En effet, la vidéo issue de notre appareil

photo était au format MOV alors que les logiciels de pointage vidéo n'acceptent que des vidéos au format AVI. Nous avons effectué le rognage et la conversion de format à l'aide d'applications en ligne.

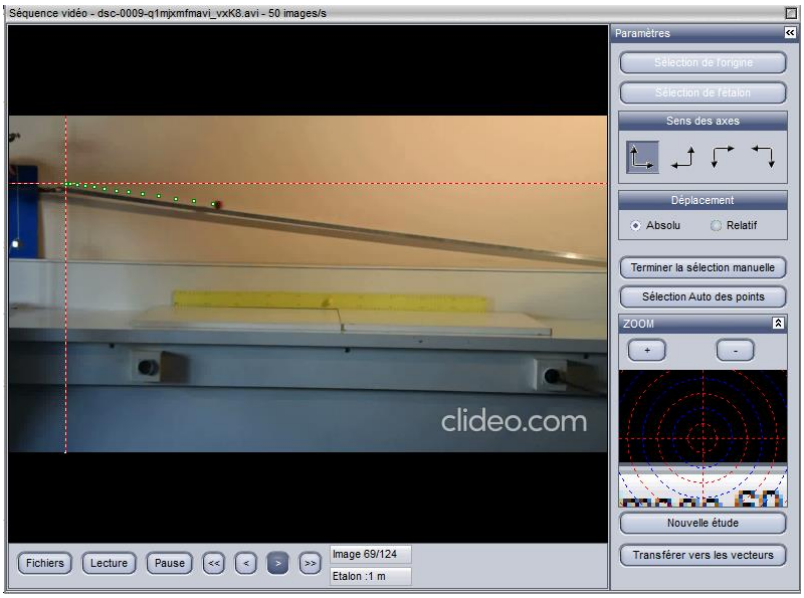
Une fois ces manipulations effectuées, nous avons traité notre vidéo à l'aide du logiciel Latis-Pro. Malgré le fait que la vidéo soit rognée, il a tout de même fallu commencer le pointage vidéo à la 20ème image et ne pointer qu'une image sur quatre pour ne pas avoir trop de points à traiter.

La première étape du traitement de la vidéo consiste à sélectionner l'origine du mouvement et de sélectionner un étalon.

Ensuite, le logiciel avance la vidéo image par image et nous permet de cliquer sur les différentes positions de la bille au cours du temps. Pour que chaque clic se fasse au même endroit sur la bille, le logiciel fournit une cible permettant de zoomer sur la bille. A l'image d'une chronophotographie, le mouvement de la bille se dessine progressivement à l'écran.

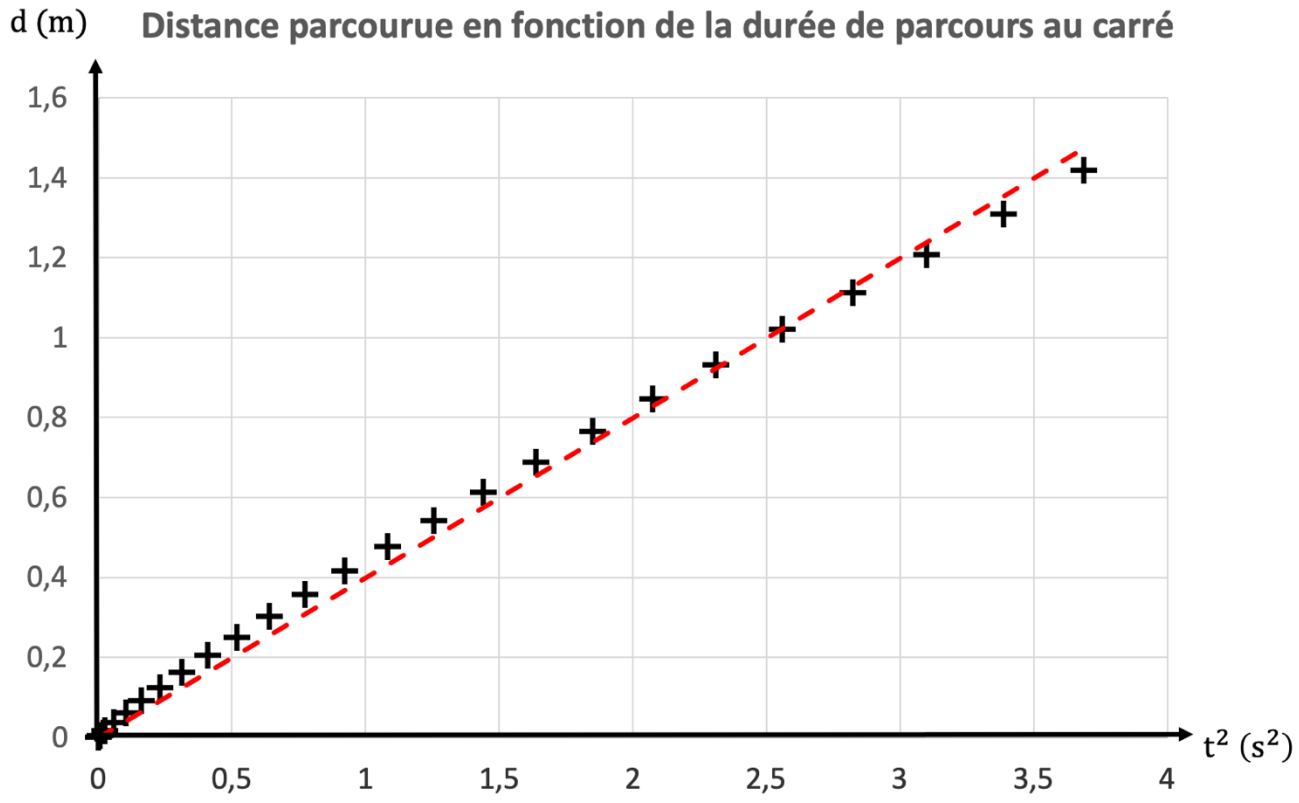


Sélection de l'origine et de l'étalon sur Latis-Pro.



Pointage de la bille image par image – La trace du mouvement de la bille apparaît progressivement sur l'écran.

Après le pointage, le logiciel fournit directement l'évolution de l'abscisse (Mouvement X – horizontal) et de l'ordonnée (Mouvement Y – vertical) en fonction du temps. A partir de ces valeurs, on peut calculer la distance parcourue par la bille. Nous avons tracé sur cette courbe la distance parcourue par la bille en fonction de la durée de parcours au carré. A partir d'une certaine distance parcourue, on retrouve le même résultat que Galilée à l'époque : la distance est proportionnelle au temps au carré. C'est pour cela que les points s'alignent globalement sur une droite. On voit que les premiers points ne sont pas sur la droite, cela est peut-être à cause du départ de la bille que nous lâchons à la main.



Bien que nos résultats soient cohérents avec les travaux de Galilée sur la chute des corps, nous n'étions pas tout à fait satisfaits de notre travail. Pour répondre correctement à notre problématique, il faudrait « reproduire » l'expérience de Galilée… ce qui n'était pas le cas ici. Galilée disposait de « capteurs » tout au long du plan incliné (les clochettes) mais nous n'avons aucun capteur dans notre expérience. C'est pourquoi nous avons poursuivi nos recherches. Nous avons alors eu l'idée de disposer des interrupteurs tout au long de notre plan incliné qui, au moment du passage de la bille, déclencheraient un son émis par un buzzer, à l'image des clochettes. Nous avons alors trouvé deux types d'interrupteurs utilisables : les interrupteurs mécaniques et les interrupteurs magnétiques.

2 – Utilisation d'interrupteurs mécaniques

Ces interrupteurs sont faits pour fermer un circuit électrique dès que deux lames métalliques entrent en contact. Une masse, notre bille par exemple, passant sur le levier peut faire en sorte que le contact ait lieu.

Nous avons très vite abandonné l'idée d'utiliser ces interrupteurs car le mouvement de la bille aurait été bien trop altéré lors de son passage sur chaque interrupteur.

3 – Utilisation d'interrupteurs magnétiques

Ces interrupteurs sont également faits pour fermer un circuit électrique dès lors que deux lames métalliques sont en contact. Le contact a lieu si un objet magnétique passe à proximité de l'interrupteur. Nous avons alors décidé de travailler avec une bille magnétique qui n'a pas besoin de passer sur l'interrupteur mais seulement à proximité ! Son mouvement ne serait donc a priori pas altéré par ce type d'interrupteur. De plus, ces interrupteurs ont un temps de réponse très court de l'ordre de la milliseconde. Ainsi, leur utilisation permettra de moderniser l'expérience mais aussi de gagner en précision !

Interrupteur magnétique

Nous avons alors décidé de construire des petits cavaliers amovibles sur le plan incliné, permettant de supporter nos interrupteurs magnétiques. Ainsi, les interrupteurs magnétiques seront au-dessus de la rigole sur laquelle la bille roule. Nous avons réalisé ces cavaliers en PVC à l'aide d'une plieuse thermique.

Nous avons ensuite percé les cavaliers pour y insérer les « pattes » de nos interrupteurs magnétiques que nous avons ensuite fixé à l'aide d'un pistolet à colle.

Réalisation des cavaliers à la plieuse thermique.

Fixation des interrupteurs au pistolet à colle.

Pour que les cavaliers soient amovibles sur notre plan incliné, nous avons décidé de les fixer sur des goulottes électriques, courant de chaque côté du plan incliné. Nous avons ensuite gradué les deux goulottes pour avoir un repère spatial.

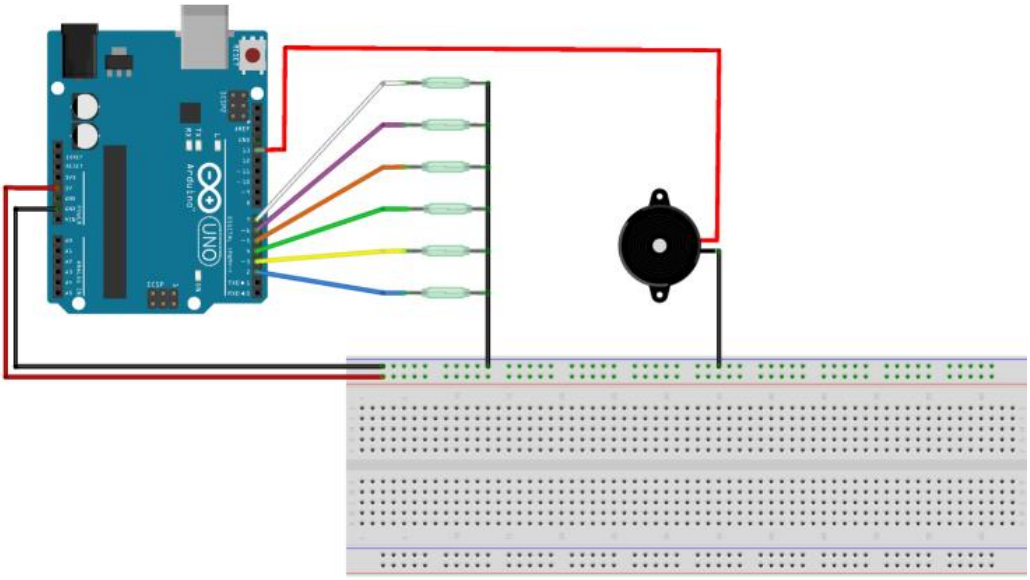
Fixation des cavaliers sur le plan incliné et graduation des goulottes.

Une fois notre plan incliné prêt à l'emploi, nous avons monté nos interrupteurs magnétiques en dérivation sur une pile reliée à un buzzer. Le passage de la bille déclenchait le bruit du buzzer comme prévu ; il ne nous restait plus qu'à retrouver les résultats de Galilée…
Cependant, après quelques mesures préliminaires, nous nous sommes rendu compte qu'il était impossible de mesurer le temps écoulé entre deux « bips » ! La bille était bien trop rapide et notre temps de réaction avant d'appuyer sur le chronomètre était bien trop important par rapport au temps mesuré… Nous aurions dû retrouver le même temps écoulé entre chaque intervalle de distance entre deux cavaliers…Ce n'était pas du tout le cas lorsque nous avons effectué nos premières mesures, en disposant les cavaliers selon la loi des nombres impairs de Galilée.

Image de notre chronomètre - Le temps mis par la bille pour parcourir la distance entre chaque cavalier (tour) est loin d'être toujours la même !

C'est alors que nous avons décidé de moderniser nos mesures en utilisant une carte programmable de type Arduino.

Chaque interrupteur magnétique est relié à une entrée numérique de la carte et le buzzer est sur une sortie numérique :



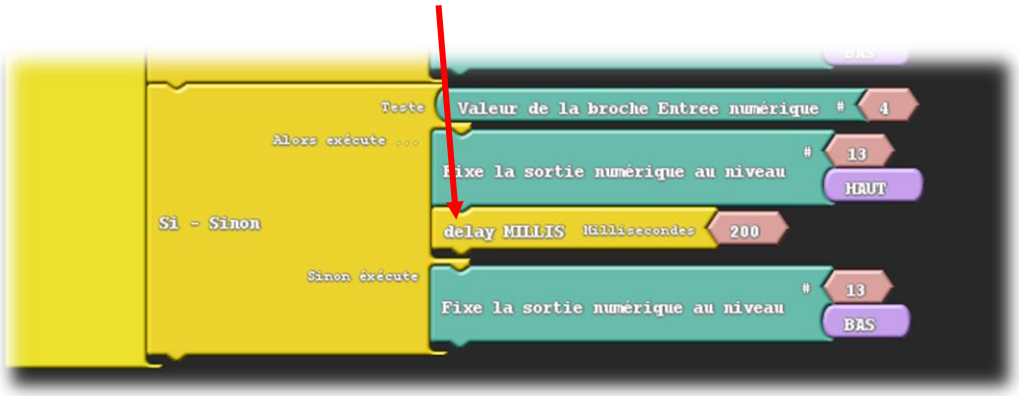
Nous avons ensuite créé un code sur Ardublock permettant de commander le buzzer au passage de la bille. Nous voulions que :

-Le buzzer sonne lorsque la bille quitte le premier capteur
-Le buzzer sonne au moment où la bille passe sous les autres capteurs
Voici donc le programme permettant d'obtenir cela :

Pour chaque capteur, on envoie un ordre au buzzer en fonction de l'état de l'interrupteur. Ici le premier interrupteur est configuré à l'inverse des suivants.

Nous avons rencontré deux problèmes avec ce code.

Premièrement, avant de tester ce code, l'un de nos élèves s'est rendu compte que le buzzer ne pourrait pas s'arrêter. Il faut lui définir une durée de fonctionnement et lui ordonner de s'arrêter ensuite. Il suffit d'utiliser la fonction « delay » que nous connaissons déjà.



Deuxièmement, après avoir testé le code, nous nous sommes rendu compte que le buzzer ne se déclenchait pas correctement lorsque la bille quittait le premier capteur. Nous avons donc décidé de configurer ce premier capteur comme les autres. Le buzzer sonne alors et il s'arrête lorsque la bille quitte le premier capteur.

Il ne nous restait plus qu'à introduire la notion de mesure du temps, ce qui nous posait précisément problème sans l'utilisation d'une carte programmable.

Après quelques recherches, nous avons trouvé qu'il existait la fonction « millis » permettant de renvoyer le temps écoulé depuis la mise en marche de la carte. En utilisant cette fonction à chaque passage de la bille sous un capteur, il nous suffirait ensuite de faire des différences de temps pour obtenir le temps auquel la bille passe sous chaque capteur.

En parallèle de ce travail, nous avons réalisé un partenariat avec l'Université de Technologie de Troyes (UTT). Au sein de cette école plusieurs étudiants se retrouvent chaque semaine dans un club de robotique : le Mindtech. Nous avions prévu de visiter cette école et nous pensions aussi montrer notre projet aux étudiants afin que ceux-ci puissent nous aider à l'améliorer. Mais le contexte sanitaire ne nous a pas permis de réaliser cette visite.

Nous avons donc commencé par échanger avec les étudiants et nous leur avons soumis notre code. Un d'entre eux, Romain, nous a expliqué que lui ne travaillait pas avec Ardublock mais avec de « réelles lignes de codes ».

Après avoir étudié en détails notre travail, il nous a confirmé que tous les capteurs devaient être configurés de la même façon. Il nous a ensuite rajouté des lignes de code afin de calculer la différence de temps entre chaque capteur.

Même si notre propre code n'est pas parfait, il permet tout de même la détection de la bille aux passages des interrupteurs magnétiques et nous souhaitons l'exposer au jury le jour de la finale du concours.

4 – Mesures réalisées avec les interrupteurs magnétiques

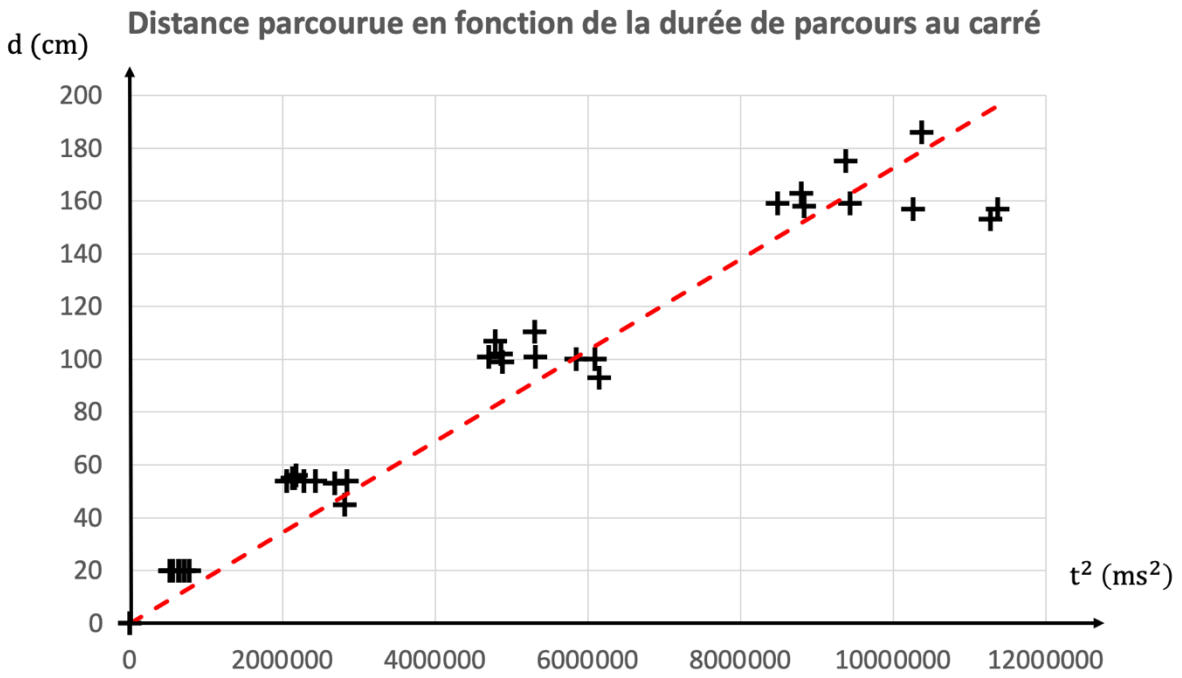
Une fois le code mis au point, nous avons pu réaliser des mesures avec ce nouveau système de détection de la bille.

Pour les séries de mesures présentées ici, le plan incliné formait un angle de 2.3° avec l'horizontal. Nous avons réalisé plusieurs mesures et déplacé les capteurs pour que la durée de parcours de la bille entre deux capteurs soit toujours la même. Il y avait 5 capteurs sur le rail, c'est-à-dire 5 interrupteurs magnétiques.

Nous avons inscrit nos mesures dans un tableau, que vous trouverez dans l'annexe 6. Grâce à ces mesures, nous avons pu tracer sur un graphique la distance parcourue par la bille en fonction du temps de parcours. Nous avons choisi de mettre le temps de parcours au carré, pour comparer nos résultats à la théorie de Galilée. En effet, comme expliqué plus haut, Galilée a montré que la distance est proportionnelle au temps de parcours au carré :

$$d = \beta \times t^2$$

Sur cette courbe, on remarque que nos points sont assez étalés, mais nous avons tracé une droite en pointillés pour montrer qu'on peut retrouver une évolution linéaire de la distance avec le temps au carré. On remarque que nos mesures ne sont pas extrêmement précises. En effet, nous savons que Galilée utilisait un plan incliné trois fois plus long que le nôtre, ce qui devait réduire les erreurs de mesures !



Au cours de nos expériences, nous nous sommes rendus compte de plusieurs problèmes.

Le premier problème concerne le temps de parcours entre le premier et le deuxième capteur. En effet, si on regarde le tableau de mesures en annexe, on voit que la distance entre ces deux capteurs n'a jamais été modifiée. Nous avons toujours gardé la distance d2 = 20cm. Pourtant, le temps mis par la bille pour aller du premier au deuxième capteur change notablement d'une expérience à l'autre ! On constate une différence qui va jusqu'à 154 ms entre l'expérience 5 et l'expérience 7.
De plus, il arrive régulièrement que le buzzer du premier capteur ne s'active pas au départ de la bille. Ainsi, notre technique pour le départ de la bille pourrait être améliorée.

Le deuxième problème nous est apparu lorsque nous avons comparé nos mesures à la théorie établie grâce aux mesures de Galilée de façon plus précise que la courbe précédente.
Comme nous l'avons évoqué plus tôt dans ce dossier, d'après la théorie, on peut montrer que le rapport entre deux distances d_1 et d_2 parcourues par la bille est égal au rapport entre les durées de parcours correspondantes t_1 et t_2 au carré :

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{t_1^2}{t_2^2}$$

Nous avons donc calculé ces rapports pour nos différentes expériences et nos différents capteurs. Voici les calculs réalisés pour 3 expériences :

Expérience 1	Calculs distance	Calculs temps
$D2/D1=T2^2/T1^2$	2,7	3,90
$D3/D2=T3^2/T2^2$	2,05	2,58
$D4/D3=T4^2/T3^2$	1,68	1,96

Expérience 2	Calculs distance	Calculs temps
$D2/D1=T2^2/T1^2$	2,75	2
$D3/D2=T3^2/T2^2$	1,95	1,56
$D4/D3=T4^2/T3^2$	1,64	1,38

Expérience 3	Calculs distance	Calculs temps
$D2/D1=T2^2/T1^2$	2,75	3,90
$D3/D2=T3^2/T2^2$	1,85	2,26
$D4/D3=T4^2/T3^2$	1,60	1,81

On peut remarquer deux choses :

- Nos expériences sont reproductibles car les rapports de distance et de durées que nous avons calculés sont très proches d'une expérience à une autre.
- Nos expériences ne suivent pas la théorie décrite par Galilée car le rapport des distances n'est jamais égal au rapport des durées au carré.

Ainsi, il semble qu'il y ait un problème de fond plus important dans notre réalisation de l'expérience de Galilée, mais nous semblons être sur la bonne voie…

Nous avons donc mené plusieurs réflexions de manière à identifier la source du problème.

La présence des interrupteurs magnétiques affecte-t-elle le mouvement de la bille ?
Le mouvement de la bille magnétique est-il perturbé par des éléments métalliques ?

Nous avons mesuré le temps de parcours de la bille sur une distance d=1,90 m du plan incliné, avec les capteurs au-dessus du passage de la bille et sans les capteurs. Ainsi, nous avons pu tester l'influence de la présence des interrupteurs magnétiques sur le mouvement global de la bille. Les mesures réalisées au chronomètre étaient très proches avec ou sans les capteurs. De plus, nous avons pu vérifier que la durée obtenue était proche de la durée théorique attendue. Les interrupteurs magnétiques ne perturbent donc pas le mouvement de la bille, contrairement aux interrupteurs mécaniques que nous avions testés précédemment.

Sous la table sur laquelle nous plaçons le rail pour réaliser nos expériences, nous avons remarqué qu'il y avait de grosses structures métalliques par lesquelles la bille magnétique peut être fortement attirée. En déplaçant le rail au sol, et en écartant bien tous les objets métalliques à proximité, nous avons pu tester l'influence de ces objets sur le mouvement de la bille. Cependant, cette fois encore, le temps de parcours du rail était identique sur la table ou au sol.

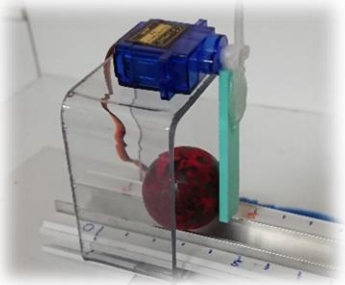
Afin d'éloigner tout objet métallique de notre rail, les élèves de l'UTT nous ont conçu un support pour poser notre rail. Celui-ci a été imprimé en 3D, ce qui nous a permis de « nous débarrasser » de notre potence en métal :

Elévateur imprimé en 3D

Au mois de janvier, Romain a pu se libérer une après-midi et il est venu travailler sur notre projet.

Il nous a donné quelques pistes concernant nos problèmes :

- Le départ de la bille n'est pas fiable. Il nous a conseillé d'utiliser un servo moteur. Nous en avons donc fixé un sur un de nos supports :



Servo moteur

- La détection du temps dans notre programme a été mal codée, il nous a conseillé d'utiliser la fonction « millis », plus adaptée à nos prises de temps. De plus, lorsque nous avons réalisé notre premier code, nous avions considéré l'état haut comme un instant « t » très bref correspondant au passage de la bille. Romain nous a expliqué que dans notre cas le capteur restait à l'état haut pendant une certaine durée (le temps que la bille passe). Donc pour détecter le passage de la bille précisément, la carte Arduino devait mesurer quelque chose de précis. Une des solutions est de détecter l'instant où l'état du capteur change (pour nous de haut à bas, c'est-à-dire au moment où la bille quitte la zone de détection du capteur : c'est un évènement unique).

- La vitesse de passage de la bille lors du passage à proximité de l'interrupteur magnétique n'est pas la même, ce qui peut influencer les mesures.

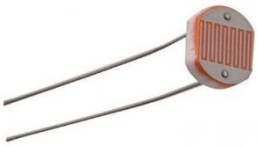
- Les capteurs que nous avons choisis ne sont peut-être pas les plus judicieux : il nous a conseillé d'essayer avec des capteurs lumineux.

IV – Perspectives

1 – Capteurs lumineux

Nous n'avons pas baissé les bras, et décidé de nous atteler à la réalisation de nouveaux capteurs : des capteurs lumineux.

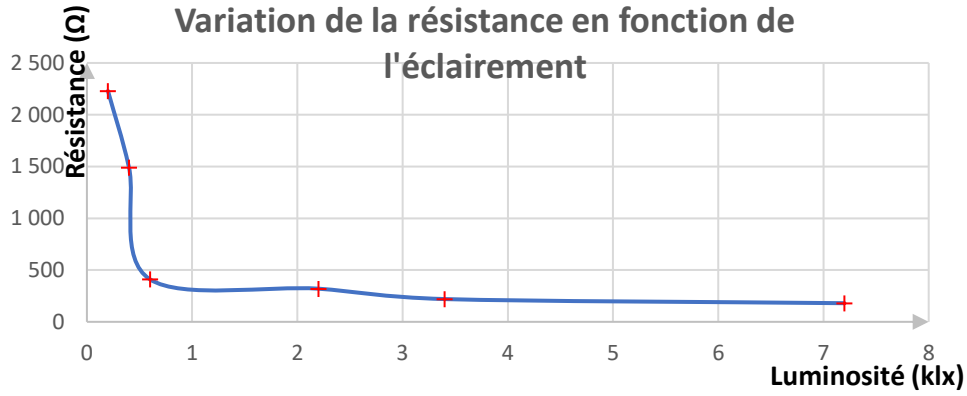
Comment créer un capteur de lumière ?



Dans nos recherches pour fabriquer un capteur de lumière nous avons vu qu'une photorésistance était très souvent utilisée, nous avons donc voulu comprendre son fonctionnement. Le nom anglais, LDR, permet déjà de mieux comprendre ce que c'est : LDR pour Light Dependent Resistor.
La photorésistance est un dipôle dont la résistance dépend de la lumière qu'il reçoit.

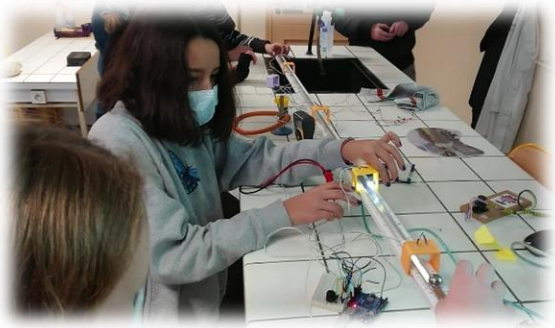
Pour s'en rendre compte nous avons exposé une photorésistance à plusieurs luminosités différentes et nous avons mesuré les valeurs de résistance correspondantes :

Nous avons obtenu les résultats suivants :



Mesure de la résistance

On voit ici que la résistance diminue en fonctionnement de l'éclairement.



Nous avons ensuite fabriqué de nouveaux supports pour pouvoir fixer les photorésistances. Celles-ci seront éclairées par des LED. Lorsque la bille passera dans le support, la luminosité va baisser d'un coup, ce qui correspondra au temps de passage de la bille.

Les premiers tests que nous avons réalisés avec nos nouveaux capteurs lumineux sont encourageants.

Au passage de la bille, nous avons noté une nette baisse de la résistance ce qui nous laisse penser qu'ils pourront mesurer efficacement le temps.
Il ne nous reste plus qu'à coder …

2 – Kit de diffusion

Suite à la finale académique nous avons voulu partager notre projet. Pour cela nous avons imaginé un kit de diffusion qui pourrait profiter à des collégiens ou des lycéens. Ainsi les élèves et leurs enseignants pourraient disposer de toutes les informations nécessaires pour réaliser ce projet. Nous pourrions l'envoyer, sous format numérique, sur demande des établissements.

Ce kit serait composé :

- Du dossier réalisé pour le concours C.Génial
- Du lien de la vidéo youtube : https://youtu.be/eGbwdOFqOzk
- Du plan des cavaliers (Annexe 7)
- D'un fichier tableur avec les références, quantité, fournisseur et prix du matériel nécessaire (Annexe 8)
- Du fichier en format. stl pour imprimer le support élévateur en 3D

Conclusion

A travers ce projet nous avons pu découvrir de nombreuses choses et nous avons réalisé beaucoup d'expériences et de mesures.

Nous avons pu nous comprendre la démarche qui a poussé Galilée à utiliser un plan incliné pour l'étude de la chute d'un corps. Nous avons aussi utilisé une méthode de pointage vidéo que nous réutiliserons très certainement au lycée !

Nous pensons avoir réussi à revisiter l'expérience de Galilée avec les moyens techniques d'aujourd'hui. En effet, les capteurs que nous avons testés et la carte programmable Arduino ont vraiment modernisé cette expérience historique. De plus, ces nouvelles techniques permettent d'obtenir une meilleure précision que celle de Galilée. En effet, Galilée mesurait les temps à l'oreille, alors que notre méthode innovante peut permettre d'atteindre une précision de l'ordre de la milliseconde.

Les difficultés que nous avons rencontrées au cours du projet nous ont parfois un peu démoralisés, mais nous avons compris que les erreurs et les problèmes font partie de la démarche de recherche scientifique. C'est grâce aux problèmes que nous avons eu que nous avons pu améliorer notre expérience. Ce projet nous a permis aussi de nous rendre compte de la précision des travaux de Galilée, alors qu'il ne disposait pas des moyens techniques que nous avons utilisé.

Lors de l'utilisation des interrupteurs magnétiques, les changements que nous avons effectués nous ont permis d'améliorer nos résultats, mais il reste encore un écart avec les résultats théoriques. Comme nous l'avons présenté dans les perspectives de ce dossier, nous espérons bientôt pouvoir mettre en place les capteurs lumineux que nous avons commencé à fabriquer. Grâce à ces capteurs et un code adapté, nous pensons qu'il sera possible de se rapprocher encore plus des résultats obtenus par Galilée.

Remerciements

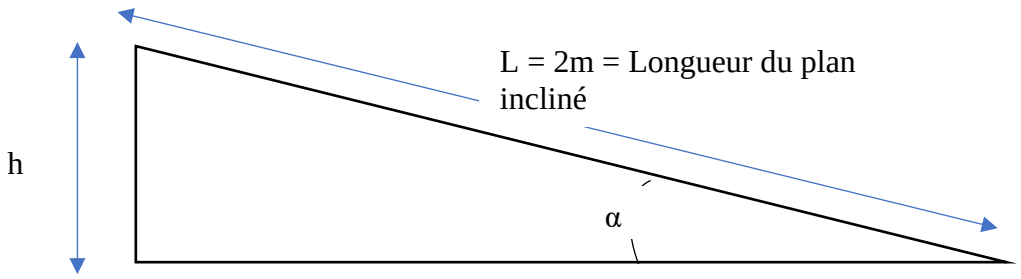
Nous remercions M. Germain, principal, M. Michel, principal adjoint, de nous avoir permis de mettre en place notre atelier au sein du collège ainsi que Madame Veron, gestionnaire du collège.

Nous remercions aussi Madame Chollet et Mme Maizières, qui nous ont été d'une grande aide au début de notre projet.

Enfin, nous remercions les étudiants de l'UTT, en particulier Romain pour son aide précieuse concernant la partie programmation.

Annexes

1 – Mesure de l'angle d'inclinaison du plan incliné



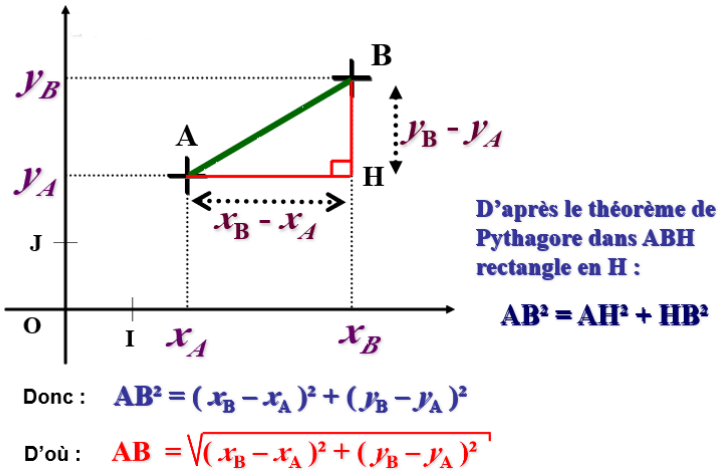
$$\sin \alpha = \frac{h}{L}$$

$$\alpha = arcsin\,(\frac{h}{L})$$

-Connaissant la longueur L de notre plan incliné ainsi que la hauteur h, on peut calculer le sinus de l'angle d'inclinaison α.
-Ensuite, on accède à α grâce à la fonction inverse du sinus.

2 – Calcul de la distance entre deux points avec Latis-Pro

Voici comment on peut calculer la distance entre deux points dans un repère orthonormé, en utilisant le théorème de Pythagore.



Voici alors la formule entrée dans le logiciel Latis-Pro pour calculer l'écart de distance entre deux positions de la bille. L'abscisse étant ici « Mouvement X » et l'ordonnée « Mouvement Y ».

```
DeltaD=sqrt(sqr(Mouvement X-Mouvement X[n-1])+sqr(Mouvement Y-Mouvement Y[n-1]))
```

A partir de DeltaD, nous avons pu calculer la distance d parcourue par la bille depuis son départ.

3 – Code final avec trois capteurs

Dans ce code, tout le texte noté après les symboles // sont des commentaires qui permettent de rendre le code lisible pour une personne qui ne l'aurait pas conçu.

CODE 3 capteurs + mesure du temps

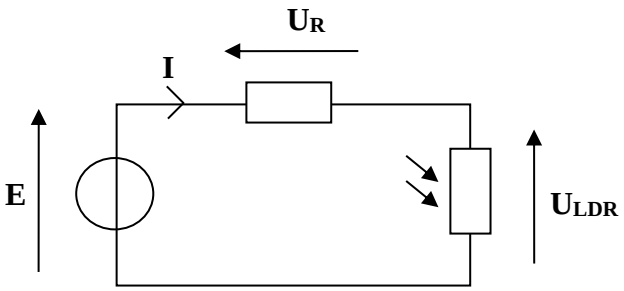
```
int switch1 = 3;   //l'interrupteur 1 est sur la sortie 3
int switch2 = 4;   //l'interrupteur 2 est sur la sortie 4
int switch3 = 5;   //l'interrupteur 3 est sur la sortie 5

int buzzer = 13;    //le buzzer est sur la sortie 13

int switch1actuel;       //variable pour l'état actuel du switch1
int switch1avant = HIGH;  //variable pour l'état précédent
long tDepart;            //variable (longue) qui stocke la mesure du temps de départ

int switch2actuel;       //variable pour l'état actuel du switch2
int switch2avant = HIGH;  //variable pour l'état précédent
long t2;                 //variable (longue) qui stocke la mesure du temps t2

int switch3actuel;       //variable pour l'état actuel du switch3
int switch3avant = HIGH;  //variable pour l'état précédent
long t3;                 //variable (longue) qui stocke la mesure du temps t3

int tempsDelay = 200;     //duree du bip de tout les buzzers en ms


void setup()
{

  pinMode( switch1 , INPUT_PULLUP);  // l'interrupteur 1 est une entrée
  pinMode( switch2 , INPUT_PULLUP);  // l'interrupteur 2 est une entrée
  pinMode( switch3 , INPUT_PULLUP);  // l'interrupteur 3 est une entrée

  pinMode( buzzer , OUTPUT);        // le buzzer est une sortie

  Serial.begin(57600);              // on règle la vitesse à 57600 bits par seconde dans le moniteur série
   }


void loop()
{
    switch1actuel = digitalRead(switch1);                //lit l'état actuel du bouton

  if ((switch1avant == LOW) && (switch1actuel == HIGH)) {   //L'état vient de passer de LOW a HIGH : la
bille quite le capteur
   digitalWrite(buzzer, HIGH);                          //le buzzer sonne pendant le temps choisi (tempsDelay)
   delay(tempsDelay);
```

```
  digitalWrite(buzzer, LOW);                    //le buzzer s'arrête
  tDepart = millis();                          //Définit le temps de départ quand la bille s'écarte du capteur
de départ
 }
 switch1avant = switch1actuel;                  //on mémorise l'état pour les prochains passages dans la
boucle loop
 switch2actuel = digitalRead(switch2);              //lit l'état actuel du bouton

 if ((switch2avant == LOW) && (switch2actuel == HIGH)) {   //L'état vient de passer de LOW a HIGH : la
bille quite le capteur
  digitalWrite(buzzer, HIGH);                   //actions qui seront exécutées quand la bille s'écarte du
capteur
  delay(tempsDelay);
  digitalWrite(buzzer, LOW);
  t2 = millis();                            //Définit le temps t2 quand la bille s'écarte du capteur 2
  Serial.print(" delta2 : ");                     //affiche delta2
  Serial.println(t2 - tDepart);                   //mesure la différence entre t2 et tDépart
 }

 switch2avant = switch2actuel;                  //on mémorise l'état pour les prochains passages dans la
boucle loop


 switch3actuel = digitalRead(switch3);              //lit l'état actuel du bouton

 if ((switch3avant == LOW) && (switch3actuel == HIGH)) {   //L'état vient de passer de LOW a HIGH : la
bille quite le capteur
  digitalWrite(buzzer, HIGH);                   //actions qui seront exécutées quand la bille s'écarte du
capteur
  delay(tempsDelay);
  digitalWrite(buzzer, LOW);
  t3 = millis();                            //Définit le temps t3 quand la bille s'écarte du capteur 3
  Serial.print(" delta3 : ");                     //affiche delta3
  Serial.println(t3 - t2);                       //mesure la différence entre t2 et tDépart
 }
 switch3avant = switch3actuel;                  //on mémorise l'état pour les prochains passages dans la
boucle loop

 }
```

4 – Comment mesurer la luminosité avec une photorésistance ?

Utilisons les règles d'électricité pour comprendre ce que nous avons observé :
Pour aller plus loin dans nos mesures nous avons réalisé le montage suivant :

Il permet d'étudier l'évolution de la tension aux bornes de la photorésistance ($\mathbf{U_{LDR}}$)en fonction de l'éclairement.



E est la tension aux bornes du générateur
$\mathbf{U_R}$ est la tension aux bornes de la résistance
$\mathbf{U_{LDR}}$ est la tension aux bornes de la photorésistance

Nous avons réalisé plusieurs mesures avec des résistances différentes. Cela nous a permis de constater que plus la résistance est élevée, plus la différence de tension est importante. Nous avons donc choisi d'utiliser une résistance de 4 700 Ω.

Loi d'Ohm : $U_R = R \times I$
$U_{LDR} = R_{LDR} \times I$

Loi des mailles : $E = U_R + U_{LDR}$

$$E = R \times I + R_{LDR} \times I$$

$$E = (R + R_{LDR}) \times I$$

On remplace I par : $I = \frac{U_{LDR}}{R_{LDR}}$

$$E = (R + R_{LDR}) \times \frac{U_{LDR}}{R_{LDR}}$$

Soit : $U_{LDR} = \frac{R_{LDR}}{R + R_{LDR}} \times E$

On s'aperçoit que la valeur de la résistance R joue énormément sur la sensibilité du montage :
Si la valeur de R est négligeable devant R_{LDR} , la photorésistance sera peu sensible. Au contraire si la valeur de R est proche de R_{LDR}, la photorésistance sera très sensible, car la moindre différence de luminosité entrainera un changement de la tension en sortie du pont diviseur.

5 – Influence de la masse de la bille sur le mouvement

Comme expliqué dans le texte, nous avons réalisé plusieurs expériences pour tester l'influence de la masse de la bille sur le mouvement. Pour cela, nous avions 4 billes et nous avons mesurer le temps pris par ces billes pour parcourir le plan incliné.

Deux séries de mesures ont été réalisées. Pour la première série de mesures, l'angle d'inclinaison de notre plan était alors de 3,5°. Pour les billes 2 et 4, nous avons effectué quatre mesures du temps de parcours de la rigole (en secondes) et nous avons réalisé une moyenne de ces mesures. Voici les résultats obtenus :

Masse bille = 32,5 g	Mesure n°...	1	2	3	4	Moyenne
Angle = 3,5°	Mesure chronomètre	3	3,04	2,94	3,06	3,01
	Mesure montre Ewan	3,04	2,9	2,98	2,99	2,98
	Mesure montre Côme	3,07	3,01	2,95	2,92	2,99
Masse bille = 93,4 g	Mesure n°...	1	2	3	4	Moyenne
Angle = 3,5 °	Mesure chronomètre	3,09	3,09	3,12	3,03	3,08
	Mesure montre Ewan	3,02	3,02	2,88	2,9	2,96
	Mesure montre Côme	3,39	2,85	3,01	3,14	3,10

Ensuite, de la même manière, nous avons mesuré le temps mis par la bille 4 pour parcourir notre plan mais avec deux angles d'inclinaison différents : 3,5 ° et 3,1°. Voici les résultats obtenus :

Masse bille = 93,4 g	Mesure n°...	1	2	3	4	Moyenne
Angle = 3,5 °	Mesure chronomètre	3,09	3,09	3,12	3,03	3,08
	Mesure montre Ewan	3,02	3,02	2,88	2,9	2,96
	Mesure montre Côme	3,39	2,85	3,01	3,14	3,10
Masse bille = 93,4 g	Mesure n°...	1	2	3	4	Moyenne
Angle = 3,1°	Mesure chronomètre	4,06	3,59	3,53	3,69	3,72
	Mesure montre Ewan	3,85	3,57	3,55	3,69	3,67
	Mesure montre Côme	3,6	3,58	3,45	3,64	3,57

Pour la deuxième série de mesures, l'angle d'inclinaison de notre plan était de 6°. Pour les quatre billes, nous avons effectué quatre mesures (en secondes) et nous avons réalisé une moyenne de ces mesures. Ici, les mesures ont été réalisées au chronomètre seulement. Ici, nous avons mesuré les durées de parcours d'une partie du plan incliné, soit une distance D = 1,9 m. Voici les résultats obtenus :

Masse de la bille	$m_1 = 7{,}4\ g$	$m_2 = 32{,}5\ g$	$m_3 = 36{,}3\ g$	$m_4 = 93{,}4\ g$
Mesure n°1 (s)	2,27	2,25	1,97	2,22
Mesure n°2 (s)	2,19	2,09	2,25	2,03
Mesure n°3 (s)	2,15	2,16	2,25	2,22
Mesure n°4 (s)	2,18	2,28	2,08	2,22
Moyenne (s)	2,20	2,20	2,14	2,17

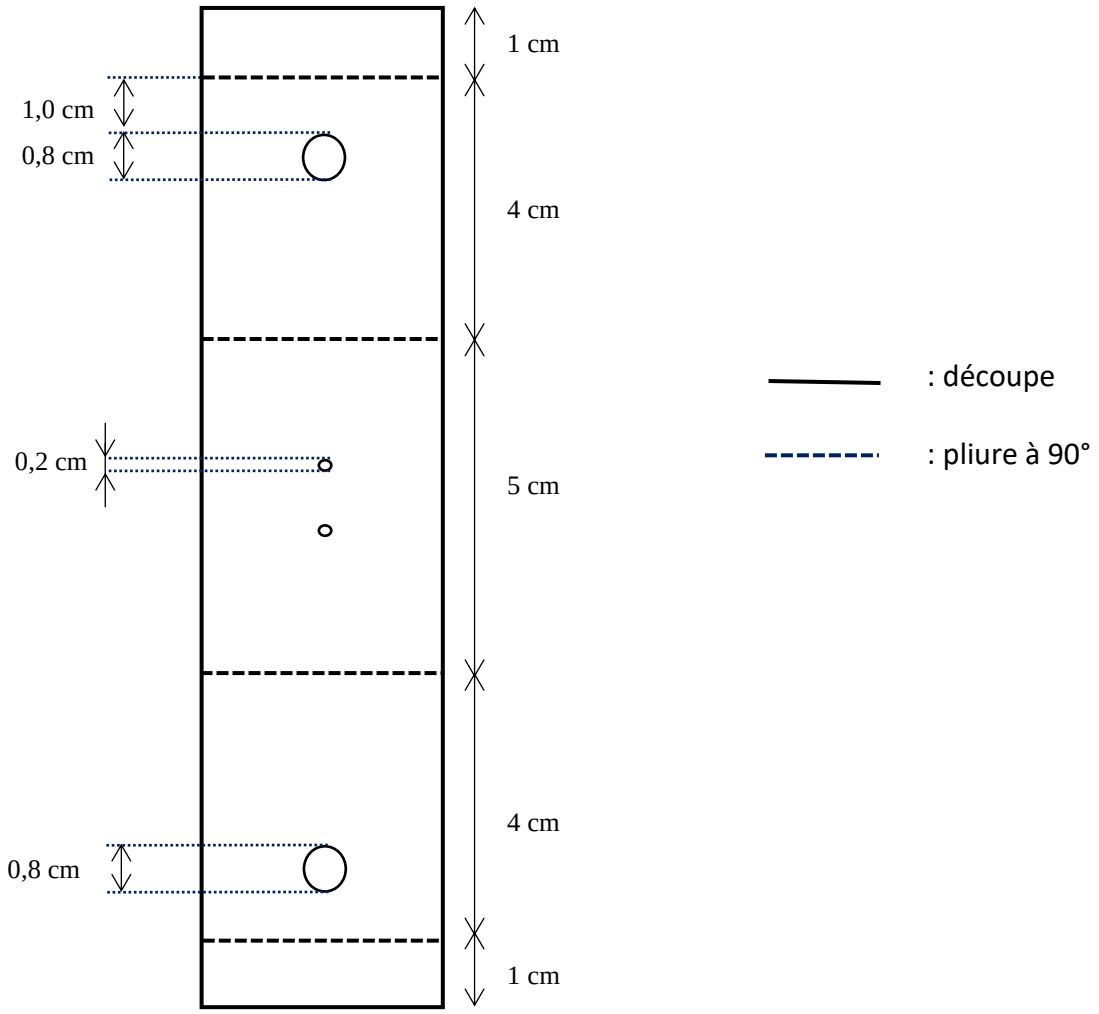
Grâce à toutes ces mesures, on remarque que la masse de la bille n'influence pas la chute, comme le prévoyait Galilée. De plus, on remarque aussi que la bille est plus rapide lorsque le plan est plus incliné.

6 – Mesures réalisées avec les interrupteurs magnétiques

On note t_2 la durée de parcours de la bille entre le premier et le deuxième capteur qui sont séparés d'une distance d_2, t_3 la durée de parcours de la bille entre le deuxième et le troisième capteur qui sont séparés d'une distance d_3, etc…
Voici les résultats de nos mesures :

Numéro expérience	t_2 (ms)	d_2 (cm)	t_3 (ms)	d_3 (cm)	t_4 (ms)	d_4 (cm)	t_5 (ms)	d_5 (cm)
1	750	20	928	25	801	48	878	60
2	800	20	709	34	701	45	762	59
3	743	20	732	36	694	45	744	58
4	803	20	755	34	747	47	766	58
5	883	20	804	34	781	46	903	57
6	843	20	795	33	780	47	785	57
7	727	20	708	34	868	56.5	918	75.5
8	729	20	729	35	729	52	876	68
9	743	20	725	35	738	47	759	61

7 – Plan des cavaliers



8 – Liste matériel

Produit	Fournisseur	Qté	Prix unit.	Prix total
Profilé alu en U 2m (15 mm)	https://www.bricodepot.fr/auxerre/u-alu-brut-15-x-19-mm-2-m/prod74533/ref104586/?pushSite=1742&gclid=CjwKCAjw6qqDBhB-EiwACBs6x6BHlP0bSSrZ5eB4vhfKNfEEtTITgapW5gbtGpdletPsQhSgdodGUhoCNxgQAvD_BwE&gclsrc=aw.ds	1	11,9	11,9
Moulure blanche PVC adhésive	https://www.bricodepot.fr/auxerre/moulure-blanche-adhesive-10x10-mm-l-2m/prod44128/	2	2,5	5
Plaque PVC	https://www.opitec.fr/Accessoires-techniques---/Plastique/Plaques-en-mousse-rigide/Plaque-de-mousse-rigide-PVC-Di-rouge.html?listtype=search&searchparam=plaque%20pvc	3	1,55	4,65
Câbles électriques	https://www.opitec.fr/Accessoires-techniques---/Cablage/Cables-cables-de-mesure/Fil-de-c-blage-monobrin-Section-noir.html?pgNr=5	1	16,79	16,79
Interrupteur magnétique	https://www.opitec.fr/Accessoires-techniques---/Cablage/Interrupteurs/Contacteur-reed-Pour-utilis-10-pi-ces.html?searchparam=oxartnum:204161&redirected=1	1	6,55	6,55
Carte Arduino	https://fr.farnell.com/arduino/a000066/arduino-uno-carte-d-eval/dp/2075382?st=carte%20arduino	1	19,55	19,55
Plaque d'essai	https://www.opitec.fr/Accessoires-techniques---/Composants-electroniques/Platines/Plaque-d-essai-de-montage-Breadboard-petit.html?searchparam=oxartnum:210968&redirected=1	1	2,95	2,95
Gaine thermo rétractable	https://www.opitec.fr/Accessoires-techniques---/Cablage/Cables-cables-de-mesure/Tube-thermor-tractable-K200-diam-3.html?searchparam=oxartnum:930507&redirected=1	1	5,45	5,45
Buzzer	https://www.opitec.fr/Accessoires-techniques---/Composants-electroniques/Vibreurs/Vibreur-magn-tique-Emission-sonore.html	1	1,29	1,29
Bille magnétique 19 mm	https://www.supermagnete.fr/billes-magnetiques-neodyme/bille-magnetique-19mm_K-19-C	1	23,3	23,3
Bobine fil PLA	https://fr.farnell.com/filamentive/10866/3d-printer-filament-pla-1-75mm/dp/2917062?st=pla	1	32,15	32,15
		TOTAL :		**129,58 €**