

Travaux pratiques de physique

Enseignement de Spécialité de la classe de Première

M. Leroy-Bury

Année 2024 - 2025

C'est par l'expérience que la science et l'art

font leur progrès chez les Hommes

Métaphysique – ARISTOTE (384-322 av. J.-C)



LABORATOIRES
Physique & Chimie

72 rue Raynouard, 75016 Paris

01 44 30 26 00

Saint-Jean de Passy

Calendrier prévisionnel - travaux pratiques de physique

Année scolaire 2024-2025

numéro de semaine et lundi	code et intitulé du TP
39 – lundi 23 septembre	<i>P01 – lentilles minces convergentes - focométrie</i>
40 – lundi 30 septembre	<i>P02 – formation des images par réfraction – relation de conjugaison</i>
46 – lundi 11 novembre	<i>P03 - Vecteur variation de vitesse et PFD</i>
47 – lundi 18 novembre	<i>P04 – Champ gravitationnel – poids et champ de pesanteur</i>
50 – lundi 09 décembre	<i>P05 – interaction électrique - Loi de Coulomb – champ électrostatique</i>
03 – lundi 13 janvier	<i>P06 – travail d'une force constante – énergie cinétique</i>
04 – lundi 20 janvier	<i>P07 – énergie potentielle - énergie mécanique – conservation – pendule simple</i>
11 – lundi 10 mars	<i>P08 – Circuits électriques et capteurs (photorésistance)</i>
12 – lundi 17 mars	<i>P09 – Conversion d'énergie dans un circuit électrique (moteur)</i>
13 – lundi 24 mars	<i>P10 – Conversion énergie lumineuse (cellule photovoltaïque)</i>
14 – lundi 31 mars	<i>P11– Ondes – mesures de retard et de célérité</i>
15 – lundi 07 avril	<i>P12 – Ondes périodiques – mesures de longueur d'onde</i>
20 – lundi 12 mai	<i>P13 – Fluide compressible au repos (gaz) – loi de Mariotte</i>
21 – lundi 19 mai	<i>P14 – Fluide incompressible au repos (liquide) – loi de l'hydrostatique</i>

Tous droits réservés - À l'usage exclusif des élèves de M. Leroy-Bury

Comment obtenir une image à l'aide d'une lentille mince convergente ?

Objectifs d'apprentissage :

- Estimer la distance focale d'une lentille mince convergente.
- Réaliser une mise au point en modifiant soit la distance focale de la lentille convergente soit la géométrie du montage optique.

Document 1 : matériels mis à disposition

- 1 banc d'optique gradué
- 1 lanterne avec condenseur et porte-objet
- 1 coffret avec lentilles, miroirs et diaphragmes
- 2 cavaliers porte-lentille
- 1 cavalier porte-écran et son écran
- 1 chiffon d'essuyage microfibre
- 1 lampe de bureau avec filtre rouge

But des travaux pratiques

On souhaite établir les conditions permettant d'obtenir une image nette et contrastée à l'aide d'une lentille mince convergente.

Première partie : image réelle ou virtuelle - positions de l'objet et de l'image.

1. Choisir une lentille de vergence $C = 10 \delta$ (distance focale $f' = 100 \text{ mm}$).
2. Une lentille mince convergente peut être employée soit comme une loupe soit comme une lentille de projection. Pour chaque situation étudiée, réaliser le schéma optique correspondant.
 - a) Positionner la lentille \mathcal{L} et l'objet AB de telle sorte que $\overline{AO} < f'$.
 Observe-t-on une image sur un écran ? Qu'observe-t-on à travers la lentille ?
 Où peut-on situer l'image par rapport à la lentille ou l'un des foyers ? Comment la qualifie-t-on ?
 - b) Positionner la lentille \mathcal{L} et l'objet AB de telle sorte que $f' < \overline{AO} < 2f'$.
 Observe-t-on une image sur un écran ? Le cas échéant mesurer sa taille A'B'.
 Où peut-on situer l'image par rapport à la lentille ou l'un des foyers ? Comment la qualifie-t-on ?
 - c) Positionner la lentille \mathcal{L} et l'objet AB de telle sorte que $\overline{AO} > 2f'$.
 Observe-t-on une image sur un écran ? Le cas échéant mesurer sa taille A'B'.
 Où peut-on situer l'image par rapport à la lentille ou l'un des foyers ? Comment la qualifie-t-on ?
3. Reprendre le travail précédent avec une lentille de vergence $C = 5 \delta$ (distance focale $f' = 200 \text{ mm}$)
4. On souhaite obtenir une image réelle renversée et agrandie d'un objet ($\gamma = \frac{A'B'}{AB} = -2$) avec le montage le plus court possible (distance AA' minimale) : quelle lentille faut-il choisir parmi les deux précédentes ?

Deuxième partie : effet d'un diaphragme et conditions de stigmatisme approché de Gauss

Dans cette partie, on utilise la lentille mince convergente de distance focale $f' = 200$ mm (vergence $C = 5 \delta$).

1. Positionner l'objet AB , la lentille \mathcal{L} et l'écran de sorte que l'image $A'B'$ soit réelle renversée et agrandie ($\gamma = \frac{A'B'}{AB} = -2$). Relever les différentes positions des éléments du montage optique.
2. Comparer l'image, en terme de netteté et de luminosité (ou contraste), dans les trois situations suivantes :
 - a) sans diaphragme accolé à la lentille ;
 - b) avec le plus grand des diaphragmes circulaires ;
 - c) avec le plus petit des diaphragmes circulaires.
3. Dans chaque cas précédent, préciser l'intervalle des positions de l'écran permettant d'obtenir une image nette.
4. Quel est le rôle d'un diaphragme accolé à la lentille dans un montage optique ?
5. Vérifier qu'en occultant la partie inférieure ou supérieure de la lentille (ou bien la gauche ou la droite), l'image continue de se former en entier. Que remarque-t-on alors ? Interpréter le phénomène observé en vous aidant d'un schéma.

Comment déterminer la position et la taille d'une image donnée par une lentille mince convergente ?

Objectifs d'apprentissage :

- Mesurer la distance focale d'une lentille mince convergente.
- Tester la relation de conjugaison d'une lentille mince convergente.
- Réaliser une mise au point en modifiant soit la distance focale de la lentille convergente soit la géométrie du montage optique.

Document 1 : matériels et produits mis à disposition

- 1 banc d'optique gradué
- 1 lanterne avec condenseur et porte-objet
- 1 coffret avec lentilles, miroirs et diaphragmes
- 1 cavalier porte-lentille
- 1 cavalier porte-écran et son écran
- 1 chiffon d'essuyage microfibre
- 1 lampe de bureau + filtre rouge
- Logiciel tableur-grapheur scientifique *Regressi* + EDI python (*pyzo*TM)

But des travaux pratiques

On souhaite tester la relation de conjugaison (relation de DESCARTES) des lentilles minces et en déduire une méthode pour déterminer la distance focale $f' = \frac{1}{\overline{OF'}}$ ou bien la vergence $C = \frac{1}{f'}$ d'une lentille mince convergente.

Première partie : la relation de conjugaison de Descartes (René)

La relation de conjugaison de DESCARTES établit qu'une image A'B' donné par une lentille mince d'un objet AB est l'homothétique de cet objet ; autrement dit la position de l'objet vis à vis du centre optique O de la lentille et la connaissance de sa distance focale suffisent pour déterminer la position de l'image, son sens et sa taille. Du point de vue des constructions géométriques, l'homothétie de centre O met en correspondance des triangles judicieusement choisi selon le théorème de THALÈS.

Relation de conjugaison de DESCARTES pour une lentille mince :

$$\frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{\overline{OA}} + \frac{1}{\overline{OF'}}$$

Dans cette partie, on utilise une lentille mince convergente de distance focale $f' = 200\text{mm}$ et un diaphragme permettant d'obtenir l'image la plus nette et la plus contrastée possible.

On veillera à utiliser le condenseur de la lanterne lors de chaque mesure pour concentrer toute la lumière sur la lentille.

1. Positionner l'objet AB, la lentille \mathcal{L} et l'écran de sorte que l'image A'B' soit réelle et renversée puis mesurer les positions $a = \overline{OA}$ et $a' = \overline{OA'}$
2. Modifier la position de la lentille et de l'écran de sorte d'obtenir une dizaine de couples de mesure (a, a') :

— Compléter alors le tableau des mesures suivant :

a (en m)										
a' (en m)										
$x = \frac{1}{a}$ (en m^{-1})										
$y = \frac{1}{a'}$ (en m^{-1})										

- Construire le graphique représentant l'évolution de a en fonction de a' .
- Construire le graphique représentant l'évolution de y en fonction de x .
- Modéliser mathématiquement $y = f(x)$ selon la relation de conjugaison de DESCARTES.

3. Dédire de ce qui précède une valeur expérimentale de la distance focale f' et de la vergence $C = \frac{1}{f'}$ de la lentille utilisée.

Deuxième partie : la construction de Bouasse (Henri)

Principe : On construit un repère orthonormé (Ox, Oy) dont les axes représentent respectivement les espaces objet et image de la lentille. L'origine O du repère correspond au centre optique O de la lentille. Les objets sont réels si $x < 0$ et les images sont réelles si $y > 0$. Pour chaque couple de mesures $x = \overline{OA}$ et $y = \overline{OA'}$, on place les points de coordonnées $A'(0; y)$ et $A(x; 0)$ puis on trace la droite (AA') . On constate que l'ensemble des droites correspondant aux mesures réalisées avec une même lentille s'interceptent en un seul point Ω de coordonnées $(\overline{OF}; \overline{OF'})$.

1. Réaliser la construction de BOUASSE correspondant à vos mesures de la première partie.
2. Déterminer par lecture graphique la valeur de la distance focale de votre lentille.
3. Montrer que le coefficient directeur (pente) de l'une de ces droites (AA') est l'opposé du grandissement pour le couple objet-image considéré.
4. *Pour aller plus loin :* Montrer que l'on peut retrouver la relation de conjugaison de DESCARTES à partir de l'équation cartésienne de cette droite.

Troisième partie : la méthode de Bessel (Friedrich)

Principe : On note D la distance entre l'objet et l'écran sur lequel se formera une image, et f' la focale de la lentille étudiée. On peut montrer par le calcul que si $D \geq 4f'$, alors il existe deux positions de la lentille permettant d'obtenir une image à l'écran. Soit d la distance entre ces deux positions, on a alors :

$$f' = \frac{D^2 - d^2}{4D}$$

1. En fixant dans un premier temps la distance $D > 4f'$ entre l'objet et l'écran, vérifier qu'il existe bien deux positions de la lentille pour lesquelles on obtient une image nette sur l'écran.
2. Mesurer précisément la distance d entre ces deux positions et en déduire la distance focale f' de la lentille utilisée.
3. Réduire la distance objet-écran D jusqu'à qu'une seule et unique position de la lentille permette d'obtenir une image sur l'écran. Comparer cette distance D à la valeur de f' déterminée expérimentalement. Réaliser le schéma optique correspondant à cette situation particulière.
4. *Pour aller plus loin :* Retrouver la formule de BESSEL à partir de la relation de conjugaison de DESCARTES.

Vecteur variation-de-vitesse et Principe fondamental de la dynamique

En physique, la cinématique (du grec *kinêma*, le mouvement) est l'étude du mouvement d'un corps mobile, selon le point de vue d'un observateur, indépendamment des interactions de ce mobile avec son environnement. On peut dater la naissance de la cinématique moderne à l'allocution de Pierre Varignon le 20 janvier 1700 devant l'Académie royale des sciences de Paris. C'est à cette occasion qu'il définit la notion d'accélération et qu'il montre l'importance de considérer la variation du vecteur vitesse pour lier le changement dans le mouvement aux causes extérieures (actions mécaniques). La dynamique quant à elle s'intéresse aux rôles des forces (interactions avec l'environnement) dans l'évolution du mouvement d'un corps mobile c'est-à-dire aux conséquences de l'application de la 2e loi de Newton (principe fondamental de la dynamique) dans la description du vecteur accélération.

Comment construire et manipuler le vecteur variation-de-vitesse ? Comment le mettre en relation avec la résultante des forces extérieures appliquées ?

Document 1 – matériel et documents mis à disposition

- 1 règle graduée de 50 cm.
- une table d'enregistrement avec mobiles autoporteurs et leurs accessoires
- un ensemble de programmes python pour l'exploitation des mesures de coordonnées.

Première partie : exploitation des documents d'enregistrement - table inclinée

L'objectif de cette partie est de déterminer des modes opératoires permettant de réaliser, dans la pratique, l'étude du mouvement d'un mobile autoporteur à partir d'un enregistrement (chronophotographie) effectué sur une table dont l'inclinaison est paramétrable.

1. Décrire le mode opératoire permettant d'obtenir les coordonnées cartésiennes d'un point mobile associé au mobile autoporteur en mouvement dans le référentiel terrestre (référentiel lié à l'observateur) ; on précisera et on discutera notamment :
 - le choix du point mobile,
 - l'origine du repère,
 - l'orientation des axes et l'échelle.
2. La vitesse instantanée n'est pas directement accessible à la mesure. Rappeler les trois manières d'obtenir une valeur approchée de cette vitesse (calcul par l'amont, par l'aval ou centrée).
3. Rappeler le mode opératoire permettant de tracer un vecteur vitesse et un vecteur variation-de-vitesse.
4. Choisir une première position M_i (date t_i) et tracer deux vecteurs vitesse successifs aux dates t_i et $t_i + \Delta t$ puis le vecteur variation-de-vitesse correspondant.
5. Faire de même pour une autre position sur la trajectoire.
6. Tracer un repère orthonormé et relever dans un fichier tableur les dates et coordonnées de toutes les positions occupées par le point mobile (fichier au format .csv avec trois colonnes pour les dates, les abscisses x et les ordonnées y)
7. À partir de l'analyse du script du programme python fourni pour exploiter les mesures de coordonnées, indiquer quelle méthode de calcul a été retenue pour déterminer les vecteurs vitesse et variation-de-vitesse du point mobile.

Deuxième partie : étude des approximations - mouvement circulaire

1. Dessiner les schémas de la situation expérimentale (vues de dessus et de profil).
2. Dresser le bilan des forces extérieures appliquées au mobile et indiquer les caractéristiques de la résultante.

3. Enregistrer le mouvement du mobile autoporteur sur une portion de trajectoire circulaire (table horizontale).
4. Déterminer, par construction géométrique à partir de l'enregistrement, la position du centre de la trajectoire circulaire.
5. Calcul *par l'aval* :
 - a) Choisir trois positions M_i (dates t_i) bien espacées et tracer le rayon de la trajectoire circulaire pour chacune.
 - b) Construire deux vecteurs vitesse successifs aux dates t_i et $t_i + \Delta t$ ainsi que le vecteur variation-de-vitesse correspondant.
 - c) Comparer la direction du vecteur vitesse et celle du rayon de la trajectoire.
6. Calcul *centré* :
 - a) Reprendre les trois positions précédentes (dates t_i) et construire pour chacune d'elles deux vecteurs vitesse aux dates $t_i - \Delta t$ et $t_i + \Delta t$.
 - b) Tracer le vecteur variation-de-vitesse pour ces trois positions.
 - c) Comparer la direction du vecteur variation-de-vitesse et celle du rayon de la trajectoire.
7. Que dire du produit scalaire $\vec{v} \cdot \Delta\vec{v}$ dans cette partie ? Faire le lien avec le PFD.
8. Faire le bilan (avantages/inconvénients) des méthodes de construction et de calcul des vecteurs vitesse et variation-de-vitesse *par l'aval* et *centrée*.

Troisième partie : mouvement pendulaire sur un table inclinée

1. Dessiner les schémas de la situation expérimentale (vues de dessus et de profil).
2. Dresser le bilan des forces extérieures appliquées au mobile et indiquer les caractéristiques de la résultante.
3. Enregistrer le mouvement pendulaire du mobile autoporteur sur un seul battement (table inclinée).
 - a) Combien peut-on distinguer de phases au mouvement ?
 - b) Les caractériser d'un point de vue cinématique pour chacune d'elles.
4. Déterminer, par construction géométrique à partir de l'enregistrement, la position du centre de la trajectoire circulaire.
5. Calcul *par l'aval* :
 - a) Choisir trois positions M_i (dates t_i) bien espacées et tracer le rayon de la trajectoire circulaire pour chacune.
 - b) Construire deux vecteurs vitesse successifs aux dates t_i et $t_i + \Delta t$ ainsi que le vecteur variation-de-vitesse correspondant.
 - c) Comparer la direction du vecteur vitesse et celle du rayon de la trajectoire.
6. Calcul *centré* :
 - a) Reprendre les trois positions précédentes (dates t_i) et construire pour chacune d'elles deux vecteurs vitesse aux dates $t_i - \Delta t$ et $t_i + \Delta t$.
 - b) Tracer le vecteur variation-de-vitesse pour ces trois positions.
 - c) Comparer la direction du vecteur variation-de-vitesse et celle du rayon de la trajectoire.
7. Que dire du produit scalaire $\vec{v} \cdot \Delta\vec{v}$ dans cette partie ? Faire le lien avec le PFD.

Accélération dans le champ de pesanteur / champ gravitationnel

Quel lien peut-on établir entre la chute des corps et le champ de pesanteur local ?

De l'étude de la chute des corps jusqu'à la notion de gravité puis de champ de pesanteur, il s'est écoulé plusieurs siècles.

Dans une première partie, on cherche à appliquer l'expérience du pendule effectuée par Galilée permettant de montrer que la masse n'interfère pas sur la chute des corps. Dans une seconde partie, on définira le champ de pesanteur. Puis, suite à la lecture d'un texte de Huygens, on réfléchira sur la durée des oscillations en fonction de la longueur du pendule afin de déterminer expérimentalement la valeur de l'intensité de la pesanteur puis les caractéristiques du champ de pesanteur dans la salle.

Document 1 – matériel et documents mis à disposition

- 1 règle graduée de 50 cm.
- un jeu de masse marquée à crochet, une potence et du fil
- une boule en plastique + balance numérique
- un microphone (type cravate) + carte son USB + logiciel Audacity™
- tapis de paillasse
- documents préparatoires au TP (en annexe)

Document 2 – introduction

La chute des corps est une fatalité. Elle est dans la nature des choses. Tout finit par tomber un jour ou l'autre.

Il n'est donc guère étonnant que ce phénomène ait suscité autant de réflexions, d'opinions, de controverses. Déjà, au IV^{ème} siècle avant notre ère, Aristote en proposa une explication. Mais c'est Galilée qui, le premier, au XVIII^{ème} siècle, énonça correctement la loi de la chute des corps. On savait désormais comment les corps tombaient. Mais on ignorait toujours pourquoi. Le XVII^{ème} siècle n'était pas achevé que Newton proposa une explication : les corps tombaient parce que la Terre exerçait sur eux une force attractive.

La théorie Newtonienne, parce qu'elle était universelle et rendait bien compte des phénomènes observés, semblait définitive. Mais elle fut à son tour remise en cause au XX^{ème} siècle par Einstein. L'espace et le temps qu'on avait cru absolus et indépendants, devinrent relatifs et interdépendants. Ils n'étaient plus que les composantes d'un continuum nouveau appelé « espace-temps ».

D'après *L'histoire de la chute des corps*, de Robert Signore

Activité préparatoire au TP : exploitation des documents en annexe

L'objectif de cette partie est de confronter les thèses émises par ARISTOTE et par GALILÉE sur la chute des corps : la chute dépend-elle de la masse ? du milieu ? Que se passerait-il dans le vide ?

1. Après lecture du document 1 de l'annexe, reformuler les trois hypothèses émises par ARISTOTE sur la chute des corps.
2. Étude du document 2 de l'annexe : Extrait des « *Discours* », de Galilée (1638) : texte relatant la conversation entre deux personnages symbolisant les défenseurs des pensées d'ARISTOTE et de GALILÉE.
 - a) Quelle contradiction est mise en évidence par *Salviati* dans les lignes 6 à 13 ?
 - b) Quelle hypothèse émise par ARISTOTE est mise en défaut par *Salviati* dans les lignes 14 à 16 ?

- c) Quelles hypothèses émises par ARISTOTE est mise en défaut par *Salviati* dans les lignes 19 à 21 ?
- d) Quel personnage représente les idées de GALILÉE ? d'ARISTOTE ?

Première partie : vérification expérimentale de la thèse galiléenne

Afin de vérifier expérimentalement l'influence (ou non) de la masse sur la chute d'un corps, GALILÉE a eu l'idée de ralentir le mouvement de chute en travaillant sur un plan incliné ou bien en étudiant les oscillations d'un pendule. C'est cette dernière solution que nous allons mettre en œuvre.

Salviati :

« En fin de compte, j'ai pris deux boules, l'une de plomb, l'autre de liège, celle-là au moins cent fois plus lourde que celle-ci, puis j'ai attaché chacune d'elles à deux fils très fins, longs tous deux de quatre ou cinq coudées : les écartant alors de la position perpendiculaire, je les lâchais en même temps, et celles-ci, suivant les circonférences des cercles ayant les fils égaux pour rayons, dépassaient la perpendiculaire pour remonter de l'autre côté, par la même voie. (...) »

Travail à effectuer :

1. Quelle hypothèse émise par *Salviati* cette manipulation peut permettre de valider ou d'invalider ?
2. Mettre en place un protocole expérimental. Le faire valider par le professeur.
3. Réaliser l'expérience.
4. Conclure : Lequel des deux grands penseurs a-t-il raison au vu des résultats de votre expérience ?
5. Comparer l'évolution des amplitudes des oscillations (des allers-retours) des deux pendules. À quoi est due cette différence de mouvement ? Par extrapolation, pensez-vous comme *Simplicio* qu'un morceau de laine, dans le vide ne tombera pas aussi vite qu'un morceau de plomb ? Expliquer.
6. À l'époque de GALILÉE, il fut impossible de réaliser une expérience de chute des corps dans le vide. En 1971, David SCOTT, sur la lune permit cette vérification : visionner la vidéo à l'adresse : http://www.dailymotion.com/video/x15x72_chutevide4_school

Seconde partie : le champ de pesanteur local

1. Origine de la gravité par Newton

Mais, quelle est la cause de la chute ? La réponse de GALILÉE est plutôt évasive :

« *Je dis donc qu'un corps pesant possède par nature un principe intrinsèque pour se mouvoir vers le centre commun des graves, c'est-à-dire de notre globe terrestre, d'un mouvement continuellement et toujours également accéléré.* »

NEWTON montre que la force de gravitation (centripète) qui retient la lune sur son orbite (circulaire) est la même que celle qui s'applique aux corps placés à la surface de la Terre : Il montre que les accélérations dues à ces deux forces sont dans le rapport inverse du carré des distances (cf. document 3 des annexes préparatoires au TP). Ainsi les deux forces n'en font qu'une (et universelle) dont l'intensité varie en proportion inverse du carré des distances (fait admis de longue date pour toute propriété se distribuant uniformément et de manière isotrope dans l'espace à partir d'un point) ! NEWTON est également le premier à faire la distinction entre la masse (grave) et le poids.

1. Quel objet, selon NEWTON, est donc à l'origine de la chute des corps ? La chute dépend-elle « *d'un principe intrinsèque que possède par nature les corps* » comme le pensait GALILÉE ?
2. Nous dirons que la Terre crée un champ de pesanteur en son voisinage. En vous inspirant des expressions « *champ opératoire* », « *champ de bataille* », « *champ d'action* » etc, proposer une définition de l'expression « *champ de pesanteur* ».
3. Recopier les propositions correctes :

- Il existe un champ de pesanteur partout dans la classe
- Il existe un champ de pesanteur seulement là où il y a des objets possédant une masse.
- Le champ de pesanteur existe du fait de la masse M de la Terre.
- Le champ de pesanteur existe en un point A du fait de la masse M de la Terre et de la présence d'un objet de masse m en ce point A.

2. Mesure du champ de pesanteur local par Huygens

« L'on assure d'avoir trouvé dans la Cayenne, qui est un pays dans l'Amérique, éloigné seulement de 4 à 5 degrés de l'Équateur, qu'un pendule qui bat la seconde, y est plus court qu'à Paris d'une ligne et un quart. D'où s'en suit que, si on prend des pendules d'égale longueur, celui de la Cayenne fait des allées un peu plus lentes que celui de Paris. La vérité du fait étant posée, on ne peut douter que ce ne soit une marque assurée de ce que les corps pesants descendent plus lentement en ce pays là qu'en France. Et comme cette diversité ne saurait être attribuée à la ténuité (raréfaction) de l'air, qui est plus grande dans la zone torride (parce qu'elle devrait causer un effet tout contraire) je ne vois pas qu'il puisse y avoir d'autre raison, sinon qu'un même corps pèse moins sous la ligne (l'équateur) que sous des climats qui s'en éloignent. »

HUYGENS, en 1690, dans le *Discours de la cause de la pesanteur*

Questions :

1. En vous aidant de votre montage expérimental, déterminer quelle doit être la longueur du pendule pour que celui-ci batte la seconde (attention à bien différencier le battement d'une oscillation = 2 battements).
2. D'après le texte, dans quelle partie du globe terrestre, la période du pendule est-elle la plus grande ?
3. « *les corps pesants descendent plus lentement en ce pays là qu'en France.* » : quelle grandeur physique évoquée dans le terme « *corps pesant* » est responsable de cette différence de mouvement ? Peut-on alors dire que la valeur du champ de pesanteur (= intensité de la pesanteur) est identique en tout point du globe terrestre ?

Travail expérimental à effectuer : La période d'un pendule (= la durée d'un aller-retour), notée T (en s) peut être déterminée par la formule :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$$

où ℓ représente la longueur (en m) du pendule et g , l'intensité de la pesanteur (unité du SI).

1. Après avoir mesuré T pour différentes longueurs ℓ , déterminer, par le tracé d'un graphe adéquat, la valeur de l'intensité de pesanteur g_{exp} dans la salle de classe.
2. Commenter la précision de votre résultat par rapport aux données ci-dessous :
à Paris, en unités internationales, $g_A = 9,81$ SI ;
à Cayenne, $g_B = 9,78$ SI.
3. Afin de représenter le champ de pesanteur, on utilise un vecteur. Cet outil mathématique permet de « *visualiser* » les modifications de l'espace causées par la présence de la Terre.
 - a) En vous référant à la position d'équilibre du pendule, indiquez la direction et le sens du champ de pesanteur dans la salle.
 - b) Peut-on considérer que le champ de pesanteur local est uniforme ?
 - c) Sur un schéma de la salle, représenter le champ de pesanteur en différents points de l'espace.

Complément : relation entre temps de chute et durée de chute d'un corps pesant

On se propose de retrouver expérimentalement l'une des lois de la chute d'un corps pesant établie par GALILÉE : la hauteur de chute d'un corps pesant est proportionnelle au carré de la durée de la chute et le coefficient de proportionnalité est indépendant de la masse du corps pesant (c'est-à-dire que les corps chutent avec la même vitesse à chaque instant).

On envisage donc de mesurer la durée Δt de la chute d'un corps à l'aide d'un logiciel d'acquisition et de traitement de signal audio (Audacity™) pour différentes hauteurs h de chute d'une bille de masse m .

Pour améliorer la précision des mesures, on réalisera 5 acquisitions pour chacune des valeurs de hauteur choisies et on moyennera la durée de chute.

La durée mesurée correspond à l'intervalle de temps qui sépare le lâcher de la bille (accompagné d'un bruit sec de claquement) de son impact sur la table (bruit d'impact). Les signaux sonores sont enregistrés à l'aide d'un microphone posé sur la table au voisinage du point d'impact.

1. Recopier et compléter le tableau suivant :

h (m)	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
Δt (s)					
$(\Delta t)^2$ (s ²)					

2. Construire le graphe $h = f(\Delta t^2)$ et modéliser par une fonction linéaire en déterminant son coefficient directeur k (avec son unité).
3. Comparer le coefficient directeur et la valeur de l'intensité de pesanteur g_{exp} déterminée précédemment.
4. Proposer une relation entre h , g et Δt .
5. En dérivant cette relation, vérifier que « tous les corps chutent avec la même vitesse à chaque instant ».

Activité préparatoire au TP – Documents annexes

Document 1

Selon Aristote (-384, -322), chaque corps possède un lieu propre où il se dirige naturellement en raison d'une qualité intrinsèque. Ainsi, les corps pesants se dirigent-ils naturellement vers le centre de l'univers, tandis que les corps légers s'élèvent vers la périphérie. Il s'agit de savoir pourquoi et comment les choses légères et les choses lourdes sont mues vers leur lieu propre. Une pesanteur déterminée parcourt une distance déterminée en un temps déterminé. Si une demi-pesanteur met tel temps, la pesanteur qui est double mettra moitié moins de temps. Mais la vitesse de chute dépend aussi des propriétés du milieu traversé. Moins ce milieu est résistant, plus la chute est rapide. La résistance du milieu traversé est d'autant plus facile à vaincre que le poids du corps est grand ; c'est d'ailleurs pourquoi les corps les plus lourds tombent plus vite.

D'après *L'histoire de la chute des corps*, de Robert Signore

Document 2

Salviati. « [L1] Si donc nous avons deux mobiles possédant des vitesses naturelles inégales, il est clair qu'en attachant le plus lent au plus rapide la vitesse de celui-ci serait partiellement ralentie par le plus lent, et celle du plus lent partiellement accrue par le plus rapide. N'êtes-vous pas d'accord avec moi sur ce point ?

Simplicio. [L5] Il ne peut, à mon avis, en aller autrement.

Salv. [L6] Mais, s'il en est ainsi, et s'il est vrai encore qu'une grande pierre se meut, par exemple, avec huit degrés de vitesse et une plus petite avec quatre degrés, il s'ensuivra, si on les attache, que l'ensemble se mouvra avec une vitesse inférieure à huit degrés ; or, les deux pierres, réunies, forment une pierre plus grande que celle qui se mouvait avec huit degrés de vitesse, et que la plus grande se meut par conséquent moins vite que la plus petite, ce qui va contre votre supposition. Vous voyez donc comment, si vous supposez qu'un mobile plus grave se meut plus vite qu'un mobile moins grave, j'en conclus, de mon côté, qu'un mobile plus grave se meut moins vite.

...

Salv. [L14] Dans le vif-argent (1), l'or non seulement tombe vers le fond plus rapidement que le plomb, mais il est le seul à descendre, tous les autres corps, métaux et pierres, montant vers la surface pour y flotter, alors que dans l'air les boules d'or, de plomb, de cuivre, de porphyre (2), ou de toute autre substance auront des vitesses si voisines qu'une boule d'or, après une chute de 100 coudées, ne précédera pas de quatre doigts une boule de cuivre ; c'est alors, considérant ces faits, qu'il me vint à l'esprit que si l'on supprimait totalement la résistance du milieu, tous les corps descendraient avec la même vitesse.

Simpl. [L21] Voilà une bien grande affirmation, seigneur Salviati. Je ne croirai jamais, pour ma part, que même dans le vide, si le mouvement y était possible, un flocon de laine tomberait aussi vite qu'un morceau de plomb. »

GALILÉE, en 1638, dans les *Discours*

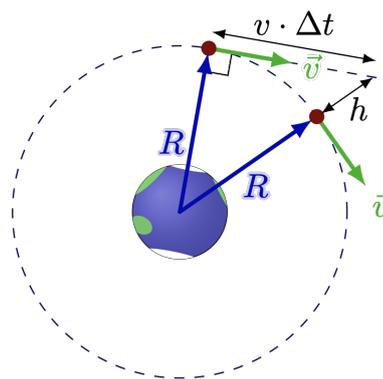
(1) Le vif-argent était autrefois le nom utilisé pour désigner le mercure.

(2) Le porphyre est une roche magmatique

Document 3 - « chute » de la Lune

On considère que la Lune se déplace sur une orbite circulaire de rayon $R = 384\,399$ km avec une période de révolution sidérale $T = 27,321582$ j.

Si elle n'était soumise à aucune force attractive centripète (dite gravitationnelle), la Lune poursuivrait son mouvement rectiligne et uniforme avec sa vitesse orbitale \vec{v} de sorte qu'elle se retrouverait, après la durée Δt , à une hauteur h au-dessus de sa position réelle sur l'orbite.



1. Déterminer une expression de la valeur v de la vitesse orbitale de la Lune. Calculer cette valeur.
2. À l'aide du théorème de PYTHAGORE, déterminer une relation entre h , R , v et Δt .
3. En déduire la valeur de la hauteur de la « chute » de la Lune pour une durée d'une seconde.
4. En considérant que h est suffisamment petite devant R pour supposer l'intensité de la pesanteur constante pendant la « chute », en déduire une valeur de l'intensité (accélération) de la pesanteur g_R à la distance R du centre de la Terre.
5. On donne le rayon terrestre $R_T = 6\,371,009$ km. Vérifier que « les accélérations dues à ces deux forces (poids et attraction gravitationnelle) sont dans le rapport inverse du carré des distances ».

Cartographier un champ électrique

C'est, semble-t-il, l'expérimentateur anglais MICHAEL FARADAY (1791-1867) qui, le premier, proposa de décrire l'action de l'électricité en termes d'influence plutôt que de mouvement avec le concept de « lignes de force » ; le concept de champ qui reprend cette intuition allait par la suite se révéler extrêmement fécond. JAMES CLERK MAXWELL (1831-1879) généralisa et formalisa les résultats obtenus par les nombreux pionniers de l'étude des phénomènes électromagnétiques en leur donnant, en 1872, une forme quasi définitive.

Comment cartographier un champ électrique ?

Document 1 – matériel et documents mis à disposition

- 1 cuve rhéographique
- 1 flacon – 120 mL – contenant la solution électrolytique de sulfate de cuivre II à $5,0 \times 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$.
- 1 voltmètre numérique
- des fils de connexions dont un rouge avec pointe de touche
- un générateur de tension continue 6 V
- un fil de cuivre diamètre 2 mm d'environ 2 cm de long (étude d'un effet de pointe)

Document 2 – La cuve rhéographique et la carte des potentiels électriques

La cuve rhéographique est une cuve de forme rectangulaire en matériau isolant et transparent, comportant sur son fond un quadrillage sérigraphié permettant de repérer une position dans le plan horizontal et deux électrodes planes sur ses parois en vis-à-vis.

On verse dans la cuve une solution d'un électrolyte faiblement conducteur de sorte que lorsque les deux électrodes sont sous tension, la solution électrolytique constitue un circuit électrique plan.

En mesurant la tension électrique entre l'une des électrodes (la masse) et une pointe de touche immergée dans la solution, on relève la valeur du potentiel électrique $\varphi(x, y)$ au point d'immersion I de coordonnées (x, y) .



En déplaçant la pointe de touche sur toute la surface de la cuve, on peut dresser une carte du *champ scalaire des potentiels électriques* qui règne dans la solution électrolytique.

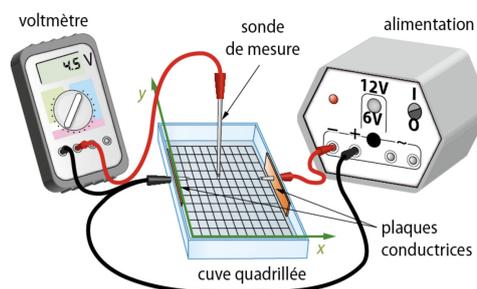
Document 3 – Simulation charge et champ

https://phet.colorado.edu/sims/html/charges-and-fields/latest/charges-and-fields_fr.html

Première partie : cartographie du champ de potentiel électrique $\varphi(x, y)$

L'objectif de cette partie est de relever les valeurs des potentiels électriques dans la solution électrolytique et de tracer les lignes équipotentielles du champ de potentiel électrique.

Le montage expérimental correspond à celui de la figure ci-contre en plaçant dans la cuve rhéographique une solution de sulfate de cuivre II à la concentration de $5,0 \times 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$ et en appliquant entre les électrodes une tension électrique continue de 6,0 V.



Mode opératoire :

1. On immerge la pointe de touche (sonde de mesure) verticalement au point $P(x, y)$. L'axe Ox est dirigé perpendiculairement aux plaques électrodes tandis que l'axe Oy est dirigé parallèlement aux plaques électrodes. On choisit l'origine de ce repère au centre de l'électrode « négative » c'est-à-dire directement reliée au pôle \ominus du générateur.
2. On mesure la tension électrique entre l'électrode reliée directement à la borne négative du générateur (masse M) et la sonde de mesure P : $U_{PM} = \varphi_P - \varphi_M = \varphi(x, y)$
3. En déplaçant la pointe de la sonde (toujours tenue verticalement) dans la cuve, on change les coordonnées du point de mesure P et on mesure donc la valeur du potentiel électrique en ce point de coordonnées (x, y) en volt.
4. On relève dans un tableau les coordonnées des points de mesure et la valeur du potentiel électrique correspondant.
5. Sur une feuille de papier millimétré, reproduire à l'échelle 1 : 1 le quadrillage de la cuve rhéographique et indiquer les valeurs des potentiels mesurés en chaque point de mesure.
6. Tracer les lignes équipotentielles $\varphi(x, y) = k$ pour chaque variation Δk d'environ 0,5 V.

Observations qualitatives :

- Que peut-on dire du potentiel $\varphi(x_{max}, y)$ sur l'électrode « positive » et du potentiel $\varphi(0, y)$ sur l'électrode « négative » ?
- Que peut-on dire de l'évolution de potentiel électrique $\varphi(x, y)$ lorsque la sonde se déplace perpendiculairement aux plaques : x croît avec y constant ?
- Que peut-on dire de l'évolution de potentiel électrique $\varphi(x, y)$ lorsque la sonde se déplace parallèlement aux plaques : y croît avec x constant ?

Seconde partie : cartographie du champ électrique $\vec{E}(x, y)$

L'objectif de cette partie est de relever les valeurs des potentiels électriques le long d'une ligne de champ électrique et d'en déduire une relation linéaire entre le potentiel électrique au point considéré et la position le long de la ligne de champ.

Mode opératoire :

1. Sur le document précédent (cartographie du champ de potentiel électrique), tracer et orienter quelques lignes du champ électrique de part et d'autre de l'axe Ox médian.
2. En suivant une ligne de champ proche de l'axe médian, relever dans un tableau les valeurs des potentiels électrique et les coordonnées des points de mesure correspondant.

Exploitation :

1. Tracer la courbe représentative de $\varphi = f(x)$
2. E_x correspond au coefficient directeur de la droite $\varphi = f(x)$ ou dérivée de φ par rapport à x . Proposer un modèle mathématique permettant de déduire de cette courbe une valeur de l'intensité E_x du champ électrique.
3. Que peut-on dire du champ électrique \vec{E} entre les deux plaques électrodes ? Comment le qualifie-t-on ?

Transferts d'énergie en mécanique - le travail d'une force constante

C'est Thomas Young qui, en 1807, proposa le mot énergie (energeia en grec = quelque chose en action). L'énergie, exprimée en joule dans le S.I. d'unité, est une grandeur physique abstraite associée à l'état de tout système physique par l'intermédiaire d'une relation fonctionnelle, c'est-à-dire permettant son calcul, et étroitement liée à l'évolution ou à la transformation de ce système. Cette évolution ou transformation s'accompagne d'une évolution ou d'une transformation des paramètres permettant de caractériser l'état de ce dernier. On distingue les formes d'énergie et les transferts d'énergie.

Dans quelle mesure le poids participe-t-il à un transfert d'énergie entre un système de masse m en mouvement et le champ de pesanteur ?

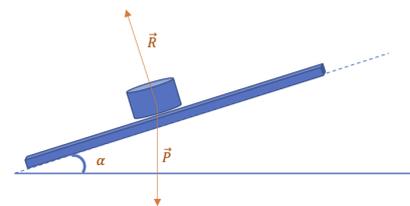
Document 1 – matériel mis à disposition pour le groupe ou chaque équipe

- 1 mobile autoporteur
- 1 table de marquage (encrage) pour mobile autoporteur
- des feuilles format A3
- 1 balance numérique
- 1 jeu de cales pour incliner la table
- 1 rapporteur avec fil à plomb pour mesurer l'inclinaison
- 1 règle métallique de 50 cm + un étalon photographique
- 1 webcam sur trépied télescopique
- le logiciel d'acquisition vidéo et pointage + tableur-grapheur scientifique *Regressi*

Première partie : Analyse de la situation

Un mobile autoporteur de masse m est en mouvement de translation rectiligne sur une table inclinée d'un angle α avec l'horizontale. Il est abandonné en haut de la pente sans vitesse initiale et il accélère tout du long sur une longueur L .

On négligera toutes les actions de l'air environnant devant les autres forces. Le coussin d'air sous le mobile exerce sur sa base une action mécanique modélisée par une force de portance \vec{R} que l'on supposera constamment perpendiculaire au plan incliné. Le mouvement du mobile est étudié dans un référentiel terrestre supposé galiléen et il est enregistré par un marquage, à intervalle de temps constant, des positions occupées par son centre d'inertie.



1. Reproduire le schéma de la situation expérimentale.
2. Définir le référentiel d'étude et le système étudié.
3. Choisir un repère d'espace (position de l'origine et orientation) pertinent pour obtenir des coordonnées toujours positives pour les positions occupées par un point du système.
4. Préciser les conditions initiales sur la position et la vitesse du système à l'instant de date $t = 0$ s, choisi sur un événement à expliciter.
5. À l'aide d'un diagramme objet-interaction, représenter la situation expérimentale du point de vue des actions mécaniques exercées sur le système.
6. Dresser le bilan des forces extérieures modélisant chacune des actions exercées sur le système et préciser leurs caractéristiques vectorielles. Indiquer les hypothèses simplificatrices concernant ce bilan des forces (le système étant un solide on ne tiendra aucunement compte des forces intérieures).

7. Pour chaque force, exprimer son travail sur un trajet de longueur L le long du plan incliné. Quelle est alors l'expression de la somme des travaux ?
8. Comment détermine-t-on une valeur approchée (méthode centrée) de la vitesse du mobile à la position éloignée de L depuis l'origine ?
9. En exploitant le théorème de l'énergie cinétique, déterminer une expression de la valeur de la vitesse du mobile. Que remarque-t-on ?

Deuxième partie : Étude des transferts d'énergie du mobile à partir d'une chronophotographie papier

1. Enregistrer par encrage la chronophotographie du mouvement du mobile autoporteur pour trois différentes inclinaisons de la table.
2. Déterminer une valeur approchée de la vitesse atteinte par le mobile au bout du trajet de longueur L .
3. Comparer la valeur approchée de la vitesse à celle calculée à l'aide de l'expression établie à la question n°9 de la première partie.
4. Dans quelle mesure le poids participe-t-il à un transfert d'énergie entre le mobile et le champ de pesanteur ? Quel est le rôle de la masse ?

Troisième partie : Étude des transferts d'énergie du mobile à partir d'un enregistrement vidéo

1. Enregistrer en vidéo le mouvement du mobile autoporteur pour trois différentes inclinaisons de la table.
2. Réaliser le pointage des positions du centre d'inertie du mobile en justifiant du choix de l'origine et de l'orientation du repère.
3. Déterminer une valeur approchée de la vitesse atteinte par le mobile au bout du trajet de longueur L .
4. Comparer la valeur approchée de la vitesse à celle calculée à l'aide de l'expression établie à la question n°9 de la première partie.
5. Dans quelle mesure le poids participe-t-il à un transfert d'énergie entre le mobile et les champ de pesanteur ? Quel est le rôle de la masse ?

Conservation de l'énergie mécanique

Galileo Galilei dit GALILÉE (1564-1642) est, semble-t-il, le premier à avoir étudié de manière quantitative les oscillations d'un pendule en observant le balancement d'un lustre suspendu à la voûte de la cathédrale de Pise. Il découvre ainsi les lois du mouvement pendulaire, à la base des premières horloges à pendule.



Lustre de la cathédrale de Pise

Quels sont les transferts d'énergie entre un pendule de longueur ℓ et de masse m en mouvement d'oscillation et le champ de pesanteur ?

Document 1 – matériel mis à disposition pour chaque équipe

- | | |
|---|---|
| — 1 potence avec pince | — 1 logiciel tableur-grapheur scientifique |
| — 1 fil + sphère en laiton avec attache | — 1 règle métallique de 50 cm |
| — 1 balance numérique | — fichier de données : pendule_polaire.csv |
| — 1 webcam + étalon photographique | — le logiciel d'acquisition vidéo et pointage |
| — 1 logiciel d'acquisition vidéo + 1 logiciel de pointage vidéo | + tableur-grapheur scientifique <i>Regressi</i> |
| | + EDI python (<i>pyzo</i> TM) |

L'objectif de ce TP est d'étudier les transferts d'énergie ayant lieu lors de l'oscillation d'un pendule.

I- Étude énergétique des oscillations libres d'un pendule

Document 1 Dispositif expérimental

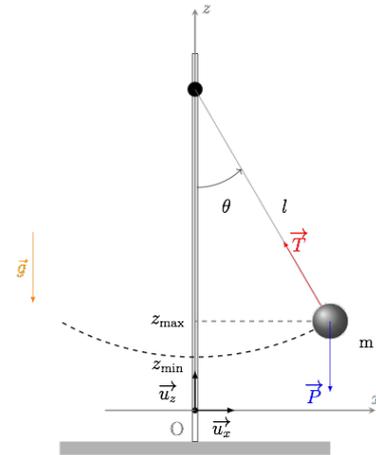
Un pendule simple est constitué d'un solide de masse m , de petite dimension, suspendu à un fil inextensible de masse négligeable devant m et de longueur très supérieure aux dimensions du solide.

On note ℓ la longueur du pendule (distance entre le point d'attache et le centre de gravité du solide).

Au repos, le pendule est dans position d'équilibre. Lors de son mouvement, le pendule oscille autour de sa position d'équilibre.

La durée d'une oscillation (appelée période) est l'intervalle de temps qui sépare deux passages consécutifs du pendule par la position d'équilibre avec le même vecteur vitesse (direction, sens et valeur).

Au cours de ses oscillations, l'altitude et la vitesse du pendule varient ainsi que la résultante des forces rendant l'étude dynamique complexe. C'est pourquoi on envisage une étude énergétique.



Document 2 : Vitesse d'un point mobile

La valeur de la vitesse d'un point mobile M dans un plan est obtenue à partir des coordonnées cartésiennes du vecteur vitesse v_x et v_y selon la relation : $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$.

Pour déterminer la coordonnée v_x du vecteur vitesse, il faut calculer la dérivée par rapport au temps de la position x (de même pour y).

Document 3 : Conservation de l'énergie mécanique

Les forces de frottement fluide et la poussée d'Archimède seront considérées comme négligeables devant le poids du pendule (seule force qui travaille ici). L'objectif de ce TP est d'étudier les transferts d'énergie ayant lieu lorsque seule une force conservative travaille.

1°/ Réalisation de la vidéo

À l'aide du matériel à votre disposition, réaliser une vidéo de quelques oscillations d'un pendule simple lâché sans vitesse initiale.

Pour réaliser cette vidéo, on utilisera les fonctionnalités du logiciel *Regressi* :

- Dans les préférences du logiciel sélectionner un dossier préalablement créé sur le bureau (ex. TP_P07) pour l'enregistrement des documents vidéo et autres.
- Sélectionner la caméra (cf. périphérique de capture) et pour que chaque image soit nette au cours d'un mouvement rapide, il faut régler l'exposition (en la diminuant) et la luminosité de manière adéquate ; la vidéo sera enregistrée à la fréquence de 25 images/secondes (25 Hz) avec une durée adéquate (cliquer sur l'icône Paramètres de la capture) afin de régler ces paramètres.
- Placer dans le champ d'observation l'étalon photographique, il servira également pour faire la mise au point ; cadrer l'image pour ne visualiser que le seul mouvement pendulaire (inutile de voir le pendule sur toute sa longueur).
- Lancer le pendule (oscillations planes) puis déclencher l'enregistrement ; la durée d'enregistrement devra correspondre à une demi-douzaine d'oscillations (une douzaine de battements)

2°/ Réalisation du pointage sur Regressi

- À l'aide du tableur-grapheur scientifique *Regressi*, ouvrir le document vidéo créé puis sélectionner l'image où commencer votre étude (l'instant initial devra correspondre au passage du pendule par une position d'équilibre).

- Faire les réglages d'échelle et du repère (orientation et origine) de manière judicieuse.
- Réaliser un pointage des positions du centre d'inertie du solide sur deux oscillations du pendule (quatre battements).
- Fixer dans *Regressi* les valeurs des paramètres intervenants dans les expressions littérales.
- Réaliser les calculs nécessaires afin de déterminer pour chaque position du système, assimilé à un point matériel de masse m , l'énergie cinétique E_c , l'énergie potentielle de pesanteur E_{pp} et l'énergie mécanique E_m .
- Imprimer votre graphique après accord du professeur.

3°/ Exploitation et analyse

1. Déterminer la valeur de l'énergie cinétique à $t = 0$ puis à $t = \frac{T}{4}$.
2. Faire de même pour l'énergie potentielle de pesanteur.
3. Sous quelle forme est l'énergie mécanique à $t = 0$ puis à $t = \frac{T}{4}$.
4. Quel transfert énergétique se produit entre ces deux instants? Et entre $t = \frac{T}{4}$ et $t = \frac{T}{2}$?
5. Avec quelle période évoluent les énergies cinétique et potentielle de pesanteur? Proposer une explication.

II- Description des oscillations en coordonnées polaires

La position du pendule peut être repérée plus simplement par son abscisse angulaire $\theta(t)$ (cf. schéma du document 1).

$\theta(t)$ représente l'angle (orienté) entre la verticale (Oz) passant par le point d'attache A et le segment de droite (AG) à la date t . Cet angle est une fonction du temps, mais par souci de simplification de l'écriture, on écrira par la suite θ au lieu de $\theta(t)$.

Lors d'un mouvement circulaire de rayon ℓ , la vitesse (linéaire) v d'un point est définie à une date t par la relation :

$$v = \ell \cdot \frac{d\theta}{dt}$$

avec ℓ en mètre, θ en radians et v en m.s^{-1} ; $\frac{d\theta}{dt}$ est la dérivée de θ par rapport au temps t , appelée vitesse angulaire (notée ω et exprimée en rad.s^{-1})

Avec Regressi

Le fichier de données de mesure *pendule_polaire.csv* a été obtenu grâce à un capteur d'angle et un pendule dont la masse est $m = 200 \text{ g}$ et la longueur $\ell = 48,9 \text{ cm}$. On a écarté le pendule de sa position d'équilibre G_0 puis on a enregistré l'évolution de son abscisse angulaire θ au cours du temps.

L'origine des énergies potentielles de pesanteur $E_{pp0} = 0 \text{ J}$ est prise au point G_0 d'altitude $z_0 = 0 \text{ m}$.

1. Importer le fichier de données dans *Regressi*.
2. En vous aidant d'un schéma (cf. document 1), montrer que la relation entre l'altitude z du centre de gravité du solide et l'angle θ est : $z = \ell \cdot (1 - \cos(\theta))$
3. En déduire l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur E_{pp} en fonction de m , g , ℓ et θ .
4. Sur *Regressi*, les angles doivent être exprimés en radians. Faire les réglages et paramétrage nécessaires afin de représenter, sur le même graphique l'évolution des énergie cinétique, potentielle de pesanteur et mécanique au cours du temps.
5. Interpréter en terme de transfert d'énergie les évolutions des différentes formes d'énergie.

Avec Python

1. Ouvrir le programme *etude-energie.py* à l'aide de l'EDI python.
2. En vous aidant des informations et des réponses aux questions précédentes :
 - a) Compléter les lignes [57] et [58] avec les valeurs des données.
 - b) Compléter les lignes [67], [71], [72] et [75] avec les expressions de code correctes.
 - c) Décommenter la ligne [62] ou [64] (en retirant le caractère #) suivant la méthode de calcul choisie pour la dérivation.
3. Exécuter le script en tant que programme puis interpréter en terme de transfert d'énergie les évolutions des différentes formes d'énergie.

Circuits électriques et capteurs

Les capteurs sont les éléments de base des systèmes d'acquisition de données. Un capteur est un dispositif transformant l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable, telle qu'une tension électrique, un courant électrique, la déviation d'une aiguille ou la hauteur d'une colonne de liquide (thermomètre). Le capteur se distingue de l'instrument de mesure par le fait qu'il ne se suffit pas à lui-même, en n'étant qu'une interface entre un processus physique et une information manipulable. Un capteur est au minimum constitué d'un transducteur assurant la conversion d'un signal physique en un autre de nature différente (conversion de forme d'énergie).

Nous allons nous intéresser à un type de capteur électrique dit passif, c'est-à-dire susceptible de fournir une information sous forme d'un signal électrique. Ces capteurs passifs ont besoin dans la plupart des cas d'apport d'énergie extérieure pour fonctionner et ils sont modélisables par une impédance (une grandeur qui généralise la notion de résistance électrique) : une variation d'une grandeur caractéristique du phénomène physique étudié engendre une variation de l'impédance du capteur.

Ces capteurs, auquel il faut appliquer une tension (en entrée) pour obtenir un signal de sortie, sont très souvent mis en œuvre dans un montage « pont diviseur de tension » qui permet d'adapter assez simplement les niveaux de tension électrique (et les puissances) entre les différentes parties d'un circuit électrique.

Comment mettre en œuvre une photorésistance pour réaliser une luxmètre élémentaire ?

Document 1 – matériel mis à disposition pour chaque équipe

- | | |
|--|---|
| — 1 générateur de tension continue (avec limiteur de courant), | — 1 luxmètre, |
| — 1 boîte à décade de résistance, | — 2 multimètres numériques, |
| — 1 résistance de $1,0\text{ k}\Omega$ montée sur support, | — 1 platine de montage, |
| — 1 photorésistance montée sur support, | — 1 jeu de fils de connexion fiche banane, |
| — 1 platine de montage, | — 1 tableur-grapheur scientifique Regressi, |
| — 1 boîte à décade de résistances, | — 1 IDE python (Pyzo™) + programme <i>etalonnage_LDR.py</i> . |
| — 1 lanterne optique + 1 filtre neutre, | |

I – Étude du montage diviseur de tension (à vide)

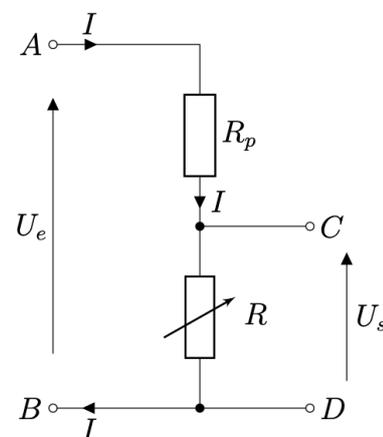
A – Sortie sur la résistance ajustable

Document 2 Dispositif expérimental

On réalise le montage série comportant d'abord un résistor de résistance $R_p = 1,0\text{ k}\Omega$ puis un rhéostat (boîte à décade) de résistance R ajustable (cf. schéma ci-contre).

On alimente le montage (en entrée) par un générateur de tension continue $U_e = E = 5,00\text{ V}$.

On place un ampèremètre en série pour mesurer le courant I délivré par le générateur et un voltmètre en dérivation sur le rhéostat pour mesurer la tension U_s en sortie du montage (entre les bornes C et D).



1°/ Étude expérimentale

- Reproduire et compléter le tableau suivant en mesurant l'intensité I et la tension U_s pour différentes valeurs de la résistance R .

R (Ω)	125	250	500	$1,0 \times 10^3$	$2,0 \times 10^3$	$4,0 \times 10^3$	$8,0 \times 10^3$	16×10^3	32×10^3	64×10^3
$r = R/R_p$	1/8	1/4	1/2	1	2	4	8	16	32	64
I (mA)										
U_s (V)										

- Tracer les graphes $U_s = f(r)$ et $I = g(r)$.
- Pour quel domaine des valeurs de r la tension de sortie U_s varie-t-elle le plus ?

2°/ Étude théorique

- Établir l'expression de la tension U_s en fonction de U_e , R et R_p .
- En déduire l'expression de la tension U_s en fonction de U_e et r .
- Faire de même pour l'intensité I .
- Quel est l'intérêt d'un tel montage ?

B – Sortie sur la résistance fixe

Document 3 Dispositif expérimental

On réalise le montage série comportant d'abord un rhéostat (boîte à décade) de résistance R ajustable puis un résistor de résistance $R_p = 1,0 \text{ k}\Omega$ (cf. schéma ci-contre).
 On alimente le montage (en entrée) par un générateur de tension continue $U_e = U_g = 5,00 \text{ V}$.
 On place un ampèremètre en série pour mesurer le courant I délivré par le générateur et un voltmètre en dérivation sur le rhéostat pour mesurer la tension U_s en sortie du montage (entre les bornes C et D).

1°/ Étude expérimentale

- Reproduire et compléter le tableau suivant en mesurant l'intensité I et la tension U_s pour différentes valeurs de la résistance R .

R (Ω)	125	250	500	$1,0 \times 10^3$	$2,0 \times 10^3$	$4,0 \times 10^3$	$8,0 \times 10^3$	16×10^3	32×10^3	64×10^3
$r = R/R_p$	1/8	1/4	1/2	1	2	4	8	16	32	64
I (mA)										
U_s (V)										

- Tracer les graphes $U_s = f(r)$ et $I = g(r)$.
- Pour quel domaine des valeurs de r la tension de sortie U_s varie-t-elle le plus ?

2°/ Étude théorique

- Établir l'expression de la tension U_s en fonction de U_e , R et R_p .
- En déduire l'expression de la tension U_s en fonction de U_e et r .
- Faire de même pour l'intensité I .
- Quel est l'intérêt d'un tel montage ?

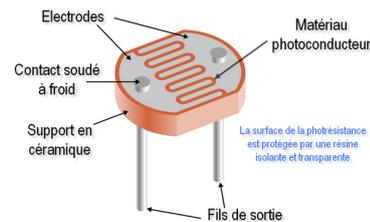
II – Utilisation d'une photorésistance comme capteur d'éclairément

La courbe d'étalonnage d'un capteur sert à établir une relation mathématique entre la tension mesurée à ses bornes et la grandeur physique que l'on souhaite étudier de manière à modéliser l'évolution de la tension en fonction des valeurs prises par le capteur. Afin de définir les propriétés électriques d'un dipôle, il est nécessaire d'étudier sa caractéristique tension-intensité $U = f(I)$. Cette caractéristique est la courbe représentant la tension U entre les bornes du dipôle étudié en fonction de l'intensité I du courant qui le traverse.

Document 4 photorésistance LDR

LDR pour *Light Dependent Resistor*, la photorésistance est un dipôle dont la résistance électrique varie en fonction de l'éclairément L qu'elle reçoit d'une source de lumière : plus elle est éclairée, plus la valeur de sa résistance baisse.

La partie sensible du capteur est une piste de sulfure de cadmium CdS, un semi-conducteur, en forme de serpentin : l'énergie lumineuse reçue déclenche une augmentation du nombre de porteurs de charges libres dans ce matériau, de sorte que sa conductivité électrique augmente. L'efficacité est fonction de la longueur d'onde de la lumière. Pour CdS, la courbe de sensibilité est voisine de celle de l'oeil humain. Pour les éclairéments faibles (1 lux) à forts (1000 lux) la variation de résistance avec l'éclairément est représentée correctement par une loi du type : $R(L) = R_0 \cdot L^{-k}$.



1 – Caractéristique intensité-tension de la LDR

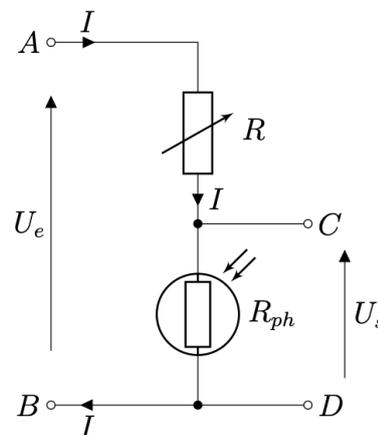
Document 5 Dispositif expérimental

Pour étudier la caractéristique $U_s = f(I)$ de la photorésistance, on utilisera le montage schématisé ci-contre.

On alimente le montage (en entrée) par un générateur de tension continue $U_e = U_g = 5,00\text{ V}$.

Le voltmètre est placé aux bornes de la photorésistance (entre les bornes C et D) pour mesurer U_s et un ampère-mètre placé en série mesure l'intensité du courant I .

Attention : le flux lumineux arrivant sur la photorésistance doit rester constant tout au long des mesures (même éclairément). On ne fait varier que la tension d'alimentation de la LDR à l'aide de la boîte à décade.



- Reproduire et compléter le tableau suivant en mesurant l'intensité I et la tension U_s pour différentes valeurs de la résistance R .

I (mA)										
U_s (V)										

- Tracer le graphe $U_s = f(I)$.
- Que vaut la résistance de la photorésistance dans ces conditions d'éclairage.
- Montrer rapidement (3 points de mesures) que pour un éclairement plus faible la résistance augmente. Préciser votre méthode pour obtenir un éclairement plus faible du capteur.

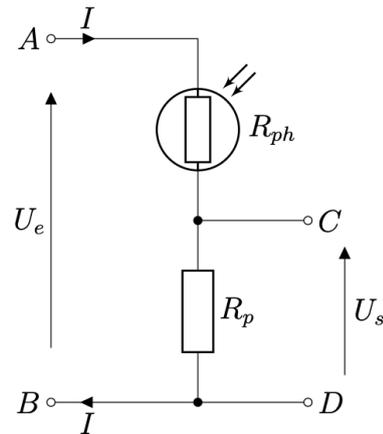
2 – Étalonnage de la LDR

Document 6 Dispositif expérimental

Afin d'utiliser la photorésistance en tant que luxmètre, on utilisera un montage pont diviseur de tension.

Le voltmètre est placé aux bornes de la résistance R_p dont on choisira une valeur adaptée.

Remarque : La tension d'alimentation reste constante. On ne fait varier que l'intensité lumineuse arrivant sur la photorésistance.



- Faire varier l'éclairage sur la photorésistance à l'aide d'un dispositif que vous devrez créer à partir du matériel disponible.
- Reproduire et compléter le tableau suivant en mesurant l'éclairement L et la tension U_s .

L (lux)										
U_s (V)										

- Tracer le graphe $U_s = f(L)$.
- Utiliser le programme "etalonnage_LDR.py" afin de tracer la courbe d'étalonnage et l'équation spécifique de conversion (remplacer dans le script les valeurs par défaut par celles mesurées).

Conversion d'énergie : alimentation d'un monte-charge par un moteur électrique

Les moteurs électriques sont des convertisseurs d'énergie : il convertissent de l'énergie électrique en énergie mécanique (cinétique et potentielle).

Afin de rendre compte de changements de forme de l'énergie, par exemple dans une machine tel qu'un monte-charge, on fait appel à une représentation graphique : la chaîne énergétique. Dans une chaîne énergétique, on peut faire apparaître (mais c'est facultatif) les réservoirs d'énergie sous la forme de rectangles, mais cela ne peut concerner que des formes stockables de l'énergie.

Les convertisseurs d'énergie assurent la conversion d'une forme d'énergie en une ou plusieurs autres utiles ou non. Par convention, un convertisseur se note par un cercle, par lequel va transiter des transferts d'énergie, indiqués par des flèches. Un convertisseur n'emmagasine ni ne crée d'énergie.

D'après le principe de conservation de l'énergie, l'énergie totale sortant d'un convertisseur est strictement égale à l'énergie entrante. À chaque convertisseur, il y a possibilité de « pertes » d'énergie. Cette énergie est dite perdue, ou dégradée, car elle est sous une forme non exploitable par la chaîne, comme par exemple la chaleur dissipée par des frottements. En conséquence, quand on fournit une quantité d'énergie à un convertisseur, seule une partie sera utilisable en sortie.

De manière générale, le rendement d'un convertisseur est le rapport de l'énergie utile sur l'énergie apportée : le rendement est donc un nombre sans dimension compris entre 0 et 1, et peut s'exprimer sous la forme d'un pourcentage.

Le rendement du monte-charge dépend-il de la masse de la charge soulevée ?

Document 1 – matériel mis à disposition pour chaque équipe

- 1 générateur de tension continue (12V),
- 1 boîte à décade de résistance,
- 1 moteur monte-charge sur haute potence,
- 1 jeu de masses à crochet,
- 1 mètre-ruban,
- 1 webcam sur statif + une échelle photographique
- 2 multimètres numériques,
- 1 jeu de fils de connexion fiche banane,
- 1 module Plug'Uino avec deux câbles SATA,
- 2 adaptateurs SATA - fiche banane,
- 1 tableur-grapheur scientifique Regressi,
- 1 IDE python (Pyzo™) + programme *Acqui_UI_mesu.py*.

I – Étude du montage avec le moteur monte-charge

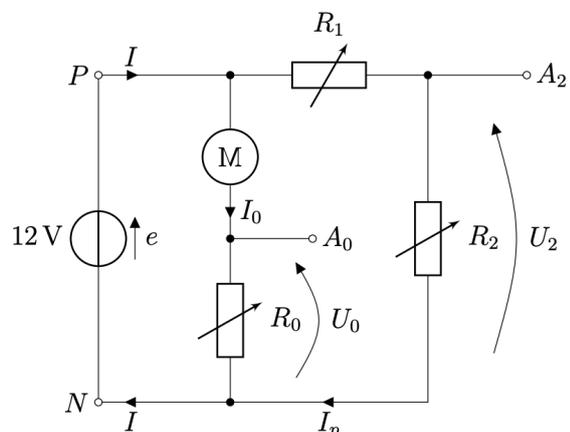
Document 2 Montage électrique

On réalise le montage correspondant au schéma électrique ci-contre comprenant un moteur monte-charge en série avec un résistor R_0 et un pont diviseur de tensions.

Les trois résistors R_0 , R_1 et R_2 sont réalisés à l'aide de la boîte à décade de résistance avec $R_0 = 5 \Omega$, $R_1 = 10,0 \text{ k}\Omega$ et $R_2 = 5,0 \text{ k}\Omega$.

Le générateur est une alimentation stabilisée pouvant déivrée une tension continue $e = 12 \text{ V}$.

Les tensions U_0 et U_2 sont mesurées par les entrées analogiques A_0 et A_2 d'un microcontrôleur Arduino (module Plug'Uino) piloté par un programme python.



Document 2 Montage mécanique et expérience

On fixe le moteur monte-charge au point le plus élevé du statif puis on déroule le fil pour y suspendre une masse à crochet (charge de masse m) de 100 g – la charge ne doit pas reposer sur la paillasse.

On place une webcam de sorte que l'on puisse filmer la charge sur la totalité de sa remontée.

On relie le moteur au montage électrique.

À l'aide du logiciel Regressi, on pilote l'enregistrement de la vidéo afin de mouvoir étudier (par pointage) le mouvement ascendant de la charge suspendue au moteur monte-charge.

Reprendre l'expérience avec d'autres valeurs supérieures de la masse de la charge à monter.

**1°/ Étude théorique du montage électrique avec le moteur**

- Établir l'expression de l'intensité du courant I_0 traversant le moteur en fonction de U_0 et R_0 .
- Établir l'expression de la tension U_2 en fonction de la tension e et des résistances R_1 et R_2 .
- Établir l'expression de la tension U_M aux bornes du moteur en fonction de e et de U_0 .
- En déduire une expression de la puissance électrique P_M délivrée au moteur en fonction de U_0 , U_2 , R_0 , R_1 et R_2 .
- Sachant que les entrées analogiques du microcontrôleur ne surportent pas des tensions supérieures à 5,0 V (tension d'alimentation de la carte via le port de communication série USB de l'ordinateur), quel est l'intérêt du montage pont diviseur réalisé avec les résistors R_1 et R_2 ? Quelle est l'intensité maximale admissible $I_{o,max}$ dans la branche contenant le moteur?
- Quelle est la valeur moyenne de l'énergie électrique $E_M(t)$ délivrée au moteur pendant l'intervalle de temps Δt entre deux mesures aux dates t et $t + \Delta t$?
- Comment obtenir l'énergie totale délivrée au moteur pendant toute la durée de l'expérience?

2°/ Étude théorique du montage mécanique avec la charge de masse m

On considère le système {charge de masse m } en interaction avec le champ de pesanteur en négligeant toutes les autres forces. On se place dans le référentiel du laboratoire considéré comme galiléen.

- Donner l'expression de l'énergie cinétique de la charge levée par le monte-charge.
- Donner l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur de la charge levée par le monte-charge en fonction de son altitude z . Précisez le choix de l'origine des altitudes.
- En déduire une expression de son énergie mécanique.
- Quelle est la puissance mécanique fournie en moyenne à la charge par le monte-charge? Quelle est la force qui travaille? Est-elle constante pendant toute la remontée?

3°/ Étude expérimentale

- Faire monter une première charge de masse $m = 100$ g en enregistrant son mouvement à l'aide d'une webcam et les valeurs des tensions U_0 et U_1 à l'aide du microcontrôleur Arduino.
- Relever les différentes positions occupées par la charge au cours du temps (pointage avec le tableur-grapheur Regressi) et construire la courbe représentative de l'énergie potentielle de pesanteur E_{pp} cette charge au cours du temps.

- Déterminer la vitesse ascensionnelle de la charge et en déduire la valeur de son énergie cinétique E_c au cours du temps. Construire sa courbe représentative.
- Construire la courbe représentative de l'évolution de l'énergie mécanique E_{meca} de la charge au cours du temps. Quelle est sa valeur finale ?
- Quelle est la valeur de l'énergie électrique E_{moteur} fournie au moteur pendant l'ascension de la charge ?
- En déduire le rendement r du moteur du monte-charge.
- Reprendre votre étude pour d'autres valeurs de la masse m .
- Regrouper vos résultats dans un tableau (cf. modèle ci-dessous).

m (g)	100	150	200	250
$r = E_{meca}/E_{moteur}$				
E_{meca} (J)				
E_{moteur} (J)				

- Répondre à la question introductive au TP
- Pensez-vous que le moteur puisse augmenter son rendement indéfiniment ? Pourquoi ?
- Représenter la chaîne énergétique correspondant à ce convertisseur.

Étude du rendement d'un convertisseur d'énergie : la photopile

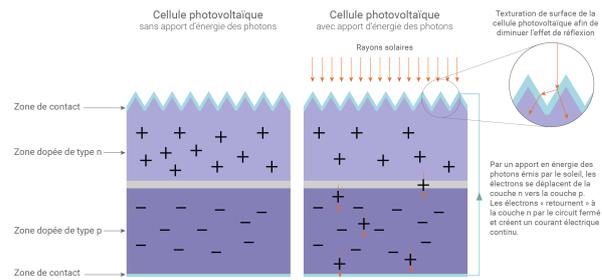
L'énergie photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, elle a l'avantage d'être non polluante (en exploitation), souple et fiable. Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies ensuite avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant des batteries pour stocker d'énergie électrique pendant les heures sans soleil. *Quel est le rendement de conversion d'énergie d'un panneau photovoltaïque ou photopile ?*

Document 1 – Effet photovoltaïque : effet photoélectrique au voisinage d'une jonction PN

Découvert en 1839 par Edmond BECQUEREL, l'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil (sous forme de photons) en énergie électrique à l'aide d'un composant semi-conducteur appelé cellule photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque ne peut se produire que s'il existe une barrière de potentiel dans le semi-conducteur avant qu'il ne soit éclairé. Parmi les matériaux semi-conducteurs les plus utilisés on trouve le silicium, le germanium, le sulfure de Gallium et l'arséniure de Gallium. Une telle barrière de potentiel existe (avec un champ électrique résultant), par exemple, à l'interface entre deux volumes dopés différemment c'est-à-dire où l'on a introduit deux types différents d'impuretés à concentration différente : lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction (dite P-N) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones N et P, une diode est obtenue.

Prenons le cas le plus général d'une plaquette de silicium : elle est dopée dans sa partie supérieure au bore (coté P) et dans sa partie inférieure au phosphore (coté N). Lorsqu'un photon vient frapper la cellule, il arrache des électrons par effet photoélectrique et crée une paire électron-trou. L'électron a suffisamment d'énergie pour franchir la jonction et il est collecté du côté N. Un courant électrique est ainsi créé.



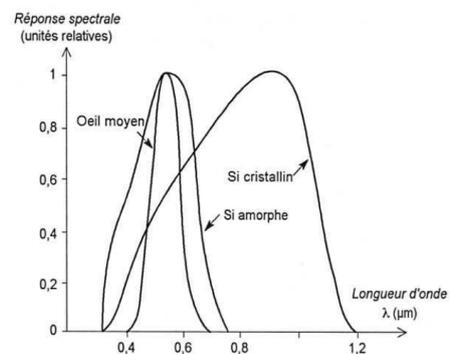
Texturation de surface de la cellule photovoltaïque afin de diminuer l'effet de réflexion. Par un apport en énergie des photons émis par le soleil, les électrons se déplacent de la couche n vers la couche p. Les électrons « recourent » à la couche n par le circuit fermé et créent un courant électrique continu.

Document 2 – Réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque

Il existe différents types de photopiles, mais elles se différencient surtout par leur sensibilité spectrale, ou capacité plus ou moins grande à convertir l'énergie radiative en fonction de certaines longueurs d'onde.

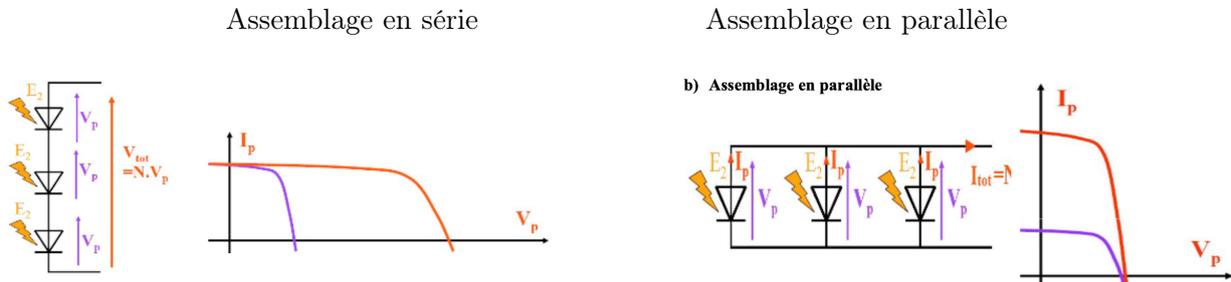
Les cellules au silicium amorphe ont une sensibilité spectrale très proche de celle de l'œil (cf. figure). Ainsi, le silicium amorphe est particulièrement bien adapté en éclairage intérieur car les tubes fluorescents ou les LED ont un spectre d'émission qui est prévu pour l'œil humain.

Les photopiles au silicium cristallin sont destinées à un usage extérieur sous fort ensoleillement, à cause de leur sensibilité plus grande au proche infrarouge et de leur médiocre comportement dans le bleu.



Document 3 – Types d’assemblages électriques

Il est possible de relier des cellules en série pour augmenter la tension ou en parallèle pour augmenter le courant, ou bien encore série-parallèle pour augmenter les deux paramètres simultanément. Dans tous les cas, la puissance électrique augmente avec le nombre de cellules qui sont généralement identiques pour faciliter les processus industriels et optimiser le rendement des capteurs.



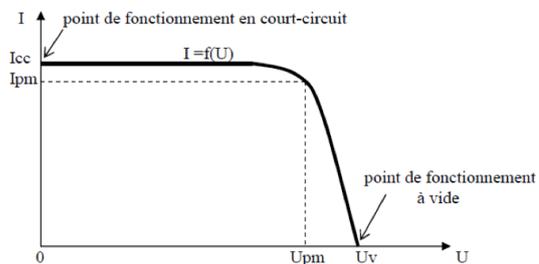
L’assemblage électrique le plus utilisé dans les modules est l’assemblage série pour des raisons de conversions électriques. Il faut faire attention à ce que toutes les photopiles soient éclairées de la même façon. En effet, une photopile ombragée (même partiellement) voit sa tension et surtout son intensité baisser considérablement. Une perte de puissance risque de provoquer une polarisation inverse avec dissipation d’énergie dans la diode défaillante.

Document 4 – Fonctionnement électrique d’une photopile

Une photopile débite un certain courant dans un récepteur sous une différence de potentiel donnée (ou « tension » en langage courant). Cette relation courant-tension est décrite par une courbe (la caractéristique intensité-tension) qui conditionne le fonctionnement électrique de la photopile et son couplage avec le récepteur.

Si l’on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur ($R = \infty$,) elle peut générer à ses bornes une tension continue maximale, dite tension de circuit ouvert U_V ou tension à vide. Elle est mesurée en reliant directement la photopile à un voltmètre.

C’est sous une tension inférieure que la photopile sera utilisée, afin qu’elle débite tension et courant (puissance électrique) pour alimenter le récepteur.



À l’inverse du point de circuit ouvert, lorsqu’on place la photopile en court-circuit ($R = 0$), elle débite son courant maximal, mais aucune tension. C’est le courant que l’on peut mesurer en branchement direct sur un ampèremètre. On appelle ce courant maximal à tension nulle courant de court-circuit.

L’utilisation optimale d’une photopile consiste à alimenter un récepteur sous la tension la plus grande correspondant à l’intensité la plus grande. En effet, suivant la relation $P = U \cdot I$, pour que la puissance soit maximale, il faut être dans les conditions où le produit $U \cdot I$ est maximal : c’est le point de charge optimal de la photopile, ou point de puissance maximale P_m (cf. figure). On a coutume d’appeler U_m et I_m la tension et le courant correspondant à ce point.

Document 5 – Mesure d'éclairement

L'éclairement d'une surface se mesure en lux (lx) à l'aide d'un appareil : le luxmètre !
 Un lux est l'éclairement d'une surface qui reçoit d'une manière uniformément répartie, un flux lumineux d'un lumen par mètre-carré : $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm.m}^{-2}$

L'appareil de mesure de l'éclairement lumineux comporte généralement une partie à cellule photosensible et une partie d'affichage. La sensibilité d'un récepteur tel que l'œil ou une caméra vidéo se définit également en lux et correspond généralement au niveau d'éclairement minimum de sensibilité acceptable. Concernant l'œil humain, cette sensibilité diminue d'environ 25% entre les âges de 20 et 60 ans. L'œil humain peut s'accommoder à des niveaux d'éclairement très variables, de 130 000 lux (une journée ensoleillée d'été) à 1 lux (une nuit de pleine lune). Néanmoins certains niveaux minimaux sont requis : par exemple 5 lx pour se déplacer, 150 lx pour la lecture et l'écriture...



Le lumen (lm) quant à lui est homogène à une puissance, tout comme le watt (W). Mais la grosse différence entre les deux, c'est que la mesure de la première est subjective car elle dépend de la sensibilité de l'œil humain aux longueurs d'onde émises par la source (répartition spectrale de l'énergie), tandis que la seconde en est totalement indépendante.

La conversion s'effectue à raison de 683 lm/W pour une longueur d'onde monochromatique 555 nm, 48 lm/W pour une lampe à incandescence (filament de tungstène à 3695 K) ou encore 240 lm/W pour de la lumière blanche.

Document 6 – Matériel mis à disposition

- | | |
|--|---|
| — un voltmètre | — un panneau avec cellules photovoltaïques (photopiles) |
| — un ampèremètre | — deux pinces crocodiles |
| — une boîte à décade de résistance | — une règle de 50 cm |
| — un luxmètre | — un tapis de paille |
| — un jeu de fil de connexion banane-banane | — un ordinateur avec tableur-grapheur scientifique Regressi |
| — un élévateur à croisillons | |
| — une lampe de bureau avec ampoule à incandescence (15 W - 80 lm - 2200 K) | |

Tracé des caractéristiques du panneau photovoltaïque**Dispositif expérimental**

- Proposer un schéma de montage permettant, avec le matériel disponible, de mesurer la tension U aux bornes du panneau photovoltaïque et l'intensité I qu'il génère lorsqu'il est éclairé par une lampe de bureau.
- Après validation par le professeur, réaliser votre montage.

Remarque : dans le montage, le potentiomètre, qui se branche en série avec la cellule, doit permettre de faire varier les valeurs de la tension U et de l'intensité I .

Tracé des caractéristiques

1. Éclairer le panneau photovoltaïque avec la lampe de bureau et relever la valeur de l'éclairement E .
2. Sans modifier l'éclairement, tracer la caractéristique courant – tension $I = f(U)$.
3. Tracer ensuite la caractéristique puissance – tension $P = f(U)$.
4. Appeler le professeur pour lui présenter les caractéristiques obtenues

Détermination du rendement du panneau photovoltaïque

1. Proposer une méthode permettant de déterminer le rendement de la cellule photovoltaïque étudiée.
2. Calculer ce rendement et l'exprimer en pourcentage.
3. Appeler le professeur pour lui présenter la méthode proposée

Interprétation du résultat obtenu

- Commenter la valeur du rendement obtenu.

Retard à la propagation et célérité d'une onde mécanique

MESURE DE LA VITESSE DE PROPAGATION D'UNE ONDE MÉCANIQUE PROGRESSIVE

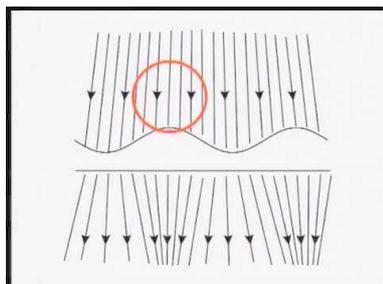
Première partie : cas d'une onde se propageant à la surface de l'eau :

Document 1 – matériel mis à disposition pour cette partie

- | | |
|---|--|
| — 1 cuve à ondes + eau, | — 1 ordinateur portable, |
| — 1 webcam sur trépied télescopique, | — 1 logiciel d'acquisition vidéo et de traitement des données de pointage <i>Regressi</i> (tableur-grapheur scientifique). |
| — 1 échelle photographique ou une toise, | |
| — 1 verre à pied + 1 pipette compte-goutte, | |

Document 2 : la cuve à ondes

Éclairés par dessus, les crêtes et les creux des vagues provoquées en surface projettent, sur l'écran dépoli de la cuve à ondes, des zones claires ou sombres qui permettent de suivre la progression du front du paquet d'ondes.



En filmant l'écran dépoli avec une webcam, on réalise la captation de la progression du front du paquet d'ondes.

Mode opératoire :

- Placer une échelle photographique ou une toise sur l'écran dépoli de la cuve à onde pour obtenir la référence d'échelle du document vidéo et réaliser la mise au point de la caméra pour obtenir une image nette.
- Suivi de la progression de l'onde créée à la surface de l'eau :
 - Sélectionner le bureau de l'ordinateur portable comme dossier d'enregistrement de la vidéo.
 - Effectuer le paramétrage du logiciel de prise de vue pour réaliser une acquisition vidéo de bonne qualité : la fréquence de prise de vue doit être fixée à une valeur comprise entre 15 et 30 images par secondes, la webcam filmera en noir et blanc.
 - Réaliser dans ces conditions l'acquisition sur une ou deux secondes de la surface de l'eau (images projetés sur l'écran dépoli de la cuve) pendant la propagation du paquet d'ondes.
 - Récupérer le fichier vidéo sur un support numérique pour réaliser l'acquisition et le traitement des données de pointage à votre poste de travail.
- Proposer un mode opératoire pour l'acquisition et le traitement des données de pointage afin de déterminer la vitesse de propagation du paquet d'ondes à la surface de l'eau.

Questions :

- Si le milieu est identique en tout point et dans toutes les directions, le front d'onde se « déplace » alors à vitesse de propagation constante (célérité) sans subir de déformation.
 - Quelle type de relation mathématique – ou loi horaire – relie la position du front d'onde à la date d'observation ? Écrire son équation.
 - Dans cette équation, identifier chacun des paramètres.
- En utilisant l'équation de la loi horaire et les fonctionnalités de modélisation intégré à l'application logicielle *Regressi*, déterminer les valeurs optimales des paramètres assurant la meilleure corrélation entre le modèle mathématique et les valeurs expérimentales.
- Noter le coefficient de corrélation et l'écart-type correspondant.
- En déduire une valeur de la célérité des ondes à la surface de l'eau.

Deuxième partie : cas des ultrasons dans l'air

Document 3 – matériel mis à disposition pour cette partie

— 1 émetteur US + générateur US (salves)	E/R d'ultrasons monté sur potence + câble SATA de liaison + câble USB
— 1 récepteur US	
— 1 écran d'optique (plaque rigide) + potence	— 1 règle métallique de 50 cm
— 1 jeu de cordons de connexion + fiches BNC-banane,	— 1 tapis de paille,
— 1 module plug'Uino (arduino) + module	— 1 oscilloscope numérique,
	— 1 logiciel IDE python (<i>pyzo</i> TM),
	— le programme python : <i>US_duree_graphique.py</i>

Document 4 : les ondes ultrasonores

Les ultrasons sont des ondes acoustiques de fréquence supérieure à 20 kHz, inaudibles pour l'Homme.

Ce sont des ondes mécaniques de compression-dilatation progressives périodiques (pendant la durée d'une salve) longitudinales à trois dimensions. Ainsi le front de l'onde est une portion de sphère centrée sur la source.



Pour émettre et recevoir des ultrasons, on utilise des transducteurs piézoélectriques qui vont transformer un signal électrique en une vibration acoustique et vice-versa.

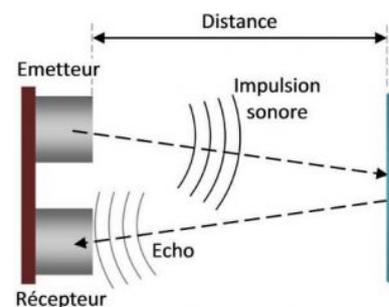
Document 5 : le principe de l'écholocation pour mesurer la célérité des ondes

L'écholocation est l'un des principes de base du sonar : une impulsion électrique produite par l'émetteur est convertie en une onde acoustique qui est émise dans l'eau.

Lorsque cette onde atteint un objet, elle rebondit et cet écho revient vers le récepteur. En mesurant la durée aller-retour, connaissant la vitesse de propagation des ondes acoustiques dans l'eau, on peut en déduire la position d'un obstacle réfléchissant.

C'est sur ce principe de fonctionnement que sont calculées les profondeurs lors de l'étude des fonds marins.

À l'inverse, si la distance est connue, la mesure de la durée de l'aller-retour nous permet d'obtenir la célérité de l'onde.



A) Validation du principe de la mesure

- Réaliser le montage permettant d'envoyer des salves d'ultrasons (40 kHz) sur un écran situé à une distance $d = 17,0$ cm du couple émetteur-récepteur.
- À l'aide de l'oscilloscope, visualiser les signaux envoyés et reçus.
- Déterminer le plus précisément possible la durée τ d'un aller-retour de l'onde acoustique après réflexion sur l'écran.
- Relever la température de l'air de la salle et en déduire une valeur de la célérité des ultrasons dans l'air pour cette température.
- Déterminer l'incertitude $u(d)$ sur votre mesure de la distance entre le couple émetteur-récepteur et l'écran en utilisant la relation $u(d) = \frac{q \cdot \sqrt{2}}{3}$ avec « q » la résolution de la règle. Sur quelle hypothèse "forte" repose la justesse de cette mesure de distance ?
- Déterminer l'incertitude $u(\tau)$ sur votre mesure de la durée d'un aller retour en utilisant la relation $u(\tau) = \frac{r \cdot \sqrt{2}}{3}$ avec « r » la résolution du quadrillage de l'écran de l'oscilloscope (en tenant compte de l'échelle horizontale).
- En déduire l'incertitude sur la valeur de la célérité à l'aide de la relation :

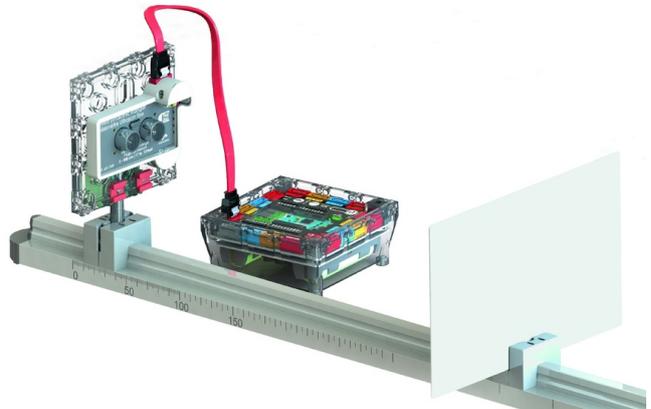
$$U(v) = 2v \cdot \sqrt{\left(\frac{u(d)}{d}\right)^2 + \left(\frac{u(\tau)}{\tau}\right)^2}$$

B) Répétition de la mesure pour d'autres distances

Pour augmenter la précision de la méthode, on réitère l'opération de mesure de la durée de l'aller-retour de l'onde ultrasonore pour différentes distances entre l'écran et le couple émetteur-récepteur.

On utilise cette fois un microcontrôleur arduino relié à un module émetteur-récepteur.

On modifie la distance d mesurée à la règle aussi précisément que possible et on saisie sa valeur à chaque demande de l'application python qui pilote le microcontrôleur. cinq salves sont émises et une moyenne sur les cinq durées aller-retour est calculée puis enregistrée dans le fichier d'acquisition.



- Réaliser la mesure de la durée aller-retour pour une dizaine de valeurs différentes de la distance à l'écran (par exemple tous les 5 cm depuis la distance minimale de 5 cm).
- L'exécution du programme python fournit un fichier de données (format .csv) et un graphique (format .png) représentant la distance à l'écran en fonction de la durée aller-retour ; proposer une méthode pour exploiter les données et/ou le graphique afin de déterminer la célérité des ultrasons dans l'air.

Longueur d'onde d'une onde périodique sinusoïdale

L'onde mécanique progressive périodique sinusoïdale est l'élément de base de l'analyse des ondes périodiques à signaux (ou formes d'onde) complexes. En perturbant périodiquement (avec une période temporelle T) le milieu de propagation de l'onde, du fait de l'existence d'ondes progressives se propageant avec une célérité v , on constate que des points du milieu régulièrement espacés le long d'une direction de propagation de l'onde vibrent en phase, c'est-à-dire se présentent de manière synchrone dans le même état vibratoire avec le même sens d'évolution (aux effets de l'atténuation près). Cette période spatiale est dénommée longueur d'onde, notée λ .

Première partie : cas d'une onde périodique se propageant à la surface de l'eau :

Document 1 : création d'une onde périodique à la surface de l'eau

On place l'embouchure d'un tube courbé à la surface de l'eau de la cuve. Ce tube est relié au piston d'un compresseur susceptible d'y insuffler périodiquement de l'air.

L'air sous pression, en appuyant sur la surface de l'eau, crée une perturbation périodique de celle-ci, qui se propage de proche en proche avec la même célérité dans toutes les directions : on obtient ainsi une onde mécanique progressive périodique circulaire dont on peut mesurer la longueur d'onde sur un cliché photographique.



Document 2 – matériel mis à disposition pour cette partie

- 1 cuve à ondes + eau,
- 1 webcam sur pied,
- 1 étalon photographique ou une toise,
- 1 logiciel de prise de vue : *Observation*TM,
- 1 logiciel de traitement des images *Regressi*.

Mode opératoire :

- Placer une échelle photographique ou une toise sur l'écran dépoli de la cuve à onde pour obtenir la référence d'échelle du document photographique et réaliser la mise au point de la caméra pour obtenir une image nette.
- Le logiciel de traitement d'image permet d'obtenir le profil d'intensité de l'image photographiée ; proposer un mode opératoire permettant de déterminer la longueur d'onde des ondes périodiques à la surface de l'eau.

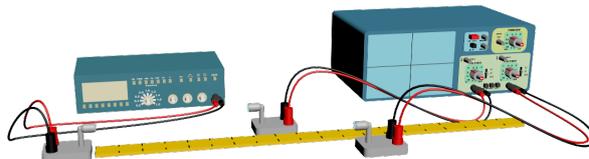
Questions :

- Rappeler la définition de la longueur d'onde qui vous permet d'utiliser le profil d'intensité pour en mesurer la valeur.
- Comment améliorer la précision de la mesure
- Sachant que la longueur d'onde est, par propriété, la distance parcourue par l'onde pendant une durée égale à la période de vibration de la source, en déduire une valeur de la célérité des ondes à la surface de l'eau.

Deuxième partie : cas des ultrasons dans l'air

Document 3 : déphasage de l'onde périodique entre deux récepteurs

Deux récepteurs, espacés de quelques centimètres le long de l'une des directions de propagation de l'onde ultrasonore, reçoivent l'onde périodique, l'un par rapport à l'autre, avec un certain retard du fait de la propagation de cette onde sur la distance qui les séparent.



Ce retard à la propagation se manifeste du point de vue des signaux (oscillogrammes) par un décalage temporel des motifs périodiques observés, c'est-à-dire un déphasage.

Lorsque la distance qui séparent les deux récepteurs est un multiple entier de la longueur d'onde, les signaux sont en phase et seule l'amplitude, du fait de l'atténuation, permet de distinguer le signal reçu au niveau du premier récepteur de celui reçu au niveau du second.

Document 4 – matériel mis à disposition pour cette partie

- | | |
|--|---|
| — 1 émetteur US + générateur US | — 1 oscilloscope numérique, |
| — 2 récepteurs US | — 1 tapis de pailleasse, |
| — 1 jeu de cordons de connexion + fiches BNC-banane, | — 1 logiciel d'acquisition et de traitement des données tableur-grapheur scientifique <i>Regressi</i> . |
| — 1 règle métallique de 50 cm, | |

1. Réaliser le montage permettant d'envoyer des ultrasons (environ 40 kHz) à deux récepteurs distants de D (distance de quelques centimètres arbitrairement choisie).
2. À l'aide de l'oscilloscope, visualiser les signaux reçus.
3. Proposer un protocole expérimental permettant de déterminer la longueur d'onde des ondes ultrasonores.
4. Mesurer cette longueur d'onde.
5. Relever la température de l'air de la salle et en déduire une valeur de la célérité des ultrasons dans l'air pour cette température.
6. Proposer une amélioration de la méthode de mesure permettant de réduire les incertitudes sur la valeur de la longueur d'onde mesurée.

Modèle de comportement d'un gaz : la loi de Mariotte

Nous nous proposons, lors de cette activité expérimentale, d'étudier le comportement d'une quantité donnée et constante d'un gaz (ici l'air) supposé parfait.

L'état d'un gaz parfait est décrit par un faible nombre de paramètres macroscopiques tels que la pression ou la température. Nous allons nous intéresser à l'évolution de la pression d'une quantité fixée de gaz, lors d'une variation de son volume (compression ou expansion) à température constante.

Document 1 – matériel mis à disposition

- | | |
|---|--|
| — 1 microcontrôleur arduino <i>Plug'Uino</i> , | — 1 pressiomètre, |
| — 1 capteur de pression avec connecteur SATA, | — 1 logiciel tableur-grapheur scientifique <i>Regressi</i> |
| — 1 ensemble de tubes souples et 1 robinet trois voies (système Luer-Lock), | — 1 logiciel EDI python <i>pyzo</i> TM et programmes python : |
| — 1 seringue 30 ou 60 mL avec embout Luer-lock, | — <i>etalon_capteur_pression.py</i> |
| | — <i>loi_de_mariotte.py</i> |

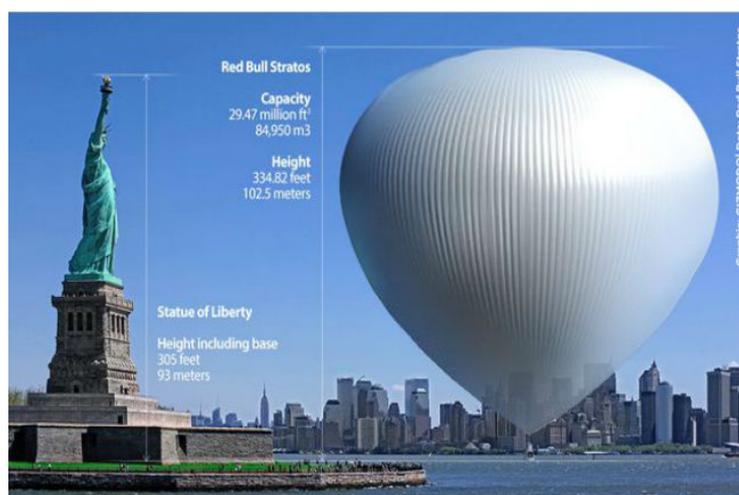
Document 2 : projet Red Bull Stratos - le contexte

Le 14 octobre 2012, Félix BAUMGARTNER a utilisé un ballon stratosphérique gonflé avec de l'hélium (gaz moins dense que l'air) pour parvenir à une altitude de 39,45 km et a ensuite effectué un saut en chute libre depuis la stratosphère. L'ascension avec un ballon stratosphérique classique se divise en deux parties, la première phase s'effectue à masse constante (tout se passe comme si le ballon était hermétiquement fermé), lors de l'ascension, on remarque alors que le volume de celui-ci augmente. La montée se poursuit jusqu'à ce que l'enveloppe soit pleine. Toute augmentation de volume supplémentaire provoque un rejet de gaz par les ouvertures inférieures, appelées manches d'évacuation (2ème phase).

Document 3 : projet Red Bull Stratos - le ballon

Pour atteindre l'altitude de 39 000 m, et atteindre la stratosphère, l'équipe a décidé d'utiliser un ballon gonflé à l'hélium, ce qui permettait à Félix BAUMGARTNER de débiter sa chute à partir d'un point fixe.

Le « *Red Bull Stratos balloon* » est dix fois plus grand que le ballon utilisé par le précédent détenteur du record, le colonel Joe KITTINGER (qui a sauté d'une altitude de 31 333 m en 1960).



Plus élevé que la Statue de la Liberté, avec ses 100 m de hauteur, le ballon peut contenir environ 850 000 m³ cubes d'hélium (inflammable et non toxique en cas de rejet dans l'atmosphère). Il est constitué de bandes de haute performance en polyéthylène, une sorte de plastique.

La quantité d'hélium contenu dans le ballon a été calculée avec précision pour éviter à la fois l'éclatement du ballon et atteindre la « *float altitude* » souhaitée.

Il a été conçu pour être récupéré après l'expérience. En effet, après que Félix Baumgartner a sauté de la nacelle, l'ordre a été donné à distance de détacher la capsule du ballon et le système de dégonflage automatique a été déclenché. Le ballon a pu être récupéré sept minutes après le saut.

Document 4 : projet Red Bull Stratos - la pression

Dans la stratosphère, beaucoup de facteurs sont à prendre en compte et la pression en fait partie. En effet, alors que la pression au niveau des océans est en moyenne de 1015 hPa, la pression à la limite entre la troposphère et la stratosphère est d'environ 200 hPa et la pression en haut de la stratosphère est d'environ 1 hPa !

On pourrait d'abord se dire que c'est un gros avantage pour un saut qui se veut le plus rapide du monde car la quasi-absence de pression lui permet d'avoir moins de frottements, de résistance à l'air et donc d'aller beaucoup plus vite et c'est le cas.

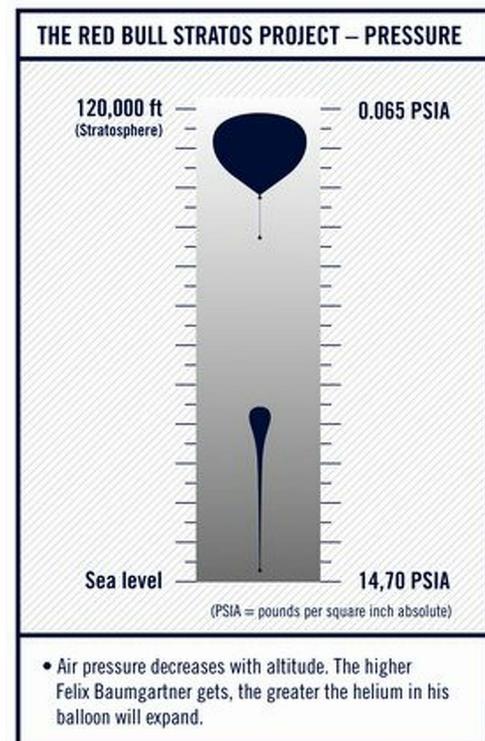
Mais, vous vous en doutez, ce n'est pas si facile ! Faire chuter un être humain n'est pas comme lâcher une pierre. Le corps d'un adulte est constitué de près de 60% d'eau et pour une bonne part directement à l'état liquide

Or, il existe deux facteurs pour qu'un liquide entre en ébullition : Il y a évidemment la température mais également la pression ; si on diminue la pression, on diminue également la température d'ébullition : au sommet de l'Everest (8848 m), la température d'ébullition n'est déjà plus que de 67°C !

Le problème est donc que le sang de Félix BAUMGARTNER est un liquide comme les autres et qu'il peut alors entrer en ébullition si l'on diminue la pression. Félix devra donc porter une combinaison pressurisée et disposer d'une capsule pour la montée afin d'éviter ce scénario catastrophe.

Données :

- 1 PSIA = 68,9476 hPa
- 1000 ft = 304,8 m

**Questions :**

1. En vous aidant des documents, indiquer si le nombre de molécules de gaz (hélium) à l'intérieur du ballon varie lors de la première partie de la phase ascensionnelle (ballon hermétiquement fermé).
2. En vous aidant des documents, indiquer comment évolue la pression à l'intérieur du ballon, lors de la première partie de la phase ascensionnelle, préciser aussi l'évolution du volume du ballon.
3. À l'aide d'une seringue, d'un tuyau souple et du montage comportant le capteur de pression et le microcontrôleur Arduino (cf. photographie ci-après), proposer le mode opératoire d'une expérience permettant de vérifier comment varie le volume d'un gaz en fonction de la pression.

Atelier n°1 : étalonnage du capteur

Afin de mesurer la pression, il vous faut étalonner le capteur et obtenir le graphique représentant la pression en fonction de la tension : $p = f(U)$.

On réalise un montage qui permet d'établir une correspondance entre la valeur de la pression p mesurée à l'aide d'un pressiomètre et la tension U délivrée en sortie du capteur utilisé.

Dans ce montage, la seringue sert uniquement à faire varier la pression dans le circuit hydraulique (circuit enfermant un fluide sous pression). Le mesurage est piloté par le programme python « *etalon_capteur_pression.py* »



le capteur de pression

- Relier le pressiomètre, le capteur de pression et la seringue ;
- Mesurer la pression et la tension délivrée par le capteur et appliquée en entrée A0 du microcontrôleur pour une quantité de gaz fixe.
- Après avoir effectué cette première mesure, faire varier la pression à l'aide de la seringue et mesurer ainsi six autres couples tension-pression ($U-p$).
- Présenter vos résultats expérimentaux et noter l'équation de la droite d'étalonnage du capteur.

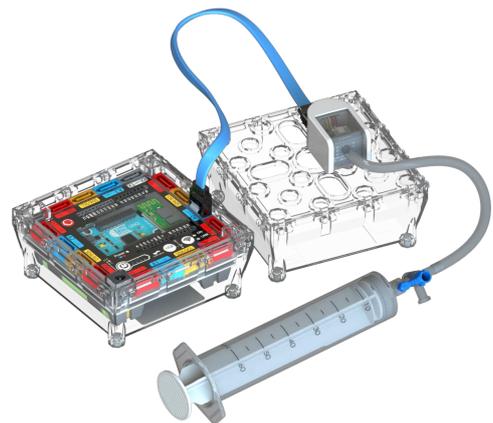
Atelier n°2 : comportement du gaz et modélisation

Il s'agit à présent de mettre en œuvre le protocole expérimental proposer en réponse à la question n°3.

On réalise le montage qui permet d'établir une correspondance entre la valeur de la pression p du gaz enfermé dans la seringue (et le tube), mesurée à l'aide du capteur de pression et le volume de la seringue.

Le mesurage est piloté par le programme python « *loi_de_mariotte.py* »

- Après avoir estimé le volume de gaz enfermé dans le tube abducteur reliant la seringue au capteur, modifier la ligne 21 du programme python en conséquence ;
- En utilisant l'équation de la droite d'étalonnage obtenue à l'atelier n°1, modifier la ligne 36 du programme python en conséquence ;
- Introduire dans la seringue un volume d'air représentant au moins un quart de sa contenance et fermer le circuit hydraulique.
- Faire varier le volume de la seringue et mesurer une dizaine de couples volume-pression ($V-p$).
- Présenter vos résultats expérimentaux et répondre aux questions.



Questions :

1. Choisir parmi les propositions ci-dessous, la « bonne relation » entre la pression p d'un gaz et le volume V qu'il occupe. Justifier votre choix.

a) $p = k \cdot V$

b) $V = k \cdot p$

c) $p \cdot V = k$

On précise que k désigne un paramètre constant pour la série de mesures réalisées.

2. Énoncer la loi de Mariotte pour une quantité de matière de gaz donnée à température constante.
3. De quel autre paramètre doit-on tenir compte pour déterminer l'altitude de flottaison (« *float altitude* ») du ballon stratosphérique de Félix BAUMGARTNER ?
4. Pourquoi les ballons-sondes météorologiques éclatent-ils à haute altitude ?

Fluide au repos - loi fondamentale de l'hydrostatique

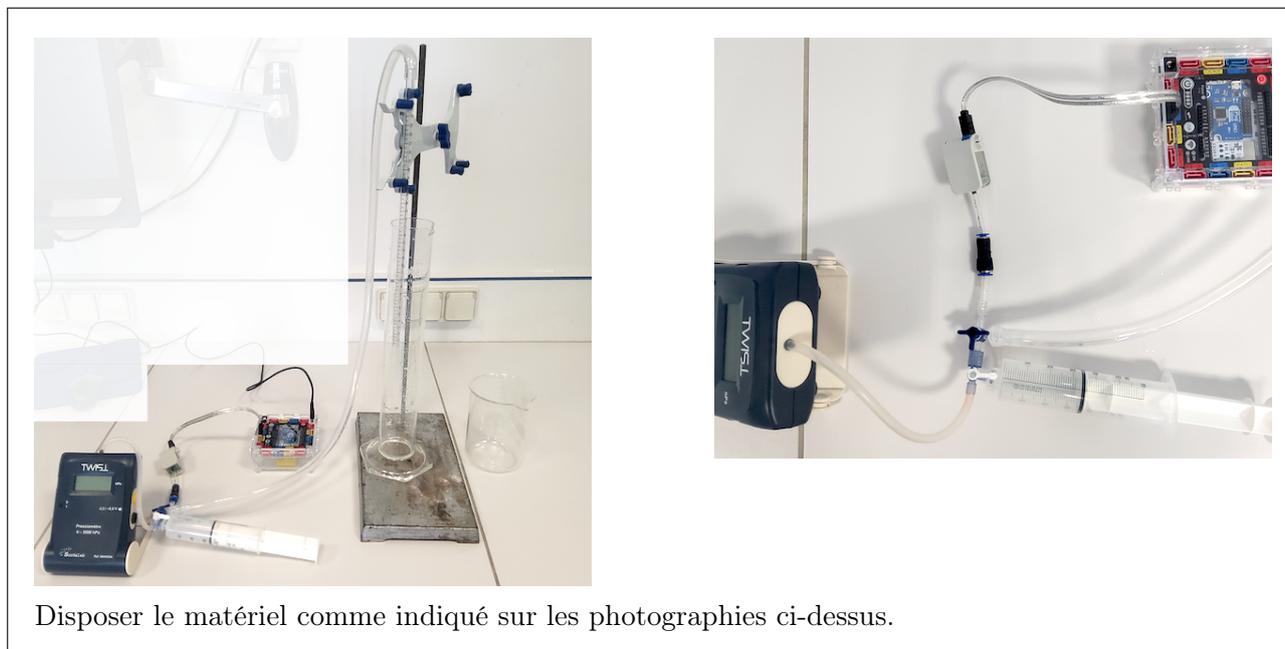
En plongée, la pression exercée par l'eau s'accroît au fur et à mesure que la hauteur d'eau située au-dessus du plongeur augmente.

L'objectif de ce T.P. est de montrer en quoi le principe fondamental de l'hydrostatique permet d'expliquer l'augmentation de la pression avec la profondeur de plongée.

Document 1 – matériel mis à disposition

- 1 éprouvette graduée en verre de 1000 mL,
- 1 seringue 60 mL embout Luer-Lock,
- 1 bécher de 500 mL,
- 1 tube rigide gradué (cm) + tube souple avec embout Luer-Lock,
- 1 pressiomètre 0-2000 hPa,
- 2 robinets 3 voies luer-Lock,
- 1 capteur de pression relative *Plug'Uino*TM + câble SATA
- 1 module microcontrôleur *Plug'Uino*TM,
- 1 potence + pince de maintien de burette
- 1 EDI python *pyzo*TM + programme python *loi_hydrostatique.py*
- 1 logiciel tableur-grapheur scientifique *Regressi*

Document 2 : le montage



Document 3 : le principe de Pascal

Vers 1651, Blaise Pascal énonce le principe suivant :

Une pression externe appliquée à un fluide confiné à l'intérieur d'un récipient fermé est transmise intégralement à travers tout le fluide.

Document 4 : le principe fondamental de l'hydrostatique

Pour un fluide parfait incompressible de masse volumique ρ , au repos dans le référentiel terrestre supposé galiléen, la différence de pression entre deux points A et B du fluide est proportionnelle à la différence d'altitude entre ces deux points, ce qui se traduit également par la conservation de la quantité :

$$p(z) + \rho g z = C^{ste}$$

Corollaire (théorème de Stevin) : tous les points d'un fluide parfait incompressible de même altitude sont à la même pression.

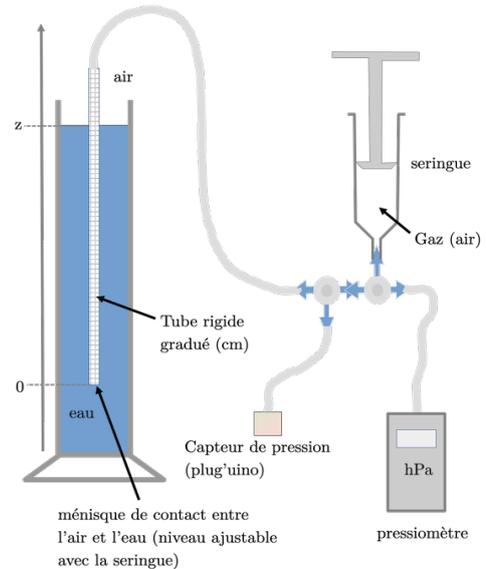
Document 5 : mode opératoire et mise en œuvre du matériel

Le tube rigide gradué plonge dans le fluide incompressible (eau) et explore le champ de pression dans le fluide à mesure que l'on enfonce plus ou moins profondément le tube.

La profondeur est repérée par les graduations du tube entre son extrémité (graduation zéro) et la surface libre du liquide en contact avec l'atmosphère.

Le tube enferme de l'air et une seringue permet de chasser le liquide qui pénètre dans le tube rigide de façon à ce que le ménisque se situe toujours au niveau de la graduation zéro.

Un pressiomètre permet d'enregistrer la pression absolue de l'air enfermé dans le tube et un capteur de pression relié à un microcontrôleur permet d'enregistrer la pression relative (par rapport à la pression atmosphérique) dans un fichier de données.

**Hypothèses** :

1. L'eau est un fluide incompressible ($\rho = Cste$) et se trouve au repos dans le référentiel du laboratoire supposé galiléen
2. La pression dans le liquide, loin de la paroi, est identique en tout point d'une même profondeur (ou altitude) c'est-à-dire d'une surface équipotentielle du champ de pesanteur
3. La pression de l'air dans le tube rigide gradué, l'ensemble des tubes souples et dans la seringue (c'est-à-dire en tout point du gaz) est identique à celle qui règne au niveau du ménisque de contact entre l'air et l'eau (principe de Pascal).

Expérience :

À l'aide du matériel et des documents mis à votre disposition, élaborer et mettre en œuvre un protocole expérimental permettant de vérifier, dans le cas de l'eau, la relation mathématique reliant la variation de pression entre deux points d'un fluide et leur différence d'altitude.

Validation des résultats :

La modélisation mathématique des données expérimentales par une fonction affine de type $p(z) = Az + B$ à l'aide du programme python renvoie les valeurs de A et de B ainsi que les incertitudes type $u(A)$ et $u(B)$ sur ces valeurs.

1. À quels paramètres physiques peut-on identifier les valeurs de A et de B du modèle ?
2. Déterminer les écart-relatif ϵ_A et ϵ_B entre les valeurs du modèle et celles de référence ainsi que les z-scores ζ_A et ζ_B
3. Conclure sur la vérification de la loi fondamentale de l'hydrostatique dans le cas de la colonne d'eau.

Données :

- Masse volumique de l'eau $\rho = 998 \text{ g.dm}^{-3}$ à 20°C
- Intensité du champ de pesanteur : $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$
- Le z-score pour une grandeur G_{exp} d'incertitude type $u(G_{exp})$ en référence à la grandeur G_{ref} est calculé à l'aide de la relation : $\zeta = \frac{|G_{exp} - G_{ref}|}{u(G_{exp})}$