

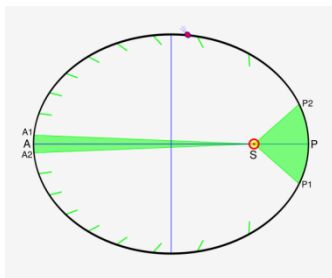
## M01 : Dynamique newtonienne (2013/2014)

La dynamique newtonienne représente le fleuron de la physique de Galilée à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle avant de céder sa place à la mécanique quantique. Dans ce montage, on va essayer de présenter les manipulations selon un ordre chronologique.

### I) Loi des aires :

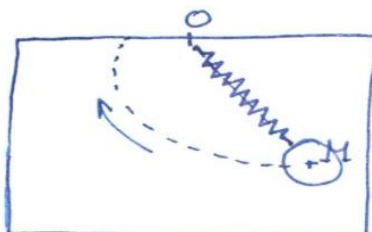
Nous commençons à l'époque de Kepler qui couche sur papier sa fameuse loi des aires.

Soient deux corps A et B. A tourne autour de B selon une trajectoire elliptique dont B occupe l'un des foyers. **Les surfaces balayées pendant des intervalles de temps égaux sont égales.**



### Expérience :

Avec la table à coussin d'air, attacher un mobile à un point fixe à l'aide d'un ressort. Lancer le mobile avec une vitesse initiale orthogonale à la direction du ressort. Utiliser la fonction de marquage du mobile pour visualiser sa trajectoire. Découper (au cutter) 3 surfaces balayées entre 2 positions au début, au milieu et à la fin de la trajectoire. Peser les bandelettes avec une balance. Normalement, les 3 surfaces doivent faire la même face : la loi des aires est vérifiée.



### Remarques :

- le lancer demande beaucoup de doigté : il faut éviter absolument de faire tourner le mobile sur lui-même sinon on n'est plus en mécanique du point (il peut être utile de le faire remarquer lors de la présentation de cette manipulation). Il faut aussi obtenir une belle ellipse de façon à avoir une forte variation du rayon, largement supérieure (estimation à l'œil) aux erreurs, sinon la trajectoire peut être vue comme circulaire et la pesée permet de montrer la loi des aires, la conservation du rayon et d'autres choses.

- utiliser une balance sensible (ici, on a utilisé une balance de capacité maximale de 200g) puisque les bandelettes sont de l'ordre de la dizaine de grammes (37g ici).

- attacher le ressort le plus près possible du centre de masse du mobile autoporteur : on l'avait attaché sur son pare-choc, il y a un fort risque que le mobile tourne sur lui-même sous l'effet du ressort. Le correcteur préconise de l'attacher sur le sommet du mobile pour être vraiment au centre de ce dernier mais le danger d'avoir une expérience incompatible avec la mécanique du point est encore présente...

- s'assurer à l'aide d'un niveau à bulle que la table est bien horizontale.

- pour faire fonctionner le système d'impulsion électrique du mobile, il faut brancher et mettre l'autre sur la table également.

### II) Chute libre dans un champ de pesanteur :

A présent, nous voici avec Galilée, contemporain de Kepler.

Poser les équations de la chute libre et établir la trajectoire  $z(t) = 1/2.g.t^2$ .

On cherche à mesurer l'accélération de pesanteur  $g$

### Expérience :

Chute libre d'un aimant dans un tube sur lequel se trouve deux capteurs inductifs (spires). Mettre l'une le plus haut possible, elle servira de référence pour le déclenchement de l'oscilloscope et l'autre à une altitude quelconque. Relever la différence d'altitude entre les deux et visualiser à l'oscilloscope le passage de l'aimant à travers les deux spires, mesurer l'intervalle de temps et remonter à l'équation du mouvement à ajuster par une parabole.

### Remarques :

- on aurait pu filmer la chute et c'est ce qui est recommandé. Attention toutefois à prendre le bon ensemble {webcam+ordinateur} : la datation est plus ou moins fiable selon l'ensemble (pour vérifier, filmer un chronomètre en marche et si les dates des images ne correspondent pas à ce qu'il y a d'indiquer sur le chrono à quelques dixièmes près, le système n'est pas bon) et les valeurs seront absurdes.

- au lieu de tracer  $z=f(t)$ , on peut tracer  $z=f(t^2)$  qui donne une droite donc plus facile à ajuster et à exploiter.

### III) Roulement d'un cylindre sur un plan incliné :

On reste avec Galilée et on va faire de la mécanique du solide.

Objectif : montrer la conservation de l'énergie mécanique en mécanique du solide.

### Expérience :

Prendre un plan incliné d'environ  $15^\circ$  par rapport à l'horizontale. Faire rouler un objet cylindrique de masse et rayon préalablement déterminés. Filmer son roulement sur le plan incliné.

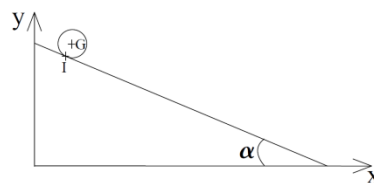


Figure 1 : schéma de principe du montage

Exploitation de la vidéo : relever la position du centre de masse (centre du disque du cylindre sur la vidéo) sur chaque image. Exporter les valeurs vers Igor, Regressi ou autres. Déterminer la norme de sa vitesse, son énergie cinétique et son énergie mécanique. Tracer l'évolution de l'énergie mécanique au cours du temps : elle n'est pas sensée se conserver, elle diminue au cours du temps. Il faut donc passer en mécanique du solide et rajouter un terme dans l'énergie mécanique : l'énergie de rotation.

Donc il faut déterminer la vitesse de rotation du solide à tout instant avec la formule  $\Omega = V/R$ .

Il faut ensuite calculer l'énergie d'inertie due à la rotation :  $E_{\text{inertie}} = 1/2.J.\Omega^2$  avec  $J$  le moment cinétique du cylindre selon son axe de rotation :  $I = 1/2.m.R^2$ .

Enfin, rajouter ce terme à l'énergie mécanique et constater sa conservation : l'hypothèse d'un point mobile ne fonctionne pas dans ce cas, on doit considérer le solide entièrement.

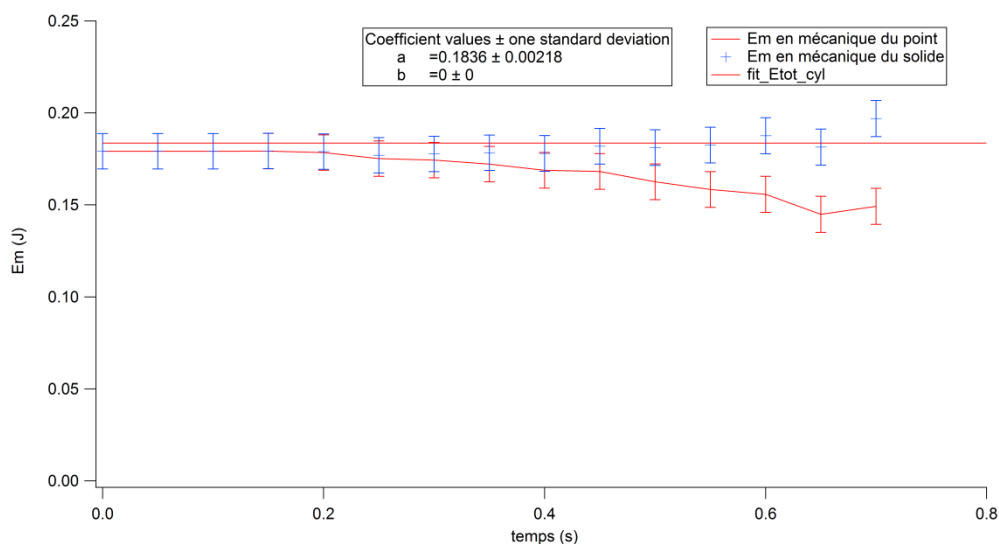


Figure 2: Energie mécanique du cylindre au cours du temps

### Remarques :

- Le choix de l'angle est un compromis entre la vitesse du roulement qui ne doit pas être trop rapide pour avoir une vidéo exploitable ni trop lente pour éviter d'avoir une énergie d'inertie négligeable.

- Repérer précisément la verticale sur la vidéo à l'aide d'un plomb, elle est importante pour déterminer l'énergie potentielle de pesanteur.

- Positionner la caméra de façon à ne pas avoir d'effet de parallaxe sur la profondeur ou quand la bille arrive et sort du champ de la caméra.

- L'hypothèse tacite ici est le roulement sans glissement, cette hypothèse peut être discutable et une explication possible si votre énergie ne reste pas constante.

- Pour calculer la norme de la vitesse : avec Igor, on peut calculer la dérivée d'une wave par rapport à une autre (analysis>differentiate), on peut ainsi calculer les vitesses selon les directions  $x$  et  $y$  et remonter à la norme du vecteur vitesse. Igor propose plusieurs manières de calculer la dérivée au  $n$ -ième point (en prenant les points  $n$ ,  $n-1$  ou  $n-1$ ,  $n+1$  ou  $n,n+1$ ), à voir laquelle donne le moins d'erreur suivant les cas.

### IV) Accélération d'entraînement :

A présent, voyons un phénomène qui se passe en référentiel non galiléen : caractérisation de l'accélération d'entraînement. On va aussi utiliser un nouvel outil : la force.

Objectif : montrer la dépendance en  $\Omega^2$  de la force d'entraînement.

On dispose d'un plateau tournant avec une gouttière dans laquelle se trouve un étrier de masse  $m$  relié à un ressort par un fil inextensible. Ce système masse-ressort n'est rien d'autre qu'un dynamomètre qui va mesurer la force d'accélération à laquelle est soumise l'étrier. En faisant tourner le plateau, l'étrier se trouve expulsé par la force d'entraînement et son déplacement est égal à l'allongement du ressort. On peut ainsi quantifier directement la force d'entraînement à laquelle est soumis l'étrier.

Pour montrer la dépendance, il suffit de faire un bilan des forces sur l'étrier :

- force d'entraînement :  $\mathbf{F}_e = -m.\Omega^2.\mathbf{HM}$ ,  $\mathbf{HM} = (\mathbf{l}_0 + \mathbf{x})$  avec  $\mathbf{l}_0$  la position initiale de l'étrier

- force de rappel du ressort =  $\mathbf{F}_r = -k \mathbf{x}$

Il vient alors :

$$m.\Omega^2.(l_0+x) = k.x$$

d'où :

$$x/(l_0+x) = m/k.\Omega^2$$

On a adimensionné et linéarisé l'équation.

### Expérience :

On utilise le plateau tournant.

Il est important d'étalonner le ressort pour remonter à sa constante de raideur (ici :  $k = 65.4 \text{ N/m}$ ) et éventuellement montrer la courbe d'étalonnage voire refaire une mesure d'étalonnage devant le jury.

Une fois le ressort étalonné, il faut lui raccrocher l'étrier.

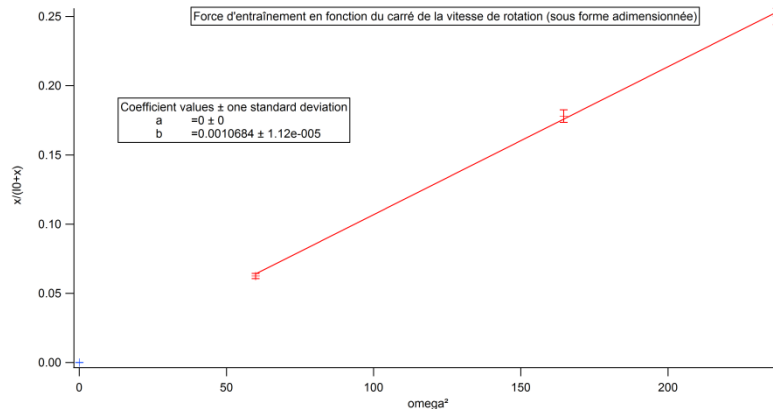
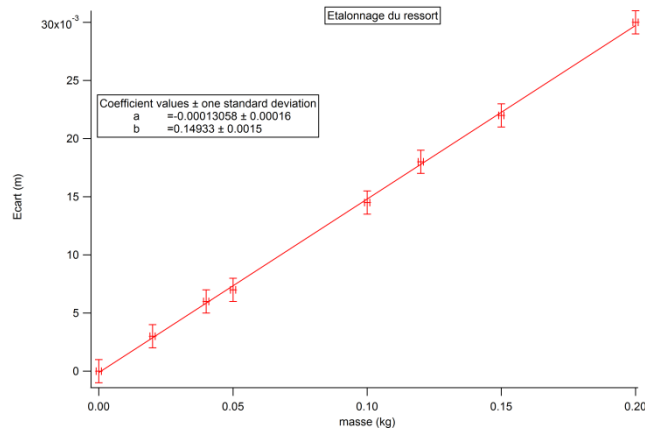
$l_0$  est la position initiale de l'étrier telle que le fil soit tendu mais que le ressort ne soit pas allongé (ici :  $l_0 = 6 \text{ cm}$ )

Faire tourner le plateau à une vitesse de rotation indiquée sur la boîte de vitesse de l'appareil, mesurer l'allongement du ressort (qui correspond au déplacement de l'étrier sous l'effet de la force d'entraînement). Il faut aussi mesurer à l'aide d'un tachymètre la vitesse de rotation du plateau, les vitesses indiquées sur l'appareil n'étant pas très justes ni précises.

Faire ensuite une représentation graphique de la courbe  $x/(l_0+x) = f(\Omega^2)$  et visualiser une droite de pente  $m/k$ .

On a montré la dépendance en  $\Omega^2$  de la force (et donc de l'accélération) d'entraînement.

On peut aussi comparer la valeur de la droite donnée par le logiciel à celle attendue grâce aux valeurs de la masse de l'étrier et de la constante de raideur du ressort.



### Remarques :

- La lecture de l'allongement du ressort n'est pas facile : le régllet n'est pas forcément droit et il faut pouvoir repérer facilement un point particulier du ressort pour faire une mesure qui sera précise au mieux au mm.
- La boîte de vitesse du plateau tournant ne permet que 4 vitesses de rotation différente. En branchant un autotransformateur sur l'appareil, on pourrait avoir un intervalle continue de valeurs de vitesse et ainsi pouvoir faire plus de 4 mesures.
- La lecture avec le tachymètre n'est pas facile : il est très sensible et affiche souvent des valeurs absurdes. On peut le poser sur un support élévateur, viser la partie basse du plateau tournant (a priori, la gouttière en plexiglas perturbe la mesure), s'assurer que le pointeur laser soit bien en incidence normale sur le plateau puis prendre la mesure.
- Attention, la pente de la courbe d'étalonnage est en g/k.

### **V) Remarques et questions du correcteur :**

- Expérience I : - est-on sûr que l'ont a bien un mouvement à force centrale ?
  - pourquoi une table horizontale ? Pour éviter que le poids intervienne dans le mouvement. Il doit être compensé par la réaction normale du coussin d'air du mobile.
  - faire une mesure de la pesée avec des incertitudes précises : il faut lire (et surtout trouver) la notice de la balance.
- Si les expériences fonctionnent moyennement, ne pas systématiquement mettre la faute sur les frottements, on peut faire des mesures précises en mécanique.
- Eviter les possessifs dans le discours, le matériel ne vous appartient pas.
- Expérience II : - entre quoi et quoi est mesurée la hauteur  $h$  ? Entre le milieu de chaque spire.
  - la condition  $dz/dt(0) = 0$  est-elle vraie ? Sujet à débat, tout dépend de comment vous aurez mis en place l'expérience et comment vous avez paramétré le schéma. Il faut garder à l'esprit que l'aimant traverse les spires avec une vitesse non nulle donc peut-être faudra-t-il calibrer le montage pour avoir la vitesse en fonction de l'intensité en fonction de la tension donnée par l'oscilloscope. Dans cette fiche, il est conseillé de mettre la spire en haut et idéalement de telle sorte à avoir des conditions initiales nulles (mais dans ce cas, pas de courant induit donc rien à l'oscilloscope). Un étalonnage de la manipulation semble donc nécessaire pour faire l'expérience proprement.

- on a  $z(t) = K_2 t^2 + K_1 t + K_0$ , que représente  $K_1$  ? Il peut représenter les frottements mais aussi la manière dont ont été définies les conditions initiales et la manière dont a été paramétré le problème.

- Expérience IV : bien qu'on arrive au résultat voulu, il faut garder à l'esprit que pour faire une mesure correcte de la dépendance en  $\Omega^2$  de la force d'entraînement, il faudrait fixer la position de l'étrier. Cependant, il n'y a pas de moyen simple et efficace pour cela.

- Montrer au jury comment faire une acquisition vidéo et comment faire le pointage. Peut-être même refaire une exploitation complète.

- Suggestions d'autres expériences :

- le gyroscope (mouvement de précession et couple gyroscopique)(Voir BUP n°587 (10/1976), *Mécanique 2* de Bertin, Faroux, Renault)

- pendules couplés (pour les bilans énergétiques)

- pendule avec invariant adiabatique : ardue mais payante si bien expliquée : pendant l'oscillation du pendule, raccourcir lentement (de manière quasistatique) la longueur du fil, son énergie potentielle varie donc non seulement par le balancement mais aussi par cette traction, ce qui a une incidence sur la période des oscillations. On peut remonter comme ça à une grandeur appelé "invariant adiabatique".

(<http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=9017>,

<http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=9014>)

- Message à transmettre durant le montage : la mécanique, ça marche et même très bien !

## **VI) Bibliographie :**

- *Mécanique*, Perez