

# MP01 – MÉCANIQUE NEWTONIENNE

9 avril 2015

Antoine Coste & Quentin Chateiller

*"You are not Isaac Newton."*

*Leonard*

*"No, no, that's true. Gravity would have  
been apparent to me without the apple."*

*Sheldon*

## Commentaires du jury

**2014** : Contrairement à une idée apparemment répandue chez les candidats, les mesures précises en mécanique ne sont pas nécessairement hors d'atteinte, et il est possible de discuter quantitativement une loi de conservation en prenant en compte les incertitudes expérimentales. Par ailleurs, le jury constate que les mobiles autoporteurs donnent le plus souvent lieu à des expériences trop simples, mal exploitées quantitativement et coûteuses en temps, au détriment d'expériences plus en accord avec le niveau attendu à l'agrégation ; une informatisation de ces expériences serait profitable pour éviter des erreurs de mesures et limiter leurs durées.

Jusqu'en 2013, le titre était : Quantité de mouvement, moment cinétique et énergie en mécanique classique.

**2013** : Contrairement à une idée apparemment répandue chez les candidats, les mesures précises en mécanique ne sont pas nécessairement hors d'atteinte. L'étude quantitative du moment cinétique est très peu abordée. L'étude des solides en rotation est essentiellement limitée au gyroscope, dont le principe est par ailleurs souvent mal compris.

**2011, 2012** : Il faut bien différencier mécanique du point et mécanique du solide pour valider un modèle théorique. Les trois aspects de l'intitulé sont d'égale importance. Les systèmes isolés ou pseudo-isolés ne sont pas les seuls pouvant illustrer ce montage.

**2010** : Il faut bien différencier mécanique du point et mécanique du solide pour valider un modèle théorique. L'étude quantitative du moment cinétique est souvent négligée. Les systèmes isolés ou pseudo-isolés ne sont pas les seuls pouvant illustrer ce montage.

## Bibliographie

✍ *CAPES de science physique*, **Duffait**

✍ *Mécanique PCSI-MPSI*, **Brasselet**

✍ *Mécanique : fondements et applications*, **Pérez**

✍ *BUP N° 952*

→ pour la chute libre de la réglette et choc élastique

→ mouvement à force central (pour les équations, on n'a pas trouvé de référence pour la manip en elle même)

→ calcul "théorique" du moment d'inertie du pendule pesant

→ justifie l'hypothèse de traiter le pendule pesant comme un pendule simple

## Expériences

☞ Choc élastique (mobiles autoporteurs)

☞ Chute libre (réglette)

☞ Mouvement à force centrale (mobiles autoporteurs)

☞ Pendule pesant

## Table des matières

|          |                                                                 |          |
|----------|-----------------------------------------------------------------|----------|
| <b>1</b> | <b>Principe fondamental de la dynamique</b>                     | <b>2</b> |
| 1.1      | Conservation de l'impulsion d'un système pseudo-isolé . . . . . | 2        |
| 1.2      | Mesure de $g$ par chute libre d'un corps . . . . .              | 4        |
| <b>2</b> | <b>Théorème du moment cinétique</b>                             | <b>5</b> |
| 2.1      | Loi des aires : conservation du moment cinétique . . . . .      | 5        |
| 2.2      | Mesure d'un moment d'inertie . . . . .                          | 7        |

## Introduction

La quantité de mouvement, le moment cinétique et l'énergie sont des notions de bases de la mécanique qui, associées aux lois de la dynamique comme le principe fondamentale de la dynamique ou le théorème du moment cinétique, permettent de décrire le mouvement des corps. Ce montage est l'occasion d'illustrer des caractéristiques du mouvement soulevées par ces deux lois incontournables de la mécanique, ainsi que de les utiliser pour mesurer des grandeurs physiques utiles.

## 1 Principe fondamental de la dynamique

### 1.1 Conservation de l'impulsion d'un système pseudo-isolé

On illustre dans un premier temps le principe fondamental de la dynamique. Plus précisément, notre but est de montrer la conservation de l'impulsion pour un système pseudo-isolé, c'est à dire pour lequel la résultante des forces extérieures qui s'y appliquent est pratiquement nulle.

Expérimentalement, on étudie un choc élastique entre deux mobiles autoporteurs sur table horizontale afin de négliger les frottements entre les systèmes d'études et le support.



#### Choc élastique

🔧 Duffait

⊖ Lancer + ImageJ qq min

On étudie la collision élastique de deux mobiles autoporteurs munis de bagues élastiques identiques, mais dont l'un possède une masse supplémentaire. Notons qu'il faut bien régler l'horizontalité de la table, et ne surtout pas hésiter à changer la feuille de carbone. Essayer de provoquer la collision le plus au centre de la feuille <sup>a</sup>. Prendre une photo du chronogramme et exploiter l'image avec ImageJ (voir le tuto à la fin) pour exporter les positions successives des mobiles sur Regressi. Notons que pour cette manip il n'est pas nécessaire de convertir les pixels en mètres. On ne s'intéressera donc pas aux valeurs d'énergie, mais uniquement à leur comportement. Il faut aussi peser les mobiles pour exploiter les données :  $m_A = 695,53 \pm 0.02g$  et  $m_B = 1050,66 \pm 0.02g$

<sup>a</sup>. Le seul problème de cette manip est qu'il faut à priori trois mains (deux pour le lancer et une pour activer le dispositif de marquage), mais quelques essais d'entraînements pour la coordination vous permettront de vous débrouiller comme un(e) grand(e).

#### Analyse des résultats :

On va étudier ici le système composé du mobile A et du mobile B de masses respectives  $m_A$  et  $m_B$ . Si le système est bien pseudo-isolé on devrait avoir la conservation de la quantité de mouvement  $\vec{P}_I$  du centre de masse de notre système tel que :

$$\frac{d\vec{P}_I}{dt} = \frac{d(\vec{P}_A + \vec{P}_B)}{dt} = \vec{0}$$

Avec  $\vec{P}_A$  et  $\vec{P}_B$  les quantités de mouvement respectivement du mobile de masse  $m_A$  et  $m_B$ .

Pour vérifier cela, on trace la trajectoire du centre d'inertie (figure 1) avec :

$$x_I = \frac{m_A}{m_A + m_B} x_A + \frac{m_B}{m_A + m_B} x_B$$

$$y_I = \frac{m_A}{m_A + m_B} y_A + \frac{m_B}{m_A + m_B} y_B$$

où  $(x_A, y_A)$ ,  $(x_B, y_B)$ ,  $(x_I, y_I)$  correspondent aux coordonnées respectives du mobile A, du mobile B, et du centre d'inertie.

Ensuite on peut vérifier que son mouvement est bien rectiligne uniforme, en vérifiant (figure 1) que :

$$x_I = a_1 t + b_1$$

$$y_I = a_2 t + b_2$$

Où  $a_1, b_1, a_2, b_2$  sont des constantes auxquelles on ne va pas particulièrement prêter attention.

Concernant les incertitudes ici, nous avons tout d'abord celle portant sur la période entre deux étincelles. Celles-ci sont directement reliées à l'électronique du dispositif, mais on a pas la notice.. on fait le choix de les négliger. On a ensuite l'incertitude liée à la taille du pixel, à la détection de la position du mobile sur ImageJ et à la parallaxe. Étant qu'ImageJ fait une détection de contour puis une moyenne pondérée par l'intensité des pixels, il est raisonnable de supposer que cette incertitude est négligeable devant celle la parallaxe. Si on suppose que que l'appareil photo est bien centré par rapport à la feuille, on prend comme incertitude l'écart qu'il y a entre les distances mesurées via les

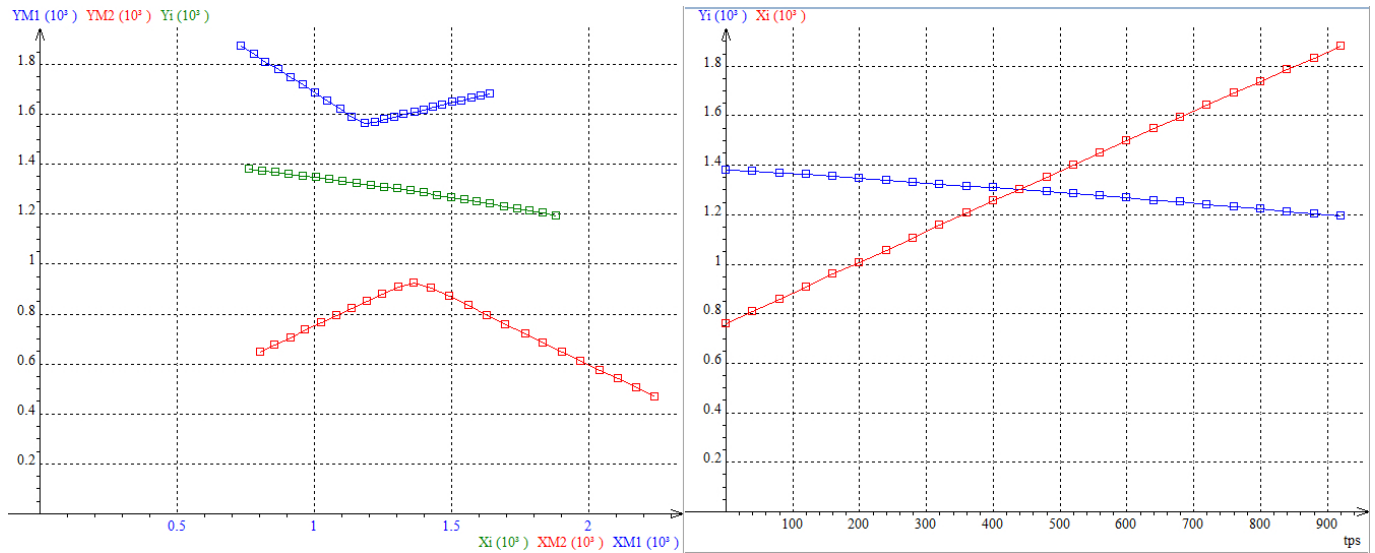


FIGURE 1 – Gauche : trajectoire des mobiles et du centre d'inertie. Droite : Evolution des coordonnées du centre d'inertie.

coordonnées trouvées et les mêmes distances mesurées à la règle sur le papier. Mais cette incertitude là est très faible, et surtout liée à l'imprécision de la règle. Du coup, on prend 1mm d'incertitudes sur les longueurs, ce qui correspond ici à environ 5 pixels.

### • Étude énergétique :

On va maintenant étudier ce qui s'est produit lors du choc d'un point de vue énergétique. Par dérivation des trajectoires précédentes il est possible de déterminer numériquement les énergies cinétiques des deux mobiles  $Ec_A$  et  $Ec_B$ , ainsi que l'énergie cinétique totale de notre système (les deux mobiles autoporteurs) qui vaut  $Ec_{tot} = Ec_A + Ec_B$ . Dans le cas où le système est bien pseudo-isolé, on devrait avoir un échange d'énergie entre les deux mobiles ainsi que la conservation de l'énergie cinétique totale, qui correspond ici à l'énergie mécanique totale si on suppose l'énergie cinétique de rotation négligeable.

Or, on observe sur la figure 2 qu'il y a bien un échange d'énergie entre les mobiles mais que l'énergie mécanique n'est pas tout à fait conservée. Lors du choc, on observe une diminution de l'énergie cinétique totale : cela est dû au fait qu'on n'a pas tenu compte de l'énergie potentielle des ressorts qui entrent en contact au moment du choc. Par ailleurs, en dehors de la zone du choc, on observe que l'énergie cinétique diminue linéairement au cours du temps. Cette perte d'énergie peut être causée d'une part par les mobiles qui ne sont pas complètement pseudo-isolés, c'est à dire qu'il y a des frottements (entre les mobiles, la table, l'air...), et d'autres part, il y a une perte d'énergie pendant la collision.

On constate que l'énergie mécanique n'est globalement pas constante au cours du temps ce qui montre l'effet des frottements contre le papier. D'autres part, la perte d'énergie cinétique totale au moment de la collision est due à la transformation d'une partie d'énergie cinétique en énergie potentielle élastique à cause de bagues élastiques qui entrent en contact. Cela ne servirait pas à grand chose, mais on pourrait donc à partir de cette courbe là remonter à une constante de raideur effective.

On peut estimer la perte relative d'énergie due au frottements par  $\frac{|E_{c_{tot},initial} - E_{c_{tot},final}|}{E_{c_{tot},initial}}$ , qui est de l'ordre de 12%. Du coup, pour l'hypothèse d'un système pseudo-isolé, c'est tout juste valable !

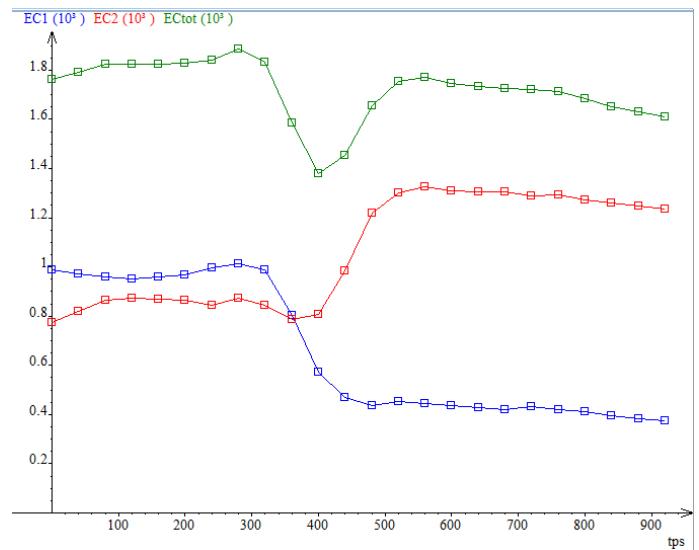


FIGURE 2 – Évolution énergétique du système.

## 1.2 Mesure de $g$ par chute libre d'un corps

On se propose maintenant de présenter un dispositif permettant de remonter à la valeur du champ de pesanteur  $g$  ambiant, en étudiant la chute libre d'un corps.

### Chute d'une règlette

☞ Duffait



Pour cela, on dispose d'un support vertical d'environ 1m muni d'un capteur infrarouge, et d'une règle en plastique transparent de masse  $m = 16.23 \pm 0.02g$  sur laquelle est disposée des bandes noires réparties de façon régulière. Dans notre cas, les bandes de la règle ont une largeur de 3mm, et sont espacées de 3mm. Initialement retenue magnétiquement par sa base supérieure par une bobine en haut du support vertical, le début de sa chute libre est commandée par l'ouverture du circuit de la bobine. La règle tombe en direction du capteur situé sur sa trajectoire. Le capteur est alimenté en 5V directement par la carte d'acquisition. Lorsque le faisceau lumineux est coupé à cause du passage des bandes noires de la règle, le capteur infrarouge délivre alors un signal non nul. Autrement, le signal est nul. En effectuant l'acquisition de ces signaux au cours du temps via la carte d'acquisition pilotée par LatisPro, on observe donc la structure de la figure ?? (Fenêtre n1). Notons que le traitement informatique est détaillé dans le Duffait. Le déclenchement de l'enregistrement est basé sur le capteur.

L'intérêt d'étudier la chute libre de la règle munie de bandes noires par rapport à une simple bille est simplement d'avoir plus de points expérimentaux à analyser tout en ayant un système d'étude tout à fait équivalent et un nombre de capteurs réduit à 1.

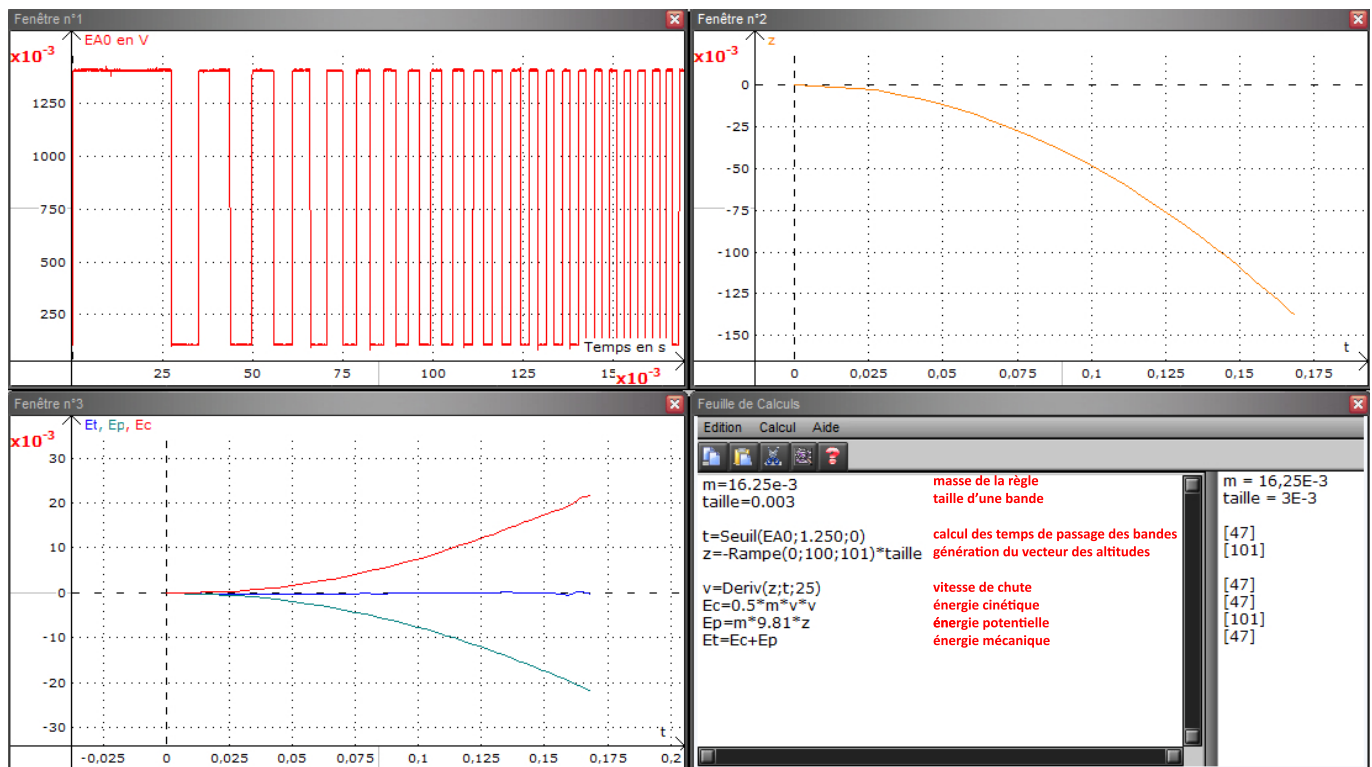


FIGURE 3 – Résultats pour la chute libre de la règle.

### Mesure de $g$

Théoriquement, l'application du principe fondamental de la dynamique sur le système Règle dans le référentiel du laboratoire donne que, si on néglige toute force de frottement de l'air, la vitesse  $v(t)$  de la règle est régie par l'équation :

$$\frac{d\vec{v}(t)}{dt} = \vec{g} \quad (1)$$

Le mouvement étant purement vertical, on obtient donc une trajectoire théorique  $d(t)$  :

$$z(t) = -\frac{gt^2}{2} + v_0t + z_0 \quad (2)$$

avec  $z(t)$  l'altitude de la règle au cours du temps, et  $v_0$  et  $z_0$  les conditions initiales de chute de la règle, toutes deux nulles dans notre cas puisque le capteur est placé juste au bout de la règle initialement retenue par l'électroaimant :

$$z(t) = -\frac{gt^2}{2} \quad (3)$$

Ce qui nous intéresse est donc le temps correspondant au passage des bandes noires devant les capteurs. Pour les obtenir, on utilise la fonction Seuil de LatisPro qui permet d'extraire des précédentes courbes expérimentales l'ensemble des instants où le signal des capteurs change de valeur. On obtient alors les points de la trajectoire fictive de l'extrémité inférieure de la règle (figure 3, haut, droite).

Il ne reste plus qu'à fitter sous LatisPro cette courbe par un polynôme du second degré pour accéder à la valeur expérimentale de  $g = 9.76 \pm 0.05 \text{ m s}^{-2}$ .

Discutons rapidement des sources d'incertitude du montage :

- L'incertitude sur le temps est prise égale à la période d'échantillonnage, qui est supérieure au temps de transition "signal nul->signal non nul".
- L'incertitude liée aux longueurs mesurées peut être ramenée à deux sources : la légère inclinaison de la règle au cours du mouvement et la position du capteur par rapport à la règle avant le début de la chute. La première source peut être négligée tandis que la deuxième peut être estimée à 1mm.

## Étude énergétique

Vérifions maintenant la conservation de l'énergie mécanique  $E_m$  puisqu'on a directement accès à l'énergie cinétique  $E_c$  et potentielle  $E_p$  (figure 3, bas, gauche) :

$$\begin{aligned} E_c(t) &= \frac{1}{2}mv^2(t) \\ E_p(t) &= mg(d_0 - d(t)) \\ E_m(t) &= E_c(t) + E_p(t) \end{aligned}$$

On observe donc bien ici que l'énergie mécanique de la règle.

## 2 Théorème du moment cinétique

Le théorème du moment cinétique est un des théorèmes fondamentaux de la mécanique newtonnienne, particulièrement utile pour les problèmes à deux corps et pour la mécanique du solide.

### 2.1 Loi des aires : conservation du moment cinétique

Nous allons illustrer un intérêt de ce théorème : la loi des aires, ou conservation du moment cinétique pour un système d'étude ( $S$ ) soumis exclusivement à un champ de force centrale.



#### Mouvement à force centrale



On reprend ici le dispositif des mobiles autoporteurs. Cette fois-ci, ils ne possèdent ni bague élastique ni poids supplémentaire. Les deux mobiles sont reliés par un ressort au niveau de leur branchement électrique, car ce dernier est situé au centre des mobiles. L'un d'entre eux est fixe sur la feuille : il représente le centre de force central qu'impose le ressort. L'autre est lancé autour de ce dernier pour observer le mouvement à force centrale : c'est le système d'étude ( $S$ ), assimilé à un point matériel.

Pour des raisons pratiques, on éteint le moteur du mobile fixe et on appuie dessus au cours du mouvement (ou on lui ajoute des masses) pour éviter à tout prix qu'il bouge au cours de l'enregistrement (ok, la feuille de papier en dessous va avoir un petit coup de chaud, mais l'expérience ne dure que quelques secondes) car il ne faut qu'un seul centre sur la feuille pour le traitement ensuite. Par ailleurs, le ressort doit impérativement être tendu tout au long de l'enregistrement pour un traitement correct sous *ImageJ* ensuite. Les autres précautions exposées dans le tuto à la fin sont toujours valables.

## Analyse des résultats

Après application du tuto pour récupérer la trajectoire du mobile libre et pour le centre du champ de force, on obtient la figure 4 sous *Régressi*. Remarquons ici que le dispositif expérimental est le même que dans la partie 1.1, on va alors avoir les mêmes sources d'incertitudes.

Théoriquement, dans un tel cas de figure, on trouve effectivement que le moment cinétique du système ( $S$ ) par rapport au centre  $O$  du champ de force  $\sigma_{S/O}$ , est une constante du mouvement :

$$\frac{d\vec{\sigma}_{S/O}}{dt} = \vec{r} \wedge F(\vec{r}) = \vec{0} \text{ car } \begin{cases} \vec{r} = ||OM|| \vec{u}_r = r \vec{u}_r \\ \vec{F}(r) = F(r) \vec{u}_r \end{cases}$$

où  $M$  est la position du système ( $S$ ) à un instant  $t$ . Cette constante du mouvement, usuellement notée  $C$ , vaut donc :

$$||\vec{\sigma}_{S/O}|| = ||\vec{r} \wedge m\vec{v}|| \text{ soit } C = m \cdot r^2(t) \cdot \dot{\theta}(t) \forall t$$

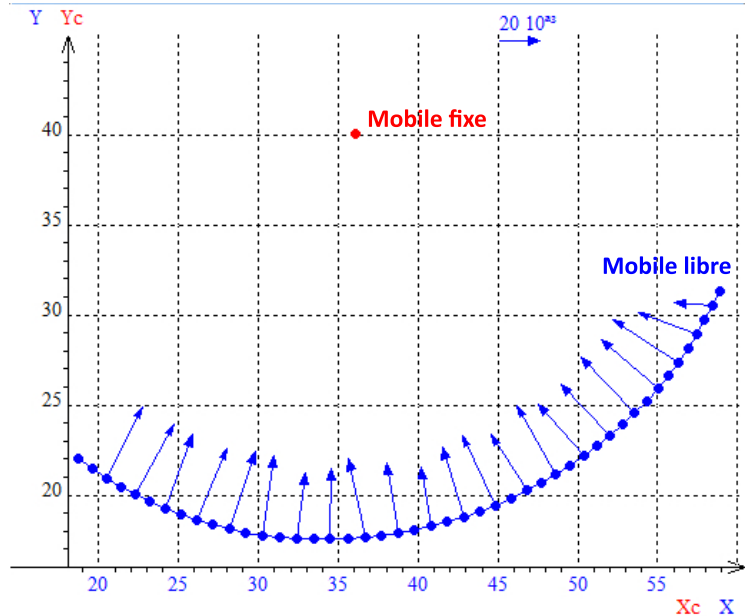


FIGURE 4 – Trajectoire mouvement à force centrale et vecteurs accélération.

On peut vérifier ce résultat avec nos données expérimentales :

### • Méthode 1 - en traçant directement :

$$\dot{\theta}(t) = f\left(\frac{1}{mr^2(t)}\right) \quad (4)$$

La distance  $r$  entre le centre du champ de force et le mobile à chaque instant s'obtient aisément avec les coordonnées du mobile et du centre. Pour  $\dot{\theta}(t)$ , calculer d'abord  $\theta(t)$  chaque instant par trigo, et dériver. On obtient (figure 5)  $C_{exp,1} = 0.073 kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$

### • Méthode 2 - loi des aires / 2e loi de Kepler :

Lors d'un mouvement à force centrale, des aires égales sont balayées par le rayon vecteur  $\vec{r}$  dans des temps égaux. Donc concrètement, l'aire  $A(\Delta t)$  parcourue pendant un temps  $\Delta t$  doit être linéaire en  $\Delta t$ . En effet, l'aire parcourue entre un instant  $t$  et  $t + dt$  vaut :

$$dA(t) = \frac{||\vec{r} \wedge \vec{v}(t) dt||}{2} \quad (5)$$

donc

$$\frac{dA(t)}{dt} = \frac{C}{2m} \text{ soit } A(t) = \frac{C}{2m} \cdot t \quad (6)$$

Vérifions-le expérimentalement sur notre exemple. La figure 5 donne l'aire balayée par le vecteur rayon en fonction du temps depuis le début de l'enregistrement : on a bien une droite linéaire dont la pente nous donne une évaluation de la constante des aires :  $C_{exp,2} = 0.074 kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$ .

## Étude énergétique :

On peut tenter de remonter à la raideur du ressort reliant les deux mobiles. Pour cela, nous allons mener une étude énergétique de notre système. Avec les variables propres au repère polaire, l'énergie cinétique de notre mobile peut s'écrire :

$$E_c(t) = \frac{m\dot{r}^2(t)}{2} + \frac{mC^2}{2r^2(t)} \quad (7)$$

L'énergie potentielle de rappel due au ressort, s'écrit comme :

$$E_p(t) = \frac{K(r(t) - l_0)^2}{2} \quad (8)$$

où  $K$  est la constante de raideur du ressort utilisé,  $r(t)$  sa longueur à l'instant  $t$ , et  $= 13.5 \pm 0.2 cm$  sa longueur au repos. La longueur du ressort est directement  $r$  car il est attaché aux centres des mobiles.

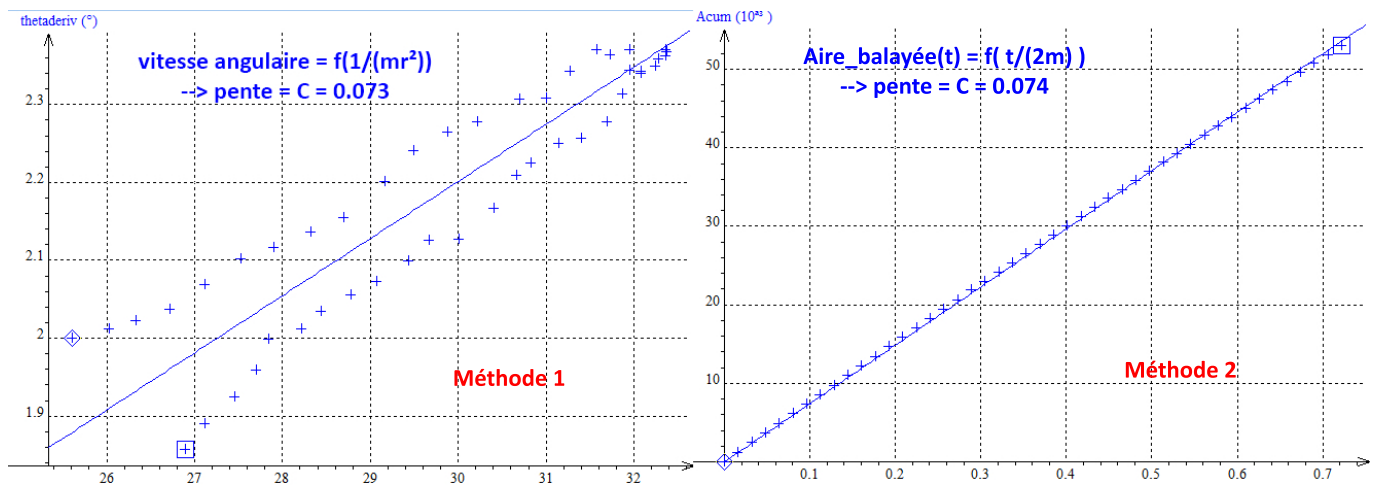


FIGURE 5 – Deux méthodes pour trouver la constante des aires.

Avec nos données et par conservation de l'énergie mécanique de notre système, on peut donc maintenant déterminer expérimentalement son énergie mécanique  $E_m$  et la constante de raideur  $K$  du ressort avec l'équation :

$$E_c(t) = -K \cdot \frac{(r(t) - l_0)^2}{2} + E_m \quad (9)$$

En traçant  $E_c(t)$  en fonction de  $\frac{(r(t)-l_0)^2}{2}$  et fittant la courbe obtenue par une droite affine, on trouve  $E_m$  avec l'ordonnée à l'origine et  $K$  avec la pente. On trouve une raideur moyenne (en utilisant les deux valeurs de  $C$  trouvées) :  $K_{exp,A} = 1.92 \text{ N.m}^{-1}$

Pour vérifier cette valeur, on peut succinctement évaluer la raideur avec une méthode simple : en étudiant son allongement du au poids d'une masse connue et en utilisant un simple PFD : on obtient  $K_{exp,B} = 5.4 \pm 0.3 \text{ N.m}^{-1} \dots$

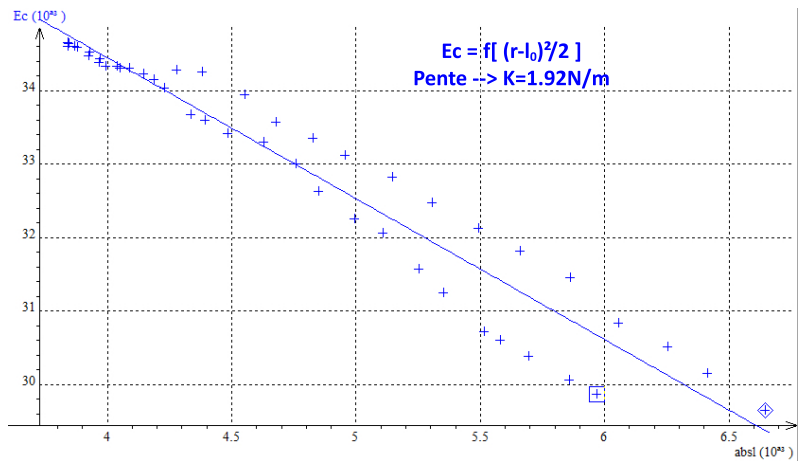


FIGURE 6 – Etude énergétique pour déterminer la constante de raideur du ressort.

## 2.2 Mesure d'un moment d'inertie

Le théorème du moment cinétique permet de mesurer le moment d'inertie d'un pendule pesant. Le dispositif expérimental est le "pendule grand angle".

### Pendule grand angle



La première étape est d'étalonner le pendule, afin d'avoir la correspondance {tension du signal capteur ↔ angle}. Pour ceci, on prend plusieurs mesures de 0 degrés à 50 degrés pour deux raisons. Tout d'abord on ira jamais au delà pour être dans l'approximation des petits angles ( $\theta < 20^\circ$ ) et au delà de  $50^\circ$  le capteur n'est plus linéaire (sachant qu'il n'est possible d'étalonner le capteur en faisant tourner le pendule d'un tour entier car il y a une discontinuité du capteur à  $90^\circ$ ). Pour chaque angle, on fait deux mesures symétriques (angles négatifs et positifs) pour s'affranchir de l'erreur systématique due à la lecture (très) approximative du papier plastifié donnant la valeur des angles. On rajoute ensuite une masse  $M$  à une extrémité de la tige. La deuxième étape consiste à mesurer les différentes grandeurs du pendule, schématisé figure 7.

La troisième étape est finalement de trouver le moment d'inertie en mesurant la fréquence d'oscillation propre du pendule pour des petits angles.

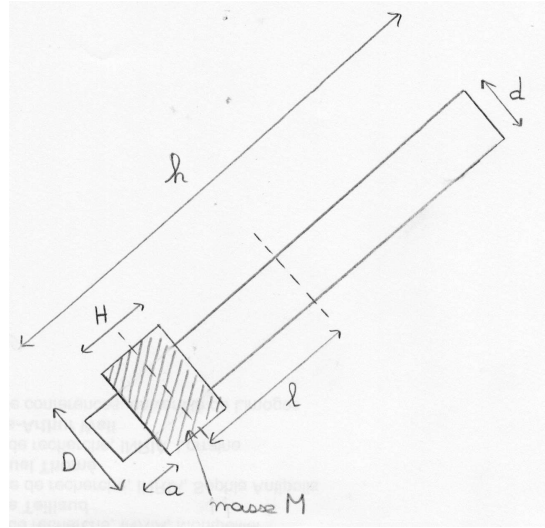


FIGURE 7 – Schéma de la partie oscillante du dispositif pendule grand angle.

Les grandeurs caractéristiques du pendule sont :

$$l = 247 \pm 1 \text{ mm} \quad a = 0 \text{ mm} \quad h = 524 \pm 1 \text{ mm} \quad H = 30 \pm 1 \text{ mm} \quad d = 10 \pm 1 \text{ mm} \quad D = 30 \pm 1 \text{ mm} \\ M = 148.20 \pm 0.02 \text{ g} \quad m = 111 \pm 11 \text{ g}$$

Le théorème du moment cinétique, dans l'approximation des petits angles ( $\theta < 20^\circ$ ) et du pendule simple, donne :

$$I\ddot{\theta} + Mgl\theta = 0 \quad (10)$$

avec  $I$  le moment d'inertie de notre système. La fréquence propre du système est donc donnée par l'expression :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Mgl}{I}} \quad (11)$$

Il suffit donc d'acquérir le signal d'oscillation du pendule pendant via *LatisPro* sur quelques période et en déduire la fréquence du signal. On trouve :

$$f_{0,exp} = 0,88 \pm 0.01 \text{ Hz} \quad \text{soit} \quad I_{exp} = 1,17 \pm 0.02 \cdot 10^{-2} \text{ kg.m}^2 \quad (12)$$

L'incertitude liée à la mesure de la fréquence est dominée par lecture du curseur. On obtient ainsi une incertitude de l'ordre  $\sigma_{f_0} = 0.01 \text{ Hz}$ . Par propagation des erreurs on obtient  $\sigma_I = I\sqrt{4\sigma_{f_0}^2 + \sigma_M^2 + \sigma_l^2} \approx I2\sigma_{f_0} \approx 0.02 \text{ kg.m}^2$

Théoriquement, le moment d'inertie vaut :

$$I_{th} = \left( \frac{1}{16} Ml^2 + \frac{1}{12} MH^2 \right) + Ml^2 + \left( \frac{1}{16} md^2 + \frac{1}{12} mh^2 \right) = 1.21 \cdot 10^{-2} \text{ kg.m}^2$$

### • Étude énergétique :

Après étalonnage, on peut tracer  $E_c$ ,  $E_p$  et  $E_m$  pour notre pendule, qui est théoriquement donnée par :

$$E_m = E_c + E_p = \frac{1}{2} I\dot{\theta}^2 + Mgl(1 - \cos(\theta)) \quad (14)$$

Le résultat (figure 8) montre bien les conversions d'énergie cinétique en énergie mécanique au cours du temps.

L'étude énergétique montre aussi la dissipation due aux frottements au niveau de l'axe de rotation (et air) puisque l'énergie mécanique décroît avec le temps. Il y a compétition entre frottement fluide et frottements solides car on est en petits angles. En fittant la courbe avec une exponentielle décroissante, on obtient une estimation de la constante caractéristique associée au frottement fluide.

Par ailleurs, on remarque des "bosses" sur la courbe de l'énergie mécanique : cela est probablement due aux erreurs commises sur les valeurs mesurées des paramètres intervenant dans son expression :  $M$ ,  $l$ , mais surtout sans doute  $I$ . En jouant légèrement sur la valeur de  $I$ , on supprime quasiment ces artefacts et l'énergie mécanique décroît alors quasi-exponentiellement.

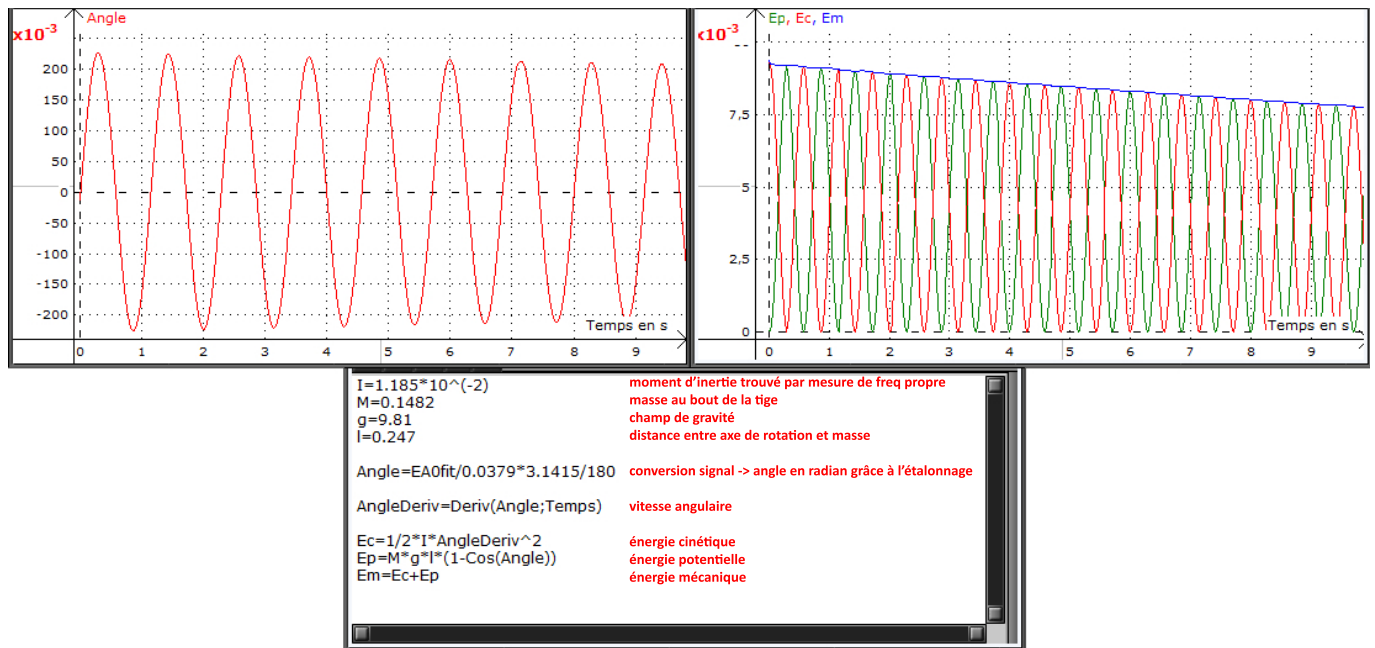


FIGURE 8 – Gauche : Position angulaire de la masse. Droite : Conversions entre énergies cinétique et potentielle.

## Conclusion

Ce montage a permis d'illustrer les grands théorèmes de la mécanique newtonienne (PFD, TMC) et de ses outils (quantité de mouvement, énergie, moment cinétique) et comment on les utilise pour déterminer des grandeurs caractéristiques des systèmes étudiés (raideur de ressort, moment d'inertie, coefficients de frottement).

La mécanique newtonienne sont à la base du fonctionnement des machines industrielles, mais permettent aussi d'expliquer des phénomènes physique de plus grande ampleur comme le mouvement des planètes.

Cependant, la mécanique newtonienne (ou classique) a des limites, notamment lorsque l'on s'approche de l'infiniment petit. Il faut alors s'orienter vers la mécanique quantique.



**Vous pensez que vous avez autre chose à faire en agreg que du scrapbooking avec vos chronogrammes ? Alors ce tuto est fait pour vous !**

Ce tutoriel explique comment extraire automatiquement les coordonnées des points d'un chronogramme obtenu avec la manip des mobiles autoporteurs, pour travailler sur *Régressi*. Matériel : APN, trépied (avec niveaux si dispo), patafix, *ImageJ*, *Excel* ou *Libre Office Calc*, *Régressi*.

1. **Générez votre chronogramme papier.** Vérifier l'horizontalité de la table au niveau à bulle si besoin. Pour la suite du tuto, il est absolument nécessaire que le(s) mobile(s) ne revienne(nt) pas sur ses (leur) pas lors de l'enregistrement du chronogramme : de gauche à droite de la feuille ou de droite à gauche mais pas de retour en arrière ! De plus, pendant l'enregistrement, le ou les mobiles doivent être en mouvement libre : vous les lâchez avant d'allumer le dispositif de marquage (avec un peu d'habileté, pas besoin d'une personne extérieure), et vous arrêtez l'enregistrement avant tout choc avec les parois de la table.
2. **Prenez votre chronogramme en photo.** Accrochez-le au mur (on conseille de s'appuyer sur une ligne bien horizontale présente dans la pièce, comme le bas d'un tableau blanc, ou repères au crayon sur le mur avec un niveau à bulle...). Montez votre appareil photo sur son trépied et minimisez l'effet de parallaxe en plaçant l'appareil photo le plus centré possible par rapport à la feuille de papier. L'éclairage doit être aussi homogène que possible (utilisez le flash). La photo doit contenir légèrement plus que la feuille elle-même (pour l'étalonnage pixel/cm).
3. **Transférez sur le PC.**
4. **Traitement *ImageJ*.**
  - (a) Ouvrir *ImageJ* et faites glisser le fichier .jpg de la photo dans sa fenêtre.
  - (b) Convertissez l'image en niveaux de gris 8 bit : **Image** → **Type** → **8 Bit**
  - (c) Via un des outils de sélection de la barre d'outils, sélectionnez sur l'image les points de la trajectoire d'un seul mobile. Faites une sélection assez proche de la trajectoire pour éviter toute détection parasite : l'outil de sélection polygonal est particulièrement pratique pour ça.
  - (d) Il faut maintenant faire ressortir au max les points du chronogramme : **Image** → **Adjust** → **Threshold** → Mode Noir et Blanc. Ajustez les curseurs pour réduire les défauts d'éclairage, jusqu'à ce que vos points soient bien visibles et dans un environnement propre. Cliquez ensuite sur **Apply**.
  - (e) Détection des points : **Process** → **Find Edge**. Les points détectés deviennent légèrement rouge.
  - (f) Liste de coordonnées : **Analyse** → **Analyse Particle** → cochez **Clear Results** → **ok**. Une fenêtre s'ouvre avec les coordonnées en pixel des points. Vous pouvez vérifier qu'il y en a le bon nombre, mais si la sélection était propre avant la détection il n'y a aucun souci.
5. **Traitement *Excel* / *LibreOfficeCalc*.** La liste de coordonnées fournie par *ImageJ* n'est pas ordonnée. Pour travailler avec *Régressi*, il va falloir les trier. Nous faisons ça avec un tableur. Ouvrez une feuille de calcul, et dans **Outils** → **Options** → **Paramètres linguistiques** Sélectionnez **Anglais (Royaume-Uni)** et cochez l'option pour les séparateurs juste en dessous<sup>a</sup>. Copiez/collez les colonnes de coordonnées dans une feuille de calcul. Lors de l'importation, laissez le format en **Unicode**. Une fois importées, sélectionnez les deux colonnes de coordonnées, cherchez la fonction Trier, et triez **par rapport à la composante X**.
6. **Traitement *Régressi*.** Le copier-coller ne fonctionne pas dans le tableau de *Régressi*. Mais faites quand même un **Clic droit Copier** des colonnes du tableau de la feuille de calcul, ouvrez *Régressi* → **Nouveau** → **Presse-papier**. Vous avez maintenant vos coordonnées dans le tableau de *Régressi* ! Utilisez la première colonne (1,2,3,...) pour vous faire une colonne "temps" connaissant l'intervalle de temps entre deux points (d'ailleurs, comme le traitement est maintenant automatique, poussez la période au minimum sur le dispositif de traçage pour avoir un max de points).
7. **Conversion pixel / cm.** Vos coordonnées sont toujours en pixels. Cela vous posera un problème lorsque que vous voudrez mesurer des grandeurs physiques comme la raideur d'un ressort à partir de vos données... Pour cela, retournez dans *ImageJ*, prenez l'outil de sélection **Ligne** et pointez la largeur ou la hauteur de la feuille sur la photo. Allez ensuite dans **Image** → **Set Scale** et vous aurez le nombre de pixel correspondant. Connaissant les dimensions de la feuille, vous avez votre facteur de conversion à intégrer dans *Régressi*<sup>b</sup>.
8. **Pour les expériences à plusieurs mobiles.** Recommencer le traitement sur *ImageJ* autant de fois que nécessaire, en copiant collant au fur et à mesure les coordonnées dans le tableur. Triez les indépendamment en fonction de leur coordonnées X. Ainsi, une même ligne dans le tableur recense les coordonnées de tous les mobiles au même instant. Vérifiez que vous avez le même nombre de points à chaque fois, couper en bas si besoin, puis importer en dernier l'ensemble dans *Régressi* comme précédemment.

a. Sinon *ImageJ* et *LibreOfficeCalc* n'ont pas la même définition de la virgule ce qui est gênant. Faut juste y penser.

b. Il vaut mieux le faire à posteriori comme ceci, car *ImageJ* a du mal avec ce type de conversion