

## TD11 : Dynamique du point – corrigé

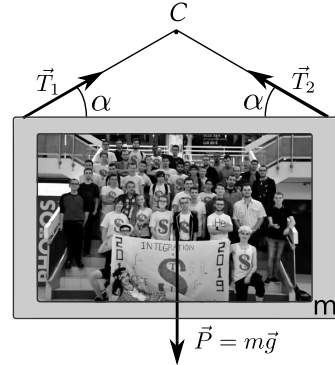
### Exercice 1 : ACCROCHER UN CADRE

- Les forces qui s'appliquent au cadre sont :
  - Son poids  $\vec{P} = m\vec{g}$
  - La tension du fil aux deux points d'accroche  $\vec{T}_1$  et  $\vec{T}_2$ . On a  $||\vec{T}_1|| = ||\vec{T}_2|| = T$ .
- Le cadre étant immobile, la somme des forces appliquées doit être nulle. En projetant sur l'axe vertical, on obtient :

$$mg = 2T \sin(\alpha) \Leftrightarrow T = \frac{mg}{2 \sin(\alpha)}$$

- Le fabricant indique que le fil peut supporter une charge de 5 kg, ce qui signifie que la tension  $T$  maximale vaut  $T = 5g$  (la tension exercée par une masse de 5 kg). On obtient donc

$$\alpha_{\min} = \arcsin\left(\frac{mg}{2 \times 5g}\right) \simeq 11,5^\circ$$



### Exercice 2 : GLISSEMENT SUR UN PLAN INCLINÉ

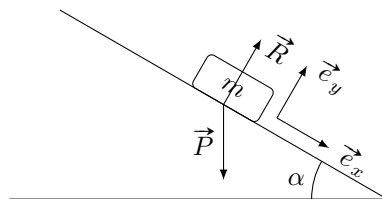
- Lorsqu'on néglige les frottements, les forces qui s'appliquent au mobile sont son poids  $\vec{P}$  et la réaction normale du support  $\vec{R}$ .
- On considère un repère  $(O, \vec{e}_x, \vec{e}_y)$  avec l'origine  $O$  au point de départ du mobile, l'axe  $x$  dirigé suivant la pente et l'axe  $y$  perpendiculaire à la pente. En projetant le PFD sur l'axe  $x$  on obtient :

$$ma_x = m\ddot{x} = P \sin(\alpha) \Leftrightarrow \ddot{x} = g \sin(\alpha)$$

En intégrant l'équation deux fois et en prenant en compte les conditions initiales on trouve  $x(t) = \frac{1}{2}g \sin(\alpha)t^2$

On considère maintenant qu'il existe des frottements solides entre le mobile et le plan incliné caractérisés par un coefficient de frottement statique  $\mu_s$  et un coefficient de frottement dynamique  $\mu_d$

- Pour que le mobile initialement immobile se mette en mouvement, il faut que  $T > \mu_s N \Leftrightarrow \frac{T}{N} > \mu_s$ . Comme le mobile est immobile (!) la somme des forces appliquées est nulle ce qui donne  $T = mg \sin(\alpha)$  et  $N = mg \cos(\alpha)$ . Donc le mobile se met à glisser lorsque l'angle  $\alpha$  est tel que  $\frac{\sin(\alpha)}{\cos(\alpha)} = \tan(\alpha) > \mu_s$  soit  $\alpha_m = \arctan(\mu_s)$
- Pour un angle  $\alpha > \alpha_m$ , on détermine l'équation du mouvement comme à la question 2), en prenant en compte la force  $T = -\mu_d N = -\mu_d mg \cos(\alpha)$  suivant l'axe  $x$ . On trouve alors  $x(t) = \frac{1}{2}g(\sin(\alpha) - \mu_d \cos(\alpha))t^2$ .



### Exercice 3 : FORCES EN COORDONNÉES POLAIRES

Un point matériel de masse  $m$  suit un mouvement dont l'équation horaire en coordonnées polaires est :

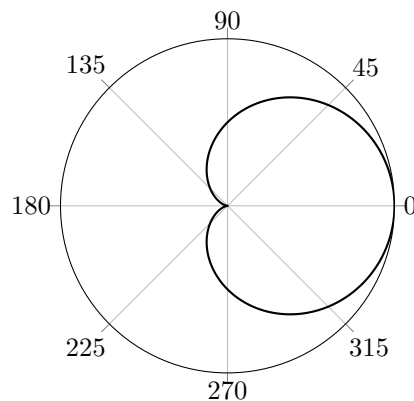
$$\begin{cases} r(t) = A(1 + \cos(\omega t)) \\ \theta(t) = \omega t \end{cases}$$

- Voir graphique ci-contre.
- On commence par calculer l'accélération du point matériel :

$$\vec{a} = (\ddot{r} - r\dot{\theta}^2)\vec{e}_r + (r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta})\vec{e}_\theta = -A\omega^2(1 + 2\cos(\omega t))\vec{e}_r - 2A\omega^2 \sin(\omega t)\vec{e}_\theta$$

D'après le PFD, la résultante des force subie par le point matériel est

$$\vec{F} = m\vec{a} = -mA\omega^2(1 + 2\cos(\omega t))\vec{e}_r - 2mA\omega^2 \sin(\omega t)\vec{e}_\theta$$



### Exercice 4 : TIR BALISTIQUE

- La seule force qui s'exerce sur l'obus une fois qu'il a quitté le canon est son poids  $\vec{P} = m\vec{g}$ .
- On choisit un repère  $(0, \vec{e}_x, \vec{e}_y)$  tel que  $O$  est sur la sortie du canon,  $\vec{e}_x$  est horizontal vers la droite et  $\vec{e}_y$  vertical vers le haut.

On applique le principe fondamental de la dynamique et on trouve finalement :

$$\begin{cases} x(t) = v_0 \cos(\alpha)t \\ y(t) = v_0 \sin(\alpha)t - \frac{1}{2}gt^2 \end{cases}$$

- D'après la première équation on a  $t = \frac{x}{v_0 \cos(\alpha)}$  que l'on injecte dans la seconde équation pour obtenir :

$$y = \tan(\alpha)x - \frac{g}{2v_0^2 \cos^2(\alpha)}x^2 = x \left( \tan(\alpha) - \frac{g}{2v_0^2 \cos^2(\alpha)}x \right)$$

- L'obus touche le sol lorsque  $y(x) = 0$  ce qui en dehors de la solution évidente  $x = 0$  (à la sortie du canon) on trouve

$$\tan(\alpha) - \frac{g}{2v_0^2 \cos^2(\alpha)}x = 0 \Leftrightarrow x = \frac{2v_0^2 \cos(\alpha) \sin(\alpha)}{g} = \frac{v_0^2 \sin(2\alpha)}{g}$$

- La distance maximale est atteinte lorsque  $\alpha = \frac{\pi}{4}$  et vaut  $x_{\max} = \frac{v_0^2}{g}$
- Le calcul donne une portée maximale d'environ 11 315 m.
- La portée réelle du canon est inférieure à la portée théorique que nous venons de calculer à cause des frottements de l'air qui freinent l'obus lors de son parcours.

### Exercice 5 : RAYON DE COURBURE

- En appliquant le PFD au projectile dans le référentiel terrestre que l'on suppose galiléen, on obtient les équations du mouvement que l'on peut intégrer :

$$\begin{cases} \ddot{x} = 0 \\ \ddot{z} = -g \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x} = v_0 \cos(\alpha) \\ \dot{z} = -gt + v_0 \sin(\alpha) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x = v_0 \cos(\alpha)t \\ z = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0 \sin(\alpha)t \end{cases} \quad (1)$$

L'altitude maximale est atteinte au temps  $t_1$  lorsque  $\dot{z}(t_1) = 0$ , soit  $t_1 = \frac{v_0 \sin(\alpha)}{g}$ , ce qui donne une altitude maximale

$$h_{\max} = z(t_1) = \frac{v_0^2 \sin^2(\alpha)}{2g} \quad (2)$$

- On utilise l'expression de l'accélération dans le repère de Frenet  $\vec{a} = \frac{dv}{dt}\vec{T} + \frac{v^2}{R}\vec{N}$ . Au sommet de la trajectoire, la vitesse est horizontale et vaut  $v = v_0 \cos(\alpha)$ . L'accélération est constante et vaut toujours  $g$ . Comme l'accélération est perpendiculaire à la trajectoire, on a  $a_N = \frac{v^2}{R} = g$ . Donc le rayon de courbure est

$$R = \frac{v^2}{g} = \frac{(v_0 \cos(\alpha))^2}{g} \quad (3)$$

- On a directement  $\frac{R}{h_{\max}} = \frac{2}{\tan^2(\alpha)}$

**Exercice 6 : FREINAGE ET DISTANCE D'ARRÊT**

1. Le PFD projeté sur l'axe  $Ox$  donne  $ma_x = -F_0$ . En intégrant une fois, on trouve la vitesse de la voiture en fonction du temps :  $v_x = v_1 - \frac{F_0}{m}t$ . Le temps nécessaire à l'arrêt complet du véhicule est de  $T=7$  s, donc  $v_x(T) = 0 = v_1 - \frac{F_0}{m}T$  ce qui donne  $F_0 = \frac{mv_1}{T} \simeq 5160$  N.
2. La force de freinage est la composante tangentielle  $T$  de la réaction de la route sur la voiture. La composante normale  $N$  compense le poids  $mg$  de la voiture. Comme il n'y a pas glissement entre les roues et la route on en conclut que  $\frac{T}{N} \leq \mu_s$  et donc  $\mu_s \geq \frac{F_0}{mg} \simeq 0,4$ .
3. On intègre la vitesse trouvée à la question 1) pour trouver la position en fonction du temps :  $x(t) = v_1t - \frac{F_0}{2m}t^2$  en considérant que à  $x(t) = 0$ . On trouve alors  $x(T) \simeq 97$  m.
4. Le temps au bout duquel la voiture s'arrête est (en reprenant la question 1) :  $T = \frac{mv_1}{F_0}$  et en reprenant la question précédente, on trouve que la distance d'arrêt est :

$$d = v_1T - \frac{F_0}{2m}T^2 = \frac{mv_1^2}{F_0} - \frac{1}{2} \frac{mv_1^2}{F_0} = \frac{1}{2} \frac{mv_1^2}{F_0}$$

$d$  est proportionnelle à  $v_1^2$  donc si la vitesse est multipliée par 2, la distance d'arrêt est multipliée par 4.

5. La vitesse  $V$ , exprimée en km/h, est reliée à  $v_1$  en m/s par la formule :  $V = \frac{v_1}{3,6}$ . l'expression de  $d$  devient :

$$d = \frac{1}{2} \frac{mV^2}{3,6^2 F_0} = \frac{mV^2}{2 \times 3,6^2 \times F_0} \simeq \frac{V^2}{103} \simeq \left(\frac{V}{10}\right)^2$$

C'est la formule que l'on enseigne dans les auto-écoles.

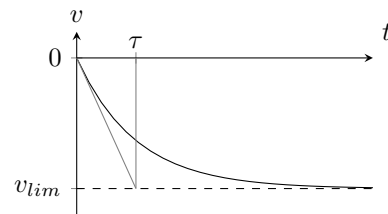
**Exercice 7 : CHUTE D'UNE GOUTTE D'EAU**

1. La goutte d'eau est soumise à son poids  $\vec{P} = m\vec{g}$  et la la force  $\vec{f} = -6\pi r\eta\vec{v}$ . Le PFD donne donc  $m\vec{a} = \vec{P} + \vec{f}$ , projeté sur l'axe  $z$  orienté par le vecteur  $\vec{e}_z$  dirigé vers le bas donne, il devient  $m\frac{d^2z}{dt^2} = -mg - 6\pi r\eta\frac{dz}{dt}$ .
2. Lorsque la goutte atteint sa vitesse limite, la résultante des forces qu'elle subit est nulle et  $f = mg$ . Ce qui donne  $v_{lim} = \frac{mg}{6\pi r\eta}$ . A.N :  $v_{lim} \simeq 0,29$  m/s.
3. L'équation différentielle devient :  $\frac{d^2z}{dt^2} = -g - \frac{g}{v_{lim}}\frac{dz}{dt}$  soit  $\frac{d^2z}{dt^2} + \frac{g}{v_{lim}}\frac{dz}{dt} = -g$ . On note  $v = \frac{dz}{dt}$  et on résout l'équation différentielle  $\frac{dv}{dt} + \frac{g}{v_{lim}}v = g$ . Par la méthode classique (equation homogène, solution particulière, conditions initiales) on trouve :

$$v(t) = -v_{lim} \left(1 - \exp\left(-\frac{g}{v_{lim}}t\right)\right) = -v_{lim} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right)$$

$\tau$  est le temps caractéristique au bout duquel la goutte atteint sa vitesse limite. Numériquement, on trouve  $\tau = 0,03$  s.

4. La vitesse limite est atteinte à 1% près lorsque  $(1 - \exp(-t/\tau)) = 0,99$  soit  $\exp(-t/\tau) = 1/100$ . Ce qui donne  $t = \ln(100)\tau \simeq 0,14$  s.  
Pour trouver la distance parcourue, on intègre l'expression de la vitesse :  
 $d = \int_0^{5\tau} v(t)dt = 5\tau v_{lim} + v_{lim}\tau \exp(-5) \simeq 35$  cm

**Exercice 8 : JEU DE CONSTRUCTION**

Pour empiler les cubes, on en laisse un au sol, le suivant doit monter de  $a$ , le suivant de  $2a$ , etc... Au final, l'énergie totale à fournir est :

$$E = \sum_{i=0}^9 mga \times i = mga \sum_{i=0}^9 i = mga \frac{9 \times 10}{2} = 45mga$$

**Exercice 9 : CIRCUIT DE VOITURES**

1.  $\frac{1}{2}mv_B^2 = mgh$  donc  $v_B = \sqrt{2gh}$ . Comme il n'y a pas de frottements,  $v_C = v_B$ .
2. Encore une fois on néglige les frottements, donc la piste n'exerce pas de réaction tangentielle, la force est uniquement normale.
3. L'accélération au sommet de la piste est  $a = \frac{v_S^2}{R}$  et elle est reliée à la somme des forces appliquées à la voiture. Donc  $mg + R_N = m\frac{v_S^2}{R}$  d'où  $R_N = m\frac{v_S^2}{R} - mg$ .
4. L'énergie mécanique de la voiture est conservée, donc  $mg(h - 2R) = \frac{1}{2}mv_S^2$ . La hauteur  $h_{\min}$  est donnée par  $\frac{v_S^2}{R} = g \Leftrightarrow 2g(h_{\min} - 2R) = Rg \Leftrightarrow h_{\min} = \frac{5}{2}R$ .

**Exercice 10 : LUGE SUR UN IGLOO**

1. L'accélération normale de la luge est  $\vec{a}_N = -R\dot{\theta}^2\vec{e}_r = -\frac{v^2}{R}\vec{e}_r$ . Le PFD donne  $m\vec{a} = \vec{P} + \vec{F}$  où  $\vec{F} = F\vec{e}_r$  est la force exercée par l'igloo sur la luge. En projetant sur  $\vec{e}_r$  on obtient :

$$-m\frac{v^2}{R} = -mg\cos(\theta) + F \Leftrightarrow F = m\left(g\cos(\theta) - \frac{v^2}{R}\right) \quad (1)$$

2. La conservation de l'énergie mécanique de la luge donne :  $mgR = mgR\cos(\theta) + \frac{1}{2}mv^2$ , ce qui donne  $v^2 = 2gR(1 - \cos(\theta))$ .
3. La luge décolle de l'igloo lorsque  $F = 0$ , soit  $v^2 = Rg\cos(\theta) = 2gR(1 - \cos(\theta))$ . Ce qui donne finalement :

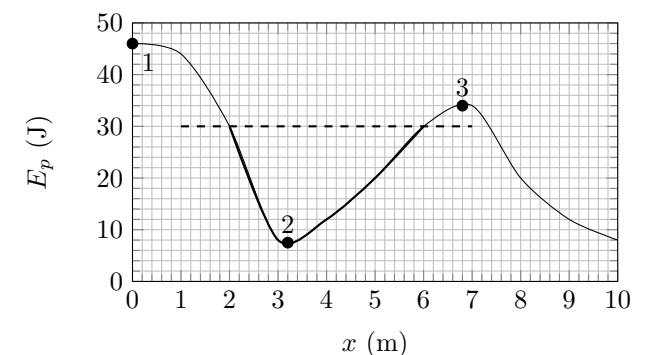
$$\cos(\theta) = \frac{2}{3} \Leftrightarrow \theta \simeq 48,2^\circ$$

4. Cette question ne pose pas de problème conceptuel, il faut calculer la trajectoire dans le champ de pesanteur terrestre en tenant compte des conditions initiales. Les calculs sont assez fastidieux. On trouve finalement une distance  $d$  entre le bord de l'igloo et le point d'impact d'impact de  $d \simeq 0,12R$ .

**Exercice 11 : ÉTUDE ÉNERGÉTIQUE**

Le graphique ci-contre représente l'énergie potentielle d'un point matériel  $M$  astreint à se déplacer suivant l'axe  $x$ .

1. Les positions 1 et 3 sont des positions d'équilibre instables, la position 2 est une position d'équilibre stable.
2. Les valeurs de  $x$  accessibles sont  $x \in [2 \text{ m}, 6 \text{ m}]$ .
3. L'énergie mécanique de  $M$  est de 30 J.
4. Pour que la trajectoire de  $M$  ne soit pas bornée en  $x > 0$ , il faudrait que son énergie mécanique soit supérieure à 46 J. Donc son énergie cinétique doit être plus grande que 26 J.

**Exercice 12 : PETITS PROBLÈMES**

1. L'objet est soumis uniquement à son poids et subit une accélération  $\vec{g} = -g\vec{e}_z$  vers le bas. Si on note  $\vec{v}_0 = v_0\vec{e}_z$  la vitesse initiale de l'objet, on trouve par intégrations successives que sa vitesse est  $v(t) = -gt + v_0$  et son altitude est  $z(t) = v_0t - \frac{1}{2}gt^2$ . Les temps  $t_1$  et  $t_2$  auxquels l'objet passe par l'altitude  $h$  sont donc solutions de l'équation :

$$-\frac{1}{2}gt^2 + v_0t = h \quad \text{soit} \quad -\frac{1}{2}gt^2 + v_0t - h = 0$$

On peut résoudre cette équation, exprimer  $t_1$  et  $t_2$  en fonction de  $g$ ,  $h$  et  $v_0$ . On obtiendrait deux équations dont les inconnues seraient  $v_0$  et  $h$  et on en déduirait  $h$ .

On peut également utiliser le fait que pour une équation de degré 2  $ax^2 + bx + c = 0$ , les solutions  $x_1$  et  $x_2$  vérifient la relation :  $x_1x_2 = -\frac{c}{a}$ . Ce qui dans ce problème se traduit par  $t_1t_2 = \frac{2h}{g}$ . On en déduit beaucoup plus facilement l'expression de  $h$  :

$$h = \frac{gt_1t_2}{2} \quad \text{soit} \quad h \simeq 100 \text{ m}$$

2. On commence par estimer la force exercée par un humain qui saute. On estime la hauteur de saut à  $h \approx 0,5$  m, la vitesse initiale  $v_0$  est donnée par  $\frac{1}{2}mv_0^2 = mgh$  soit  $v_0 = \sqrt{2gh}$ . Si l'impulsion dure  $\Delta t = 0,5$  s, l'accélération subie par la personne qui saute est  $a = \frac{v_0}{\Delta t}$  et la force appliquée est  $F = ma = \frac{mv_0}{\Delta t} = \frac{m\sqrt{2gh}}{\Delta t}$  avec  $m = 60$  kg on trouve  $F \approx 400$  N.  
En considérant  $N = 6 \times 10^9$  humains, la force totale exercée sur la Terre est  $F_T \approx 24 \times 10^{11}$  N pendant  $\Delta t \approx 0,5$  s. La Terre subit alors une accélération  $a_T = \frac{F_T}{m_T}$ , avec  $m_T \approx 5 \times 10^{24}$  kg. La distance parcourue pendant le temps  $\Delta t$  est alors  $l = \frac{1}{2}a_T(\Delta t)^2$ . On trouve alors  $l \approx 6 \times 10^{-14}$  m soit 10000 fois plus petit que la taille d'un atome !

3. On considère que la vitesse initiale du saut est la même sur la Terre et sur la Lune, on la note  $v_0$ . La hauteur maximum atteinte  $h$  est donnée par  $\frac{1}{2}mv_0^2 = mgh$  (conservation de l'énergie mécanique). On a donc  $h = \frac{v_0^2}{2g}$ . Et donc

$$\frac{h_{\text{Lune}}}{h_{\text{Terre}}} = \frac{g_{\text{Terre}}}{g_{\text{Lune}}} \quad \text{soit} \quad h_{\text{Lune}} = h_{\text{Terre}} \frac{g_{\text{Terre}}}{g_{\text{Lune}}}$$

Si on prend  $h_{\text{Terre}} \approx 0,5 \text{ m}$ , on trouve  $h_{\text{Lune}} \approx 3 \text{ m}$ .

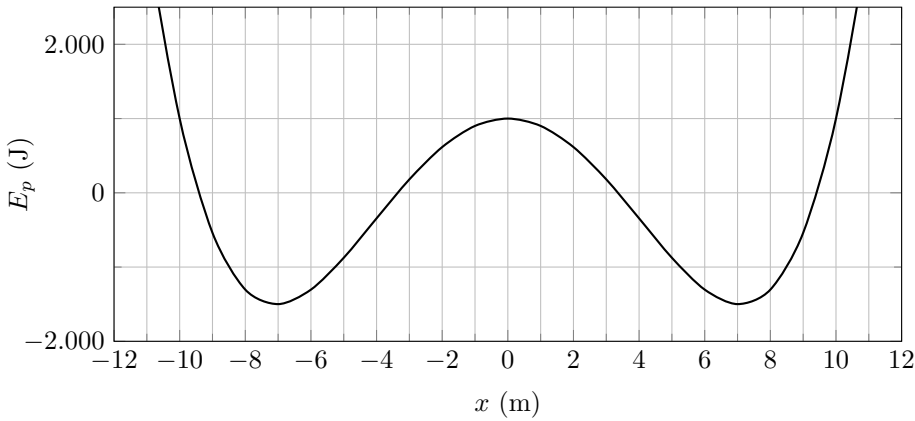
4. Considérons que les visiteurs montent en moyenne jusqu'au 3ème étage, soit une hauteur d'environ 10 m. On considère également que la masse moyenne des visiteurs est de 60 kg. L'énergie nécessaire pour faire monter les visiteurs au cours d'une année est alors :

$$E = mgh \approx 1,5 \times 10^{11} \text{ J} = 40 \text{ MW h}$$

Le prix moyen du kWh d'électricité étant de l'ordre de 0,15 €, cela revient à environ 6000 € par an pour faire fonctionner les escalators.

**Exercice 13 : Puits double**

1. On obtient le graphique suivant :



2. On cherche les positions d'équilibre en cherchant les points pour lesquels  $\frac{dE_p}{dx} = 0$ , on en trouve 3 :  $x_1 = -7,07 \text{ m}$ ,  $x_2 = 0 \text{ m}$ ,  $x_3 = 7,07 \text{ m}$ . On voit directement sur le graphique que  $x_1$  et  $x_3$  sont des positions d'équilibre stable et  $x_2$  est une position d'équilibre instable.
3. Il faut que le point  $M$  puisse franchir la barrière de potentiel, il faut lui donner une énergie cinétique supérieure à  $E_p(0) - E_p(x_1) = 1000 - (-1500) = 2500 \text{ J}$ .
4. — La trajectoire 1 correspond à des oscillations anharmoniques dans le puits de gauche, sans frottements.  
— La trajectoire 2 correspond à des oscillations anharmoniques dans le puits de gauche, avec amortissement dû aux frottements, le point  $M$  se stabilise au fond du puits.  
— La trajectoire 3 correspond à des oscillations anharmoniques dans les deux puits, avant que l'énergie du point  $M$  soit suffisamment dissipée par les frottements et qu'il se stabilise au fond du puits de droite.  
— La trajectoire 4 correspond à des oscillations anharmoniques dans les deux puits, sans frottements.

**Exercice 14 : Vibrations de la molécule de monoxyde de carbone**

1. L'argument de l'exponentielle ne peut pas avoir d'unité donc  $\beta$  est en  $\text{m}^{-1}$ .
2.  $r_0$  correspond à la position du minimum d'énergie potentielle,  $V_0$  à la limite de  $V(r)$  lorsque  $r \rightarrow \infty$  et  $\beta$  est relié à la largeur du puits de potentiel ( $\frac{1}{\beta}$  est la largeur caractéristique du puits).
3. Si son énergie mécanique est inférieure à  $V_0$ , l'oxygène oscillera autour de sa position d'équilibre.
4. En  $r_0$  on se trouve au minimum d'énergie potentielle ( $\frac{dV}{dr} = 0$ ) et on va chercher à approximer l'énergie potentielle par une parabole. On fait un développement limité à l'ordre 2 en  $r_0$  :

$$V(r) \approx V(r_0) + (r - r_0) \frac{dV}{dr}(r_0) + \frac{1}{2}(r - r_0)^2 \frac{d^2V}{dr^2}(r_0)$$

Comme  $\frac{dV}{dr}(r_0) = 0$ , il reste à calculer  $\frac{d^2V}{dr^2}(r_0)$ . On trouve

$$\frac{d^2V}{dr^2}(r_0) = 2\beta^2 V_0$$

On peut donc modéliser l'interaction entre les deux atomes par la force de rappel d'un ressort de raideur  $k = 2\beta^2 V_0$ .

5. La pulsation des oscillations d'une masse  $m$  accrochée à un ressort de raideur  $k$  est  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ . Donc la pulsation des oscillations de la molécule de monoxyde de carbone est

$$\omega_0 = \beta \sqrt{\frac{2V_0}{m}}$$

6. Si l'énergie mécanique de l'atome d'oxygène est supérieur à  $V_0$ , il peut s'échapper de l'attraction de l'atome de carbone et la liaison C–O sera brisée.