

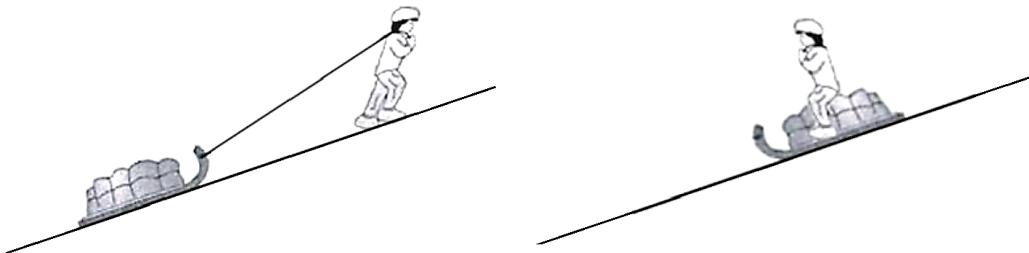
TD14 : Énergétique du point matériel

CAPACITÉS TRAVAILLÉES :

- ▷ Reconnaître le caractère moteur ou résistant d'une force : TLB1,4, ex2
- ▷ Déterminer le travail d'une force au cours d'un déplacement élémentaire : ex1
- ▷ Établir et citer les expressions de l'énergie potentielle de pesanteur (champ uniforme) et de l'énergie potentielle élastique : TLB3,5,6 ex3,5, RP1,2
- ▷ Utiliser le théorème énergétique approprié en fonction du contexte : TLB2-5, ex1-6, RP
- ▷ Distinguer force conservative et force non conservative : TLB3,5,6.
- ▷ Identifier les cas de conservation de l'énergie mécanique. Utiliser les conditions initiales : TLB3,5,6, ex3,6, RP
- ▷ Réaliser le bilan énergétique d'un oscillateur mécanique en absence de frottement en régime libre : ex5, RP1
- ▷ Identifier sur un graphe d'énergie potentielle une barrière et un puits de potentiel : TLB5, ex6
- ▷ Déduire d'un graphe d'énergie potentielle le comportement qualitatif d'un système : trajectoire bornée ou non, mouvement périodique, positions de vitesse nulle : TLB5, ex6
- ▷ Déduire d'un graphe d'énergie potentielle l'existence de positions d'équilibre, et le caractère stable ou instable de ces positions : TLB5, ex6

1 Tester les bases

TLB1 : Apoussiak et son traîneau



Dans la situation de gauche, le système est le traîneau. Dans celle de droite, le système est composé du traîneau et d'Apoussiak.

Dans chacune des situations :

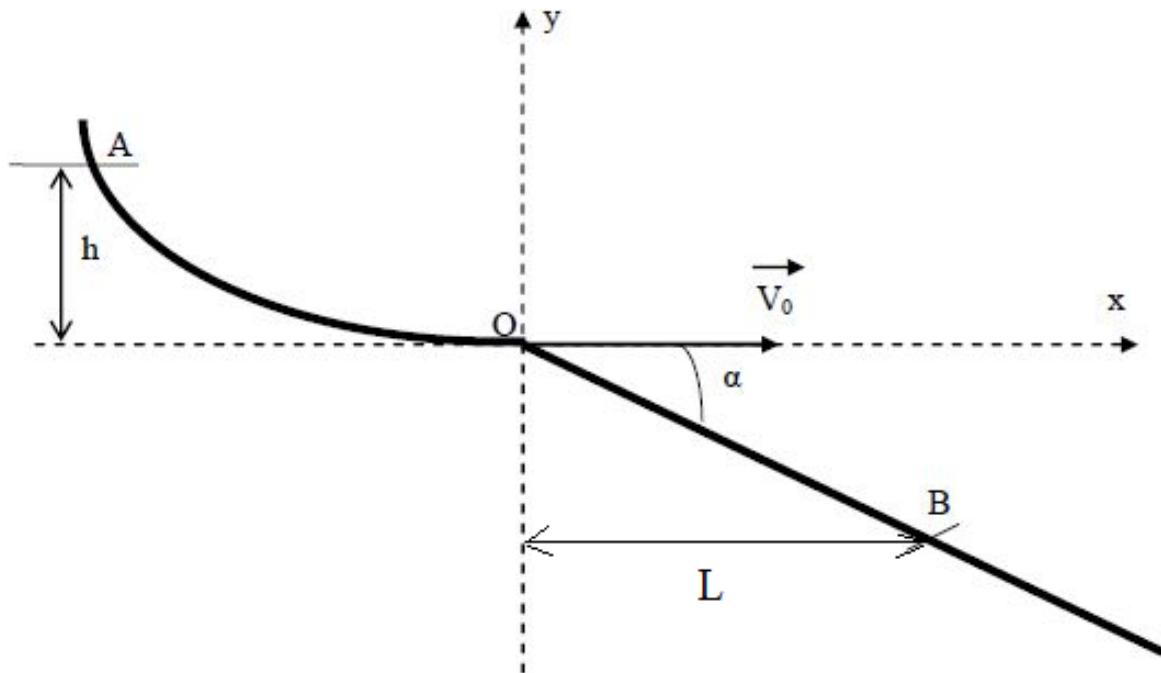
1. Faire la liste des principales forces qui s'exercent sur le système. Les représenter qualitativement sur un schéma.
2. Identifier, en justifiant : les forces motrices, les forces résistantes, et celles qui ne travaillent pas.

TLB2 : un skieur

Un skieur pesant 70 kg descend une piste rectiligne longue de 50 m et inclinée d'un angle $\alpha = 25^\circ$ par rapport à l'horizontale. Il est soumis à son poids \vec{P} et à la réaction \vec{R} de la piste, qui se décompose en une composante normale \vec{N} perpendiculaire à la piste et une composante tangentielle \vec{T} colinéaire et de sens opposé à la vitesse. Les normes de ces deux composantes sont liées entre elles par la **loi de Coulomb**, $T = \mu N$, avec $\mu = 0,1$.

1. Faire un schéma de la situation et y représenter qualitativement les différentes forces.
2. Exprimer, puis calculer, le travail des trois forces au cours de la descente.
3. En admettant que le skieur part du haut de la piste sans vitesse initiale, appliquer le théorème de l'énergie cinétique pour déterminer la valeur de sa vitesse en bas de la piste.

TLB3 : un saut à ski



Lors d'un saut à ski, un skieur de masse $m = 70$ kg prend de l'élan sur un tremplin de hauteur $h = 40$ m. Pour simplifier, on supposera que sa vitesse initiale est nulle, et on négligera les frottements. On note v_0 la valeur de la vitesse du skieur au bout du tremplin, au point O, où le vecteur vitesse est horizontal. La piste d'atterrissement forme un angle $\alpha = 30^\circ$ avec l'horizontale. À l'issue de son saut, le skieur se réceptionne au point noté B sur le schéma, qui se situe à une distance horizontale $L = 100$ m du bout du tremplin.

1. Exprimer, puis évaluer, l'énergie cinétique initiale $E_{c,i}$ et l'énergie potentielle de pesanteur initiale $E_{pp,i}$ du skieur.
2. Exprimer, puis calculer, l'énergie mécanique initiale $E_{m,i}$ du skieur.
3. En vous appuyant sur la conservation de l'énergie mécanique, que vous justifierez, en déduire la valeur de l'énergie mécanique $E_{m,s}$ du skieur au début du saut.
4. Calculer l'énergie potentielle de pesanteur $E_{pp,s}$ au moment du saut. En déduire l'expression de l'énergie cinétique $E_{c,s}$ du skieur au moment du saut, en fonction de l'énergie mécanique $E_{m,s}$.
5. Que vaut la vitesse v_0 du skieur au moment du saut ?
6. Exprimer l'énergie potentielle de pesanteur du skieur au point B en fonction des données du problème.
7. Exprimer l'énergie cinétique du skieur au point B, en fonction des données du problème et de la vitesse v_B au point B.
8. En vous appuyant sur la conservation de l'énergie mécanique, calculer v_B .

TLB4 : Perseverance (CCINP23)

Lancé depuis la Terre le 30 juillet 2020 grâce à un lanceur Atlas V, le rover Perseverance a atterri sur la planète Mars le 18 février 2021. Le site d'atterrissement, le cratère Jezero, est une zone présentant une grande diversité géologique et ayant abrité un lac il y a environ 3,6 milliards d'années. Un des enjeux de cette mission est le prélèvement d'échantillons destinés à être analysés sur Terre afin de déceler d'éventuelles traces d'une vie passée.

La sonde spatiale Mars 2020, de masse m , pénètre dans l'atmosphère martienne à la vitesse de $12\,000\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (vitesse mesurée par rapport au sol), elle larguera le rover 7 minutes plus tard.

Après une première phase de freinage grâce au bouclier thermique, le parachute est déployé à l'altitude d'environ 10,6 km et à la vitesse, notée v_A , de $420 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Aide au calcul			
$420^2 \approx 1,8 \cdot 10^5$	$160^2 \approx 2,6 \cdot 10^4$	$420^2 - 160^2 \approx 1,5 \cdot 10^5$	$3 \times 3,7 \times 3,1 \approx 34$

1. Le point A étant l'endroit où le parachute est déployé, donner l'expression littérale de l'énergie cinétique $E_c(A)$ de l'ensemble en se limitant à un simple mouvement de translation.

Au bout de 20 secondes, la vitesse n'est plus que de $160 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et l'altitude de 7,5 km, Mars 2020 largue alors son bouclier thermique.

2. En appelant B le point de largage et en considérant toujours la même masse, exprimer la variation d'énergie cinétique entre les points A et B.

3. Connaissant la masse de la sonde spatiale de 3000 kg, effectuer le calcul de cette variation d'énergie cinétique.

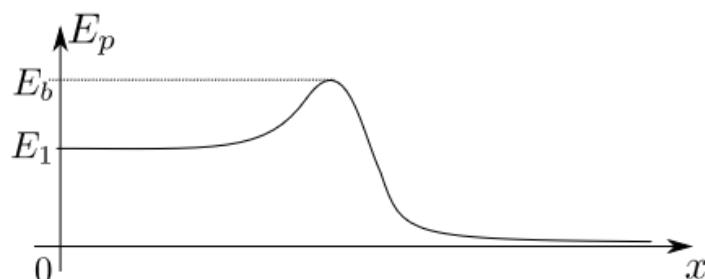
4. Énoncer le théorème de l'énergie cinétique.

5. En supposant l'accélération de la pesanteur martienne uniforme et de valeur $g = 3,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, calculer la valeur du travail du poids entre les points A et B, noté $W_{AB}(\vec{P})$.

6. Ce travail est-il qualifié de moteur ou de résistant ? Justifier.

7. Montrer, à partir des questions 4 et 5, que le travail des forces de frottement noté $W_{AB}(\vec{f})$ sur le parachute, dont la résultante sera notée \vec{f} , est d'environ $-2,5 \cdot 10^8 \text{ J}$.

TLB5 : franchissement d'une barrière de potentiel



On considère le profil d'énergie potentielle représenté ci-dessus, qui peut correspondre à une bille glissant sans frottement sur un sol dont la topographie est celle du graphique : altitude h_1 en $x = 0$, franchissement d'un col d'altitude h_b , puis altitude nulle lorsque $x \rightarrow +\infty$. La bille est lancée en $x = 0$ avec une vitesse v_0 en direction des x croissants.

1. Justifier que l'énergie mécanique de la bille reste constante au cours du temps.

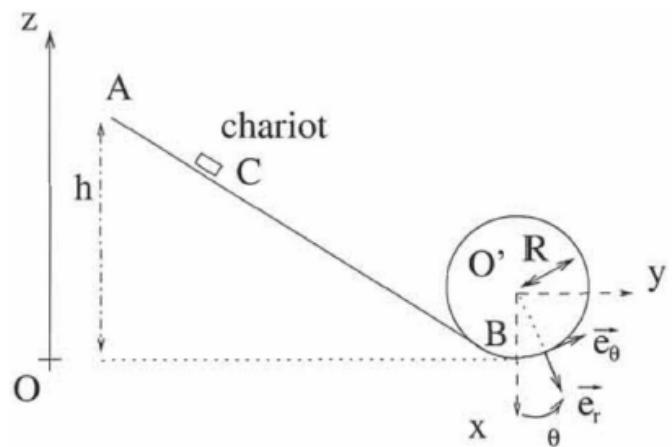
2. Montrer que la bille atteint tout juste le haut du col pour une valeur particulière de sa vitesse initiale v_0 , que l'on exprimera en fonction de m , E_1 et E_b .

3. Justifier que la bille est alors dans une position d'équilibre, dont vous discuterez la stabilité.

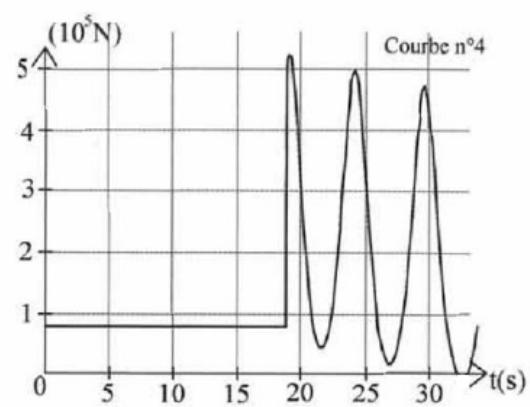
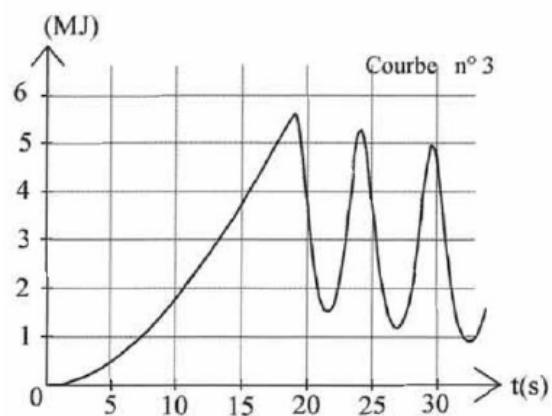
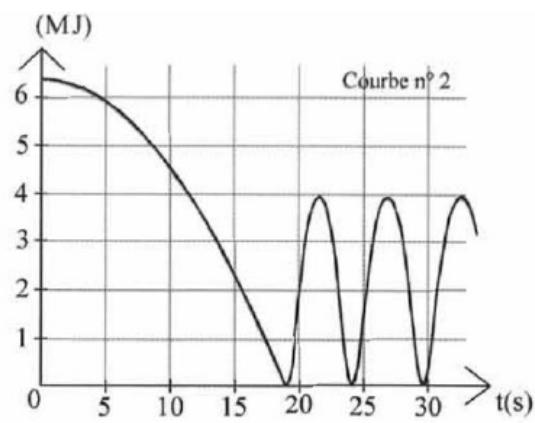
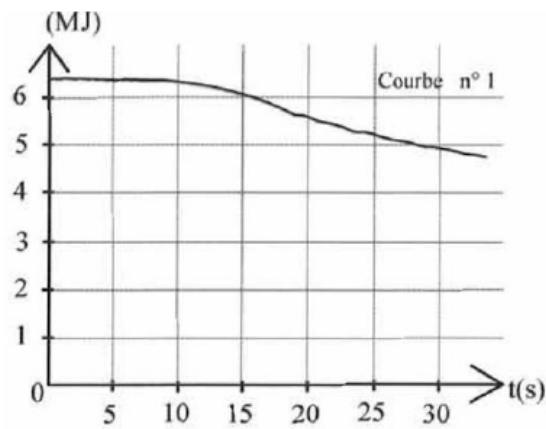
4. Que se passe-t-il si v_0 est inférieure à cette valeur limite ? Et supérieure ?

TLB6 : looping dans un parc d'attraction

On étudie numériquement la trajectoire d'un chariot de parc d'attraction, de masse $m = 10 \text{ t}$, modélisé par un point matériel C.



Ce chariot part du point A, descend le long d'un plan incliné et entre ensuite, au point B, dans un looping circulaire de rayon $R = 20 \text{ m}$, dans lequel il peut faire plusieurs tours avant d'en ressortir.



Les courbes fournies ci-dessus représentent l'évolution au cours du temps de l'énergie cinétique E_c , de l'énergie potentielle de pesanteur E_p , de l'énergie totale E_m et de la norme R_n de la réaction normale des rails sur le chariot (pas nécessairement dans cet ordre).

1. Associer à chaque courbe la grandeur représentée. Justifier.
2. Déterminer si la simulation prend en compte le phénomène de frottement.
3. Calculer la hauteur initiale h et la vitesse initiale v_0 du chariot, ainsi que la vitesse maximale v_{max} qu'il atteint.
4. Indiquer la valeur de R_n lorsque le chariot quitte le looping, et déterminer l'instant où cela a lieu.
5. Déterminer combien de tours entiers le chariot effectue avant de se décoller du looping et d'en ressortir.

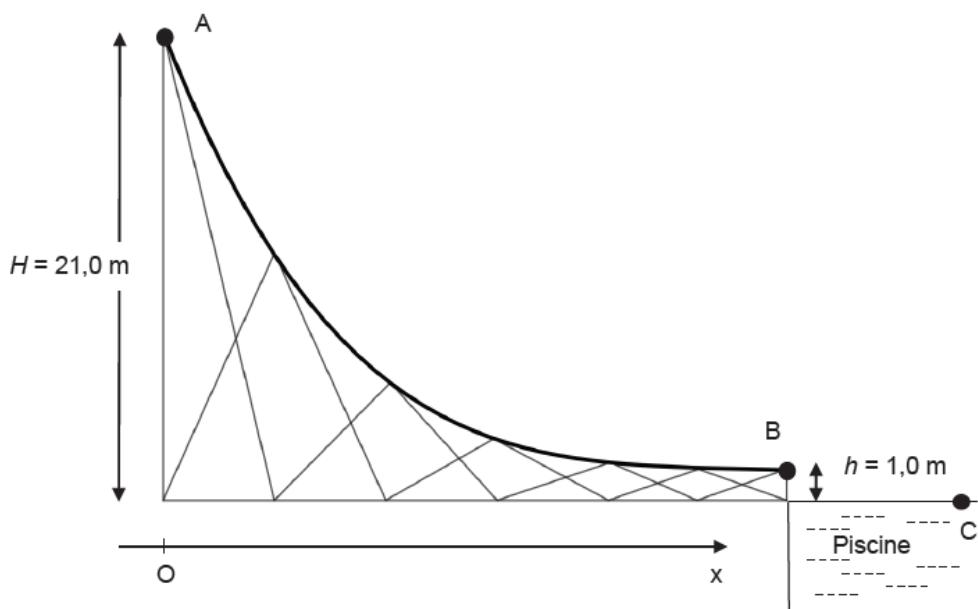
Données :

- ▷ intensité de l'accélération de la pesanteur : $g = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$;
- ▷ une tonne : $1 \text{ t} = 10^3 \text{ kg}$.

2 Exercices

Exercice 1 : sécurisation de la zone d'arrivée d'un toboggan aquatique (CCINP25)

Un enfant modélisé par un point matériel M, de masse $m = 50 \text{ kg}$, glisse sur un toboggan schématisé ci-dessous.



L'enfant se laisse glisser sur le toboggan depuis le point A d'altitude $H = 21,0 \text{ m}$ sans vitesse initiale. Il termine sa glissade au point B d'altitude $h = 1,0 \text{ m}$ avec une vitesse horizontale qui lui permet d'atteindre un point C à la surface de l'eau de la piscine.

Une discussion s'engage lors de la conception du toboggan pour savoir dans quelle zone de la piscine il faudra interdire les baigneurs pour éviter toute collision avec l'enfant qui arrive dans la piscine. On suppose tout d'abord qu'un filet d'eau annule les frottements de l'enfant sur toute la longueur $L = 37,5 \text{ m}$ de la piste du toboggan.

1. Exprimer, puis calculer, le travail $W_{AB}(\vec{P})$ du poids de l'enfant lors de cette descente de A vers B.

2. Citer le théorème de l'énergie cinétique. L'appliquer à l'enfant qui glisse sans frottement entre les points A et B et en déduire l'expression de la vitesse $v_{B,sf}$ atteinte au point B en fonction des données. Calculer la valeur de cette vitesse $v_{B,sf}$.

Du fait des frottements, la vitesse au point B, horizontale, vaut $v_B = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

3. Recopier le schéma. Y faire figurer, sans souci d'échelle, les forces appliquées sur le point M en un endroit quelconque de la glissade.

4. Exprimer, puis calculer, le travail $W_{AB}(\vec{F})$ de cette force de frottement \vec{F} sur le trajet de A à B (vous vous appuyerez, pour ce faire, sur le théorème de l'énergie cinétique).

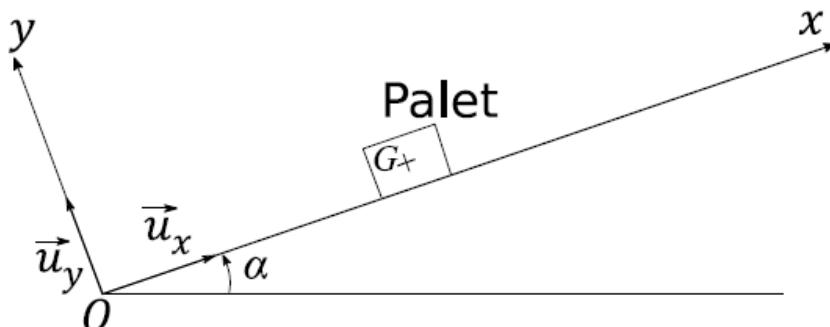
5. Donner l'expression du travail élémentaire de la force de frottement $\delta W(\vec{F})$ pour en déduire une expression du travail $W_{AB}(\vec{F})$ sur le trajet de A à B, en supposant la force de frottement de norme F constante sur le trajet.

6. Déduire ainsi la norme F de la force de frottement.

Exercice 2 : mouvement d'un palet sur la glace (CCINP20)

Un palet de hockey sur glace est fabriqué en caoutchouc avec une masse moyenne de 160 grammes. Sur la glace, le palet peut atteindre des vitesses exceptionnelles du fait de la puissance des joueurs. En Russie, lors des épreuves d'habileté de la Ligue continentale de hockey, le défenseur Aleksandr Riazantsev a établi un nouveau record du monde en janvier 2017 avec une frappe à $183,67 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ soit environ $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Au cours d'une séance d'entraînement à ces épreuves d'habileté, un joueur de hockey propulse le palet, à l'aide de sa crosse, sur un plan recouvert de glace et incliné d'un angle $\alpha = 20^\circ$ par rapport à l'horizontale. La position du centre d'inertie du palet est repérée sur un axe (Ox) de même direction que la ligne de plus grande pente et orienté vers le haut. On note (Oy) l'axe perpendiculaire au plan incliné et orienté vers le haut. Les vecteurs \vec{u}_x et \vec{u}_y sont des vecteurs unitaires dirigés respectivement selon les axes (Ox) et (Oy). Le centre d'inertie du palet est noté G. À l'instant initial, le palet se trouve à l'origine du repère. L'intensité du champ de pesanteur terrestre g est estimée à $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.



Dans une première phase (propulsion du palet par la crosse sur le plan incliné), on considère les frottements comme négligeables. La palette de la crosse est en contact avec le palet.

1. Choisir un référentiel afin d'étudier le mouvement du palet durant la propulsion et le préciser. Peut-il être considéré comme galiléen dans le cadre de cet entraînement ?

2. Établir un bilan des forces qui s'exercent sur le palet durant la propulsion et les représenter sur un schéma cohérent sans souci d'échelle.

3. Exprimer l'intensité de la force de propulsion F exercée par le joueur sur le palet en fonction de l'accélération a du palet, de l'angle d'inclinaison α du plan, de la masse m du palet et de l'intensité du champ de pesanteur g .

4. Sachant que la propulsion due au joueur de hockey dure 0,5 seconde et que le mouvement est uniformément accéléré, quelle doit être l'intensité de la force de propulsion pour que le joueur égale le record du monde de vitesse sur ce plan incliné ?

Dans une deuxième phase, le palet n'est plus en contact avec la crosse et est en mouvement de translation rectiligne vers le haut du plan incliné. On considère les frottements comme négligeables.

5. Sur un schéma, représenter les forces qui s'exercent sur le palet. Ces forces ont-elles un caractère moteur, résistant ou sont-elles sans effet lors du mouvement du palet vers le haut du plan incliné ?

6. Déterminer l'expression de $x(t)$, déplacement du palet selon l'axe (Ox).

7. Montrer que la distance d parcourue par le palet avant de s'arrêter est donnée par la relation :

$$d = \frac{v_0^2}{2g \sin(\alpha)}$$

où v_0 est la vitesse initiale selon l'axe (Ox) au début de la deuxième phase.

Exercice 3 : marcher en montagne (CCINP19)

Tout le monde en a déjà fait l'expérience : marcher en montée est plus fatigant que marcher à plat. Le randonneur est un système articulé complexe. Nous nous contenterons ici de réfléchir aux différentes contributions énergétiques mises en jeu lorsqu'il se déplace.

On considère un randonneur de masse m , de centre d'inertie I , en mouvement dans le référentiel terrestre supposé galiléen muni d'un repère cartésien $(O, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$.

L'accélération de la pesanteur, notée $\vec{g} = -g\vec{e}_z$, est supposée uniforme.

Le randonneur se déplace d'un point A situé au bas d'une colline à un point B situé en haut d'une colline, comme indiqué sur la figure ci-dessous.

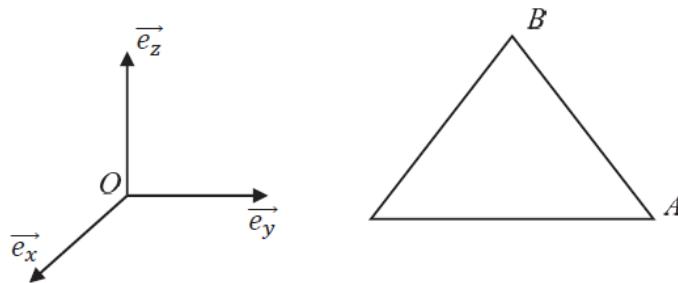


FIGURE 1 – Base cartésienne et colline

On note h le dénivelé parcouru par le randonneur, $h = z_B - z_A$, où z_A est la coordonnée du point A suivant l'axe (O, \vec{e}_z) et z_B celle du point B.

Les frottements de l'air sur le randonneur seront négligés.

1. Lorsqu'il marche, le randonneur est soumis à la réaction \vec{R} du sol sous ses pieds. La réaction du sol s'applique à chaque instant en un point de vitesse nulle (le point d'appui du pied). On assimile le pied à un point matériel. Que vaut la puissance de la réaction du sol sur le pied ? Justifier.

On cherche la variation d'énergie mécanique du randonneur. Pour cela, on assimile le randonneur à un point matériel placé en I de coordonnées (x_I, y_I, z_I) .

2. Le randonneur est soumis à son poids. Donner sans démonstration l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur E_p du randonneur en fonction de m , g , z_I et d'une constante. Cette énergie potentielle est la seule prise en compte dans notre étude.

3. À l'instant initial, le randonneur est en A et a une vitesse nulle. Il s'arrête à l'arrivée en B pour contempler le paysage. Que vaut la variation de son énergie cinétique entre A et B ?

4. Rappeler la définition de l'énergie mécanique. Déterminer la variation d'énergie mécanique ΔE_m du randonneur entre A et B en fonction de m , g et h .

5. Lors d'une randonnée, un individu de 60 kg parcourt une distance de 7 km avec un dénivelé de 1 km. L'accélération de la pesanteur est approximée à $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Calculer numériquement la variation de son énergie mécanique.

6. Calculer à nouveau la variation d'énergie mécanique pour une distance parcourue de 10 km sans dénivelé. Comparer les deux résultats précédent en s'appuyant sur le texte introductif.

Exercice 4 : des toboggans sous contrôle (CCS18)

Les toboggans font aujourd'hui parti des incontournables d'un centre aquatique. De nombreux toboggans présentent des enroulements plus ou moins complexes.

On étudie le toboggan présenté sur la figure ci-dessous et composé d'un enroulement hélicoïdal d'approximativement $n = 2,3$ tours. Le rayon moyen est estimé à $R = 2,0 \text{ m}$ et la hauteur de l'ensemble est $h = 4,0 \text{ m}$. On néglige les frottements.

On note $\theta > 0$ la position angulaire du baigneur dans le toboggan relativement à la position de départ, d'altitude h . Le baigneur suit la trajectoire d'équation $r = R$, $z = \alpha\theta$, l'axe (Oz) étant orienté selon la verticale descendante.



1. Déterminer la valeur de α .

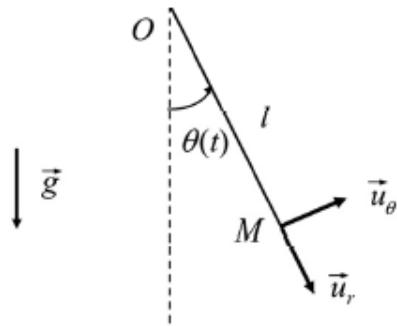
2. Calculer la valeur de la vitesse atteinte en sortie du toboggan, le départ se faisant sans vitesse initiale.

3. Afin d'éviter les collisions, le toboggan est équipé au point de départ d'un feu qui passe au vert toutes les t_f secondes. On impose une marge de $t_m = 5 \text{ s}$ en plus de la durée de parcours dans le toboggan. Calculer t_f . On prendra $g = 9,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

Exercice 5 : étude énergétique du pendule simple sans frottement

On considère une masse ponctuelle m située en M et suspendue en O par un fil tendu, de masse négligeable et de longueur l fixe (le fil est inextensible).

On note $\theta(t)$ l'angle algébrique entre la verticale descendante et le fil.



Le champ de pesanteur, noté \vec{g} , de norme g , est supposé uniforme. À l'instant initial, le pendule est lâché sans vitesse d'un angle θ_0 .

On néglige tout frottement de la tige sur son axe de rotation et tout frottement dû à la résistance de l'air. On note T_c la tension du fil.

On commence par établir l'équation du mouvement du pendule simple :

$$\ddot{\theta} + \omega_0^2 \sin(\theta) = 0,$$

avec $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$.

1. Faire le bilan des principales forces s'exerçant sur la masse. Les représenter qualitativement sur un schéma. Les exprimer dans la base polaire locale. Établir l'accélération du point M dans la base polaire, puis appliquer la relation fondamentale de la dynamique et la projeter sur \vec{u}_r et \vec{u}_θ . En déduire l'équation du mouvement du pendule simple.

2. Exprimer l'énergie potentielle de pesanteur et l'énergie cinétique dans la base locale polaire. Justifier la conservation de l'énergie mécanique et s'appuyer sur cette dernière pour montrer que

$$\dot{\theta}^2 = 2\omega_0^2(\cos(\theta) - \cos(\theta_0)).$$

En déduire l'équation du mouvement du pendule.

3. En vous appuyant sur l'expression de l'énergie potentielle obtenue à la question précédente, déterminer la ou les position(s) d'équilibre, dont vous discuterez la stabilité. Commenter.

4. Déduire de ce qui précède que la tension de la corde vaut

$$T_c = mg(3\cos(\theta) - 2\cos(\theta_0)).$$

Exprimer le domaine de valeurs que peut prendre $\frac{T}{mg}$ en fonction de θ_0 . Quelle valeur maximale de θ_0 permet au fil de rester tendu ? À quelle tension le fil doit-il alors résister pour ne pas rompre, si la masse pèse 1kg ? Décrire qualitativement le mouvement de la masse en cas de rupture du fil.

On souhaite à présent résoudre l'équation du mouvement.

5. À quelle condition sur l'angle initial θ_0 le mouvement peut-il être considéré comme celui d'un oscillateur harmonique ? Déterminer alors l'expression de $\theta(t)$ en tenant compte des conditions initiales et donner l'expression de la période propre T_0 du mouvement dans cette approximation. Justifier pourquoi on parle d'**isochronisme des petites oscillations**. Déterminer la longueur à imposer au fil pour que le pendule batte la seconde, autrement dit pour qu'une demi-période dure une seconde. On prendra $g = 9,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

Exercice 6 : potentiel de Lennard-Jones

En tenant compte de toutes les interactions dipolaires pouvant exister entre deux molécules (London, Debye et Keesom), on modélise l'énergie potentielle d'interaction par le potentiel de Lennard-Jones, dont l'allure est tracée ci-dessous.

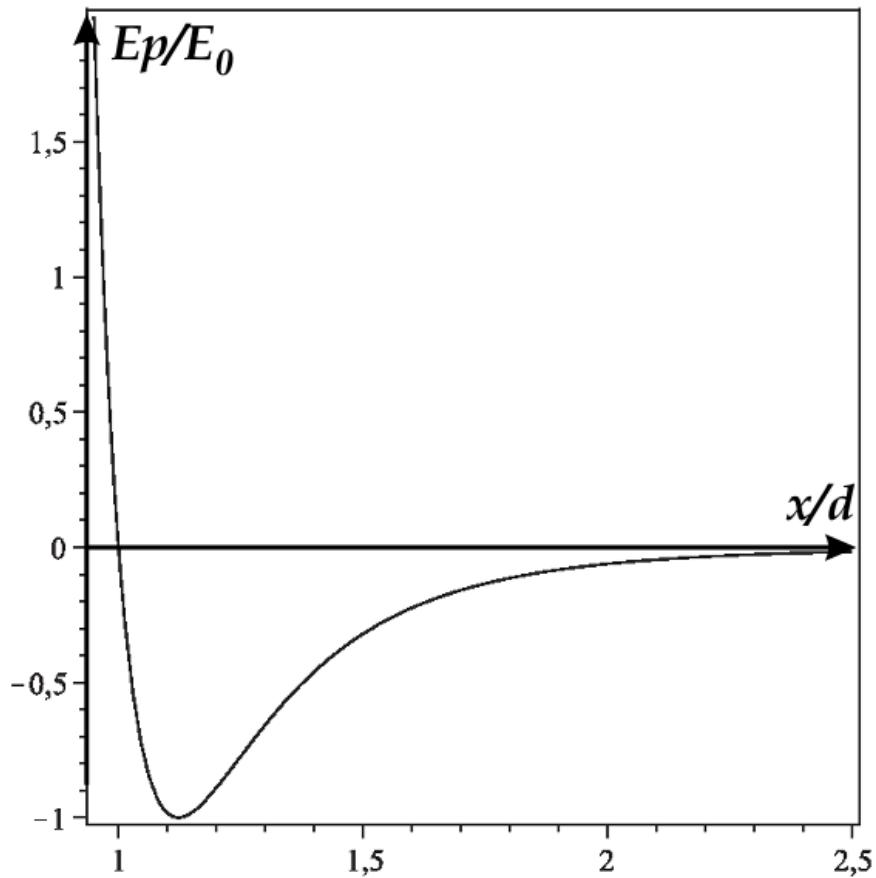


FIGURE 2 – Potentiel de Lennard-Jones

Son expression en fonction de la distance x entre les deux centres des molécules

est donnée par :

$$E_p(x) = 4E_0 \left[\left(\frac{d}{x}\right)^{12} - \left(\frac{d}{x}\right)^6 \right]$$

où E_0 est une énergie de référence et d une distance caractéristique du type de molécule. Le terme en puissance 6, attractif, domine à grande distance et correspond aux interactions de Van der Waals. Le terme en puissance 12, répulsif, domine à courte distance et rend compte de l'impénétrabilité des nuages électroniques des deux molécules.

On suppose pour toute la suite que le système étudié est conservatif. La molécule, de masse m , subit une seule force : celle qui correspond à l'énergie potentielle tracée ci-dessus.

1. Indiquer si le graphe de $E_p(x)$ contient une barrière ou un puits de potentiel.
2. Ce graphe révèle une position d'équilibre notée x_{eq} . La repérer, puis préciser si cet équilibre est stable ou instable.
3. Obtenir analytiquement (autrement dit par calcul) l'expression de x_{eq} , en fonction de la distance d .
4. Déterminer l'expression de $E_p(x_{eq})$.
5. Quelle est l'énergie mécanique minimale à fournir à une molécule pour qu'elle puisse s'éloigner à l'infini ? Justifier graphiquement.
6. Montrer que la dérivée seconde de l'énergie potentielle, calculée au niveau de la position d'équilibre, vaut :

$$\frac{d^2E_p}{dx^2}(x_{eq}) = \frac{2E_0}{a},$$

où a est une constante.

7. On donne le **développement de Taylor** à l'ordre 2 de l'énergie potentielle autour du point d'abscisse x_{eq} :

$$E_p(x) \simeq E_p(x_{eq}) + (x - x_{eq}) \frac{dE_p}{dx}(x_{eq}) + \frac{(x - x_{eq})^2}{2} \frac{d^2E_p}{dx^2}(x_{eq}),$$

Établir l'expression de l'énergie potentielle $E_p(x)$ autour de la position d'équilibre x_{eq} .

8. Tracer l'allure de la représentation graphique de l'énergie potentielle obtenue à la question précédente.

9. En fournissant à la molécule une énergie très légèrement supérieure à $-E_0$, et en la laissant évoluer dans le puit de potentiel précédent, quel sera son mouvement ?

10. Que peut-on dire de l'énergie mécanique de la molécule au cours du temps ? En déduire l'équation du mouvement de la molécule dans ce puits de potentiel. Préciser la période de ce mouvement, en fonction de E_0 , m et a .

3 Résolution de problèmes :

RP1 : Houba houba c'est lui...

Le Marsupilami est un animal de bande dessinée créé par Franquin. Ses capacités physiques sont remarquables : il peut notamment sauter en enroulant sa queue comme un ressort entre lui et le sol.



On note $l_0 = 2$ m la longueur à vide du ressort équivalent à la queue du Marsupilami. Lorsqu'il est complètement comprimé, la longueur minimale du ressort est $l_m = 50$ cm. On suppose que le Marsupilami pèse 50 kg, qu'il est capable de sauter jusqu'à une hauteur $h = 10$ m, et que sa queue quitte le sol lorsque le ressort mesure l_0 .

Quelle est la vitesse du Marsupilami lorsque sa queue quitte le sol ?

RP2 : un crash-test vertical

Lors d'un crash-test frontal, une voiture de masse 1,3 tonne est projetée contre un obstacle à $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, ce qui simule un accident en milieu urbain.



De combien d'étages devrait-on laisser tomber cette voiture pour observer les mêmes dommages ?