

Évaluation diagnostique

Pour chaque situation présentée, proposer une réponse en argumentant.

Situation 1

Pour vérifier l'indispensable



Lors d'une épreuve de slalom, le skieur contrôle la trajectoire de sa descente par l'action de ses skis sur la piste.

Quelles sont les caractéristiques de la force modélisant cette action ?
Force et mouvement ont-ils, dans ce cas, la même direction ?

▶ **Activité 1**, p. 184

Situation 2

Pour amorcer la réflexion



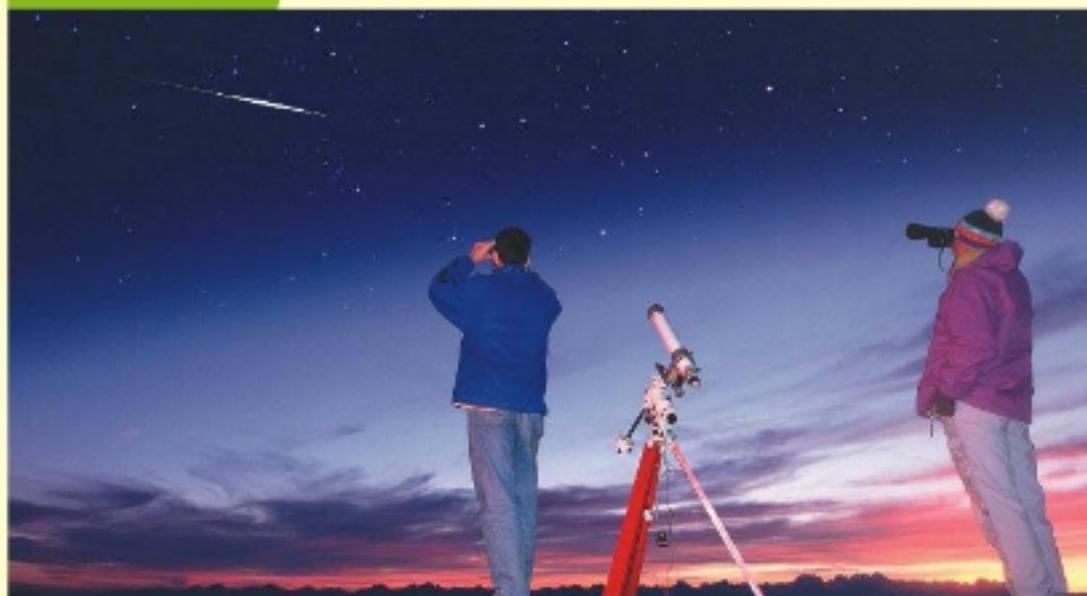
Dans une station de ski, différents trajets permettent d'atteindre un même sommet.

Les systèmes de remontée mécanique fournissent-ils le même effort selon que le skieur suit l'un ou l'autre des chemins ?

▶ **Activités 2 et 3**, p. 185 et 186

Situation 3

Pour traquer les idées fausses



Chaque année, en août, a lieu la « nuit des étoiles filantes ». On peut y observer de nombreuses météorites en chute libre dans l'atmosphère, qui deviennent alors incandescentes.

La chute de ces poussières de comètes est-elle vraiment libre ?

▶ **Activité 3**, p. 186

Travail d'une force



Au cours d'une descente, alors que les effets des frottements sont réduits au minimum, la force de pesanteur travaille en faveur du skieur de vitesse.

Les acquis des classes précédentes

- ▶ Une force modélise une action mécanique et se manifeste par ses effets sur le mouvement.
- ▶ Un objet de masse m situé dans le champ de pesanteur terrestre \vec{g} est soumis à son poids \vec{P} : $\vec{P} = m \cdot \vec{g}$.
- ▶ Une particule de charge q située dans un champ électrostatique \vec{E} est soumise à une force électrique \vec{F} : $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$.

Les compétences à acquérir

1. **Établir** et **exploiter** l'expression du travail de la force électrique.
2. **Établir** et **exploiter** l'expression du travail de la force de pesanteur.
3. **Établir** l'expression du travail d'une force de frottement.

→ Culture scientifique

Forces conservatives et non conservatives

Animation

Accélérateur de particules

Dans les collisionneurs de particules, les physiciens ajustent les paramètres des forces mises en jeu afin de se rapprocher des conditions énergétiques du Big Bang.

Compétences scientifiques évaluées

- Formuler des hypothèses pertinentes.
- Identifier les paramètres jouant un rôle dans un phénomène physique.

Pour commencer (situation déclenchante)

Dans les accélérateurs de particules linéaires, les physiciens utilisent un champ électrostatique pour lancer des projectiles (des particules électriquement chargées comme des électrons, des protons ou des ions) sur une piste rectiligne (Fig. 1). Lors de ces déplacements, des forces électriques permettent aux particules d'être dans les meilleures conditions avant d'aborder l'étape de collision. Il s'agit, pour les chercheurs, de communiquer au paquet de particules la plus grande énergie cinétique possible.



Fig. 1 Piste d'un accélérateur de particules, située à plusieurs dizaines de mètres sous terre.

Investigation

Lors de la mise en mouvement d'une particule électriquement chargée, quels paramètres peuvent modifier l'effet produit par la force électrique ?

Quelques idées (hypothèses)



Expérience (recherche de validation)

Matériel

- tableur-grapheur informatique
- animation « Travail d'une force électrique constante » consultable sur le site www.bordas-espace.fr/lycee

Pour évaluer l'effet d'une force sur un objet, le physicien dispose d'une grandeur appelée « travail ». À l'aide d'une animation (Fig. 2), on peut faire varier différents paramètres permettant d'estimer théoriquement la valeur du travail, noté $W_{AB}(\vec{F})$, fourni par une force \vec{F} lors de la mise en mouvement d'une particule entre deux points A et B.

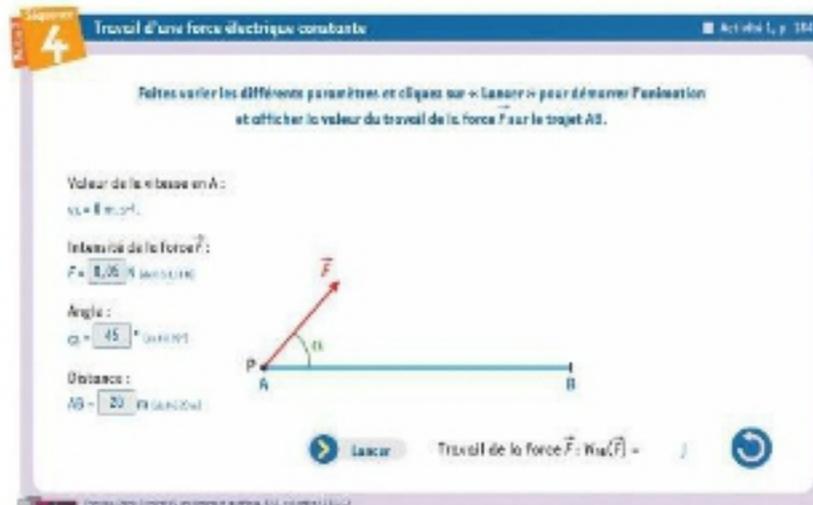


Fig. 2 Simulation Informatique.

- 1 Pour chaque hypothèse avancée :
 - a. indiquer la grandeur physique testée et celles qui restent constantes ;
 - b. prévoir l'effet d'une modification de cette grandeur sur le travail fourni par la force ;
 - c. tester la prévision en réalisant une série de simulations.
- 2 a. Récapituler l'ensemble des résultats dans un tableau.
b. Comparer l'effet attendu à celui observé.
- 3 a. Un ou plusieurs paramètres ont-ils une influence sur le travail fourni ?
b. Si oui, détailler l'influence de chaque paramètre identifié.

Pour conclure

4 Le travail $W_{AB}(\vec{F})$ d'une force constante \vec{F} , pour un déplacement rectiligne de son point d'application de A vers B, est la grandeur qui caractérise l'effet qu'elle produit.

Proposer une relation liant $W_{AB}(\vec{F})$ à F , AB et $\cos \alpha$ (α désignant l'angle entre les vecteurs \vec{F} et \vec{AB}).

- 5 Dans quelle(s) condition(s) :
 - a. une force ne fournit-elle aucun travail ?
 - b. le travail d'une force est-il maximal ?
- 6 En déduire l'expression du travail de la force électrique \vec{F}_e s'exerçant sur une particule de charge q dans un accélérateur de particules linéaire de longueur ℓ . On rappelle que $\vec{F}_e = q \cdot \vec{E}$ et $F_e = |q| \cdot E$.

Différents chemins peuvent être empruntés pour déplacer un objet d'un point à un autre. Lors de ces déplacements, les forces mises en jeu fournissent un travail mécanique.

Compétences expérimentales évaluées

- S'approprier un montage expérimental.
- Analyser un résultat expérimental.

Principe

En saut à skis, la prise d'élan qui s'effectue sur un tremplin incliné est fondamentale. Différents types de tremplins existent (le grand tremplin, le tremplin normal..., Fig. 1) et le point d'application de la force de pesanteur peut alors suivre des trajets de pentes et de longueurs différentes. Lors de ces déplacements, le travail de la force de pesanteur permet au sauteur d'atteindre la vitesse d'environ $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ en sortie.



Fig. 1 Différents tremplins du saut à skis.

La prise d'élan du sauteur peut être modélisée au laboratoire par la chute d'un mobile sur un banc à coussin d'air.

Mise en œuvre au laboratoire

Matériel

- banc à coussin d'air d'inclinaison variable
- mobile
- webcam
- logiciel de pointage
- logiciel tableur-grapheur

- Réaliser le montage correspondant à la figure 2.

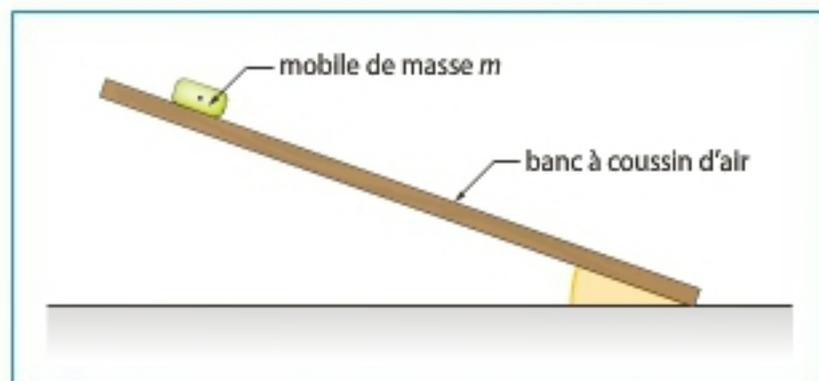


Fig. 2 Schématisation du montage expérimental.

- Ajuster le banc pour avoir une inclinaison d'environ 10° .
- Lâcher le mobile sans vitesse initiale depuis le haut du banc incliné et filmer son mouvement sur la rampe.

Mesures

- Mesurer la masse du mobile, la longueur L de la rampe et la hauteur d'élévation H .
- Ouvrir le fichier vidéo à l'aide du logiciel de pointage.
- Sélectionner l'image correspondant au départ du mobile et choisir l'origine O d'un repère d'espace $(O ; x, y)$ au centre d'inertie du mobile. Étalonner le document vidéo.
- Réaliser le pointage des positions successives du mobile de coordonnées $(x ; y)$ lors de son déplacement, puis transférer les mesures dans le tableur.

Exploitation

- 1 Quel type de mouvement décrit le mobile ?
- 2 a. Sans souci d'échelle, reproduire le schéma de l'expérience en faisant apparaître le repère $(O ; x, y)$, la longueur L , la hauteur d'élévation H et l'angle d'inclinaison, noté β_1 .
b. Calculer la valeur de l'angle β_1 à partir de H et de L .
- 3 Exprimer la distance ℓ parcourue par le mobile sur le plan en fonction des coordonnées y et x .
• À partir du tableur, calculer automatiquement la distance ℓ , puis la vitesse instantanée v du mobile.
• Afficher le graphe $\ell = f(v)$, puis modéliser la courbe.
• Sur la courbe, déterminer la valeur ℓ_1 de ℓ pour laquelle le mobile atteint une vitesse $v = 1,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- 4 a. Faire le bilan des forces qui modélisent les actions mécaniques exercées sur le mobile, puis les représenter sur le schéma sans souci d'échelle.
b. Exprimer le travail du poids en fonction des paramètres m, g, ℓ et β_1 de l'expérience.
c. Calculer la valeur du travail $W_1(\vec{P})$ du poids pour le déplacement $\ell = \ell_1$. On prendra $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.
- 5 À partir du tracé d'un graphe, déterminer la variation de hauteur h_1 du mobile correspondant à la distance parcourue ℓ_1 .
- 6 Réaliser à nouveau la manipulation pour une pente deux fois plus importante. Les mesures seront repérées par l'indice 2. Comparer ℓ_1 et ℓ_2, h_1 et $h_2, W_1(\vec{P})$ et $W_2(\vec{P})$. Que constate-t-on ?

Pour conclure

- 7 a. La valeur du travail du poids $W(\vec{P})$ lors d'un déplacement de son point d'application dépend-elle de la longueur du chemin suivi lors du déplacement ?
b. De quoi dépend-elle alors ?

Un travail non négligeable

Parfois négligés dans l'étude du mouvement de certains systèmes mécaniques, les frottements jouent un rôle prépondérant dans certaines situations.

Compétences scientifiques évaluées

- Faire preuve de curiosité.
- Associer un modèle à un phénomène.

Étude de document

Un solide en mouvement sur un support ou dans un fluide (gaz ou liquide) subit de la part de celui-ci une action mécanique qui s'oppose à son mouvement. Cette action peut être modélisée par une force de même direction que le vecteur vitesse, mais de sens contraire. Cette force est nommée force de frottement de glissement pour un support solide ou force de frottement fluide pour un fluide. Elle est notée \vec{f} .

Au hockey sur glace par exemple, le palet (un disque de caoutchouc) lancé sur la patinoire glacée finit par s'arrêter en raison de l'action mécanique de la glace. La valeur de la force de frottement de glissement qui modélise cette action est indépendante de la vitesse du palet, mais dépend de l'état de la piste. Quelques heures avant le coup d'envoi d'un match, la préparation technique de la patinoire consiste à « refaire » la glace à l'aide d'une surfaceuse. Le passage de ce véhicule permet de lisser la piste afin de réduire le travail produit par les forces de frottement.

Le sky surf (Fig. 1) constitue un autre exemple. Dans ce sport, le parachutiste debout sur sa planche est en chute verticale dans l'air. Pour un saut à 4 000 m d'altitude, et après une



Fig. 1 Des skysurfers en chute dans l'air.

phase d'accélération, le travail résistant produit par les forces de frottement fluide, qui modélisent l'action mécanique de l'air sur le skysurfer, conduit à un mouvement uniforme. Le sportif dispose alors d'environ 50 s de chute « libre », à près de $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Cette durée lui permet de réaliser des figures, qui peuvent être filmées, avant d'ouvrir son parachute.

Pistes de réflexion

- a. Quelles actions mécaniques sont ici évoquées ?

b. Citer deux caractéristiques des forces les modélisant.

c. Lors d'un déplacement, quel sera le signe du travail produit par de telles forces ? Justifier la réponse.
- a. On modélise la situation du palet ci-dessous. Sans souci d'échelle, représenter la force de frottement \vec{f} modélisant l'action mécanique de la glace sur le palet de hockey lors d'un déplacement de A en B, puis de C en B.



- b. Exprimer le travail $W_{AB}(\vec{f})$ pour un déplacement direct de A en B ; puis pour un déplacement de A en B en passant par un rebond en C.

c. Que constate-t-on ?

Un objet de volume V subit de la part du fluide dans lequel il est plongé, de masse volumique ρ , une action mécanique modélisée par une force nommée poussée d'Archimède, et notée $\vec{\Pi}$: $\vec{\Pi} = -\rho \cdot V \cdot \vec{g}$.

- a. Réaliser le bilan des forces qui modélisent les actions mécaniques s'exerçant sur le skysurfer dans sa chute verticale, puis les représenter sur un schéma, sans souci d'échelle.

- b. Lors de la phase uniforme du mouvement, quelle relation existe-t-il entre ces forces ? Justifier la réponse.

c. Les points d'application des forces subissent le même déplacement, noté \vec{AB} . Montrer que le travail $W_{AB}(\vec{F}_{\text{ext}})$ de leur résultante est nul.

d. En déduire l'expression du travail de la force de frottement fluide $W_{AB}(\vec{f})$.

e. Calculer le travail de chaque force. Que constate-t-on ? Ce résultat est-il en accord avec la question 1.c ?

Données. Volume du skysurfer : $V_s = 0,30 \text{ m}^3$.

Masse du skysurfer : $m = 80 \text{ kg}$.

Intensité de la pesanteur : $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Masse volumique de l'air : $\rho_{\text{air}} = 1,0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Pour conclure

- Écrire l'expression du travail d'une force de frottement constante \vec{f} lors d'un déplacement de son point d'application de A en B.
- Une force est dite conservative lorsque le travail qu'elle produit est indépendant du chemin suivi par son point d'application.

Une force de frottement est-elle conservative ?

Une force modélise une action mécanique. Elle est caractérisée par son point d'application, sa direction, son sens et sa valeur. Pour traduire les effets, lors d'un **déplacement**, d'une action mécanique modélisée par une force constante (Fig. 1), les physiciens ont créé une grandeur appelée **travail**.

● Travail d'une force constante

Le **travail d'une force constante au cours d'un déplacement** dépend de l'intensité de la force, de la longueur du déplacement mais aussi de la direction selon laquelle la force est appliquée.

Le **travail** d'une force \vec{F} constante, lors du déplacement rectiligne de son point d'application de A vers B, se note $W_{AB}(\vec{F})$.

$$W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \vec{AB} = F \cdot AB \cdot \cos \alpha$$

$W_{AB}(\vec{F})$ s'exprime en joule (J).

$\vec{F} \cdot \vec{AB}$ désigne le produit scalaire des vecteurs force \vec{F} et déplacement \vec{AB} . F est l'intensité de la force en newton (N), AB la longueur du déplacement en mètre (m) et α l'angle formé par les vecteurs \vec{F} et \vec{AB} .

Le travail $W_{AB}(\vec{F})$ est une grandeur algébrique dont le signe est déterminé par la valeur de α (F et AB étant toujours positives).

Si $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$, alors $W_{AB}(\vec{F}) > 0$: le travail est **moteur** et la force favorise le déplacement.

Si $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$, alors $W_{AB}(\vec{F}) < 0$: le travail est **résistant** et la force s'oppose au déplacement.

Si \vec{F} est perpendiculaire au déplacement \vec{AB} , ou si son point d'application ne se déplace pas, alors la force **ne travaille pas** : $W_{AB}(\vec{F}) = 0$.

Exemple

Une perche exerce sur un skieur une force constante de valeur $F = 3,5 \text{ kN}$ et son point d'application se déplace rectilignement sur $AB = 2,0 \times 10^2 \text{ m}$. \vec{F} et \vec{AB} forment un angle $\alpha = 40^\circ$ (Fig. 1). Le travail produit est moteur et vaut :

$$W_{AB}(\vec{F}) = 3,5 \times 10^3 \times 2,0 \times 10^2 \times \cos 40^\circ = 5,4 \times 10^5 \text{ J.}$$

1 Travail d'une force électrique constante

● Expression du travail

> **Activité 1**

Une particule de charge électrique q , placée dans un champ électrostatique uniforme \vec{E} , est soumise à une force électrique \vec{F}_e constante d'intensité $F_e = |q| \cdot E$.

Lors du déplacement de A à B d'une particule dans un champ électrostatique uniforme (Fig. 2), le **travail** $W_{AB}(\vec{F}_e)$ de la force électrique \vec{F}_e exercée a pour expression :

$$W_{AB}(\vec{F}_e) = \vec{F}_e \cdot \vec{AB} = F_e \cdot AB \cdot \cos \alpha = |q| \cdot E \cdot AB \cdot \cos \alpha$$

avec q , charge électrique portée par la particule en coulomb (C) ; E , intensité du champ électrique en volt par mètre ($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$).

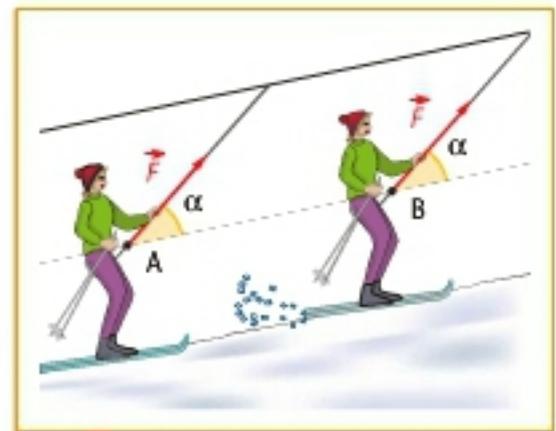


Fig. 1 Le point d'application de la force \vec{F} constante se déplace et modifie l'altitude du skieur.

Repère

Une **force** \vec{F} est **vectoriellement constante** lorsque sa direction, son sens et son intensité restent inchangés au cours du temps.

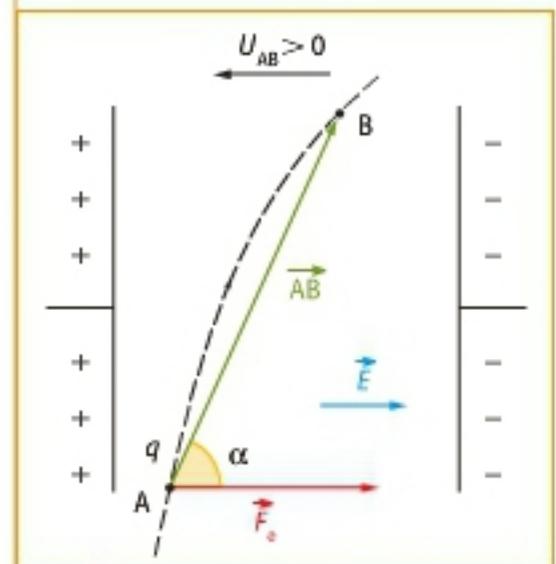


Fig. 2 Particule de charge $q > 0$ se déplaçant de A à B dans le champ électrique \vec{E} .

● Travail et tension électrique

Un champ électrostatique uniforme \vec{E} est produit entre deux points A et B par une tension électrique U_{AB} (en V) appliquée entre ces deux points : $U_{AB} = \vec{E} \cdot \vec{AB}$. L'expression du travail de la force électrique \vec{F}_e devient alors :

$$W_{AB}(\vec{F}_e) = q \cdot \vec{E} \cdot \vec{AB} = q \cdot U_{AB}.$$

La valeur et le signe du travail de la force électrique dépendent uniquement de ceux de q et de U_{AB} , et non du chemin suivi par la particule entre A et B.

Exemples

Le champ \vec{E} (Fig. 2) est produit par la tension électrique $U_{AB} = 9,0$ V. Le travail de la force \vec{F}_e sur un proton est moteur : $W_{AB}(\vec{F}_e) = 1,6 \times 10^{-19} \times 9,0 = 1,4 \times 10^{-18}$ J. Si la particule est un électron ($q = -e$), le travail est résistant, car \vec{F}_e et \vec{AB} sont colinéaires mais de sens contraires. $W_{AB}(\vec{F}_e) = -1,6 \times 10^{-19} \times 9,0 = -1,4 \times 10^{-18}$ J.

→ Exercices 1 à 5

Sciences et culture

L'électronvolt, une autre unité d'énergie

Si q est exprimé en unité de charge élémentaire e et U_{AB} en volt, le travail électrique s'exprime en électronvolt (eV) : $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19}$ J.

1 eV représente ainsi l'énergie acquise par une particule de charge e soumise à une tension de 1 V. Cette unité est notamment employée pour exprimer les énergies rencontrées dans les accélérateurs de particules.

2 Travail de la force de pesanteur

● Expression du travail

› Activité 2

Le travail de la force de pesanteur, aussi appelée poids, ne dépend pas du chemin suivi par le corps entre A et B, mais seulement de leur différence d'altitude $z_A - z_B$. En effet, le travail de la force de pesanteur \vec{P} lors du déplacement de son point d'application entre A et B (Fig. 3) s'écrit :

$$W_{AB}(\vec{P}) = \vec{P} \cdot \vec{AB} = P \cdot AB \cdot \cos \alpha.$$

Or, $\vec{AB} = \vec{AH} + \vec{HB}$; $(\vec{P}; \vec{HB}) = 90^\circ$ et $(\vec{P}; \vec{AH}) = 0^\circ$. Donc :

$$W_{AB}(\vec{P}) = \vec{P} \cdot \vec{AH} + \vec{P} \cdot \vec{HB} = \vec{P} \cdot \vec{AH}.$$

De plus, $\vec{P} = m \cdot \vec{g}$ et, dans le repère $(O; x, y, z)$, $AH = z_A - z_B$ donc :

$$W_{AB}(\vec{P}) = P \cdot AH = m \cdot g \cdot (z_A - z_B).$$

Le **travail de la force de pesanteur** exercée sur un corps de masse m se déplaçant de A vers B dans un champ de pesanteur d'intensité constante g a pour expression : $W_{AB}(\vec{P}) = m \cdot g \cdot (z_A - z_B)$. $W_{AB}(\vec{P})$ s'exprime en joule (J), g en $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$, m en kg ; z_A et z_B en m.

Exemple

Si $z_A - z_B > 0$, alors $W_{AB}(\vec{P}) > 0$ et le travail est moteur : la force de pesanteur contribue à une diminution de l'altitude.

● Travail et énergie potentielle de pesanteur

Soit E_{ppA} et E_{ppB} les énergies potentielles de pesanteur du corps en A et B (Fig. 3).

Par définition, $E_{pp} = m \cdot g \cdot z$ et $\Delta E_{ppA \rightarrow B} = E_{ppB} - E_{ppA}$.

L'expression du travail de la force de pesanteur s'écrit alors :

$$W_{AB}(\vec{P}) = m \cdot g \cdot (z_A - z_B) = m \cdot g \cdot z_A - m \cdot g \cdot z_B = E_{ppA} - E_{ppB} = -\Delta E_{ppA \rightarrow B}.$$

Ainsi, $W_{AB}(\vec{P}) = -\Delta E_{ppA \rightarrow B}$. Le **travail** d'une force traduit donc une **variation d'énergie**. Ces deux grandeurs sont exprimées dans la même unité.

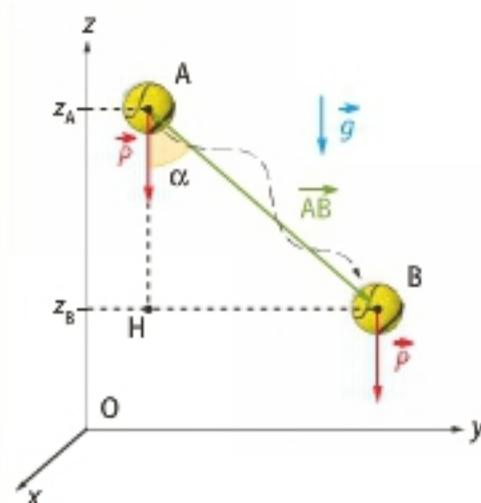


Fig. 3 Mouvement d'une balle de tennis.

Repère

Cette expression n'est valable que pour un déplacement suffisamment court à la surface de la Terre, afin que g soit constant.

● Force conservative

Une force est dite **conservative** lorsque le travail qu'elle produit est indépendant du chemin suivi par son point d'application. La force de pesanteur est donc conservative.

> **Activité 2**

↳ Exercices 6 à 9

3 Travail d'une force de frottement

Lorsqu'un solide est en mouvement sur un support ou au sein d'un fluide, il est soumis à une action mécanique de la part de ce dernier nommée **force de frottement** \vec{f} (Fig. 4 et 5). Dans le cas d'un contact avec le support, on appelle **réaction du support** la force \vec{R} modélisant l'action du support. Cette réaction peut être décomposée en ses composantes normale \vec{R}_n et tangentielle \vec{R}_t au support : $\vec{R}_t = \vec{f}$ (Fig. 5).

● Expression du travail

> **Activité 3**

Si un solide est soumis à une **force de frottement d'intensité constante** f (en N) constamment opposée à sa vitesse (Fig. 4 et 5), le **travail** de cette force, lors d'un déplacement est toujours **résistant** :

$$W_{AB}(\vec{f}) = \vec{f} \cdot \vec{AB} = f \cdot AB \cdot \cos \alpha = -f \cdot AB$$

\vec{f} et \vec{AB} sont colinéaires et de sens opposés ($\alpha = 180^\circ$).

● Force non conservative

> **Activité 3**

Une force de frottement est **non conservative**. Son sens, toujours contraire au mouvement, change avec celui du vecteur vitesse. Par conséquent, le travail qu'elle fournit dépend du chemin suivi par son point d'application.

↳ Exercices 10 à 14

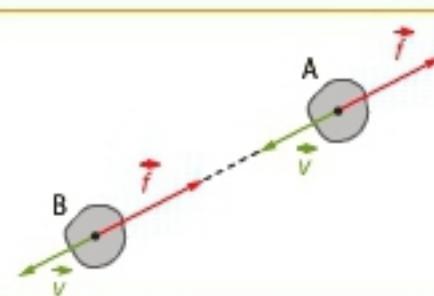


Fig. 4 Le travail de la force de frottement \vec{f} s'oppose au mouvement du solide.

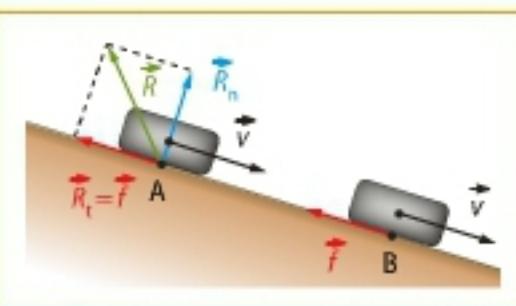


Fig. 5 Le travail de la réaction \vec{R} d'un support est réduit à celui de sa composante tangentielle \vec{R}_t ou force de frottement \vec{f} .

Les compétences à acquérir

1 Établir et exploiter l'expression du travail de la force électrique

- Lors du déplacement de A vers B d'une particule chargée dans un champ électrostatique uniforme, le **travail de la force électrique** \vec{F}_e a pour expression :

$$W_{AB}(\vec{F}_e) = \vec{F}_e \cdot \vec{AB} = |q| \cdot E \cdot AB \cdot \cos \alpha$$

avec q , charge électrique de la particule (en C) ; E , intensité du champ électrique (en $V \cdot m^{-1}$) ; AB , distance entre A et B (en m), α , angle (\vec{F}_e ; \vec{AB}). $W_{AB}(\vec{F}_e)$ s'exprime en J.

2 Établir et exploiter l'expression du travail de la force de pesanteur

- Le **travail de la force de pesanteur** \vec{P} exercée sur un corps se déplaçant de A vers B a pour expression :

$$W_{AB}(\vec{P}) = \vec{P} \cdot \vec{AB} = m \cdot g \cdot (z_A - z_B)$$

avec m , masse du corps (en kg) ; g , intensité du champ de pesanteur (en $m \cdot s^{-2}$) ; z_A et z_B , altitudes de A et B (en m).

- La force de pesanteur est **conservative**.

3 Établir l'expression du travail d'une force de frottement

- Le **travail d'une force de frottement** d'intensité constante f (en N), constamment opposée à la vitesse d'un solide se déplaçant de A vers B, est toujours résistant.

$$W_{AB}(\vec{f}) = \vec{f} \cdot \vec{AB} = -f \cdot AB$$

- Une force de frottement est **non conservative**.

Compétence 1

Établir et exploiter l'expression du travail de la force électrique

Données. Charge électrique élémentaire : $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$.
 $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$. Cette quantité représente l'énergie acquise par une charge e soumise à une tension de 1 V.

1 VRAI ou FAUX ?

Corriger, si nécessaire, les affirmations suivantes.

- Une force électrique fournit un travail dès que son point d'application se déplace.
- Le travail d'une force électrique s'exprime en joule si l'intensité de la force est exprimée en newton.
- Le travail d'une force électrique constante reste inchangé lorsque le déplacement de son point d'application est doublé et si l'intensité de cette force est divisée par deux.
- Ce travail est proportionnel à la charge électrique de la particule qui subit la force.

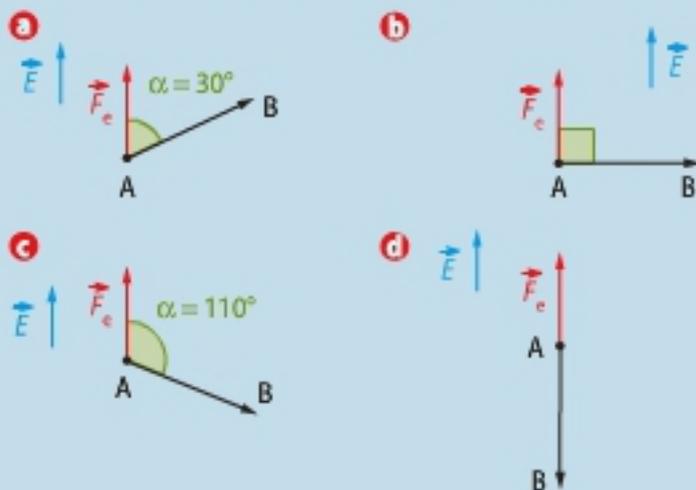
2 Le travail, une grandeur algébrique

- Écrire l'expression permettant de calculer la valeur du travail d'une force électrique \vec{F}_e constante lors du déplacement \vec{AB} de son point d'application.
 - Associer un schéma à cette expression.
 - Préciser la signification et l'unité de chaque terme.
 - Quel paramètre de l'expression en impose le signe ?
- Dans quel(s) cas le travail fournit est-il nul ? moteur ? résistant ? résistant et maximal ? moteur et maximal ?

EXERCICE RÉSOLU

3 Travail fourni à un proton

Dans les quatre situations ci-dessous, une force électrique \vec{F}_e constante, d'intensité $F_e = 2,5 \text{ N}$, s'exerce sur un proton en mouvement sur une distance $AB = 5,0 \text{ cm}$.



- Calculer, dans chaque cas, le travail de la force électrique.
- Indiquer quel qualificatif convient pour décrire ce travail.

Aides et méthodes

- Appliquer la définition du travail d'une force. Observer la valeur des angles avant de passer à l'application numérique. Si nécessaire, paramétrer la calculatrice en degré.
- Raisonnement à partir du signe du résultat obtenu ou de la valeur de l'angle.

Solution

1. $W_{AB}(\vec{F}_e) = \vec{F}_e \cdot \vec{AB} = F_e \cdot AB \cdot \cos \alpha$. L'usage de la calculatrice n'est pas nécessaire pour les applications numériques des cas **b** et **c**. On trouve :

a : $W_{AB}(\vec{F}_e) = 1,1 \times 10^{-1} \text{ J}$;

b : $W_{AB}(\vec{F}_e) = 0 \text{ J}$;

c : $W_{AB}(\vec{F}_e) = -4,3 \times 10^{-2} \text{ J}$;

d : $W_{AB}(\vec{F}_e) = -1,3 \times 10^{-1} \text{ J}$.

2. Le travail est nul en **b** ; moteur dans la situation **a** car $W_{AB}(\vec{F}_e) > 0$ ($0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$) ; résistant en **c** et **d** car $W_{AB}(\vec{F}_e) < 0$ ($90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$).

4 Travail fourni à un électron

On remplace la particule de l'exercice 3 par un électron. Le champ \vec{E} est identique.

- Schématiser les quatre situations alors obtenues.
- Donner l'expression du travail de la force électrique en fonction de e , E , AB et α .
- Dans quel(s) cas la valeur du travail change-t-elle par rapport au proton ? Justifier.
- Indiquer, le cas échéant, la nouvelle valeur et le qualificatif adapté.

5 Accélérateur de particules

Dans un accélérateur linéaire, un noyau d'hélium He^{2+} ($Z = 2$, $A = 4$) subit le travail moteur et maximal d'une force électrique constante \vec{F}_e . Il se déplace dans l'un des tubes de l'accélérateur, sur une longueur $\ell = 50 \text{ cm}$, sous l'action d'un champ électrique d'intensité $E = 400 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$.

- Établir l'expression du travail que fournit la force électrique \vec{F}_e lors du déplacement du noyau d'hélium.
 - Quelle est la valeur de l'angle entre \vec{F}_e et le déplacement ? Justifier.
 - Calculer la valeur du travail de la force électrique.
- Quelle est la valeur de la tension électrique U permettant de générer le champ \vec{E} ?
 - Exprimer, en eV, l'énergie acquise par le noyau accéléré.
 - Convertir cette énergie en joule.
- En déduire l'expression du travail de la force électrique en fonction de la charge q d'une particule et de la tension U à laquelle elle est soumise.
 - Le travail de la force électrique dépend-il du chemin suivi par son point d'application entre ses positions initiale et finale ? Justifier.

Compétence 2

Établir et exploiter l'expression du travail de la force de pesanteur

Donnée. Intensité du champ de pesanteur : $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

6 QCM

Indiquer la (ou les) bonne(s) réponse(s).

1 Le travail $W_{AB}(\vec{P})$ de la force de pesanteur \vec{P} lorsque son point d'application se déplace de A vers B, d'altitudes respectives z_A et z_B , s'écrit :

- a $W_{AB}(\vec{P}) = P \cdot AB$;
- b $W_{AB}(\vec{P}) = m \cdot g \cdot (z_B - z_A)$;
- c $W_{AB}(\vec{P}) = P \cdot AB \cdot \cos \alpha$;
- d $W_{AB}(\vec{P}) = P \cdot (z_A - z_B)$.

2 Ce travail est résistant lorsque :

- a l'altitude augmente ;
- b $z_B < z_A$;
- c \vec{P} et \vec{AB} sont de même sens ;
- d l'angle entre \vec{P} et \vec{AB} vaut 90° .

EXERCICE RÉSOLU

7 Direction de la force et déplacement

Le point d'application d'une force de pesanteur constante d'intensité $P = 250 \text{ N}$ subit un déplacement rectiligne $AB = \ell = 15,4 \text{ m}$.

1. Pourquoi ne peut-on pas affirmer que le travail qu'elle fournit vaut $W_{AB}(\vec{P}) = 3,85 \times 10^3 \text{ J}$?

2. a. Quel est l'angle α entre la direction de la force et celle du déplacement si $W_{AB}(\vec{P}) = 1,68 \times 10^3 \text{ J}$?

b. Représenter la situation sur un schéma, sans souci d'échelle.

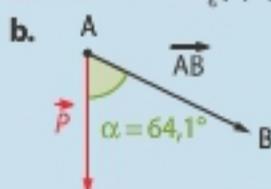
Aides et méthodes

1. Écrire l'expression littérale du travail d'une force et identifier les paramètres dont dépend sa valeur. Associer ensuite ces paramètres et les données de l'énoncé.
2. Appliquer la définition du travail du poids puis écrire l'expression littérale de $\cos \alpha$ en fonction de $W_{AB}(\vec{P})$, P et ℓ . Pour l'application numérique, s'assurer que la calculatrice est bien paramétrée en degrés.

Solution

1. $W_{AB}(\vec{P}) = F \cdot AB \cdot \cos \alpha$ soit, ici, $W_{AB}(\vec{P}) = P \cdot \ell \cdot \cos \alpha$. La valeur du travail fourni dépend de l'angle entre les vecteurs poids et déplacement. Il faut donc le préciser.

2. a. $\cos \alpha = W_{AB}(\vec{P}) / (P \cdot \ell) = 0,436$. Soit $\alpha = 64,1^\circ$.



8 La naissance d'une grandeur

Histoire des sciences

C'est en étudiant la chute libre de différents corps dans l'air que le savant allemand Gottfried Wilhelm Leibniz s'intéressa à l'effet d'une force. Il remarqua qu'un corps d'une livre lâché d'une hauteur de quatre aunes produisait le même effet qu'un corps de quatre livres lâché d'une hauteur d'une aune. Il en conclut que l'effet produit par une force pouvait être caractérisé par une grandeur homogène au produit d'une force et d'une longueur.

1. **B2i** En effectuant une recherche sur Internet :

- a. dater les travaux de Leibniz ;
- b. définir les termes « aune » et « livre ».

2. a. Quelle grandeur est aujourd'hui associée à l'effet d'une force ?

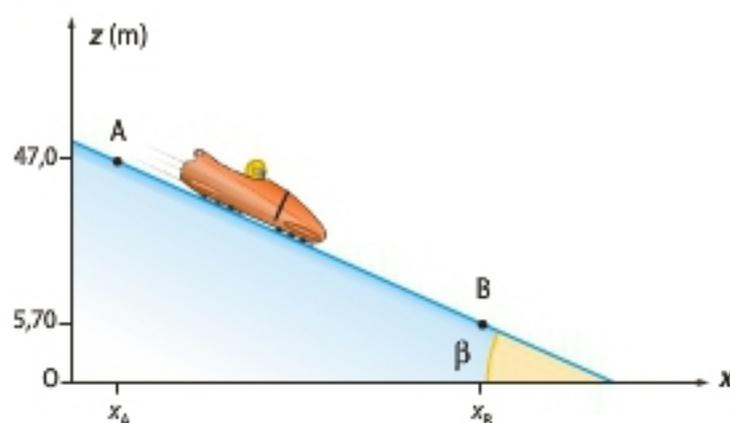
b. À quelle condition la conclusion de Leibniz est-elle valable ?

c. Exprimer le travail produit par la force mise en jeu en fonction des données du texte

d. Calculer sa valeur pour chacune des chutes évoquées.

9 Expressions du travail

Un bobsleigh de masse $m = 450 \text{ kg}$ dévale une piste rectiligne, inclinée d'un angle $\beta = 16,0^\circ$ avec l'horizontale, sur une longueur $L = 150 \text{ m}$. Le mouvement est étudié dans un repère $(O ; x, z)$.



1. Reproduire le schéma et représenter la force de pesanteur exercée sur le bobsleigh.

2. α désigne l'angle entre les vecteurs force et déplacement.

a. Exprimer α en fonction de β .

b. Établir, en fonction de β , l'expression du travail de cette force lors du déplacement \vec{AB} de son point d'application.

c. En déduire sa valeur.

d. S'agit-il d'un travail moteur, résistant ou nul ? Justifier.

3. a. Exprimer la variation de hauteur, notée AH , en fonction de AB et α ; puis en fonction des altitudes z_A et z_B .

b. En déduire une autre expression de $W_{AB}(\vec{P})$.

c. Vérifier cette expression en effectuant l'application numérique.

4. Quelle expression met en évidence que le travail de la force de pesanteur est indépendant du chemin suivi par son point d'application ? Justifier.

Compétence 3

➤ **Établir l'expression du travail d'une force de frottement constante**

10 QCM

Indiquer la (ou les) bonne(s) réponse(s).

Le travail $W_{AB}(\vec{f})$ d'une force de frottement \vec{f} , constante lors d'un déplacement AB de son point d'application...

1 a pour expression :

- a** $-\vec{f} \cdot \overline{AB}$; **b** $f \cdot AB \cdot \cos \alpha$;
c $-f \cdot AB$; **d** $f \cdot (z_A - z_B)$.

(α est l'angle entre \vec{f} et \overline{AB} , z_A et z_B les altitudes de A et B).

2 est toujours :

- a** résistant; **b** moteur;
c nul; **d** maximal.

3 **a** dépend du chemin suivi entre A et B;

b ne dépend pas du chemin suivi entre A et B.

11 Palet

Un palet glisse rectilignement d'un bout à l'autre d'une table plane et horizontale de longueur $\ell = 2,50$ m. Les frottements de l'air sont négligés, tandis que ceux dus à l'action de la table sont constants, d'intensité $f = 3,0$ N.

1. Sur un schéma et sans souci d'échelle, représenter :

- a.** le vecteur vitesse du palet;
b. la force de frottement \vec{f} due à l'action de la table.

2. Peut-on affirmer que le travail de la force \vec{f} vaut $W_f(\vec{f}) = -7,5$ J ? Justifier la réponse.

12 Retour d'une sonde spatiale

Lors de son retour dans l'atmosphère, une sonde spatiale décrit, après l'ouverture de son parachute, un mouvement vertical et uniforme.

1. Représenter sur un schéma de la situation, sans souci d'échelle :

- a.** le vecteur vitesse de la sonde;
b. la force de frottement \vec{f}_{air} due à la résistance de l'air.



2. **a.** Le travail de cette force de frottement est-il moteur, résistant, nul ou maximal ? Justifier.

b. Donner l'expression du travail de cette force lors d'un déplacement rectiligne de longueur AB.

3. La vitesse de descente v de la sonde vaut $35 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

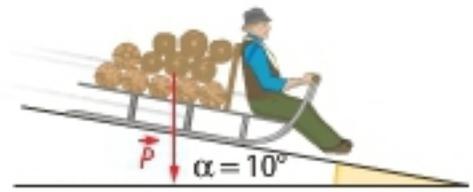
a. Quelle distance parcourt-elle pendant la dernière minute de sa chute ?

b. Écrire l'expression du travail $W_{AB}(\vec{f}_{\text{air}})$ en fonction de la vitesse v de la sonde et de la durée de sa chute Δt .

c. Calculer sa valeur pendant cette dernière minute de chute, sachant que $f_{\text{air}} = 2,3$ kN. Le résultat est-il en accord avec la réponse à la question 2.a ?

13 Le schlittage

Un bûcheron descend à vitesse constante un chargement de bois de masse m sur une piste rectiligne de longueur ℓ et inclinée. La résistance de l'air est négligée.



1. **a.** Quelle relation existe-t-il entre la force de pesanteur \vec{P} et la force de réaction \vec{R} de la piste ? Justifier la réponse.

b. Représenter la réaction \vec{R} sur un schéma.

2. **a.** Faire apparaître les composantes normale \vec{R}_n et tangentielle \vec{R}_t de la force de réaction.

b. Quelle composante empêche le mobile de pénétrer dans la piste ? Que représente l'autre composante ?

3. Lors du déplacement ℓ , écrire l'expression du travail de :

- a.** la force de réaction \vec{R} ;
b. la composante normale \vec{R}_n ;
c. la force de frottement \vec{f} exercée par la piste.

4. **a.** En déduire à quel travail se réduit le travail de la force de réaction d'un support.

b. En l'absence de frottement, que peut-on dire du travail de la réaction d'un support ?

14 Différents frottements

La figure ci-dessous présente trois des forces exercées sur un scooter des neiges en mouvement. La force \vec{R}_1 est exercée par la piste sur les skis ; la force motrice \vec{R}_2 par la piste sur la chaîne en rotation ; la force \vec{f}_{air} est due à la résistance de l'air.



1. Schématiser la situation en représentant, à l'aide de projections, la force de frottement \vec{f}_1 exercée par la piste sur les skis et la force de frottement \vec{f}_2 exercée par la piste sur la chaîne.

2. **a.** Lors du déplacement du scooter, quel est le signe du travail des forces \vec{f}_1 , \vec{f}_2 et \vec{f}_{air} ?

b. Justifier le terme « motrice » utilisée pour la force \vec{R}_2 .

3. La chaîne est remplacée par une roue en mouvement de rotation. Que peut-on dire du travail de la force \vec{f}_2 lors d'un déplacement du véhicule ? Justifier.

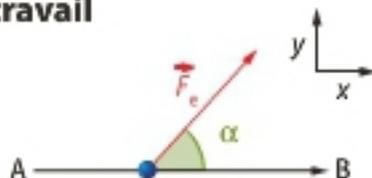
Exercices de synthèse

Pour préparer le **BAC**

Donnée. Intensité du champ de pesanteur : $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.
Charge élémentaire : $e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$.

15 Établir l'expression du travail

Dans la situation suivante, la force électrique \vec{F}_e est exercée sur une particule se déplaçant de A en B.



- Donner, en fonction de l'angle α , l'expression du travail de la force \vec{F}_e lors de ce déplacement.
- Tracer les composantes \vec{F}_x et \vec{F}_y de \vec{F}_e selon les deux axes perpendiculaires (x) et (y).
 - Exprimer F_x et F_y en fonction de F_e et de l'angle α .
 - Quelle composante favorise le mouvement ? Justifier.
 - En déduire l'expression du travail de \vec{F}_x et \vec{F}_y .
- Comparer les expressions de $W_{AB}(\vec{F}_e)$, $W_{AB}(\vec{F}_x)$ et $W_{AB}(\vec{F}_y)$. Conclure.

16 Flight of a paraglider



A paraglider jumps from the top of Puy Mary at an altitude of $z_1 = 1,520 \text{ m}$ for a flight of an altitude difference of $h = 506 \text{ m}$. The mass of the paraglider and their material is $m = 82,5 \text{ kg}$.

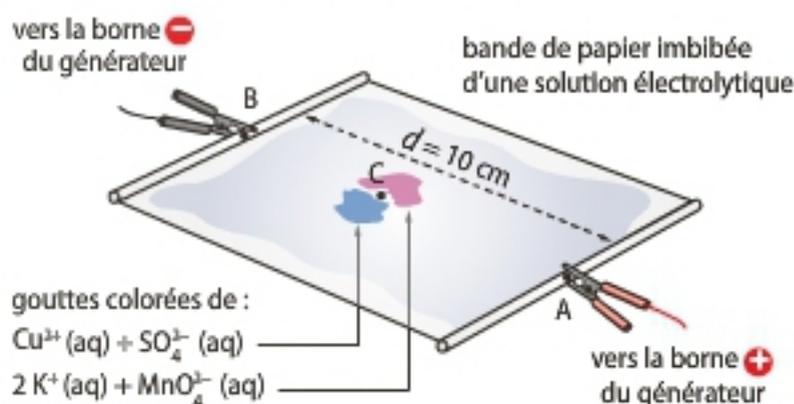
- Give the expression of the work of the force of gravity using the data of the above statement. Calculate its value.

During the flight, carried by an ascending airstream, the paraglider reaches an altitude $z = 1,753 \text{ m}$ before gliding down.

- Is the work of the force of gravity during this displacement modified? Justify your answer.
- Is the same answer applicable to the work of the forces of friction of the air?

17 Migration d'ions sur une plaque

On réalise l'expérience schématisée ci-dessous.



Les extrémités A et B de la bande de papier sont reliées aux bornes d'un générateur délivrant une tension continue $U_{AB} = 20 \text{ V}$ pendant plusieurs minutes. Les taches se déplacent rectilignement depuis le centre C jusqu'aux points A et B.

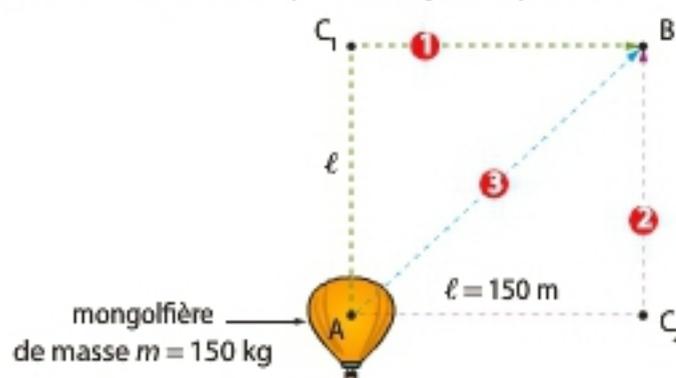
- Représenter la bande de papier en fin d'expérience et faire apparaître :
 - le champ électrique \vec{E} régnant sur la bande de papier ;

- la force électrique qui modélise l'action exercée sur un ion Cu^{2+} (présent dans la solution bleue) et celle qui modélise l'action exercée sur un ion MnO_4^{2-} (présent dans la solution mauve).

- En s'aidant des unités utilisées, proposer une relation entre E , U_{AB} et $d = AB$. En déduire l'intensité E du champ électrique.
 - Pour chaque ion coloré, écrire l'expression du travail de la force électrique en fonction de leur charge q , de E et de AB .
 - Calculer leur valeur.
 - Le travail est-il moteur ou résistant ?
- L'ion potassium K^+ incolore subit le même déplacement CB. Le travail de la force électrique est-il identique ? Justifier.

18 Quel déplacement choisir ?

Lors d'un vol en montgolfière, différents trajets permettent d'atteindre l'altitude d'un point B depuis le point A.



- Entre quels points A, B, C_1 et C_2 la force de pesanteur fournit-elle un travail résistant ? un travail nul ? Justifier.
- Donner, pour chaque trajet parmi ①, ② et ③, l'expression du travail de la force de pesanteur en fonction de ℓ .
 - Calculer leur valeur.
 - Le travail de la force de pesanteur dépend-il du chemin suivi par son point d'application ?
 - En déduire une expression générale pour un déplacement AB.
- Que vaudrait le travail de la force de pesanteur pour :
 - un déplacement de B vers A ?
 - un aller-retour de A à B ?

19 Saut en parachute

Un parachutiste de masse $m = 75 \text{ kg}$ effectue un saut depuis un avion situé à $3\,000 \text{ m}$ d'altitude. Après une phase de chute libre, il ouvre son parachute à 800 m d'altitude puis termine la descente par un mouvement rectiligne et uniforme.

- Représenter sur un schéma les forces exercées sur le parachutiste après l'ouverture de son parachute.
 - Calculer le travail de la force de pesanteur au cours de cette seconde phase.
 - En déduire la valeur du travail des forces de frottement.
- Pourquoi ne peut-on pas calculer le travail des forces de frottement de l'air avant l'ouverture du parachute ?

20 Ski de vitesse

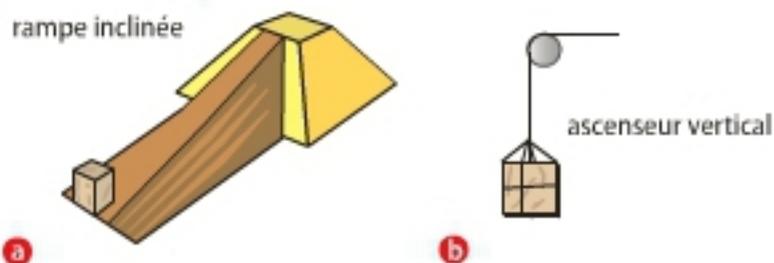
Un skieur équipé, de masse $m = 72,5 \text{ kg}$, glisse à vitesse constante sur une piste rectiligne de longueur $\ell = 740 \text{ m}$, inclinée d'un angle $\alpha = 48,6^\circ$ par rapport à l'horizontale.

Exercices

- Quelle donnée de l'énoncé permet d'affirmer la présence de frottement entre les skis et la piste ?
 - Quelle relation existe entre les intensités du poids \vec{P} du skieur et de la réaction \vec{R} de piste ? Justifier.
 - Reproduire le schéma et représenter les forces \vec{P} et \vec{R} . Préciser l'échelle utilisée.
- Calculer le travail de la force \vec{P} lors de la descente.
 - En déduire le travail de la réaction \vec{R} .
- Tracer sur le schéma les composantes normale \vec{R}_n et tangentielle \vec{R}_t de la réaction \vec{R} de la piste.
 - Quelle composante est la force de frottement \vec{f} de la piste ?
 - Exprimer son travail lors du déplacement, en fonction de P et α , puis calculer sa valeur.
 - Le résultat obtenu était-il prévisible ? Justifier.

21 La construction de la Grande Pyramide

La construction de la pyramide de Khéops (vers 2 500 av. J.-C.) a nécessité l'élevage de blocs de calcaire de plusieurs tonnes jusqu'à des hauteurs atteignant parfois plus de 100 mètres. Selon l'hypothèse la plus connue, les Égyptiens firent glisser les blocs à l'aide de rampes inclinées **a** ; des rouleaux intercalés entre le bloc et le sol rendant les frottements négligeables. Une autre hypothèse envisage le recours à un système de levage vertical **b**.

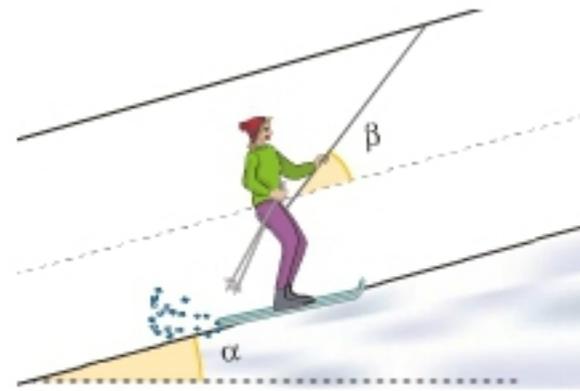


Un bloc de masse $m = 2,50 \text{ t}$ est élevé, à vitesse constante, d'une hauteur $h = 20 \text{ m}$. Dans le cas **a**, le plan est incliné d'un angle $\alpha = 25^\circ$ par rapport à l'horizontale.

- Pour chacune des deux hypothèses, représenter sur un schéma (sans souci d'échelle) les forces qui modélisent les actions mécaniques agissant sur le bloc.
- Calculer, dans les deux cas, la valeur minimale T de la force de traction qui doit être exercée.
 - Combien d'hommes, exerçant chacun une force de 900 N , seraient nécessaires pour soulever le bloc ?
- Dans chaque cas, exprimer le travail de la force de traction en fonction de T puis calculer sa valeur.
- Quel est l'intérêt que présente chaque technique ?
 - Peut-on alors privilégier une des hypothèses ?
- B26** En effectuant éventuellement une recherche sur Internet, expliquer quelle hypothèse est aujourd'hui privilégiée.

22 Remonte-pente

Un skieur alpin est tracté à vitesse constante sur une piste rectiligne et inclinée. Les frottements exercés par la piste sont modélisés par une force unique \vec{f} et la traction de la perche par la force \vec{T} .

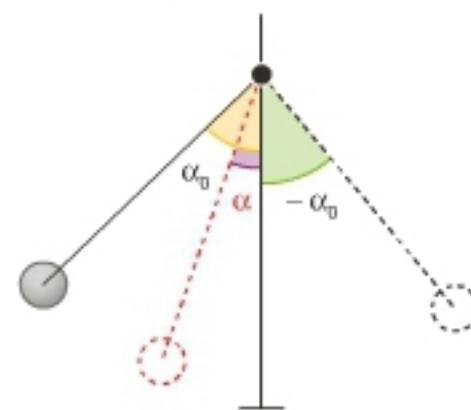


Données. Masse du skieur : $m_{\text{skieur}} = 85,5 \text{ kg}$.
Vitesse de la remontée : $v = 8,0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.
Longueur de la remontée : $L = 300 \text{ m}$.
 $\alpha = 22^\circ$; $\beta = 30^\circ$, $T = 430 \text{ N}$.

- Effectuer le bilan des forces qui modélisent les actions mécaniques agissant sur le skieur, puis les représenter sur un schéma.
 - Que peut-on dire de la résultante de ces forces ?
 - En déduire la valeur du travail de la résultante des forces.
- Comment qualifier le travail (moteur, résistant, nul, maximal) associé à chaque force ?
- Déterminer la différence d'altitude entre les deux extrémités de la piste.
 - Établir l'expression littérale du travail de chaque force, puis calculer sa valeur.
 - En déduire l'intensité de la force de frottement \vec{f} .

23 ★ Le pendule simple

On écarte un pendule de sa position d'équilibre d'un angle $\alpha_0 = 40^\circ$ et on le lâche sans vitesse initiale.

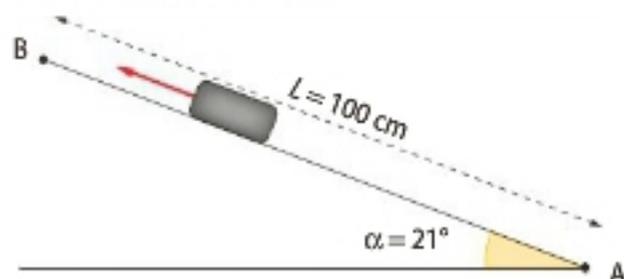


Données. Masse du pendule : $m = 200 \text{ g}$.
Longueur du pendule : $L = 50 \text{ cm}$.
Les frottements sont négligeables.

- Établir l'expression du travail de la force de pesanteur lorsque le pendule passe de la position $\alpha = \alpha_0$ à une position α comprise entre α_0 et 0° .
 - Quel est le signe du travail fourni lors de ce déplacement ? Est-il moteur, résistant ou nul ?
 - Calculer sa valeur pour $\alpha = 0^\circ$.
- Calculer le travail de la force de pesanteur lorsque le pendule passe de la position $\alpha = 0^\circ$ à la position $\alpha = -\alpha_0$.
 - Que peut-on dire du travail fourni au cours d'une oscillation ?
- Que dire du travail de la force exercée par le fil sur la sphère ?

24 ★ Travail et énergie

Un palet de masse $m = 63,2 \text{ g}$ et de largeur $\ell = 5,0 \text{ cm}$ est lancé d'un point A, avec une vitesse initiale $v_A = 3,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, sur un plan incliné. Il arrive en B, où il occulte un faisceau de lumière pendant une durée $\Delta t = 35,7 \text{ ms}$.



- Calculer la variation d'énergie cinétique ΔE_c entre A et B.
- Calculer le travail du poids lors du déplacement AB.
- Comparer les deux résultats précédents.
 - En utilisant les données de l'énoncé, indiquer ce que l'on peut dire des forces de frottement.

25 ★ L'énergie des skieurs

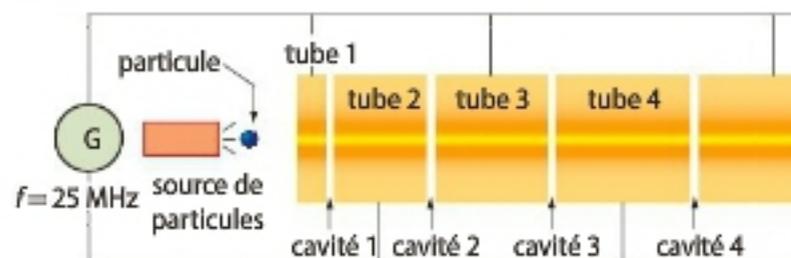
Un snowboarder et un skieur équipé de miniskis (de même masse $m = 75,0 \text{ kg}$) s'élancent sans vitesse initiale du sommet A d'une piste rectiligne, présentant un dénivelé $h = 15,0 \text{ m}$.

- L'origine O des altitudes étant choisie au bas de la piste, quelle est l'énergie potentielle de pesanteur des deux sportifs au sommet de la piste ?
- En supposant les frottements sur le snowboarder négligeables, déterminer son énergie cinétique, puis sa vitesse en bas de la piste.
 - En déduire la variation d'énergie cinétique ΔE_c .
 - Que peut-on dire de l'énergie mécanique du snowboarder ?
- Faire le bilan des forces qui modélisent les actions mécaniques agissant sur le snowboarder, puis les représenter sur un schéma.
 - Donner les expressions littérales, puis les valeurs des travaux des forces mises en jeu.
 - Écrire une relation entre le travail de la force de pesanteur et la variation d'énergie potentielle ΔE_{pp} du snowboarder.
 - Comparer la somme des travaux des forces appliquées au snowboarder et ΔE_c . Que peut-on en conclure ?
- Les frottements entre les miniskis, de surface plus faible que la planche de snowboard, et la piste ne sont pas négligeables. Que peut-on dire alors :
 - de l'énergie mécanique du skieur lors de la descente ?
 - de la variation de son énergie cinétique ?
- Le skieur atteint en bas de piste la vitesse $v = 40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. En utilisant la conclusion établie en 3.d, exprimer le travail fourni par les forces de frottement \vec{f} en fonction de :
 - ΔE_c et du travail de la force de pesanteur ;
 - v, m, g et h , puis calculer sa valeur.
- Déterminer la variation d'énergie mécanique du skieur. Que constate-t-on ?
- Que peut-on conclure de cette étude ?

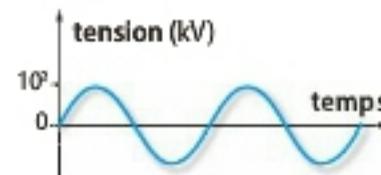
En route vers le Supérieur

26 ★★ De l'énergie pour les particules

Les accélérateurs linéaires sont constitués d'une succession de tubes disposés en ligne droite et placés sous vide. Les tubes sont alternativement chargés positivement et négativement pour qu'une particule chargée, en passant d'un tube au suivant, soit soumise à un champ électrique accélérateur. Pour que l'accélération soit efficace, les particules traversent les cavités entre les tubes quand le champ électrique est maximal. En revanche, le champ électrique est nul à l'intérieur d'un tube.

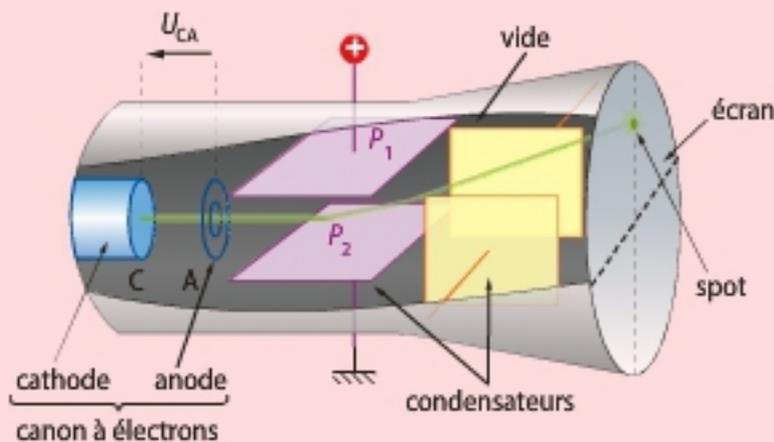


- Quel est le rôle du générateur de tension alternatif ?
- À l'instant t_1 , un proton se présente à la sortie du tube 1 devant la première cavité accélératrice de longueur $L = 2,0 \text{ cm}$. Sa vitesse est négligeable et orientée selon l'axe des tubes.
 - Reproduire le schéma ci-dessus et situer y la particule.
 - Quel doit être, à cet instant, le signe des charges électriques portées par les tubes 1 et 2 ?
 - En déduire le signe des bornes du générateur de tension et repérer l'instant t_1 sur le graphe de la tension ci-contre.
- Représenter le champ électrique \vec{E} au sein de la première cavité et la force électrique \vec{F}_e exercée sur le proton.
 - Calculer son intensité F_e .
 - Justifier le fait que le travail de la force électrique soit moteur et maximal, puis calculer sa valeur.
 - Sachant que $\Delta E_c = W(\vec{F}_e)$, déterminer la vitesse acquise par la particule.
- La particule arrive, à l'instant t_2 , à la sortie du tube 2 devant une nouvelle cavité accélératrice.
 - Quel est, à cet instant, le signe des bornes du générateur ?
 - Repérer l'instant t_2 sur le graphe.
 - Exprimer, en fonction de la période T de la tension, la durée du trajet du proton dans le tube 1. Donner sa valeur.
 - En déduire la longueur du tube.
- Pourquoi les tubes sont-ils de plus en plus longs ?
 - Pour n tubes, montrer que l'énergie cinétique acquise par les particules vaut $E_c = n \cdot e \cdot U_G$.
 - Calculer E_c en J, puis en eV, pour $n = 12$.
 - Comparer alors la vitesse acquise par le proton à celle de la lumière dans le vide. Justifier la taille des accélérateurs permettant d'approcher la célérité de la lumière.
- Quelle conséquence sur l'accélération pourrait avoir :
 - une modification de la longueur des cavités ?
 - un décalage de l'instant t_1 d'un quart de période ?



Fonctionnement d'un oscilloscope

Un oscilloscope est constitué d'un tube cathodique : un canon y produit des électrons, de masse m , puis les accélère. Ces électrons sont émis à la cathode C avec une vitesse v_C négligeable. Une tension électrique U_{CA} établie entre deux armatures verticales les accélère jusqu'à l'anode A, où ils ont alors pour vitesse v_A . Un deuxième condensateur, constitué de plaques horizontales P_1 et P_2 entre lesquelles règne un champ électrique \vec{E} , permet ensuite une déviation verticale des électrons. Un dernier condensateur assure la déviation horizontale des électrons, dont les impacts sur un écran fluorescent laissent une trace lumineuse.



Données. $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$; $m = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$; $U_{CA} = -1,8 \text{ kV}$; $E = 8,2 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$.

- Représenter, sur un schéma simplifié et sans souci d'échelle, le champ électrique \vec{E}_1 régnant dans le condensateur plan CA et la force électrique \vec{F}_e modélisant l'action mécanique exercée sur un électron. Indiquer le signe des charges électriques portées par chaque armature C et A.
 - Écrire l'expression littérale du travail $W_{CA}(\vec{F}_e)$ produit par la force électrique \vec{F}_e constante exercée sur un électron lors de son trajet entre C et A. On rappelle que $\vec{E}_1 \cdot \vec{CA} = U_{CA}$.
 - Quel type de travail fournit \vec{F}_e pour permettre l'accélération de l'électron ?
 - En déduire que la tension U_{CA} appliquée doit bien être négative.
 - Calculer la valeur du travail $W_{CA}(\vec{F}_e)$.
 - En A, à la sortie du canon, l'énergie cinétique acquise par l'électron est égale au travail $W_{CA}(\vec{F}_e)$. En déduire par le calcul la valeur de v_A .
- Représenter sur un schéma, sans souci d'échelle, les forces modélisant les actions mécaniques agissant sur un électron en mouvement entre P_1 et P_2 .
 - Proposer une expression du travail $W_e(\vec{F}_e)$ de la force électrique \vec{F}_e exercée sur l'électron lors de son déplacement entre ces plaques.

La compétence évaluée

- Établir et exploiter l'expression du travail de la force électrique.

Coups de pouce

- L'électron est une particule portant une charge $q < 0$.
- e. L'énergie cinétique d'une particule dépend de sa masse et de sa vitesse.
- Observer sur la figure de l'énoncé le sens de la déviation subie par le faisceau d'électrons et le signe des charges portées par P_1 et P_2 .
 - Repérer et nommer sur le schéma la position de l'électron lorsqu'il quitte le condensateur $P_1 P_2$.

EXEMPLE DE RÉOLUTION

- Par définition, le travail $W_{CA}(\vec{F}_e)$ s'écrit :

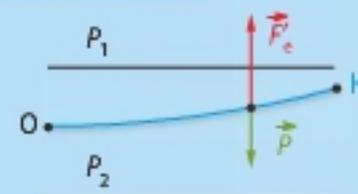
$$W_{CA}(\vec{F}_e) = \vec{F}_e \cdot \vec{CA} = q \cdot \vec{E}_1 \cdot \vec{CA} = -e \cdot U_{CA}$$
 - Le travail doit être moteur et maximal.
 - $W_{CA}(\vec{F}_e) > 0$ donc $-e \cdot U_{CA} > 0$ et $U_{CA} < 0$.
 - $W_{CA}(\vec{F}_e) = -1,6 \times 10^{-19} \times (-1,8 \times 10^3)$

$$W_{CA}(\vec{F}_e) = 2,9 \times 10^{-16} \text{ J}$$

e. D'après l'énoncé : $E_{cin} = W_{CA}(\vec{F}_e)$,
 soit $(1/2)m \cdot v_A^2 = -e \cdot U_{CA}$ donc $v_A = (-2e \cdot U_{CA}/m)^{1/2}$.

A.N. : $v_A = 2,5 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

3. a.



b. On note O le point d'entrée et H le point de sortie de l'électron du condensateur.

$W_e(\vec{F}_e) = e \cdot E \cdot OH \cdot \cos \alpha$, où α désigne l'angle $(\vec{F}_e; \vec{OH})$.

Viscosité d'une huile moteur

La viscosité est une grandeur qui mesure la capacité d'un fluide à résister à l'écoulement. Dans les moteurs à combustion, on minimise ainsi le travail des frottements entre les pièces mécaniques en utilisant des huiles de viscosité élevée. Pour déterminer expérimentalement la viscosité η (en $\text{Pa} \cdot \text{s}$) d'une huile moteur, on filme la chute verticale d'une bille métallique, lâchée sans vitesse initiale, dans une éprouvette remplie de cette huile. Lors de sa chute, la bille est soumise à l'action de la Terre (la force de pesanteur \vec{P}) et aux actions du fluide : la poussée d'Archimède $\vec{\Pi}$ et la force de frottement fluide \vec{f} . Sa position, étudiée dans le référentiel du laboratoire, est repérée sur un axe (Oz) vertical. L'exploitation du film permet d'obtenir les variations de sa vitesse v et de sa position z en fonction du temps.



Les compétences évaluées

- Établir et exploiter l'expression du travail de la force de pesanteur.
- Établir l'expression du travail d'une force de frottement.

Données. $\vec{f} = -k \cdot \vec{v}_G$ où \vec{v}_G est la vitesse du centre d'inertie de la bille et k , le coefficient de frottement.

$\vec{\Pi}$ est opposée à la force de pesanteur et son intensité est égale au poids du volume de fluide déplacé : $\vec{\Pi} = -\rho_{\text{huile}} \cdot V_{\text{bille}} \cdot \vec{g}$.

$\rho_{\text{huile}} = 0,910 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; $m_{\text{bille}} = 6,20 \text{ g}$; $V_{\text{bille}} = 0,692 \text{ cm}^3$; $R_{\text{bille}} = 0,55 \text{ cm}$; $g : 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

- Représenter sur un schéma, sans souci d'échelle, les forces qui modélisent les actions mécaniques agissant sur la bille en chute verticale dans l'huile.
 - Faire apparaître l'axe (Oz) , l'origine O et le vecteur vitesse \vec{v}_G .
- Relever la valeur de la vitesse limite atteinte par la bille sur le graphique.
 - Entre quelles positions z_A et z_B la force \vec{f} est-elle constante ? Justifier.
- Écrire l'expression du travail $W_{AB}(\vec{f})$ de la force de frottement \vec{f} , constante lors de la chute AB de la bille, en fonction de k , v_G , z_A et z_B .
 - Lors de la chute entre les points A et B , exprimer puis calculer le travail de la force de pesanteur $W_{AB}(\vec{P})$ et le travail de la poussée d'Archimède $W_{AB}(\vec{\Pi})$.
- Le travail résistant de la poussée d'Archimède est-il négligeable ?
- Déduire d'une des lois de Newton l'expression de $W_{AB}(\vec{f})$ en fonction de $W_{AB}(\vec{P})$ et $W_{AB}(\vec{\Pi})$. En déduire la valeur de $W_{AB}(\vec{f})$.
- Pour des vitesses faibles, la formule de Stokes énonce que : $\vec{f} = -6\Pi \cdot \eta \cdot R_{\text{bille}} \cdot \vec{v}_G$. Calculer la viscosité η de l'huile étudiée.

➤ Coups de pouce

- Les forces appliquées à la bille sont données dans l'énoncé, le sens de la poussée d'Archimède figure en données.
 - D'après le graphique, les positions z de la bille en chute verticale sont positives et croissent au cours du temps.
- L'intensité de la force de frottement dépend de la vitesse v_G de la bille.
- L'étude est réalisée dans le référentiel terrestre considéré comme galiléen et le mouvement du centre d'inertie de la bille est rectiligne et uniforme.
- Comparer les deux expressions données de \vec{f} pour déterminer une expression littérale de η .

EXEMPLE DE RÉOLUTION

1. a. et b.



2. a. On mesure graphiquement : $v_{\text{limite}} = 0,75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

b. De $z_A = 33,0 \text{ cm}$ à $z_B = 58,0 \text{ cm}$, $v_G = v_{\text{limite}}$. De plus, direction et sens du mouvement ne changent pas.

$\vec{f} = -k \cdot \vec{v}_G$ est donc une force constante entre z_A et z_B .

3. a. $W_{AB}(\vec{f}) = \vec{f} \cdot \vec{AB} = -k \cdot v_G \cdot AB = -k \cdot v_G \cdot (z_B - z_A)$.

b. $W_{AB}(\vec{P}) = \vec{P} \cdot \vec{AB} = m \cdot g \cdot (z_B - z_A)$.

$W_{AB}(\vec{\Pi}) = \vec{\Pi} \cdot \vec{AB} = -\rho_{\text{huile}} \cdot V_{\text{bille}} \cdot g \cdot (z_B - z_A)$.

A.N. : $W_{AB}(\vec{P}) = 6,20 \times 10^{-3} \times 9,81 \times (58,0 - 33,0) \times 10^{-2}$.

$$W_{AB}(\vec{P}) = 1,52 \times 10^{-2} \text{ J}$$

$W_{AB}(\vec{\Pi}) = -0,910 \times 0,692 \times 10^{-3} \times 9,81 \times (58,0 - 33,0) \times 10^{-2}$.

$$W_{AB}(\vec{\Pi}) = -1,54 \times 10^{-3} \text{ J}$$

c. $W_{AB}(\vec{P}) / |W_{AB}(\vec{\Pi})| = 10$. Il convient donc ici de ne pas négliger le travail de la poussée d'Archimède.

4. Dans le référentiel du laboratoire, considéré comme galiléen, on déduit de la première loi de Newton que : $\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{\Pi} + \vec{f} + \vec{P} = \vec{0}$. Les trois forces sont colinéaires au déplacement \vec{AB} , donc $W(\sum \vec{F}_{\text{ext}}) = \sum W(\vec{F}_{\text{ext}}) = 0$.

$W_{AB}(\vec{\Pi}) + W_{AB}(\vec{f}) + W_{AB}(\vec{P}) = 0$.

donc $W_{AB}(\vec{f}) = -W_{AB}(\vec{P}) - W_{AB}(\vec{\Pi})$.

$$\text{A.N. : } W_{AB}(\vec{f}) = -1,37 \times 10^{-2} \text{ J}$$

5. a. $k = 6\Pi \cdot \eta \cdot R_{\text{bille}}$ et, d'après la question 3.a,

$k = -W_{AB}(\vec{f}) / (v_G \cdot (z_B - z_A))$. Donc :

$\eta = -W_{AB}(\vec{f}) / (6\Pi \cdot R_{\text{bille}} \cdot v_G \cdot (z_B - z_A))$.

$$\text{A.N. : } \eta = 0,705 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$