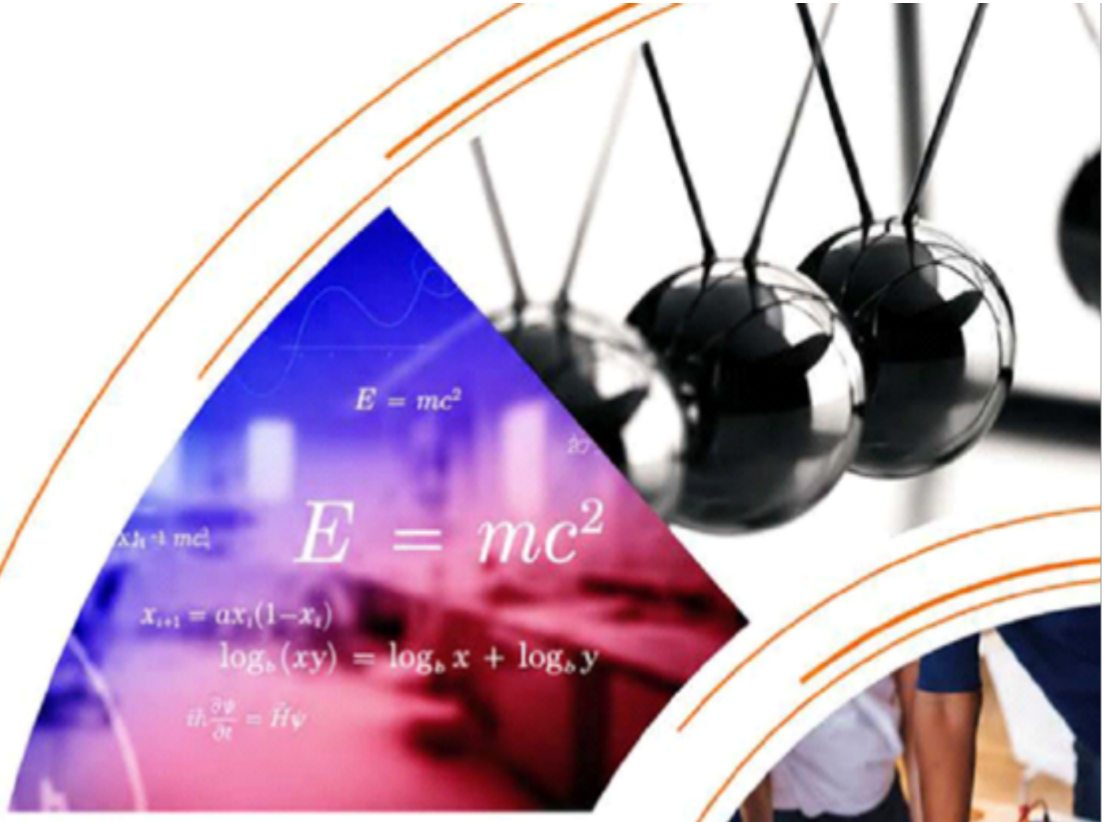
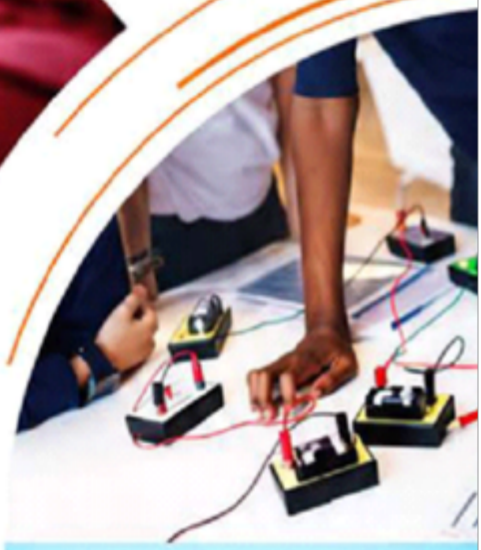
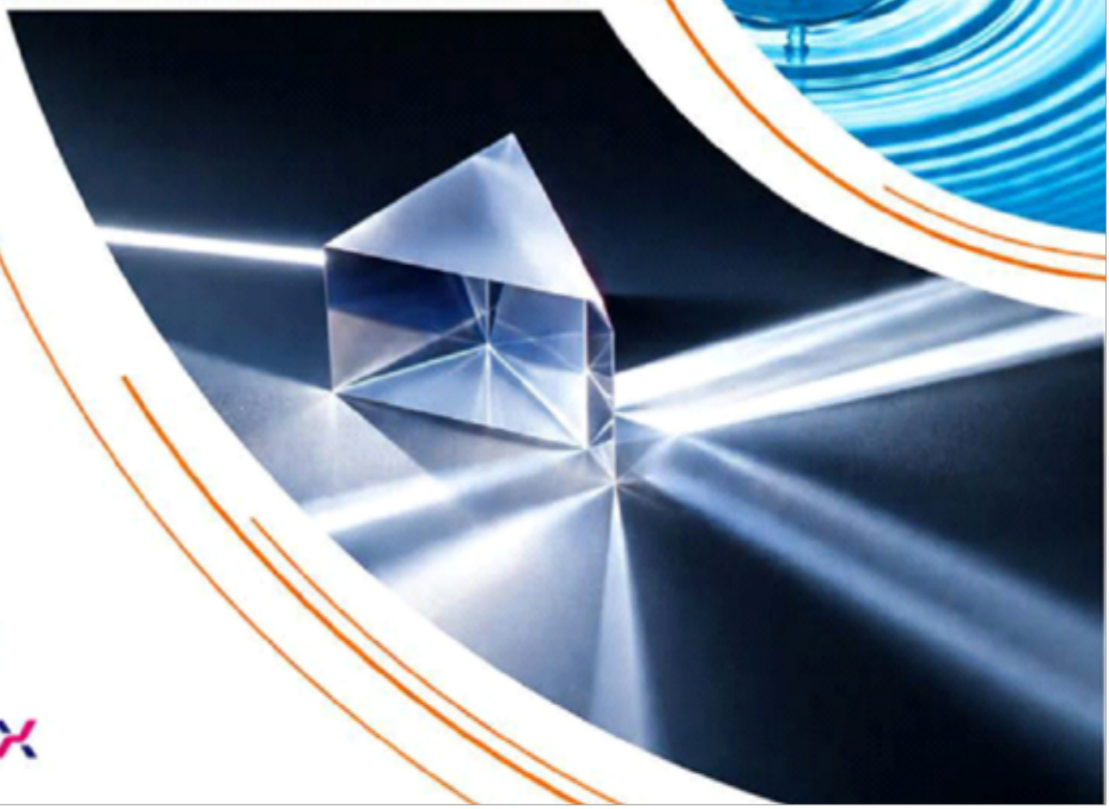






Physique

partie 1



2ème Année

SPRIX

Physique

Baccalauréat Égyptien 2éme année

Le Baccalauréat International ™ a examiné les approches pédagogiques et d'évaluation qui sous-tendent ce manuel.

© 2026 Ministère de l'Éducation et de l'Enseignement technique

Tous droits réservés.

Les droits d'auteur et la responsabilité du contenu de ce manuel restent la propriété du Ministère de l'Éducation et de l'Enseignement technique.

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, stockée dans un système de recherche documentaire, ni transmise sous quelque forme ou par quelque moyen que ce soit — électronique, mécanique, par photocopie, enregistrement ou autre — sans l'autorisation écrite préalable des détenteurs des droits d'auteur.

Ministère de l'Éducation et de l'Enseignement technique

Nouvelle capitale administrative

Le Caire, Égypte

Introduction

La physique est la recherche du plus petit nombre d'idées qui expliquent le plus grand nombre de choses. Un ferry traversant le Nil, un ballon botté à travers une cour, un pendule oscillant dans une cage d' escalier, les couleurs diffusées par un disque compact — tous se plient à une poignée de principes. Mettre ces principes à votre portée est l'objet de ce livre.

Ce manuel de physique de 11e année a été élaboré conformément à la vision du système du baccalauréat égyptien et au cadre du Baccalauréat International. Il est conçu pour développer non seulement ce que vous savez, mais aussi la manière dont vous parvenez à le savoir : observer attentivement, prédire avant qu'on ne vous le dise, mesurer de vos propres mains et ne nommer une idée qu'après l'avoir expérimentée

Dans cette partie, vous traverserez deux paysages reliés entre eux. En mécanique, vous décrirez le mouvement en deux dimensions, décomposerez et recombinerez des vitesses, et suivrez un projectile tout au long de sa trajectoire. Vous ferez pivoter des forces autour d'un axe, les mettrez en équilibre et rendrez compte de l'énergie qu'elles transfèrent. Vous rencontrerez la quantité de mouvement et l 'impulsion, et découvrirez pourquoi la quantité de mouvement totale d'un système isolé ne change jamais. Vous suivrez un corps sur un cercle et terminerez en regardant vers l'extérieur — vers les lois de Kepler et la gravitation qui maintient les planètes sur leurs orbites.

Dans Oscillations et ondes, vous étudierez le mouvement qui se répète. Vous retrouverez les mêmes mathématiques dans un ressort chargé et un pendule en balancement, puis vous verrez ce mouvement se propager vers l'extérieur sous forme d'onde. Vous verrez les ondes s'additionner et s'annuler, se courber lorsqu'elles changent de vitesse, et se révéler dans le son, dans la lumière et dans les franges de la double fente de Young.

Chaque leçon suit la même séquence délibérée. Elle s'ouvre sur une question qui mérite une réponse et un phénomène qui mérite une explication, et vous demande de consigner une prédiction par écrit avant de poursuivre la lecture. Elle vous remet ensuite les instruments : vous explorez, recueillez vos propres données et cherchez la régularité qui s'en dégage. C'est seulement ensuite que le modèle est nommé, énoncé avec précision et mis à l'œuvre dans des exemples que vous pouvez suivre ligne par ligne. Lapratique suit par étapes graduées — une première tentative, puis un nouveau contexte, puis unequestion de type examen — de sorte que la compréhension se construit plutôt que d'être mémorisée.

Deux habitudes traversent chaque chapitre. La première est la Nature de la science : de brefs récits sur la manière dont un résultat a véritablement été obtenu — qui l'a mesuré, ce qui a été mal évalué et comment la correction est venue. La seconde est la discipline consistant à dire où un modèle s'arrête. Un projectile décrit une parabole uniquement lorsque la résistance de l'air est négligée ; la force normale est égale au poids uniquement dans des conditions précises ; l'approximation des petits angles demeure une approximation. Connaître les limites d'une équation fait partie de la connaissance de l'équation.

Vous trouverez aussi la physique là où vous vivez. Les problèmes de ce livre se déroulent sur le Nil et sur le lac Nasser, dans une rame de métro et le long de la côte nord, sur les cordes d'un oud et dans les fibres optiques qui arrivent à Alexandrie. L'intention est simple : les lois que vous étudiez ne sont pas confinées à un laboratoire.

Les mathématiques sont utilisées ici comme les physiciens les utilisent — comme un langage pour raisonner, et non comme une liste de formules à mémoriser. Les symboles sont définis avant d'être utilisé s, les unités sont conservées tout au long de chaque calcul, et chaque exemple résolu se termine en demandant si la réponse est raisonnable.

Abordez ce livre un crayon à la main. Écrivez votre prédiction même si vous n'en êtes pas sûr : une pré diction erronée que vous examinez vous en apprendra plus qu'une bonne réponse qu'on vous a donnée. Prenez vos propres mesures suffisamment au sérieux pour vous demander pourquoi elles se dispersent. La physique récompense ce genre d'attention, et c'est tout à fait à votre portée.

Comment utiliser ce livre

Chaque leçon suit la même séquence : Observer, Prédire, Mesurer, Nommer.

1 **Question de la leçon**

La grande idée à laquelle répondre

2 **Tu apprendras que...**

Des objectifs clairs pour cette leçon

3 **Le phénomène – prédire d'abord**

Observe-le, puis fait une prédiction

4 **Explore**

Essaye et observe les régularités

5 **Exemple résolu (pourquoi ?)**

Méthode présentée avec le raisonnement

6 **Essaie par toi-meme**

Applique toi- meme l'idée en pratique

7 **Fait clé**

À retenir

8 **Application rapide**

Applique l'idée dans un nouveau contexte

9 **Question de liaison**

Relie les idées tout au long de la leçon

10 **Encadré d'équation**

Équations clés en un coup d'oeil

11 **La nature de la science**

Découvre comment les idées scientifiques évoluent

12 **En mode examen**

Applique ce que tu as appris dans un contexte d'examen

Ce qui rend ce livre différent

Il ne se contente pas de vous expliquer la physique — il vous apprend à penser comme un physicien.

- Prédis avant l'explication, puis confronte tes idées aux preuves.
- Comprends pourquoi chaque méthode fonctionne, repére les idées fausses et établis des liens entre les notions de la leçon.

Comment l’apprentissage fonctionne ici



1. Observer

Un phénomène réel se produit et contredit vos attentes.



2. Prédire

Notez votre pré diction avant de poursuivre la lecture.



3. Mesurer

faites-le de vos propres mains et recueillez les données



4. Nommer

Apprenez le terme scientifique après avoir construit l’idée et non en le mémorisant d’abord.

Commence par le phénomène.
Laisse les preuves construire l’explication.

Outils :

1. Techniques expérimentales
2. Technologie
3. Mathématiques



Enquête :

1. Explorer et concevoir
2. Collecter et traiter
3. Conclure et évaluer



Le contenu

Chapitre 1 – Mécanique

1-1 Vecteurs de vitesse et vitesse relative..... 02

1-2 Mouvement d'un projectile lancé horizontalement..... 08

1-3 Mouvement d'un projectile lancé avec un angle..... 14

1-4 Moment d'une force..... 20

1-5 Équilibre des forces..... 26

1-6 Puissance et efficacité..... 32

1-7 Quantité de mouvement et impulsion..... 38

1-8 Loi de conservation de la quantité de mouvement..... 44

1-9 Quantité de mouvement et énergie mécanique..... 50

1-10 Mouvement circulaire uniforme et force centripète..... 56

1-11 Mouvement circulaire : horizontal et vertical..... 62

1-12 Lois de Kepler et gravitation universelle..... 69

Chapitre 2 – Oscillations et ondes

2-1 Mouvement harmonique simple..... 77

2-2 L'oscillateur masse-ressort..... 83

2-3 Le pendule simple..... 90

2-4 Ondes sinusoïdales..... 96

2-5 Interférence des ondes et ondes stationnaires..... 103

2-6 Réfraction des ondes..... 109

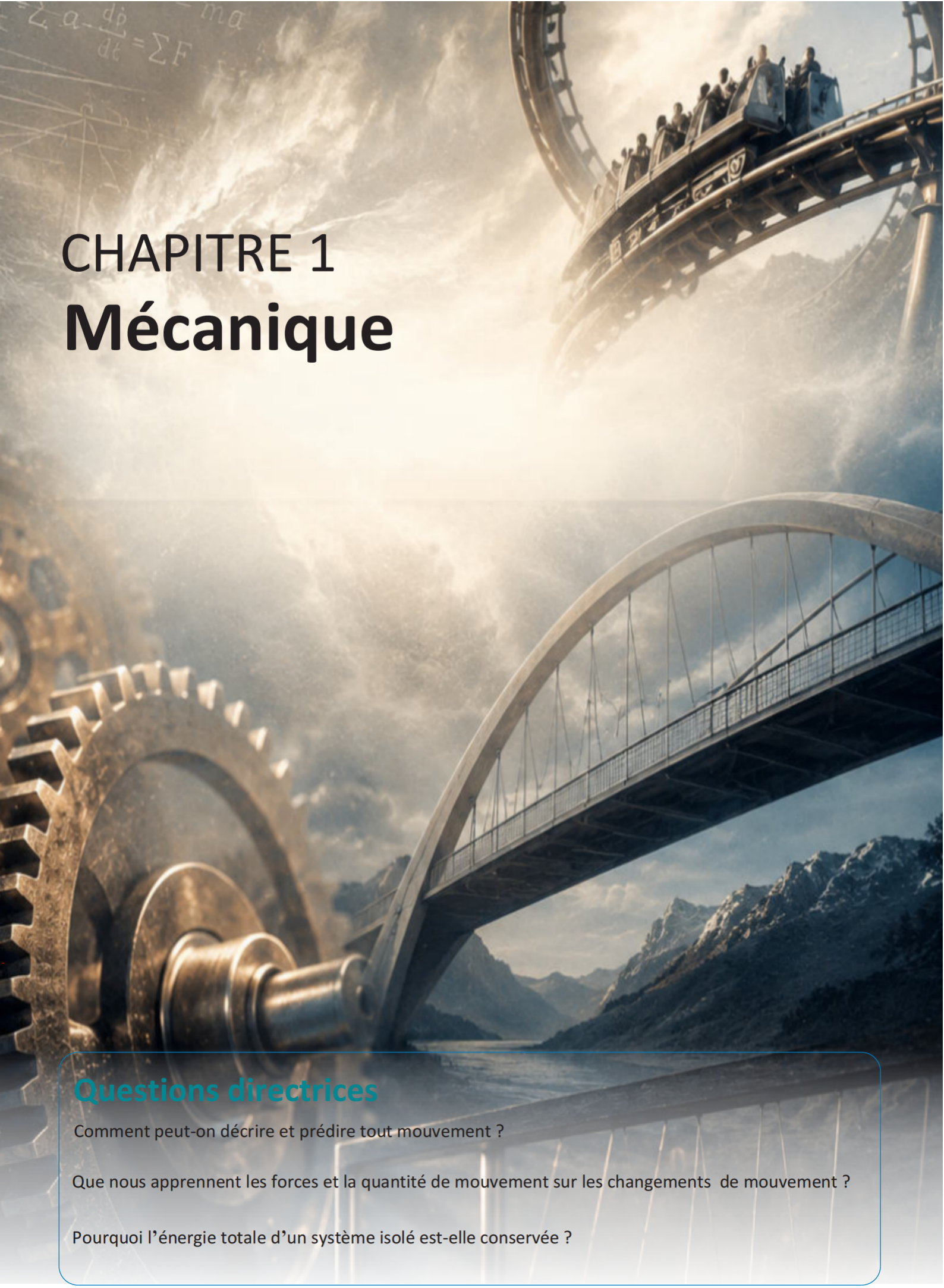
2-7 Interférence du son..... 115

2-8 L'effet Doppler..... 121

2-9 Réfraction et réflexion totale interne de la lumière..... 128

2-10 Lentilles et images..... 134

2-11 Expérience des fentes de Young..... 142



CHAPITRE 1
Mécanique

Questions directrices

Comment peut-on décrire et prédire tout mouvement ?

Que nous apprennent les forces et la quantité de mouvement sur les changements de mouvement ?

Pourquoi l'énergie totale d'un système isolé est-elle conservée ?

Leçon 1-1 — Vecteurs vitesse et vitesse relative

❓ **Question de la leçon**: Pourquoi un ferry pointé droit vers l'autre rive du Nil atterrit-il en aval — et pourquoi la pluie qui tombe semble-t-elle former des traînées obliques sur la vitre d'un bus en marche ?

Tu vas apprendre à

À la fin de cette leçon, tu seras capable de :

1. **Expliquer** comment deux vitesses se combinent en une vitesse résultante.
2. **Calculer** les composantes perpendiculaires d'une vitesse et les recombiner.
3. **Déterminer** la vitesse d'un objet vu depuis un observateur en mouvement.

🔍 Le phénomène — prédire avant de continuer🔍

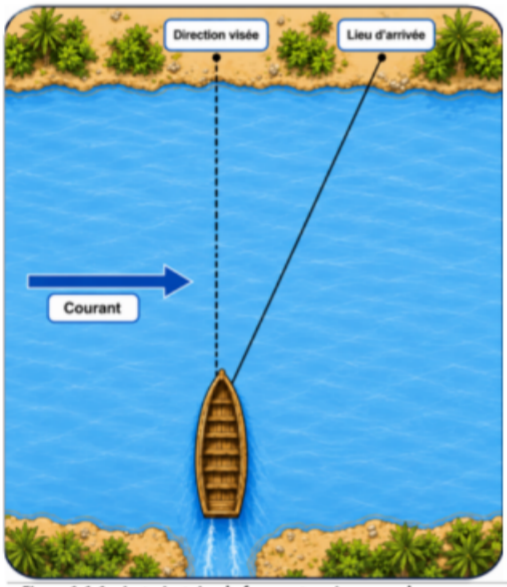


Figure 1-1-1 – La trajectoire du ferry se termine en aval, bien que sa proue soit orientée transversalement au courant.



Figure 1-1-2 – La pluie qui tombe verticalement forme des traînées inclinées vers l'arrière sur la vitre d'un bus en mouvement.

Le ferry du Nil dirige sa proue directement vers le point d'accostage situé sur la rive opposée. La puissance du moteur ne change jamais et la proue reste constamment orientée dans la même direction. Pourtant, le ferry accoste en aval du point visé. Le même matin, alors que tu es dans le bus, la pluie tombe parfaitement verticalement. Pourtant, les traînées qu'elle laisse sur la fenêtre du bus sont inclinées. Deux observations quotidiennes, un même principe sous-jacent.

Prédis avant de poursuivre — Écris ta prédiction

(a) Sans modifier les réglages du moteur du ferry, si le courant du fleuve devient plus rapide, la traversée prendra-t-elle plus de temps, le même temps ou moins de temps?

(b) Depuis l'intérieur du bus en mouvement, les traînées inclinées de la pluie semblent-elles provenir de l'avant du bus ou de l'arrière ?

Fait essentiel

Triangles rectangles :

$$a^2 + b^2 = c^2$$

Les vecteurs de vitesse perpendiculaires forment un triangle rectangle.

Explore— dessine la traversée

Ce que v a s faire : mesurer des longueurs et identifier un motif.

Durée :12 min

Tu auras besoin d'une feuille de papier A4, d'une règle, d'un stylo et d'un crayon.



Figure 1-1-3· Les quatre éléments nécessaires pour l'activité.

Étapes :

1. Le partenaire A tient la feuille à plat sous la règle, qui sert de rail. Au signal partagé, A tire la feuille en ligne droite vers sa poitrine — perpendiculairement au rail — à une vitesse lente et constante.
2. Au même compte, le partenaire B fait glisser le stylo le long du rail à une vitesse lente et constante, en dessinant pendant tout le trajet.
3. Arrêtez-vous ensemble. Mesurez la distance parcourue par le stylo le long du rail (la distance **transversale**) et la distance sur laquelle la feuille a été tirée (la distance de **traction**). Mesurez ensuite la longueur de la trace inclinée laissée sur la feuille.
4. Répétez deux fois de plus : une fois en tirant la feuille plus vite, une fois en faisant glisser le stylo plus vite.

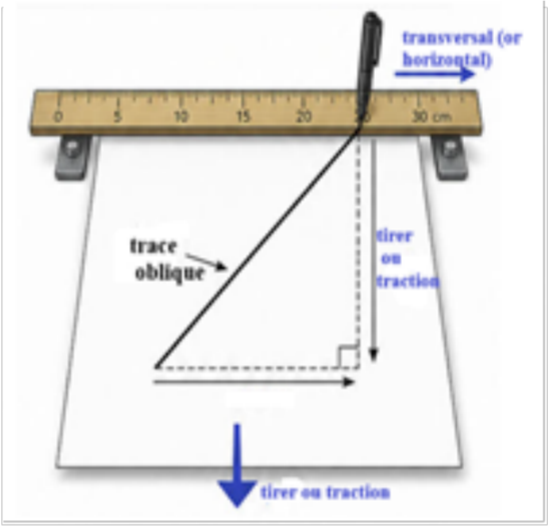


Figure 1-1-4 · Une trace oblique inclinée : le stylo est tiré transversalement pendant qu'il glisse le long du rail.

Essai	Tranversale (cm)	Traction (cm)	Longueur de l a trace mesurée (cm)	$\sqrt{\text{transversale}^2 + \text{traction}^2}$ cm)
1				
2 (Tirer la feuille plus vite)				
3 (Déplacer le stylo plus vite)				

Analyse ce que tu as recueilli :

(a) Compare les deux dernières colonnes, essai par essai. Quelle tendance les nombres montrent-ils ?

(b) Le stylo se déplace uniquement le long du rail, tandis que la feuille est tirée vers le bas en ligne droite. Comment ces deux mouvements se combinent-ils pour produire la trace inclinée ?

Rédige ton explication en deux lignes avant de lire la page suivante.

Remarque sur la mesure

Déplace- toi lentement, utilise un signal partagé unique, faites davantage confiance au motif qu'à un seul essai.

De l'observation au modèle

Dans l'exploration, le stylo se déplaçait uniquement le long du rail, mais sa trace sur la feuille était inclinée. La longueur mesurée de la trace correspondait approximativement à ($\sqrt{\text{transversale}^2 + \text{traction}^2}$), et non à la simple somme des distances de traversée et de traction. On pourrait s'attendre à ce que les deux mouvements s'additionnent directement, mais vos propres résultats montrent le contraire. Le modèle qui suit explique ces observations.

La vitesse est une grandeur vectorielle

Une vitesse décrit à la fois la rapidité avec laquelle un objet se déplace et la direction dans laquelle il se déplace — c'est un vecteur, dessiné comme une flèche. Parfois, un corps a deux composantes de vitesse : un bateau est poussé par son moteur tandis que la rivière l'emporte. Les deux flèches se combinent alors **bout à bout** en une seule **vitesse résultante**: $\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$ .C'est l'addition des vitesses.**Les vecteurs vitesse doivent être combinés géométriquement pour déterminer la ré sultante ; l'addition scalaire des grandeurs n'est valable que lorsque les vecteurs sont coliné aires.**

Décomposition d'une vitesse en composantes

Toute vitesse peut être décomposée en deux composantes perpendiculaires : $v_x = v\cos\theta$ le long d'un axe et $v_y = v\sin\theta$ le long de l'autre. Pour une rivière de largeur fixe , la composante de vitesse perpendiculaire à la rivière détermine le temps de traversée ;la dérive vers l'aval est égale à la composante de vitesse vers l'aval multipliée par cetemps. Traite chaque axe séparément, puis recombinez avec $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$.

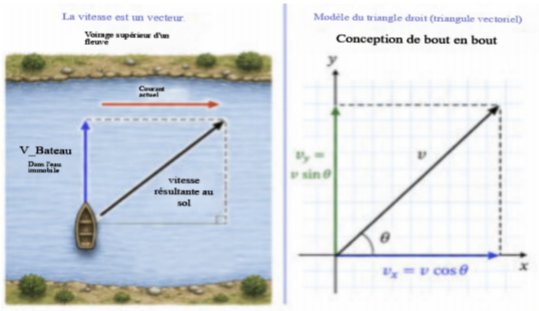


Figure 1-1-5 · La même vitesse représentée par une seule flèche et par deux composantes perpendiculaires.

Point

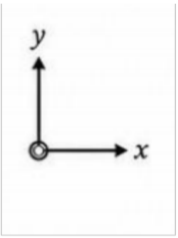
- Soit v_1[m/s] la vitesse d'un bateau en eau calme et v_2[m/s] la vitesse du courant ; la vitesse du bateau par rapport à la rive est $v=v_1+v_2$— les flèches sont combinées gé ométriquement, et non les grandeurs. La vitesse v est appelée la vitesse résultante of v_1 et v_2, et sa détermination est appelée l'addition des vitesses. Inversement,**v** peut être décomposée en v_1 et v_2: on appelle cela la décomposition d'une vitesse en composantes.
- Décomposez ***v*** selon des *directions x* et y mutuellement perpendiculaires. Soit *v* la grandeur,θ l'angle entre ***v*** et l'axe *x*:v_x=*v* cos θ,v_y=*v* sin θ, et $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$. Un signe positif ou négatif est attribué à la grandeur de chaque composante pour indiquer sa direction le long de l'' axe des coordonnées.)
- Soit la vitesse de A v_A et la vitesse de B soit vB. La vitesse de *B* vue depuis A — la vitesse relative de B par rapport à A — est $v_{AB} = v_B - v_A$: observé moins observateur.

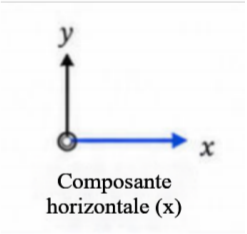
Encadré d'' équation

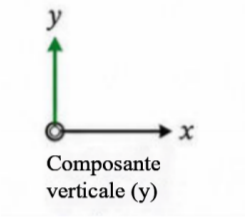
Composantes de Une vitesse	$v_x = v\cos\theta$ $v_y = v\sin\theta$	Magnitude à partir des composantes	$v = \sqrt{(v_x^2 + v_y^2)}$

Terme

Vitesse résultante : le vecteur vitesse unique ayant le même effet que deux vecteurs vitesse combinés.







Ce que voit un observateur en mouvement

Considère maintenant un observateur situé sur un objet en mouvement. Pour déterminer la vitesse d' un objet par rapport au bus, soustrais la vitesse du bus, dans le référentiel terrestre, de la vitesse de l ' objet, également mesurée dans le référentiel terrestre. **La vitesse relative** de B par rapport à A est la vitesse de B moins la vitesse de A : $\vec{v}_{AB} = \vec{v}_B - \vec{v}_A$, soit observé - observateur. Les deux vecteurs sont représentés à partir **d' une même origine**. Dans le référentiel terrestre, la pluie tombe verticalement vers le bas ; en soustrayant la vitesse du bus à la vitesse de la pluie dans le référentiel terrestre, tu obtiens la vitesse de la pluie par rapport au bus, qui est dirigée vers le bas et vers l ' arrière.

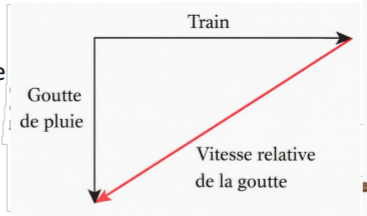


Figure 1-1-7 · Le triangle des vecteurs donnant la vitesse de la goutte de pluie par rapport au train.

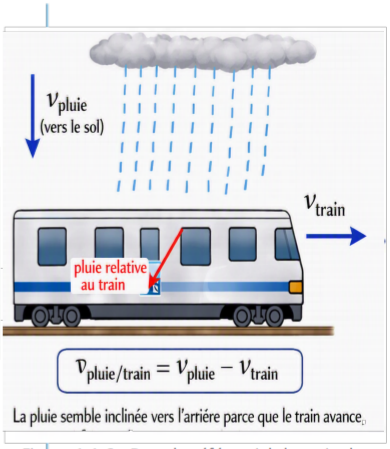


Figure 1-1-6 · Dans le référentiel du train, la pluie arrive inclinée, car la vitesse du train est soustraite.

Encadré d'équation

Vitesse relative de B par rapport à A	$\vec{v}_{AB} = \vec{v}_B - \vec{v}_A$

Exemple résolu

Situation	Un bateau a une vitesse de 4,0 m/s en eau calme. Il se dé place dans une rivière rectiligne avec un courant de 3,0 m/s. La proue du bateau est orientée perpendiculairement à la berge. Déterminez la vitesse du bateau par rapport à la berge.
Données et éléments demandés	**Donné :**Vitesse du bateau en eau calme = 4,0 m/s et vitesse du courant de la rivière = 3,0 m/s (perpendiculaire). **Requis :**vitesse du bateau par rapport à la berge.
Représentation	Tracez un triangle vectoriel rectangle avec la vitesse du bateau (4,0 m/s) et le courant de la rivière (3,0 m/s) comme côtés perpendiculaires. L'hypoténuse représente la vitesse résultante du bateau.
Stratégie	Étapes pour résoudre une vitesse : Résolvez la vitesse en composantes perpendiculaires selon les axes x et y, puis calculez la somme ou la diff érence pour chaque composante. En utilisant = $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$.
Solution annotée	Le long de la rive :v_x= 3,0 m/s. À travers la rivière :v_y= 4,0 m/s $v = \sqrt{(3.0)^2 + (4.0)^2} = \sqrt{25} = 5.0 \text{ms}^{-1}$ Par conséquent, la vitesse du bateau par rapport à la rive est de 5,0 m/s.
Vérification de la cohérence	La réponse 5,0 m/s est supérieure à la plus grande composante individuelle, 4,0 m/s, mais inférieure à la somme simple, 7,0 m/s. Cela est attendu car les deux composantes de vitesse sont perpendiculaires. Les nombres forment également un triangle rectangle 3-4-5.
Explique-le toi-même	Dans vos propres mots, pourquoi la vitesse résultante est-elle de 5,0 m/s et non de 7,0 m/s ?

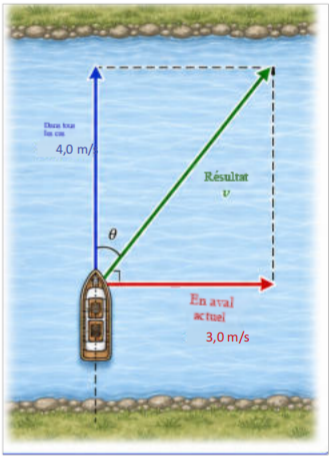


Figure 1-1-8 · Les vitesses transversale et aval s' ajoutent pour donner la vitesse r ésultante par rapport au sol.

Application rapide :

Un avion se déplace à une vitesse constante de 60 m/s à 30° au-dessus de l ' horizontale. Détermine la hauteur qu ' il gagne en 5,0 s.

À toi d'essayer : Pour un passager d'une rame de métro traversant une section à ciel ouvert à 5,0 m/s, la pluie tombant verticalement semble tomber à 30° par rapport à la verticale. Calculez la vitesse des gouttes de pluie.

Essayer

(a) Un bateau dont la vitesse est de 6,0 m/s en eau calme traverse une rivière rectiligne avec un courant de 3,0 m/s, sa proue étant perpendiculaire au courant.

(i) Détermine l'angle θ que fait la vitesse résultante du bateau avec la berge.

(ii) Si la rivière a 60 m de large, détermine le temps nécessaire pour la traverser.

(b) Un cycliste roulant vers l'ouest à 5,0 m/s observe un vent apparent de 5,0 m/s venant du nord. Détermine la direction et la vitesse du vent par rapport au sol.

Un nouveau contexte — atterrissage par vent de travers

Par un après-midi venteux à l'aéroport de Borg El Arab, le vent souffle en travers de la piste alors qu'un pilote s'aligne pour atterrir. Si l'avion était pointé droit dans l'axe de la piste, le vent de travers le pousserait latéralement hors de l'axe central. C'est le même effet que dans le problème du bateau. Le pilote pointe donc l'avion légèrement face au vent. La vitesse de l'avion dans l'air, additionnée bout à bout avec la vitesse du vent, donne une résultante dirigée exactement le long de la piste. Avec une vitesse d'approche de 220 km/h et un vent de travers de 40 km/h, la correction de cap nécessaire (l'angle de crabe) est d'environ 10°.

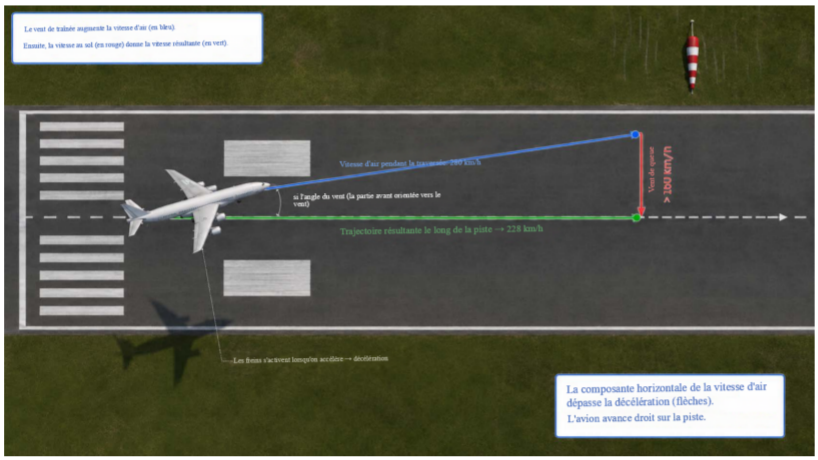
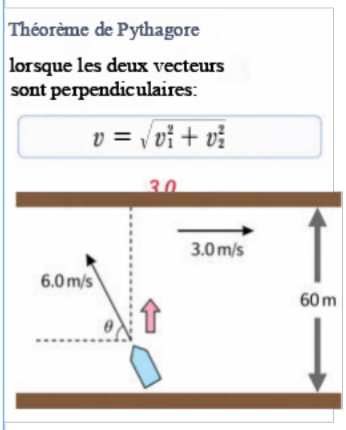


Figure 1-1-10 · L'avion fait face au vent, de sorte que sa trajectoire reste le long de la piste.

À votre tour : Explique pourquoi le pilote doit orienter le nez de l'avion à l'opposé de la direction de la piste même si l'avion doit se déplacer exactement le long de la piste. En 1632, Galilée imagina une cabine sous le pont d'un navire voguant sans heurts : de l'eau qui goutte, des

Figure 1-1-9 · Les composantes perpendiculaires se combinent par la relation de Pythagore.



Fait essentiel

Triangle 3-4-5 : les côtés perpendiculaires 4 (en travers) et 3 (le long) donnent une hypoténuse de 5.



Conseil d'examen

La vélocité est une grandeur vectorielle qui comporte une magnitude et une direction. Ne donnez pas seulement un nombre lorsqu'une direction est requise.

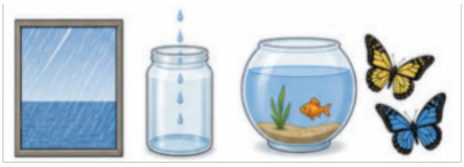
Livret de données

Décompose, combine et recombine.

Nature de la science : Observations — mouvement uniforme
ne peut pas être détecté depuis l'intérieur du référentiel en mouvement

1632, Galilée imagina une cabine située sous le pont d' un navire naviguant régulièrement : de l 'eau qui goutte, des poissons dans un bocal et des papillons qui volent. Aucune observation effectuée à l intérieur de la cabine ne permet de déterminer si le navire est au repos ou s' il se déplace à vitesse uniforme. Ce qu' un observateur mesure dépend de son propre mouvement .

c' est la même idée que celle illustrée par la pluie sur la vitre de ton bus. Une vitesse n' a de sens que si le référentiel d' observation est précisé.À toi : Propose une situation dans laquelle deux observateurs attentifs peuvent mesurer des vitesses différentes pour la même goutte de pluie, sans qu' aucun des deux ne se trompe.



À ton tour : propose comment deux observateurs attentifs peuvent enregistrer des vitesses différentes pour la même goutte de pluie sans que l' un ou l' autre se trompe.

Question de la leçon, avec réponse

Pourquoi un bac pointé droit vers l' a utre rive du Nil atterrit-il en aval — et pourquoi la pluie qui tombe semble-t-elle former des traînées obliques sur la vitre d' u n bus en marche ? La vitesse du bac par rapport au sol est la somme vectorielle de sa vitesse en eau calme et de celle du courant. Sa trajectoire oblique donc vers l' a val, même si sa proue ne tourne jamais. La vitesse de la pluie par rapport au bus est égale à la vitesse de la pluie dans le référentiel terrestre moins la vitesse du bus dans le référentiel terrestre ; ainsi, une pluie quitombe verticalement dans le référentiel terrestre semble tomber avec un angle pour un observateur dans le bus.

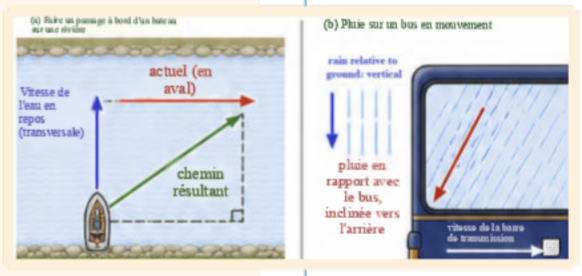


Figure 1-1-11 · Bac et pluie : une méthode pour les deux situations.

Figure 1-1-12 · La vitesse en eau calme et le courant donnent la résultante.

Exercice

(a) Un bateau dont la vitesse est de 2,0 m/s en eau calme se d éplace dans une rivière rectiligne dont le courant est de 1,5 m/s, son avant pointant perpendiculairement à la berge. D éterminez la vitesse du bateau par rapport à la berge.

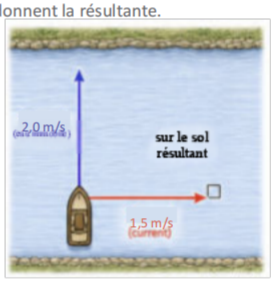
(b) Un avion monte à une vitesse constante de 50 m/s selon un angle de 30° par rapport à l'horizontale. Déterminez la hauteur gagnée par l'avion en 10 s.

(c) Pour un observateur regardant par la fenêtre du train A, qui se déplace sur une voie horizontale à une vitesse de 10 m/s, la pluie tombant verticalement semble tomber selon un angle de 45° par rapport à la verticale.

(i) Déterminez la vitesse des gouttes de pluie.

(ii) Pour un observateur regardant par la fenêtre du train B qui passe train A, la pluie semble tomber selon un angle de 60° par rapport à la verticale. Déterminez la vitesse du train B.

(d) La voiture A se déplace vers l'est à 20 m/s et la voiture B se d éplace vers le nord à 20 m/s. Déterminez la direction et la grandeur de la vitesse relative de B par rapport à A.



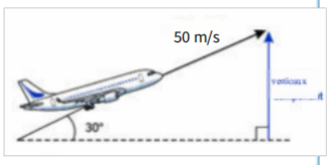


Figure 1-1-13 · Décomposition de 50 m/s à 30°.

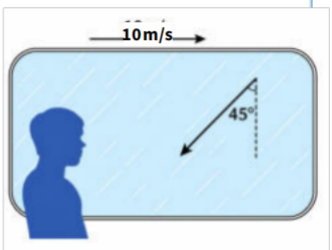


Figure 1-1-14 · Pluie observée à 45° par rapport à la verticale à travers la vitre d' un véhicule en mouvement.

Question type examen

Une rivière s' écoule à 1,2 m/s parallèlement à ses rives. Un nageur dont la vitesse en eau calme est de 0,9 m/s se dirige directement vers l' autre rive.

Détermine la norme de la vitesse du nageur par rapport à la rive.

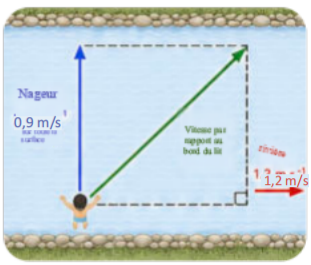


Figure 1-1-15 · La vitesse du nageur par rapport à l' eau et la vitesse du courant donnent la vitesse par rapport à la rive.



Leçon 1-2 — Horizontale Mouvement d'un projectile

Question de la leçon : Lorsqu'une pièce est projetée horizontalement depuis une table tandis qu'une autre tombe à côté, laquelle touche le sol en premier — et qu'est-ce qui détermine le résultat ?

Tu apprendras à

À la fin de cette leçon, tu seras capable de :

1. **Expliquer** pourquoi les mouvements horizontal et vertical d'un projectile se produisent indépendamment.
2. **Calculer** le temps de vol et la portée d'un projectile lancé horizontalement.
3. **Déterminer** la vitesse d'un projectile à tout instant en recombinant ses composantes.

Le phénomène — prédis avant de continuer

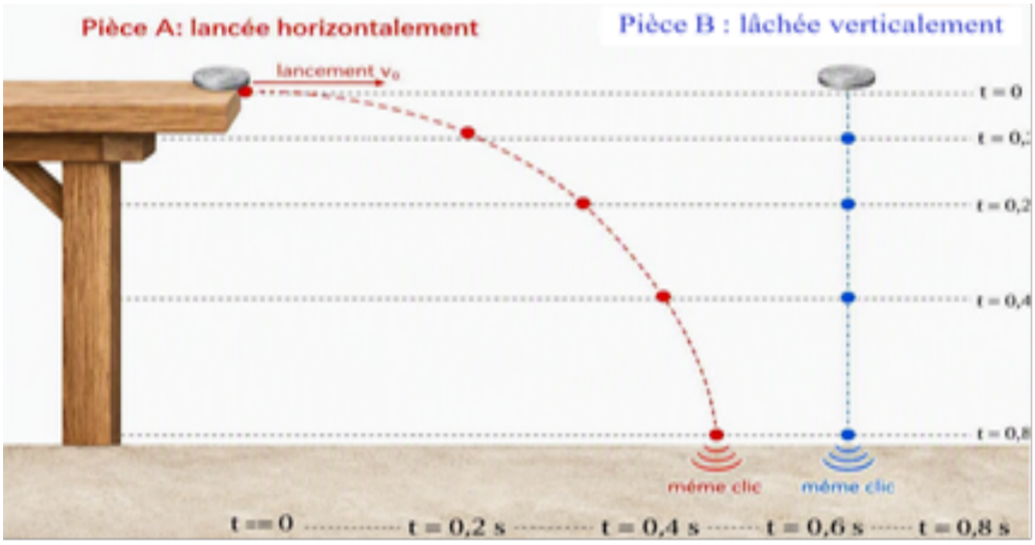


Figure 1-2-1 · Une pièce projetée latéralement et une autre lâchée touchent le sol au même instant.

Place deux pièces au bord même d'une table. Fait glisser une pièce horizontalement hors de la table et, au même instant, pousse l'autre pièce juste au-delà du bord pour qu'elle tombe directement sans aucune poussée horizontale. La pièce projetée atterrit quelque part à distance, tandis que l'autre atterrit presque directement sous le bord.

Prédis avant de poursuivre — Écris ta prédiction

(a) Quelle pièce touche le sol en premier — celle qui est projetée, celle qui est poussée, ou aucune des deux ?

(b) Si vous projetez la première pièce deux fois plus fort, reste-t-elle en l'air plus longtemps, moins longtemps, ou le même temps ?

Fait clé

$v = v_0 + at$

$s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$

Chute libre :

$v_0 = 0$

$a = g = 9{,}8\ \text{m/s}^2$

Explore — compare lemouvement de deux pièces de monnaie :

Ce que vous ferez :lance des objets du quotidien, chronométre leur mouvement et identifie un schéma.

Durée :10 min
Il vous faudra :

- deux pièces identiques
- une règle plate
- une table dans une pièce calme

Figure 1-2-2 · Deux pièces, une règle plate et une table.



1. Place une règle à plat sur une table, avec une extrémité qui dépasse du bord. Tiens la règle fermement près de son centre. Place une pièce sur la table à côté de la règle et une seconde pièce sur l'extrémité qui dépasse.
2. Fait claquer brusquement l'extrémité qui dépasse. La règle lance la première pièce horizontalement tout en se retirant de sous la deuxième pièce, lui permettant de tomber verticalement. Les deux pièces commencent leur mouvement à peu près en même temps.
3. Écoute : un seul impact au sol, ou deux ? Note ce que tu entends.
4. Répéte cinq fois, en donnant des coups allant du plus douce au plus forte possible. Note chaque essai.

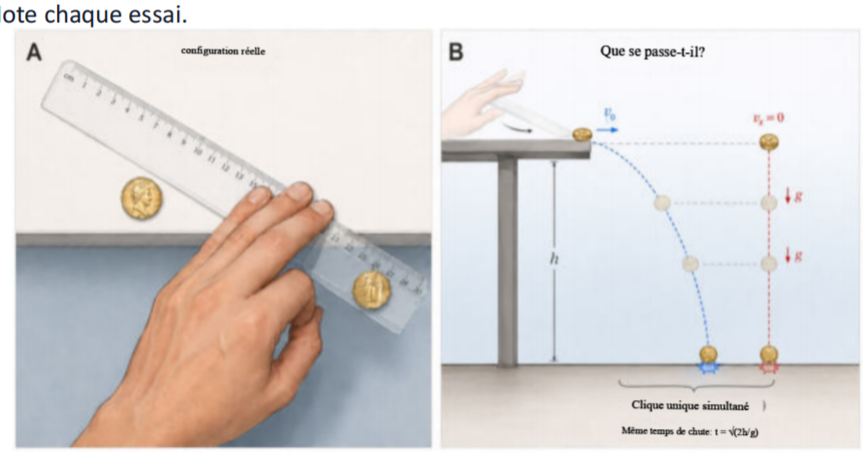


Figure 1-2-3 · Le montage réel et le mouvement qu'il produit.

Essai	Force de la chiquenaude (douce → forte)	Un impact ou deux ?
1		
2		
3		
4		
5		

Analyse ce que tu as recueilli :

(a) L'atterrissage s'est-il déjà divisé en deux clics à mesure que la chiquenaude devenait plus forte ? Quel schéma la colonne montre-t-elle ?

(b) La pièce propulsée parcourt une trajectoire courbe beaucoup plus longue, mais les impacts restent simultanés. Pourquoi la trajectoire plus longue n'augmente-t-elle pas le temps mis pour atteindre le sol ?

Écris ton explication en deux lignes avant de lire la page suivante.

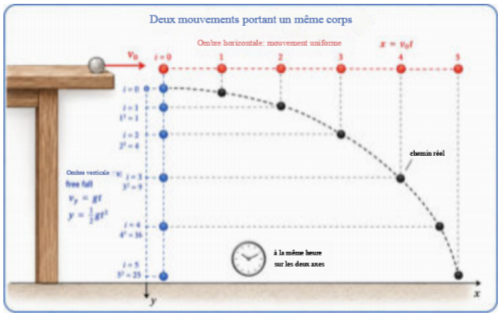
Fait clé

Deux clics plus proches qu'environ 20 ms sont perçus comme un seul son. Répétez dans une pièce calme.

De l'observation au modèle

Dans l'activité Explore, les deux pièces ont frappé le sol presque en même temps, même lorsque la pièce lancée horizontalement recevait des vitesses initiales différentes. Augmenter sa vitesse horizontale augmentait la distance horizontale parcourue, mais ne changeait pas son temps de chute. Tu avais peut-être prédit que la pièce plus rapide atterrirait plus tard, mais les observations n'ont pas confirmé cette prédiction. Le modèle suivant explique ces résultats.

Deux mouvements combinés dans un même corps



Un objet projeté horizontalement suit une trajectoire parabolique. Il possède deux mouvements indépendants. Horizontalement, aucune force n'agit sur l'objet (si l'on néglige la résistance de l'air), donc il conserve une **vitesse constante**: horizontale $x = v_0 t$. Verticalement, la gravité attire exactement comme elle attire tout objet lâché, donc l'objet est en **chute libre**:

$v = gt$ et $y = \frac{1}{2}gt^2$.

Les deux mouvements composants sont **indépendants**— ils partagent seulement le même temps t.**La parabole, et ce qui détermine le temps**

La combinaison des composantes produit une trajectoire parabolique. Cependant, chaque partie du mouvement peut être analysée séparément. Le mouvement vertical obéit à $y = \frac{1}{2}gt^2$, où y est la composante verticale du déplacement de l'objet. Par conséquent, le temps de vol est donné par : $t = \sqrt{\frac{2y}{g}}$. Le mouvement horizontal obéit à $x = v_0 t$, où x est la composante horizontale du déplacement de l'objet. La vitesse d'un objet lancé horizontalement est obtenue en combinant ses composantes de vitesse horizontale et verticale.

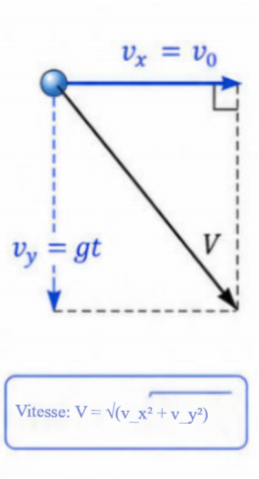


Figure 1-2-4 · Les composantes se combinent pour donner la vitesse.

Point

- Le mouvement d'un objet lancé horizontalement est appelé mouvement projectile horizontal . Il se décompose en composantes horizontale et verticale et se traite comme deux mouvements linéaires indépendants , qui ne partagent que le même temps t .
- Les deux composantes

  Composante horizontale : L'objet conserve la vitesse constante v_0 [m/s], donc la composante horizontale x [m] de son déplacement est $x = v_0 t$.

  Composante verticale : L'objet est en chute libre . En notant g [m/s²] l'accélération due à la gravité, la composante verticale de la vitesse est v = gt et la composante verticale y [m] du déplacement est $y = \frac{1}{2}gt^2$. e)

Encadré d'équation

Mouvement horizontal (mouvement uniforme)	$= v_0 t + \frac{1}{2}at^2$ avec $a = 0 \geq x = v_0 t$
Mouvement vertical (chute libre depuis le repos)	$v = v_0 + at$ with $v_0 = 0 \geq v = gt, y = \frac{1}{2}gt^2$

Terme

Projectile : un corps en vol dont le mouvement après le lancement est régi uniquement par la gravité (résistance de l'air négligée) .

La hauteur détermine le temps

Le temps $t = \sqrt{\frac{2y}{g}}$ dépend uniquement de la hauteur verticale (y) et de l'accélération gravitationnelle (g) . La vitesse horizontale initiale n'apparaît pas car elle n'a aucun effet sur le temps de vol. Augmenter la vitesse de lancement augmente la distance horizontale parcourue, mais ne change pas le temps mis par le projectile pour atteindre le sol.

Exemple résolu

Situation	Un objet a été lancé horizontalement à une vitesse de 14,7 m/s depuis une hauteur de 19,6 m au-dessus du sol. En supposant que l'accélération due à la gravité est de 9,8 m/s², déterminez ce qui suit : **(a)** le temps mis par l'objet pour atteindre le sol en s. **(b)** la portée horizontale de l'objet en m. **(c)** la vitesse de l'objet juste avant qu'il ne touche le sol en m/s.
Données et éléments demandés	**Donné :** $v_0 = 14{,}7$ m/s, $y = 19{,}6$ m, $g = 9{,}8$ m/s². **Requis :** t, x, et v.
Représentation	Le mouvement est divisé en deux parties. Horizontalement, l'objet se déplace à vitesse constante $v_0 = 14{,}7$ m/s. Verticalement, il tombe librement sur $y = 19{,}6$ m sous l'effet de la gravité. La trajectoire est une parabole.
Stratégie	Tout d'abord, utilisez le mouvement vertical pour trouver le temps : $y = \frac{1}{2}gt^2$. Utilisez ensuite le mouvement horizontal pour trouver la portée : $x = v_0 t$. Enfin, trouvez la composante verticale avec $v_y = gt$, puis la vitesse d'impact avec $v = \sqrt{(v_0^2 + v_y^2)}$.
Solution annotée	**(a)** Puisque l'objet est en chute libre dans la direction verticale, soit t le temps nécessaire pour tomber de 19,6 m. $y = \frac{1}{2}gt^2$ $19.6 = \frac{1}{2} \times 9.8 \times t^2$ $19.6 = 4.9\ t^2$ $t^2 = 4$. Puisque $t > 0$, $t = 2{,}0$ s **(b)** La vitesse horizontale est constante, donc : $x = v_0 t = 14{,}7 \times 2{,}0 = 29{,}4$ m, $x \approx 29$ m **(c)** À $t = 2{,}0$ s, la composante horizontale de la vitesse est $v_x = v_0 = 14{,}7$ m/s La composante verticale de la vitesse est $v_y = gt = 9{,}8 \times 2{,}0 = 19{,}6$ m/s Soit la vitesse de l'objet juste avant de toucher le sol v, $v = \sqrt{(v_x^2 + v_y^2)} = \sqrt{(14{,}7)^2 + (19{,}6)^2} = 24{,}5$ m/s
Vérification de la cohérence	L'objet tombe pendant 2,0 s, parcourt 29,4 m horizontalement, et sa vitesse finale est supérieure à sa vitesse initiale car la gravité augmente uniquement la composante verticale de la vitesse.
Expliquez-le vous-même	Expliquez avec vos propres mots les résultats obtenus.

Figure 1-2-7 · Vitesse résultante 24,5 m/s.

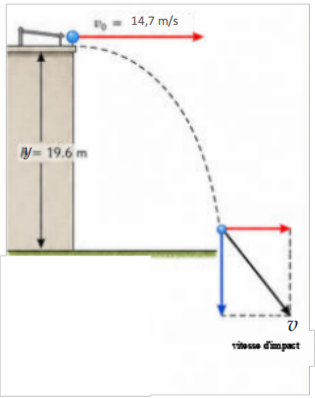


Figure 1-2-6 · Vitesse d'impact après une chute de 19,6 m.

À vous maintenant : Un objet projeté horizontalement à une vitesse de 4,0 m/s depuis une certaine hauteur atteint le sol en 2,0 s. Calcule la hauteur initiale de l'objet et sa portée horizontale.

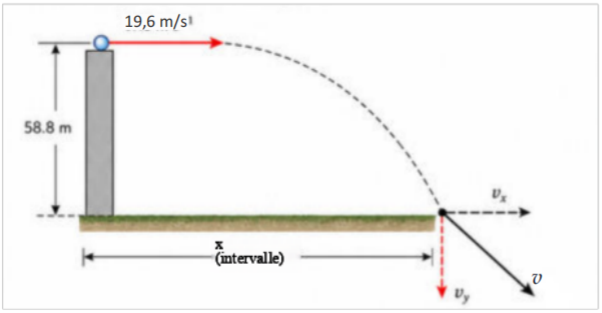
Application rapide

Un téléphone glisse d'un rebord de fenêtre situé à 4,9 m au-dessus du trottoir. Déterminez son temps de chute.

Essayer

(a) Un objet est projeté horizontalement à une vitesse de 19,6 m/s depuis une hauteur de 58,8 m au-dessus du sol.

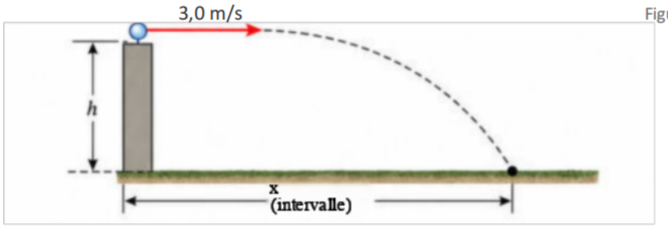
Figure 1-2-8 · Une pierre lancée à 19,6 m/s depuis une hauteur de 58,8 m.



(i) Déterminer le temps mis (en s) pour que l'objet atteigne le sol.
(ii) Déterminer la portée horizontale de l'objet en m.
(iii) Déterminer la vitesse de l'objet en m/s juste avant qu'il ne touche le sol.

(b) Un objet projeté horizontalement à une vitesse de 3,0 m/s depuis une certaine hauteur atteint le sol en 3,0 s.

Figure 1-2-9 · Portée d'une balle lancée à 3,0 m/s.



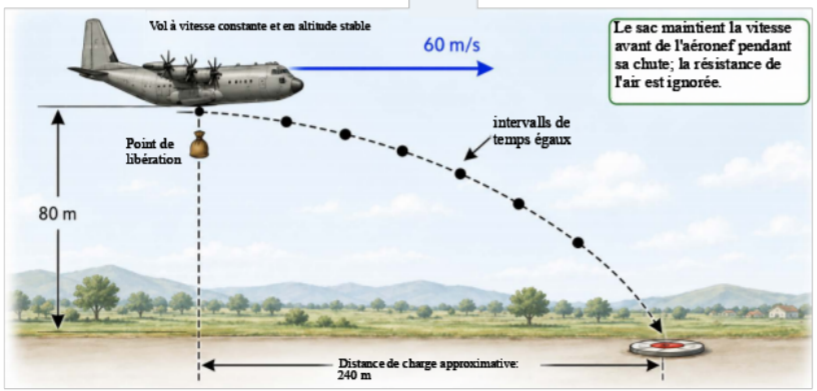
(i) Détermine la hauteur initiale de l'objet en m.

(ii) Détermine la portée horizontale de l'objet en m.

Dans un nouveau contexte — Chute avant la cible

Un avion de secours vole en palier à 60 m/s, à 80 m au-dessus d'un village isolé par les inondations, et largue en chute libre des sacs de céréales à double emballage sur un terrain balisé. Le pilote ne doit pas larguer au-dessus du repère. Chaque sac quitte l'avion avec la vitesse horizontale de celui-ci, conserve cette vitesse horizontalement (en négligeant la résistance de l'air) et tombe verticalement sous l'effet de la gravité pendant ce temps. $= \sqrt{\frac{2 \times 80}{9.8}} \approx 4{,}0$ s, pendant lesquels le sac avance de $60 \times 4{,}0 \approx 240$ m. Le largage doit donc avoir lieu environ 240 m avant que l'avion n'atteigne la cible.

Figure 1-2-10 · Le sac conserve la vitesse horizontale de l'avion pendant sa chute.



➡ Si l'avion conserve sa vitesse horizontale constante, le sac atterrit presque directement sous l'avion — pourtant bien en avant de l'endroit où il a été lâché. Explique comment ces deux affirmations peuvent être vraies en même temps.

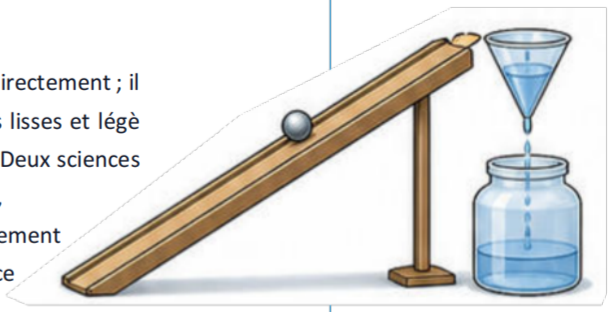
Fait clé

La hauteur détermine le temps de vol. La vitesse horizontale détermine la portée. Combinez les composantes de la vitesse pour trouver la vitesse à l'atterrissage.

Question de liaison

Le mouvement d'un projectile peut-il être résolu par l'énergie plutôt que par les équations cinématiques ?

Nature de la science : Expériences — ralentir l'effet de la gravité pour pouvoir chronométrer le mouvement



La chute libre était trop rapide pour que Galilée puisse la chronométrer directement ; il ralentit donc le mouvement en faisant rouler des billes sur des rainures lisses et légèrement inclinées, et en les chronométrant avec une horloge à eau. Dans Deux sciences nouvelles (1638), il montra que, si l'on néglige la résistance de l'air, un projectile combine un mouvement horizontal uniforme avec un mouvement vertical sous l'effet de la gravité, formant une parabole. Votre expérience des deux pièces suit la même idée.

À toi : Explique pourquoi l'étude du mouvement le long d'un plan incliné doux et sans frottement est analogue à l'étude de la chute libre verticale directe.

Question de la leçon, corrigée

Lorsqu'une pièce est projetée horizontalement depuis une table tandis qu'une autre pièce est lâchée à côté, laquelle touche le sol en premier et qu'est-ce qui détermine le résultat ? Aucune n'arrive en premier : elles touchent le sol ensemble. Lorsqu'on néglige la résistance de l'air, la gravité détermine le mouvement vertical indépendamment du mouvement horizontal. Augmenter la vitesse horizontale augmente la distance horizontale parcourue, mais ne change pas le temps de vol depuis la même hauteur.

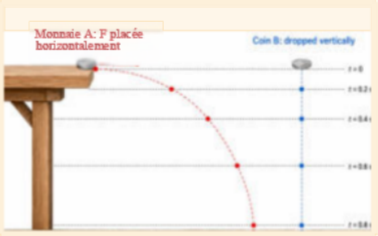


Figure 1-2-11 · L'expérience des pièces, revisitée.

Exercice

(a) Un objet est projeté horizontalement à une vitesse de 9,8 m/s depuis une hauteur de 14,7 m au-dessus du sol.

(i) Détermine le temps mis (en secondes) par l'objet pour atteindre le sol.

(ii) Détermine la portée horizontale de l'objet en m.

(iii) Détermine la vitesse de l'objet en m/s juste avant qu'il ne touche le sol.

(b) Un objet projeté horizontalement à une vitesse de 6,0 m/s depuis une certaine hauteur atteint le sol en 2,0 s.

(i) Détermine la hauteur initiale de l'objet en m.

(ii) Détermine la portée horizontale de l'objet en m.

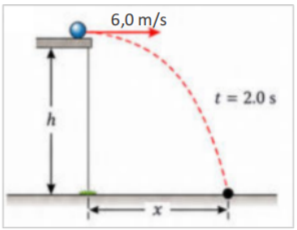


Figure 1-2-12 · Un lancement à 6,0 m/s tombant pendant 2,0 s.

(c) Un objet est projeté horizontalement depuis une hauteur de 0,40 m et atterrit au point A, qui est à une distance horizontale de 0,40 m.

(i) Détermine le temps en s à partir du moment où l'objet est projeté jusqu'à ce qu'il atteigne le sol.

(ii) Détermine la vitesse initiale de l'objet en m/s.

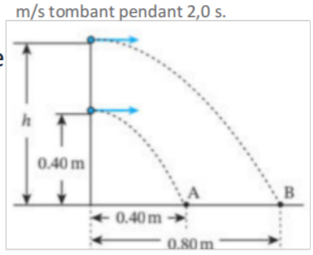


Figure 1-2-13 · Même vitesse, deux hauteurs, deux portées.

(iii) Détermine la hauteur initiale requise en m pour que l'objet tombe au point B, à 0,80 m de distance à l'horizontale, en supposant la même vitesse initiale.

Conseil d'examen

Conserve le temps non arrondi dans les parties suivantes ; arrondir trop tôt peut réduire la précision des réponses ultérieures.

Question type examen

Une balle roule d'un banc horizontal de 1,25 m de hauteur à une vitesse de 2,0 m/s.

(a) **Calcule** le temps que met la balle pour atteindre le sol.

(b) **Détermine** la distance horizontale depuis le banc à laquelle la balle atterrit.

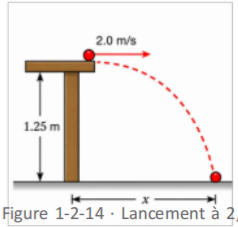
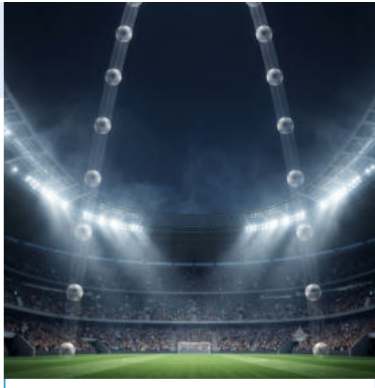


Figure 1-2-14 · Lancement à 2,0 m/s depuis 1,25 m.



Leçon 1-3 — Mouvement d’un projectile lancé avec un angle

❓ **Question de la leçon :**Au point le plus haut du mouvement d’un projectile lancé avec un angle, le ballon est-il momentanément au repos ?

Tu apprendras à

À la fin de cette leçon, tu seras capable de :

1. **Expliquer** comment un projectile lancé avec un angle peut être décomposé en deux mouvements indépendants.
2. **Calculer** le temps de vol, la hauteur maximale et la portée d’un projectile lancé avec un angle.
3. **Décrire** le mouvement d’un projectile au point le plus haut, y compris ses composantes horizontale et verticale de vitesse.

🔍 Le phénomène — prédis avant de continuer



Figure 1-3-1 · Un ballon frappé : au point le plus haut, la vitesse verticale est nulle.

Regarde le ralenti d’un coup franc. Le ballon quitte le pied du joueur, s’élève et semble marquer une pause au point le plus haut de sa trajectoire avant de redescendre vers le but. Les commentateurs parlent parfois de « temps de suspension ». Regarde à nouveau le ralenti et concentre-toi sur le point le plus haut : le ballon est-il réellement au repos à cet instant ?

Prédis avant de poursuivre

(a) Au point le plus haut, la vitesse de la balle est-elle nulle, minimale mais non nulle, ou inchangée ?

(b) La balle met 1,8 s pour atteindre le point le plus haut — le retour à la hauteur de lancement prendra-t-il plus, moins ou le même temps ?

Fait clé

Les composantes horizontale et verticale du mouvement sont indépendantes.

Explore — Faire une pause au point le plus haut

Ce que tu feras : utilise la vidéo au ralenti d'un téléphone poursuivre un projectile lancé avec un angle et chercher des régularités dans son mouvement.

Temps :12 min

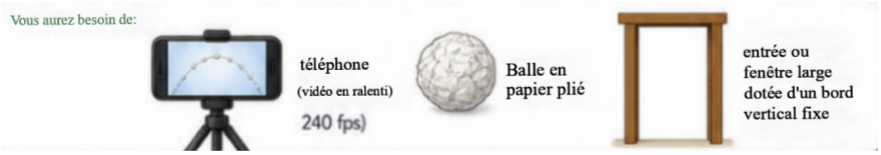


Figure 1-3-2 · Un téléphone à 240 i/s, une boule de papier et une embrasure de porte avec un bord droit.

Il vous faudra :

- Un téléphone avec vidéo au ralenti
- Une embrasure de porte avec un bord vertical net
- Une boule de papier froissé
- Une règle

Étapes :

1. Lance la boule de papier à environ 45° pour qu'elle suive une trajectoire courbe à travers une porte ouverte ; un partenaire la filme au ralenti contre le bord de la porte.
2. Parcoure les images de la vidéo près du point le plus haut de la trajectoire, une à la fois. Contre le bord fixe de la porte, observez séparément les deux composantes du mouvement.
3. Marquez le centre de la boule dans chaque image. À l'aide de l'échelle, mesure les distances horizontales et verticales entre les positions consécutives.
4. Répéte avec un angle de lancement plus raide et notez vos observations.

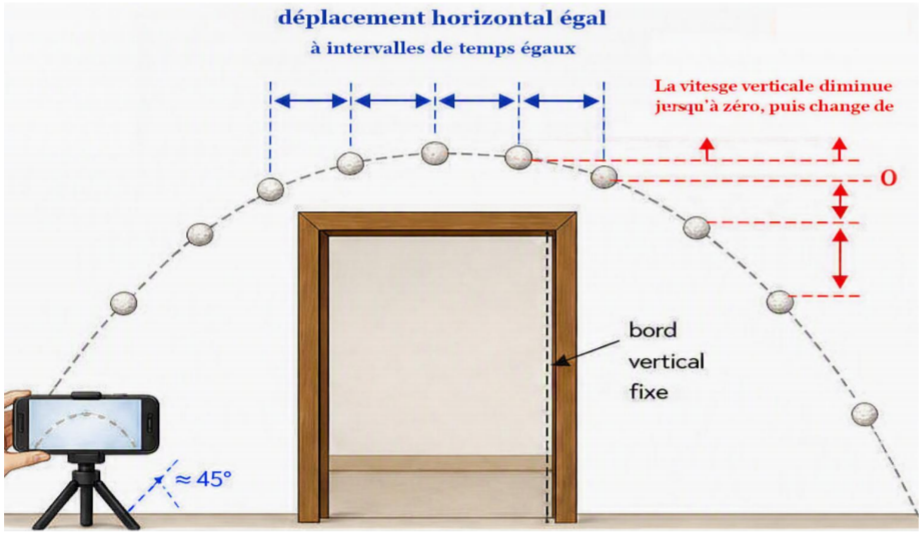


Figure 1-3-3 · Pas horizontaux égaux dans des temps égaux lorsque la vitesse verticale s'inverse.

Angle de lancement	Déplacement horizontale	Déplacement verticale
Environ 45°		
Plus raide		

Analyse ce que tu as recueilli :

(a) Pour chaque angle de lancement, le déplacement horizontal par image est-il resté à peu près constant lorsque la balle passait par le point le plus haut ?

(b) Comment le mouvement vertical a-t-il changé lorsque la balle passait par le point le plus haut ?

Écris ton explication en deux lignes avant de lire la page suivante.

Remarque sur la mesure

Des numéros d'image égaux signifient des intervalles de temps égaux. Comparez le déplacement horizontal sur le même nombre d'images.

De l’ observation au modèle

Dans Explore, en examinant la vidéo image par image, la balle continuait de se dé placer horizontalement en passant par le point le plus haut par étapes à peu près é gales. Pendant ce temps, le déplacement vertical entre les images successives diminue à mesure que la balle monte, devient approximativement nul au point le plus haut, puis s’ inverse et augmente à mesure que la balle tombe. Vous aviez peut-être prédit que la balle s’ arrêterait complètement au point le plus haut, mais les preuves vidéo montrent le contraire. Le modèle suivant explique vos observations.

Décomposition du mouvement d’ un projectile en composantes

Décomposez la vitesse de lancement v_0 en deux composantes. La composante horizontale est $v_x = v_0 \cos\theta$; si l’ on néglige la résistance de l’ air, elle reste constante. Pour la composante verticale, la balle se comporte exactement comme un lancer vers le haut — elle commence avec $v_y = v_0 \sin\theta$ et la gravité la ramène, donc $v_y = v_0 \sin\theta - gt$ et $y = v_0 \sin\theta \times t - \frac{1}{2}gt^2$. Les mouvements horizontal et vertical sont indépendants seulement lorsque la résistance de l’ air est négligée et que la gravité est uniforme, et ils partagent le même temps, t.

Au point le plus haut, seule la composante verticale de la vitesse devient nulle. La composante horizontale reste constante, de sorte que la balle n’ est jamais réellement au repos.

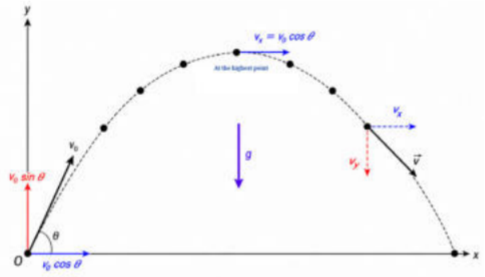


Figure 1-3-4 · La vitesse de lancement décomposée en composantes horizontale et verticale.

Point

- Le mouvement d'un objet projeté selon un angle par rapport à l'horizontale est appelé **mouvement projectile**. Il suit une trajectoire parabolique, et le mouvement dans le plan vertical est décomposé en **composantes horizontale et verticale** et traité comme deux mouvements linéaires indépendants.
- Les deux composantes

  Composante horizontale : En négligeant la résistance de l'air, l'objet se déplace avec une vitesse constante égale à la composante horizontale de la vitesse initiale v_0[m/s] : $v_x = v_0 \cos\theta$ et $x = v_0 \cos\theta \times t$.

  Direction verticale : Il subit le même mouvement qu'un lancer vertical vers le haut.*Accélération constante −g,initial vertical velocity* $v_0 \sin\theta$.$v_y = v_0 \sin\theta - gt$ et $y = v_0 \sin\theta \times t - \frac{1}{2}gt^2$.
- Uniquement pour un lancement et un atterrissage à la même hauteur, et en négligeant la résistance de l' air, le mouvement est symétrique par rapport à la ligne verticale passant par le point le plus haut. Si le temps mis pour atteindre la hauteur maximale est de 1,2 s, le temps de vol total est de 2,4 s ; si la distance horizontale jusqu'à la hauteur maximale est de 3,0 m, la portée horizontale totale est de 6,0 m.

Encadré d'équation

Mouvement horizontal	$a = 0 \rightarrow x = v_0 \cos\theta \times t$
Mouvement vertical	$v_y = v_0 \sin\theta - gt$ $y = v_0 \sin\theta \times t - \frac{1}{2}gt^2$

Temps de vol

Temps total du lancement à l’ atterrissage ; sur un sol plat, il est le double du temps mis pour atteindre le point le plus haut

Application rapide

Un ballon est frappé à 14 m/s à 30° au-dessus de l’ horizontale. Dé terminez les deux composantes de sa vitesse initiale

Symétrie par rapport au point le plus haut

Le mouvement est symétrique par rapport au point le plus haut uniquement pour un lancement et un atterrissage à la même hauteur, sans résistance de l'air. Par conséquent, le temps mis pour monter jusqu'à la hauteur maximale est égal au temps mis pour redescendre au niveau de lancement : $t_{vol}=2t_{sommet}$

Comme il n'y a pas d'accélération horizontale (en négligeant la résistance de l'air), la vitesse horizontale reste constante tout au long du mouvement. Par conséquent, la portée horizontale est donnée par : $R=v_0 \cos\theta \times t_{vol}$

Par exemple, si un projectile atteint son point le plus haut après 1,2 s, il reviendra à sa hauteur initiale après 2,4 s. Si le déplacement horizontal au point le plus haut est de 3,0 m, alors la portée horizontale totale est de 6,0 m, puisque le mouvement horizontal est uniforme.

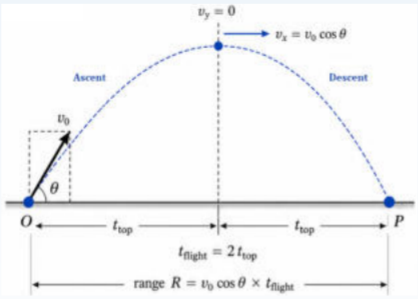


Figure 1-3-5 · La montée et la descente prennent des temps égaux, la portée s'ensuit donc.

Fait essentiel

Pour utiliser l'équation du mouvement, décomposez d'abord le mouvement du projectile en composantes horizontale et verticale. En négligeant la résistance de l'air $v_0 y = v_0 \sin\theta$ et $a = -g$

Exemple traité

Situation	Une petite balle est lancée depuis le sol avec une vitesse initiale de 19,6 m/s à un angle de 30° au-dessus de l'horizontale. Le mouvement se produit sous une accélération gravitationnelle constante g = 9,8 m/s² sans résistance de l'air.
Données et éléments requis	**Donné :** $v_0 = 19{,}6$ m/s ; $\theta = 30°$; g = 9,8 m/s² $\sin 30° = \frac{1}{2}, \cos 30° = \frac{\sqrt{3}}{2}$ Requis : (a) Temps pour atteindre la hauteur maximale (b) Portée horizontale
Représentation	Décomposer la vitesse en composantes. $v_0 x = v_0 \cos\theta, v_0 y = v_0 \sin\theta$ À la hauteur maximale, $v_y = 0$ Le mouvement d'un projectile est symétrique (temps de montée = temps de descente).
Stratégie	Décomposez la vitesse initiale en composantes horizontale et verticale, utilisez les formules du mouvement à vitesse constante pour l'horizontale et les équations du mouvement à accélération constante pour la verticale.
Solution annotée	(a) Temps pour atteindre la hauteur maximale À la hauteur maximale : $v_y = 0$ $v_y = v_0 \sin\theta - gt$ 0 = 9,8 m/s − (9,8 m/s²)t 9,8t=9,8 t= 1,0 s Temps de vol total : 2t = 2,0 s **(b)** Portée horizontale $R = v_0 \cos\theta \cdot t_{flight}$ = 19,6 × cos 30° • 2,0 = 33,948 ≈ 34 m

Vérification de la cohérence	Le temps 1,0 s est cohérent avec $v_0 y/g$. La portée ≈ 34 m est raisonnable pour un projectile de 19,6 m/s à 30 °. Le mouvement est symétrique (temps de montée = temps de descente).
Explique-le toi-même	Pourquoi la décomposition du mouvement en composantes horizontale et verticale permet-elle de déterminer séparément le temps de vol et la portée, même si le projectile suit une trajectoire courbe ?

À toi d'essayer : Le même ballon est frappé avec un angle plus grand — 9,8 m/s à 60° par rapport à l'horizontale. Calcule le temps nécessaire pour atteindre la hauteur maximale et la hauteur maximale.

Essaye

Une petite balle est lancée depuis le sol à une vitesse de 19,6 m/s selon un angle de 60° par rapport à l'horizontale. Déterminez les valeurs suivantes avec deux chiffres significatifs, en supposant que l'accélération due à la gravité est de 9,8 m/s² et $\sqrt{3} \approx 1,73$.

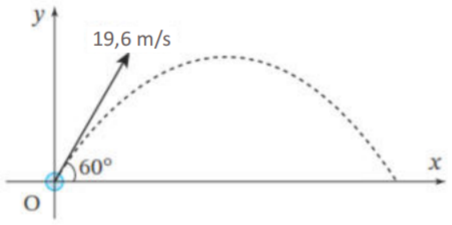


Figure 1-3-6 · Un lancement de 19,6 m/s à 60° par rapport à l'horizontale.

(a) Détermine la composante horizontale de la vitesse initiale en m/s.

(b) Détermine le temps mis (en secondes) pour que la balle atteigne sa hauteur maximale.

(c) Détermine la hauteur maximale atteinte par la balle en m.

(d) Détermine la portée horizontale en m.

Dans un nouveau contexte — le motif du feu d'artifice qui reste sphérique



Figure 1-3-7 · Chaque fragment suit sa propre parabole sous la même accélération.

Une bombe de feu d'artifice éclate haut au-dessus de la ville, éjectant des pastilles lumineuses, appelées étoiles, dans toutes les directions. Chaque étoile se déplace alors comme un projectile indépendant et subit la même accélération gravitationnelle vers le bas, (g). En négligeant la résistance de l'air, chaque étoile suit une trajectoire parabolique par rapport au sol. Comme la gravité donne à chaque étoile la même accélération, elle ne modifie pas leur mouvement relatif les unes par rapport aux autres. Si les étoiles sont éjectées à des vitesses approximativement égales dans toutes les directions, elles forment un motif en expansion, approximativement sphérique. Le centre de ce motif suit une trajectoire de projectile, tandis que le motif augmente en taille mais reste approximativement sphérique.

Explique pourquoi le motif en expansion des étoiles reste approximativement sphérique, même si chaque étoile suit une trajectoire parabolique.

Question de liaison

Comment un champ gravitationnel affecte-t-il le mouvement d'un objet ?

Figure 1-3-8 · Au sommet, seule la vitesse verticale est nulle.

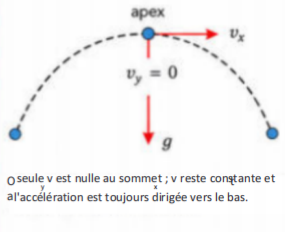
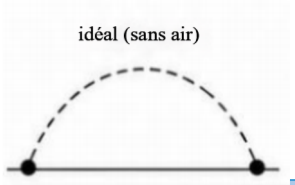


Figure 1-3-9 · Trajectoire idéale, sans air.



Nature de la science : Modèles — l'auteur du modèle a identifié ses limites

Dans Deux sciences nouvelles (1638), Galilée a montré qu'en l'absence de résistance de l'air, un projectile suit une trajectoire parabolique. C'est le modèle utilisé tout au long de cette leçon. Dans le même ouvrage, cependant, il a souligné que la résistance de l'air fait dévier la trajectoire réelle d'une parabole, surtout à grande vitesse. Tout modèle physique possède un domaine de validité, et Galilée lui-même a identifié les limites du modèle de projectile qu'il a élaboré.

À votre tour : Propose une observation issue d'un vrai match de football que le modèle parabolique négligeant la résistance de l'air ne peut pas expliquer.

Question de la leçon, réponse

Au point le plus haut du mouvement parabolique d'une balle, la balle est-elle momentanément au repos ? Jamais véritablement au repos. La composante verticale de la vitesse devient momentanément nulle, tandis que la composante horizontale de la vitesse reste constante (en négligeant la résistance de l'air). L'accélération reste dirigée vers le bas pendant tout le mouvement. La balle semble seulement faire une pause parce que son mouvement vertical ralentit jusqu'à zéro avant d'inverser sa direction ; son mouvement horizontal ne s'arrête jamais.

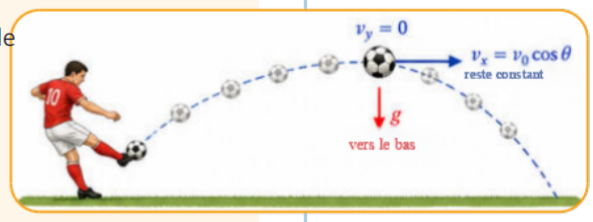


Figure 1-3-10 · Le tir revisité : la vitesse horizontale ne change jamais.

Exercice

(a) Une petite balle est lancée depuis le sol à une vitesse de 39,2 m/s selon un angle de 30° par rapport à l'horizontale.

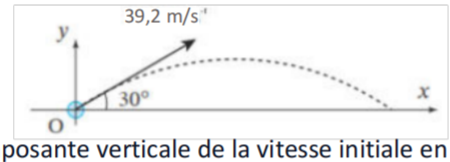
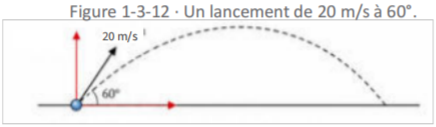


Figure 1-3-11 · Un lancement à 39,2 m/s à 30°.

(i) Détermine la composante verticale de la vitesse initiale en m/s.
(ii) Détermine la composante horizontale de la vitesse après 1,5 s en m/s.
(iii) Détermine le temps mis (en secondes) pour que la balle atteigne sa hauteur maximale.
(iv) Déterminez la portée horizontale en m.

(b) Une petite balle est lancée depuis le sol à une vitesse de 20 m/s sous un angle de 60° par rapport à l'horizontale.

Figure 1-3-12 · Un lancement de 20 m/s à 60°.



(i) Détermine la composante horizontale de la vitesse initiale en m/s.
(ii) Détermine la composante verticale de la vitesse après 0,50 s en m/s.

(c) Une petite balle est lancée depuis le sommet d'un bâtiment situé à 39,2 m au-dessus du sol à une vitesse de 19,6 m/s sous un angle de 30° au-dessus de l'horizontale.

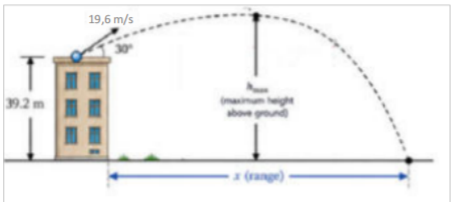


Figure 1-3-13 · Lancement à 19,6 m/s et 30° depuis un bâtiment de 39,2 m.

(i) Détermine le temps mis (en secondes) pour que la balle atteigne sa hauteur maximale.
(ii) Détermine la hauteur maximale atteinte par la balle au-dessus du sol en m.
(iii) Détermine le temps mis (en secondes) pour que la balle touche le sol.
(iv) Détermine la portée horizontale en m.

Question type examen

Une pierre est lancée depuis le niveau du sol à 12 m/s à 30° au-dessus de l'horizontale.

(a) **Indique** la composante horizontale de sa vitesse au point le plus haut.

(b) **Calcule** le temps que met la pierre pour revenir au sol.



Leçon 1-4 — Moment d’ une force

❓ **Question de la leçon :**Poussez une porte avec la même force à deux endroits — pourquoi tourne-t-elle facilement au niveau de la poignée mais bouge à peine près de la charnière ?

Tu vas apprendre à

À la fin de cette leçon, tu seras capable de :

1. **Calculer** le moment d’ une force comme le produit de la force et de sa distance perpendiculaire au point de rotation.
2. **Déterminer** le bras de levier perpendiculaire pour une force agissant selon un angle.
3. **Attribuer** un signe positif ou négatif à un moment selon le sens de rotation.

🔍 Le phénomène — prédis avant de continuer

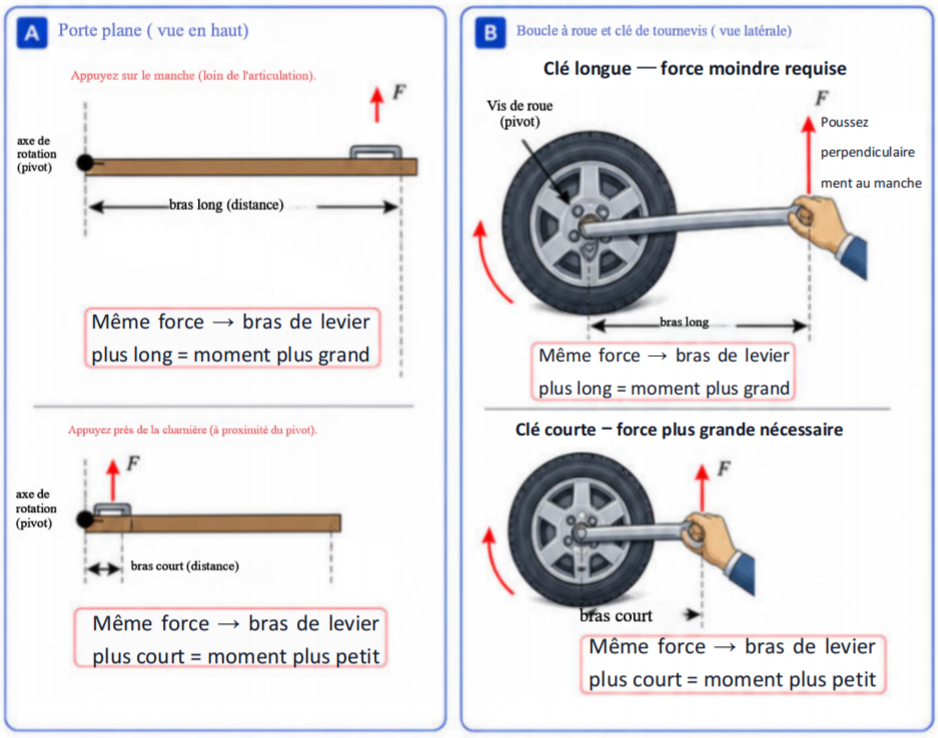


Figure 1-4-1 · Porte et clé : la même force produit un moment plus grand sur un bras plus long.

Une porte s’ ouvre facilement quand on la pousse par la poignée, mais elle est beaucoup plus difficile à ouvrir quand on la pousse près de la charnière. De même, une clé plus longue desserre plus facilement un écrou de roue serré qu’ une clé plus courte. Dans les deux cas, la force est la même — c’ est la distance par rapport au pivot qui change.

Prédis avant de poursuivre

(a) La grandeur de la force suffit-elle à elle seule à déterminer son effet de rotation ?

(b) Pousser la porte près de la charnière rend-il la porte plus facile à ouvrir parce que la force est plus proche du pivot ?

⭐ Fait clé

Une force est une poussée ou une traction ayant une intensité et une direction. Cette leçon porte sur l’ effet de rotation d’ une force autour d’ un point.

Explore — Étude de l'effet de la distance sur l'équilibre

Ce que tu feras : place des pièces identiques à des distances mesurées de part et d'autre d'un pivot et note les dispositions qui équilibrent la règle.

Durée :12 min

Tu auras besoin de :

- Une règle droite.
- Un crayon servant de pivot sous le milieu de la règle.
- Un petit groupe de pièces identiques.
- Une tableplate.



Figure 1-4-2 · Une règle droite, un crayon comme pivot, des pièces identiques et une table plate.

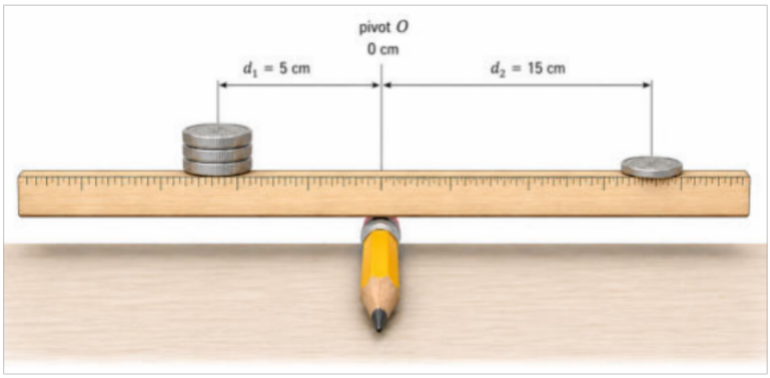


Figure 1-4-3 · A règle équilibrée sur un pivot en crayon, avec des pièces des deux côtés.

Étapes :

1. Place la règle sur le crayon jusqu'à ce qu'elle s'équilibre horizontalement, le crayon étant sous le repère du point médian.
2. Place une pièce près de l'extrémité droite et observez la règle s'incliner vers le bas de ce côté.
3. Ajoute maintenant des pièces du côté gauche, près du crayon, jusqu'à ce que la règle s'équilibre à nouveau.
4. Compte combien de pièces près du pivot (n) sont nécessaires pour équilibrer la pièce unique éloignée, et mesurez les deux distances.
5. Rapproche la pièce unique du crayon et répétez la procédure d'équilibrage.

d_1	Nombre de pièces du côté gauche	d_2

Analyse ce que tu as recueilli :

(a) Lorsque la pièce unique était placée plus loin du pivot, fallait-il plus de pièces près du pivot ou moins pour l'équilibrer ?

(b) Multiplie le nombre de pièces de chaque côté par sa distance au pivot. Comment les deux produits se comparent-ils à l'équilibre ?

Écris votre explication en deux lignes avant de lire la page suivante.

Une note de mesure

Lis chaque distance jusqu'à la division d'échelle la plus proche. Répétez l'équilibrage deux fois, car le nombre de pièces peut varier d'une unité près du point d'équilibre.

De l'observation au modèle

Dans Exploration, une pièce éloignée du pivot était équilibrée par plusieurs pièces proches du pivot. À l'équilibre, la force multipliée par sa distance correspondait des deux côtés, et non la force seule. Vous aviez peut-être prédit que le groupe le plus lourd ferait basculer la règle vers le bas. Voici le modèle vers lequel vos observations tendent.

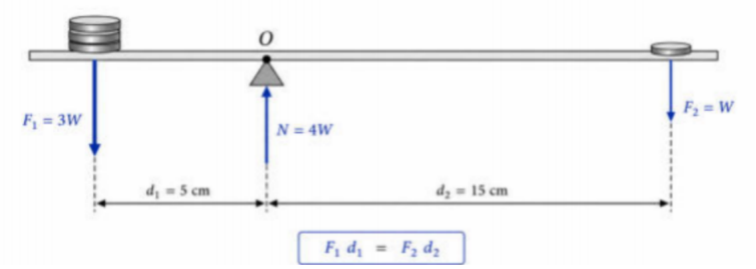


Figure 1-4-4 · À l'équilibre, les deux moments autour du pivot sont égaux.

Moment d'une force

Une force ne fait pas que pousser un corps — elle peut le faire tourner autour d'un point. L'importance de son effet de rotation dépend de deux choses à la fois : la grandeur de la force et la distance entre sa ligne d'action et le pivot. Cet effet de rotation s'appelle le moment d'une force par rapport au point. Mesurez la force en newtons et la distance perpendiculaire en mètres ; le moment s'exprime alors en newtons-mètres (N m). Le moment d'une force par rapport à un point est le produit de la force et de la distance perpendiculaire entre le point et la ligne d'action de la force.

Moment d'une force

l'effet de rotation d'une force autour d'un point ; son unité est (N m).

Sens de rotation — le signe d'un moment

Une force peut produire un moment autour d'un certain point dans l'un ou l'autre de deux sens : antihoraire ou horaire. Nous distinguons ces directions au moyen d'une convention de signe, en considérant une rotation antihoraire comme **positive** et une rotation horaire comme **négative**. Chaque moment porte donc à la fois une grandeur et un signe.

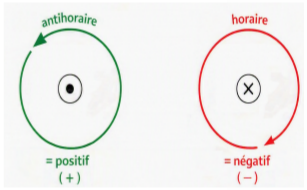


Figure 1.4.5 : Convention de signe : sens antihoraire positif, sens horaire négatif.

Lorsque la force est inclinée — le bras de levier

Lorsqu'une force est inclinée, le bras de levier est déterminé par la distance perpendiculaire du point *O* à la ligne d'action de la force. Pour une force F telle qu'illustrée à la Figure 1-4-6, puisque $d=L \sin\theta$, le moment de force par rapport au point *O* est donné par $M = FL \sin\theta$.

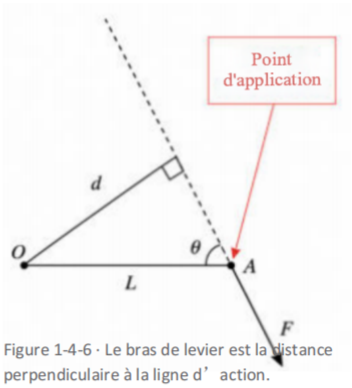


Figure 1-4-6 · Le bras de levier est la distance perpendiculaire à la ligne d'action.

Conseil pour l'examen

Avant de calculer le moment autour du point O, tracez la distance perpendiculaire du point O à la ligne d'action de la force.

Point

Un objet étendu idéal qui ne se déforme pas lorsqu'une force est appliquée est appelé corps rigide. L'effet de rotation d'une force autour du point O est déterminé par le produit de la grandeur de la force et de la distance perpendiculaire **du point O à la ligne d'action**. On l'appelle le **moment de la force** par rapport au point O, et son unité est le **newton-mètre (N m)**. La distance perpendiculaire du point O à la ligne d'action est appelée le **bras de levier**.

En notant le moment de force M [N m], la grandeur de la force *F*[N] et la longueur du bras de levier *d*[m], cela s'exprime par $M = Fd$. Pour une force *F* agissant selon un angle, puisque $d=L \sin\theta$, le moment par rapport au point O est $M= FL \sin\theta$. Une force peut faire tourner l'objet **dans le sens antihoraire ou horaire** autour d'un point, et ceux-ci sont distingués en attribuant un signe positif **ou négatif** au moment. Ainsi, le moment d'une force autour d'un point situé sur sa propre ligne d'action est de **0 N m**.

Là, la distance perpendiculaire à la ligne d'action est de 0 m.

Encadré d'équation

Moment d'une force	$M = Fd$
Moment d'une force inclinée	$M = FL \sin\theta$

Exemple résolu

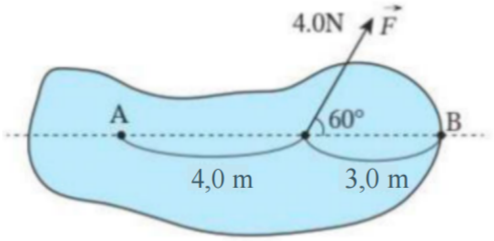


Figure 1-4-7 · Une force de 4,0 N appliquée à 60° par rapport à la ligne AB.

Situation	Une force de 4,0 N agit comme indiqué. Déterminez le moment de la force par rapport aux points A et *B*. Prenez le sens antihoraire comme positif.
Donné et requis	Donné : F = 4,0 N, θ= 60°, distance jusqu'à A = 4,0 m, distance jusqu'à *B*= 3,0 m. Requis : Trouvez le moment autour de A et *B*.
Représentation	Moment = Force × distance perpendiculaire ⟶ *M=Fd*
Stratégie	- Trouvez la distance perpendiculaire du point de référence à la ligne d'action de la force. - Appliquez *M=FL* sin θ. - Attribuez un signe (+ dans le sens antihoraire, − dans le sens horaire) .
Solution annotée	**(a)** Autour du point A $M = F\,L \sin\theta$ = 4,0 × 4,0 × sin 60° = 13,9 ≈ 14 N m La rotation est antihoraire ⟶ *M* = +14 N *m* **(b)** À propos du point B $M = -F\,L \sin\theta$ = −4,0 × 3,0 × sin 60° = −10,4 ≈ −10 N m
Vérification de la Cohérence	La même force agit dans les deux cas, mais le point A a une distance perpendiculaire plus grande par rapport à la ligne d'action de la force que le point B, donc l'intensité du moment en A est plus grande.
Explique-le toi-même	Explique pourquoi le moment autour du point A est plus grand en intensité que celui autour du point B, même si la même force est appliquée.

À vous maintenant :la même force de 4,0 N agit sur le même corps. Prends un point C sur le corps, à 2,0 m du point où la force est appliquée, et elle fait tourner le corps dans le sens horaire autour de C.**Détermine** le moment de la force autour de C en N m .

Application rapide

Une force de 5,0 N agit perpendiculairement à une tige de 0,40 m de long, à une extrémité de la tige. Calcule le moment autour de l'autre extrémité en utilisant M= FD.

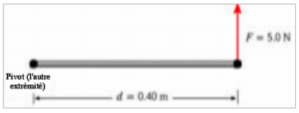


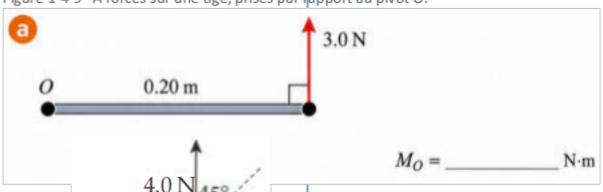
Figure 1-4-8 · Une force de 5,0 N agissant à 0,40 m à partir du pivot.

Essaye

Pour chaque figure, détermine le moment de la force par rapport au point O. Prends le sens antihoraire comme positif.

(a) O se trouve à l'extrémité gauche d'une barre horizontale. Un bras horizontal de 0,20 m de long s'étend depuis O. Une force de 3,0 N agit perpendiculairement à l'extrémité éloignée. (La force est perpendiculaire au bras — la longueur du bras est la distance perpendiculaire.)

Figure 1-4-9 · A forces sur une tige, prises par rapport au pivot O.



(b) Une barre inclinée a un point O à son extrémité inférieure. La barre est inclinée d'un certain angle par rapport à l'horizontale. Une force de 4,0 N est appliquée à l'extrémité supérieure, à 0,30 m de O le long de la barre. La force agit à un angle de 45° par rapport à la barre.

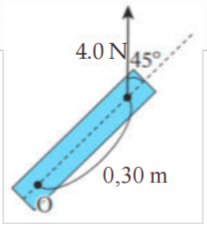
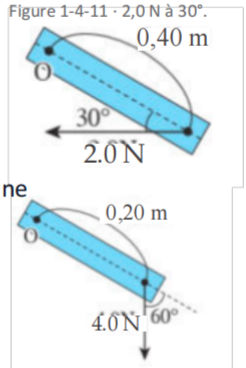


Figure 1-4-10 · 4,0 N à 45°.

(c) Une barre inclinée a O à son extrémité gauche. Une force de 2,0 N est dirigée vers la gauche à l'extrémité éloignée, à 0,40 m de O. La force agit à un angle de 30° par rapport à la barre.

Figure 1-4-11 · 2,0 N à 30°.



(d) Le point O se trouve à l'extrémité supérieure gauche d'une barre. Une force de 4,0 N agit à 0,20 m de O, agissant comme indiqué sur la figure 1-4-12 et faisant tourner la barre dans le sens horaire.

Figure 1-4-12 · Une force de 4,0 N à 60° sur un bras de 0,20 m.

Dans un contexte d'atelier — utilisation d'une clé dynamométrique

Dans un atelier automobile ou aéronautique, un écrou de roue doit être serré pour produire l'effet de rotation correct. Si l'écrou n'est pas assez serré, il peut se desserrer en service ; s'il est trop serré, le boulon risque d'être endommagé. Les mécaniciens utilisent donc une clé dynamométrique : un outil qui émet un clic audible lorsque le moment de force requis est atteint. Lorsque le mécanicien tire, l'effet de rotation dépend de la force et de la distance perpendiculaire (bras de levier). Une clé plus longue donne un bras plus grand, donc une force plus petite peut produire le même moment. Le clic est déclenché par le moment réglé — souvent appelé couple dans les contextes d'ingénierie — et non par la force seule.

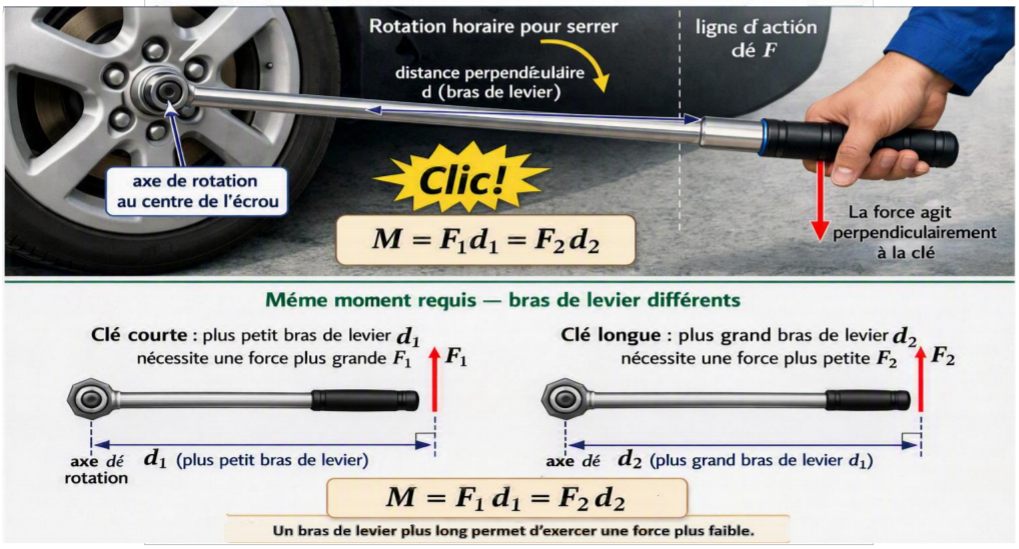


Figure 1-4-13 · Le même moment avec un bras plus long nécessite une force plus petite.

➡ **À votre tour : Explique** pourquoi une clé dynamométrique plus longue atteint le même moment préréglé avec une force plus petite, en utilisant la relation : force × distance perpendiculaire (bras de levier)

Une note de travail

Dans **(b)**,**(c)**et **(d)**la force est inclinée, donc trouvez d'abord la distance perpendiculaire (bras de levier) d = L sin θ, puis multipliez par la force, puis attribuez le signe pour la rotation.

Fait clé

L'unité de moment est le N m. Bien qu'elle ait les mêmes unités de base que le joule, elle n'est pas utilisée de la même manière : le N m pour le moment sert à mesurer un effet de rotation, tandis que le J pour l'énergie sert à mesurer l'énergie transférée ou stockée.

Nature de la science : Archimède et le levier — la première loi de la mécanique

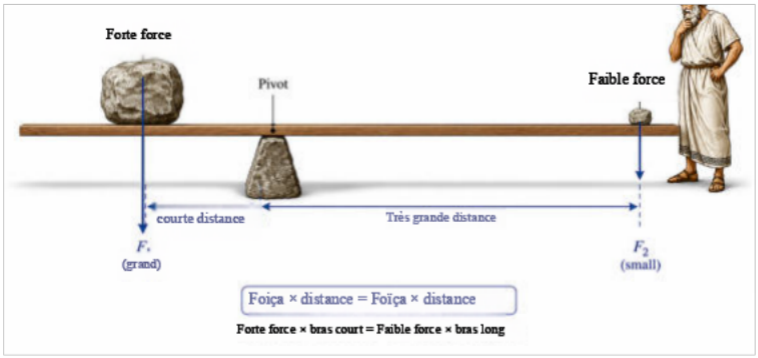


Figure 1-4-14 · Un bras long permet à une petite force d'équilibrer une grande force.

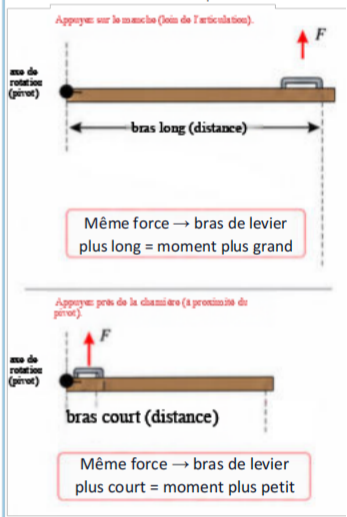
Il y a plus de deux mille ans, Archimède formula la loi du levier. Un petit poids éloigné du pivot peut équilibrer un grand poids proche du pivot, lorsque le produit poids × distance est é gal des deux côtés. On raconte qu'il aurait déclaré : « Donnez-moi un point d'appui et je soul èverai la Terre. » Ce fut l'une des premières règles quantitatives précises connues concernant l'effet de rotation d'une force. C'est le même produit — force × bras de moment — que vous avez utilisé tout au long de cette leçon. (Source : Archimède, De l'équilibre des plans, v. 250 av. J.-C.)

À ton tour : propose un outil du quotidien qui utilise la loi du levier — un grand moment à partir d'une petite force appliquée loin du pivot.

Question de la leçon, réponse

Poussez une porte avec la même force à deux endroits — pourquoi tourne-t-elle facilement au niveau de la poignée mais bouge à peine près de la charnière ? Parce que le moment dépend à la fois de la force et de sa distance perpendiculaire à la charnière, et non de la force seule. Au niveau de la poignée, le bras de levier est long, donc le moment est grand ; près de la charnière, le bras de levier est petit, donc le moment est petit. Attribuez un signe à ce moment — antihoraire positif, horaire négatif — et le moment est entièrement décrit pour cette convention de signe plane.**Le moment d'une force est le produit de la force et de la distance perpendiculaire du point à la ligne d'action de la force : appliquez la force plus loin du pivot, et la même force produit un moment beaucoup plus grand.**

Figure 1-4-15 · La porte revisitée : pousser loin de la charnière la fait tourner plus facilement.



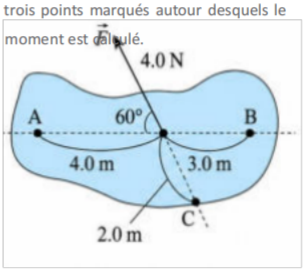
Fait clé

Une force dont la ligne d'action passe par le pivot a un bras de levier nul, donc elle produit un moment nul — la distance, et non seulement la force, détermine le moment.

Exercice

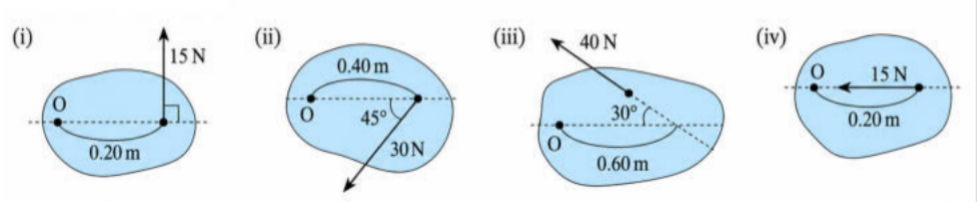
(a) Comme le montre la Figure 1-4-16, lorsqu'une force F d'intensité 4,0 N est appliquée, détermine le moment de la force par rapport à chacun des points suivants.
Prends le sens antihoraire comme positif.

Figure 1-4-16 · Le même corps avec trois points marqués autour desquels le moment est calculé.



(i) Point A (ii) Point B (iii) Point C

(b) Pour chacune des figures suivantes, détermine le moment de la force par rapport au point O.



Question type examen

Une force de 6,0 N agit à l'extrémité d'un levier de 0,50 m de long, à 30° par rapport au levier.**Déterminez** le moment de la force par rapport à l'autre extrémité du levier.



Leçon 1-5 — Équilibre des forces

❓ **Question de la leçon**: Un livre reste au repos sur une table et une enseigne de magasin est suspendue par deux chaînes — qu'en est-il de la force ré sultante agissant sur chaque objet ?

Tu vas apprendre à

À la fin de cette leçon, tu seras capable de :

1. **Énoncer** la condition d'équilibre pour un corps au repos ou en mouvement à vitesse constante.
2. **Tracer** un diagramme de corps libre, en isolant le corps et en montrant toutes les forces externes agissant sur lui, en identifiant la source de chaque force.
3. **Déterminer** une force inconnue en décomposant les forces en composantes selon deux axes perpendiculaires et en appliquant les conditions d'équilibre à chaque axe.

🔍 Le phénomène — prédis avant de continuer

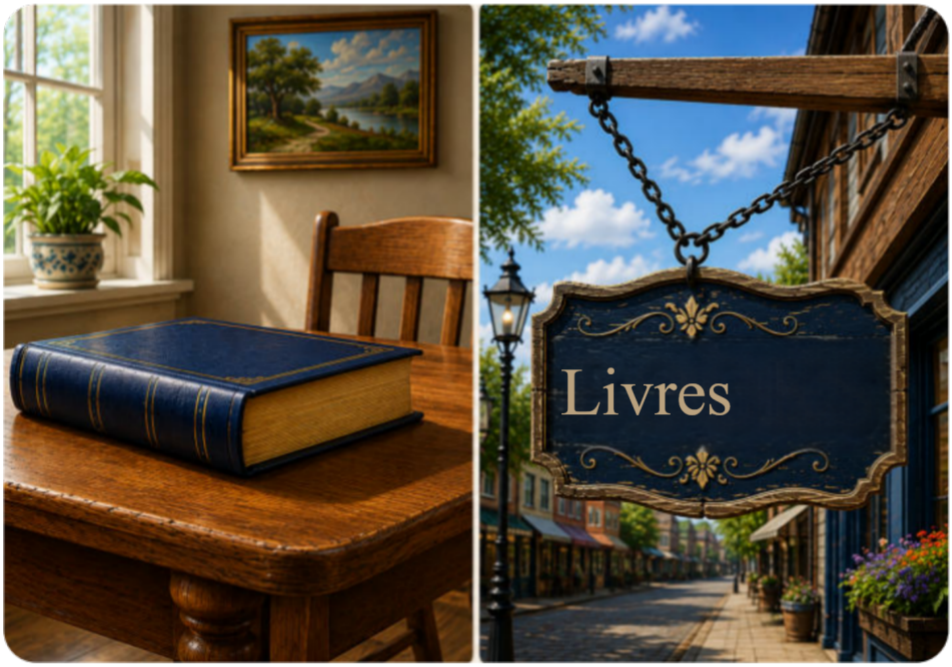


Figure 1-5-1 · Un livre au repos et une enseigne suspendue : tous deux sont en équilibre.

Un livre lourd repose sur une table. Son poids agit vers le bas en raison de la gravité, et pourtant le livre reste au repos sur la table. À proximité, une lourde enseigne de magasin est suspendue immobile à deux chaînes inclinées selon des angles différents : l'une est abrupte, l'autre est plus proche de l'horizontale.

✏️ **Prédis avant de poursuivre**

(a) Quelle force, le cas échéant, la table exerce-t-elle sur le livre ?

(b) Le panneau est suspendu par deux chaînes à des angles différents. Quelle chaîne a la plus grande tension : la chaîne plus inclinée ou la chaîne plus proche de l'horizontale ?

Explorer — augmenter l'angle, mesurer l'extension

Ce que tu feras : Mesure l'extension de deux élastiques identiques lorsque leur angle par rapport à la verticale change, tout en gardant la charge constante.

Durée :12 min

Il te faudra :

- Une bouteille d'eau remplie, de poids connu.
- Deux élastiques identiques.
- Une règle.
- Un rapporteur.
- Une barre horizontale ou deux crochets pouvant être écartés.

Étapes :

1. Suspends une bouteille à l'aide de deux bandes élastiques identiques. Ajuster les crochets de sorte que chaque bande élastique forme un petit angle avec la verticale.
2. Mesure l'allongement de chaque bande élastique et noter l'angle que chaque bande forme avec la verticale.
3. Garde la même bouteille et écarter davantage les points d'attache supérieurs afin que les bandes forment un plus grand angle avec la verticale.
4. Mesure de nouveau l'allongement de chaque bande élastique.
5. Répéte la procédure pour plusieurs angles plus grands, sans dépasser la limite élastique du caoutchouc.

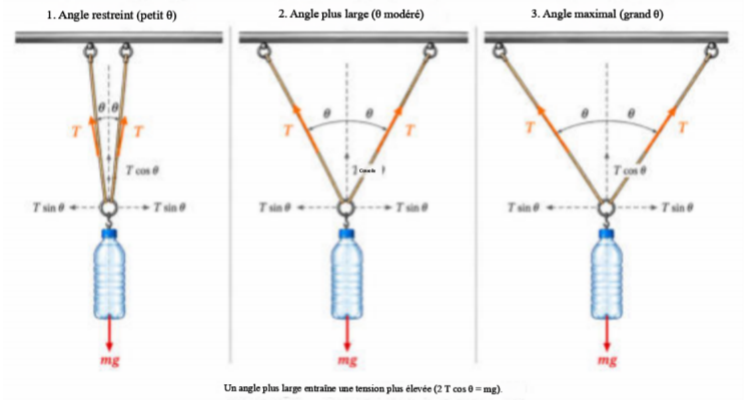


Figure 1-5-2 · Plus l'angle est grand, plus la tension dans chaque bande est élevée.

Essai	Le poids de la bouteille a-t-il changé ?	Allongement de La bande droite (cm)	Extension de Bande gauche (cm)	Angle de chaque bande par rapport à la verticale, θ(°)	Moyenne extension (cm)
1					
2					
3					

Analyse ce que vous avez recueilli :

(a) À mesure que l'angle par rapport à la verticale augmentait, qu'est-il arrivé à l'extension de chaque bande et, par conséquent, à la tension dans celle-ci ?

(b) Le poids de la bouteille restait constant, alors pourquoi la tension dans chaque bande augmentait-elle ? Qu'est-il arrivé aux composantes horizontales des deux forces de tension lorsque les bandes se sont éloignées l'une de l'autre ?

Écris votre explication en deux lignes avant de lire la page suivante.

Une note sur la mesure

Mesure deux fois l'allongement de chaque bande et calculez la moyenne. Utilisez les mêmes bandes tout au long de l'expérience, et comparez l'allongement moyen pour différents angles plutôt que par rapport à une valeur fixe.

De l'observation au modèle

Dans l'expérience Explorer, le poids de la bouteille est resté constant, mais l'augmentation de l'angle que chaque élastique forme avec la verticale a augmenté l'allongement moyen des élastiques, ce qui indique une augmentation de la tension dans chaque élastique.

On aurait pu s'attendre à ce que la tension reste constante parce que le poids n'a pas changé. Cependant, les observations montrent que la tension nécessaire pour soutenir la bouteille dépend non seulement de son poids, mais aussi de l'angle que chaque élastique forme avec la verticale. Les données soutiennent le modèle suivant.

Isoler le corps — tracer un diagramme des forces

Une force est une poussée ou une traction exercée par un objet sur un autre. Pour analyser un corps, il faut d'abord l'isoler de son environnement. Ne représenter que les forces exté rieures qui s'exercent sur le corps, et non les forces que le corps exerce sur d'autres objets. Représenter chaque force par une flèche indiquant sa direction et l'étiqueter selon sa source. Lorsque cela est approprié, tracer chaque force en son point d'application. Le poids du corps est représenté par une force unique dirigée vers le bas et agissant par son centre de gravité.

Un diagramme des forces isole un corps et montre toutes les forces extérieures qui s'exercent sur lui, chaque force étant identifiée par sa source.

Force	Symbole	Source et direction
Force normale	F_N	Une surface de contact ; agit perpendiculairement à la surface. Pour un corps en équilibre vertical sur une surface horizontale sans autres forces verticales, $F_N = mg$.
Tension	T	Une corde ou un câble tendu ; agit le long de la corde, dirigé à l'opposé du corps.
Force élastique	$F_e = -kx$	Un ressort étiré ou comprimé ; agit à l'opposé du déplacement par rapport à l'équilibre, dans la limite de proportionnalité.
Poids	$F_g = mg$	Le champ gravitationnel de la Terre (ou d'une planète) ; agit verticalement vers le bas en passant par le centre de gravité.

Applique la condition d'équilibre

Un corps est en équilibre de translation lorsqu'il reste au repos ou se déplace à vitesse constante — c'est-à-dire lorsque la force résultante qui s'exerce sur lui est nulle :

$$\Sigma F = 0$$

Une force formant un angle est décomposée en composantes le long de deux axes perpendiculaires, et la condition est appliqué e indépendamment le long de chacun : $\Sigma F_x = 0$ et $\Sigma F_y = 0$

Les composantes horizontales des deux tensions sont égales et opposé es, donc elles s'annulent. Les composantes verticales agissent vers le haut et équilibrent ensemble le poids de la bouteille. Par conséquent, la force résultante sur la bouteille est nulle, et elle demeure en équilibre.

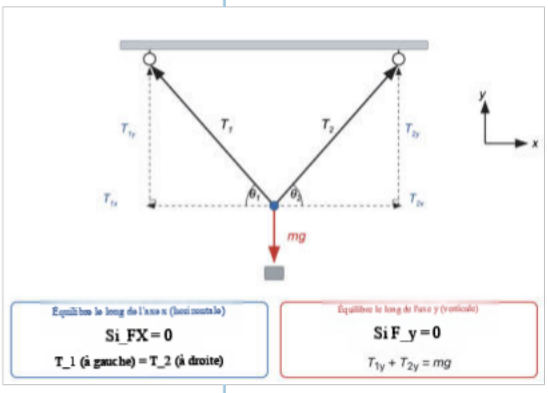


Figure 1-5-4 · Les composantes horizontales s'annulent tandis que les composantes verticales supportent le poids.

Point

- Si un corps rigide reste au repos ou se déplace à vitesse constante sous l'action de plusieurs forces, on dit qu'il est en équilibre. Pour l'analyser, il faut d'abord isoler le corps de son environnement et tracer un diagramme de corps libre ne montrant que les forces externes qui s'exercent sur lui. Le poids du corps est une force unique dirigée vers le bas qui agit par son centre de gravité.
- $\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \mathbf{F}_3 + \cdots = 0$. Les équations d'équilibre sont établies en décomposant les forces en composantes le long de deux axes perpendiculaires : $\Sigma F_x = 0$ et $\Sigma F_y = 0$.e)

Application rapide

Une lampe de 5,0 kg est suspendue à deux câbles qui font chacun 40° avec l'horizontale. En prenant g = 9,8 m/s², calculez la composante verticale que chaque câble doit fournir.

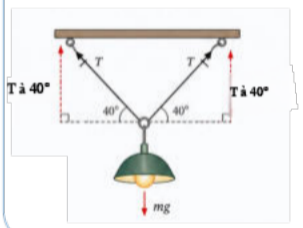
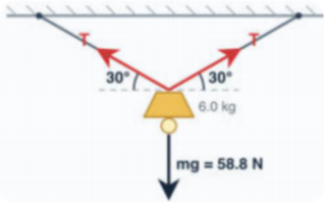


Figure 1-5-3 · Une lampe suspendue à deux câbles à 40° par rapport à l'horizontale.

Encadré d'équation

Condition d'équilibre de translation	$\Sigma F = 0$
Résolu selon deux axes perpendiculaires	$\Sigma F_x = 0,\ \Sigma F_y = 0$

Exemple résolu

Situation	Une lampe de masse 6,0 kg est suspendue en équilibre par deux câbles identiques, chacun formant un angle de 30° avec l'horizontale. Calculez la tension dans chaque câble.
Données et éléments requis	Données : m= 6,0 kg, g= 9,8 m/s ^{2} et θ= 30° . Recherché : tension T dans chaque câble.
Représentation	 Figure 1_5_5 · Une charge de 6,0 kg sur deux câbles à 30°.
Stratégie	Appliquez les conditions d'équilibre : ΣFx = 0, ΣFy = 0. Utilisez l'équilibre vertical : la somme des composantes verticales de la tension est égale au poids.
Solution annotée	$2T\sin 30° = W$ $T = W/(2\sin 30°)$ $= 58{,}8/(2 \times 0{,}5)$ $= 58{,}8\ \text{N} \approx 59\ \text{N}$
Vérification de la Cohérence	La tension est égale au poids de la lampe car à 30°, seule la moitié de chaque tension agit verticalement pour soutenir la lampe.
Explique-le toi-même	Pourquoi chaque câble supporte-t-il une tension égale au poids total de la lampe, alors que deux câbles la soutiennent ?

Conseil d'examen

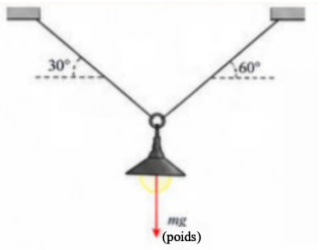
Pour un corps en équilibre soutenu par deux câbles, décomposez les deux tensions. Leurs composantes horizontales s'annulent, et leurs composantes verticales s'additionnent pour équilibrer le poids.

À toi d'essayer :La même lampe de 6,0 kg est suspendue par deux câbles identiques, chacun faisant un angle de 50° avec l'horizontale. Déterminez la tension dans chaque câble (N), et comparez-la avec la valeur obtenue dans l'exemple précédent.

Essaye

(a) Un lampadaire au-dessus d'une place publique est suspendu à deux câbles qui font des angles de 30° et 60° avec l'horizontale. La lampe a une masse de 20 kg. Détermine la tension dans chaque câble, en N, et indique quel câble est soumis à la plus grande tension.

Figure 1_5_6 · Une lampe sur deux câbles à 30° et 60°.



(b) Une enseigne de masse 5,0 kg au-dessus d'une rue est suspendue à deux câbles qui forment chacun un angle de 40° avec l'horizontale. Détermine la tension dans chaque câble, en N.

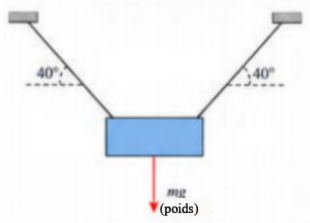
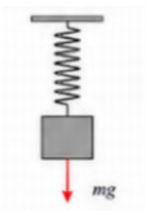


Figure 1_5_7 · Deux câbles à 40°.

(c) Un bloc métallique pend au repos à un ressort ayant une constante de rappel de 200 N/m, l'étirant de 0,15 m. Détermine le poids du bloc, en N.



Dans un nouveau contexte — lignes électriques entre les poteaux

En circulant sur une route de campagne, vous remarquerez peut-être que les lignes électriques pendent entre les poteaux plutôt que de former une ligne horizontale droite. Le même principe d'équilibre s'applique à une charge soutenue par deux câbles.

Le poids de chaque portée est réparti en continu le long du fil. Aux deux appuis, les composantes verticales des forces de tension équilibrent ensemble le poids total de la portée, tandis que les composantes horizontales sont d'égale intensité et de sens opposé. À mesure que la flèche diminue, le fil devient presque horizontal au niveau des appuis. La composante verticale devient alors une plus petite fraction de la tension, si bien qu'une tension plus grande est nécessaire pour supporter le même poids.

Dans la limite idéalisée d'un fil parfaitement horizontal supportant un poids non nul, la tension nécessaire tendrait vers l'infini. Les lignes électriques sont donc installées avec une flèche contrôlée.

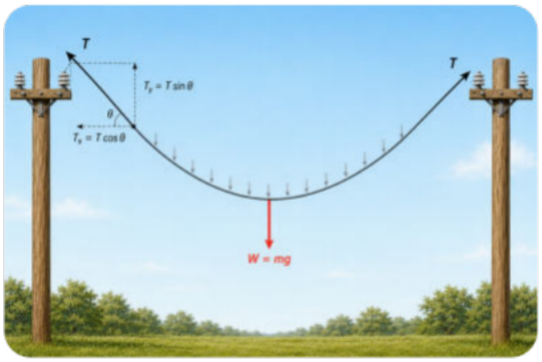


Figure 1_5_9 · Un câble pend jusqu'à ce que sa tension équilibre le poids.

À ton tour : À l'aide des composantes verticales, expliquez pourquoi la réduction de la flèche d'une ligne électrique augmente la tension dans la ligne.

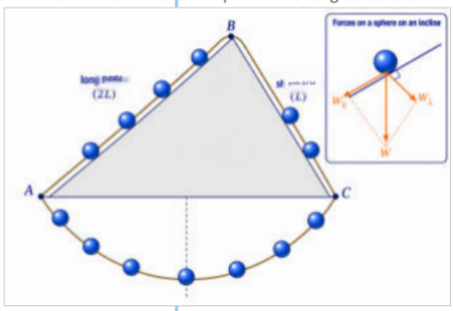
Question de liaison

« Comment les concepts d'équilibre et de conservation sont-ils appliqués pour comprendre la matière et le mouvement, du plus petit atome à l'univers entier ? »

Nature de la science : Modèles — une loi primitive de l'équilibre avant Newton

Avant que Newton ne formule les lois du mouvement, Simon Stevin (1586) a étudié l'équilibre sur des plans inclinés à l'aide d'une expérience de pensée connue sous le nom de « collier de sphères ». Il imagina une chaîne fermée de sphères également espacées placée autour de deux plans inclinés. Si un côté produisait un effet de rotation supérieur à l'autre, la chaîne se déplacerait continuellement tout en revenant à la même disposition, produisant un mouvement perpétuel. Stevin conclut que les effets sur deux pentes doivent s'équilibrer. Cette idée a contribué à établir la loi de l'équilibre sur un plan incliné et les principes de décomposition des forces en composantes.

Figure 1_5_10 · Billes sur deux pentes : l'angle d'inclinaison détermine la composante le long de celle-ci.



À votre tour : Pourquoi Stevin pouvait-il faire confiance à cette conclusion même sans les équations modernes du mouvement ?

Question de cours, résolue



Un livre reste au repos sur une table et une enseigne de magasin est suspendue par deux chaînes — qu'est-ce qui est vrai pour la force résultante agissant sur chaque objet ?

Dans les deux cas, les corps sont en équilibre de translation, donc la somme vectorielle de toutes les forces agissant sur chaque corps est nulle : $\Sigma F = 0$

Pour le livre, la force normale dirigée vers le haut équilibre son poids. Pour le panneau, les composantes horizontales des deux forces de tension se compensent, tandis que leurs composantes verticales, ensemble, équilibrent son poids. Comme les chaînes forment des angles différents avec l'horizontale, les tensions sont généralement inégales, et la chaîne la plus inclinée supporte la tension la plus élevée.grande tension.

Figure 1-5-11 · Le livre et le signe revisités.

Exercice

Travaille avec deux chiffres significatifs ; prends $g = 9{,}8\ m/s^2$.

(a) Une enseigne de magasin de masse 8,0 kg est suspendue en équilibre à deux câbles légers fixés à une poutre horizontale. Le câble de gauche forme un angle de 30° avec l'horizontale, et le câble de droite forme un angle de 55° avec l'horizontale.

Détermine la tension dans chaque câble, en N, et indiquez quel câble supporte la plus grande tension.

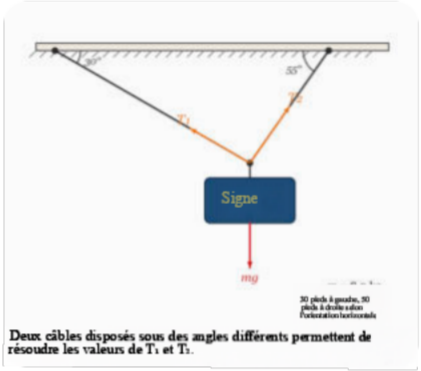
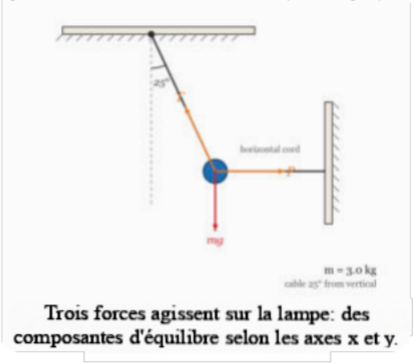


Figure 1-5-12 · Un panneau de 8,0 kg tenu par deux câbles à des angles différents.

(b) Une lampe de masse 3,0 kg est maintenue en équilibre par un câble léger fixé au plafond et un cordon horizontal léger. Le câble forme un angle de 25° avec la verticale.

Détermine (i) la tension T dans le câble, et (ii) la tension P dans la corde horizontale, toutes deux en N.

Figure 1-5-13 · Trois forces maintiennent une lampe de 3,0 kg en place.



(c) Un bloc de masse 1,5 kg est suspendu en équilibre à deux ressorts légers identiques. Chaque ressort fait un angle de 40° avec la verticale et a une constante de raideur de 60 N/m. Déterminer (i) la force dans chaque ressort, en N, et (ii) l'allongement de chaque ressort, en m.

Question type examen

Une lampe de 6,0 kg est suspendue au repos à deux câbles qui font des angles égaux de 40° avec l'horizontale. Tracer un diagramme des forces de la lampe, puis déterminer la tension dans chaque câble.



Leçon 1-6 — Puissance et efficacité

❓ **Question de la leçon**: Deux ascenseurs soulèvent la même charge à la même hauteur verticale, mais l'un effectue la montée en moitié moins de temps. Les deux ascenseurs effectuent-ils le même travail utile ? Quel ascenseur a la plus grande puissance ?

Tu vas apprendre à

À la fin de cette leçon, tu seras capable de :

1. **Calculer** la puissance d'une machine à partir du travail effectué et du temps mis, ou à partir de la force et d'une vitesse constante.
2. **Déterminer** l'efficacité d'un appareil à partir de son énergie utile de sortie et de son énergie totale d'entrée, exprimées en pourcentage.
3. **Interpréter** le transfert d'énergie dans un diagramme de Sankey et identifier où l'énergie perdue est dissipée.

🔍 Le phénomène — prédis avant de continuer

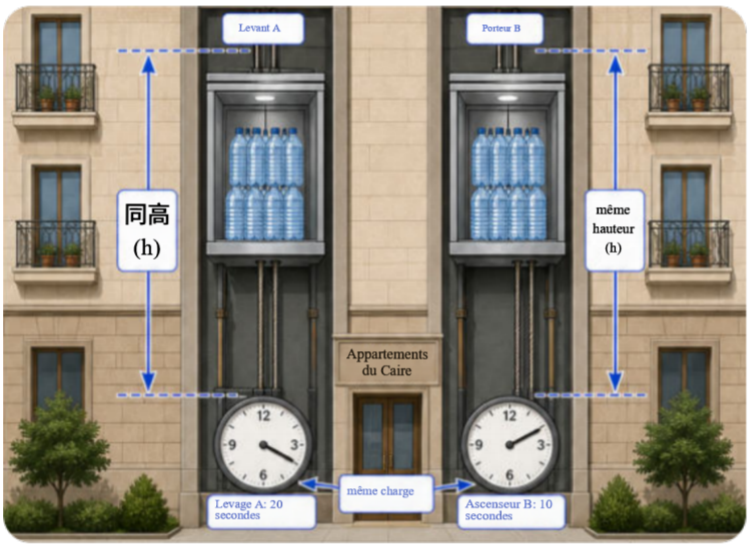


Figure 1-6-1 · Deux ascenseurs soulèvent la même charge à la même hauteur en des temps différents.

Deux ascenseurs montent côte à côte dans un même immeuble. Chacun transporte la même charge jusqu'au même étage — la même hauteur. L'ascenseur A met 20 s ; l'ascenseur B met 10 s, soit moitié moins de temps. On entend parfois dire que l'ascenseur le plus rapide « effectue plus de travail ». Est-ce vrai, et quel ascenseur a la plus grande puissance ?

Prédis avant de poursuivre

(a) L'ascenseur plus rapide a-t-il effectué un travail utile plus important sur la charge, ou les deux ascenseurs ont-ils effectué le même travail utile ?

(b) Un vendeur affirme : « Le moteur plus puissant consomme moins d'énergie électrique. » Cela peut-il être vrai ?

Fait clé

Travail : $W = F\,s\cos\theta$. Une force n'effectue un travail que lorsqu'elle provoque un déplacement dans la direction de la force ou de sa composante le long du déplacement.

Explore — monte les escaliers de l'école

Ce que tu vas faire: Utilise une balance et un chronomètre pour mesurer la puissance produite en montant des escaliers.

Temps :12 min

Tu auras besoin de :

• Un pèse-personne numérique. • Un chronomètre ou une minuterie de téléphone. • Un ruban à mesurer.

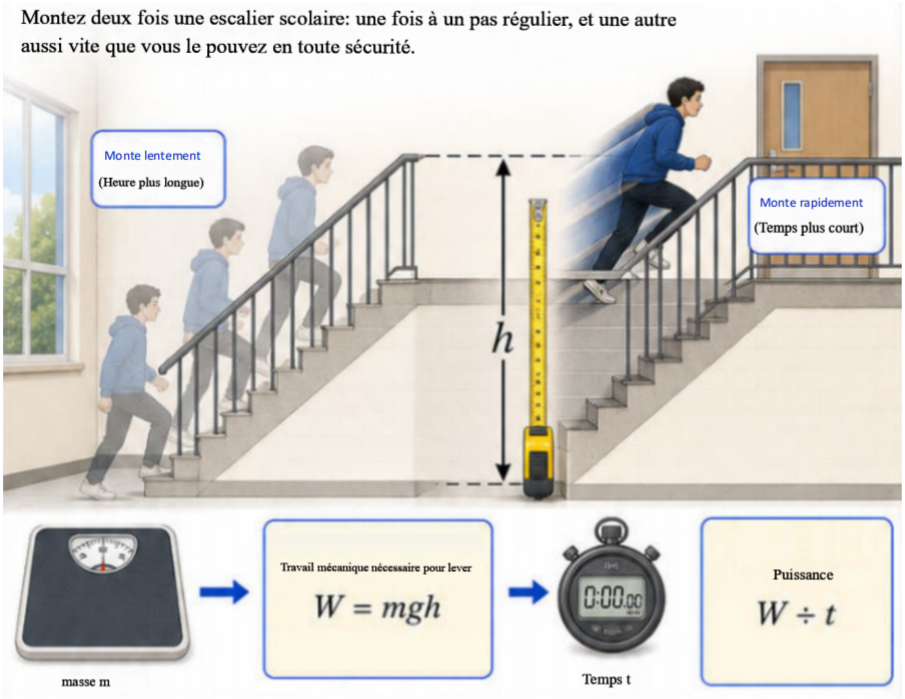


Figure 1-6-2 · La même montée effectuée lentement et rapidement : même travail, puissance différente.

Étapes :

1. Mesure ta masse (m) et note-la en kilogrammes.
2. Mesurez la hauteur verticale h d'une volée de marches, en mètres — mesurez la montée verticale, pas la longueur des escaliers.
3. Calculez le travail effectué en vous soulevant d'une volée $W = mgh$, en prenant g = 9,8 m/s ².
4. Montez la volée lentement pendant que votre partenaire mesure le temps. Notez le résultat. 5

Répétez la montée aussi rapidement que possible en toute sécurité et notez le temps le plus court.

Monter	Temps	Travail effectué = mgh	Travail ÷ temps
Lentement			
Rapidement			

Analyse ce que vous avez collecté :

(a) Le travail que vous avez effectué a-t-il changé entre les deux montées, ou est-il resté le même ? Expliquez votre réponse.

(b) Pour quelle montée la valeur de (W/t) était-elle plus grande ? Que représente cette quantité ?

Écris votre explication en deux lignes avant de lire la page suivante.

Une note de mesure

Mesure le temps de chaque montée deux fois et prenez la valeur moyenne. Le temps de ré action humain au dé marrage et à l'arrêt du chronomètre peut introduire une incertitude de quelques dixièmes de seconde. Cette incertitude a un effet en pourcentage plus important sur la mont ée la plus rapide, car son temps mesuré est plus court.

De l'observation au modèle

Dans Explore, tu as fourni la même quantité de travail dans les deux montées — ta masse et la hauteur verticale étaient les mêmes, donc ($W=mgh$) est resté inchangé. Cependant, la montée plus rapide a accompli ce travail en moins de temps et a donc donné une valeur plus grande de (W/t) . Cette grandeur est appelée puissance moyenne.

Puissance — taux de réalisation du travail

Deux machines peuvent effectuer la même quantité de travail ou transférer la même quantité d'énergie, mais mettent des temps différents pour le faire. La puissance mesure cette différence : c'est le taux auquel le travail est effectué ou l'énergie est transférée.

La puissance moyenne sur un intervalle de temps est : $P = \Delta W/\Delta t$

où ΔW est le travail effectué pendant l'intervalle de temps. L'unité de puissance est le watt :

$1\ \mathrm{W} = 1\ \mathrm{J/s}$

Les valeurs plus grandes de puissances sont couramment exprimées en kW et en MW :

$1\ kW = 10^3\ W,\ 1\ MW = 10^6\ W$

La puissance peut aussi être reliée à la force F et à la vitesse v. Si une force agit dans le sens du mouvement : $P = Fv$

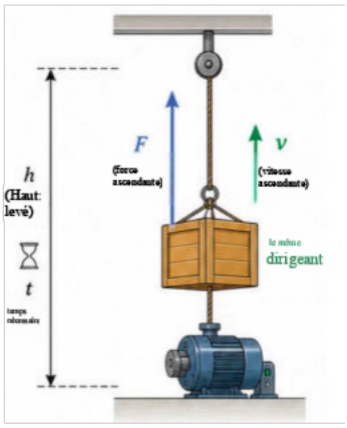


Figure 1-6-3 · Soulever une charge régulièrement : la force et le mouvement vont dans le même sens.

Point

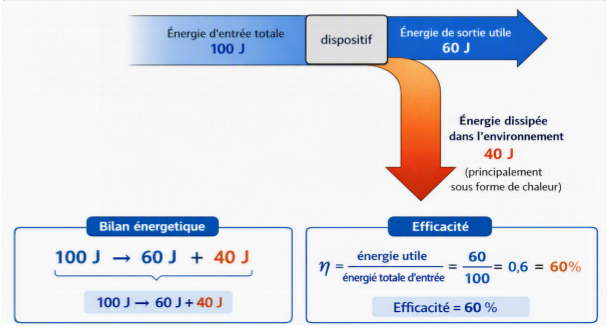
- Le travail effectué par une force constante F[N] qui déplace un corps sur une distance [m] selon un angle θ par rapport à la force est $W = Fs\cos\theta$. Deux machines peuvent effectuer le même travail mais prendre des temps différents : la vitesse à laquelle le travail est effectué est appelée puissance moyenne, et pour un travail ΔW[J] effectué en un temps Δt[s], elle vaut $P = \Delta W/\Delta t$, mesurée en watts (W) .e)
- Lorsqu'une force F *agit* sur un corps se déplaçant à une vitesse v[m/s], la puissance peut s'écrire sans mesurer le temps : $P = Fv\cos\theta$.
- La fraction de l'énergie d'entrée qui sort d'un dispositif sous forme de sortie utile est appelée son rendement. C'est une grandeur sans dimension, exprimée sous forme décimale entre 0 et 1 ou en pourcentage.
  Aucun dispositif réel n'a un rendement de 100 %: une partie de l'énergie d'entrée est toujours transférée à l'environnement sous forme de pertes.
  Un diagramme de Sankey le montre visuellement — une flèche d'entrée se divise en sortie utile et en pertes, la largeur de chaque flèche étant proportionnelle à l'énergie qu'elle transporte.

Encadré d'équation

Travail	$W = F\,s\cos\theta$
Puissance, à partir du travail et du temps	$P = \Delta W/\Delta t$
Puissance, à partir de la force et de la vitesse	$P = Fv\cos\theta$

Le rendement est une grandeur sans dimension, exprimée sous forme décimale (entre 0 et 1) ou en pourcentage. Aucun dispositif réel n'a un rendement de 100 %, car une partie de l'énergie fournie est toujours transférée à l'environnement.
Un diagramme de Sankey représente visuellement les transferts d'énergie : une seule flèche d'entrée se divise en une voie correspondant à l'énergie utile et en une ou plusieurs voies correspondant à l'énergie dissipée. La largeur de chaque flèche est proportionnelle à la quantité d'énergie qu'elle représente. Les diagrammes de Sankey sont interprétés en comparant les largeurs relatives des différentes flèches.

Figure 1-6-4 · Sur 100 J fournis, 60 J sont utiles et 40 J sont dissipés.



Application rapide

Un ascenseur de bureau transporte sa charge vers le haut à une vitesse constante de 2, 5 m/s. Le câble de levage exerce sur l'ascenseur une force dirigée vers le haut de 7 840 N.Détermine la puissance utile fournie à l'ascenseur par le moteur.

Encadré d'équation

Efficacité	η = énergie utile de sortie ÷ énergie totale d'entrée

Exemple traité

Situation	Un monte-charge de chantier soulève une palette de $5{,}0 \times 10^2$ kg verticalement vers le haut sur une hauteur de 6,0 m à vitesse constante en 12 s. Négligez la résistance de l'air. Déterminez : **(a)** le travail effectué par le monte-charge, en J **(b)** la puissance moyenne développée par le monte-charge. **(c)** vérifiez en utilisant $P=Fv$
Données et éléments demandés	Données : m =500 kg, h= 6,0 m, t= 12 s, g = 9,8 m/s^2. Requis : **(a)**travail W, **(b)**puissance P, **(c)**vérification en utilisant $P = Fv$
Représentation	Levage vertical à vitesse constante, F = mg.
Stratégie	**1)** Utilisez $W = mgh$ **2)** Utilisez $P = W/t$ **3)** Trouvez la vitesse $v = h/t$ et vérifiez en utilisant $P = mgv$.
Solution annotée	**(a)** $W = 500 \times 9{,}8 \times 6{,}0 = 2{,}94 \times 10^4$ J ≈ $2{,}9 \times 10^4$ J **(b)** $P = (2{,}94 \times 10^4) / 12 = 2{,}5 \times 10^3$ W = 2,5 kW **(c) v = 6,0 / 12 = 0,50 m/s** $P = mgv = 500 \times 9{,}8 \times 0{,}5 = 2450$ W = 2,5 kW
Vérification de la cohérence	Les deux méthodes donnent la même valeur positive pour la puissance.
Explique-le toi-même	Si le palan soulève la même charge mais en moitié moins de temps, comment cela affecte-t-il la puissance et pourquoi ?

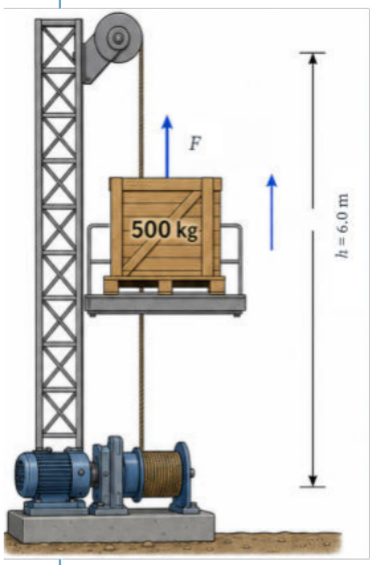


Figure 1-6-5 · Une charge de 500 kg soulevée sur 6,0 m.

Fait essentiel

Pour un levage vertical à vitesse constante : $P = Fv = mgv = mgh/t$ Utilisez $P = Fv$ lorsque la vitesse est donnée, ou $P = mgh/t$ *lorsque* la hauteur et le temps sont donnés.

À toi d'essayer : une cabine d'ascenseur de masse 400 kg s'élève verticalement de 9,0 m à vitesse constante en 15 s. Prenez g = 9,8 m/s^2.Calculez la puissance de sortie de son moteur, en kW, puis vérifiez votre réponse en utilisant $P=Fv$.

Rendement — fraction de l'énergie d'entrée utilement transférée

Aucun appareil ne convertit toute son énergie d'entrée en sortie utile ; une partie de l'énergie est toujours dissipée, généralement sous forme d'énergie thermique. Le rendement mesure la fraction de l'énergie d'entrée convertie en sortie utile : η = énergie de sortie utile / énergie d'entrée totale

Essayer

Donnez chaque efficacité sous forme de pourcentage.

(a) Une pompe électrique dans une ferme du delta du Nil consomme 2000 W de puissance électrique et fournit 1500 W de puissance utile en soulevant l'eau d'irrigation. Détermine l'efficacité de la pompe.

Figure 1-6-6 · Une pompe : 2000 W fournis, 1500 W utiles.



(b) Un petit chauffe-eau électrique consomme 2400 W et fournit 2040 W de puissance thermique utile à l'eau. Détermine son efficacité.

Figure 1-6-7 · Un chauffage : 2400 W fournis, 2040 W utiles.



(c) Une lampe reçoit 100 J d'énergie électrique. Elle émet 25 J de lumière et le reste est dissipé sous forme de chaleur. Détermine l'énergie dissipée sous forme d'énergie thermique et l'efficacité de la lampe.



Figure 1-6-8 · Une lampe : 100 J fournis, 25 J sous forme de lumière.

(d) Dessine un diagramme de Sankey simple pour la lampe en (c) : tracez une flèche d'entrée représentant 100 J, se divisant en une sortie de lumière utile et une sortie de chaleur perdue. Faites en sorte que les largeurs des flèches soient proportionnelles aux énergies qu'elles représentent.

Dans un nouveau contexte — choisir une lampe efficace

Remplacer une lampe à filament de tungstène par une lampe LED peut réduire l'énergie électrique nécessaire pour éclairer une pièce. Pour chaque 100 J d'énergie électrique fournie, une lampe à filament peut ne transférer qu'environ 10 J sous forme de lumière utile. Les 90 J restants sont dissipés dans l'environnement, principalement sous forme d'énergie thermique. Une lampe LED peut transférer environ 40 J des mêmes 100 J d'entrée sous forme de lumière utile, tandis qu'environ 60 J sont dissipés dans l'environnement.

La LED est donc plus efficace, car une plus grande fraction de son énergie d'entrée est transférée sous forme de lumière utile. Un diagramme de Sankey illustre cette différence : la LED présente une flèche de lumière utile plus large et une flèche d'énergie gaspillée plus étroite que la lampe à filament, même si toutes deux reçoivent la même entrée de 100 J.

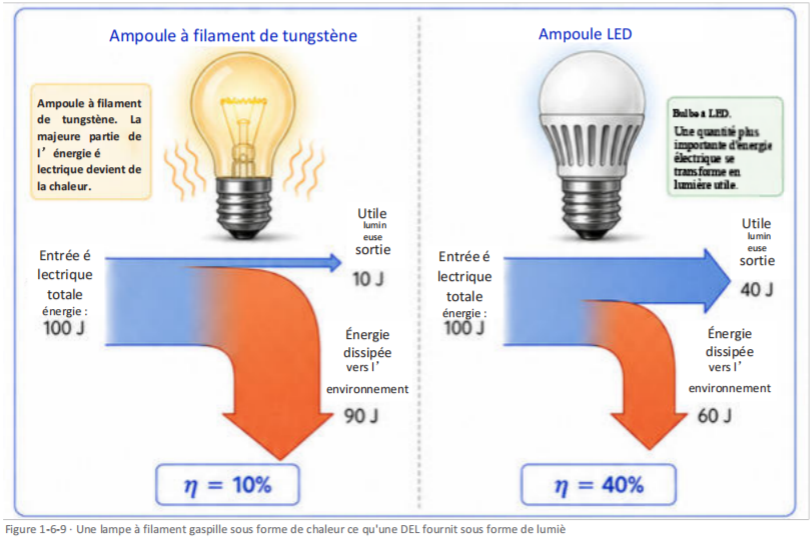


Figure 1-6-9 · Une lampe à filament gaspille sous forme de chaleur ce qu'une DEL fournit sous forme de lumière.

➡ **Explique**, à partir des deux diagrammes de Sankey, pourquoi une lampe à DEL nécessite moins d'énergie électrique qu'une lampe à filament de tungstène pour produire la même quantité de lumière utile. Watt a utilisé une estimation de la puissance

Fait clé

Lire un diagramme de Sankey : l'entrée totale est égale à la somme de la sortie utile et de toutes les sorties perdues. Par conséquent, une sortie manquante peut être calculée en soustrayant la somme des sorties connues de l'entrée totale.

Conseil d'examen

Indiquez l'efficacité en pourcentage uniquement lorsque la question le demande. L'efficacité peut être écrite sous forme décimale ou en pourcentage.

Question de liaison

« Comment l'efficacité d'un appareil est-elle liée à l'énergie qu'il dissipe dans l'environnement ? »

Nature des sciences : la mesure — l'origine du cheval-vapeur

Lorsque James Watt commercialisa ses machines à vapeur améliorées à la fin du XVIIIe siècle, les clients avaient besoin d'un moyen familier pour comparer leur puissance à celle des chevaux de travail. soutenue d'un cheval de travail comme base pratique de comparaison. Il a défini un cheval-vapeur comme un taux de travail de 33 000 pieds-livres-force par minute, soit environ 746 W. Cela a permis d'exprimer la puissance des moteurs en des termes que les clients pouvaient facilement comprendre. Le cheval-vapeur est donc une unité conventionnelle de puissance, et non la puissance exacte produite par chaque cheval.

À votre tour : Proposez un avantage à exprimer la puissance d'un moteur en chevaux-vapeur plutôt que d'introduire une unité entièrement nouvelle.

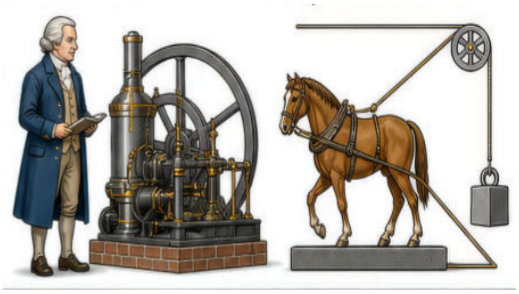


Figure 1-6-10 · Watt compara sa machine au cheval qu'elle remplaçait.

Question de cours, corrigée

Deux ascenseurs soulèvent la même charge à la même hauteur verticale, mais l'un accomplit le levage en moitié moins de temps. Les deux ascenseurs effectuent-ils le même travail utile ? Quel ascenseur a la plus grande puissance ? Les deux ascenseurs effectuent le même travail utile, car la même charge est soulevée à la même hauteur verticale (W = mgh). L'ascenseur qui accomplit le mouvement en moins de temps a la plus grande puissance (P = W/t). Si leurs énergies d'entrée diffèrent, l'ascenseur le plus efficace est celui qui convertit une plus grande fraction de l'énergie d'entrée en travail utile de levage et dissipe moins d'énergie vers l'environnement. Un diagramme de Sankey montrerait donc une flèche de sortie utile plus large et une flèche d'énergie gaspillée plus étroite pour l'ascenseur le plus efficace.

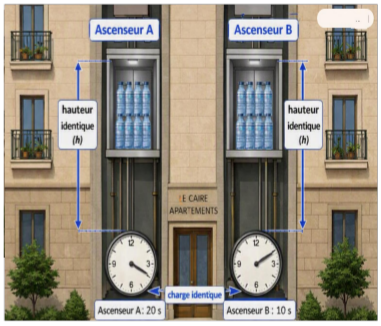


Figure 1-6-11 · Les deux ascenseurs revisités.

Exercice

(1) Un monte-charge élève une charge de masse $1{,}5 \times 10^{3}$ kg verticalement sur une hauteur de 18 m à vitesse constante, en 30 s.

- **(a)** Calcule le travail effectué par le monte-charge sur la charge.
- **(b)** Détermine la puissance de sortie du monte-charge, en kW.
- **(c)** Montre que la vitesse constante de la charge est de 0,60 m/s.
- **(d)** En utilisant $P=Fv$, confirmez votre réponse à (b), et expliquez brièvement pourquoi les deux méthodes doivent donner le même résultat.

(2) Deux ascenseurs, A et B, soulèvent chacun une charge de masse 600 kg sur la même hauteur verticale de 9,0 m à vitesse constante. L'ascenseur A effectue le levage en 24 s ; l'ascenseur B effectue le même levage en 12 s.

- **(a)** Explique pourquoi les deux ascenseurs effectuent le même travail utile sur la charge, et indiquez sa valeur.
- **(b)** Calcule la puissance de sortie de l'ascenseur A et de l'ascenseur B, en kW.
- **(c)** Indique le rapport $P_B : P_A$ et décrivez comment il est lié au rapport des temps mis.

(3) Un treuil électrique reçoit $5{,}0 \times 10^{4}\ J$ d'énergie électrique. Il effectue $3{,}5 \times 10^{4}\ J$ de travail utile en soulevant une charge ; l'énergie restante est dissipée.

- **(a)** Calculez l'énergie dissipée par le treuil.
- **(b)** Détermine le rendement du treuil, exprimé en pourcentage.
- **(c)** Trace un diagramme de Sankey pour ce transfert d'énergie, la largeur de chaque flèche étant proportionnelle à l'énergie qu'elle représente.
- **(d)** Indique la principale forme d'énergie sous laquelle l'énergie dissipée est transféreé

(4) Un palan électrique soulève une charge de masse 250 kg sur une hauteur verticale de 6,0 m à vitesse constante en 8,0 s. Pendant ce temps, le palan est alimenté en énergie électrique à une puissance constante de 2,5 kW.

- **(a)** Calcule la puissance utile fournie par le palan, en kW.
- **(b)** Détermine le rendement du palan, exprimé en pourcentage.
- **(c)** Calcule l'énergie dissipée par le palan pendant les 8,0 s de levage, et indiquez la principale forme d'énergie vers laquelle elle est transférée.

Question type examen

Une petite grue soulève une charge de masse 600 kg verticalement sur une hauteur de 8,0 m à vitesse constante en 16 s. Prenez $g = 9{,}8\ m/s^2$.

Calcule

le travail effectué par la grue sur la charge.

la puissance mécanique fournie par la grue, en kW.

Figure 1-6-12 · Une grue soulevant une charge à vitesse constante.



Leçon 1-7 — Quantité de mouvement et impulsion

Question de la leçon : Pourquoi un téléphone est-il moins susceptible de se casser lorsqu'il atterrit sur un lit que lorsqu'il atterrit sur un sol carrelé, même s'il est lâché de la même hauteur ?

tu apprendras à

À la fin de cette leçon, tu seras capable de :

1. **Décrire** la quantité de mouvement comme le produit de la masse et de la vitesse, $p = mv$.
2. **Déterminer** l'impulsion d'une force et la relier à la variation de la quantité de mouvement, $J = F\,\Delta t = \Delta p$.
3. **Expliquer** pourquoi l'augmentation de la durée sur laquelle se produit une variation de quantité de mouvement réduit la force résultante moyenne.

Fait clé

La quantité de mouvement et l'impulsion sont des grandeurs vectorielles. Deux relations clés sont utilisées dans cette leçon : $p = mv$ et $J = F\Delta t$.

Le phénomène — prédis avant de continuer



Figure 1-7-1 · La même chute sur un lit mou et sur un carrelage dur.

Un téléphone est lâché de la même hauteur sur deux surfaces différentes. Il atterrit sur un lit et s'immobilise sans dommage. Il atterrit ensuite sur un sol carrelé depuis la même hauteur, et l'écran se fissure. Dans les deux cas, le téléphone atteint la surface avec la même masse et la même vitesse, donc la variation de quantité de mouvement est la même. La différence réside dans l'interaction pendant l'impact, et non dans la chute elle-même.

Prédis avant de poursuivre

(a) Qu'est-ce que le lit change : la quantité de mouvement, le temps d'arrêt, ou les deux ?

(b) Une balle qui rebondit contre un mur subit-elle une force plus grande, plus petite ou identique à celle d'une balle qui colle au mur, pour la même vitesse initiale et le même temps d'interaction ?

Explorer — Teste le théorème impulsion – quantité de mouvement

Ce que tu vas faire : tu mesure l'impulsion agissant pendant une collision et la variation de quantité de mouvement qu'elle produit, puis tu étudie la relation entre elles.

Durée :40 min

Tu auras besoin de :

- Un chariot de dynamique et un rail de niveau.
- Un capteur de force fixé à une extrémité du rail, avec un pare-chocs rigide et un pare-chocs souple.
- Un capteur de mouvement (ou un chariot codeur de mouvement) pour mesurer la vitesse du chariot.
- Un enregistreur de données ou un ordinateur avec un logiciel graphique.
- Une balance.

Étapes :

1. Mesure la masse totale m du chariot. Fixez le capteur de force et son pare-chocs à ressort à une extrémité d'une piste de niveau, le capteur de mouvement étant à l'autre extrémité.
2. Régle le zéro du capteur de force lorsqu'aucune force ne s'exerce sur lui. Configurez le logiciel pour tracer la force et la vitesse sur le même axe temporel.
3. Pousse le chariot pour qu'il se déplace à une vitesse approximativement constante avant de heurter le pare-chocs et de rebondir ; garde votre main éloignée pendant la collision.
4. À partir du graphique vitesse – temps, lisez la vitesse sur les sections à vitesse constante juste avant (v_i) et juste après (v_f) la collision. En prenant la direction initiale comme positivemakes v_f négative, donc $\Delta p = m(v_f - v_i)$.
5. À partir du graphique force – temps, déterminez l'impulsion J comme l'aire sous la courbe de l'impulsion, et enregistre la force maximale ainsi que le temps de contact Δt.
6. Répéte pour deux essais supplémentaires : d'abord avec le même pare-chocs à une vitesse incidente plus élevée, puis avec le pare-chocs plus souple à une vitesse incidente approximativement identique à celle de l'essai 1.

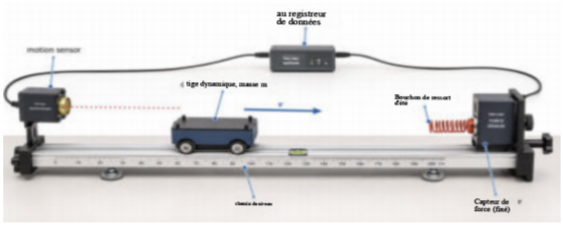


Figure 1-7-2 · Un chariot sur une piste plane, avec un capteur de mouvement et un capteur de force.

Essai	v_i (m/s)	v_f (m/s)	Δt(s)	$\Delta p = m(v_f - v_i)$ (N s)	Impulsion J (N s)
1					
2					
3 (pare-chocs souple)					

Analyse ce que tu as recueilli :

(a) Pour chaque essai, comparez l'impulsion J (aire sous la courbe force – temps) avec la variation de quantité de mouvement $\Delta p = m(v_f - v_i)$. Sont-elles égales en grandeur dans les limites de l'incertitude expérimentale ? Ceci teste le théorème de l'impulsion – quantité de mouvement.

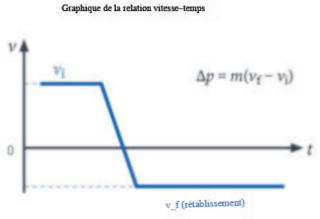
(b) Le pare-chocs plus souple augmente le temps de contact. Pour une variation de quantité de mouvement semblable, expliquez comment cela affecte la force pendant la collision.

Écris, en deux lignes, pourquoi l'aire sous votre courbe force-temps devrait être égale à m(v_f - v_i), avant de lire la page suivante.

Note de mesure

Lisez v_i et v_f à partir des parties plates (vitesse constante) du graphique vitesse-temps, juste avant et juste après la collision – jamais pendant celle-ci. Trouvez l'impulsion à partir de l'aire sous l'impulsion de force seulement, et remettez à z éro le capteur de force avant chaque essai.

Figure 1-7-3 · Le graphique vitesse-temps d'un rebond donne la variation de quantité de mouvement.



De l'observation au modèle

Dans Explore, lorsque les essais 1 et 3 sont comparés, le chariot a la même masse et approximativement la même vitesse initiale. Pourtant, le pare-chocs plus souple a exercé une force moyenne plus petite sur une durée plus longue, tandis que le pare-chocs plus ferme a exercé une force moyenne plus grande sur une durée plus courte. Vous avez peut-être prédit que le pare-chocs plus souple réduit la variation de quantité de mouvement du chariot. Ce n'est pas le cas — pour la même vitesse initiale et la même vitesse de rebond, la variation de quantité de mouvement est la même ; la durée d'interaction, et donc la force moyenne, est différente.

Quantité de mouvement et impulsion

Un corps de masse m se déplaçant avec une vitesse v a une quantité de mouvement p =mv.

La quantité de mouvement est une grandeur vectorielle de même direction que la vitesse et se mesure en kg m/s.

Une variation de quantité de mouvement est produite par une force résultante agissant pendant un intervalle de temps. Pour une force résultante constante,$J = F\,\Delta t$ et J =Δp.

Par conséquent, la deuxième loi de Newton sous forme de quantité de mouvementest $F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$

Pour un même changement de quantité de mouvement, augmenter le temps d'interaction réduit la force résultante moyenne, tandis que diminuer le temps d'interaction augmente la force résultante moyenne.

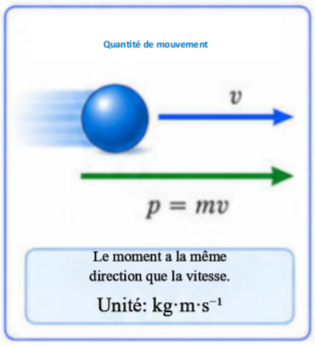


Figure 1-7-4 · La quantité de mouvement pointe dans la même direction que la vitesse.

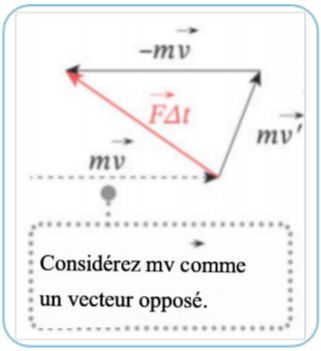


Figure 1-7-5 · L'impulsion transforme la quantité de mouvement initiale en quantité de mouvement finale.

Point

- Le produit de la masse m[kg] d'un objet et de sa vitesse v[m/s] est appelé quantité de mouvement, ce qui représente la quantité de mouvement. Son unité est le kg m/s, et elle est exprimée par $p = mv$.
- Le produit $F\,\Delta t$[N s] est appelé impulsion, ce qui représente la variation de quantité de mouvement. Son unité est le N s. Si la quantité de mouvement avant la variation est mv *et* que la quantité de mouvement après la variation est mv′ ,*alors* $mv' - mv = J = F\,\Delta t$, donc la deuxième loi de Newton sous forme de quantité de mouvement est $F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$.
- Un temps d'interaction plus long réduit la force moyenne, pour une même variation de quantité de mouvement.La force moyenne est l'impulsion ÷ le temps.

Encadré d'équation

Quantité de mouvement	$p = mv$
Impulsion	$J = F\Delta t = \Delta p$
Deuxième loi de Newton (forme de quantité de mouvement)	$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$

Impulsion

Le produit d'une force résultante constante et de l'intervalle de temps pendant lequel elle agit. $J = F\,\Delta t$;c'est un vecteur dans la direction de la force résultante, mesuré en N s.

Figure 1-7-6 · Une surface souple allonge le temps de contact et réduit la force.





Figure 1-7-7 · Une surface dure raccourcit le temps de contact et augmente la force.

Exemple travaillé

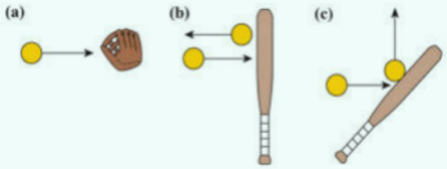
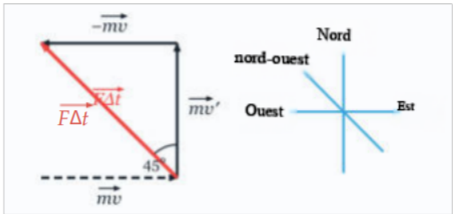
Situation	Une balle de masse 6,0 × 10_2 *kg* se déplace vers l'est à une vitesse de 20 m/*s*. Pour chacun des cas suivants, déterminez la direction et la grandeur de l'impulsion appliquée à la balle. (a) lorsque la balle est attrapée; (b) lorsque la balle est renvoyée vers l'ouest à la même vitesse; (c) lorsque la balle est renvoyée vers le nord à la même vitesse. 
Donné et requis	Données : $m = 6{,}0 \times 10^{-2}\ kg; v = 20\ m/s$ (est) Requis : impulsion
Représentation	Tracez le vecteur de quantité de mouvement initiale, $p_i = m\ v_i$, dans la direction du mouvement initial de la balle. Pour chaque cas, déterminez le vecteur de quantité de mouvement finale, $p_f = m\ v_f$, dans la direction du mouvement final de la balle. L'impulsion est égale à la variation vectorielle de la quantité de mouvement : $J = \Delta p = p_f - p_i = m(v_f - v_i)$.
Stratégie	Appliquez le théorème de l'impulsion et de la quantité de mouvement : $F\Delta t = mv' - mv$ Étapes pour trouver la quantité de mouvement à partir de l'impulsion : alignez les points de dé part du vecteur de quantité de mouvement avant le changement et du vecteur d'impulsion, puis additionnez-les à l'aide de la règle du parallélogramme pour trouver le vecteur de quantité de mouvement après le changement.
Solution annotée	Utilisez la relation impulsion – quantité de mouvement. **(a)** Considérez la direction est comme positive. $F\Delta t = (6{,}0 \times 10^{-2}) \times 0 - (6{,}0 \times 10^{-2}) \times 20$ $= -1{,}2$ N s,i.c.-à-d. 1,2 N s vers l'ouest • $F\Delta t = mv' - mv$ • Lorsque la balle est attrapée, sa vitesse devient nulle. L'est est positif, donc l'ouest est négatif. **(b)** Supposons que la direction est soit positive. $F\Delta t = (6{,}0 \times 10^{-2}) \times (-20) - (6{,}0 \times 10^{-2}) \times 20$ $= -2{,}4$ N s,c.-à-d. 2,4 N s vers l'ouest **(c)** En le considérant comme un vecteur, FΔt sera comme indiqué dans la Figure 1-7-9. La magnitude de FΔt est $\sqrt{2} \times 6{,}0 \times 10^{-2} \times 20 = 1{,}70 \approx 1{,}7$ N s 1,7 N s dirigée vers le nord-ouest. 
Vérification de la cohérence	La plus grande impulsion se produit lorsque la direction s'inverse (cas b). L'arrêt donne une impulsion plus petite (cas a). Changer la direction du mouvement vers le nord donne une impulsion intermé diaire de 1,7 N s dirigée vers le nord-ouest (cas c).
Explique-le Toi-même	Pourquoi l'impulsion dans le cas (*b*) est-elle deux fois celle du cas (*a*), même si la vitesse est la même dans les deux ?

Figure 1-7-9 · L'impulsion résolue avec les directions cardinales du mouvement.

À toi d'essayer : Une force constante de 5,0 N agit sur un objet pendant 2,0 s dans la direction de son mouvement. Déterminez la magnitude de l'impulsion appliquée à l'objet, en N s.

Fait essentiel

Si un objet se déplaçant à une vitesse (v) s'arrête, la grandeur de sa variation de quantité de mouvement est (mv). S'il rebondit à la même vitesse dans la direction opposée, la grandeur de sa variation de quantité de mouvement est ($2mv$). Inverser la quantité de mouvement, plutôt que de simplement la réduire à zéro, double l'impulsion.

Essayer

(a) Une force de 5,0 N est appliquée à un objet de masse 4,0 kg se déplaçant à 2,0 m/s pendant 2,0 secondes dans la direction de son mouvement.

(i) Déterminer l'amplitude de l'impulsion appliquée à l'objet en N s.

(ii) Déterminer l'augmentation de la quantité de mouvement de l'objet en kg m/s.

(iii) Déterminer sa vitesse finale en m/s.

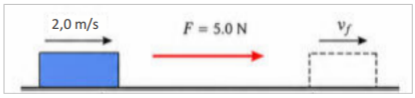


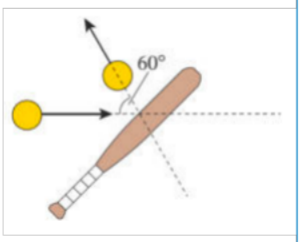
Figure 1-7-10 · Un bloc poussé par une force de 5,0 N.

(b) Une balle de masse 0,15 kg se déplaçant horizontalement à une vitesse de 30 m/s est renvoyée par une batte à la même vitesse avec un angle d'élévation de 60° au-dessus de l'horizontale.

(i) Déterminer l'amplitude de l'impulsion appliquée à la balle.

(ii) Si le temps de contact entre la balle et la batte est $2,0 \times 10^{-2}$ s, déterminez l'intensité de la force moyenne exercée sur la balle en N.

Figure 1-7-11 · Une balle rencontrant la batte à 60°.



Fait clé

Dans la partie (b), la balle inverse sa direction, alors tracez d'abord les vecteurs de quantité de mouvement. L'impulsion est la variation vectorielle de la quantité de mouvement, et non la différence entre les deux vitesses.

Dans un nouveau contexte — Comment un casque réduit la force d'impact

Lorsqu'un motocycliste tombe et que sa tête heurte la route, le changement de quantité de mouvement est inévitable, car la tête doit ralentir jusqu'à l'arrêt. Cependant, un casque augmente le temps pendant lequel ce changement de quantité de mouvement se produit.

La mousse absorbant l'énergie du casque se comprime pendant l'impact, augmentant le temps d'arrêt et la distance d'arrêt de la tête. Pour le même changement de quantité de mouvement :

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

Augmenter le temps d'arrêt réduit la force d'impact moyenne et donc la décélération moyenne de la tête.

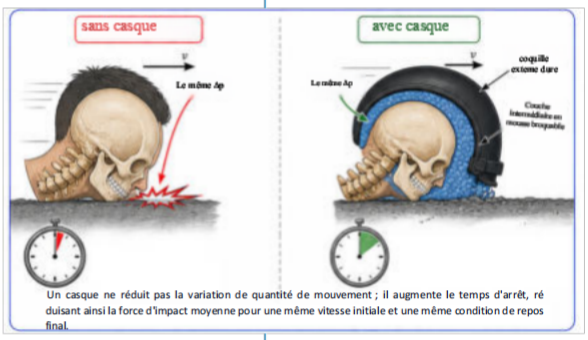


Figure 1-7-12 · Un casque allonge le temps d'arrêt, donc la force d'impact diminue.

À ton tour : Explique pourquoi une doublure de casque plus épaisse et plus souple offre une meilleure protection au crâne, même si l'ampleur du changement de quantité de mouvement de la tête est inchangée.

Nature de la science : Lois — Deuxième loi de Newton (forme en quantité de mouvement)

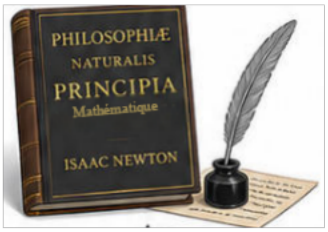
Newton (1687) n'a pas exprimé sa deuxième loi sous la forme $F = ma$; il a énoncé que le taux de variation du mouvement est proportionnel à la force appliquée et se produit dans sa direction. La « quantité de mouvement » correspond à la quantité de mouvement. Sous forme moderne : $F_{resultant} = \frac{dp}{dt}$.

Sur un intervalle de temps : *la force résultante moyenne is* $F_{avg} = \frac{\Delta p}{\Delta t}$.

Pour une masse constante : $F_{resultant} = ma$.

Une loi scientifique décrit une relation cohérente entre des grandeurs physiques et permet de faire des prédictions dans des conditions déterminées. La deuxième loi de Newton relie la force résultante agissant sur un objet au taux de variation de la quantité de mouvement.

À ton tour : Suggère pourquoi la forme de quantité de mouvement $F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$ st considéré comme le forme plus générale.



Question de leçon, répondue

Pourquoi un téléphone est-il moins susceptible de se casser lorsqu'il atterrit sur un lit que lorsqu'il atterrit sur un sol carrelé, même s'il est lâché de la même hauteur ? Si un téléphone heurte un lit ou du carrelage avec la même vitesse et s'arrête sans rebondir, la variation de quantité de mouvement est la même dans les deux cas. La différence est le temps d'arrêt.

Un lit augmente le temps d'arrêt en se déformant, ce qui réduit la force moyenne. Un sol carrelé arrête le téléphone en un temps beaucoup plus court, produisant une force moyenne beaucoup plus grande et augmentant le risque de dommage.

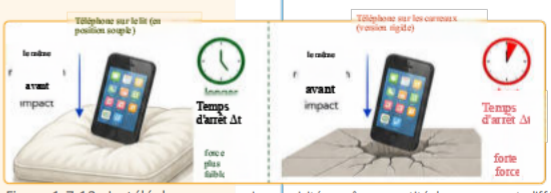


Figure 1-7-13 · Le téléphone comparaison revisitée : même quantité de mouvement, différent temps d'arrêt.

Exercice

Détermine ce qui suit :

(a) Une force de 2,5 N est appliquée à un objet de masse 2,0 kg se déplaçant à 1,0 m/s pendant 0,40 s dans la direction de son mouvement.

(i) Détermine la grandeur de l'impulsion appliquée à l'objet en N s.
(ii) Détermine l'augmentation de la quantité de mouvement de l'objet en kg m/s.
(iii) Détermine sa vitesse finale en m/s.

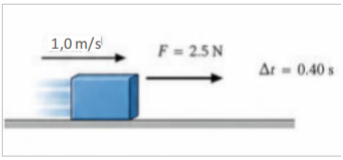


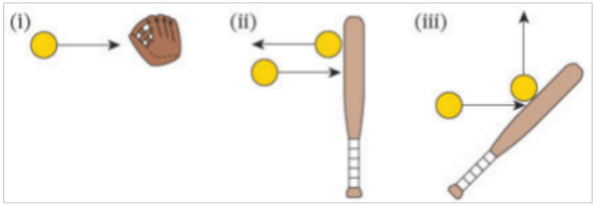
Figure 1-7-14 · Une force de 2,5 N agissant pendant 0,40 s.

(b) Une balle de masse 0,14 kg se déplaçant à une vitesse de 40 m/s est attrapée avec un gant.

(i) Détermine la grandeur de l'impulsion reçue par la balle en N s.
(ii) Si le temps de contact entre la balle et le gant jusqu'à l'arrêt de la balle est $2,0 \times 10^{-2}$ s, détermine la grandeur de la force moyenne exercée par la balle sur le gant en N.

(c) Une balle de masse $3,0 \times 10^{-2}$ kg se déplace vers l'est à une vitesse de 10 m/s. Pour chacun des cas suivants, détermine la grandeur et la direction de l'impulsion appliquée à la balle.

Figure 1-7-15 · Trois cas pour l'exercice.



(i) Lorsque la balle est attrapée.
(ii) Lorsque la balle est renvoyée vers l'ouest à la même vitesse.
(iii) Lorsque la balle est renvoyée vers le nord à la même vitesse.

(d) Une balle de masse 0,40 kg se déplaçant horizontalement à une vitesse de 10 m/s est renvoyée à la même vitesse dans une direction qui fait un angle de 120° avec sa direction initiale. Déterminez l'intensité de l'impulsion reçue par la balle, ainsi que l'angle entre la direction de l'impulsion et sa direction initiale.

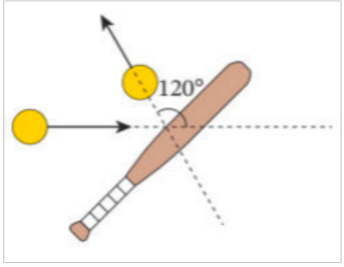


Figure 1-7-16 · Une balle rencontrant la batte à 120°.

Question type examen

Une balle de 0,50 kg se déplaçant à 8,0 m/s est arrêtée par un gant en 0,040 s. Déterminez l'impulsion exercée sur la balle.



Figure 1-7-17 · Une balle de 0,50 kg attrapée à 8,0 m/s.



Leçon 1-8 — La loi de conservation de la quantité de mouvement

❓ **Question de la leçon :**Lorsque vous passez d'un petit bateau immobile à un quai, pourquoi le bateau recule-t-il et qu'est-ce qui détermine sa vitesse ?

Tu apprendras à

À la fin de cette leçon, tu seras capable de :

1. **Expliquer** pourquoi la quantité de mouvement totale d'un système isolé reste constante.
2. **Appliquer** la conservation de la quantité de mouvement pour calculer des vitesses inconnues avant et après une collision.
3. **Définir** le système, choisir un axe et indiquer le sens positif lors de l'application de la conservation de la quantité de mouvement.

🔍 Le phénomène — prédis avant de continuer



Figure 1-8-1 · Avancer hors du bateau le pousse vers l'arrière.

Tu termine une excursion sur un petit bateau et avance pour monter sur le quai en pierre. À mesure que votre pied avance, le bateau glisse vers l'arrière, augmentant l'écart entre le bateau et le quai. Avancez doucement et il s'éloigne lentement, tandis qu'une poussée plus forte lui donne une plus grande vitesse vers l'arrière. Personne d'autre ne pousse le bateau — pourtant il recule toujours.

Prédis avant de poursuivre

(a) Pendant la poussée, vous et le bateau subissez-vous des changements de grandeur de quantité de mouvement égaux ou différents ?

(b) Un bateau vide et un bateau chargé de caisses reçoivent la même impulsion. Quel bateau recule avec la plus grande vitesse ?

Fait clé

La quantité de mouvement d'un objet est $p = mv$. L'impulsion exercée par la force ré sultante pendant un intervalle de temps est é gale à la variation de la quantité de mouvement.

Explorer — Recul lorsque deux élèves se repoussent

Ce que tu vas faire : Vous mesurerez la distance parcourue par deux élèves sur des chaises à roulettes après s'être repoussés, et vous étudierez comment la distance parcourue par chacun dépend de sa masse.**Durée :**20 min

Tu auras besoin de :

- Deux chaises de laboratoire à roulettes qui se déplacent librement.
- Un sol lisse et plat avec une bande de départ marquée.
- De la craie ou du ruban adhésif pour marquer l'arrêt de chaque chaise.
- Un élève plus lourd et un élève plus léger pour l'essai à masses inégales.

Étapes :

1. Deux élèves s'assoient face à face sur les chaises, paumes l'une contre l'autre, tous deux au repos sur la bande de départ.
2. Au signal, les deux élèves poussent fermement une fois contre les paumes de l'autre, puis gardent leurs mains immobiles pendant que les chaises s'éloignent. Marquez l'endroit où chaque chaise s'arrête.
3. Répète avec un élève plus lourd face à un plus léger, depuis la même ligne de départ.
4. Répète encore une fois, mais cette fois, un seul élève pousse tandis que l'autre garde les bras rigides. Marquez à nouveau les points d'arrêt.

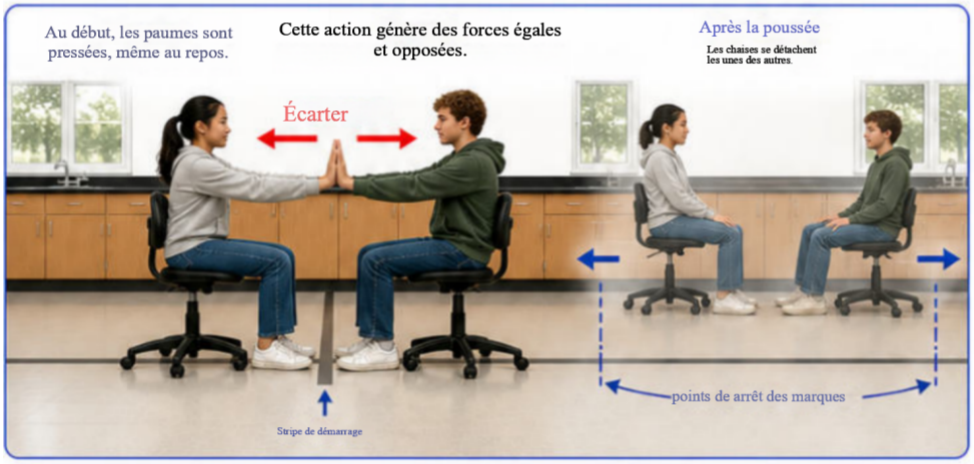


Figure 1-8-2 · Deux élèves se repoussent sur des chaises roulantes et se séparent.

Jumelage	Quel élève s'est déplacé le plus loin ?
Masses similaires	
Plus lourd contre plus léger	
Poussée unilatérale	

Analyse ce que tu as recueilli :

(a) Lorsque les deux élèves ont des masses différentes, lequel se déplace le plus loin ? Comment la distance parcourue par chacun dépend-elle de leur masse ?

(b) Lorsqu'un seul élève a poussé, seule cette chaise a-t-elle bougé, ou les deux ? Qu'est-ce que cela t'indique sur les forces lors d'une interaction ?

Écris, en deux lignes, pourquoi les deux chaises bougent même lorsqu'un seul élève pousse — avant de lire la page suivante.

note de mesure

La friction du sol varie d'un endroit à l'autre du plancher ; garde donc chaque essai sur la même bande marquée et compare les distances d'arrêt uniquement au sein d'un même appariement, jamais entre différentes parties de la pièce.

De l'observation au modèle

Dans Explorer, le fauteuil transportant l'élève plus léger est allé plus loin, donc il a quitté la poussée avec la plus grande vitesse, et — notamment — les deux fauteuils se sont écart és même lorsqu'un seul élève poussait. On pourrait s'attendre à ce que seul le fauteuil poussé bouge, pourtant les observations montrent que les deux fauteuils s'écartent.

Les deux fauteuils n'agissent pas indépendamment ; ils interagissent en paire. Chaque fois qu'un élève pousse sur l'autre, l'autre repousse avec une force de même grandeur et de direction opposée, agissant exactement pendant le même temps. Chaque fauteuil reçoit donc une impulsion de même grandeur mais de direction opposé e, de sorte que chacun subit une variation de quantité de mouvement égale et opposée ; comme il a la plus petite masse, le fauteuil plus léger s'éloigne à la plus grande vitesse.

Le modèle suivant rend compte de ces observations.

Le modèle : conservation de la quantité de mouvement

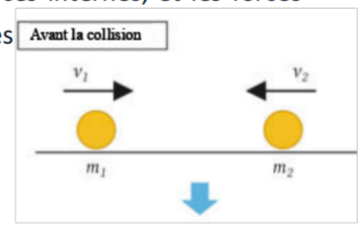
Un groupe d'objets considéré est appelé un système. Les forces exercées les unes sur les autres à l'intérieur du système sont appelées forces internes, et les forces exercées par des agents extérieurs au système sont appelées forces externes. La quantité de mouvement totale du système isolé est la même avant et après une collision. Ce principe est appelé loi de conservation de la quantité de mouvement.

Lorsque l'objet A de masse m_1 and velocity v_1 entre en collision avec l'objet B de masse m_2 and velocity v_2, et que leurs vitesses respectives become v_1' and v_2' ,

$$m_1v_1 + m_2v_2 \quad = \quad m_1v_1' + m_2v_2'$$

quantité de mouvement totale avant la collision — quantité de mouvement totale après la collision

La loi de conservation de la quantité de mouvement s'applique lorsque le système ne reçoit aucune impulsion externe nette.



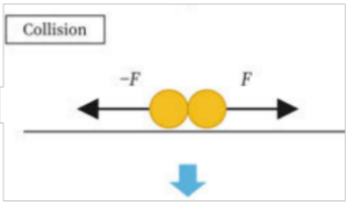
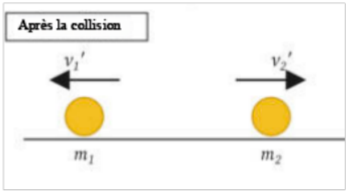


Figure 1-8-4 · En contact : forces égales et opposées.

Figure 1-8-5 · Après l'impact : chaque masse possède une nouvelle vitesse.



Point

Un groupe d'objets considérés est appelé un système. Les forces exercées les unes sur les autres au sein du système sont appelées forces internes, et les forces exercées par des objets extérieurs au système sont appelées forces externes.

La quantité de mouvement totale d'un système isolé ne change pas lors d'une collision. Lorsque l'objet A de masse m_1 et de vitesse v_1 entre en collision avec l'objet B de masse m_2 et de vitesse v_2, et que leurs vitesses deviennent v_1' et v_2': $m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v_1' + m_2v_2'$ .e)

Cela est valable lorsqu'aucune impulsion n'est reçue de forces externes.

Cela est également valable si des forces externes telles que la gravité sont reçues mais peuvent être ignor ées Pour un mouvement dans un plan, décomposez les vecteurs selon les *directions x* et *y*.

Encadré d'équation

Conservation le long d'un axe (deux corps)	$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v_1' + m_2v_2'$
Quantité de mouvement d'un corps	$p = mv$

système isolé

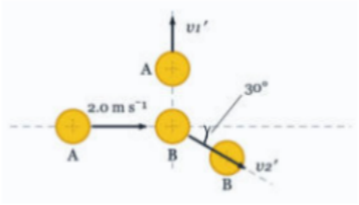
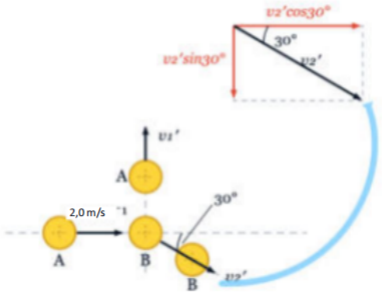
Un ensemble d'objets considérés ensemble comme un seul système. Le système est isolé pendant un intervalle de temps si l'impulsion externe nette est nulle.

Sa quantité de mouvement totale reste donc constante.

Application rapide

Un objet de masse 5 kg, initialement au repos, explose en deux objets : un objet de 3 kg se déplace vers l'est à 4 m/s, tandis qu'un objet de 2 kg se dé place vers l'ouest à 6 m/s. Montrez que la quantité de mouvement est conservée.

Exemple travaillé

Situation	**(a)** Un objet A de masse 1,2 kg se déplaçant dans le sens positif à 3,0 m/s et un objet B de masse 2,8 kg se déplaçant dans le sens négatif à 2,0 m/s le long d'une ligne droite entrent en collision et restent collés ensemble. Déterminez la vitesse après qu'ils se sont collés ensemble en m/s. **(b)** Comme le montre la figure ci-dessous, sur une surface horizontale lisse, un objet A de masse 0,20 kg se déplaçant à une vitesse de 2,0 m/s entre en collision avec un objet B de masse 0,80 kg au repos. Déterminez les vitesses finales des objets A et B après la collision. 
Donné et requis	**Donné (a) :** $m_A = 1{,}2$ kg, $v_A = +3{,}0$ m/s, $m_B = 2{,}8$ kg, $v_B = -2{,}0$ m/s. Requis : vitesse finale v,. **Donné (b) :** $m_A = 0{,}20$ kg, $v_A = 2{,}0$ m/s, $m_B = 0{,}80$ kg, $v_B = 0$. Requis : vitesses finales de A et B.
Représentation	**(a)** Mouvement unidimensionnel avec une direction positive choisie. **(b)** Mouvement bidimensionnel résolu en composantes perpendiculaires ; la quantit é de mouvement est conservée indépendamment dans les directions x et y.
Stratégie	Appliquer la conservation de la quantité de mouvement. Dans (**a**), les deux objets se déplacent ensemble après la collision. Dans (**b**), résoudre le mouvement et utiliser la conservation de la quantité de mouvement dans des directions perpendiculaires.
Solution annotée	**(a)** $1.2 \times (3.0) + 2.8 \times (-2.0) = (1.2 + 2.8)v'$ $3.6 - 5.6 = 4.0v' \rightarrow v' = -0.50$ m/s  Figure 1-8-7 · Deux corps se rencontrent de front et se déplacent ensemble. **(b)** **(i)** x: $0.20 \times 2.0 + 0.80 \times 0 = 0.20 \times 0 + 0.80 \times v'_2 \cos 30°$ **(ii)** y : $0{,}20 \times 0 + 0{,}80 \times 0 = 0{,}20 \times v'_1 - 0{,}80 \times v'_2 \sin 30°$, 1 Résolution de (i) : $v'_2 = \frac{3}{3} = 0{,}577\cdots \approx 0{,}58$ En substituant $v'_2 = \frac{1}{\sqrt{3}}$ dans (ii) : $v'_1 = \frac{2.0}{\sqrt{3}} = \frac{2.0\sqrt{3}}{3} = 1.15\ldots \approx 1.2$ A: 1.2 m/s; B: 0.58 m/s Figure 1-8-8 · Décomposition de la vitesse finale de B en composantes. 
Vérification de la cohérence	**(a)** La vitesse finale est négative, ce qui est cohérent avec le fait que l'objet B possède la plus grande quantité de mouvement en valeur absolue dans la direction négative. **(b)** Les deux vitesses finales sont inférieures à la vitesse initiale, ce qui est cohérent avec le partage de la quantité de mouvement entre les deux objets.
Explique-le Toi-même	Dans la partie (a), pourquoi peut-on additionner les deux quantités de mouvement comme des nombres signés sur une seule ligne au lieu de les décomposer selon deux axes ?

Fait clé

Choisissez la direction positive avant d'appliquer la conservation de la quantité de mouvement. Une vitesse négative indique un mouvement opposé à la direction positive choisie.

Essayer

(a) Un objet A de masse 2,0 kg se déplaçant dans le sens positif à 4,0 m/s et un objet B de masse 3,0 kg se déplaçant dans le sens négatif à 4,0 m/s sur une ligne droite entrent en collision. Lorsque la vitesse de l'objet B après la collision est de 2,0 m/s dans le sens positif, détermine la vitesse de l'objet A après la collision en m/s.

(b) Un objet de masse 8,0 kg au repos explose en un objet A de masse 3,0 kg et un objet B de masse 5,0 kg. Si l'objet A après l'explosion se déplace vers la gauche à 10 m/s, détermine la vitesse et la direction de l'objet B après l'explosion.

(c) Sur une surface horizontale lisse, un objet A de masse 1,0 kg se déplaçant à une vitesse de 4,0 m/s entre en collision avec un objet B de masse 2,0 kg au repos. Après la collision, A est dévié de 45° d'un côté de sa direction initiale et B est dévié de 45° de l'autre côté. Détermine la vitesse finale des objets A et B après la collision.

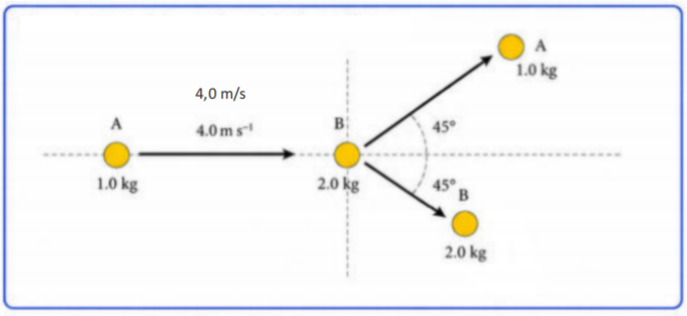


Figure 1-8-9 · Un corps de 1,0 kg frappe un corps de 2,0 kg, et les deux repartent à 45°.

Dans un nouveau contexte — la propulsion par fusée

Une fusée fonctionne en expulsant des gaz d'échappement vers l'arrière à grande vitesse. Les gaz gagnent une quantité de mouvement vers l'arrière, tandis que la fusée gagne une quantité de mouvement égale vers l'avant.

Pour le système fusée et gaz d'échappement, si l'impulsion externe est négligeable, la quantité de mouvement totale est conservée : $\Delta p_{fusée} = -\Delta p_{échappement}$

Pendant le lancement, la gravité agit vers le bas, donc la fusée n'accélère vers le haut que lorsque sa poussée est supérieure à son poids. (La résistance de l'air est négligée.)

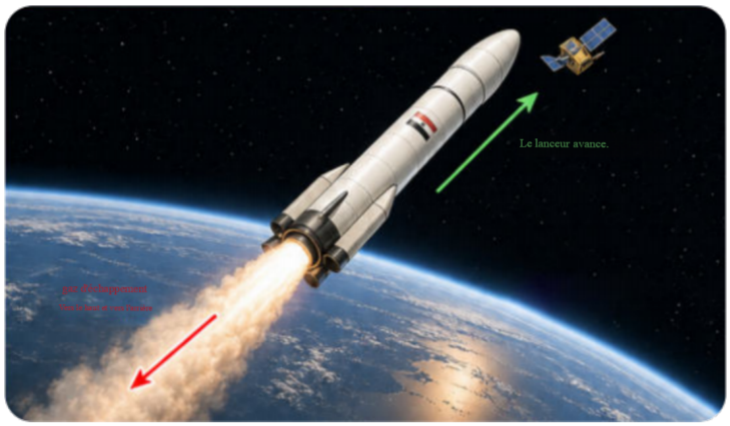


Figure 1-8-10 · Une fusée avance en poussant du gaz vers l'arrière.

Expliquez pourquoi une fusée peut accélérer dans le vide spatial même s'il n'y a aucun milieu extérieur contre lequel pousser.

Nature de la science — Preuve — Tester une hypothèse Contre les lois de conservation

En 1930, des mesures de la désintégration bêta semblaient montrer qu'une partie de l'énergie et de la quantité de mouvement manquait dans les produits observés. Plutôt que d'abandonner immédiatement les lois de conservation bien établies, Wolfgang Pauli proposa qu'une particule

neutre non détectée emportait l'énergie et la quantité de mouvement manquantes.
Cette particule fut plus tard connue sous le nom de neutrino. La proposition de Pauli fit une prédiction vérifiable : si la particule existait, les expériences pourraient é ventuellement détecter des preuves de ses interactions. En 1956, Frederick Reines et Clyde Cowan rapportèrent la détection expérimentale du neutrino.
Cet épisode montre que les lois établies ne sont pas acceptées sans question. Les scientifiques les conservent tant que les preuves les soutiennent fortement, mais ils développent et testent é galement des explications alternatives lorsque de nouvelles observations semblent incompatibles avec ces lois.**À votre tour :**Pourquoi proposer une hypothèse vérifiable sur une particule était-il plus utile scientifiquement que de simplement déclarer que les lois de conservation avaient échoué ?

Question de la leçon, réponse

Lorsque vous passez d'un petit bateau immobile à un quai, pourquoi le bateau recule-t-il, et qu'est-ce qui détermine sa vitesse ?

Considérez la personne et le bateau comme un seul système. Au départ, la quantité de mouvement totale est nulle. Pendant la brève poussée, l'impulsion horizontale externe est négligeable, donc la quantité de mouvement est conserv ée :

$$p_{personne} + p_{bateau} = 0$$

La personne et le bateau acquièrent des quantités de mouvement égales et opposées. Puisque p = mv, le bateau plus léger se déplace plus vite qu'un plus lourd pour la même quantité de mouvement.



Figure 1-8-11 · Le bateau revisité.

Exercice

(a) Un objet A de masse 2,0 kg se déplaçant dans le sens positif à 3,0 m/s sur une ligne droite entre en collision avec un objet B de masse 1,0 kg au repos, et ils restent collés ensemble. Déterminez la vitesse après qu'ils se sont collés ensemble en m/s.

(b) Un chariot A de masse 2,0 kg se déplaçant à une vitesse de 4,5 m/s entre en collision sur une ligne droite avec un chariot B de masse 5,0 kg se déplaçant à 0,40 m/s dans la même direction. Si le chariot B après la collision se déplace à une vitesse de 2,6 m/s dans sa direction d'origine, déterminez la vitesse et la direction du chariot A après la collision.

(c) Un objet de masse 7,0 kg au repos explose en un objet A de masse 4,0 kg et un objet B de masse 3,0 kg. Si l'objet A après l'explosion se déplace vers la gauche à 9,0 m/s, déterminez la vitesse et la direction de l'objet B après l'explosion.

(d) Un objet de masse m au repos explose en un objet A et un objet B. Si l'objet A de masse $(\frac{2}{3})$m se déplace dans le sens positif à une vitesse de v, déterminez la vitesse et la direction de l'objet B après l'explosion.

(e) Sur une surface horizontale lisse, un objet A de masse 0,20 kg se déplaçant à une vitesse de 2,0 m/s entre en collision avec un objet B de masse 0,60 kg au repos. Après la collision, A est dévié de 60° d'un côté de sa direction d'origine et B est dévié de 30° de l'autre côté. Déterminez la vitesse finale des objets A et B après la collision.

(f) Sur une surface horizontale lisse, un objet de masse 5,0 kg se déplaçant à une vitesse de 2,0 m/s se scinde en un objet A de masse 4,0 kg et un objet B de masse 1,0 kg. Après la scission, A est dévié de 60° par rapport à sa direction initiale et B se déplace perpendiculairement à cette direction, du côté opposé. Déterminez la vitesse des objets A et B après la scission.

Conseil d'examen

Indique la direction positive et écrivez $\Sigma p_{avant} = \Sigma p_{a\ après}$ pour l'axe avant tout calcul.

Question type examen

Un chariot de 1,5 kg se déplaçant à 2,0 m/s entre en collision frontale avec un chariot immobile de 0,50 kg sur une piste lisse et les deux se déplacent ensemble. Déterminez la vitesse finale des chariots accouplés en m/s.

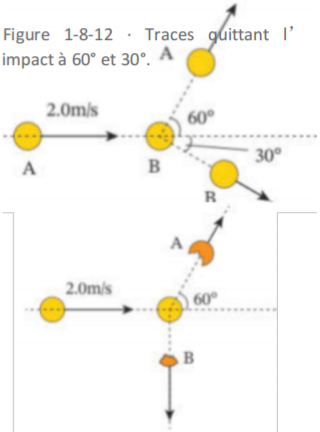
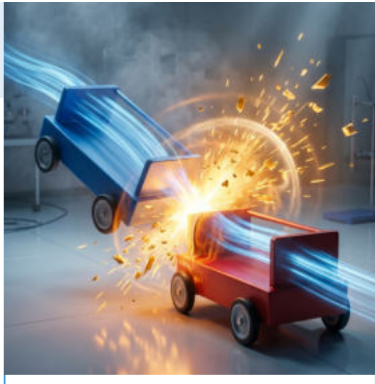


Figure 1-8-12 · Traces quittant l'impact à 60° et 30°.



Leçon 1-9 — Quantité de mouvement et énergie mécanique

? **Question de la leçon :**Deux chariots entrent en collision, restent collés et se déplacent plus lentement. Si leur quantité de mouvement totale est conservée, pourquoi leur énergie cinétique totale diminue-t-elle, et vers quelles formes d'énergie est-elle transférée ?

Tu apprendras à

À la fin de cette leçon, tu seras capable de :

1. **Indiquer** quand la quantité de mouvement totale est conservée et distinguer les collisions élastiques des collisions inélastiques.
2. **Calculer** la diminution de l'énergie cinétique totale lors d'une collision inélastique.
3. **Expliquer** comment l'énergie cinétique est transférée vers d'autres formes lors d'une collision inélastique.

Le phénomène — prédis avant de continuer

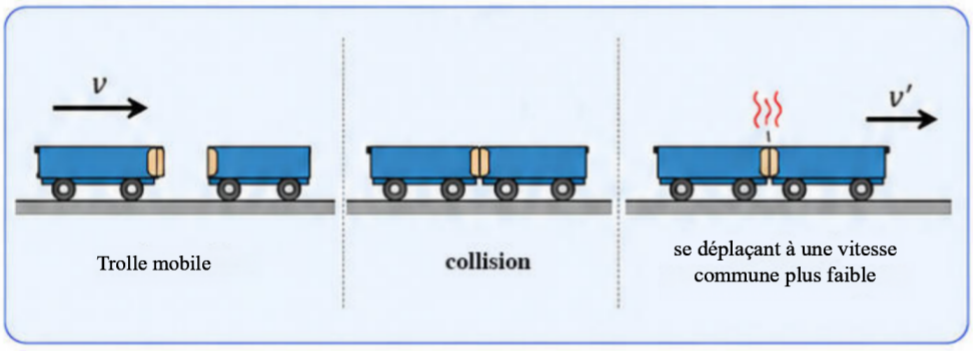


Figure 1-9-1 · Les chariots se joignent et poursuivent leur mouvement à une vitesse commune plus faible.

Un chariot de laboratoire en mouvement entre en collision avec un second chariot initialement au repos. Des tampons adhésifs à leurs extrémités font que les chariots restent collés et se déplacent avec une vitesse commune après la collision. Leur vitesse commune est inférieure à la vitesse initiale du chariot en mouvement. Un son bref peut être entendu pendant la collision, et les chariots ainsi que les tampons peuvent subir une légère déformation. Ces observations suggèrent qu'une partie de l'énergie cinétique est transférée vers d'autres formes d'énergie.

Comparez le mouvement avant et après la collision.

Prédis avant de poursuivre

(a) Après qu'ils se collent l'un à l'autre, la quantité de mouvement totale est-elle plus petite, la même ou plus grande qu'avant ?

(b) Qu'arrive-t-il à l'énergie cinétique totale — devient-elle plus petite, reste-t-elle la même ou devient-elle plus grande ?

Fait essentiel

Pour un système isolé : $\sum \vec{p}_{avant} = \sum \vec{p}_{après}$ Pour chaque objet : $E_k = \frac{1}{2}mv^2$

Explorer — Quantité de mouvement et énergie cinétique dans une collision inélastique

Ce que tu feras : enregistrer une vidéo au ralenti de deux chariots entrant en collision, puis comparer leur mouvement avant et après la collision.

Temps : 12 min

Tu auras besoin de :

- Un téléphone avec vidéo au ralenti.
- Deux chariots de laboratoire avec un tampon à boucles et crochets (adhésif).
- Un mètre ruban placé le long de la piste pour l'échelle.

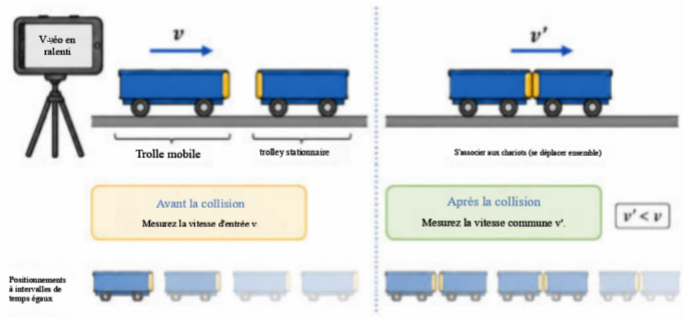


Figure 1-9-2 · Filmer les chariots pour mesurer la vitesse avant et après.

Étapes :

1. Mesure et notez la masse de chaque chariot. Placez le chariot B au repos sur une piste plane à faible frottement.
2. Libére le chariot A pour qu'il entre en collision avec le chariot B. Des bandes auto-agrippantes sur les extrémités en regard devraient faire en sorte que les chariots restent collés ensemble. Enregistrez toute la collision en vidéo au ralenti.
3. Place un ruban à mesurer parallèlement à la piste et près de la trajectoire des chariots. Utilise la fréquence d'images de la vidéo et la distance parcourue sur plusieurs images pour déterminer : la vitesse du chariot A immédiatement avant la collision ; la vitesse commune des chariots liés immédiatement après la collision.
4. Note si un son, une vibration ou une déformation visible se produit pendant la collision.
5. Ajoute solidement une masse au chariot B et répétez la procédure. Gardez la vitesse initiale du chariot A aussi proche que possible de la même valeur.

Essai	Masse de Chariot A (kg)	Masse de Chariot B (kg)	Vitesse avant collision, v (m/s)	Vitesse commune après collision, v' (m/s)	Son ou deformation observé ?
Plus léger Chariot cible					
Plus lourd Chariot cible					

Analyse ce que tu as collecté :

(a) Pour chaque essai, calculez la quantité de mouvement totale et l'énergie cinétique totale avant et après la collision. Chaque total est-il approximativement conservé ?

(b) Expliquez comment les observations de son, de vibration ou de déformation fournissent la preuve qu'une partie de l'énergie cinétique a été transférée vers d'autres formes d'énergie.

Écris ton explication en deux lignes avant de lire la page suivante.

Une note de mesure

À une cadence d'images constante, des nombres égaux d'intervalles d'images représentent des intervalles de temps égaux. Mesurez les deux vitesses sur le même nombre d'intervalles d'images, immédiatement avant et après la collision, afin que la comparaison soit fondée sur des intervalles de temps égaux.

De l'observation au modèle

Dans Explorer, les deux chariots se sont déplacés ensemble avec une vitesse commune inférieure à la vitesse initiale du chariot en mouvement. En utilisant les masses et les vitesses mesurées, on obtient un résultat plus précis : la quantité de mouvement totale avant et après la collision était approximativement la même, tandis que l'énergie cinétique totale après la collision était plus petite. L'énergie cinétique n'a pas été détruite. Une partie a été transférée vers d'autres formes d'énergie, notamment l'énergie interne associée à la déformation et à la vibration, ainsi que le son.

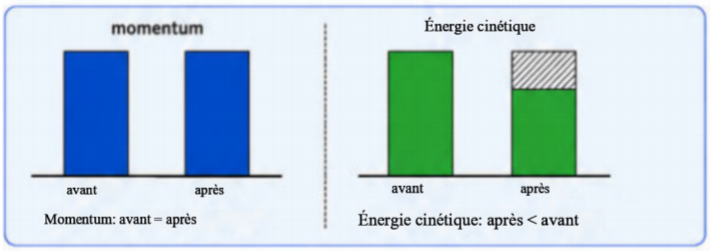


Figure 1-9-3 · La quantité de mouvement reste inchangée, mais l'énergie cinétique diminue.

Point

- La somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle d'un système est appelée énergie mécanique. Lorsqu'un objet de masse m[kg] se déplace à une vitesse v[m/s], son énergie cinétique E_k[J] est $E_k = ½ mv2$.
- Lorsque des objets entrent en collision, leur vitesse relative après la collision est inférieure ou égale à leur vitesse relative avant celle-ci ; ainsi, pour les collisions ordinaires (non explosives), le coefficient de restitution e— le rapport de la vitesse relative après la collision sur la vitesse relative avant celle-ci — satisfait $0 \le e \le 1$. Lorsque $e = 1$, on parle de collision parfaitement élastique; lorsque $0 \le e < 1$, de collision inélastique; et la collision inélastique avec $e = 0$ est appelée collision parfaitement inélastique.Les corps ne forment plus qu'un seul corps après la collision..e))
- Dans une collision élastique ($e = 1$), l'énergie mécanique est conservée. Dans une collision inélastique ($0 \le e < 1$), l'énergie mécanique diminue : une partie est transférée en énergie interne associée à la déformation et aux vibrations, ainsi qu'au son.

Encadré d'équation

Énergie cinétique d'un corps	$E_k = \frac{1}{2}mv^2$
Conservation de la quantité de mouvement (système isolé)	$m_A v_A + m_B v_B = m_A v'_A + m_B v'_B$
Énergie cinétique perdue	$\Sigma E_{k,avant} - \Sigma E_{k,après}$

Le cas parfaitement inélastique

Lors de la collision, l'énergie cinétique totale des deux chariots a diminué. L'énergie mécanique d'un système est définie comme la somme de son énergie cinétique et de son énergie potentielle. Leur énergie potentielle gravitationnelle est restée constante. Par conséquent, la diminution de l'énergie cinétique totale correspond à une diminution de l'énergie mécanique du système. L'énergie mécanique n'est pas conservée dans cette collision inélastique. Une partie de l'énergie mécanique est transférée en énergie interne associée à la déformation et aux vibrations, ainsi qu'au son.

Lorsque des objets entrent en collision, leur vitesse relative après la collision est inférieure ou égale à leur vitesse relative avant la collision. Ainsi, pour les collisions ordinaires (non explosives), le coefficient de restitution e satisfait $0 \le e \le 1$.

Lorsque e = 1, la collision est appelée une collision parfaitement **élastique**.

Lorsque $0 \le e < 1$, on parle de **collision inélastique.**

Parmi les collisions inélastiques, une collision où e = 0 est spécifiquement appelée une collision parfaitement

Point clé :

Dans une collision inélastique, l'énergie cinétique n'est pas conservée. Dans une collision élastique, l'énergie cinétique est conservée.

Application rapide

Un chariot unique de masse 2,0 kg se déplace à 4,0 m/s.

Calculez son énergie cinétique en J.

collision inélastique ; les objets se déplacent ensemble après la collision.

- Dans une collision élastique (e= 1), l'énergie mécanique est conservée.
- Dans une collision inélastique (0 ≤ e< 1), l'énergie mécanique diminue.

Lorsque deux objets entrent en collision, le rapport entre la grandeur de la vitesse relative après la collision et celle avant la collision est appelé coefficient de restitution. Le coefficient de restitution dépend des matériaux des objets en collision. Soient les vitesses des deux objets avant la collision v_1 et v_2, les vitesses après la collision v_1' et v_2', et le coefficient de restitution e, $v_1' - v_2' = -e(v_1 - v_2)$

Exemple résolu

Situation	Une petite bille A de masse 1,0 kg se déplace vers la droite à 4,0 m/s et entre en collision frontale avec une petite bille B immobile de masse 1,5 kg. Le coefficient de restitution est de 0,25. Déterminez ce qui suit : **(a)** Déterminez les vitesses finales des deux billes après la collision en m/s. **(b)** Déterminez l'énergie mécanique perdue lors de la collision en J. Prenez la direction vers la droite comme positive.
Données et exigences	**Données :** m_A=1.0 kg, v_A= +4.0 m/s, m_B=1.5 kg, v_B=0 m/s, e =0.25. **Recherché :** **(a)** Vitesses finales v'_A et v'_B **(b)** Énergie mécanique perdue pendant la collision.
Représentation	Soit les vitesses des petites billes A et B après la collision v'_A et v'_B
Stratégie	Utilisez la conservation de la quantité de mouvement avec l'équation du coefficient de restitution pour déterminer les vitesses finales. Calculez ensuite l'énergie cinétique totale avant et après la collision et trouvez la différence.
Solution annotée	**(a) Vitesses finales.** D'après la loi de conservation de la quantité de mouvement, $1{,}0\times 4{,}0 + 1{,}5\times 0 = 1{,}0 \times v'_A + 1{,}5 \times v'_B$ $v'_A + 1{,}5\, v'_B = 4{,}0$..... (1) D'après la formule du coefficient de restitution, $v'_A - v'_B = -0{,}25(4{,}0 - 0)$ $v'_B - v'_A = 1{,}0$..... (2) En résolvant (1) et (2) : v'_A= 1,0 m/s, v'_B= 2,0 m/s **(b) l'énergie mécanique perdue lors de la collision :** La somme de l'énergie cinétique avant la collision est $\frac{1}{2} \times 1{,}0 \times 4{,}0^2 + \frac{1}{2} \times 1{,}5 \times 0^2 = 8{,}0$ J La somme de l'énergie cinétique après la collision est $\frac{1}{2} \times 1{,}0 \times 1{,}0^2 + \frac{1}{2} \times 1{,}5 \times 2{,}0^2 = 3{,}5$ J La perte d'énergie cinétique est de 8,0 J − 3,5 J = 4,5 J
Vérification de la cohérence	Puisque (e= 0,25 < 1), la collision est inélastique, donc l'énergie mécanique n'est pas conservée. L'énergie cinétique totale diminue, ce qui correspond à une perte de 4,5 J.
Explique-le toi-même	Expliquer pourquoi la quantité de mouvement est conservée pendant la collision même si l'énergie mécanique ne l'est pas.

À vous maintenant : Une petite balle A de masse 4,0 kg se déplace vers la droite à 6,0 m/s et entre en collision frontale avec une petite balle B immobile de masse 3,0 kg. Après la collision, les deux balles restent collées et se déplacent comme un seul objet.

Détermine la vitesse finale, puis **calcule** l'énergie cinétique perdue en J.

Essayer

(a) Sur une ligne droite, une petite boule A de masse 2,0 kg se déplaçant vers la droite à 4,0 m/s et une petite boule B de masse 1,0 kg se déplaçant vers la gauche à 6,0 m/s entrent en collision frontale. Le coefficient de restitution entre la petite boule A et la petite boule B est de 0,50. Prendre la direction vers la droite comme positive.



Figure 1-9-4· Deux corps en mouvement entrent en collision frontale.**

(i) Déterminer la vitesse de chaque boule après la collision, en m/s.
(ii) Déterminer l'énergie cinétique perdue lors de la collision en J.

(b) Une petite boule A de masse 2,0 kg se déplaçant vers la droite à 4,0 m/s entre en collision frontale avec une petite boule B de masse 3,0 kg au repos, et elles restent collées ensemble. Prendre la direction vers la droite comme positive.



Figure 1-9-5 · Un corps en mouvement en percute un autre au repos, et les deux s'unissent.

(i) Déterminez la vitesse finale des balles en m/s.
(ii) Déterminez l'énergie cinétique perdue lors de la collision en J.

Dans un nouveau contexte — la zone de déformation

Une collision de véhicule est en grande partie inélastique. Pendant l'impact, la zone de déformation se déforme, de sorte que le véhicule rebondit moins et que son énergie cinétique diminue. La diminution de l'énergie cinétique est transformée principalement en énergie interne par déformation permanente, vibrations internes et échauffement, tandis qu'une plus petite quantité est transférée à l'environnement sous forme de son. La déformation augmente également le temps pendant lequel la quantité de mouvement du véhicule change, ce qui réduit la force moyenne agissant sur le conducteur et les passagers.

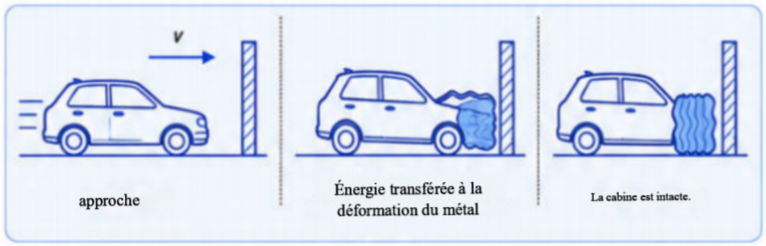


Figure 1-9-6 · Une zone de déformation absorbe l'énergie tandis que l'habitacle reste intact.

À votre tour : Expliquez pourquoi une voiture conçue pour se déformer lors d'une collision protège mieux ses passagers qu'une voiture conçue pour rester rigide.

Nature de la science : Preuves — où va l'énergie cinétique « perdue »

En 1850, James Joule publia son expérience de la roue à aubes dans les Philosophical Transactions. Des poids en chute faisaient tourner une pale qui agitait l'eau, et le travail mécanique produisait une élévation mesurable de la température de l'eau. Cela prouvait que le travail n'était pas perdu, mais converti en énergie interne (thermique). L'énergie cinétique « perdue » lors d'une collision inélastique change de la même manière : elle devient de l'énergie interne, qui peut être mesurée par une élévation de température.

Fait essentiel

Dans la partie (a), le coefficient de restitution est donné plutôt que les vitesses finales, donc l'équation de restitution et la conservation de la quantité de mouvement doivent être résolues ensemble.

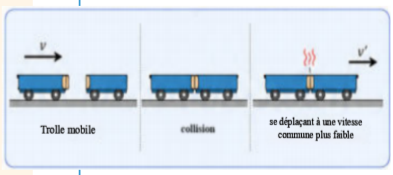
Dans la partie (b), les objets se déplacent ensemble après la collision et leur vitesse commune est inconnue. Utiliser la conservation de la quantité de mouvement pour calculer d'abord cette vitesse.

À votre tour :suggérez pourquoi une élévation de température mesurée est une preuve plus solide que simplement affirmer que l'énergie est perdue.

Question de la leçon, répondue

Deux chariots entrent en collision, restent collés ensemble et se déplacent plus lentement. Si leur quantité de mouvement totale est conservée, pourquoi leur énergie cinétique totale diminue-t-elle, et vers quelles formes d'énergie est-elle transférée ? La quantité de mouvement totale est conservée pendant la collision.Cependant, la diminution de l'énergie cinétique totale des corps en collision est principalement convertie en énergie interne par la déformation, les vibrations internes et l'échauffement, tandis qu'une fraction plus faible est emportée par les ondes sonores.

Figure 1-9-7 · Les chariots revisités.



Exercice

(a) Une petite bille A de masse 2,0 kg se déplaçant vers la droite à 8,0 m/s entre en collision en ligne droite avec une petite bille B de masse 1,0 kg se déplaçant vers la droite à 2,0 m/s. Après la collision, A se déplace à 5,0 m/s et B se déplace à 8,0 m/s, toutes deux vers la droite. Prendre le sens vers la droite comme positif.

(i) Montre que la quantité de mouvement est conservée lors de la collision.

(ii) Détermine l'énergie cinétique perdue lors de la collision en J.

(b) Une petite bille A de masse 0,10 kg se déplaçant vers la droite à 3,0 m/s entre en collision frontale avec une petite bille B de masse 0,20 kg se déplaçant vers la gauche à 2,0 m/s. Après la collision, A se déplace à 1,0 m/s vers la gauche et B est au repos. Prenez la direction vers la droite comme positive.

(i) Montre que la quantité de mouvement est conservée lors de la collision.

(ii) Détermine l'énergie cinétique perdue lors de la collision en J.

(c) Une petite bille A de masse 1,0 kg se déplaçant vers la droite à 4,0 m/s entre en collision frontale avec une petite bille B de masse 1,5 kg qui est au repos, et elles restent collées ensemble. Prenez la direction vers la droite comme positive.

(i) Détermine la vitesse des billes combinées en m/s.

(ii) Détermine l'énergie cinétique perdue lors de la collision en J.

(d) Une petite bille A de masse 0,20 kg se déplaçant vers la droite à 10,0 m/s entre en collision frontale avec une petite bille B de masse 0,30 kg se déplaçant vers la gauche à 5,0 m/s, et elles restent collées ensemble. Prenez la direction vers la droite comme positive.

(e) Détermine la vitesse des billes combinées en m/s.

(f) Détermine l'énergie cinétique perdue lors de la collision en J.

Question type examen

Un chariot A de masse 1,0 kg se déplaçant à 4,0 m/s entre en collision avec un chariot B immobile de masse 1,5 kg, et les deux restent collés ensemble.

(a) Déterminez la vitesse finale des chariots combinés.

(b) Calculez l'énergie cinétique perdue lors de la collision.

Conseil d'examen

Écris l'équation de conservation de la quantité de mouvement sur une seule ligne.

Utilise une méthode de tableau pour calculer l'énergie cinétique totale avant et après la collision.



Leçon 1-10 — Mouvement circulaire uniforme et force centripète

❓ **Question de la leçon**: Une balle est tournée en cercle au bout d'une corde. Si la corde est coupée, dans quelle direction la balle se déplace-t-elle ?

Tu apprendras à

À la fin de cette leçon, tu seras capable de :

1. **Calculer** la période (T), la fréquence (f), la vitesse angulaire (ω) et la vitesse linéaire (v) d'un objet en mouvement circulaire uniforme.
2. **Déterminer** l'accélération centripète (a_c) de l'objet et identifier la force qui la fournit.
3. **Expliquer** pourquoi aucune force vers l'extérieur (centrifuge) n'agit sur un objet se déplaçant en cercle.

Le phénomène — prédis avant de continuer

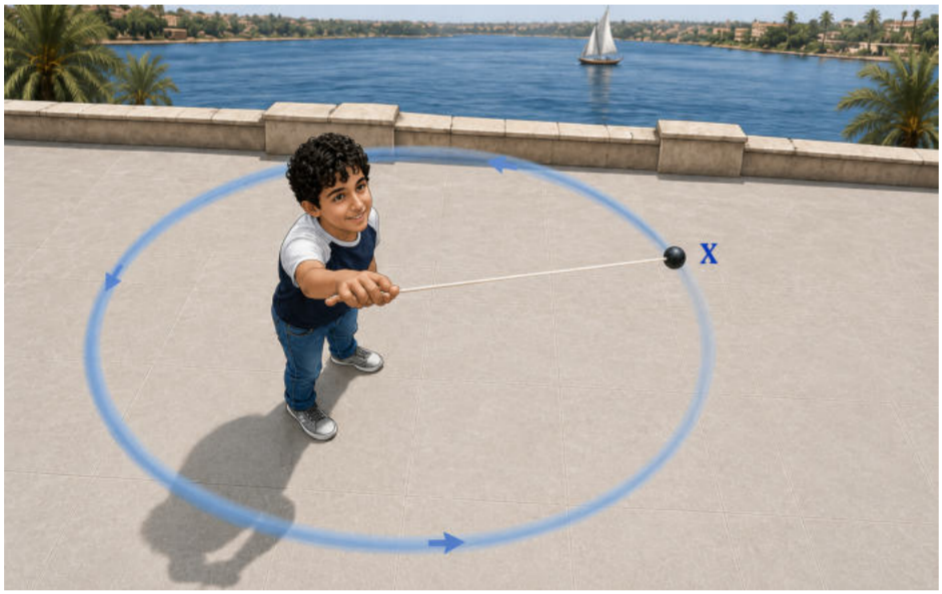


Figure 1-10-1 · Une pierre tournée au bout d'une corde se déplace en cercle à vitesse constante.

Fait tourner une balle au bout d'une corde dans un cercle horizontal au-dessus de votre tête. La corde reste tendue, et votre main ressent une traction constante vers l'intérieur tant que la balle continue de se déplacer en cercle. Supposons maintenant que la corde soit coupée à l'instant où la balle est au point X. Sans force provenant de la corde, la balle est libre. Prédis la trajectoire que la balle suit après le point X.

Prédis avant de poursuivre

(a) Lorsque le fil est coupé à X, la balle se déplace-t-elle : (i) en ligne droite vers l'extérieur le long du fil à cet endroit, (ii) le long de la tangente au cercle, ou (iii) suit-elle une trajectoire progressivement incurvée ?

(b) Pendant que la balle se déplace autour du cercle à vitesse constante, une force vers l'extérieur agit-elle sur elle ? Explique votre réponse.

Fait clé

La vitesse change lorsque sa direction change, et pas seulement lorsque sa grandeur change. Ainsi, un objet se déplaçant en cercle à vitesse constante accélère quand même.

D'après le livret de données, les équations du mouvement circulaire uniforme sont :

$v = 2\pi r / T = \omega r$

$a_c = v^2 / r = \omega^2 r$

Explorer— Étudier la trajectoire d'un objet libéré d'un mouvement circulaire mouvement

Ce que tu feras : tu lâcheras un objet se déplaçant en cercle et détermine la direction qu'il prend ensuite.

Durée :15 min

Tu auras besoin de :

- Un bouchon en caoutchouc attaché solidement à environ 0,5 m de ficelle solide.
- Des lunettes de sécurité, portées par toutes les personnes présentes dans la zone
- Un grand espace dégagé — idéalement à l'extérieur ou dans un gymnase
- De la craie ou du ruban adhésif de sol pour marquer une grille : un cercle, son centre, et les points 12, 3, 6 et 9 heures

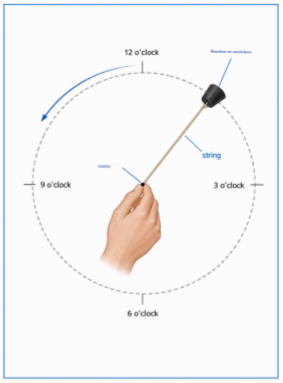


Figure 1-10-2 · Vue de dessus du montage de mouvement circulaire montrant un bouchon en caoutchouc se déplaçant dans un cercle horizontal au-dessus d'une grille au sol marquée.

Étapes :

1. Mets des lunettes de sécurité et vérifiez que l'espace autour de vous est entièrement dégagé. Si la grille au sol n'est pas déjà marquée, tracez à la craie un cercle avec son centre et les points 12, 3, 6 et 9 heures.
2. Passe l'extrémité libre de la ficelle autour d'un doigt et faites tourner doucement le bouchon en un cercle horizontal au-dessus de la grille. Sentez comment la ficelle tire sur votre doigt et notez la direction de la traction.
3. En gardant le cercle régulier et lent, choisissez un point de lâcher sur la grille (par exemple, le repère 3 heures). À l'instant où le bouchon passe ce point, ouvrez le doigt pour laisser partir la ficelle — en ne relâchant que vers un espace dégagé.
4. Observe la direction initiale du bouchon : tout droit vers l'extérieur le long de la ligne depuis le centre, ou le long de la tangente (à angle droit par rapport à la ficelle). Notez le point de lâcher et la direction du vol.
5. Ramene le bouchon au repos, puis répétez pour cinq points de lâcher différents autour du cercle, en gardant une vitesse à peu près identique à chaque fois.
6. Compare vos cinq essais et déterminez si la direction du vol suit un schéma cohérent

Point de lâcher sur la grille	Direction du vol (vers l'extérieur depuis le centre / le long de la tangente)

Note également : pendant que le bouchon tourne, dans quelle direction la ficelle tire-t-elle sur votre doigt ?

Analyse ce que tu as recueilli :

(a) Au cours de vos cinq lancers, quel est le schéma — le bouchon se déplace-t-il vers l'extérieur depuis le centre, ou le long de la tangente ?

(b) Pendant qu'il tournait, qu'a ressenti votre doigt — une poussée vers l'extérieur ou une traction vers l'intérieur — et quel objet tirait sur lequel ?

Écris, en deux lignes, pourquoi la ficelle doit tirer plus fort sur votre doigt lorsque le bouchon se déplace plus vite au même rayon — avant de lire la page suivante.

Consigne de sécurité

Fait tourner doucement dans un espace dégagé, loin des autres personnes, des fenêtres et des lampes. Utilisez un bouchon en caoutchouc — jamais un objet dur — et vérifiez que le nœud et la ficelle sont bien fixés avant chaque essai. Portez des lunettes de sécurité.

De l'observation au modèle

Dans Explorer, la ficelle tirait le bouchon régulièrement vers l'intérieur, vers le centre du cercle — jamais vers l'extérieur. Lorsque le bouchon était lâché, la tension disparaissait, et le bouchon se déplaçait en ligne droite, tangentiellement au cercle au point de relâchement. Vous auriez pu vous attendre à ce que le bouchon se déplace vers l'extérieur le long du rayon ; vos observations montrent le contraire. Voici le modèle que vos preuves soutiennent.

Mouvement circulaire

Lorsqu'un objet se déplace en cercle à vitesse constante, le mouvement est appelé mouvement circulaire uniforme.

La vitesse angulaire ω est le déplacement angulaire par unité de temps, en radians par seconde (rad/s). Si l'objet tourne d'un angle θ(rad) en un temps t (s),

$$\omega = \frac{\theta}{t}$$

La période T est le temps nécessaire pour une révolution, et la fréquence f est le nombre de révolutions par seconde (en Hz) :

$$T \quad \frac{2\pi}{\omega}, \quad f \quad \frac{1}{T}$$

Pour un cercle de rayon r, la longueur d'arc l parcourue lorsque l'objet tourne d'un angle θ est $l=r\theta$, donc la vitesse linéaire est

$$v = \frac{l}{t} = \frac{r\theta}{t} = r\omega$$

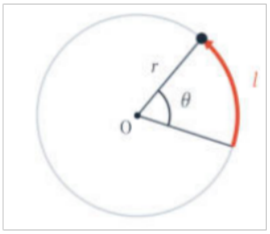


Figure 1-10-3 · L'angle en radians est la longueur d'arc divisée par le rayon.

Bien que la vitesse soit constante, la vitesse vectorielle change continuellement dedirection, donc l'objet accélère. Dans un court intervalle de temps Δt, le vecteur vitesse conserve sa norme v mais tourne du même petit angle $\Delta\theta = \omega \Delta t$, l'angle dont l'objetse déplace. La variation de vitesse qui en résulte a pour norme $\Delta v = v\Delta\theta$ et est dirigéevers le centre du cercle. En divisant par Δt on obtient l'a ccélération, dirigée vers lecentre — l'accélération centripète :

$$a_c \quad \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad v\omega \quad r\omega^2 \quad \frac{v^2}{r}$$

D'après la deuxième loi de Newton, cette accélération exige une force ré sultante dans la même direction — la force centripète :

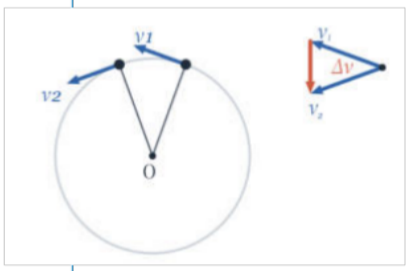


Figure 1-10-4 · La variation de vitesse pointe vers le centre.

Fait clé

La force centripète est la force résultante exercée sur l'objet, toujours dirig ée vers le centre du cercle. Ce n'est pas une force supplémentaire dirigée vers l'extérieur — il n'y a pas de « force centrifuge » s'exerçant sur l'objet lui-même. Supprimez la force dirigé e vers l'intérieur et l'objet continue en ligne droite le long de la tangente.

Point

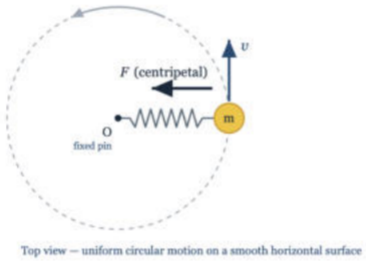
- Lorsqu'un objet se déplace en cercle à vitesse constante, ce mouvement est appelé mouvement circulaire uniforme. L'angle dont il tourne par unité de temps est appel é la vitesse angulaire: s'il tourne d'un angle θ[rad] en un temps t[s], alors $\omega=\frac{\theta}{t}$, en radians par seconde (rad/s).
- Période et fréquence Le temps T[s] pour un tour est appelé la période:$T=\frac{2\pi}{\omega}$la fréquence . Le nombre de tours par unité de temps est f [Hz] :$f=\frac{1}{T}$. Sur un cercle de rayon r[m] la distance parcourue est $l=r\theta$, donc la vitesse est $v = r\omega$
- La direction du mouvement change même lorsque la norme de la vitesse ne change pas, donc l'objet a une accélération $a = r\omega^2=\frac{v^2}{r}$, toujours dirigée vers le centre du cercle. La force résultante qui la produit est appelée force centripète, et l'équation du mouvement vers le centre est $F=m\frac{v^2}{r}$.

C'est l'équation F= ma écrite vers le centre.

Zone d'équation

Vitesse angulaire *(I)*	$\omega = \frac{v}{r}$
Accélération centripète *a*	$a = r\omega^2 = \frac{v^2}{r}$
Force centripète F	$F \quad \frac{mv^2}{r}$

Exemple résolu

Situation	Une balle de 0,50 kg est attachée à un ressort et se déplace en mouvement circulaire uniforme sur une surface horizontale lisse. Le ressort est étiré par rapport à sa longueur naturelle, et sa force é lastique fournit la force centripète nécessaire au mouvement circulaire.
Données et éléments requis	Données : masse m = 0,50 kg, longueur naturelle L_0= 0,15 m. Longueur finale L = 0,25 m, constante de raideur k = 20 N/m Requis : (a) la force élastique (de rappel) (b) la vitesse (c) l'accélération centripète
Représentation	Représentez les forces agissant sur la balle, puis trouvez la force radiale r ésultante dirigée vers le centre — cette résultante est la force centripète.  Top view — uniform circular motion on a smooth horizontal surface
Stratégie	1. Trouvez la norme de la force élastique à partir de F=kx, où x est l'allongement. 2. Utilisez l'équation de la force centripète $F\frac{mv^2}{r}$ pour trouver v, le rayon r é tant égal à la longueur étirée. 3. Utilisez $a\ \frac{v^2}{r}$ pour trouver l'accélération centripète.
Solution annotée	(a) Allongement du ressort et intensité de la force $x = L - L_0 = 0.25 - 0.15 = 0.10$ m $F = kx = 20 \times 0.10 = 2.0$ N $\boldsymbol{F = 2{,}0}$ **N** (b) Vitesse à partir de la force centripète (***r***= 0,25 m) $\frac{mv^2}{r} = F \Rightarrow \frac{0{,}50v^2}{0.25} = 2{,}0$ $v^2 = 1.0 \Rightarrow v = 1.0$ m/s $\boldsymbol{v}$ **=1,0 m/s** (c) Accélération centripète $a_c \quad \frac{v^2}{r} \quad \frac{1.0}{.25} \quad 4{,}0\ \text{ms}^{-2}$ a_c**= 4,0 m/s²**
Vérification de la cohérence	a_c= 4,0 m/s² est cohérent avec a=$\frac{F}{m}$ =($\frac{2.0}{0.5}$) et est d'environ 4,0 m/s² Ainsi, la force du ressort fournit exactement la force centripète requise.
Explique-le Toi-même	Pourquoi la force élastique exercée par le ressort est-elle la seule force qui contribue à la force résultante vers le centre dans cette situation ?

Application rapide

Une balle se déplace en cercle horizontal de rayon 0,20 m avec une période de 0,50 s. Calculez sa vitesse linéaire.

À vous maintenant : Un objet est en mouvement circulaire uniforme, effectuant 20 tours en 5,0 s dans un cercle de rayon 0,20 m. Déterminez les éléments suivants

(a) Période **(b)**Fréquence **(c)**Vitesse angulaire **(d)**Vitesse.

Essayer

(a) Un objet est en mouvement circulaire uniforme, effectuant 10 tours en 2,0 s sur un cercle de rayon 0,40 m. Déterminez sa période en s.

(b) Pour le même mouvement, déterminez sa vitesse angulaire en rad/s et sa vitesse en m/s.

(c) Une petite boule de masse 0,50 kg attachée à un fil de longueur 2,0 m effectue un mouvement circulaire uniforme sur une surface horizontale lisse avec une vitesse angulaire de 3,0 rad/s. Déterminez son accélération centripète.

(d) Une petite boule de masse $8,0 \times 10^{-2}$ kg est attachée à une extrémité d'un ressort de longueur naturelle de 0,13 m et de constante de raideur de 60 N/m, et est mise en mouvement circulaire uniforme sur une surface horizontale lisse autour de l'autre extrémité du ressort, ce qui donne une longueur de ressort de 0,15 m.

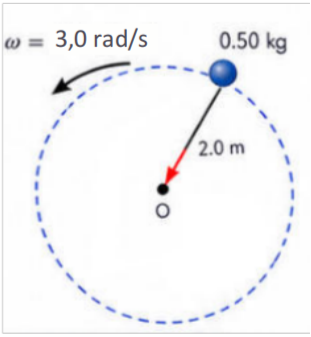


Figure 1-10-6 · Un corps de 0,50 kg à 2,0 m tournant à 3,0 rad/s.

Déterminez les valeurs suivantes à 2 chiffres significatifs.

(i) Déterminez l'intensité de la force élastique du ressort en N.

(ii) Déterminez la vitesse de la petite boule en m/s.

(iii) Déterminez la vitesse angulaire de la petite boule en rad/s.

Dans un nouveau contexte — l'essorage du lave-linge

Pendant l'essorage, les vêtements mouillés se déplacent avec le tambour en rotation selon une trajectoire circulaire. La force normale exercée par la surface intérieure du tambour fournit l'essentiel de la force résultante dirigée vers l'intérieur nécessaire à ce mouvement. Au niveau d'une perforation du tambour, il n'y a pas de paroi solide pour exercer la force de contact nécessaire dirigée vers l'intérieur sur l'eau. L'eau continue donc avec sa vitesse tangentielle instantanée. Comme le tambour s'éloigne en courbe de cette trajectoire rectiligne, l'eau passe à travers la perforation et est recueillie par la cuve extérieure.

L'eau quitte le tambour parce qu'elle n'est plus contrainte de suivre sa trajectoire circulaire.

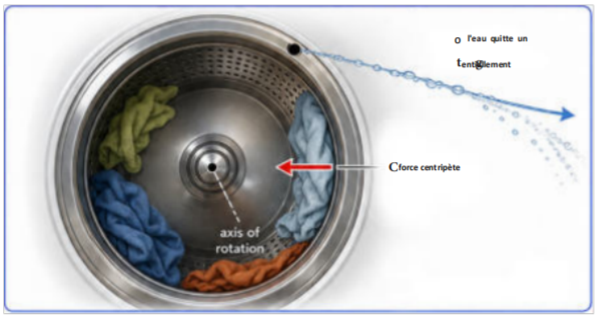


Figure 1-10-7 · L'eau quitte le tambour dès que la paroi cesse de la tirer vers l'intérieur.

Question de liaison

Pourquoi la force résultante dirigée vers l'intérieur n'effectue-t-elle aucun travail sur un corps se déplaçant à vitesse constante en cercle ?

À votre tour : Pourquoi l'eau passe-t-elle à travers les trous du tambour en rotation alors que les vêtements restent plaqués contre la surface intérieure ?

Nature de la science : Théories — une relation avant une cadre plus large

En 1659, Christiaan Huygens dériva une relation pour le mouvement circulaire uniforme. Exprimé en notation moderne, son résultat est équivalent en grandeur à $F=mv2/r$.

Huygens obtint cette relation géométriquement, avant que les lois de Newton ne fournissent un cadre plus large reliant la force résultante à l'accélération. La théorie de la gravitation universelle de Newton montra plus tard que la gravité fournit la force intérieure qui maintient les planètes en orbite.

À votre tour : Donnez une grandeur que la relation de Huygens pourrait calculer, et une question à laquelle elle ne pourrait pas répondre.

Figure 1-10-8 · La boule tourbillonnante revisitée.



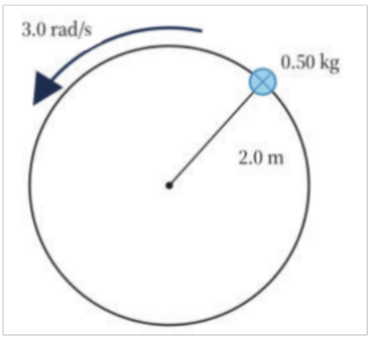
Question de cours, corrigée

Une balle est tournée en cercle au bout d'une corde. Si la corde est coupée, dans quelle direction la balle se déplace-t-elle ?

Elle se déplace le long de la tangente au cercle au point de lâcher — la direction dans laquelle elle se déplaçait déjà — et non vers l'extérieur, loin du centre. Pendant qu'elle se déplaçait en cercle, la tension vers l'intérieur de la corde fournissait la force centripète qui maintenait l'objet sur sa trajectoire circulaire. Dans un référentiel inertiel, aucune force vers l'extérieur (centrifuge) n'agit sur l'objet ; la traction vers l'extérieur ressentie par votre main est la force exercée par la corde sur votre main. Lorsque la corde est coupée, la tension vers l'intérieur disparaît, de sorte qu'aucune force vers l'intérieur ne subsiste pour maintenir le mouvement circulaire, et l'objet se déplace initialement le long de la tangente.

Exercice

Figure 1-10-9 · Un corps de 0,50 kg sur un rayon de 2,0 m.



(a) Une petite boule de masse 0,50 kg est attachée à une extrémité d'un fil de longueur 2,0 m et effectue un mouvement circulaire uniforme sur une surface horizontale lisse autour de l'autre extrémité du fil, et la vitesse angulaire est devenue 3,0 rad/s.

(i) Détermine la vitesse de la petite boule en m/s.

(ii) Détermine l'accélération de la petite boule en m/s

(iii) Détermine l'intensité de la force nécessaire pour maintenir le mouvement circulaire, en N.

(b) Comme le montre la figure 1-10-10, un objet de masse 3,0 kg se déplace sur un cercle de rayon 2,0 m à vitesse constante, effectuant 1 tour en 4,0 s. Supposons $\pi = 3{,}14$.

(i) Détermine la vitesse angulaire de l'objet en mouvement circulaire en rad/s.

(ii) Détermine la vitesse de l'objet en mouvement circulaire en m/s.

(iii) Détermine l'intensité de l'accélération en m/s ^{2}. De plus, au point P de la figure, dans quelle direction de A à D l'accélération est-elle orientée ? Répondez par la lettre.

(iv) Détermine l'intensité de la force centripète né cessaire à ce mouvement circulaire en N.

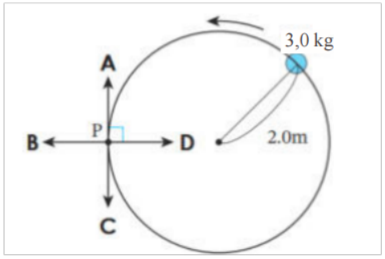


Figure 1-10-10 · Un corps de 3,0 kg en P : dans quelle direction la force agit-elle ?

(c) Une petite balle de masse 0,50 kg est attachée à une extrémité d'un ressort de longueur naturelle 0,10 m et de constante de raideur 30 N/m, et effectue un mouvement circulaire uniforme sur une surface horizontale lisse autour de l'autre extrémité du ressort. Si la vitesse angulaire résultante est de 6,0 rad/s, détermine l'allongement du ressort en m.

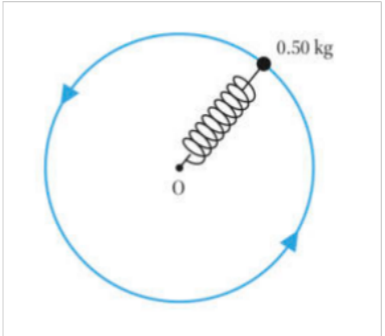


Figure 1-10-11 · Un corps de 0,50 kg maintenu par un ressort.

Fait clé

Avant de résoudre un problème de mouvement circulaire, identifiez d'abord la force agissant vers le centre du cercle.



Leçon 1-11 — Mouvement circulaire : horizontal et vertical

❓ **Question de la leçon**: Pourquoi l'eau peut-elle rester dans un seau au sommet d'un cercle vertical ?

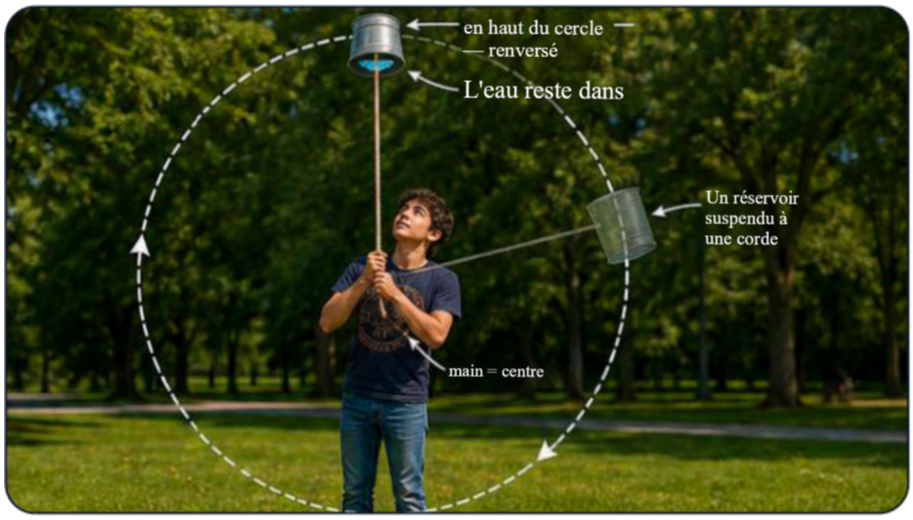
Tu vas apprendre à

À la fin de cette leçon, tu seras capable de :

1. **Identifier** les forces dans le mouvement circulaire horizontal et vertical.
2. **Analyser** le mouvement circulaire horizontal et vertical.
3. **Déterminer** la tension et la vitesse minimale dans le mouvement circulaire vertical.

Le phénomène — prédis avant de continuer

Figure 1-11-1 · L'eau reste dans le seau au sommet de la boucle.



Attache un petit seau contenant de l'eau à une corde et fais-le tourner rapidement dans un cercle vertical au-dessus de ta tête. Au point le plus haut du cercle, le seau est à l'envers, et pourtant l'eau reste dans le seau et ne se renverse pas. Réduis maintenant progressivement la vitesse du seau. En dessous d'une certaine vitesse, l'eau commence à se renverser près du sommet du cercle. Avant de poursuivre ta lecture, imagine le seau au point le plus haut de son mouvement et détermine ce qui maintient l'eau dans le seau.

Prédis avant de poursuivre

(a) Au point le plus haut, qu'est-ce qui retient l'eau dans le seau : la traction de la corde, la poussée du seau, la gravité ou rien du tout ?

(b) Existe-t-il une vitesse minimale au point le plus haut en dessous de laquelle l'eau se renverse ? Si oui, qu'est-ce qui détermine cette vitesse minimale ?

Explorer — Déplacer un seau d'eau en cercle vertical

Ce que tu feras : Vous découvrirez à quelle vitesse un seau d'eau doit être déplacé en cercle vertical pour que l'eau reste à l'intérieur, et à quel moment l'eau quitte d'abord le seau lorsque la vitesse est trop lente.

Durée : 30 min

Il te faudra :

- Un petit seau avec une anse, ou un gobelet en plastique attaché solidement avec de la ficelle solide.
- De l'eau, en quantité suffisante pour remplir partiellement le seau.
- Un téléphone ou un appareil photo avec un réglage de ralenti.
- Un espace extérieur dégagé et ouvert.

Étapes :

1. Remplis partiellement le seau d'eau. Tenez l'anse et déplacez le seau en cercle vertical à vitesse constante sur le côté, suffisamment vite pour que l'eau reste à l'intérieur pendant tout le cercle.
2. Demandez à un partenaire de filmer le mouvement circulaire au ralenti, avec tout le cercle visible à l'écran.
3. Réduis progressivement la vitesse, à chaque tour, jusqu'à ce que l'eau commence à quitter le seau.
4. À partir de la vidéo au ralenti, identifiez à quel endroit du cercle l'eau quitte le seau en premier — en bas, sur le côté ou près du haut.
5. Compare la vitesse du seau en haut dans l'essai où l'eau se renverse en premier avec sa vitesse au même endroit dans l'essai plus rapide qui garde l'eau à l'intérieur.



Figure 1-11-2 · Filmer le seau pour voir où l'eau reste à l'intérieur.

Vitesse de l'essai	L'eau s'est-elle renversée ? (oui / non)	Où l'eau a-t-elle d'abord quitté le seau
Rapide		
Moyenne		
Lente		

Analyse ce que tu as recueilli :

(a) Au premier déversement, à quel endroit du cercle l'eau commence-t-elle à sortir du seau — en bas, sur le côté ou près du haut ?

(b) Expliquez pourquoi le seau doit être déplacé assez vite pour que l'eau reste à l'intérieur en haut. Qu'est-ce qui fournit la force qui maintient l'eau en mouvement circulaire à cet endroit, et que se passe-t-il lorsque la rotation est trop lente ?

Écris, en deux lignes, ce qui doit être vrai au sujet de la vitesse en haut pour que l'eau reste à l'intérieur — avant de lire la page suivante.

Une note de sécurité

Réalise l'activité dans un espace extérieur dégagé, loin des autres personnes et des fenêtres. Utilisez seulement une petite quantité d'eau et vérifiez que la poignée ou la ficelle et son attache sont bien fixées avant chaque essai.

De l'observation au modèle

Dans la section Explore, l'eau est restée dans le seau pendant tout son mouvement en cercle vertical lorsque la vitesse du seau était suffisamment élevée. Lorsque la vitesse a été progressivement réduite, l'eau a d'abord commencé à quitter le seau près du sommet du cercle. Au premier abord, il pourrait sembler qu'une force vers le haut soit nécessaire pour garder l'eau dans le seau au sommet. La vidéo au ralenti montre le contraire : la force résultante nécessaire est dirigée vers le centre du cercle, c'est-à-dire verticalement vers le bas au sommet. Les données de l'expérience appuient le modèle du mouvement circulaire vertical, dans lequel la vitesse change tout au long du cercle.

Cercle vertical

Considérons un objet de masse m, attaché à une corde de longueur r, déplacé dans un cercle vertical. Sa vitesse change maintenant tout au long du cercle — maximale en bas, minimale en haut. La figure montre l'objet à trois positions et comment la tension est déterminée à chacune, où v est sa vitesse à cette position. La tension est minimale en haut et maximale en bas.

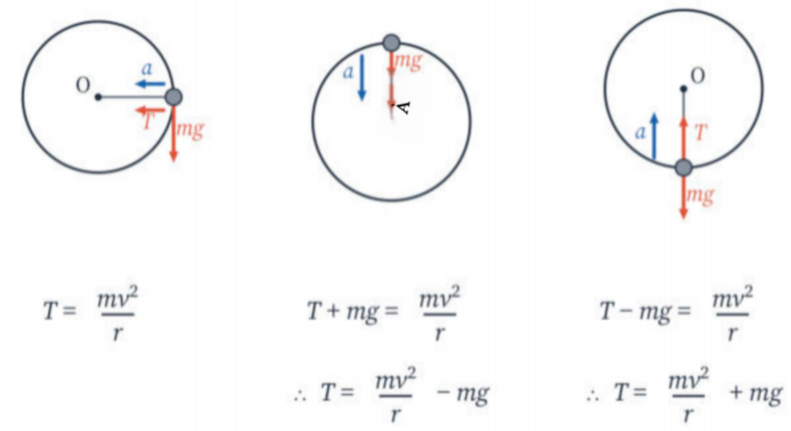


Figure 1-11-3 · Tension sur le côté, en haut et en bas de la boucle.

Vitesse minimale en haut

En haut du cercle, la tension et le poids agissent tous deux vers le centre, donc

$$\frac{mv^2}{r} = mg + T$$

Une corde ne peut que tirer, donc sa tension ne peut pas être négative ; le cas limite est lorsqu'elle tombe à zéro. En posant $T = 0$:

$$\frac{mv^2}{r} = mg$$

ce qui donne

$$v_{\min} = \sqrt{gr}$$

C'est la vitesse minimale nécessaire pour que l'objet maintienne tout juste un mouvement circulaire sans que la corde ne se détende au sommet du cercle.

Conseil pour l'examen

Assure-toi de bien comprendre les schémas et la méthode utilisée pour calculer la tension dans la corde lorsqu'un objet est déplacé dans un cercle vertical.

Un pendule conique

Considérons un objet de masse m attaché à une corde PQ de longueur l. P est fixé à un support, et l'objet se déplace dans un cercle horizontal de rayon r, comme illustré ci-dessous. Lorsque l'objet se déplace à vitesse constante, la corde forme un angle constant θ avec la verticale.

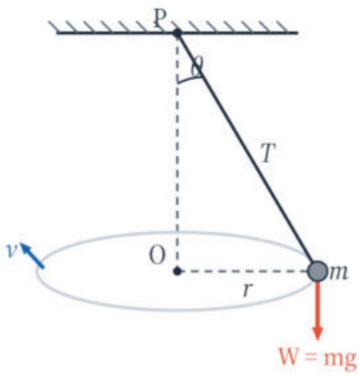


Figure 1-11-4 · Un pendule conique : la masse trace un cercle horizontal.

La figure 1-11-5 montre les forces agissant sur l'objet : son poids W = mg et la tension T, décomposée en une composante horizontale $T\sin\theta$ et une composante verticale $T\cos\theta$.

Puisque l'objet se déplace sur une trajectoire circulaire, une force centripète doit agir vers le centre du cercle, O. Celle-ci est fournie par la composante horizontale de la tension, T sin θ. En utilisant $F=ma_c$

$$(1) \quad T\sin\theta = \frac{mv^2}{r}$$

L'objet ne se déplace pas dans la direction verticale, donc les forces verticales sont équilibrées :

$$(2) \quad T\cos\theta = mg$$

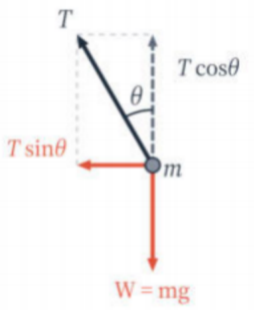


Figure 1-11-5 · La tension décomposée en composantes verticale et horizontale.

En divisant l'équation (1) par l'équation (2) :

$$\frac{T\sin\theta}{T\cos\theta} = \frac{\frac{mv^2}{r}}{mg}$$

$$\tan\theta = \frac{v^2}{rg}$$

Figure 1-11-6 · L'angle découle du rapport des deux composantes.

Point

- Pour une bille se déplaçant sur la surface interne lisse d'un récipient conique, la résultante de la force normale et du poids est dirigée vers le centre du cercle, et pour un cercle de rayon r dont la génératrice fait un angle θ avec l'horizontale (donc la normale fait θ avec la verticale), $v^2=gr\tan\theta$.
- Le mouvement dans un cercle vertical n'est pas un mouvement circulaire uniforme: la vitesse est maximale en bas du cercle et minimale en haut, et la tension suit cette évolution. Établissez l'équation du mouvement vers le centre à chaque instant.
- L'objet passe tout juste le point le plus haut lorsque la tension devient T= 0 et que le poids fournit à lui seul la force centripète. Cela donne $v^2_{min}=gr$.e)

Encadré d'équation

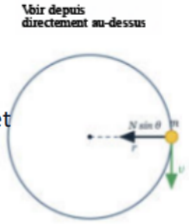
Tension minimale T(en haut)	$T = \frac{mv^2}{r} - mg$
Tension maximale T(en bas)	$T = \frac{mv^2}{r} + mg$

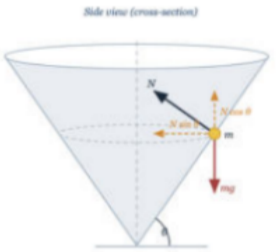
Minimum speed v_{min}(haut)	$v_{min} = \sqrt{gr}$

Exemple résolu

Situation	Une petite bille de masse m se déplace en mouvement circulaire uniforme sur la surface interne lisse d'un récipient conique. Elle parcourt un cercle horizontal de rayon r à la vitesse v, et la génératrice du cône fait un angle θ avec l'horizontale. Déterminez la vitesse et la période du mouvement.
Donné et requis	Données : masse m, rayon r, angle θ, accélération de la pesanteur g, surface lisse (sans frottement). À trouver : (a) la vitesse v, (b) la période T
Représentation	Seules deux forces agissent sur la bille : son poids mg (verticalement vers le bas) et la force normale N. Décomposez N en une composante verticale N cos θ et Une composante horizontale (radiale)N sin θ; La composante horizontale pointe vers Le centre et fournit la force centripète.
Stratégie	Décomposez les forces agissant sur l'objet en directions horizontale et verticale, établissez une équation d'équilibre pour la direction verticale et l'équation du mouvement pour un mouvement circulaire uniforme dans la direction horizontale.
Solution annotée	Équilibre vertical **(a) la vitesse v** $N\cos\theta - mg = 0 \Rightarrow N = \frac{mg}{\cos\theta}$ Direction radiale (deuxième loi de Newton) $\frac{mv^2}{r} = N\sin\theta$ Remplacez N : $\frac{mv^2}{r} = \frac{mg}{\cos\theta}\sin\theta = mg\tan\theta$ $\Rightarrow v^2 = gr\tan\theta$ $gr\tan\theta$ **(b) la période T** $T \quad \frac{2\pi r}{v} \quad \frac{2\pi r}{\sqrt{gr\tan\theta}} \Rightarrow T \quad 2\pi \frac{r}{g\tan\theta}$ $T \quad 2\pi \frac{r}{g\tan\theta}$
Vérification de la cohérence	La vitesse est indépendante de la masse, ce qui est logique puisque le poids et la force normale sont tous deux proportionnels à m, qui s'annule donc. Les dimensions concordent : $gr\tan\theta$ a pour unités √(m/s ² · m) = m/s (une vitesse), et la période s'exprime en s. Un rayon r plus grand augmente à la fois v et T, comme prévu pour un cercle plus large.
Expliquez-le toi- même	Pourquoi la balle reste-t-elle à la même hauteur même si la force normale agit avec un angle, et pourquoi seule la composante horizontale de la force normale contribue-t-elle au mouvement circulaire ?

Figure 1-11-7 : Un corps sur un cône al surface, vue de dessus et en coupe.

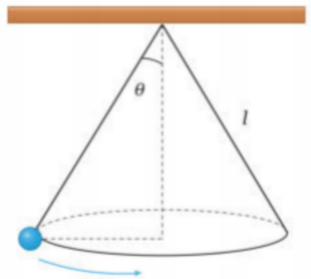




À toi d'essayer : Sur un rail lisse où une pente rencontre un demi-cercle vertical de rayon r au point le plus bas A, une petite bille de masse m est libérée sans vitesse initiale au point P de la pente, à une hauteur h au-dessus de A, et parcourt le circuit jusqu'au point le plus haut B. Soit g l'accélération due à la pesanteur. Déterminez la vitesse v de la bille lorsqu'elle passe au point le plus haut B, en fonction de g,h et r.

Figure 1-11-8 · Un pendule conique de longueur inclinée l.

Essayer



Une extrémité d'un fil de longueur l[m] est fixée au plafond, et une petite balle de masse m[kg] attachée à l'autre extrémité effectue un mouvement circulaire uniforme dans un plan horizontal. Soit l'angle entre le fil et la direction verticale θ, l'accélération due à la gravité 8 [m/s ^{2}], et le rapport de la circonférence d'un cercle à son diamètre π .

(i) Déterminez l'intensité de la tension dans le fil en N.

(ii) Déterminez la période du mouvement circulaire en s.

Dans un nouveau contexte — la boucle de montagnes russes

Une boucle de montagnes russes est un exemple de mouvement dans un plan vertical, comme l'eau dans le seau. Mais la vitesse du wagon est déterminée par la conservation de l'énergie, plutôt que d'être imposée par le passager. Une boucle circulaire a le même rayon partout. Au sommet, le wagon a besoin d'une vitesse minimale :$v^2=8r$. En bas, il se déplace beaucoup plus vite, donc la piste pousse sur les passagers avec une force normale N = mg + mv ^{2}/r, où v est la vitesse du wagon en bas — environ six fois leur poids. Les vraies boucles sont plutôt des courbes clothoïdes (en forme de larme). Le petit rayon au sommet réduit la vitesse nécessaire à cet endroit, et le grand rayon en bas réduit la force — ce qu'un rayon fixe unique ne peut pas faire.

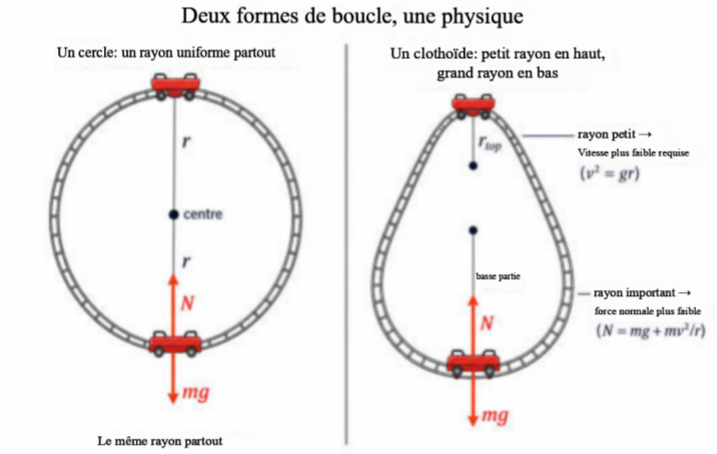


Figure 1-11-9 · Une boucle clothoïde nécessite une vitesse plus faible au sommet qu'un cercle.

➡ **Expliquez** pourquoi une voiture qui maintient tout juste le contact avec la piste au sommet d'une boucle circulaire produit une force normale importante sur les passagers en bas.

Nature de la science : Modèles — montagnes russes

Les premières montagnes russes à Coney Island ont été rapidement améliorées après des conceptions dangereuses. En 1895, le Flip-Flap Railway a introduit une petite boucle circulaire excitante mais inconfortable et dangereuse. En 1901, le Loop-the-Loop utilisait une boucle ovale plus douce pour réduire les forces sur les passagers. Plus tard, le Drop-the-Dip a ajouté des vitesses plus élevées et a introduit des barres de sécurité pour la protection des passagers.

À ton tour : Quelle hypothèse du modèle de boucle circulaire est supprimée dans une boucle à rayon variable ?

Question de cours, réponse

Pourquoi l'eau peut-elle rester dans un seau au sommet d'un cercle vertical ? Au sommet du cercle, le centre de la trajectoire circulaire se trouve en dessous de l'eau, donc l'accélération centripète — et par conséquent la force radiale résultante exercée sur l'eau — doit être dirig ée verticalement vers le bas, vers le centre. Le poids de l'eau agit vers le bas, et le seau exerce aussi une force normale vers le bas tant que le contact est maintenu. À la vitesse minimale nécessaire pour maintenir le contact, l'eau est sur le point de perdre le contact avec le seau, donc la force normale est nulle. Le poids de l'eau fournit alors à lui seul la force radiale résultante requise,giving $v_{\min} = \sqrt{gr}$

Si $v \geq \sqrt{gr}$, l'eau suit la trajectoire circulaire et reste dans le seau ; si $v < \sqrt{gr}$, elle perd le contact et tombe.

Fait clé

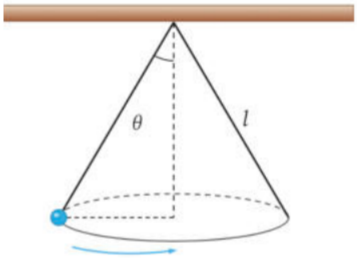
Dans le mouvement circulaire vertical, la vitesse du corps change continuellement lorsqu'il se déplace autour du cercle.

Exercice

Réponds aux questions suivantes.

(a) Une extrémité d'un fil de longueur l[m] est fixée au plafond, et une petite boule de masse m[kg] attachée à l'autre extrémité effectue un mouvement circulaire uniforme dans un plan horizontal. Soit l'angle entre le fil et la direction verticale θ, l'accélération due à la gravité beg [m/s ^{2}], et le rapport de la circonférence d'un cercle à son diamètre π .

Figure 1-11-10 · Le même pendule avec un angle plus grand.



(i) Détermine la valeur de la force centripète en N.

(ii) Détermine la vitesse de la petite balle v en fonction de l,g et θ.

(b) Une extrémité d'un fil de longueur l[m] est fixée au plafond, et une petite balle de masse m

[kg] attachée à l'autre extrémité effectue un mouvement circulaire uniforme sur un plan horizontal lisse tout en recevant une force normale de la surface. Soit l'angle entrele fil et la direction verticale θ, la vitesse angulaire ω[rad/s], et la norme de l'accélération gravitationnelle beg [m/s ^{2}].

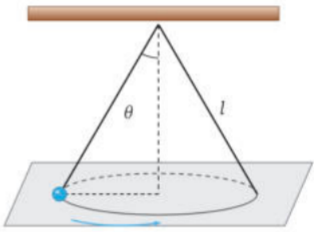


Figure 1-11-11 · Le pendule tourne juste au-dessus d'une surface horizontale.

(i) Détermine la norme de la tension dans le fil en N.

(ii) Détermine la norme de la force normale que la petite balle reçoit du plan horizontal en N.

(c) Comme le montre la figure 1-11-12, une petite balle de masse m effectue un mouvement circulaire uniforme à une hauteur h à l'intérieur d'un récipient conique à surface intérieure lisse. Soit l'angle entre l'axe du cône et la génératrice θ, la norme de l'accélération gravitationnelle g, et le rapport de la circonférence d'un cercle à son diamètre π .

(i) Détermine la norme de la force normale N que la petite balle reçoit de la surface conique en fonction de m,θ et g.

(ii) Détermine la vitesse de la petite balle v en fonction de h et g.

(iii) Détermine la période du mouvement circulaire T en utilisant h,θ et g.

Question type examen

Une petite balle de masse 0,50 kg est attachée à une corde et déplacée dans un cercle vertical de rayon 0,80 m. Au point le plus bas du cercle, sa vitesse est de 4,0 m/s. Dé terminez la tension dans la corde au point le plus bas.

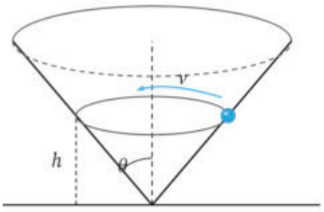


Figure 1-11-12 · Un corps tournant à l'intérieur d'un entonnoir.



Leçon 1-12 — Les lois de Kepler et la gravitation universelle

❓ **Question de la leçon**: Pourquoi un satellite paraît-il fixe au-dessus de la Terre et qu'est-ce qui détermine le temps qu'un satellite met pour effectuer une orbite ?

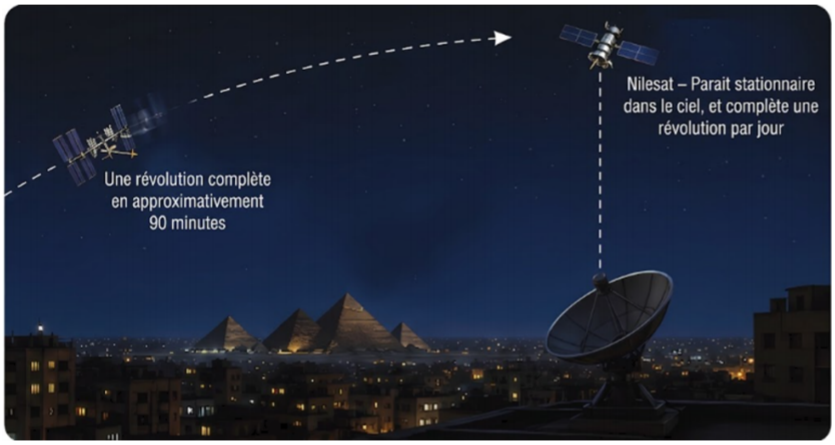
Tu apprendras à

À la fin de cette leçon, tu seras capable de :

1. **Décrire** et appliquer les lois de Kepler du mouvement planétaire.
2. **Expliquer** comment la période orbitale dépend du rayon orbital pour les planètes et les satellites.
3. **Déterminer** la force gravitationnelle et l'intensité du champ gravitationnel.

Le phénomène — prédis avant de continuer

Figure 1-12-1 · Un satellite en orbite basse fait un tour toutes les 90 min alors que NileSat paraît fixe.



Observe le ciel nocturne : Certains satellites paraissent fixes par rapport à la surface de la Terre, tandis que d'autres se déplacent rapidement dans le ciel. Les planètes suivent aussi des orbites régulières autour du Soleil, et leur mouvement est étudié depuis des siècles. Ces mouvements ne sont pas aléatoires. La gravité accélère continuellement chaque objet vers le corps autour duquel il orbite, tandis que sa vitesse tangentielle le porte vers l'avant. Par conséquent, l'objet demeure en chute libre continue, suivant une trajectoire orbitale courbe plutôt que de tomber directement vers le corps central.

Prédis avant de poursuivre

(a) Qu'est-ce qui détermine si un satellite semble fixe par rapport à la surface de la Terre ou se déplace rapidement dans le ciel ?

(b) Supposons que la vitesse instantanée d'un satellite ne change pas lorsque la force gravitationnelle change. Comment une force gravitationnelle plus forte ou plus faible affecterait-elle son orbite ?

Fait clé

Pour maintenir un corps en mouvement circulaire, une force nette dirigée vers l'intérieur doit pointer vers le centre.

Explorer — Enquête sur le mouvement orbital

Ce que vous ferez : Analyser les rayons orbitaux et les périodes des quatre plus grandes lunes de Jupiter pour identifier un modèle mathématique.

Temps :12 min

Vous aurez besoin de :

- Le tableau fourni du rayon orbital (r) et de la période orbitale (T).
- Une calculatrice.

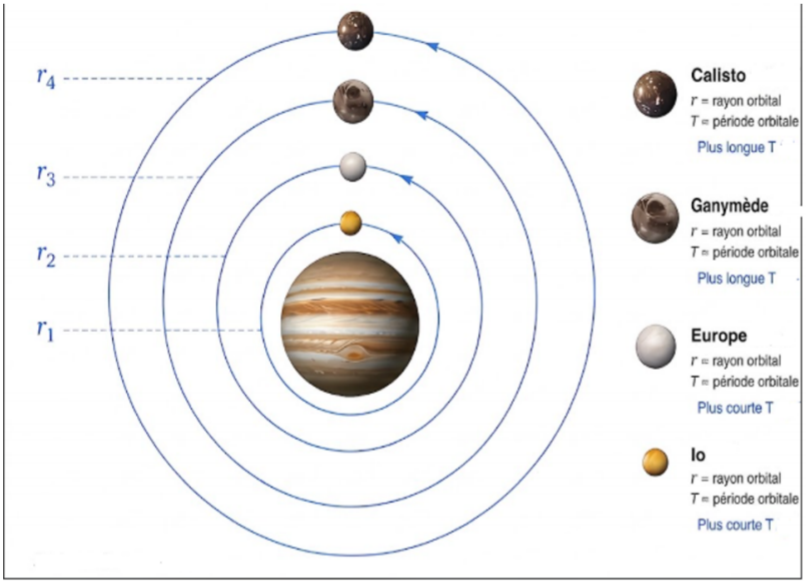


Figure 1-12-2 · Plus la lune est éloignée, plus sa période est longue.

Étapes :

1. Utilise les valeurs du rayon orbital,r, et de la période orbitale,T, données pour chaque lune.
2. Pour chaque lune, calculez T^2,r^3 et le rapport $\frac{T^2}{r^3}$
3. Enregistre la valeur calculée de $\frac{T^2}{r^3}$ dans la dernière colonne du tableau.
4. Compare les valeurs de $\frac{T^2}{r^3}$ pour les quatre lunes.

Lune	Rayon de l'orbite r ($\times 10^8$ m)	Période T(jours)	$\frac{T^2}{r^3}$ (jour ^{2}/m ^{3})
Io	4.22	1.77	
Europe	6.71	3.55	
Ganymède	10.7	7.15	
Callisto	18.8	16.7	

Analyse ce que tu as recueilli :

(a) Le rapport reste-t-il approximativement constant pour les quatre lunes, ou varie-t-il de manière significative ?

(b) Quelle propriété de la planète centrale détermine cette valeur constante, et quelles lois physiques l'expliquent ?

Écris ton explication en deux lignes avant de lire la page suivante.

De l'observation au modèle

Dans Explorer, vous avez calculé $\frac{T^2}{r^3}$ pour les quatre plus grandes lunes de Jupiter. Les valeurs similaires pour les quatre lunes révèlent un schéma commun. Ce rapport presque constant indique que les lunes orbitent autour de la même masse centrale et est cohérent avec une force gravitationnelle inversement proportionnelle au carré de la distance.

Loi de la gravitation universelle de Newton : Chaque particule attire toute autre particule le long de la ligne qui les joint ; cette attraction est la force gravitationnelle. Pour deux masses m_1 et m_2 séparées par une distance r, elle est proportionnelle au produit des masses et inversement proportionnelle au carré de la distance :

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$$

Ici G= 6,67 × 10 $^{-11}$ N·m ^{2}/kg ^{2} est la constante gravitationnelle universelle, la même pour tous les corps.

Construction du modèle

Une lune de masse m orbite autour de Jupiter (masse M) dans un cercle de rayon r à une vitesse v. La force gravitationnelle entre elles, GMm/r^2, fournit la force centripète qui maintient la lune sur son orbite circulaire : $\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$

La masse de la lune s'annule, laissant sa vitesse orbitale : $v^2 = \frac{GM}{r}$ (1)

En une période, la Lune parcourt une circonférence, donc $v = 2\pi r/T$. En substituant dans (1) et en réarrangeant :

$$\left(\frac{2\pi r}{T}\right)^2 = \frac{GM}{r} \Rightarrow \frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM} \quad (2)$$

Interprétation du résultat

L'équation (2) est le motif que vous avez mesuré. Son membre de droite ne contient aucune propriété de la Lune — seulement G et la masse centrale M. C'est pourquoi les quatre lunes partagent une même valeur : elles orbitent toutes autour de Jupiter, donc la constante est fixée par sa masse.

Les lois de Kepler

La relation $T^2 \propto r^3$ est la troisième des trois lois de Kepler, tirée des données planétaires bien avant que Newton ne les explique.

Première loi. Chaque planète se déplace sur une ellipse dont le Soleil occupe l'un des foyers. Le plus long diamètre est le grand axe ; sa moitié est le demi-grand axe a. Pour l'orbite de la Terre, a vaut une unité astronomique (1 UA = 1,50 × 10 ^{11} m) .

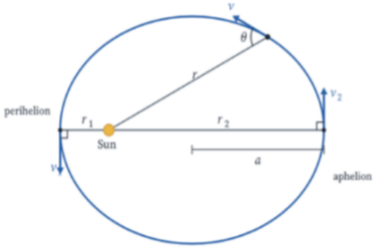


Figure 1-12-3 · Une orbite elliptique : le Soleil se trouve à l'un des foyers.

Deuxième loi. Le rayon vecteur allant du Soleil à une planète balaie des aires égales en des temps égaux, de sorte que la vitesse aréolaire reste constante. Avec θ l'angle entre le rayon vecteur r et le vecteur vitesse v,

$$\frac{1}{2}rv\sin\theta = \frac{1}{2}r_1v_1 = \frac{1}{2}r_2v_2 = \text{constante}$$

Au périhélie (le plus proche, r_1) et à l'aphélie (le plus éloigné, r_2), la vitesse est perpendiculaire au rayon vecteur, donc sin θ = 1 et $r_1v_1 = r_2v_2$: une planète se déplace plus vite lorsqu'elle est plus proche du Soleil. Troisième loi. Le carré de la période sur le cube du demi-grand axe est la même constante pour tout corps en orbite autour d'un centre donné :

$$\frac{T^2}{a^3} = k$$

Fait clé

Tous les objets en orbite autour du même corps central ont la même valeur de $\frac{T^2}{r^3}$. Cette valeur ne dépend que de la masse du corps central.

C'est la relation établie ci-dessus, avec k = $4\pi^2/GM$; pour une orbite circulaire, le demi-grand axe a est le rayon r. Comme k est partagé, deux corps quelconques en orbite autour du même centre obéissent à $T_1^2/a_1^3 = T_2^2/a_2^3$.

Point

Lois de Kepler

Première loi : Les planètes se déplacent selon des orbites elliptiques avec le Soleil à l'un des foyers. Le demi-grand axe de l'orbite terrestre est appelé **1 unité astronomique**.

Deuxième loi :L'aire balayée par unité de temps (vitesse aréolaire) par le rayon vecteur reliant le Soleil à une planète est constante : avec le rayon vecteur *r*, la vitesse *v* et l'angle θ entre eux, elle vaut ½*rv* sin θ.ΔABC = ½ *bcsinA* Au périhélie, elle vaut ½ r_1v_1 et à l'aphélie ½ r_2v_2, donc ½ *rv* sin θ=½ r_1v_1= ½ r_2v_2.sin 90° = 1 **Troisième loi :**Le rapport du carré de la période orbitale d'une planète *T* au cube du demi-grand axe *a* de son orbite elliptique est constant pour toutes les planètes :$\frac{T^2}{a^3}$ =*k*(*k* est constant).

La force d'attraction entre deux objets quelconques est la force gravitationnelle, et for masses m_1, m_2 séparées d'une distance *r* elle est $F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$, avec *G*[N·m ^{2}/kg ^{2}] la constante gravitationnelle universelle.

Encadré d'équation

Gravitation universelle	$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$
Vitesse orbitale	$v^2 = \frac{GM}{r}$
Troisième loi de Kepler	$\frac{T^2}{a^3} - k - \frac{4\pi^2}{GM}$
Vitesse aréolaire (deuxième loi)	$\frac{1}{2}r_1v_1 = \frac{1}{2}r_2v_2$

Champs gravitationnels

Un champ de force est une région dans laquelle un objet subit une force sans contact. Un champ gravitationnel peut être représenté par des vecteurs, qui indiquent la direction et l'intensité relative du champ en chaque point — la même direction que la force qui agirait sur une masse placée à cet endroit. Il peut aussi être représenté par des lignes de champ : leur direction indique la direction du champ, et plus elles sont rapprochées, plus le champ est intense dans cette région.

Un champ gravitationnel est un champ de force dans lequel tout objet ayant une masse subit une force.

Intensité du champ gravitationnel

L'intensité du champ gravitationnel g en un point est la force gravitationnelle par unité de masse agissant sur une petite masse d'essai placée en ce point :

$$g = \frac{F}{m}$$

C'est un vecteur, dirigé le long du champ, et il se mesure en newtons par kilogramme (N/kg, ou de manière équivalente m/s ^{2}). Pour une masse sphérique M, le champ est radial, et sa grandeur à une distance r du centre est

$$g = \frac{GM}{r^2}$$

donc elle obéit à une loi en carré inverse : si la distance à la masse double,g tombe à un

Point clé

Les lignes de champ gravitationnel pointent toujours vers la masse qui produit le champ, car la gravité est uniquement attractive. Là où les lignes sont plus rapprochées, le champ est plus fort.

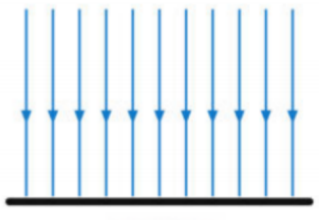


Figure 1-12-4 · Un champ uniforme : lignes parallèles, régulièrement espacées.

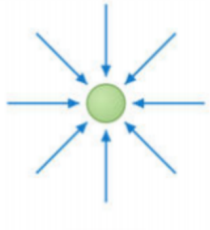


Figure 1-12-5 · Un champ radial : les lignes convergent vers la masse.

quart de sa valeur. Un champ de gravitation est généralement représenté de deux façons — comme un champ uniforme ou comme un champ radial :

Les flèches sur les lignes de champ indiquent la direction du champ, c'est-à-dire la direction de la force exercée sur une masse. Dans un champ uniforme, l'intensité du champ est la même en tout point, donc les lignes de champ sont parallèles et régulièrement espacées, et une masse donnée subit la même force où qu'elle soit placée. Dans un champ radial, l'intensité du champ dépend de la position : lorsque r augmente, les lignes de champ s'écartent et g diminue (selon $g = GM/r^2$), donc la force sur une masse donnée diminue aussi. Le champ gravitationnel de la Terre est radial ; cependant, sur une petite région proche de la surface, il est très proche d'un champ uniforme, c'est pourquoi $g \approx 9{,}8$ N/kg peut y être considéré comme constant.

Exemple traité

Situation	Trois problèmes indépendants sur la gravitation et le mouvement orbital. **(a)**Une comète se déplace sur une orbite elliptique dans laquelle sa distance au Soleil à l'aphélie est 5,0 fois sa distance au périhélie. **(b)**L'orbite d'un astéroïde autour du Soleil a un demi-grand axe de 4,0 unités astronomiques (UA). **(c)**Deux objets, chacun de masse 60 kg, sont placés à 3,0 m l'un de l'autre.
Donné et requis	Données : (a) distance à l'aphélie = 5,0 × distance au périhélie. (b) demi-grand axe de l'astéroïde a= 4,0 UA ; demi-grand axe de la Terre = 1,0 UA et période orbitale = 1,0 an. (c) $m_1 = m_2$= 60 kg, séparation r= 3,0 m · constante gravitationnelle G= 6,67 × 10^{-11} $N \cdot m^2/kg^2$ Requis : (a) le rapport entre la vitesse de la comète à l'aphélie et sa vitesse au périhélie. (b) la période orbitale T de l'astéroïde. (c) la grandeur de la force gravitationnelle F entre les deux objets.
Représentation	**(a)** La comète suit une orbite elliptique avec le Soleil à l'un des foyers. Au périhélie (distance r), la vitesse v_1 est maximale ; à l'aphélie (distance 5,0r), la vitesse v_2 est minimale. Aux deux points, la vitesse est perpendiculaire à la ligne joignant la comète au Soleil. **(c)** Chaque objet attire l'autre avec une force gravitationnelle égale et opposée de grandeur F.
Stratégie	**(a)** Appliquer la deuxième loi de Kepler (aires égales en temps égaux). Au périhélie et à l'aphélie, la vitesse est perpendiculaire au rayon, donc la quantité rv est la même aux deux points. **(b)** Appliquer la troisième loi de Kepler, $T^2 \propto a^3$. **(c)** Appliquer la loi de la gravitation universelle de Newton, $F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$.
solution détaillée	**(a)** Rapport des vitesses Soit r la distance au périhélie et soit v_1 et v_2 les vitesses au périhélie et à l'aphélie ; la distance à l'aphélie est 5,0r. La deuxième loi de Kepler donne : $\frac{1}{2} v_1 = \frac{1}{2}(5.0)\, v_2 \qquad v_2 = \frac{1}{5.0} = 0.20\, v_1 \qquad \frac{v_2}{v_1} = 0.20$ **(b)** Période orbitale de l'astéroïde D'après la troisième loi de Kepler, T^2/a^3 a la même valeur pour l'astéroïde et pour la Terre : $\frac{T^2}{(4.0)^3} = \frac{(1.0)^2}{(1.0)^3}$ $T^2 = (4.0)^3 = 64 \rightarrow T = 8.0 \qquad T = 8{,}0$ ans (c) Force gravitationnelle $F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$ $F \quad \frac{(6.67 \quad 10^{-11})(60)(60)}{(\ .0)^2} = 2.67 \times 10^{-8} \approx 2.7 \times 10^{-8}$ N $F \approx 2{,}7 \times 10^{-8}$ N

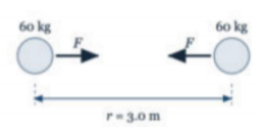
Application rapide

La masse de la Lune est 7,3 × 10^{22} kg et son rayon est de 1,7 × 10^6 m. Calcule l'intensité du champ g à sa surface en utilisant $g = GM/r^2$.

Question rapide :

Pourquoi n'est-il pas facile de se déstabiliser lors de la pleine conscience en marchant à grande vitesse ?

Figure 1-12-6 · Deux sphères de 60 kg distantes de 3,0 m s'attirent mutuellement de façon égale.



(c) Attraction gravitationnelle mutuelle

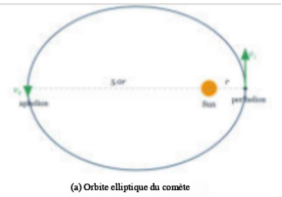

(a) Orbite elliptique du comète

Figure 1-12-7 · Une comète se déplace le plus rapidement au périhélie et le plus lentement à l'aphélie.

Contrôle de la cohérence	La comète se déplace plus vite au périhélie et plus lentement à l'aphélie, comme l'exige la deuxième loi de Kepler : le rapport des vitesses $\frac{v_2}{v_1}$ = 0,20 est l'inverse du rapport des distances. Une orbite plus grande correspond à une période plus longue : les 8,0 années de l'astéroïde dépassent l'année terrestre de 1,0 an, comme l'exige la troisième loi de Kepler $T^2 \propto a^3$. La force gravitationnelle entre deux objets de masse ordinaire est extrêmement faible, de l'ordre de 10_$8\ N$.
Expliquez-le toi -même	Expliquez, à l'aide de la deuxième loi de Kepler, pourquoi la comète se déplace le plus vite au périhélie et le plus lentement à l'aphélie.

À vous maintenant : Calcule la masse du Soleil, sachant que la période de ré volution de la Terre autour du Soleil est de 3,156 × 10^7 s et que le demi-grand axe de l'orbite terrestre est de 1,496 × 10^{11} m.

Essayer

(a) Lorsque la distance d'une comète au Soleil à l'aphélie est de 2,5 unités astronomiques, et que la distance au Soleil au périhélie est de 1,5 unité astronomique, détermine le rapport entre sa vitesse à l'aphélie et sa vitesse au périhélie.

(b) Le demi-grand axe de l'orbite d'un certain astéroïde est de 16 unités astronomiques. En utilisant le fait que l'orbite de la Terre a un demi-grand axe de 1,0 unité astronomique et une période orbitale de 1,0 an, détermine la période orbitale de cet astéroïde.

(c) Deux objets, chacun d'une masse de 60 kg, sont distants de 2,0 m. Détermine l'intensité de la force gravitationnelle qui s'exerce entre ces deux objets. Soit la constante gravitationnelle égale à 6,67 × 10^{-11} $N{\cdot}m^2/kg^2$.

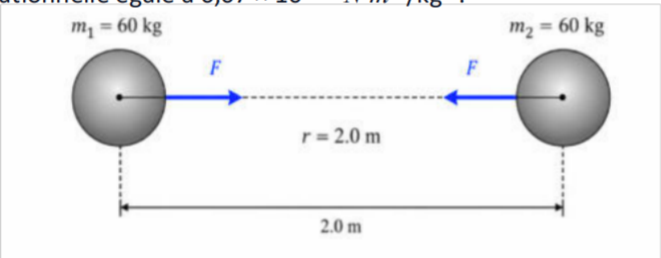


Figure 1-12-8 · Deux sphères de 60 kg distantes de 2,0 m.

Fait clé

La deuxième loi de Kepler stipule que des aires égales sont balayées en des temps égaux. Au périhélie et à l'aphélie, la vitesse de la comète est perpendiculaire à la ligne reliant la comète au Soleil.

Dans un nouveau contexte — l'orbite géostationnaire

Un satellite de communication est plus utile lorsqu'il reste au-dessus du même point de l'équateur, afin qu'une parabole au sol puisse pointer dans une direction fixe dans le ciel. Pour cela, le satellite doit orbiter autour de la Terre en un temps égal à celui que met la Terre pour tourner une fois sur elle-même, T = 8,62 × 10^4 s (environ un jour) .

Pour un satellite de masse m en orbite circulaire autour de la Terre de masse M, la force gravitationnelle fournit la force centripète : $\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$, donc $v^2 = \frac{GM}{r}$. En substituant $v = \frac{2\pi r}{T}$, on retrouve la relation déjà établie : $\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM}$. En réarrangeant pour le rayon : $r = \sqrt[3]{\frac{GMT^2}{4\pi^2}} \approx 4,2 \times 10^7$ m, ce qui correspond à environ $3,6 \times 10^7$ mau-dessus de la surface terrestre. À ce rayon, la vitesse orbitale est : $v = \frac{2\pi r}{T} \approx 3,1 \times 10^3$ m/s. Seul ce rayon permet au satellite d'orbiter à la même vitesse angulaire que la Terre, de sorte qu'il reste au-dessus du même point.

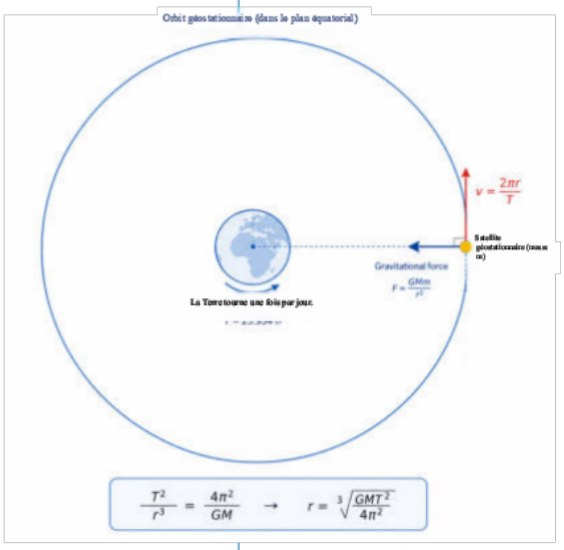


Figure 1-12-9 · Le rayon géostationnaire découle d'un jour sidéral.

Explique pourquoi une fusée lancée vers l'est depuis près de l'équateur nécessite moins de vitesse supplémentaire pour atteindre une orbite vers l'est qu'une fusée lancée vers l'ouest depuis un site à haute latitude.

Nature de la science : Modèles et tendances — les lois qui attendirent soixante-dix ans

Kepler n'a pas dérivé ses lois d'une théorie de la force. Il les a inférées à partir des régularités dans les observations précises à l'œil nu de Tycho Brahe sur le mouvement planétaire. Les deux premières lois furent publiées dans Astronomia Nova en 1609, et la troisième dans Harmonices Mundi en 1619. Pendant près de soixante-dix ans, ces lois restèrent des descriptions empiriques fiables sans explication dynamique généralement acceptée. Dans les Principia (1687), Newton montra comment elles pouvaient être expliquées à l'aide de ses lois du mouvement et de la gravitation universelle. La deuxième loi de Kepler découle de la direction centrale de la force gravitationnelle, tandis que la première et la troisième dépendent de sa variation en carré inverse avec la distance.

À votre tour : Énoncez une prédiction que la troisième loi de Kepler a permis aux astronomes de faire sur le mouvement d'une planète nouvellement découverte avant que Newton ne fournisse une explication gravitationnelle de cette relation.

Question de la leçon, réponse

Pourquoi un satellite semble-t-il fixe au-dessus de la Terre, et qu'est-ce qui détermine le temps nécessaire pour accomplir une orbite ?

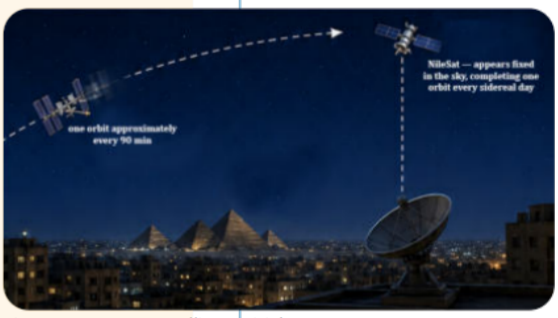


Figure 1-12-10 · Les satellites revisités.

La force gravitationnelle de la Terre fournit la force centripète qui maintient un satellite en orbite. La période orbitale dépend du demi-grand axe et de la masse de la Terre. Selon la troisième loi de Kepler :

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM}a^3$$

où T est la période orbitale et a est le demi-grand axe (égal au rayon orbital r pour une orbite circulaire).

Un satellite géostationnaire se déplace sur une orbite circulaire au-dessus de l'équateur terrestre, dans le même sens que la rotation de la Terre, et sa période orbitale est égale à la période de rotation de la Terre. Par conséquent, il reste au-dessus du même emplacement et paraît immobile dans le ciel. Un satellite sur une orbite plus basse, comme la Station spatiale internationale, a un rayon orbital plus petit et donc, d'après $T^2 \propto r^3$, une période plus courte.

Exercice

Détermine ce qui suit :

(a) Lorsque la distance d'une comète au Soleil à l'aphélie est égale à 4,0 fois sa distance au Soleil au périhélie, déterminez le rapport de sa vitesse à l'aphélie sur sa vitesse au périhélie.

(b) Le demi-grand axe de l'orbite d'un certain astéroïde est de 9,0 unités astronomiques. En utilisant le fait que l'orbite de la Terre a un demi-grand axe de 1,0 unité astronomique et une période orbitale de 1,0 an, déterminez la période orbitale de cet astéroïde.

(c) Deux objets, chacun d'une masse de 40 kg, sont distants de 3,0 m. Détermine la valeur de la force gravitationnelle qui s'exerce entre ces deux objets. Prends la constante gravitationnelle égale à $6{,}67 \times 10^{-11}$ N·m^2/kg^2.

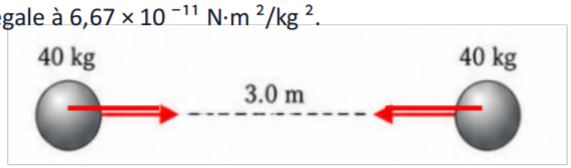


Figure 1-12-11 · Deux sphères de 40 kg distantes de 3,0 m.

(d) Deux objets, chacun d'une masse de 50 kg, sont distants de 1,0 m. Détermine la valeur de la force gravitationnelle qui s'exerce entre ces deux objets. Prends la constante gravitationnelle égale à $6{,}67 \times 10^{-11}$ N·m^2/kg^2.

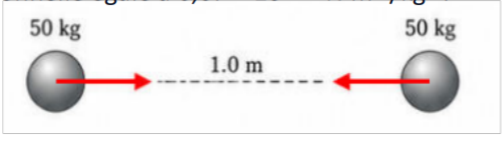
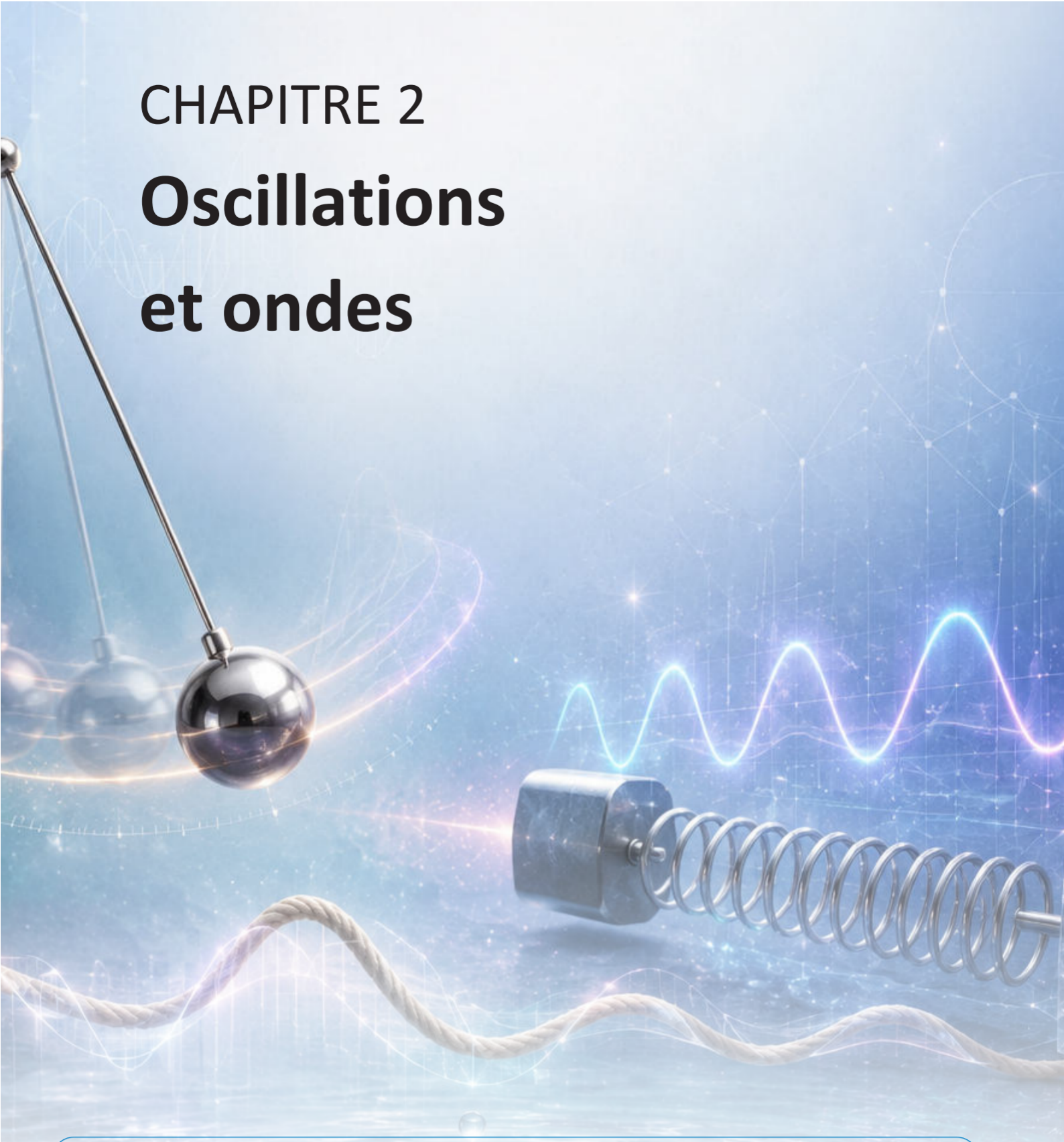


Figure 1-12-12 · Deux sphères de 50 kg distantes de 1,0 m.

CHAPITRE 2

Oscillations et ondes

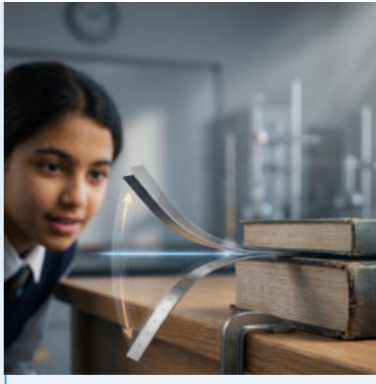


Questions directrices

Qu'est-ce qui rend un mouvement répétitif ? Et qu'est-ce qui en détermine la fréquence ?

Comment une onde transporte-t-elle de l'énergie sans transporter de matière ?

Comment les mêmes concepts ondulaires expliquent-ils à la fois le son et la lumière ?



Leçon 2-1 — Mouvement harmonique simple

❓ **Question de la leçon :** Une règle vibre lorsque son extrémité libre est écartée puis relâchée au bord d'un bureau. Qu'est-ce qui détermine la fréquence de cette vibration ?

Tu vas apprendre à

À la fin de cette leçon, tu seras capable de :

1. **Identifier** le mouvement harmonique simple à partir de sa condition déterminante — une force de rappel proportionnelle au déplacement et dirigée vers la position d'équilibre.
2. **Déterminer** la période d'un mouvement harmonique simple, en utilisant $T = \frac{1}{f} = 2\frac{\pi}{\omega}$ and $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

Le phénomène — prédis avant de poursuivre

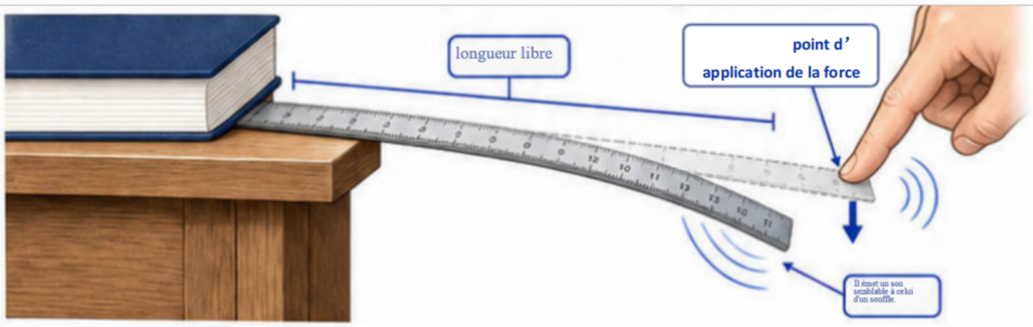


Figure 2-1-1 · Une règle serrée sous des livres bourdonne lorsque son extrémité libre est relâchée.

Serre une règle en acier à plat sous un livre de sorte que la majeure partie dépasse du bord du bureau. Appuyez sur l'extrémité libre vers le bas et relâche-la : elle vibre de haut en bas et produit une note régulière. Fait glisser la règle pour que **moins** dépasse, appuie à nouveau, et la hauteur du son monte. La règle est faite du même matériau sur toute sa longueur — seule la longueur libre a changé.

Prédis avant de poursuivre :

(a) Pendant la vibration, l'extrémité de la règle se déplace-t-elle le plus rapidement lorsqu'elle passe par la position d'équilibre ou aux points de rebroussement ?

(b) À un point de rebroussement, l'extrémité est momentanément au repos. La force de rappel est-elle nulle à ce point ? Explique.

Fait essentiel

Une force de rappel est une force qui agit en direction de la position d'équilibre. Dans de nombreux systèmes, pour de petits déplacements, la force de rappel est proportionnelle au déplacement : $F = -kx$ où k est la constante de raideur et le signe négatif indique que la force agit en sens opposé au déplacement.

Explorer — Fait vibrer la règle et mesure sa période

Ce que tu feras : Fais vibrer une règle fixée, utilise une vidéo au ralenti pour mesurer sa période et observe comment la modification de la longueur libre affecte la période.

Durée :12 min

Il te faudra :• Une règle en acier ou une lame de scie à métaux.

• Une grande gomme fixée à son extrémité avec du ruban adhésif. • Un livre lourd ou une pince.

• Un téléphone avec vidéo au ralenti. • Un bureau avec un bord dégagé.

Étapes :

1. Fixe la gomme à l'extrémité libre de la règle avec du ruban adhésif. Fixez la règle sous un livre lourd de sorte qu'environ 20 cm dépassent du bord du bureau.
2. Écarte légèrement l'extrémité libre vers le bas puis relâchez-la. Enregistrez le mouvement à l'aide d'une vidéo au ralenti.
3. Utilise le minuteur vidéo pour mesurer le temps de dix oscillations complètes. Une oscillation complète est un mouvement d'une position extrême jusqu'au retour à cette même position extrême.
4. Raccourcisse la longueur libre à environ 12 cm tout en gardant la même gomme attachée, puis répétez la mesure.
5. Compare le temps mis pour dix oscillations complètes dans les deux cas.

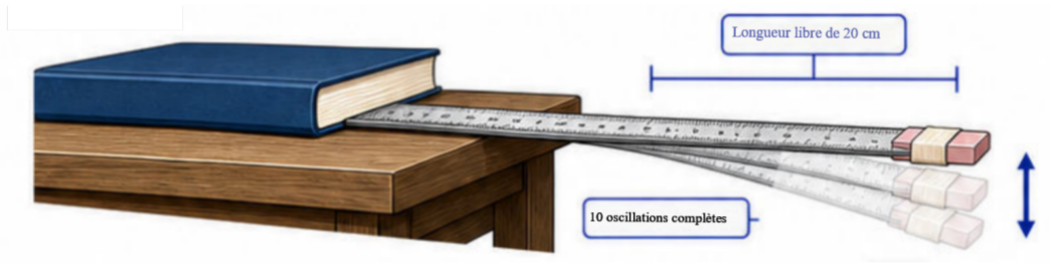


Figure 2-1-3 · Chronométrage de dix oscillations complètes d'une longueur libre de 20 cm.

Longueur libre de la règle (cm)	Temps pour 10 oscillations complètes (s)	Position de la vitesse maximale (milieu / points de retournement)

Analyse ce que tu as recueilli

(a) Dans la vidéo au ralenti, où l'extrémité de la règle se déplaçait-elle le plus rapidement : à la **position d'équilibre** ou aux **points de retournement**? Quelle était sa vitesse à l'instant où elle changeait de direction ?

(b) Quelle longueur libre avait la période la plus courte ? Qu'est-ce que cela suggère sur la relation entre la constante du ressort, la masse et la période ?

Rédige ton explication en deux lignes au maximum avant de lire la page suivante.



Figure 2-1-2 · Un enregistrement au ralenti donne la période avec plus de précision.

Une remarque sur la mesure

Chronométrez dix oscillations, pas une seule, et lisez le temps sur le minuteur du clip au ralenti : une oscillation unique est trop rapide pour l'œil, et dix ensemble réduisent l'incertitude relative — la même raison pour laquelle les tableaux de données expérimentales contiennent généralement plusieurs mesures.

De l'observation au modèle

Dans votre clip, l'extrémité libre atteignait sa vitesse maximale en passant par la position d'équilibre et était instantanément au repos à chaque point de rebroussement. Et la longueur plus courte a terminé ses dix oscillations plus tôt. Voici le modèle que vos preuves soutiennent.

Une force qui agit toujours vers l'équilibre

Un corps effectue un mouvement harmonique simple lorsque son accélération est directement proportionnelle à son déplacement par rapport à la position d'équilibre et dirigée vers la position d'équilibre :$a = -\omega^2 x$

De manière équivalente, si la force de rappel est proportionnelle au déplacement et dirigée vers la position d'équilibre, alors :$F = -kx$

où x est le déplacement par rapport à l'équilibre et k est la constante de raideur. La position d'équilibre est le centre de l'oscillation. L'amplitude A est le déplacement maximal par rapport à l'équilibre. La période T est le temps nécessaire pour une oscillation complète.

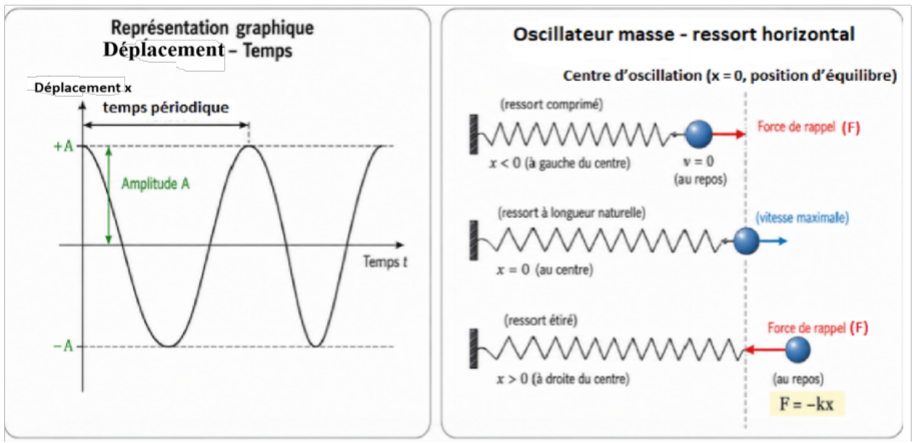


Figure 2-1-4 · Déplacement en fonction du temps, et la force de rappel à chaque position.

Fréquence angulaire

La fréquence angulaire (ω) décrit la rapidité avec laquelle l'oscillation se répète. Elle est liée à la période par $\omega = \frac{2\pi}{T}$ donc : $T\frac{2\pi}{\omega}$

L'unité SI de la fréquence angulaire est le rad/s, souvent écrit comme 1/s car le radian est sans dimension.

Fréquence angulaire

La vitesse à laquelle le point de référence se déplace autour de son cercle, $\omega = \frac{2\pi}{T}$; elle est mesurée en rad/s et indique la rapidité avec laquelle l'oscillation se répète.

Point

- Une vibration dont l'accélération est proportionnelle au déplacement par rapport à la position d'équilibre et dirigée vers celle-ci est appelée **mouvement harmonique simple**. Le déplacement maximal par rapport à la position d'équilibre est appelé **amplitude** A. Le temps T nécessaire pour accomplir une oscillation complète est appelé la **période**.
- Le taux auquel le point de référence se déplace autour de son cercle est appelé la fréquence angulaire : $\omega = \frac{2\pi}{T}$, donc $T = \frac{2\pi}{\omega}$.
- L'accélération est donnée par : $a = -\omega^2 x$, elle est proportionnelle au déplacement et dirigée vers la position d'équilibre.

Encadré d'équation

Définir l'accélération	$a = -\omega^2 x$
Période à partir de la fréquence angulaire	$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}$

De la condition déterminante à la période

La condition définie $a = -\omega^2 x$ permet également de déterminer le temps périodique. Appliquons la deuxième loi de Newton à une masse m soumise à une force de rappel $F = -kx$ (où k est la force pour l'unité d'élongation). $ma = -kx$, ce qui donne : $-m\omega^2 x = -kx$, $donc\ \omega^2 = \frac{k}{m}$, substitue cela dans $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$

Encadré d'équation

Période de l'oscillateur masse-ressort	$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

Au cours de chaque cycle, le mouvement échange également de l'énergie : elle est entièrement stockée sous forme d'énergie potentielle élastique aux points extrêmes, et entièrement sous forme d'énergie cinétique au centre. Nous traitons cet échange **qualitativement** ici — les quantités viendront plus tard.

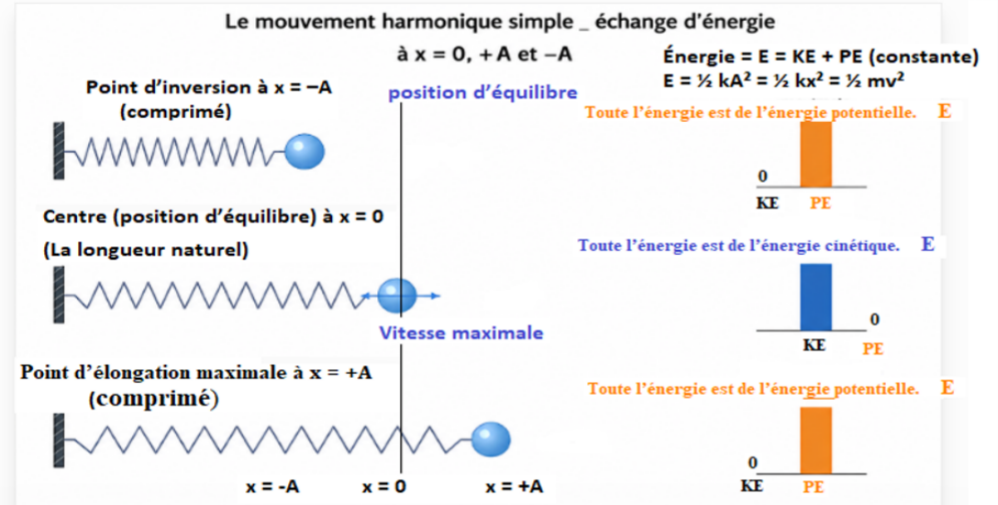


Figure (2.1.5) : L' énergie se transforme entre l' énergie cinétique et l' énergie potentielle, tandis que leur somme reste constante

Application rapide : Un objet de masse 0,30 kg oscille sous une force de rappel F=−30x, où x est le déplacement en mètres.**Détermine** la période. (Prenez π = 3,14)

Mets-le à l'épreuve :sur un schéma déplacement-temps, marquez où la vitesse est nulle et où l'accélération est nulle, et **montre** qu'elles ne coïncident jamais.

Lis la période directement à partir du mouvement

Il y a deux façons de déterminer la période. La première, vous l'avez déjà utilisée : nommez la force de rappel sous la forme F = − kx, puis $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}\ T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$. La seconde méthode est plus directe. Parfois, le mouvement est déjà donné sous forme écrite comme un déplacement qui oscille comme une onde sinusoïdale autour de la position d'équilibre — en d'autres termes, la position est l'amplitude multipliée par le sinus de (la fréquence angulaire multipliée par le temps). En symboles, pour un corps passant par le centre à t = 0 avec une vitesse maximale,

$$x = A\sin\omega t.$$

Interprétez l'équation. Le coefficient de la fonction sinus est l'amplitude A — le déplacement maximal par rapport au centre. Le coefficient de t à l'intérieur de la fonction sinus est la fréquence angulaire ω. Une fois que vous pouvez identifier ω, la période découle directement de $T\frac{2\pi}{\omega}$ — ni masse ni constante de ressort nécessaires, car oméga encode déjà leur rapport, ω^2= k/m.

Livret de données

$a = -\omega^2 x$, $T = \frac{2\pi}{\omega}$ et $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ sont toutes imprimées ; lis k à partir du $F = -kx$ donné.

Exemple travaillé

Un petit bloc de masse 0,20 kg glisse sur une piste horizontale lisse. Une force de rappel le tire vers la position d'équilibre, $F = -kx$, avec k =80 N/m et x le déplacement en mètres. Prendre π = 3,14. **Déterminer** la période de son oscillation.

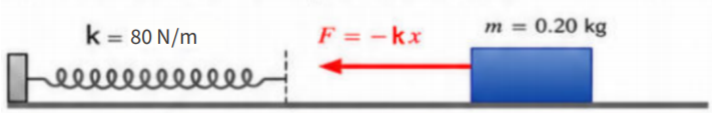


Figure 2-1-6 · Une masse de 0,20 kg sur un ressort de constante de raideur 80 N/m.

Situation	Le bloc de masse m =0,20 kg subit une force de rappel $F = -kx$ avec k= 80 N/m. Trouve la période T du mouvement harmonique simple.
Données et requis	$k = 80\ \text{N m}^{-1}$, $m = 0{,}20\ \text{kg}$ T =? $\pi = 3{,}14$
Représentation	La force est proportionnelle au déplacement et pointe vers la position d'équilibre, donc le mouvement est harmonique simple.
Stratégie	Écrivez la force de rappel au déplacement x sous la forme: $F = -kx$. Si cette relation s'applique, le mouvement est harmonique simple : $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ et $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ Ou lorsque l'équation du déplacement est directement donnée, lisez directement la valeur de ω, puis calculez $T = \frac{2\pi}{\omega}$
Solution annotée	**1. Déterminez la constante de force :** $k = 80\ \text{N m}^{-1}$ **2. Trouvez la fréquence angulaire :** $\omega = \sqrt{\frac{80}{0{,}20}} = \sqrt{400} = 20\ \text{rad s}^{-1}$ **3. Calculez le temps périodique :** $T = \frac{2\pi}{20} = \frac{2\times3{,}14}{20}$ $\boxed{T = 0{,}31\ \text{s}}$
Vérification de la cohérence	La période porte l'unité de temps (s), comme il se doit ; ω= 20 rad/s est une oscillation rapide, et T = 0,31 s correspond à une fréquence f = 1/t = 3,2 Hz — un rythme crédible pour un oscillateur rigide de faible masse.
Explique-le toi-même	Pourquoi un ressort plus rigide (un k plus grand), la masse restant inchangée, donne-t-il une période plus courte ?

À vous d'essayer : un bloc de masse 0,80 kg sur une piste lisse subit une force de rappel $F = -kx$ avec k =20 N/m (π = 3,14) . **Détermine** la période de son oscillation.

Essayer

Déterminez les valeurs suivantes avec deux chiffres significatifs, en prenant π = 3,14.

(a) Le déplacement x (m) d'un mouvement harmonique simple au temps t (s) est x =0,50 sin(8,0π t). Déterminez son amplitude A(m) et sa période T(s) .

(b) Un objet de masse 0,50 kg effectue un mouvement harmonique simple sous une force de rappel $F(N)$ donnée par F= −2,0x, où x(m) est le déplacement. Déterminez la période de ce mouvement en s.

Livret de données

Chaque élément correspond à **une seule substitution directe** : soit un déplacement écrit sous forme d'une fonction sinusoïdale, soit une force de rappel :

$$F = -kx$$
$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$
$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

Décidez d'abord **quelle formule est fournie dans la question** avant de substituer par les chiffres.

Dans un nouveau contexte — la suspension sous une voiture de métro

Chaque voiture de métro est soutenue par des ressorts de suspension. Lorsque la caisse se dé place vers le bas par rapport à l'ensemble des roues, elle comprime les ressorts. Les ressorts exercent une force de rappel vers le haut en direction de la position d'équilibre. Pour de petits dé placements verticaux, ce mouvement peut être approximé comme un mouvement harmonique simple.

La période dépend de la masse de la voiture et de la constante de rappel effective de la suspension :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

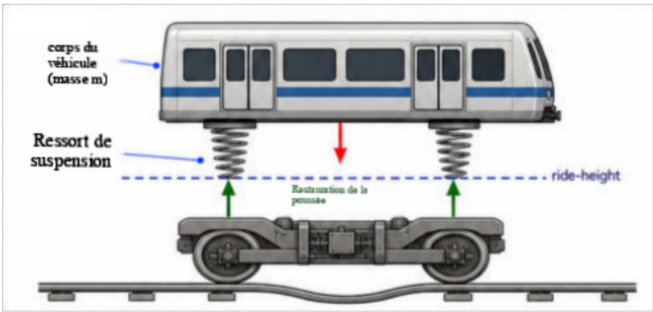


Figure 2-1-7 · Un ressort de suspension ramène la caisse à sa hauteur de conduite.

À votre tour : Une voiture à pleine charge a une masse m plus grande qu'une voiture vide. En utilisant $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, **prédire** s'il oscille avec une période plus longue ou plus courte, et **expliquer** pourquoi un ressort plus raide (k plus grand) donne l'effet opposé.

Nature de la science : La science comme entreprise partagée — La loi que Hooke avait dissimulée dans une phrase écrite à l'envers

En 1676, Robert Hooke énonça sa loi sous la forme d'un anagramme latin. Il la révéla plus tard ainsi : ut tensio, sic vis, ce qui signifie : « telle extension, telle force ». En notation moderne, cette idée s'exprime par : $F = -kx$ pour une force de rappel agissant en sens opposé au déplacement.

Question de la leçon, réponse

Une règle vibre lorsque son extrémité libre est écartée puis relâchée. Pour de petits déplacements, la règle exerce une force de rappel approximativement proportionnelle au déplacement et dirigée vers la position d'équilibre. Cela produit un mouvement harmonique simple décrit par : $a = -\omega^2 x$

La fréquence de vibration dépend de la constante de rappel effective de la règle et de la masse mobile effective. Raccourcir la longueur libre rend la règle effectivement plus raide, de sorte que la fréquence angulaire augmente et que la période diminue : $T\frac{2\pi}{\omega}$

En conséquence, la hauteur du son devient plus élevée.



Figure 2-1-8 · La force de rappel détermine la période.

Exercice

(a) Le déplacement x (m) d'un mouvement harmonique simple au temps t(s) est x= 0,20 sin(4,0π t). Détermine son amplitude A (m) et sa période T(s).

(b) Un objet de masse 0,50 kg est animé d'un mouvement harmonique simple sous une force de rappel F(N) donnée par $F = -50x$, où x(m) est le déplacement. Détermine la période de ce mouvement en s.

(c) Un objet de masse 7,5 kg est animé d'un mouvement harmonique simple sous une force de rappel F(N) donnée par $F = -30x$, où x(m) est le déplacement. Détermine la période de cette motion dans s.

Question de liaison

Comment une compréhension du mouvement harmonique simple peut-elle être appliquée au modèle ondulatoire ?

Le modèle ondulatoire s'appuie sur cela : chaque particule du milieu effectue cette oscillation.

Conseil d'examen

Montre la ligne de substitution dans chaque réponse — les examinateurs attribuent des points pour la méthode, pas seulement pour la réponse finale.

Question type examen

Un corps de masse 0,20 kg est animé d'un mouvement harmonique simple sous une force de rappel $F = -kx$. Son accélération est mesurée comme $a = -\omega^2 x$ avec ω= 5,0 rad/s. **Déterminez la valeur de k, puis déterminez** la période du mouvement. (Prenez π = 3,14).



Leçon 2- 2 — Le pendule élastique

? **Question de la leçon**: Si la même masse est attachée à un ressort vertical au lieu d'un ressort horizontal, la gravité change-t-elle la période d'oscillation ?

Tu apprendras à

À la fin de cette leçon, tu seras capable de :

1. Déterminer le temps périodique d'un système masse–ressort oscillant à partir de la relation : $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$
2. Démontrer qu'un ressort suspendu perpendiculairement conserve le même temps périodique que le ressort suspendu horizontalement.

— En choisissant la position d'équilibre comme origine du repère, on obtient la force de rappel $F = -kx$.

Le phénomène — prédis avant de poursuivre

Figure 2-2-1 · Un sac d'oranges étire la balance jusqu'à une nouvelle position d'équilibre.



À un étal de fruits, le vendeur accroche un sac d'oranges à une balance à ressort suspendue. L'aiguille descend, dépasse la position, puis oscille de haut en bas autour d'une nouvelle lecture plus basse avant de s'y stabiliser. Le même sac posé sur un comptoir plat n'oscillerait pas du tout — pourtant, suspendu, il oscille plusieurs fois avant de s'immobiliser.

Prédis avant de poursuivre

(a) Par rapport à un montage horizontal ayant la même masse et le même ressort, un oscillateur vertical a-t-il une période plus longue, plus courte ou identique ?

(b) Si vous tiriez le sac plus bas avant de le relâcher — une plus grande amplitude — une oscillation complète prendrait-elle plus de temps ?

Fait essentiel

Pour un oscillateur masse-ressort, la période est :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

où m est la masse et k est la constante de raideur du ressort. La constante de raideur peut être déterminée à partir de la force de rappel :

$$F = -kx$$

puis utilisée pour déterminer la période.

Explorer — Charger le ressort et mesurer la période

Ce que tu vas faire : ajouter différentes masses à un ressort ou à un élastique, mesurer l'allongement et la période des oscillations.

Durée : 12 min

Tu auras besoin de :

- Un ressort souple ou un élastique.
- Un petit sac ou un gobelet en papier partiellement rempli de pièces de monnaie.
- Un trombone pour suspendre la masse.
- Une règle. • Un chronomètre. • Un support fixe pour suspendre le ressort.

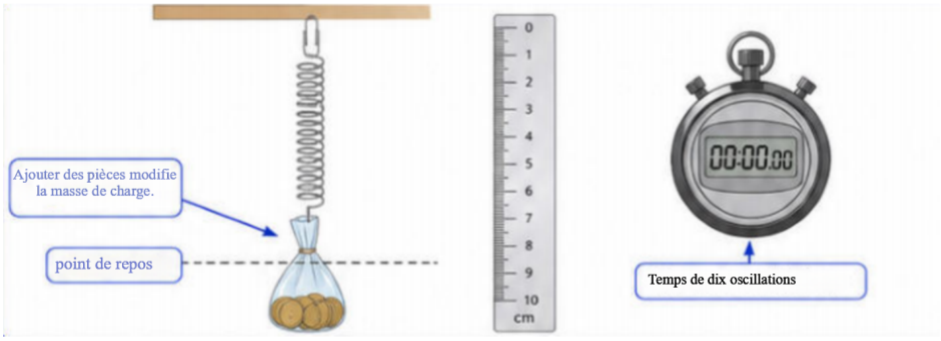


Figure 2-2-2 · L'ajout de pièces modifie la charge, et dix oscillations sont chronométrées.

Étapes :

1. Suspendre le ressort à un support fixe et attacher le sac vide.
2. Ajouter quelques pièces jusqu'à ce que le ressort s'étire d'une quantité mesurable. Laisser le système revenir au repos. Cette position est la position d'équilibre.
3. Tirer le sac vers le bas sur une petite distance et le relâcher doucement.
4. Mesurer le temps pour dix oscillations complètes. Une oscillation complète est le mouvement d'une position extrême jusqu'à la même position extrême.
5. Ajouter d'autres pièces, laisser le système atteindre sa nouvelle position d'équilibre, puis répéter la mesure.
6. Revenir à la première charge. Répéter la mesure en utilisant un petit déplacement initial puis un déplacement initial plus grand, en gardant la masse inchangée.

(nombre de pièces)	Déplacement initial (cm)	Temps pour 10 oscillations complètes (s)

Analyse ce que tu as collecté :

(a) À mesure que le nombre de pièces augmentait, le temps pour dix oscillations augmentait-il ou diminuait-il ? Qu'est-ce que cela suggère concernant l'effet de la masse sur la période ?

(b) Pour la même masse, le fait d'augmenter le déplacement initial a-t-il changé de manière significative le temps pour dix oscillations ? Qu'est-ce que cela suggère quant à la dépendance de la période vis-à-vis de l'amplitude pour de petites oscillations ?

Rédige ton explication en deux lignes maximum avant de lire la page suivante.

Note de mesure

Chronométrez dix oscillations et divisez, jamais une seule : une oscillation unique est trop rapide pour être chronométrée avec précision, et dix ensemble réduisent l'incertitude relative sur le chronométrage.

De l'observation au modèle

Dans l'Exploration, une observation a été laissée de côté : tirer le sac davantage vers le bas ne changeait presque pas la durée. Mais une période inchangée ne signifie pas un mouvement inchangé — une traction plus grande traversait le milieu nettement plus vite et revenait plus fort. Pour lire toute l'oscillation — quelle vitesse, quelle force et quelle durée prend chaque partie — nous ajoutons trois grandeurs au modèle que vous avez déjà.

Vitesse : maximale au centre

Vous avez déjà rencontré cette forme une fois : avec la règle qui vibre dans la Leçon 2-1, l'extrémité traversait le milieu à toute vitesse et s'immobilisait un instant à chaque extrémité. Voici ce comportement avec une valeur associée. La vitesse varie comme $v = A\omega$ cos ωt *donc* la vitesse est maximale au centre O, où $v_{max}=A\omega$, et tombe à zéro à chaque extrémité, là où le sac fait demi-tour. C'est pourquoi une traction plus grande — une amplitude A plus grande — est plus rapide : l'oscillateur parcourt un chemin plus long pendant la même période, donc sa vitesse maximale est plus grande.

Puisque $a=-\omega^2 x$, l'accélération est nulle au centre, où le ressort est à son étirement de repos, et maximale aux extrémités, où le déplacement par rapport à la position d'équilibre est le plus grand : $a_{max}=\omega^2 A$. Ainsi, une plus grande traction est non seulement plus rapide au milieu, mais aussi plus fortement accélérée aux points de retournement — les deux effets que la période seule ne révèle pas.

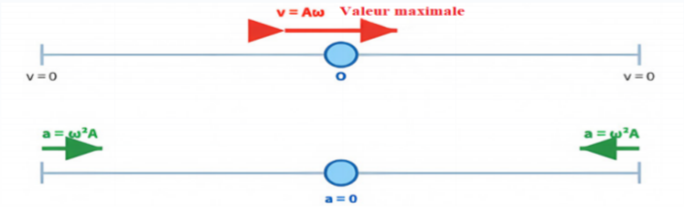


Figure 2-2-3 · La vitesse est maximale au centre, l'accélération maximale aux extrémités.

La vitesse est la plus maximale (v_{max})au centre, tandis que l'accélération est la plus maximale (a_{max}) aux deux extrémités.

Une augmentation de l'amplitude entraîne une augmentation de la vitesse et de l'accélération maximales, mais ne modifie pas le temps périodique.

Point

La force qui ramène l'objet au centre est opposée au déplacement x, elle s'écrit donc F= − k x(k> 0), et l'équation du mouvement pour un mouvement harmonique simple est ma= − k x. Si l'équation du mouvement est ma= − k x, le mouvement est harmonique simple

La vitesse est $v=A\omega$ cos ωt: maximale,$A\omega$, au **centre** de la vibration et 0 aux **deux extrémités**. L'accélération est $a = -A\ \omega^2 x$: nulle au centre et maximale,ω^2, aux deux extrémités.

La période ne dépend pas de l'amplitude : en substituant $a=-\omega^2 x$ dans $ma=-kx$ on obtient T = 2π√ (m/k) . Un poids suspendu à un ressort oscille autour de sa position d'équilibre, et non de la longueur naturelle du ressort.

Encadré d'équation

Vitesse et accélération dans le mouvement harmonique simple	$v_{max}=A\omega,\qquad a_{max}=\omega^2 A$

Chronométrer l'oscillation

Un cycle complet prend la période T. Par la symétrie de l'oscillation, chaque trajet entre une extrémité et le centre en prend un quart. Ainsi, un sac lâché depuis un point extrême atteint d'abord le point de repos O après

Temps d'une extrémité au centre	$t=\frac{1}{4}T=\frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{m}{k}}$

Figure 2-2-4 · Un cycle complet prend quatre quarts de période.



Fait clé

L'amplitude du balancement n'affecte pas la période, mais elle détermine le reste :

$v_{max}=A\omega$

$a_{max}=\omega^2 A$

et chaque jambe d'une extrémité au centre prend $\frac{T}{4}$.

Livret de données :

Le forme standard:

$v=\pm\omega\sqrt{(A^2-x^2)}$ $a=-\omega^2 x$

Au centre $v=v_{max}$, $a=0$; à une extrémité $v=0$, $a=a_{max}$

Relâchée à une extrémité, la masse passe d'abord par O après un quart de période.

Le ressort suspendu détermine sa propre amplitude

Le modèle nous a indiqué qu'un ressort suspendu est étudié par rapport à sa position de repos, située à une distance $x_o = \frac{mg}{k}$ au-dessous de sa longueur naturelle.

Ce seul fait détermine l'amplitude dans l'expérience habituelle. Soulevez le sac jusqu'à ce que le ressort retrouve sa longueur naturelle, puis relâchez-le à partir du repos : il commence alors son mouvement à un point situé exactement à une hauteur $x_0$au-dessus du point O. Par conséquent, l'amplitude est : $A = x_0$

Sa vitesse maximale est alors atteinte en O. À ce moment, $\mathbf{v} = A\omega = g\sqrt{\frac{m}{k}}$ tandis que le point le plus bas se situe à une distance Aau-dessous de O, c'est-à-dire à un allongement de : $x_0 + A = 2x_0$

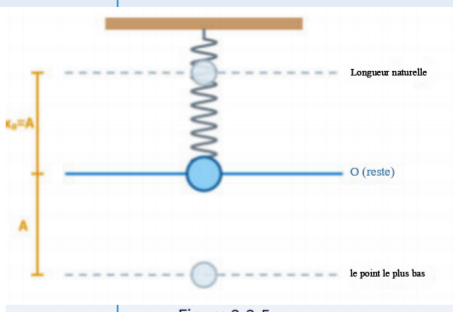


Figure 2-2-5

Application rapide : Une masse de 0,10 kg sur un ressort de constante de raideur k= 40 N/m est écartée de 0,050 m de son point de repos et relâchée (π = 3,14). Déterminez sa vitesse maximale et le temps qu'elle met pour atteindre pour la première fois le point de repos.

Exemple travaillé

Un ressort léger de constante k= 50 N/m porte une masse m= 2,0 kg. Il repose d'abord sur une surface horizontale lisse ; ensuite, le même ressort suspend la même masse verticalement. Chaque fois, la masse est tirée de 0,08 m depuis sa position de repos puis relâchée doucement. Prendre π = 3,14 et g = 9,8 m/s².



Figure 2-2-6 · Le même ressort et la même charge, placés horizontalement et verticalement.

Situation	On l'utilise d'abord sur une surface horizontale lisse, puis on le suspend verticalement au même support ; chaque fois, la masse est écartée de A = 0,08 m de sa position de repos puis relâchée.
Données et requis	m= 2,0 kg,k= 50 N/m,A= 0,08 m, π = 3,14,g= 9,8 m/s2 **(a)** horizontal — la période, la vitesse en O et l'accélération maximale. **(b)** le même ressort suspendu verticalement — l'allongement x_0 en O, la période et le temps nécessaire pour atteindre O pour la première fois.
Représentation	Dans les deux montages, le ressort exerce une force de rappel F= _kx, donc le mouvement est harmonique simple et T= 2π$\sqrt{\frac{m}{k}}$ s'applique. Horizontalement, k se lit directement sur le ressort. Verticalement, la gravité étire d'abord le ressort jusqu'à une position de repos O; en mesurant x à partir de O, le poids s'annule à l'équilibre kx_0=mg et la force garde la même forme $F = -kx$.
Stratégie	Construisez tout à partir de ω=$\sqrt{\frac{k}{m}}$; alors $T = \frac{2\pi}{\omega}$ la vitesse en O est v_{max}= A ω, et l'accélération maximale est a_{max}=ω 2A. Le déplacement initial est l'amplitude A ; il fixe v et a, jamais T. Pour le ressort vertical,find x_o=$\frac{mg}{k}$; car la force de rappel est identique, ω T, v et a sont reportés, et le temps entre un extrême et O est un quart de période,$\frac{T}{4}$.
Solution annotée	**(a) Horizontal** **1.** $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{50}{2,0}} = \sqrt{25} = 5,0$ rad s^{-1} **2.** $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\times3,14}{5.0} = 1,256 \Rightarrow T = 1,3$ s $\boxed{T = 1,3\text{ s}}$ **3. Vitesse en O:** $v_{max} = A\omega = 0,08 \times 5,0 = 0,40$ m/s **4. Accélération maximale :** $a_{max} = \omega^2 A = 5,0^2 \times 0,08 = 2,0$ m/s^2 **(b) Même ressort, vertical** **5. Allongement en O:** $kx_0 = mg \Rightarrow x_0 = \frac{mg}{k} = \frac{2,0 \times 9,8}{50} = 0,39$ m **6. Mesurée à partir de O:** $F = mg - k(x + x_0) = -kx$— **la même forme**, donc ω, T, $v$et $a$sont inchangés : $T = 1,3$ s, $v_{max} = 0,40$ m/s, $a_{max} = 2,0$ m/s^2 **7. Temps pour atteindre Opour la première fois :** $t = \frac{T}{4} = \frac{1,256}{4} = 0,314$ s ≈ 0,31 s

Fait clé

La période n'a besoin que de m et de k— lire k d'après le ressort, ou d'après l'équilibre au repos $kx_0 = mg$.

Puis

(1) $\sqrt{\frac{k}{m}}$, T $\frac{2\pi}{\omega}$

La traction de départ est la amplitude ; elle pilote v_{max} et a_{max}, jamais T.

Vérification de la cohérence	Les unités sont correctes (*s, m, m/s, m/s2*).*T = 1,3 s signifie environ 0,77 oscillation par seconde*— crédible pour une masse de 2 kg sur un ressort assez souple. Les deux montages partagent les mêmes m,k et A, donc ils partagent la même période, la vitesse maximale et l'accélération maximale ; la gravité n'a fait qu'abaisser le centre de x_0= 0,39 m.
Expliquez-le to-même	Pourquoi le fait de suspendre le ressort déplace-t-il la position de repos de la masse (de x_0) tout en laissant inchangés la période, la vitesse maximale et l'accélération maximale ?

À toi d'essayer : Une masse m =0,20 kg est suspendue à un ressort de constante de raideur k= 80 N/m et oscille autour de sa position d'équilibre (π = 3,14).

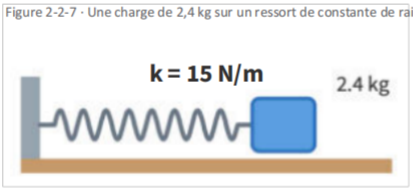
Détermine la période de l'oscillation.

Essayer

Détermine les valeurs suivantes avec deux chiffres significatifs, en prenant π = 3,14 et g = 9,8 m/s ^{2}.

(a) Une extrémité d'un ressort léger de constante de raideur k= 15 N/m est fixée à un mur sur une surface horizontale lisse, et un bloc de masse 2,4 kg est attaché à l'autre extrémité. Le bloc est légèrement écarté de sa longueur naturelle puis relâché doucement. Détermine la période de l'oscillation en s.

Figure 2-2-7 · Une charge de 2,4 kg sur un ressort de constante de raideur 15 N/m.



(b) L'extrémité supérieure d'un ressort léger est fixée au plafond et une masse m est attachée à l'extrémité inférieure ; elle s'équilibre en un point O où le ressort est allongé de x_0 par rapport à sa longueur naturelle. La masse est ensuite soulevée jusqu'à ce que le ressort atteigne sa longueur naturelle puis relâchée doucement, de sorte qu'elle effectue un mouvement harmonique simple.

(i) Détermine la constante de raideur k(en fonction de m,g,x_0).

(ii) Détermine la vitesse v lorsque la masse passe par O.

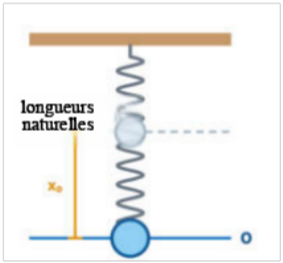


Figure 2-2-8 · L'extension au repos fixe la position d'équilibre.

Dans un nouveau contexte — La balance à ressort d'un pêcheur au lac Nasser

Un pêcheur au lac Nasser attache un poisson à une balance à ressort tenue à la main. L'aiguille se déplace vers le bas et oscille autour de la position d'équilibre avant de s'immobiliser. Le poisson étire le ressort jusqu'à ce que la force ascendante du ressort équilibre son poids. Chaque petite oscillation autour de la position d'équilibre peut être modélisée comme un mouvement harmonique simple. La période est $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$. La gravité détermine la lecture à l'équilibre, tandis que la période dépend de m et de k.

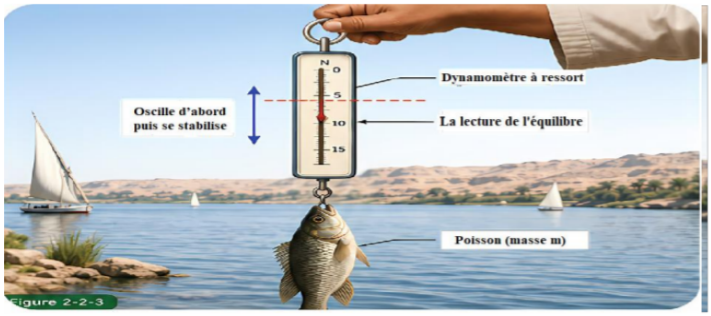


Figure 2-2-9 · La balance oscille, puis se stabilise à la lecture d'équilibre.

Question de liaison

Comment le mouvement harmonique simple d'une particule construit-il le modèle ondulatoire ?

Un poisson plus lourd a une masse m plus grande. En utilisant $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, prédis si le poisson oscille avec une période plus longue ou plus courte. Expliquez pourquoi un ressort plus raide, avec un k plus grand, donne le changement opposé de période.

Nature de la science — La science en tant qu'entreprise partagée — l'horloge qui gardait l'heure exacte en mer

Une horloge à pendule dépend de la gravité car la période d'un pendule simple dépend de g. Sur un navire qui tangue, les variations du champ gravitationnel effectif peuvent affecter le mouvement d'une horloge à pendule. Les chronomètres de marine mis au point par John Harrison utilisaient des oscillateurs à ressort au lieu de pendules, ce qui les rendait plus adaptés à un usage en mer.

À toi : suggère une raison pour laquelle un garde-temps à ressort était le meilleur choix pour un navire qui tangue. Reliez votre raison au résultat de cette leçon.

Détermine la constante de raideur k à partir de $k\ x_0 = mg$, puis **détermine** la période des oscillations.

Question de la leçon et réponse :



Figure 2-2-10 · Le ressort échelle revisitée.

Relier la même masse à un **ressort vertical** au lieu d'un ressort horizontal **ne modifie pas le temps périodique**, à condition que la constante du ressort soit la même et que les oscillations soient petites. Dans le cas vertical, la gravité déplace la position d'équilibre vers le bas. À l'équilibre $kx_0 = mg$. Lorsque le déplacement est mesuré à partir de cette nouvelle position d'équilibre, la force résultante est $F = -kx$

Ainsi, $T = \frac{2\pi}{\omega}, \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$

Par conséquent, pour les mêmes valeurs de m et de k, les systèmes vertical et horizontal ont le même temps périodique. Le temps périodique ne dépend pas de g.

Choisissez la position d'équilibre comme origine de vos coordonnées : le ressort suspendu aura alors le même temps périodique que le ressort horizontal : la même masse , la même constante du ressort et le même temps périodique.

Conseil d'examen

Montre la ligne de substitution dans chaque réponse — les examinateurs attribuent des points pour le raisonnement, pas seulement pour la réponse finale.

Exercice

Déterminez ce qui suit avec deux chiffres significatifs, en prenant π = 3,14 et g = 9,8 m/s ^{2}.

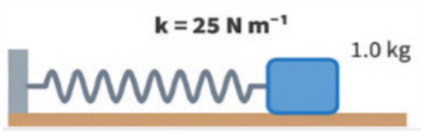


Figure 2 - 2 - 11 · Un bloc attaché à un ressort horizontal.

(a) Un ressort léger de constante de raideur k= 25 N/m est fixé à un mur sur une surface horizontale lisse, avec un bloc de masse 1,0 kg à l'autre extrémité. Il est légèrement écarté de sa longueur naturelle puis relâché doucement. Détermine la période en s.

(b) Un ressort léger de constante de raideur k = 25 N/m est fixé à un mur sur une surface horizontale lisse, avec un bloc de masse 0,80 kg à l'autre extrémité. Le bloc est tiré jusqu'à un point situé à 0,20 m de sa position d'équilibre O puis relâché doucement.

(i) Détermine la période en s.

(ii) Détermine la vitesse lorsqu'il passe par O en m/s.

(iii) Détermine la plus grande valeur de l'accélération en m/s ^{2}.

Question type examen

Une masse de 0,20 kg est suspendue à un ressort léger, l'étirant de x= 0,049 m au repos. Prendre g= 9,8 m/s ^{2}, π = 3,14.

- Indiquer la constante de rappel du ressort k.
- Déterminer la période des petites oscillations verticales.

(c) L'extrémité supérieure d'un ressort léger de constante de raideur k= 9,8 N/m est fixe, et une masse de 5,0 × 10^{-2} kg est suspendue à l'extrémité inférieure. La masse est tirée vers le bas de 2,0 × 10^{-2} m depuis la position d'équilibre puis relâchée. Déterminer l'amplitude, la période et la vitesse maximale.

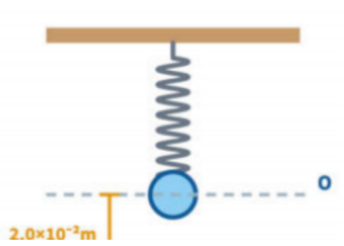


Figure 2-2-12 · La charge relâchée 2,0 × 10^{-2} m sous la position de repos.

(d) L'extrémité supérieure d'un ressort léger de constante de raideur k est fixe, et une masse m est suspendue à l'extrémité inférieure. La masse est relâchée sans vitesse initiale à la position où le ressort est à sa longueur naturelle, de sorte qu'elle effectue un mouvement harmonique simple.

(i) Déterminer l'amplitude, la période et la vitesse maximale.

(ii) Déterminer l'allongement du ressort au point le plus bas.

(iii) Déterminer le temps écoulé entre le lâcher et le premier passage par le centre de vibration.

(e) Un ressort léger est fixé au plafond et une masse m y est suspendue, en équilibre au point O où le ressort est allongé de x_0. On la tire vers le bas d'une distance d depuis O et on la relâche doucement, la masse vibre verticalement. Déterminer la vitesse lors du passage par O(en fonction de d,g,x_0).

Conseil d'examen

L'écart initial par rapport à l'équilibre correspond à l'amplitude — il détermine v_{max} et a_{max}, mais jamais la période. Montrer chaque ligne de substitution.

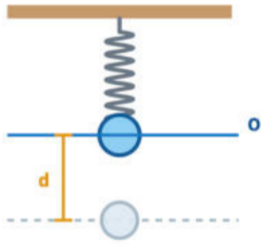
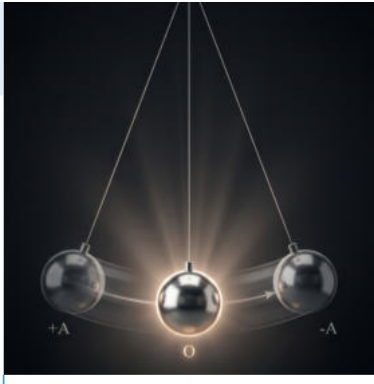


Figure 2-2-13 · Une charge relâchée à une distance d sous la position de repos.



Leçon 2- 3 — Le pendule simple

❓ **Question de la leçon :**La masse de la bille ou l'amplitude d'un petit déplacement initial affecte-t-elle la période d'un pendule simple ?

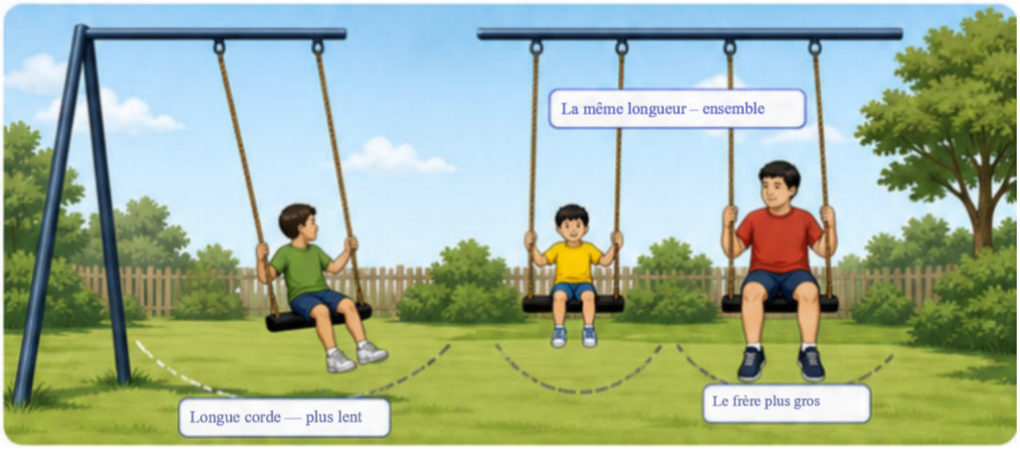
tu apprendras à

À la fin de cette leçon, tu seras capable de :

- Déterminer la période d'un pendule simple en utilisant $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ pour de petits déplacements angulaires.
- Expliquer pourquoi la période d'un pendule simple dépend de L et de g, mais pas de la masse de la bille.
- Expliquer pourquoi la période est approximativement indépendante de l'amplitude pour de petites oscillations.

Le phénomène — prédis avant de poursuivre

Figure 2-3-1 · Des balançoires de même longueur se balancent en même temps, quelle que soit la masse de la personne.



Dans un jardin, deux balançoires sont suspendues côte à côte à la même barre, avec des cordes de même longueur. Un petit enfant s'assoit sur l'une, son frère plus lourd sur l'autre. On les lâche et — oscillation après oscillation — ils restent ensemble, côte à côte. Au club, une balançoire sur une corde beaucoup plus longue a une période plus longue : elle met plus de temps à accomplir une oscillation.

Prédis avant de poursuivre — engage-toi par écrit :

(a) Le frère est plus lourd. Sa balançoire mettra-t-elle plus de temps, moins de temps, ou le même temps par oscillation que celle de l'enfant plus léger, sur des cordes de même longueur ?

(b) Donne à une balançoire une poussée plus forte pour qu'elle décrive un arc plus large. Une oscillation prend-elle alors plus de temps, moins de temps, ou le même temps ?

Fait clé

Un mouvement est harmonique simple lorsque la force de rappel est directement proportionnelle au déplacement par rapport à l'équilibre et dirigée en sens opposé : $F = -kx$. Pour un système de masse m, cela donne $T = 2\pi\sqrt{(m/k)}$, où k est la constante de force effective.

Explorer — Mesurer la période en modifiant une variable

Ce que tu feras : modifie une variable à la fois : la longueur du pendule, la masse de la masselotte ou le déplacement initial, puis mesure la période d'oscillation.

Durée :20 min

Il te faudra :

- Un fil d'une longueur de 1 à 2 m.
- Un petit objet dense servant de masselotte au pendule.
- Une seconde masselotte de masse différente.
- Un support fixe.
- Un chronomètre ou une minuterie de téléphone.
- Une règle d'un mètre.

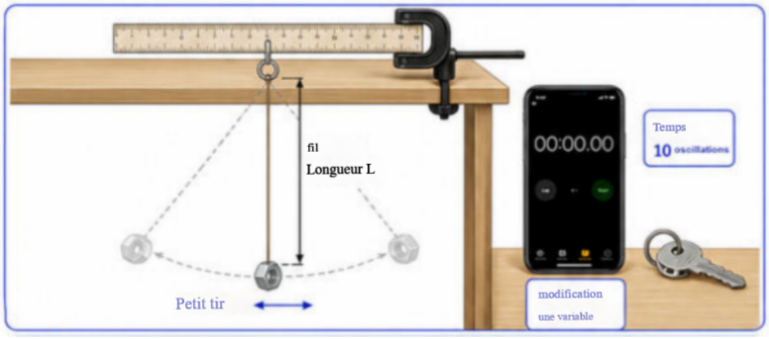


Figure 2-3-2 · La longueur du fil est mesurée et dix oscillations sont chronométrées.

Étapes :

1. Attache la masselotte au fil et suspendez-le à un support fixe. Mesurez la longueur (L) depuis le point de suspension jusqu'au centre de la masselotte.
2. Écarte la masselotte d'un petit angle et relâchez-la sans la pousser.
3. Mesure le temps de dix oscillations complètes. Une oscillation complète est le mouvement d'une position extrême jusqu'au retour à cette même position extrême.
4. Divise le temps mesuré par 10 pour obtenir la période (T).
5. Répéte la mesure en changeant uniquement la longueur.
6. Répéte la mesure en changeant uniquement la masse de la masselotte.
7. Répéte la mesure en changeant uniquement le déplacement initial, tout en maintenant le déplacement angulaire dans l'approximation des petits angles (généralement inférieur à environ 10°).

Variable modifiée	Longueur L / m	Temps pour 10 oscillations t / s	Période T (t /10) / s
Pendule initial			
Quatre fois la longueur			
Masse plus lourde			
Angle initial plus grand (toujours inférieur à 10°)			

Analyse ce que tu as collecté :

(a) Lorsque la longueur a été multipliée par quatre, comment la période a-t-elle changé ? Compare votre résultat avec la prédiction : $T \propto \sqrt{L}$

(b) Le changement de masse du pendule a-t-il affecté de manière significative la période ?

(c) La modification du déplacement initial a-t-elle significativement affecté la période lorsque l'angle restait faible ?

Rédige ton explication en deux lignes maximum avant de lire la page suivante.

Note de mesure

Mesurez le temps de dix oscillations complètes, puis calculez la période à l'aide de $T=t/10$. Chronométrer plusieurs oscillations réduit l'incertitude relative due au temps de réaction lors du lancement et de l'arrêt du chronomètre.

De l'observation au modèle

Dans la partie Explorer, une longueur quatre fois plus grande donnait environ le double de la pé riode, tandis qu'un lest plus lourd et une plus grande amplitude la laissaient inchangée. Tu avais peut-être prédit que le lest plus lourd serait en retard ou qu'une poussée plus large augmenterait la période — le chronométrage dit le contraire. Voici le modèle vers lequel pointent tes données.

Décomposition du poids en composantes

Pour un lest de pendule de masse m attaché à un fil léger de longueur L, le poids mg agit verticalement vers le bas. La tension dans le fil agit le long du fil. La composante du poids tangentielle à l'arc fournit la force de rappel :$F = -mg \sin \theta$, où θ est l'écart angulaire par rapport à la verticale. Le signe négatif indique que la force agit vers la position d'équilibre.**Seule la partie le long de l'arc, mg sin θ, agit comme force de rappel — toujours en direction de O.**

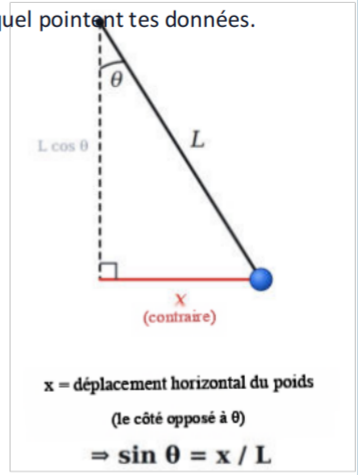


Figure 2-3-3 · Le déplacement horizontal du lest est L sin θ.

Approximation des petits angles

Lorsqu'un poids de pendule est écarté d'un angle θ, la composante tangentielle affecte son poids comme force de rappel : $F = -mg \sin \theta$. Pour de petits déplacements angulaires, avec θexprimé en radians : $\sin \theta \approx \theta$. Le déplacement du poids le long de l'arc circulaire est donné par : $x = L\theta$ d'où : $\theta = \frac{x}{L}$. Ainsi : $F \approx -mg\theta = -kx = mgx/L$. La force de rappel est donc, pour les petites oscillations, proportionnelle au déplacement par rapport à la position d'équilibre et agit dans le sens opposé. Le pendule est soumis ainsi, de manière approximative, à un mouvement harmonique simple avec une constante de force effective : $k = \frac{mg}{L}$

De la force de rappel au temps périodique : pour les petites oscillations, la masse s'élimine et la force de rappel sera $F = \frac{mg}{L}$. En comparant cette expression à la forme standard $F = -kx$, on obtient : $k = \frac{mg}{L}$. En substituant cette valeur dans la formule générale du temps périodique : $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, on obtient : $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{mg/L}} = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$. Ainsi, la masse du poids s'élimine. Donc, le temps périodique ne dépend pas de la masse du poids mais il dépend uniquement de L et de g, à condition que l'approximation du petit angle soit valable (En cas du petit angle seulement).

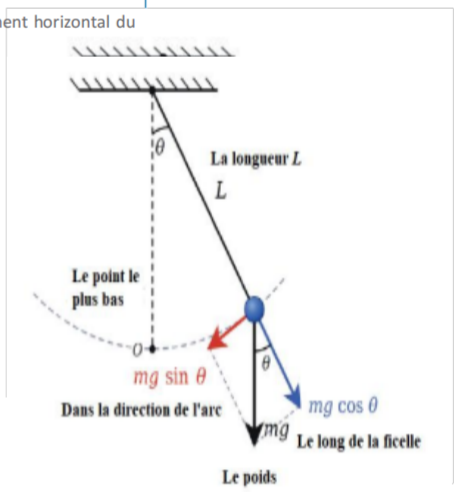


Figure 2-3-4 · Seule la composante le long de l'arc ramène la masse.

Pendule simple

Un pendule simple est constitué d'une petite masse dense suspendue à un point fixe par un fil léger et inextensible. Pour de petits déplacements angulaires, son mouvement peut être approximé comme étant un mouvement harmonique simple.

Point

- Pour une masse m suspendue à un fil de longueur L, la force agissant dans la direction tangentielle est la composante du poids dans la direction du mouvement, $mg \sin \theta$. Comme sa direction est opposée au déplacement $s$le long de l'arc depuis le point le plus bas O, on a $F = -mg \sin \theta$.
- Lorsque l'angle de balancement θest suffisamment petit, $\sin \theta \approx \theta$, et le déplacement le long de l'arc est $s = L\theta$. En substituant, on obtient $F = -\frac{mg}{L}s$. La force de rappel est donc proportionnelle au déplacement, ce qui signifie qu'un pendule simple avec un petit angle de balancement peut être approximativement considéré comme un mouvement harmonique simple.
- La période est donnée par $T = 2\pi\sqrt{L/g}$. Elle dépend de la longueur Let de g, mais pas de la masse de la boule ni de l'amplitude.

  (La masse m se simplifie entre le numérateur et le dénominateur.)

Encadré d'équation

Période d'un pendule simple	$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$

Dans $\sqrt{\frac{m}{mg/L}}$, la masse **m** apparaît au numérateur et au dénominateur et s'élimine; il reste alors : $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$. Le temps périodique dépend donc de la longueur L et de l'intensité du champ gravitationnel g, mais pas de la masse du poids. L'amplitude n'intervient pas non plus : pour de petits angles, la force reste proportionnelle à x.

Ainsi, pour un petit oscillation d'amplitude, le temps périodique ne dépend ni de la masse ni de l'amplitude. C'est la **régularité temporelle des oscillations** mise en évidence par vos découvertes.

Mets-le à l'épreuve :suspends deux fils égaux, un écrou lourd sur l'un et un écrou léger sur l'autre ; lâche-les ensemble depuis le même petit angle et **montre** qu'ils restent en phase pendant dix oscillations.

Détermination de la force de rappel pour un pendule simple

Pour un ressort, la force de rappel s'écrit directement sous la forme : $F = -kx$. Pour un pendule simple, la force de rappel effective est déterminée à partir de la composante tangentielle du poids de la masse. Pour de petits déplacements angulaires : $F = -mg\sin\theta$. Ainsi, $F = -\frac{mg}{L}x$. Alors, $k = \frac{mg}{L}$. En substituant dans : $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, on obtient : $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$

Exemple résolu

Un pendule simple a un fil de longueur L =1,8 m. Prendre π = 3,14 et l'intensité du champ gravitationnel g = 9,8 m/s^2.**Déterminer** la période de son oscillation, à deux chiffres significatifs.

Situation	Un petit poids est suspendu à un fil léger de longueur L =1,8 m et oscille avec un petit angle. Trouvez la période T.
Données et valeurs demandées	L =1,8 m ·g =9,8 m/s^2· π = 3,14 → T = ?(la masse n'est pas donnée — et n'est pas nécessaire)
Représentation	Oscillation à petit angle → mouvement harmonique simple avec une constante de force effective k = mg/L, donc la période est $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$. Seuls L et g entrent.
Stratégie	Déterminez la force de rappel au déplacement x : de la géométrie $F = -\frac{mg}{L}x$. Ainsi, $k = \frac{mg}{L}$ puis : $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$. En ce qui concerne le pendule, substituez directement par Let g.
Solution annotée	1) Nommez la force de rappel (la géométrie donne *k*) :*k* = *mg*/*L*, donc la période est $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ 2) Formez le rapport L/g(un seul nombre) :L/g =1,8 / 9,8 = 9/49 3) Remplacez dans $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} = 2\pi\sqrt{\frac{9}{49}} = 2\pi \times \frac{3}{7} = \frac{2 \times 3{,}14 \times 3}{7} \Longrightarrow T \approx 2.7$ s
Vérification de la cohérence	La réponse obtenue porte l'unité de temps (s), comme elle doit l'être pour le temps périodique $\sqrt{\frac{9}{49}} = \frac{3}{7}$. Un examen de confirmation. Un temps périodique d'environ 2,7 s est raisonnable pour une balançoire dont la longueur est d'environ 1,8 m.
Expliquez-le vous-même	Pourquoi le temps périodique est-il déterminé complètement alors que la masse du poids n'a jamais été donnée ?

Note de mesure

L'intensité du champ gravitationnel près de la surface de la Terre est d'environ g= 9,8 m/s^2. Pour des pendules au même endroit,g est constant, donc la période ne dépend que de la longueur L.

Cahier de données

pour le pendule, utilisez $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ directement ; vous n'avez besoin que de L et de g— la masse n'est pas requise et n'apparaît pas.

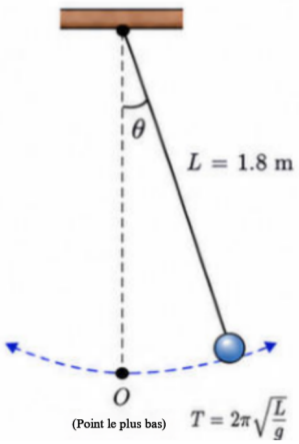


Figure 2-3-5 · Un pendule de longueur 1,8 m.

Question de liaison

Comment la période d'un pendule simple peut-elle être utilisée pour déterminer l'intensité du champ gravitationnel g ?

À toi d'essayer : Un pendule simple a un fil de longueur L= 1,8 m(π = 3,14, g =9,8 m/s^2) .**Détermine** la longueur de fil qui rendrait sa période **deux fois plus courte**.(Raisonnement complet dans la section de réponse de l'unité) .

Essayer

(a) Détermine la période, en s, d'un pendule simple dont la longueur de fil est de 36 cm.

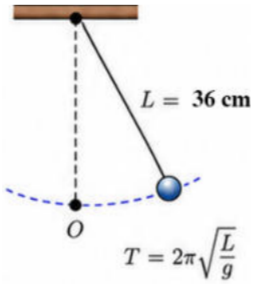


Figure 2-3-6 · Un pendule de longueur 36 cm.

(b) Un pendule simple a une longueur de fil L et une période T. Déterminez la longueur de fil qui rendrait la période **deux fois plus courte**.

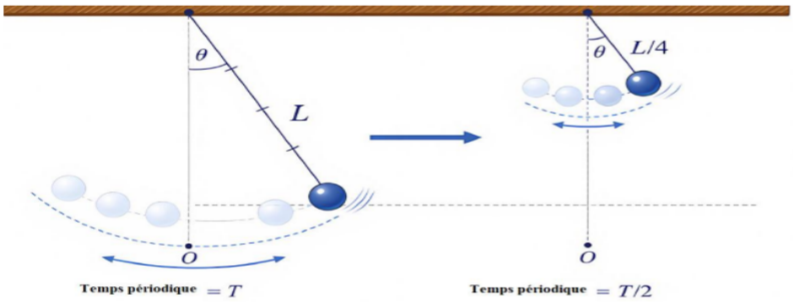


Figure 2-3-7 · Diviser la longueur par quatre divise la période par deux.

Dans un nouveau contexte — le pendule de Foucault dans la Bibliothèque d'Alexandrie

Un long **pendule de Foucault** est suspendu au centre du Planétarium de la Bibliothèque d'Alexandrie. En raison de sa grande longueur, son temps périodique est plus long que celui d'une balançoire dans un parc ordinaire. Pour de petites oscillations, le temps périodique est $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$.

Le pendule de Foucault est également utilisé pour mettre en évidence la rotation de la Terre. Par rapport au plan d'oscillation, la Terre et le bâtiment tournent sous le pendule. Nous avons alors l'impression que le pendule change lentement de direction. Cependant, cette rotation n'affecte pas la vitesse d'oscillation du pendule.

➡ La longueur de la ficelle du pendule d'Alexandrie est d'environ 15 m . En utilisant $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$, déterminez son temps périodique et comparez-le au temps périodique de 2,7 s d'une balançoire de parc de longueur 1,8 m.

Nature de la science : preuves et schémas — l'horloge qui a révélé la variation de g sur Terre

En 1672, Jean Richer observa qu'une horloge à pendule qui donnait l'heure exacte à Paris retardait à Cayenne, près de l'équateur. Puisque $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$, une période plus longue indique une valeur de g plus petite. Cela fournit la preuve que g varie légèrement selon l'endroit sur Terre — étant plus petit près de l'équateur.

Fait clé

Chaque élément ici utilise uniquement L et g. Lis $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ comme « deux pi fois la racine carrée de la longueur sur g », substituez en dernier, et répondez avec deux chiffres significatifs.

Cahier de données

Utilisez π,g et $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ du cahier ; votre tâche est de choisir la relation et d'y substituer L et g, sans vous rappeler la formule.

Question de cours, résolue

Pour de petites oscillations, ni la masse du poids ni les faibles variations de l'amplitude n'affectent le temps périodique du pendule simple. La composante tangentielle du poids fournit la force de rappel $F = -mg\sin\theta$.

Pour les petits angles $\sin\theta \approx \frac{x}{L}$, d'où $F = -\frac{mg}{L}x$ .Cette expression correspond à la forme du mouvement harmonique simple avec une rigidité de force effective : $k = \frac{mg}{L}$. En substituant cette valeur dans $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, on obtient $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$. Le temps périodique dépend donc uniquement de L et de g, et pas de la masse du poids. De même, il est approximativement indépendante de l'amplitude pour les petits déplacements angulaires.

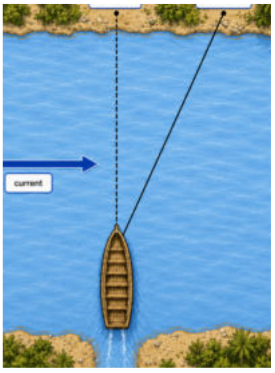


Figure 2-3-8 · Un bateau retenu par une corde oscille comme un pendule dans le courant.

Exercice

(a) Détermine la période, en s, d'un pendule simple dont la longueur du fil est de **5,0 m**.

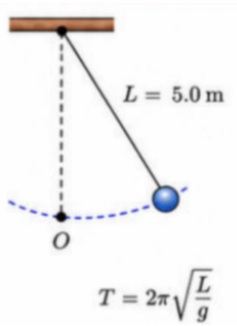


Figure 2-3-9 · Un pendule de longueur 5,0 m.

(b) Détermine la période, en s, d'un pendule simple dont la longueur du fil est de **7,2 m**.

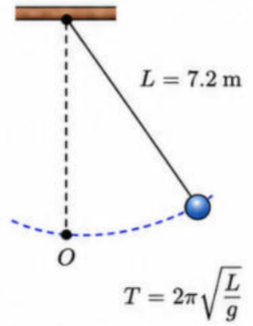


Figure 2-3-10 · Un pendule de longueur 7,2 m.

(c) Détermine le facteur par lequel la période d'un pendule simple change, dans chaque cas (les réponses peuvent être laissées sous forme radicale) :

(i) l'amplitude est réduite de moitié ;

(ii) la longueur du fil est doublée ;

(iii) la masse du pendule est quadruplée.

Question type examen

Un pendule simple a un fil de longueur 2,0 m. Prendre π = 3,14 et g = 9,8 m/s ^{2}.**Déterminer** la période de ses petites oscillations, et **indiquer** ce qui arrive à cette pé riode si le pendule est remplacé par un autre de masse double.



Leçon 2- 4 — Ondes sinusoïdales

❓ **Question de la leçon**: Dans une ola de stade, la perturbation se déplace autour du stade tandis que chaque spectateur reste près de son siège. Qu'est-ce qui est transféré par l'onde ?

Tu apprendras à

À la fin de cette leçon, tu seras capable de :

- Décrire une onde comme une perturbation qui se propage et qui transfère de l'énergie sans transfert net de matière.
- Déterminer l'amplitude et la longueur d'onde λ à partir d'un graphique déplacement – position (y – x), et la période T à partir d'un graphique déplacement – temps (y – t).
- Calculer la vitesse d'une onde à l'aide de $v = f\lambda$.
- Distinguer les ondes transversales des ondes longitudinales, et les ondes mécaniques des ondes électromagnétiques.

🔍 Le phénomène — prédis avant de poursuivre



Figure 2-4-1 · L'onde traverse la tribune tandis que chaque supporter reste à sa place.

Lors d'un match de football dans un stade bondé, la foule fait une « ola » : un bloc de spectateurs se lève et lève les bras, puis se rassoit pendant que le bloc suivant se lève. La perturbation fait tout le tour du stade en quelques secondes — pourtant chaque spectateur reste à sa place. Une perturbation fait clairement tout le tour, mais les personnes ne se déplacent pas avec elle.

Prédis avant de poursuivre

(a) Dans une ola de stade, les spectateurs se déplacent-ils autour du stade avec l'ola, ou restent-ils près de leurs positions ?

(b) Si les spectateurs se déplacent sur un plus grand déplacement vertical, cela augmente-t-il nécessairement la vitesse de l'onde ? Expliquez.

Fait clé

Dans les ondes mécaniques, chaque particule du milieu oscille autour de sa position d'équilibre. La perturbation se propage dans le milieu, mais les particules du milieu ne se déplacent pas avec l'onde.

Explorer — Envoie une impulsion le long d'une corde et observe un marqueur

Ce que tu feras : enverre une impulsion le long d'une corde tendue et observe le mouvement d'un marqueur coloré attaché à la corde.

Temps =12 min

Tu auras besoin de :

- Une corde ou une corde à linge de 3 à 4 m de long.
- Un marqueur en tissu coloré.
- Un support fixe ou un partenaire pour tenir une extrémité.

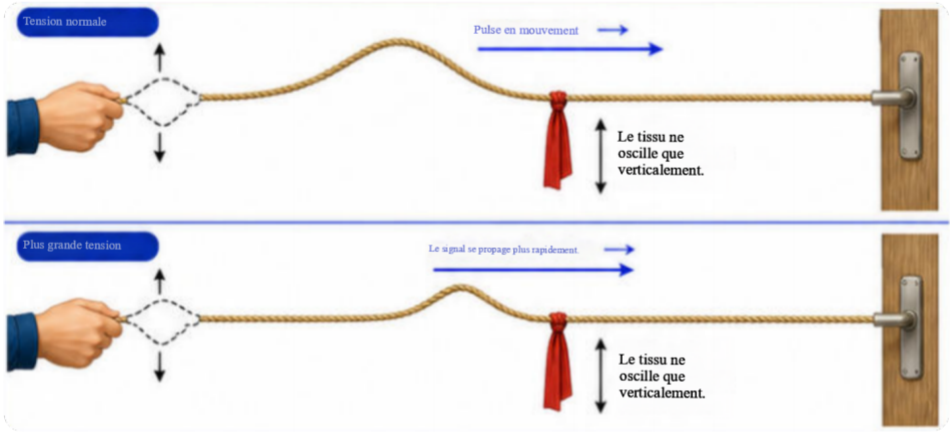


Figure 2-4-2 · Une plus grande tension transporte l'impulsion plus rapidement le long de la même corde.

Étapes :

1. Étire la corde et attachez le repère coloré près du milieu.
2. Tiens une extrémité de la corde pendant que l'autre extrémité est fixe ou tenue par un partenaire.
3. Déplace votre extrémité brusquement vers le haut puis vers le bas une fois pour envoyer une seule impulsion le long de la corde.
4. Observe si le repère se déplace le long de la corde ou oscille autour de sa position d'équilibre au passage de l'impulsion.
5. Augmente la tension de la corde et répétez l'impulsion. Comparez la vitesse de l'impulsion dans les deux cas.

Modification apportée	Mouvement du repère	Vitesse relative de l'impulsion
Tension normale		
Tension plus élevée		

Analyse ce que tu as recueilli :

(a) Lorsque l'impulsion est passée devant le repère, le repère s'est-il déplacé le long de la corde ou a-t-il oscillé autour de sa position d'équilibre ?

(b) Comment l'augmentation de la tension de la corde a-t-elle influé sur la vitesse de l'impulsion ? Qu'est-ce que cela suggère quant à la dépendance de la vitesse de l'onde aux propriétés du milieu ?

Rédige ton explication en deux lignes avant de lire la page suivante.

Note de mesure

Envoyez plusieurs impulsions et observez la même bande à chaque fois : une seule observation peut ne pas suffire pour tirer des conclusions fiables, et la r épétition rend l'oscillation de la bande indiscutable.

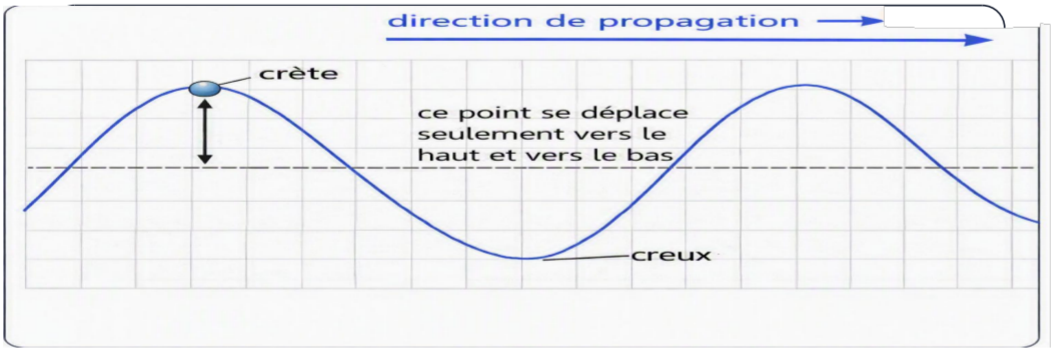
De l'observation au modèle

Dans Exploration, tu as vu l'impulsion se déplacer le long de la corde tandis que la bande de tissu oscillait autour de sa position d'équilibre. Tu as peut-être prédit que la bande de tissu serait transportée — elle ne l'a pas été. Et en resserrant la corde, la vitesse de l'impulsion a changé, même si l' impulsion a été produite de la même manière. Voici le modèle vers lequel tes observations pointent.

Une perturbation se propage dans un milieu

Une onde est une perturbation qui se propage et qui transfère de l'énergie d'un endroit à un autre sans transfert net de matière. Dans une onde mécanique, la perturbation se propage dans un milieu matériel comme une corde, de l'eau ou de l'air. Chaque petite partie du milieu oscille autour de sa position d'équilibre lorsque l'onde passe.

Figure 2-4-3 · Chaque point monte et descend tandis que l'onde avance.



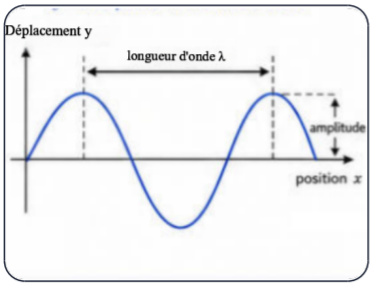
Dans la corde, l'impulsion se déplace le long de la corde, tandis que chaque petite section de la corde monte et descend autour de sa position d'équilibre. Par conséquent, le motif de l'onde et l'énergie se déplacent le long de la corde, mais la matière de la corde ne se déplace pas avec l'onde. Si la source d'une onde oscille de manière sinusoïdale, le déplacement du milieu peut former une onde sinusoïdale répétitive. Les points les plus hauts de l'onde sont appelés crêtes, et les points les plus bas sont appelés creux. La longueur d'onde (λ) est la distance entre deux points successifs qui sont en phase, comme de crête à crête ou de creux à creux. Elle se mesure en mètres (m).

Lecture des graphiques déplacement-position et déplacement-temps

Un graphique déplacement-position ($y - x$) montre le déplacement (y) des points du milieu à différentes positions (x) à un instant donné. À partir de ce graphique, la longueur d'onde (λ) et l'amplitude (A) peuvent être déterminées. Il ne montre pas directement la période.

Un graphique déplacement-temps ($y - t$) montre le déplacement (y) d'un point fixe du milieu au cours du temps (t). À partir de ce graphique, la période (T) et l'amplitude (A) peuvent être déterminées. Il ne montre pas directement la longueur d'onde.

Figure 2-4-4 · Le déplacement en fonction de la position donne la longueur d'onde.



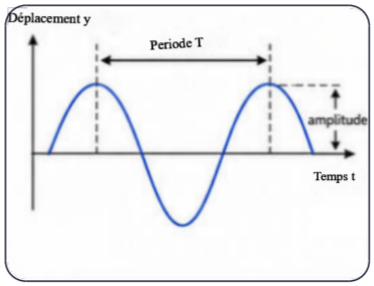


Figure 2-4-5 · Le déplacement en fonction du temps donne la période.

La relation de vitesse des ondes

Une source produit f ondes par seconde. Pendant une seconde, la perturbation parcourt f λ, donc la vitesse de l'onde est $v = f\lambda$, et puisque la fréquence est l'inverse de la période, la vitesse est aussi la longueur d'onde divisée par la période.

longueur d'onde

La distance entre deux points successifs en phase, par exemple d' une crête à la crête suivante ou d'un creux au creux suivant, sur un graphique $y - x$.

Conseil d'examen

Indiquez à partir de quel graphique vous avez lu chaque grandeur :λ et l' amplitude à partir du graphique − x(espace), la p ériode à partir du graphique − t(temps). Confondre les deux est l' erreur la plus courante.

Point

Le phénomène par lequel les vibrations générées en un certain point se propagent dans le milieu environnant est appelé une onde. Le point où la vibration commence est la source de l'onde ; la longueur d'une onde complète est la longueur d'onde λ [m] ; et le nombre de vibrations par seconde est la fréquence f[Hz].

En désignant la période par T[s] et la vitesse de propagation de l'onde par v[m/s] : $f=\frac{1}{T}$ et $v=f\lambda$. Une onde dont le déplacement suit une courbe sinusoïdale est appelée onde sinusoïdale.

Prêtez attention à l'axe horizontal. Un graphique y – x représente la forme de l'onde à un instant donné — il équivaut à une photographie de l'onde entière. Un graphique y – t représente un point du milieu au cours du temps — il équivaut à une vidéo de ce mouvement ponctuel.

Encadré d'équation

Équations d'onde	$= f\lambda = \frac{\lambda}{T}$
Fréquence et période	$f \quad \frac{1}{T}$

Mettez-le à l'épreuve :envoyez une impulsion de petite amplitude, puis une impulsion de plus grande amplitude, le long de la même corde et observez la bande de tissu : montrez que chaque impulsion l'atteint dans le même temps court — seule l'amplitude diffère.

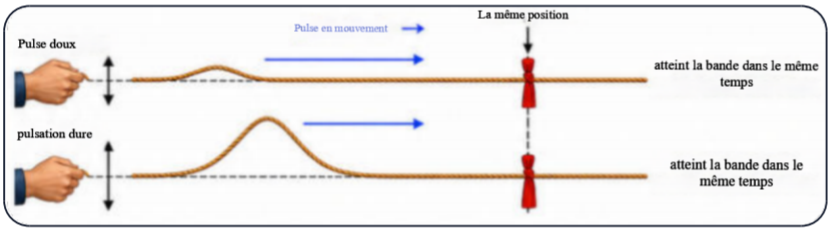


Figure 2-4-6 · L'amplitude ne change pas la vitesse de l'impulsion.

Types d'ondes :transversales,longitudinales, mécaniques et électromagnétiques

Dans une onde mécanique transversale, les particules du milieu oscillent perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde. Une onde sur une corde en est un exemple.

Dans une onde longitudinale, les particules du milieu oscillent parallèlement à la direction de propagation de l'onde. Le son dans l'air en est un exemple ; il est constitué de compressions et de raréfactions.

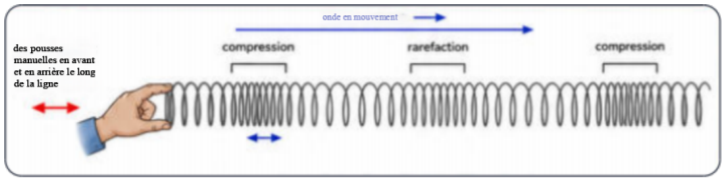


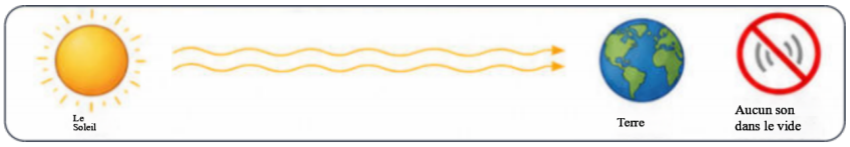
Figure 2-4-7 · Une onde longitudinale : compressions et raréfactions le long de la ligne.

Ondes électromagnétiques

Le son est une onde mécanique longitudinale, il nécessite donc un milieu matériel et ne peut pas se propager dans le vide.

La lumière est une onde électromagnétique. Elle peut se propager dans le vide à une vitesse $c = 3 \times 10^8$ m/s.

Figure 2-4-8 · La lumière traverse l'espace vide, mais pas le son.



Fait essentiel

Pour des ondes sur une même corde soumise à la même tension, augmenter l'amplitude augmente l'énergie transportée par l'onde, mais ne modifie pas la vitesse de l'onde. La vitesse dépend des propriétés du milieu, comme la tension et la masse par unité de longueur pour une corde tendue.

Question de liaison

Comment le mouvement harmonique simple aide-t-il à décrire une onde sinusoïdale ?

Dans une onde sinusoïdale idéale, chaque point du milieu oscille autour de sa position d'équilibre, tandis que la perturbation se propage à travers le milieu.

Exemple travaillé

Une onde sinusoïdale se propage dans la direction positive des x. Un graphique déplacement-position ($y - x$) montre la forme d'onde au temps t =0 s. Un graphique déplacement-temps ($y - t$) montre le mouvement du point à x= 3,0 m. Déterminez l'amplitude, la longueur d'onde et la période.

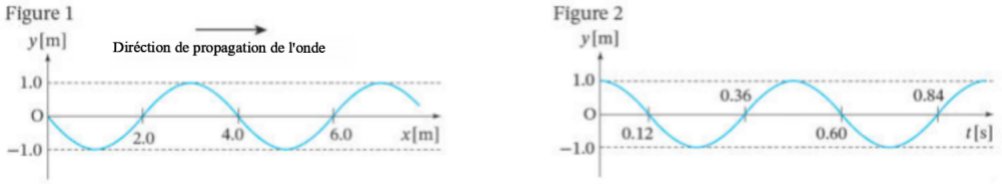


Figure 2-4-9 · La même onde lue en fonction de la position et en fonction du temps.

Situation	Le graphique $y - x$ donne la forme d'onde à t= 0 s ; le graphique $y - t$ donne le mouvement du point à x = 3,0 m.
Données et éléments demandés	**Donné :**graphique $y - x$: hauteur de crête et un cycle complet le long de x· Graphique $y - t$: un cycle complet le long de t. **Requis :**amplitude = ? · longueur d'onde = ? · période = ?
Représentation	Les deux graphiques donnent des quantités différentes : prenez la longueur d'onde et l'amplitude à partir de l'instantané ($y - x$), et la période à partir de la trace temporelle ($y - t$). Marquez un cycle complet sur chacun avant d'effectuer la lecture.
Stratégie	À partir de l'instantané $y - x$, lisez la longueur d'onde et l'amplitude ; à partir de la trace y − t d'un point, lisez la période ; si une vitesse est ensuite demandée, combinez-les avec $v = f\lambda$.
Solution annotée	**1)** Amplitude à partir de la hauteur (elle peut être lue sur l'un ou l'autre graphique — la crête atteint la même hauteur) : la crête est à y= 1,0 m, donc l'amplitude est de 1,0 m. **2)** Longueur d'onde à partir du graphique $y - x$(un intervalle complet de crête à crête le long de x) : un cycle s'étend de 0 à 4,0 m, donc la longueur d'onde est de 4,0 m. **3)** Période à partir du graphique $y - t$(un cycle complet le long de t) : un cycle s'étend de 0,12 s à 0,60 s, donc la période est $0.60 - 0{,}12 = 0{,}48$ s.
Vérification de la cohérente	L'amplitude et la longueur d'onde sont lues sur le graphique ($y - x$), leurs unités sont donc des mètres. La période est lue sur le graphique ($y - t$), son unité est donc la seconde. Cela est cohérent avec les définitions de ces grandeurs.
Explique-le toi-même	Pourquoi la période peut-elle être déterminée à partir du graphique y − t mais pas à partir du graphique y − x?

À toi d'essayer :une onde sinusoïdale se propage dans la direction +x; son graphique $y - x$ montre un cycle complet de x= 0 à x= 2,0 m avec une hauteur de crête de 1,5 m, et son graphique y − t(pour le point à x = 2,0 m) montre un cycle complet sur 0,40 s.**Détermine** l'amplitude, la longueur d'onde et la période.

Essayer

(a) Un objet en mouvement harmonique simple a une période de 2,0 s. Détermine sa fréquence en Hz.

(b) Une onde sinusoïdale a une longueur d'onde de 2,0 m et une fréquence de 3,0 Hz. Détermine la vitesse à laquelle elle se déplace en m/s.

(c) Pour l'onde sinusoïdale de la figure 2-4-10 (y – x à t = 0 s ;y – t pour le point à x = 2,0 m), détermine (i) l'amplitude en m, (ii) la longueur d'onde en m, (iii) la période en s.

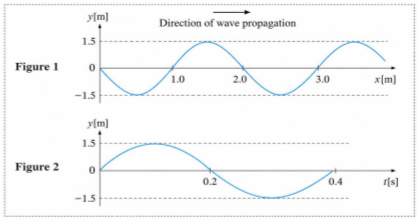


Figure 2-4-10 · Deux graphiques d'une onde.

(d) Une onde sinusoïdale se déplaçant dans la direction +x à 4,0 m/s a la forme d'onde du graphique à t = 0 s. Dessinez-la à t = 0,50 s.

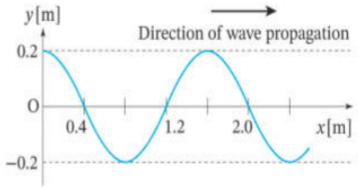


Figure 2-4-11 · Une onde d'amplitude 0,2 m.

> **Conseil d'examen**
>
> Montrez l'étape de substitution — écrivez $v = f\lambda$ avec les nombres insérés avant le résultat. Pour un croquis d'onde en mouvement, décalez l'onde de $d = v \times \Delta t$ dans la direction de propagation.

Dans un nouveau contexte — les deux vagues d'un séisme

Lorsqu'un séisme se produit, il génère différents types d'ondes sismiques. Les ondes primaires, ou **ondes P**, sont longitudinales et se propagent généralement plus vite. Les ondes secondaires, ou **ondes S**, sont transversales et se propagent plus lentement. Les deux ondes quittent la source presque en même temps, mais l'onde P atteint une station de surveillance en premier.

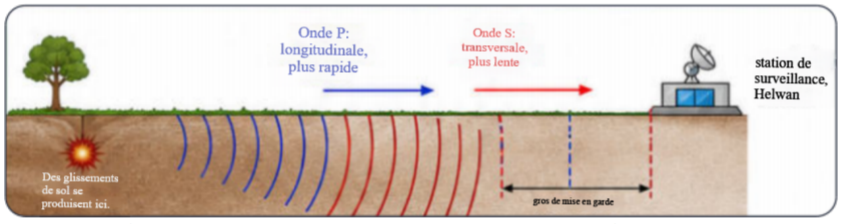


Figure 2-4-12 · L'onde P, plus rapide, arrive en premier, laissant un intervalle d'alerte.

À ton tour : L'onde P et l'onde S quittent la source presque en même temps, mais l'onde P se déplace plus vite. Expliquez pourquoi l'écart de temps entre leurs arrivées augmente pour une station plus éloignée de la source.

> **Conseil d'examen**
>
> Indiquez f = $\frac{1}{T}$ et $v = f\lambda$, puis montrez l'étape de substitution — les points sont attribués pour un calcul correct.

Nature de la science : modèles et preuves — Hertz détecte les ondes prédites par Maxwell

La théorie électromagnétique de Maxwell prédisait que la lumière est une onde électromagnétique et que des ondes électromagnétiques pouvaient être générées électriquement. En 1887, Heinrich Hertz généra et détecta des ondes électromagnétiques en laboratoire à l'aide d'un émetteur à étincelles et d'une boucle réceptrice. Cela fournit une preuve expérimentale de la prédiction de Maxwell.

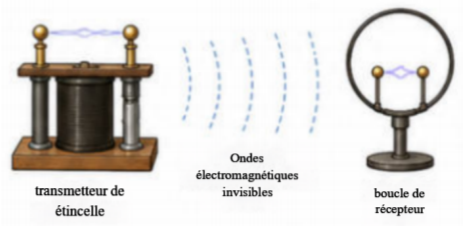


Figure 2-4-13 · Émetteur à étincelles et boucle de réception de Hertz.

À ton tour : Pourquoi les preuves expérimentales de Hertz étaient-elles essentielles pour confirmer la prédiction de Maxwell ?

Question de cours, avec réponse

Dans une ola de stade, la perturbation et son énergie se déplacent autour du stade, mais les spectateurs ne se déplacent pas avec la ola. Chaque spectateur monte et descend autour de sa position, puis revient à sa position d'équilibre. De même, dans une onde mécanique, les particules du milieu oscillent autour de leurs positions d'équilibre tandis que l'onde transfère de l'énergie à travers le milieu.



Figure 2-4-14 · La ola de stade revisitée.

Exercice

(a) Un mouvement harmonique simple a une période de 0,10 s. Détermine sa fréquence en Hz.

(b) Un mouvement harmonique simple a une période de 4,0 s. Détermine sa fréquence en Hz.

(c) Une onde sinusoïdale a une période de 0,20 s et une longueur d'onde de 3,0 m. Détermine sa vitesse en m/s.

(d) Une onde sinusoïdale a une longueur d'onde de 1,5 m et une fréquence de 4,0 Hz. Détermine sa vitesse en m/s.

(e) Pour l'onde sinusoïdale des graphiques ($y-x$ à t =0 s ; $y-t$ pour le point à x= 2,0 m), détermine
(i) l'amplitude en m
(ii) la longueur d'onde en m
(iii) la période en s.

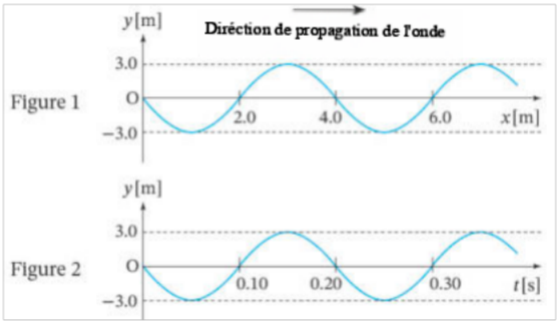


Figure 2-4-15 · Deux graphiques d'une onde, pour l'exercice.

(f) Une onde sinusoïdale se déplaçant dans la direction +x à 1,0 m/s a la forme d'onde de 2-4-16 à t= 0 s. Dessine-la à t=1 ,0 s.

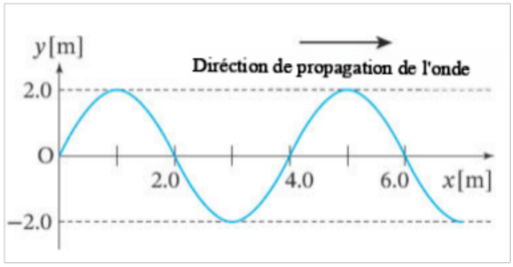
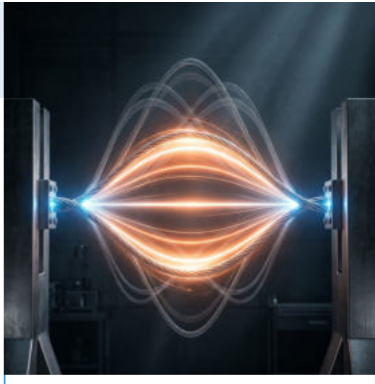


Figure 2-4-16 · Une onde d'amplitude 2,0 m.

Question type examen

Une onde sinusoïdale sur une corde a un graphique $y-x$ montrant une longueur d'onde de 0,60 m et un graphique $y-t$ montrant une période de 0,20 s.

Déterminez la fréquence, puis déterminez la vitesse de l'onde en m/s



Leçon 2-5 — Onde Interférence et ondes stationnaires

❓ **Question de la leçon**: Lorsque deux haut-parleurs émettent des ondes sonores cohérentes de même fréquence, le son peut être fort à certaines positions et faible à d'autres. Dans quelles conditions les ondes se renforcent-elles ou s'annulent-elles ?

Tu vas apprendre à

À la fin de cette leçon, tu seras capable de :

1. Appliquer le principe de superposition pour déterminer le déplacement résultant lorsque deux ondes se chevauchent.
2. Utiliser la différence de chemin pour prédire les interférences constructives et destructives pour des sources cohérentes.
3. Décrire comment deux ondes de même fréquence et de même amplitude se propageant en sens opposés peuvent former une onde stationnaire.

🔍 Le phénomène — prédis avant de poursuivre

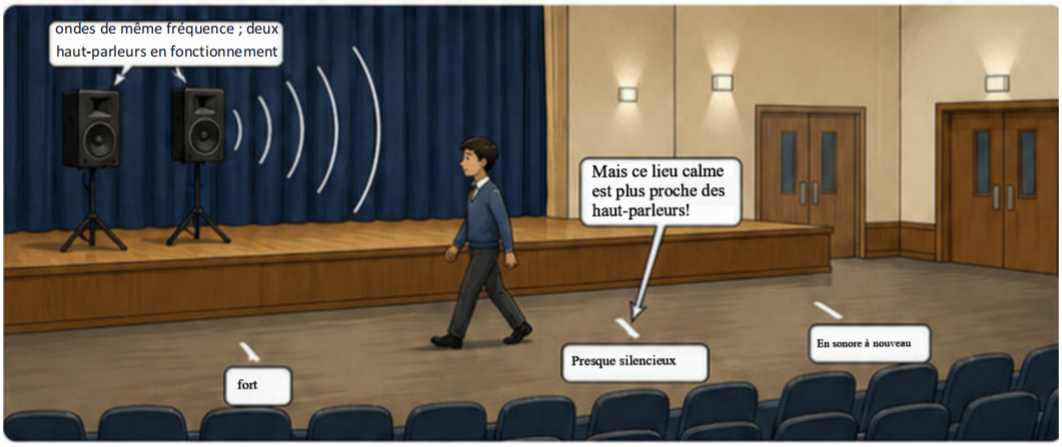


Figure 2-5-1 · Deux haut-parleurs créent des zones de forte et de faible intensité dans la salle.

Avant un concert scolaire, une tonalité de test stable est diffusée par les deux haut-parleurs de la scène. En longeant le devant, la note est forte, puis presque inaudible, puis de nouveau forte — un motif qui se répète. Ce qui est surprenant, c'est que cette zone de faible intensité est plus proche des haut-parleurs que la zone de forte intensité suivante le long de votre trajet.

Prédis avant de poursuivre

(a) Un point plus éloigné des haut-parleurs est-il toujours moins sonore ? Expliquez pourquoi cela peut ne pas être vrai lorsque deux ondes interfèrent.

(b) Si deux haut-parleurs identiques sont utilisés au lieu d'un seul, chaque point de la salle doit-il nécessairement être plus sonore ? Expliquez.

Fait essentiel

Lorsque deux ondes se superposent en un point, le déplacement résultant est la somme algébrique des déplacements dus à chaque onde : $y = y_1 + y_2$ C'est le principe de superposition. Après s'être superposées, les ondes continuent de se propager comme avant, à condition que le milieu se comporte de manière linéaire.

Explorer — Observer l'interférence des ondes à la surface de l'eau

Ce que tu feras : crée deux séries d'ondulations à la surface de l'eau et observe leur figure d'interférence.

Temps : 12 min

Tu auras besoin de :

- Un plateau large et peu profond.
- De l'eau sur environ 1 cm de profondeur.
- Deux doigts ou deux pointes de crayon fixées à quelques centimètres l'une de l'autre.
- Une lampe puissante ou la lampe torche d'un téléphone.

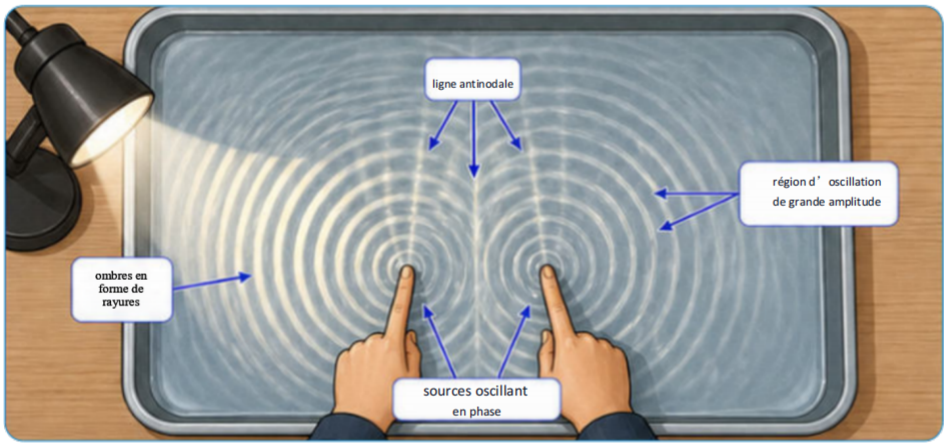


Figure 2-5-2 · Deux sources en phase sur une cuve à ondes créent des lignes de grande et de petite oscillation.

Étapes :

1. Remplis le plateau d'eau et laissez la surface devenir calme.
2. Trempe les deux pointes de crayon ou les doigts dans l'eau et tapez la surface ensemble à un rythme régulier. Observe le motif des ondulations et les ombres au fond du plateau.
4. Identifiez les lignes où l'eau reste presque immobile et les régions voisines où l'eau oscille fortement.
5. Augmentez la fréquence des tapes et observez comment l'espacement entre les lignes immobiles adjacentes change.

Rythme des tapes	Nombre de lignes immobiles observées	Espacement entre les lignes immobiles adjacentes
Lent et régulier		
Plus rapide et régulier		

Analyse ce que tu as recueilli :

(a) Les lignes immobiles sont-elles approximativement régulièrement espacées ? Qu'advient-il de leur espacement lorsque la fréquence de tapotement est augmentée ?

(b) Les deux sources tapotent en phase. Pourquoi certains points entre les sources restent-ils presque immobiles ?

Écris ton explication en deux lignes avant de lire la page suivante.

De l'observation au modèle

Dans Explorer, des lignes le long desquelles l'eau restait presque immobile (lignes nodales) se sont formées dans la figure d'interférence produite par les deux sources en phase, et leur espacement diminuait à mesure que la fréquence augmentait. Vous aviez peut-être prédit « deux sources, amplitude plus grande partout » ; c'est ce que fait la plupart des gens. Les sources continuaient de vibrer au même rythme, donc la figure observée résulte de la superposition des deux ondes là où elles se chevauchent.

Deux ondes en un point — les déplacements s'additionnent

Lorsque deux ondes se rencontrent en un point d'un milieu linéaire, le déplacement résultant est égal à la somme algébrique des déplacements produits par les deux ondes : $y = y_1 + y_2$.

Si deux crêtes arrivent ensemble, le déplacement résultant est plus grand ; c'est une interférence constructive. Si une crête et un creux égaux arrivent ensemble, le déplacement résultant est nul ; c'est une interférence destructive.

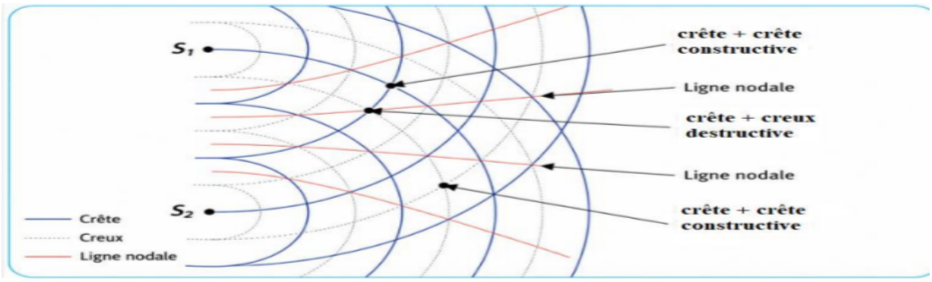


Figure 2-5-3 · Crête sur crête s'amplifie ; crête sur creux s'annule.

La différence de marche décide — exprimée en demi-longueurs d'onde

Pour deux sources cohérentes S_1 et S_2, la différence de marche en un point P est : $\Delta d = |S_1 P - S_2 P|$ où $S_1 P$ et $S_2 P$ sont les distances des deux sources au point P.

Pour deux sources cohérentes vibrant en phase, une interférence constructive se produit lorsque $\Delta d = n\lambda$, où $n = 0, 1, 2, 3, \cdots$. Une interférence destructive se produit lorsque $\Delta d = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$, où $n = 0, 1, 2, 3, \cdots$.

Si les deux sources cohérentes vibrent en opposition de phase, les conditions sont inversées : les différences de marche qui produisaient une interférence constructive pour des sources en phase produisent une interférence destructive, et vice-versa.

Point

- La grandeur qui représente l'état de vibration d'un milieu — son déplacement et sa vitesse — est appelée la **phase**. Deux points dans le même état de vibration sont dits en phase; deux points dont les déplacements sont égaux et opposés à chaque instant, de sorte que leurs directions de mouvement sont également opposées, sont en **opposition de phase**.
- Le phénomène dans lequel des ondes issues de sources cohérentes se superposent et produisent des effets différents d'un endroit à l'autre est appelé **interférence** des ondes.e)Là où une crête rencontre une crête, ou un creux rencontre un creux, les ondes se renforcent : il s'agit d'interférence constructive et, pour deux sources cohérentes en phase, la différence de marche est $n\lambda$. Là où une crête rencontre un creux, les ondes s'annulent : il s'agit d'interférence destructive et la différence de marche est $(n + ½)\lambda$.
- Lorsque deux ondes cohérentes de même fréquence et de même amplitude se propagent dans des **directions opposées** et interfèrent, le motif ne se déplace plus : une onde stationnaire se forme. Les points qui ne bougent jamais sont des nœuds, et les points qui oscillent avec la plus grande amplitude sont des ventres.

Encadré d'équation

Interférence constructive (sources cohérentes en phase)	**Différence de marche** $= n\lambda$
Interférence destructive	**Différence de marche** $= \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$

Application rapide : Deux sources cohérentes en phase émettent des ondes de longueur d'onde 4,0 cm ; les trajets jusqu'à un point diffèrent de 6,0 cm. Indiquez le nombre de demi-longueurs d'onde et précisez si le point subit une interférence constructive ou destructive.

Fait essentiel

La différence de marche en un point (P) est la différence entre les distances des deux sources à ce point : $\Delta d = |S_1 P - S_2 P|$.

Elle détermine si les ondes arrivent en phase ou en opposition de phase.

Livret de données

$n\lambda$ et $\left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$ sont imprimés dans la section des ondes, où n est un nombre entier (0, 1, 2, ⋯). Utilisez la différence de marche et son nombre de demi-longueurs d'onde pour choisir le type d'interférence.

Ondes stationnaires produites par des ondes se propageant en sens opposés Une onde stationnaire se forme lorsque deux ondes cohérentes de même fréquence et de même amplitude se propagent en sens opposés et interfèrent. Le motif résultant ne se déplace pas le long du milieu. Au lieu de cela, des points fixes appelés nœuds restent à un déplacement nul, tandis que des points appelés ventres oscillent avec une amplitude maximale.

• **Un nœud** est un point d'une onde stationnaire qui reste au repos.

• **Un ventre** est un point d'une onde stationnaire où l'amplitude est maximale.

Résonance et ondes stationnaires. La résonance se produit lorsqu'un système est excité à une fréquence proche de l'une de ses fréquences propres, provoquant une oscillation de grande amplitude. Dans une corde fixée à ses deux extrémités, seules certaines fréquences produisent des ondes stationnaires stables motifs.

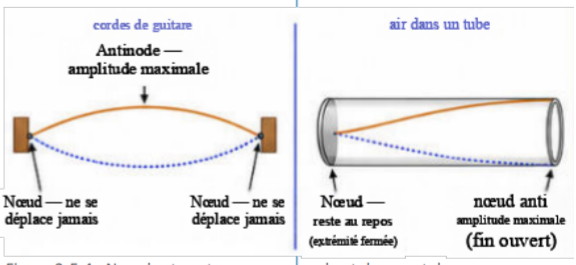
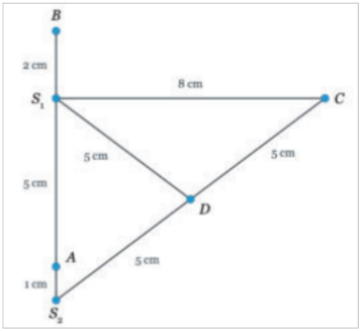


Figure 2-5-4 · Nœuds et ventres sur une corde et dans un tube.

Exemple traité

Interférence de deux sources à la surface de l'eau

Figure 2-5-5 · Différences de chemin des deux sources vers quatre points.



Situation	Deux sources d'ondes aquatiques en phase, S_1 et S_2, produisent une figure d'interférence. Les points A, B, C et D sont indiqués avec leurs distances par rapport aux deux sources, en centimètres. En tout point P, le type d'interférence est déterminé par la différence de marche : $\Delta d = \lvert S_1P - S_2P \rvert$.
Données et requis	**Données**: amplitude de chaque onde = 0,30 cm, longueur d'onde λ = 4,0 cm, donc $\lambda/2$ = 2,0 cm. **Requis**: identifier les points constructifs parmi A, B, C et D; trouver le nombre de points constructifs P entre S_1 et S_2; trouver les amplitudes résultantes en C et en D; et trouver l'amplitude résultante en D lorsque les sources émettent en opposition de phase.
Représentation	Utilisez la différence de marche $\Delta d = \lvert S_1P - S_2P \rvert$. Pour des sources en phase, les multiples pairs de $\frac{\lambda}{2}$ donnent des interférences constructives, et les multiples impairs de $\frac{\lambda}{2}$ donnent des interférences destructives
Stratégie	Puisque $\lambda/2$ = 2,0 cm, comparez chaque différence de marche avec des multiples de 2,0 cm : 0, 4, 8, ⋯ cm sont constructifs ; 2, 6, 10, ⋯ cm sont destructifs.
Solution annotée	**(a)** Différence de marche en chaque point : A: Δd = 4 cm = $2(\frac{\lambda}{2})$ → constructif. B: Δd = 6 cm = $3(\frac{\lambda}{2})$ → destructif. C: Δd = 2 cm = $1(\frac{\lambda}{2})$ → destructif. D: Δd = 0 = $0(\frac{\lambda}{2})$ → constructif. Donc, les points constructifs sont A et D. **(b)** Entre S_1 et S_2, l'interférence constructive se produit lorsque Δd = 0 ou 4 cm, ce qui donne trois points : (S_1P, S_2P) = (3 cm, 3 cm), (1 cm, 5 cm), (5 cm, 1 cm). **(c)** En C, l'interférence est destructive, donc l'amplitude résultante est de 0 cm. En D, l'interférence est constructive, donc l'amplitude résultante est de 0,30× 2 = 0,60 cm. **(d)** Si les sources émettent en opposition de phase, D devient destructive, donc l'amplitude résultante est de 0 cm.

Vérification de la cohérente	Les résultats suivent la règle des sources en phase : des trajets égaux ou des différences de demi-longueur d'onde paires donnent une interférence constructive ; des différences de demi-longueur d'onde impaires donnent une interférence destructive.
Explique-le toi même	Trouvez la di仟érence de trajet erence from S_1 and S_2, puis comparez-la avec $\frac{\lambda}{2}$. Si le nombre de demi-longueurs d'onde est pair, l'interférence est constructive ; s'il est impair, l'interférence est destructive.

À toi d'essayer : deux sources cohérentes en phase, distantes de 10 cm, avec une longueur d'onde de 6,0 cm et une amplitude de 0,50 cm. Au point P, les deux distances sont S_1P= 28 cm et S_2P= 37 cm. **Déterminez** la di仟érence de trajet, son nombre de demi-longueurs d'onde et l'amplitude en P— d'abord avec les sources en phase, puis en opposition de phase.

Essayez

Détermine ce qui suit.

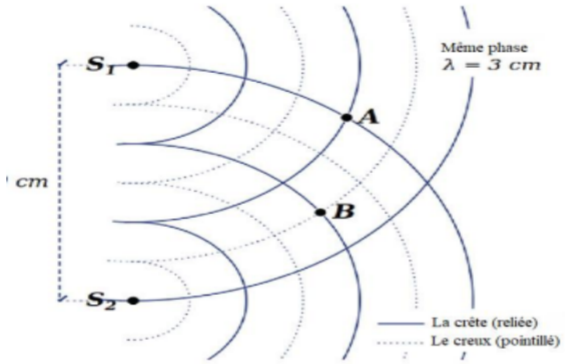


Figure 2-5-6 · Deux sources distantes de 9 cm émettant des ondes de longueur d'onde 3 cm.

(a) Comme le montre la figure, deux sources S_1 et S_2, **distantes de 9 cm**, vibrent en phase et émettent des ondes de **longueur d'onde 3 cm**; la figure montre les crêtes en traits pleins et les creux en pointillés à un instant donné.

(i) Déterminer si les points A et B sont des points d'interférence constructive ou destructive.

(ii) Déterminer combien de lignes immobiles (lignes d'interférence destructive) se trouvent entre S_1 et S_2.

(b) Deux ondes de **longueur d'onde 5,0 cm** et d'**amplitude 1,0 cm** sont émises depuis deux points S_1 et S_2. Au point P, les distances sont S_1P**= 30 cm** et S_2P**= 37,5 cm**. Déterminer l'amplitude en P:

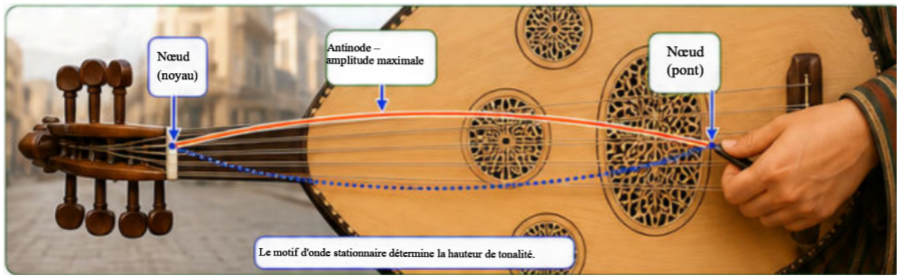
(i) lorsque S_1 et S_2 vibrent en phase _____

(ii) lorsque S_1 et S_2 vibrent en opposition de phase _____

Dans un nouveau contexte — la corde vibrante d'un oud

Lorsqu'une corde d'oud est pincée, des ondes se propagent le long de la corde et se réfléchissent aux extrémités fixes. La superposition des ondes incidentes et réfléchies peut former une onde stationnaire. Comme les extrémités de la corde sont fixes, elles doivent être des nœuds. Dans le mode fondamental, le milieu de la corde est un ventre.

Augmenter la tension de la corde augmente la vitesse de l'onde sur la corde. Pour la même longueur vibrante, cela augmente les fréquences naturelles, donc la hauteur du son devient plus élevée.



Conseil d'examen

Montrez la ligne de différence de chemin dans chaque réponse : écrivez $|S_1P - S_2P|$ et son nombre de demi-longueurs d'onde avant d'énoncer le résultat. Montrer cette étape rend votre raisonnement clair et peut vous rapporter des points de méthode, selon le barème.

Question de liaison

Comment les conditions aux limites d'un système sont-elles liées aux ondes stationnaires qu'il peut supporter ? Une extrémité fixe exige un nœud ; le mode fondamental est l'onde stationnaire la plus simple que de telles extrémités permettent.

➡ Les deux extrémités de la corde pincée sont fixes et ne peuvent pas bouger.

Expliquez pourquoi ces extrémités fixes doivent être des nœuds de l'onde stationnaire.

Nature de la science : Modèles et tendances — un seul principe régissant l'eau, le son et la lumière

Les mêmes règles d'interférence s'appliquent aux ondes à la surface de l'eau, aux ondes sonores et aux ondes lumineuses. L'expérience des fentes de Young a montré des bandes claires et sombres produites par l'interférence constructive et destructive de la lumière. Cela a fourni une preuve solide que la lumière possède des propriétés ondulatoires.

➡ **Propose** pourquoi le même phénomène d'interférence (renforcement et annulation) se produit dans l'eau, le son et la lumière.

Question de la leçon, réponse

Lorsque deux ondes cohérentes issues de sources vibrant en phase se rencontrent, leurs déplacements s'additionnent algébriquement. Aux points où la différence de marche est un nombre entier de longueurs d'onde, $\Delta d = n\lambda$, les ondes arrivent en phase et se renforcent mutuellement. Aux points où la différence de marche est un nombre impair de demi-longueurs d'onde, $\Delta d = (n+\frac{1}{2})\lambda$, les ondes arrivent en opposition de phase et s'annulent mutuellement. Cela explique pourquoi le son provenant de deux haut-parleurs peut être fort à certains endroits et faible à d'autres.

Question type examen

Deux sources cohérentes émettent des ondes aquatiques identiques en phase. Au point M, la surface reste presque immobile.

Expliquez pourquoi M reste presque immobile.

Exercice

Détermine ce qui suit.

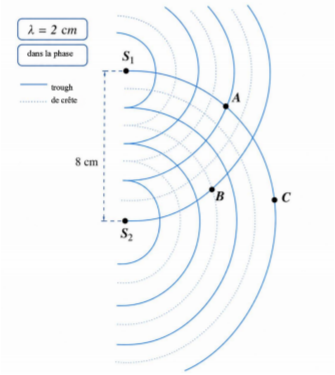


Figure 2-5-7 · Deux sources distantes de 8 cm émettant des ondes de longueur d'onde 2 cm.

(a) Comme le montre la figure, deux sources S1 et S2, distantes de 8 cm, vibrent en phase et émettent des ondes de longueur d'onde 2 cm.

(i) Détermine si les points A et B sont des points d'interférence constructive ou destructive.

(ii) Détermine combien de points de très faible intensité (lignes d'interférence destructive) se trouvent entre S_1 et S_2.

(b) Deux points $S1$ et $S2$ à la surface de l'eau émettent des ondes en phase, d'amplitude 0,30 cm et de longueur d'onde 4,0 cm (atténuation ignorée). Aux points A,B et C, les différences de marche lues sur la figure sont $|\Delta A|$ = 4 cm, $|\Delta B|$ = 0 cm et $|\Delta C|$ = 6 cm. Détermine l'amplitude en A,B et C, en cm.

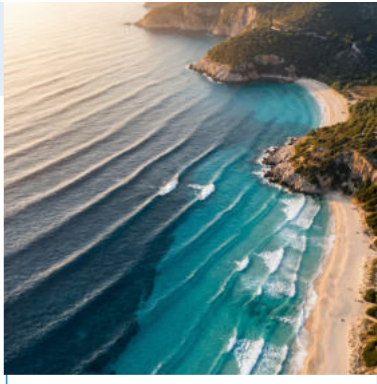
(c) Deux ondes de longueur d'onde 6,0 cm et d'amplitude 0,40 cm sont émises depuis S_1 et S_2. Au point P, les distances sont S_1 P= 20 cm et S_2 P= 35 cm. Détermine l'amplitude en P:

(i) lorsque S1 et S2 vibrent en phase

(ii) lorsque S1 et S2 vibrent en opposition de phase

Fait essentiel

Pour le point (b), $\frac{\lambda}{2}$ = 2,0 cm. Exprimez chaque différence de marche comme un multiple de $\frac{\lambda}{2}$, puis déterminez si l'interférence est constructive ou destructive.



Leçon 2- 6 — Réfraction des ondes

❓ **Question de la leçon**: Lorsqu'une onde entre dans un milieu où sa vitesse est différente, pourquoi sa direction change-t-elle à la frontière ?

Tu apprendras à

À la fin de cette leçon, tu seras capable de :

- **Déterminer** une vitesse d'onde, une longueur d'onde ou un angle inconnus à une frontière en utilisant la law $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$.
- **Expliquer** que la réfraction se produit parce que la vitesse de l'onde change à une frontière, alors que la fréquence reste constante.
- **Utiliser** $v = f\lambda$ pour expliquer pourquoi la longueur d'onde change lorsque la vitesse de l'onde change.

🔍 Le phénomène — prédire avant de continuer



Figur e 2-6-1· VAgUeS Se cOUrBENt Et LeUr eSpACeMeNt rÉtrÉcIt DaNS UNe eAu MoINS PROFONdE.

Tenez-vous sur une plage de la côte nord et regardez la mer. Au loin, les crêtes des vagues s'approchent sous un angle oblique, inclinées à travers l'eau. Mais au moment où elles atteignent le sable, ces mêmes crêtes se sont réfractées et arrivent presque parallèlement au rivage — à chaque fois, quel que soit l'angle depuis lequel elles sont parties en eau profonde au large.

✏️ Prédis avant de poursuivre

(a) Pourquoi les vagues de la mer atteignent-elles généralement le rivage avec leurs crêtes presque parallèles au littoral ? Leur direction reste-t-elle inchangée, ou change-t-elle à mesure que l'eau devient moins profonde ?

(b) Les vagues se déplacent plus lentement en eau peu profonde. Comment ce changement de vitesse affecte-t-il la direction des fronts d'onde à l'approche du rivage ?

⭐ Fait essentiel

Pour une onde, $v = f\lambda$, où v est la vitesse de l'onde, f est la fréquence, et λ est la longueur d'onde. Un front d'onde est une ligne joignant des points qui sont en phase, comme des points situés sur la même crête. Un rayon est une ligne tracée perpendiculairement au front d'onde, indiquant la direction de propagation de l'onde.

Explorer — Observer la réfraction des ondes planes à la surface de l'eau

Ce que tu feras : observe comment des ondes rectilignes à la surface de l'eau changent de direction en passant entre des zones de profondeurs différentes.

Durée :12 min

tu auras besoin de :

- Un plateau large et peu profond.
- De l'eau sur environ 1 cm de profondeur.
- Une plaque plate ou une tuile pour créer une zone moins profonde.
- Une règle pour générer des fronts d'onde rectilignes.
- Une lampe de poche ou une lampe.

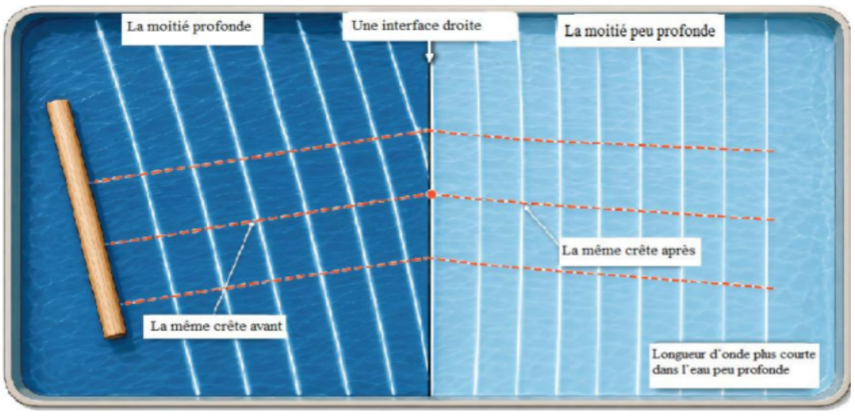


Figure 2-6-2 · t La longueur d'onde raccourcit dans la moitié peu profonde du réservoir.

Étapes :

1. Place la plaque dans le bac de sorte qu'une région soit plus profonde et l'autre moins profonde, avec une limite droite entre elles.
2. Éclaire l'eau par le côté afin que les fronts d'onde soient bien visibles.
3. Utilise la règle pour générer des fronts d'onde droits dans la région plus profonde, dirigés vers la limite avec un angle.
4. Dessine un front d'onde juste avant qu'il atteigne la limite et un autre juste après son entrée dans la région moins profonde.
5. Répète avec un angle d'incidence plus petit et comparez le changement de direction.

Front d'onde incident	Angle par rapport à la limite avant la traversée	Angle par rapport à la limite après la traversée	Direction de la réfraction
Angle plus fort			
Angle plus petit			

Analyse ce que tu as recueilli :

(a) Lorsque les vagues sont entrées dans la région moins profonde, les fronts d'onde sont-ils devenus plus presque parallèles à la limite ?

(b) Lorsque la vague est entrée dans la région moins profonde, quelles grandeurs ont changé : la vitesse, la longueur d'onde ou la fréquence ? Laquelle est restée constante ?

Rédige ton explication en deux lignes au maximum avant de lire la page suivante.

Une note de mesure

la courbure est faible et les crêtes se déplacent rapidement, alors évaluez l'angle à partir de votre croquis, et non par observation directe en temps réel : enregistrez (dessinez) une crête avant la marche et une après, puis mesurez les deux angles à partir de la même ligne de marche

De l'observation au modèle

dans l'exploration, une crête traversant vers la moitié moins profonde et plus lente a pivoté pour devenir presque parallèle à la limite, tandis que le rythme d'arrivée des crêtes restait constant. Bien qu'on puisse prédire que les crêtes des vagues continuent dans leur direction d'origine ou soient déviées par le vent, les observations montrent que la réfraction se produit parce que la vitesse de l'onde change au changement de profondeur. ces données probantes indiquent le modèle suivant.

Fronts d'onde et rayons

Un front d'onde est une ligne ou une surface reliant des points d'une onde qui sont en phase. Pour les vagues à la surface de l'eau, un front d'onde peut être représenté par une ligne de crête. Un rayon est tracé perpendiculairement au front d'onde et indique la direction de propagation de l'onde.

À une limite, l'angle d'incidence et l'angle de réfraction sont mesurés par rapport à la normale, qui est une ligne perpendiculaire à la limite.

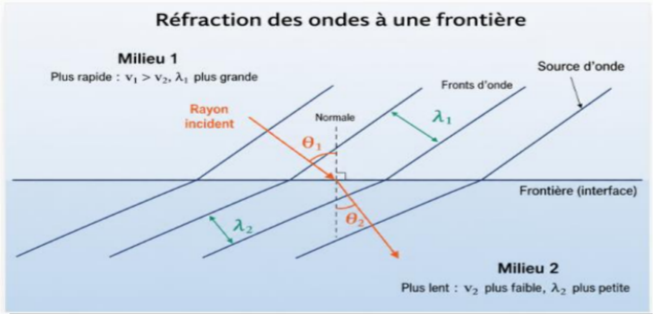


Figure (3.6.2) : La direction de l'onde et la distance entre les ondes changent à l'interface.

Pourquoi un changement de vitesse réfracte l'onde

Lorsqu'un front d'onde atteint une limite selon un angle, un côté du front d'onde entre dans le nouveau milieu avant l'autre côté. si la vitesse de l'onde est différente dans le nouveau milieu, ce côté change de vitesse avant l'autre, ce qui fait pivoter le front d'onde. c e changement de direction est appelé réfraction.

si l'onde entre dans un milieu plus lent, le rayon se rapproche de la normale. si elle entre dans un milieu plus rapide, le rayon s'écarte de la normale.

La fréquence de l'onde est déterminée par la source et reste constante lorsque l'onde franchit la limite. Puisque v = $f\boldsymbol{\lambda}$, une diminution de la vitesse de l'onde (v) à fréquence constante (f) entraîne une diminution de la longueur d'onde ($\boldsymbol{\lambda}$).

La relation de réfraction

Pour les ondes franchissant une limite, $\dfrac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \dfrac{v_1}{v_2} = \dfrac{\lambda_1}{\lambda_2}$

Pour la lumière, la loi de Snell est souvent écrite comme : $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$ où n est l'indice de réfraction.

Point

- Lorsqu'une onde se propage dans l'espace, le lieu de tous les points qui oscillent en phase est appelé un front d'onde. Un front d'onde se déplace avec le temps dans une direction **perpendiculaire à lui-même**. Une flèche tracée perpendiculairement à un front d'onde dans la direction de propagation de l'onde est appelée un rayon.
- L'angle θ_1 entre la normale et le rayon incident est l'angle d'incidence; l'angle θ_2 **entre la normale** et le rayon réfracté est l'angle de réfraction.
- Lorsqu'une onde passe du milieu 1, où sa vitesse est v_1 et sa longueur d'onde est λ_1, au milieu 2, où sa vitesse est v_2 et sa longueur d'onde est λ_2, la fréquence ne change pas. Par conséquent :

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = {}_1n_2$$

où ${}_1n_2$ est l'indice de réfraction du milieu 2 par rapport au milieu 1.
Cette relation peut être écrite sous la forme de la loi de Snell-Descartes de la refraction :
$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$

Réfraction
la déviation de la direction de propagation d'une onde à une frontière, causée par le changement de sa vitesse d'un milieu à l'autre

Encadré d'équation

réfraction des ondes	$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$ $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$

Application rapide : Une onde franchit une frontière avec $\theta_1 = 45°$ et $\theta_2 = 30°$ (prendre $\sqrt{2} = 1{,}4$). **Déterminer** le rapport $\frac{v_1}{v_2}$ des vitesses.

Exemple travaillé

les lignes pointillées de la figure sont les fronts d'onde lorsque des ondes d'eau passent d'un milieu 1 au milieu 2. La longueur d'onde de l'onde incidente dans le milieu 1 est **1,4 cm** et la fréquence est **50 Hz**. Le rayon forme un angle de **45°** avec la normale dans le milieu 1 et de **30°** dans le milieu 2. prendre $\sqrt{2} = 1.4$. **Déterminez** (a) l'indice de réfraction du milieu 2 par rapport au milieu 1, (b) les vitesses des ondes dans les deux milieux, et (c) la longueur d'onde dans le milieu 2 — chacun à deux chiffres significatifs.

Problème	Les lignes en pointillés sont des fronts d'onde lorsque les vagues passent du milieu 1 au milieu 2. dans le milieu 1, $\lambda_1 = 1{,}4$ cm et f = 50 Hz ; le rayon rencontre la normale à 45 ° dans le milieu 1 et à 30 ° dans le milieu 2. prendre $\sqrt{2} = 1{,}4$. Trouver, à 2 chiffres significatifs près : (a) l'indice de réfraction n_{12}; (b) les vitesses v_1 et v_2; (c) la longueur d'onde λ_2.
Situation	Des vagues traversent une frontière. Milieu 1 : $\lambda_1 = 1{,}4$ cm, $f = 50$ Hz, rayon à $\theta_1 = 45°$ par rapport à la normale. Milieu 2 : *rayon à* $\theta_2 = 30$ °. Trouver l'indice relatif, les deux vitesses d'onde et λ_2.
Données et exigences	**Donné :** $\lambda_1 = 1{,}4$ cm · $f = 50$ Hz · $\theta_1 = 45°$ · $\theta_2 = 30°$ · $\sqrt{2} = 1{,}4$ **Requis :** $n_{12} = ?$ · $v_1 = ?$ · $v_2 = ?$ · λ_2 **= ?**
Représentation	Dans le milieu 2, les fronts d'onde sont plus rapprochés et se trouvent plus près de la frontière (un angle plus petit), donc le rayon se rapproche de la normale ($\theta_2 < \theta_1$) : le milieu 2 est le milieu le plus lent. la fréquence reste inchangée à travers la frontière — seuls v et λ changent.
Stratégie	Tracer la normale, lire θ_1 et θ_2, puis utiliser un rapport constant $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$. Dans θ_2 et λ_2 = et lire off chaque inconnue
Solution annotée	Les angles donnent l'indice — prendre le rapport des sinus. $n_2 = \frac{\sin 45}{\sin 30} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ $2 = \sqrt{2} = 1.4$ Première vitesse à partir de $v = f\lambda$ (un produit) . $v_1 = f\lambda_1 = 50 \times 1{,}4 = 70$ cm/s Deuxième vitesse à partir du même rapport (une division) . $v_2 = \frac{v_1}{\sqrt{2}} = \frac{70}{\sqrt{2}} \approx 50$ m/s Longueur d'onde à partir du même rapport (une division) . $\lambda_2 = \frac{\lambda_1}{\sqrt{2}} = \frac{1.4}{\sqrt{2}} \approx 1{,}0$ cm $n_{12} = 1{,}4$ $v_1 = 70$ cm/s $v_2 = 50$ cm/s
Vérification de la vraisemblance	Le rayon se rapproche de la normale dans le milieu 2, donc le milieu 2 est le milieu le plus lent. par conséquent $v_2 < v_1$ et $\lambda_2 < \lambda_1$, tandis que la fréquence reste inchangée.
e Expliquez-le Vous-même	La fréquence, 50 Hz, n'a été utilisée qu'une seule fois — pour trouver v_1. Pourquoi n'a-t-elle pas été nécessaire again to find v_2? idée : v_2 provient du ratio $v_1 : v_2 = \sqrt{2} : 1$, qui ne contient aucune fréquence. f est inchangée à travers la frontière, donc once $v_1 = f\lambda_1$ connu, le ratio gives v_2 directement.

Conseil pour l'examen :

Si n_2 désigne l'indice de réfraction du milieu 2 par rapport au milieu 1, alors $n_2 = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{n_2}{n_1}$ la formule place l'angle d'incidence au numérateur ; une autre forme s'écrit : $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$

Elle exprime la même relation, puisque $n_2 = \frac{n_2}{n_1}$

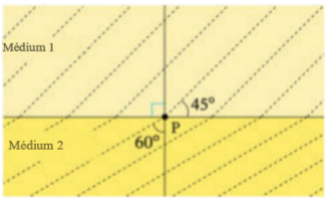


Figure 2-6-4 · Waves Rents At 45° in Medium 1 et 60° dans le milieu2.

Livret de données

Citation $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$, et rappelez-vous que pour les ondes, c'est le rapport constant $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$. choisissez la relation, lisez les angles d'après la géométrie du front d'onde, puis les vitesses ou les longueurs d'onde suivent

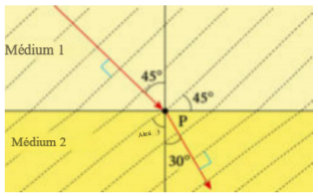


Figure 2-6-5 · The RAY Bends toward the Normal en entrant dans le milieu plus lent.

À toi d'essayer : Les vagues d'eau passent du milieu 1 au milieu 2 avec le rayon à 45° par rapport à la normale dans le milieu 1 et à 60° dans le milieu 2 ; la vitesse dans le milieu 1 est de 60 cm/s et la fréquence est de 5,0 Hz (prendre =1,4, $\sqrt{3} = 1.7$) . Détermine l' indice relatif et la vitesse de l'onde dans le milieu 2, et indiquez quel milieu est le plus rapide.

Mets-le à l'épreuve : Dans votre bac à eau, comptez les crêtes qui passent par seconde du côté profond et du côté peu profond, et montrez que les fréquences sont égales.

Essayez

les lignes en pointillés de la figure sont les fronts d'onde lorsque les vagues d'eau passent du milieu 1 au milieu 2. Le rayon est à 60° par rapport à la normale dans le milieu 1 et à 30° dans le milieu 2. La vitesse de l'onde incidente dans le milieu 1 est de 30 cm/s et la fré quence est de 4,0 Hz/ Prendre $\sqrt{3} = 1,7$. Détermine ce qui suit à deux chiffres significatifs.

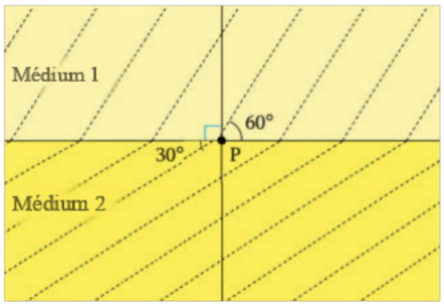


Figure 2-6-6 · Fronts d'onde à 60° dans le milieu 1 et à 30° dans le milieu 2.

(a) Dessine, sur la figure, le rayon indiquant la direction dans laquelle l'onde se propage dans le milieu 1 et dans le milieu 2.

(b) Détermine l'indice de réfraction du milieu 2 par rapport au milieu 1.

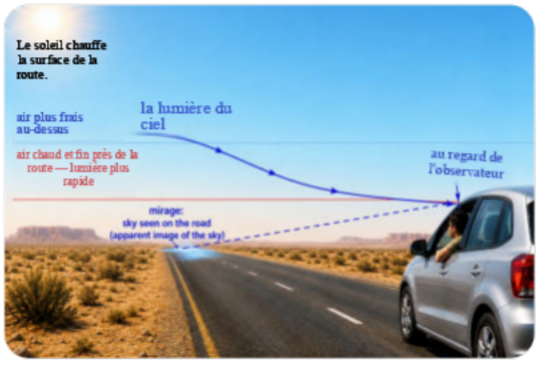
(c) Détermine les longueurs d'onde des ondes dans le milieu 1 et dans le milieu 2, en cm.

(d) Détermine la vitesse de l'onde dans le milieu 2, en cm/s.

Dans un nouveau contexte — Mirage au-dessus d'une route désertique

Par une chaude journée sur une route désertique, l'air juste au-dessus de la surface de la route est plus chaud et moins dense que l'air au-dessus. La lumière se déplace plus vite dans cet air chaud. Lorsque la lumière traverse des couches d'air dont l'indice de réfraction change progressivement, sa trajectoire s'incurve progressivement. La lumière provenant du ciel peut atteindre l'œil de l'observateur depuis une direction proche de la surface de la route, de sorte que la route peut sembler refléter le ciel comme de l'eau.

Figur e 2-6-7· Hot Air NeAr t He r oAD BeNDS l igHt upwar d, montrant un mir age.



À votre tour :chaque fine couche d'air près de la route modifie légèrement la vitesse de la lumière. Expliquez pourquoi le rayon lumineux s'incurve près de la route. Indiquez si le rayon s'écarte de la normale ou s'en rapproche lorsqu'il pénètre dans une couche plus rapide.

Nature de la science : La science comme entreprise partagée — un loi, deux noms, deux pays

la loi de la réfraction est souvent appelée loi de Snell, d'après Willebrord Snellius, qui l'a dérivée vers 1621. René Descartes a publié plus tard la même relation en 1637 dans la Dioptrique.

publier des résultats scientifiques permet à d'autres scientifiques de les tester, de les utiliser et de les développer.

Fait clé

lisez la loi comme « n-un sinus thêta-un égale n-deux sinus thêta-deux ». ceci est équivalent au rapport constant $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$. Tracez d'abord la normale, lisez les deux angles par rapport à elle, substituez les valeurs numériques en dernier, et répondez avec deux chiffres significatifs.

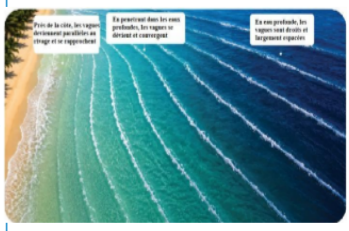
Question de liaison

Comment les modèles ondulatoire et corpusculaire de la réfraction sont-ils liés ?

À votre tour : proposez une raison pour laquelle une découverte écrite mais restée non publiée, comme celle de Snellius, contribue moins à la science qu'une découverte publiée, comme celle de Descartes.

Question de la leçon, corrigée

Lorsqu'une onde passe dans un milieu où elle se déplace à une vitesse différente, pourquoi sa direction se courbe-t-elle à la frontière ? Parce qu'un front d'onde qui atteint la frontière en biais a une extrémité qui change de vitesse avant l'autre, donc la ligne de crête pivote. La fréquence est fixée par la source et ne peut pas changer, donc d'après $v = f\lambda$, une vitesse plus petite correspond à une longueur d'onde plus petite. Les deux angles sont alors reliés aux deux vitesses by $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$— le rapport constant $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$. Le rayon se courbe vers la normale lorsque l'onde entre dans un milieu plus lent et s'éloigne de la normale lorsqu'elle entre dans un milieu plus rapide.



Livret de données

Quote $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$ du livret ; pour les ondes, écrivez-le comme $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$. Votre travail consiste à choisir la bonne et les substituer les angles et les vitesses dans celle-ci, pas à vous rappeler la formule

Conseil d'examen

Montre la relation des rapports de sinus — $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$ — et la substitution qui suit dans chaque réponse ; les examinateurs créditent le raisonnement, pas seulement le nombre final

Question type examen

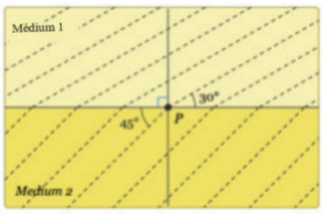
Une onde d'eau passe du milieu 1 au milieu 2. Le rayon fait 60° avec la normale dans le milieu 1 et 45° dans le milieu 2 (prenons $\sqrt{2} = 1{,}4, \sqrt{3} = 1{,}7$).

Détermine l'indice de réfraction du milieu 2 par rapport au milieu 1, et indiquez si la vitesse de l'onde augmente ou diminue.

Exercice

(a) Les lignes pointillées de la Figure 2-6-9 fronts d'onde lorsque les ondes aquatiques passent du milieu 1 au milieu 2. La vitesse de l'onde incidente dans le milieu 1 est de 35 cm/s, et la fréquence est de 50 Hz.

Figur e 2-6-9 · FrONtS d'ONDE à 30° ET 45° à trAvErS lA frontière.



(i) Dessine, dans la figure, la direction dans laquelle l'onde passant par le point p se déplace dans les milieux 1 et 2, respectivement.

(ii) Détermine l'indice de réfraction du milieu 2 par rapport au milieu 1.

(iii) Détermine la vitesse de l'onde dans le milieu 2, en cm/s.

(iv) Détermine la longueur d'onde de l'onde dans le milieu 2, en cm.

(b) Les lignes pointillées de la Figure 2-6-10 représentent les fronts d'onde lorsque les ondes aquatiques passent du milieu 1 au milieu 2. La vitesse de l'onde incidente dans le milieu 1 est de 2,0 m/s, et la fréquence est de 5,0 Hz.



Figur e 2-6-10 · Fronts d'onde à 45° ET 30° à travers la frontière.

(i) Dessine, dans la figure, la direction dans laquelle l'onde passant par le point p se déplace dans les milieux 1 et 2, respectivement.

(ii) Détermine l'indice de réfraction du milieu 2 p a rapp ot au milieu 1.

(iii) Détermine la vitesse de l'onde dans le milieu 2, en m/s.

(iv) Détermine les longueurs d'onde des ondes dans les milieux 1 et 2, respectivement, en m.

(c) les lignes pointillées de la Figure 2-6-11 représentent les fronts d'onde lorsque des ondes aquatiques se propagent du milieu 1 au milieu 2. La longueur d'onde de l'onde incidente dans le milieu 1 est de 2,0 cm, et la fréquence est de 5,0 Hz.

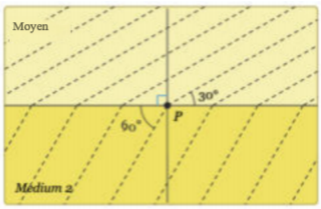


Figure 2-6-11· Fronts d'onde à 30° ET 60° à travers la frontière.

(i) Dessine, dans la figure, la direction dans laquelle l'onde passant par le point P se propage dans les milieux 1 et 2, respectivement.

(ii) Détermine l'indice de réfraction du milieu 2 par rapport au milieu 1.

(iii) Détermine les vitesses des ondes dans les milieux 1 et 2, respectivement, en cm/s.

(iv) Détermine la longueur d'onde de l'onde dans le milieu 2, en cm.



Leçon 2- 7 — Interférence du son

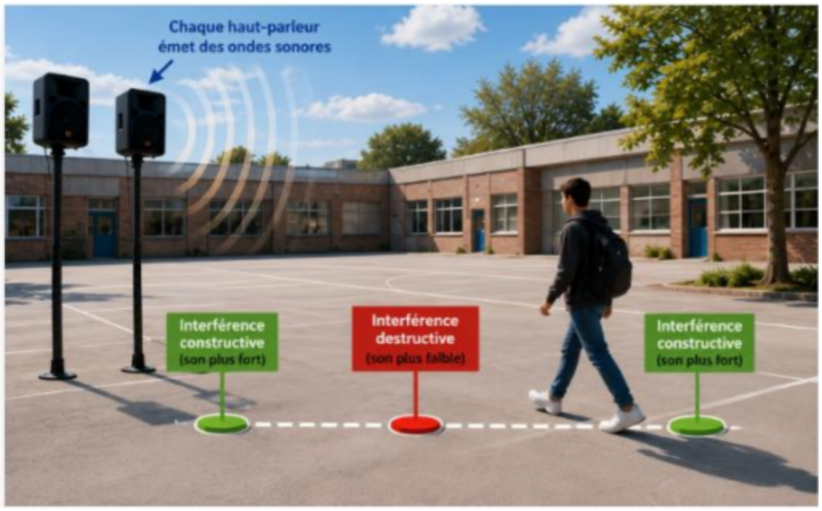
❓ **Question de la leçon :**Lorsque deux haut-parleurs émettent le même son continu, pourquoi le son est-il fort à certains endroits et presque silencieux à d'autres ?

À la fin de cette leçon, tu seras capable de :

1. **Expliquer** comment deux sources sonores cohérentes produisent des positions d'interférence constructive et destructive.
2. **Prédire** si une interférence constructive ou destructive se produit en un point à partir de sa différence de chemin.
3. **Déterminer** la longueur d'onde et la fréquence du son à l'aide de mesures d'interférence.

🔍 Le phénomène — prédis avant de poursuivre

Figure 2-7-1 · Passer devant deux haut-parleurs donne des points forts et presque silencieux.



Avant les annonces du matin, le concierge teste les deux haut-parleurs de la cour avec un son continu. En traversant la cour, vous passez par une zone où le son devient presque inaudible — deux pas plus loin, il revient à une intensité maximale. Votre ami, qui traverse ailleurs, ne détecte aucune variation de ce type. Les deux haut-parleurs restent allumés pendant tout ce temps.

Prédis avant de poursuivre

(a) **tu** traverse lentement la cour pendant que la tonalité est diffusée. Qu'entendras -tu : la même intensité sonore partout, une diminution progressive de l'intensité avec la distance, ou un motif répétitif alternant fort et faible ?

(b) Un ami affirme qu'avec deux haut-parleurs allumés, chaque point de la cour doit être plus fort qu'avec un seul. Êtes-vous d'accord ?

Fait clé

Un son pur possède une fréquence unique (f). Dans l'air, sa longueur d'onde est liée à la vitesse du son par : $v = f\,\lambda$. Lorsque deux ondes sonores se superposent, le déplacement résultant des particules d'air est la somme algébrique des déplacements individuels. C'est le principe de superposition.

Localise les positions des interférences constructives et destructives du son

interférence

Ce que tu feras : utilise deux sources sonores cohérentes pour localiser les positions des interférences constructives et destructives.

Durée :12 min

Tu auras besoin de :

- Un téléphone avec une application générateur de tonalités.
- Des écouteurs filaires.
- Du ruban adhésif.
- Un mètre ruban ou un ruban à mesurer.
- Des marqueurs en papier.
- Un espace ouvert et calme.

Sécurité sonore : Maintenez le volume suffisamment bas pour être confortable et sûr.

Étapes :

1. Scotche les deux écouteurs au bord d'une table, face à l'observateur et séparés d'environ 0,50 m.
2. Régle l'application génératrice de tonalité sur une tonalité continue de 1700 Hz à un volume bas et sûr.
3. Marche lentement le long d'une ligne située à environ 2 m de la table, parallèlement à la ligne joignant les écouteurs.
4. Garde une oreille face aux écouteurs et bouchez l'autre oreille.
5. Place un repère en papier à chaque position où l'intensité sonore est au minimum ou proche du minimum.
6. Répéte le parcours et ne conservez que les positions reproductibles.
7. Répéte avec 3400 Hz et comparez l'espacement entre les positions calmes adjacentes.

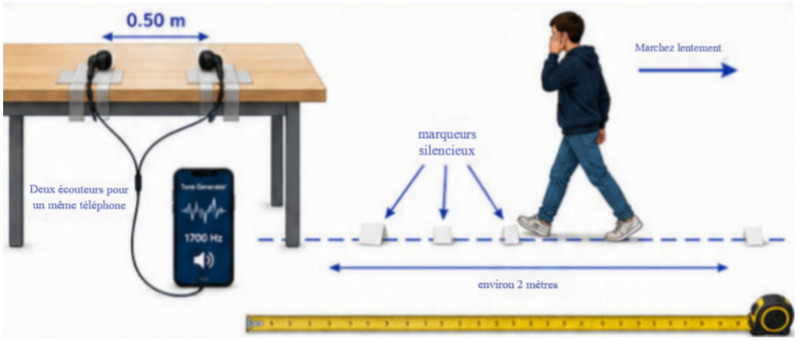


Figure 2-7-2 · Deux écouteurs distants de 0,50 m, avec les points de silence marqués le long du trajet.

Essai	Fréquence (Hz)	Nombre de positions de silence	Espacement entre positions de silence adjacentes (m)
1	1700		
2	1700		
3	1700		
4	3400		

Analyse ce que tu as recueilli :

(a) Près du milieu du trajet, les positions de silence sont-elles à peu près également espacées ? Qu'arrive-t-il à cet espacement lorsque la fréquence est doublée ?

(b) Le même signal est envoyé aux deux écouteurs. Pourquoi les positions de silence doivent-elles être dues à une interférence dans l'air entre les sources et l'oreille ?

Rédige ton explication en deux lignes au maximum avant de lire la page suivante.

De l'observation au modèle

Dans Explore, vous avez constaté que les positions calmes près du centre étaient approximativement également espacées. Doubler la fréquence réduisait l'espacement entre les positions calmes adjacentes. Pendant chaque essai, le signal restait stable lorsque la position d'écoute changeait, de sorte que la variation de l'intensité sonore était causée par la superposition des deux ondes sonores dans l'air. Le modèle suivant explique ce schéma.

Superposition de deux ondes sonores

Le son est une onde longitudinale. Lorsque deux ondes sonores se superposent en un point, le déplacement résultant des particules d'air est la somme algébrique des déplacements dus aux deux ondes. Si les ondes arrivent en phase, une interférence constructive se produit et, pour des amplitudes comparables, le son est plus fort. Si elles arrivent en opposition de phase avec des amplitudes égales, une interférence destructive se produit et le son est fortement réduit.

Les deux écouteurs agissent comme des sources cohérentes, car ils sont pilotés par le même signal. Ils ont la même fréquence et une relation de phase constante, de sorte que la figure d'interférence reste fixe dans l'espace.

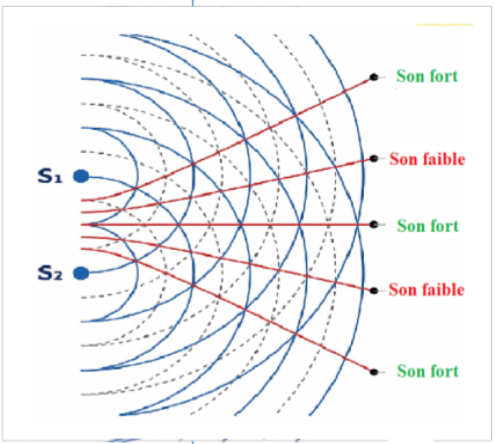


Figure 2-7-3 · Les directions de son fort et de silence alternent en s'éloignant des deux sources.

La règle de la différence de marche et comment la mesurer

En un point (P), la différence de marche est : $\Delta d = |SIP_S_2P|$, où (SIP) et (S_2P) sont les distances des deux sources sonores jusqu'au point.

Pour deux sources cohérentes vibrant en phase : L'interférence constructive se produit lorsque $\Delta d = n\lambda$. L'interférence destructive se produit lorsque $\Delta d = (n + \frac{1}{2})\lambda$, où n = 0, 1, 2, 3, ⋯.

Point

- Puisque les ondes sonores sont aussi des ondes, elles présentent les mêmes phénomènes que les autres ondes. Le son est une onde longitudinale ; là où deux sons se rencontrent, chaque particule d'air subit la somme algébrique des deux déplacements.
- Lorsque les sources d'ondes S_1 et S_2 vibrent en phase et émettent des ondes de même longueur d'onde λ, alors en un point d'observation P :

  Interférence constructive : $|PS_1 - PS_2| = \lambda/2 \times$ (nombre pair) .

  Interférence destructive : $|PS_1 - PS_2| = \lambda/2 \times$ (nombre impair) .
- Lorsque les sources d'ondes sont en opposition de phase, les positions de l'interférence constructive et de l'interférence destructive sont inversées par rapport à celles de sources en phase.

Encadré d'équation

Interférence constructive (sources cohérentes en phase)	Différence de trajet $= n\lambda$
Interférence destructive	Différence de trajet = $(+\frac{1}{2})\lambda$
Vitesse de l'onde	$v = f\lambda$

Comptage en demi-longueurs d'onde

La différence de chemin peut être comptée en multiples de ($\lambda/2$). Un nombre pair de demi-longueurs d'onde correspond à une interférence constructive pour des sources en phase, tandis qu'un nombre impair correspond à une interférence destructive.

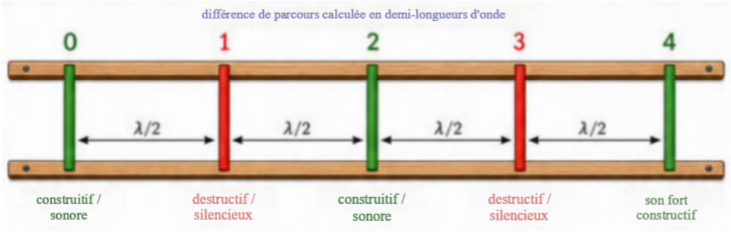


Figure 2-7-4 · La différence de chemin en demi-longueurs d'onde détermine si le son est fort ou faible.

Tube de Quincke pour mesurer la longueur d'onde du son : un tube de Quincke mesure la longueur d'onde du son par interférence. Le son provenant d'une source unique est divisé dans deux tubes puis recombiné à la sortie. En tirant sur l'un des tubes (tube en U) et en modifiant la longueur du trajet, la « différence de chemin » des deux ondes change. En profitant du phénomène où l'intensité sonore atteint un minimum en raison d'une interférence destructive lorsque la différence de chemin est un multiple impair d'une demi-longueur d'onde, la longueur d'onde de l'onde sonore peut être calculée avec précision à partir de la distance d'extraction du tube.

Exemple travaillé

Situation	Dans le tube de Quincke illustré, le son entrant en P est divisé en deux trajets et se recombine en Q. Lorsque le tube B est complètement inséré, les deux longueurs de trajet sont égales. À mesure que le tube B est retiré lentement, le premier minimum d'intensité sonore se produit lorsque le tube est retiré de x = 8,5 cm. La vitesse du son est de $3{,}4 \times 10^2$ m/s. Déterminez : **(i)** la longueur d'onde λ du son, en m ; **(ii)** la fréquence f du son, en Hz.
Données et exigences	Retrait $x = 8{,}5$ cm · $v = 3{,}4 \times 10^2$ m/s · Premier minimum en Q > $\lambda = ?, f = ?$
Représentation	Schéma avant/après : trajet A fixe ; le trajet B gagne x sur une branche et x sur l'autre — chaque centimètre de retrait augmente la longueur du trajet de deux centimètres.
Stratégie	Trouvez d'abord la différence de marche entre les deux trajets ; exprimez-la en nombre de demi-longueurs d'onde — un compte pair ($n\lambda$) donne une interférence constructive, un compte impair $(n+\frac{1}{2})\lambda$ donne une interférence destructive — puis déterminez λ.
Solution annotée	**1)** Différence de marche d'abord (la coulisse augmente la longueur des deux bras du coude en U) : $\Delta d = 2 \times 8{,}5$ cm = 17 cm = 0,17 m **2)** Premier minimum = plus petit nombre impair de demi-longueurs d'onde (le plus petit compte impair de demi-longueurs d'onde est un) : $0{,}17 \text{ m} = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \lambda = 0{,}34$ m **3)** Calculez la fréquence : $f = \frac{v}{\lambda} = \frac{3.4 \times 10^2}{0{,}34} \Rightarrow f = 1{,}0 \times 10^3$ Hz
Vérification de la cohérence	$1{,}0 \times 10^3$ Hz se situe dans le domaine audible ; un allongement de quelques centimètres donnant une longueur d'onde de quelques dizaines de centimètres est de l'ordre de grandeur attendu pour un son audible ; et d'après le schéma, 17 cm est exactement la moitié de 34 cm.
Expliquez-le toi-même	Pourquoi le fait de tirer la coulisse de x augmente-t-il la différence de marche de 2x plutôt que de x?

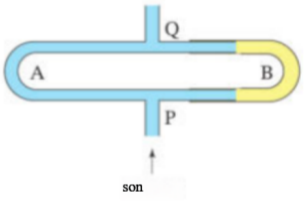


Figure 2-7-5 · Un son se divise le long de deux trajets et se recombine en Q.

Application rapide :

Deux haut-parleurs é mettent un son en phase ; à votre siège, les trajets diffèrent de 0,51 m et la longueur d'onde est de 0,34 m. Indiquez si le son est fort ou faible, et donnez le nombre de demi-longueurs d'onde dans la différence de trajet.

À to d'essayer : le même instrument, une fréquence différente. Avec le tube B repoussé, un nouveau son à fréquence constante entre en P ; le premier minimum se produit maintenant lorsque le coulisseau n'est sorti que de 2,5 cm. Calculez la longueur d'onde et la fréquence de ce son.

Essayer

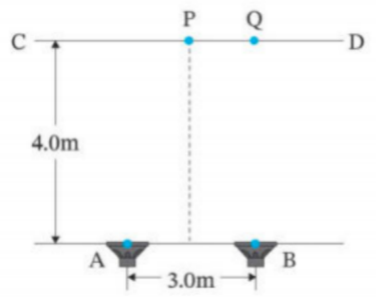


Figure 2-7-6 · Deux haut-parleurs distants de 3,0 m, avec la ligne CD à 4,0 m.

(a) Comme le montre la figure 2-7-5, deux haut-parleurs émettent un son de même fréquence. Lorsqu'un observateur se déplace le long de la ligne CD, située à 4,0 m de la ligne AB, l'intensité sonore est minimale au point P, intersection de la ligne CD et de la médiatrice de AB. À mesure que l'observateur s'éloigne de ce point le long de CD, l'intensité sonore augmente progressivement et atteint un maximum au point Q, situé à 1,5 m du point P.

(i) Déterminer si les vibrations des sources sonores A et B sont en phase ou en opposition de phase.

(ii) Déterminer la longueur d'onde du son émis par les haut-parleurs, en m.

(b) Dans le dispositif illustré à la figure 2-7-7 (un tube de Quincke), le son entrant en P est divisé en deux trajets, le tube A à gauche et le tube B à droite, puis se recombine en Q, où se produit une interférence. Lorsque le tube B est complètement inséré, les longueurs des deux trajets sont égales. Pendant qu'un son de fréquence constante est introduit en P, le tube B est lentement retiré, et l'intensité sonore devient minimale pour la première fois lorsqu'il est retiré de 5,0 cm. Soit la vitesse du son v égale à $3{,}4 \times 10^{2}\ m/s$.

(i) Déterminer la longueur d'onde λ du son, en m. _____

(ii) Déterminer la fréquence f du son, en Hz. _____

Fait clé

L'élément (a) contient un triangle 3-4-5 : AQ est trouvé à l'aide du théorème de Pythagore ; BQ est simplement la distance de 4,0 m entre les lignes — avant toute analyse d'onde.

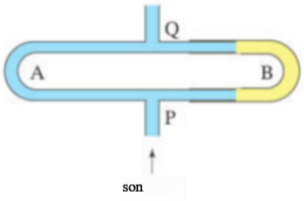


Figure 2-7-7 · Un son se divise le long de deux trajets et se recombine en Q.

Dans un nouveau contexte — Écouteurs à réduction de bruit

Les écouteurs à réduction de bruit utilisent des microphones pour détecter le son entrant. L'électronique produit alors une onde sonore de même fréquence et d'amplitude presque égale, mais en opposition de phase. Au niveau du tympan, les deux ondes se superposent et réduisent la variation de pression résultante. Il s'agit d'une interférence destructive.

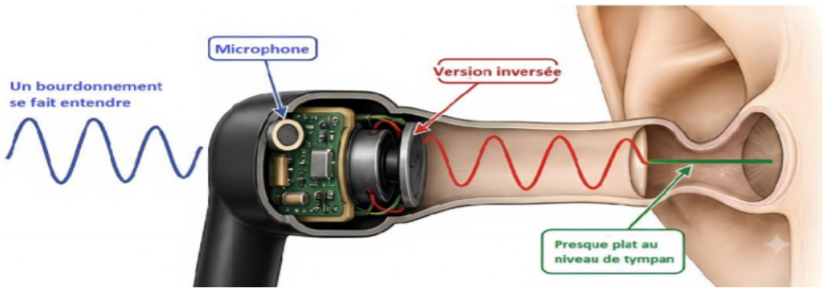


Figure 2-7-8 · L'écouteur ajoute une copie inversée, laissant le tympan presque imperturbable.

Expliquez pourquoi les écouteurs à réduction de bruit réduisent plus efficacement un bourdonnement de moteur constant qu'un son soudain et impulsif tel qu'un claquement de porte.

Nature de la science : Preuve — l'interférence comme preuve du comportement ondulatoire de la lumière

Une position de faible intensité dans la figure d'interférence produite par deux sources est une preuve solide du comportement ondulatoire. En un tel point, deux perturbations se combinent pour produire un effet résultant presque nul, ce qui ne peut pas être expliqué par un simple modèle de flux de particules. L'expérience des fentes de Young a utilisé une preuve d'interférence similaire pour appuyer le modèle ondulatoire de la lumière.

À ton tour : propose une explication pour laquelle les positions d'intensité minimale, et non les positions d'intensité maximale, constituent la preuve la plus solide que le son est une onde.

Question de la leçon, réponse

Lorsque deux haut-parleurs cohérents et en phase émettent la même tonalité constante, chaque point reçoit deux ondes sonores qui peuvent avoir parcouru des distances différentes. Si la différence de trajet est un nombre entier de longueurs d'onde, les ondes arrivent en phase et interfèrent de manière constructive, produisant un son fort. Si la différence de trajet est un nombre impair de demi-longueurs d'onde, les ondes arrivent en opposition de phase et interfèrent de manière destructive, produisant une position de faible intensité.

Figure 2-7-9· The two speakers revisited.



Exercice

(a) Comme le montre la figure 2-7-10, deux haut-parleurs émettent un son en phase à la même fréquence, $1{,}7 \times 10^2$ Hz. Soit P l'intersection de la ligne CD, située à 4,0 m de la ligne AB, et de la médiatrice de AB, et soit Q un point à 1,5 m du point P. Soit la vitesse du son égale à $3{,}4 \times 10^2$ m/s.

(i) Déterminer la longueur d'onde du son émis par les haut-parleurs, en m.

(ii) Déterminer si le point Q est un point d'interférence constructive ou destructive.

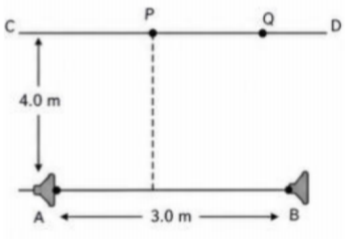


Figure 2-7-10 · Le même montage, pour l'exercice.

(b) Dans le même dispositif illustré à la figure 2-7-7, le tube B étant de nouveau entièrement inséré pour que les deux trajets soient égaux, un son de fréquence constante est introduit en P. Le tube B est lentement retiré, et l'intensité sonore devient minimale pour la première fois lorsqu'il a été retiré de 17 cm. Soit la vitesse du son v égale à $3{,}4 \times 10^2$ m/s.

(i) Déterminer la longueur d'onde λ du son, en m. _____

(ii) Déterminer la fréquence f du son, en Hz. _____

(c) Dans le même dispositif, le tube B étant de nouveau entièrement inséré, un son de fréquence constante est introduit en P. Le tube B est lentement retiré, et l'intensité sonore est minimale pour la première fois lorsqu'il a été retiré de 10 cm. Soit la vitesse du son v égale à 3.4×10^2 m/s.

(i) Déterminez la longueur d'onde λ du son, en m. _____

(ii) Détermine la fréquence f du son, en Hz. _____

(iii) Si la même expérience est réalisée avec un son de fréquence double, détermine la distance sur laquelle le tube B est retiré lorsque l'intensité sonore est minimale pour la première fois, en m._____

Conseil d'examen

Montrez clairement chaque étape de votre raisonnement. Dans les questions d'interférence, écrivez explicitement la différence de marche avant de terminer le calcul.

Question type examen

Deux haut-parleurs, connectés au même générateur de signal, émettent des ondes sonores en phase. Au point M, l'intensité sonore est presque nulle. Expliquez, en termes de différence de marche et de différence de phase, pourquoi l'intensité sonore est très faible au point M.



Leçon 2- 8 — L'effet Doppler

Question de la leçon : Pourquoi la hauteur perçue d'une sirène change-t-elle lorsqu'une ambulance passe devant un observateur ?

Tu apprendras à

À la fin de cette leçon, vous serez capable de :

1. Expliquer qualitativement pourquoi le mouvement relatif entre une source d'onde et un observateur modifie la fréquence observée.
2. **Tracer** des diagrammes de fronts d'onde pour une source en mouvement et identifier les régions de longueur d'onde plus courte et plus longue.
3. **Utiliser** la relation Doppler approximative pour la lumière : $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{v}{}$

Le phénomène — prédis avant de poursuivre

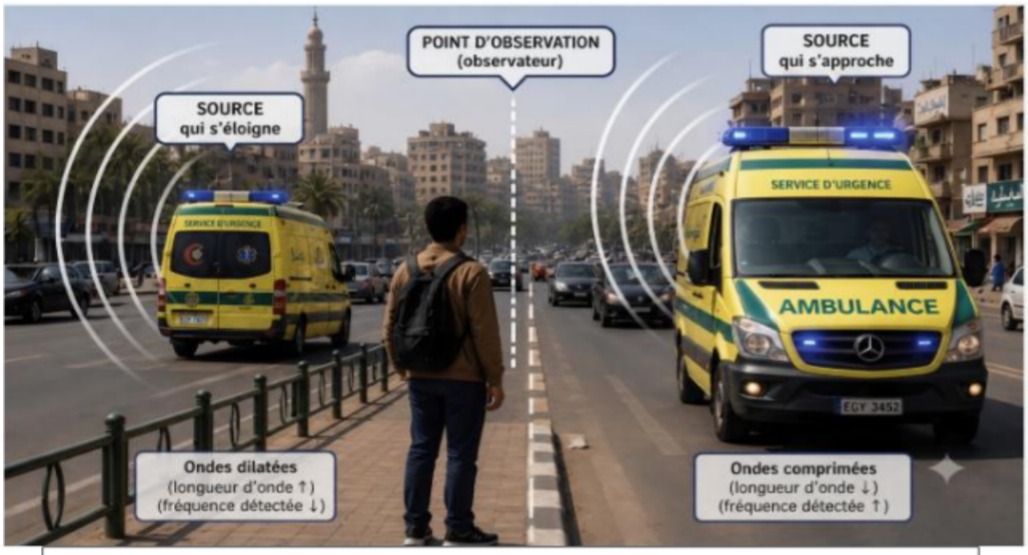


Figure 2.8.1 : Les ondes se rapprochent devant la source et s'éloignent derrière elle.

Tiens-toi dans une rue passante pendant qu'une ambulance passe, et écoutez. Tout le monde s'accorde à dire que la sirène semble différente lorsqu'elle passe. De nombreux auditeurs ne savent pas exactement ce qui change, ni à quel moment.

Prédis avant de poursuivre

(a) Lorsqu'une ambulance approche à vitesse constante, la hauteur perçue augmente-t-elle continuellement, ou reste-t-elle presque constante jusqu'à ce que l'ambulance passe ?

(b) Pendant que l'ambulance approche à vitesse constante, la hauteur perçue est-elle supérieure, inférieure ou égale à la hauteur émise ?

Fait essentiel

Pour le son dans l'air immobile, la vitesse de l'onde est déterminée par les propriétés de l'air. Les grandeurs v, f et λ sont liées par : $v = f\lambda$. Une fréquence observée plus élevée correspond à une hauteur plus élevée.

Explorer — Observer le décalage Doppler d'une source sonore en mouvement

Ce que tu feras : Vous déplacerez une source sonore par rapport à un auditeur et écouterez les changements de hauteur perçue.

Temps :12 min

Il te faudra :

- Un téléphone avec une application génératrice de sons réglée sur 600 Hz.
- Un espace ouvert et dégagé.
- Un second téléphone ou un enregistreur pour les observations.

Étapes :

1. Un élève reste immobile et joue le rôle de l'auditeur.
2. Un second élève porte le téléphone pendant qu'il émet un son continu (600 Hz). L'auditeur enregistre ce son comme hauteur de référence.
3. L'étudiant porte ensuite le téléphone directement vers l'auditeur à une vitesse de marche constante, puis le dépasse et s'éloigne.
4. L'auditeur note si la hauteur du son est plus élevée, plus basse ou inchangée pendant l'approche et pendant l'éloignement.
5. Répéte l'observation avec différents auditeurs.

Note de mesure

Différents auditeurs peuvent juger différemment les changements de hauteur. Répétez les observations avec plusieurs auditeurs pour améliorer la fiabilité.

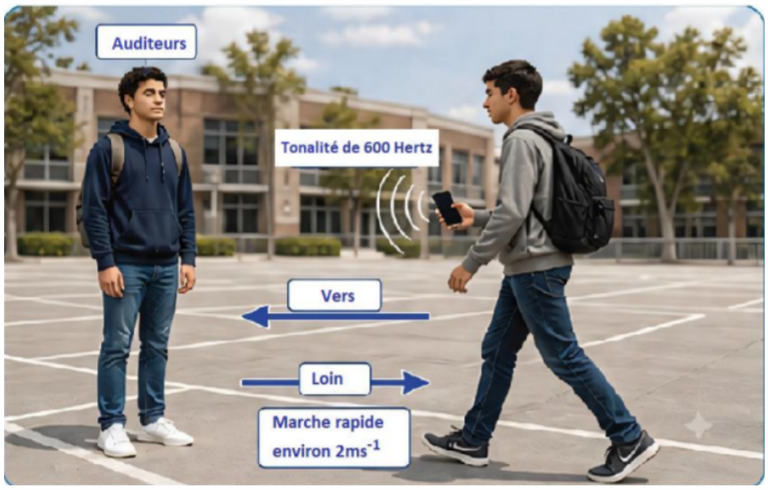


Figure 2-8-2 · Un son de 600 Hz transporté devant un auditeur à vitesse de marche.

Mouvement de la source par rapport à l'auditeur	Hauteur observée	Notes
Se rapprochant de l'auditeur		
S'éloignant de l'auditeur		
Source immobile		

Analyse ce que tu as recueilli :

(a) Pendant l'approche à vitesse constante, la hauteur observée augmentait-elle continuellement ou était-elle à peu près stable et plus élevée que la hauteur de référence ?

(b) Puisque le réglage de fréquence du téléphone n'a pas changé, qu'est-ce qui a changé entre la source et l'auditeur ?

Écris ton explication en deux lignes avant de lire la page suivante.

De l'observation au modèle

Dans Explore, la hauteur observée était plus élevée pendant que la source se rapprochait de l'auditeur et plus basse pendant qu'elle s'en éloignait. Pour un mouvement directement vers l'auditeur ou directement à l'opposé de celui-ci à vitesse constante, la fr équence observée reste constante pendant chaque phase : plus élevée pendant l'approche et plus basse pendant l'éloignement. Une hausse progressive est une prédiction courante, mais ce n'est pas ce qui est observé. Comme la fréquence émise restait constante, le changement de fréquence observée était causé par le mouvement de la source par rapport à l'auditeur et à l'air environnant. Le modèle suivant concorde avec ces données.

Source en mouvement et longueur d'onde variable

Une source sonore émet des fronts d'onde qui se propagent dans l'air à la vitesse du son. Lorsque la source se déplace vers un observateur, les fronts d'onde successifs sont émis depuis des positions plus proches de l'observateur. Les fronts d'onde devant la source sont plus rapprochés, si bien que la longueur d'onde observée est plus courte et que la fréquence observée est plus élevée.

Derrière la source en mouvement, les fronts d'onde successifs sont plus espacés, si bien que la longueur d'onde observée est plus longue et que la fréquence observée est plus basse.

Pour le son dans l'air immobile, la vitesse du son n'est pas modifiée par le mouvement de la source. Le mouvement de la source modifie l'espacement des fronts d'onde, et non la vitesse du son dans le milieu.

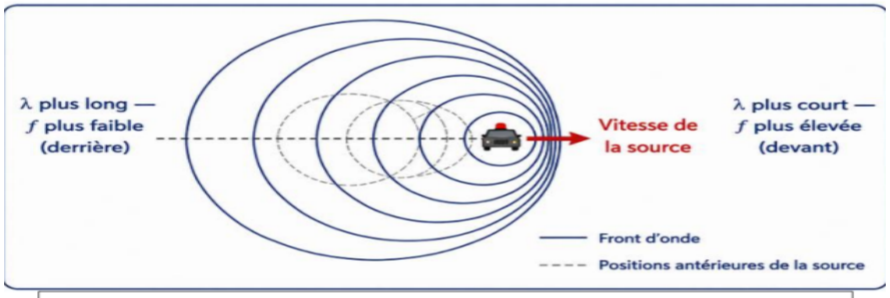


Figure 2.8.3 : Les ondes se rapprochent devant la source et s'éloignent derrière elle.

Observateur se déplaçant vers une source immobile

Si la source est immobile et que l'observateur se déplace vers elle, la longueur d'onde dans l'air reste inchangée, mais l'observateur rencontre les fronts d'onde plus fréquemment. La fréquence observée est donc plus élevée. Si l'observateur s'éloigne de la source, il rencontre les fronts d'onde moins fréquemment, et la fréquence observée est donc plus basse.

L'effet Doppler pour la lumière

Pour la lumière, l'effet Doppler se manifeste par un déplacement des longueurs d'onde des raies spectrales. Si une étoile ou une galaxie s'éloigne de l'observateur, ses raies spectrales sont décalées vers des longueurs d'onde plus grandes ; c'est ce qu'on appelle le décalage vers le rouge. Si elle se rapproche de l'observateur, les raies sont décalées vers des longueurs d'onde plus courtes ; c'est ce qu'on appelle le décalage vers le bleu.

Pour des vitesses très inférieures à la vitesse de la lumière : $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{v}{c}$ où v est la vitesse radiale le long de la ligne de visée et c est la vitesse de la lumière.



Figure 2-8-4 · Le motif provenant d'une galaxie qui s'éloigne est décalé vers des longueurs d'onde plus grandes.

Effet Doppler

L'effet Doppler est la variation de la fréquence ou de la longueur d'onde observée d'une onde due au mouvement relatif entre la source et l'observateur.

Point

Le phénomène par lequel la fréquence observée diffère de la fréquence de la source en raison du mouvement relatif est appelé l'effet Doppler.

> Approche → son plus aigu. Éloignement → son plus grave.
> Il en va de même, que la source ou l'observateur se déplace.

Soit *v* la vitesse du son, v_s la vitesse de la source et v_o la vitesse de l'observateur. La fréquence f′ entendue par l'observateur et la frequency f_s de la source are related by $f' = f_s \frac{v + v_o}{v - v_s}$, where v_o est positive lorsque l'observateur se déplace vers la source et v_s est positive lorsque la source se déplace vers l'observateur.

Devant une source qui s'approche, les fronts d'onde sont plus rapprochés, donc la longueur d'onde observée est plus courte. Le mouvement de la source modifie l'espacement des fronts d'onde,et non la vitesse du son dans le milieu.

Encadré d'équation

Décalage Doppler pour la lumière (v ≪ c)	$\frac{\lvert\Delta f\rvert}{f} = \frac{\lvert\Delta\lambda\rvert}{\lambda} = \frac{v}{c}$

Application rapide : Une raie de l'hydrogène dans le spectre d'une galaxie est décalée de $\Delta\lambda/\lambda = 0{,}0030$ vers les plus grandes longueurs d'onde. Déterminez la vitesse de la galaxie le long de la ligne de visée ($c = 3{,}00 \times 10^8$ m/s).

Mettez-le à l'épreuve : Deux élèves se tiennent de part et d'autre d'une route tandis qu'une sirène passe. Prédisez ce que chacun entend au même instant, et ce que montrerait la chronologie des impulsions successives du Klaxon — puis esquissez un diagramme de fronts d'onde qui explique les deux.

Exemple travaillé

Problème	Soit la vitesse du son égale à 340 m/s. **(a)** Près d'un passage à niveau, une personne entend un train s'approcher à 20 m/s en émettant un klaxon de fréquence 720 Hz. **(i)** Trouvez la fréquence entendue lorsque le train s'approche du passage à niveau. **(ii)** Trouvez la fréquence entendue lorsque le train s'éloigne. **(b)** Une voiture se déplaçant vers l'est à vitesse constante en émettant un son de fréquence 660 Hz et une moto se déplaçant vers l'ouest à 17 m/s se croisent. La fréquence entendue par le motocycliste avant qu'ils ne se croisent est de 770 Hz. **(i)** Trouvez la vitesse de la voiture. **(ii)** Trouvez la fréquence entendue par le motocycliste après qu'ils se sont croisés.
Situation	Une source et un auditeur se déplacent le long d'une même ligne droite. (a) le train (source, 720 Hz) croise une personne immobile — d'abord en s'approchant, puis en s'éloignant. (b) une voiture (source, 660 Hz, est) et une moto (auditeur, ouest, 17 m/s) se rencontrent, puis se croisent.
Données et requis	*Donné* — $v = 340$ m/s · (a) f_s = 720 Hz, train 20 m/s, v_o = 0 · (b) f_s = 660 Hz, motocycliste 17 m/s, f′ avant = 770 Hz **Requis** — (a) f′ en approche & en éloignement · (b) vitesse de la voiture & f′ après le croisement
Représentation	Attribuez un signe à chaque vitesse selon qu'elle pointe vers l'autre corps : v_o est positif lorsque l'observateur se déplace vers la source, et vs est positif lorsque la source se déplace vers l'observateur. (Ainsi, le même train vers l'est compte comme +20 lorsque l'auditeur est devant lui, mais −20 lorsque l'auditeur est derrière lui.)
Stratégie	Remplacez les vitesses signées dans la relation Doppler $f' = f_s(\frac{v + v_o}{v - v_s})$ (v = 340 m/s), puis résoudre pour l'inconnue.

Livret de données

Citer $c = 3{,}00 \times 10^8$ m/s et $\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{v}{c}$ du livret ; la relation ne tient que lorsque $v \ll c$. Lisez d'abord le décalage fractionnaire, puis la vitesse suit — la relation est fournie, pas mémorisée.

Conseil d'examen

Citez la relation du livret comme « delta-f sur f égale delta-lambda sur lambda, approximativement *v* sur *c*. » Montrez d'abord la ligne fractionnaire, puis la vitesse ; les examinateurs créditent le raisonnement, pas un simple chiffre.

Solution annotée	**(a)** Le train émet un son à 720 Hz · auditeur au repos (v_o = 0) **(i)** en approche : les points positifs se dirigent vers l'auditeur, donc v_s = +20 m/*s*. $f' = \frac{340}{340 - 20} \quad 720 = 765 \text{ Hz}$ (ii) en recul : l'auditeur est maintenant derrière, donc Le positif points the other way and v_s = _20 m/*s* · Figure 2-8-5 · Une source se déplaçant vers le $f' = \frac{340}{340 + 20} 720 = 680 \text{ Hz}$ d'eux. (b) La voiture est la source (660 Hz) · le cycliste est l'auditeur en mouvement **(i)** avant — les deux s'approchent : v_o = 17 m/s et f ′ = 770 Hz, $770 = \frac{340 + 17}{340 - v_s} \times 660 \quad v_s = 34 \text{ m/s}$ **(ii)** après — les deux s'éloignent :now v_o = _17 m/*s* and v_s = _34 m/*s*, *donc* $f' = \frac{340 - 17}{340 + 34} \quad 660 = 570 \text{ Hz}$ *(a·i)* $f' = 765$ Hz *(a·ii)* $f' = 680$ Hz *(b·i)* $v_{car} = 34$ m/*s (b·ii)* $f' = 570$ Hz
Vérification de la cohérence	L'approche augmente la hauteur perçue (765 > 720) et l'éloignement la diminue (680 < 720) ; le cycliste entend plus aigu en approchant (770 > 660) et plus grave en s'éloignant (570 < 660). Les *34 m/s* de la *voiture* (≈ 122 km/h) sont rapides mais réalistes.
Explique-le Toi-même	Dans les deux images de la partie (a), le train se déplace de la même façon (vers la droite), et pourtant v_s = +20 en (i) et −20 en (ii). Pourquoi ? Parce que le sens « positif » est celui qui va de la source vers l'observateur. L'auditeur est devant en (i), donc ce sens pointe vers la droite et le mouvement du train vers la droite se fait vers lui (+) ; l'auditeur est derrière en (ii), donc le sens positif pointe vers la gauche et ce même mouvement vers la droite se fait maintenant en s'éloignant (−).

observateur, et en s'éloignant

À toi d'essayer : une raie de l'hydrogène provenant d'une galaxie lointaine est décalée vers les plus grandes longueurs d'onde de $\Delta\lambda/\lambda = 4{,}0 \times 10^{-4}$. Prenez c = 3,00 × 10 ^{8} m/s. Déterminez la vitesse de la galaxie le long de la ligne de visée, et indiquez si elle s'approche ou s'éloigne.

Essayer

Détermine ce qui suit, en supposant que la vitesse du son est de 340 m/s.

(a) Pour chacun des cas suivants, déterminez la fréquence du son entendu par l'observateur.

(i) Une source sonore se déplaçant à 20 m/s s'approche d'un observateur immobile tout en émettant un son de fréquence 720 Hz.

(ii) Une source sonore se déplaçant à 20 m/s s'éloigne d'un observateur immobile tout en émettant un son de fréquence 640 Hz.

(iii) Un observateur se déplaçant à 34 m/s s'approche d'une source sonore émettant un son de fréquence 850 Hz.

(iv) Un observateur se déplaçant à 20 m/s s'éloigne d'une source sonore émettant un son de fréquence 510 Hz.

(b) Une voiture se déplaçant vers l'est à 20 m/s tout en émettant un son de fréquence 720 Hz et une moto se déplaçant vers l'ouest à 20 m/s se croisent.

(i) Déterminez la fréquence du son entendu par la personne conduisant la moto avant qu'ils ne se croisent, en Hz.

(ii) Déterminez la fréquence du son entendu par la personne conduisant la moto apr ès qu'ils se soient croisés, en Hz.

(c) Près d'un passage à niveau, une personne entend le son d'un train approchant à vitesse constante tout en klaxonnant. La fréquence du son entendu lorsque le train s'approche du passage à niveau est de 800 Hz, et la fréquence du son entendu lorsque le train s'éloigne du passage à niveau est de 600 Hz. Déterminez la vitesse du train, en m/s.

(d) La source sonore S et l'observateur O se déplacent le long d'une ligne droite. Pour chacun des cas suivants, déterminez la fréquence du son entendu par l'observateur O.

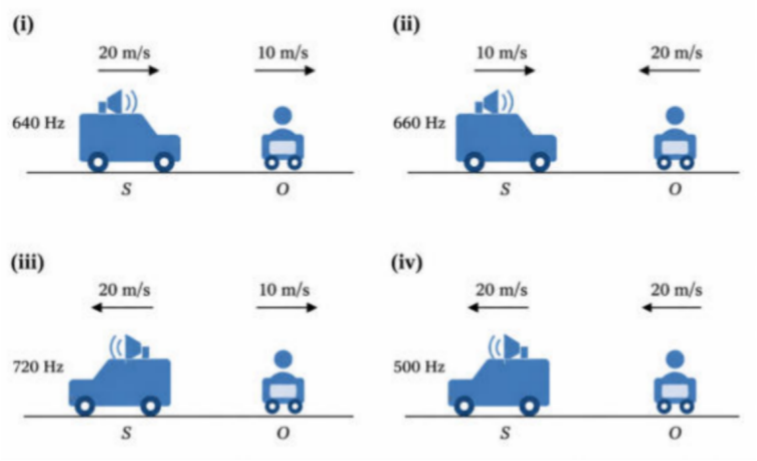


Figure 2-8-6 · Quatre cas de vitesses de la source et de l'observateur.

Dans un nouveau contexte — mesure par échographie Doppler du flux sanguin

En échographie Doppler, une sonde émet des ultrasons de fréquence connue dans un vaisseau sanguin. Les cellules sanguines en mouvement reçoivent les ultrasons en tant qu'observateurs en mouvement, puis les rediffusent tout en se déplaçant. Par conséquent, les ultrasons réfléchis subissent un décalage Doppler. Le décalage de fréquence mesuré est utilisé pour déterminer la composante de la vitesse du sang le long de la direction du faisceau ultrasonore.

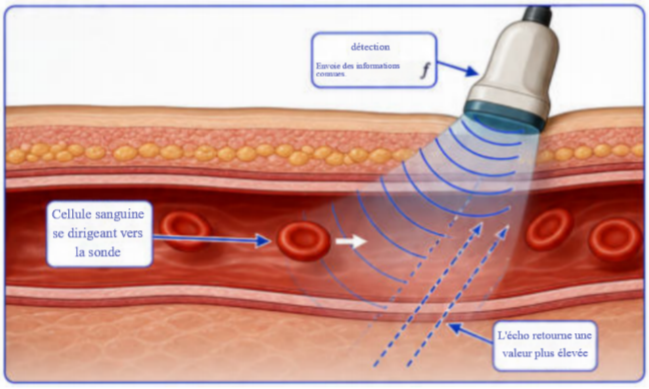


Figure 2-8-7 · L'écho provenant d'une cellule sanguine en mouvement revient à une fréquence plus élevée.

➠ L'écho ultrasonore du sang se déplaçant **vers** la sonde a une fréquence plus élevée que les ultrasons émis. Expliquez pourquoi le décalage Doppler se produit **deux fois**: une première fois lorsque la cellule sanguine en mouvement reçoit l'onde, puis une seconde fois lorsqu'elle rediffuse l'onde vers la sonde.

Nature de la science : Preuves — le décalage vers le rouge comme preuve de l'expansion de l'univers

L'effet Doppler s'applique également à la lumière. Lorsque la lumière provenant de galaxies lointaines est observée, les raies spectrales sont souvent décalées vers des longueurs d'onde plus grandes. La comparaison de ces raies décalées avec les mêmes raies mesurées en laboratoire permet aux astronomes de déterminer le mouvement radial des galaxies. Le **décalage vers le rouge** généralisé des galaxies lointaines est une preuve de l'**expansion de l'univers**.

Suggérez :pourquoi la preuve du décalage vers le rouge provient de la comparaison des raies spectrales observées avec les longueurs d'onde correspondantes en laboratoire, plutôt que de l'examen du seul spectre de la galaxie.

Question de liaison

Qu'est-ce qui donne naissance aux spectres d'émission et comment peuvent-ils être utilisés pour déterminer les distances astronomiques ? Cette question sera approfondie dans les thèmes sur les niveaux d'énergie et les étoiles.

Livret de données

$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \approx \frac{v}{c}$ est donné dans le livret (avec $c = 3{,}00 \times 10^8$ m/s). À l'examen, il est sélectionné dans le livret et le décalage fractionnaire y est substitué, il n'est pas mémorisé. Les réponses qualitatives ici ne nécessitent aucune formule du tout

Question de cours, réponse

La fréquence émise par la sirène reste constante. À mesure que l'ambulance s'approche, les fronts d'onde devant elle sont plus rapprochés, de sorte qu'un observateur immobile reçoit une fréquence plus élevée et entend un son plus aigu. Une fois que l'ambulance est passée et s'éloigne, les fronts d'onde qui atteignent l'observateur sont plus espacés, donc la fréquence observée est plus basse. La vitesse du son est déterminée par l'air ; le mouvement de la source modifie la longueur d'onde qui parvient à l'observateur.

Figure 2-8-8 · Retour sur l'ambulance.



Exercice

Détermine ce qui suit, en supposant que la vitesse du son est de 340 m/s.

(a) Pour chacun des cas suivants, déterminez la fréquence du son entendu par l' observateur.

(i) Une source sonore se déplaçant à 20 m/s s'approche d'un observateur immobile tout en émettant un son de fréquence 800 Hz.

(ii) Une source sonore se déplaçant à 20 m/s s'éloigne d'un observateur immobile tout en émettant un son de fréquence 720 Hz.

(iii) Un observateur se déplaçant à 20 m/s s'approche d'une source sonore émettant un son de fréquence 510 Hz.

(iv) Un observateur se déplaçant à 34 m/s s'éloigne d'une source sonore émettant un son de fréquence 850 Hz.

(b) Une voiture se déplaçant vers l'est à vitesse constante émet un son de fréquence 576 Hz, tandis qu'une moto se déplaçant vers l'ouest à 10 m/s la croise. La fréquence du son entendu par la personne sur la moto après leur croisement est de 528 Hz.

(i) Détermine la vitesse de la voiture.

(ii) Détermine la fréquence du son entendu par la personne sur la moto avant leur croisement.

(c) Près d'un passage à niveau, une personne entend le son d'un train approchant à vitesse constante en klaxonnant. La fréquence du son entendu lorsque le train approche du passage à niveau est de 918 Hz, et la fréquence du son entendu lorsque le train s'éloigne du passage à niveau est de 816 Hz.

(i) Détermine la vitesse du train, en m/s.

(ii) Détermine la fréquence du klaxon, en Hz.

(d) La source sonore S et l'observateur O se déplacent le long d'une ligne droite. Pour chacun des dans les cas suivants, déterminez la fréquence du son entendu par l'observateur O.

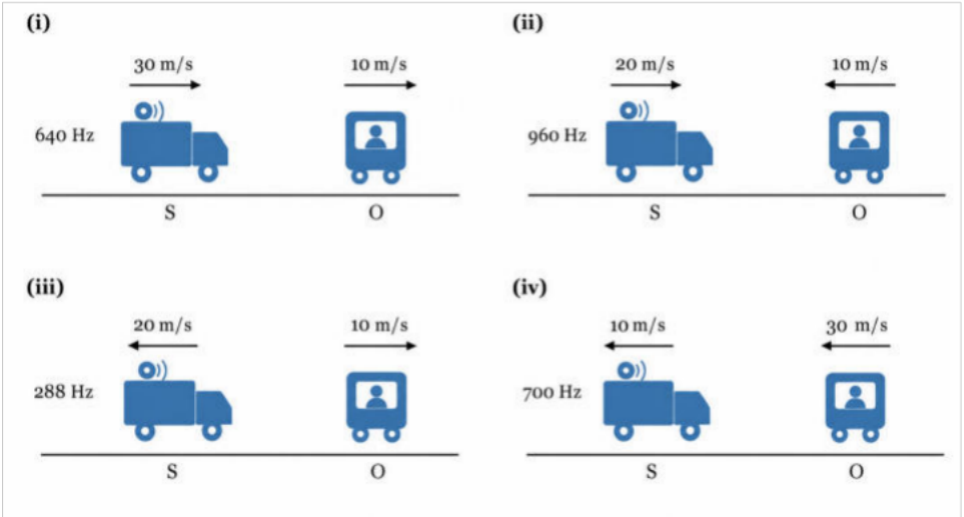


Figure 2-8-9 · Quatre autres cas, pour l'exercice.

Question style examen

Une sirène émettant un son de fréquence constante s'approche d'un observateur stationnaire à vitesse constante.

Expliquez pourquoi la fréquence entendue par l' observateur est plus élevée que la fréquence émise.



Leçon 2- 9 — Réfraction et réflexion totale interne de la lumière

❓ **Question de la leçon :**Lorsque la lumière passe de l'eau à l'air, traverse-t-elle toujours la frontière, ou peut-elle être totalement réfléchie dans l'eau ?

Tu apprendras à

À la fin de cette leçon, vous serez capable de :

- **Utiliser** l'indice de réfraction absolu :$n = \frac{c}{v}$ et la loi de Snell :$n1 \sin \theta 1 = n2 \sin \theta 2$ *pour* déterminer la vitesse, la longueur d'onde ou l'angle de la lumière à une frontière.
- **Expliquer** les conditions de réflexion totale interne lorsque la lumière passe d'un milieu optiquement plus dense à un milieu optiquement moins dense.
- **Déterminer** l'angle critique à l'aide de :$\sin \theta = \frac{n_2}{n_1}$, *où* $n1 > n2$.

Le phénomène — prédis avant de poursuivre



Figure 2-9-1 · La lumière provenant de l'intérieur du réservoir ne s'échappe qu'à l'intérieur d'un cône.

Lorsque la lumière passe de l'eau à l'air sous un petit angle d'incidence, une partie est réfractée dans l'air et une partie est réfléchie dans l'eau. Aux angles d'incidence suffisamment grands, aucun rayon réfracté n'émerge dans l'air ; toute la lumière est réfléchie dans l'eau. C'est la réflexion totale interne.

Prédis avant de poursuivre

(a) La lumière traverse-t-elle toujours une surface claire, en se courbant légèrement mais en passant dans le second milieu — ou une surface peut-elle la renvoyer entièrement ? Si oui, quelle propriété de l'angle d'incidence en décide ?

(b) La lumière part de l'eau (plus dense) et se dirige vers l'air (plus rare). La réflexion totale interne apparaîtrait-elle si elle descendait plutôt de l'air vers l'eau ?

Fait clé

À la frontière entre deux milieux transparents, un rayon incident oblique peut changer de direction parce que sa vitesse change. Les angles sont reliés par la loi de Snell : $n1 \sin \theta 1 = n2 \sin \theta 2$ La fréquence de la lumière reste inchangée à la frontière, tandis que sa vitesse et sa longueur d'onde changent.

Tous les angles sont mesurés par rapport à la normale à la frontière.

Explorez — Observe la réflexion totale interne à une interface eau-air limite

Ce que tu feras :faire varier l'angle d'incidence d'un faisceau lumineux étroit passant de l'eau à l'air et observerez la réfraction, la réflexion partielle et la ré flexion totale interne.**Durée :**12 min

tu auras besoin de :

• Un grand gobelet transparent rempli d'eau. • Une lampe de poche de téléphone masquée pour former un faisceau étroit.
• Une pièce sombre. • Une feuille de papier blanc.

Sécurité : Utilisez une boîte à rayons de faible puissance ou une lampe de poche masquée. Si un laser est utilisé, il doit être de faible puissance et utilisé uniquement sous la supervision de l'enseignant. Ne dirigez jamais le faisceau vers les yeux de quiconque ni vers une surface réfléchissante brillante.

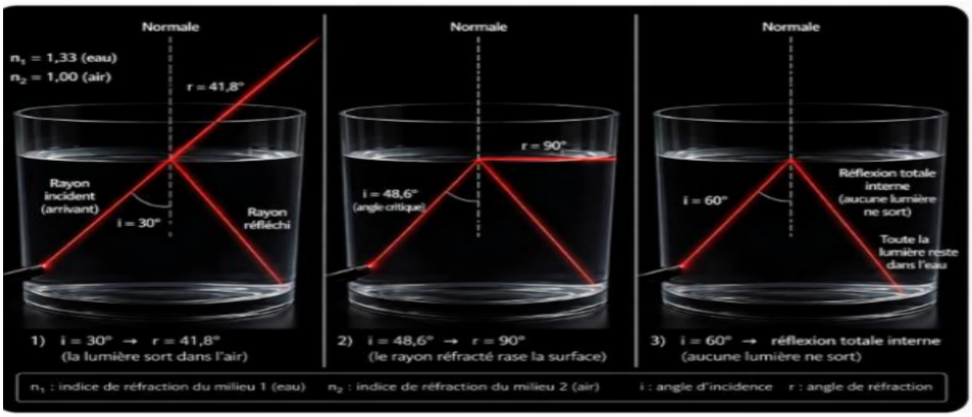


Figure 2-9-2 · Au-delà de l'angle critique, aucune lumière ne s'échappe dans l'air.

Étapes :

1. Dans une pièce sombre, dirigez un étroit faisceau lumineux vers le haut à travers le côté d'un gobelet transparent rempli d'eau de manière à ce qu'il atteigne la surface eau-air par en dessous.
2. Place une feuille de papier blanc au-dessus de la surface pour observer tout faisceau réfracté émergeant dans l'air.
3. Commence avec un petit angle d'incidence, proche de la normale. Observe le rayon réfracté dans l'air et le rayon réfléchi dans l'eau.
4. Augmente progressivement l'angle d'incidence. Observe que le rayon réfract é se rapproche de la surface et que le rayon réfléchi devient plus lumineux.
5. Continue à augmenter l'angle jusqu'à ce que le rayon réfracté disparaisse tout juste. Au-delà de cet angle, la lumière est totalement réfléchie de manière interne.

Angle d'incidence	Faisceau réfracté dans l'air	Faisceau réfléchi dans l'eau
Petit angle		
Près de l'angle critique		
Supérieur à l'angle critique		

Analyse ce que tu as recueilli :

(a) À mesure que l'angle d'incidence augmentait, qu'est-il arrivé au rayon ré fracté et au rayon réfléchi ?

(b) Lorsque le rayon réfracté a disparu, la lumière a-t-elle été absorbée, ou a-t-elle été totalement réfléchie dans l'eau ?

Rédige ton explication en deux lignes au maximum avant de lire la page suivante.

Remarque sur la mesure

Augmentez l'angle d'incidence par petits pas près de la transition. L'angle critique est l'angle limite auquel le rayon réfracté se déplace le long de la surface. La r éflexion totale interne se produit lorsque l'angle d'incidence est supé rieur à cette valeur.

De l'observation au modèle

Dans Explorer, le faisceau émergent n'a pas disparu progressivement. À mesure que l'angle d'incidence augmentait, le rayon réfracté se rapprochait de la surface. À un angle précis, il se propageait le long de la surface. Lorsque l'angle d'incidence augmentait encore, aucun rayon réfracté n'émergeait dans l'air, et la lumière était réfléchie dans l'eau. Rappelez la loi de Snell et ajoutez l'indice de réfraction absolu, qui caractérise chaque milieu en lui-même.

Chaque milieu possède sa propre valeur caractéristique — l'indice de réfraction absolu

La lumière se déplace à sa vitesse maximale dans le vide : c = 3,0 × 10 ^{8} m/s. Dans un milieu transparent, la lumière se déplace à une vitesse plus faible (v). L'indice de réfraction absolu (n) du milieu est défini par :$n = \frac{c}{v}$ Un milieu dont l'indice de réfraction est plus grand est dit optiquement plus dense. Cela signifie que la lumière s'y déplace plus lentement ; cela ne signifie pas nécessairement que le matériau possède une masse volumique plus élevée. Pour la lumière passant d'un milieu à un autre :$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$

où θ_1 et θ_2 sont mesurés par rapport à la normale à la surface de séparation.

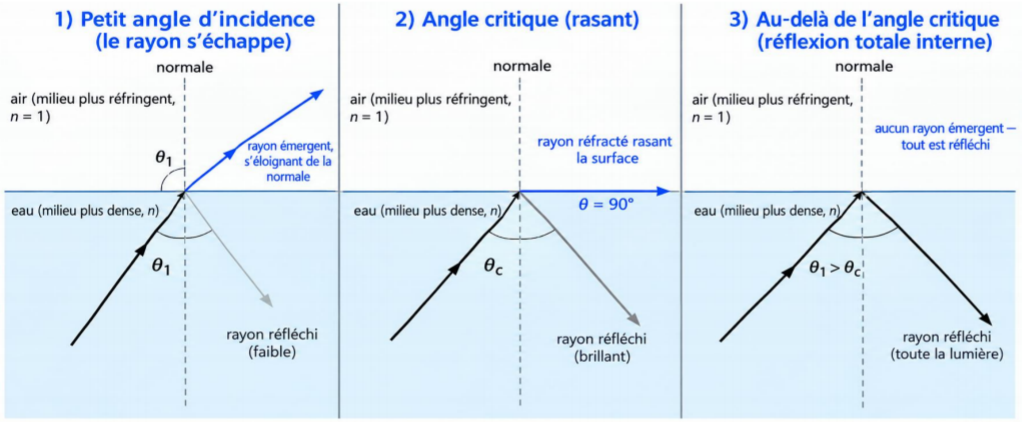


Figure 2-9-3 · Échappement, incidence rasante et réflexion totale lorsque l'angle augmente.

Angle critique et réflexion totale interne

Lorsque la lumière passe d'un milieu optiquement plus dense (n_1) à un milieu optiquement plus rare (n_2), où $n_1 > n_2$, le rayon réfracté s'écarte de la normale. L'angle critique (θ_c) est l'angle d'incidence dans le milieu plus dense pour lequel l'angle de réfraction est de 90° . D'après la loi de Snell :

$n_1 \sin\theta_c = n_2 \sin 90°$ Puisque $\sin 90° = 1$ alors : $\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1}$.

La réflexion totale interne se produit lorsque :

la lumière passe d'un milieu optiquement plus dense à un milieu optiquement plus rare ; l'angle d'incidence dans le milieu plus dense est supérieur à l'angle critique. À des angles supérieurs à θ_c, aucun rayon réfracté n'est formé, et la lumière est réflé chie dans le milieu plus dense.

Angle critique (θ_c)

Angle d'incidence dans le milieu plus dense pour lequel le rayon réfracté a un angle de réfraction de 90° ; pour des angles d'incidence supérieurs à θ_c, il se produit une ré flexion interne totale.

Point

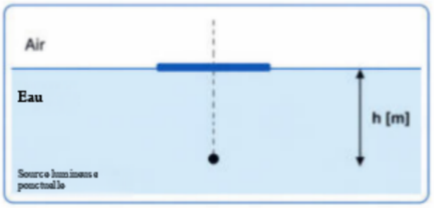
- La lumière se déplace à sa vitesse maximale *c* dans le vide; dans un milieu transparent, elle se dé place à une vitesse plus faible *v*. L'indice de réfraction absolu de ce milieu est $n = \frac{c}{v}$, et un milieu avec un indice de réfraction plus grand est appelé optiquement plus dense— la lumière s'y propage plus lentement, ce qui ne signifie pas nécessairement que le matériau a une masse volumique plus grande. Écrite avec les indices absolus, la loi de réfraction est $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$.e)
- En passant d'un milieu plus dense à un milieu plus rare, l'angle d'incidence pour lequel l'angle de réfraction devient 90° est appelé l'angle critique. Pour des angles d'incidence supérieurs à celui-ci, aucun rayon réfracté n'émerge et la lumière est entièrement réfléchie vers l'arrière : c'est la réflexion interne totale.$\sin\theta c = n_2/n_1$.

encadré d'équation

Indice de réfraction absolu	$n = \frac{c}{v}$
Loi de Snell pour la lumière	$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$
Angle critique (plus dense → moins dense)	$\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1}$

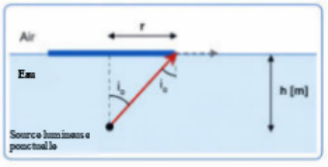
Application rapide : La lumière arrive sur une surface eau − air depuis le côté de l'eau. Prendre l'indice de réfraction de l'eau égal à $\sqrt{2}$ (et $\sqrt{2} \approx 1{,}4$) .**Déterminer** s in θ pour la réflexion totale interne n_2 . réflexion, en utilisant s in $\theta_c = \frac{n_1}{}$ avec $a\ ir\ n_2 = 1$

Exemple travaillé

Problème	**(a)** La lumière se propageant dans l'air (indice de réfraction 1,0) pénètre dans une substance d'indice de réfraction 1,5. Prenez la vitesse de la lumière dans l'air $c = 3{,}0 \times 10^8$ m/s et la longueur d'onde dans l'air $\lambda_0 = 6{,}0 \times 10^{-7}$ m ; **(i)**Déterminez la vitesse v dans la substance, en m/s. (ii) Déterminez la longueur d'onde **λ** dans la substance, en m.  Figure 2-9-4 · Une source ponctuelle à une profondeur h sous la surface. **(b)** Une source lumineuse ponctuelle se trouve à une profondeur h m sous la surface de l'eau. En faisant flotter un disque sur la surface, trouvez le rayon minimal r m du disque qui empêche la lumière de la source d'émerger dans l'air. Prenez l'indice de réfraction de l'air = 1 et celui de l'eau =n.
Situation	**(a)** la lumière passe de l'air (n= 1,0) à une substance plus dense (n= 1,5) . **(b)** une source ponctuelle se trouve à une profondeur h dans l'eau (indice n) ; un disque flottant doit bloquer tout rayon qui, autrement, se réfracterait dans l'air.
Données et exigences	Donné — (a) $n_{air} = 1.0, n_{sub} = 1.5,\ c = 3{,}0 \times 10^8$ m/s, $\lambda_0 = 6{,}0 \times 10^{-7}$ m ·**(b)** profondeur $h, n_{air} = 1, n_{water} = n$ Requis — **(a)(i)**v·**(a)(ii)**λ·**(b)**rayon minimal du disque r
Représentation	En passant dans un milieu plus dense, la lumière ralentit et sa longueur d'onde diminue (la fréquence reste inchangée) . Sous l'eau, les rayons qui atteignent la surface avec un angle inférieur à l'angle critique sont réfractés dans l'air ; au-delà, la surface produit une réflexion totale interne. Les rayons qui s'échappent forment un cercle de rayon r à la surface — couvrez-le et aucune lumière n'émerge.
Stratégie	Utiliser la loi de la réfraction avec les indices absolus : $_2 = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_0}{\lambda}$. Pour la réflexion totale interne, trouver l'angle critique θ_c en fixant l'angle de réfraction à 90 ° : $n \sin\theta_c = \sin 90° \rightarrow \sin\theta_c = 1/n$. *Alors* $r = h \tan\theta_c$.
Solution annotée	**(a)** La lumière entrant dans le matériau $(n: 1{,}0 \rightarrow 1{,}5)$ La Vitesse : $= \frac{3{,}0\times10^8}{v} = \frac{1{,}5}{1{,}0} \rightarrow \boxed{v = 2{,}0 \times 10^8\ \text{m/s}^{-1}}$ La longueur d'onde : $= \frac{6{,}0\times10^{-7}}{\lambda} = \frac{1{,}5}{1{,}0} \rightarrow \lambda = 4{,}0 \times 10^{-7}$ m **(b)** Rayon du disque déterminé à partir de l'angle critique Angle critique : $\frac{1}{n} = \sin i_0$ Dans le triangle rectangle : $\tan i_0 = \frac{1}{\sqrt{n^2-1}} \rightarrow r = h \tan i_0 = \frac{h}{\sqrt{n^2-1}}$ m

Livret de données

citation $= \frac{c}{v}$ et $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$ d'après le livret. La relation d'angle critique dans $\theta = \frac{n_2}{n_1}$ ne s'imprime pas — vous le construisez en fixant l'angle de réfraction égal à 90° dans la loi de Snell. Lisez d'abord la géométrie, puis substituez les valeurs numériques.



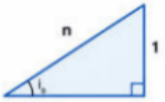


Figure 2-9-5 · Le cône d'échappement a un rayon r, déterminé par l'angle critique.

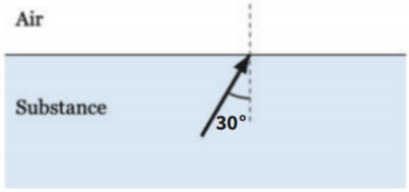
Vérification de la cohénce	Le rayon (r) augmente avec la profondeur (h) et diminue lorsque (n) augmente, car un indice de réfraction plus grand donne un angle critique plus petit et Un cône d'échappement plus étroit : $r = \frac{h}{\sqrt{n^2-1}}$
Explique-le toi même	Pour une source à la même profondeur h, pourquoi un indice de réfraction plus grand n rend-il le disque bloquant plus petit ? Idée : un n plus grand donne un sin $\theta_c = \frac{1}{n}$ plus petit, donc un angle critique θ_c plus petit. Le cône de rayons qui peuvent s'échapper se rétrécit, donc le rayon d'échappement $r = h\tan\theta_c = \frac{h}{n^2-1}$ rétrécit.

À toi d'essayer : une lampe se trouve à une profondeur **h = 0,30 m** sous l'eau d'indice de réfraction $\sqrt{2}$. **Déterminez** le plus petit rayon de disque r qui bloque tous les rayons qui s'échappent, en m.

Mets -le à l'épreuve : dans votre tasse, dirigez le faisceau étroit vers le bas depuis l'air dans l'eau avec un grand angle d'incidence et montrez qu'un rayon transmis est encore produit, contrairement au faisceau dirigé vers le haut.

Essayez

(a) Comme le montre la figure, la lumière se déplaçant dans une substance dont l'indice de réfraction est de $\sqrt{2}$ entre dans l'air dont l'indice de réfraction est de 1,0 sous un angle d'incidence de 30° . Soit la vitesse de la lumière dans l'air c $3{,}0 \times 10^{8}$ m/s, soit la longueur d'onde de la lumière dans air λ_0 égale à $5{,}8 \times 10^{-7}$ m, et soit $\sqrt{2} \approx 1{,}4$. **(i)**Déterminez la vitesse de la lumière v dans la substance, en m/s. **(ii)**Déterminez la longueur d'onde de la lumière λ dans la substance, en m. **(iii)**Soit l'angle de réfraction θ_2. Détermine la valeur de sin θ_2.



(b) Il y a une source lumineuse ponctuelle à une profondeur de 0,30 m sous la surface de l'eau. Pour empêcher la lumière de la source ponctuelle de sortir dans l'air en faisant flotter un disque sur la surface de l'eau, déterminez le rayon minimal r du disque en m. Supposez que l'indice de réfraction de l'air est 1 et que l'indice de réfraction de l'eau est $\sqrt{2}$.

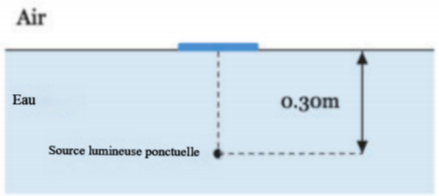


Figure 2-9-7 · Une source à 0,30 m sous la surface de l'eau.

Conseils pour l'examen :
Présentez la relation que vous avez utilisé : $n = \frac{c}{v}$ ou $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$ ou $\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1}$ ainsi que la **substitution numérique** qui suit dans chaque réponse. Les examinateurs attribuent des points pour la méthode de résolution.

Dans un nouveau contexte — les fibres optiques qui arrivent à Alexandrie

Une fibre optique possède un cœur dont l'indice de réfraction est supérieur à celui de la gaine qui l'entoure. La lumière guidée qui se propage dans le cœur peut rencontrer la limite cœur-gaine sous des angles supérieurs à l'angle critique, de sorte qu'elle subit une réflexion totale interne et reste guidée le long de la fibre.

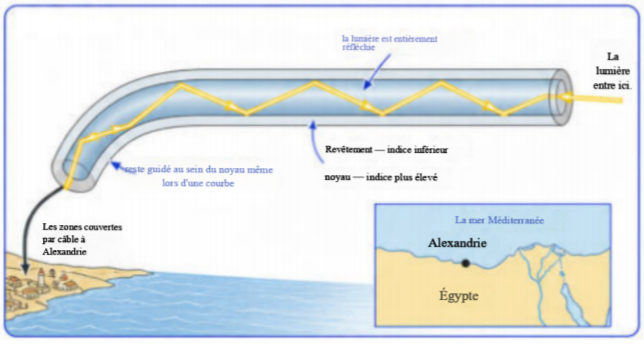


Figure 2-9-8 · La lumière reste dans le cœur même dans un coude du câble.

Question de liaison
« Comment la réflexion totale interne est-elle utilisée pour guider la lumière dans les fibres optiques ? »

l'indice de réfraction de la gaine est inférieur à celui du cœur, si bien que la lumière qui atteint leur interface peut être totalement réfléchie. Expliquez pourquoi la lumière reste piégée dans le cœur et indiquez ce qu'il adviendrait du signal si la gaine était plut ôt constituée d'un verre dont l'indice serait supérieur à celui du cœur.

Nature de la science : la science comme entreprise commune — Charles Kao et le verre le plus pur

La réflexion totale interne peut guider la lumière le long d'une fibre de verre, mais les premiers verres absorbaient trop de lumière pour permettre une communication sur de longues distances. En 1966, Charles Kao montra que la cause principale de ces pertes était la présence d'impureté s dans le verre. Il affirma qu'un verre suffisamment pur pouvait transmettre la lumière sur de longues distances. Les progrès ultérieurs de la fabrication du verre rendirent la communication par fibre optique praticable, et Kao partagea le prix Nobel de physique 2009 pour ces travaux. Les fibres optiques devinrent une technologie majeure pour la communication mondiale.

À votre tour : proposez une raison pour laquelle l'intuition de Kao n'a changé le monde qu'après que d'autres scientifiques et ingénieurs, dans de nombreux pays, ont pu vérifier son calcul et s'appuyer sur celui-ci.

Question de la leçon, corrigée

Lorsque la lumière passe de l'eau à l'air, traverse-t-elle toujours la surface — ou la surface peut-elle réfléchir totalement la lumière ? Elle ne traverse pas toujours. Du côté le plus dense vers le côté le plus rare, le rayon s'écarte de la normale. À mesure que l'angle d'incidence augmente, le rayon émergent s'écarte davantage de la normale jusqu'à ce que, à l'angle critique



Figure 2 - 9 - 9 · Le réservoir revisité.

sin $\theta_c = \frac{n_2}{n_1}$, il rase la surface. Au-delà de cet angle, il n'y a pas de rayon réfracté du tout : toute la lumière est réfléchie, et la surface devient un miroir parfait. Au-dessus de l'angle critique, une surface allant d'un milieu plus dense vers un milieu moins dense cesse de transmettre et réfléchit totalement la lumière — c'est le principe qui guide les signaux lumineux le long des fibres optiques.

Exercice

Détermine ce qui suit.

(a) Comme le montre la Figure 2-9-10, la lumière se propageant dans une substance dont l'indice de réfraction est de 1,5 pénètre dans l'air dont l'indice de réfraction est de 1,0 sous un angle d'incidence de 30°. Soit la vitesse de la lumière dans l'air c égale à $3{,}0 \times 10^{8}$ m/s, et la longueur d'onde de la lumière dans la substance λ égale à $4{,}0 \times 10^{-7}$ m.



Figure 2-9-10 · Un rayon rencontrant la frontière à 30°.

(i) Détermine la vitesse de la lumière v dans la substance, en m/s.

(ii) Déterminezla longueur d'onde λ_0 de la lumière dans l'air, en m.

(iii) Soit l'angle de réfraction r. Déterminez la valeur de sin r.

(b) Il y a une source lumineuse ponctuelle à une profondeur de 0,20 m sous la surface verre-air. Pour empêcher la lumière de la source ponctuelle d'émerger dans l'air en plaçant un disque sur la surface, déterminez le rayon minimal r du disque en m. Suppose que l'indice de réfraction de l'air est de 1,0 et que l'indice de réfraction du verre est de $\sqrt{5}$.

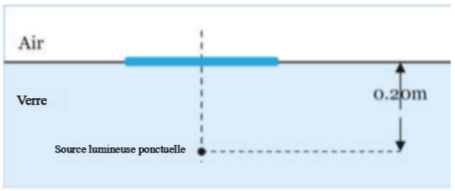


Figure 2-9-11 · Une source à 0,20 m sous la surface du verre.

Fascicule de données

Citation $n = \frac{c}{v}$ et $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$ du fascicule ; construisez sin $\theta_c = \frac{n_2}{n_1}$ par dérivation vous-même en fixant l'angle réfracté à 90 °. Votre tâche consiste à choisir la relation appropriée et à utiliser le schéma pour identifier les grandeurs géométriques requises.

Question de type examen

La lumière à l'intérieur d'un bloc de verre d'indice de réfraction 1,5 atteint la surface verre – air (indice de l'air 1,0).

Déterminez sin θ_c pour la réflexion totale interne à cette surface, et indiquez ce qui arrive à un rayon qui atteint la surface avec un angle d'incidence supérieur à θ_c.



Leçon 2- 10 — Lentilles et images

❓ **Question de la leçon :**Une loupe produit une image droite et agrandie lorsqu'elle est proche d'un journal. Pourquoi l'image peut-elle devenir inversée lorsque la lentille est éloignée de la page ?

tu apprendras à

À la fin de cette leçon, tu seras capable de :

1. **Tracer les** rayons principaux à travers une lentille mince et localiser l'image à partir de leur intersection.
2. **Décrire l'image formée par une lentille comme réelle ou virtuelle, inversée ou droite,**agrandie ou réduite.
3. **Utiliser** l'équation des lentilles et la relation de grandissement pour déterminer la position et la taille de l'image, en utilisant la convention de signe indiquée dans la leçon.

Sécurité : Si une bougie est utilisée, elle doit être sous la supervision de l'enseignant et tenue à l'écart du papier et d'autres matériaux inflammables.

🔍 Le phénomène — prédis avant de pousuivre



Figure 2-10-1 · Une loupe fait paraître le texte plus grand.

Un grand-père tient une loupe près d'un journal, et le titre apparaît grand et droit. Il soulève la même lentille plus haut au-dessus de la page, et les lettres deviennent plus petites et inversées. Seule la distance entre la page et la lentille a changé. Pourquoi le fait de modifier cette distance fait-il passer l'image de droite et grossie à inversée ?

Prédis avant de poursuivre

(a) Une loupe fait-elle toujours paraître les objets plus grands, quelle que soit la distance ?

(b) Si vous couvrez la moitié de la lentille avec votre pouce, perdez-vous la moitié de l'image ?

Fait essentiel

La lumière est réfractée lorsqu'elle passe d'un milieu à un autre ayant un indice de réfraction diffé rent. Une lentille utilise la réfraction au niveau de ses surfaces courbes pour modifier la direction des rayons lumineux et former une image.

Explore — Former une image réelle avec une lentille convexe

Ce que tu feras : utilise une lentille convexe pour former une image réelle sur un écran et la comparez à l'image virtuelle observée lorsque l'objet est à l'intérieur de la distance focale.**Temps :**12 min

Tu auras besoin de :

- Une lentille convexe ou une loupe.
- Un petit objet lumineux, comme la flamme d'une bougie.
- Un écran blanc ou un mur uni.
- Une pièce sombre.

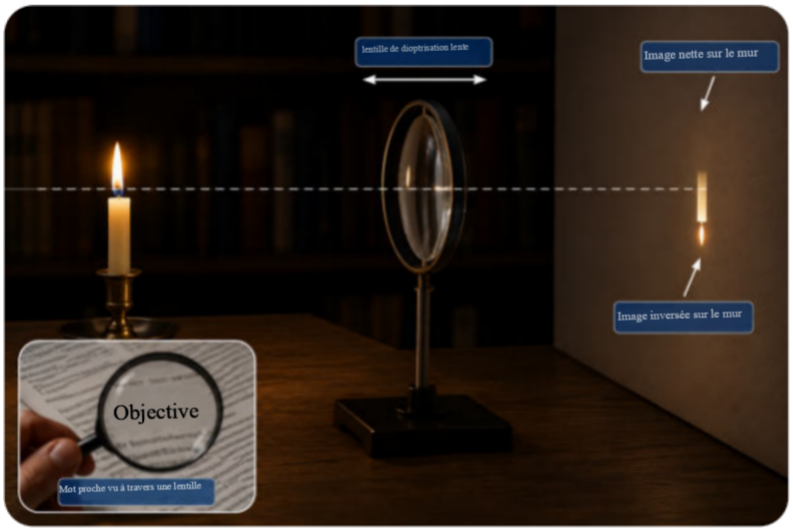


Figure 2-10-2 · En faisant glisser la lentille, une image nette inversée apparaît sur le mur.

Étapes :

1. Place un petit objet lumineux à plusieurs mètres d'un mur blanc ou d'un écran.
2. Tiens la lentille convexe entre l'objet et l'écran.
3. Déplace lentement la lentille jusqu'à ce qu'une image nette se forme sur l'écran.
4. Note si l'image est droite ou inversée.
5. Place la même lentille près d'un mot imprimé et regardez à travers la lentille.
6. Éloigne lentement la lentille du mot et observez comment l'image change.

Position de l'objet par rapport à la lentille	Image formée sur l'écran ?	Orientation de l'image

Analyse ce que tu as recueilli :

(a) L'image formée sur le mur était-elle réelle ou virtuelle ? Comment le savez-vous ?

(b) Pourquoi l'image du mot imprimé ne pouvait-elle pas se former sur un écran lorsque celui-ci était très proche de la lentille ?

Écris ton explication en deux lignes avant de lire la page suivante.

Une note de mesure

Faites glisser lentement la lentille près de la position de mise au point nette ; l'image sur le mur devient rapidement floue si la distance est décalée, ne serait-ce que de quelques millimètres.

De l'observation au modèle

Dans l'activité Explorer, vous avez formé une image nette de l'objet éloigné sur le mur, et elle était inversée. L'image du mot proche vu à travers la lentille ne pouvait être formée sur aucun écran. Vous avez peut-être prédit qu'une lentille ne fait que grossir ; vos deux images diffèrent déjà. Voici le modèle indiqué par les rayons — dessiné, sans calcul pour l'instant.

Deux formes de lentilles, un axe principal

Une lentille convexe est plus épaisse en son centre qu'à ses bords et agit comme une lentille convergente pour des rayons parallèles. Une lentille concave est plus mince en son centre qu'à ses bords et agit comme une lentille divergente pour des rayons parallèles.

L'axe principal est la droite passant par le centre optique de la lentille et perpendiculaire au plan de la lentille. Les foyers principaux F et F' se trouvent sur cet axe, de part et d'autre de la lentille, à une distance f, appelée distance focale, du centre optique. Une lentille convexe fait converger les rayons parallèles vers F'.

Localisation de l'image à l'aide des rayons principaux

Pour localiser l'image formée par une lentille mince, tracez deux des rayons principaux suivants à partir du sommet de l'objet :

1. Un rayon passant par le centre optique de la lentille continue sans déviation.
2. Un rayon parallèle à l'axe principal est réfracté en passant par le foyer éloigné F' pour une lentille convexe, ou semble provenir du foyer proche F pour une lentille concave.
3. Un rayon passant par le foyer proche F d'une lentille convexe ressort parallèlement à l'axe principal. Pour une lentille concave, un rayon dirigé vers le foyer éloigné F' ressort parallèlement à l'axe principal.

Si les rayons réfractés se rencontrent réellement, l'image est réelle et peut être formé e sur un écran. Si les rayons réfractés divergent et que seuls leurs prolongements vers l'arrière se rencontrent, l'image est virtuelle et ne peut pas être formée sur un écran.

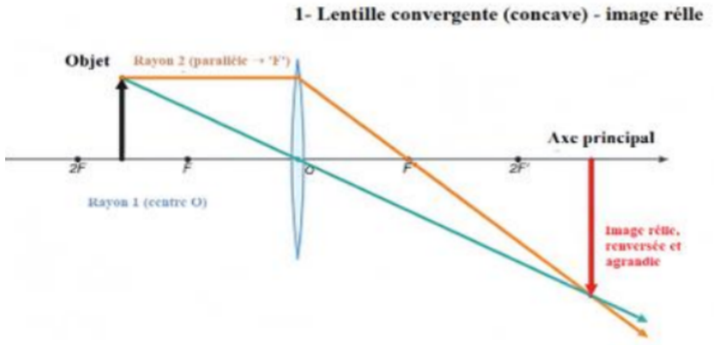
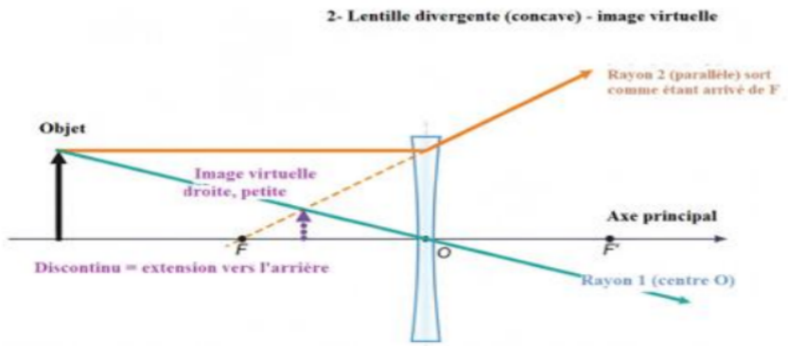


Figure 2-10-3 · Lentille convergente : image réelle et inversée.

Figure 2-10-4 · Lentille divergente : image virtuelle et droite.



Les six positions, représentées sur une même grille

Rapprochez l'objet depuis une position éloignée et la lentille convexe produit une séquence fixe d'images. Pour une lentille concave, l'image reste virtuelle, droite et diminuée, bien que sa position et sa taille changent à mesure que l'objet se déplace. Lisez chaque ligne comme un tracé de rayons exemple de diagramme — l'algèbre vient à la page suivante.

Foyer principal (F)

Pour une lentille convexe, le foyer principal est le point de l'axe principal o ù les rayons initialement parallèles à l'axe convergent après ré fraction. Pour une lentille concave, c'est le point d'où ces rayons semblent diverger. La distance focale f est la distance entre le centre optique et le foyer principal.

Note sur la grille

Sur ces schémas, une distance focale f correspond à un nombre fixe de carreaux, donc 2F se situe à deux fois ce compte par rapport à la lentille — lisez les positions de l'objet en comptant les carreaux, et non par estimation visuelle.

Position de l'objet (convexe sauf indication contraire)	Type d'image	Orientation et taille	Position de l'image
Au-delà de 2F	Réelle	Inversée et réduite	Entre F et 2F du côté opposé de la lentille
À 2F	Réelle	Inversée et de même taille	À 2F du côté opposé de la lentille
Entre F et 2F	Réel	Inversée et agrandie	Au-delà de 2F du côté opposé de la lentille
À F	Image à l'infini ; les rayons émergents sont parallèles	Inversée · fortement Agrandie	À l'infini du côté opposé de la lentille
À l'intérieur de F(plus près que F)	Virtuelle	Droite et agrandie	Du même côté de la lentille que l'objet
Lentille concave — toute position	Virtuelle	Droite et réduite	Entre la lentille et F, du même côté que l'objet

Du dessin au nombre — l'équation de la lentille

Les rayons montrent où se trouve l'image ; nous allons maintenant la déterminer quantitativement. Soit a la distance de l'objet à la lentille, b la distance de l'image à la lentille, et f la distance focale. Dans cette leçon, nous utilisons la convention de signe suivante : a est toujours positif, f est écrit comme une grandeur positive, et le signe de b identifie l'image.

Pour une lentille convexe (convergente) : $\frac{1}{a}+\frac{1}{b}=\frac{1}{f}$ Pour une lentille concave (divergente) : $\frac{1}{a}+\frac{1}{b}=-\frac{1}{f}$

Le grandissement M est le rapport de la taille de l'image à la taille de l'objet : M= $\left|\frac{b}{a}\right|$ Dans cette convention, M est pris comme un rapport de taille positif. L'orientation de l'image est décrite séparément comme droite ou renversée.

Le signe décisif — le signe de b

La distance image b est la seule grandeur signée. Son signe indique, sans dessin supplémentaire, de quel côté se trouve l'image — et donc si elle est réelle ou virtuelle.

Signe de b	Où se forme l'image	Ce que c'est
b positif (+)	Derrière la lentille — du côté opposé à l'objet	Image réelle
b négatif (−)	Devant la lentille — du même côté que l'objet	Image virtuelle

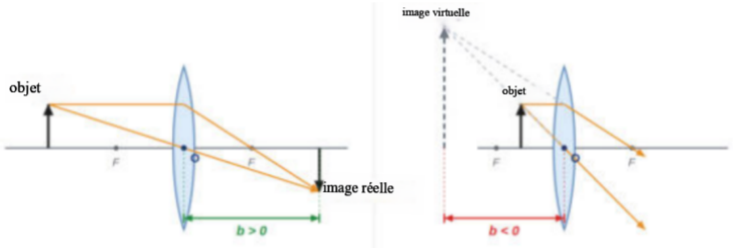


Figure 2-10-5 · Le signe de la distance image distingue le réel du virtuel.

Conseil d'examen

Citez b avec son signe, puis lisez directement le type d'image à partir de celui-ci : un plus signifie réel et derrière, un moins signifie virtuel et devant. N'écrivez jamais de signe sur M.

Point

- Une lentille plus épaisse au centre qu'aux bords est appelée lentille convexe et fait converger les rayons parallèles ; une lentille plus mince au centre qu'aux bords est appelée lentille concave et les fait diverger. La droite passant par le centre optique, perpendiculaire à la lentille, est l'axe principal.
- Une image formée là où les rayons lumineux eux-mêmes se croisent est appelée image réelle; une image formée sur les prolongements de rayons divergents est appelée image virtuelle. Pour une lentille convexe avec l'objet à l'extérieur du point focal, l'image est réelle et renversée; avec l'objet à l'intérieur du point focal, elle est virtuelle et droite. Pour une lentille concave, l'image est toujours virtuelle, droite et réduite, quelle que soit la position de l'objet.
- Soit a la distance objet, b la distance image et f la distance focale. Lentille convexe : $\frac{1}{a}+\frac{1}{b}=\frac{1}{f}$. Lentille concave : $-\frac{1}{a}+\frac{1}{b}=-\frac{1}{f}$. Le grandissement est $M=\left|\frac{b}{a}\right|$

b est positif pour une image réelle et négatif pour une image virtuelle ; M ne porte jamais de signe.

Encadré d'équation

Lentille convexe	$-+\bar{b}=\bar{f}$	Lentille concave	$-+\bar{b}=-\bar{f}$	Grossissement	$M=\left\|\frac{b}{a}\right\|$

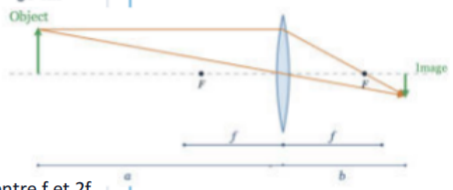
Application rapide : un objet est placé à 40 cm devant une lentille convergente de distance focale 10 cm. **Calcule** la distance de l'image b à partir de $+\bar{b}=\bar{f}$, puis le grandissement M.

Exemple résolu

Situation	Un objet est placé devant une lentille mince. Deux cas distincts sont considérés : une lentille **convexe**(convergente) et une lentille **concave**(divergente).
Données et requis	**Donné : (a)**lentille convexe : distance objet a= 60 cm · distance focale f = 20 cm **(b)** lentille concave : distance objet a= 20 cm · distance focale f = 10 cm **Requis**(à 2 chiffres significatifs) **(i)** le type d'image · **(ii)**la position de l'image · **(iii)**le grandissement
Représentation	Appliquer l'équation des lentilles minces, où a est la distance objet et b est la distance image : $\frac{1}{a}+\frac{1}{b}=\frac{1}{f}$ • utiliser $+\frac{1}{f}$ pour une lentille convergente (convexe) et $-\frac{1}{f}$ pour une lentille divergente (concave), avec f conservée comme une grandeur positive. • Un b positif correspond à une image réelle du côté opposé de la lentille ; un b négatif correspond à une image virtuelle du même côté que l'objet. • Le grandissement linéaire est $M=\left\|\frac{b}{a}\right\|$. Chaque image est ensuite localisée à l'aide de deux rayons principaux : l'un parallèle à l'axe et l'autre passant par le centre optique de la lentille.
Stratégie	**1.** Attribuez le signe du terme de la lentille : $+f$ pour la lentille convexe, $-\frac{1}{f}$ pour la lentille concave. **2.** Résolvez l'équation des lentilles minces pour b; son signe indique le type et le côté de l'image — positif signifie réelle (côté éloigné), négatif signifie virtuelle (côté de l'objet). **3.** Trouvez $M=\left\|\frac{b}{a}\right\|$; $M<1$ indique une image réduite, $M>1$ une image agrandie. **4.** Confirmez à l'aide d'un diagramme de rayons.
Solution annotée	**(a) Lentille convexe** **(i) Type d'image** La lentille est convexe (convergente) et l'objet (à 60 cm) se trouve au-delà de 2f = 40 cm, donc l'image est réelle, inversée et réduite. **(ii) Position de l'image** Pour une lentille convergente f = +20 cm : $\frac{1}{60}+\frac{1}{b}=\frac{1}{20}\ \frac{1}{b}=\frac{1}{20}-\frac{1}{60}=\frac{1}{30}\Rightarrow b=30\text{ cm}$ Puisque b est positif, l'image est à 30 cm derrière la lentille. Un b positif signifie une image réelle, du côté opposé de la lentille par rapport à l'objet. **(iii) Grossissement** $M=\left\|\frac{b}{a}\right\|=\left\|\frac{30}{60}\right\|=\frac{1}{2}=0.50$ M =0,50 Lentille convexe — un objet au-delà de 2f donne une image réelle, inversée et réduite entre f et 2f. **(b) Lentille concave** **(i) Type d'image** La lentille est concave (divergente), donc pour toute position de l'objet, l'image est virtuelle, droite et plus petite. **(ii) Position de l'image** Pour une lentille divergente f= 10 cm : $\frac{1}{20}+\frac{1}{b}=-\frac{1}{10}$: $\frac{1}{20}+\frac{1}{b}=\frac{1}{-10}=-\frac{1}{10}$ $\frac{1}{b}=-\frac{1}{10}-\frac{1}{20}=-\frac{3}{20}\Rightarrow b=-\frac{20}{3}\text{ cm}\approx-6.7\text{ cm}$ Puisque b est négatif, l'image se trouve à 6,7 cm devant la lentille. Un b négatif signifie une image virtuelle, du même côté que l'objet. **(iii) Grossissement** $M\ \left\|\frac{b}{a}\right\|\ \left\|\frac{-20}{20}\right\|\ \frac{1}{3}$ 0,333… ≈ 0,33 M= 0,33 Lentille concave — une image virtuelle, droite et réduite se forme entre l'objet et la lentille

Fait essentiel

Une image virtuelle (b négatif) ne peut pas être formée sur un écran — les rayons semblent seulement en provenir. Le mot droit vu à travers une loupe est exactement ce type d'image.



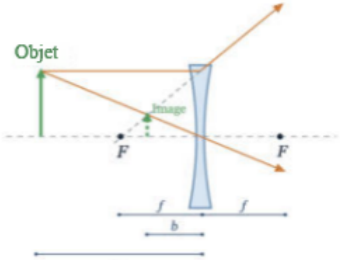


Figure 2-10-7 · Distances objet et image pour une lentille divergente.

Vérification de la cohérence	**Cas (a)**: un objet au-delà de 2f donne une image réelle entre f et 2f.b= 30 cm se situe entre 20 et 40 cm, et M = 0,50 la rend diminuée — comme le montre le schéma. **Cas (b)** :une lentille divergente donne toujours une image virtuelle, droite et diminuée. Ici $\|b\|$ = 6,7 cm < $\|f\|$ = 10 cm et M = 0,33, encore une fois conforme au schéma.
Explique-le Toi-même	Pourquoi une lentille divergente (concave) forme-t-elle toujours une image virtuelle, droite et diminuée, quelle que soit la distance de l'objet ?

Mettez-le à l'épreuve : Capturez une image nette sur le mur. Faites ensuite glisser une carte sur la moitié de la lentille. Notez ce qui change — la forme de l'image, ou seulement sa luminosité.

Essaye

1. Étant donné un objet représenté par une flèche et une lentille avec des points focaux *F et F,*, tracez l'image de l'objet formée par la lentille.

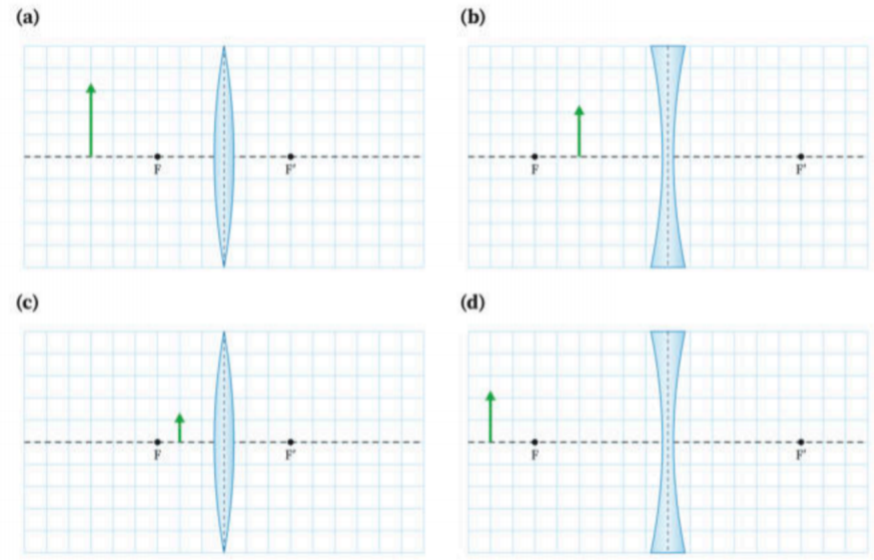


Figure 2-10-8 · Quatre lentilles avec l'objet à différentes distances.

2. Détermine les valeurs suivantes à 2 chiffres significatifs.

(a) Pour chacun des cas suivants, déterminez (A) le type d'image, (B) la position de l'image et (C) le grandissement.

(i) Un objet est placé à 30 cm devant une lentille convergente de distance focale 20 cm.

(ii) Un objet est placé à 4,0 cm devant une lentille convergente de distance focale 6,0 cm.

(iii) Un objet est placé à 6,0 cm devant une lentille divergente de distance focale 12 cm.

(b) Comme le montre la Figure 2-10-9, un écran est placé à 90 cm d'un objet, et une lentille convergente de distance focale 20 cm est déplacée entre l'objet et l'écran. Déterminez toutes les valeurs de la distance a entre la lentille et l'objet pour lesquelles une image nette se forme sur l'écran.

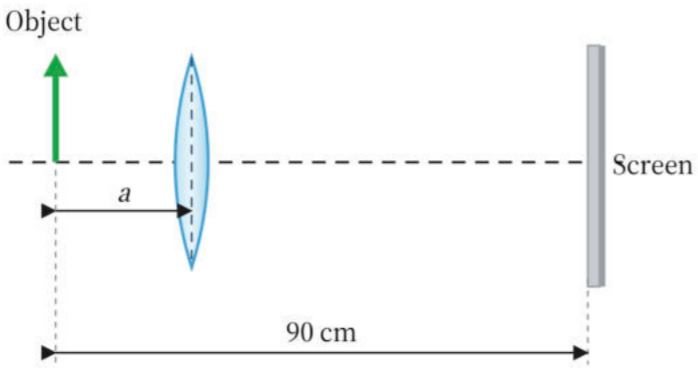


Figure 2-10-9 · Un objet à 90 cm de l'écran.

Une note de travail

Pour les cas d'image virtuelle (b), (c) et (d), les rayons émergents divergent ; prolongez-les vers l'arrière en pointillés pour trouver où se situe l'image virtuelle, du côté objet de la lentille.

Dans un nouveau contexte — le cristallin à l'intérieur de votre œil

La cornée et le cristallin de l'œil agissent ensemble comme un système optique convergent. Ils forment une image réelle et inversée sur la rétine. L'accommodation modifie la forme du cristallin, ce qui change la distance focale effective afin que les images d'objets proches et éloignés puissent être mises au point sur la rétine.

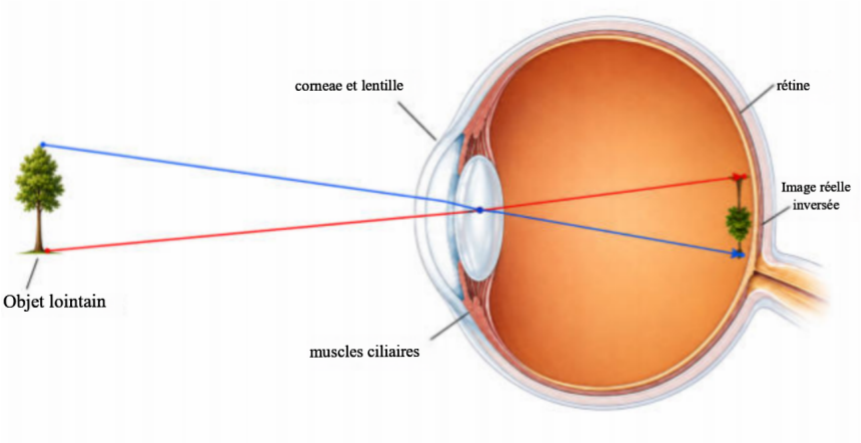


Figure 2-10-10 · L'œil concentre un objet éloigné sur la rétine.

Applique votre compréhension : Explique pourquoi l'image sur votre rétine est réelle et inversée, et quels rayons principaux vous traceriez pour le montrer.

Nature des sciences : Ibn al- Haytham et le Livre de l'Optique — voir grâce à la lumière qui entre dans l'œil

Ibn al-Haytham a soutenu que la vision se produit parce que la lumière des objets entre dans l'œil, et non parce que des rayons sortent de l'œil. Ses travaux en optique ont mis l'accent sur l'observation et l'expérimentation, qui sont des méthodes centrales de la science moderne. (Source : Ibn al-Haytham, Kitāb al-Manāẓir, vers 1011 – 1021 de notre ère.)

À votre tour : proposez une observation quotidienne qui montre que nous voyons grâce à la lumière qui entre dans l'œil, et non grâce à des rayons qui en sortent.

Question de la leçon, résolue

Figure 2-10-11 · La loupe revisitée.



Une loupe agrandit les caractères lorsqu'elle est tenue près d'un journal, mais pourquoi les lettres s'inversent-elles quand la lentille est éloignée ?

Lorsque le journal se trouve entre la lentille convexe et son foyer principal, la lentille forme une image virtuelle, droite et agrandie. À mesure que la lentille s'éloigne, la distance objet augmente. Une fois que le journal est au-delà du foyer principal, la lentille forme une image réelle et inversée.

Ainsi, les propriétés de l'image dépendent de la position de l'objet par rapport au foyer principal : un objet placé entre la lentille et le foyer principal produit une image virtuelle et droite, tandis qu'un objet placé au-delà du foyer principal produit une image réelle et inversée.

Question de liaison

« Comment la réfraction sur une surface courbe permet-elle à une seule lentille de former une image ? » — renvoie à la réfraction de la leçon 2-9. La courbure que vous y avez rencontrée est celle que chaque rayon principal suit au niveau de la lentille.

Exercice

1. Étant donné un objet représenté par une flèche et une lentille avec les foyers F et $F,$, dessine l'image de l'objet formée par la lentille.

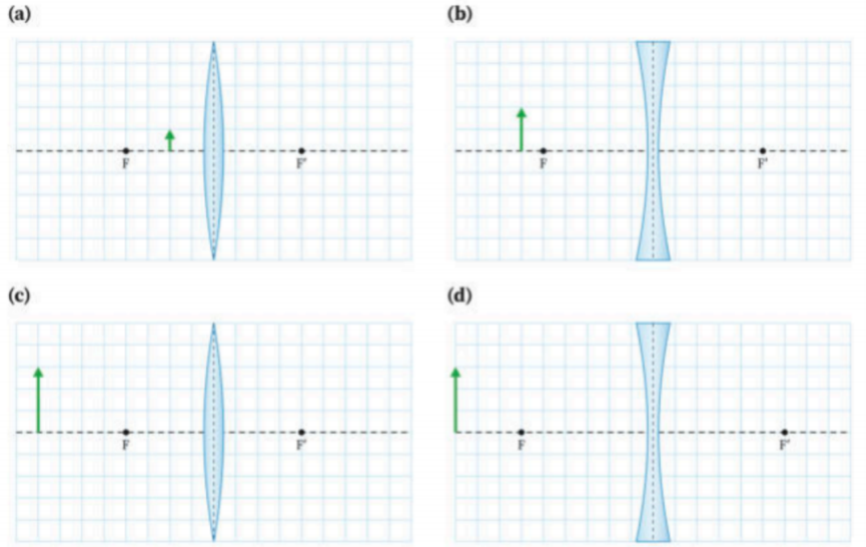


Figure 2-10-12 · Quatre autres cas, pour l'exercice.

2. Déterminez ce qui suit à 2 chiffres significatifs.

(a) Pour chacun des cas suivants, détermine (A) le type d'image, (B) la position de l'image et (C) le grandissement.

(i) Un objet est placé à 50 cm devant une lentille convergente de distance focale 30 cm.

(ii) Un objet est placé à 8,0 cm devant une lentille convergente de distance focale de 10 cm.

(iii) Un objet est placé à 10 cm devant une lentille divergente de distance focale de 15 cm.

(b) Comme le montre la figure 2-10-13, un écran est placé à 50 cm d'un objet, et une lentille convexe d'une distance focale de 12 cm est déplacée entre l'objet et l'écran. Détermine toutes les valeurs de la distance a entre la lentille et l'objet pour lesquelles une image nette se forme sur l'écran.

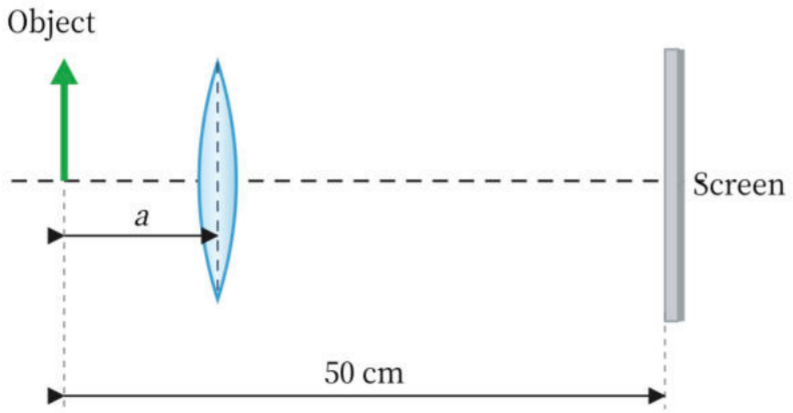
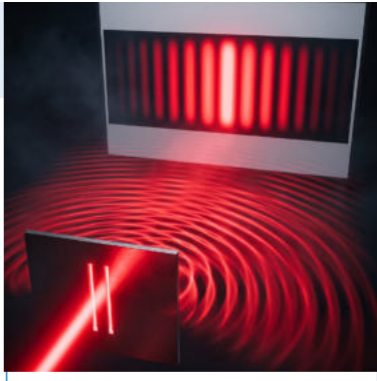


Figure 2-10-13 · Un objet à 50 cm de l'écran.

Question type examen

Un objet est placé à 30 cm devant une lentille convexe de distance focale 12 cm. Déterminez la distance de l'image *b*, avec son signe, et indiquez si l'image est réelle ou virtuelle.



Leçon 2- 11 — Expérience des fentes de Young

> ❓ **Question de la leçon :**Lorsque de la lumière monochromatique cohérente traverse deux fentes étroites, l'écran montre- t- il seulement deux régions brillantes, ou une figure d'interférence de franges brillantes et sombres ?

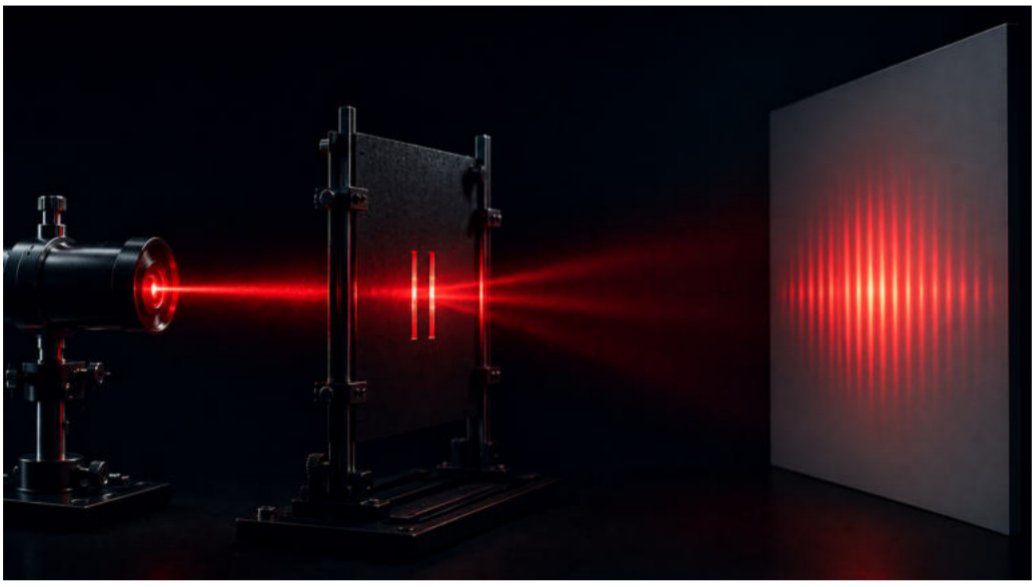
Tu apprendras à

À la fin de cette leçon, tu seras capable de :

1. **Décrire** comment la lumière cohérente provenant de deux fentes étroites produit des franges d'interférence brillantes et sombres sur un écran.
2. **Relier** la di仟érence de chemin des deux fentes à la position *x* sur l'écran en utilisant : $\Delta = \frac{dx}{D}$ pour leş petits angles
3. **Utiliser** la condition des franges brillantes : $\Delta = n\lambda$ et la relation d'espacement des franges : $\Delta y = \frac{\lambda D}{d}$ pour résoudre des problèmes et prédire les changements dans la figure.

🔍 Le phénomène — prédis avant de poursuivre

Figure 2-11-1 · La lumière laser passant par une double fente produit des bandes claires et sombres.



Lorsque la lumière monochromatique d'un laser traverse deux fentes étroites rapprochées, la lumière issue des fentes se superpose sur l'écran. Au lieu de deux régions claires seulement, une figure de franges claires et sombres se forme. La frange centrale est claire parce que la lumière provenant des deux fentes parcourt des distances égales jusqu'au centre de l'écran.

> **Prédis avant de poursuivre**
>
> **(a)** Avec les deux fentes ouvertes, le mur montrera-t-il deux taches lumineuses (une par fente) ou une rangée de nombreuses franges claires — et où se trouve la plus brillante ?
>
> **(b)** Si l'on utilise une double fente avec une plus petite séparation entre les fentes, les franges se rapprochent-elles ou s'écartent-elles davantage ?

Explorez — mesurez l'espacement des franges à différentes distances de l'écran

distances

Ce que tu feras :Faire passer une lumière laser monochromatique à travers une double fente préparée, observe les franges d'interférence sur un écran et mesurerez l'espacement des franges.

Temps :12 min

Tu auras besoin de :

- Un laser rouge de faible puissance.
- Une double fente préparée.
- Un écran blanc ou un mur mat.
- Un mètre ruban.
- Une règle d'un mètre.
- Une pièce sombre.

Utilisez uniquement un laser de faible puissance sous la supervision de l'enseignant. Ne dirigez jamais le faisceau laser vers un œil ou une surface réfléchissante. Maintenez le faisceau sous le niveau des yeux et éteignez-le lorsqu'il n'est pas utilisé.

Étapes :

1. Place la double fente devant le laser et dirigez le faisceau sur un écran blanc situé à plusieurs mètres.
2. Assombrisse la pièce afin que la figure d'interférence soit clairement visible.
3. Identifiez la frange centrale brillante et les franges brillantes adjacentes des deux côtés.
4. Mesure la distance couvrant plusieurs franges brillantes adjacentes, puis divisez par le nombre d'interfranges pour obtenir l'interfrange moyen s.
5. Mesure la distance D entre la double fente et l'écran.
6. Éloigne l'écran. Mesurez et notez la nouvelle distance fente-écran D, puis mesurez et note le nouvel interfrange moyen s.

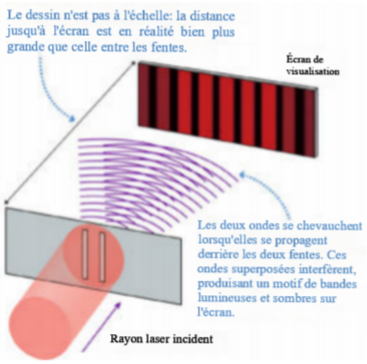


Figure 2-11-2 · Les deux ondes se chevauchent au-delà des fentes et interfèrent sur l'écran.

Fente à l'écran distance D / m	Distance sur plusieurs interlignes / mm	Nombre d'interlignes	Interligne moyen Δy / mm

Analyse ce que tu as recueilli :

(a) L'écran a-t-il montré seulement deux régions brillantes, ou un motif de plusieurs franges brillantes et sombres ? Où était située la frange centrale brillante ?

(b) Qu'est-il arrivé à l'espacement des franges lorsque la distance D des fentes à l'écran a été augmentée ?

Écris ton explication en deux lignes avant de lire la page suivante.

Note de mesure

Les franges sont proches les unes des autres, il faut donc mesurer plusieurs espacements à la fois et diviser, plutôt qu'un seul petit intervalle. Par exemple, mesurer dix espacements ensemble et diviser par dix réduit l'incertitude relative sur l'espacement moyen calculé des franges par rapport à la mesure d'un seul espacement.

De l'observation au modèle

Dans l'activité Explorer, vous n'avez pas observé deux taches lumineuses, mais une série de franges alternativement brillantes et sombres, avec une frange centrale brillante. Vous avez également constaté qu'en éloignant l'écran des fentes, l'espacement des franges augmentait. Vous vous attendiez peut-être à ce que les deux fentes produisent deux taches lumineuses distinctes. Or, la lumière issue des deux fentes atteint chaque point de l'écran, et la figure d'interférence qui en résulte dépend de la différence de marche entre les deux ondes.

Lumière cohérente issue de deux fentes

Dans l'expérience des fentes de Young, un faisceau monochromatique éclaire deux fentes étroites. Les deux fentes se comportent comme des sources cohérentes, car la lumière qui en émerge a la même fréquence et une différence de phase constante. Les deux faisceaux se superposent sur l'écran et interfèrent.

Les franges brillantes apparaissent là où les deux ondes arrivent en phase. Les franges sombres apparaissent là où les deux ondes arrivent en opposition de phase. Lorsque les ondes cohérentes se superposent, les interférences constructives produisent des franges brillantes et les interférences destructives produisent des franges sombres.

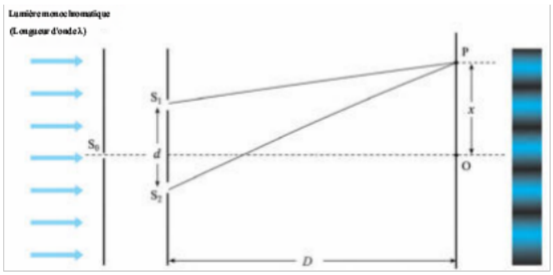


Figure 2-11-3 · La géométrie qui détermine l'espacement des bandes.

Les deux trajets diffèrent de *dx/D*

Pour un point P situé à une distance x de la ligne centrale sur un écran placé à une distance D de deux fentes séparées par une distance d, la différence de marche est approximativement : $\Delta = |S_1P - S_2P| \approx d\sin\theta \approx \frac{dx}{D}$.

Cette approximation est valable lorsque : $d \ll D$ et $x \ll D$, de sorte que l'angle est petit

Les franges brillantes se produisent lorsque : $\Delta = n\lambda$ où : $n = 0,1,2,3, \cdots \cdots$

Les franges sombres se produisent lorsque : $\Delta = \left(+\frac{1}{2}\right)\lambda$, où : $n = 0,1,2,3,\ldots$

Au centre de l'écran : $x = 0$ donc $\Delta = 0$ et la frange centrale est brillante.

Des franges à leur espacement

Pour des franges brillantes adjacentes, la différence de chemin augmente d'une longueur d'onde (Δ augmente de λ). Puisque : $\Delta = \frac{dx}{D}$ la séparation entre franges brillantes adjacentes est : $\Delta y = \frac{\lambda D}{d}$.

Point

- Lorsque la lumière monochromatique éclaire une fente S_0 puis les doubles fentes S_1 et S_2 sur un écran, la lumière interfère et une figure de franges brillantes et sombres franges— franges d'interférence— est observée. Les deux fentes agissent comme des sources cohérentes car la lumière qui en sort a la même fréquence et une différence de phase constante.
- Où S_1 et S_2 sont en phase, en un point P de l'écran :
  Franges brillantes : $|S_1P - S_2P| = \frac{\lambda}{2} \times 2n$
  Franges sombres : $|S_1P - S_2P| = \frac{\lambda}{2} \times (2n + 1)$ avec $n = 0, 1, 2, \cdots$
- Soit d la séparation des fentes et D la distance des fentes à l'écran, avec $d \ll D$ de sorte que les angles sont petits. L'espacement entre franges brillantes adjacentes $= \frac{\lambda D}{d}$, donc une plus grande longueur d'onde, un plus grand D, ou une plus petite séparation des fentes écarte davantage les franges.

Fait clé

Lorsque deux ondes cohérentes se rencontrent en un point, leurs déplacements se superposent. L'interférence constructive se produit lorsque la différence de marche est un nombre entier de longueurs d'onde : $\Delta = n\lambda$, où $n = 0, 1, 2, 3, \cdots$ L'interférence destructive se produit lorsque la différence de marche est un nombre impair de demi-longueurs d'onde : $\Delta = \left(\left(+\frac{1}{2}\right)\lambda\right.$, où $n = 0, 1, 2, 3, \cdots$

Différence de marche

La différence de marche est la distance supplémentaire parcourue jusqu'au point (P) par la lumière provenant d'une fente par rapport à la lumière provenant de l'autre fente

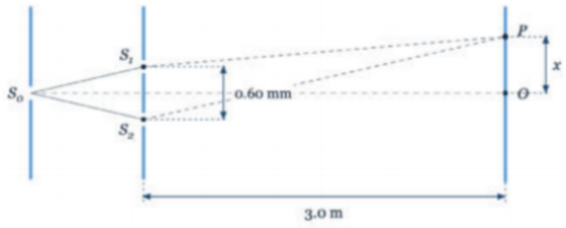
Encadré d'équation

Espacement des franges dans l'expérience des fentes de Young	$\Delta y = \frac{\lambda D}{d}$

Une longueur d'onde plus grande (λ), ou une plus grande distance fentes-écran (D), augmente l'espacement des franges (Δy)Diminuer la séparation des fentes (d) augmente aussi l'espacement des franges car d est au dénominateur.

La clé est : $\Delta y \propto \frac{1}{d}$
Par conséquent, rapprocher les fentes l'une de l'autre éloigne les franges l'une de l'autre.

Exemple résolu

Situation	Une lumière monochromatique passe à travers une fente simple puis à travers une paire de fentes, produisant une figure d'interférence sur un écran. L'espacement des franges est mesuré, et l'effet de placer de l'eau entre les fentes et l'écran est ensuite considéré.
Donné et requis	**Données** Espacement des franges Δy= 2,9 mm · distance entre les fentes d= 0,60 mm · distance fentes – écran D= 3,0 m · indice de réfraction de l'eau n= 1,3 **Inconnues** (a) la longueur d'onde λ de la lumière · (b) le nouvel espacement des franges Δx, dans l'eau
Représentation	La lumière issue de la fente simple S_0 éclaire les deux fentes $S1$ et S_2, séparées par d. Les ondes issues de $S1$ et de S_2 se superposent et interfèrent sur l'écran, situé à une distance D. *Une* frange brillante se forme en un point P, à une distance x du point central O, où la différence de marche entre les deux fentes est un nombre entier de longueurs d'onde. 
Stratégie	1. Pour un point P situé à une distance x du centre O, la différence de marche entre les ondes issues des deux fentes est $\frac{xd}{D}$ (approximation des petits angles) 2. Les franges brillantes apparaissent lorsque cette différence de marche est un nombre entier de longueurs d'onde (n longueurs d'onde entières) ; les franges sombres apparaissent lorsqu'elle est un multiple impair d'une demi-longueur d'onde. 3. Les franges brillantes consécutives sont alors séparées par l'interfrange $\Delta y = \frac{\lambda D}{d}$; réarrangez ceci pour trouver λ. 4. L'eau réduit la longueur d'onde à $\lambda = \frac{\lambda}{n}$, ce qui réduit l'interfrange : recalculez pour trouver $\Delta y'$.
Solution annotée	(a) Longueur d'onde de la lumière $\lambda \quad \frac{d\Delta y}{D} \quad \frac{(0.60 \quad 10^{-3})(2.9 \quad 10^{-3})}{} = 5.8 \times 10^{-7}\ \text{m} 3.0$ $\lambda = 5.8 \times 10^{-7}\ \text{m}$ (b) Espacement des franges dans l'eau Dans l'eau, la fréquence est inchangée, donc $\lambda' = \frac{\lambda}{}$. L'espacement des franges devient alors : $\Delta y' = \frac{D\lambda'}{d} = \frac{D\lambda}{nd}$ $\Delta y' = \frac{3.0 \times (5.8\times10^{-7})}{1.3 \times (0.60\times10^{-3})} = 2{,}23 \times 10^{-3}\ \text{m} \approx 2{,}2\ \text{mm}$ $\Delta x, \approx 2{,}2\ \text{mm}$

Conseil d'examen

Écrivez toujours la formule sous forme symbolique, réarrangée pour la grandeur demandée, avant de substituer des valeurs numériques : $\Delta y = \frac{\lambda D}{d}$

$\lambda = \frac{d\Delta y}{D}$

Cela rend votre méthode explicite et vous vaut les points de méthode. Ensuite, substituez et arrondissez avec soin, car la valeur finale est notée séparément.

Vérification de la cohérence	La longueur d'onde $5{,}8 \times 10^{-7}\ m$(580 nm) se situe dans la région visible du spectre, une valeur physiquement raisonnable. Dans l'eau, la longueur d'onde diminue ($\lambda' = \frac{\lambda}{n}$), donc l'espacement des franges diminue : $\Delta y' = 2{,}2$ mm $< \Delta y = 2{,}9$ mm, ce qui est cohérent avec $\Delta y \propto \lambda$.
Explique-le toi-même	Explique pourquoi l'espacement entre les franges d'interférence diminue lorsque la lumière passe de l'air dans l'eau.

Essayer

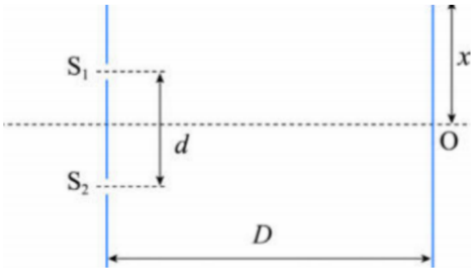


Figure 2-11-6 · Séparation des fentes d et distance à l'écran D.

Comme le montre la figure 2-11-6, une lumière monochromatique de longueur d'onde λ [m] traverse une fente unique S_0, puis deux fentes S_1 et S_2. Des franges claires et sombres se forment sur un écran. La séparation des fentes est d[m] et la distance fente-écran est D[m] .

(a) Si D est **augmentée**, déterminer si l'espacement entre les franges brillantes adjacentes devient plus petit ou plus grand.

(b) Si d est **diminuée**, déterminer si l'espacement entre les franges brillantes adjacentes devient plus petit ou plus grand.

(c) L'espace entre les fentes et l'écran est rempli d'un liquide d'indice de réfraction n. Déterminer par quel facteur l'espacement entre les franges brillantes adjacentes change.

Dans un nouveau contexte — les couleurs spectrales observées sur un CD

Les pistes très rapprochées d'un CD ou d'un DVD agissent comme un réseau de diffraction. Lorsque la lumière blanche se réfléchit sur ces pistes régulièrement espacées, différentes longueurs d'onde subissent une interférence constructive dans différentes directions. Ainsi, **différentes couleurs sont observées sous différents angles de vision**. Changer l'angle de vision sélectionne différentes longueurs d'onde, produisant une séquence changeante de couleurs.

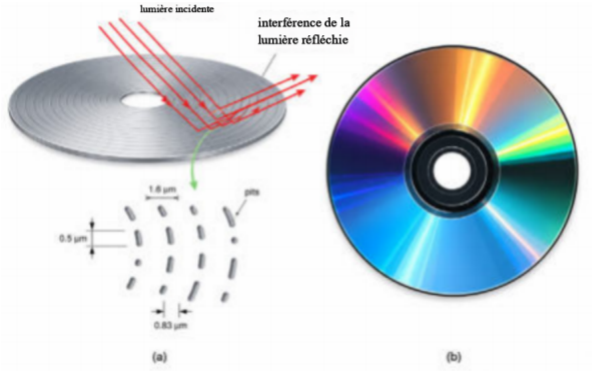


Figure 2-11-7 · La lumière réfléchie par la piste d'un disque interfère en couleurs.

➡ En utilisant l'idée que différentes longueurs d'onde subissent une interférence constructive à des angles différents, expliquer en une ou deux phrases pourquoi un CD produit un étalement de couleurs plutôt qu'une seule tache brillante.

Nature de la science : la science comme entreprise partagée — la acceptation progressive des preuves d'interférence de Young

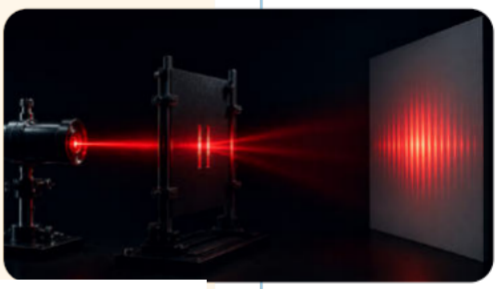
L'expérience de la double fente de Young a fourni des preuves solides de la nature ondulatoire de la lumière, car elle produisait des franges d'interférence. À l'époque, le modèle corpusculaire de la lumière était largement accepté, de sorte que l'interprétation ondulatoire n'a pas été immédiatement admise. Des travaux ultérieurs, notamment ceux d'Augustin-Jean Fresnel, ont renforcé le modèle ondulatoire et contribué à l'établir plus largement.

À votre tour : Suggérez une raison pour laquelle des preuves expérimentales solides, comme les franges de Young, peuvent tout de même mettre une génération à être acceptées.

Livret de données

$\Delta y = \frac{\lambda D}{d}$ est imprimée ; pour la partie (a)(i), réarrangez-la en $\lambda = \frac{\Delta y d}{D}$, gardez les longueurs en mètres, et convertissez à l'unité demandée seulement à la fin.

Question de la leçon, réponse



Lorsqu'une lumière monochromatique cohérente éclaire deux fentes étroites, on observe sur l'écran un motif d'interférence constitué de franges brillantes et sombres, plutôt que deux zones lumineuses isolées. Les deux fentes se comportent comme deux sources cohérentes. Les deux ondes issues des fentes se superposent et interfèrent. La frange centrale est brillante, car la différence de marche en ce point est égale à zéro. Pour les petits angles, la différence de marche en un point situé à une distance x du centre est approximativement :

$\Delta \approx \frac{dx}{D}$. Les franges brillantes apparaissent lorsque $\Delta = n\lambda$ et les franges sombres apparaissent lorsque $\Delta = \left(n + \frac{\lambda D}{d}\right)\lambda$ où $n = 0,1,2,3,\ldots$. Par conséquent, les franges brillantes adjacents sont séparées par une distance $\Delta y = \frac{\lambda D}{d}$

Exercice

Détermine ce qui suit.

(a) Une lumière monochromatique de longueur d'onde λ [m] traverse une fente simple S_0, puis deux fentes S_1 et S_2, formant des franges brillantes et sombres sur un écran. L'espacement entre franges brillantes adjacentes est mesuré à 4,5 mm. La séparation des fentes est de 0,20 mm et la distance fente-écran est de 1,5 m.

(i) Détermine la longueur d'onde λ [m] de la lumière.

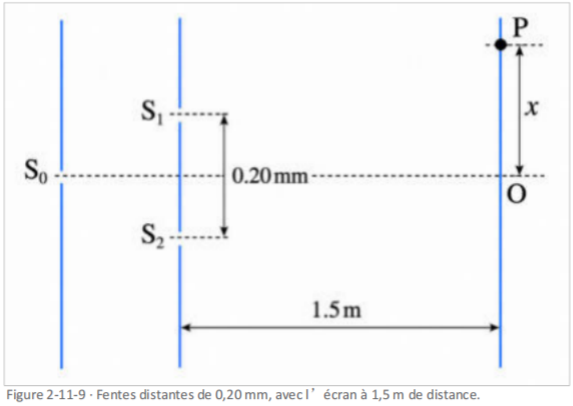


Figure 2-11-9 · Fentes distantes de 0,20 mm, avec l'écran à 1,5 m de distance.

(ii) L'espace entre les fentes et l'écran est ensuite rempli d'eau (indice de réfraction 1,3). Détermine le nouvel espacement entre les franges brillantes adjacentes, en mm.

(b) Dans une figure d'interférence à double fente, déterminez dans chaque cas ci-dessous si l'espacement entre les franges brillantes adjacentes devient **plus grand** ou **plus petit**:

(i) la distance entre les fentes est augmentée _____

(ii) l'écran est éloigné des fentes _____

(iii) la lumière est remplacée par une lumière de plus grande longueur d'onde

Question de type d'examen :

Dans une expérience des fentes doubles, la distance entre les deux fentes est $d = 0,40$ mm et l'écran se trouve à une distance $D = 2,0$ m La lumière utilisée a une longueur d'onde : $\lambda = 6,0 \times 10^{-7}$ m. Déterminez l'interfrange entre deux franges brillantes adjacentes, en millimètres.

Auteurs

Maki Komizo
Yukihiro Kawakubo
Tomoaki Tsunoyama
Yoko Sasamori
Yuki Toda
Ritsu Igarashi
Yasser Mahdy
Kotomi Shirai (Designer)

Réviseurs

Prof. Dr. Hany Nazmy Soliman

Prof. Dr. Hend Ali Mohamed Ali

Prof. Dr. Islam Mohamed Sheha

Prof. Dr. Walid Mohamed Ahmed Desouky

Dr. Aziza Ragab Khalifa

Dr. Hanan Abul-Abbas Mohamed

M. Magdy Fathy Mohamed

M. Ayman Shawky El-Sayed

Mme Noura Mohamed Abdel-Majid

Traduite par:

Mme / Caroline Saïd Azer
Mme / Chérine Heshmat Abdel Hakam

Supervision générale

Dr. Gebreil Anwer Hemeida

Chef de l'Administration centrale pour le développement des programmes

