Dernière mise à jour: November 1, 2026

À propos de ce cours

Ce cours gratuit compte 8 unités et 8 travaux pratiques. Ce sont les vrais totaux, pas un programme plus long raccourci.

Un contrôle est un nombre ou un résultat de code sur une page de cours qu'un script recalcule avant publication. Le nombre affiché et le nombre recalculé doivent correspondre.

> Ceci est le plan d'un cours gratuit en autonomie rédigé par Saving Planets. Ce n'est pas un cours universitaire : il ne donne aucun crédit académique et aucun établissement n'y participe.
>
> Son programme suit le premier semestre de physique universitaire avec calcul différentiel (mécanique classique), le cours que tout étudiant en ingénierie ou en physique suit en premier. Il est calqué sur les thèmes et le niveau de ressources ouvertes comme OpenStax University Physics Volume 1 et MIT OpenCourseWare 8.01SC Classical Mechanics, vers lesquelles nous renvoyons tout au long du cours. Ces organisations ne cautionnent pas cette page.
>
> Ce que nous ajoutons : chaque unité est reliée à un vrai travail en aérospatiale et en observation de la Terre, chaque nombre de la page est recalculé par un script de vérification avant sa mise en ligne, et chaque TP a une version à la maison ou virtuelle pour que tout le monde puisse le faire.
>
> Suivez-le dans l'ordre. Chaque unité comporte des objectifs, des notions clés, des équations, des exemples pas à pas, des exercices corrigés en détail, des erreurs fréquentes, des cartes mémoire et un quiz. Votre progression est enregistrée uniquement dans ce navigateur.

Comment ce cours aide à sauver la planète

La mécanique est la physique du lancement, du vol et de l'orbite. Les mêmes équations placent en orbite des satellites d'observation de la Terre comme Landsat 9 et GRACE-FO, les maintiennent orientés et transforment de minuscules variations de leur mouvement en cartes de l'eau, de la glace et des terres.

Au sol, les mêmes idées servent à dimensionner les éoliennes, à faire consommer moins d'énergie aux voitures et aux avions, et à aider les ingénieurs à planifier la déviation d'un astéroïde. Chaque unité se termine par une courte section sourcée montrant comment ses idées aident à la fois les gens et la nature.

Pour les enseignants

Vous pouvez enseigner ce cours, ou laisser un élève le faire seul. Il est gratuit. Saving Planets ne donne ni note ni crédit scolaire.

- Cette page est le cours entier : 8 unités et 8 travaux pratiques (PHYS 110 + PHYS 110L).
- Prévoyez 15 semaines, environ 6 à 9 heures par semaine, y compris les semaines de travaux pratiques.
- Suivez le calendrier de 15 semaines. Lisez l'unité, faites les exercices sur papier, puis ouvrez la réponse. La semaine d'un TP, faites le TP ou la version à la maison.
- Un contrôle est un nombre ou un résultat de code sur la page qu'un script recalcule avant publication. Le nombre affiché et le nombre recalculé doivent correspondre.
- Utilisez Imprimer cette page, ou téléchargez le guide d'étude PDF. La feuille de formules est vers la fin.
- Demandez : en quoi cette unité aide-t-elle les gens et la planète ? Chaque unité a un encadré vert avec un fait sourcé.
- Copiez le modèle de guide enseignant et écrivez le nom de votre classe, le temps dont vous disposez et les questions que vous poserez. Ouvrir le modèle de guide enseignant

Avant de commencer

Prérequis

- Algèbre et trigonométrie : résolution d'équations, sinus, cosinus et tangente, théorème de Pythagore.
- Analyse I, au moins en parallèle : les dérivées comme taux de variation et les intégrales comme aires. Ce cours utilise dv/dt et ∫v dt dès l'unité 1.
- Vecteurs dans le plan : composantes, norme et direction.
- Unités SI et notation scientifique.

Comment étudier

- Lisez l'unité, puis refermez-la et essayez vous-même les exemples résolus avant de vérifier chaque étape.
- Faites un dessin pour chaque problème. Pour tout problème de forces, tracez un diagramme des forces avant d'écrire une équation.
- Résolvez d'abord avec des symboles et mettez les nombres à la fin. Vérifiez ensuite les unités et si l'ordre de grandeur de la réponse a du sens.
- Faites chaque exercice sur papier avant d'ouvrir la réponse. Se tromper d'abord puis corriger, c'est ainsi que la méthode s'ancre.
- Utilisez les simulations PhET pour tester votre intuition : prédisez ce qui va se passer, puis lancez-la.

- Refaites les quiz quelques jours plus tard. La pratique espacée vaut mieux qu'une longue séance.
- Utilisez g = 9.81 m/s² sauf indication contraire, et gardez trois chiffres significatifs.

Matériel de TP (pour les TP en laboratoire)

- Règle d'un mètre et mètre ruban ; pied à coulisse si possible.
- Chronomètre (un téléphone convient) et, idéalement, une application de téléphone ou un capteur scolaire qui enregistre le mouvement ou l'accélération.
- Chariot et rail à faible frottement (ou une planche lisse), une poulie et un jeu de masses à suspendre.
- Une petite balle, une rampe, du papier carbone ou du papier ordinaire pour marquer les points d'impact.
- De la ficelle, une masse dense (un plomb de pêche convient) et un rapporteur.
- Un tableur pour les moyennes, les écarts types et les graphiques.

Programme suggéré sur 15 semaines

Environ 6 à 9 heures par semaine : lecture, exercices et, les semaines de TP, le TP.

Semaine	Unité	Thèmes	Lecture
1	Mesure, vecteurs et mouvement à une dimension	Unités, incertitude, vecteurs ; TP A	OpenStax 1.1–1.7, 2.1–2.2
2	Mesure, vecteurs et mouvement à une dimension	Vitesse et accélération comme dérivées ; accélération constante ; chute libre	OpenStax 3.1–3.5
3	Mouvement à deux dimensions : projectiles et cercles	Projectiles, mouvement relatif, mouvement circulaire ; TP B	OpenStax 4.1–4.5
4	Lois de Newton, frottement et dynamique circulaire	Lois de Newton et diagrammes des forces	OpenStax 5.1–5.7
5	Lois de Newton, frottement et dynamique circulaire	Frottement, corps reliés, dynamique circulaire ; TP C et D	OpenStax 6.1–6.4
6	Travail, énergie et puissance	Travail, énergie cinétique, puissance	OpenStax 7.1–7.4
7	Travail, énergie et puissance	Énergie potentielle et conservation de l'énergie ; TP E	OpenStax 8.1–8.5

Semaine	Unité	Thèmes	Lecture
8	Quantité de mouvement, collisions et fusées	Quantité de mouvement, impulsion, collisions, centre de masse, fusées ; TP F ; entraînement de mi-semestre	OpenStax 9.1–9.7
9	Rotation, moment de force et moment cinétique	Cinématique de rotation, moment d’inertie	OpenStax 10.1–10.5
10	Rotation, moment de force et moment cinétique	Moment de force, roulement, moment cinétique ; TP G	OpenStax 10.6–10.8, 11.1–11.3
11	Gravitation et orbites	Loi de la gravitation de Newton, g en altitude, satellites	OpenStax 13.1–13.4
12	Gravitation et orbites	Lois de Kepler, vitesse de libération, transferts d’orbite	OpenStax 13.5–13.6
13	Oscillations et introduction aux fluides	Mouvement harmonique simple, pendules, amortissement, résonance ; TP H	OpenStax 15.1–15.6
14	Oscillations et introduction aux fluides	Fluides : pression, poussée d’Archimède, continuité, Bernoulli	OpenStax 14.1–14.6
15	Révision	Révision et série d’exercices finale	Toutes les unités

Votre progression

Cochez les unités et les TP à mesure que vous les terminez, et faites les quiz. La progression et les scores sont enregistrés uniquement dans ce navigateur et ne nous sont jamais envoyés.

Unités

UNITÉ 1 · SEMAINES 1–2

Mesure, vecteurs et mouvement à une dimension

Comment les physiciens mesurent, comment les vecteurs décrivent une direction, et comment position, vitesse et accélération sont reliées par le calcul différentiel.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Utiliser les unités SI, les chiffres significatifs et une incertitude indiquée pour toute valeur mesurée.
- Additionner des vecteurs par composantes et trouver une norme et une direction.
- Définir la vitesse par v = dx/dt et l'accélération par a = dv/dt, et les lire sur des graphes.
- Résoudre des problèmes à accélération constante, chute libre comprise, avec les quatre équations de la cinématique.

Notions clés

- Toute mesure a une incertitude. Donnez une valeur sous la forme meilleure estimation ± incertitude, avec unités, et arrondissez l'incertitude à un ou deux chiffres significatifs.
- Un vecteur a une norme et une direction. Additionnez des vecteurs en additionnant leurs composantes x et y, jamais leurs normes.
- La vitesse est la pente d'un graphe position–temps ; l'accélération est la pente d'un graphe vitesse–temps. L'aire sous un graphe vitesse–temps est le déplacement.
- À accélération constante, les quatre équations de la cinématique découlent de deux intégrations de a = constante.
- Près de la surface de la Terre, tout objet en chute libre (sans résistance de l'air) accélère vers le bas à g ≈ 9.81 m/s², quelle que soit sa masse.

Équations clés

$$v = \frac{dx}{dt}, \quad a = \frac{dv}{dt}$$

`v=dx/dt, a=dv/dt`

Vitesse et accélération comme dérivées

$$v = v_0 + at$$

`v=v_0+at`

Vitesse après un temps t à accélération constante

$$x = x_0 + v_0 t + \tfrac{1}{2} a t^2$$

`x=x_0+v_0t+12at^2`

Position après un temps t à accélération constante

$$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$$

`v^2=v_0^2+2a(x-x_0)`

Vitesse et distance, sans le temps

$$|\vec{A}| = \sqrt{A_x^2 + A_y^2}, \quad \theta = \tan^{-1}(A_y/A_x)$$

`| A|=_x^2+A_y^2, θ=^-1(A_y/A_x)`

Norme et direction à partir des composantes

Exemples résolus pas à pas

Exemple 1.1 Une voiture part de l'arrêt et accélère de façon constante à 3.0 m/s² pendant 8.0 s. Quelle est sa vitesse, et quelle distance a-t-elle parcourue ?

1. Connu : v_0 = 0, a = 3.0 m/s², t = 8.0 s.
2. v = v_0 + at = 0 + 3.0 × 8.0 = 24 m/s.
3. x = v_0t + ½at² = 0 + ½ × 3.0 × 8.0² = 96 m.

Réponse : 24 m/s (86 km/h) après 96 m.

Exemple 1.2 Une balle est lancée verticalement vers le haut à 15 m/s. Combien de temps met-elle pour atteindre le sommet, et à quelle hauteur monte-t-elle ?

1. Au sommet, v = 0. Prenez le haut comme sens positif, donc a = −9.81 m/s².
2. Temps : 0 = 15 − 9.81t, donc t = 15 ÷ 9.81 = 1.53 s.
3. Hauteur : 0 = 15² − 2 × 9.81 × h, donc h = 225 ÷ 19.62 = 11.5 m.

Réponse : 1.53 s jusqu'au sommet, 11.5 m au-dessus du point de lancer.

Exemple 1.3 Une randonneuse marche 3.0 km vers l'est puis 4.0 km vers le nord. Quel est son déplacement ?

1. Composantes : x = 3.0 km, y = 4.0 km.
2. Norme : √(3.0² + 4.0²) = √25 = 5.0 km.
3. Direction : $\tan^{-1}$(4.0/3.0) = 53.1° au nord de l'est.

Réponse : 5.0 km à 53.1° au nord de l'est. Elle a marché 7.0 km, mais son déplacement est de 5.0 km.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Une voiture roulant à 27 m/s freine de façon constante à 6.0 m/s². Quelle distance parcourt-elle avant de s'arrêter, et en combien de temps ?

   Distance : $0 = 27^2 - 2 \times 6.0 \times d$, donc $d = 729 \div 12 = 60.8$ m. Temps : $t = 27 \div 6.0 = 4.5$ s.

2. Une pierre est lâchée sans vitesse initiale d'un pont de 20 m. En négligeant la résistance de l'air, combien de temps met-elle à toucher l'eau, et à quelle vitesse ?

   $t = \sqrt{(2h/g)} = \sqrt{(40 \div 9.81)} = 2.02$ s. $v = gt = 9.81 \times 2.02 = 19.8$ m/s.

3. La position d'un drone est $x(t) = 2.0t^3 - 3.0t$ (mètres, secondes). Trouvez sa vitesse et son accélération à $t = 2.0$ s.

   $v = dx/dt = 6.0t^2 - 3.0 = 6.0 \times 4 - 3.0 = 21$ m/s. $a = dv/dt = 12t = 24$ m/s².

4. La vitesse en orbite terrestre basse est d'environ 7.8 km/s. Convertissez-la en km/h.

   7.8 km/s × 3600 s/h = 28080 km/h, soit environ 28000 km/h.

5. Un panneau solaire mesure 2.50 ± 0.02 m sur 1.20 ± 0.01 m. Trouvez son aire et l'incertitude.

   $A = 2.50 \times 1.20 = 3.00$ m². Incertitudes relatives : 0.02/2.50 = 0.8% et 0.01/1.20 = 0.83%. Combinez-les quadratiquement : $\sqrt{(0.8^2 + 0.83^2)} = 1.16\%$. $\Delta A = 0.0116 \times 3.00 = 0.035$ m². $A = 3.00 \pm 0.03$ m².

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Si la vitesse est nulle, l'accélération doit l'être aussi.

En réalité : Au sommet de sa trajectoire, une balle lancée a $v = 0$ mais $a = -9.81$ m/s². Sa vitesse continue de changer.

Idée reçue : Les objets plus lourds tombent plus vite.

En réalité : Sans résistance de l'air, tous les objets tombent avec la même accélération g. C'est la résistance de l'air, et non le poids, qui fait tomber lentement une plume.

Idée reçue : Distance et déplacement, c'est la même chose.

En réalité : Le déplacement est un vecteur qui va du départ à l'arrivée. Un tour de piste d'athlétisme donne une distance de 400 m et un déplacement nul.

Cartes mémoire

Déplacement

Variation de position, un vecteur : $\Delta x = x_{final} - x_{initial}$.

Vitesse

Taux de variation de la position, $v = dx/dt$ (m/s).

Accélération

Taux de variation de la vitesse, $a = dv/dt$ (m/s²).

Chute libre

Mouvement sous l'effet de la seule gravité ; $a = g \approx 9.81$ m/s² vers le bas.

Incertitude

L'intervalle dans lequel se trouve probablement la vraie valeur, indiqué par ± avec unités.

Composantes d'un vecteur

$A_x = A \cos \theta$, $A_y = A \sin \theta$.

Quiz d'autocontrôle

1. La pente d'un graphe vitesse–temps donne la…

position

déplacement

accélération

secousse (jerk)

accélération. $a = dv/dt$, la pente de $v(t)$. L'aire sous $v(t)$ est le déplacement.

2. Une balle lancée vers le haut est tout en haut de sa trajectoire. Qu'est-ce qui est vrai ?

$v = 0$ et $a = 0$

$v = 0$ et $a = -9.81$ m/s²

v est maximale

a est dirigée vers le haut

$v = 0$ et $a = -9.81$ m/s². La gravité tire vers le bas en permanence, donc $a = -g$ même quand $v = 0$.

3. On additionne des vecteurs de 3 N vers l'est et 4 N vers le nord. La résultante vaut…

7 N

1 N

5 N

12 N

5 N. Composantes perpendiculaires : $\sqrt{(3^2 + 4^2)} = 5$ N.

4. Si $x(t) = 5t^2$, la vitesse à t = 3 s vaut…

15 m/s

30 m/s

45 m/s

10 m/s

30 m/s. $v = dx/dt = 10t = 30$ m/s.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Les satellites d'observation de la Terre ne sont utiles que si l'on sait exactement où ils se trouvaient au moment de chaque prise de vue. Leurs positions viennent de l'intégration de la vitesse et de l'accélération dans le temps, le même calcul que dans cette unité, vérifié par GPS.

Landsat 9 orbite à 705 km au-dessus de la Terre. Connaître sa position au mètre près permet aux scientifiques de comparer des images prises à des années d'écart et de mesurer la perte de forêts, le recul des glaciers et l'état des cultures, ce qui aide à gérer les terres et protège les habitats.

L'incertitude compte tout autant : une variation mesurée ne compte que si elle est plus grande que l'incertitude de la mesure.

Sur Saving Planets : Landsat 9 · Guide de physique

Sources : NASA : Landsat 9 (en anglais) (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/) · JCGM : Guide pour l'expression de l'incertitude (en anglais) (https://www.bipm.org/en/committees/jc/jcgm/publications)

Ressources d’apprentissage gratuites

- OpenStax University Physics 1, 3.1 Position, Displacement and Average Velocity (en anglais) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/3-1-position-displacement-and-average-velocity): Section de manuel gratuite avec exemples corrigés.
- OpenStax University Physics 1, 3.4 Motion with Constant Acceleration (en anglais) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/3-4-motion-with-constant-acceleration): Démonstrations et exercices.
- MIT OpenCourseWare 8.01SC Classical Mechanics (en anglais) (https://ocw.mit.edu/courses/8-01sc-classical-mechanics-fall-2016/): Vidéos de cours, notes et séries d’exercices gratuites du MIT pour tout le cours.
- PhET : The Moving Man (https://phet.colorado.edu/en/simulations/moving-man): Relier les graphes de position, de vitesse et d’accélération.
- PhET : Vector Addition (https://phet.colorado.edu/en/simulations/vector-addition): Additionner des vecteurs par composantes.

Regarder le cours magistral

Vectors in Multiple Dimensions (https://oyc.yale.edu/physics/phys-200/lecture-2) (en anglais)

Ramamurti Shankar, PHYS 200 Fundamentals of Physics I, Open Yale Courses. Licence : CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · Conditions d’utilisation (https://oyc.yale.edu/terms). Lien fourni uniquement pour l’étude gratuite ; Saving Planets n’est ni affilié à cette université ni soutenu par elle.

- [ ] **J’ai terminé cette unité**

Mouvement à deux dimensions : projectiles et cercles

Séparer le mouvement en parties horizontale et verticale indépendantes, puis ajouter le mouvement circulaire, la clé de toute orbite.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Traiter séparément le mouvement horizontal et vertical d'un projectile et trouver la durée de vol, la portée et la hauteur maximale.
- Trouver une vitesse relative par addition vectorielle.
- Calculer l'accélération centripète et expliquer pourquoi elle est dirigée vers le centre.

Notions clés

- Sans résistance de l'air, un projectile a une vitesse horizontale constante et une accélération constante g vers le bas. Les deux directions sont indépendantes et n'ont en commun que le temps.
- Sur un sol horizontal, la portée est R = v_0^2 sin 2θ / g, maximale à 45°.
- Un objet qui décrit un cercle à vitesse constante accélère, car sa direction change. L'accélération a = v^2/r est dirigée vers le centre.
- Les vitesses s'additionnent comme des vecteurs : la vitesse d'un bateau par rapport au rivage est sa vitesse par rapport à l'eau plus la vitesse de l'eau.

Équations clés

$$x = v_0 \cos\theta \, t, \quad y = v_0 \sin\theta \, t - \tfrac{1}{2} g t^2$$

`x=v_0θ t, y=v_0θ t-12gt^2`

Position d'un projectile

$$R = \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{g}$$

`R=(v_0^22θ)/(g)`

Portée sur sol horizontal

$$H = \frac{(v_0 \sin\theta)^2}{2g}$$

`H=((v_0θ)^2)/(2g)`

Hauteur maximale

$$a_c = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r$$

`a_c=(v^2)/(r)=ω^2r`

Accélération centripète

Exemples résolus pas à pas

Exemple 2.1 Une balle est lancée à 20 m/s, à 30° au-dessus d'un sol horizontal. Trouvez la durée de vol, la portée et la hauteur maximale.

1. Composantes : v_x = 20 cos 30° = 17.3 m/s ; v_y = 20 sin 30° = 10.0 m/s.
2. Durée de vol : t = 2v_y/g = 20.0 ÷ 9.81 = 2.04 s.
3. Portée : R = v_xt = 17.3 × 2.04 = 35.3 m.
4. Hauteur : H = v_y^2/2g = 100 ÷ 19.62 = 5.10 m.

Réponse : 2.04 s, 35.3 m, 5.10 m.

Exemple 2.2 Un colis est lancé horizontalement à 12 m/s du haut d'une falaise de 45 m. Où atterrit-il ?

1. Vertical : 45 = ½ × 9.81 × t^2, donc t = √(90 ÷ 9.81) = 3.03 s.
2. Horizontal : x = 12 × 3.03 = 36.3 m.

Réponse : À 36.3 m du pied de la falaise, après 3.03 s.

Exemple 2.3 Un satellite tourne autour de la Terre à 420 km d'altitude à 7.66 km/s. Quelle est son accélération centripète ? (Rayon terrestre 6371 km.)

1. Rayon de l'orbite r = 6371 + 420 = 6791 km = 6.791 × 10^6 m.
2. a = v^2/r = $(7{,}660)^2$ ÷ 6.791 × 10^6 = 8.64 m/s^2.

Réponse : 8.64 m/s^2, environ 88% de g à la surface. Cette accélération est la gravité elle-même : le satellite est en chute libre autour de la Terre.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Sous quel angle un projectile va-t-il le plus loin sur sol horizontal, et jusqu'où va-t-il s'il est lancé à 20 m/s ?

   45°. $R = v_0^2/g = 400 \div 9.81 = 40.8$ m.

2. Un bateau traverse une rivière en visant droit vers l'autre rive à 4.0 m/s par rapport à l'eau. Le courant est de 3.0 m/s. Trouvez la vitesse du bateau par rapport au rivage et sa direction.

   $\sqrt{(4.0^2 + 3.0^2)} = 5.0$ m/s, à $\tan^{-1}(3.0/4.0) = 36.9°$ vers l'aval par rapport à la perpendiculaire.

3. Une voiture prend un virage de 50 m de rayon à 15 m/s. Quelle est son accélération centripète ?

   $a = 15^2 \div 50 = 4.5$ m/s².

4. À quelle vitesse se déplace un point de l'équateur à cause de la rotation de la Terre ? (Rayon équatorial 6378 km, un tour en 86164 s.)

   $v = 2\pi r/T = 2\pi \times 6.378 \times 10^6 \div 86164 = 465$ m/s. Les fusées lancées vers l'est près de l'équateur bénéficient gratuitement de cette vitesse.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Une balle tirée horizontalement touche le sol plus tard qu'une balle lâchée de la même hauteur.
En réalité : Le mouvement vertical ne dépend pas du mouvement horizontal. Les deux touchent le sol en même temps (en négligeant la résistance de l'air et la courbure de la Terre).

Idée reçue : Un objet en mouvement circulaire à vitesse constante n'accélère pas.
En réalité : Sa vitesse change de direction, donc il accélère vers le centre à v^2/r.

Idée reçue : Au sommet de la trajectoire d'un projectile, sa vitesse est nulle.
En réalité : Seule la composante verticale est nulle. La composante horizontale ne change pas.

Cartes mémoire

Projectile

Objet qui se déplace sous la seule action de la gravité après son lancement.

Portée

Distance horizontale sur sol plat : $R = v_0^2 \sin 2\theta / g$.

Accélération centripète

$a = v^2/r$ vers le centre d'un cercle.

Vitesse angulaire ω

Vitesse de rotation en rad/s ; $v = \omega r$.

Vitesse relative

$v_{A/sol} = v_{A/B} + v_{B/sol}$.

Période T

Durée d'un tour complet : $T = 2\pi r/v$.

Quiz d'autocontrôle

1. Pour un projectile sans résistance de l'air, la vitesse horizontale…

diminue régulièrement

reste constante

augmente

est nulle au sommet

reste constante. Pas de force horizontale, donc pas d'accélération horizontale.

2. Deux angles de tir donnent la même portée sur sol horizontal. Quelle paire ?

30° et 60°

20° et 45°

10° et 50°

45° et 90°

30° et 60°. $\sin 2\theta$ est le même pour des angles complémentaires : $\sin 60° = \sin 120°$.

3. Si la vitesse sur un cercle double à rayon égal, l'accélération centripète…

double

est divisé par deux

quadruple

reste le même

quadruple. $a = v^2/r$, donc $2^2 = 4$ fois plus.

4. La direction de l’accélération centripète est…

selon la vitesse

vers l’extérieur

vers le centre

vers le bas

vers le centre. Elle est toujours dirigée vers le centre du cercle.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Une orbite est un projectile qui n’atterrit jamais : lancé assez vite sur le côté, il tombe vers la Terre au même rythme que la surface terrestre s’incurve. C’est pourquoi le satellite de l’exemple 2.3 accélère à v^2/r sans jamais se rapprocher.

Les sites de lancement profitent de la rotation de la Terre. Tirer vers l’est près de l’équateur ajoute jusqu’à environ 465 m/s, ce qui économise du carburant à chaque lancement d’un satellite météo ou climatique.

Raisonner en projectiles protège aussi les gens au sol : les mêmes équations, avec la traînée, servent à prédire où pourrait tomber un étage ou un débris qui rentre dans l’atmosphère.

Sur Saving Planets : Calculateur de mouvement de projectile avec traînée · Guide des orbites

Sources : OpenStax University Physics 1, 4.4 Circular Motion (en anglais) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/4-4-uniform-circular-motion) · ESA : les débris spatiaux (en anglais) (https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris)

Ressources d’apprentissage gratuites

- OpenStax University Physics 1, 4.3 Projectile Motion (en anglais) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/4-3-projectile-motion): Section de manuel gratuite avec exemples et exercices.
- OpenStax University Physics 1, 4.4 Uniform and Nonuniform Circular Motion (en anglais) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/4-4-uniform-circular-motion): L’accélération centripète en détail.
- PhET : Projectile Motion (https://phet.colorado.edu/en/simulations/projectile-motion): Modifier l’angle, la vitesse et la résistance de l’air.

Regarder le cours magistral

3.4 Projectile Motion (https://ocw.mit.edu/courses/8-01sc-classical-mechanics-fall-2016/resources/3-3/) (en anglais)

MIT 8.01SC Classical Mechanics (Fall 2016), MIT OpenCourseWare. Licence : CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Conditions d'utilisation (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Lien fourni uniquement pour l'étude gratuite ; Saving Planets n'est ni affilié à cette université ni soutenu par elle.

- [ ] **J'ai terminé cette unité**

Lois de Newton, frottement et dynamique circulaire

Les forces provoquent l’accélération. Les diagrammes des forces et ΣF = ma résolvent presque tous les problèmes du cours.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Énoncer les trois lois de Newton et identifier les paires action–réaction.
- Tracer un diagramme des forces et appliquer ΣF = ma selon des axes choisis.
- Résoudre des problèmes de plan incliné, de poulie et de corps reliés avec frottement statique et cinétique.
- Appliquer la deuxième loi de Newton au mouvement circulaire.

Notions clés

- Première loi : un objet conserve sa vitesse tant qu’aucune force nette n’agit sur lui.
- Deuxième loi : ΣF = ma. C’est la force nette, et non une force isolée, qui fixe l’accélération.
- Troisième loi : les forces vont par paires, égales en intensité et opposées en direction, agissant sur des objets différents.
- Le frottement statique peut valoir n’importe quoi jusqu’à $\mu_s N$; le frottement cinétique vaut $\mu_k N$ et s’oppose au glissement.
- En mouvement circulaire, la force nette vers l’intérieur vaut $m\,v^2/r$. Elle est fournie par de vraies forces comme la tension, le frottement, la réaction normale ou la gravité.

Équations clés

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

`F=m a`

Deuxième loi de Newton

$$W = mg$$

`W=mg`

Poids

$$f_s \le \mu_s N, \quad f_k = \mu_k N$$

`f_sμ_sN, f_k=μ_kN`

Frottement statique et cinétique

$$\sum F_r = \frac{mv^2}{r}$$

F_r=(mv^2)/(r)

Deuxième loi pour le mouvement circulaire

Exemples résolus pas à pas

Exemple 3.1 Une voiture de 1500 kg passe de 0 à 25 m/s en 10 s. Quelle force nette s'exerce sur elle ?

1. a = Δv/Δt = 25 ÷ 10 = 2.5 m/s².
2. ΣF = ma = 1,500 × 2.5 = 3,750 N.

Réponse : 3750 N vers l'avant.

Exemple 3.2 Une caisse de 5.0 kg glisse sur une rampe à 30° avec μ_k = 0.20. Trouvez son accélération.

1. Axes parallèle et perpendiculaire à la rampe.
2. Perpendiculaire : N = mg cos 30°.
3. Parallèle : ma = mg sin 30° − μ_k mg cos 30°.
4. a = 9.81 × (0.500 − 0.20 × 0.866) = 3.21 m/s². La masse se simplifie.

Réponse : 3.21 m/s² vers le bas de la rampe.

Exemple 3.3 Une machine d'Atwood suspend 3.0 kg et 2.0 kg de part et d'autre d'une poulie légère sans frottement. Trouvez l'accélération et la tension.

1. Le côté le plus lourd descend. Pour 3.0 kg : 3.0g − T = 3.0a. Pour 2.0 kg : T − 2.0g = 2.0a.
2. On additionne : 1.0g = 5.0a, donc a = 9.81 ÷ 5 = 1.96 m/s².
3. T = 2.0 × (9.81 + 1.96) = 23.5 N.

Réponse : a = 1.96 m/s², T = 23.5 N.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Une personne de 70 kg se tient sur une balance dans un ascenseur qui accélère vers le haut à 1.5 m/s². Qu'indique la balance ?

$N - mg = ma$, donc $N = 70 \times (9.81 + 1.5) = 792$ N (elle indique comme si la personne avait une masse de 80.7 kg).

2. Une caisse de 40 kg repose sur un sol avec $\mu_s = 0.50$. Quelle poussée horizontale la met tout juste en mouvement ?

   $F = \mu_s mg = 0.50 \times 40 \times 9.81 = 196$ N.

3. Une fusée de masse 5.0×10^5 kg a une poussée de 7.6×10^6 N au décollage. Trouvez son accélération initiale.

   $a = (T - mg)/m = 7.6 \times 10^6 \div 5.0 \times 10^5 - 9.81 = 15.2 - 9.81 = 5.39$ m/s² vers le haut. Son rapport poussée/poids est de 1.55.

4. Une poussée de 10 N agit sur un bloc de 2.0 kg qui pousse un bloc de 3.0 kg sur un sol sans frottement. Trouvez l'accélération et la force entre les blocs.

   $a = 10 \div 5.0 = 2.0$ m/s². La force sur le bloc de 3.0 kg vaut $3.0 \times 2.0 = 6.0$ N.

5. Quelle est la vitesse maximale d'une voiture dans un virage plat de 40 m de rayon si $\mu_s = 0.60$?

   Le frottement fournit la force vers l'intérieur : $\mu_s mg = mv^2/r$, donc $v = \sqrt{(\mu_s g r)} = \sqrt{(0.60 \times 9.81 \times 40)} = 15.3$ m/s.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Un objet en mouvement a besoin d'une force pour continuer à bouger.

En réalité : Seulement pour vaincre le frottement ou la traînée. Dans l'espace, une sonde file pendant des années moteurs éteints.

Idée reçue : Action et réaction s'annulent, donc rien ne peut accélérer.

En réalité : Elles agissent sur des objets différents, donc elles ne s'annulent jamais sur un même objet.

Idée reçue : La réaction normale est toujours égale à mg.

En réalité : Seulement sur une surface horizontale sans accélération verticale. Sur une rampe elle vaut $mg \cos \theta$; dans un ascenseur qui accélère, elle change.

Cartes mémoire

Première loi de Newton

La vitesse reste constante tant qu'aucune force nette n'agit.

Deuxième loi de Newton

$\Sigma F = ma$.

Troisième loi de Newton

Les forces vont par paires égales et opposées, sur des objets différents.

Diagramme des forces

Croquis d'un seul objet avec toutes les forces qui agissent sur lui.

Coefficient de frottement μ

Rapport de la force de frottement à la réaction normale ; sans unité.

Newton (N)

1 N = 1 kg·m/s².

Quiz d'autocontrôle

1. Un vaisseau spatial file moteurs éteints, loin de toute planète. Sa vitesse…

diminue lentement

reste constante

augmente

tombe à zéro

reste constante. Pas de force nette, donc pas d'accélération (première loi).

2. Une fusée pousse des gaz d'échappement vers l'arrière. Qu'est-ce qui pousse la fusée vers l'avant ?

L'air derrière elle

Le sol

Les gaz d'échappement qui la repoussent

Rien ; elle n'est pas poussée

Les gaz d'échappement qui la repoussent. Troisième loi : les gaz poussent la fusée avec une force égale et opposée. C'est pourquoi les fusées fonctionnent dans le vide.

3. Sur une rampe sans frottement d'angle θ, un bloc accélère à…

g

g cos θ

g sin θ

g tan θ

g sin θ. Seule la composante de la gravité parallèle à la rampe, mg sin θ, n’est pas compensée.

4. Qu’est-ce qui fournit la force centripète à une voiture qui tourne sur une route plate ?

Le moteur

Le frottement statique de la route

La gravité

La force centrifuge

Le frottement statique de la route. Le frottement statique entre pneus et route est dirigé vers le centre du virage.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La troisième loi de Newton explique le fonctionnement de toute fusée : elle pousse les gaz vers l’arrière et les gaz la poussent vers l’avant. Ces lancements emportent les satellites qui surveillent la météo, les incendies, le niveau de la mer et les gaz à effet de serre.

Le frottement et la traînée absorbent une grande partie de notre énergie. Des pneus et roulements à plus faible frottement, et des véhicules plus aérodynamiques, demandent moins de force à vitesse égale, donc moins de carburant ou d’énergie de batterie.

Le rapport poussée/poids est le premier chiffre que les ingénieurs vérifient sur tout lanceur : en dessous de 1, il ne peut pas décoller.

Sur Saving Planets : Calculateur de rapport poussée/poids · Observation de la Terre

Sources : OpenStax University Physics 1, 5.3 Newton’s Second Law (en anglais) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/5-3-newtons-second-law) · DOE des États-Unis : Vehicle Technologies Office (en anglais) (https://www.energy.gov/eere/vehicles/vehicle-technologies-office)

Ressources d’apprentissage gratuites

- OpenStax University Physics 1, 5.3 Newton’s Second Law (en anglais) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/5-3-newtons-second-law): Section de manuel gratuite.
- OpenStax University Physics 1, 6.2 Friction (en anglais) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/6-2-friction): Frottement statique et cinétique, avec exemples.
- OpenStax University Physics 1, 6.3 Centripetal Force (en anglais) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/6-3-centripetal-force): Virages relevés et dynamique circulaire.
- PhET : Forces and Motion: Basics (https://phet.colorado.edu/en/simulations/forces-and-motion-basics): Force nette, frottement et accélération.
- PhET : The Ramp (https://phet.colorado.edu/en/simulations/the-ramp): Forces sur un plan incliné avec frottement.

Regarder le cours magistral

Newton's Laws of Motion (https://oyc.yale.edu/physics/phys-200/lecture-3) (en anglais)

Ramamurti Shankar, PHYS 200 Fundamentals of Physics I, Open Yale Courses. Licence : CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · Conditions d’utilisation (https://oyc.yale.edu/terms). Lien fourni uniquement pour l’étude gratuite ; Saving Planets n’est ni affilié à cette université ni soutenu par elle.

- [ ] **J’ai terminé cette unité**

Travail, énergie et puissance

L’énergie est la comptabilité qui rend faciles des problèmes de forces difficiles, et la langue de toute centrale électrique, batterie et moteur.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer un travail par W = ∫F·dx, y compris pour un ressort.
- Utiliser le théorème de l’énergie cinétique et la conservation de l’énergie mécanique.
- Tenir compte de l’énergie perdue par frottement, et calculer puissance et rendement.
- Estimer la puissance du vent par P = ½ρAv³.

Notions clés

- Le travail est la force multipliée par le déplacement selon la force : W = Fd cos θ pour une force constante.
- Le travail net sur un objet est égal à la variation de son énergie cinétique.
- La gravité et les ressorts sont des forces conservatives : leur travail peut être stocké sous forme d’énergie potentielle et restitué.
- Le frottement transforme l’énergie mécanique en énergie thermique ; l’énergie totale reste conservée.
- La puissance est le rythme auquel un travail est fourni, en watts (J/s).

Équations clés

$$W = \int \vec{F} \cdot d\vec{x}$$

`W= F· d x`

Travail d’une force

$$K = \tfrac{1}{2}mv^2, \quad W_{net} = \Delta K$$

`K=12mv^2, W_net=Δ K`

Énergie cinétique et théorème de l’énergie cinétique

$$U_g = mgh, \quad U_s = \tfrac{1}{2}kx^2$$

`U_g=mgh, U_s=12kx^2`

Énergie potentielle de pesanteur et élastique

$$K_i + U_i = K_f + U_f + E_{th}$$

`K_i+U_i=K_f+U_f+E_th`

Conservation de l’énergie avec frottement

$$P = \frac{dW}{dt} = Fv$$

`P=dW/dt=Fv`

Puissance

$$P_{wind} = \tfrac{1}{2}\rho A v^3$$

`P_wind=12ρ Av^3`

Puissance transportée par le vent à travers une surface A

Exemples résolus pas à pas

Exemple 4.1 Une voiture de 1200 kg roulant à 20 m/s freine avec une force de frottement constante de 6000 N. Quelle distance parcourt-elle ?

1. K = ½ × 1,200 × 20² = 240,000 J.
2. Le travail du frottement l’absorbe entièrement : 6000 × d = 240000.
3. d = 40 m.

Réponse : 40 m.

Exemple 4.2 Des montagnes russes partent de l’arrêt à 30 m au-dessus du bas d’un creux. Sans frottement, quelle est leur vitesse en bas ?

1. mgh = ½mv², donc la masse se simplifie.
2. v = √(2gh) = √(2 × 9.81 × 30) = 24.3 m/s.

Réponse : 24.3 m/s, quelle que soit la forme du parcours.

Exemple 4.3 Une éolienne a des pales de 50 m. Quelle puissance un vent de 10 m/s transporte-t-il à travers la surface balayée, et quel est le maximum qu’une éolienne pourrait en extraire ?

1. A = πr² = π × 50² = 7,854 m².

2. $P = \frac{1}{2}\rho A v^3 = \frac{1}{2} \times 1.225 \times 7{,}854 \times 10^3 = 4.81 \times 10^6$ W.
3. La limite de Betz dit qu'aucune éolienne ne peut capter plus de 16/27 (59.3%) de cette puissance : 0.593 × 4.81 MW = 2.85 MW.

Réponse : Le vent transporte 4.81 MW ; au plus 2.85 MW pourraient être captés. Les vraies éoliennes en tirent moins.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Un ressort de k = 200 N/m comprimé de 0.10 m lance une balle de 0.050 kg. À quelle vitesse la balle part-elle ?

   Énergie stockée $\frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2} \times 200 \times 0.01 = 1.0$ J. $v = \sqrt{(2 \times 1.0 \div 0.050)} = 6.32$ m/s.

2. Une force de 50 N tire une luge sur 10 m à 30° au-dessus de l'horizontale. Quel travail fournit-elle ?

   $W = Fd \cos\theta = 50 \times 10 \times 0.866 = 433$ J.

3. Quelle puissance faut-il pour soulever 70 kg de 3.0 m en 2.0 s ?

   $P = mgh/t = 70 \times 9.81 \times 3.0 \div 2.0 = 1030$ W.

4. Une voiture de 1500 kg freine de 25 m/s jusqu'à l'arrêt. Quelle énergie cinétique est retirée ? Si un freinage régénératif en stockait 60%, combien cela ferait-il ?

   $K = \frac{1}{2} \times 1{,}500 \times 25^2 = 468{,}750$ J ≈ 469 kJ. 60 % correspondent à 281 kJ.

5. Si la vitesse du vent passe de 10 m/s à 7 m/s, de quelle fraction la puissance du vent baisse-t-elle ?

   La puissance varie comme v^3 : $(7/10)^3 = 0.343$, elle tombe donc à environ 34% de sa valeur initiale.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Porter une caisse lourde à travers une pièce à vitesse constante fournit beaucoup de travail sur elle.

En réalité : La gravité et votre force vers le haut sont perpendiculaires au mouvement, donc elles ne fournissent aucun travail sur la caisse.

Idée reçue : L'énergie est perdue par frottement.

En réalité : Elle est convertie en énergie thermique, pas détruite. Elle n'est perdue qu'en tant qu'énergie mécanique utile.

Idée reçue : Une éolienne de diamètre deux fois plus grand obtient deux fois plus de puissance.

En réalité : La puissance varie comme la surface, donc doubler le diamètre donne quatre fois plus de puissance.

Cartes mémoire

Travail

W = Fd cos θ ; énergie transférée par une force (J).

Énergie cinétique

$K = \frac{1}{2}mv^2$.

Énergie potentielle

Énergie stockée liée à la position : mgh, $\frac{1}{2}kx^2$.

Théorème de l'énergie cinétique

$W_{net} = \Delta K$.

Puissance

Rythme de transfert d'énergie, P = dW/dt (W).

Limite de Betz

Aucune éolienne ne peut capter plus de 16/27 ≈ 59.3% de la puissance du vent.

Quiz d'autocontrôle

1. Si la vitesse d'une voiture double, son énergie cinétique…

double

triple

quadruple

reste le même

quadruple. $K = \frac{1}{2}mv^2$, donc $2^2 = 4$.

2. L'unité SI de puissance est le…

joule

watt

newton

kilowattheure

watt. 1 W = 1 J/s. Un kilowattheure est une énergie.

3. La puissance du vent à travers une éolienne varie avec la vitesse du vent comme…

v

v^2

v^3

$\sqrt{v}$

v^3. Débit massique ∝ v et énergie cinétique par kg ∝ v^2, donc P ∝ v^3.

4. Le travail du frottement cinétique sur un bloc qui glisse est…

positif

zéro

négatif

ne dépend que de la masse

négatif. Le frottement s'oppose au mouvement, donc il retire de l'énergie cinétique.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Les éoliennes transforment l'énergie cinétique de l'air en mouvement en électricité. Comme la puissance du vent croît avec le cube de sa vitesse et le carré de la longueur des pales, les ingénieurs construisent des mâts plus hauts et des pales plus longues, d'où la taille des éoliennes en mer.

Les véhicules électriques et hybrides utilisent le freinage régénératif : le moteur fonctionne en générateur et reconvertit une partie de l'énergie cinétique de la voiture en énergie stockée dans la batterie au lieu de chaleur.

La comptabilité énergétique permet aux ingénieurs de comparer équitablement les options d'énergie propre, en joules et en watts plutôt qu'en promesses.

Sur Saving Planets : Calculateur de puissance de rotor en vol stationnaire · Calculateurs

Sources : DOE des États-Unis : comment fonctionnent les éoliennes ? (en anglais) (https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work) · DOE des États-Unis : les bases des véhicules électriques (en anglais) (https://afdc.energy.gov/vehicles/electric-basics-ev)

Ressources d’apprentissage gratuites

- OpenStax University Physics 1, 7.3 Work–Energy Theorem (en anglais) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/7-3-work-energy-theorem): Section de manuel gratuite.
- OpenStax University Physics 1, 8.3 Conservation of Energy (en anglais) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/8-3-conservation-of-energy): Diagrammes d’énergie et exemples.
- PhET : Energy Skate Park (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-skate-park): Voir l’énergie cinétique, potentielle et thermique s’échanger.

Regarder le cours magistral

Work-Energy Theorem and Law of Conservation of Energy (https://oyc.yale.edu/physics/phys-200/lecture-5) (en anglais)

Ramamurti Shankar, PHYS 200 Fundamentals of Physics I, Open Yale Courses. Licence : CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · Conditions d’utilisation (https://oyc.yale.edu/terms). Lien fourni uniquement pour l’étude gratuite ; Saving Planets n’est ni affilié à cette université ni soutenu par elle.

☐ **J’ai terminé cette unité**

Quantité de mouvement, collisions et fusées

La quantité de mouvement se conserve dans toute collision et toute explosion. Elle explique les fusées, et comment un vaisseau a dévié un astéroïde.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Relier l'impulsion à la variation de quantité de mouvement, J = ∫F dt = Δp.
- Appliquer la conservation de la quantité de mouvement aux collisions élastiques et inélastiques à une dimension.
- Trouver le centre de masse d'un système.
- Utiliser l'équation de la fusée Δv = v_e ln(m_0/m_f).

Notions clés

- La quantité de mouvement p = mv est un vecteur. Sans force extérieure nette, la quantité de mouvement totale d'un système reste constante.
- Dans une collision élastique, l'énergie cinétique est aussi conservée ; dans une collision inélastique, une partie devient chaleur, son et déformation. Dans une collision parfaitement inélastique, les objets restent collés.
- Une durée de collision plus longue signifie une force moyenne plus faible pour la même variation de quantité de mouvement. C'est le principe des airbags et des zones de déformation.
- Une fusée gagne de la vitesse en éjectant de la masse vers l'arrière. Sa variation de vitesse dépend de la vitesse d'éjection et du rapport entre masse initiale et masse finale, pas de la vitesse de combustion du carburant.

Équations clés

$$\vec{p} = m\vec{v}, \quad \vec{J} = \int \vec{F}\,dt = \Delta\vec{p}$$

```
p=m v, J= F dt=Δ p
```

Quantité de mouvement et impulsion

$$m_1 v_{1i} + m_2 v_{2i} = m_1 v_{1f} + m_2 v_{2f}$$

```
m_1v_1i+m_2v_2i=m_1v_1f+m_2v_2f
```

Conservation de la quantité de mouvement (1D)

$$x_{cm} = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i}$$

`x_cm=( m_ix_i)/( m_i)`

Centre de masse

$$\Delta v = v_e \ln \frac{m_0}{m_f}$$

`Δ v=v_e(m_0)/(m_f)`

Équation de la fusée de Tsiolkovski

Exemples résolus pas à pas

Exemple 5.1 Une balle de baseball de 0.145 kg arrive à 40 m/s et repart de la batte à 50 m/s dans le sens opposé. Le contact dure 1.0 ms. Trouvez l'impulsion et la force moyenne.

1. Prenez le sens de sortie comme positif : Δp = 0.145 × (50 − (−40)) = 0.145 × 90 = 13.1 kg·m/s.
2. F = Δp/Δt = 13.05 ÷ 0.0010 = 13,000 N.

Réponse : Impulsion 13.1 kg·m/s ; force moyenne d'environ 13000 N.

Exemple 5.2 Une voiture de 1000 kg à 20 m/s percute par l'arrière une voiture de 1500 kg à l'arrêt et elles restent accrochées. Trouvez leur vitesse et l'énergie cinétique perdue.

1. Quantité de mouvement : 1000 × 20 = 2500 × v, donc v = 8.0 m/s.
2. K avant : ½ × 1000 × 20² = 200 kJ. K après : ½ × 2500 × 8.0² = 80 kJ.
3. Perdu : 120 kJ, 60% de l'énergie initiale.

Réponse : 8.0 m/s ; 120 kJ transformés en déformation, chaleur et son.

Exemple 5.3 Un étage de fusée a une vitesse d'éjection de 3000 m/s et un rapport de masse m_0/m_f = 5. Quelle variation de vitesse peut-il fournir, en négligeant gravité et traînée ?

1. Δv = v_e ln(m_0/m_f) = 3,000 × ln 5.
2. ln 5 = 1.609, donc Δv = 4,830 m/s.

Réponse : Environ 4.83 km/s. Atteindre l'orbite à environ 7.8 km/s demande davantage, c'est pourquoi les fusées utilisent des étages.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Un chariot de 2.0 kg à 3.0 m/s heurte un chariot de 1.0 kg au repos lors d'une collision parfaitement élastique. Trouvez les deux vitesses finales.

   $v_1 = (m_1 - m_2)/(m_1 + m_2) \times 3.0 = 1.0$ m/s ; $v_2 = 2m_1/(m_1 + m_2) \times 3.0 = 4.0$ m/s. Vérification : K avant 9.0 J, après 1.0 + 8.0 = 9.0 J.

2. Un fusil de 4.0 kg tire une balle de 0.010 kg à 400 m/s. Trouvez la vitesse de recul du fusil.

   $0 = 0.010 \times 400 - 4.0v$, donc $v = 1.0$ m/s vers l'arrière.

3. Une masse de 2.0 kg est en x = 0 et une masse de 3.0 kg en x = 5.0 m. Où est le centre de masse ?

   x_cm = (2.0 × 0 + 3.0 × 5.0) ÷ 5.0 = 3.0 m.

4. Un étage avec une vitesse d'éjection de 3.5 km/s doit fournir à lui seul $\Delta v = 9.0$ km/s. Quel rapport de masse faut-il ?

   $m_0/m_f = e^{(9.0/3.5)} = e^{2.571} = 13.1$. Seulement 7.6% environ de la masse de départ pourraient être autre chose que des ergols.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Une fusée a besoin d'air sur lequel prendre appui.

En réalité : Elle pousse sur ses propres gaz d'échappement. Les fusées fonctionnent mieux dans le vide.

Idée reçue : Dans une collision inélastique, de la quantité de mouvement est perdue.

En réalité : La quantité de mouvement se conserve dans toute collision sans force extérieure. C'est l'énergie cinétique qui est perdue.

Idée reçue : Une force plus grande signifie toujours une plus grande variation de quantité de mouvement.

En réalité : L'impulsion, c'est force × temps. Une petite force sur une longue durée peut changer autant la quantité de mouvement qu'une grande force sur une courte durée.

Cartes mémoire

Quantité de mouvement

$p = mv$ (kg·m/s), un vecteur.

Impulsion

$J = \int F\,dt = \Delta p$.

Collision élastique

Quantité de mouvement et énergie cinétique sont toutes deux conservées.

Collision parfaitement inélastique

Les objets restent collés ; perte maximale d'énergie cinétique.

Centre de masse

Position moyenne d’un système pondérée par les masses.

Équation de la fusée

$\Delta v = v_e \ln(m_0/m_f)$.

Quiz d’autocontrôle

1. Qu’est-ce qui est toujours conservé lors d’une collision sans force extérieure ?

Énergie cinétique

Quantité de mouvement

La vitesse

L’énergie cinétique et la quantité de mouvement

Quantité de mouvement. La quantité de mouvement toujours ; l’énergie cinétique seulement dans les collisions élastiques.

2. Les airbags réduisent les blessures surtout en…

réduisant la variation de quantité de mouvement

allongeant la durée d’arrêt

augmentant la force

réduisant votre masse

allongeant la durée d’arrêt. Même Δp sur une durée plus longue signifie une force moyenne plus faible.

3. Dans l’équation de la fusée, doubler la vitesse d’éjection…

double Δv

quadruple Δv

divise Δv par deux

ne change pas Δv

double Δv. Δv est directement proportionnel à v_e.

4. Deux boules d'argile de même masse et de même vitesse se heurtent de face et restent collées. Ensuite, elles…

se déplacent à la vitesse initiale

sont au repos

se déplacent à mi-vitesse

rebondissent

sont au repos. La quantité de mouvement totale était nulle, elle reste donc nulle.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Le 26 septembre 2022, la sonde DART de la NASA a percuté volontairement la petite lune astéroïdale Dimorphos. Sa quantité de mouvement a raccourci d'environ 33 minutes l'orbite de 11 heures 55 minutes de Dimorphos autour de Didymos, bien plus que le minimum de 73 secondes requis pour réussir, car les débris éjectés de l'astéroïde ont ajouté une poussée supplémentaire.

C'était le premier essai de déviation d'un astéroïde par impact cinétique, un moyen de protéger les gens et tous les autres êtres vivants sur Terre d'un futur impact. Aucun des deux astéroïdes n'a jamais menacé la Terre.

L'équation de la fusée guide aussi la conception de lancements plus propres : une vitesse d'éjection plus élevée signifie moins d'ergols pour la même mission.

Sur Saving Planets : Défense planétaire · Calculateur de delta-v

Sources : NASA : la mission DART (en anglais) (https://science.nasa.gov/mission/dart/) · NASA : l'orbite et la forme de l'astéroïde ont changé après l'impact de DART (en anglais) (https://www.nasa.gov/missions/dart/nasa-study-asteroids-orbit-shape-changed-after-dart-impact/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- OpenStax University Physics 1, 9.3 Conservation of Linear Momentum (en anglais) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/9-3-conservation-of-linear-momentum): Section de manuel gratuite.

- OpenStax University Physics 1, 9.4 Types of Collisions (en anglais) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/9-4-types-of-collisions): Collisions élastiques et inélastiques.
- OpenStax University Physics 1, 9.7 Rocket Propulsion (en anglais) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/9-7-rocket-propulsion): Démonstration de l'équation de la fusée.
- PhET : Collision Lab (https://phet.colorado.edu/en/simulations/collision-lab): Collisions élastiques et inélastiques en 1D et 2D.

Regarder le cours magistral

19.2 Rocket Problem 2 - Momentum Diagrams (https://ocw.mit.edu/courses/8-01sc-classical-mechanics-fall-2016/resources/19-1/) (en anglais)

MIT 8.01SC Classical Mechanics (Fall 2016), MIT OpenCourseWare. Licence : CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Conditions d'utilisation (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Lien fourni uniquement pour l'étude gratuite ; Saving Planets n'est ni affilié à cette université ni soutenu par elle.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Rotation, moment de force et moment cinétique

Tout ce qui tourne, des roues et turbines aux roues de réaction qui orientent les satellites, obéit aux versions rotationnelles des lois de Newton.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Utiliser la position, la vitesse et l'accélération angulaires, et les relier au mouvement linéaire par v = ωr.
- Calculer des moments d'inertie et utiliser τ = Iα.
- Résoudre des problèmes de roulement par la conservation de l'énergie.
- Appliquer la conservation du moment cinétique.

Notions clés

- Les grandeurs de rotation font écho aux grandeurs linéaires : θ ↔ x, ω ↔ v, α ↔ a, I ↔ m, τ ↔ F, L ↔ p.
- Le moment d'inertie dépend de la répartition de la masse autour de l'axe. Une masse éloignée de l'axe est plus difficile à mettre en rotation.
- Le moment d'une force est la force multipliée par son bras de levier : τ = rF sin θ.
- Un objet qui roule a une énergie cinétique de translation et de rotation, donc il descend une pente plus lentement qu'un bloc qui glisse sans frottement.
- Sans moment extérieur, le moment cinétique L = Iω reste constant.

Équations clés

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}, \quad \alpha = \frac{d\omega}{dt}, \quad v = \omega r$$

```
ω=(dθ)/(dt), α=(dω)/(dt), v=ω r
```

Vitesse et accélération angulaires

$$I = \sum m_i r_i^2, \quad I_{disk} = \tfrac{1}{2} M R^2$$

```
I= m_ir_i^2, I_disk=12MR^2
```

Moment d'inertie

$$\tau = rF \sin\theta = I\alpha$$

```
τ=rFθ=Iα
```

Moment d’une force et deuxième loi de Newton pour la rotation

$$K_{rot} = \tfrac{1}{2} I\omega^2$$

K_rot=12Iω^2

Énergie cinétique de rotation

$$L = I\omega, \quad \tau_{net} = \frac{dL}{dt}$$

L=Iω, τ_net=dL/dt

Moment cinétique

Exemples résolus pas à pas

Exemple 6.1 Le rotor d’une éolienne passe de l’arrêt à 1.5 rad/s en 30 s à rythme constant. Trouvez α et le nombre de tours effectués.

1. α = 1.5 ÷ 30 = 0.050 rad/s².
2. θ = ½αt² = ½ × 0.050 × 30² = 22.5 rad.
3. Tours : 22.5 ÷ 2π = 3.58.

Réponse : α = 0.050 rad/s² ; 3.58 tours.

Exemple 6.2 Une boule pleine roule sans glisser sur une pente depuis 2.0 m de haut. Quelle est sa vitesse en bas ?

1. Pour une sphère pleine, I = (2/5)mr² et ω = v/r.
2. mgh = ½mv² + ½(2/5)mr²(v/r)² = (7/10)mv².
3. v = √(10gh/7) = √(10 × 9.81 × 2.0 ÷ 7) = 5.29 m/s.

Réponse : 5.29 m/s, moins que les 6.26 m/s d’un bloc glissant sans frottement.

Exemple 6.3 Une patineuse qui tourne à 2.0 tours/s ramène ses bras, ce qui fait passer son moment d’inertie de 4.0 à 1.6 kg·m². Trouvez sa nouvelle vitesse de rotation.

1. L se conserve : $I_1\omega_1 = I_2\omega_2$.
2. ω_2 = 4.0 × 2.0 ÷ 1.6 = 5.0 tours/s.
3. Son énergie cinétique est multipliée par 2.5 ; le surplus vient du travail fourni par ses bras.

Réponse : 5.0 tours/s.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Une force de 50 N est appliquée perpendiculairement au bout d'une clé de 0.30 m. Trouvez le moment.

   $\tau = 0.30 \times 50 = 15$ N·m.

2. Un enfant de 30 kg est assis à 2.0 m du pivot d'une balançoire à bascule. Où doit s'asseoir un enfant de 40 kg pour l'équilibrer ?

   $30 \times 2.0 = 40 \times x$, donc $x = 1.5$ m de l'autre côté.

3. Un volant d'inertie en acier plein est un disque de 100 kg et de 0.50 m de rayon tournant à 300 rad/s. Quelle énergie stocke-t-il ?

   $I = \frac{1}{2} \times 100 \times 0.50^2 = 12.5$ kg·m². $K = \frac{1}{2} \times 12.5 \times 300^2 = 562{,}500$ J ≈ 0.563 MJ (0.156 kWh).

4. Un satellite a $I = 500$ kg·m² autour d'un axe. Une roue de réaction embarquée de $I = 0.10$ kg·m² passe de l'arrêt à 600 rad/s. À quelle vitesse le satellite tourne-t-il ?

   Le L total reste nul : $0.10 \times 600 = 500 \times \omega$, donc $\omega = 0.12$ rad/s dans l'autre sens.

5. Un moment de 2.0 N·m agit sur un disque de $I = 0.50$ kg·m². Trouvez α.

   $\alpha = \tau / I = 4.0$ rad/s².

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Le moment ne dépend que de l'intensité de la force.

En réalité : Il dépend aussi de l'endroit et de l'angle où l'on pousse. Pousser une porte près des gonds la fait à peine tourner.

Idée reçue : Tous les objets ronds descendent une pente à la même vitesse.

En réalité : Une boule pleine bat un cylindre plein, qui bat un anneau. Une moindre part de leur énergie part dans la rotation.

Idée reçue : Ramener les bras crée du moment cinétique.

En réalité : Le moment cinétique reste le même ; la vitesse de rotation augmente parce que I diminue.

Cartes mémoire

Vitesse angulaire ω

Vitesse de rotation, en rad/s.

Moment d'inertie I

Résistance à l'accélération angulaire ; $I = \Sigma mr^2$.

Moment d'une force τ

Effet de rotation d'une force ; $\tau = rF \sin \theta$ (N·m).

$\tau = I\alpha$

Deuxième loi de Newton pour la rotation.

Moment cinétique L

$L = I\omega$; conservé en l'absence de moment extérieur.

Roulement sans glissement

$v = \omega r$ au point de contact ; K totale = $\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$.

Quiz d'autocontrôle

1. Lequel arrive en premier en bas d'une rampe, en roulant depuis l'arrêt ?

Un anneau

Un disque plein

Ils arrivent ensemble

Le plus lourd

Un disque plein. Le disque a le plus petit $I/(mr^2)$, donc une plus grande part de son énergie va au mouvement vers l'avant.

2. L'équivalent rotationnel de la masse est…

le moment d'une force

le moment cinétique

le moment d'inertie

la vitesse angulaire

le moment d'inertie. I s'oppose à l'accélération angulaire comme m s'oppose à l'accélération linéaire.

3. Un satellite tourne sans allumer de propulseurs en faisant tourner une roue à l'intérieur. Il utilise…

la conservation de l'énergie

la conservation du moment cinétique

la première loi de Newton seulement

la gravité

la conservation du moment cinétique. Faire tourner la roue dans un sens fait tourner le satellite dans l'autre ; le L total reste constant.

4. Doubler le rayon d'un disque de même masse multiplie I par…

2

4

½

8

4. $I = \frac{1}{2}MR^2$, donc $2^2 = 4$.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Les roues de réaction sont un moyen courant d'orienter les instruments d'un engin spatial : faire tourner une roue dans un sens fait tourner l'engin dans l'autre, comme dans l'exercice, sans consommer d'ergols.

Les éoliennes sont des machines tournantes. Le moment exercé par le vent sur les pales fait tourner le rotor, et le générateur convertit cette rotation en électricité.

Les volants d'inertie stockent l'énergie sous forme de rotation et peuvent lisser le réseau ; la physique est exactement $K = \frac{1}{2}I\omega^2$.

Sur Saving Planets : GRACE-FO · Observation de la Terre

Sources : OpenStax University Physics 1, 11.3 Conservation of Angular Momentum (en anglais) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/11-3-conservation-of-angular-momentum) · DOE des États-Unis : comment

fonctionnent les éoliennes ? (en anglais) (https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work)

Ressources d’apprentissage gratuites

- OpenStax University Physics 1, 10.4 Moment of Inertia and Rotational Kinetic Energy (en anglais) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/10-4-moment-of-inertia-and-rotational-kinetic-energy): Section de manuel gratuite.
- OpenStax University Physics 1, 10.6 Torque (en anglais) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/10-6-torque): Le moment d’une force, avec exemples.
- PhET : Balancing Act (https://phet.colorado.edu/en/simulations/balancing-act): Moment et équilibre sur une balançoire à bascule.

Regarder le cours magistral

34.1 Torque Causes Angular Momentum to Change - Point Particle (https://ocw.mit.edu/courses/8-01sc-classical-mechanics-fall-2016/resources/34/) (en anglais)

MIT 8.01SC Classical Mechanics (Fall 2016), MIT OpenCourseWare. Licence : CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Conditions d’utilisation (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Lien fourni uniquement pour l’étude gratuite ; Saving Planets n’est ni affilié à cette université ni soutenu par elle.

☐ **J’ai terminé cette unité**

Gravitation et orbites

La loi de la gravitation de Newton explique pourquoi les satellites restent en l'air, combien de temps dure une orbite, et comment passer d'une orbite à une autre.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Utiliser la loi de la gravitation universelle de Newton et trouver g à toute altitude.
- Trouver la vitesse et la période d'une orbite circulaire et le rayon d'une orbite géostationnaire.
- Utiliser l'énergie potentielle gravitationnelle pour trouver la vitesse de libération.
- Appliquer les trois lois de Kepler et estimer un transfert de Hohmann.

Notions clés

- Toute masse attire toute autre masse avec F = Gm_1m_2/r^2. La gravité diminue avec le carré de la distance au centre.
- Une orbite circulaire existe quand la gravité fournit exactement la force centripète : $GMm/r^2 = mv^2/r$.
- Lois de Kepler : les orbites sont des ellipses dont la planète occupe un foyer ; une ligne vers la planète balaie des aires égales en des temps égaux ; $T^2 \propto a^3$.
- Loin de la Terre, l'énergie potentielle gravitationnelle vaut $U = -GMm/r$. La vitesse de libération est celle qui rend l'énergie totale nulle.
- Un transfert de Hohmann fait passer d'une orbite circulaire à une autre par deux poussées le long d'une demi-ellipse.

Équations clés

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}, \quad g(r) = \frac{GM}{r^2}$$

F=(Gm_1m_2)/(r^2), g(r)=(GM)/(r^2)

Gravitation universelle

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}, \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{GM}}$$

v=GM/r, T=2π(r^3)/(GM)

Vitesse et période d'une orbite circulaire

$$U = -\frac{GMm}{r}, \quad v_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

U=-GMm/r, v_esc=2GM/R

Énergie potentielle et vitesse de libération

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} a^3$$

T^2=(4π^2)/(GM)a^3

Troisième loi de Kepler

Exemples résolus pas à pas

Exemple 7.1 Trouvez g à la surface de la Terre à partir de G, de la masse et du rayon de la Terre.

1. $g = GM/R^2 = 6.674 \times 10^{-11} \times 5.972 \times 10^{24} \div (6.371 \times 10^6)^2$.
2. $GM = 3.986 \times 10^{14}\ m^3/s^2$; $R^2 = 4.059 \times 10^{13}\ m^2$.
3. $g = 9.82\ m/s^2$.

Réponse : 9.82 m/s². Le g mesuré varie d'environ 9.78 m/s² à l'équateur à 9.83 m/s² aux pôles, parce que la Terre tourne et est renflée à l'équateur ; 9.81 m/s² est une moyenne pratique.

Exemple 7.2 Landsat 9 orbite à environ 705 km au-dessus de la Terre. En traitant l'orbite comme un cercle, trouvez sa vitesse et sa période.

1. $r = 6{,}371 + 705 = 7{,}076\ km = 7.076 \times 10^6\ m$.
2. $v = \sqrt{(GM/r)} = \sqrt{(3.986 \times 10^{14} \div 7.076 \times 10^6)} = 7{,}505\ m/s$.
3. $T = 2\pi r/v = 2\pi \times 7.076 \times 10^6 \div 7505 = 5924\ s = 98.7\ min$.

Réponse : 7.51 km/s et environ 99 minutes par orbite, ce qui correspond au chiffre publié.

Exemple 7.3 À quel rayon un satellite fait-il un tour par jour sidéral (86164 s), en restant au-dessus d'un même point de l'équateur ?

1. $r^3 = GM\,T^2/4\pi^2 = 3.986 \times 10^{14} \times 86{,}164^2 \div 39.48$.
2. $r^3 = 7.496 \times 10^{22}$.
3. $r = 4.216 \times 10^7\ m = 42160\ km$ du centre de la Terre, soit environ 35790 km au-dessus de l'équateur.

Réponse : Environ 42160 km du centre de la Terre : l'orbite géostationnaire, où se trouvent de nombreux satellites météo.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Trouvez la vitesse de libération depuis la surface de la Terre.

   $v = \sqrt{(2GM/R)} = \sqrt{(2 \times 3.986 \times 10^{14} \div 6.371 \times 10^{6})} = 11.2$ km/s.

2. À l'altitude de l'ISS, environ 420 km, quelle fraction de la gravité de surface reste-t-il ?

   $(6371 \div 6791)^2 = 0.880$. Les astronautes flottent parce qu'ils sont en chute libre, pas parce que la gravité a disparu.

3. Mars tourne autour du Soleil avec un demi-grand axe de 1.524 UA. Combien dure son année ?

   Kepler : T = a^1.5 années = 1.524^1.5 = 1.88 années terrestres.

4. Estimez le Δv total d'un transfert de Hohmann d'une orbite circulaire à 300 km jusqu'au rayon géostationnaire (42164 km).

   $r_1 = 6671$ km, $r_2 = 42164$ km. Poussée 1 : $\sqrt{(GM/r_1)}(\sqrt{(2r_2/(r_1 + r_2))} - 1) = 2.43$ km/s. Poussée 2 : $\sqrt{(GM/r_2)}(1 - \sqrt{(2r_1/(r_1 + r_2))}) = 1.47$ km/s. Total 3.90 km/s (plus un éventuel changement de plan).

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Il n'y a pas de gravité en orbite.

En réalité : À 420 km, la gravité vaut encore 88% de sa valeur en surface. Les astronautes et la station tombent ensemble.

Idée reçue : Un satellite plus lourd doit aller plus vite pour rester sur la même orbite.

En réalité : $v = \sqrt{(GM/r)}$ ne contient pas la masse du satellite.

Idée reçue : Pour rattraper un vaisseau devant vous sur la même orbite, accélérez.

En réalité : Accélérer élève votre orbite et allonge votre période, donc vous prenez du retard. Il faut ralentir pour descendre sur une orbite plus basse et plus rapide.

Cartes mémoire

Loi de la gravitation de Newton

$F = Gm_1m_2/r^2$.

Vitesse orbitale

$v = \sqrt{(GM/r)}$ pour un cercle.

Troisième loi de Kepler

$T^2 \propto a^3$.

Vitesse de libération

$v = \sqrt{(2GM/R)}$; 11.2 km/s depuis la Terre.

Orbite géostationnaire

Période d’un jour sidéral, à environ 35790 km au-dessus de l’équateur.

Transfert de Hohmann

Demi-ellipse à deux poussées entre orbites circulaires.

Quiz d’autocontrôle

1. Si vous doublez votre distance au centre de la Terre, la gravité devient…

½ aussi forte

¼ aussi forte

2 fois plus forte

inchangée

¼ aussi forte. Inverse du carré : $1/2^2 = 1/4$.

2. Une orbite circulaire plus basse a une…

période plus longue et vitesse plus faible

période plus courte et vitesse plus élevée

période plus longue et vitesse plus élevée

la même période

période plus courte et vitesse plus élevée. $v = \sqrt{(GM/r)}$ augmente quand r diminue, et $T \propto r^{1.5}$ diminue.

3. La deuxième loi de Kepler signifie qu’une planète va le plus vite…

au plus loin du Soleil

au plus près du Soleil

à la même vitesse partout

seulement aux équinoxes

au plus près du Soleil. Aires égales en des temps égaux : près du Soleil, le rayon est court, donc elle doit aller plus vite.

4. La vitesse de libération depuis la Terre est d'environ…

7.9 km/s

11.2 km/s

3.1 km/s

30 km/s

11.2 km/s. √(2GM/R) = 11.2 km/s, soit √2 fois la vitesse en orbite basse.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Les satellites jumeaux GRACE-FO volent à environ 220 km l'un de l'autre et mesurent la variation de la distance qui les sépare à environ un micron près. Quand le satellite de tête survole un excès de masse, comme un grand aquifère ou une calotte glaciaire, la gravité le tire légèrement en avant. Cartographier ces tractions mois après mois montre où les nappes souterraines s'épuisent et à quelle vitesse les calottes glaciaires perdent de la masse.

Ces données de gravité aident à gérer l'eau pendant les sécheresses et permettent aux scientifiques de suivre la montée du niveau de la mer, qui compte pour les communautés côtières comme pour les zones humides.

Le choix de l'orbite relève aussi de la physique : les orbites héliosynchrones comme celle de Landsat 9 reproduisent les mêmes conditions d'éclairage pour comparer équitablement les changements au sol, et les orbites géostationnaires permettent aux satellites météo de surveiller les tempêtes en continu.

Sur Saving Planets : GRACE-FO · Calculateur de vitesse orbitale · Calculateur de transfert de Hohmann

Sources : NASA JPL: GRACE-FO (https://gracefo.jpl.nasa.gov/) · NASA : Landsat 9 (en anglais) (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- OpenStax University Physics 1, 13.4 Satellite Orbits and Energy (en anglais) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/13-4-satellite-orbits-and-energy): Section de manuel gratuite.

- OpenStax University Physics 1, 13.5 Kepler's Laws of Planetary Motion (en anglais) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/13-5-keplers-laws-of-planetary-motion): Les lois de Kepler démontrées et appliquées.
- PhET : Gravity and Orbits (https://phet.colorado.edu/en/simulations/gravity-and-orbits): Modifiez masses et vitesses et regardez les orbites se former.
- PhET : Kepler's Laws (https://phet.colorado.edu/en/simulations/keplers-laws): Explorez les trois lois.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Oscillations et introduction aux fluides

Ressorts et pendules se répètent en mouvement harmonique simple ; les fluides poussent par la pression et portent par la flottabilité et l'écoulement.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Décrire le mouvement harmonique simple et trouver période, fréquence et vitesse maximale pour un ressort et un pendule.
- Expliquer l'amortissement et la résonance.
- Calculer la pression en profondeur et la poussée d'Archimède.
- Utiliser l'équation de continuité et l'équation de Bernoulli pour un écoulement permanent.

Notions clés

- Une force de rappel proportionnelle au déplacement ($F = -kx$) donne un mouvement harmonique simple, $x = A\cos(\omega t + \varphi)$.
- La période d'une masse sur un ressort ne dépend pas de l'amplitude ; celle d'un pendule ne dépend que de sa longueur et de g pour de petites oscillations.
- La pression dans un fluide augmente avec la profondeur : $P = P_0 + \rho g h$.
- Archimède : la poussée est égale au poids du fluide déplacé.
- En écoulement permanent, un fluide accélère là où le tuyau se rétrécit (continuité), et un écoulement plus rapide a une pression plus faible (Bernoulli).

Équations clés

$$x(t) = A\cos(\omega t + \phi)$$

`x(t)=A(ω t+)`

Mouvement harmonique simple

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

`ω=k/m, T=2πm/k`

Masse sur un ressort

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

T=2πL/g

Pendule simple (petits angles)

$$P = P_0 + \rho g h, \quad F_B = \rho_{fluid} V_{sub} g$$

P=P_0+ρ gh, F_B=ρ_fluidV_subg

Pression en profondeur et flottabilité

$$A_1 v_1 = A_2 v_2, \quad P + \tfrac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h = \text{const}$$

A_1v_1=A_2v_2, P+12ρ v^2+ρ gh=const

Continuité et Bernoulli

Exemples résolus pas à pas

Exemple 8.1 Une masse de 0.50 kg sur un ressort de k = 200 N/m est tirée de 5.0 cm puis lâchée. Trouvez ω, la période, la fréquence et la vitesse maximale.

1. ω = √(k/m) = √(200 ÷ 0.50) = 20 rad/s.
2. T = 2π/ω = 0.314 s; f = 1/T = 3.18 Hz.
3. v_max = Aω = 0.050 × 20 = 1.0 m/s.

Réponse : ω = 20 rad/s, T = 0.314 s, f = 3.18 Hz, v_max = 1.0 m/s.

Exemple 8.2 Quelle est la période d'un pendule de 1.00 m sur Terre, et sur la Lune (g = 1.62 m/s²) ?

1. Terre : T = 2π√(1.00 ÷ 9.81) = 2.01 s.
2. Lune : T = 2π√(1.00 ÷ 1.62) = 4.94 s.

Réponse : 2.01 s sur Terre, 4.94 s sur la Lune.

Exemple 8.3 De l'eau circule à 2.0 m/s dans un tuyau horizontal de 4.0 cm de diamètre, qui se rétrécit à 2.0 cm. Trouvez la nouvelle vitesse et la chute de pression.

1. L'aire est multipliée par (2.0/4.0)² = ¼, donc v_2 = 4 × 2.0 = 8.0 m/s.
2. Bernoulli, tuyau horizontal : ΔP = ½ρ(v_2^2 − v_1^2) = ½ × 1000 × (64 − 4.0) = 30000 Pa.

Réponse : 8.0 m/s et une chute de pression de 30 kPa.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Quelle est la surpression à 10 m sous la surface de l’eau de mer ($\rho = 1025$ kg/m³) ?

   $\rho g h = 1025 \times 9.81 \times 10 = 100600$ Pa, soit environ une atmosphère de plus.

2. Un bloc de bois de masse volumique 600 kg/m³ flotte dans l’eau douce. Quelle fraction est immergée ?

   Flottaison : $\rho_{wood} V g = \rho_{water} V_{sub} g$, donc $V_{sub}/V = 600/1000 = 0.60$.

3. Un pendule doit avoir une période d’exactement 2.00 s. Quelle doit être sa longueur ?

   $L = g(T/2\pi)^2 = 9.81 \times (2.00 \div 6.283)^2 = 0.994$ m.

4. Pourquoi demande-t-on aux soldats de rompre le pas en traversant un pont ?

   Marcher au pas pousse le pont à une fréquence régulière. Si elle correspond à une fréquence propre du pont, la résonance peut produire de grandes oscillations.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Une plus grande amplitude allonge la période d’un pendule.

En réalité : Pour de petites oscillations, la période ne dépend pas de l’amplitude, seulement de L et g.

Idée reçue : Les objets lourds coulent et les légers flottent.

En réalité : C’est la masse volumique qui décide. Un navire en acier flotte parce que sa forme déplace un poids d’eau égal à son propre poids.

Idée reçue : Un fluide plus rapide a une pression plus élevée.

En réalité : En écoulement permanent et horizontal, un écoulement plus rapide a une pression plus faible (Bernoulli).

Cartes mémoire

Mouvement harmonique simple

Oscillation avec force de rappel ∝ déplacement ; $x = A\cos(\omega t + \varphi)$.

Période

Durée d’un cycle ; $T = 1/f$.

Résonance

Pression

Grande réponse quand on excite à une fréquence propre.

Force par unité d'aire, P = F/A (Pa).

Principe d'Archimède

Poussée = poids du fluide déplacé.

Équation de Bernoulli

$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h$ est constant le long d'une ligne de courant, en écoulement permanent et idéal.

Quiz d'autocontrôle

1. Quadrupler la masse sur un ressort multiplie la période par…

4

2

½

¼

2. $T \propto \sqrt{m}$, et $\sqrt{4} = 2$.

2. La poussée sur un objet immergé est égale…

à son propre poids

au poids du fluide qu'il déplace

à la pression du fluide

zéro

au poids du fluide qu'il déplace. Principe d'Archimède.

3. L'eau accélère là où un tuyau d'arrosage se rétrécit à cause de…

la continuité ($A_1v_1 = A_2v_2$)

la flottabilité

la résonance

le frottement

la continuité ($A_1v_1 = A_2v_2$). Le même volume par seconde doit traverser une aire plus petite.

4. On emporte une horloge à pendule sur la Lune. Elle va…

plus vite

plus lentement

pareil

à l'envers

plus lentement. Un g plus faible donne une période plus longue, donc elle bat moins souvent.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La portance d'une aile ou d'une pale d'éolienne vient de l'air qui s'écoule plus vite d'un côté, ce qui y abaisse la pression. L'équation de Bernoulli est la première étape pour concevoir des pales et des ailes qui gaspillent moins d'énergie.

La physique des oscillations compte aussi pour les machines d'énergie propre : toute structure haute poussée de façon rythmique, comme un mât d'éolienne par son rotor, peut accumuler de grandes vibrations si la poussée correspond à l'une de ses fréquences propres (résonance).

La pression des fluides et la flottabilité sont aussi au cœur des sciences de l'océan, des flotteurs qui mesurent les grands fonds aux satellites comme Sentinel-6 qui mesurent le niveau de la mer pour aider les communautés côtières à se préparer.

Sur Saving Planets : Calculateur de période d'un pendule · Calculateur de l'équation de portance · Sentinel-6B

Sources : DOE des États-Unis : comment fonctionnent les éoliennes ? (en anglais) (https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work) · NASA : Sentinel-6 sea level mission (en anglais) (https://sealevel.nasa.gov/missions/sentinel-6)

Ressources d'apprentissage gratuites

- OpenStax University Physics 1, 15.1 Simple Harmonic Motion (en anglais) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/15-1-simple-harmonic-motion): Section de manuel gratuite.

- OpenStax University Physics 1, 15.4 Pendulums (en anglais) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/15-4-pendulums): Pendules simples et pesants.
- OpenStax University Physics 1, 14.4 Archimedes' Principle and Buoyancy (en anglais) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-4-archimedes-principle-and-buoyancy): La flottabilité, avec exemples.
- OpenStax University Physics 1, 14.6 Bernoulli's Equation (en anglais) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-6-bernoullis-equation): Écoulement, pression et portance.
- PhET : Pendulum Lab (https://phet.colorado.edu/en/simulations/pendulum-lab): Période, longueur, masse et gravité.
- PhET : Masses and Springs (https://phet.colorado.edu/en/simulations/masses-and-springs): Ressorts, énergie et amortissement.
- PhET : Buoyancy (https://phet.colorado.edu/en/simulations/buoyancy): Masse volumique et poussée d'Archimède.
- PhET : Under Pressure (https://phet.colorado.edu/en/simulations/under-pressure): La pression en profondeur.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Exercices

Ces exercices sont dans chaque unité. Faites-les sur papier, puis ouvrez la réponse.

1. Mesure, vecteurs et mouvement à une dimension
   5 exercices
2. Mouvement à deux dimensions : projectiles et cercles
   4 exercices
3. Lois de Newton, frottement et dynamique circulaire
   5 exercices
4. Travail, énergie et puissance
   5 exercices
5. Quantité de mouvement, collisions et fusées
   4 exercices
6. Rotation, moment de force et moment cinétique
   5 exercices
7. Gravitation et orbites
   4 exercices
8. Oscillations et introduction aux fluides
   4 exercices

Le laboratoire (PHYS 110L)

Les TP sont la partie pratique du cours, qui vaut 1 crédit dans un cursus universitaire typique. Ici, ils sont gratuits et uniquement pour s'entraîner.

Chaque TP confronte une idée du cours à de vraies mesures, et chacun vous demande d'indiquer une incertitude. Un résultat sans incertitude ne peut pas être comparé à une prédiction. Chaque TP a aussi une version à la maison ou PhET.

Référence de sécurité : OSHA : sécurité au travail (en anglais) (https://www.osha.gov/)

TP A : Mesure et incertitude (mesurer g)

SEMAINE 1

Objectif : Chronométrez la chute d'une balle depuis une hauteur mesurée, trouvez g et indiquez une incertitude correcte.

$$g = \frac{2h}{t^2}, \quad \frac{\delta g}{g} = \sqrt{\left(\frac{\delta h}{h}\right)^2 + \left(2\frac{\delta t}{t}\right)^2}$$

`g=(2h)/(t^2), ( g)/(g)=(( h)/(h))^2+(2( t)/(t))^2`

Propager les incertitudes relatives en quadrature ; le temps est au carré, donc son incertitude relative compte double

Mode opératoire

1. Mesurez la hauteur de chute h du bas de la balle au sol ; estimez δh (pour un mètre ruban, environ ±2 mm).
2. Lâchez une balle dense sans vitesse initiale et chronométrez la chute. Une vidéo au ralenti au téléphone ou une appli à déclenchement sonore vaut mieux qu'un chronomètre manuel.
3. Recommencez au moins cinq fois.
4. Trouvez le temps moyen, l'écart-type de l'échantillon s et l'erreur type s/√N ; prenez l'erreur type comme δt.
5. Calculez g et δg, et comparez avec 9.81 m/s².

Tableau de données

Essai	Durée de chute (s)
1	0.55
2	0.56
3	0.54
4	0.55
5	0.56
Moyenne	0.552
Écart-type s	0.0084
Erreur type s/√5	0.0037

Données d'exemple, pour s'entraîner seulement. h = 1.500 ± 0.002 m.

Exemple de calcul

1. $g = 2h/t^2 = 2 \times 1.500 \div 0.552^2 = 9.85\ m/s^2$.
2. Incertitude relative due au temps : $2 \times 0.0037 \div 0.552 = 1.36\%$. Due à la hauteur : $0.002 \div 1.500 = 0.13\%$.
3. Combinée : $\sqrt{(1.36^2 + 0.13^2)} = 1.36\%$, donc $\delta g = 0.0136 \times 9.85 = 0.13\ m/s^2$.
4. Résultat : $g = 9.85 \pm 0.13\ m/s^2$. La valeur admise $9.81\ m/s^2$ est dans l'intervalle, donc les deux concordent. Le chronométrage domine l'incertitude.

> **Sécurité**
>
> - Ne lâchez la balle que là où personne ne se trouve dessous, et dégagez le sol.
> - Montez sur une surface solide, pas sur une chaise, pour atteindre la hauteur de lâcher.

Alternative à la maison ou virtuelle

- Faites-le exactement comme décrit, à la maison, avec une vidéo au ralenti au téléphone.
- Ou utilisez la simulation PhET Projectile Motion avec une vitesse de lancement de 0 pour vérifier le temps.

PhET : Projectile Motion (https://phet.colorado.edu/en/simulations/projectile-motion) · Guide JCGM sur l'incertitude (GUM) (en anglais) (https://www.bipm.org/en/committees/jc/jcgm/publications)

Lien avec la planète : La science de GRACE-FO ne fonctionne que parce que l'équipe connaît l'incertitude de chaque distance mesurée ; un changement ne compte que s'il dépasse cette incertitude. NASA JPL: GRACE-FO (https://gracefo.jpl.nasa.gov/)

☐ **J'ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP B : Mouvement des projectiles

SEMAINE 3

Objectif : Mesurez la vitesse d’un lanceur à partir d’un tir horizontal, puis prédisez et vérifiez où atterrit un tir incliné.

$$v_0 = \frac{x}{\sqrt{2h/g}}, \quad R = \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{g}$$

`v_0=2h/g, R=(v_0^22θ)/(g)`

Vitesse de lancement à partir d’un tir horizontal, puis portée prédite

Mode opératoire

1. Tirez une balle horizontalement avec un lanceur (ou faites-la rouler au bout d’une rampe) à la hauteur de la table h.
2. Scotchez du papier carbone sur du papier blanc à l’endroit d’impact ; faites cinq tirs et mesurez chaque distance x.
3. Trouvez la moyenne de x et calculez v_0.
4. Prédisez la portée d’un tir à 30° depuis le sol, marquez le point et vérifiez-le avec cinq tirs.
5. Comparez prédiction et résultat ; listez les sources d’erreur (traînée de l’air, hauteur de lancement, lecture de l’angle).

Tableau de données

Grandeur	Valeur
Hauteur de la table h	1.00 m
Distance d’impact moyenne x	2.26 m
Durée de chute √(2h/g)	0.452 s
Vitesse de lancement v_0	5.01 m/s
Portée prédite à 30°	2.21 m

Données d’exemple pour s’entraîner uniquement.

Exemple de calcul

1. t = √(2 × 1.00 ÷ 9.81) = 0.452 s.
2. v_0 = 2.26 ÷ 0.452 = 5.01 m/s.
3. R(30°) = 5.01² × sin 60° ÷ 9.81 = 25.1 × 0.866 ÷ 9.81 = 2.21 m.
4. Écart en pourcentage = |mesuré − prédit| ÷ prédit × 100%.

Sécurité

- Portez des lunettes de protection avec tout lanceur à ressort, et ne le pointez jamais vers quelqu'un.
- Dégagez la zone d'impact.

Alternative à la maison ou virtuelle

- Faites rouler une bille au bord d'une table et mesurez x ; sautez la partie inclinée ou utilisez la simulation PhET.

PhET : Projectile Motion (https://phet.colorado.edu/en/simulations/projectile-motion)

Lien avec la planète : La même méthode « prédire puis tester » sert à prévoir où pourrait retomber un étage de fusée en rentrée.

☐ **J'ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP C : Deuxième loi de Newton

SEMAINE 5

Objectif : Montrer que l'accélération est proportionnelle à la force nette et inversement proportionnelle à la masse.

$$a = \frac{m_h g}{m_c + m_h}$$

`a=(m_hg)/(m_c+m_h)`

Chariot tiré par une masse suspendue via une poulie, sans frottement

Mode opératoire

1. Mettez un rail à niveau. Reliez un chariot (masse m_c) par une ficelle passant sur une poulie à une masse suspendue m_h.
2. Lâchez sans vitesse initiale et enregistrez le mouvement avec un capteur, une vidéo ou en chronométrant une distance connue (a = 2d/t²).
3. Recommencez pour cinq masses suspendues, en déplaçant de la masse du chariot vers le support pour garder le total fixe.
4. Tracez a en fonction de m_h g. La pente doit valoir 1/(m_c + m_h).
5. Recommencez avec une masse ajoutée sur le chariot pour tester la dépendance en masse.

Tableau de données

Grandeur	Valeur
Masse du chariot m_c	0.500 kg
Masse suspendue m_h	0.050 kg
a prédite	0.892 m/s²
a mesurée	0.86 m/s²

Données d'exemple pour s'entraîner uniquement.

Exemple de calcul

1. a prédite = 0.050 × 9.81 ÷ 0.550 = 0.892 m/s².
2. La valeur mesurée, 0.86 m/s², est inférieure de 3.6%.
3. Force de frottement nécessaire pour expliquer l'écart : (0.892 − 0.86) × 0.550 = 0.018 N, un frottement de roulement raisonnable.

> **Sécurité**

- Placez une butée souple au bout du rail et gardez les doigts loin de la poulie.

Alternative à la maison ou virtuelle

- Utilisez PhET Forces and Motion: Basics (écran Acceleration) pour faire varier force et masse.

PhET : Forces and Motion: Basics (https://phet.colorado.edu/en/simulations/forces-and-motion-basics)

Lien avec la planète : F = ma explique pourquoi les véhicules plus légers ont besoin de moins d'énergie pour accélérer : chaque kilogramme économisé réduit la force, et le carburant, nécessaires.

☐ **J'ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP D : Frottement

SEMAINE 5

Objectif : Mesurez les coefficients de frottement statique et cinétique avec une rampe inclinable.

$$\mu_s = \tan\theta_{slip}, \quad \mu_k = \tan\theta_{steady}$$

`μ_s=θ_slip, μ_k=θ_steady`

Sur une rampe, le frottement équilibre mg sin θ quand N = mg cos θ

Mode opératoire

1. Posez un bloc sur une planche et levez lentement une extrémité jusqu'à ce que le bloc commence juste à glisser ; notez l'angle θ_slip. Recommencez cinq fois.
2. Trouvez l'angle auquel le bloc, après une petite tape, glisse à vitesse constante : θ_steady.
3. Calculez μ_s et μ_k. Recommencez sur une seconde surface (feutre, caoutchouc).

Tableau de données

Grandeur	Valeur
Masse du bloc	0.250 kg
Angle de glissement moyen	31°
Angle moyen de glissement à vitesse constante	24°
μ_s	0.60
μ_k	0.45

Données d'exemple pour s'entraîner uniquement.

Exemple de calcul

1. $\mu_s = \tan 31° = 0.601$.
2. $\mu_k = \tan 24° = 0.445$.
3. Comme prévu, $\mu_k < \mu_s$. La masse n'apparaît pas : elle se simplifie.

> **Sécurité**
>
> - Gardez la rampe basse et stable ; rattrapez le bloc en bas.

Alternative à la maison ou virtuelle

- Un livre, une appli d'inclinomètre sur téléphone et une couverture rigide suffisent.

- PhET The Ramp permet de régler le frottement et de voir les forces.

PhET : The Ramp (https://phet.colorado.edu/en/simulations/the-ramp)

Lien avec la planète : Le frottement de roulement des pneus est l'une des forces contre lesquelles un véhicule dépense de l'énergie à toute vitesse ; des conceptions à faible frottement économisent du carburant. DOE des États-Unis : Vehicle Technologies Office (en anglais) (https://www.energy.gov/eere/vehicles/vehicle-technologies-office)

☐ **J'ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP E : Conservation de l’énergie

SEMAINE 7

Objectif : Comparez la vitesse mesurée d’un chariot en bas d’une rampe avec celle que prédit la conservation de l’énergie.

$$v = \sqrt{2gh}, \quad \text{fraction kept} = \frac{v_{meas}^2}{2gh}$$

```
v=2gh, fraction kept=_meas^22gh
```

Vitesse idéale pour une descente h, et part de l’énergie mécanique conservée

Mode opératoire

1. Mesurez la dénivellation verticale h de la rampe.
2. Lâchez un chariot à faible frottement sans vitesse initiale et mesurez sa vitesse en bas (cellule photoélectrique, ou vidéo sur une courte distance connue).
3. Recommencez cinq fois et faites la moyenne.
4. Calculez la vitesse prédite et la part d’énergie conservée ; expliquez où est passé le reste.

Tableau de données

Grandeur	Valeur
Dénivellation h	0.300 m
Vitesse prédite	2.43 m/s
Vitesse mesurée (moyenne)	2.35 m/s
Énergie conservée	93.8%

Données d’exemple pour s’entraîner uniquement.

Exemple de calcul

1. v = √(2 × 9.81 × 0.300) = 2.43 m/s.
2. Part conservée = 2.35^2 ÷ (2 × 9.81 × 0.300) = 5.52 ÷ 5.89 = 0.938.
3. Environ 6.2% de l’énergie mécanique est devenue chaleur et son, par frottement et traînée.

> **Sécurité**
>
> - Fixez la rampe avec un serre-joint et arrêtez le chariot en bas.

Alternative à la maison ou virtuelle

- Faites rouler une balle sur une rampe de livres et chronométrez-la sur un parcours plat mesuré.
- PhET Energy Skate Park affiche les mêmes histogrammes d’énergie.

PhET : Energy Skate Park (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-skate-park)

Lien avec la planète : Suivre où va l’énergie, c’est ainsi que les ingénieurs trouvent des économies, du freinage régénératif au pompage-turbinage. DOE des États-Unis : les bases des véhicules électriques (en anglais) (https://afdc.energy.gov/vehicles/electric-basics-ev)

☐ **J’ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP F : Quantité de mouvement et collisions

SEMAINE 8

Objectif : Testez la conservation de la quantité de mouvement dans des collisions élastiques et collantes, et mesurez la perte d'énergie cinétique.

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v_f$$

```
m_1v_1+m_2v_2=(m_1+m_2)v_f
```

Collision parfaitement inélastique

Mode opératoire

1. Sur un rail horizontal, lancez le chariot 1 contre le chariot 2 au repos, velcro face à face pour qu'ils restent collés.
2. Mesurez les vitesses juste avant et juste après (capteur ou vidéo).
3. Recommencez avec des aimants ou des ressorts face à face pour un rebond presque élastique.
4. Pour chaque essai, comparez la quantité de mouvement totale et l'énergie cinétique totale avant et après.

Tableau de données

Grandeur	Valeur
m_1 = m_2	0.50 kg
v_1 avant	0.80 m/s
v après prédite (collés)	0.40 m/s
v après mesurée	0.39 m/s

Données d'exemple pour s'entraîner uniquement.

Exemple de calcul

1. p avant = 0.50 × 0.80 = 0.40 kg·m/s. p après = 1.00 × 0.39 = 0.39 kg·m/s, un écart de 2.5% (frottement pendant le trajet).
2. K avant = ½ × 0.50 × 0.80^2 = 0.160 J. K après = ½ × 1.00 × 0.39^2 = 0.076 J.
3. Environ la moitié de l'énergie cinétique a été perdue, comme le prévoit la théorie pour deux masses égales qui se collent (exactement 50% dans le cas idéal).

> **Sécurité**

- Gardez des vitesses faibles et arrêtez les chariots avant la fin du rail.

Alternative à la maison ou virtuelle

- PhET Collision Lab permet de régler l'élasticité de 0% à 100%.

PhET : Collision Lab (https://phet.colorado.edu/en/simulations/collision-lab)

Lien avec la planète : DART a utilisé exactement cette physique sur un astéroïde : une collision planifiée et mesurée pour modifier l'orbite d'une petite lune. NASA : la mission DART (en anglais) (https://science.nasa.gov/mission/dart/)

☐ **J'ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP G : Inertie de rotation

SEMAINE 10

Objectif : Mesurez le moment d’inertie d’un disque avec une masse qui tombe et comparez-le à ½MR².

$$I = mr^2\left(\frac{g}{a} - 1\right), \quad a = \frac{2d}{t^2}$$

`I=mr^2(g/a-1), a=(2d)/(t^2)`

Masse suspendue m à une ficelle enroulée autour d’un axe de rayon r

Mode opératoire

1. Enroulez une ficelle autour de l’axe du disque (rayon r) et suspendez-y une masse m.
2. Lâchez sans vitesse initiale et chronométrez la chute sur une hauteur d ; recommencez cinq fois.
3. Calculez a, puis I. Mesurez la masse M et le rayon R du disque et calculez ½MR².
4. Comparez. Ajoutez ensuite un anneau et voyez de combien I augmente.

Tableau de données

Grandeur	Valeur
Masse suspendue m	0.050 kg
Rayon de l’axe r	0.025 m
Hauteur de chute d	0.800 m
Durée moyenne de chute t	4.00 s
Disque M, R	1.50 kg, 0.064 m

Données d’exemple pour s’entraîner uniquement.

Exemple de calcul

1. a = 2 × 0.800 ÷ 4.00² = 0.100 m/s².
2. I = 0.050 × 0.025² × (9.81 ÷ 0.100 − 1) = 0.050 × 0.000625 × 97.1 = 3.03 × 10⁻³ kg·m².
3. ½MR² = ½ × 1.50 × 0.064² = 3.07 × 10⁻³ kg·m².
4. Écart de 1.2%, dans l’incertitude du rayon et du chronométrage.

> **Sécurité**
>
> - Gardez la masse suspendue basse, au-dessus d’un tapis souple.

Alternative à la maison ou virtuelle

- Faites rouler une boîte de soupe pleine et une vide sur la même rampe et comparez les temps ; expliquez le résultat avec $K = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$.

OpenStax 10.4 Moment of Inertia (en anglais) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/10-4-moment-of-inertia-and-rotational-kinetic-energy)

Lien avec la planète : Les roues de réaction qui orientent les satellites d'observation de la Terre sont conçues précisément autour de cette grandeur.

☐ **J'ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP H : Pendule et mouvement harmonique simple

SEMAINE 13

Objectif : Testez T = 2π√(L/g), montrez que la période ne dépend ni de la masse ni d'une petite amplitude, et mesurez g d'une seconde façon.

$$g = \frac{4\pi^2 L}{T^2}$$

g=(4π^2L)/(T^2)

Équation du pendule réarrangée

Mode opératoire

1. Suspendez une masse dense à une ficelle ; mesurez L du pivot au centre de la masse.
2. Écartez-la de moins de 10° et chronométrez 20 oscillations complètes ; divisez par 20 pour obtenir T.
3. Recommencez pour cinq longueurs. Tracez T² en fonction de L : la pente vaut 4π²/g.
4. Changez la masse et l'amplitude (toujours petite) et vérifiez que T reste le même.
5. Facultatif : chronométrez une masse qui oscille sur un ressort et testez T = 2π√(m/k).

Tableau de données

Grandeur	Valeur
Longueur L	0.800 m
Durée de 20 oscillations	35.9 s
Période T	1.795 s
g	9.80 m/s²

Données d'exemple pour s'entraîner uniquement.

Exemple de calcul

1. T = 35.9 ÷ 20 = 1.795 s. Chronométrer 20 oscillations divise l'erreur de temps de réaction par 20.
2. g = 4π² × 0.800 ÷ 1.795² = 31.58 ÷ 3.222 = 9.80 m/s².
3. Comparez avec le TP A : deux méthodes indépendantes, et le pendule est bien plus précis.

> **Sécurité**
>
> - Utilisez un pivot solide et faites osciller la masse loin des visages.

Alternative à la maison ou virtuelle

- Une clé au bout d'un lacet fonctionne ; chronométrez-la avec un téléphone.

PhET : Pendulum Lab (https://phet.colorado.edu/en/simulations/pendulum-lab) · PhET : Masses and Springs (https://phet.colorado.edu/en/simulations/masses-and-springs)

Lien avec la planète : Connaître précisément g, et ses infimes variations d'un lieu à l'autre, c'est ce que les missions de gravimétrie comme GRACE-FO transforment en cartes de l'eau et de la glace. NASA JPL: GRACE-FO (https://gracefo.jpl.nasa.gov/)

☐ **J'ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

Séries d'entraînement aux examens

Chronométrez-vous : environ 10 minutes par problème. Comparez ensuite avec les solutions complètes.

Série d'entraînement pour le partiel (unités 1–4)

1. Une fusée accélère verticalement depuis le repos à 5.0 m/s² pendant 20 s, puis son moteur s'arrête. Quelle hauteur maximale atteint-elle ?

    1. À l'extinction : $v = 5.0 \times 20 = 100$ m/s ; hauteur = $\frac{1}{2} \times 5.0 \times 20^2 = 1000$ m.
    2. Montée sur l'élan : hauteur supplémentaire = $v^2/2g = 100^2 \div 19.62 = 510$ m.

    Réponse : 1510 m, sans traînée.

2. Un ballon est frappé à 25 m/s à 40° au-dessus d'un sol horizontal. Trouvez sa portée et sa durée de vol.

    1. $v_y = 25 \sin 40° = 16.1$ m/s ; $t = 2 \times 16.1 \div 9.81 = 3.28$ s.
    2. $R = 25^2 \times \sin 80° \div 9.81 = 625 \times 0.985 \div 9.81 = 62.7$ m.

    Réponse : 62.7 m en 3.28 s.

3. Une luge de 20 kg est tirée à vitesse constante sur la neige ($\mu_k = 0.10$) par une corde horizontale. Trouvez la tension de la corde et le travail effectué sur 50 m.

    1. Vitesse constante : $T = \mu_k mg = 0.10 \times 20 \times 9.81 = 19.6$ N.
    2. $W = 19.6 \times 50 = 981$ J.

    Réponse : 19.6 N ; 981 J, entièrement transformés en chaleur par le frottement.

4. Un bloc de 2.0 kg glisse depuis le repos sur une piste courbe sans frottement depuis 5.0 m de haut, puis comprime un ressort (k = 400 N/m) sur le sol horizontal. Trouvez la compression maximale.

    1. $mgh = \frac{1}{2}kx^2$.
    2. $x = \sqrt{(2 \times 2.0 \times 9.81 \times 5.0 \div 400)} = \sqrt{0.4905} = 0.700$ m.

Réponse : 0.700 m.

Série d’entraînement finale (toutes les unités)

1. Un chariot de 3.0 kg à 4.0 m/s heurte un chariot de 1.0 kg au repos et ils restent collés. Trouvez la vitesse finale et la part d’énergie cinétique perdue.

    1. v = 3.0 × 4.0 ÷ 4.0 = 3.0 m/s.
    2. K avant = 24 J ; après = ½ × 4.0 × 9.0 = 18 J.

    Réponse : 3.0 m/s ; 25% de l’énergie cinétique est perdue.

2. Un anneau creux et un disque plein de même masse et de même rayon roulent depuis le repos sur une rampe de 1.0 m de haut. Trouvez la vitesse de chacun en bas.

    1. Anneau ($I = mr^2$) : $mgh = mv^2$, donc $v = \sqrt{(gh)} = 3.13$ m/s.
    2. Disque ($I = \frac{1}{2}mr^2$) : $mgh = \frac{3}{4}mv^2$, donc $v = \sqrt{(4gh/3)} = 3.62$ m/s.

    Réponse : Anneau 3.13 m/s, disque 3.62 m/s ; le disque gagne.

3. Trouvez la période orbitale d’un satellite sur une orbite circulaire à 1336 km au-dessus de la Terre.

    1. r = 6,371 + 1,336 = 7,707 km.
    2. $T = 2\pi\sqrt{(r^3/GM)} = 2\pi\sqrt{((7.707 \times 10^6)^3 \div 3.986 \times 10^{14})} = 6{,}733$ s.

    Réponse : Environ 112 minutes.

4. Une masse de 0.20 kg sur un ressort oscille avec une période de 0.50 s et une amplitude de 0.10 m. Trouvez k et la vitesse maximale.

    1. $\omega = 2\pi \div 0.50 = 12.57$ rad/s.
    2. $k = m\omega^2 = 0.20 \times 158.0 = 31.6$ N/m.
    3. $v_{max} = A\omega = 0.10 \times 12.57 = 1.26$ m/s.

    Réponse : k = 31.6 N/m ; v_{max} = 1.26 m/s.

5. Une bouée de 1.0 m³ et de 400 kg est maintenue entièrement immergée dans l’eau de mer (ρ = 1025 kg/m³) par un câble fixé au fond. Trouvez la tension du câble.

    1. Poussée = 1025 × 1.0 × 9.81 = 10060 N.
    2. Poids = 400 × 9.81 = 3920 N.
    3. Tension = 10060 − 3920 = 6130 N.

    Réponse : Environ 6130 N.

Fiche de formules

$$v = dx/dt,\ a = dv/dt \qquad x = x_0 + v_0 t + \tfrac{1}{2}at^2$$

$$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x$$

$$R = v_0^2 \sin 2\theta / g$$

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

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

$$f_k = \mu_k N$$

$$W = \int \vec{F} \cdot d\vec{x}$$

$$K = \tfrac{1}{2}mv^2,\ U_g = mgh,\ U_s = \tfrac{1}{2}kx^2$$

$$P = dW/dt = Fv$$

$$\vec{p} = m\vec{v},\ \vec{J} = \Delta\vec{p}$$

$$\Delta v = v_e \ln(m_0/m_f)$$

$$\tau = rF\sin\theta = I\alpha$$

$$L = I\omega,\ K_{rot} = \tfrac{1}{2}I\omega^2$$

$$F = Gm_1m_2/r^2$$

$$v_{orb} = \sqrt{GM/r},\ v_{esc} = \sqrt{2GM/R}$$

$$T^2 = 4\pi^2 a^3/GM$$

$$T_{spring} = 2\pi\sqrt{m/k},\ T_{pend} = 2\pi\sqrt{L/g}$$

$$P = P_0 + \rho gh,\ F_B = \rho V g$$

$$A_1v_1 = A_2v_2,\ P + \tfrac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{const}$$

Constantes

Constante	**Valeur**
Constante gravitationnelle, G	6.674 × 10⁻¹¹ N·m²/kg²
Pesanteur normale, g	9.81 m/s² (9.80665 m/s² par définition)
Masse de la Terre	5.972 × 10²⁴ kg (fiche NASA sur la Terre)
Rayon moyen de la Terre	6371 km (fiche NASA sur la Terre)
GM de la Terre	3.986 × 10¹⁴ m³/s²
Jour sidéral	86,164 s
Masse volumique de l’eau douce	1000 kg/m³ ; eau de mer environ 1025 kg/m³
Masse volumique de l’air au niveau de la mer, 15 °C	1.225 kg/m³

Source : NIST : constantes physiques fondamentales (en anglais) (https://physics.nist.gov/cuu/Constants/)

Données de référence

Utilisez ces sources de données officielles et gratuites en parallèle du cours.

- Fiche NASA sur la Terre (en anglais) (https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html): Masse, rayon, gravité et orbite de la Terre (et liens vers les autres planètes).
- Unités SI du NIST (en anglais) (https://www.nist.gov/pml/owm/metric-si/si-units): Les sept unités de base du SI et leur définition.
- Publications du JCGM (GUM) (en anglais) (https://www.bipm.org/en/committees/jc/jcgm/publications): Le guide international pour exprimer l'incertitude de mesure.

Glossaire

Accélération
Taux de variation de la vitesse, dv/dt.

Amplitude
Déplacement maximal par rapport à l'équilibre dans une oscillation.

Moment cinétique
L = Iω ; conservé en l'absence de moment extérieur.

Poussée d'Archimède
Force vers le haut exercée par un fluide, égale au poids du fluide déplacé.

Centre de masse
Position moyenne d'un système pondérée par les masses.

Force conservative
Force dont le travail ne dépend pas du chemin, comme la gravité ou un ressort.

Déplacement
Variation de position, un vecteur.

Collision élastique
Collision qui conserve l'énergie cinétique.

Vitesse de libération
Vitesse minimale pour quitter l'attraction d'un astre sans poussée supplémentaire.

Diagramme des forces
Schéma de toutes les forces sur un objet.

Fréquence
Cycles par seconde (Hz) ; f = 1/T.

Orbite géostationnaire
Orbite équatoriale de période égale à un jour sidéral.

Impulsion
Force intégrée sur le temps ; égale à la variation de quantité de mouvement.

Inertie
Résistance au changement de mouvement ; mesurée par la masse.

Énergie cinétique
Énergie du mouvement, $\frac{1}{2}mv^2$.

Moment d’inertie
Inertie de rotation, Σmr^2.

Quantité de mouvement
$p = mv$.

Newton
Unité SI de force, $kg \cdot m/s^2$.

Période
Durée d’un cycle ou d’une orbite.

Puissance
Taux de transfert d’énergie, en watts.

Pression
Force par unité d’aire, en pascals.

Résonance
Grande oscillation quand on excite à une fréquence propre.

Erreur type
Écart-type de la moyenne, $s/\sqrt{N}$.

Orbite héliosynchrone
Orbite quasi polaire qui survole chaque lieu à peu près à la même heure solaire locale.

Moment d’une force
Effet de rotation d’une force, $rF \sin \theta$.

Incertitude
Intervalle estimé autour d’une valeur mesurée qui contient probablement la vraie valeur.

Vecteur
Grandeur ayant une norme et une direction.

Poids
Force gravitationnelle sur une masse, mg.

Travail
Énergie transférée par une force au cours d’un déplacement.

Grille d’autoévaluation

Aucune note ni aucun crédit ne sont attribués. Utilisez cette grille pour juger honnêtement où vous en êtes dans chaque unité.

Niveau	À quoi cela ressemble
4 · Maîtrise	Résout correctement des problèmes nouveaux, part d'un schéma et d'un principe (Newton, énergie ou quantité de mouvement), et vérifie unités et cas limites.
3 · Compétent	Résout les exercices avec des unités correctes et des chiffres significatifs sensés ; quelques erreurs d'inattention.
2 · En progression	Suit les exemples résolus mais peine à choisir une méthode pour des problèmes nouveaux, ou confond vecteurs et scalaires.
1 · Débutant	Remplace des nombres dans des formules sans schéma ; doit revoir l'unité.

Pondération suggérée si vous voulez une note

Partie	Poids
Exercices	30%
Comptes rendus de TP (ou TP virtuels)	20%
Série d'entraînement de mi-parcours	20%
Série d'entraînement finale	30%

Visez le niveau 3 ou mieux dans chaque unité avant de passer au cours suivant.

Cours associés

- Chimie générale I + TP CHEM 110 + CHEM 110L
- Analyse I MATH 110
- Analyse II MATH 111
- Tous les cours