Dernière mise à jour: November 1, 2026

🗺️ Parcours sur quatre ans · Année 2, Printemps · 🧱 Calculateur intégré

À propos de ce cours

Ce cours gratuit compte 10 unités et 6 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 contenu suit un cours de dynamique pour ingénieurs de deuxième année sur un semestre. Il s'inspire des thèmes et du niveau de MIT 2.003 Engineering Dynamics et MIT 8.01 Classical Mechanics (tous deux sur MIT OpenCourseWare), de Purdue ME 274 et de la dynamique de Georgia Tech, ainsi que du manuel gratuit OpenStax University Physics Volume 1, auquel nous renvoyons tout au long du cours. Aucun de ces auteurs ou établissements ne cautionne cette page.
>
> Ce que nous ajoutons : chaque unité est reliée à un vrai travail sur l'énergie propre, l'observation de la Terre ou la défense planétaire avec une source publique citée (voitures électriques, station spatiale, GRACE-FO, stockage par pompage, test d'astéroïde DART de la NASA, fusées, éoliennes et turbines hydrauliques, bâtiments parasismiques), chaque nombre de la page est recalculé par un script de vérification avant sa mise en ligne, et chaque labo a une simulation gratuite ou une version maison bon marché.
>
> 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 dynamique est la physique de toute machine qui déplace de l'énergie. Les voitures électriques transforment l'énergie de la batterie en mouvement et en récupèrent une partie, les turbines hydrauliques et éoliennes sont des solides en rotation, les centrales de pompage stockent de l'énergie en élevant de l'eau, et les satellites qui surveillent l'eau et le climat de la Terre restent en orbite parce qu'ils ne cessent de tomber autour d'elle.

C'est aussi ainsi que nous protégeons la planète : la mission DART de la NASA a utilisé la quantité de mouvement pour modifier l'orbite d'un astéroïde, et les ingénieurs utilisent la théorie des

vibrations pour que les bâtiments tiennent lors des séismes. Chaque unité se termine par une courte section sourcée. Les valeurs qui ne proviennent pas d'une source sont indiquées comme valeurs d'exemple.

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 : 10 unités et 6 travaux pratiques (ENGR 212).
- 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

- Statique : diagrammes du corps libre, moments et centroïdes.
- Physique I : lois de Newton, énergie et quantité de mouvement.
- Analyse I et II : dérivées, intégrales et équations différentielles simples.
- Équations différentielles aide pour l'unité 10 (vibrations) mais n'est pas obligatoire ; les solutions nécessaires sont fournies.

Comment étudier

- Commencez par la cinématique : que sait-on de la position, de la vitesse et de l'accélération, et dans quelles coordonnées ?
- Tracez côte à côte un diagramme du corps libre et un diagramme cinétique (ma et Iα).
- Choisissez la méthode adaptée : F = ma pour les accélérations, travail-énergie pour les vitesses entre deux positions, impulsion-quantité de mouvement pour les forces dans le temps et les chocs.

- Résolvez d’abord en symboles, puis remplacez par des valeurs SI, et vérifiez les unités et les cas limites.
- Faites chaque exercice sur papier avant d’ouvrir la réponse.
- Refaites les quiz quelques jours plus tard ; un entraînement espacé vaut mieux qu’une longue séance.

Ce qu’il vous faut

- Un ordinateur ou une tablette pour les simulations PhET gratuites (elles fonctionnent dans un navigateur).
- Un smartphone avec caméra ralenti ou une application de capteurs gratuite (accéléromètre, chronomètre).
- Une planche ou un grand livre pour faire une rampe, un mètre ruban, et une balle, une boîte de soupe, une boîte vide et un anneau ou cerceau à faire rouler.
- De la ficelle, un petit poids (un écrou ou des rondelles) et une règle pour un pendule.
- Quelques élastiques ou un ressort souple et de petites masses (pièces dans un sachet) pour un oscillateur masse-ressort.
- Un tableur pour les graphiques et les ajustements.

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	Cinématique du point en ligne droite	Position, vitesse, accélération ; accélération constante	OpenStax UP1 3.1–3.4
2	Cinématique du point en ligne droite	Accélération variable, a(x) et a(v) ; labo A	UP1 3.6
3	Mouvement curviligne : projectiles, coordonnées normale–tangentielle et polaires	Projectiles, normale–tangentielle, polaires, mouvement relatif ; labo B	UP1 4.1–4.5
4	Cinétique du point : deuxième loi de Newton	Deuxième loi de Newton, frottement, corps liés	UP1 5.1–6.2
5	Cinétique du point : deuxième loi de Newton	Virages, dévers, orbites	UP1 6.3, 13.4
6	Travail, énergie et puissance	Travail, énergie, conservation, puissance et rendement	UP1 7.1–8.3
7	Impulsion, quantité de mouvement et chocs	Impulsion, quantité de mouvement, chocs, moment cinétique ; labo C ; entraînement au partiel	UP1 9.1–9.4

Semaine	Unité	Thèmes	Lecture
8	Systèmes de points et masse variable : jets et fusées	Systèmes de points, jets, fusées	UP1 9.5–9.7
9	Cinématique plane des solides	Rotation des solides, engrenages, vitesse relative	UP1 10.1–10.3
10	Cinématique plane des solides	Centres instantanés, accélération relative, roulement	UP1 11.1
11	Cinétique plane des solides : force, masse et accélération	Moments d'inertie, équations du mouvement plan, roulement ; labo D	UP1 10.4–10.7
12	Solides : méthodes de l'énergie et de la quantité de mouvement	Énergie des solides, puissance, moment cinétique	UP1 10.8, 11.2–11.3
13	Vibrations mécaniques	Vibrations libres, pendules, méthode énergétique ; labo E	UP1 15.1–15.4
14	Vibrations mécaniques	Vibrations amorties et forcées, résonance ; labo F	UP1 15.5–15.6
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

Cinématique du point en ligne droite

Position, vitesse et accélération comme dérivées, accélération constante, accélération donnée en fonction du temps, de la vitesse ou de la position, et distance parcourue ou déplacement.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Relier x, v et a par dérivation et intégration.
- Utiliser correctement les équations à accélération constante.
- Résoudre des problèmes a(x) avec v dv = a dx.
- Distinguer distance totale et déplacement.

Notions clés

- La vitesse est v = dx/dt et l'accélération a = dv/dt = d²x/dt². L'intégration fait le chemin inverse.
- Ce n'est que si a est constante que v = v_0 + at, x = x_0 + v_0t + ½at² et v² = $v_0$² + 2a(x − x_0) sont valables.
- Si a est donnée en fonction de la position, utilisez a dx = v dv ; en fonction de la vitesse, utilisez dt = dv/a(v).
- La distance parcourue compte chaque tronçon ; découpez le mouvement là où v = 0 et additionnez les longueurs.
- Les signes comptent : choisissez un sens positif et gardez-le ; ralentir signifie que a et v ont des signes opposés.

Équations clés

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

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

Définitions

$$v = v_0 + at, \quad x = x_0 + v_0 t + \tfrac{1}{2} a t^2$$

`v=v_0+at, x=x_0+v_0t+12at^2`

Accélération constante

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

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

Accélération constante, sans le temps

$$a\,dx = v\,dv$$

```
a dx=v dv
```

Accélération en fonction de la position

Exemples résolus pas à pas

Exemple 1.1 Un point se déplace selon $x = t^3 - 6t^2 + 9t$ (m, s). Trouvez quand il s'arrête, v et a à t = 2 s, et la distance parcourue de 0 à 4 s.

1. $v = 3t^2 - 12t + 9 = 0$ à $t = 1$ s et $t = 3$ s ; $a = 6t - 12$.
2. At $t = 2$ s: $v = -3$ m/s, $a = 0$.
3. $x(0) = 0$, $x(1) = 4$, $x(3) = 0$, $x(4) = 4$, d'où des tronçons de 4 + 4 + 4 m.

Réponse : S'arrête à 1 s et 3 s ; $v = -3$ m/s, $a = 0$ à 2 s ; 12 m parcourus (déplacement 4 m).

Exemple 1.2 Une voiture part du repos et accélère à 3 m/s² pendant 8 s. Trouvez sa vitesse et la distance parcourue.

1. $v = at = 3 \times 8$.
2. $x = \tfrac{1}{2}at^2 = \tfrac{1}{2} \times 3 \times 64$.

Réponse : 24 m/s et 96 m.

Exemple 1.3 Une voiture à 30 m/s freine à 6 m/s². Trouvez la distance et le temps d'arrêt.

1. $x = v_0^2/(2a) = 900/12$.
2. $t = v_0/a$.

Réponse : 75 m en 5 s.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Une balle est lancée verticalement vers le haut à 15 m/s. Trouvez sa hauteur maximale et le temps pour l'atteindre.

   $h = v^2/(2g) = 11.47$ m; $t = v/g = 1.529$ s.

2. Un point part du repos en x = 0 avec a = 2x (m/s²). Trouvez v en x = 3 m.

   v dv = 2x dx donne $v^2 = 2x^2$, $v = \sqrt{2} \times 3 = 4.24$ m/s.

3. Valeurs d'exemple : une voiture électrique passe de 0 à 27 m/s (environ 100 km/h) en 6 s. Trouvez son accélération moyenne.

   a = 27/6 = 4.5 m/s² (valeurs d'exemple).

4. Une pierre lâchée dans un puits touche l'eau au bout de 2.5 s. À quelle profondeur est la surface de l'eau (négligez le temps de propagation du son) ?

   $h = \frac{1}{2}gt^2 = 30.7$ m.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Vitesse nulle signifie accélération nulle.
En réalité : Au sommet d'un lancer, v = 0 mais a = −g.

Idée reçue : Distance parcourue et déplacement sont identiques.
En réalité : Pas quand le point fait demi-tour ; découpez en v = 0.

Idée reçue : Les formules à accélération constante marchent toujours.
En réalité : Seulement pour a constante ; sinon, intégrez.

Cartes mémoire

Vitesse

v = dx/dt.

Accélération

a = dv/dt.

a constante

$v = v_0 + at$; $x = v_0t + \frac{1}{2}at^2$.

Équation sans le temps

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

a(x)

a dx = v dv.

Distance parcourue

Découpez le mouvement là où v = 0.

Quiz d'autocontrôle

1. L'accélération est la dérivée de…

position

la vitesse

la distance parcourue

la force

la vitesse. a = dv/dt.

2. Au sommet d'un lancer vertical, l'accélération vaut…

0

g vers le bas

g vers le haut

la vitesse maximale

g vers le bas. La pesanteur ne s'arrête jamais.

3. Doubler la vitesse multiplie la distance de freinage (même a) par…

2

4

√2

1

4. $x = v^2/(2a)$.

4. Si a est donnée en fonction de x, utilisez…

v = at

a dx = v dv

x = vt

F = ma seulement

a dx = v dv. Règle de la chaîne.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Chaque changement de vitesse coûte de l'énergie, et l'origine de cette énergie compte. FuelEconomy.gov (DOE/EPA) indique que les véhicules électriques convertissent plus de 77% de l'énergie électrique du réseau en puissance aux roues, alors que les véhicules à essence classiques ne convertissent qu'environ 12% à 30% de l'énergie de l'essence. La cinématique de cette unité, à quelle vitesse une voiture accélère et sur quelle distance elle freine, est le point de départ des modèles de cycles de conduite utilisés pour évaluer l'efficacité des véhicules.

Sur Saving Planets : Physique I

Sources : FuelEconomy.gov (DOE/EPA): All-electric vehicles (https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml) · OpenStax UP1, 3.4 Motion with constant acceleration (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/3-4-motion-with-constant-acceleration)

Ressources d'apprentissage gratuites

- OpenStax UP1, 3.1 Position, displacement and average velocity (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/3-1-position-displacement-and-average-velocity): Section de manuel gratuite.
- OpenStax UP1, 3.4 Motion with constant acceleration (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/3-4-motion-with-constant-acceleration): Équations à a constante.
- MIT OpenCourseWare 2.003SC Engineering Dynamics (https://ocw.mit.edu/courses/2-003sc-engineering-dynamics-fall-2011/): Cours et exercices du MIT.

Regarder le cours magistral

Kinematics: describing the motion of particles and rigid bodies (https://ocw.mit.edu/courses/2-003sc-engineering-dynamics-fall-2011/resources/kinematics-describing-the-motion-of-particles-and-rigid-bodies/) (en anglais)

MIT 2.003SC Engineering Dynamics (Fall 2011), 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**

Mouvement curviligne : projectiles, coordonnées normale–tangentielle et polaires

Mouvement plan : composantes cartésiennes et projectiles, composantes normale et tangentielle sur trajectoires courbes, coordonnées polaires pour bras en rotation, et mouvement relatif.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Résoudre des problèmes de projectiles avec des mouvements x et y indépendants.
- Trouver les accélérations tangentielle et normale sur une trajectoire courbe.
- Utiliser les composantes polaires pour un mouvement le long d'un bras en rotation.
- Composer des vitesses relatives.

Notions clés

- Un projectile a a_x = 0 et a_y = −g (sans traînée de l'air) ; le temps relie les deux directions.
- Sur une trajectoire courbe, a_t = dv/dt change la norme de la vitesse et a_n = v²/ρ pointe vers le centre de courbure et change la direction.
- En coordonnées polaires, a_r = r̈ − rθ̇² et a_θ = rθ̈ + 2ṙθ̇ ; le terme 2ṙθ̇ est la partie de Coriolis.
- Mouvement relatif : v_A = v_B + v_A/B, et de même pour les accélérations (repères en translation).
- Un satellite en orbite circulaire n'a qu'une accélération normale : il tombe vers la Terre à v²/r tout en se déplaçant latéralement assez vite pour la manquer.

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`

Projectile

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

`R=(v_0^22θ)/(g)`

Portée sur sol horizontal

$$a_t = \dot{v}, \quad a_n = \frac{v^2}{\rho}$$

`a_t= v, a_n=(v^2)/(ρ)`

Normale–tangentielle

$$a_r = \ddot{r} - r\dot{\theta}^2, \quad a_\theta = r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta}$$

`a_r= r-rθ^2, a_θ=rθ+2 rθ`

Composantes polaires

Exemples résolus pas à pas

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

1. v_x = 17.32 m/s, v_y = 10 m/s.
2. Durée = 2v_y/g ; hauteur = v_y²/(2g) ; R = v_0^2 sin 60°/g.

Réponse : R = 35.3 m, h = 5.10 m, t = 2.04 s.

Exemple 2.2 Une voiture à 25 m/s dans un virage de rayon 100 m ralentit à 2 m/s². Trouvez son accélération totale.

1. a_n = 25²/100 = 6.25 m/s²; a_t = −2 m/s².
2. |a| = √(6.25² + 2²).

Réponse : 6.56 m/s².

Exemple 2.3 Un coulisseau glisse le long d'un bras à 0.3 m/s (constante) pendant que le bras tourne à 2 rad/s constants. Trouvez son accélération quand r = 0.5 m.

1. a_r = 0 − 0.5 × 2² = −2.0 m/s².
2. a_θ = 0 + 2 × 0.3 × 2 = 1.2 m/s².

Réponse : |a| = 2.33 m/s².

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. La NASA indique que la station fait le tour de la Terre environ toutes les 90 minutes. Avec un rayon d'orbite d'exemple de 6791 km (420 km d'altitude), trouvez sa vitesse et son accélération normale.

$v = 2\pi r/T = 7902$ m/s (la NASA indique environ 5 miles par seconde, 8.0 km/s) ; $a_n = v^2/r = 9.19$ m/s².

2. Un bateau se dirige vers le nord à 4 m/s dans un courant qui va vers l'est à 3 m/s. Trouvez sa vitesse par rapport au sol.

   5 m/s à 36.9° à l'est du nord.

3. Quel angle de lancement donne la plus grande portée sur sol horizontal (sans traînée) ?

   45°, où $\sin 2\theta = 1$.

4. Trouvez l'accélération normale d'une voiture à 15 m/s dans un virage de rayon 50 m.

   $a_n = 225/50 = 4.5$ m/s².

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Un corps à vitesse constante n'a pas d'accélération.
En réalité : Dans un virage, il a $a_n = v^2/\rho$.

Idée reçue : La vitesse horizontale d'un projectile diminue pendant le vol.
En réalité : Sans traînée, v_x reste constante.

Idée reçue : Les astronautes flottent parce qu'il n'y a pas de gravité en orbite.
En réalité : La pesanteur y est encore forte : $(6371/6791)^2 = 88\%$ de la pesanteur au sol, à une altitude d'exemple de 420 km. Ils flottent parce qu'ils sont en chute libre avec la station.

Cartes mémoire

Projectile

$a_x = 0$, $a_y = -g$.

Portée

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

Tangentielle

$a_t = dv/dt$.

Normale

$a_n = v^2/\rho$.

Polaire

$a_r = \ddot{r} - r\dot{\theta}^2$, $a_\theta = r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta}$.

Vitesse relative

$v_A = v_B + v_{A/B}$.

Quiz d'autocontrôle

1. Pour un projectile sans traînée, a_x vaut…

g

0

$-g$

v^2/r

0. Seule la pesanteur agit, verticalement.

2. Dans un virage, l'accélération normale…

dv/dt

v^2/ρ

$r\ddot{\theta}$

0

v^2/ρ. Change la direction.

3. Le terme $2\dot{r}\dot{\theta}$ en coordonnées polaires est le…

terme centripète

terme de Coriolis

terme de traînée

terme tangentiel

terme de Coriolis. Coriolis.

4. Doubler la vitesse dans le même virage multiplie a_n par…

2

4

½

1

4. v^2.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La station spatiale montre le mouvement curviligne à l'extrême. La NASA indique qu'elle se déplace à cinq miles par seconde, fait le tour de la Terre environ toutes les 90 minutes, soit 16 orbites en 24 heures, et que sa trajectoire la fait passer au-dessus de 90 pour cent de la population mondiale ; les astronautes ont pris des millions d'images de la planète. Le même équilibre d'accélération normale maintient en orbite tous les satellites d'observation de la Terre.

Sur Saving Planets : Introduction à l'ingénierie aérospatiale

Sources : NASA: International Space Station facts and figures (https://www.nasa.gov/international-space-station/space-station-facts-and-figures/) · OpenStax UP1, 4.4 Uniform circular motion (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/4-4-uniform-circular-motion)

Ressources d'apprentissage gratuites

- OpenStax UP1, 4.3 Projectile motion (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/4-3-projectile-motion): Section de manuel gratuite.
- OpenStax UP1, 4.4 Uniform circular motion (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/4-4-uniform-circular-motion): Mouvement circulaire.
- PhET : Projectile Motion (https://phet.colorado.edu/en/simulations/projectile-motion): Interactif.
- PhET: Ladybug Motion 2D (https://phet.colorado.edu/en/simulations/ladybug-motion-2d): Vecteurs vitesse et accélération.

Regarder le cours magistral

Definition of normal and tangential coordinates (https://ocw.mit.edu/courses/2-003sc-engineering-dynamics-fall-2011/resources/definition-of-normal-and-tangential-coordinates/) (en anglais)

MIT 2.003SC Engineering Dynamics (Fall 2011), 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**

Cinétique du point : deuxième loi de Newton

ΣF = ma en coordonnées cartésiennes, normale–tangentielle et polaires, frottement et corps liés, virages relevés et orbites.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Tracer des diagrammes du corps libre et cinétiques.
- Appliquer ΣF = ma avec frottement et corps liés.
- Résoudre des problèmes de virages et de dévers avec les composantes normale–tangentielle.
- Trouver les vitesses d’orbites circulaires.

Notions clés

- Deuxième loi de Newton : ΣF = ma, dans un référentiel galiléen. Écrivez-la dans les coordonnées adaptées au mouvement.
- Le frottement cinétique en glissement vaut μ_kN, opposé au sens de glissement.
- Les corps liés partagent leurs accélérations par des liaisons (une corde de longueur fixe, une poulie) ; écrivez une équation par corps.
- Dans un virage, la force normale résultante fournit mv²/ρ ; le dévers permet à la réaction normale de la fournir sans frottement.
- Pour une orbite circulaire, la gravité fournit la force normale : GMm/r² = mv²/r, donc v = √(GM/r).

Équations clés

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

`F=m a`

Deuxième loi de Newton

$$\sum F_n = \frac{mv^2}{\rho}, \quad \sum F_t = m\dot{v}$$

`F_n=(mv^2)/(ρ), F_t=m v`

Normale–tangentielle

$$v = \sqrt{g\rho\tan\theta}$$

Virage relevé, sans frottement

$$v = \sqrt{GM/r}$$

Orbite circulaire

Exemples résolus pas à pas

Exemple 3.1 Une voiture de 1200 kg dérape jusqu'à l'arrêt depuis 25 m/s avec μ_k = 0.7. Trouvez la décélération et la distance d'arrêt.

1. a = μ_k g = 6.87 m/s² (la masse se simplifie).
2. x = v²/(2a) = 625/13.73.

Réponse : 6.87 m/s²; 45.5 m.

Exemple 3.2 Des masses de 5 kg et 3 kg pendent de part et d'autre d'une poulie légère sans frottement. Trouvez l'accélération et la tension de la corde.

1. a = (5 − 3)g/(5 + 3).
2. T = $2m_1m_2g/(m_1 + m_2)$.

Réponse : a = 2.45 m/s²; T = 36.8 N.

Exemple 3.3 Un virage de rayon 80 m est relevé de 15°. À quelle vitesse aucun frottement n'est-il nécessaire ?

1. v = √(gρ tan 15°) = √(9.81 × 80 × 0.268).

Réponse : 14.5 m/s (52 km/h).

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Un bloc de 10 kg est poussé avec 50 N sur un sol avec μ_k = 0.3. Trouvez son accélération.

   a = (50 − 29.4)/10 = 2.06 m/s².

2. Une personne de 70 kg se tient dans un ascenseur qui accélère vers le haut à 1.5 m/s². Trouvez la force du plancher.

   N = m(g + a) = 792 N.

3. Trouvez la vitesse en orbite circulaire pour un rayon d'exemple de 6791 km ($GM = 3.986 \times 10^{14}$ m³/s²).

   $v = \sqrt{(GM/r)} = 7{,}661$ m/s.

4. Trouvez la vitesse maximale dans un virage plat de rayon 50 m avec $\mu_s = 0.8$.

   $v = \sqrt{(\mu_s g r)} = 19.8$ m/s.

Idées reçues fréquentes

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

En réalité : Seulement pour changer sa vitesse.

Idée reçue : ma est une force du diagramme du corps libre.

En réalité : ma est le résultat, tracé sur le diagramme cinétique.

Idée reçue : La force centrifuge vous pousse vers l'extérieur dans un virage.

En réalité : Dans un référentiel galiléen, la force résultante vers l'intérieur vous fait tourner ; rien ne pousse vers l'extérieur.

Cartes mémoire

Deuxième loi

$\Sigma F = ma$.

Diagramme cinétique

Montre ma (et plus tard $I\alpha$).

Frottement cinétique

$\mu_k N$, opposé au glissement.

Machine d'Atwood

$a = (m_1 - m_2)g/(m_1 + m_2)$.

Virage relevé

$v = \sqrt{(g\rho \tan \theta)}$.

Orbite circulaire

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

Quiz d'autocontrôle

1. La deuxième loi de Newton est valable dans…

n'importe quel référentiel

un référentiel galiléen

uniquement sur Terre

uniquement pour des points au repos

un référentiel galiléen. Les référentiels non galiléens exigent des termes supplémentaires.

2. Pour une voiture qui dérape, μ_k g est la…

la vitesse scalaire

décélération

la force

la distance parcourue

décélération. a = μ_kN/m.

3. Une orbite circulaire de plus grand rayon est…

plus vite

plus lentement

à la même vitesse

impossible

plus lentement. v = √(GM/r).

4. Qu’est-ce qui fournit l’accélération normale dans un virage relevé sans frottement ?

la pesanteur seule

la composante de la réaction normale

la poussée des moteurs

à la traînée

la composante de la réaction normale. N sin θ.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

GRACE-FO pèse l'eau de la Terre avec la deuxième loi de Newton. Le JPL de la NASA explique que les deux satellites jumeaux volent à environ 220 km l'un de l'autre ; les zones de gravité légèrement plus forte attirent d'abord le satellite de tête, et un système de télémétrie micro-ondes mesure la minuscule variation de distance. Un accéléromètre placé au centre de masse de chaque satellite mesure les accélérations non gravitationnelles, comme la traînée atmosphérique, afin que seule la gravité soit prise en compte. Il en résulte des cartes mensuelles montrant comment l'eau se déplace dans les aquifères, les lacs, les calottes glaciaires et les océans.

Sur Saving Planets : Observation de la Terre

Sources : NASA JPL: GRACE-FO mission overview (https://gracefo.jpl.nasa.gov/mission/overview/) · OpenStax UP1, 6.3 Centripetal force (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/6-3-centripetal-force)

Ressources d'apprentissage gratuites

- OpenStax UP1, 6.3 Centripetal force (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/6-3-centripetal-force): Section de manuel gratuite.
- OpenStax UP1, 6.2 Friction (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/6-2-friction): Frottement.
- MIT OpenCourseWare 8.01SC Classical Mechanics (en anglais) (https://ocw.mit.edu/courses/8-01sc-classical-mechanics-fall-2016/): Cours du MIT.

Regarder le cours magistral

Lecture 2: Newton's Laws and Describing the Kinematics of Particles (https://ocw.mit.edu/courses/2-003sc-engineering-dynamics-fall-2011/resources/lecture-2-newtons-laws-and-describing-the-kinematics-of-particles-1/) (en anglais)

MIT 2.003SC Engineering Dynamics (Fall 2011), 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**

Travail, énergie et puissance

Travail des forces (pesanteur, ressorts, frottement), théorème de l’énergie cinétique, forces conservatives et énergie potentielle, conservation de l’énergie, puissance et rendement.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer le travail de la pesanteur, des ressorts et du frottement.
- Utiliser le théorème de l’énergie cinétique pour trouver des vitesses entre deux positions.
- Utiliser la conservation de l’énergie mécanique quand seules des forces conservatives travaillent.
- Calculer la puissance et le rendement.

Notions clés

- Le travail est U = ∫F·dr. La pesanteur fournit −mgΔh, un ressort −½k(x_2^2 − x_1^2), et le frottement cinétique −μ_kN × distance.
- Théorème de l’énergie cinétique : T_1 + $\Sigma U_{1\to 2}$ = T_2, avec l’énergie cinétique T = ½mv².
- Pour les forces conservatives, le travail est égal à la perte d’énergie potentielle, donc T_1 + V_1 = T_2 + V_2 quand elles seules travaillent.
- La puissance est le débit de travail : P = F·v. Le rendement est la puissance de sortie divisée par la puissance d’entrée.
- Les méthodes énergétiques donnent directement les vitesses sans passer par les accélérations, d’où leur grande utilité.

Équations clés

$$T_1 + \sum U_{1\to 2} = T_2, \quad T = \tfrac{1}{2}mv^2$$

```
T_1+ U_12=T_2, T=12mv^2
```

Théorème de l’énergie cinétique

$$V_g = mgh, \quad V_e = \tfrac{1}{2}kx^2$$

```
V_g=mgh, V_e=12kx^2
```

Énergies potentielles

$$P = \vec{F}\cdot\vec{v}, \quad \eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}$$

```
P= F· v, =_outP_in
```

Exemples résolus pas à pas

Exemple 4.1 Un bloc de 2 kg glisse depuis le repos sur une rampe lisse en descendant de 3 m. Trouvez sa vitesse en bas.

1. $mgh = \tfrac{1}{2}mv^2$.
2. $v = \sqrt{(2gh)}$.

Réponse : 7.67 m/s (la masse n'intervient pas).

Exemple 4.2 Un ressort (k = 500 N/m) comprimé de 0.2 m lance un bloc de 0.5 kg sur un sol lisse. Trouvez la vitesse de lancement.

1. $\tfrac{1}{2}kx^2 = \tfrac{1}{2}mv^2$.
2. $v = x\sqrt{(k/m)}$.

Réponse : 6.32 m/s.

Exemple 4.3 Une voiture de 1500 kg gravit une pente de 5% à 20 m/s constants. En négligeant la traînée et le roulement, quelle puissance l'élève ?

1. $\theta = \tan^{-1} 0.05 = 2.86°$.
2. $P = mg \sin\theta \times v$.

Réponse : 14.7 kW.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Valeurs d'exemple : une centrale de pompage élève 1 million de m^3 d'eau de 300 m. Quelle énergie stocke-t-elle ?

   $E = mgh = 10^9 \times 9.81 \times 300 = 2.94 \times 10^{12}$ J ≈ 818 MWh (valeurs d'exemple).

2. Un moteur de rendement 85% fournit 10 kW. Quelle puissance absorbe-t-il ?

   P_in = 10/0.85 = 11.8 kW.

3. Une caisse de 20 kg est poussée sur 5 m sur un sol avec μ_k = 0.4. Quel travail fournit le frottement ?

   U = −0.4 × 196.2 × 5 = −392 J.

4. La masse d'un pendule est lâchée 0.5 m au-dessus de son point le plus bas. Trouvez sa vitesse en ce point.

   v = √(2g × 0.5) = 3.13 m/s.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Le travail est toujours force fois distance.

En réalité : Seule la composante dans le sens du mouvement travaille.

Idée reçue : La réaction normale travaille sur un bloc qui glisse.

En réalité : Elle est perpendiculaire au mouvement, donc son travail est nul.

Idée reçue : L'énergie est perdue par frottement.

En réalité : Elle est convertie en chaleur ; l'énergie totale se conserve, pas l'énergie mécanique.

Cartes mémoire

Travail

$U = \int F \cdot dr$.

Énergie cinétique

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

Travail–énergie

$T_1 + \Sigma U = T_2$.

Énergie potentielle

mgh ; $\frac{1}{2}kx^2$.

Puissance

$P = F \cdot v$.

Rendement

P_{out}/P_{in}.

Quiz d'autocontrôle

1. L'unité SI du travail est le…

watt

joule

newton

pascal

joule. N·m = J.

2. Doubler la vitesse multiplie l’énergie cinétique par…

2

4

8

√2

4. ½mv².

3. L’énergie mécanique se conserve quand…

le frottement agit

seules des forces conservatives travaillent

la vitesse est constante

toujours

seules des forces conservatives travaillent. Définition.

4. La puissance est égale à…

F·v

F/v

mv

mgh

F·v. Débit de travail.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Le stockage par pompage met de l'électricité propre en réserve sous forme de hauteur. Le département de l'Énergie des États-Unis décrit l'hydroélectricité par pompage comme deux réservoirs à des altitudes différentes qui produisent de l'électricité quand l'eau descend à travers une turbine et consomment de l'électricité pour la remonter, comme une batterie géante. Selon le DOE, elle représente 88% de tout le stockage d'énergie à l'échelle des réseaux aux États-Unis, avec 43 centrales. L'énergie stockée vaut simplement mgh, comme dans l'exercice d'exemple.

Sur Saving Planets : Physique II

Sources : U.S. DOE: Pumped storage hydropower (https://www.energy.gov/eere/water/pumped-storage-hydropower) · OpenStax UP1, 8.3 Conservation of energy (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/8-3-conservation-of-energy)

Ressources d'apprentissage gratuites

- OpenStax UP1, 7.3 Work-energy theorem (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/7-3-work-energy-theorem): Section de manuel gratuite.
- OpenStax UP1, 8.3 Conservation of energy (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/8-3-conservation-of-energy): Conservation de l'énergie.
- PhET : Energy Skate Park (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-skate-park): Interactif.

Regarder le cours magistral

Example 2b-work done equals the change in kinetic energy (https://ocw.mit.edu/courses/2-003sc-engineering-dynamics-fall-2011/resources/example-2b-work-done-equals-the-change-in-kinetic-energy/) (en anglais)

MIT 2.003SC Engineering Dynamics (Fall 2011), 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

Impulsion, quantité de mouvement et chocs

Impulsion et quantité de mouvement linéaires, conservation de la quantité de mouvement, choc central direct et coefficient de restitution, et moment cinétique d’un point.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Utiliser le principe impulsion–quantité de mouvement pour trouver des forces moyennes.
- Appliquer la conservation de la quantité de mouvement aux collisions et au recul.
- Résoudre des chocs avec le coefficient de restitution.
- Utiliser la conservation du moment cinétique pour le mouvement à force centrale.

Notions clés

- La quantité de mouvement est L = mv. Impulsion–quantité de mouvement : $mv_1 + \int F\,dt = mv_2$.
- Si aucune impulsion extérieure n’agit sur un système, sa quantité de mouvement totale se conserve, même quand l’énergie cinétique ne se conserve pas.
- Le coefficient de restitution $e = (v_2' - v_1')/(v_1 - v_2)$ va de 0 (parfaitement plastique) à 1 (parfaitement élastique).
- Le moment cinétique par rapport à O est H_O = r × mv. Si toutes les forces passent par O (force centrale comme la gravité), H_O se conserve.
- En orbite, la conservation du moment cinétique signifie qu’un satellite va le plus vite au périapside : $r_1v_1 = r_2v_2$ aux apsides.

Équations clés

$$m\vec{v}_1 + \int \vec{F}\,dt = m\vec{v}_2$$

```
m v_1+ F dt=m v_2
```

Impulsion–quantité de mouvement

$$\sum m\vec{v}_1 = \sum m\vec{v}_2$$

```
m v_1= m v_2
```

Conservation de la quantité de mouvement

$$e = \frac{v_2' - v_1'}{v_1 - v_2}$$

```
e=(v_2'-v_1')/(v_1-v_2)
```

Coefficient de restitution

$$\vec{H}_O = \vec{r} \times m\vec{v}$$

H_0= r× m v

Moment cinétique

Exemples résolus pas à pas

Exemple 5.1 Une balle de 0.15 kg arrive à 40 m/s et quitte la batte à 30 m/s en sens inverse après 2 ms de contact. Trouvez l'impulsion et la force moyenne.

1. Impulsion = $m(v_2 - v_1) = 0.15 \times 70$.
2. F = impulsion/Δt.

Réponse : 10.5 N·s; 5,250 N.

Exemple 5.2 Une voiture de 1500 kg à 20 m/s heurte une voiture arrêtée de 1000 kg et elles restent accrochées. Trouvez la vitesse commune et l'énergie cinétique perdue.

1. $1500 \times 20 = 2500v$.
2. $T_1 = 300$ kJ; $T_2 = \tfrac{1}{2} \times 2500 \times 12^2$.

Réponse : 12 m/s ; 120 kJ (40%) perdus.

Exemple 5.3 Une boule de 2 kg à 5 m/s heurte de plein fouet une boule de 3 kg au repos avec $e = 0.8$. Trouvez les deux vitesses finales.

1. Quantité de mouvement : $10 = 2v_1' + 3v_2'$.
2. Restitution : $v_2' - v_1' = 0.8 \times 5 = 4$.

Réponse : $v_1' = -0.4$ m/s (rebondit), $v_2' = 3.6$ m/s.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. La NASA indique que DART a raccourci l'orbite de Dimorphos de 11 h 55 min à 11 h 23 min. Quelle fraction de la période orbitale cela représente-t-il ?

32 min/715 min = 4.48%.

2. La NASA donne une vitesse d’impact de DART d’environ 22530 km/h. Convertissez en m/s.

   22,530/3.6 = 6,258 m/s.

3. Un satellite se déplace à 7.5 km/s à 7000 km du centre de la Terre (périapside). Trouvez sa vitesse à 8000 km (apoapside).

   $r_1v_1 = r_2v_2$: v_2 = 6.56 km/s.

4. Une patineuse de 60 kg au repos lance une balle de 2 kg vers l’avant à 10 m/s. Trouvez sa vitesse de recul.

   60v = 2 × 10, v = 0.333 m/s vers l’arrière.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Quantité de mouvement et énergie cinétique se conservent toutes deux dans toute collision.

En réalité : La quantité de mouvement oui ; l’énergie cinétique seulement si e = 1.

Idée reçue : Une force plus grande donne toujours une impulsion plus grande.

En réalité : L’impulsion est force × temps ; une poussée longue et douce peut égaler une poussée courte et forte.

Idée reçue : La restitution ne dépend que du matériau.

En réalité : Elle dépend aussi de la vitesse, de la forme et de la température.

Cartes mémoire

Quantité de mouvement

L = mv.

Impulsion

∫F dt = Δ(mv).

Conservation

Pas d’impulsion extérieure : Σmv constante.

Restitution

e de 0 à 1.

Moment cinétique

H_O = r × mv.

Apsides d’une orbite

$r_1v_1 = r_2v_2$.

Quiz d’autocontrôle

1. L’impulsion est égale à la variation de…

- l’énergie
- la quantité de mouvement
- la vitesse scalaire
- la force

la quantité de mouvement. Impulsion–quantité de mouvement.

2. Pour un choc parfaitement plastique, e =

- 0
- 0.5
- 1
- ∞

0. Ils se déplacent ensemble.

3. Une force centrale conserve…

- la quantité de mouvement
- le moment cinétique par rapport au centre
- la vitesse scalaire
- rien

le moment cinétique par rapport au centre. Pas de moment par rapport à O.

4. Les airbags réduisent les blessures en…

- réduisant l’impulsion
- augmentant le temps d’arrêt

ajoutant de la masse

ajoutant de la vitesse

augmentant le temps d'arrêt. Même impulsion, sur un temps plus long.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

En 2022, la NASA a prouvé que la quantité de mouvement peut défendre la Terre. La NASA indique que la sonde DART a percuté l'astéroïde Dimorphos à environ 22530 km/h et a modifié son orbite autour de Didymos de 32 minutes, de 11 heures 55 minutes à 11 heures 23 minutes, soit plus de 25 fois le seuil minimal de réussite fixé par la NASA. La NASA ajoute que le recul dû aux débris éjectés a nettement renforcé la poussée de DART, comme l'air qui s'échappe d'un ballon. Aucun des deux astéroïdes ne présentait de danger pour la Terre.

Sur Saving Planets : Défense planétaire

Sources : NASA: DART impact changed asteroid's motion in space (https://www.nasa.gov/news-release/nasa-confirms-dart-mission-impact-changed-asteroids-motion-in-space/) · OpenStax UP1, 9.4 Types of collisions (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/9-4-types-of-collisions)

Ressources d'apprentissage gratuites

- OpenStax UP1, 9.3 Conservation of linear momentum (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/9-3-conservation-of-linear-momentum): Section de manuel gratuite.
- OpenStax UP1, 9.4 Types of collisions (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/9-4-types-of-collisions): Collisions.
- PhET : Collision Lab (https://phet.colorado.edu/en/simulations/collision-lab): Interactif.

Regarder le cours magistral

A review of the principle of linear momentum and impulse (https://ocw.mit.edu/courses/2-003sc-engineering-dynamics-fall-2011/resources/a-review-of-the-principle-of-linear-momentum-and-impulse/) (en anglais)

MIT 2.003SC Engineering Dynamics (Fall 2011), 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**

Systèmes de points et masse variable : jets et fusées

Centre de masse d’un système, mouvement du centre de masse, quantité de mouvement des systèmes, écoulements fluides permanents, et systèmes à masse variable dont l’équation de la fusée.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Trouver le centre de masse d’un système et son mouvement.
- Utiliser la quantité de mouvement pour des systèmes qui se séparent.
- Trouver la force d’un jet de fluide permanent.
- Utiliser les équations de poussée et de la fusée.

Notions clés

- Le centre de masse se déplace comme si toutes les forces extérieures agissaient sur la masse totale placée en ce point : ΣF_ext = m a_G. Les forces intérieures s’annulent.
- Un écoulement permanent qui change de vitesse exige une force : F = ṁ(v_out − v_in) dans chaque direction.
- Une fusée gagne de la quantité de mouvement en éjectant de la masse vers l’arrière. La poussée idéale est F = ṁv_e plus un terme de pression (p_e − p_a)A_e.
- L’équation idéale de la fusée, Δv = v_e ln(m$_0$/m_f), montre pourquoi les fusées sont surtout constituées d’ergols.
- La gravité et la traînée réduisent le Δv réel, si bien que les lanceurs utilisent des étages pour larguer la masse vide.

Équations clés

$$\bar{x} = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i}, \quad \sum \vec{F}_{\text{ext}} = m\vec{a}_G$$

`x=( m_ix_i)/( m_i), F_ext=m a_G`

Centre de masse

$$F = \dot{m}(v_{\text{out}} - v_{\text{in}})$$

`F= m(v_out-v_in)`

Écoulement permanent

$$F = \dot{m}v_e + (p_e - p_a)A_e$$

F= m v_e+(p_e-p_a)A_e

Poussée d’une fusée

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

Δ v=v_e(m_0)/(m_f)

Équation idéale de la fusée

Exemples résolus pas à pas

Exemple 6.1 Trouvez le centre de masse de 3 kg en x = 0 et 5 kg en x = 4 m.

1. $\bar{x}$ = (3 × 0 + 5 × 4)/8.

Réponse : 2.5 m.

Exemple 6.2 Valeurs d’exemple : un moteur brûle 250 kg/s avec des gaz éjectés à 3000 m/s. Trouvez la poussée idéale (négligez le terme de pression).

1. F = $\dot{m}$v_e = 250 × 3000.

Réponse : 750 kN (valeurs d’exemple).

Exemple 6.3 Un étage de fusée a v_e = 3000 m/s et brûle jusqu’à ce que sa masse soit le quart de sa masse initiale. Trouvez le Δv idéal.

1. Δv = 3000 ln 4.

Réponse : 4,159 m/s.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Quel rapport de masse m_0/m_f donne Δv = 7800 m/s avec v_e = 3500 m/s (idéal) ?

   m_0/m_f = e^(7800/3500) = e^2.229 = 9.29.

2. Un jet d’eau de section 0.001 m² à 20 m/s frappe un mur plan et s’arrête. Trouvez la force.

$F = \rho A v^2 = 1000 \times 0.001 \times 400 = 400$ N.

3. Des patineurs de 50 kg et 75 kg se repoussent depuis le repos ; celui de 75 kg part à 2 m/s. Trouvez la vitesse de l’autre.

   $50v = 75 \times 2$, $v = 3$ m/s.

4. Valeurs d’exemple : une fusée de 50000 kg décolle avec 750 kN de poussée. Trouvez son accélération initiale.

   $a = (750000 - 490500)/50000 = 5.19$ m/s² (valeurs d’exemple).

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Une fusée pousse sur l’air.

En réalité : Elle pousse sur ses propres gaz d’échappement ; elle fonctionne mieux dans le vide.

Idée reçue : Doubler la quantité d’ergols double le Δv.

En réalité : Le Δv ne croît qu’avec le logarithme du rapport de masse.

Idée reçue : Les forces intérieures peuvent déplacer le centre de masse.

En réalité : Seules les forces extérieures changent a_G.

Cartes mémoire

Centre de masse

$\Sigma m\, x / \Sigma m$.

Mouvement d’un système

$\Sigma F_{ext} = m\, a_G$.

Écoulement permanent

$F = \dot{m} \Delta v$.

Poussée

$\dot{m} v_e + (p_e - p_a) A_e$.

Équation de la fusée

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

Étagement

Larguer les réservoirs vides pour améliorer le rapport de masse.

Quiz d’autocontrôle

1. Le centre de masse d’un système est mis en mouvement par…

les forces intérieures

les forces extérieures

les deux

aucun des deux

les forces extérieures. ΣF_ext = m a_G.

2. Le Δv idéal d’une fusée dépend de v_e et…

de la durée de combustion seulement

du rapport de masse

de la masse volumique de l’air

de la couleur

du rapport de masse. ln(m_0/m_f).

3. La poussée augmente avec…

le débit massique et la vitesse d’éjection

la longueur de la fusée

la charge utile

l’altitude seulement

le débit massique et la vitesse d’éjection. F = ṁv_e + terme de pression.

4. Pourquoi une fusée a-t-elle des étages ?

pour être plus jolie

pour larguer la masse vide

pour ralentir

pour ajouter de la traînée

pour larguer la masse vide. Meilleur rapport de masse par étage.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Chaque satellite d'observation de la Terre voyage sur une fusée fondée sur cette unité. NASA Glenn explique que la poussée découle de la troisième loi de Newton et dépend du débit massique dans le moteur, de la vitesse d'éjection des gaz et de la pression en sortie de tuyère. Tirer plus de Δv de chaque kilogramme d'ergols signifie des lancements moins nombreux et plus petits pour les mêmes charges utiles, comme les satellites Landsat et météorologiques qui surveillent forêts, cultures et tempêtes.

Sur Saving Planets : Introduction à l'ingénierie aérospatiale

Sources : NASA Glenn: Rocket thrust equation (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/rocket-thrust-equation/) · OpenStax UP1, 9.7 Rocket propulsion (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/9-7-rocket-propulsion)

Ressources d'apprentissage gratuites

- OpenStax UP1, 9.6 Center of mass (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/9-6-center-of-mass): Section de manuel gratuite.
- OpenStax UP1, 9.7 Rocket propulsion (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/9-7-rocket-propulsion): Équation de la fusée.
- NASA Glenn: Rocket thrust equation (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/rocket-thrust-equation/): La poussée expliquée.

Regarder le cours magistral

Damped response of spring-mass-dashpot system to initial conditions (https://ocw.mit.edu/courses/2-003sc-engineering-dynamics-fall-2011/resources/damped-response-of-spring-mass-dashpot-system-to-initial-conditions/) (en anglais)

MIT 2.003SC Engineering Dynamics (Fall 2011), 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**

Cinématique plane des solides

Rotation autour d’un axe fixe, vitesse et accélération angulaires, trains d’engrenages, vitesse et accélération relatives dans les solides, centres instantanés de rotation, et roulement sans glissement.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Relier ω et α aux vitesses et accélérations des points.
- Utiliser les rapports d’engrenages et de courroies.
- Utiliser la vitesse relative et le centre instantané de rotation pour les mécanismes articulés.
- Décrire le roulement sans glissement.

Notions clés

- Pour une rotation autour d’un axe fixe, un point au rayon r a v = rω, a_t = rα et a_n = rω².
- Des engrenages en prise partagent la vitesse au contact : $r_1\omega_1 = r_2\omega_2$, donc les rapports de vitesse suivent les nombres de dents.
- Vitesse relative dans un solide : v_B = v_A + ω × r_B/A ; l’accélération relative ajoute α × r et −ω²r.
- Le centre instantané de rotation (CIR) permet de traiter un corps en mouvement comme une rotation pure pour les vitesses à cet instant.
- Roulement sans glissement : v_G = rω et a_G = rα ; le point de contact est momentanément au repos et le sommet se déplace à 2v_G.

Équations clés

$$v = r\omega, \quad a_t = r\alpha, \quad a_n = r\omega^2$$

`v=rω, a_t=rα, a_n=rω^2`

Rotation autour d’un axe fixe

$$r_1\omega_1 = r_2\omega_2$$

`r_1ω_1=r_2ω_2`

Engrenages et courroies

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{\omega} \times \vec{r}_{B/A}$$

`v_B= v_A+ω× r_B/A`

Vitesse relative

$$v_G = r\omega$$

v_G=rω

Roulement sans glissement

Exemples résolus pas à pas

Exemple 7.1 Une roue de rayon 0.3 m roule sans glisser à 15 m/s. Trouvez ω et la vitesse du point le plus haut.

1. ω = v/r = 15/0.3.
2. En haut : v = 2v_G.

Réponse : ω = 50 rad/s ; point le plus haut à 30 m/s.

Exemple 7.2 Valeurs d'exemple : un rotor d'éolienne tourne à 15 tr/min et un multiplicateur de rapport 100 entraîne la génératrice. Trouvez la vitesse de la génératrice en tr/min et en rad/s.

1. n = 15 × 100.
2. ω = 1500 × 2π/60.

Réponse : 1500 tr/min = 157.1 rad/s (valeurs d'exemple).

Exemple 7.3 Une barre de 1 m glisse, son extrémité A sur le sol se déplaçant vers la droite à 2 m/s et son extrémité B contre un mur. Trouvez ω et v_B quand la barre fait 30° avec le sol.

1. Le CIR est à l'intersection des perpendiculaires à v_A et v_B ; sa distance à A vaut L sin 30° = 0.5 m.
2. ω = v_A/0.5 ; v_B = ω × L cos 30°.

Réponse : ω = 4 rad/s ; v_B = 3.46 m/s vers le bas.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Valeurs d'exemple : un rotor de 60 m tourne à 15 tr/min. Trouvez la vitesse en bout de pale et l'accélération normale.

   v = 60 × 1.571 = 94.2 m/s ; a_n = v²/r = 148 m/s² (valeurs d'exemple).

2. Un volant d’inertie passe du repos à 3000 tr/min en 10 s avec α constante. Trouvez α.

   $\omega = 314.2$ rad/s ; $\alpha = 31.4$ rad/s^2.

3. Un disque de 0.5 m a $\omega = 2$ rad/s et $\alpha = 4$ rad/s^2. Trouvez l’accélération à la jante.

   $a_t = 2$, $a_n = 2$, $|a| = 2.83$ m/s^2.

4. Un pignon de 20 dents entraîne une roue de 80 dents à 1200 tr/min. Trouvez la vitesse de sortie.

   $1200 \times 20/80 = 300$ tr/min.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Tous les points d’une roue qui roule vont à la même vitesse.
En réalité : Le point de contact est au repos et le sommet se déplace à 2v.

Idée reçue : La vitesse angulaire varie d’un point à l’autre d’un solide.
En réalité : ω est la même pour tout le corps.

Idée reçue : Le CIR a une accélération nulle.
En réalité : Seulement une vitesse nulle, à cet instant.

Cartes mémoire

Axe fixe

$v = r\omega$, $a_t = r\alpha$, $a_n = r\omega^2$.

Rapport d’engrenage

$\omega_2/\omega_1 = r_1/r_2 = N_1/N_2$.

Vitesse relative

$v_B = v_A + \omega \times r_{B/A}$.

Centre instantané de rotation

Point de vitesse nulle à un instant donné.

Roulement

$v_G = r\omega$.

tr/min

$\times 2\pi/60$ pour obtenir des rad/s.

Quiz d’autocontrôle

1. Vitesse d’un point au rayon r sur un corps en rotation :

ω/r

$r\omega$

$r\omega^2$

r/ω

$r\omega$. $v = r\omega$.

2. Des engrenages en prise partagent la même…

ω

nombre de dents

vitesse au contact

du rayon

vitesse au contact. $r_1\omega_1 = r_2\omega_2$.

3. Le point de contact d'une roue qui roule sans glisser se déplace à…

v

2v

0

$r\omega^2$

0. Pas de glissement.

4. 1 tr/min en rad/s vaut environ…

0.1047

1

6.28

60

0.1047. 2π/60.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Une éolienne est une chaîne de solides en rotation. Le département de l'Énergie des États-Unis explique que le rotor est relié à la génératrice soit directement, dans une éolienne à entraînement direct, soit par un arbre et un multiplicateur qui accélère la rotation et permet une génératrice physiquement plus petite. La cinématique des rapports d'engrenages de cette unité est la façon dont les ingénieurs adaptent un énorme rotor lent à une génératrice rapide.

Sur Saving Planets : Physique II

Sources : DOE des États-Unis : comment fonctionnent les éoliennes ? (en anglais) (https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work) · OpenStax UP1, 10.3 Relating angular and translational quantities (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/10-3-relating-angular-and-translational-quantities)

Ressources d'apprentissage gratuites

- OpenStax UP1, 10.3 Relating angular and translational quantities (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/10-3-relating-angular-and-translational-quantities): Section de manuel gratuite.
- OpenStax UP1, 11.1 Rolling motion (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/11-1-rolling-motion): Roulement.
- MIT OpenCourseWare 2.003SC Engineering Dynamics (https://ocw.mit.edu/courses/2-003sc-engineering-dynamics-fall-2011/): Cinématique des solides du MIT.

Regarder le cours magistral

Kinematics: describing the motion of particles and rigid bodies (https://ocw.mit.edu/courses/2-003sc-engineering-dynamics-fall-2011/resources/kinematics-describing-the-motion-of-particles-and-rigid-bodies/) (en anglais)

MIT 2.003SC Engineering Dynamics (Fall 2011), 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**

Cinétique plane des solides : force, masse et accélération

Moments d’inertie de masse, théorème des axes parallèles, équations du mouvement en translation, en rotation autour d’un axe fixe et en mouvement plan général, et roulement avec frottement.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer les moments d’inertie de masse de formes courantes.
- Écrire ΣF = ma_G et ΣM_G = I_Gα.
- Résoudre des problèmes de rotation autour d’un axe fixe et de poulies.
- Résoudre des problèmes de roulement et vérifier le glissement.

Notions clés

- Le moment d’inertie de masse I = ∫r² dm mesure la résistance à l’accélération angulaire. Disque plein ½mr², anneau mr², sphère pleine ⅖mr², tige par rapport à son centre mL²/12.
- Théorème des axes parallèles : I = I_G + md².
- Équations du mouvement plan : ΣF_x = m a_Gx, ΣF_y = m a_Gy, ΣM_G = I_Gα (ou ΣM_P = somme des moments du diagramme cinétique par rapport à un point P quelconque).
- Un corps qui roule sans glisser sur une pente a a = g sin θ/(1 + I_G/(mr²)) ; c’est le frottement qui provoque la rotation.
- Vérifiez le roulement avec f ≤ μ_sN ; si le frottement nécessaire est plus grand, le corps glisse et roule à la fois.

Équations clés

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}_G, \quad \sum M_G = I_G\alpha$$

F=m a_G, M_G=I_Gα

Mouvement plan

$$I = I_G + md^2$$

I=I_G+md^2

Axes parallèles

$$a = \frac{g\sin\theta}{1 + I_G/(mr^2)}$$

a=(gθ)/(1+I_G/(mr^2))

Exemples résolus pas à pas

Exemple 8.1 Un disque plein de 10 kg et de rayon 0.2 m sur un axe fixe subit un couple de 4 N·m. Trouvez α.

1. $I = \tfrac{1}{2} \times 10 \times 0.2^2 = 0.2$ kg·m².
2. $\alpha = M/I$.

Réponse : 20 rad/s².

Exemple 8.2 Un cylindre plein roule sans glisser sur une pente de 30°. Trouvez son accélération et le plus petit μ_s qui empêche le glissement.

1. $a = g \sin 30°/(1 + \tfrac{1}{2}) = (2/3)g \sin 30°$.
2. Moments par rapport à G : $fr = \tfrac{1}{2}mr^2(a/r)$, donc $f = \tfrac{1}{2}ma = (1/3)mg \sin 30°$; $\mu_s \geq f/N = (1/3) \tan 30°$.

Réponse : $a = 3.27$ m/s²; $\mu_s \geq 0.192$.

Exemple 8.3 Une masse de 4 kg pend à une corde enroulée sur une poulie disque plein de 2 kg et de rayon 0.1 m. Trouvez l'accélération et la tension.

1. Masse : $4g - T = 4a$. Poulie : $Tr = \tfrac{1}{2}Mr^2\,(a/r)$, donc $T = \tfrac{1}{2}Ma = a$.
2. $4g = 5a$.

Réponse : $a = 7.85$ m/s²; $T = 7.85$ N.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Trouvez I pour une tige de 3 kg et 2 m par rapport à une extrémité.

   $I = mL^2/3 = 4$ kg·m².

2. Cette tige est articulée à une extrémité et lâchée à l'horizontale. Trouvez α au lâcher.

   $\alpha = 3g/(2L) = 7.36$ rad/s².

3. Valeurs d’exemple : la roue d’une turbine hydraulique a $I = 5 \times 10^4$ kg·m² et un couple net de 1×10^6 N·m au démarrage. Trouvez α.

   $\alpha = 20$ rad/s² (valeurs d’exemple).

4. Trouvez l’accélération d’une sphère pleine roulant sur une pente de 30°.

   $a = (5/7)\, g \sin 30° = 3.50$ m/s².

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Seule la masse s’oppose à l’accélération angulaire.

En réalité : La répartition de la masse (I) compte ; un anneau accélère moins vite qu’un disque de même masse.

Idée reçue : Le frottement ralentit toujours une roue qui roule.

En réalité : En roulement pur, le frottement statique ne travaille pas et c’est lui qui la fait tourner.

Idée reçue : ΣM = Iα est valable par rapport à n’importe quel point.

En réalité : Utilisez-la par rapport à G ou à un axe fixe ; par rapport à d’autres points, incluez le moment de ma_G.

Cartes mémoire

Moment d’inertie de masse

$I = \int r^2\, dm$.

Disque, anneau, sphère

$\frac{1}{2}mr^2$, mr^2, $\frac{2}{5}mr^2$.

Rod

$mL^2/12$ (centre), $mL^2/3$ (extrémité).

Mouvement plan

$\Sigma F = ma_G$, $\Sigma M_G = I_G\alpha$.

a en roulement

$g \sin\theta/(1 + I/(mr^2))$.

Vérification du glissement

$f \le \mu_s N$.

Quiz d’autocontrôle

1. Lequel arrive en bas de la pente en premier ?

anneau

disque plein

sphère pleine

tous à égalité

sphère pleine. Le plus petit $I/(mr^2)$.

2. I d'un disque plein par rapport à son axe :

mr^2

$\frac{1}{2}mr^2$

$\frac{2}{5}mr^2$

$mL^2/12$

$\frac{1}{2}mr^2$. Résultat classique.

3. Le théorème des axes parallèles ajoute…

md^2

mr

I/d

d^2

md^2. $I = I_G + md^2$.

4. Forme rotationnelle de la loi de Newton :

$M = I\alpha$

$M = m\alpha$

$F = I\omega$

$P = I\alpha$

$M = I\alpha$. Par rapport à G ou à un axe fixe.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Les turbines hydrauliques sont des solides mis en rotation par l'eau. Le département de l'Énergie des États-Unis décrit deux grandes familles : les turbines à réaction, comme Francis et Kaplan, qui fonctionnent noyées dans l'écoulement et utilisent la pression et l'eau en mouvement, et les turbines à action, comme la roue Pelton, dont les augets sont frappés par des jets libres. Le DOE note que les turbines Francis sont couramment utilisées pour des chutes d'environ 130 à 2000 pieds. Dimensionner le moment d'inertie et le couple de la roue relève de la cinétique de cette unité.

Sur Saving Planets : Physique II

Sources : U.S. DOE: Types of hydropower turbines (https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-turbines) · OpenStax UP1, 10.7 Newton's second law for rotation (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/10-7-newtons-second-law-for-rotation)

Ressources d'apprentissage gratuites

- OpenStax UP1, 10.5 Calculating moments of inertia (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/10-5-calculating-moments-of-inertia): Section de manuel gratuite.
- OpenStax UP1, 10.7 Newton's second law for rotation (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/10-7-newtons-second-law-for-rotation): Dynamique de rotation.
- PhET: Torque (https://phet.colorado.edu/en/simulations/torque): Interactif.

Regarder le cours magistral

Angular momentum for rigid bodies and the mass moment of inertia matrix, [I] (https://ocw.mit.edu/courses/2-003sc-engineering-dynamics-fall-2011/resources/angular-momentum-for-rigid-bodies-and-the-mass-moment-of-inertia-matrix-i/) (en anglais)

MIT 2.003SC Engineering Dynamics (Fall 2011), 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**

Solides : méthodes de l’énergie et de la quantité de mouvement

Énergie cinétique des solides en translation, rotation et roulement, travail des couples, puissance des machines tournantes, impulsion et moment cinétique, et conservation du moment cinétique.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Écrire T = ½mv_G² + ½I_Gω².
- Utiliser travail–énergie pour des corps qui roulent ou pivotent.
- Calculer la puissance d’une machine tournante P = Mω.
- Appliquer la conservation du moment cinétique.

Notions clés

- L’énergie cinétique d’un solide est T = ½mv_G² + ½I_Gω² ; en roulement, une partie de l’énergie part dans la rotation.
- Un couple M qui tourne d’un angle θ fournit un travail Mθ ; la puissance est P = Mω.
- Le moment cinétique par rapport à G est H_G = I_Gω. Impulsion angulaire–moment cinétique : $I_G\omega_1 + \int M\,dt = I_G\omega_2$.
- Si aucun moment extérieur n’agit autour d’un axe, I ω se conserve : ramener la masse vers l’intérieur fait tourner plus vite.
- Un volant d’inertie stocke l’énergie ½Iω² ; le faire tourner deux fois plus vite stocke quatre fois plus d’énergie.

Équations clés

$$T = \tfrac{1}{2} m v_G^2 + \tfrac{1}{2} I_G \omega^2$$

T=12mv_G^2+12I_Gω^2

Énergie cinétique d’un solide

$$U = M\theta, \quad P = M\omega$$

U=Mθ, P=Mω

Travail et puissance d’un couple

$$I_1\omega_1 = I_2\omega_2$$

`I_1ω_1=I_2ω_2`

Conservation du moment cinétique

$$v = \sqrt{\frac{2gh}{1 + I_G/(mr^2)}}$$

`v=(2gh)/(1+I_G/(mr^2))`

Roulement depuis une hauteur h

Exemples résolus pas à pas

Exemple 9.1 Un volant d’inertie avec I = 10 kg·m² tourne à 300 rad/s. Trouvez son énergie stockée en J et en kWh.

1. T = ½ × 10 × 300².
2. ÷ 3.6 × 10⁶.

Réponse : 450 kJ = 0.125 kWh.

Exemple 9.2 Une sphère pleine roule sans glisser depuis le repos en descendant d’une hauteur de 2 m. Trouvez sa vitesse.

1. mgh = ½mv² + ½(⅖mr²)(v/r)² = (7/10)mv².
2. v = √(10gh/7).

Réponse : 5.29 m/s.

Exemple 9.3 Une patineuse tourne à 2 rad/s avec I = 4 kg·m², puis ramène ses bras pour atteindre I = 1.6 kg·m². Trouvez sa nouvelle vitesse de rotation.

1. 4 × 2 = 1.6ω.

Réponse : 5 rad/s.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Un cylindre plein roule depuis le repos en descendant d’une hauteur de 2 m. Trouvez sa vitesse.

$v = \sqrt{(4gh/3)} = 5.11$ m/s.

2. Un disque plein de 20 kg et de rayon 0.5 m tourne à 100 rad/s. Trouvez son énergie cinétique.

   $I = 2.5$ kg·m²; $T = 12.5$ kJ.

3. Une tige de 2 m articulée à une extrémité est lâchée à l'horizontale. Trouvez ω quand elle pend verticalement.

   $mg(L/2) = \frac{1}{2}(mL^2/3)\omega^2$, $\omega = \sqrt{(3g/L)} = 3.84$ rad/s.

4. Valeurs d'exemple : un arbre de turbine transmet 1×10^6 N·m à 150 tr/min. Trouvez la puissance.

   $\omega = 15.7$ rad/s ; $P = M\omega = 15.7$ MW (valeurs d'exemple).

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Une balle qui roule a seulement l'énergie cinétique $\frac{1}{2}mv^2$.

En réalité : Ajoutez $\frac{1}{2}I\omega^2$ pour la rotation.

Idée reçue : Ramener les bras ajoute de l'énergie venue de nulle part.

En réalité : Vos muscles fournissent le travail ; c'est le moment cinétique qui se conserve, pas l'énergie cinétique.

Idée reçue : Couple et puissance, c'est la même chose.

En réalité : $P = M\omega$; le même couple donne plus de puissance à plus grande vitesse.

Cartes mémoire

T d'un solide

$\frac{1}{2}mv_G^2 + \frac{1}{2}I_G\omega^2$.

Travail d'un couple

$U = M\theta$.

Puissance sur l'arbre

$P = M\omega$.

Moment cinétique

$H_G = I_G\omega$.

Conservation

$I_1\omega_1 = I_2\omega_2$.

Volant d'inertie

Stocke $\frac{1}{2}I\omega^2$.

Quiz d'autocontrôle

1. L’énergie cinétique d’un corps qui roule comprend…

seulement $\frac{1}{2}mv^2$

seulement $\frac{1}{2}I\omega^2$

les deux termes

mgh

les deux termes. Translation plus rotation.

2. Puissance d’un arbre en rotation :

$M\omega$

M/ω

$I\omega$

mv

$M\omega$. $P = M\omega$.

3. Diviser I par deux sans moment extérieur rend ω…

moitié

pareil

double

quatre fois plus grande

double. $I\omega$ constant.

4. Doubler la vitesse d’un volant d’inertie multiplie son énergie par…

2

4

8

√2

4. ω^2.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

L'hydroélectricité est une chaîne énergétique qui va de la hauteur à la rotation puis à l'électricité. Le département de l'Énergie des États-Unis explique que l'eau s'écoule dans une conduite appelée conduite forcée, fait tourner les pales d'une turbine, et la turbine entraîne une génératrice qui produit de l'électricité pour le réseau. Les équations travail–énergie et de puissance de cette unité, de mgh à P = Mω, décrivent chaque maillon de cette chaîne.

Sur Saving Planets : Physique II

Sources : U.S. DOE: How hydropower works (https://www.energy.gov/eere/water/how-hydropower-works) · OpenStax UP1, 11.3 Conservation of angular momentum (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/11-3-conservation-of-angular-momentum)

Ressources d'apprentissage gratuites

- OpenStax UP1, 11.1 Rolling motion (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/11-1-rolling-motion): Section de manuel gratuite.
- OpenStax UP1, 11.3 Conservation of angular momentum (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/11-3-conservation-of-angular-momentum): Moment cinétique.
- MIT OpenCourseWare 2.003SC Engineering Dynamics (https://ocw.mit.edu/courses/2-003sc-engineering-dynamics-fall-2011/): Cours du MIT.

Regarder le cours magistral

Angular momentum for rigid bodies and the mass moment of inertia matrix, [I] (https://ocw.mit.edu/courses/2-003sc-engineering-dynamics-fall-2011/resources/angular-momentum-for-rigid-bodies-and-the-mass-moment-of-inertia-matrix-i/) (en anglais)

MIT 2.003SC Engineering Dynamics (Fall 2011), 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**

Vibrations mécaniques

Vibrations libres non amorties, fréquence propre, méthodes énergétiques, amortissement visqueux et taux d'amortissement, vibrations forcées, résonance et amplification.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Trouver les fréquences propres de systèmes masse-ressort et de pendules.
- Utiliser le taux d'amortissement pour classer le mouvement et l'estimer à partir de la décroissance.
- Trouver l'amplitude en régime permanent d'une vibration forcée.
- Expliquer la résonance et pourquoi un faible amortissement est dangereux.

Notions clés

- Une masse sur un ressort obéit à mẍ + kx = 0 et vibre à ω_n = √(k/m) ; la période est T = 2π/ω_n. Un pendule simple a ω_n = √(g/L) pour de petites oscillations.
- Avec un amortissement visqueux, mẍ + cẋ + kx = 0. Le taux d'amortissement ζ = c/(2√(km)) fixe le comportement : ζ < 1 oscille en s'amortissant, ζ = 1 est critique, ζ > 1 revient lentement.
- Le décrément logarithmique δ = ln(x_1/x_2) entre pics successifs donne ζ ≈ δ/(2π) pour un faible amortissement.
- Une force harmonique F_0 sin ωt produit une réponse permanente d'amplitude X = (F_0/k)/√((1 − r²)² + (2ζr)²), avec r = ω/ω_n.
- À la résonance (r = 1) l'amplification vaut 1/(2ζ) : avec un faible amortissement, une petite poussée répétée au bon rythme produit un grand mouvement.

Équations clés

$$\omega_n = \sqrt{k/m}, \quad T = 2\pi/\omega_n$$

ω_n=/m, T=2π/ω_n

Pulsation propre

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}, \quad \omega_d = \omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$$

=2, ω_d=ω_n1-^2

Amortissement

$$X = \frac{F_0/k}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}}, \quad r = \frac{\omega}{\omega_n}$$

X=_0/k(1-r^2)^2+(2 r)^2, r=(ω)/(ω_n)

Réponse forcée

$$\left.\frac{X}{F_0/k}\right|_{r=1} = \frac{1}{2\zeta}$$

.(X)/(F_0/k)|_r=1=12

Amplification à la résonance

Exemples résolus pas à pas

Exemple 10.1 Une masse de 2 kg pend à un ressort avec k = 800 N/m. Trouvez ω_n, f et T.

1. ω_n = √(800/2) = 20 rad/s.
2. f = ω_n/(2π); T = 1/f.

Réponse : 20 rad/s, 3.18 Hz, 0.314 s.

Exemple 10.2 Ajoutez un amortisseur avec c = 8 N·s/m. Trouvez ζ et la pulsation amortie.

1. ζ = 8/(2√(800 × 2)) = 8/80.
2. ω_d = 20√(1 − 0.01).

Réponse : ζ = 0.1 ; ω_d = 19.9 rad/s.

Exemple 10.3 Le système non amorti est excité par F_0 = 10 N à 15 rad/s. Trouvez l'amplitude en régime permanent.

1. F_0/k = 12.5 mm; r = 0.75.
2. X = 12.5/(1 − 0.5625).

Réponse : 28.6 mm.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Trouvez la période d'un pendule simple de 1 m.

   T = 2π√(1/9.81) = 2.01 s.

2. Une machine s’affaisse de 10 mm sur ses supports. Estimez sa fréquence propre.

   $\omega_n = \sqrt{(g/\delta)}$ donne f = 4.98 Hz.

3. Trouvez l’amplification à la résonance pour $\zeta = 0.02$.

   $1/(2 \times 0.02) = 25$.

4. Deux pics successifs d’une vibration libre mesurent 10 mm et 7 mm. Estimez ζ.

   $\delta = \ln(10/7) = 0.357$; $\zeta \approx \delta/(2\pi) = 0.057$.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Une masse plus lourde vibre plus vite.
En réalité : $\omega_n = \sqrt{(k/m)}$: plus de masse, fréquence plus basse.

Idée reçue : Plus d’amortissement signifie toujours plus de sécurité.
En réalité : Il réduit les pics de résonance mais transmet aussi plus de force à haute fréquence.

Idée reçue : La période d’un pendule dépend du poids de la masse.
En réalité : Pour de petites oscillations, elle ne dépend que de L et g.

Cartes mémoire

Pulsation propre

$\omega_n = \sqrt{(k/m)}$.

Pendule

$\omega_n = \sqrt{(g/L)}$.

Taux d’amortissement

$\zeta = c/(2\sqrt{(km)})$.

Décrément logarithmique

$\zeta \approx \ln(x_1/x_2)/(2\pi)$.

Rapport de fréquences

$r = \omega/\omega_n$.

Résonance

$X/(F_0/k) = 1/(2\zeta)$ pour $r = 1$.

Quiz d’autocontrôle

1. Fréquence propre d’un système masse-ressort :

$\sqrt{(m/k)}$

√(k/m)

k/m

km

√(k/m). ω_n = √(k/m).

2. L’amortissement critique est ζ =

0

0.5

1

2

1. Retour le plus rapide sans oscillation.

3. À la résonance avec ζ = 0.05, l’amplification vaut…

5

10

20

0.1

10. 1/(2ζ).

4. Exciter bien au-dessus de ω_n (r ≫ 1) rend la réponse…

énorme

petite

de fréquence nulle

critique

petite. X → 0 quand r augmente.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La résonance décide quels bâtiments survivent aux séismes. IRIS (aujourd'hui EarthScope) explique que chaque bâtiment a une période propre, le temps qu'il met à osciller d'avant en arrière, et que lorsque le mouvement du sol y correspond, le bâtiment subit ses plus grandes oscillations et ses plus gros dégâts. Une étude de l'USGS portant sur 41 immeubles de grande hauteur a trouvé des taux d'amortissement nettement inférieurs à 3 %, et la formule d'amplification de cette unité montre pourquoi un faible amortissement rend la résonance dangereuse. Les ingénieurs ajustent les périodes et ajoutent de l'amortissement pour que logements, hôpitaux et infrastructures restent debout.

Sur Saving Planets : Solutions

Sources : IRIS/EarthScope: Building resonance (https://www.iris.edu/hq/inclass/animation/224) · USGS: Natural periods and damping of tall buildings (Çelebi, 2022) (https://www.usgs.gov/publications/preliminary-study-correlation-natural-periods-and-damping-percentages-tall-buildings)

Ressources d'apprentissage gratuites

- OpenStax UP1, 15.1 Simple harmonic motion (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/15-1-simple-harmonic-motion): Section de manuel gratuite.
- OpenStax UP1, 15.5 Damped oscillations (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/15-5-damped-oscillations): Amortissement.
- OpenStax UP1, 15.6 Forced oscillations (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/15-6-forced-oscillations): Résonance.
- PhET : Masses and Springs (https://phet.colorado.edu/en/simulations/masses-and-springs): Interactif.
- PhET : Pendulum Lab (https://phet.colorado.edu/en/simulations/pendulum-lab): Interactif.

Regarder le cours magistral

Lecture 19: Introduction to Mechanical Vibration (https://ocw.mit.edu/courses/2-003sc-engineering-dynamics-fall-2011/resources/lecture-19-introduction-to-mechanical-vibration-1/) (en anglais)

MIT 2.003SC Engineering Dynamics (Fall 2011), 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**

Exercices

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

1. Cinématique du point en ligne droite
   4 exercices
2. Mouvement curviligne : projectiles, coordonnées normale–tangentielle et polaires
   4 exercices
3. Cinétique du point : deuxième loi de Newton
   4 exercices
4. Travail, énergie et puissance
   4 exercices
5. Impulsion, quantité de mouvement et chocs
   4 exercices
6. Systèmes de points et masse variable : jets et fusées
   4 exercices
7. Cinématique plane des solides
   4 exercices
8. Cinétique plane des solides : force, masse et accélération
   4 exercices
9. Solides : méthodes de l’énergie et de la quantité de mouvement
   4 exercices
10. Vibrations mécaniques
    4 exercices

Le laboratoire (Dynamics lab)

Le labo est la partie pratique du cours. Ici, il est gratuit et sert uniquement à s’entraîner, sans crédits.

Chaque TP peut se faire dans une simulation PhET gratuite ou avec des objets du quotidien. Ne faites rouler et tomber que des objets mous et légers, dégagez le sol et ne lancez jamais rien vers des personnes, des animaux ou des fenêtres.

Référence de sécurité : OSHA: Hand and power tools (https://www.osha.gov/hand-power-tools)

TP A : Accélération constante sur une rampe

SEMAINE 2

Objectif : Mesurez la position en fonction du temps pour une balle qui descend une rampe douce, montrez que x croît comme t² et déduisez-en l'accélération.

$$x = \frac{1}{2}at^2$$

x=12at^2

Départ arrêté ; tracez x en fonction de t² pour obtenir une droite de pente a/2

Mode opératoire

1. Surélevez une extrémité d'une longue planche sur un livre pour former une pente douce ; marquez 0.25, 1.0, 2.25 et 4.0 m (ou des repères à l'échelle).
2. Lâchez une balle depuis le repos et filmez-la au ralenti avec un téléphone ; relevez le temps à chaque repère.
3. Tracez x en fonction de t² et ajustez une droite passant par l'origine ; a = 2 × pente.
4. Facultatif : comparez avec PhET ou avec a = (5/7) g sin θ pour une balle pleine qui roule.

Tableau de données

t (s)	x (m) pour a = 0.5 m/s²
1	0.25
2	1.00
3	2.25
4	4.00

Valeurs d'exemple pour a = 0.5 m/s² ; votre pente donne votre propre a.

Exemple de calcul

1. x/t² = 0.25 m/s² sur chaque ligne, donc a = 0.50 m/s².
2. Doubler le temps quadruple la distance.
3. Pour une balle pleine, a = 0.5 m/s² exige sin θ = 0.5 × 7/(5 × 9.81), θ = 4.1°.

> **Sécurité**
>
> - Dégagez le sol là où la balle termine sa course ; utilisez une balle molle.

Alternative à la maison ou virtuelle

- Tout ce labo se fait à la maison.

PhET: Ladybug Motion 2D (https://phet.colorado.edu/en/simulations/ladybug-motion-2d)

Lien avec la planète : Des mesures d'accélération comme celles-ci alimentent les cycles de conduite qui évaluent l'efficacité énergétique des voitures. FuelEconomy.gov (DOE/EPA): All-electric vehicles (https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml)

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

TP B : Portée d’un projectile et angle de tir

SEMAINE 3

Objectif : Mesurez comment la portée dépend de l’angle de tir et comparez avec R = v_0^2 sin 2θ/g.

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

`R=(v_0^22θ)/(g)`

Sol horizontal, sans traînée

Mode opératoire

1. Ouvrez PhET Projectile Motion, désactivez la résistance de l’air, réglez v_0 = 10 m/s et la hauteur de tir à 0.
2. Tirez à 15°, 30°, 45°, 60° et 75° et notez la portée.
3. Tracez R en fonction de sin 2θ ; la pente doit valoir v_0^2/g = 10.19 m.
4. Activez la résistance de l’air et notez quel angle donne maintenant la plus grande portée.

Tableau de données

θ (°)	R (m)
15	5.10
30	8.83
45	10.19
60	8.83
75	5.10

Valeurs calculées avec la formule et g = 9.81 m/s².

Exemple de calcul

1. Des angles complémentaires (15° et 75°, 30° et 60°) donnent la même portée.
2. Maximum à 45° : R = v_0^2/g = 10.19 m.

> **Sécurité**
>
> - Aucune au-delà d’un usage normal de l’ordinateur ; si vous essayez une version à la maison, ne lancez que des balles molles et jamais vers des personnes.

Alternative à la maison ou virtuelle

- Facultatif : lancez une balle molle à des angles estimés dans un jardin et mesurez les portées ; la traînée et la hauteur de tir rendent le résultat moins exact.

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

Lien avec la planète : Les mêmes équations, avec la traînée en plus, servent à planifier les trajectoires d'ascension des fusées qui placent en orbite les satellites d'observation de la Terre.
NASA: International Space Station facts and figures (https://www.nasa.gov/international-space-station/space-station-facts-and-figures/)

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

TP C : Rebonds, collisions et coefficient de restitution

SEMAINE 7

Objectif : Trouvez e pour une balle qui rebondit à partir des hauteurs de rebond, et vérifiez la conservation de la quantité de mouvement dans des collisions simulées.

$$e = \sqrt{h_2/h_1}$$

e=_2/h_1

Balle lâchée sur un sol lourd

Mode opératoire

1. Lâchez une balle de 1.0 m devant un mètre ruban et filmez-la ; relevez les trois premières hauteurs de rebond.
2. Calculez e pour chaque rebond.
3. Dans PhET Collision Lab, faites entrer en collision 2 kg à 5 m/s avec 3 kg au repos avec une élasticité de 80 % et comparez les vitesses finales à l'exemple de l'unité 5.
4. Recommencez avec une élasticité de 0 % et 100 % et comparez la quantité de mouvement totale et l'énergie cinétique avant et après.

Tableau de données

Rebond	Hauteur (m)	e
Chute	1.00	—
1	0.64	0.80
2	0.41	0.80
3	0.26	0.80

Valeurs d'exemple pour une balle avec e ≈ 0.8.

Exemple de calcul

1. e = √(0.64/1.00) = 0.80; √(0.41/0.64) = 0.80; √(0.26/0.41) = 0.80.
2. Simulation à 80 % : v_1' = −0.4 m/s, v_2' = 3.6 m/s ; quantité de mouvement de 10 kg·m/s avant et après.

> **Sécurité**
>
> - Utilisez une balle molle et éloignez les objets fragiles.

Alternative à la maison ou virtuelle

- La partie rebond est la version à la maison.

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

Lien avec la planète : Le test DART de la NASA était une collision planifiée ; mesurer comment la quantité de mouvement se transmet lors des impacts est la base de la défense planétaire. NASA: DART impact changed asteroid's motion in space (https://www.nasa.gov/news-release/nasa-confirms-dart-mission-impact-changed-asteroids-motion-in-space/)

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

TP D : La course au roulement

SEMAINE 11

Objectif : Faites courir une balle, une boîte de conserve pleine et un anneau sur la même pente et expliquez l'ordre d'arrivée avec a = g sin θ/(1 + I/(mr²)).

$$a = \frac{g \sin\theta}{1 + I_G/(mr^2)}, \quad t = \sqrt{2L/a}$$

`a=(gθ)/(1+I_G/(mr^2)), t=2L/a`

Roulement depuis le repos sur une longueur L

Mode opératoire

1. Inclinez une planche à 10° (inclinomètre du téléphone) et marquez un parcours de 1 m.
2. Lâchez des paires ensemble : balle pleine contre boîte de soupe pleine, boîte pleine contre anneau ou boîte vide (paroi mince).
3. Filmez les arrivées et chronométrez chaque course ; répétez trois fois.
4. Comparez avec les temps prévus.

Tableau de données

Objet	I/(mr²)	a (m/s²)	t sur 1 m (s)
Sphère pleine	0.4	1.22	1.28
Cylindre plein	0.5	1.14	1.33
Anneau	1.0	0.852	1.53

Valeurs calculées pour θ = 10° et un roulement sans glissement ; une boîte de soupe pleine ne se comporte qu'approximativement comme un cylindre plein car le liquide peut ballotter.

Exemple de calcul

1. Sphère : a = 9.81 sin 10°/1.4 = 1.22 m/s² ; t = √(2/1.22) = 1.28 s.
2. Anneau : a = 9.81 sin 10°/2 = 0.852 m/s² ; t = 1.53 s.
3. La masse et le rayon s'annulent : seul le facteur de forme compte.

> **Sécurité**
>
> - Rattrapez les objets en bas ; ne mettez pas les doigts sous les boîtes lourdes.

Alternative à la maison ou virtuelle

- Tout ce labo se fait à la maison.

PhET: Torque (https://phet.colorado.edu/en/simulations/torque)

Lien avec la planète : La répartition de la masse d'un rotor change la vitesse à laquelle il prend de la vitesse, ce qui compte pour les éoliennes et les turbines hydrauliques. U.S. DOE: Types of hydropower turbines (https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-turbines)

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

TP E : Période d’un pendule et g

SEMAINE 13

Objectif : Mesurez la période d’un pendule simple pour plusieurs longueurs et déduisez g d’un ajustement.

$$T = 2\pi\sqrt{L/g} \;\Rightarrow\; T^2 = \frac{4\pi^2}{g}L$$

T=2π/g\ \ T^2=(4π^2)/(g)L

Tracez T² en fonction de L

Mode opératoire

1. Attachez un petit poids à une ficelle et suspendez-le à un encadrement de porte. Réglez L (jusqu’au centre du poids) à 0.25, 0.50 et 1.00 m.
2. Écartez-le d’environ 10° et chronométrez 10 oscillations ; divisez par 10.
3. Tracez T² en fonction de L et ajustez une droite passant par l’origine ; g = 4π²/pente.
4. Vérifiez dans PhET Pendulum Lab que la masse ne change pas la période.

Tableau de données

L (m)	T (s)
0.25	1.003
0.50	1.419
1.00	2.006

Valeurs calculées pour g = 9.81 m/s² ; formule des petits angles.

Exemple de calcul

1. T²/L = 4.024 s²/m sur chaque ligne, donc g = 4π²/4.024 = 9.81 m/s².
2. Quadrupler L double T.

> **Sécurité**
>
> - Utilisez un poids léger et gardez le balancement loin des visages.

Alternative à la maison ou virtuelle

- Tout ce labo se fait à la maison.

PhET : Pendulum Lab (https://phet.colorado.edu/en/simulations/pendulum-lab)

Lien avec la planète : Chaque bâtiment a aussi une période propre ; la faire coïncider avec les secousses du sol est ce qui rend les séismes dangereux. IRIS/EarthScope: Building resonance (https://www.iris.edu/hq/inclass/animation/224)

- [ ] **J’ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP F : Vibration masse-ressort et amortissement

SEMAINE 14

Objectif : Mesurez la fréquence propre en fonction de la masse et estimez le taux d'amortissement à partir des pics décroissants.

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{k/m}, \quad \zeta \approx \frac{\ln(x_1/x_2)}{2\pi}$$

`f=(1)/(2π)/m, ≈((x_1/x_2))/(2π)`

Fréquence propre et décrément logarithmique

Mode opératoire

1. Dans PhET Masses and Springs, réglez un ressort de 10 N/m et suspendez 100, 200 et 400 g ; chronométrez 10 oscillations pour chacune.
2. Activez l'amortissement, lâchez, et relevez trois hauteurs de pic successives sur la règle.
3. À la maison : suspendez un sachet de pièces à un élastique ou un ressort souple et recommencez avec le chronomètre d'un téléphone.
4. Tracez f en fonction de 1/√m.

Tableau de données

m (kg)	f (Hz) pour k = 10 N/m
0.1	1.592
0.2	1.125
0.4	0.796

Valeurs calculées avec la formule ; des pics d'amortissement d'exemple de 10, 8 et 6.4 cm sont utilisés ci-dessous.

Exemple de calcul

1. Quadrupler m divise f par deux : 1.592 → 0.796 Hz.
2. Pics 10 → 8 → 6.4 cm : δ = ln 1.25 = 0.223, ζ ≈ 0.0355.
3. Avec ζ = 0.0355, l'amplification à la résonance serait 1/(2ζ) = 14.1.

> **Sécurité**
>
> - Les élastiques peuvent casser ; portez des lunettes et gardez une petite masse.

Alternative à la maison ou virtuelle

- L’étape avec l’élastique est la version à la maison.

PhET : Masses and Springs (https://phet.colorado.edu/en/simulations/masses-and-springs)

Lien avec la planète : Les mesures de l’USGS montrent que les immeubles de grande hauteur ont peu d’amortissement, d’où l’ajout d’amortisseurs par les ingénieurs pour réduire le mouvement de résonance. USGS: Natural periods and damping of tall buildings (Çelebi, 2022) (https://www.usgs.gov/publications/preliminary-study-correlation-natural-periods-and-damping-percentages-tall-buildings)

☐ **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’exercices de mi-parcours (unités 1–5)

1. Une voiture accélère depuis le repos à 2.5 m/s² jusqu’à 30 m/s. Trouvez le temps et la distance.

    1. $t = v/a$; $x = v^2/(2a)$.

    Réponse : 12 s; 180 m.

2. Une balle est lancée à 25 m/s et 40° au-dessus d’un sol horizontal. Trouvez la portée.

    1. $R = v_0^2 \sin 80°/g$.

    Réponse : 62.7 m.

3. Un bloc de 5 kg est tiré avec 40 N sur un sol avec $\mu_k = 0.2$. Trouvez son accélération.

    1. $a = (40 - 0.2 \times 49.05)/5$.

    Réponse : 6.04 m/s².

4. Une masse de 1 kg tombe de 5 m sur un ressort (k = 2000 N/m). Trouvez la compression maximale.

    1. $mg(5 + x) = \frac{1}{2}kx^2$, donc $1000x^2 - 9.81x - 49.05 = 0$.

    Réponse : 0.226 m.

5. Une balle de 0.06 kg à 50 m/s est arrêtée en 0.005 s. Trouvez la force moyenne.

    1. $F = m\Delta v/\Delta t$.

    Réponse : 600 N.

Série d’entraînement finale (toutes les unités)

1. Un étage avec v_e = 2800 m/s a $m_0/m_f = 3$. Trouvez le Δv idéal.
    1. $\Delta v = v_e \ln 3$.

    Réponse : 3,076 m/s.

2. Une roue de rayon 0.4 m roule sans glisser à 20 m/s. Trouvez ω.
    1. $\omega = v/r$.

    Réponse : 50 rad/s.

3. Un disque plein de 4 kg et de rayon 0.25 m subit un couple de 2 N·m. Trouvez α.
    1. $I = \tfrac{1}{2}mr^2 = 0.125$ kg·m².

    Réponse : 16 rad/s².

4. Un anneau roule sans glisser depuis le repos en descendant d'une hauteur de 1.5 m. Trouvez sa vitesse.
    1. $mgh = mv^2$ pour un anneau, $v = \sqrt{gh}$.

    Réponse : 3.84 m/s.

5. Une masse de 5 kg sur un ressort avec k = 1250 N/m. Trouvez ω_n et f.
    1. $\omega_n = \sqrt{k/m}$.

    Réponse : 15.8 rad/s ; 2.52 Hz.

6. Trouvez l'amplification à la résonance pour $\zeta = 0.05$.
    1. $1/(2\zeta)$.

    Réponse : 10.

Fiche de formules

$$v = dx/dt,\ a = dv/dt,\ a\,dx = v\,dv \qquad v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x$$

$$R = v_0^2 \sin 2\theta / g \qquad a_n = v^2/\rho,\ a_t = \dot{v}$$

$$a_r = \ddot{r} - r\dot{\theta}^2,\ a_\theta = r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta} \qquad \sum \vec{F} = m\vec{a}$$

$$T_1 + \sum U = T_2,\ P = \vec{F} \cdot \vec{v}$$

$$m\vec{v}_1 + \int \vec{F} dt = m\vec{v}_2,\ e = (v_2' - v_1')/(v_1 - v_2)$$

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

$$v = r\omega,\ a_t = r\alpha,\ a_n = r\omega^2$$

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{\omega} \times \vec{r}_{B/A}$$

$$\sum M_G = I_G\alpha,\ I = I_G + md^2$$

$$T = \tfrac{1}{2}mv_G^2 + \tfrac{1}{2}I_G\omega^2,\ P = M\omega$$

$$\omega_n = \sqrt{k/m},\ \zeta = c/(2\sqrt{km})$$

$$X = (F_0/k)/\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}$$

Constantes

Constante	Valeur
Accélération normale de la pesanteur, g	9.80665 m/s² (nous utilisons 9.81 m/s²)
Paramètre gravitationnel terrestre, GM (arrondi)	3.986 × 10¹⁴ m³/s²
Rayon terrestre moyen (arrondi)	6371 km
1 tour par minute	2π/60 = 0.1047 rad/s
1 kilowattheure	3.6 × 10⁶ J
1 mile	1.609 km

Source : NIST: Standard acceleration of gravity (https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?gn)

Textes et simulations gratuits

Utilisez ces manuels, cours et simulations gratuits en parallèle du cours.

- OpenStax University Physics Volume 1 (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/3-1-position-displacement-and-average-velocity): Manuel gratuit pour la partie physique du cours.
- MIT OpenCourseWare 2.003SC Engineering Dynamics (https://ocw.mit.edu/courses/2-003sc-engineering-dynamics-fall-2011/): Cours, séries de problèmes et examens du MIT, gratuits.
- MIT OpenCourseWare 8.01SC Classical Mechanics (en anglais) (https://ocw.mit.edu/courses/8-01sc-classical-mechanics-fall-2016/): Cours de mécanique gratuits du MIT.
- PhET : Projectile Motion (https://phet.colorado.edu/en/simulations/projectile-motion): Trajectoires.
- PhET : Collision Lab (https://phet.colorado.edu/en/simulations/collision-lab): Quantité de mouvement et chocs.
- PhET : Masses and Springs (https://phet.colorado.edu/en/simulations/masses-and-springs): Vibrations et amortissement.

Glossaire

Moment cinétique
H = r × mv pour une particule ; I_Gω pour un solide en mouvement plan.

Coefficient de restitution
Rapport entre la vitesse de séparation et la vitesse d'approche lors d'un choc.

Accélération de Coriolis
Terme 2ṙθ̇ en coordonnées polaires.

Taux d'amortissement
ζ = c/(2√(km)) ; 1 correspond au cas critique.

Impulsion
Intégrale de la force par rapport au temps.

Centre instantané de rotation
Point d'un corps de vitesse nulle à un instant donné.

Diagramme cinétique
Schéma montrant ma_G et I_Gα.

Décrément logarithmique
ln du rapport de pics successifs.

Moment d'inertie de masse
$I = \int r^2 \, dm$.

Pulsation propre
Fréquence de la vibration libre, √(k/m).

Accélération normale
v^2/ρ, dirigée vers le centre de courbure.

Puissance
Taux de travail fourni, F·v ou Mω.

Projectile
Corps en mouvement sous la seule gravité.

Résonance
Forte réponse quand l'excitation coïncide avec une fréquence propre.

Équation de la fusée
$\Delta v = v_e \ln(m_0/m_f)$.

Roulement sans glissement
v_G = rω ; point de contact immobile.

Accélération tangentielle
dv/dt le long de la trajectoire.

Théorème de l'énergie cinétique
$T_1 + \Sigma U = T_2$.

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	Choisit les coordonnées et la meilleure méthode (forces, énergie ou quantité de mouvement), trace les diagrammes du corps libre et cinétiques, et vérifie les unités et les cas limites.
3 · Compétent	Résout les exercices avec quelques erreurs de signe ou d’unité.
2 · En progression	Suit les exemples résolus mais confond les méthodes ou oublie les termes de rotation.
1 · Débutant	Remplace les nombres dans les formules sans diagrammes ; doit revoir l’unité.

Pondération suggérée si vous voulez une note

Partie	Poids
Exercices	25%
Travaux pratiques	20%
Série d’entraînement de mi-parcours	25%
Série d’entraînement finale	30%

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

Cours associés

- Statique ENGR 211
- Résistance des matériaux ENGR 213
- Analyse III MATH 210
- Tous les cours