

Physique 1 — Mécanique

Recueil d'exercices

203-20B-QM

Institut Maritime du Québec

Hiver 2026

Table des matières

0	Notions fondamentales	5
	Exercices	5
1	Cinématique	11
	Exercices	11
2	Dynamique et statique	29
	Exercices	29
3	Énergie, travail et quantité de mouvement	39
	Exercices	39

Chapitre 0

Notions fondamentales

Exercices

Niveaux de difficulté

- ★ Application directe d'une formule
- ★★ Problème à plusieurs étapes ou avec conversion
- ★★★ Problème complexe ou piège conceptuel

Questions conceptuelles

- ★ 1. Énumérez les éléments qui doivent absolument faire partie d'une réponse complète.
- ★ 2. Énumérez les unités de base du SI qui seront utilisées dans le cours Physique 1.
- ★ 3. Quelle est la seule unité de base du SI à avoir un préfixe ?
- ★ 4. Pourquoi utilise-t-on les valeurs absolues des composantes pour calculer l'angle de référence d'un vecteur ?
- ★ 5. Comment détermine-t-on dans quel quadrant se trouve un vecteur à partir de ses composantes ?
- ★ 6. Comment s'assure-t-on qu'une équation est homogène ?
- ★ 7. Comment établit-on le nombre de chiffres à conserver pour la multiplication et la division ?
- ★ 8. Comment établit-on le nombre de chiffres à conserver pour l'addition et la soustraction ?
- ★ 9. À quoi doit-on penser lorsqu'on utilise la fonction arc tangente avec sa calculatrice ?
- ★ 10. Pourquoi ne peut-on pas simplement additionner les modules de deux vecteurs pour obtenir le module de la résultante ?

Conversions

- ★ 11. Convertir $l = 65 \text{ cm}$ en m Rép. : $l = 0,65 \text{ m}$
- ★ 12. Convertir $t = 1,25 \text{ h}$ en min Rép. : $t = 75,0 \text{ min}$
- ★ 13. Convertir $P = 165 \text{ lb}$ en kg Rép. : $P = 75,0 \text{ kg}$
- ★ 14. Convertir $A = 24,7 \text{ cm}^2$ en m^2 Rép. : $A = 24,7 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
- ★ 15. Convertir $V = 355 \text{ mL}$ en m^3 Rép. : $V = 355 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
- ★ 16. Convertir $t = 1,5 \text{ années}$ en secondes Rép. : $t = 4,7 \times 10^7 \text{ s}$
- ★ 17. Convertir $p = 550 \frac{\text{lb}\cdot\text{pi}}{\text{s}}$ en $\frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{s}}$ Rép. : $p = 76,0 \frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{s}}$
- ★ 18. Convertir $I = 101,4 \text{ po}^4$ en mm^4 Rép. : $I = 42,21 \times 10^6 \text{ mm}^4$
- ★ 19. Convertir $p = 32,0 \text{ psi}$ en kPa Rép. : $p = 221 \text{ kPa}$
- ★★ 20. Sachant que $G = 6,673 \times 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}\cdot\text{s}^2}$, $M = 5,972 \times 10^{21} \text{ t}$ et que $R = 6374 \text{ km}$, déterminez la valeur de $g = \frac{GM}{R^2}$ en m/s^2 . Rép. : $g = 9,809 \text{ m/s}^2$

Chiffres significatifs

- ★ 21. Combien y a-t-il de chiffres significatifs dans les valeurs suivantes : $A = 0,1252$; $B = 7,120$; $C = 3,726 \times 10^2$; $D = 155,1$; $E = 0,0000230$; $F = 4200$; $G = \pi$; $H = \frac{1}{4}$?

Pour les exercices 22 à 25, réécrivez chaque valeur avec **3 chiffres significatifs** en utilisant le **préfixe SI approprié** (pas de notation scientifique). Respectez la règle : pas plus de 2 zéros après la virgule.

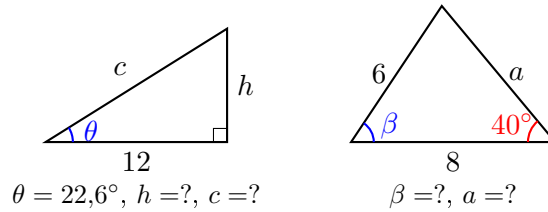
- ★ 22. $d = 0,000\,045\,20 \text{ m}$ Rép. : $d = 45,2 \mu\text{m}$
- ★ 23. $m = 7\,841\,000 \text{ g}$ Rép. : $m = 7,84 \text{ t}$ (ou $7,84 \text{ Mg}$)
- ★ 24. $t = 0,000\,009\,25 \text{ s}$ Rép. : $t = 9,25 \mu\text{s}$
- ★ 25. $P = 34\,720\,000 \text{ W}$ Rép. : $P = 34,7 \text{ MW}$

Pour les exercices suivants, donnez la réponse avec 3 C.S. en utilisant le préfixe SI approprié ou la notation scientifique.

- ★★ 26. Calculer $F = ma$ avec $m = 12,45 \text{ kg}$ et $a = 3,7 \text{ m/s}^2$. Rép. : $F = 46,1 \text{ N}$
- ★★ 27. Calculer $v = \sqrt{2gh}$ avec $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ et $h = 4,25 \text{ m}$. Rép. : $v = 9,13 \text{ m/s}$
- ★★ 28. Calculer $E = \frac{1}{2}mv^2$ avec $m = 0,0025 \text{ kg}$ et $v = 340 \text{ m/s}$. Rép. : $E = 144 \text{ J}$
- ★★ 29. Calculer $P = \frac{F}{A}$ avec $F = 2500 \text{ N}$ et $A = 0,0012 \text{ m}^2$. Rép. : $P = 2,08 \text{ MPa}$ ou $2,08 \times 10^6 \text{ Pa}$

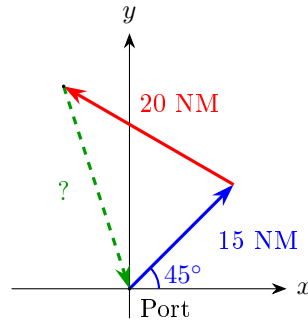
Trigonométrie

- ★★ 30. Pour chacun des triangles suivants, déterminez les valeurs manquantes en utilisant la méthode la plus efficace.



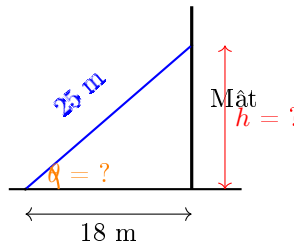
Rép. : $h = 5,00, c = 13,0 ; \beta = 29,5^\circ, a = 5,15$

- ★★ 31. Un navire quitte le port et navigue 15 NM à 45° par rapport à l'axe des x , puis 20 NM à 150° par rapport à l'axe des x . Quelle est la distance et l'angle pour revenir directement au port ?



Rép. : Distance = 21,7 NM, Angle = 288°

- ★★ 32. Un câble de 25 m de long est ancré au sol à 18 m de la base d'un mât. Quel angle le câble fait-il avec le sol ? Quelle est la hauteur du point d'attache sur le mât ?



Rép. : $\theta = 43,9^\circ, h = 17,3 \text{ m}$

Vecteurs

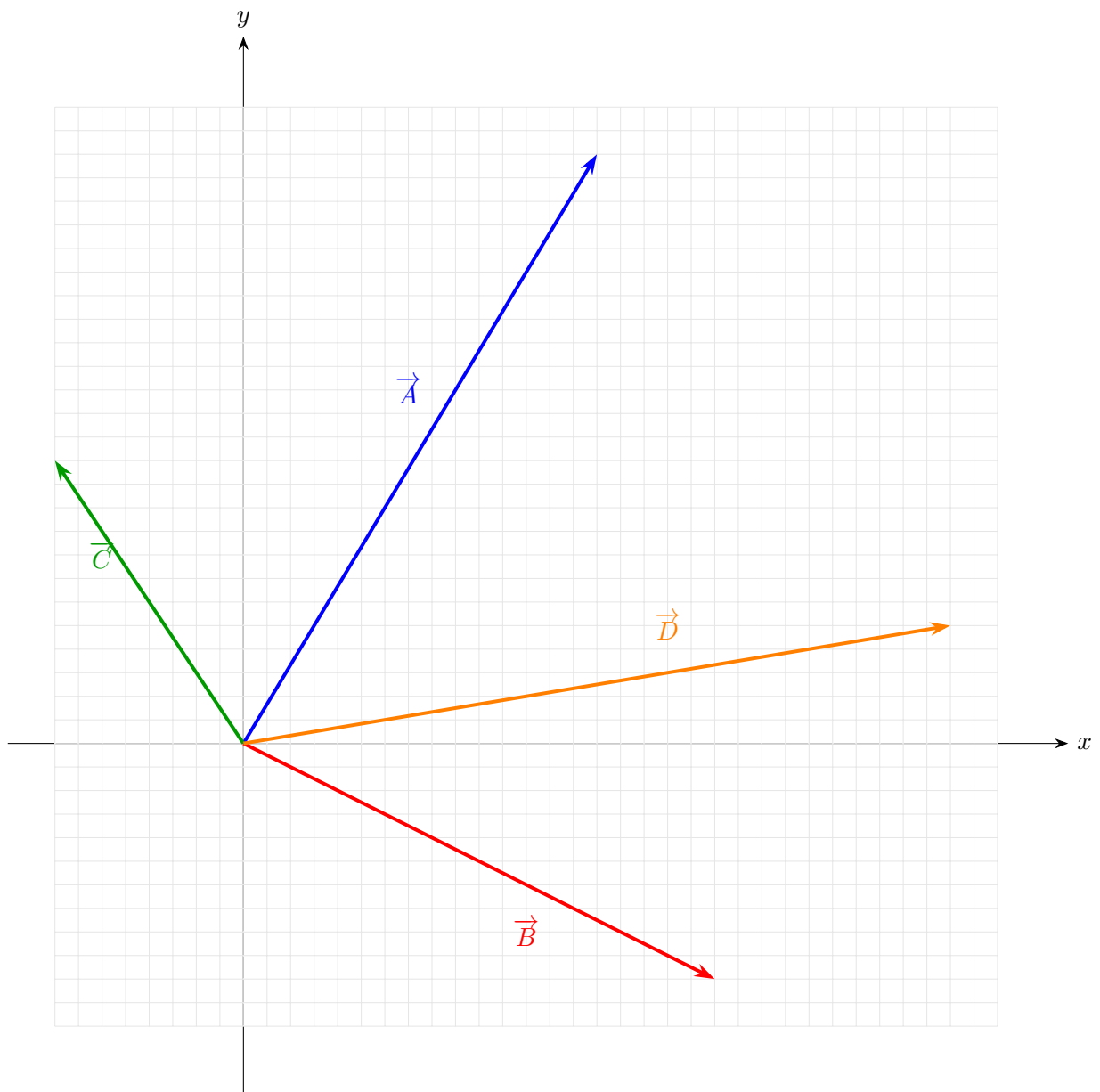
- ★ 33. Pour chacune des grandeurs suivantes, indiquez s'il s'agit d'un scalaire ou d'un vecteur : la vitesse, la température, la pression, le déplacement, le volume, la vitesse du vent, l'accélération, la force, l'énergie.
- ★ 34. Dans la méthode par composantes, que représentent les résultantes R_x et R_y ?

Opérations vectorielles

Les vecteurs suivants sont utilisés pour les exercices ci-dessous.

Pour chaque exercice :

- Dessinez les vecteurs sur un plan cartésien
- Donnez la réponse **en composantes** (R_x, R_y)
- Donnez la réponse **en module et orientation** $\|\vec{R}\| \angle \theta$



$$\vec{A} = 29,2 \angle 59,0^\circ \quad \vec{B} = 22,4 \angle -26,6^\circ \quad \vec{C} = 14,4 \angle 124^\circ \quad \vec{D} = 30,4 \angle 9,46^\circ$$

★★ 35. Résoudre $\vec{R} = \vec{A} + \vec{B}$.

Rép. : $\vec{R} = (35, 15) = 38,1 \angle 23,2^\circ$

★★ 36. Résoudre $\vec{R} = \vec{B} + \vec{C}$.

Rép. : $\vec{R} = (12, 2) = 12,2 \angle 9,46^\circ$

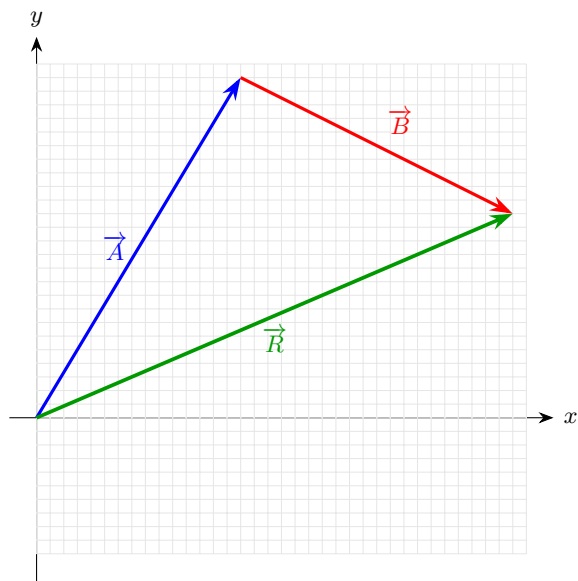
★★ 37. Résoudre $\vec{R} = \vec{A} - \vec{B}$.

Rép. : $\vec{R} = (-5, 35) = 35,4 \angle 98,1^\circ$

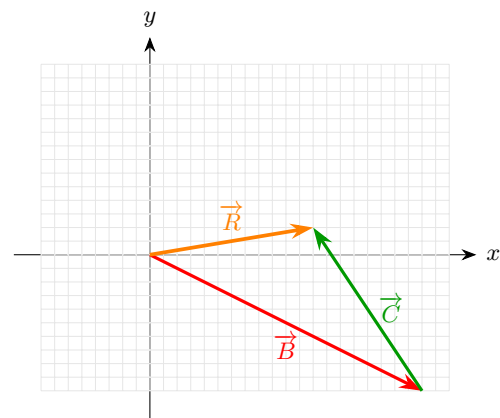
★★ 38. Résoudre $\vec{R} = \vec{A} + \vec{B} + \vec{C} + \vec{D}$.

Rép. : $\vec{R} = (57, 32) = 65,4 \angle 29,3^\circ$

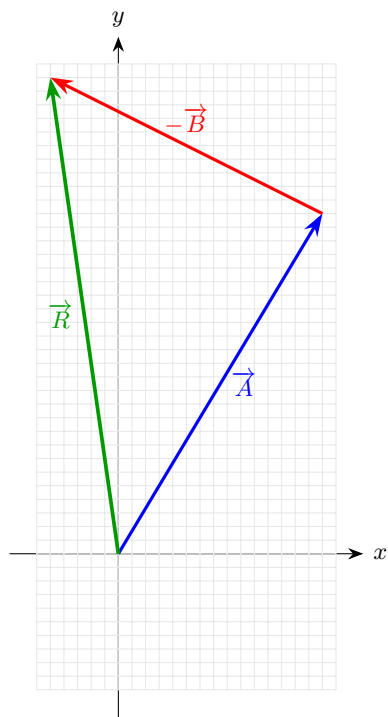
Solutions graphiques des opérations vectorielles



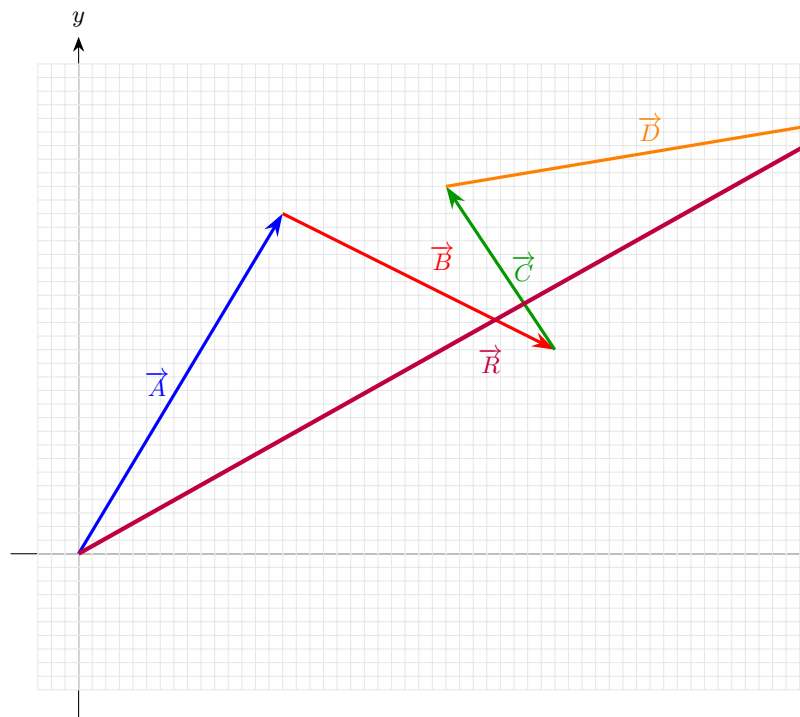
$$\vec{R} = \vec{A} + \vec{B}$$



$$\vec{R} = \vec{B} + \vec{C}$$



$$\vec{R} = \vec{A} - \vec{B}$$



$$\vec{R} = \vec{A} + \vec{B} + \vec{C} + \vec{D}$$

Chapitre 1

Cinématique

Exercices

Niveaux de difficulté

- ★ Application directe d'une formule
- ★★ Problème à plusieurs étapes ou avec conversion
- ★★★ Problème complexe ou piège conceptuel

Position et déplacement

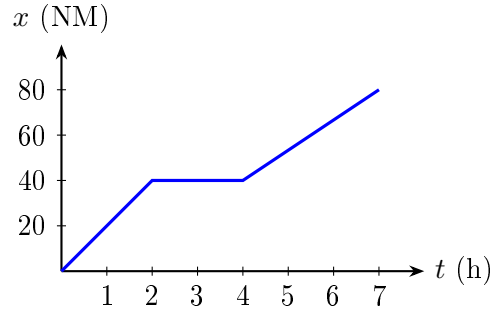
- ★ 1. Un navire-citerne part du terminal A (position $x = 0$), se rend au terminal B situé à 15 km à l'est, puis revient au terminal C situé à 8 km à l'est de A.
 - a) Quelle est la distance totale parcourue?
 - b) Quel est le déplacement du navire?
- ★ 2. Un remorqueur effectue les déplacements suivants dans un port : 200 m vers l'est, 150 m vers l'ouest, puis 300 m vers l'est. Calculez la distance parcourue et le déplacement net.
- ★★ 3. Un patrouilleur part de sa base, navigue 12 km vers l'est puis 5 km vers le nord.
 - a) Quelle est la distance totale parcourue?
 - b) Quel est le module du déplacement? (Utilisez le théorème de Pythagore)
- ★★★ 4. **Vrai ou faux?** Justifiez chaque réponse.
 - a) Le déplacement est toujours inférieur ou égal à la distance parcourue.
 - b) Si un navire revient à son point de départ, sa vitesse moyenne est nulle mais sa vitesse scalaire moyenne ne l'est pas.
 - c) Le déplacement dépend du trajet emprunté.

Vitesse moyenne et scalaire

- ★ 5. Un traversier effectue la traversée Rimouski–Forestville (25 km) en 55 min. Calculez sa vitesse moyenne en km/h, en m/s et en nœuds.
- ★ 6. Un cargo parcourt 450 millesnautiques en 30 heures. Quelle est sa vitesse moyenne en nœuds et en m/s?
- ★★ 7. Un patrouilleur des garde-côtes part de sa base, parcourt 40 NM vers le nord à 20 nuds, puis revient à sa base à 15 nuds.
 - a) Quel est le temps total de la patrouille?
 - b) Quelle est la vitesse moyenne sur l'ensemble du trajet?
 - c) Quelle est la vitesse scalaire moyenne?
- ★★ 8. Un vraquier effectue un trajet de 1200 NM. Il navigue à 12 nuds pendant les 20 premières heures, puis à 15 nuds pour le reste du trajet. Quelle est sa vitesse scalaire moyenne?
- ★★★ 9. **Question piège!** Un navire parcourt la *première moitié* d'un trajet à 10 nuds et la *seconde moitié* à 20 nuds.
 - a) Quelle est sa vitesse scalaire moyenne?
 - b) Expliquez pourquoi ce n'est **pas** 15 nuds.
- ★★★ 10. Un autre navire parcourt la *première moitié du temps* à 10 nuds et la *seconde moitié du temps* à 20 nuds. Quelle est sa vitesse scalaire moyenne? Comparez avec l'exercice précédent.
- ★★ 11. Deux trains partent simultanément de gares situées à 200 km l'une de l'autre et roulent l'un vers l'autre. Le train A roule à 90 km/h et le train B à 110 km/h.
 - a) Après combien de temps se croiseront-ils?
 - b) À quelle distance de la gare de A se trouvera le point de rencontre?
- ★★ 12. Une voiture quitte Montréal à 8h00 et roule vers Québec à 100 km/h. Une autre voiture quitte Québec à 9h00 et roule vers Montréal à 110 km/h. Les deux villes sont séparées de 250 km.
 - a) À quelle heure les deux voitures se croisent-elles?
 - b) À quelle distance de Montréal se trouvent-elles à ce moment?
- ★★ 13. Un cycliste roule vers le nord à 25 km/h. Un coureur, situé 500 m au nord du cycliste, court dans la même direction à 12 km/h.
 - a) Après combien de temps le cycliste rattrape-t-il le coureur?
 - b) Quelle distance chacun a-t-il parcourue?

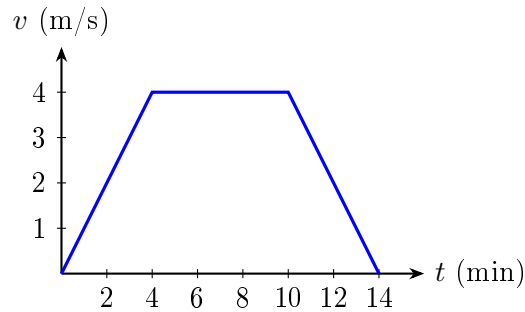
Graphiques

- ★★ 14. Le graphique suivant montre la position d'un navire en fonction du temps :



- Décrivez qualitativement le mouvement du navire.
- Calculez la vitesse entre $t = 0$ et $t = 2$ h.
- Le navire est-il à l'arrêt à un certain moment? Si oui, quand?
- Quelle est la vitesse moyenne sur l'ensemble du trajet (0 à 7 h)?

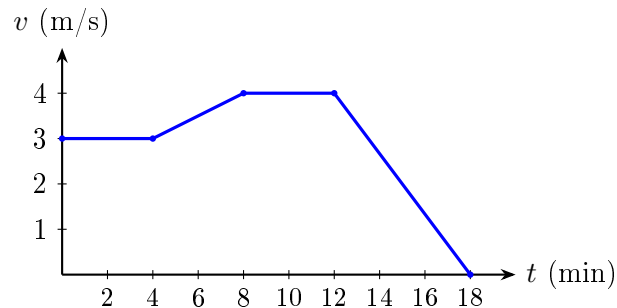
★★ 15. Le graphique suivant montre la vitesse d'un cargo en fonction du temps :



- Calculez l'accélération pendant les 4 premières minutes.
- Pendant quelle phase le navire est-il en MRU?
- Calculez la distance totale parcourue (aire sous la courbe).

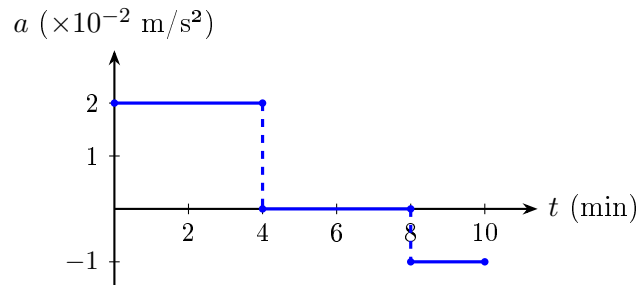
★★★ 16. **Expliquez** pourquoi, sur un graphique position-temps $x(t)$, une pente négative signifie que l'objet se déplace dans le sens négatif, et non pas qu'il recule nécessairement.

★★ 17. Un navire-citerne effectue une manœuvre d'approche. Le graphique suivant montre sa vitesse en fonction du temps :



- Décrivez qualitativement les différentes phases du mouvement.
- Calculez l'accélération pendant la phase d'accélération (entre $t = 4$ et $t = 8$ min).
- Calculez l'accélération pendant la phase de freinage.
- Calculez la distance totale parcourue pendant toute la manœuvre (aire sous la courbe).
- Tracez** le graphique $a(t)$ correspondant à ce mouvement.

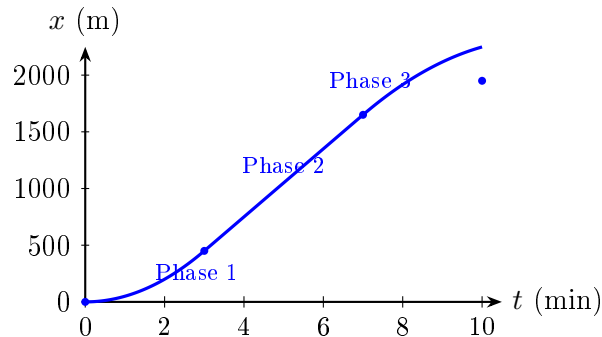
*** 18. Un cargo quitte le port de Montréal. Voici le graphique de son accélération en fonction du temps pendant les 10 premières minutes :



Le cargo part du repos ($v_0 = 0$).

- Calculez la vitesse du cargo à $t = 4$ min.
- Calculez la vitesse du cargo à $t = 8$ min.
- Calculez la vitesse du cargo à $t = 10$ min.
- Tracez** le graphique $v(t)$ correspondant.

*** 19. Un traversier effectue la traversée entre deux quais. Voici le graphique de sa position en fonction du temps :



- Identifiez les trois phases du mouvement (accélération, vitesse constante, freinage).
- Estimez graphiquement la vitesse maximale atteinte (pente de la partie linéaire).
- Le traversier est-il à l'arrêt au début et à la fin? Justifiez par la forme de la courbe.
- Tracez** le graphique $v(t)$ correspondant à ce mouvement.

Accélération et MRUA

- ★ **20.** Un porte-conteneurs passe de 5 nuds à 18 nuds en 12 min. Calculez son accélération moyenne en m/s^2 .
- ★ **21.** Un TGV roulant à 320 km/h freine et s'arrête en 4 min. Quelle est sa décélération moyenne en m/s^2 ?
- ★★ **22.** Un traversier part du repos et accélère à $0,08 \text{ m/s}^2$ jusqu'à atteindre 12 nuds.
 - a) Combien de temps dure la phase d'accélération?
 - b) Quelle distance parcourt-il pendant cette phase?
- ★★ **23.** Un cargo navigue à 15 nuds. Le capitaine ordonne le freinage avec $a = -0,006 \text{ m/s}^2$.
 - a) Quelle est la distance de freinage?
 - b) Combien de temps faut-il pour s'arrêter?
- ★★ **24.** Une voiture roule à 90 km/h et freine avec $a = -8 \text{ m/s}^2$. Calculez sa distance de freinage. Comparez avec un cargo à la même vitesse qui freine avec $a = -0,006 \text{ m/s}^2$.
- ★★★ **25.** Un navire doit s'arrêter exactement à un quai situé à 800 m. Il arrive à 8 nuds.
 - a) Quelle décélération constante doit-il appliquer?
 - b) Combien de temps dure la manœuvre?
 - c) Si le capitaine applique plutôt $a = -0,015 \text{ m/s}^2$, à quelle distance du quai le navire s'arrêtera-t-il?
- ★★★ **26. Vrai ou faux? Justifiez.**
 - a) Si l'accélération est négative, l'objet ralentit toujours.
 - b) Un objet peut avoir une vitesse nulle et une accélération non nulle.
 - c) Si la vitesse et l'accélération ont le même signe, l'objet accélère.
- ★★★ **27.** Deux navires se trouvent à 3 km l'un de l'autre et naviguent l'un vers l'autre. Le navire A voyage à vitesse constante de 8 nuds tandis que le navire B part du repos et accélère à $0,01 \text{ m/s}^2$.
 - a) Écrivez les équations de position des deux navires (origine au point de départ de A, positif vers B).
 - b) Après combien de temps les navires se rencontrent-ils?
 - c) À quelle distance du point de départ de A se trouvent-ils?
 - d) Quelle est la vitesse de B au moment de la rencontre?

Chute libre

- ★ **28.** Un matelot échappe un outil du haut d'un mât situé à 18 m au-dessus du pont.
 - a) Combien de temps l'outil met-il pour atteindre le pont?

- b) À quelle vitesse frappe-t-il le pont?
- ★ **29.** Un ouvrier sur un échafaudage à 25 m de hauteur laisse tomber un boulon.
- a) Combien de temps le boulon met-il pour atteindre le sol?
- b) À quelle vitesse frappe-t-il le sol?
- ★★ **30.** Un marin sur un pont à 8 m au-dessus de l'eau lance une bouée de sauvetage verticalement vers le bas avec une vitesse initiale de 3 m/s.
- a) Combien de temps la bouée met-elle pour atteindre l'eau?
- b) À quelle vitesse entre-t-elle dans l'eau?
- ★★ **31.** Une fusée éclairante est lancée verticalement vers le haut depuis le pont d'un navire ($y_0 = 5$ m) avec une vitesse de 25 m/s.
- a) Quelle hauteur maximale atteint-elle au-dessus de l'eau?
- b) Combien de temps reste-t-elle en l'air avant de retomber à l'eau ($y = 0$)?
- ★★ **32.** Un joueur de basketball lance un ballon verticalement vers le haut à 8 m/s depuis une hauteur de 2 m.
- a) Quelle hauteur maximale le ballon atteint-il?
- b) Combien de temps le ballon reste-t-il en l'air avant de toucher le sol?
- ★★★ **33. Question contre-intuitive.** Un marin sur un mât laisse tomber une balle A. Au même instant, un autre marin au sol lance une balle B verticalement vers le haut. Les deux balles se croisent à mi-hauteur.
- Laquelle des deux balles a la plus grande vitesse au moment où elles se croisent? *Justifiez sans calcul.*

Mouvement en 2D et projectile

- ★ **34.** Un navire navigue à 18 nuds avec un cap de 40° nord de l'est.
- a) Quelle est la composante est-ouest de sa vitesse?
- b) Quelle est la composante nord-sud de sa vitesse?
- ★★ **35.** Un lance-amarre projette une ligne à 25 m/s avec un angle de 40° depuis une hauteur de 6 m.
- a) Calculez les composantes v_{0x} et v_{0y} .
- b) Quelle est la portée horizontale?
- ★★ **36.** Un joueur de baseball frappe une balle à 35 m/s avec un angle de 30° au-dessus de l'horizontale, depuis une hauteur de 1 m.
- a) Quelle est la hauteur maximale atteinte par la balle?
- b) Quelle est la portée horizontale?

-
- ★★ 37. Un conteneur tombe d'une grue qui se déplace horizontalement à 2 m/s. Le conteneur est à 15 m de hauteur. À quelle distance horizontale (par rapport au point directement sous le largage) le conteneur touche-t-il le sol?
- ★★★ 38. Une fusée éclairante est lancée à 40 m/s avec un angle de 60° depuis le niveau de l'eau.
- a) Quelle hauteur maximale atteint-elle?
 - b) Quelle est sa portée horizontale?
 - c) À quel angle faudrait-il la lancer pour maximiser la portée? (Sans calcul)
- ★★★ 39. Expliquez pourquoi un objet lancé horizontalement et un objet lâché au même instant depuis la même hauteur touchent le sol en même temps.

Cinématique de rotation

- ★ 40. Convertissez : a) 270 en radians b) $\frac{3\pi}{4}$ rad en degrés c) 90 RPM en rad/s
- ★ 41. Une hélice de navire tourne à 150 RPM. Si le rayon de l'hélice est de 2 m, quelle est la vitesse linéaire en bout de pale (en m/s et km/h)?
- ★★ 42. Un treuil de rayon 15 cm doit enrouler 8 m de câble.
- a) Combien de tours doit-il effectuer?
 - b) S'il tourne à 25 RPM, combien de temps faut-il?
- ★★ 43. L'hélice d'un navire passe de 0 RPM à 120 RPM en 20 s avec une accélération angulaire constante.
- a) Quelle est l'accélération angulaire en rad/s²?
 - b) Combien de tours l'hélice effectue-t-elle pendant cette phase?
- ★★ 44. Les roues d'une voiture (rayon 30 cm) tournent à 800 RPM lorsque la voiture roule à vitesse constante. Le conducteur freine et la voiture s'arrête après 50 m.
- a) Quelle était la vitesse de la voiture?
 - b) Quelle est la décélération angulaire des roues?
 - c) Combien de tours les roues effectuent-elles pendant le freinage?
- ★★★ 45. Un cabestan de rayon 20 cm tourne à 45 RPM. On applique les freins et il s'arrête après 8 tours.
- a) Quelle est la décélération angulaire?
 - b) Quelle longueur de câble a été halée pendant le freinage?
 - c) Combien de temps a duré le freinage?

Problèmes de synthèse

Ces problèmes intègrent plusieurs concepts du chapitre. Ils sont représentatifs du niveau attendu lors des évaluations.

S1. Manœuvre d'accostage

Un cargo de haute mer arrive au port de Montréal. À 2 km du quai, il navigue à 10 nuds. Le pilote du port ordonne une première phase de freinage avec $a_1 = -0,005 \text{ m/s}^2$ jusqu'à atteindre 3 nuds, puis une seconde phase avec $a_2 = -0,008 \text{ m/s}^2$ jusqu'à l'arrêt complet.

- Quelle distance parcourt le navire pendant la première phase?
- Quelle distance parcourt-il pendant la seconde phase?
- Le navire s'arrête-t-il avant le quai? Si non, à quelle distance du quai aurait-il dû commencer à freiner?

S2. Homme à la mer

Un marin tombe d'un navire qui se déplace à 14 nuds. L'équipage met 45 s avant de réagir (temps de réaction), puis le navire freine avec une décélération de $0,15 \text{ m/s}^2$ jusqu'à l'arrêt.

- Quelle distance le navire parcourt-il pendant le temps de réaction?
- Quelle distance parcourt-il pendant le freinage?
- À quelle distance totale du point de chute le navire s'arrête-t-il?
- Si le marin dérive à 1 nud dans le sens opposé au navire, à quelle distance du navire se trouve-t-il quand celui-ci s'arrête?

S3. Sauvetage hélicoptéré

Un hélicoptère de la Garde côtière vole horizontalement vers l'est à 90 km/h à une altitude de 40 m au-dessus de l'eau. Il doit larguer une bouée de sauvetage pour qu'elle tombe exactement sur un naufragé.

- À quelle distance horizontale **avant** le naufragé l'hélicoptère doit-il larguer la bouée?
- Avec quelle vitesse (module et direction) la bouée touche-t-elle l'eau?
- Si le naufragé dérive vers l'est à 2 m/s (même direction que l'hélicoptère), comment cela modifie-t-il la distance de largage?
- L'hélicoptère décide plutôt de lancer la bouée vers le bas avec une vitesse initiale de 5 m/s. Recalculez la distance de largage.

S4. Opération de levage

Une grue portuaire soulève un conteneur de 20 tonnes. Le treuil (rayon 25 cm) accélère de 0 à 30 RPM en 5 s, puis maintient cette vitesse constante.

- Quelle est l'accélération angulaire pendant la phase d'accélération?
- À quelle vitesse linéaire le conteneur monte-t-il en régime permanent?
- Quelle hauteur le conteneur atteint-il après 5 s?
- Si le câble casse à une hauteur de 12 m, combien de temps le conteneur met-il pour toucher le sol?

S5. Accident évité de justesse

Une voiture roule à 110 km/h sur l'autoroute. Le conducteur aperçoit un obstacle à 80 m devant lui. Son temps de réaction est de 0,8 s, puis il freine avec une décélération de 9 m/s^2 .

- a) Quelle distance parcourt la voiture pendant le temps de réaction?
- b) Quelle est la distance de freinage?
- c) La voiture s'arrête-t-elle avant l'obstacle?

S6. Chute d'un grimpeur

Un grimpeur à 15 m au-dessus du sol glisse et tombe en chute libre. Son partenaire d'assurage, au sol, a un temps de réaction de 0,5 s avant d'activer le système de freinage qui applique une décélération de 15 m/s^2 au grimpeur.

- a) Quelle est la vitesse du grimpeur après 0,5 s de chute libre?
- b) Quelle distance a-t-il parcourue pendant ce temps?
- c) Combien de temps supplémentaire faut-il pour l'arrêter complètement?
- d) À quelle hauteur au-dessus du sol le grimpeur s'arrête-t-il?

S7. Course poursuite

Une voiture de police, initialement à l'arrêt, voit passer un véhicule en infraction à 120 km/h. Après un temps de réaction de 2 s, la voiture de police accélère à 4 m/s^2 jusqu'à atteindre 160 km/h, vitesse qu'elle maintient ensuite.

- a) Quelle distance le véhicule en infraction parcourt-il pendant le temps de réaction de la police?
- b) Combien de temps la voiture de police met-elle pour atteindre 160 km/h?
- c) À quel moment (depuis le passage du véhicule) la police rattrape-t-elle le fuyard?
- d) Quelle distance chaque véhicule a-t-il parcourue?

S8. Évitement de collision

Deux navires se font face dans un chenal. Le navire A (14 nuds vers l'est) et le navire B (10 nuds vers l'ouest) sont séparés de 1500 m. Les deux capitaines freinent simultanément avec des décélérations de $a_A = -0,008 \text{ m/s}^2$ et $a_B = -0,005 \text{ m/s}^2$.

- a) Calculez le temps et la distance de freinage de chaque navire.
- b) Les navires s'arrêtent-ils avant de se percuter?
- c) Si collision il y a, calculez la position de l'impact et les vitesses des navires à ce moment.
- d) Quelle décélération minimale **identique** les deux navires auraient-ils dû appliquer pour éviter la collision?

S9. Lancer du poids

Un athlète lance un poids de 7,26 kg avec une vitesse de 13 m/s à un angle de 40° au-dessus de l'horizontale. Le poids quitte sa main à une hauteur de 2 m.

- a) Quelle est la hauteur maximale atteinte par le poids?

- b) Quelle est la portée horizontale (distance officielle du lancer)?
- c) À quel angle le poids devrait-il être lancé pour maximiser la portée?
- d) Si l'athlète pouvait augmenter sa vitesse de lancer de 10%, de combien la portée augmenterait-elle?

S10. Analyse de navigation

Un cargo quitte Sept-Îles à 6h00 pour Rimouski (180 NM). Il navigue d'abord à 12 nuds pendant 8 heures, puis accélère à $0,002 \text{ m/s}^2$ jusqu'à atteindre 16 nuds, vitesse qu'il maintient jusqu'à destination.

- a) Quelle distance a-t-il parcourue pendant les 8 premières heures?
- b) Combien de temps dure la phase d'accélération?
- c) À quelle heure arrive-t-il à Rimouski?
- d) Tracez le graphique $v(t)$ de ce voyage.

Défis intégrateurs

Ces problèmes demandent de combiner plusieurs concepts et de développer une stratégie de résolution. Ils représentent le niveau attendu pour bien maîtriser la cinématique.

D1. Lance-amarre tactique (*)**

Un officier sur le gaillard d'avant (hauteur $h_1 = 8 \text{ m}$) doit envoyer une amarre sur un quai situé à 25 m horizontalement. Le quai est à une hauteur $h_2 = 3 \text{ m}$ au-dessus de l'eau. Le lance-amarre propulse la ligne à $v_0 = 30 \text{ m/s}$.

- a) Quelle est la différence de hauteur Δy entre le point de tir et le point d'arrivée?
- b) Déterminez l'angle minimal θ_{min} permettant d'atteindre le quai. (*Indice : vous devrez résoudre une équation du second degré en $\tan \theta$*)
- c) Pour cet angle minimal, calculez le temps de vol de l'amarre.
- d) Il existe un deuxième angle θ_{max} qui permet aussi d'atteindre la cible. Lequel des deux angles est préférable en pratique? Justifiez.
- e) Si le navire s'approche du quai à $0,5 \text{ m/s}$ pendant le vol de l'amarre, de combien la portée effective est-elle réduite?

D2. Rendez-vous en mer (*)**

Deux navires doivent se rejoindre pour un transfert de personnel. À $t = 0$:

- Le navire A est à l'origine, immobile, et commence à accélérer vers l'est à $0,02 \text{ m/s}^2$
- Le navire B est à 5 km à l'est, navigue vers l'ouest à 8 nuds et maintient cette vitesse

- a) Écrivez les équations de position $x_A(t)$ et $x_B(t)$ pour chaque navire.
- b) À quel instant et à quelle position les navires se rencontrent-ils?

-
- c) Quelle est la vitesse du navire A au moment du rendez-vous?
 - d) Quelle est la vitesse **relative** du navire A par rapport au navire B à cet instant? Interprétez physiquement.
 - e) Si le navire A doit s'arrêter au point de rendez-vous avec une décélération de $0,015 \text{ m/s}^2$, à quel moment doit-il commencer à freiner?

D3. Analyse complète d'une manœuvre (★★★)

Un vraquier de 200 m de long effectue la manœuvre suivante dans le chenal :

- Phase 1 : Accélération de 0 nud à 6 nuds avec $a_1 = 0,01 \text{ m/s}^2$
- Phase 2 : Vitesse constante de 6 nuds pendant 15 min
- Phase 3 : Accélération de 6 nuds à 12 nuds avec $a_3 = 0,008 \text{ m/s}^2$
- Phase 4 : Vitesse constante de 12 nuds jusqu'à destination

La destination est à 10 km du point de départ.

- a) Calculez la durée et la distance parcourue pendant chaque phase (1, 2 et 3).
- b) Quelle distance reste-t-il à parcourir en phase 4? Combien de temps dure cette phase?
- c) Calculez le temps total de la manœuvre.
- d) Tracez les graphiques $v(t)$ et $x(t)$ à l'échelle, en identifiant clairement chaque phase.
- e) Calculez la vitesse moyenne sur l'ensemble du trajet. Comparez avec la moyenne arithmétique des vitesses (6 et 12 nœuds).

D4. Système de treuils coordonnés (★★★)

Lors d'une opération de chargement, deux treuils travaillent en coordination :

- Treuil A (rayon $r_A = 20 \text{ cm}$) : part du repos, accélère à $\alpha_A = 0,5 \text{ rad/s}^2$ pendant 4 s, puis maintient sa vitesse
- Treuil B (rayon $r_B = 30 \text{ cm}$) : tourne à vitesse constante $\omega_B = 2 \text{ rad/s}$ dès $t = 0$

Les deux treuils enroulent des câbles reliés au même conteneur par un système de poulies (le conteneur monte à la moyenne des vitesses linéaires des deux câbles).

- a) Calculez la vitesse angulaire finale du treuil A et sa vitesse linéaire en bout de tambour.
- b) Calculez la vitesse linéaire du câble B.
- c) À $t = 4 \text{ s}$, à quelle vitesse monte le conteneur?
- d) Quelle longueur de câble le treuil A a-t-il enroulée pendant les 4 premières secondes?
- e) Quelle longueur de câble le treuil B a-t-il enroulée pendant le même temps?
- f) De quelle hauteur le conteneur est-il monté pendant ces 4 s? (*Attention : la vitesse de montée varie!*)

D5. Poursuite et interception (★★★★)

Un navire de patrouille P détecte un navire suspect S à 8 km au nord. Au moment de la détection :

- Le navire S navigue vers l'est à 15 nuds (vitesse constante)
- Le navire P est immobile mais peut atteindre 25 nuds avec une accélération de $0,03 \text{ m/s}^2$

Le capitaine de P veut intercepter S en naviguant en ligne droite vers un point d'interception.

- Si P navigue directement vers la position actuelle de S, expliquez pourquoi il ne l'interceptera jamais.
- Supposons que P navigue vers un point situé à un angle θ est du nord. Écrivez les équations de position de P et S en fonction du temps.
- Pour une interception, les positions doivent coïncider. Établissez les deux équations (en x et en y) qui doivent être satisfaites.
- Par essai-erreur ou graphiquement, estimez l'angle θ optimal et le temps d'interception. (*La solution analytique exacte dépasse le cadre du cours.*)
- Quelle distance totale le navire P parcourt-il jusqu'à l'interception?

D6. Chute d'un conteneur en mouvement (★★★)

Une grue portuaire déplace un conteneur horizontalement à 3 m/s à une hauteur de 20 m . Le câble casse et le conteneur tombe.

- Combien de temps le conteneur met-il pour toucher le sol?
- À quelle distance horizontale du point de rupture le conteneur atterrit-il?
- Avec quelle vitesse (module) le conteneur frappe-t-il le sol?
- Un travailleur se trouve à 8 m horizontalement du point de rupture (dans la direction du mouvement). A-t-il le temps de s'écarter s'il lui faut $1,5 \text{ s}$ pour réagir et courir 3 m ?
- Le conteneur a des dimensions $6 \text{ m} \times 2,4 \text{ m}$ (longueur \times largeur). En supposant qu'il ne tourne pas pendant la chute, quelle est la zone de danger au sol (rectangle où le conteneur pourrait tomber)?

D7. Navigation avec courant variable (★★★★)

Un navire doit traverser un détroit de 4 km de large (direction nord-sud). Le courant dans le détroit varie linéairement :

- Au bord sud : courant nul
- Au centre : courant maximal de 3 nuds vers l'est
- Au bord nord : courant nul

Le navire part du bord sud et navigue à 10 nuds (vitesse surface) cap au nord.

- Exprimez le courant $v_c(y)$ en fonction de la position y (où $y = 0$ au sud et $y = 4 \text{ km}$ au nord).
- Expliquez qualitativement pourquoi le navire dérivera vers l'est, puis reviendra partiellement.
- À quelle distance à l'est de sa ligne de départ le navire se trouvera-t-il quand il atteindra le bord nord? (*Indice : divisez la traversée en petits segments et summez les dérives, ou utilisez l'intégration si vous la connaissez.*)

-
- d) Combien de temps dure la traversée?
 - e) Quel cap initial (ouest du nord) le capitaine devrait-il prendre pour arriver exactement au point visé? (*Question ouverte – une réponse approximative est acceptable.*)

D8. Interception 2D avec accélération (★★★★)

Un cargo navigue vers l'est à vitesse constante de 12 nuds. Un garde-côte, situé 800 m au sud de la trajectoire du cargo et exactement à la même longitude (vis-à-vis de sa position actuelle), doit l'intercepter. Le garde-côte peut accélérer à $0,03 \text{ m/s}^2$ jusqu'à une vitesse maximale de 25 nuds.

- a) Si le garde-côte navigue directement vers le nord (perpendiculairement), interceptera-t-il le cargo? Justifiez.
- b) Le garde-côte décide de naviguer avec un angle θ est du nord. Écrivez les équations de position des deux navires (origine à la position initiale du garde-côte).
- c) Pour un angle de 30° est du nord, calculez le temps nécessaire au garde-côte pour atteindre la trajectoire du cargo (la ligne est-ouest à $y = 800 \text{ m}$).
- d) Pour ce même angle, le cargo sera-t-il encore là? Comparez les positions horizontales des deux navires à cet instant.
- e) (*Question ouverte*) Estimez graphiquement ou par essai-erreur l'angle optimal pour minimiser le temps d'interception.

D9. Manœuvre d'accostage optimale (★★★)

Un traversier doit rejoindre un quai situé à exactement 2 km. Pour le confort des passagers, le capitaine souhaite une manœuvre symétrique : accélérer uniformément pendant la première moitié de la distance, puis freiner uniformément (avec la même magnitude d'accélération) pour s'arrêter exactement au quai.

- a) Si l'accélération est de $0,04 \text{ m/s}^2$, quelle est la vitesse maximale atteinte (à mi-parcours)?
- b) Quel est le temps total de la manœuvre?
- c) Comparez ce temps avec celui d'un trajet à vitesse constante égale à la vitesse moyenne de cette manœuvre.
- d) Le capitaine réalise qu'il peut accélérer à $0,06 \text{ m/s}^2$ mais ne peut freiner qu'à $0,04 \text{ m/s}^2$. À quelle distance du quai doit-il commencer à freiner? Quelle est la nouvelle vitesse maximale?
- e) Pour cette manœuvre asymétrique, calculez le nouveau temps total et comparez avec la manœuvre symétrique.

Conseils pour les défis

- **Dessinez toujours** un schéma avec les axes, les positions initiales et les directions.
- **Identifiez les phases** du mouvement (MRU, MRUA, chute libre...) pour chaque objet.
- **Listez les inconnues** et comptez vos équations – vous devez avoir autant d'équations que d'inconnues.
- **Le temps est souvent le lien** entre les composantes x et y , ou entre deux objets.
- **Vérifiez vos unités** à chaque étape et la cohérence de vos réponses (ordres de grandeur).

Réponses**Position et déplacement**

1. a) 22 km b) 8 km vers l'est
2. $d = 650$ m, $\Delta x = 350$ m vers l'est
3. a) 17 km b) $|\Delta \vec{r}| = 13$ km
4. a) vrai (égalité si ligne droite sans demi-tour) b) Vrai c) Faux (ne dépend que des positions initiale et finale)

Vitesse moyenne et scalaire

5. 27,3 km/h ; 7,58 m/s ; 14,7 nuds
6. 15 nuds ; 7,72 m/s
7. a) 4,67 h b) 0 nud c) 17,1 nuds
8. 14,3 nuds
9. a) 13,3 nuds b) Le temps passé à chaque vitesse n'est pas égal
10. 15 nuds (moyenne arithmétique car temps égaux)
11. a) 1,0 h = 60 min b) 90 km de la gare A
12. a) ≈ 9 h43 b) 171 km de Montréal
13. a) 2,3 min ≈ 138 s b) Cycliste : 962 m ; Coureur : 462 m

Graphiques

14. a) MRU, repos, MRU b) 20 NM/h c) Oui, entre 2h et 4h d) 11,4 NM/h
15. a) $1 \text{ m/s/min} = 0,017 \text{ m/s}^2$ b) Entre 4 et 10 min c) 2400 m
16. Le signe dépend du choix de l'axe; une pente négative indique un mouvement vers les x décrois-

sants

17. a) MRU, accélération, MRU, freinage b) $0,0042 \text{ m/s}^2$ c) $-0,011 \text{ m/s}^2$ d) 3240 m

18. a) $4,8 \text{ m/s}$ b) $4,8 \text{ m/s}$ c) $3,6 \text{ m/s}$

19. a) Accélération, MRU, freinage b) 5 m/s c) Oui (pentes nulles aux extrémités)

Accélération et MRUA

20. $0,0093 \text{ m/s}^2$

21. $-0,37 \text{ m/s}^2$

22. a) 77 s b) 238 m

23. a) $4940 \text{ m} \approx 2,7 \text{ NM}$ b) $1286 \text{ s} \approx 21 \text{ min}$

24. Voiture : 39 m ; Cargo : 52 000 m (1300 fois plus!)

25. a) $-0,0106 \text{ m/s}^2$ b) 389 s c) 234 m avant le quai

26. a) Faux (dépend du signe de v) b) Vrai (ex: balle au sommet) c) Vrai

27. a) $x_A = 4,12t$; $x_B = 3000 - 0,005t^2$ b) $466 \text{ s} \approx 7,8 \text{ min}$ c) 1920 m de A d) $4,7 \text{ m/s} \approx 9,1 \text{ nuds}$

Chute libre

28. a) 1,92 s b) $18,8 \text{ m/s}$

29. a) 2,26 s b) $22,1 \text{ m/s}$

30. a) 1,01 s b) $12,9 \text{ m/s}$

31. a) 36,9 m b) 5,3 s

32. a) 5,27 m b) 1,85 s

33. La balle A (lâchée) a la plus grande vitesse; la balle B est à son apogée ($v_B = 0$) au point de croisement

Mouvement en 2D et projectile

34. a) 13,8 nuds b) 11,6 nuds

35. a) $v_{0x} = 19,2 \text{ m/s}$, $v_{0y} = 16,1 \text{ m/s}$ b) 69 m

36. a) 16,6 m b) 109 m

37. 3,5 m

38. a) 61,2 m b) 141 m c) 45

39. Le mouvement vertical est indépendant du mouvement horizontal; les deux subissent la même accélération g

Cinématique de rotation

40. a) $\frac{3\pi}{2} \approx 4,71 \text{ rad}$ b) 135 c) $9,42 \text{ rad/s}$
41. $31,4 \text{ m/s} \approx 113 \text{ km/h}$
42. a) 8,5 tours b) 20,4 s
43. a) $0,628 \text{ rad/s}^2$ b) 20 tours
44. a) $25,1 \text{ m/s} \approx 90 \text{ km/h}$ b) $-21,1 \text{ rad/s}^2$ c) 26,5 tours
45. a) $-0,221 \text{ rad/s}^2$ b) 10,1 m c) 21,3 s

Problèmes de synthèse

- S1. a) 2400 m b) 148 m c) Non, s'arrête à 548 m après le quai; aurait dû commencer à 2548 m
- S2. a) 324 m b) 173 m c) 497 m d) 545 m
- S3. a) 71,4 m b) $v = 37,5 \text{ m/s}$ à $48,2$ sous l'horizontale c) Réduit de 5,7 m (larguer à 65,7 m)
d) 59,8 m
- S4. a) $0,628 \text{ rad/s}^2$ b) $0,785 \text{ m/s}$ c) 1,96 m d) 1,65 s
- S5. a) 24,4 m b) 52 m c) Oui, s'arrête à 3,6 m de l'obstacle
- S6. a) $4,9 \text{ m/s}$ b) 1,23 m c) 0,33 s d) 12,97 m (s'arrête à environ 13 m)
- S7. a) 66,7 m b) 11,1 s c) $t \approx 30 \text{ s}$ d) Police : 1007 m ; Fuyard : 1007 m
- S8. a) $A: t = 900 \text{ s}, d = 3241 \text{ m}$; $B: t = 1029 \text{ s}, d = 2646 \text{ m}$ b) Non, collision c) Position $\approx 872 \text{ m}$
de A; $v_A \approx 6,2 \text{ m/s}$, $v_B \approx 4,5 \text{ m/s}$ d) $a \geq 0,026 \text{ m/s}^2$
- S9. a) 5,55 m b) 17,8 m c) ≈ 42 (légèrement moins que 45° car lancé en hauteur) d) Portée
augmente de $\approx 21\%$ (proportionnel à v^2)
- S10. a) 96 NM b) $1029 \text{ s} \approx 17 \text{ min}$ c) $\approx 17\text{h}30$ d) Graphique trapézoïdal

Défis intégrateurs

- D1. a) $\Delta y = 5 \text{ m}$ (tire vers le bas) b) $\theta_{\min} \approx 28$ c) $t \approx 1,4 \text{ s}$ d) θ_{\min} préférable (trajectoire
plus tendue, moins affectée par le vent) e) Portée réduite de 0,7 m
- D2. a) $x_A = \frac{1}{2}(0,02)t^2$; $x_B = 5000 - 4,12t$ b) $t = 650 \text{ s}$, $x = 4220 \text{ m}$ c) $13 \text{ m/s} = 25,3 \text{ nuds}$ d)
 $v_{A/B} = 17,1 \text{ m/s}$ vers l'est (A s'approche rapidement de B) e) Commencer à freiner à $t = 217 \text{ s}$
- D3. a) Phase 1: 309 s, 476 m; Phase 2: 900 s, 2778 m; Phase 3: 386 s, 1736 m b) 5010 m restants,
811 s c) $2406 \text{ s} \approx 40 \text{ min}$ d) Voir graphique e) $v_{\text{moy}} = 15,0 \text{ km/h} = 8,1 \text{ nuds}$ (inférieure à
9 nuds, moyenne arithmétique)
- D4. a) $\omega_A = 2 \text{ rad/s}$, $v_A = 0,4 \text{ m/s}$ b) $v_B = 0,6 \text{ m/s}$ c) $v_{\text{cont}} = 0,5 \text{ m/s}$ d) $L_A = 0,8 \text{ m}$ e)
 $L_B = 2,4 \text{ m}$ f) $h = 1,33 \text{ m}$ (intégration de la vitesse moyenne)
- D5. a) S se déplace; quand P atteint la position initiale de S, celui-ci est déjà ailleurs b) $x_P =$

$v_P(t) \sin \theta \cdot t$; $y_P = v_P(t) \cos \theta \cdot t$; $x_S = 7,72t$; $y_S = 8000$ c) $x_P = x_S$ et $y_P = y_S$ d) $\theta \approx 50$ est du nord, $t \approx 620$ s e) $\approx 6,2$ km

D6. a) 2,02 s b) 6,06 m c) 20,0 m/s d) Non! Le conteneur atterrit à 6,06 m, le travailleur à 8 m est en sécurité même sans bouger e) Zone de $6 \text{ m} \times 2,4 \text{ m}$ centrée à 6,06 m du point de rupture (de 3,06 m à 9,06 m)

D7. a) $v_c(y) = 3 \text{ nd} \times \sin\left(\frac{\pi y}{4 \text{ km}}\right)$ ou approximation triangulaire b) Dérive maximale au centre où le courant est maximal, puis le courant diminue mais ne ramène pas le navire c) ≈ 780 m vers l'est d) 24 min e) ≈ 5 à 7 ouest du nord (solution itérative)

D8. a) Non, le cargo se sera déplacé vers l'est pendant que le garde-côte monte vers le nord b) $x_{GC} = \frac{1}{2}(0,03)t^2 \sin \theta$, $y_{GC} = \frac{1}{2}(0,03)t^2 \cos \theta$; $x_C = 6,17t$, $y_C = 800$ c) $t \approx 264$ s pour atteindre $y = 800$ m d) $x_{GC} \approx 523$ m, $x_C \approx 1629$ m – le cargo est loin devant e) $\theta \approx 55$ à 60 est du nord

D9. a) $v_{max} = 8,94 \text{ m/s} \approx 17,4 \text{ nuds}$ b) $t_{total} = 447 \text{ s} \approx 7,5 \text{ min}$ c) Vitesse moyenne = $4,47 \text{ m/s}$; à vitesse constante : $t = 447 \text{ s}$ (identique!) d) Freiner à 800 m du quai; $v_{max} = 9,80 \text{ m/s}$ e) $t_{total} = 408 \text{ s} \approx 6,8 \text{ min}$ (plus rapide de 9%)

Chapitre 2

Dynamique et statique

Exercices

Niveaux de difficulté

- ★ Application directe d'une formule
- ★★ Problème à plusieurs étapes ou avec conversion
- ★★★ Problème complexe ou piège conceptuel

Données utiles :

- Accélération gravitationnelle : $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- Constante de gravitation : $G = 6,674 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$
- Masse de la Terre : $M_T = 5,972 \times 10^{24} \text{ kg}$
- Rayon de la Terre : $R_T = 6,378 \times 10^6 \text{ m}$
- 1 nœud = 0,514 m/s

A — Concepts fondamentaux et lois de Newton

- ★ 1. **Vrai ou faux.** Pour chaque affirmation, indiquez si elle est vraie ou fausse et **justifiez** votre réponse en une ou deux phrases.
- a) Si aucune force nette n'agit sur un objet, celui-ci est nécessairement immobile.
 - b) Un navire qui se déplace à vitesse constante en eau calme n'a aucune force qui agit sur lui.
 - c) Un objet plus lourd tombe plus vite qu'un objet plus léger (en négligeant la résistance de l'air).
 - d) Lorsqu'un remorqueur pousse un navire, le navire exerce sur le remorqueur une force de réaction plus petite, car le navire est plus massif.

- e) La force normale exercée par une surface sur un objet est toujours égale au poids de cet objet.
- f) Si la force résultante sur un objet est nulle, la vitesse de cet objet est nécessairement nulle.

Réponses :

- a) **Faux.** Selon la première loi de Newton, si la force nette est nulle, l'objet conserve son état de mouvement : il peut être immobile *ou* se déplacer à vitesse constante (MRU).
 - b) **Faux.** Les forces sont présentes (poids, poussée d'Archimède, poussée des moteurs, résistance de l'eau), mais leur somme vectorielle est nulle. C'est un état d'équilibre dynamique.
 - c) **Faux.** La deuxième loi donne $a = F_g/m = mg/m = g$. L'accélération gravitationnelle est la même pour tous les objets, indépendamment de leur masse.
 - d) **Faux.** Selon la troisième loi de Newton, les forces d'action et de réaction sont *toujours* égales en grandeur et opposées en direction, peu importe les masses des objets.
 - e) **Faux.** La normale est égale au poids uniquement sur une surface horizontale sans autres forces verticales. Sur un plan incliné ou si une force a une composante verticale, $N \neq mg$.
 - f) **Faux.** C'est une reformulation du (a). Force résultante nulle signifie accélération nulle, pas vitesse nulle.
- ★ **2. Identification des forces.** Pour chacune des situations suivantes, identifiez **toutes** les forces qui agissent sur l'objet souligné et indiquez leur direction. Ne faites aucun calcul.
- a) Un conteneur est posé sur le pont d'un navire en mer calme. Le navire se déplace à vitesse constante.
 - b) Un navire est tiré par un remorqueur à vitesse constante dans un port.
 - c) Une caisse est tirée sur un quai par un câble formant un angle au-dessus de l'horizontale. La caisse accélère et il y a du frottement cinétique.
 - d) Un conteneur est suspendu, immobile, au câble d'une grue au-dessus du quai.

Réponses :

- a) **Conteneur sur le pont :** poids \vec{F}_g (vers le bas) et force normale \vec{N} du pont (vers le haut). Deux forces.
 - b) **Navire remorqué :** poids \vec{F}_g (vers le bas), poussée d'Archimède \vec{F}_A (vers le haut), tension du câble de remorquage \vec{T} (vers l'avant), résistance de l'eau \vec{f} (vers l'arrière). Quatre forces. (La somme est nulle puisque $v = \text{constante}$.)
 - c) **Caisse tirée :** poids \vec{F}_g (vers le bas), force normale \vec{N} (vers le haut), tension \vec{T} (à angle vers le haut et l'avant), frottement cinétique \vec{f}_c (vers l'arrière, parallèle à la surface). Quatre forces. (La somme n'est pas nulle : la caisse accélère.)
 - d) **Conteneur suspendu :** poids \vec{F}_g (vers le bas) et tension du câble \vec{T} (vers le haut). Deux forces. ($T = F_g$ en équilibre.)
- ★ **3. Paires action-réaction (3^e loi de Newton).** Pour chaque force ci-dessous, identifiez la force de réaction : sur quel objet s'exerce-t-elle, par quel objet est-elle exercée, et dans quelle direction agit-elle?

- a) La Terre exerce une force gravitationnelle vers le *bas* sur un navire.
- b) L'hélice d'un navire pousse l'eau vers l'*arrière*.
- c) Une amarre exerce une tension sur le navire, dirigée vers le quai.
- d) Le pont du navire exerce une force normale vers le *haut* sur un conteneur.

Réponses :

- a) **Réaction :** Le navire exerce une force gravitationnelle vers le *haut* sur la Terre. (Même grandeur, mais totalement négligeable pour la Terre vu sa masse énorme.)
- b) **Réaction :** L'eau pousse l'hélice (et donc le navire) vers l'*avant*. C'est cette réaction qui propulse le navire!
- c) **Réaction :** Le navire exerce une tension sur l'amarre, dirigée *vers le large* (opposée à la direction du quai).
- d) **Réaction :** Le conteneur exerce une force vers le *bas* sur le pont du navire. (C'est le « poids apparent » du conteneur sur le pont.)

B — Diagramme de corps libre et équilibre (statique)

★ 4. **Tracé de DCL (sans calcul).** Pour chacune des situations suivantes, tracez le diagramme de corps libre (DCL) de l'objet indiqué. Identifiez chaque force par son symbole, indiquez sa direction et précisez l'objet qui l'exerce.

- a) Un moteur de 250 kg est suspendu au plafond de la salle des machines par un câble vertical unique.
- b) Une caisse de 100 kg est immobile sur une rampe de chargement inclinée à 30°, retenue par le frottement statique.
- c) Un conteneur est retenu en l'air par deux câbles : le premier fait un angle de 20° avec la verticale et le second fait un angle de 45° avec la verticale.

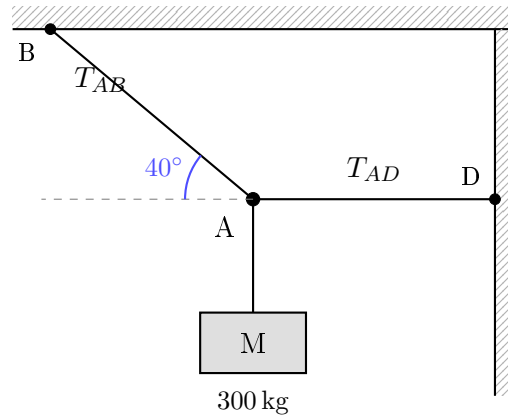
Réponses :

- a) Deux forces : poids \vec{F}_g (vers le bas) et tension \vec{T} (vers le haut). Le point d'application est le centre de masse du moteur.
- b) Trois forces : poids \vec{F}_g (verticalement vers le bas, au centre de masse), force normale \vec{N} (perpendiculaire à la rampe, vers l'extérieur de la surface) et frottement statique \vec{f}_s (parallèle à la rampe, vers le haut de la pente).
- c) Trois forces : poids \vec{F}_g (vers le bas) et deux tensions \vec{T}_1 (le long du premier câble, à 20° de la verticale) et \vec{T}_2 (le long du second câble, à 45° de la verticale).

★★ 5. **(Maritime)** Un moteur diesel de 300 kg est suspendu au point de jonction A par un câble vertical dans la salle des machines d'un navire. Au point A, deux câbles maintiennent le système en équilibre :

- le câble AB est fixé au plafond et fait un angle de 40° avec l'horizontale;

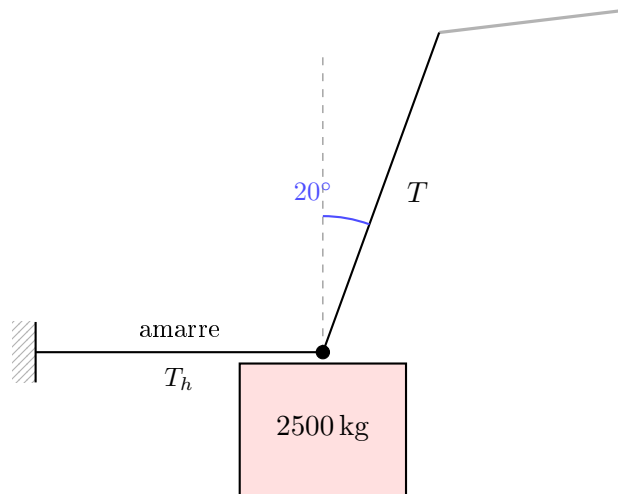
- le câble AD est horizontal et fixé à une cloison.



- Tracez le DCL du point A.
- Déterminez la tension dans le câble AB.
- Déterminez la tension dans le câble AD.

Réponses : b) $T_{AB} = 4,58 \text{ kN}$ c) $T_{AD} = 3,51 \text{ kN}$

- ★★ 6. (Maritime) Un conteneur de 2500 kg est soulevé par la grue d'un navire. Le câble de la grue fait un angle de 20° avec la verticale. Une amarre horizontale est attachée au conteneur pour l'empêcher de balancer.

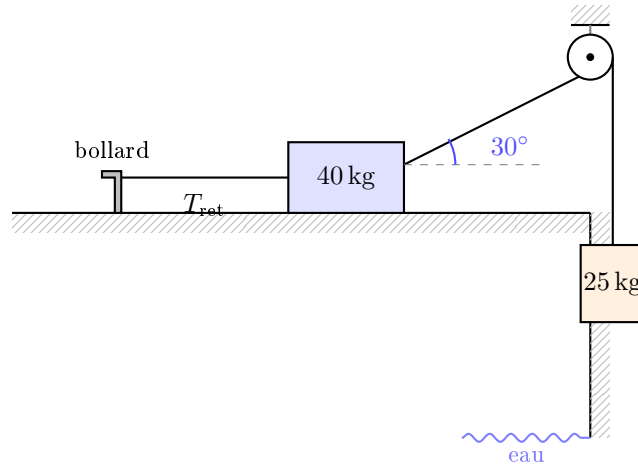


- Tracez le DCL du conteneur.
- Calculez la tension dans le câble de la grue.
- Calculez la tension dans l'amarre horizontale.

Réponses : b) $T = 26,1 \text{ kN}$ c) $T_h = 8,93 \text{ kN}$

- ★★ 7. (Maritime) Sur un quai, une caisse de 40 kg est posée sur une surface sans frottement. Un câble attaché à la caisse passe par une poulie fixée en hauteur au bord du quai, puis descend

verticalement pour supporter un fût de 25 kg au-dessus de l'eau. Le segment de câble entre la caisse et la poulie fait un angle de 30° avec l'horizontale. Un câble de retenue horizontal, attaché à un bollard, maintient le système en équilibre.



- a) Déterminez la tension dans le câble de retenue.
- b) Quelle est la force normale exercée par le quai sur la caisse?

Réponses : a) $T_{ret} = 212 \text{ N}$ b) $N = 270 \text{ N}$

★ 8. (Maritime) Une caisse de 500 kg est immobile sur la passerelle de chargement d'un navire, inclinée à 25° par rapport à l'horizontale.

- a) Quel est le coefficient de frottement statique minimal $\mu_{s,min}$ entre la caisse et la passerelle pour que la caisse ne glisse pas?
- b) Si le coefficient de frottement statique réel est $\mu_s = 0,60$, quelle force maximale pourrait-on exercer sur la caisse, parallèlement à la pente et vers le bas, sans qu'elle ne se mette à glisser?

Réponses : a) $\mu_{s,min} = 0,466$ b) $F_{max} = 594 \text{ N}$

C — Dynamique : la deuxième loi en action

★ 9. (Maritime) Le NM *Saaremaa I* ($m = 8500$ tonnes) accélère de 0 à 12 nœuds en 90 s.

- a) En supposant l'accélération constante et en négligeant la résistance de l'eau, calculez la force nette requise.
- b) Si la résistance de l'eau est de 150 kN pendant cette phase d'accélération, quelle est la poussée réelle des moteurs?

Réponses : a) $F_{net} = 583 \text{ kN}$ b) $F_{poussée} = 733 \text{ kN}$

★ 10. (Maritime) Un conteneur de 8 tonnes est posé sur le pont d'un navire. Lors d'un freinage d'urgence, le navire décélère à raison de $0,5 \text{ m/s}^2$.

- a) Quelle force de frottement minimale est requise pour empêcher le conteneur de glisser sur le pont?
- b) Si le coefficient de frottement statique entre le conteneur et le pont est $\mu_s = 0,40$, le conteneur glisse-t-il?

Réponses : a) $f = 4,00 \text{ kN}$ b) $f_{s,max} = 31,4 \text{ kN} \gg 4,00 \text{ kN}$: le conteneur ne glisse pas.

- ★★ **11. (Maritime)** Lors de l'amarrage, un navire de 5000 tonnes se déplaçant à 2 nœuds est immobilisé sur une distance de 5 m par les amarres et les défenses du quai.

- a) Calculez la décélération du navire.
- b) Calculez la force moyenne exercée par les amarres et les défenses.

Réponses : a) $a = 0,106 \text{ m/s}^2$ b) $F = 528 \text{ kN}$

- ★★ **12. (Maritime)** Un treuil tire une caisse de 80 kg sur un quai à l'aide d'un câble faisant un angle de 25 au-dessus de l'horizontale. Le coefficient de frottement cinétique entre la caisse et le quai est $\mu_c = 0,30$. La tension dans le câble est de 350 N.

- a) Calculez la force normale.
- b) Calculez la force de frottement cinétique.
- c) Calculez l'accélération de la caisse.

Réponses : a) $N = 637 \text{ N}$ b) $f_c = 191 \text{ N}$ c) $a = 1,58 \text{ m/s}^2$

- ★★ **13. (Maritime)** Une palette de 200 kg est relâchée du repos au sommet d'une rampe de chargement inclinée à 30 et longue de 4 m. Le coefficient de frottement cinétique est $\mu_c = 0,20$.

- a) Calculez l'accélération de la palette sur la rampe.
- b) Quelle est la vitesse de la palette au bas de la rampe?

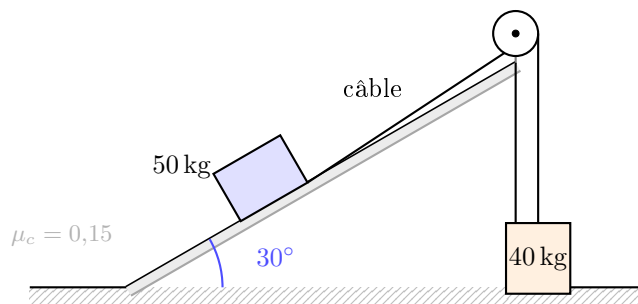
Réponses : a) $a = 3,21 \text{ m/s}^2$ b) $v = 5,06 \text{ m/s}$

- ★★ **14. (Maritime)** Un baril de 40 kg part du repos et descend une rampe inclinée à 25, longue de 2 m, avec un coefficient de frottement cinétique $\mu_c = 0,15$. Au bas de la rampe, le baril continue sur le plancher horizontal de la cale, où le coefficient de frottement cinétique est $\mu_c = 0,20$. À quelle distance du bas de la rampe le baril s'immobilise-t-il?

Indice : Ce problème se résout en deux étapes. Trouvez d'abord la vitesse au bas de la rampe, puis utilisez-la comme vitesse initiale sur le plancher.

Réponse : $d = 2,87 \text{ m}$

- ★★★ **15. (Maritime)** Lors du chargement d'un navire, une caisse de 50 kg est posée sur une rampe inclinée à 30 avec un coefficient de frottement cinétique $\mu_c = 0,15$. Elle est reliée par un câble passant par une poulie sans frottement au sommet de la rampe à un contrepoids de 40 kg suspendu dans le vide. Le système est relâché du repos.



- Dans quelle direction le système se met-il en mouvement? Justifiez par une comparaison des forces.
- Calculez l'accélération du système.
- Quelle est la tension dans le câble?

Indice : Comparez le poids du contrepoids avec la somme de la composante du poids de la caisse parallèle à la rampe et du frottement.

Réponses : a) Le contrepoids descend (la caisse monte). b) $a = 0,93 \text{ m/s}^2$ c) $T = 355 \text{ N}$

D — Mouvement circulaire

- ★ **16. (Maritime)** L'hélice d'un cargo a un diamètre de 5 m et tourne à 150 RPM.

- Calculez la vitesse angulaire de l'hélice en rad/s.
- Calculez la vitesse tangentielle à l'extrémité d'une pale.
- Calculez l'accélération centripète subie par un point à l'extrémité d'une pale.

Réponses : a) $\omega = 15,7 \text{ rad/s}$ b) $v = 39,3 \text{ m/s}$ (141 km/h) c) $a_c = 617 \text{ m/s}^2$

- ★★ **17. (Maritime)** Un pétrolier de 60 000 tonnes effectue un virage avec un rayon de giration de 700 m. Sa vitesse est de 12 nœuds.

- Calculez la force centripète nécessaire pour maintenir ce virage.
- En combien de temps le navire effectue-t-il un demi-tour (180)?
- Si le capitaine réduit la vitesse à 8 nœuds, quelle est la nouvelle force centripète?

Réponses : a) $F_c = 3,26 \text{ MN}$ b) $t = 5 \text{ min } 57 \text{ s}$ c) $F_c = 1,45 \text{ MN}$

- ★★ **18. (Maritime)** Un conteneur de 15 tonnes est arrimé sur le pont d'un navire. Le coefficient de frottement statique entre le conteneur et le pont est $\mu_s = 0,45$.

- Si le navire effectue un virage de rayon 500 m, quelle est la vitesse maximale pour que le conteneur ne glisse pas?
- À 10 nœuds, quel est le rayon de virage minimal sécuritaire?

Réponses : a) $v_{max} = 47,0 \text{ m/s}$ (91 nœuds) b) $r_{min} = 5,98 \text{ m}$

Interprétation physique

Ces résultats montrent que, pour les vitesses typiques de navigation, le frottement statique sur le pont est largement suffisant pour retenir la cargaison dans un virage. Le vrai danger pour la cargaison vient des accélérations en tangage et en roulis (mouvements du navire dans les vagues), qui sont beaucoup plus violentes qu'un simple virage.

★★ **19. (Maritime)** Un satellite GPS de 2000 kg orbite à une altitude de 20 200 km au-dessus de la surface terrestre. Ces satellites sont essentiels à la navigation maritime moderne.

- Calculez l'accélération gravitationnelle à cette altitude.
- Calculez la vitesse orbitale du satellite.
- Calculez la période orbitale et comparez avec la valeur connue d'environ 12 h.

Réponses : a) $g = 0,564 \text{ m/s}^2$ b) $v = 3870 \text{ m/s}$ (13 900 km/h) c) $T = 43\,100 \text{ s} \approx 12,0 \text{ h}$

★★★ **20. (Maritime)** Un navire passe au sommet d'une vague dont le profil a un rayon de courbure de 40 m.

- À quelle vitesse un matelot de 80 kg situé sur le pont aurait-il un poids apparent nul (sensation d'apesanteur)?
- Si le navire se déplace à 15 nœuds, quel est le poids apparent du matelot au sommet de la vague? Exprimez-le en newtons et en pourcentage de son poids normal.

Réponses : a) $v = 19,8 \text{ m/s}$ (38,5 nœuds) b) $N = 666 \text{ N}$, soit 85% du poids normal.

E — Synthèse et intégration

★★★ **21. (Maritime — Manœuvre complète)** Le traversier *F.A. Gauthier* ($m = 5000$ tonnes) quitte le port de Matane.

Phase 1 : Le navire accélère de 0 à 14 nœuds en 2 minutes.

Phase 2 : À vitesse constante de 14 nœuds, le navire effectue un virage de rayon 500 m.

Phase 3 : Sur le pont du navire, un véhicule de 2000 kg n'est pas arrimé. Le coefficient de frottement statique entre les pneus et le pont est $\mu_s = 0,40$.

- Calculez la force de poussée des moteurs pendant la phase 1. (Négligez la résistance de l'eau.)
- Calculez la force centripète nécessaire pendant le virage.
- Le véhicule glisse-t-il pendant le virage? Justifiez par un calcul.
- Quelle serait la vitesse maximale du traversier pour que le véhicule ne glisse pas dans un virage de ce rayon?

Réponses : a) $F = 300 \text{ kN}$ b) $F_c = 518 \text{ kN}$ c) Force centripète requise sur le véhicule : 207 N; frottement statique maximal disponible : 7850 N. Non, le véhicule ne glisse pas. d) $v_{\max} = 44,3 \text{ m/s}$ (86 nœuds, bien au-delà des vitesses de navigation).

★ ★ ★ **22. (Maritime — Opération de chargement)** Une caisse de 2000 kg doit être chargée sur un navire.

Étape 1 : La caisse est soulevée par une grue. Le câble fait un angle de 15° avec la verticale et une amarre horizontale empêche la caisse de balancer.

Étape 2 : La caisse est déposée sur le pont, puis poussée horizontalement par un chariot élévateur avec une force de 5000 N. Le coefficient de frottement cinétique entre la caisse et le pont est $\mu_c = 0,20$.

- a) Calculez les tensions dans le câble de la grue et dans l'amarre horizontale (étape 1).
- b) Calculez l'accélération de la caisse sur le pont (étape 2).
- c) Si la caisse part du repos et est poussée sur une distance de 10 m, quelle est sa vitesse finale?

Réponses : a) $T_{\text{câble}} = 20,3 \text{ kN}$; $T_{\text{amarre}} = 5,26 \text{ kN}$ b) $a = 0,538 \text{ m/s}^2$ c) $v = 3,28 \text{ m/s}$

★ ★ **23. (Maritime — Estimation)** Un porte-conteneurs de 100 000 tonnes navigue à 20 nœuds. La force de freinage maximale (inversion des moteurs et résistance de l'eau) est estimée à 2000 kN.

- a) Estimez la distance de freinage.
- b) Estimez le temps d'arrêt.
- c) Comparez avec une automobile de 1500 kg roulant à 100 km/h et freinant avec une force de 10 000 N. Commentez les implications pour la navigation maritime.

Réponses : a) $d \approx 2,6 \text{ km}$ b) $t \approx 8 \text{ min } 34 \text{ s}$ c) Pour l'automobile : $d \approx 58 \text{ m}$, $t \approx 4 \text{ s}$. La distance de freinage du navire est environ 46 fois plus grande. Cela explique pourquoi les règles d'anticollision en mer exigent des manœuvres préventives bien à l'avance et pourquoi la veille maritime est si importante.

Chapitre 3

Énergie, travail et quantité de mouvement

Exercices

Niveaux de difficulté

- ★ Application directe d'une formule
- ★★ Problème à plusieurs étapes ou avec conversion
- ★★★ Problème complexe ou piège conceptuel
- ★★★★ Problème de synthèse intégrateur

A — Travail et théorème de l'énergie cinétique

- ★ 1. Un remorqueur exerce une force de poussée de $F = 150 \text{ kN}$ sur un pétrolier, dans la direction du mouvement. Le pétrolier se déplace de $d = 250 \text{ m}$ sous l'effet de cette poussée.
 - a) Calculez le travail effectué par le remorqueur sur le pétrolier.
 - b) Ce travail est-il positif ou négatif? Qu'est-ce que cela signifie physiquement?
- ★ 2. Pour chacune des situations suivantes, déterminez si le travail effectué par la force mentionnée est **positif**, **négatif** ou **nul**. Justifiez brièvement.
 - a) La force de propulsion d'un moteur sur un navire qui avance en ligne droite.
 - b) La résistance de l'eau sur un navire qui avance.
 - c) La force normale du pont sur un conteneur qui glisse horizontalement.
 - d) La force gravitationnelle sur une ancre qu'on remonte vers le navire.
 - e) La tension d'un câble de remorquage qui fait un angle de 20° avec la direction du mouvement du navire remorqué.

- ★★ 3. Un matelot tire une caisse de matériel ($m = 40 \text{ kg}$) sur le pont d'un navire à l'aide d'une corde qui fait un angle de $\theta = 30$ avec l'horizontale. La tension dans la corde est $T = 200 \text{ N}$. La caisse se déplace horizontalement sur une distance de $d = 12 \text{ m}$. Le coefficient de frottement cinétique entre la caisse et le pont est $\mu_c = 0,20$.
- Calculez le travail effectué par la tension de la corde.
 - Calculez la force normale, puis la force de frottement.
 - Calculez le travail effectué par le frottement.
 - Calculez le travail total effectué sur la caisse.
- ★★ 4. Un conteneur de masse $m = 500 \text{ kg}$ est tiré vers le haut d'une rampe inclinée à $\theta = 25$ par un câble parallèle à la rampe exerçant une tension $T = 4000 \text{ N}$. Le conteneur parcourt une distance $d = 8 \text{ m}$ le long de la rampe. Le coefficient de frottement cinétique est $\mu_c = 0,15$.
- Calculez le travail effectué par la tension.
 - Calculez la variation de hauteur Δy et le travail effectué par la gravité.
 - Calculez le travail effectué par le frottement.
 - Calculez le travail total effectué sur le conteneur. Le conteneur accélère-t-il?
- ★★ 5. Un cargo de masse $m = 20\,000$ tonnes navigue à $v_i = 10$ nuds ($\approx 5,14 \text{ m/s}$). Le capitaine ordonne l'inversion des moteurs, qui exercent une force de freinage constante de $F = 400 \text{ kN}$.
- Calculez l'énergie cinétique initiale du cargo.
 - En utilisant le théorème de l'énergie cinétique, déterminez la distance de freinage.
 - Exprimez cette distance en milles nautiques.

B — Énergie potentielle et conservation de l'énergie

- ★ 6.
- Une ancre de masse $m = 1500 \text{ kg}$ est suspendue à 20 m au-dessus du fond marin. Calculez son énergie potentielle gravitationnelle par rapport au fond marin.
 - Un conteneur de masse $m = 10\,000 \text{ kg}$ est suspendu par une grue à 15 m au-dessus du quai. Calculez son énergie potentielle gravitationnelle par rapport au quai.
 - La grue dépose le conteneur sur le pont du navire, à 5 m au-dessus du quai. Calculez la variation d'énergie potentielle ΔU_g et le travail effectué par la gravité lors de cette descente.
- ★★ 7. Un outil de $m = 2 \text{ kg}$ tombe accidentellement du sommet d'un mât situé à $h = 25 \text{ m}$ au-dessus du pont. En négligeant la résistance de l'air :
- Calculez la vitesse de l'outil juste avant qu'il ne touche le pont, en utilisant la conservation de l'énergie mécanique.
 - Convertissez cette vitesse en km/h .

-
- c) La masse de l'outil influence-t-elle la vitesse d'impact? Justifiez.
- ★★ 8. Un canot de sauvetage de masse $m = 350 \text{ kg}$ est lancé le long d'une glissière inclinée à 30° par rapport à l'horizontale. La glissière mesure $L = 10 \text{ m}$ de long. Le canot part du repos. En négligeant le frottement :
- Calculez la hauteur h du point de départ par rapport au point d'arrivée.
 - En utilisant la conservation de l'énergie, déterminez la vitesse du canot au bas de la glissière.
 - Si on veut que le canot atteigne une vitesse de 12 m/s , quelle doit être la longueur minimale de la glissière?
- ★★ 9. Un système de lancement de canot de sauvetage utilise un ressort de constante $k = 5000 \text{ N/m}$ comprimé de $x = 0,40 \text{ m}$.
- Calculez l'énergie potentielle élastique emmagasinée dans le ressort.
 - Si toute cette énergie est transférée à un chariot de $m = 2 \text{ kg}$, quelle sera sa vitesse?
 - Quelle compression serait nécessaire pour doubler cette vitesse de lancement?
- ★★★ 10. Une caisse de matériel de masse $m = 100 \text{ kg}$ glisse du repos le long d'une rampe de chargement inclinée à $\theta = 30^\circ$, sur une distance de $d = 6 \text{ m}$ le long de la rampe. Le coefficient de frottement cinétique est $\mu_c = 0,20$.
- Calculez la hauteur de descente h .
 - Calculez la force de frottement et le travail effectué par le frottement.
 - En utilisant le bilan énergétique ($E_i + W_{nc} = E_f$), déterminez la vitesse au bas de la rampe.
 - Quelle serait la vitesse sans frottement? Comparez.

C — Puissance

- ★ 11. Une grue portuaire soulève un conteneur de masse $m = 8000 \text{ kg}$ sur une hauteur de $h = 10 \text{ m}$ en $t = 25 \text{ s}$.
- Calculez le travail effectué contre la gravité.
 - Calculez la puissance mécanique moyenne de la grue.
 - Exprimez cette puissance en chevaux-vapeur ($1 \text{ ch} = 735,5 \text{ W}$).
- ★★ 12. Un cargo de $25\,000$ tonnes navigue à vitesse constante de $v = 14 \text{ nuds}$ ($\approx 7,20 \text{ m/s}$). La résistance totale (eau + air) est estimée à $F_r = 650 \text{ kN}$.
- Quelle puissance les moteurs doivent-ils fournir pour maintenir cette vitesse?
 - Exprimez cette puissance en MW et en chevaux-vapeur.
 - Si le navire réduit sa vitesse à 10 nuds ($\approx 5,14 \text{ m/s}$) et que la résistance diminue à 350 kN , quelle est la nouvelle puissance requise? Comparez avec la réponse en a).

★★ 13. Un ferry consomme une puissance motrice moyenne de $P = 6 \text{ MW}$ pendant une traversée de $t = 1,5 \text{ h}$.

- Calculez l'énergie consommée en MWh, en kWh et en MJ.
- Si le diesel marin fournit 42 MJ par litre et que le rendement global des moteurs est de $\eta = 38\%$, combien de litres de carburant sont consommés pendant la traversée?
- Si le ferry effectue 4 traversées par jour, quel est le coût quotidien en carburant si le diesel marin coûte $1,20 \text{ \$/L}$?

D — Quantité de mouvement et impulsion

★ 14. Calculez la quantité de mouvement de chacun des navires suivants et classez-les par ordre décroissant de difficulté à les arrêter.

Navire	Masse	Vitesse
Chalutier	200 tonnes	3 m/s
Traversier	5000 tonnes	8 m/s
Pétrolier (VLCC)	150 000 tonnes	7 m/s

★★ 15. Un traversier de masse $m = 10\,000 \text{ tonnes}$ accoste un quai à une vitesse de $v_i = 0,5 \text{ m/s}$. Les défenses du quai l'immobilisent en $\Delta t = 8 \text{ s}$.

- Calculez la variation de quantité de mouvement du traversier.
- Calculez la force moyenne exercée par les défenses sur le traversier.
- Si un accostage brutal réduit le temps de contact à 2 s , quelle serait la force moyenne? Commentez.

★★ 16. Un canon naval de masse $M = 8000 \text{ kg}$ tire un obus de masse $m = 30 \text{ kg}$ à une vitesse de 600 m/s .

- En utilisant la conservation de la quantité de mouvement, calculez la vitesse de recul du canon.
- Calculez l'énergie cinétique de l'obus et celle du canon. Comparez et expliquez la différence.

★★ 17. Un marin de 75 kg se tient debout à la poupe d'un canot de 150 kg , initialement au repos sur l'eau (frottement négligeable). Le marin marche vers la proue à $1,5 \text{ m/s}$ par rapport au sol.

- Quelle est la vitesse du canot par rapport au sol?
- Quelle est la vitesse du marin par rapport au canot?

E — Collisions

- ★★ 18. Une barge chargée ($m_A = 400$ tonnes, $v_A = 3$ m/s) rattrape une barge plus lourde ($m_B = 600$ tonnes, $v_B = 1$ m/s) se déplaçant dans la même direction. Les deux barges restent accrochées après le contact (collision parfaitement inélastique).
- Calculez la vitesse commune après la collision.
 - Calculez l'énergie cinétique avant et après la collision.
 - Quel pourcentage de l'énergie cinétique a été perdu? Où est passée cette énergie?
- ★★ 19. Un cargo ($m_1 = 25\,000$ tonnes, $v_1 = 4$ m/s vers l'est) entre en collision frontale avec un vraquier ($m_2 = 15\,000$ tonnes, $v_2 = 2$ m/s vers l'ouest). Les navires restent soudés après l'impact.
- Définissez un axe et attribuez les signes appropriés aux vitesses.
 - Calculez la vitesse de l'ensemble après la collision.
 - Calculez le pourcentage d'énergie cinétique perdue.
 - Si la collision dure $\Delta t = 3$ s, calculez la force moyenne subie par le vraquier.
- ★★★ 20. Deux chariots sur rail se déplacent sur le pont d'un navire. Le chariot A ($m_A = 200$ kg, $v_A = 4$ m/s) frappe le chariot B ($m_B = 100$ kg) initialement au repos. La collision est parfaitement élastique.
- Calculez les vitesses des deux chariots après la collision en utilisant la conservation de \vec{p} et la relation des vitesses relatives ($v_{1i} - v_{2i} = -(v_{1f} - v_{2f})$).
 - Vérifiez que l'énergie cinétique est effectivement conservée.
- ★★★ 21. Un traversier de masse $m = 5000$ tonnes heurte un quai (considéré comme infiniment massif) à une vitesse de $v_i = 0,8$ m/s. Le coefficient de restitution des défenses est $e = 0,40$.
- Calculez la vitesse du traversier après le rebond.
 - Calculez l'énergie cinétique avant et après le rebond.
 - Quel pourcentage de l'énergie cinétique est absorbé par les défenses?
 - Montrez que la fraction d'énergie conservée est e^2 .
- ★★★ 22. Deux navires entrent en collision en pleine mer (collision parfaitement inélastique en 2D) :
- Cargo : $m_1 = 15\,000$ tonnes, $v_1 = 5$ m/s, cap 090 (vers l'est)
 - Traversier : $m_2 = 5000$ tonnes, $v_2 = 8$ m/s, cap 000 (vers le nord)
- Choisissez un système d'axes et décomposez les quantités de mouvement initiales selon x et y .
 - Calculez les composantes v_{fx} et v_{fy} de la vitesse finale de l'ensemble.
 - Calculez le module et la direction (cap) de la vitesse finale.
 - Calculez le pourcentage d'énergie cinétique perdue lors de la collision.

F — Problèmes de synthèse***** 23. Opération de chargement au port**

Une grue portuaire soulève un conteneur de masse $m = 10\,000\text{ kg}$ d'une hauteur de $h = 12\text{ m}$ à vitesse constante de $v = 0,3\text{ m/s}$. Le rendement mécanique de la grue est de $\eta = 70\%$.

- Calculez le travail mécanique minimal effectué contre la gravité.
- Calculez l'énergie totale consommée par la grue, en tenant compte du rendement.
- Calculez la puissance mécanique fournie par la grue et la puissance électrique consommée.
- Le câble cède lorsque le conteneur est au sommet ($h = 12\text{ m}$). Calculez la vitesse d'impact sur le quai.
- Si le conteneur s'immobilise en s'enfonçant de $d = 0,50\text{ m}$ dans le quai, calculez la force moyenne d'impact. Combien de fois le poids du conteneur cela représente-t-il?

***** 24. Accostage et amarrage**

Un traversier de masse $m = 8000\text{ tonnes}$ approche un quai à $v_i = 0,6\text{ m/s}$.

- Calculez l'énergie cinétique du traversier à l'approche.
- Les défenses du quai ont un coefficient de restitution $e = 0,30$. Calculez la vitesse du traversier après le rebond et l'énergie absorbée par les défenses.
- Si la durée du contact avec les défenses est $\Delta t = 4\text{ s}$, calculez la force moyenne exercée sur le traversier.
- Après le rebond, le traversier s'éloigne du quai. La résistance de l'eau exerce une force moyenne de $F_r = 20\text{ kN}$. Quelle distance parcourt-il avant de s'immobiliser?
- Quelle puissance les moteurs du traversier devraient-ils fournir pour maintenir une vitesse de $0,6\text{ m/s}$ contre cette même résistance de 20 kN ?

***** 25. Scénario d'abordage**

Un cargo ($m_1 = 15\,000\text{ tonnes}$, cap 090 , vitesse 5 m/s) et un traversier ($m_2 = 5000\text{ tonnes}$, cap 000 , vitesse 8 m/s) entrent en collision. Les navires restent enchevêtrés (collision parfaitement inélastique).

- Calculez la vitesse (module et cap) de l'ensemble après la collision.
- Calculez l'énergie cinétique perdue. Identifiez les formes sous lesquelles cette énergie s'est transformée.
- Si la collision dure $\Delta t = 2\text{ s}$, calculez le module de la force moyenne subie par le traversier pendant l'impact.
- Après la collision, la résistance de l'eau exerce une force de $F_r = 100\text{ kN}$ sur l'ensemble. En utilisant le théorème de l'énergie cinétique, calculez la distance parcourue avant l'arrêt complet.
- Convertissez cette distance en milles nautiques et commentez les implications pour les opérations de sauvetage.

Réponses

Section A — Travail et théorème de l'énergie cinétique

1. a) $W = Fd = 150 \times 10^3 \text{ N} \times 250 \text{ m} = 37,5 \text{ MJ}$ b) Positif : le remorqueur ajoute de l'énergie au pétrolier.

2. a) Positif ($\theta = 0$). b) Négatif ($\theta = 180$). c) Nul ($\theta = 90$). d) Négatif (force vers le bas, déplacement vers le haut, $\theta = 180$). e) Positif ($\cos 20 > 0$).

3. a) $W_T = Td \cos \theta = 200 \times 12 \times \cos 30 = 200 \times 12 \times 0,866 \approx 2078 \text{ J}$

b) $N = mg - T \sin \theta = 40 \times 9,8 - 200 \times 0,5 = 392 - 100 = 292 \text{ N}$; $f = \mu_c N = 0,20 \times 292 = 58,4 \text{ N}$

c) $W_f = -fd = -58,4 \times 12 = -701 \text{ J}$

d) $W_{total} = 2078 - 701 = 1377 \text{ J}$ (la caisse accélère)

4. a) $W_T = Td = 4000 \times 8 = 32\,000 \text{ J}$

b) $\Delta y = d \sin 25 = 8 \times 0,4226 = 3,38 \text{ m}$; $W_g = -mg\Delta y = -500 \times 9,8 \times 3,38 = -16\,562 \text{ J}$

c) $N = mg \cos 25 = 500 \times 9,8 \times 0,9063 = 4441 \text{ N}$; $f = 0,15 \times 4441 = 666 \text{ N}$; $W_f = -666 \times 8 = -5330 \text{ J}$

d) $W_{total} = 32\,000 - 16\,562 - 5330 = 10\,108 \text{ J}$ (le conteneur accélère)

5. a) $K_i = \frac{1}{2}mv_i^2 = \frac{1}{2} \times 20 \times 10^6 \text{ kg} \times (5,14)^2 = 264 \text{ MJ}$

b) $W_{total} = \Delta K \Rightarrow -Fd = 0 - K_i \Rightarrow d = \frac{K_i}{F} = \frac{264 \times 10^6}{400 \times 10^3} = 660 \text{ m}$

c) $d = 660 \text{ m} \div 1852 \approx 0,36 \text{ NM}$

Section B — Énergie potentielle et conservation de l'énergie

6. a) $U_g = mgy = 1500 \times 9,8 \times 20 = 294 \text{ kJ}$

b) $U_g = 10\,000 \times 9,8 \times 15 = 1,47 \text{ MJ}$

c) $\Delta U_g = mg(y_f - y_i) = 10\,000 \times 9,8 \times (5 - 15) = -980 \text{ kJ}$; $W_g = -\Delta U_g = 980 \text{ kJ}$

7. a) $\frac{1}{2}mv^2 = mgh \Rightarrow v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 9,8 \times 25} = \sqrt{490} = 22,1 \text{ m/s}$

b) $v = 22,1 \times 3,6 = 79,6 \text{ km/h}$

c) Non, la masse s'annule dans $v = \sqrt{2gh}$.

8. a) $h = L \sin 30 = 10 \times 0,5 = 5 \text{ m}$

b) $v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 9,8 \times 5} = \sqrt{98} = 9,9 \text{ m/s}$

c) $\frac{1}{2}mv^2 = mgL \sin 30 \Rightarrow L = \frac{v^2}{2g \sin 30} = \frac{144}{2 \times 9,8 \times 0,5} = 14,7 \text{ m}$

9. a) $U_e = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2} \times 5000 \times (0,40)^2 = 400 \text{ J}$

b) $\frac{1}{2}mv^2 = U_e \Rightarrow v = \sqrt{2U_e/m} = \sqrt{2 \times 400/2} = \sqrt{400} = 20 \text{ m/s}$

c) $v \propto x$, donc pour doubler v , il faut doubler x : $x = 0,80 \text{ m}$.

10. a) $h = d \sin 30 = 6 \times 0,5 = 3 \text{ m}$

b) $N = mg \cos 30 = 100 \times 9,8 \times 0,866 = 849 \text{ N}$; $f = 0,20 \times 849 = 170 \text{ N}$; $W_f = -170 \times 6 = -1020 \text{ J}$

c) $mgh + W_f = \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow 100 \times 9,8 \times 3 - 1020 = 50 v^2 \Rightarrow 1920 = 50 v^2 \Rightarrow v = 6,2 \text{ m/s}$

d) $v = \sqrt{2gh} = \sqrt{58,8} = 7,7 \text{ m/s}$. Le frottement réduit la vitesse d'environ 19%.

Section C — Puissance

11. a) $W = mgh = 8000 \times 9,8 \times 10 = 784\,000 \text{ J} = 784 \text{ kJ}$

b) $P = W/t = 784\,000/25 = 31,4 \text{ kW}$

c) $P = 31\,360/735,5 \approx 42,6 \text{ ch}$

12. a) $P = F_r \times v = 650 \times 10^3 \times 7,20 = 4,68 \text{ MW}$

b) $4,68 \text{ MW} \approx 6360 \text{ ch}$

c) $P' = 350\,000 \times 5,14 = 1,80 \text{ MW} \approx 2450 \text{ ch}$. Réduire la vitesse de 30% diminue la puissance requise de 62%.

13. a) $E = 6 \times 1,5 = 9 \text{ MWh} = 9000 \text{ kWh} = 9000 \times 3,6 = 32\,400 \text{ MJ}$

b) Énergie carburant nécessaire = $32\,400/0,38 = 85\,263 \text{ MJ}$; $V = 85\,263/42 \approx 2030 \text{ L}$

c) Coût quotidien = $4 \times 2030 \times 1,20 = 9744 \text{ \$}$

Section D — Quantité de mouvement et impulsion

14. Chalutier : $p = 200\,000 \times 3 = 6,0 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$; Traversier : $p = 5 \times 10^6 \times 8 = 4,0 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$;
Pétrolier : $p = 150 \times 10^6 \times 7 = 1,05 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$.

Ordre : Pétrolier \gg Traversier \gg Chalutier.

15. a) $\Delta p = mv_f - mv_i = 0 - 10 \times 10^6 \times 0,5 = -5,0 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$

b) $F_{\text{moy}} = \Delta p / \Delta t = -5,0 \times 10^6 / 8 = -625 \text{ kN}$; $|\vec{F}| = 625 \text{ kN}$

c) $F_{\text{moy}} = -5,0 \times 10^6 / 2 = -2,5 \text{ MN}$. La force est 4 fois plus grande! L'amortissement réduit les forces d'impact.

16. a) $0 = mv_{\text{obus}} + Mv_{\text{canon}} \Rightarrow v_{\text{canon}} = -\frac{30 \times 600}{8000} = -2,25 \text{ m/s}$ (recul)

b) $K_{\text{obus}} = \frac{1}{2}(30)(600)^2 = 5,40 \text{ MJ}$; $K_{\text{canon}} = \frac{1}{2}(8000)(2,25)^2 = 20,3 \text{ kJ}$.

L'obus reçoit 99,6% de l'énergie : à quantité de mouvement égale, l'objet le plus léger a la plus grande énergie cinétique ($K = p^2/2m$).

17. a) $0 = 75 \times 1,5 + 150 \times v_{\text{canot}} \Rightarrow v_{\text{canot}} = -0,75 \text{ m/s}$ (vers la poupe)

b) $v_{rel} = 1,5 - (-0,75) = 2,25 \text{ m/s}$

Section E — Collisions

18. a) $v_f = \frac{m_A v_A + m_B v_B}{m_A + m_B} = \frac{400\,000 \times 3 + 600\,000 \times 1}{1\,000\,000} = 1,8 \text{ m/s}$

b) $K_i = \frac{1}{2}(400\,000)(9) + \frac{1}{2}(600\,000)(1) = 1800 + 300 = 2100 \text{ kJ}; \quad K_f = \frac{1}{2}(1\,000\,000)(1,8)^2 = 1620 \text{ kJ}$

c) $\%_{\text{perdu}} = \frac{2100 - 1620}{2100} \times 100 = 22,9\%$. Énergie transformée en déformation des structures et chaleur.

19. a) Axe x positif vers l'est : $v_1 = +4 \text{ m/s}$, $v_2 = -2 \text{ m/s}$.

b) $v_f = \frac{25 \times 10^6 \times 4 + 15 \times 10^6 \times (-2)}{40 \times 10^6} = \frac{100 - 30}{40} = 1,75 \text{ m/s}$ (vers l'est)

c) $K_i = \frac{1}{2}(25 \times 10^6)(16) + \frac{1}{2}(15 \times 10^6)(4) = 200 + 30 = 230 \text{ MJ}$

$K_f = \frac{1}{2}(40 \times 10^6)(1,75)^2 = 61,3 \text{ MJ}; \quad \%_{\text{perdu}} = \frac{230 - 61,3}{230} \times 100 = 73,3\%$

d) $\Delta p_{vr} = m_2(v_f - v_{2i}) = 15 \times 10^6 \times (1,75 - (-2)) = 15 \times 10^6 \times 3,75 =$