

Physique 1 – Mécanique

Exercices

Institut Maritime du Québec

Hiver 2026

Table des matières

1 Exercices - Chapitre 1 : Cinématique	5
Exercices	5
2 Exercices - Chapitre 2 : Dynamique et statique	23
Exercices	23

Chapitre 1

Exercices - 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

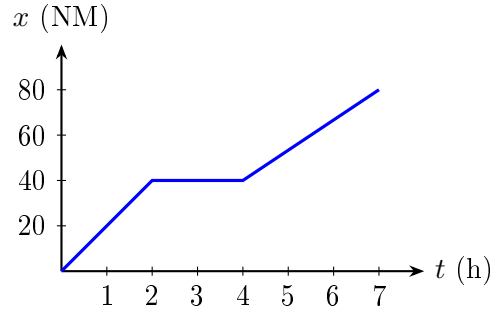
- ★ 1. Un navire-citerne part du terminal A (position $x = 0$), se rend au terminal B situé à 15 km à l'est, puis revient au terminal C situé à 8 km à l'est de A.
 - a) Quelle est la distance totale parcourue?
 - b) Quel est le déplacement du navire?
- ★ 2. Un remorqueur effectue les déplacements suivants 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?

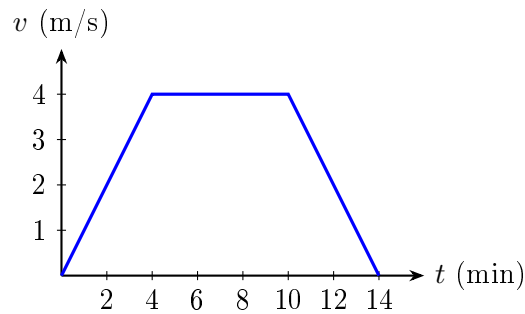
Graphiques

- ★★ 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)?

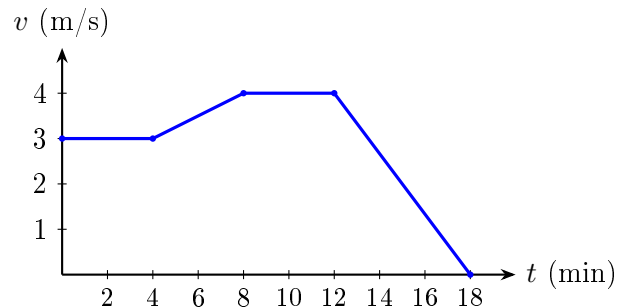
★★ 15. Le graphique suivant montre la vitesse d'un cargo en fonction du temps :



- 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).

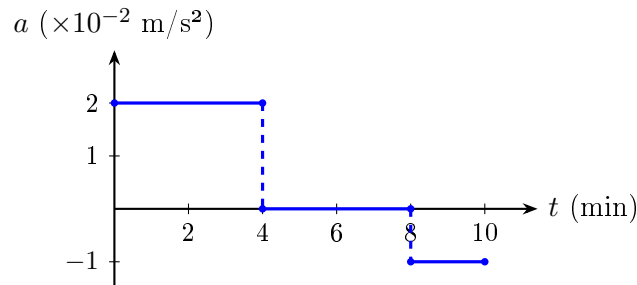
★★★ 16. **Expliquez** pourquoi, sur un graphique position-temps $x(t)$, une pente négative signifie que l'objet se déplace dans le sens négatif, et non pas qu'il recule nécessairement.

★★ 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.

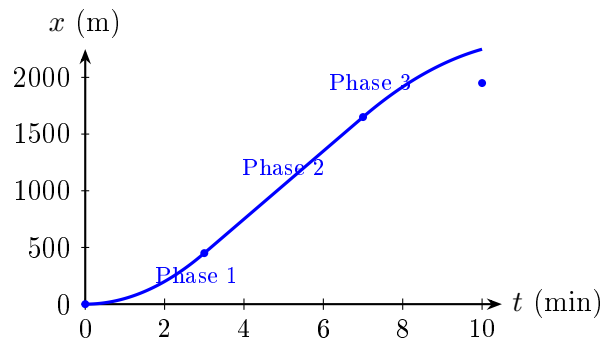
*** 18. Un cargo quitte le port de Montréal. Voici le graphique de son accélération en fonction du temps pendant les 10 premières minutes :



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

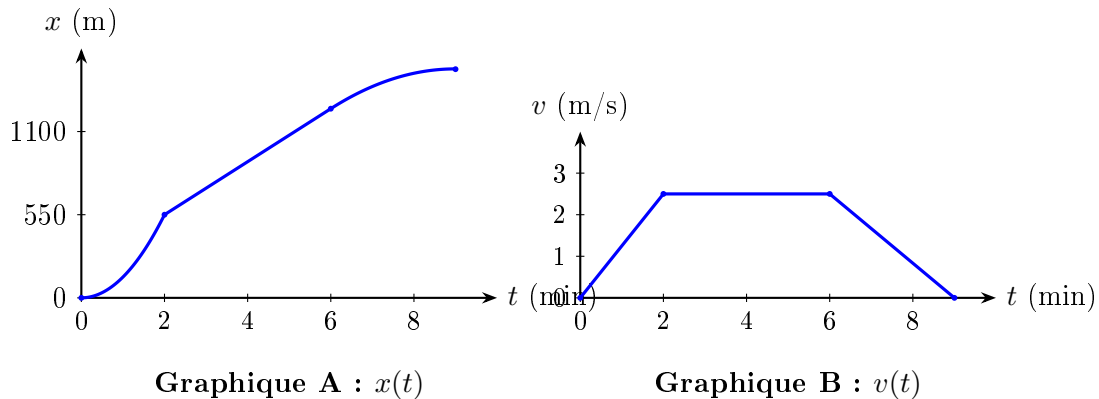
- Calculez la vitesse du cargo à $t = 4$ min.
- Calculez la vitesse du cargo à $t = 8$ min.
- Calculez la vitesse du cargo à $t = 10$ min.
- Tracez** le graphique $v(t)$ correspondant.

*** 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.

*** 19B. Défi – lecture croisée $x(t)$ et $v(t)$. On étudie un traversier se déplaçant le long d'un axe x (vers l'est positif). Voici les deux graphiques :



- Sur le graphe $x(t)$, à quel(s) instant(s) l'accélération est-elle nulle? Justifiez.
- Sur le graphe $v(t)$, indiquez les intervalles où l'accélération est positive, nulle et négative.
- Les deux graphes sont-ils compatibles? Donnez deux arguments (pentes et aires).
- Sans calculs détaillés, pendant quel intervalle le traversier parcourt-il la plus grande distance : $[0, 2]$, $[2, 6]$ ou $[6, 9]$? Justifiez.
- À $t = 6$ min, comparez la vitesse instantanée (pente de $x(t)$) et la vitesse moyenne sur $[0, 6]$.

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.
 - Combien de temps dure la phase d'accélération?
 - Quelle distance parcourt-il pendant cette phase?
- ★★ **23.** Un cargo navigue à 15 nuds. Le capitaine ordonne le freinage avec $a = -0,006 \text{ m/s}^2$.
 - Quelle est la distance de freinage?
 - 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.
 - Quelle décélération constante doit-il appliquer?
 - Combien de temps dure la manœuvre?
 - 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 ($y_0 = 5 \text{ m}$) 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/s^2 ?
- 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.

- a) Quelle distance parcourt le navire pendant la première phase?
- b) Quelle distance parcourt-il pendant la seconde phase?
- c) 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 $0,015 \text{ m/s}^2$ jusqu'à l'arrêt.

- a) Quelle distance le navire parcourt-il pendant le temps de réaction?
- b) Quelle distance parcourt-il pendant le freinage?
- c) À quelle distance totale du point de chute le navire s'arrête-t-il?

-
- d) 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.

- a) À quelle distance horizontale **avant** le naufragé l'hélicoptère doit-il larguer la bouée?
- b) Avec quelle vitesse (module et direction) la bouée touche-t-elle l'eau?
- c) 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?
- d) 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.

- a) Quelle est l'accélération angulaire pendant la phase d'accélération?
- b) À quelle vitesse linéaire le conteneur monte-t-il en régime permanent?
- c) Quelle hauteur le conteneur atteint-il après 5 s?
- d) 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'assurance, 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.

- Quelle distance le véhicule en infraction parcourt-il pendant le temps de réaction de la police?
- Combien de temps la voiture de police met-elle pour atteindre 160 km/h?
- À quel moment (depuis le passage du véhicule) la police rattrape-t-elle le fuyard?
- 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 $a_B = -0,005 \text{ m/s}^2$.

- Calculez le temps et la distance de freinage de chaque navire.
- Les navires s'arrêtent-ils avant de se percuter?
- Si collision il y a, calculez la position de l'impact et les vitesses des navires à ce moment.
- Quelle décélération minimale le navire A aurait-il dû appliquer pour éviter la collision (B gardant la même décélération)?

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.

- Quelle est la hauteur maximale atteinte par le poids?
- Quelle est la portée horizontale (distance officielle du lancer)?
- À quel angle le poids devrait-il être lancé pour maximiser la portée?
- 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.

- Quelle distance a-t-il parcourue pendant les 8 premières heures?
- Combien de temps dure la phase d'accélération?
- À quelle heure arrive-t-il à Rimouski?
- 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 $h_1 = 8$ m) doit envoyer une amarre sur un quai situé à 25 m horizontalement. Le quai est à une hauteur $h_2 = 3$ m au-dessus de l'eau. Le lance-amarre propulse la ligne à $v_0 = 30$ m/s.

- Quelle est la différence de hauteur Δy entre le point de tir et le point d'arrivée?
- Déterminez l'angle minimal θ_{min} permettant d'atteindre le quai. (*Indice : vous devrez résoudre une équation du second degré en $\tan \theta$*)
- Pour cet angle minimal, calculez le temps de vol de l'amarre.
- Il existe un deuxième angle θ_{max} qui permet aussi d'atteindre la cible. Lequel des deux angles est préférable en pratique? Justifiez.
- Si le navire s'approche du quai à 0,5 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 $0,02$ m/s²
 - Le navire B est à 5 km à l'est, navigue vers l'ouest à 8 nuds et maintient cette vitesse
- Écrivez les équations de position $x_A(t)$ et $x_B(t)$ pour chaque navire.
 - À quel instant et à quelle position les navires se rencontrent-ils?
 - Quelle est la vitesse du navire A au moment du rendez-vous?
 - Quelle est la vitesse **relative** du navire A par rapport au navire B à cet instant? Interprétez physiquement.
 - Si le navire A doit s'arrêter au point de rendez-vous avec une décélération de $0,015$ m/s², 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 $a_1 = 0,01$ m/s²
- Phase 2 : Vitesse constante de 6 nuds pendant 15 min
- Phase 3 : Accélération de 6 nuds à 12 nuds avec $a_3 = 0,008$ m/s²
- Phase 4 : Vitesse constante de 12 nuds jusqu'à destination

La destination est à 10 km du point de départ.

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

- a) Si P navigue directement vers la position actuelle de S, expliquez pourquoi il ne l'interceptera jamais.
- b) 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.
- c) Pour une interception, les positions doivent coïncider. Établissez les deux équations (en x et en y) qui doivent être satisfaites.
- d) Par essai-erreur ou graphiquement, estimez l'angle θ optimal et le temps d'interception. (*La solution analytique exacte dépasse le cadre du cours.*)
- e) 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 s pour réagir et courir 3 m?
- Le conteneur a des dimensions 6 m \times 2,4 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 $y = 4$ 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.*)
- Combien de temps dure la traversée?
- 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 m/s² jusqu'à une vitesse maximale de 25 nuds.

- Si le garde-côte navigue directement vers le nord (perpendiculairement), interceptera-t-il le cargo? Justifiez.
- 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. $d = 650 \text{ m}$, $\Delta x = 350 \text{ m}$ vers l'est
- 3. a) 17 km b) $|\Delta \vec{r}| = 13 \text{ km}$

4. a) Faux (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) $\approx 9\text{h}43$ 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 décroissants

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 m/s

29. a) 2,26 s b) 22,1 m/s

30. a) 1,05 s b) 13,3 m/s

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

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

33. La balle B (lancée) a une plus grande vitesse car elle a eu le temps d'accélérer depuis le sol

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 rad/s

41. 31,4 m/s \approx 113 km/h

42. a) 8,5 tours b) 20,4 s

43. a) 0,628 rad/s² b) 20 tours

44. a) 25,1 m/s \approx 90 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) 521 m

S3. a) 71,4 m b) $v = 37,5 \text{ m/s}$ à 41,8 sous l'horizontale c) Réduit de 5,7 m (larguer à 65,7 m)
d) 63,9 m

S4. a) 0,628 rad/s² b) 0,785 m/s c) 0,98 m d) 1,56 s

S5. a) 24,4 m b) 52 m c) Oui, s'arrête à 3,6 m de l'obstacle d) 19,4 m/s \approx 70 km/h

S6. a) 4,9 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) $t \approx 38 \text{ s}$ d) Police : 1270 m ; Fuyard : 1270 m

S8. a) A: $t = 901 \text{ s}$, $d = 3246 \text{ m}$; B: $t = 1029 \text{ s}$, $d = 2646 \text{ m}$ b) Non, collision c) Position \approx 940 m de A; $v_A \approx 4,6 \text{ m/s}$, $v_B \approx 3,2 \text{ m/s}$ d) $a_A \geq -0,035 \text{ m/s}^2$

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 $0,7 \text{ m}$

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, $t \approx 620 \text{ s}$ e) $\approx 6,2 \text{ km}$

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

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) $\approx 780 \text{ m}$ 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) $t \approx 264 \text{ s}$ pour atteindre $y = 800 \text{ m}$ d) $x_{GC} \approx 523 \text{ m}$, $x_C \approx 1629 \text{ m}$ – le cargo est loin devant e) $\theta \approx 55$ à 60 est du nord

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

Chapitre 2

Exercices - Chapitre 2 : Dynamique et statique

Exercices

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 = $0,514 \text{ m/s}$

Dynamique – Niveau 1 (Application directe)

1. Une balle de fusil de 10 g qui se déplace à 400 m/s s'arrête après avoir pénétré de 3 cm dans un bloc de bois. Trouvez le module de la force agissant sur la balle, en la supposant constante.

Réponse : 26,7 kN

2. (**Maritime**) Sur un quai, un treuil tire une caisse de 60 kg à l'aide d'un câble formant un angle de 20° au-dessus de l'horizontale. La tension dans le câble est de 440 N et la force de frottement entre la caisse et le quai est de 302 N.

(a) Quelle est la grandeur de la force normale?

(b) Quelle est l'accélération de la caisse?

Réponses : a) 438 N b) 1,85 m/s²

3. (**Maritime**) Lorsqu'il n'est pas brisé, le F.A. Gauthier ($m = 5000$ tonnes métriques) peut passer de 0 à 10,0 nœuds en 120 s.

- (a) En supposant que son accélération soit constante, déterminez la force de poussée de ses moteurs azimutaux. Négligez le frottement avec l'eau.
- (b) Quelle est la force de frottement du navire avec l'eau si sa vitesse maximale est de 20 nœuds lorsque les moteurs fonctionnent à plein régime?

Réponses : a) 214 kN b) 214 kN

4. **(Maritime)** Un conteneur de 10 tonnes est arrimé sur le pont d'un navire. Le navire décélère à raison de $0,6 \text{ m/s}^2$ lors d'une manœuvre d'urgence. Quelle est la force de frottement minimale requise pour que le conteneur ne glisse pas?

Réponse : 60 kN

Dynamique – Niveau 2 (Plans inclinés et frottement)

5. Le Père Noël tire son lourd traîneau (490 kg) afin de monter une pente bien glacée (frottement négligeable). L'angle de la pente est $\theta = 18$ et l'angle de la corde par rapport à la pente est $\beta = 26$.
- (a) Quelle tension le Père Noël doit-il appliquer pour que le traîneau se déplace à vitesse constante?
 - (b) Quelle est l'accélération du traîneau si $T = 1 \text{ kN}$?

Réponses : a) 1,65 kN b) 1,20 m/s² vers le bas de la pente

6. **(Maritime)** Une palette de 200 kg glisse du repos sur une rampe de chargement inclinée à 35° . Après avoir parcouru 3 m sur la rampe, sa vitesse est de 1 m/s. Quelle était la force de frottement sur la rampe?

Réponse : 1090 N

7. **(Maritime)** Un baril de 30 kg part du repos à une hauteur de 60 cm sur une rampe inclinée à 30° menant à la cale d'un navire. Un frottement de 51 N s'exerce pendant la descente, puis un frottement de 59 N sur le plancher horizontal de la cale. À quelle distance du bas de la rampe le baril s'immobilise-t-il?

Réponse : 1,96 m

8. **(Maritime)** Une caisse de marchandise (400 kg) est sur une passerelle de navire inclinée à 35° . Quel est le coefficient de frottement statique minimal entre la caisse et la passerelle afin que la caisse ne glisse pas?

Réponse : 0,700

Dynamique – Niveau 3 (Systèmes de poulies)

9. **(Machine d'Atwood)** Deux masses ($m_1 = 4 \text{ kg}$, $m_2 = 6 \text{ kg}$) sont suspendues de part et d'autre d'une poulie de masse négligeable pouvant tourner sans frottement.
- (a) Quelle est la tension dans la corde qui relie les deux masses?
 - (b) Quelle est l'accélération de chaque masse?

(c) Quelle est la vitesse du bloc m_1 après avoir monté de 1 m par rapport à sa position au repos?

(d) Quelle est la force que la poulie exerce sur le plafond?

Réponses : a) 47,1 N b) 1,96 m/s² c) 1,98 m/s d) 94,2 N

10. **(Maritime)** Sur un quai, une caisse de 30 kg est reliée par une corde passant par une poulie à un contrepoids de 20 kg suspendu au-dessus de l'eau. La surface du quai est sans frottement.

(a) Quelle est l'accélération du système?

(b) Quelle est la tension dans la corde?

Réponses : a) 3,92 m/s² b) 118 N

11. **(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 $\mu_c = 0,2$. Elle est reliée par une corde passant par une poulie au sommet de la rampe à un contrepoids de 30 kg suspendu dans le vide. Si le système est relâché du repos :

(a) Dans quelle direction le système se met-il en mouvement?

(b) Quelle est l'accélération du système?

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

Mouvement circulaire

12. Une automobile prend un virage horizontal de rayon 25 m. Le coefficient de frottement statique entre les pneus et la route est $\mu_s = 0,5$. Quelle est la vitesse maximale à laquelle l'automobile peut prendre ce virage sans déraper?

Réponse : 39,9 km/h

13. Un satellite de 800 kg est en orbite circulaire autour de la Terre à une altitude de 400 km.

(a) Quelle est la force gravitationnelle agissant sur le satellite?

(b) Quelle est l'accélération gravitationnelle à cette altitude?

(c) À quelle vitesse tangentielle le satellite doit-il se déplacer pour conserver son orbite?

(d) En combien de temps ce satellite fait-il une révolution complète?

Réponses : a) 7,38 kN b) 9,23 m/s² c) 27 800 km/h d) 92 min 21 s

14. **(Maritime)** Un navire de croisière passe par le sommet d'une vague dont le profil a un rayon de courbure de 50 m. Quelle est la vitesse maximale du navire pour que les passagers restent en contact avec le pont?

Réponse : 79,8 km/h (43,1 nœuds)

15. Quelle serait la durée d'un jour si une personne située à l'équateur avait un poids apparent nul? Le rayon moyen de la Terre est de 6378 km.

Réponse : 84 min 26 s

16. Un enfant de 25 kg est assis sur un siège de manège qui tourne en cercle horizontal de rayon 4 m. Le siège est suspendu par des chaînes qui font un angle de 30° avec la verticale lorsque le manège tourne.

- (a) Quelle est la vitesse du manège?
 (b) Quelle est la tension dans les chaînes?

Réponses : a) $4,75 \text{ m/s}$ ($17,1 \text{ km/h}$) b) 283 N

17. Une balle de 0,5 kg est attachée à une corde de 1,2 m et tourne en cercle horizontal (pendule conique). La corde fait un angle de 20° avec la verticale.

- (a) Quelle est la vitesse de la balle?
 (b) Quelle est la période de rotation?

Réponses : a) $1,21 \text{ m/s}$ b) $2,13 \text{ s}$

Statique (Équilibre)

Les figures suivantes accompagnent les problèmes de statique :

Figure 1

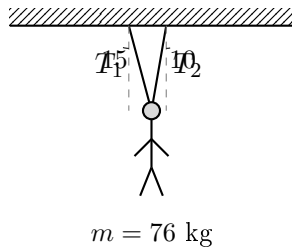


Figure 2

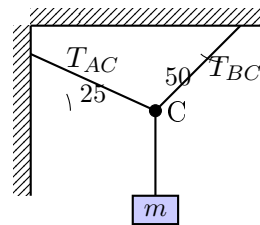


Figure 3

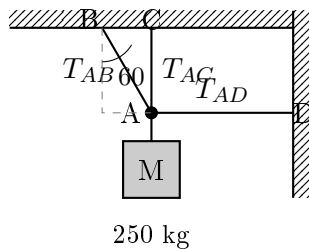


Figure 4

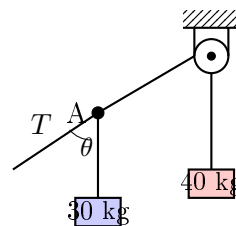
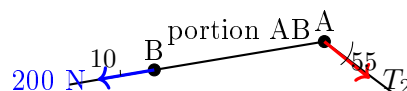


Figure 5



18. Une trapéziste suspendue à un câble a une masse de 76 kg. Le câble de gauche fait un angle de 75° avec l'horizontale (15° avec la verticale) et celui de droite fait un angle de 80° avec l'horizontale (10° avec la verticale) (Figure 1). Déterminez les tensions T_1 et T_2 .

Réponses : $T_1 = 306 \text{ N}$; $T_2 = 457 \text{ N}$

19. **(Maritime)** Un moteur diesel de 250 kg est suspendu dans la salle des machines d'un navire par trois câbles (Figure 3). Le câble AC est vertical. Le câble AB fait un angle de 60° avec l'horizontale et le câble AD est horizontal (attaché à la cloison).

- Déterminez la tension dans les câbles AC, AB et AD.
- La composante verticale de la tension dans le câble AB suffit à supporter le poids du moteur. À quoi sert la tension dans le câble AD?

Réponses : a) $T_{AC} = 2,45 \text{ kN}$; $T_{AB} = 4,90 \text{ kN}$; $T_{AD} = 4,24 \text{ kN}$

20. **(Maritime)** Dans un système d'amarrage au port (Figure 4), deux charges de 30 kg et 40 kg sont reliées par un câble passant par une poulie. Un autre câble est attaché au nœud A. Déterminez la tension T dans ce câble ainsi que son orientation θ par rapport à l'horizontale.

Réponses : $T = 427 \text{ N}$; $\theta = 62,2$

21. **(Maritime)** Deux matelots maintiennent une charge en équilibre à l'aide de câbles sur le pont (Figure 5). L'un d'eux tire avec une force de 200 N à 10° sous l'horizontale. Déterminez la tension exercée par l'autre matelot ainsi que celle dans la portion AB du câble si le système est en équilibre.

Réponses : $T_2 = 51,7 \text{ N}$; $T_{AB} = 988 \text{ N}$

Problèmes de synthèse

Figure 6 — Conteneur soulevé

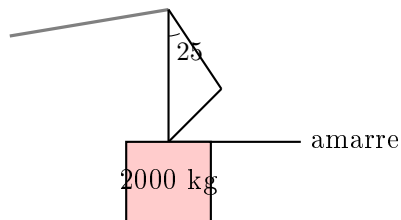
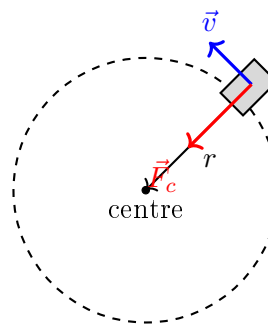


Figure 7 — Navire en virage



22. **(Contexte maritime — Figure 6)** Un conteneur de 2000 kg est soulevé par une grue à bord d'un navire. Le câble de la grue fait un angle de 25° 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) $T = 21,6 \text{ kN}$ c) $T_h = 9,14 \text{ kN}$

23. (**Contexte maritime — Figure 7**) Un navire de 15 000 tonnes effectue un virage de rayon 800 m à une vitesse de 12 nœuds.

- (a) Quelle force centripète est nécessaire pour ce virage?
- (b) Cette force est fournie par la résistance latérale de l'eau sur la coque. Si cette résistance maximale est de 500 kN, quelle est la vitesse maximale à laquelle le navire peut effectuer ce virage?

Réponses : a) $F_c = 714 \text{ kN}$ b) $v_{max} = 14,7 \text{ nœuds}$

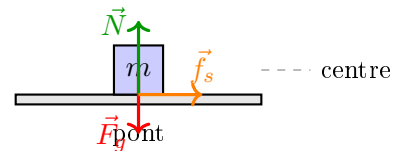
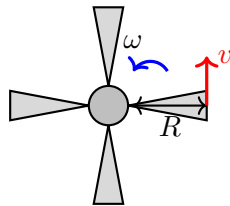
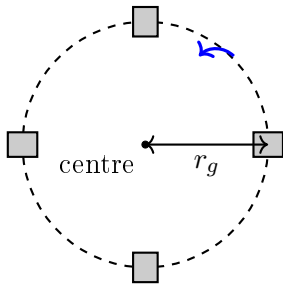
24. (**Problème combiné**) Une caisse de 50 kg est posée sur le pont d'un navire. Le coefficient de frottement statique entre la caisse et le pont est $\mu_s = 0,35$.

- (a) Si le navire accélère en ligne droite, quelle est l'accélération maximale avant que la caisse ne glisse?
- (b) Si le navire effectue un virage à vitesse constante de 8 nœuds, quel est le rayon minimal du virage pour que la caisse ne glisse pas?

Réponses : a) $a_{max} = 3,43 \text{ m/s}^2$ b) $r_{min} = 4,93 \text{ m}$

Mouvement circulaire — Applications maritimes

Figure 8 — Rayon de giration Figure 9 — Hélice de navire Figure 10 — Cargaison en virage



25. (**Rayon de giration — Figure 8**) Un pétrolier de 80 000 tonnes métriques effectue un virage avec un rayon de giration de 600 m. Sa vitesse est de 15 nœuds.

- (a) Quelle est la force centripète nécessaire pour maintenir ce virage?
- (b) En combien de temps le navire effectue-t-il un virage de 180° ?
- (c) Si le capitaine réduit la vitesse à 10 nœuds, quelle sera la nouvelle force centripète?

Réponses : a) $F_c = 7,93 \text{ MN}$ b) $t = 4 \text{ min } 5 \text{ s}$ c) $F_c = 3,53 \text{ MN}$

26. (**Hélice — Figure 9**) L'hélice d'un navire a un diamètre de 6 m et tourne à 120 RPM.

- (a) Quelle est la vitesse angulaire de l'hélice en rad/s?
- (b) Quelle est la vitesse linéaire de l'extrémité des pales?

(c) Quelle est l'accélération centripète subie par un point à l'extrémité d'une pale?

Réponses : a) $\omega = 12,6 \text{ rad/s}$ b) $v = 37,7 \text{ m/s}$ (136 km/h) c) $a_c = 474 \text{ m/s}^2$

27. (**Cargaison en virage — Figure 10**) Un conteneur de 12 tonnes est arrimé sur le pont d'un navire. Le coefficient de frottement statique entre le conteneur et le pont est $\mu_s = 0,45$.

(a) Si le navire effectue un virage de rayon 500 m, quelle est la vitesse maximale pour que le conteneur ne glisse pas?

(b) À 8 nœuds, quel est le rayon de virage minimal sécuritaire?

Réponses : a) $v_{max} = 28,9 \text{ nœuds}$ b) $r_{min} = 3,84 \text{ m}$

28. (**Manœuvre d'urgence**) Un traversier de 5000 tonnes navigue à 18 nœuds et doit effectuer un virage d'urgence. La force latérale maximale que l'eau peut exercer sur la coque est de 800 kN.

(a) Quel est le rayon de virage minimal possible?

(b) Si le capitaine veut un rayon de 400 m, à quelle vitesse maximale peut-il effectuer le virage?

(c) Combien de temps faudra-t-il pour effectuer un demi-tour (180°) au rayon minimal?

Réponses : a) $r_{min} = 535 \text{ m}$ b) $v_{max} = 15,6 \text{ nœuds}$ c) $t = 3 \text{ min } 2 \text{ s}$

29. (**Câble de remorquage**) Un remorqueur tire un barge de 2000 tonnes en effectuant un virage de rayon 300 m à une vitesse de 6 nœuds. La tension dans le câble de remorquage doit fournir à la fois :

- La force de propulsion : 50 kN (pour vaincre la résistance de l'eau)
- La force centripète nécessaire au virage

(a) Quelle force centripète est nécessaire pour maintenir la barge dans le virage?

(b) Quelle doit être la tension totale dans le câble si celui-ci est orienté vers le centre du virage? (Considérez que les deux forces s'ajoutent vectoriellement.)

Réponses : a) $F_c = 63,5 \text{ kN}$ b) $T = 80,9 \text{ kN}$

30. (**Stabilité en mer agitée**) Une bouée météorologique de 500 kg est attachée à son ancrage. Elle subit un mouvement circulaire vertical dû aux vagues. L'amplitude du mouvement est de 3 m et la période des vagues est de 8 s.

(a) Quelle est la vitesse maximale de la bouée?

(b) Quelle est l'accélération centripète maximale?

(c) À quel moment du cycle la tension dans le câble d'ancrage est-elle maximale? Quelle est cette tension?

Réponses : a) $v_{max} = 2,36 \text{ m/s}$ b) $a_c = 1,85 \text{ m/s}^2$ c) Au point le plus bas; $T_{max} = 5,83 \text{ kN}$

Pratique autonome de synthèse — Manœuvre de navire

Le traversier *Saaremaa I* ($m = 8500$ tonnes) quitte le port de Rimouski à destination de Forestville. Pendant la traversée :

1. Le navire accélère de 0 à 12 nœuds en 90 secondes. Quelle force de poussée les moteurs doivent-ils fournir? (Négligez la résistance de l'eau.)
2. À vitesse constante de 12 nœuds, le navire effectue un virage de rayon 400 m. Quelle force centripète l'eau doit-elle exercer sur la coque?
3. Sur le pont, un véhicule de 1800 kg n'est pas arrimé. Quel est le coefficient de frottement statique minimal requis pour qu'il ne glisse pas pendant le virage?
4. Si une bourrasque de vent exerce une force latérale supplémentaire de 50 kN sur le navire pendant le virage, le véhicule glissera-t-il? ($\mu_s = 0,45$ entre les pneus et le pont)

Réponses :

1. $F = 583$ kN
2. $F_c = 810$ kN
3. $\mu_{s,min} = 0,097$
4. Force sur le véhicule : $F_{vent/vhicule} = 50 \times \frac{1800}{8,5 \times 10^6} = 10,6$ N (négligeable). Force centripète requise : 172 N. Force de frottement max disponible : $0,45 \times 1800 \times 9,81 = 7,95$ kN. Non, le véhicule ne glissera pas.