Calculatrice autorisée

Exercice 1 : Une terre colorante tient-elle sa promesse ?

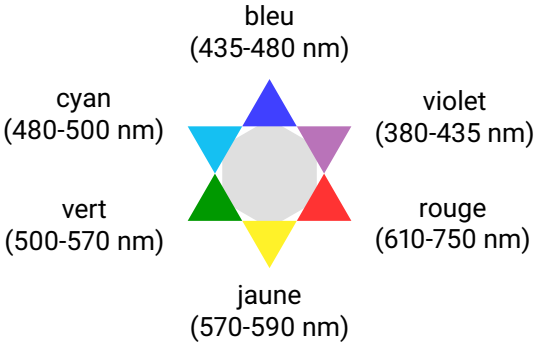
5 points

Pour teinter les enduits à la chaux, les artisans utilisent des terres colorantes : des poudres insolubles dont la couleur est due à un pigment minéral. Le fournisseur d'une terre rouge indique sur l'emballage qu'elle contient $6{,}0\,\%$ en masse d'oxyde de fer(III) $\mathrm{Fe_2O_3}$, autrement dit que le rapport de la masse d'oxyde de fer(III) à la masse de poudre vaut $0{,}060$.

Un laboratoire contrôle cette indication par un dosage spectrophotométrique par étalonnage, mené en trois temps : préparation d'une gamme de solutions étalons d'ions fer(III), tracé d'une droite d'étalonnage, puis mise en solution et analyse d'un échantillon de la poudre.

Données :

- masses molaires atomiques (en $\mathrm{g{\cdot}mol^{-1}}$) : $M(\mathrm{Fe}) = 55{,}8$; $M(\mathrm{O}) = 16{,}0$; $M(\mathrm{Cl}) = 35{,}5$; $M(\mathrm{H}) = 1{,}0$;
- accord avec une valeur de référence : une teneur mesurée X_{mes}, dont l'incertitude-type vaut $u(X)$, est compatible avec la valeur annoncée X_{ref} lorsque le quotient $z = \dfrac{|X_{\mathrm{mes}} - X_{\mathrm{ref}}|}{u(X)}$ est inférieur ou égal à 2 ;
- étoile chromatique (deux couleurs diamétralement opposées sont complémentaires) :



Partie A : La gamme de solutions étalons

Les ions fer(III) $\mathrm{Fe^{3+}}$ sont presque incolores à faible concentration ; en présence d'ions thiocyanate $\mathrm{SCN^-}$, ils forment une espèce colorée. On prépare d'abord $500{,}0\,\mathrm{mL}$ d'une solution mère S_0, acidifiée, contenant $C_0 = 40{,}0\,\mathrm{mg{\cdot}L^{-1}}$ d'ions fer(III), en dissolvant des cristaux de $\mathrm{FeCl_3}$ hexahydraté ; l'équation de la dissolution est :

$$(\mathrm{FeCl_3, 6\,H_2O})\,(\mathrm{s}) \longrightarrow \mathrm{Fe^{3+}}(\mathrm{aq}) + 3\,\mathrm{Cl^-}(\mathrm{aq}) + 6\,\mathrm{H_2O}\,(\mathrm{l})$$

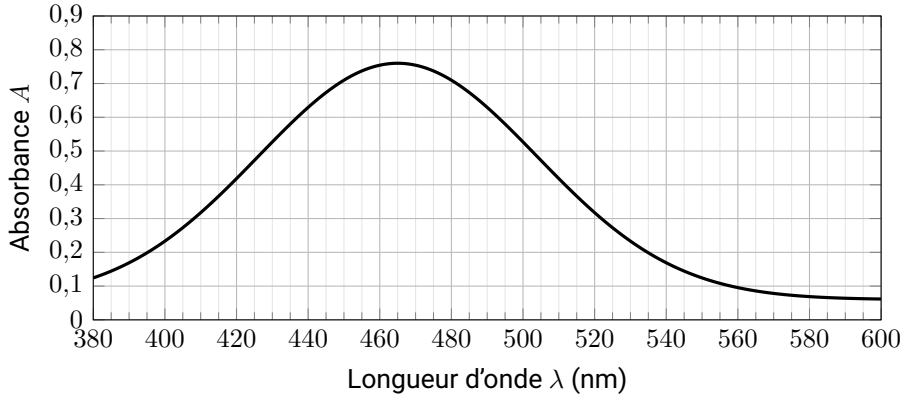
1) Calculer la masse de cristaux à peser pour préparer la solution S_0.

Chaque solution étalon S_i est préparée en fiole jaugée ($50{,}0\,\mathrm{mL}$) : on y introduit un volume V_i de solution S_0 et $2{,}0\,\mathrm{mL}$ d'une solution de thiocyanate de potassium, avant d'ajuster le volume avec de l'eau distillée.

Solution étalon	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
Teneur en ions Fe^{3+}, C_i ($mg{\cdot}L^{-1}$)	0,80	1,60	2,40	3,20	4,00

2) Déterminer par un calcul le volume V_5 de solution S_0 à prélever pour préparer S_5, puis nommer la verrerie à utiliser.

On a enregistré ci-dessous l'absorbance d'une solution plus concentrée de l'espèce colorée en fonction de la longueur d'onde.



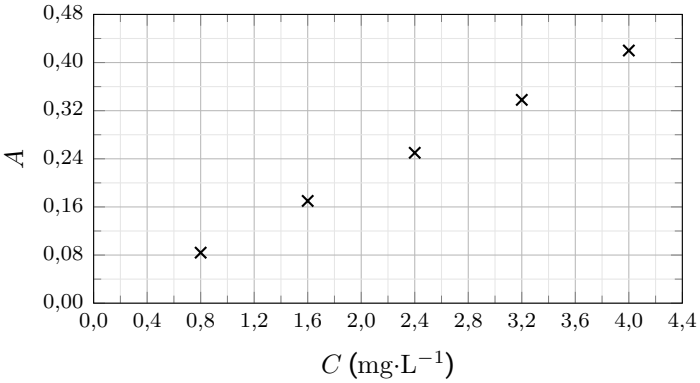
3) Indiquer, en justifiant, la teinte des solutions de la gamme.

4) Choisir, en justifiant, la longueur d'onde λ_0 à utiliser pour mesurer l'absorbance des solutions de la gamme.

Partie B : La droite d'étalonnage

Le spectrophotomètre étant réglé sur λ_0, on mesure l'absorbance des cinq solutions étalons.

Solution	C_i ($mg{\cdot}L^{-1}$)	A_i
S_1	0,80	0,084
S_2	1,60	0,170
S_3	2,40	0,250
S_4	3,20	0,338
S_5	4,00	0,420



5) Justifier que ces mesures respectent la loi de Beer-Lambert.

6) En déduire la valeur du coefficient k de la relation $A = k\,C$, où C désigne la concentration en masse des ions Fe^{3+}.

Partie C : L'analyse de la terre colorante

L'oxyde de fer(III) se dissout en milieu très acide : chaque entité $\mathrm{Fe_2O_3}$ dissoute libère deux ions $\mathrm{Fe^{3+}}$. On attaque $150{,}0\,\mathrm{mg}$ de terre colorante par $25\,\mathrm{mL}$ d'acide chlorhydrique concentré, puis on transvase le mélange en fiole jaugée ($250{,}0\,\mathrm{mL}$), que l'on remplit d'eau distillée jusqu'au trait : c'est la solution S. On prélève $5{,}00\,\mathrm{mL}$ de S, que l'on traite comme les solutions étalons (fiole de $50{,}0\,\mathrm{mL}$, $2{,}0\,\mathrm{mL}$ de thiocyanate de potassium) : S est ainsi diluée dix fois. L'absorbance de la solution obtenue, mesurée à λ_0, vaut $A = 0{,}282$.

7) Pourquoi ne mesure-t-on pas directement l'absorbance de la solution S ?

8) Montrer que la solution S contient environ $27\,\mathrm{mg}$ d'ions fer(III) par litre.

9) Calculer la teneur en masse de la terre colorante en oxyde de fer(III).

10) L'incertitude-type sur cette teneur est estimée à $u(X) = 1{,}2 \times 10^{-3}$ (soit $0{,}12\,\%$). L'indication du fournisseur est-elle confirmée ? Justifier par un calcul.

Si la question 9) n'a pas été traitée, on prendra une teneur plausible, que l'on précisera, pour répondre à la question 10).

Exercice 2 : Une toiture en zinc sous la pluie

5 points

Même en l'absence de pollution, l'eau de pluie est légèrement acide : elle dissout une partie du dioxyde de carbone de l'air. Près des zones industrielles ou des grands axes routiers, les oxydes de soufre et d'azote rejetés par les combustions renforcent cette acidité. Or beaucoup de toitures, de chéneaux et de descentes d'eau sont en zinc, un métal qui réagit avec les solutions acides. On cherche à comprendre pourquoi ces ouvrages durent pourtant plusieurs dizaines d'années.

Données :

- masse molaire du zinc : $M(\mathrm{Zn}) = 65{,}4\,\mathrm{g{\cdot}mol^{-1}}$;
- couples oxydant/réducteur : $\mathrm{Zn^{2+}(aq)/Zn\,(s)}$ et $\mathrm{H_3O^+(aq)/H_2(g)}$;
- équation d'état du gaz parfait : $PV = nRT$.

Partie A : L'acidité de la pluie

Le dioxyde de carbone dissous dans l'eau est noté $\mathrm{H_2CO_3(aq)}$ (acide carbonique). C'est un acide faible : sa réaction avec l'eau n'est pas totale. Dans une ville industrielle, le pH moyen des pluies relevé sur une année vaut 4,6.

1) Écrire l'équation de la réaction de l'acide carbonique avec l'eau.

2) Calculer la concentration des ions $\mathrm{H_3O^+}$ dans ces eaux de pluie.

Le zinc est attaqué par les ions oxonium ; l'équation de la réaction est :

$$\mathrm{Zn\,(s) + 2\,H_3O^+(aq) \longrightarrow Zn^{2+}(aq) + H_2(g) + 2\,H_2O\,(l)}$$

3) S'agit-il d'une réaction acide-base ou d'une réaction d'oxydo-réduction ? Justifier à l'aide des couples donnés.

Partie B : Suivi de la transformation par la mesure d'une pression

On étudie cette transformation, supposée totale, au laboratoire avec le montage de la figure 1 : l'erlenmeyer, bouché, est relié à un capteur de pression et plongé dans un bain thermostaté à $25\,°\mathrm{C}$.
À la date $t = 0$, on fait couler d'un seul coup, sur $0{,}40\,\mathrm{g}$ de zinc en poudre, $60{,}0\,\mathrm{mL}$ d'acide chlorhydrique dont la concentration en H_3O^+ vaut $0{,}45\,\mathrm{mol{\cdot}L^{-1}}$.

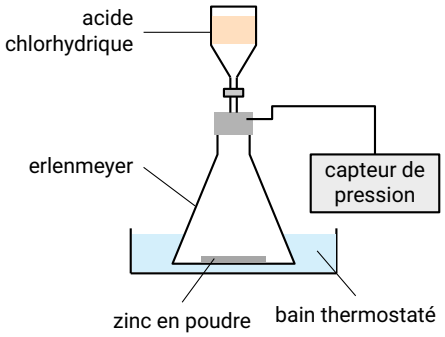


Figure 1 – Montage

4) a. Déterminer le réactif limitant.

b. En déduire l'avancement maximal $x_{\max}$. On remarquera que la quantité de dihydrogène formé est égale à l'avancement x.

Avant l'ajout de l'acide, le capteur indique la pression de l'air enfermé : $P_\mathrm{i} = 1\,010\,\mathrm{hPa}$. Le dihydrogène formé, considéré comme un gaz parfait, occupe le volume V_{gaz} laissé libre au-dessus du liquide, à la température T du bain ; il y crée une surpression $P - P_\mathrm{i}$ qui s'ajoute à la pression de l'air. V_{gaz} et T restent constants, mais ne sont pas connus avec précision.

t (min)	0	2	4	6	10	15	20	25	30	40
P (hPa)	1010	1048	1083	1117	1179	1247	1306	1357	1401	1473

t (min)	50	60	80	100	120	150	180	210	240	270
P (hPa)	1527	1568	1621	1651	1668	1681	1686	1689	1690	1690

5) a. Exprimer l'avancement x en fonction de $P - P_\mathrm{i}$, V_{gaz}, R et T.

b. On note $P_{\max}$ la pression atteinte en fin de transformation. En écrivant la même relation à l'état final, montrer que $x = x_{\max} \times \dfrac{P - P_\mathrm{i}}{P_{\max} - P_\mathrm{i}}$, relation qui ne fait plus intervenir V_{gaz} ni T.

c. Cette relation a permis de tracer la figure 2. Retrouver graphiquement la valeur de $x_{\max}$ obtenue à la question 4).

d. Calculer, à l'aide du tableau, l'avancement à la date $t = 30\,\mathrm{min}$, puis le contrôler sur la figure 2.

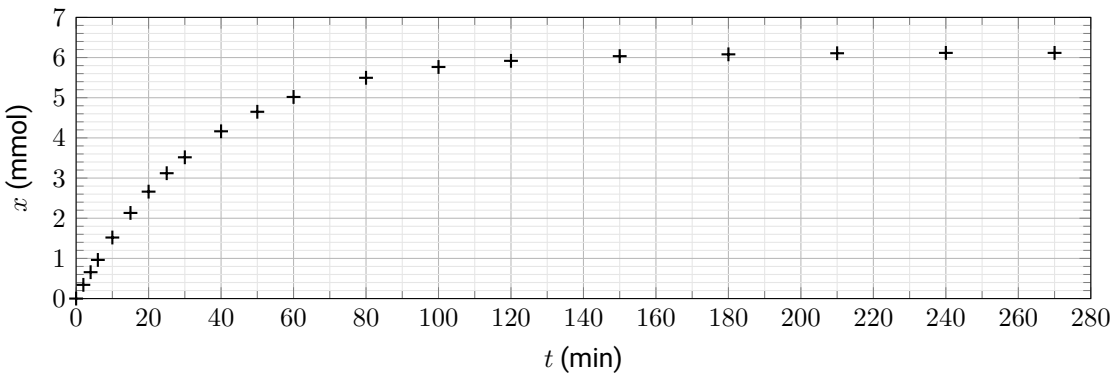


Figure 2 – Avancement de la réaction au cours du temps

Partie C : Facteurs cinétiques

Le montage de la figure 1 est réutilisé, toujours à $25\,°\mathrm{C}$, avec $0{,}40\,\mathrm{g}$ de zinc et $60{,}0\,\mathrm{mL}$ d'acide. Dans une première série, le zinc est en poudre et seule change la valeur initiale de $[H_3O^+]$:

	Expérience 1	Expérience 2	Expérience 3
$[H_3O^+]_i$ $(\mathrm{mol{\cdot}L^{-1}})$	0,30	0,60	0,45

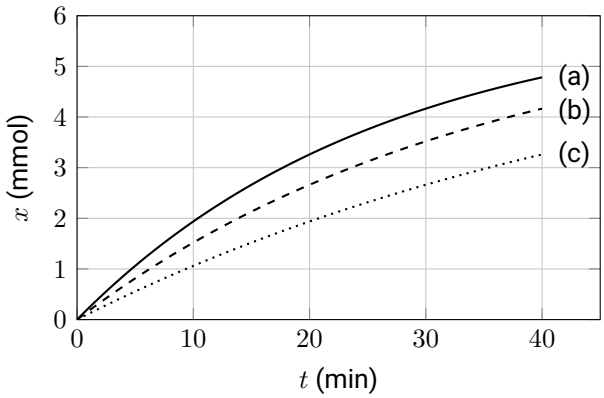


Figure 3 – Première série

6) Associer les courbes (a), (b) et (c) aux expériences 1, 2 et 3 (figure 3). Justifier.

Dans une seconde série, $[H_3O^+]_i = 0{,}45\,\mathrm{mol{\cdot}L^{-1}}$; seule change la forme du zinc :

- expérience 4 : zinc en poudre ;
- expérience 5 : petits morceaux découpés dans une lame de zinc neuve ;
- expérience 6 : morceaux de même taille découpés dans une vieille plaque de toiture, recouverte d'une fine couche grise protectrice (la « patine » que le zinc acquiert à l'air humide).

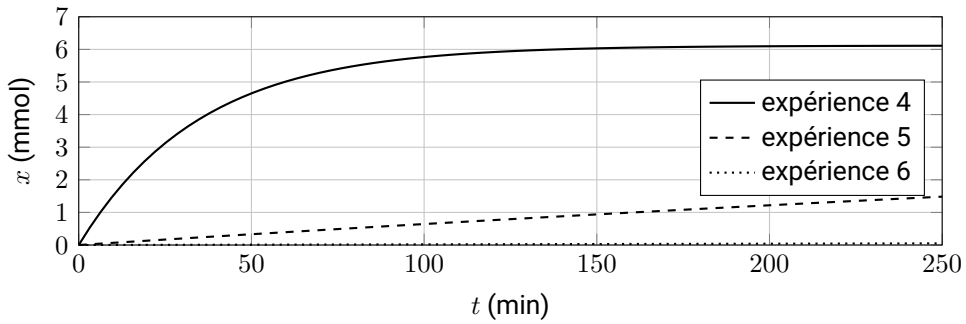


Figure 4 – Seconde série

7) a. Quelles expériences faut-il comparer pour mettre en évidence l'effet de l'aire de métal exposée à l'acide ? Quel est cet effet ?

b. Comment la patine modifie-t-elle la vitesse de la transformation ? Justifier.

8) En s'appuyant sur l'ensemble de l'exercice, proposer au moins trois raisons pour lesquelles une toiture en zinc résiste plusieurs dizaines d'années aux pluies acides.

Exercice 3 : Décollage d'un lanceur lourd

10 points

Au décollage, un lanceur lourd est propulsé à la fois par son étage principal, dont le moteur brûle de l'hydrogène et de l'oxygène liquides, et par deux propulseurs d'appoint à poudre fixés de part et d'autre. On se propose d'exploiter une chronophotographie des premières secondes du vol pour estimer l'accélération du lanceur et la poussée de ses moteurs, puis d'étudier le bruit du décollage.

Données :

- intensité de la pesanteur : $g = 9{,}8\,\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$;
- débit massique des gaz éjectés par le moteur de l'étage principal : $240\,\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$;
- débit massique des gaz éjectés par chaque propulseur d'appoint : $1{,}6 \times 10^{3}\,\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$;
- caractéristiques du lanceur : masse au décollage comprise entre $610\,\text{t}$ et $630\,\text{t}$ (selon la charge emportée) ; poussée totale au décollage annoncée entre $9\,300\,\text{kN}$ et $9\,800\,\text{kN}$.

La poussée est l'action exercée sur le lanceur par les gaz que ses moteurs éjectent vers le bas. Pendant le décollage, on la modélise par une force $\vec{F}$ verticale, orientée vers le haut, de valeur constante.

La figure 5 reproduit sept images successives du décollage, prises à intervalles de $0{,}50\,\text{s}$ et décalées horizontalement pour la lisibilité. Le point repère M est le haut de la partie cylindrique du propulseur d'appoint de gauche, à la base de son cône (marqué sur l'image 1). L'axe vertical Oy, orienté vers le haut, a pour origine la position de la base du lanceur avant le décollage.

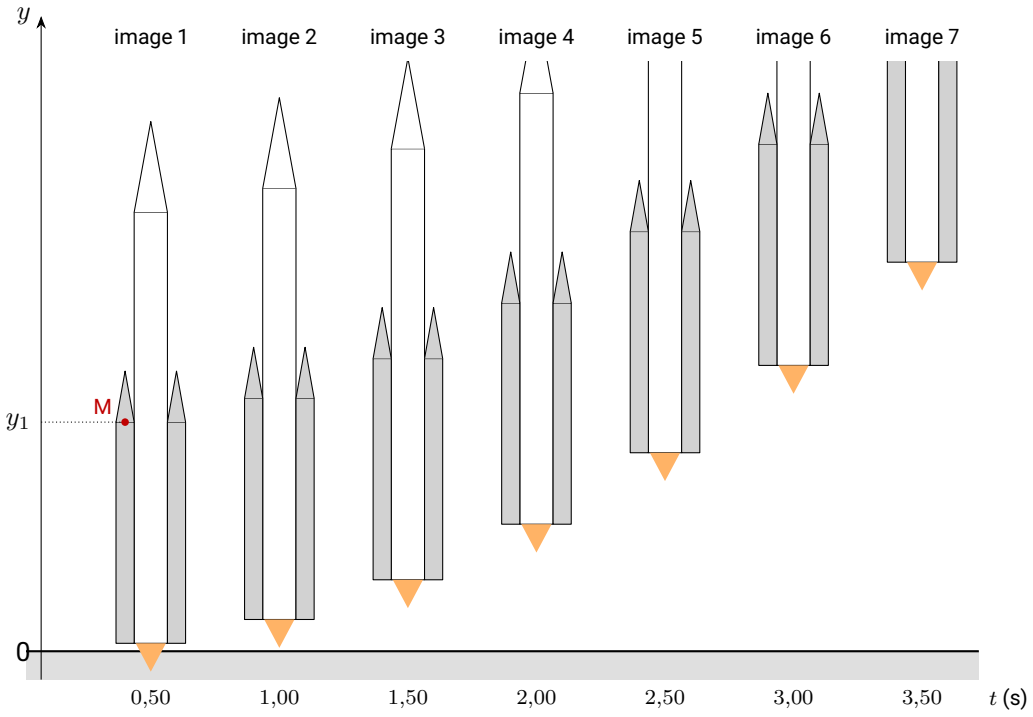


Figure 5 – Chronophotographie du décollage (seules les positions verticales comptent)

Le pointage des images donne les résultats suivants (v_y est la coordonnée verticale de la vitesse de M).

Image	1	2	3	4	5	6	7
t (s)	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50
y (m)	$y_1 = 20{,}2$	22,4	25,8	30,7	y_5	44,7	53,7
v_y ($\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$)	2,9	v_2	8,3	11,2	14,0	16,7	–

Partie A : Estimation de la poussée

1) Calculer la masse de gaz éjectée par le lanceur entre les images 1 et 7. La comparer à la masse du lanceur et conclure.

Dans toute la suite, on considère que la masse M du lanceur reste constante pendant la durée étudiée.

2) À l'aide de mesures effectuées sur la figure 5, estimer la valeur de y_5. Expliquer la démarche.

3) a. Estimer la valeur de v_2 à partir du tableau, en précisant la méthode, puis la comparer à la valeur lue sur la figure 6.

b. À l'aide de la figure 6, montrer que l'accélération du lanceur est constante pendant la durée étudiée et que sa valeur est voisine de $5{,}6\ \mathrm{m{\cdot}s^{-2}}$.

c. Caractériser, en justifiant, le vecteur accélération $\vec{a}$ du lanceur (direction et sens).

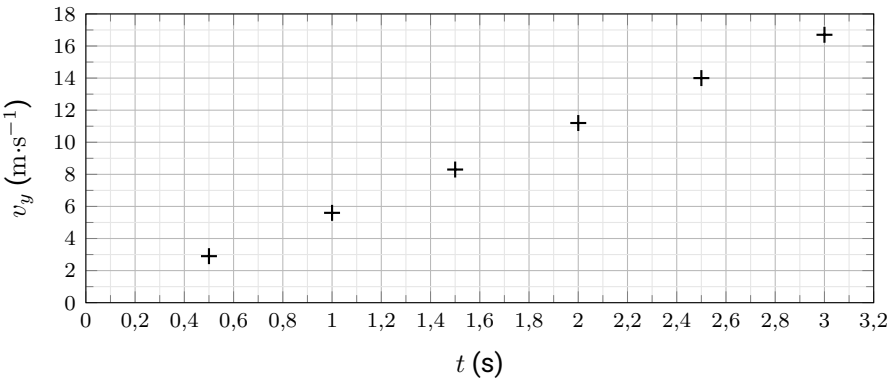


Figure 6 – Coordonnée verticale v_y de la vitesse de M au cours du temps

On néglige l'action de l'air sur le lanceur pendant ces premières secondes.

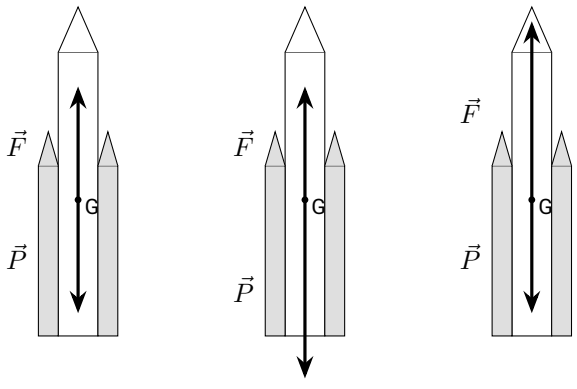


Schéma A Schéma B Schéma C

Figure 7 – Trois représentations proposées pour les forces exercées sur le lanceur après qu'il a quitté le sol

4) Lequel des schémas de la figure 7 est compatible avec le mouvement du lanceur ? Justifier à l'aide d'une loi de Newton, en expliquant pourquoi chacun des deux autres est rejeté.

5) Estimer la valeur de la poussée F. Ce résultat est-il cohérent avec les caractéristiques du lanceur ? Le rapport des longueurs des flèches du schéma choisi est-il cohérent avec ce calcul ?

Partie B : Une accélération hors du commun ?

On modélise le mouvement du point M par l'équation horaire $y(t) = 2{,}8\,t^2 + 19{,}5$, avec y en mètres et t en secondes.

6)
a. Établir l'expression de la coordonnée $v_y(t)$ du vecteur vitesse de M. Est-elle en accord avec la figure 6 ?
b. Établir l'expression de la coordonnée $a_y(t)$ du vecteur accélération. Commenter.
c. En admettant que ce modèle reste valable, calculer la position, la vitesse et l'accélération de M à la date $t = 4{,}0\,\text{s}$.

7) Les performances d'une voiture sont souvent résumées par son « 0 à 100 », la durée nécessaire pour passer de 0 à $100\,\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ en accélérant au maximum : environ $13\,\text{s}$ pour une petite citadine, $2{,}8\,\text{s}$ pour une voiture de sport parmi les plus puissantes. Calculer le « 0 à 100 » du lanceur dans le cadre du modèle, puis expliquer en quoi ce résultat est remarquable.

Partie C : Le vacarme du décollage

Document 1 – Un rideau d'eau contre le bruit
À l'allumage des moteurs, un microphone fixé sur la table de lancement, à quelques mètres des tuyères, enregistre un niveau d'intensité sonore de $188\,\text{dB}$. Les vibrations que transmet un tel bruit pourraient endommager le lanceur et les satellites qu'il emporte. Juste avant l'allumage, on déverse donc sous les tuyères plusieurs centaines de mètres cubes d'eau en quelques secondes : l'onde sonore se réfléchit un grand nombre de fois sur les gouttelettes et une partie de son énergie y est dissipée. Avec ce rideau d'eau, le même microphone, au même endroit, n'enregistre plus que $179\,\text{dB}$.

Données : à une intensité sonore I (en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) correspond le niveau $L = 10\log\left(\dfrac{I}{I_0}\right)$, où $I_0 = 1{,}0 \times 10^{-12}\,\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$; seuil de danger pour l'oreille : $90\,\text{dB}$.

8) Calculer l'intensité sonore reçue par le microphone en l'absence de rideau d'eau.

9) Calculer l'atténuation apportée par le rideau d'eau, puis le nombre par lequel il divise l'intensité sonore reçue par le microphone.

10) L'effet du rideau d'eau relève-t-il de l'éloignement de la source ou de l'absorption ? Justifier.

Un photographe autorisé suit le décollage depuis un poste d'observation où le niveau d'intensité sonore atteint $116\,\text{dB}$. Le bruit du lanceur couvre toutes les fréquences de $250\,\text{Hz}$ à $8\,000\,\text{Hz}$. Les courbes de la figure 8 indiquent, pour deux types de bouchons d'oreilles, de combien de décibels chacun réduit le niveau sonore selon la fréquence.

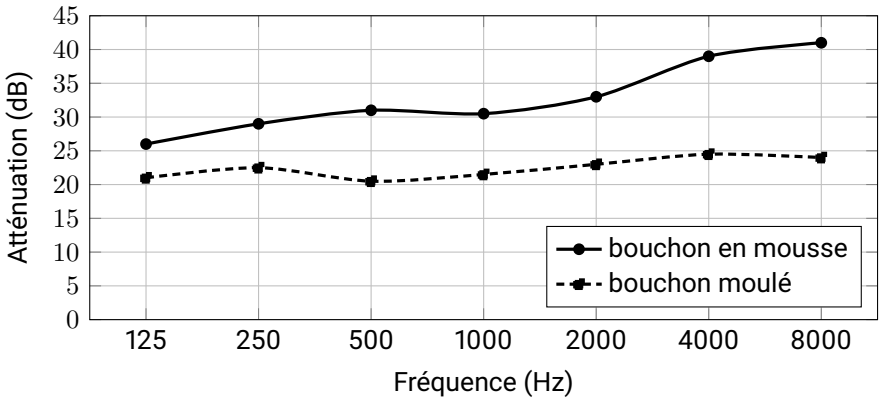


Figure 8 – Réduction du niveau sonore par deux types de bouchons d'oreilles, en fonction de la fréquence

11) Quelle atténuation minimale les bouchons doivent-ils apporter au photographe ? En déduire, à l'aide de la figure 8, le type de bouchons qu'il doit porter.

12) Avec les bouchons choisis, pour quelle fréquence du bruit le photographe est-il le moins bien protégé ? Estimer le niveau d'intensité sonore qu'il perçoit alors.