

BACCALAURÉAT GÉNÉRAL — SESSION 2026
Physique-Chimie — Enseignement de spécialité
ASIE — JOUR 1 (SUJET 26-PYCJ1JA1)

CORRIGÉ DÉTAILLÉ

Rédaction conforme à une copie notée 20/20

Comment utiliser ce corrigé. Le texte contenu dans les **cadres bleus** correspond à ce qu'il faut *effectivement écrire sur la copie* : phrase d'introduction, formule littérale, application numérique, résultat avec unité et bon nombre de chiffres significatifs, puis conclusion. Les encadrés orange « Note du professeur » ne font pas partie de la copie : ce sont des conseils de méthode et des pièges à éviter.

Répartition des points : Exercice 1 — 9 points • Exercice 2 — 6 points • Exercice 3 — 5 points.
Durée : 3 h 30.

Corrigé non officiel, proposé par Génies des Sciences. Il ne s'agit pas du barème du jury.

Exercice 1 — Acidité des sols (9 points)

1. pH d'un sol

Q1 Compléter le tableau de l'annexe en identifiant les familles associées aux trois groupes caractéristiques entourés sur la formule topologique de l'acide fulvique (liste imposée : acide carboxylique, alcool, aldéhyde, amide, cétone, ester).

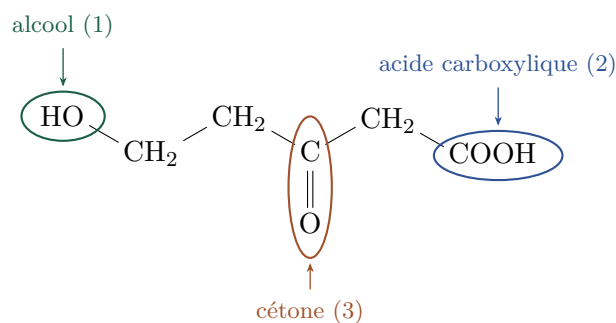
Pour identifier une famille, on ne regarde pas seulement le groupe entouré : on regarde *ce qui lui est accroché*.

N° du groupe caractéristique	Nom de la famille
1	alcool
2	acide carboxylique
3	cétone

Justifications.

- **Groupe 1** : le groupe hydroxyle —OH est porté par un atome de carbone *tétraagonal* qui n'est lié qu'à des atomes de carbone et d'hydrogène ($\text{—CH}_2\text{—OH}$) : c'est un **alcool** (ici un alcool primaire) ;
- **Groupe 2** : un atome de carbone doublement lié à un atome d'oxygène *et* simplement lié à un groupe —OH forme le groupe carboxyle —COOH , caractéristique des **acides carboxyliques** ;
- **Groupe 3** : le groupe carbonyle C=O a son atome de carbone lié à **deux atomes de carbone** : c'est une **cétone**. Ce serait un aldéhyde si ce carbone portait un atome d'hydrogène, un ester s'il portait un —O—C , un amide s'il portait un atome d'azote.





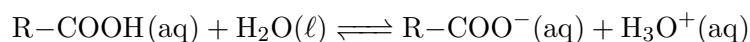
Les trois familles à reconnaître, ici replacées sur une chaîne modèle.

Note du professeur

Deux pièges classiques sur cette molécule. **(1)** Les groupes $-\text{OH}$ fixés *directement* sur le cycle aromatique (en haut et en bas du noyau) ne sont **pas** des alcools mais des **phénols** : c'est pourquoi seul le $-\text{OH}$ de la chaîne latérale est entouré comme alcool. **(2)** Cétone ou aldéhyde ? Il faut regarder si le carbone du $\text{C}=\text{O}$ porte un atome d'hydrogène : ici il est encadré par deux carbones, c'est donc une cétone.

Q2 Préciser, parmi la liste précédente, la famille qui contribue à l'acidité de la molécule.

Un acide au sens de Brønsted est une espèce capable de **céder un proton** H^+ . Parmi les familles proposées, seul le groupe carboxyle possède une liaison $\text{O}-\text{H}$ assez polarisée pour libérer un proton en solution aqueuse, l'ion carboxylate formé étant stabilisé :



C'est la famille des acides carboxyliques (groupe carboxyle $-\text{COOH}$).

La molécule d'acide fulvique en compte **six** : elle peut donc libérer plusieurs protons, d'où son fort pouvoir acidifiant sur le sol — et son nom.

Q3 Donner la formule des espèces 1, 2 et 3 mentionnées sur le diagramme de distribution (figure 2).

Sur un diagramme de distribution, on lit de gauche à droite dans le sens des pH *croissants* : l'espèce la plus acide (la plus riche en protons) prédomine aux pH les plus faibles, et l'on perd un proton à chaque changement de domaine. Les trois espèces à placer sont, dans l'ordre décroissant d'acidité : H_2CO_3 , puis HCO_3^- , puis CO_3^{2-} .

Espèce 1 : $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq})$ • Espèce 2 : $\text{HCO}_3^-(\text{aq})$ • Espèce 3 : $\text{CO}_3^{2-}(\text{aq})$



Q4 Préciser, en justifiant, le terme qualifiant le comportement acido-basique de l'espèce 2.

L'ion hydrogénocarbonate HCO_3^- appartient aux **deux** couples acide-base fournis :

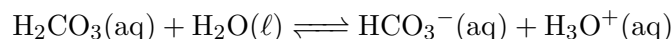
- il est la **base** du couple $\text{H}_2\text{CO}_3/\text{HCO}_3^-$ (il peut capter un proton) ;
- il est l'**acide** du couple $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$ (il peut céder un proton).

L'espèce 2 est amphotère (on dit aussi que c'est un ampholyte).

Le diagramme de distribution le confirme : le domaine de prédominance de l'espèce 2 est *encadré* par celui de son acide conjugué (espèce 1, à gauche) et celui de sa base conjuguée (espèce 3, à droite).

Q5 Donner l'expression littérale de la constante d'acidité K_{A1} en fonction de $[\text{H}_2\text{CO}_3]$, $[\text{HCO}_3^-]$, $[\text{H}_3\text{O}^+]$ et c^0 .

K_{A1} est la constante d'équilibre associée à la réaction de l'acide du couple $\text{H}_2\text{CO}_3/\text{HCO}_3^-$ avec l'eau :



Chaque concentration y est rapportée à la concentration standard c^0 et l'eau, solvant, n'y figure pas :

$$K_{A1} = \frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}} \times [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}}{[\text{H}_2\text{CO}_3]_{\text{éq}} \times c^0}$$

K_{A1} est bien une grandeur **sans dimension**.

Q6 En déduire la relation $\text{pH} = \text{p}K_{A1} + \log\left(\frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]}\right)$.

On prend le logarithme décimal des deux membres de l'expression de K_{A1} , en utilisant $\log(a \times b) = \log a + \log b$:

$$\log K_{A1} = \log\left(\frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]}\right) + \log\left(\frac{[\text{H}_3\text{O}^+]}{c^0}\right)$$

Or, par définition, $\text{p}K_{A1} = -\log K_{A1}$ et $\text{pH} = -\log([\text{H}_3\text{O}^+]/c^0)$. En remplaçant :

$$-\text{p}K_{A1} = \log\left(\frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]}\right) - \text{pH}$$

$$\text{pH} = \text{p}K_{A1} + \log\left(\frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]}\right)$$

Vérification du sens : si la base HCO_3^- est majoritaire, le rapport dépasse 1, son logarithme est positif, donc $\text{pH} > \text{p}K_{A1}$ — c'est bien le comportement attendu.

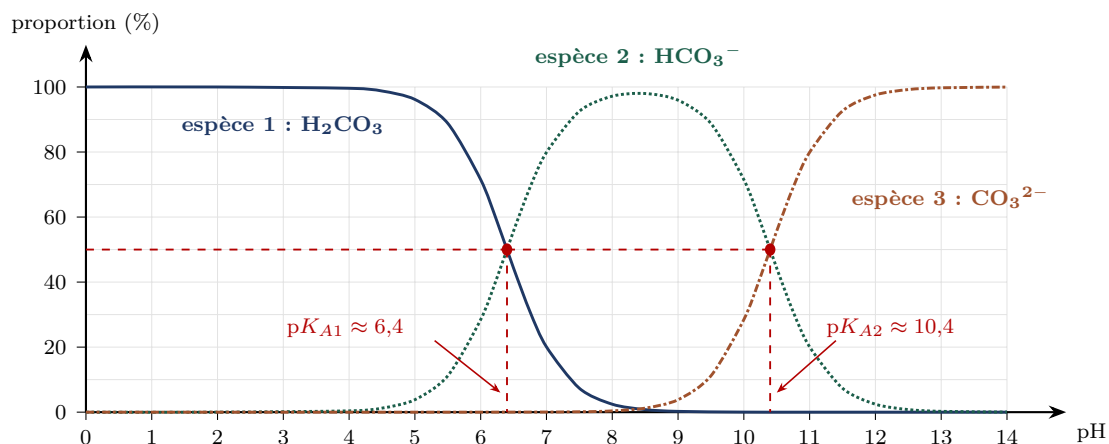


Q7 Estimer la valeur de pK_{A1} en utilisant la figure 2, en justifiant à partir de la relation précédente.

D'après la relation établie en Q6, on a $pH = pK_{A1}$ **exactement** lorsque le logarithme s'annule, c'est-à-dire lorsque

$$\frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]} = 1 \quad \Longleftrightarrow \quad [\text{HCO}_3^-] = [\text{H}_2\text{CO}_3]$$

Les deux espèces sont alors présentes dans les mêmes proportions, soit **50 % chacune**. Il suffit donc de relever l'abscisse du point d'intersection des courbes 1 et 2 à l'ordonnée 50 %.



$pK_{A1} \approx 6,4$ (lecture graphique à $\pm 0,1$ près)

La même construction sur le second point d'intersection (courbes 2 et 3) donnerait $pK_{A2} \approx 10,4$.

Note du professeur

Ne pas confondre le *point d'intersection* de deux courbes (50 %/50 %, qui donne un pK_A) avec le *maximum* de la courbe de l'espèce 2 : ce maximum se situe vers $pH = 8,4$, qui n'est aucun des deux pK_A mais leur moyenne $\frac{6,4+10,4}{2}$. Une erreur qui coûte cher car elle rend fausses toutes les questions suivantes.

Q8 Indiquer, en justifiant, l'espèce acido-basique issue du carbone atmosphérique prédominante dans la terre de Bruyère, dont le pH est proche de 5.

Appliquons la relation de la question Q6 avec $pH = 5$ et $pK_{A1} = 6,4$:

$$\log\left(\frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]}\right) = pH - pK_{A1} = 5 - 6,4 = -1,4$$

$$\frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]} = 10^{-1,4} = 4 \times 10^{-2}$$

L'ion hydrogénocarbonate est donc environ **25 fois moins concentré** que l'acide carbonique. Quant à l'ion carbonate, il est totalement négligeable puisque $pH = 5 \ll pK_{A2} = 10,4$.



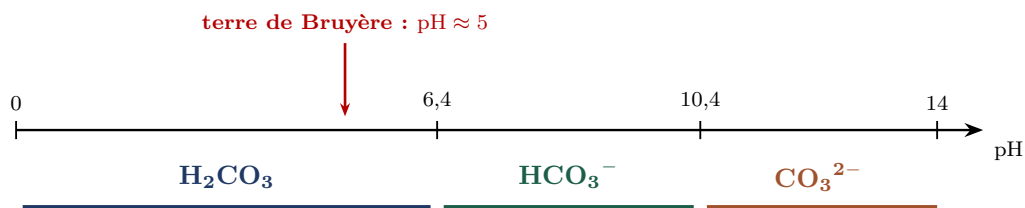


Diagramme de prédominance du système CO_2 dissous.

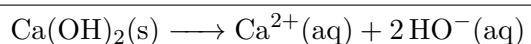
L'espèce prédominante dans la terre de Bruyère est l'acide carbonique $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq})$ (dioxyde de carbone dissous).

La figure 2 le confirme directement : à $\text{pH} = 5$, la courbe de l'espèce 1 est encore voisine de 96 %.

2. Chaulage d'un sol

Q9 Écrire l'équation de la réaction modélisant la dissolution de $\text{Ca}(\text{OH})_2(\text{s})$ dans l'eau, considérée comme totale.

L'hydroxyde de calcium est un solide ionique constitué d'ions calcium Ca^{2+} et d'ions hydroxyde HO^- dans les proportions 1 : 2 (formule $\text{Ca}(\text{OH})_2$). Sa dissolution, totale, libère ces ions dans la solution :



Vérifications : conservation des éléments ($\text{Ca} : 1 = 1$; $\text{O} : 2 = 2$; $\text{H} : 2 = 2$) et conservation de la charge ($0 = +2 - 2 \times 1$). ✓

Q10 Montrer que la concentration en ion hydroxyde de la solution S vaut $[\text{HO}^-] = 3,38 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Quantité de matière d'hydroxyde de calcium dissous.

$$n(\text{Ca}(\text{OH})_2) = \frac{m}{M} = \frac{0,250}{74,0} = 3,378 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

Quantité de matière d'ions hydroxyde libérés.

D'après les nombres stoechiométriques de l'équation de la question Q9, la dissolution d'une mole de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libère **deux** moles d'ions hydroxyde :

$$n(\text{HO}^-) = 2 \times n(\text{Ca}(\text{OH})_2) = 2 \times 3,378 \times 10^{-3} = 6,757 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

Concentration.

Avec $V = 200 \text{ mL} = 0,200 \text{ L}$:

$$[\text{HO}^-] = \frac{n(\text{HO}^-)}{V} = \frac{6,757 \times 10^{-3}}{0,200}$$

$[\text{HO}^-] = 3,38 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$: la valeur annoncée est bien vérifiée.



Q11 En déduire la valeur du pH de la solution S.

Le produit ionique de l'eau relie les concentrations des ions H_3O^+ et HO^- :

$$K_e = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+] \times [\text{HO}^-]}{(c^0)^2} \quad \Rightarrow \quad [\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{K_e \times (c^0)^2}{[\text{HO}^-]}$$

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{1,00 \times 10^{-14}}{3,38 \times 10^{-2}} = 2,96 \times 10^{-13} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$\text{pH} = -\log\left(\frac{[\text{H}_3\text{O}^+]}{c^0}\right) = -\log(2,96 \times 10^{-13}) = 12,53$$

$$\text{pH} = 12,53$$

Autre méthode, plus rapide, mais valable seulement à 25 °C où $\text{p}K_e = 14,0$:

$$\text{pH} = 14,0 + \log([\text{HO}^-]/c^0) = 14,0 - 1,47 = 12,53$$

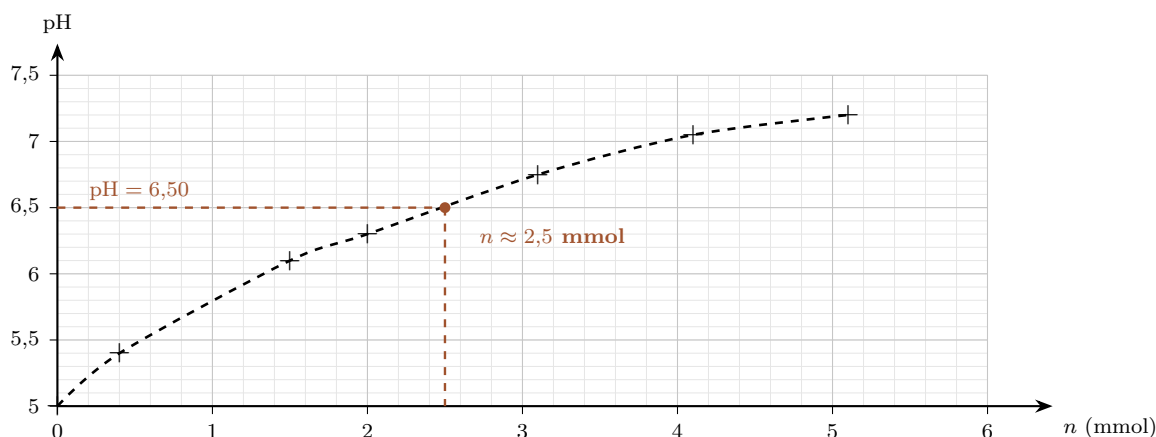
La solution S est très **basique**, ce qui est cohérent avec la forte concentration en ions hydroxyde : c'est bien ce qui permettra de faire remonter le pH d'un sol acide. Attention à ne pas s'arrêter à 1,47, qui est le pOH et non le pH.

Q12 Déterminer la valeur de la masse d'hydroxyde de calcium $m(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ nécessaire pour amener à 6,50 le pH d'une parcelle de 1,00 ha chaulée sur 10,0 cm de profondeur.

Démarche suivie : (1) lire sur la figure 3 la quantité d'ions calcium à apporter pour 100 g de terre ; (2) calculer la masse de sol à chauler ; (3) en déduire la quantité de matière totale d'ions calcium nécessaire ; (4) la convertir en masse d'hydroxyde de calcium.

Étape 1 — lecture graphique de la quantité de matière à apporter.

La terre de Bruyère non traitée est bien à pH = 5 (point $n = 0$ de la courbe). On repère l'ordonnée pH = 6,50, on rejoint la courbe, puis on projette sur l'axe des abscisses.



$$n(\text{Ca}^{2+}) \approx 2,5 \text{ mmol pour } 100 \text{ g de terre} \quad (\text{lecture à } \pm 0,1 \text{ mmol près})$$



Étape 2 — masse de sol à chauler.

La superficie vaut $S = 1,00 \text{ ha} = 1,00 \times 10^4 \text{ m}^2$ et l'épaisseur $e = 10,0 \text{ cm} = 0,100 \text{ m}$:

$$m_c = 1,4 \times S \times e = 1,4 \times 1,00 \times 10^4 \times 0,100 = 1,4 \times 10^3 \text{ tonnes}$$

$$m_c = 1,4 \times 10^3 \times 1,00 \times 10^3 = 1,4 \times 10^6 \text{ kg} = 1,4 \times 10^9 \text{ g}$$

Étape 3 — quantité de matière totale d'ions calcium.

La lecture graphique porte sur des portions de 100 g de terre ; la parcelle en contient :

$$N = \frac{1,4 \times 10^9}{100} = 1,4 \times 10^7 \text{ portions de 100 g}$$

$$n_{\text{tot}}(\text{Ca}^{2+}) = 2,5 \times 10^{-3} \times 1,4 \times 10^7 = 3,5 \times 10^4 \text{ mol}$$

Étape 4 — masse d'hydroxyde de calcium correspondante.

D'après l'équation de dissolution (Q9), une mole de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libère une mole d'ions calcium :

$$n(\text{Ca}(\text{OH})_2) = n_{\text{tot}}(\text{Ca}^{2+}) = 3,5 \times 10^4 \text{ mol}$$

$$m(\text{Ca}(\text{OH})_2) = n \times M = 3,5 \times 10^4 \times 74,0 = 2,6 \times 10^6 \text{ g}$$

$$m(\text{Ca}(\text{OH})_2) = 2,6 \times 10^6 \text{ g} = 2,6 \times 10^3 \text{ kg, soit environ 2,6 tonnes de chaux éteinte}$$

Cela représente environ 260 g de chaux par mètre carré — un ordre de grandeur tout à fait réaliste, les préconisations agronomiques se situant entre 1 et 3 tonnes par hectare.

Note du professeur

Trois pièges dans cette question à prise d'initiative. **(1)** La figure 3 est donnée *pour 100 g de terre* : il faut compter le nombre de portions de 100 g, donc convertir la masse de sol en **grammes** avant de diviser par 100. **(2)** La relation $m_c = 1,4 S e$ donne un résultat en *tonnes* : d'où la double conversion $\text{tonne} \rightarrow \text{kg} \rightarrow \text{g}$ (le facteur 10^3 $\text{tonne} \rightarrow \text{kg}$ est donné dans l'énoncé, ce n'est pas un hasard). **(3)** Ne pas confondre la masse de *sol* traité ($1,4 \times 10^3 \text{ t}$) et la masse de *chaux* à épandre (2,6 t) : un facteur 500 les sépare. Enfin, une incertitude de lecture de $\pm 0,1 \text{ mmol}$ déplace le résultat d'environ $\pm 0,1 \text{ t}$: deux chiffres significatifs, pas plus.

Exercice 2 — Satellites de communication (6 points)

Q1 Nommer le référentiel par rapport auquel le mouvement du centre de masse du satellite est étudié.

Le satellite décrit une orbite *autour de la Terre* : le référentiel adapté est celui dont l'origine est le centre de la Terre et dont les axes pointent vers trois étoiles lointaines supposées fixes.

Il s'agit du référentiel géocentrique, supposé galiléen pendant la durée de l'étude.

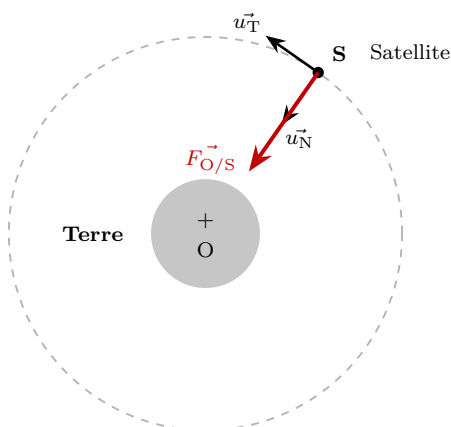
Le référentiel terrestre ne conviendrait pas : il tourne avec la Terre, et le satellite y aurait un



mouvement bien plus compliqué (immobile pour un géostationnaire!).

Q2 Compléter le schéma de l'annexe en représentant, sans souci d'échelle, la force d'interaction gravitationnelle $F_{O/S}$.

L'interaction gravitationnelle est toujours **attractive** : la force exercée par la Terre (centre O) sur le satellite (centre de masse S) est portée par la droite (OS) et dirigée **de S vers O**. Son point d'application est S. Elle a donc exactement la direction et le sens du vecteur unitaire $\vec{u}_N$ du repère de Frenet, qui pointe vers le centre de la trajectoire.



$F_{O/S}$ est appliquée en S, colinéaire à $\vec{u}_N$ et de même sens : elle est centripète.

Q3 Donner l'expression vectorielle de $F_{O/S}$ dans le repère de Frenet, en fonction de G , m , M_T , R_T et h .

La distance qui sépare les centres O et S est le rayon de l'orbite :

$$r = R_T + h$$

La loi de gravitation universelle donne la valeur de la force, et la question Q2 son sens (celui de $\vec{u}_N$) :

$$F_{O/S} = \frac{G m M_T}{(R_T + h)^2} \vec{u}_N$$

Contrôle d'homogénéité : l'unité imprimée dans le sujet ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$) comporte une coquille — G s'exprime en $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, soit $\text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$. Avec cette unité, $G m M_T / r^2$ s'exprime bien en $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$, c'est-à-dire en newtons. ✓

Note du professeur

Le signe dépend entièrement de l'orientation choisie pour $\vec{u}_N$. Sur le schéma de l'annexe, $\vec{u}_N$ pointe *vers le centre* O : l'expression est donc précédée d'un signe +. Si l'on avait orienté $\vec{u}_N$ vers l'extérieur, il aurait fallu écrire $-GmM_T/r^2 \vec{u}_N$. Toujours regarder la figure avant d'écrire le signe.



Q4 En appliquant la deuxième loi de Newton, montrer que le mouvement circulaire de S est uniforme.

Système : le satellite, de masse m , assimilé à son centre de masse S .

Référentiel : géocentrique, supposé galiléen.

Bilan des forces : le satellite n'est soumis qu'à la force d'interaction gravitationnelle $F_{O/S}^{\rightarrow}$ exercée par la Terre (énoncé).

D'après la deuxième loi de Newton :

$$\sum \vec{F}_{\text{ext}} = m \vec{a} \quad \Rightarrow \quad \vec{a} = \frac{F_{O/S}^{\rightarrow}}{m} = \frac{G M_T}{(R_T + h)^2} \vec{u}_N$$

Le vecteur accélération est donc **entièrement porté par** $\vec{u}_N$: sa composante tangentielle est nulle.

Or, pour un mouvement circulaire de rayon r , l'accélération s'écrit dans le repère de Frenet :

$$\vec{a} = \frac{dv}{dt} \vec{u}_T + \frac{v^2}{r} \vec{u}_N$$

L'identification des composantes selon $\vec{u}_T$ donne :

$$\frac{dv}{dt} = 0 \quad \Rightarrow \quad v = \text{constante}$$

La valeur de la vitesse est constante : le mouvement circulaire de S est bien uniforme.

L'identification des composantes selon $\vec{u}_N$ fournit en prime la valeur de cette vitesse :

$$\frac{v^2}{R_T + h} = \frac{G M_T}{(R_T + h)^2} \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{G M_T}{R_T + h}}$$

Q5 Définir la période de révolution T du satellite de centre de masse S .

La période de révolution T est la durée nécessaire au satellite pour effectuer un tour complet de son orbite autour de la Terre.

Le mouvement étant uniforme (Q4), la distance parcourue pendant cette durée est le périmètre du cercle, d'où :

$$T = \frac{2\pi (R_T + h)}{v}$$



Q6 Montrer que la valeur de l'altitude h du satellite géostationnaire est environ $h \approx 36\,000\text{ km}$.

Démarche suivie : (1) identifier la période de révolution d'un satellite géostationnaire ; (2) exploiter le coefficient directeur de la droite de la figure 1 pour obtenir le rayon de l'orbite ; (3) en déduire l'altitude.

Étape 1 — période de révolution du satellite géostationnaire.

Un satellite géostationnaire « survole toujours la même zone » : il tourne donc exactement à la même vitesse angulaire que la Terre. Sa période de révolution est égale à la période de rotation propre de la Terre autour de l'axe des pôles :

$$T = T_T = 23\text{ h } 56\text{ min } 4\text{ s} = 23 \times 3600 + 56 \times 60 + 4 = 8,6164 \times 10^4\text{ s}$$

Étape 2 — rayon de l'orbite.

La figure 1 montre que T^2 est proportionnelle à r^3 (troisième loi de Kepler), le coefficient de proportionnalité étant le coefficient directeur k de la droite modélisée :

$$T^2 = k r^3 \quad \Rightarrow \quad r^3 = \frac{T^2}{k} = \frac{(8,6164 \times 10^4)^2}{9,85 \times 10^{-14}} = \frac{7,4242 \times 10^9}{9,85 \times 10^{-14}} = 7,537 \times 10^{22}\text{ m}^3$$

$$r = (7,537 \times 10^{22})^{1/3} = 4,224 \times 10^7\text{ m}$$

Étape 3 — altitude.

Le rayon de l'orbite est compté depuis le *centre* de la Terre : $r = R_T + h$, avec $R_T = 6,38 \times 10^3\text{ km} = 6,38 \times 10^6\text{ m}$.

$$h = r - R_T = 4,224 \times 10^7 - 0,638 \times 10^7 = 3,586 \times 10^7 \approx 3,59 \times 10^7\text{ m}$$

$h = 3,59 \times 10^7\text{ m} = 3,6 \times 10^4\text{ km}$: l'altitude annoncée ($\approx 36\,000\text{ km}$) est bien vérifiée.

Note du professeur

Trois remarques. **(1)** La période à utiliser est le *jour sidéral* (23 h 56 min 4 s), pas 24 h : c'est par rapport aux étoiles lointaines — donc dans le référentiel géocentrique — que la Terre fait un tour sur elle-même. Avec 24 h on trouverait 35 900 km : l'écart est faible, mais le raisonnement serait faux. **(2)** Ne pas oublier de retrancher R_T : confondre r et h est l'erreur la plus fréquente sur ce type de question. **(3)** Contrôle de cohérence élégant : la troisième loi de Kepler s'écrit $T^2 = \frac{4\pi^2}{GM_T} r^3$, donc $M_T = \frac{4\pi^2}{Gk} = 6,0 \times 10^{24}\text{ kg}$ — on retrouve bien la masse de la Terre.

Q7 Comparer la durée de transmission Δt_1 d'un signal électromagnétique émis depuis la surface de la Terre vers un satellite géostationnaire à celle, Δt_2 , vers un satellite LEO en orbite à 1000 km d'altitude.

Une onde électromagnétique se propage à la célérité c ; la durée de transmission est donc le quotient de la distance parcourue par c . En supposant le satellite à la verticale de l'émetteur, cette distance est simplement l'altitude du satellite.



Satellite géostationnaire.

$$\Delta t_1 = \frac{h_1}{c} = \frac{3,59 \times 10^7}{3,00 \times 10^8}$$

$$\Delta t_1 = 1,2 \times 10^{-1} \text{ s, soit environ } 0,12 \text{ s}$$

Satellite LEO.

$$\Delta t_2 = \frac{h_2}{c} = \frac{1,000 \times 10^6}{3,00 \times 10^8}$$

$$\Delta t_2 = 3,3 \times 10^{-3} \text{ s, soit environ } 3,3 \text{ ms}$$

Comparaison.

$$\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = \frac{1,20 \times 10^{-1}}{3,33 \times 10^{-3}} = 36$$

$\Delta t_1 \approx 36 \Delta t_2$: le signal met environ 36 fois plus de temps à atteindre le satellite géostationnaire.

Ce rapport n'est autre que celui des altitudes (36 000/1000), puisque la célérité est la même dans les deux cas. Pour juger du confort d'une liaison, c'est d'ailleurs l'*aller-retour* qui compte : environ 0,24 s avec un géostationnaire — un quart de seconde de décalage avant d'entendre la réponse de son interlocuteur, parfaitement perceptible — contre 7 ms avec un LEO.

Q8 En utilisant les calculs et les informations du document, donner les avantages et les inconvénients des satellites géostationnaire et LEO pour la transmission de données par internet.

Satellite géostationnaire (altitude $\approx 36\,000$ km).

- **Avantage** — il survole toujours la même zone : l'antenne au sol reste *fixe*, il n'y a ni suivi mécanique ni basculement d'un satellite à l'autre ;
- **Avantage** — vu de très haut, il couvre une zone très large : un petit nombre de satellites suffit à couvrir l'intégralité du globe ;
- **Inconvénient** — la durée de transmission est longue ($\Delta t_1 = 0,12$ s, soit 0,24 s pour un aller-retour) : c'est pénalisant pour tous les usages interactifs (visioconférence, jeu en ligne, transactions).

Satellite LEO (orbite basse, 400 à 1000 km).

- **Avantage** — la durée de transmission est 36 fois plus courte ($\Delta t_2 = 3,3$ ms) : les échanges sont beaucoup plus rapides, ce qui est « très intéressant pour la rapidité d'échange » ;
- **Inconvénient** — chaque satellite ne couvre qu'une petite zone et défile rapidement : il faut plusieurs *milliers* de satellites fonctionnant « en groupe », et l'antenne doit changer en permanence de satellite ;



- **Inconvénient** — cette multiplication accroît les risques d'encombrement, de pannes et de débris spatiaux : l'impact environnemental est aujourd'hui pointé du doigt.

Pour l'accès à internet, le LEO est choisi pour sa réactivité, le géostationnaire pour la simplicité et l'étendue de sa couverture : les deux solutions sont complémentaires.

Exercice 3 — Sécurité acoustique (5 points)

- Q1** Calculer le niveau d'intensité sonore L_1 perçu par l'ouvrier travaillant sans protection sur une machine émettant un son d'intensité $I_1 = 3,0 \times 10^{-4} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

On applique directement la relation fournie, avec $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$:

$$L_1 = 10 \log\left(\frac{I_1}{I_0}\right) = 10 \log\left(\frac{3,0 \times 10^{-4}}{1,0 \times 10^{-12}}\right) = 10 \log(3,0 \times 10^8) = 10 \times 8,48$$

$$L_1 = 85 \text{ dB} \quad (\text{valeur non arrondie : } 84,8 \text{ dB})$$

- Q2** En déduire la conséquence auditive pour l'ouvrier, en utilisant l'échelle des niveaux d'intensité sonore fournie dans le document.

On place $L_1 = 85 \text{ dB}$ sur l'échelle du document : cette valeur appartient à la plage 80 dB – 90 dB.

L'ouvrier subit un niveau sonore qualifié d'inconfort.

Surtout, 85 dB est *exactement* le seuil à partir duquel la législation impose le port d'un système de protection individuel contre le bruit (PICB) : ici $L_1 = 84,8 \text{ dB}$, soit tout juste au seuil des 85 dB ; la question Q3 montrera que l'exposition réelle (86 dB) le dépasse effectivement. Cet ouvrier, qui travaille sans protection auditive, s'expose donc, à terme, à une fatigue auditive puis à une perte d'audition.

- Q3** Montrer que l'ouvrier perçoit un niveau d'intensité sonore $L_{\text{total}} = 86 \text{ dB}$ lorsque son collègue utilise à proximité un outillage de niveau $L_2 = 80 \text{ dB}$.

Les niveaux d'intensité sonore, qui sont des logarithmes, **ne s'additionnent pas** : ce sont les **intensités sonores** (des puissances par unité de surface) qui s'ajoutent.

Étape 1 — intensité sonore de l'outillage du collègue.



On inverse la relation $L = 10 \log(I/I_0)$:

$$I_2 = I_0 \times 10^{L_2/10} = 1,0 \times 10^{-12} \times 10^{80/10} = 1,0 \times 10^{-12} \times 10^8 = 1,0 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Étape 2 — intensité sonore totale.

$$I_{\text{total}} = I_1 + I_2 = 3,0 \times 10^{-4} + 1,0 \times 10^{-4} = 4,0 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Étape 3 — niveau d'intensité sonore correspondant.

$$L_{\text{total}} = 10 \log\left(\frac{4,0 \times 10^{-4}}{1,0 \times 10^{-12}}\right) = 10 \log(4,0 \times 10^8) = 10 \times 8,602$$

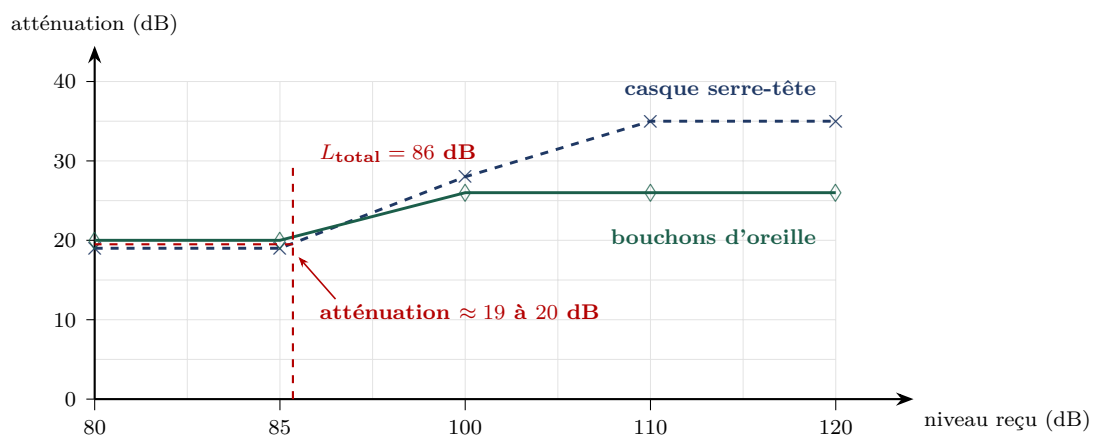
$$L_{\text{total}} = 86 \text{ dB} : \text{la valeur annoncée est bien vérifiée.}$$

Note du professeur

L'erreur à ne surtout pas commettre : $85 + 80 = 165 \text{ dB}$. Un niveau de 165 dB dépasse le seuil de destruction du tympan ! Deux réflexes à mémoriser : on repasse toujours par les intensités pour cumuler des sources, et *doubler* l'intensité n'ajoute que $10 \log 2 = 3,0 \text{ dB}$. Ici, une seconde source trois fois plus faible que la première n'a fait gagner qu'un seul décibel.

Q4 Indiquer si un mode de protection auditive est plus adapté qu'un autre pour l'ouvrier, parmi ceux indiqués sur la figure 1.

L'ouvrier reçoit $L_{\text{total}} = 86 \text{ dB}$ (question Q3). On lit sur la figure 1 l'atténuation offerte à ce niveau par chacune des deux protections : jusqu'à 85 dB, les deux courbes sont pratiquement confondues sur un palier voisin de 20 dB.



Niveaux perçus après atténuation.

- bouchons d'oreille (atténuation 20 dB) : $86 - 20 = 66 \text{ dB}$;
- casque serre-tête (atténuation 19 dB) : $86 - 19 = 67 \text{ dB}$.

Or le document impose un niveau perçu compris entre 65 dB et 80 dB pour être acceptable :

$$65 \leq 66 \leq 80 \quad \text{et} \quad 65 \leq 67 \leq 80$$



Les deux protections conviennent et donnent, à 1 dB près, le même résultat : aucun mode de protection n'est plus adapté que l'autre à ce niveau d'exposition.

Note du professeur

Attention à l'axe des abscisses de la figure 1 : les graduations 80, 85, 100, 110, 120 sont *régulièrement espacées* alors que les écarts ne le sont pas — l'échelle n'est pas linéaire. On ne peut donc pas y interpoler finement. Ici ce n'est pas gênant : à 86 dB on est encore tout près du palier initial, où les deux courbes se superposent.

Q5 Si l'on ne prend en compte que la machine d'usinage (110 dB à $d = 20$ m), calculer la distance d' à laquelle devrait se trouver l'ouvrier pour que le niveau sonore soit inférieur à $L_{\max} = 85$ dB. Commenter.

On cherche d' telle que $L' \leq L_{\max}$, en partant de la relation fournie :

$$L' = L - 10 \log\left(\frac{d'}{d}\right) \leq 85 \quad \Rightarrow \quad 10 \log\left(\frac{d'}{d}\right) \geq 110 - 85 = 25$$

$$\log\left(\frac{d'}{d}\right) \geq 2,5 \quad \Rightarrow \quad \frac{d'}{d} \geq 10^{2,5} = 3,16 \times 10^2$$

$$d' \geq 20 \times 3,16 \times 10^2$$

$$d' \geq 6,3 \times 10^3 \text{ m, soit plus de 6 kilomètres}$$

Commentaire. Une telle distance est manifestement **irréalisable** : aucun atelier de fabrication ne mesure six kilomètres de long. S'éloigner de la machine n'est donc pas une solution envisageable pour protéger l'ouvrier. Il faut soit agir à la source (capotage, isolation acoustique de la machine d'usinage), soit — c'est l'objet de la question suivante — équiper l'ouvrier d'une protection auditive individuelle.

Note du professeur

Vérifier le sens de l'inégalité par le bon sens physique : on veut *diminuer* le niveau, donc *s'éloigner*, donc $d' > d$ — le résultat doit être supérieur à 20 m. Signalons au passage que la relation fournie ici (en $10 \log$) est celle imposée par l'énoncé ; la loi habituelle d'une source ponctuelle en champ libre s'écrit $L' = L - 20 \log(d'/d)$ et conduirait à $d' \approx 3,6 \times 10^2$ m. On utilise évidemment la relation du sujet — mais l'ordre de grandeur reste dans les deux cas incompatible avec un atelier.



Q6 Déterminer, en justifiant, le mode de protection que doit utiliser l'ouvrier en période de travail intensif, parmi les deux présentés sur la figure 1.

Démarche suivie : (1) cumuler les trois sources pour obtenir le niveau réellement reçu par l'ouvrier ; (2) lire sur la figure 1 l'atténuation de chaque protection à ce niveau ; (3) vérifier laquelle ramène le niveau perçu dans l'intervalle acceptable [65 dB ; 80 dB].

Étape 1 — niveau d'intensité sonore reçu en période de travail intensif.

Trois sources se cumulent ; on repasse par les intensités (question Q3) :

- sa propre machine : $I_1 = 3,0 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$;
- l'outillage du collègue : $I_2 = 1,0 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$;
- la machine d'usinage, qui délivre $L_3 = 110 \text{ dB}$ à la distance $d = 20 \text{ m}$ où se trouve l'ouvrier :
 $I_3 = I_0 \times 10^{110/10} = 1,0 \times 10^{-12} \times 10^{11} = 1,0 \times 10^{-1} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

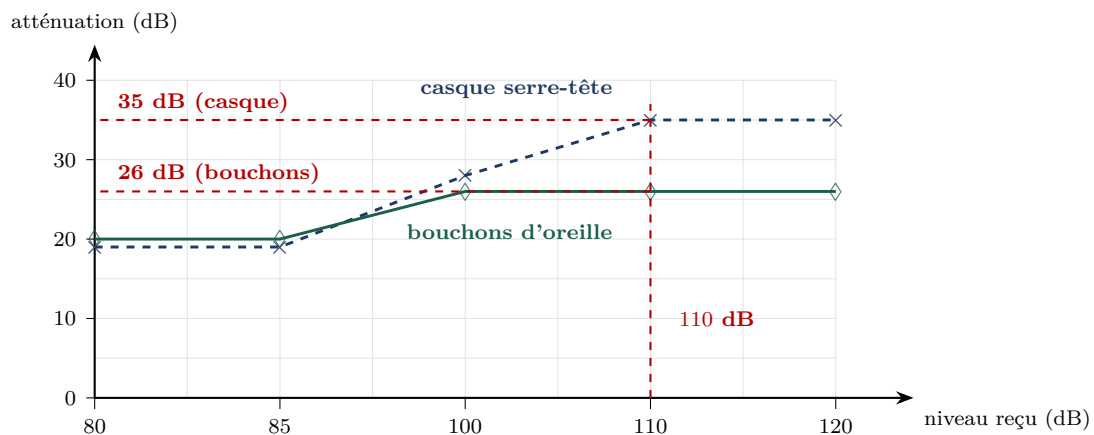
$$I_{\text{tot}} = 3,0 \times 10^{-4} + 1,0 \times 10^{-4} + 1,0 \times 10^{-1} = 1,004 \times 10^{-1} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$L_{\text{tot}} = 10 \log \left(\frac{1,004 \times 10^{-1}}{1,0 \times 10^{-12}} \right) = 10 \log (1,004 \times 10^{11})$$

$$L_{\text{tot}} = 110 \text{ dB}$$

La machine d'usinage impose à elle seule le niveau reçu : son intensité est environ 250 fois celle des deux autres sources réunies, qui ne font gagner que 0,02 dB.

Étape 2 — atténuation de chaque protection à 110 dB (figure 1).



Casque serre-tête : 35 dB • Bouchons d'oreille : 26 dB

Étape 3 — niveaux perçus et conclusion.

- avec le casque serre-tête : $110 - 35 = 75 \text{ dB}$, et $65 \leq 75 \leq 80$ ✓ acceptable ;
- avec les bouchons d'oreille : $110 - 26 = 84 \text{ dB}$, et $84 > 80$ × inacceptable.

L'ouvrier doit utiliser le casque serre-tête : c'est le seul qui ramène le niveau perçu (75 dB) dans l'intervalle acceptable [65 dB ; 80 dB].



On vérifie de plus qu'il n'atténue pas trop : à 75 dB, l'ouvrier reste au-dessus de 65 dB et continue donc de percevoir les alarmes et les consignes de sécurité de son environnement de travail.

Note du professeur

La clé de cette question est de comprendre que **l'atténuation dépend du niveau reçu** : on ne lit pas la figure 1 au même endroit qu'en Q4. Les bouchons plafonnent à 26 dB dès 100 dB, alors que le casque continue de progresser jusqu'à 35 dB — c'est précisément ce qui les disqualifie ici. Enfin, un raccourci légitime et valorisé pour l'étape 1 : ici la source dominante dépasse les autres de 24 dB (facteur 250), leur contribution est inférieure à 0,1 dB et l'on peut écrire $L_{\text{tot}} = 110$ dB sans calcul.

Récapitulatif des résultats numériques

Exercice 1. Groupes : 1 = alcool, 2 = acide carboxylique, 3 = cétone • acidité due au groupe carboxyle • espèce 1 = H_2CO_3 , espèce 2 = HCO_3^- (amphotère), espèce 3 = CO_3^{2-} • $\text{p}K_{A1} \approx 6,4$ (et $\text{p}K_{A2} \approx 10,4$) • à pH = 5, H_2CO_3 prédomine ($\approx 96\%$) • $\text{Ca}(\text{OH})_2(\text{s}) \longrightarrow \text{Ca}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{HO}^-(\text{aq})$ • $[\text{HO}^-] = 3,38 \times 10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, pH = 12,53 • lecture $n = 2,5$ mmol pour 100 g $\rightarrow m_c = 1,4 \times 10^3$ t de sol, $n(\text{Ca}^{2+}) = 3,5 \times 10^4$ mol, $m(\text{Ca}(\text{OH})_2) = 2,6 \times 10^6$ g $\approx 2,6$ t par hectare.

Exercice 2. Référentiel géocentrique • $\vec{F}_{O/S}$ centripète, portée par $\vec{u}_N$ • $\vec{F}_{O/S} = \frac{G m M_T}{(R_T + h)^2} \vec{u}_N$ • $dv/dt = 0$: mouvement uniforme • $T = T_T = 8,6164 \times 10^4$ s $\rightarrow r = 4,22 \times 10^7$ m et $h = 3,59 \times 10^7$ m $\approx 36\,000$ km • $\Delta t_1 = 1,2 \times 10^{-1}$ s, $\Delta t_2 = 3,3 \times 10^{-3}$ s, $\Delta t_1 \approx 36 \Delta t_2$.

Exercice 3. $L_1 = 85$ dB (inconfort ; seuil du PICB) • $I_2 = 1,0 \times 10^{-4} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, $L_{\text{total}} = 86$ dB • à 86 dB, les deux protections donnent 66 dB et 67 dB : équivalentes • $d' \geq 6,3 \times 10^3$ m (irréaliste) • $I_{\text{tot}} = 1,00 \times 10^{-1} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, $L_{\text{tot}} = 110$ dB $\rightarrow$ casque : 75 dB (acceptable), bouchons : 84 dB (refusé) : **casque serre-tête.**

