

Physique-chimie

Baccalauréat général 2026 — épreuve de spécialité

Asie, session 2026 (26-PYCJ1JA1)

Corrigé

Trois exercices

Exercice 1

Sujet — Acidité des sols — 9 points

Les propriétés chimiques d'un sol jouent un rôle prépondérant dans la production agricole et la biodiversité. Ainsi, la variation du pH d'un sol peut être à l'origine d'un déséquilibre dans sa composition minérale et organique, entraînant un mauvais développement des plantes. Dans une première partie, on étudie des espèces responsables du pH d'un sol. Puis on s'intéresse au chaulage des sols, technique agricole utilisée pour rectifier l'acidité d'un sol.

Partie 1 — pH d'un sol Le pH d'un sol est dû, entre autres, à la présence d'acides organiques issus de la biodégradation de la matière organique. L'acide fulvique, dont la représentation topologique est donnée ci-dessous (figure 1), est l'un d'entre eux.

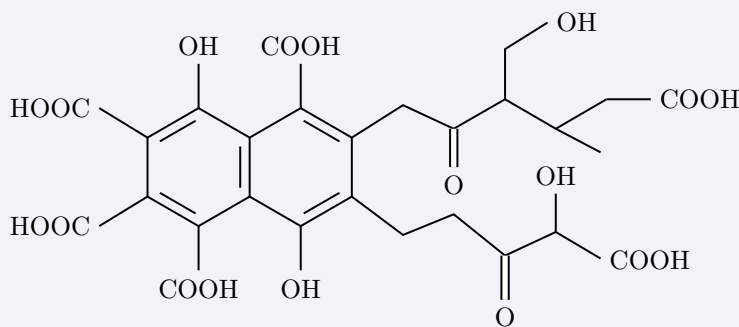


Figure 1. Représentation topologique de l'acide fulvique

Q1. Compléter le tableau présent sur l'**annexe à rendre avec la copie** en identifiant les familles associées aux groupes caractéristiques qui y sont entourés. On les choisira parmi la liste suivante : acide carboxylique, alcool, aldéhyde, amide, cétone, ester.

Q2. Préciser, parmi la liste ci-dessus, la famille qui contribue à l'acidité de la molécule. La dissolution du dioxyde de carbone atmosphérique $\text{CO}_2(\text{g})$ dans l'eau des précipitations entraîne la formation d'espèces acides et basiques dans les sols qui influent sur leur acidité.

Données : couples acido-basiques et $\text{p}K_A$ associé :

- $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq}) / \text{HCO}_3^-(\text{aq})$: $\text{p}K_{A1}$;
- $\text{HCO}_3^-(\text{aq}) / \text{CO}_3^{2-}(\text{aq})$: $\text{p}K_{A2}$.

La figure 2 représente le diagramme de distribution des espèces acido-basiques $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq})$, $\text{HCO}_3^-(\text{aq})$ et $\text{CO}_3^{2-}(\text{aq})$ obtenu par simulation informatique.

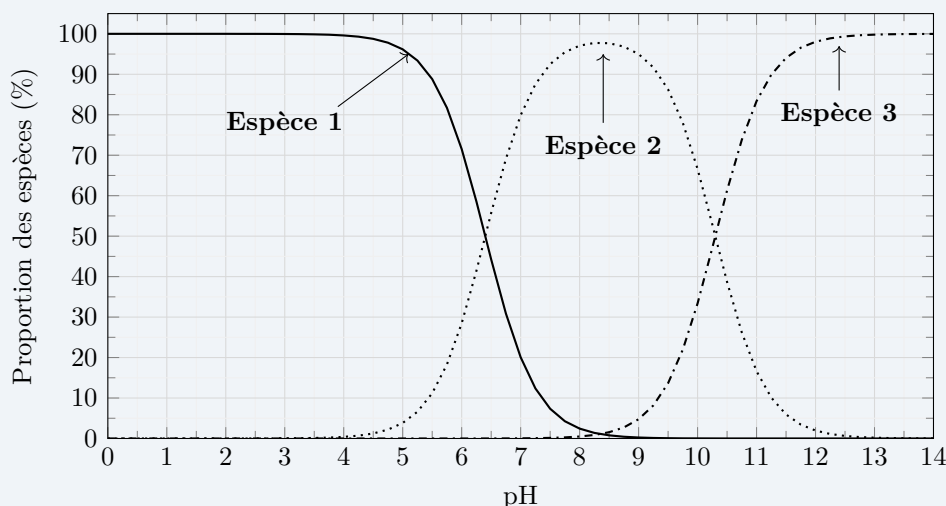


Figure 2. Diagramme de distribution des espèces acido-basiques $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq})$, $\text{HCO}_3^-(\text{aq})$ et $\text{CO}_3^{2-}(\text{aq})$

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

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

Q5. Donner l'expression littérale de la constante d'acidité K_{A1} en fonction des concentrations $[\text{H}_2\text{CO}_3]$, $[\text{HCO}_3^-]$ et $[\text{H}_3\text{O}^+]$ et c^0 , la concentration standard ($c^0 = 1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$).

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

Q7. Estimer la valeur de $\text{p}K_{A1}$ en utilisant la figure 2. Vous justifierez la réponse à partir de la relation démontrée précédemment.

Terre de prédilection pour les hortensias bleus, la terre de Bruyère a un pH proche de 5.

Q8. Indiquer, en justifiant, l'espèce acido-basique issue du carbone atmosphérique prédominante dans la terre de Bruyère.

Partie 2 — Chaulage d'un sol Les sols acides peuvent s'avérer néfastes pour la culture de certaines plantes. Le chaulage des sols consiste à réguler le pH des sols en utilisant de la chaux éteinte, ou hydroxyde de calcium, de formule chimique $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Document — Titrage de l'acidité. Pour déterminer la quantité de chaux à ajouter au sol trop acide, on utilise une courbe de titrage de l'acidité. Pour cela, on réalise une solution aqueuse S d'hydroxyde de calcium en dissolvant une masse $m = 0,250 \text{ g}$ d'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2(\text{s})$ dans un volume $V = 200 \text{ mL}$ d'eau.

On prépare différentes solutions contenant :

- 100,0 g d'un échantillon test de terre de bruyère ;
- différents volumes de la solution aqueuse S contenant une quantité de matière n d'ions calcium ;
- de l'eau.

La courbe de titrage est tracée en mesurant le pH de ces solutions en fonction de la quantité de matière n d'ions calcium.

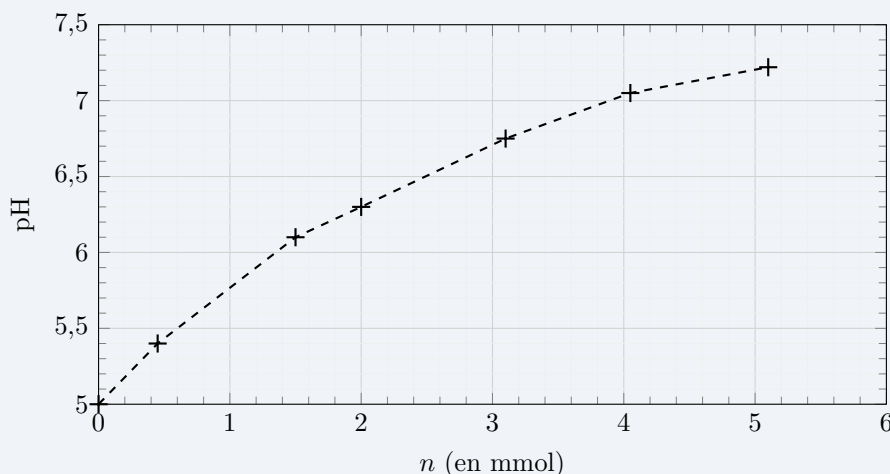


Figure 3. Évolution du pH des solutions testées en fonction de la quantité de matière n en mmol d'ions calcium pour 100 g de terre (d'après *horizon.documentation.ird.fr*)

Données :

- produit ionique de l'eau $K_e = 1,00 \times 10^{-14}$ à 25 °C ;
- masse molaire de l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$: $M = 74,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$;
- 1 ha = $1,00 \times 10^4 \text{ m}^2$; 1 tonne = $1,00 \times 10^3 \text{ kg}$.

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

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

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

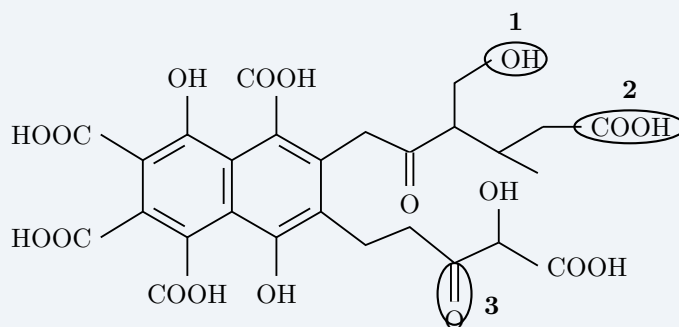
La masse m_c (en tonnes) d'un sol à chauler se calcule à partir de la relation suivante : $m_c = 1,4 \times S \times e$ où S est la superficie de la parcelle à chauler (en m^2) et e l'épaisseur de la couche de sol à considérer (en m).

Un agriculteur souhaite chauler une parcelle de 1,00 ha en épandant de l'hydroxyde de calcium sur 10,0 cm de profondeur afin d'amener le pH de son sol à 6,50.

Q12. Déterminer la valeur de la masse d'hydroxyde de calcium $m(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ nécessaire pour atteindre le pH désiré.

Le candidat est invité à prendre des initiatives et à présenter la démarche suivie, même si elle n'a pas abouti. La démarche est évaluée et doit être correctement présentée.

Annexe à rendre avec la copie Formule topologique de l'acide fulvique, trois groupes caractéristiques entourés et numérotés.



Numéro du groupe caractéristique	Nom de la famille
1	
2	
3	

Corrigé

Partie 1 — pH d'un sol **Q1.** On reconnaît chaque famille au voisinage immédiat de l'atome fonctionnel.

- Groupe 1 : un $-\text{OH}$ porté par un atome de carbone qui n'est lié qu'à des atomes de carbone et d'hydrogène (pas de double liaison $\text{C}=\text{O}$ sur ce carbone) : c'est un groupe hydroxyle, famille **alcool**.
- Groupe 2 : un groupe $-\text{COOH}$, c'est-à-dire un carbone portant à la fois une double liaison $\text{C}=\text{O}$ et un $-\text{OH}$: groupe carboxyle, famille **acide carboxylique**.
- Groupe 3 : un $\text{C}=\text{O}$ dont le carbone est lié *de part et d'autre* à deux atomes de carbone (et à aucun H, aucun O supplémentaire) : groupe carbonyle en milieu de chaîne, famille **cétone** (et non aldéhyde, qui exigerait un carbone en bout de chaîne portant un H).

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

Ce que le correcteur attend : distinguer aldéhyde et cétone en regardant les *deux* voisins du carbone du $\text{C}=\text{O}$, et ne pas confondre le $-\text{OH}$ d'alcool (groupe 1) avec le $-\text{OH}$ du groupe carboxyle (groupe 2), qui est porté par le carbone du $\text{C}=\text{O}$.

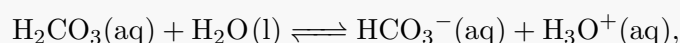
Q2. La famille responsable de l'acidité est l'**acide carboxylique**. Le groupe carboxyle $-\text{COOH}$ peut en effet céder un proton H^+ à l'eau selon $\text{R}-\text{COOH}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{R}-\text{COO}^-(\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$: c'est un acide au sens de Brønsted. Ni le groupe hydroxyle de l'alcool ni le groupe carbonyle de la cétone ne libèrent d'ion H_3O^+ en solution aqueuse. L'acide fulvique représenté porte six groupes $-\text{COOH}$: c'est un polyacide, ce qui explique son rôle dans l'acidité des sols.

Q3. Quand le pH augmente, on passe successivement de l'acide le plus fort à la base la plus forte de la série. L'espèce prédominante à pH très acide est donc le diacide, puis l'ion intermédiaire, puis l'ion le plus basique :

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. L'ion hydrogénocarbonate HCO_3^- appartient à deux couples : il est la *base* du couple $\text{H}_2\text{CO}_3/\text{HCO}_3^-$ et l'*acide* du couple $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$. Une espèce qui est ainsi l'acide d'un couple et la base d'un autre est dite **amphotère** (on dit aussi un ampholyte). C'est cohérent avec le diagramme : la courbe de l'espèce 2 croît puis décroît, elle n'est prédominante que dans un domaine *encadré*, entre $\text{p}K_{\text{A1}}$ et $\text{p}K_{\text{A2}}$.

Q5. La réaction de l'acide H_2CO_3 avec l'eau s'écrit



et la constante d'acidité est la constante d'équilibre associée, les concentrations étant rapportées

à c^0 (l'eau, solvant, n'intervient pas) :

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

K_{A1} est bien sans dimension.

Q6. On prend le cologarithme, c'est-à-dire l'opposé du logarithme décimal, des deux membres :

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

Or, par définition, $\text{pH} = -\log \left(\frac{[\text{H}_3\text{O}^+]}{c^0} \right)$, d'où $\text{p}K_{A1} = -\log \left(\frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]} \right) + \text{pH}$, et finalement

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

Q7. D'après la relation précédente, lorsque les deux espèces du couple sont en concentrations égales, $[\text{HCO}_3^-] = [\text{H}_2\text{CO}_3]$, le rapport vaut 1, $\log 1 = 0$ et donc $\text{pH} = \text{p}K_{A1}$.

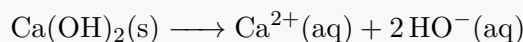
Sur la figure 2, cette égalité correspond au point d'intersection des courbes des espèces 1 et 2, qui se croisent à la hauteur 50 % (les deux espèces représentent alors chacune la moitié du carbone dissous, les autres formes étant négligeables). On lit cette abscisse entre les graduations 6 et 7, un peu avant le milieu :

$$\text{p}K_{A1} \approx 6,4.$$

Doute de lecture : la précision du graphique est de l'ordre d'un demi-carreau, une réponse comprise entre 6,3 et 6,5 est acceptable. On lirait de la même façon $\text{p}K_{A2} \approx 10,3$ à l'intersection des courbes 2 et 3.

Q8. La terre de Bruyère a un $\text{pH} \approx 5$, donc $\text{pH} < \text{p}K_{A1} = 6,4$. La relation de Q6 donne alors $\log \left(\frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]} \right) = \text{pH} - \text{p}K_{A1} = -1,4 < 0$, soit $[\text{HCO}_3^-] < [\text{H}_2\text{CO}_3]$ (le rapport vaut $10^{-1,4} \approx 0,04$) : c'est la forme acide $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq})$ qui **prédomine**. La lecture directe de la figure 2 à $\text{pH} = 5$ le confirme : l'espèce 1 y représente environ 96 % du carbone dissous.

Partie 2 — Chaulage d'un sol **Q9.** L'hydroxyde de calcium est un solide ionique constitué d'ions Ca^{2+} et HO^- dans les proportions 1 pour 2. Sa dissolution totale libère ces ions dans l'eau :



(flèche simple : la transformation est totale ; l'équation est bien équilibrée en éléments et en charges, $0 = (+2) + 2 \times (-1)$).

Q10. Quantité de matière de solide dissous :

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

D'après les coefficients stœchiométriques de l'équation de dissolution, chaque mole de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libère deux moles d'ions hydroxyde : $n(\text{HO}^-) = 2n(\text{Ca}(\text{OH})_2)$. Avec $V = 200 \text{ mL} = 0,200 \text{ L}$:

$$[\text{HO}^-] = \frac{n(\text{HO}^-)}{V} = \frac{2m}{MV} = \frac{2 \times 0,250}{74,0 \times 0,200} = 3,38 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

Ce que le correcteur attend : le facteur 2 (l'oublier donnerait $1,69 \times 10^{-2}$) et le volume converti en litres.

Q11. À 25 °C, l'autoprotolyse de l'eau impose $K_e = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+] \times [\text{HO}^-]}{(c^0)^2}$, d'où

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{K_e (c^0)^2}{[\text{HO}^-]} = \frac{1,00 \times 10^{-14}}{3,38 \times 10^{-2}} = 2,96 \times 10^{-13} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1},$$

puis

$$\text{pH} = -\log \left(\frac{[\text{H}_3\text{O}^+]}{c^0} \right) = -\log (2,96 \times 10^{-13}) = 12,5.$$

(On peut aussi passer par $\text{pOH} = -\log(3,38 \times 10^{-2}) = 1,47$ puis $\text{pH} = 14,0 - 1,47 = 12,5$.) La valeur est cohérente : la solution S est une solution basique concentrée de chaux éteinte, son pH doit être proche de 12–13.

Q12. *Démarche en trois temps.*

(a) *Quantité d'ions calcium nécessaire pour 100 g de terre.* On lit la figure 3 à l'ordonnée $\text{pH} = 6,50$: ce point est situé entre les deux points expérimentaux (2,0 ; 6,3) et (3,1 ; 6,75), à peu près à mi-chemin. On lit donc $n \approx 2,5 \text{ mmol} = 2,5 \times 10^{-3} \text{ mol}$ d'ions Ca^{2+} pour 100 g de terre. *Doute de lecture* : le graphique se lit ici à $\pm 0,2 \text{ mmol}$ près, soit environ $\pm 8 \%$ sur le résultat final.

(b) *Masse de sol à traiter.* La parcelle a pour superficie $S = 1,00 \text{ ha} = 1,00 \times 10^4 \text{ m}^2$ et l'épaisseur travaillée vaut $e = 10,0 \text{ cm} = 0,100 \text{ m}$ (attention, la relation attend des mètres) :

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

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

(c) *Masse de chaux.* La quantité d'ions calcium à apporter est proportionnelle à la masse de terre :

$$n(\text{Ca}^{2+}) = 2,5 \times 10^{-3} \times \frac{1,4 \times 10^9}{100,0} = 2,5 \times 10^{-3} \times 1,4 \times 10^7 = 3,5 \times 10^4 \text{ mol}.$$

L'équation de dissolution donne $n(\text{Ca}(\text{OH})_2) = n(\text{Ca}^{2+}) = 3,5 \times 10^4 \text{ mol}$ (un ion calcium par motif dissous), d'où

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

Ordre de grandeur. Cela représente environ 260 g de chaux éteinte par mètre carré, soit 2,6 tonnes à l'hectare : c'est bien l'ordre de grandeur des doses de chaulage pratiquées en agriculture (de 1 à 3 t·ha⁻¹). Le résultat est donc réaliste.

Ce que le correcteur attend : la lecture graphique explicitée ; la conversion cm → m avant d'appliquer $m_c = 1,4 S e$; le passage des tonnes aux grammes avant la proportionnalité ; et deux chiffres significatifs seulement, puisque la valeur de n vient d'une lecture graphique.

Exercice 2

Sujet — Satellites de communication — 6 points

Il y a 70 ans, seule la Lune tournait autour de la Terre. Actuellement, près de 7 500 satellites survolent notre planète à différentes altitudes. Si certains ont été envoyés dans l'espace à des fins scientifiques ou militaires, la majorité est dédiée aux communications et à l'observation de la Terre.

L'objectif de cet exercice est d'étudier le mouvement des satellites autour de la Terre et d'exploiter leurs caractéristiques.

Document — Mission : communiquer. Internet, radio ou encore téléphonie mobile : ces missions sont assurées par des satellites de télécommunication. Certains, positionnés sur une orbite géostationnaire, survolent toujours la même zone. Conséquence : pas besoin de déplacer l'antenne pour capter les signaux. La couverture du signal est alors plus large. Depuis cette orbite, un petit nombre de satellites suffisent à couvrir l'intégralité du globe.

D'autres se situent sur une orbite terrestre basse entre 400 et 1 000 km d'altitude : ce sont les satellites LEO. Le délai de transmission des signaux y est beaucoup plus court, ce qui est très intéressant pour la rapidité d'échange. Mais pour garantir une bonne couverture de la Terre, plusieurs milliers de satellites, fonctionnant « en groupe », sont nécessaires, multipliant les risques d'encombrement, de pannes et de débris spatiaux : leur impact environnemental est donc pointé du doigt. (*D'après cnes.fr*)

On étudie le mouvement du centre de masse S d'un satellite par rapport à un référentiel supposé galiléen. Le satellite, de masse m , gravite sur une orbite circulaire géostationnaire située à une altitude h par rapport à la surface de la Terre.

On considère que le satellite n'est soumis qu'à l'unique action de la force d'interaction gravitationnelle $\vec{F}_{OS}$ exercée par la Terre de centre O , de masse M_T et de rayon R_T . On associe au centre de masse S le repère de Frenet $(S, \vec{u}_N, \vec{u}_T)$.

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

Q2. Compléter le schéma présent sur l'**annexe à rendre avec la copie** en représentant sans souci d'échelle la force d'interaction gravitationnelle $\vec{F}_{OS}$.

Q3. Donner l'expression vectorielle de la force $\vec{F}_{OS}$ dans le repère de Frenet en fonction de G , constante de gravitation universelle, m , M_T , R_T et h .

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

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

À partir des données des rayons r des orbites et des périodes de révolution T de différents satellites terrestres, un programme informatique a permis de tracer puis de modéliser l'évolution du carré des périodes en fonction du cube des rayons r . La figure 1 ci-après fournit le graphe obtenu après exécution du programme. La modélisation par une droite indique un coefficient directeur $k = 9,85 \times 10^{-14} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$.

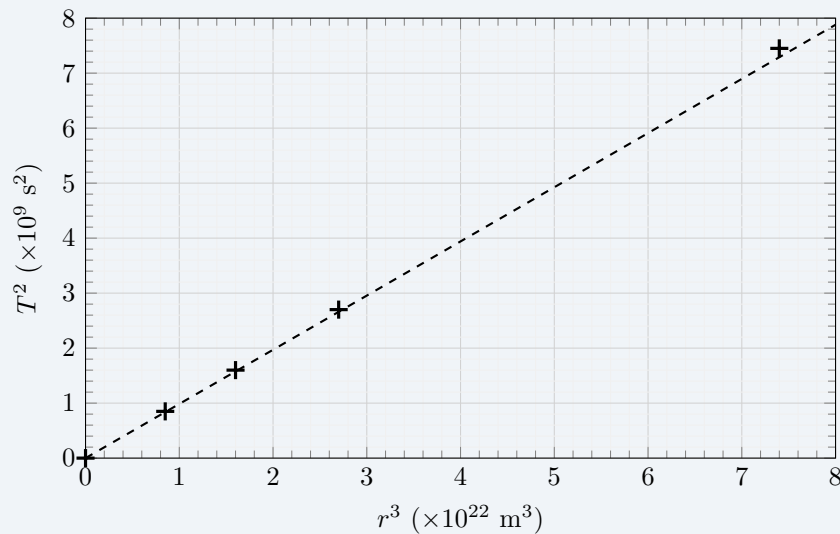


Figure 1. Évolution du carré de la période de révolution de satellites terrestres en fonction du cube du rayon de leur orbite

Données :

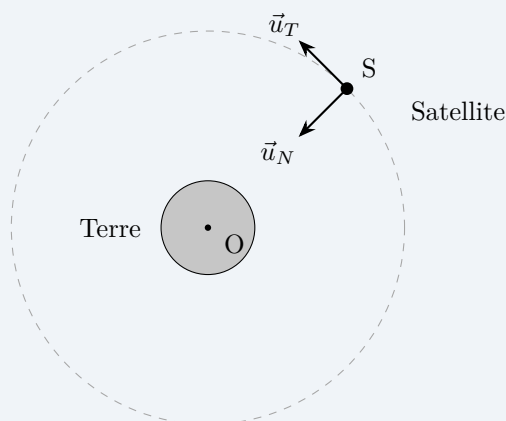
- constante de gravitation universelle : $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$;
- rayon de la Terre : $R_T = 6,38 \times 10^3 \text{ km}$;
- période de rotation de la Terre autour de l'axe des pôles : $T_T = 23 \text{ h } 56 \text{ min } 4 \text{ s}$;
- célérité d'une onde électromagnétique dans le vide : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

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

Q7. Comparer la valeur de la durée de transmission Δt_1 d'un signal électromagnétique émis depuis la surface de la Terre vers un satellite géostationnaire à celle, notée Δt_2 , vers un satellite LEO, en orbite à $1\,000 \text{ km}$ d'altitude.

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

Annexe à rendre avec la copie Schéma représentant le mouvement du centre de masse du satellite S autour de la Terre.

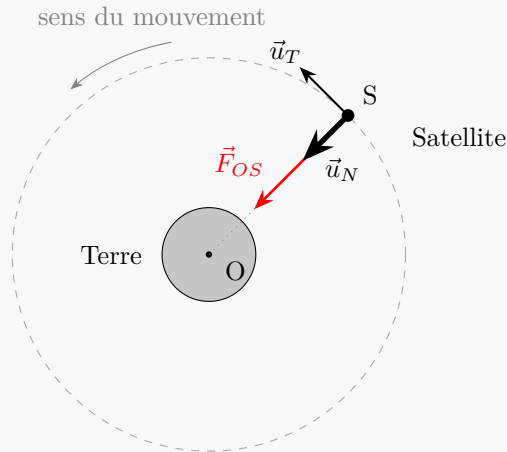


Corrigé

Q1. Le satellite tourne autour de la Terre : le référentiel adapté est le **référentiel géocentrique**, dont l'origine est le centre O de la Terre et dont les trois axes pointent vers des étoiles lointaines supposées fixes. Il est supposé galiléen pendant la durée de l'étude (quelques révolutions du satellite).

Ce que le correcteur attend : le référentiel *terrestre* serait faux — il tourne avec la Terre, et dans ce référentiel un satellite géostationnaire serait immobile.

Q2. La force d'interaction gravitationnelle exercée par la Terre sur le satellite est **attractive** : son point d'application est le centre de masse S, sa direction la droite (OS), son sens de S vers O. Elle est donc portée par le vecteur $\vec{u}_N$ du schéma, qui est dirigé de S vers le centre O.



La force est portée par la droite (OS), dirigée de S vers O, dans le même sens que $\vec{u}_N$.

Q3. La loi de gravitation universelle donne la valeur de la force exercée par la Terre (masse M_T) sur le satellite (masse m), dont les centres sont distants de $r = R_T + h$:

$$F_{OS} = G \frac{m M_T}{(R_T + h)^2}.$$

Le vecteur $\vec{u}_N$ du repère de Frenet étant dirigé de S vers O, c'est-à-dire dans le sens de la force attractive, l'expression vectorielle s'écrit

$$\vec{F}_{OS} = G \frac{m M_T}{(R_T + h)^2} \vec{u}_N.$$

Ce que le correcteur attend : le signe. Il est *positif* ici parce que $\vec{u}_N$ est centripète (figure de l'annexe). Avec un vecteur radial dirigé de O vers S (convention $\vec{u}_r$ « sortante »), il faudrait écrire un signe moins. Le rayon de l'orbite est $R_T + h$ et non h : c'est la distance entre les centres.

Remarque sur les données : le sujet officiel imprime $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$. C'est une coquille : la loi de gravitation $F = G m M_T / r^2$ impose $[G] = \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} = \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, unité rétablie plus haut dans les données. La valeur numérique, elle, est la bonne — et G n'intervient dans aucune application numérique de l'exercice, la question 6 passant par le coefficient directeur k lu sur la figure 1.

Q4. *Système :* le satellite, de masse m , assimilé à son centre de masse S. *Référentiel :* géocentrique, supposé galiléen. *Bilan des forces :* l'énoncé précise que le satellite n'est soumis qu'à la force d'interaction gravitationnelle $\vec{F}_{OS}$.

La deuxième loi de Newton s'écrit $\sum \vec{F}_{\text{ext}} = m \vec{a}$, soit

$$G \frac{m M_T}{(R_T + h)^2} \vec{u}_N = m \vec{a} \quad \Rightarrow \quad \vec{a} = G \frac{M_T}{(R_T + h)^2} \vec{u}_N.$$

L'accélération ne dépend pas de la masse du satellite ; elle est entièrement portée par $\vec{u}_N$, sa composante tangentielle est donc nulle.

Or, pour un mouvement circulaire de rayon $r = R_T + h$, le vecteur accélération s'écrit dans la base de Frenet

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

En identifiant les composantes des deux expressions :

- selon $\vec{u}_T$: $\frac{dv}{dt} = 0$, donc $v = \text{constante}$;
- selon $\vec{u}_N$: $\frac{v^2}{R_T + h} = \frac{G M_T}{(R_T + h)^2}$, d'où $v = \sqrt{\frac{G M_T}{R_T + h}}$.

La valeur de la vitesse étant constante, le mouvement circulaire de S est bien **uniforme**.

Q5. La période de révolution T du satellite est la **durée nécessaire au centre de masse S pour effectuer un tour complet de son orbite** autour du centre O de la Terre. Le mouvement étant uniforme, elle vérifie $T = \frac{2\pi(R_T + h)}{v}$.

Q6. La figure 1 montre que T^2 est une fonction linéaire de r^3 (droite modélisée passant par l'origine) : c'est la troisième loi de Kepler, $T^2 = k r^3$ avec $k = 9,85 \times 10^{-14} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$.

Un satellite *géostationnaire* reste à la verticale du même point de la surface terrestre : sa période de révolution est donc égale à la période de rotation propre de la Terre (jour sidéral),

$$T = T_T = 23 \times 3600 + 56 \times 60 + 4 = 86\,164 \text{ s}.$$

On en tire le rayon de l'orbite :

$$r^3 = \frac{T^2}{k} = \frac{(86\,164)^2}{9,85 \times 10^{-14}} = 7,54 \times 10^{22} \text{ m}^3, \quad r = \sqrt[3]{7,54 \times 10^{22}} = 4,22 \times 10^7 \text{ m}.$$

Comme $r = R_T + h$, avec $R_T = 6,38 \times 10^3 \text{ km} = 6,38 \times 10^6 \text{ m}$:

$$h = r - R_T = 4,22 \times 10^7 - 6,38 \times 10^6 = 3,59 \times 10^7 \text{ m} = 3,59 \times 10^4 \text{ km},$$

soit environ 36 000 km : la valeur annoncée est bien retrouvée.

Ce que le correcteur attend : le rayon terrestre converti en mètres avant la soustraction ($10^3 \text{ km} = 10^6 \text{ m}$) ; la période exprimée en secondes ; et l'idée que « géostationnaire » impose $T = T_T$, sans quoi la question n'a pas de point de départ. Remarque : le point le plus à droite de la figure 1, d'abscisse $r^3 \approx 7,4 \times 10^{22} \text{ m}^3$ et d'ordonnée $T^2 \approx 7,4 \times 10^9 \text{ s}^2$, est justement celui du satellite géostationnaire.

Q7. L'onde électromagnétique se propage en ligne droite à la célérité c dans le vide ; la durée de transmission entre la surface de la Terre et un satellite situé à l'altitude h est donc $\Delta t = \frac{h}{c}$.
Satellite géostationnaire ($h_1 = 3,59 \times 10^7 \text{ m}$) :

$$\Delta t_1 = \frac{h_1}{c} = \frac{3,59 \times 10^7}{3,00 \times 10^8} = 0,120 \text{ s} = 120 \text{ ms}.$$

Satellite LEO ($h_2 = 1\,000 \text{ km} = 1,00 \times 10^6 \text{ m}$) :

$$\Delta t_2 = \frac{h_2}{c} = \frac{1,00 \times 10^6}{3,00 \times 10^8} = 3,33 \times 10^{-3} \text{ s} = 3,33 \text{ ms}.$$

Comparaison :

$$\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = \frac{0,120}{3,33 \times 10^{-3}} = 36.$$

La durée de transmission vers le satellite géostationnaire est environ **36 fois plus longue** que vers le satellite LEO (rapport égal à celui des altitudes, puisque la célérité est la même). Pour un aller-retour Terre–satellite–Terre, cela représente 240 ms contre 6,7 ms.

Q8. Les deux types d'orbite s'opposent point par point.

Type de satellite	Avantages	Inconvénients
Géostationnaire ($h \approx 36\,000$ km)	Immobile au-dessus d'une même zone : l'antenne de réception est fixe, pas de suivi ni de basculement d'un satellite à l'autre. Très large couverture : quelques satellites suffisent pour le globe entier.	Délai de transmission long ($\Delta t_1 = 120$ ms, soit 240 ms aller-retour) : pénalisant pour les usages interactifs d'internet (visioconférence, jeu en ligne). Signal plus faible à si grande distance.
LEO (400 à 1 000 km)	Délai de transmission très court ($\Delta t_2 = 3,3$ ms, 36 fois moins), donc des échanges rapides : c'est l'atout majeur pour internet.	Couverture réduite par satellite et satellite mobile dans le ciel : il faut une constellation de plusieurs milliers d'engins fonctionnant en groupe, d'où encombrement de l'orbite basse, risques de pannes et de collisions, débris spatiaux et impact environnemental pointé du doigt.

Conclusion : pour de la diffusion (télévision, radio) vers de vastes zones, l'orbite géostationnaire reste la plus économique ; pour un accès internet réactif, l'orbite basse s'impose malgré le nombre de satellites nécessaires et son coût environnemental.

Exercice 3

Sujet — Sécurité acoustique — 5 points

Dans le milieu professionnel, le bruit constitue une nuisance majeure. Il peut provoquer non seulement des surdités mais aussi fatigue et stress qui entraînent des conséquences sur la santé du salarié et la qualité de son travail. Différents moyens de protection existent et sont dorénavant obligatoires.

L'objectif de cet exercice est d'analyser la situation d'un ouvrier travaillant dans un atelier de fabrication de pièces mécaniques.

Document — Protections contre le bruit. La législation concernant les dangers acoustiques sur le lieu de travail stipule qu'un système de protection individuel contre le bruit (PICB) est obligatoire à partir d'une exposition à un son de 85 dB.

Néanmoins un travailleur doit pouvoir percevoir son environnement de travail (alarmes, consignes de sécurité...). Par conséquent, on admet que le niveau d'intensité sonore perçu après atténuation doit être compris entre 65 dB et 80 dB pour être acceptable sur un lieu de travail.

0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	L (dB)
Aucun risque						Fatigue	Inconfort	Difficilement supportable	Danger de perte irréversible				

Échelle des niveaux d'intensité sonore et conséquences auditives (d'après *polycliniquedeloreille.com*)

Donnée : relation entre le niveau d'intensité sonore L (dB) et l'intensité sonore I ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) :

$$L = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

où $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ est l'intensité sonore de référence.

Dans un atelier de fabrication de pièces mécaniques, un ouvrier travaille sans protection auditive sur une machine émettant un son d'intensité $I_1 = 3,0 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Q1. Calculer le niveau d'intensité sonore L_1 perçu par cet ouvrier.

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

À proximité de lui se trouve un de ses collègues qui utilise un outillage produisant un niveau d'intensité sonore $L_2 = 80 \text{ dB}$.

Q3. Montrer que l'ouvrier perçoit un niveau d'intensité sonore $L_{\text{total}} = 86 \text{ dB}$.

L'ouvrier a le choix entre deux types de protection : un casque serre-tête ou des bouchons d'oreille. L'atténuation permise par ces protections varie selon le niveau d'intensité sonore reçu. La figure 1 ci-dessous représente l'atténuation mesurée expérimentalement.

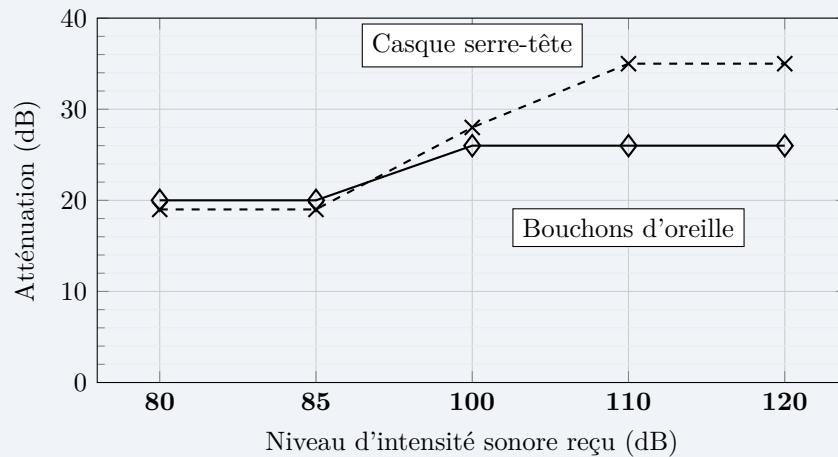


Figure 1. Évaluation de l'atténuation sonore d'un casque serre-tête et de bouchons d'oreille en fonction du niveau d'intensité sonore reçu

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

Au fond de l'atelier se trouve une machine d'usinage dont le niveau d'intensité sonore L atteint 110 dB lorsqu'elle fonctionne à une distance $d = 20$ m de l'ouvrier.

On admet que le niveau d'intensité sonore L' de cette machine à une distance d' s'obtient grâce à la relation : $L' = L - 10 \log \left(\frac{d'}{d} \right)$.

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

En période de travail intensif dans l'atelier, l'ouvrier est soumis au niveau d'intensité sonore de sa machine, à celui de l'outil de son collègue et à celui de la machine d'usinage située à 20 m. Une protection auditive efficace est donc indispensable afin que le niveau d'intensité sonore soit acceptable sur le lieu de travail.

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

Le candidat est invité à prendre des initiatives et à présenter la démarche suivie, même si elle n'a pas abouti. La démarche est évaluée et doit être correctement présentée.

Corrigé

Q1. On applique directement la relation donnée avec $I_1 = 3,0 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ et $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$:

$$L_1 = 10 \log \left(\frac{I_1}{I_0} \right) = 10 \log \left(\frac{3,0 \times 10^{-4}}{1,0 \times 10^{-12}} \right) = 10 \log (3,0 \times 10^8) = 10 \times 8,48 = 84,8 \approx 85 \text{ dB}.$$

Ce que le correcteur attend : le rapport I_1/I_0 est *sans unité* (les deux intensités sont en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), et le logarithme est décimal, pas népérien. Deux chiffres significatifs sur I_1 donnent $L_1 = 85$ dB (valeur non arrondie : 84,8 dB).

Q2. Sur l'échelle du document, $L_1 = 85$ dB se situe dans la plage 80–90 dB : l'ouvrier ressent un **inconfort** (auquel s'ajoutent, d'après l'introduction, fatigue et stress). Ce niveau atteint par ailleurs le seuil réglementaire de 85 dB à partir duquel un système de protection individuel contre le bruit (PICB) est **obligatoire** : l'ouvrier ne devrait donc pas travailler sans protection.

Q3. Les niveaux en décibels ne s'additionnent pas ; ce sont les *intensités sonores* qui s'ajoutent.

On revient donc d'abord à l'intensité de la seconde source en inversant la relation, $I = I_0 \times 10^{L/10}$:

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

Les deux sources étant indépendantes, l'intensité totale reçue est la somme :

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

D'où le niveau d'intensité sonore total :

$$L_{\text{total}} = 10 \log \left(\frac{4,0 \times 10^{-4}}{1,0 \times 10^{-12}} \right) = 10 \log (4,0 \times 10^8) = 86,0 \text{ dB} \approx 86 \text{ dB}.$$

Ce que le correcteur attend : ne surtout pas écrire $L_{\text{total}} = L_1 + L_2 = 165 \text{ dB}$. L'ajout d'une source de 80 dB à une source de 85 dB ne fait gagner qu'environ 1 dB : c'est la nature logarithmique de l'échelle.

Q4. L'ouvrier reçoit $L_{\text{total}} = 86 \text{ dB}$. On lit la figure 1 au voisinage de cette valeur, c'est-à-dire au point d'abscisse 85 dB :

- casque serre-tête : atténuation $A \approx 19 \text{ dB}$, d'où un niveau perçu $86 - 19 = 67 \text{ dB}$;
- bouchons d'oreille : atténuation $A \approx 20 \text{ dB}$, d'où un niveau perçu $86 - 20 = 66 \text{ dB}$.

Les deux valeurs appartiennent à l'intervalle acceptable [65 dB ; 80 dB] du document, et elles ne diffèrent que de 1 dB, écart inférieur à la précision de lecture du graphique (et à peine perceptible par l'oreille). **Aucun des deux modes de protection n'est donc plus adapté que l'autre à ce niveau sonore** : entre 80 et 85 dB, les deux courbes de la figure 1 sont pratiquement confondues (19 dB et 20 dB).

Doute de lecture : l'atténuation se lit à $\pm 1 \text{ dB}$ près sur la figure ; répondre « environ 20 dB pour les deux » est tout aussi recevable et ne change pas la conclusion.

Q5. On isole d' dans la relation fournie, en prenant $L' = L_{\text{max}} = 85 \text{ dB}$, $L = 110 \text{ dB}$ et $d = 20 \text{ m}$:

$$10 \log \left(\frac{d'}{d} \right) = L - L' \quad \Rightarrow \quad \log \left(\frac{d'}{d} \right) = \frac{L - L'}{10} \quad \Rightarrow \quad d' = d \times 10^{\frac{L - L'}{10}}.$$

Application numérique :

$$d' = 20 \times 10^{\frac{110 - 85}{10}} = 20 \times 10^{2,5} = 20 \times 316 = 6,3 \times 10^3 \text{ m} = 6,3 \text{ km}.$$

Commentaire : il faudrait s'éloigner de plus de six kilomètres de la machine pour que son niveau d'intensité sonore descende sous 85 dB. C'est évidemment impossible dans un atelier, dont les dimensions se comptent en dizaines de mètres, et incompatible avec le travail de l'ouvrier. L'éloignement (protection dite collective) n'est donc pas une solution ici : le port d'un PICB est indispensable.

Q6. Démarche.

(a) *Niveau reçu sans protection.* L'ouvrier reçoit trois sources ; on additionne leurs intensités. On connaît déjà $I_1 = 3,0 \times 10^{-4}$ et $I_2 = 1,0 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Pour la machine d'usinage, qui délivre $L_3 = 110 \text{ dB}$ à la distance $d = 20 \text{ m}$ où se trouve l'ouvrier :

$$I_3 = I_0 \times 10^{L_3/10} = 1,0 \times 10^{-12} \times 10^{11} = 1,0 \times 10^{-1} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

$$I_{\text{total}} = I_1 + I_2 + I_3 = 3,0 \times 10^{-4} + 1,0 \times 10^{-4} + 1,0 \times 10^{-1} = 1,004 \times 10^{-1} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2},$$

$$L_{\text{total}} = 10 \log \left(\frac{1,004 \times 10^{-1}}{1,0 \times 10^{-12}} \right) = 10 \log (1,004 \times 10^{11}) = 110,0 \text{ dB}.$$

La machine d'usinage écrase tout : les deux autres sources réunies ($4,0 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) sont 250 fois moins intenses qu'elle et n'ajoutent que 0,02 dB.

(b) *Efficacité de chaque protection à 110 dB.* On lit la figure 1 à l'abscisse 110 dB :

- casque serre-tête : $A = 35$ dB, donc niveau perçu $110 - 35 = 75$ dB ;
- bouchons d'oreille : $A = 26$ dB, donc niveau perçu $110 - 26 = 84$ dB.

(c) *Conclusion.* Le document impose un niveau perçu compris entre 65 dB et 80 dB. Avec les bouchons, $84 \text{ dB} > 80 \text{ dB}$: la protection est insuffisante, l'ouvrier reste en zone d'inconfort et presque au seuil réglementaire des 85 dB. Avec le casque, 75 dB appartient bien à l'intervalle $[65 ; 80]$ dB : le bruit est ramené à un niveau sans risque tout en laissant entendre les alarmes et les consignes de sécurité. **L'ouvrier doit donc utiliser le casque serre-tête.**

Ce que le correcteur attend : additionner les intensités et non les niveaux ; lire l'atténuation à 110 dB (et non à 86 dB comme en Q4 : c'est précisément parce que l'atténuation dépend du niveau reçu que la réponse change) ; et vérifier la borne *haute* 80 dB et la borne basse 65 dB de l'intervalle acceptable.