Corrigé complet — Bac 2021 Amérique du Nord Sujet 2

Physique-chimie, enseignement de spécialité **20 points** **3 h 30**

Ex 1	**La mission GRACE-FO** Champ gravitationnel · Deuxième loi de Newton · Mouvement circulaire uniforme · Interférences lumineuses · Condensateur plan	10 pts	1 h 15	18 questions	p. 2
Ex 2	**Protection des fondations en acier des éoliennes de mer** Quotient de réaction · Sens d'évolution spontanée · Pile et circulation des électrons · Oxydoréduction · Capacité électrique et constante de Faraday	5 pts	55 min	9 questions	p. 8
Ex 3	**Additif alimentaire pour les agneaux** Réaction acido-basique · Titrage conductimétrique · Équivalence · Incertitude-type composée · Simulation en Python	5 pts	55 min	9 questions	p. 11
Ex 4	**Analyse d'un pigment à base d'oxyde de fer** Dissolution d'un solide ionique · Dilution et verrerie jaugée · Spectre d'absorption et couleur · Loi de Beer-Lambert · Dosage par étalonnage	5 pts	55 min	8 questions	p. 15

Comment s'en servir. Fais d'abord le sujet en temps limité, puis corrige-toi exercice par exercice. À gauche de chaque question, sur les carreaux : ce qu'il faut écrire sur ta copie. À droite : les pièges, ce qu'il faut comprendre et les méthodes.

La mission GRACE-FO

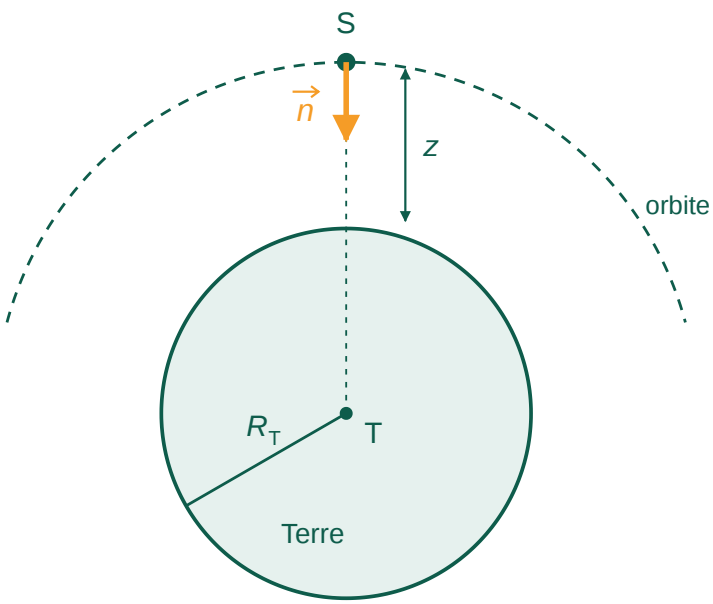
Bac 2021 Amérique du Nord Sujet 2 · Exercice 1 **10 points** **Durée conseillée 1 h 15**

A.1 Faire un schéma montrant la Terre (centre T, rayon R_T), le satellite S sur son orbite à l'altitude z et un vecteur unitaire $\vec{n}$ dirigé du satellite vers la Terre.

Le schéma montre la Terre de centre T, un rayon R_T, l'orbite circulaire de centre T et le satellite S à la distance $TS = R_T + z$ du centre.

Le vecteur unitaire $\vec{n}$ part de S et pointe vers T, le long de la droite (ST).

PIÈGE
L'altitude z se mesure depuis la surface de la Terre, pas depuis son centre : le rayon de l'orbite est $R_T + z$.



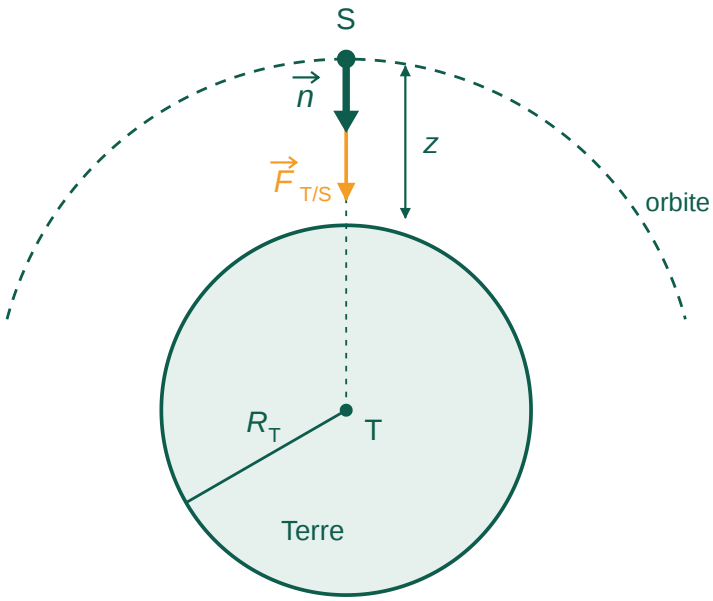
A.1 · Schéma de la situation (sans souci d'échelle)

A.2 Donner l'expression vectorielle de la force gravitationnelle $\vec{F}_{T/S}$ exercée par la Terre sur le satellite, puis la représenter sur le schéma.

La force est attractive, dirigée de S vers T, donc de même sens que $\vec{n}$; la distance entre les centres est $R_T + z$.

$$\vec{F}_{T/S} = G\,\frac{m\,M_T}{(R_T+z)^2}\,\vec{n}$$

PIÈGE
Écrire z^2 ou R_T^2 au dénominateur, ou placer un signe « $-$ » devant $\vec{n}$ alors que ce vecteur pointe déjà vers la Terre.



A.2 · Schéma complété : la force a la direction et le sens du vecteur unitaire

A.3 En déduire l'expression vectorielle du champ gravitationnel terrestre $\vec{g}$.

Le champ gravitationnel au point S est défini par $\vec{F}_{T/S} = m\,\vec{g}$, donc $\vec{g} = \dfrac{\vec{F}_{T/S}}{m}$.

$$\vec{g} = G\,\frac{M_T}{(R_T+z)^2}\,\vec{n}$$

COMPRENDRE
Le champ ne dépend pas de la masse m du satellite, seulement de la Terre et de l'altitude.

A.4 En considérant uniquement l'action de la Terre, établir l'expression vectorielle de l'accélération $\vec{a}$ du satellite.

Système : {satellite}, de masse m constante. Référentiel : géocentrique, considéré galiléen. Seule force : $\vec{F}_{T/S}$.

Deuxième loi de Newton : $\sum \vec{F}_{\text{ext}} = m\,\vec{a}$, soit $G\,\dfrac{m\,M_T}{(R_T+z)^2}\,\vec{n} = m\,\vec{a}$.

$$\vec{a} = G\,\frac{M_T}{(R_T+z)^2}\,\vec{n} = \vec{g}$$

MÉTHODE
Toujours annoncer le système, le référentiel et le bilan des forces avant d'écrire la deuxième loi de Newton : ces trois éléments sont notés.

A.5 Montrer que, dans l'approximation d'une orbite circulaire, le mouvement du satellite est uniforme.

Dans le repère de Frenet $(S\,;\vec{t},\vec{n})$, où $\vec{t}$ est le vecteur unitaire tangent à la trajectoire dans le sens du mouvement, l'accélération d'un mouvement circulaire de rayon R_T+z s'écrit :

$$\vec{a} = \frac{v^2}{R_T+z}\,\vec{n} + \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\,\vec{t}$$

D'après A.4, $\vec{a}$ n'a aucune composante selon $\vec{t}$. Par identification :

$\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = 0$: la valeur v de la vitesse est constante, le mouvement circulaire est **uniforme**.

PIÈGE
Dire « l'accélération est constante donc le mouvement est uniforme ». Le vecteur $\vec{a}$ change de direction à chaque instant ; c'est sa composante tangentielle nulle qui prouve l'uniformité.

A.6 Montrer que la vitesse du satellite s'exprime par $v = \sqrt{\dfrac{G\,M_T}{R_T + z}}$.

On identifie cette fois les composantes selon $\vec{n}$ des deux expressions de $\vec{a}$ (A.4 et A.5) :

$$\frac{v^2}{R_T + z} = \frac{G\,M_T}{(R_T + z)^2} \quad \text{donc} \quad v^2 = \frac{G\,M_T}{R_T + z}$$

$v = \sqrt{\dfrac{G\,M_T}{R_T + z}}$, ce qui est bien la relation attendue.

MÉTHODE
Force centrale et orbite circulaire : la composante tangentielle de $\vec{a}$ donne l'uniformité, la composante normale donne la vitesse. Les deux questions se traitent avec la même égalité.

A.7 En déduire la valeur de la période de révolution du satellite et vérifier qu'elle est conforme à l'information « environ 15 fois leur orbite par jour ».

Données utiles $G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$; $M_T = 5{,}98 \times 10^{24}$ kg ; $R_T = 6371$ km ; $z = 490$ km

Le mouvement est uniforme : pendant une période T, le satellite parcourt la circonférence $2\pi(R_T + z)$ à la vitesse v.

$$T = \frac{2\pi(R_T + z)}{v} = 2\pi\sqrt{\frac{(R_T + z)^3}{G\,M_T}}$$

Avec $R_T + z = 6371 + 490 = 6861\ \text{km} = 6{,}861 \times 10^6$ m :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{(6{,}861 \times 10^6)^3}{6{,}67 \times 10^{-11} \times 5{,}98 \times 10^{24}}} = 5{,}65 \times 10^3\ \text{s}$$

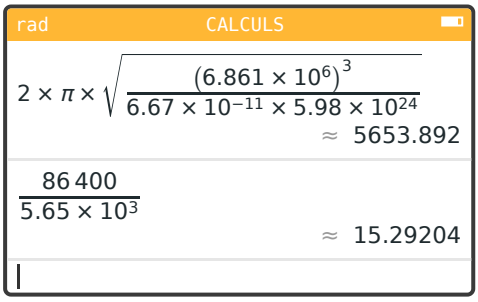
soit environ 1 h 34 min. Un jour dure $24 \times 3600 = 86\,400$ s ; le nombre de tours par jour est $\dfrac{86\,400}{5{,}65 \times 10^3} = 15{,}3$.

$T = 5{,}65 \times 10^3$ s : le satellite effectue environ 15 révolutions par jour, en accord avec l'énoncé.

PIÈGE
Laisser $R_T + z$ en kilomètres : G est en unités SI, la distance doit être en mètres. Additionner aussi R_T et z avant d'élever au cube.

COMPRENDRE
Trois chiffres significatifs, comme G, M_T et z, les données les moins précises. La vitesse correspondante vaut $v = 7{,}62 \times 10^3\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

À LA CALCULATRICE



A.8 Dans la situation schématisée ($\vec{g}_1$ non centripète pour le satellite de tête, $\vec{g}_2$ centripète pour le deuxième), expliquer si la distance L entre les deux satellites reste constante, augmente ou diminue.

D'après A.4, l'accélération de chaque satellite est égale au champ gravitationnel à l'endroit où il se trouve : $\vec{a}_1 = \vec{g}_1$ et $\vec{a}_2 = \vec{g}_2$.

Deuxième satellite : $\vec{g}_2$ est centripète, sans composante tangentielle, donc $\dfrac{\mathrm{d}v_2}{\mathrm{d}t} = 0$. Sa vitesse reste constante.

Satellite de tête : il précède l'autre, donc il se déplace vers la gauche du schéma. Le vecteur $\vec{g}_1$ ne pointe pas vers le centre de la Terre : il est incliné vers l'avant. L'accélération $\vec{a}_1$ possède une composante tangentielle dans le sens du mouvement, donc $\dfrac{\mathrm{d}v_1}{\mathrm{d}t} > 0$. Sa vitesse augmente.

Le satellite de tête va de plus en plus vite alors que le suivant garde la même vitesse.

L'écart L qui sépare les deux satellites **augmente**.

PIÈGE
Répondre sans préciser le sens du mouvement. Une composante tangentielle dirigée vers l'arrière aurait freiné le satellite de tête et la conclusion serait inversée.

COMPRENDRE
C'est le principe de la mission : un excès de masse en avant attire d'abord le satellite de tête, qui s'éloigne de son jumeau. Mesurer la variation de L renseigne sur le champ gravitationnel local.

B.1 Justifier que le dispositif schématisé permet d'obtenir des interférences.

Les faisceaux 1 et 2 proviennent du même laser : le miroir semi-réfléchissant A partage une seule onde en deux. Ces deux ondes ont donc la même fréquence et un déphasage constant l'une par rapport à l'autre : elles sont cohérentes.

Après avoir suivi deux trajets différents (ABCD et AD), elles se superposent en D.

Deux ondes cohérentes se superposent au niveau du détecteur : il y a interférences.

COMPRENDRE
Deux lasers distincts ne donneraient pas d'interférences stables, car leur déphasage varie au hasard. Diviser un seul faisceau garantit la cohérence.

B.2 Définir le phénomène d'interférence constructive de deux ondes.

L'interférence est constructive lorsque les deux ondes arrivent en phase au point considéré : leurs maxima coïncident.

L'onde résultante a alors une amplitude maximale ; cela se produit si la différence de marche vaut $\delta = k\,\lambda$, avec k entier.

PIÈGE
Confondre avec l'interférence destructive, obtenue pour des ondes en opposition de phase, soit $\delta = \left(k + \dfrac{1}{2}\right)\lambda$: l'amplitude est alors minimale.

B.3 À l'aide du schéma, établir l'expression de la différence de marche δ en fonction de L.

Données utiles schéma : $AB = CD = L$; $BC = AD = h$

La différence de marche est la différence entre les longueurs des deux trajets suivis de A à D :

$\delta = (AB + BC + CD) - AD = (L + h + L) - h$

$\delta = 2L$

COMPRENDRE
Le trajet BC du faisceau 1 a la même longueur h que le trajet AD du faisceau 2 : ils se compensent. Il ne reste que l'aller et le retour entre les deux satellites.

B.4 Le satellite 1 s'éloigne d'une distance d du satellite 2. Montrer que la variation $\Delta\delta$ de la différence de marche vaut $2d$.

La distance entre les satellites devient $L + d$. Le même raisonnement qu'en B.3 donne la nouvelle différence de marche : $\delta' = 2(L + d)$.

$\Delta\delta = \delta' - \delta = 2(L + d) - 2L$

$\Delta\delta = 2d$, ce qui est bien la valeur attendue.

B.5 Justifier que la variation de distance d correspondant à deux états immédiatement successifs d'interférence constructive est égale à $\frac{\lambda}{2}$.

Interférence constructive : $\delta = k\,\lambda$ avec k entier. L'état constructif suivant correspond à $\delta' = (k + 1)\,\lambda$.

Entre ces deux états : $\Delta\delta = (k + 1)\,\lambda - k\,\lambda = \lambda$.

Or $\Delta\delta = 2d$ (B.4), donc $2d = \lambda$.

$d = \frac{\lambda}{2}$, ce qui est bien la relation attendue.

COMPRENDRE
Le faisceau 1 fait un aller-retour : un éloignement de d allonge son trajet de $2d$. Une demi-longueur d'onde de déplacement suffit donc à décaler la différence de marche d'une longueur d'onde entière.

B.6 Calculer la plus petite valeur de la variation de distance entre les deux satellites détectable par l'interféromètre.

Données utiles $\lambda = 1064$ nm ; $d = \frac{\lambda}{2}$ (B.5)

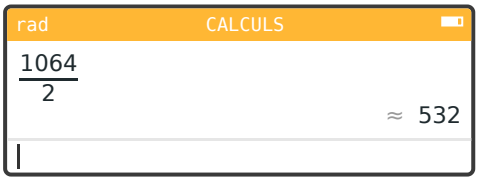
Le détecteur repère au mieux le passage d'un état constructif au suivant, donc la plus petite variation détectable est :

$d = \frac{\lambda}{2} = \frac{1064}{2} = 532{,}0$ nm

$d = 532{,}0\ \text{nm} = 5{,}320 \times 10^{-7}$ m

COMPRENDRE
Quatre chiffres significatifs, comme λ ; le 2 est un nombre exact. On détecte environ un demi-micromètre sur 220 km, soit une variation relative de l'ordre de 10^{-12}.

À LA CALCULATRICE



C.1 Discuter de l'influence du déplacement X, choisi positif, sur la valeur de la capacité C du condensateur.

Données utiles $C = \frac{\varepsilon_0\,S}{D}$

Lorsque l'armature mobile se déplace de $X > 0$, la distance entre les armatures passe de e à $D = e + X$: elle augmente.

$C = \frac{\varepsilon_0\,S}{e + X}$, avec ε_0 et S constants : C est inversement proportionnelle à D.

Quand X augmente, la capacité C **diminue** ; elle est inférieure à sa valeur au repos $\frac{\varepsilon_0\,S}{e}$.

COMPRENDRE
C'est ce qui fait du condensateur un capteur : mesurer C revient à mesurer le déplacement X de la masse d'épreuve, donc la force non gravitationnelle qui l'a provoqué.

C.2 Donner l'expression du champ électrique $\vec{E}$ créé entre les plaques du condensateur en fonction de U, e, X et du vecteur unitaire $\vec{i}$.

Entre les armatures d'un condensateur plan, le champ est uniforme, de valeur $E = \dfrac{U}{D}$ avec $D = e + X$.

Il est dirigé de l'armature positive (armature fixe, à gauche) vers l'armature négative (armature mobile, à droite) : il a le sens de $\vec{i}$.

$$\vec{E} = \frac{U}{e+X}\,\vec{i}$$

PIÈGE
Oublier le déplacement et écrire $\dfrac{U}{e}$, ou ne pas justifier le sens. Le champ électrique va toujours de l'armature chargée $+$ vers l'armature chargée $-$.

C.3 Identifier, parmi les quatre schémas, celui qui représente correctement le champ électrique $\vec{E}$ et la force électrique $\vec{F}$, en argumentant.

Données utiles armature fixe : charge $q > 0$; armature mobile : charge $-q$; $\vec{E}_1 = \dfrac{\vec{E}}{2}$

Champ : d'après C.2, $\vec{E}$ a le sens de $\vec{i}$, il est dirigé vers la droite. Les schémas 1 et 3 sont éliminés.

Force : l'armature mobile porte la charge $-q$ et se trouve dans le champ $\vec{E}_1$ créé par l'armature fixe, donc

$$\vec{F} = -q\,\vec{E}_1 = -\frac{q}{2}\,\vec{E}$$

Comme $q > 0$, $\vec{F}$ est de sens opposé à $\vec{E}$: elle est dirigée vers la gauche. Le schéma 4 est éliminé.

Le **schéma 2** convient : $\vec{E}$ vers la droite, $\vec{F}$ vers la gauche.

PIÈGE
L'énoncé écrit $\vec{E}_1 = \dfrac{\vec{E}_2}{2}$ alors qu'aucun champ $\vec{E}_2$ n'est défini : il faut lire $\dfrac{\vec{E}}{2}$, la moitié du champ régnant entre les armatures.

COMPRENDRE
Le résultat se vérifie sans calcul : deux armatures de charges opposées s'attirent, donc l'armature mobile est tirée vers l'armature fixe, à gauche.

C.4 Établir la relation existant entre le champ électrique $\vec{E}_d$ créé par l'armature fixe de droite et le champ électrique $\vec{E}_g$ créé par l'armature fixe de gauche.

Données utiles face gauche de la masse d'épreuve : charge $-q$; face droite : charge $+q$

Force exercée par l'armature fixe de gauche sur la face gauche de la masse d'épreuve, de charge $-q$: $\vec{F}_g = -q\,\vec{E}_g$.

Force exercée par l'armature fixe de droite sur la face droite, de charge $+q$: $\vec{F}_d = q\,\vec{E}_d$.

Les deux forces se compensent : $\vec{F}_g + \vec{F}_d = \vec{0}$, soit $-q\,\vec{E}_g + q\,\vec{E}_d = \vec{0}$, donc $q\,(\vec{E}_d - \vec{E}_g) = \vec{0}$ avec $q \neq 0$.

$\vec{E}_d = \vec{E}_g$: les champs créés par les deux armatures fixes sont identiques (direction, sens, valeur).

PIÈGE
Conclure $\vec{E}_d = -\vec{E}_g$ parce que les forces sont opposées. Les deux faces de la masse d'épreuve portent des charges de signes contraires : des forces opposées correspondent ici à des champs égaux.

Protection des fondations en acier des éoliennes de mer

Bac 2021 Amérique du Nord Sujet 2 · Exercice 2 **5 points** **Durée conseillée 55 min**

A.1 Exprimer le quotient de réaction initial $Q_{r,i}$.

Données utiles $2\,\mathrm{Al(s)} + 3\,\mathrm{Fe^{2+}(aq)} \rightleftharpoons 2\,\mathrm{Al^{3+}(aq)} + 3\,\mathrm{Fe(s)}$

Les solides $\mathrm{Al(s)}$ et $\mathrm{Fe(s)}$ n'apparaissent pas dans le quotient de réaction. Avec $c^\circ = 1\ \mathrm{mol\cdot L^{-1}}$:

$$Q_{r,i} = \frac{\left(\dfrac{[\mathrm{Al^{3+}}]_i}{c^\circ}\right)^2}{\left(\dfrac{[\mathrm{Fe^{2+}}]_i}{c^\circ}\right)^3} = \frac{[\mathrm{Al^{3+}}]_i^2 \times c^\circ}{[\mathrm{Fe^{2+}}]_i^3}$$

PIÈGE
Oublier les exposants : chaque concentration est élevée à la puissance de son nombre stœchiométrique, 2 pour $\mathrm{Al^{3+}}$ et 3 pour $\mathrm{Fe^{2+}}$.

A.2 Calculer, à l'état initial, la concentration en quantité de matière des ions $\mathrm{Al^{3+}(aq)}$ et celle des ions $\mathrm{Fe^{2+}(aq)}$.

Données utiles chlorure de fer II $(\mathrm{Fe^{2+}(aq)} + 2\,\mathrm{Cl^-(aq)})$, $C_1 = 1{,}0 \times 10^{-1}\ \mathrm{mol\cdot L^{-1}}$; sulfate d'aluminium $(2\,\mathrm{Al^{3+}(aq)} + 3\,\mathrm{SO_4^{2-}(aq)})$, $C_2 = 5{,}0 \times 10^{-2}\ \mathrm{mol\cdot L^{-1}}$

Une mole de chlorure de fer II apportée libère une mole d'ions $\mathrm{Fe^{2+}}$:

$[\mathrm{Fe^{2+}}]_i = C_1 = 1{,}0 \times 10^{-1}\ \mathrm{mol\cdot L^{-1}}$

Une mole de sulfate d'aluminium apportée libère deux moles d'ions $\mathrm{Al^{3+}}$:

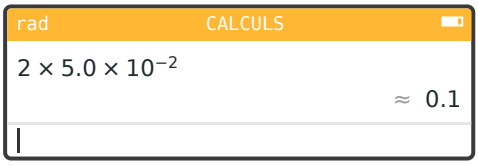
$[\mathrm{Al^{3+}}]_i = 2\,C_2 = 2 \times 5{,}0 \times 10^{-2} = 1{,}0 \times 10^{-1}\ \mathrm{mol\cdot L^{-1}}$

$$[\mathrm{Fe^{2+}}]_i = [\mathrm{Al^{3+}}]_i = 1{,}0 \times 10^{-1}\ \mathrm{mol\cdot L^{-1}}$$

PIÈGE
Écrire $[\mathrm{Al^{3+}}]_i = C_2$. La concentration apportée est celle du soluté ; la formule de la solution indique combien d'ions chaque mole de soluté libère.

COMPRENDRE
Les deux solutions restent dans des béchers séparés : il n'y a aucune dilution, les volumes V_1 et V_2 ne servent pas ici. Deux chiffres significatifs, comme C_1 et C_2.

À LA CALCULATRICE



A.3 Calculer la valeur du quotient de réaction initial $Q_{r,i}$ puis en déduire le sens d'évolution spontanée de la transformation.

Données utiles $[\mathrm{Fe^{2+}}]_i = [\mathrm{Al^{3+}}]_i = 1{,}0 \times 10^{-1}\ \mathrm{mol\cdot L^{-1}}$ (A.2) ; $K = 10^{166}$ à 25 °C

$$Q_{r,i} = \frac{[\mathrm{Al^{3+}}]_i^2 \times c^\circ}{[\mathrm{Fe^{2+}}]_i^3} = \frac{(1{,}0 \times 10^{-1})^2 \times 1}{(1{,}0 \times 10^{-1})^3} = 10$$

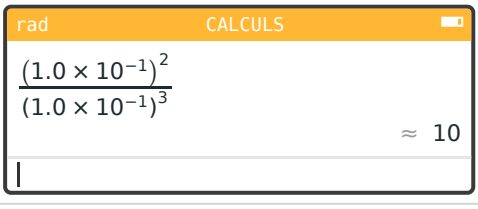
$Q_{r,i} = 10$ est très inférieur à $K = 10^{166}$.

$Q_{r,i} = 10 < K$: le système évolue spontanément dans le **sens direct** de l'équation (consommation de Al et de $\mathrm{Fe^{2+}}$).

COMPRENDRE
$K = 10^{166}$ est gigantesque : la transformation est totale. Le quotient de réaction n'a pas d'unité.

MÉTHODE
Critère d'évolution : $Q_{r,i} < K$, sens direct ; $Q_{r,i} > K$, sens inverse ; $Q_{r,i} = K$, équilibre. Toujours écrire la comparaison avant de conclure.

À LA CALCULATRICE



A.4 En déduire la réaction se produisant à l'électrode d'aluminium.

Dans le sens direct, l'aluminium métallique est consommé et forme des ions Al^{3+} : il perd des électrons, il est oxydé.

À l'électrode d'aluminium : $Al(s) = Al^{3+}(aq) + 3\,e^-$ (oxydation)

COMPRENDRE
À l'autre électrode, les ions fer II captent ces électrons : $Fe^{2+}(aq) + 2\,e^- = Fe(s)$. C'est une réduction.

A.5 L'ampèremètre indique une intensité négative. Montrer que cette valeur négative est cohérente avec la réponse à la question précédente.

Données utiles schéma de la pile : la borne COM de l'ampèremètre est du côté de la plaque de fer

D'après A.4, la plaque d'aluminium libère des électrons. Dans le circuit extérieur, ils vont de la plaque d'aluminium vers la plaque de fer, en traversant la résistance puis l'ampèremètre.

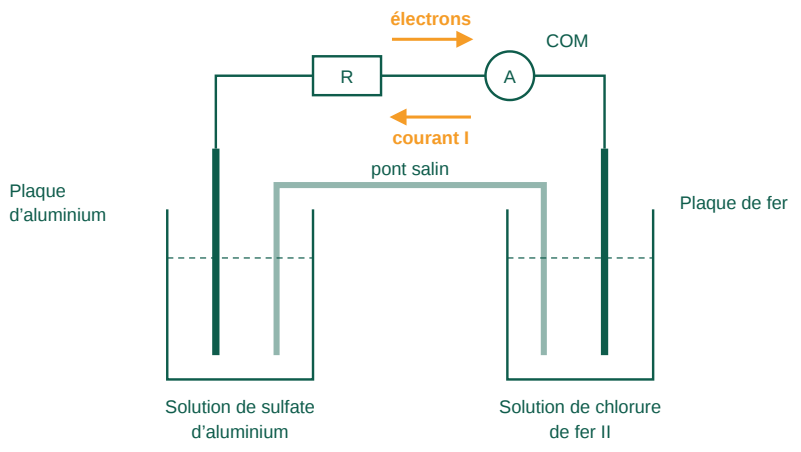
Le courant électrique circule en sens opposé aux électrons : hors de la pile, il va de la plaque de fer vers la plaque d'aluminium. Il entre donc dans l'ampèremètre par la borne COM, reliée à la plaque de fer.

Or un ampèremètre affiche une valeur négative lorsque le courant entre par sa borne COM.

Courant entrant par la borne COM, donc intensité affichée négative : c'est cohérent avec l'oxydation de l'aluminium.

PIÈGE
Confondre le sens des électrons et celui du courant, ou ne pas regarder sur le schéma à quelle plaque la borne COM est reliée.

MÉTHODE
1) Sens des électrons : de l'électrode où a lieu l'oxydation vers l'autre. 2) Sens du courant : l'inverse. 3) Affichage positif si le courant sort par COM, négatif s'il y entre.



A.5 · La pile du sujet, avec le sens des électrons et du courant dans le circuit extérieur

A.6 Identifier l'électrode qui joue le rôle d'anode de la pile.

L'anode est l'électrode où a lieu une oxydation. D'après A.4, l'aluminium est oxydé en ions Al^{3+}.

L'anode est la **plaque d'aluminium** ; la plaque de fer est la cathode.

COMPRENDRE
Tant qu'il reste de l'aluminium, c'est lui qui est oxydé et le fer reste intact : l'aluminium se « sacrifie », d'où le nom d'anode sacrificielle.

B.1 Écrire l'équation de la réaction modélisant la transformation chimique de corrosion de l'aluminium par le dioxygène dissous.

Données utiles couples $Al^{3+}(aq)$ / $Al(s)$ et $O_2(aq)$ / $HO^-(aq)$; $O_2(aq) + 2\,H_2O + 4\,e^- = 4\,HO^-(aq)$

Oxydation de l'aluminium : $Al(s) = Al^{3+}(aq) + 3\,e^- \quad (\times 4)$

Réduction du dioxygène : $O_2(aq) + 2\,H_2O(l) + 4\,e^- = 4\,HO^-(aq) \quad (\times 3)$

Les deux demi-équations mettent alors en jeu 12 électrons ; on les additionne :

$$4\,Al(s) + 3\,O_2(aq) + 6\,H_2O(l) \longrightarrow 4\,Al^{3+}(aq) + 12\,HO^-(aq)$$

PIÈGE
Laisser des électrons dans l'équation finale, ou additionner les demi-équations sans les multiplier.

MÉTHODE
Chercher le plus petit multiple commun des nombres d'électrons (ici 12), multiplier chaque demi-équation, additionner. Vérifier ensuite les éléments et les charges : 0 à gauche, $4 \times 3 - 12 = 0$ à droite.

B.2 En explicitant le raisonnement, calculer la masse d'aluminium nécessaire à la « protection cathodique » pendant une durée de 25 ans.

Données utiles $I = 400$ A ; $\Delta t = 25$ ans ; $F = 96{,}5 \times 10^3$ C · mol^{-1} ; $M_{Al} = 27{,}0$ g · mol^{-1} ; $Q = I \cdot \Delta t$

Durée : $\Delta t = 25 \times 365 \times 24 \times 3600 = 7{,}884 \times 10^8$ s.

Charge électrique débitée : $Q = I \cdot \Delta t$.

Cette charge est transportée par une quantité $n(e^-)$ d'électrons : $Q = n(e^-) \cdot F$, d'où $n(e^-) = \dfrac{I \cdot \Delta t}{F}$.

D'après $Al(s) = Al^{3+}(aq) + 3\,e^-$, chaque mole d'aluminium oxydée fournit 3 moles d'électrons : $n(Al) = \dfrac{n(e^-)}{3}$.

Masse d'aluminium consommée : $m(Al) = n(Al) \cdot M_{Al}$, soit

$$m(Al) = \frac{I \cdot \Delta t \cdot M_{Al}}{3\,F} = \frac{400 \times 7{,}884 \times 10^8 \times 27{,}0}{3 \times 96{,}5 \times 10^3} = 2{,}9 \times 10^7 \text{ g}$$

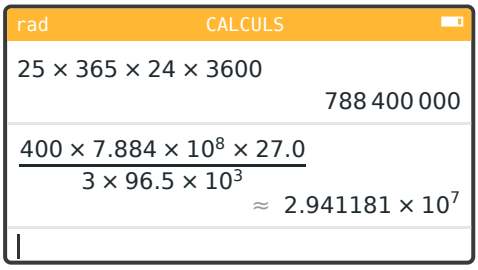
$m(Al) = 2{,}9 \times 10^7$ g $= 2{,}9 \times 10^4$ kg, soit environ 29 tonnes par éolienne.

PIÈGE
Oublier le facteur 3 (trois électrons par atome d'aluminium) donne une masse trois fois trop grande. Laisser la durée en années est l'autre erreur fréquente : $Q = I \cdot \Delta t$ exige des secondes.

COMPRENDRE
Deux chiffres significatifs : la durée (25 ans) n'en a que deux et l'intensité est donnée « de l'ordre de 400 A ». $F = N_A \times e$ est la charge d'une mole d'électrons ; N_A et e sont donc inutiles ici.

MÉTHODE
Chaîne à retenir pour toute pile ou électrolyse : $Q = I \cdot \Delta t$, puis $n(e^-) = Q/F$, puis la demi-équation à l'électrode pour passer à la quantité de matière, enfin $m = n \cdot M$.

À LA CALCULATRICE



B.3 Citer au moins un argument expliquant que le constructeur ait finalement renoncé à la protection par anode sacrificielle.

Données utiles $m(Al) \approx 29$ t par éolienne (B.2) ; parc de 62 éoliennes

- La masse d'aluminium à consommer est considérable : environ 29 tonnes par éolienne en 25 ans, à multiplier par 62 éoliennes.
- Cet aluminium est rejeté dans la mer sous forme d'ions Al^{3+} : c'est un rejet de métaux dans l'environnement, que la protection par courant imposé évite.

Trop d'aluminium consommé (environ 29 t par éolienne) et rejet de métaux dans l'eau de mer.

COMPRENDRE
Un seul argument suffit, mais il doit s'appuyer sur l'exercice : le résultat de B.2 ou la phrase d'introduction sur le rejet de métaux.

Additif alimentaire pour les agneaux

Bac 2021 Amérique du Nord Sujet 2 · Exercice 3 **5 points** **Durée conseillée 55 min**

A.1 Indiquer, en justifiant, si la transformation mise en jeu lors du titrage est une réaction acido-basique ou d'oxydo-réduction.

L'ion ammonium cède un ion hydrogène H^+ à l'ion hydroxyde, qui le capte :

- couple NH_4^+ / NH_3 : $NH_4^+ = NH_3 + H^+$;
- couple H_2O / HO^- : $HO^- + H^+ = H_2O$.

Aucun électron n'est échangé.

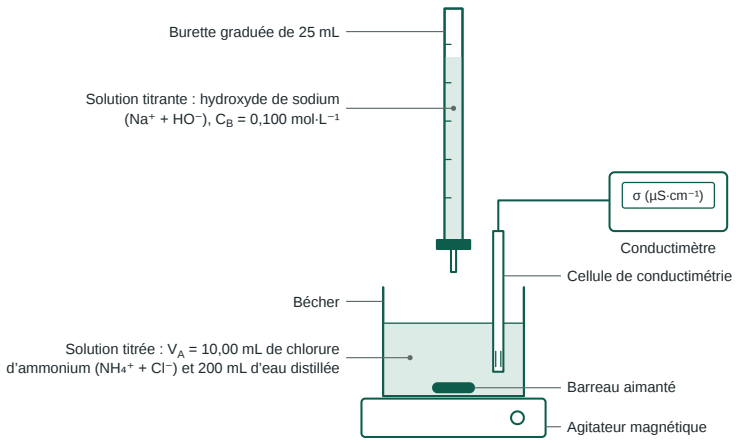
Transfert d'un ion H^+ de l'acide NH_4^+ vers la base HO^- : c'est une réaction **acido-basique**.

MÉTHODE
Pour trancher, chercher la particule échangée : un ion H^+ pour une réaction acido-basique, des électrons pour une oxydo-réduction. Les deux demi-équations suffisent à le prouver.

A.2 Réaliser un schéma légendé du dispositif de titrage conductimétrique, en nommant la verrerie et les solutions.

Le schéma montre la burette graduée contenant la solution titrante, le bécher contenant la solution titrée diluée, la cellule de conductimétrie plongée dans le bécher et reliée au conductimètre, et l'agitateur magnétique avec son barreau aimanté.

Schéma légendé ci-dessous : solution titrante d'hydroxyde de sodium dans la burette, solution titrée de chlorure d'ammonium dans le bécher.



A.2 · Dispositif du titrage conductimétrique

PIÈGE
Dessiner une sonde de pH ou oublier le conductimètre. Chaque solution doit être nommée : écrire seulement « solution titrante » et « solution titrée » ne rapporte pas tous les points.

COMPRENDRE
Les 10,00 mL sont prélevés à la pipette jaugée ; les 200 mL d'eau, mesurés à l'éprouvette, servent à immerger la cellule et à rendre la dilution négligeable pendant le titrage.

A.3 Exprimer, en fonction des données, la concentration C_A en chlorure d'ammonium de la solution préparée par l'éleveur, puis calculer sa valeur.

Données utiles $V_A = 10{,}00$ mL ; $C_B = 0{,}100\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; courbe de titrage

À l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques. Les nombres stœchiométriques valent 1, donc $n(\text{NH}_4^+)_{\text{initial}} = n(\text{HO}^-)_{\text{versé}}$, soit $C_A\,V_A = C_B\,V_{eq}$:

$$C_A = \frac{C_B\,V_{eq}}{V_A}$$

Sur la courbe, on trace les deux droites qui modélisent les points avant et après la rupture de pente : elles se coupent en $V_{eq} = 14{,}0$ mL.

$$C_A = \frac{0{,}100 \times 14{,}0}{10{,}00}$$

$$\boxed{C_A = 0{,}140\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}}$$

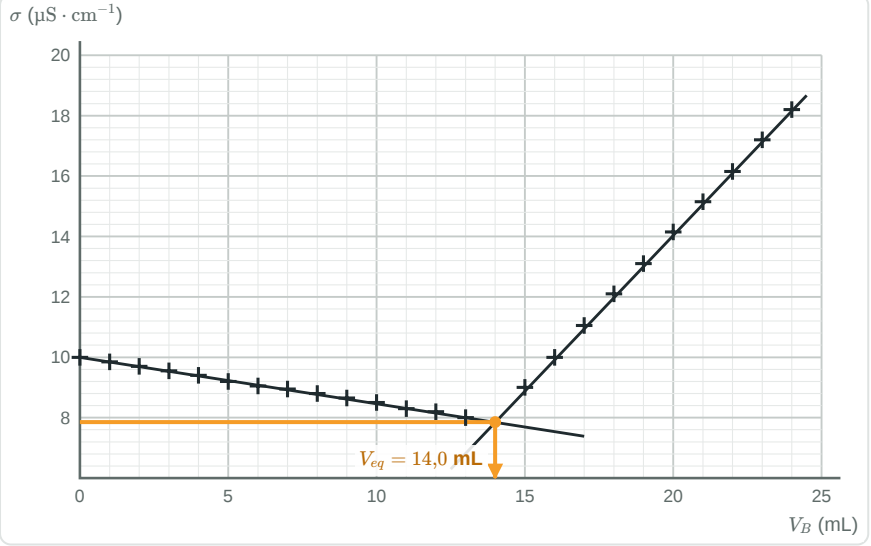
PIÈGE
Diviser par 210 mL. L'eau ajoutée ne change pas la quantité d'ions ammonium à titrer : le volume à utiliser est celui de la prise d'essai, $V_A = 10{,}00$ mL.

COMPRENDRE
Trois chiffres significatifs, comme C_B et V_{eq}. Les deux volumes peuvent rester en mL : leur rapport est sans unité.

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$$\frac{0.100 \times 14.0}{10.00} \approx 0.14$$



A.3 · Courbe du sujet : les deux droites se coupent à l'équivalence

A.4 Proposer un encadrement de la concentration de la solution préparée par l'éleveur.

Données utiles $U(C_B) = 0{,}002\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; $U(V_{eq}) = 0{,}1$ mL ; pipette jaugée : $U(V_A) = 0{,}02$ mL ; C_A (A.3) ; V_{eq} (A.3)

V_A est prélevé à la pipette jaugée de 10 mL : $U(V_A) = 0{,}02$ mL.

$$U(C_A) = 0{,}140 \times \sqrt{\left(\frac{0{,}002}{0{,}100}\right)^2 + \left(\frac{0{,}1}{14{,}0}\right)^2 + \left(\frac{0{,}02}{10{,}00}\right)^2}$$

On obtient $U(C_A) = 2{,}99 \times 10^{-3}\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$. L'incertitude est arrondie par excès à un chiffre significatif : $U(C_A) = 0{,}003\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, d'où $C_A = (0{,}140 \pm 0{,}003)\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

$$\boxed{0{,}137\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \leqslant C_A \leqslant 0{,}143\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}}$$

PIÈGE
Prendre l'incertitude de l'éprouvette (1 mL) ou de la burette (0,05 mL). L'éprouvette ne mesure que l'eau ajoutée, et l'incertitude sur V_{eq} est déjà donnée : 0,1 mL.

COMPRENDRE
Le terme dominant est celui de C_B (2 %) : c'est la concentration de la solution titrante, plus que la verrerie, qui limite ici la précision du résultat.

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$$0.140 \times \sqrt{\left(\frac{0.002}{0.100}\right)^2 + \left(\frac{0.1}{14.0}\right)^2 + \left(\frac{0.02}{10.00}\right)^2} \approx 0.002986369$$

A.5 Déterminer la masse de chlorure d'ammonium apportée quotidiennement à l'agneau par l'éleveur et la comparer à la valeur préconisée.

Données utiles $M = 53{,}5\ \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $V = 1$ L par jour ; agneau de 24 kg ; 300 mg par kg à 10 % près ; encadrement de C_A (A.4)

Masse apportée chaque jour, dans $V = 1$ L de solution : $m = C_A\,V\,M$.

$m = 0{,}140 \times 1 \times 53{,}5 = 7{,}49$ g, et avec l'encadrement de C_A :

$0{,}137 \times 53{,}5 \leqslant m \leqslant 0{,}143 \times 53{,}5$, soit $7{,}33\ \text{g} \leqslant m \leqslant 7{,}65\ \text{g}$.

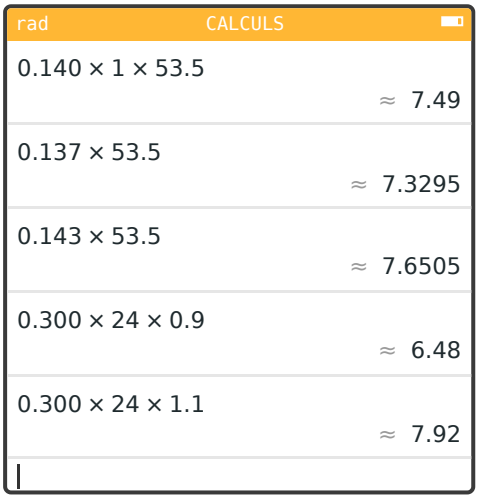
Masse préconisée pour 24 kg : $m' = 0{,}300 \times 24 = 7{,}2$ g à 10 % près, soit $6{,}5\ \text{g} \leqslant m' \leqslant 7{,}9\ \text{g}$.

$m = 7{,}49$ g, comprise entre 6,5 g et 7,9 g : la préparation de l'éleveur est conforme à la préconisation.

PIÈGE
Comparer 7,49 g à 300 mg sans multiplier par la masse de l'agneau, ou oublier de convertir les milligrammes en grammes.

MÉTHODE
Pour juger une conformité, comparer deux intervalles : celui de la mesure (avec son incertitude) et celui de la tolérance. Ici le premier est entièrement contenu dans le second.

À LA CALCULATRICE



B.1 Compléter le code à écrire aux lignes 6, 7 et 8.

Dans l'équation $\text{NH}_4^+ + \text{HO}^- \longrightarrow \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$, l'espèce titrée A est NH_4^+, l'espèce titrante B est HO^- et le produit C est NH_3 : leurs nombres stœchiométriques valent tous 1.

Ligne 6 : `a=1` ; ligne 7 : `b=1` ; ligne 8 : `c=1`

B.2 Identifier les espèces qui correspondent aux variables nS_A et nS_B.

`nS_A` reçoit toujours `Ca*Va` : cette quantité, constante, est celle d'une espèce apportée par la solution titrée et qui ne réagit pas, l'ion chlorure.

`nS_B` reçoit toujours `Cb*Vb` : cette quantité, proportionnelle au volume versé, est celle d'une espèce apportée par la solution titrante et qui ne réagit pas, l'ion sodium.

`nS_A` : ion chlorure Cl^- ; `nS_B` : ion sodium Na^+ (les deux ions spectateurs).

COMPRENDRE
Les lignes 21-22 et 27-28 sont identiques avant et après l'équivalence : ces quantités ne dépendent pas de la réaction, ce qui caractérise des ions spectateurs.

B.3 En justifiant le raisonnement, indiquer pour chaque graphe l'espèce chimique correspondante.

Données utiles $V_{eq} = 14{,}0$ mL (A.3) ; $C_A V_A = 0{,}14 \times 10{,}0 = 1{,}4$ mmol

- **Figure 1** : quantité nulle jusqu'à 14 mL, puis croissante. C'est le réactif titrant, entièrement consommé avant l'équivalence et en excès après : HO^-.
- **Figure 2** : quantité constante, égale à 1,40. C'est l'ion spectateur présent dès le départ dans le bécher : Cl^-.
- **Figure 3** : quantité croissante jusqu'à 14 mL, puis constante à 1,4. C'est le produit, qui cesse de se former quand NH_4^+ est épuisé : NH_3.
- **Figure 4** : quantité proportionnelle au volume versé pendant tout le titrage. C'est l'ion spectateur apporté par la burette : Na^+.
- **Figure 5** : quantité décroissante de 1,4 à 0, puis nulle après 14 mL. C'est le réactif titré : NH_4^+.

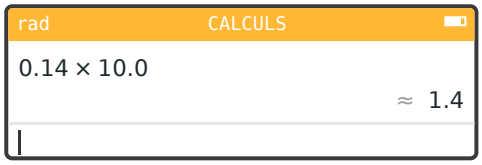
Remarque : les ordonnées sont notées en mol, mais le programme multiplie des $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ par des mL : les valeurs sont en mmol.

Figure 1 : HO^- ; figure 2 : Cl^- ; figure 3 : NH_3 ; figure 4 : Na^+ ; figure 5 : NH_4^+

PIÈGE
Confondre les figures 3 et 4, toutes deux croissantes au départ. Seule la quantité du produit plafonne à l'équivalence ; celle de Na^+ continue d'augmenter jusqu'à 2,5 pour 25 mL versés.

COMPRENDRE
Erreur d'unité du sujet : 1,4 mol d'ions dans 10 mL est impossible. Avec `Va` et `Vb` en mL, le programme calcule des millimoles ; le raisonnement sur l'allure des courbes reste inchangé.

À LA CALCULATRICE



B.4 Compléter le code des lignes 12 et 19.

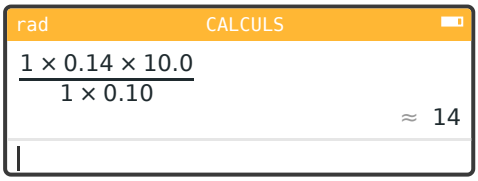
Ligne 12 : à l'équivalence, $\frac{C_A V_A}{a} = \frac{C_B V_{eq}}{b}$, donc $V_{eq} = \frac{b\,C_A V_A}{a\,C_B}$. Avec `Va` en mL, `Veq` est bien en mL.

Ligne 19 : avant l'équivalence ($V_B < V_{eq}$), l'espèce titrante B est le réactif limitant : elle est entièrement consommée dès qu'elle est versée, sa quantité est nulle.

Ligne 12 : `Veq=b*Ca*Va/(a*Cb)` (ou `Veq=Ca*Va/Cb` puisque $a = b = 1$) ; ligne 19 : `nB.append(0)`

COMPRENDRE
Le programme donne `Veq` = 14,0 mL : c'est bien l'abscisse de la rupture de pente des figures 1, 3 et 5, et la valeur lue sur la courbe expérimentale.

À LA CALCULATRICE



Analyse d'un pigment à base d'oxyde de fer

Bac 2021 Amérique du Nord Sujet 2 · Exercice 4 **5 points** **Durée conseillée 55 min**

A.1 Écrire l'équation de la dissolution du chlorure de fer III hexahydraté solide et déterminer la masse de soluté nécessaire à l'obtention de S_0.

Données utiles $C_{Fe^{3+}} = 25{,}0\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $V_0 = 250{,}00\ \text{mL}$; $M_{Fe} = 55{,}9$; $M_{Cl} = 35{,}5$; $M_O = 16{,}0$; $M_H = 1{,}0\ \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$

Équation de dissolution :

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

Une mole de solide apporte une mole d'ions fer III : $n_{\text{soluté}} = n_{Fe^{3+}} = \dfrac{C_{Fe^{3+}}\,V_0}{M_{Fe}}$.

Masse molaire du soluté : $M = 55{,}9 + 3\times 35{,}5 + 6\times(2\times 1{,}0 + 16{,}0) = 270{,}4\ \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

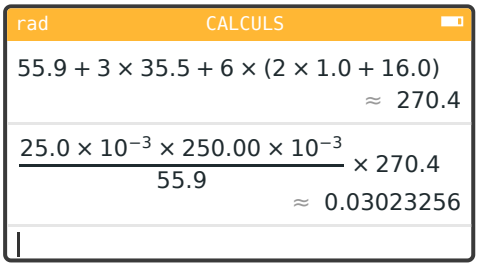
$$m = \frac{C_{Fe^{3+}}\,V_0}{M_{Fe}}\times M = \frac{25{,}0\times10^{-3}\times 250{,}00\times10^{-3}}{55{,}9}\times 270{,}4$$

$m = 3{,}02\times10^{-2}$ g, soit 30,2 mg de chlorure de fer III hexahydraté.

PIÈGE
La concentration $25{,}0\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ est celle des ions fer III, pas celle du soluté : répondre 6,25 mg revient à oublier le chlore et l'eau du solide pesé.

COMPRENDRE
Trois chiffres significatifs, comme la concentration et les masses molaires. Les six molécules d'eau font partie du solide pesé : elles comptent dans sa masse molaire.

À LA CALCULATRICE



A.2 Nommer la verrerie nécessaire à la préparation de la solution S_5 en justifiant la réponse par un calcul.

Données utiles solution mère $C_0 = 25{,}0\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; solution S_5 : $C_5 = 5{,}00\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $V_5 = 50{,}00$ mL

Lors d'une dilution, la masse d'ions fer III prélevée se retrouve dans la solution fille : $C_0\,V_0 = C_5\,V_5$.

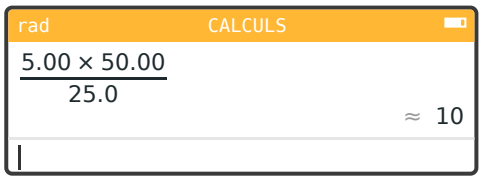
$$V_0 = \frac{C_5\,V_5}{C_0} = \frac{5{,}00\times 50{,}00}{25{,}0} = 10{,}0\ \text{mL}$$

On prélève la solution mère, versée au préalable dans un bécher, avec une pipette jaugée de 10,0 mL, et on l'introduit dans une fiole jaugée de 50,00 mL. On ajoute 1,00 mL de solution de thiocyanate de potassium avec une pipette de 1,00 mL, puis de l'eau déminéralisée jusqu'au trait de jauge.

$V_0 = 10{,}0$ mL : pipette jaugée de 10,0 mL et fiole jaugée de 50,00 mL.

PIÈGE
Citer une éprouvette graduée ou un bécher pour mesurer les volumes : une gamme étalon exige de la verrerie jaugée, sinon les concentrations C_i ne sont pas connues avec assez de précision.

À LA CALCULATRICE



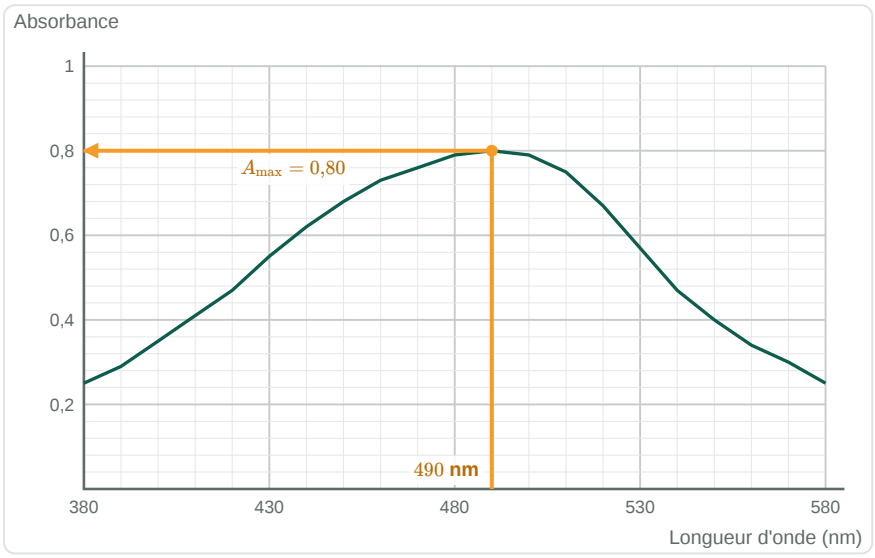
A.3 Déterminer la couleur de la solution. Justifier.

Le spectre présente un maximum d'absorbance vers 490 nm. D'après l'étoile chromatique, cette longueur d'onde appartient au domaine du cyan (480-500 nm) : la solution absorbe surtout le cyan.

La couleur perçue est la couleur complémentaire de la couleur absorbée, diamétralement opposée sur l'étoile chromatique.

La solution est **rouge**, couleur complémentaire du cyan absorbé.

PIÈGE
Répondre « cyan » : la couleur du maximum d'absorption est celle que la solution retire à la lumière blanche, pas celle que l'on voit.



A.3 · Spectre d'absorption du sujet, avec le repérage du maximum

A.4 Indiquer la longueur d'onde λ_0 la plus adaptée pour effectuer les mesures d'absorbance.

On règle le spectrophotomètre sur la longueur d'onde du maximum d'absorbance : les absorbances mesurées sont les plus grandes possibles, donc l'incertitude relative sur chaque mesure est la plus faible.

$\lambda_0 \approx 490$ nm

COMPRENDRE
Au sommet du spectre, la courbe est presque horizontale : un léger décalage du réglage de longueur d'onde modifie très peu l'absorbance mesurée.

B.1 Expliquer pourquoi la représentation graphique est compatible avec la loi de Beer-Lambert.

La loi de Beer-Lambert prévoit que l'absorbance d'une solution diluée est proportionnelle à la concentration de l'espèce colorée : $A = k\,C$.

Les cinq points expérimentaux sont alignés, aux incertitudes de mesure près, sur une droite qui passe par l'origine.

Droite passant par l'origine : A est proportionnelle à C, ce qui est conforme à la loi de Beer-Lambert.

PIÈGE
Écrire seulement « c'est une droite » : une droite qui ne passe pas par l'origine traduit une fonction affine, pas une proportionnalité.

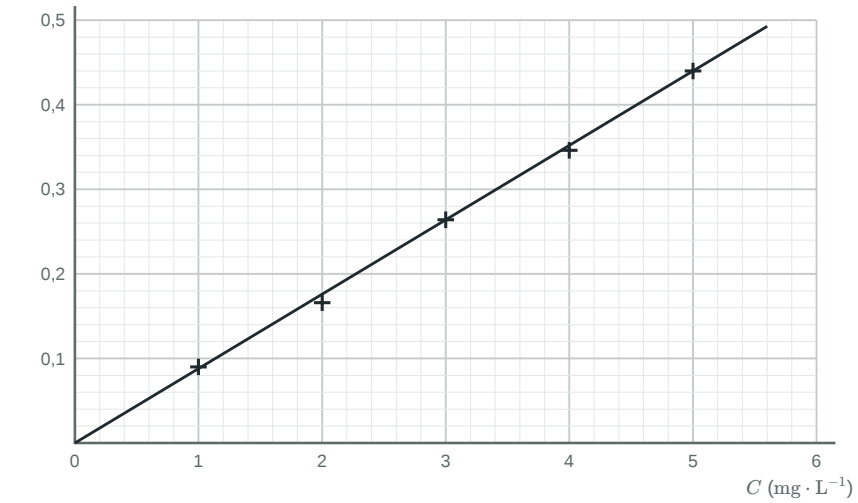
B.2 Établir la relation exprimant l'absorbance en fonction de la concentration en masse d'ions fer III.

Données utiles points de la courbe d'étalonnage : S_3 $(3{,}00\ ;\ 0{,}264)$ et S_5 $(5{,}00\ ;\ 0{,}440)$

On trace la droite passant par l'origine et au plus près des points ; elle passe par les points S_3 et S_5. Son coefficient directeur vaut :

$$k = \frac{A_5 - 0}{C_5 - 0} = \frac{0{,}440}{5{,}00} = 8{,}80 \times 10^{-2}\ \text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$$

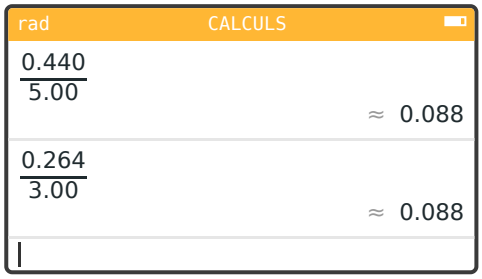
$A = 8{,}80 \times 10^{-2} \times C$, avec C en $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.



B.2 · Courbe d'étalonnage du sujet et droite modèle passant par l'origine

COMPRENDRE
Une régression linéaire à la calculatrice sur les cinq points donne un coefficient très voisin ($8{,}7 \times 10^{-2}\ \text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$) : les deux méthodes sont acceptées.

À LA CALCULATRICE



C.1 Expliquer pourquoi il est généralement nécessaire dans ce type de dosage de diluer la solution S.

La loi de Beer-Lambert n'est valable que pour des solutions peu concentrées, et la droite d'étalonnage n'a été établie qu'entre 1,00 et 5,00 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. La solution S est trop concentrée : son absorbance sortirait de ce domaine, voire saturerait le spectrophotomètre.

On dilue S pour que la concentration de l'échantillon se situe dans le domaine de la gamme étalon, où A est proportionnelle à C.

C.2 À partir de l'absorbance mesurée, déterminer la teneur de la poudre en oxyde de fer et commenter l'indication sur la teneur maximale fournie par le fabricant.

Données utiles $A = 0{,}313$; $k = 8{,}80 \times 10^{-2}\ \text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$ (B.2) ; dilution au dixième ; $V_S = 100{,}00$ mL ; $m_{\text{poudre}} = 100{,}0$ mg ; $M_{\text{Fe}} = 55{,}9$ et $M_{\text{O}} = 16{,}0\ \text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$

Concentration en ions fer III de l'échantillon dilué : $C = \dfrac{A}{k} = \dfrac{0{,}313}{8{,}80 \times 10^{-2}} = 3{,}56\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

La solution S est dix fois plus concentrée : $C_S = 10\,C = 35{,}6\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

Masse d'ions fer III dans les 100,00 mL de S : $m_{\text{Fe}^{3+}} = C_S\,V_S = 35{,}6 \times 0{,}10000 = 3{,}56$ mg.

Une mole de Fe_2O_3 libère deux moles d'ions fer III : $n_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = \dfrac{n_{\text{Fe}^{3+}}}{2} = \dfrac{m_{\text{Fe}^{3+}}}{2\,M_{\text{Fe}}}$.

Avec $M_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = 2 \times 55{,}9 + 3 \times 16{,}0 = 159{,}8\ \text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$:

$$m_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = \frac{m_{\text{Fe}^{3+}}}{2\,M_{\text{Fe}}} \times M_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = \frac{3{,}56}{2 \times 55{,}9} \times 159{,}8 = 5{,}08\ \text{mg}$$

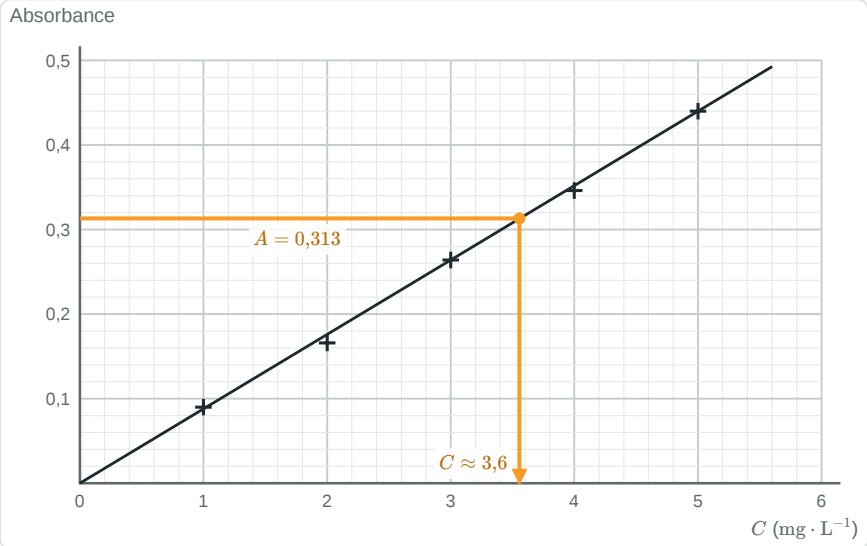
Teneur : $\dfrac{m_{\text{Fe}_2\text{O}_3}}{m_{\text{poudre}}} = \dfrac{5{,}08}{100{,}0} = 0{,}0508$.

Le fabricant annonce 5 % : l'écart relatif n'est que de 1,6 %, de l'ordre des incertitudes du dosage.

Teneur en oxyde de fer : $5{,}08$ %, en accord avec les 5 % indiqués par le fabricant.

PIÈGE
Oublier le facteur 10 de la dilution, ou le facteur 2 entre Fe^{3+} et Fe_2O_3. Les 20,0 mL d'acide ne servent pas : tout le fer se retrouve dans les 100,00 mL de S.

MÉTHODE
Garder les valeurs non arrondies dans la calculatrice d'une étape à l'autre : reprendre $3{,}56$ arrondi donne $5{,}09$ mg au lieu de $5{,}08$ mg.



C.2 · Vérification graphique : lecture de la concentration de l'échantillon dilué

À LA CALCULATRICE

