Valorisation du dioxyde de carbone dans les cimenteries

Bac 2026 Amérique du nord J1 · Exercice 1 **9 points** **Durée conseillée 1 h 35**

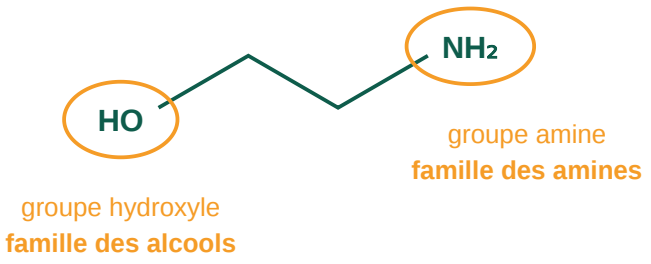
Q.1 Reproduire la formule topologique de l'éthanolamine, entourer les groupes caractéristiques et nommer les familles fonctionnelles associées.

La molécule porte deux groupes caractéristiques :

- le groupe hydroxyle $-\mathrm{OH}$: famille des **alcools** ;
- le groupe amine $-\mathrm{NH_2}$: famille des **amines**.

Groupe hydroxyle (alcool) et groupe amine (amine), entourés sur la formule ci-dessous.

PIÈGE
On entoure le groupe ($-\mathrm{OH}$, $-\mathrm{NH_2}$) et on nomme la famille (alcool, amine) : les deux sont attendus. Écrire « groupe alcool » fait perdre le point.



Q.1 · Formule topologique de l'éthanolamine, groupes caractéristiques entourés

Q.2 Vérifier que la concentration en quantité de matière C de la solution aqueuse d'éthanolamine à 20 % vaut $3{,}3\ \mathrm{mol\cdot L^{-1}}$.

Données utiles $V = 1{,}0$ L ; titre massique $w = 0{,}20$; $d = 1{,}0$; $\rho_{\mathrm{eau}} = 1{,}00\ \mathrm{g\cdot mL^{-1}}$; $M = 61{,}0\ \mathrm{g\cdot mol^{-1}}$

Masse de la solution : $m_{\mathrm{sol}} = d \times \rho_{\mathrm{eau}} \times V = 1{,}0 \times 1{,}00 \times 1{,}0 \times 10^3 = 1{,}0 \times 10^3$ g.

Masse d'éthanolamine dissoute : $m = w \times m_{\mathrm{sol}} = 0{,}20 \times 1{,}0 \times 10^3 = 2{,}0 \times 10^2$ g.

Concentration :

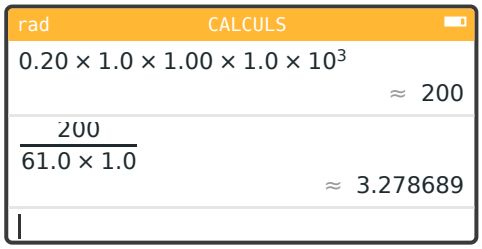
$$C = \frac{n}{V} = \frac{m}{M \times V} = \frac{2{,}0 \times 10^2}{61{,}0 \times 1{,}0} = 3{,}3\ \mathrm{mol\cdot L^{-1}}$$

$C = 3{,}3\ \mathrm{mol\cdot L^{-1}}$: c'est la valeur annoncée.

PIÈGE
ρ_{eau} est en $\mathrm{g\cdot mL^{-1}}$: convertir V en mL.

COMPRENDRE
Chiffres significatifs : d et V en ont deux, le résultat aussi : $3{,}3$ et non $3{,}28$.

À LA CALCULATRICE



Q.3 Représenter le diagramme de prédominance du couple acide-base de l'éthanolamine.

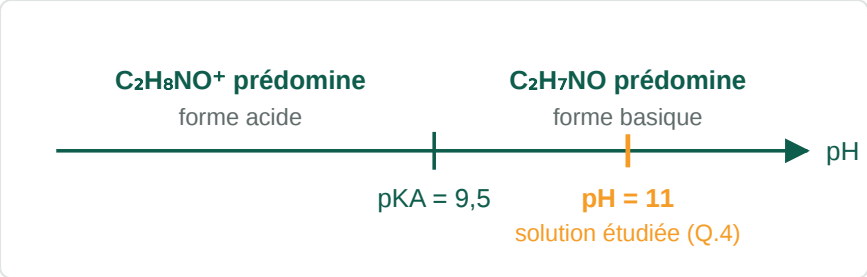
Données utiles $\mathrm{p}K_A(\mathrm{C_2H_8NO^+/C_2H_7NO}) = 9{,}5$

Sur un axe gradué en pH, la frontière se place à $\mathrm{pH} = \mathrm{p}K_A = 9{,}5$:

- pour $\mathrm{pH} < 9{,}5$, l'acide $\mathrm{C_2H_8NO^+}$ prédomine ;
- pour $\mathrm{pH} > 9{,}5$, la base $\mathrm{C_2H_7NO}$ prédomine.

Acide $\mathrm{C_2H_8NO^+}$ à gauche de $\mathrm{p}K_A = 9{,}5$, base $\mathrm{C_2H_7NO}$ à droite.

MÉTHODE
Dans tout diagramme de prédominance, l'acide est du côté des pH faibles, la base du côté des pH élevés, et la frontière est le $\mathrm{p}K_A$ du couple.



Q.3 · Diagramme de prédominance du couple de l'éthanolamine

Q.4 Préciser, en justifiant, sous quelle forme, acide ou basique, l'éthanolamine est présente dans la solution.

Données utiles $\mathrm{pH} = 11$; $\mathrm{p}K_A = 9{,}5$

Le pH de la solution est supérieur au $\mathrm{p}K_A$ du couple : $11 > 9{,}5$. On se trouve dans le domaine de prédominance de la base.

L'éthanolamine est présente sous sa forme basique $\mathrm{C_2H_7NO}$.

COMPRENDRE
Prédominer ne veut pas dire être seule : un peu d'acide $\mathrm{C_2H_8NO^+}$ coexiste avec la base, en quantité très inférieure.

Q.5 Donner l'expression du taux d'avancement τ de la réaction en fonction de l'avancement final x_f et de l'avancement maximal x_{max}.

Le taux d'avancement compare l'avancement réellement atteint à celui d'une transformation totale.

$$\tau = \frac{x_f}{x_{max}}$$

COMPRENDRE
τ est sans unité, compris entre 0 et 1.

Q.6 Exprimer l'avancement maximal x_{max} en fonction de C et V.

L'eau est le solvant, en large excès : le réactif limitant est l'éthanolamine, de quantité initiale $n_0 = C \times V$.

Si la transformation était totale, il n'en resterait plus : $C \times V - x_{max} = 0$.

$$x_{max} = C \times V$$

MÉTHODE
Pour trouver x_{max}, on annule la quantité finale du réactif limitant dans la ligne « état final » du tableau d'avancement.

Q.7 Montrer que le taux d'avancement peut s'écrire $\tau = \dfrac{K_e \cdot c^0}{C \cdot 10^{-\mathrm{pH}}}$.

Données utiles $K_e = \dfrac{[\mathrm{H_3O^+}] \cdot [\mathrm{HO^-}]}{(c^0)^2}$; $x_{max} = C \times V$ (Q.6)

D'après l'équation, il se forme autant d'ions $\mathrm{HO^-}$ que l'avancement : $n(\mathrm{HO^-})_f = x_f$, donc $x_f = [\mathrm{HO^-}] \times V$.

Le produit ionique de l'eau donne $[\mathrm{HO^-}] = \dfrac{K_e \cdot (c^0)^2}{[\mathrm{H_3O^+}]}$, avec $[\mathrm{H_3O^+}] = c^0 \cdot 10^{-\mathrm{pH}}$, d'où :

$$[\mathrm{HO^-}] = \frac{K_e \cdot c^0}{10^{-\mathrm{pH}}}$$

On reporte dans le taux d'avancement :

$$\tau = \frac{x_f}{x_{max}} = \frac{[\mathrm{HO^-}] \times V}{C \times V}$$

$\tau = \dfrac{K_e \cdot c^0}{C \cdot 10^{-\mathrm{pH}}}$: c'est l'expression demandée.

PIÈGE
Écrire $[\mathrm{H_3O^+}] = 10^{-\mathrm{pH}}$ sans le facteur c^0 : l'expression finale n'est alors plus homogène et le c^0 attendu manque.

COMPRENDRE
On néglige les ions $\mathrm{HO^-}$ apportés par l'autoprotolyse de l'eau : à $\mathrm{pH} = 11$, ils sont négligeables devant ceux formés par la réaction.

Q.8 Calculer la valeur du taux d'avancement τ et la commenter par rapport à la force de la base.

Données utiles $K_e = 1{,}0 \times 10^{-14}$; $c^0 = 1\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; $C = 3{,}3\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (Q.2) ; $\text{pH} = 11$

$$\tau = \frac{K_e \cdot c^0}{C \cdot 10^{-\text{pH}}} = \frac{1{,}0 \times 10^{-14} \times 1}{3{,}3 \times 10^{-11}} = 3{,}0 \times 10^{-4}$$

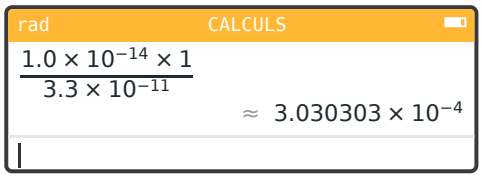
Soit $\tau = 0{,}030\ \%$: le taux d'avancement est très inférieur à 1. La réaction de l'éthanolamine avec l'eau est très limitée, ce qui est le propre d'une base faible, comme l'annonce l'énoncé.

$\tau = 3{,}0 \times 10^{-4} \ll 1$: l'éthanolamine est une base faible.

PIÈGE
Sans parenthèses autour du dénominateur, la calculatrice multiplie par 10^{-11} au lieu de diviser : le résultat est faux.

COMPRENDRE
Base forte : $\tau = 1$. Base faible : $\tau < 1$. Un pH élevé ne prouve pas qu'une base est forte.

À LA CALCULATRICE



Q.9 Identifier un intermédiaire réactionnel en justifiant la réponse.

Un intermédiaire réactionnel est une espèce formée au cours d'une étape du mécanisme, puis consommée dans une étape ultérieure.

L'espèce $\text{HO}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{NH}_2^+-\text{CO}_2^-$, qui porte une charge $+$ sur l'atome d'azote et une charge $-$ sur un atome d'oxygène, est produite par l'étape 1 et consommée par l'étape 2.

L'intermédiaire réactionnel est l'espèce formée à l'étape 1 : $\text{HO}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{NH}_2^+-\text{CO}_2^-$.

PIÈGE
Ne pas confondre avec un catalyseur, qui est consommé d'abord puis régénéré ensuite. L'intermédiaire, lui, est formé puis consommé.

Q.10 Recopier l'étape 1 et représenter par des flèches courbes le déplacement d'électrons. Justifier leur sens.

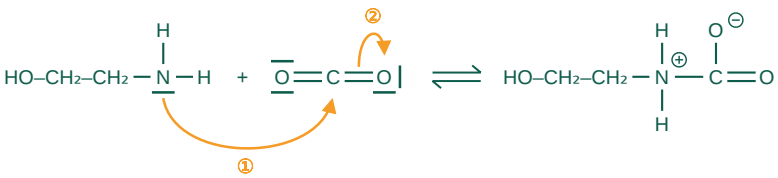
Une flèche courbe part toujours d'un doublet d'électrons (site donneur) et pointe vers un site accepteur.

- Flèche ① : l'atome d'azote porte un doublet non liant, c'est le site donneur. L'atome de carbone de CO_2, lié à deux atomes d'oxygène plus électronégatifs que lui, est appauvri en électrons : c'est le site accepteur. La flèche va du doublet de N vers C et traduit la formation de la liaison $\text{N}-\text{C}$.
- Flèche ② : le carbone ne peut pas s'entourer de plus de quatre doublets. Un doublet d'une liaison double $\text{C}=\text{O}$ bascule vers l'atome d'oxygène, plus électronégatif, qui porte alors la charge négative.

Deux flèches : doublet non liant de N vers C, puis doublet d'une liaison $\text{C}=\text{O}$ vers O.

PIÈGE
Une flèche courbe représente le mouvement d'un doublet d'électrons, pas celui d'un atome : elle ne part jamais d'un H ni d'une charge $+$.

MÉTHODE
Vérifier après coup : l'azote, qui partage son doublet, devient N^+ ; l'oxygène, qui en reçoit un, devient O^-. C'est bien le produit de l'étape 1.



Q.10 · Étape 1 du mécanisme, avec les flèches courbes

Q.11 Choisir le matériel permettant de préparer 250,0 mL de solution S_{50} à partir de la solution S, en justifiant la verrerie choisie.

Données utiles dilution au 50e ; $V_{\text{fille}} = 250{,}0$ mL

Lors d'une dilution, la quantité de soluté se conserve : $C_S \times V_{\text{mère}} = C_{50} \times V_{\text{fille}}$. Avec un facteur de dilution $F = \dfrac{C_S}{C_{50}} = 50$:

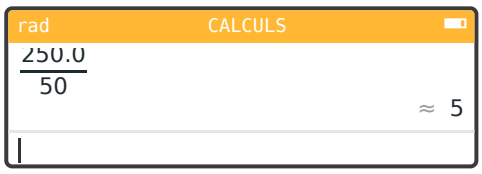
$$V_{\text{mère}} = \frac{V_{\text{fille}}}{F} = \frac{250{,}0}{50} = 5{,}0\ \text{mL}$$

Les deux volumes doivent être mesurés avec précision : on utilise de la verrerie jaugée. Un bécher de 50 mL reçoit un peu de solution S pour le prélèvement.

Pipette jaugée de 5,0 mL et fiole jaugée de 250,0 mL (plus un bécher de 50 mL pour prélever).

PIÈGE
Choisir la pipette graduée de 5,0 mL ou une éprouvette : pour une dilution précise, le prélèvement se fait à la pipette jaugée, jamais directement dans le flacon.

À LA CALCULATRICE



Q.12 Définir l'équivalence d'un titrage.

L'équivalence est l'état du titrage pour lequel le réactif titré et le réactif titrant ont été introduits dans les proportions stœchiométriques de la réaction support.

À l'équivalence, les deux réactifs sont entièrement consommés : il y a changement de réactif limitant.

Q.13 Déterminer, à partir de la courbe de titrage, le volume V_E de solution titrante versé à l'équivalence. Expliquer la méthode employée.

Données utiles figure 1 : courbes $\text{pH} = f(V)$ et $\dfrac{\text{d(pH)}}{\text{d}V} = g(V)$

L'équivalence correspond au saut de pH, là où le pH varie le plus vite.

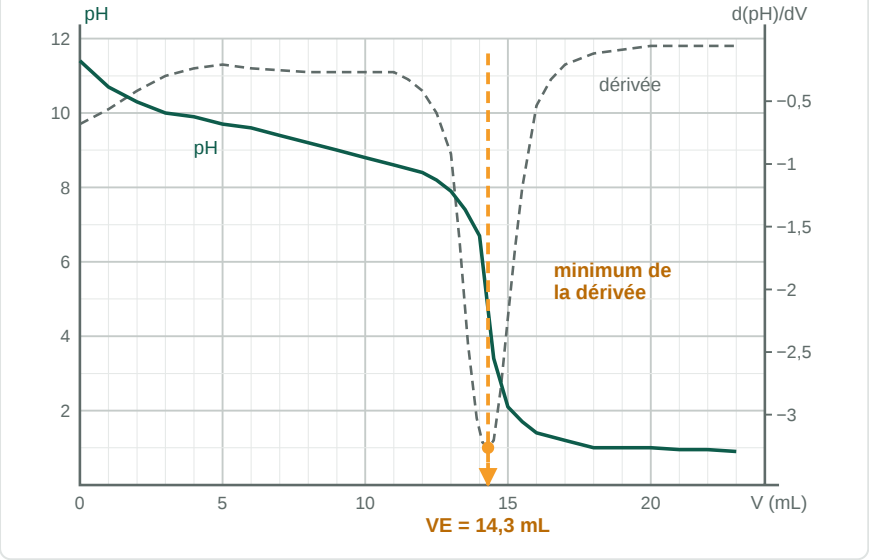
Comme le pH diminue au cours de ce titrage, la courbe dérivée $\dfrac{\text{d(pH)}}{\text{d}V}$ y passe par un extremum, ici un minimum.

On lit l'abscisse de ce minimum sur la figure 1.

$V_E = 14{,}3\ \text{mL}$

COMPRENDRE
Le pH baisse, donc la dérivée est négative. Pour un acide titré par une base, on chercherait un maximum.

MÉTHODE
La méthode des tangentes parallèles convient aussi. Une lecture entre 14,0 et 14,5 mL est recevable.



Q.13 · Figure 1 du sujet : l'équivalence est repérée par le minimum de la courbe dérivée

Q.14 En déduire la valeur du titre massique en éthanolamine, en %, de la solution S.

Données utiles $C_A = 0{,}10\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; $V_B = 25{,}0\ \text{mL}$; $V_E = 14{,}3\ \text{mL}$ (Q.13) ; dilution au 50e ; $M = 61{,}0\ \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $d = 1{,}0$; $\rho_{\text{eau}} = 1{,}00\ \text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$

Concentration de la solution diluée. À l'équivalence, d'après l'équation du titrage (une mole d'acide pour une mole de base) : $n(\text{C}_2\text{H}_7\text{NO})_{\text{titré}} = n(\text{H}_3\text{O}^+)_{\text{versé}}$, soit $C_{50} \times V_B = C_A \times V_E$.

$$C_{50} = \frac{C_A \times V_E}{V_B} = \frac{0{,}10 \times 14{,}3}{25{,}0} = 5{,}72 \times 10^{-2}\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$$

Concentration de la solution S. Elle a été diluée 50 fois : $C_S = 50 \times C_{50} = 2{,}86\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

Titre massique. Un litre de solution S contient une masse d'éthanolamine $m = C_S \times M = 2{,}86 \times 61{,}0 = 174\ \text{g}$ et pèse $m_{\text{sol}} = d \times \rho_{\text{eau}} \times V = 1{,}0 \times 1{,}00 \times 1{,}0 \times 10^3 = 1{,}0 \times 10^3\ \text{g}$.

$$w = \frac{m}{m_{\text{sol}}} = \frac{174}{1{,}0 \times 10^3} = 0{,}17$$

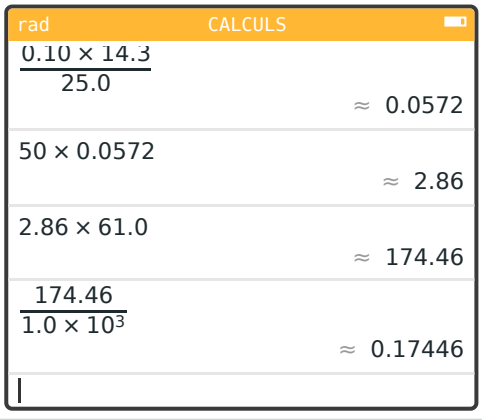
Le titre massique de la solution S est $w \approx 17\ \%$.

PIÈGE
Oublier le facteur 50 : le titrage porte sur la solution diluée S_{50}, alors que la question porte sur la solution S. Sans lui, on trouve 0,35 %.

COMPRENDRE
Inutile de convertir V_E et V_B en litres : seul leur rapport intervient. On arrondit à la fin, à deux chiffres comme C_A.

MÉTHODE
Question à prise d'initiative : annoncer les étapes (équivalence, dilution, titre) rapporte des points même sans résultat final.

À LA CALCULATRICE



Q.15 Commenter le résultat en discutant la possibilité d'utiliser cette solution d'éthanolamine pour capter le dioxyde de carbone.

Données utiles $w \approx 17\ \%$ (Q.14) ; tableau du sujet : efficacité faible à 15 %, bonne à 20 % ; tolérance à la corrosion très bonne à 15 %, acceptable à 20 %

Le titre trouvé, 17 %, est inférieur aux 20 % d'une solution neuve : la solution S s'est altérée avec le temps.

Ce titre se situe entre 15 % et 20 %. D'après le tableau, l'efficacité de captation est alors intermédiaire entre « faible » et « bonne », tandis que la tolérance à la corrosion des équipements est au moins acceptable.

La solution reste utilisable sans risque pour les équipements, mais avec une efficacité de captage moindre que celle d'une solution à 20 %.

COMPRENDRE
Un commentaire attendu s'appuie sur les deux lignes du tableau : efficacité et corrosion. Toute conclusion nuancée et justifiée par ces données est acceptée.

Q.16 Écrire l'équation de la réaction modélisant la formation du méthanol.

Réactifs : dioxyde de carbone et dihydrogène. Produits : méthanol et eau. La transformation est totale : flèche simple. On ajuste les atomes C (1), O (2) puis H (6).

$$\mathrm{CO_2 + 3\,H_2 \longrightarrow CH_3OH + H_2O}$$

PIÈGE
Vérifier l'hydrogène en dernier : 4 H dans $\mathrm{CH_3OH}$ et 2 H dans $\mathrm{H_2O}$, soit 6 H, ce qui impose 3 $\mathrm{H_2}$.

Q.17 Déterminer la durée nécessaire à la production des 37 500 tonnes de dihydrogène.

Données utiles $m(\mathrm{H_2}) = 37\,500\ \mathrm{t} = 3{,}75 \times 10^7\ \mathrm{kg}$; énergie par kilogramme : $55\ \mathrm{kW \cdot h}$; $P = 330\ \mathrm{MW} = 3{,}30 \times 10^5\ \mathrm{kW}$

Énergie électrique nécessaire :

$$E = 3{,}75 \times 10^7 \times 55 = 2{,}1 \times 10^9\ \mathrm{kW \cdot h}$$

Les électrolyseurs fonctionnent à la puissance P : $E = P \times \Delta t$, donc

$$\Delta t = \frac{E}{P} = \frac{3{,}75 \times 10^7 \times 55}{3{,}30 \times 10^5} = 6{,}3 \times 10^3\ \mathrm{h}$$

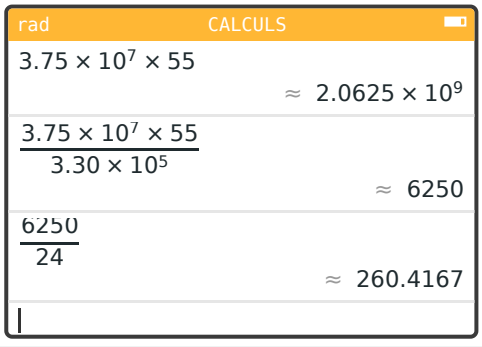
Soit $\dfrac{6\,250}{24} \approx 260$ jours de fonctionnement continu.

$\Delta t \approx 6{,}3 \times 10^3\ \mathrm{h}$, soit environ 260 jours.

PIÈGE
Mélanger les unités : avec E en $\mathrm{kW \cdot h}$, la puissance doit être en kW (330 MW = 330 000 kW) et la durée sort en heures.

MÉTHODE
Garder le $\mathrm{kW \cdot h}$ évite toute conversion en joules : une énergie en $\mathrm{kW \cdot h}$ divisée par une puissance en kW donne directement des heures.

À LA CALCULATRICE



Q.18 En déduire si la puissance des électrolyseurs est suffisante pour la production attendue.

Données utiles $\Delta t \approx 6\,250$ h (Q.17) ; production annuelle ; une année : $365 \times 24 = 8\,760$ h

Les 37 500 tonnes de dihydrogène correspondent à la production de méthanol d'une année. Or la durée de fonctionnement nécessaire est inférieure à un an : $6\,250\ \text{h} < 8\,760\ \text{h}$ (environ 260 jours sur 365).

La puissance de 330 MW est suffisante : les électrolyseurs doivent fonctionner environ 71 % du temps, ce qui laisse une marge pour les arrêts et la maintenance.

COMPRENDRE

« En déduire » impose de réutiliser la durée de Q.17 : on la compare à l'année, période sur laquelle la production est prévue.

À LA CALCULATRICE

