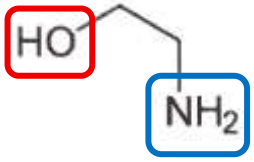
Bac 2026 Amérique du Nord Jour 2 **Correction © https://www.labolycee.org**

Exercice 1 Valorisation du dioxyde de carbone dans les cimenteries (9 points)

Q.1. Reproduire, sur la copie, la formule topologique de la molécule d'éthanolamine. Entourer les groupes caractéristiques de la molécule puis nommer les familles fonctionnelles associées.

Famille alcool



Famille amine

Densité des solutions aqueuses d'éthanolamine : d = 1,0 ;
Masse volumique de l'eau : ρ_{eau} = 1,00 g·mL^{-1}.
On considère un volume V = 1,0 L d'une solution d'éthanolamine à 20 % en masse.

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

$d = \dfrac{\rho}{\rho_{eau}}$ donc $\rho = d \cdot \rho_{eau}$

$c = \dfrac{\rho . w}{M} = \dfrac{d \cdot \rho_{eau} \cdot w}{M}$

$\dfrac{\frac{1}{1E^{-3}} * \frac{20}{100}}{61}$

3.278688525E0

$$c = \frac{1{,}0 \times 1{,}0\ \text{g·mL}^{-1} \times \frac{20}{100}}{61{,}0\ \text{g·mol}^{-1}} = \frac{1{,}0 \times \frac{1{,}0\ \text{g}}{1{,}0\ \text{mL}} \times \frac{20}{100}}{61{,}0\ \text{g·mol}^{-1}} = \frac{1{,}0 \times \frac{1{,}0\ \text{g}}{1{,}0 \times 10^{-3}\ \text{L}} \times \frac{20}{100}}{61{,}0\ \text{g·mol}^{-1}} = 3{,}3\ \text{mol.L}^{-1}$$

Autre méthode : trop détaillée
Calculons la masse d'1,0L de solution d'éthanolamine :

$d = \dfrac{\rho_{solution}}{\rho_{eau}}$ donc $\rho_{solution} = d \cdot \rho_{eau}$

$\rho_{solution}$ = 1,0 × 1,00 g·mL^{-1} = 1,0 g·mL^{-1}

Calculons la masse d'1,0 L de solution d'éthanolamine :

$\rho_{solution} = \dfrac{m_{solution}}{V}$ donc $m_{solution} = \rho_{solution} \cdot V$

$m_{solution}$ = 1,0 g·mL^{-1} × 1,0 ×10^3 mL = 1,0×10^3 g

Calculons la masse d'éthanolamine contenue dans 1,0 L de solution.
La teneur en masse est de 20%, ainsi seulement 20% de la masse de la solution est de l'éthanolamine.

$w = \dfrac{m_{\text{éthanolamine}}}{m_{solution}}$ donc $m_{\text{éthanolamine}} = w \cdot m_{solution}$

$m_{\text{éthanolamine}} = \dfrac{20}{100}$ × 1,0×10^3 g = 2,0×10^2 g.

Calculons la quantité de matière d'éthanolamine présente dans 1,0 L de solution, autant dire calculons la concentration en quantité en éthanolamine.

$$C = \frac{n}{V} = \frac{\frac{m_{\text{éthanolamine}}}{M_{\text{éthanolamine}}}}{V} = \frac{m_{\text{éthanolamine}}}{M_{\text{éthanolamine}} \cdot V}$$

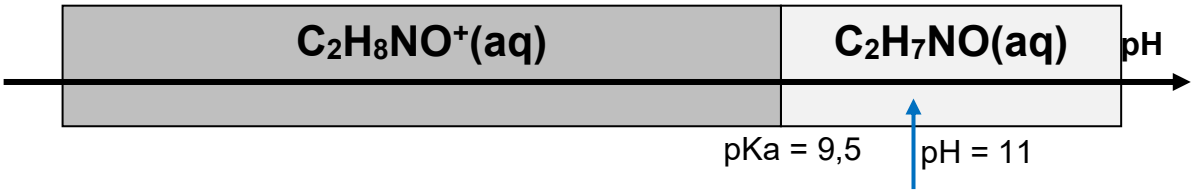
$$C = \frac{2{,}0 \times 10^2\ \text{g}}{61{,}0\ \frac{\text{g}}{\text{mol}} \times 1{,}0\ \text{L}} = 3{,}3\ \text{mol·L}^{-1}$$

$\dfrac{200}{61}$

3.278688525E0

La mesure du pH de la solution donne pH = 11.

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



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

$pH = 11 > pK_A$ ainsi l'éthanolamine est sous la forme de sa base conjuguée $C_2H_7NO(aq)$.

L'éthanolamine réagit avec l'eau selon l'équation de réaction suivante :

$$C_2H_7NO(aq) + H_2O(\ell) \rightleftharpoons C_2H_8NO^+(aq) + HO^-(aq)$$

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

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

Q.6. Exprimer l'avancement maximal x_{max} en fonction de C et V. Le candidat pourra s'appuyer, si besoin, sur un tableau d'avancement.

L'eau est en excès, l'éthanolamine est le réactif limitant.

Lorsque l'éthanolamine est totalement consommée $C \cdot V - x_{max} = 0$, donc $x_{max} = C \cdot V$

Q.7. Montrer que le taux d'avancement τ peut s'exprimer : $\tau = \frac{K_e \cdot c^0}{C \cdot 10^{-pH}}$.

équation chimique		$C_2H_7NO(aq)$ +	$H_2O(\ell)$ ⇌	$C_2H_8NO^+(aq)$ +	$HO^-(aq)$
État du système	Avancement (mol)	Quantités de matière (mol)			
État initial	$x = 0$	$C \cdot V$	Beaucoup	0	0
En cours de transformation	x	$C \cdot V - x$	Beaucoup	x	x
État final	x_f	$C \cdot V - x_f$	Beaucoup	x_f	x_f
État final si totale	$x = x_{max}$	$C \cdot V - x_{max} = 0$	Beaucoup	x_{max}	x_{max}

$x_f = n(HO^-)$ donc $\frac{x_f}{V} = [HO^-]$

D'après l'expression du produit ionique de l'eau $K_e = \frac{[H_3O^+][HO^-]}{(c^0)^2}$ donc $[HO^-] = \frac{K_e \cdot (c^0)^2}{[H_3O^+]}$

Par définition $[H_3O^+] = 10^{-pH} \cdot c^0$ alors $[HO^-] = \frac{K_e \cdot (c^0)^2}{10^{-pH}.c^0} = \frac{K_e \cdot c^0}{10^{-pH}}$

Comme établi précédemment $\frac{x_f}{V} = [HO^-(aq)]$, donc $x_f = [HO^-] \cdot V = \frac{K_e \cdot c^0}{10^{-pH}} \cdot V$

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

$$\tau = \frac{\frac{K_e \cdot c^0}{10^{-pH}} \cdot V}{C \cdot V} = \frac{K_e \cdot c^0}{C \cdot 10^{-pH}}$$

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

$$\tau = \frac{K_e \cdot c^0}{C \cdot 10^{-pH}}$$

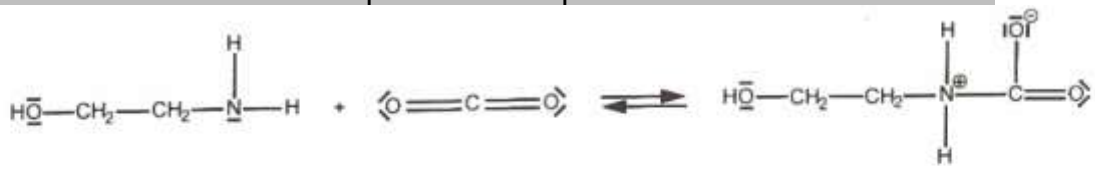
$$\tau = \frac{1{,}0\times10^{-14}\times1}{3{,}3\times10^{-11}} = 3{,}0\times10^{-4} = 3{,}0\times10^{-2}\%$$

1E-14
3.3E-11
3.03030303E-4

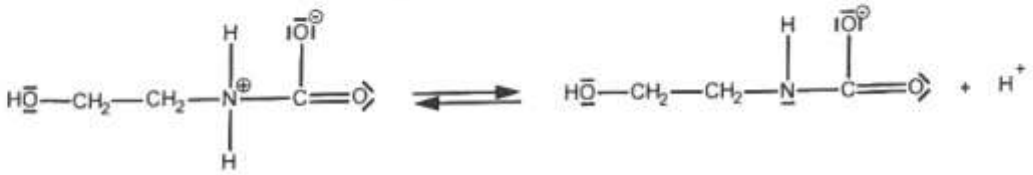
Le taux d'avancement est particulièrement petit. La base C_2H_7NO réagit très peu avec l'eau, c'est une base faible.

On s'intéresse à une partie du mécanisme réactionnel de la réaction de captage du dioxyde de carbone par l'éthanolamine dont les premières étapes sont données ci-dessous :

étape 1 :



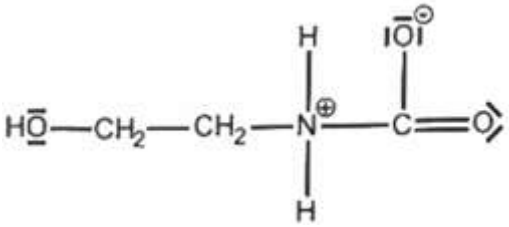
étape 2 :



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

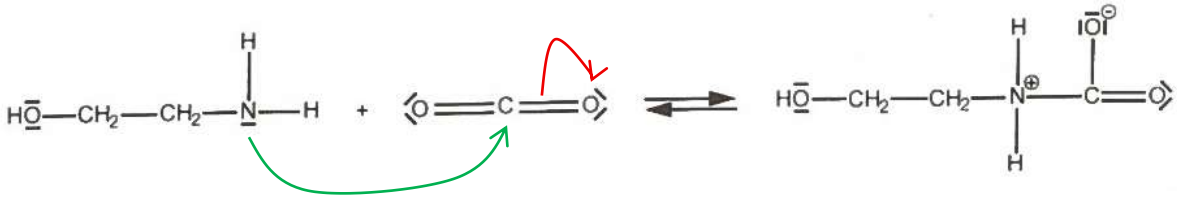
Un intermédiaire réactionnel est formé lors d'une étape puis est consommé lors d'une étape suivante.

Il s'agit de



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

étape 1 :



Lors de la formation d'une liaison, le doublet se déplace du site donneur (l'azote riche en électrons avec son doublet non liant) vers le site accepteur (le carbone C pauvre en électrons ; non demandé : en effet ses deux voisins O étant plus électronégatifs que lui, l'atome C a été appauvri en électrons).

Lors de la rupture d'une liaison le doublet se déplace vers l'atome le plus électronégatif donc vers l'oxygène.

2. Contrôle qualité d'une solution d'éthanolamine

L'éthanolamine peut s'altérer au fil du temps, entraînant une diminution progressive de sa concentration. Un technicien souhaite s'assurer que la solution aqueuse S d'éthanolamine dont il dispose peut être utilisée pour le captage du dioxyde de carbone. Pour cela, il réalise un titrage pH-métrique.

La solution S est préalablement diluée 50 fois. La solution obtenue est notée S_{50}.

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

Verrerie à disposition :
- Béchers : 50 mL, 100 mL, 250 mL ;
- Pipettes jaugées : 5,0 mL, 10,0 mL, 20,0 mL ;
- Pipettes graduées : 5,0 mL, 10,0 mL ;
- Éprouvettes graduées : 20 mL, 100 mL, 250 mL ;
- Fioles jaugées : 50,0 mL, 100,0 mL, 250,0 mL.

La solution est diluée 50 fois. Le facteur de dilution est de 50.

$$F = 50 = \frac{C}{C_{50}} = \frac{V_{50}}{V}$$

où V_{50} est le volume de solution fille = 250,0 mL

C_{50} est la concentration de la solution fille
V est le volume de solution mère à prélever
C est la concentration de la solution mère

$$V = \frac{V_{50}}{50}$$

$$V = \frac{250,0}{50} = 5,0 \text{ mL}$$

On place la solution mère dans un bécher.
On prélève V avec une pipette jaugée de 5,0 mL.
On verse ce prélèvement dans une fiole jaugée de 250,0 mL.

Le technicien dose par titrage avec suivi pH-métrique un volume V_B = 25,0 mL de solution diluée S_{50}. La solution titrante est de l'acide chlorhydrique de concentration C_A= 0,10 mol.L^{-1}. La figure 1 ci-dessous présente l'évolution du pH du milieu réactionnel en fonction du volume versé de solution titrante.

L'équation de la réaction modélisant la transformation observée durant le dosage par titrage est :

$$C_2H_7NO\ (aq) + H_3O^+\ (aq) \rightarrow C_2H_8NO^+\ (aq) + H_2O\ (\ell)$$

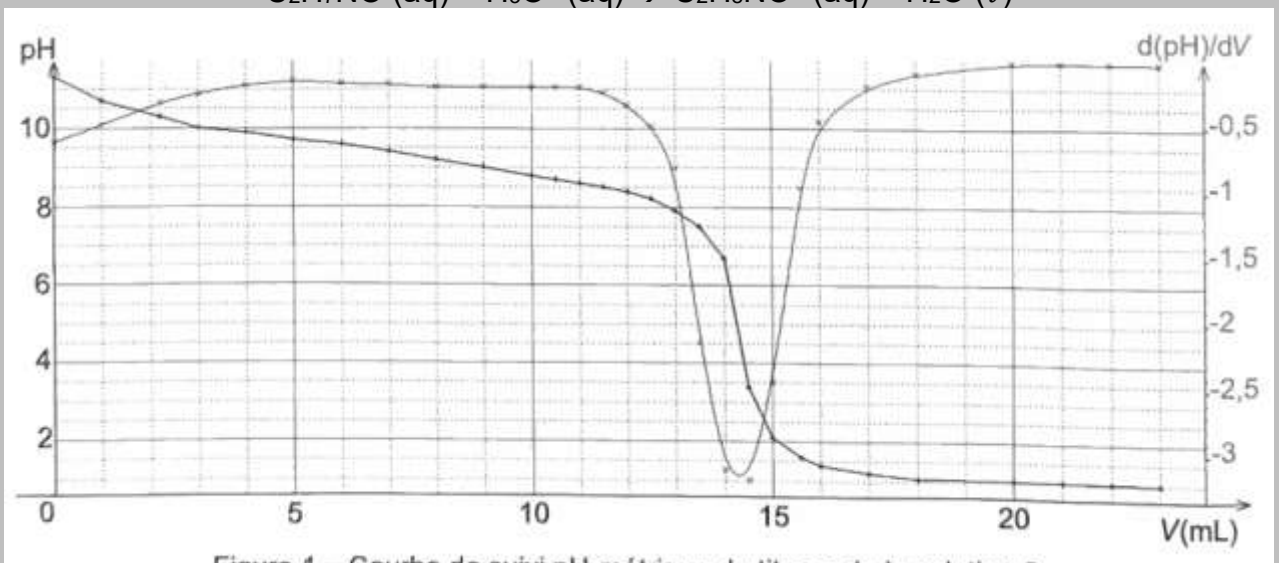


Figure 1 – Courbe de suivi pH-métrique du titrage de la solution S_{50}

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

À l'équivalence, les réactifs ont été mélangés dans les proportions stœchiométriques.

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.

À l'équivalence, il se produit un saut de pH. La baisse de pH est la plus forte à l'équivalence, ainsi la dérivée $\frac{dpH}{dV}$ atteint un minimum pour $V = V_E$. On lit V_E = 14,3 mL environ.

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

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 nécessite d'être correctement présentée.

À l'équivalence, on a $n_{\text{acide versé}} = n_{\text{éthanolamine}}$.

$$C_A \cdot V_E = C_{50} \cdot V_B$$

$C_{50} = \frac{C_A \cdot V_E}{V_B}$ pour la solution diluée 50 fois.

$C = 50C_{50} = 50\frac{C_A \cdot V_E}{V_B}$ pour la solution S.

$$C = 50 \times \frac{0{,}10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \times 14{,}3 \text{ mL}}{25{,}0 \text{ mL}} = 2{,}86 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

Le titre massique est défini par $w = \frac{m_S}{m_{\text{solution}}}$ où m_S est la masse d'éthanolamine.

$m_S = C \cdot V \cdot M$

$\rho_{\text{solution}} = \frac{m_{\text{solution}}}{V}$ donc $m_{\text{solution}} = \rho_{\text{solution}} \cdot V$

$d = \frac{\rho_{solution}}{\rho_{eau}}$ donc $\rho_{\text{solution}} = d \cdot \rho_{\text{eau}}$ alors $m_{\text{solution}} = d \cdot \rho_{\text{eau}} \cdot V$

$$w = \frac{C \cdot V \cdot M}{d \cdot \rho_{eau} \cdot V} = \frac{C \cdot M}{d \cdot \rho_{eau}}$$

$$w = \frac{2{,}86 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \times 61{,}0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}}{1{,}0 \times 1{,}00 \text{ g} \times \text{mL}^{-1}} = \frac{2{,}86 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \times 61{,}0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}}{1{,}0 \times \frac{1{,}00 \text{ g}}{1 \text{ mL}}} = \frac{2{,}86 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \times 61{,}0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}}{1{,}0 \times \frac{1{,}00 \text{ g}}{1 \times 10^{-3} \text{L}}}$$

$w = 1{,}7 \times 10^{-1} = 17\%$

La concentration en éthanolamine influence l'efficacité du captage : une concentration trop faible réduit la performance, une concentration trop élevée accroît les risques de corrosion des équipements.

Titre massique en éthanolamine	15 %	20 %	25 %	30 %
Efficacité de captation du CO_2	Faible	Bonne	Bonne à très bonne	Très bonne
Tolérance à la corrosion des équipements	Très bonne	Acceptable	Risques accrus	Très mauvaise

D'après *Wang N., Wang D., Krook-Riekkola A., Ji X. (2023). MEA-based CO_2 capture. Front. Energy Res., 11:1230743 (doi.org/10.3389/fenrg.2023.1230743)*

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

Le pourcentage de 17% est un bon compromis : la captation est correcte avec une bonne tolérance à la corrosion.

3. Production de méthanol à partir du dioxyde de carbone capté

Le méthanol (CH_3OH) peut être obtenu par réaction entre le dioxyde de carbone et le dihydrogène ; il se forme également de l'eau. La transformation est totale.

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

$CO_2 + 3H_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O$

En France, le projet EDF-Hynovi prévoit la fabrication de 200 000 tonnes de méthanol de synthèse par an à partir du CO_2 d'une cimenterie. La quantité de dihydrogène nécessaire est de 37 500 tonnes. Pour produire le dihydrogène, l'usine prévoit d'utiliser des électrolyseurs dont la puissance totale est de 330 MW. L'énergie nécessaire à la production d'un kilogramme de dihydrogène est de 55 kW.h.

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

Pour produire un kilogramme de dihydrogène il faut une énergie de 55kW·h.

Pour en produire 37 500 tonnes, soit 37 500 000 kg,

il faudra une énergie de 37 500 000 × 55 kW·h = $2{,}0625\times10^9$ kW·h = $2{,}0625\times10^6$ MW·h

$E = P\cdot\Delta t$ donc $\Delta t = \dfrac{E}{P}$

$$\Delta t = \frac{2{,}0625\times10^6\ \text{MW}\cdot\text{h}}{330\ \text{MW}} = 6250\ h = 260\ \text{jours}$$

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

Avec la puissance totale de 330 MW, il faudra 260 jours pour la production attendue en une année. Cela semble adapté car 260 < 365 jours et ainsi on disposera d'une marge de temps de maintenance assez large.

Merci de nous signaler la présence d'éventuelles erreurs à labolycee@labolycee.org.