

EXERCICE I – Capture géologique du dioxyde de carbone (4 points)

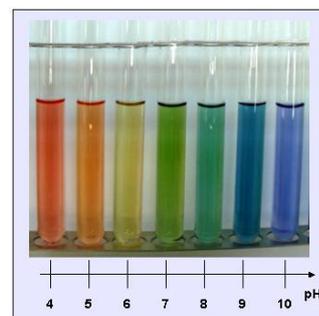
Les scientifiques ont établi le lien entre l'augmentation de la teneur en dioxyde de carbone dans l'atmosphère et l'augmentation de la température terrestre moyenne. Le procédé CarbFix, développé en Islande, permet de piéger dans des roches souterraines du dioxyde de carbone produit par les activités humaines.

Principe du procédé CarbFix : le dioxyde de carbone $\text{CO}_2(\text{g})$ est dissous sous pression dans de l'eau. La solution obtenue est injectée dans des roches basaltiques entre 400 m et 500 m de profondeur. Le contact entre la solution et les roches entraîne une dissolution partielle des roches basaltiques libérant des ions $\text{Mg}^{2+}(\text{aq})$ et $\text{Ca}^{2+}(\text{aq})$, ainsi que la formation d'ions hydrogénocarbonate $\text{HCO}_3^-(\text{aq})$ et d'ions carbonate $\text{CO}_3^{2-}(\text{aq})$. Ces ions réagissent alors entre eux pour former du carbonate de calcium $\text{CaCO}_3(\text{s})$ ou de magnésium $\text{MgCO}_3(\text{s})$. Le dioxyde de carbone est ainsi capturé sous forme de carbonates sous terre.

Le but de l'exercice est d'étudier quelques aspects du procédé Carbfix.

Données :

- couples acide-base des espèces chimiques liées au dioxyde de carbone aqueux :
 - couple 1 : $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq}) / \text{HCO}_3^-(\text{aq})$ $\text{pK}_{\text{A}_1} = 6,4$ à 25 °C ;
 - couple 2 : $\text{HCO}_3^-(\text{aq}) / \text{CO}_3^{2-}(\text{aq})$ $\text{pK}_{\text{A}_2} = 10,3$ à 25 °C ;
- masses molaires moléculaires : $M(\text{CO}_2) = 44\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $M(\text{H}_2\text{O}) = 18\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$;
- concentration standard : $c^\circ = 1,00\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$;
- masse volumique de l'eau : $\rho(\text{H}_2\text{O}) = 1\,000\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$;
- couleur de solutions comportant quelques gouttes d'un indicateur coloré universel, mélange d'indicateurs colorés, en fonction du pH de ces solutions.
D'après <http://culturesciences.chimie.ens.fr/content/les-indicateurs-de-ph-924>



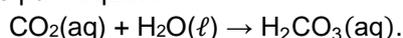
On propose, dans un premier temps, de mettre en évidence l'acidité de la solution de dioxyde de carbone grâce à l'expérience suivante : dans un bécher de 100 mL, on place 50 mL d'eau distillée et quelques gouttes d'indicateur universel. À l'aide d'une paille, un expérimentateur souffle dans l'eau distillée pendant quelques minutes de manière à faire buller l'air expiré dans l'eau distillée. Le résultat de cette expérience est présenté sur la photo ci-dessous.

Avant expiration de l'air Après expiration de l'air



1. Expliquer en quoi cette expérience permet de mettre en évidence le caractère acide de la solution aqueuse de dioxyde de carbone.

Le dioxyde de carbone dissous réagit avec l'eau pour former de l'acide carbonique $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq})$; cette transformation peut être modélisée par l'équation :



2. Indiquer, en justifiant, si l'espèce chimique H_2CO_3 est un acide ou une base de Brönsted.

Dans le procédé CarbFix, de l'eau et du dioxyde de carbone gazeux sont injectés dans la cavité rocheuse, sous pression (25 bar) et à une température comprise entre 20 °C et 30 °C. Le débit en masse d'une grandeur physique représente la masse de cette grandeur injectée dans la cavité par seconde. Dans ce cas, le débit en masse d'eau liquide est de 1 800 g·s⁻¹ et le débit en masse de dioxyde de carbone gazeux est de 70 g·s⁻¹. L'intégralité du dioxyde de carbone gazeux injecté est dissous dans l'eau. On appelle S la solution aqueuse obtenue. On suppose que l'ajout de dioxyde de carbone gazeux à l'eau ne fait pas varier le volume de liquide.

3. Montrer que la solution S présente une concentration en quantité de matière apportée d'acide carbonique H₂CO₃(aq) de valeur C_S = 0,88 mol·L⁻¹.

On cherche à déterminer la valeur du pH de la solution S₀. On modélise l'évolution du système par la réaction entre l'acide carbonique et l'eau, l'acide carbonique étant un acide faible. On établit le tableau d'avancement suivant, dont les grandeurs sont exprimées en mol·L⁻¹. L'avancement final de la réaction (équilibre chimique) est noté x_{éq} (en mol·L⁻¹).

Réaction chimique	H ₂ CO ₃ (aq) + H ₂ O(ℓ) → HCO ₃ ⁻ (aq) + H ₃ O ⁺ (aq)			
État initial	C _S	Solvant	0	négligeable
État final : équilibre chimique				x _{éq}

4. Reproduire le tableau d'avancement et compléter la ligne correspondant à l'état final avec des expressions littérales.

5. En déduire, à l'équilibre, la relation entre la constante d'acidité K_{A1} du couple H₂CO₃(aq)/ HCO₃⁻(aq), x_{éq}, C_S et c°. On exprimera la relation sous la forme d'une équation de degré 2 : ax_{éq}² + bx_{éq} + c = 0 où a, b et c sont des constantes à exprimer notamment en fonction de K_{A1}, C_S et c°.

La résolution numérique de cette équation de degré 2 conduit à deux solutions :

$$x_{éq1} = 0,000591 \text{ et } x_{éq2} = -0,000592.$$

6. En déduire la composition de la solution S à l'équilibre, puis calculer la valeur du pH de la solution S₀ à l'équilibre chimique. Commenter.

Une expérimentation du procédé CarbFix a été réalisée en situation réelle. Des mesures du pH des eaux souterraines (initialement à pH = 9) ainsi que la concentration en carbone inorganique dissous (DIC) ont été réalisées pendant 550 jours. Le DIC prend en compte l'ensemble des espèces carbonées inorganiques (H₂CO₃(aq), HCO₃⁻(aq) et CO₃²⁻(aq)). Les résultats sont donnés à la **figure 2**. Les zones grisées représentent les phases d'injection de dioxyde de carbone : 175 tonnes de dioxyde de carbone ont été injectées lors de la phase 1 (entre janvier et mars 2012) puis 55 tonnes ont été injectées lors de la phase 2 (entre juin et août 2012).

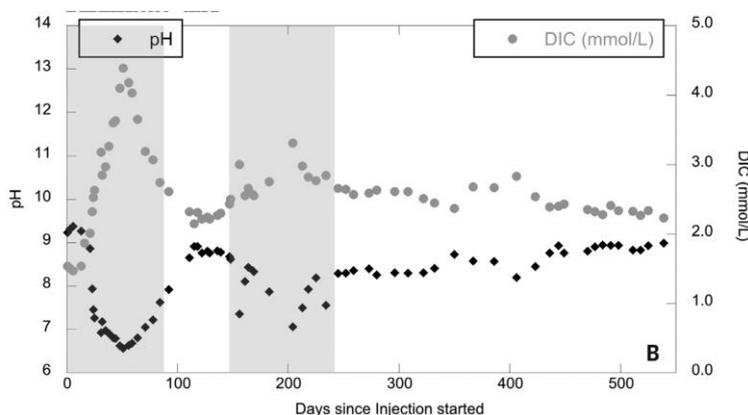


Figure 2. Graphique représentant le pH (noir) et la concentration en carbone inorganique dissous (gris) dans les eaux souterraines en fonction du temps.

Source : Matter, J. M. et al..*Science* 352, 1312–1314 (2016)

7. Expliquer l'évolution des courbes sur les 300 premiers jours de l'expérience.