

Lycée(s)	Général	Technologique	Professionnel
Niveau(x)	CAP	Seconde	Première
Enseignement(s)	Commun	De spécialité	Optionnel
Physique - Chimie			

Goutte après goutte : formation des stalactites ou des stalagmites dans l'Aven d'Orgnac

Construire progressivement une démarche de modélisation

Cette ressource propose par l'intermédiaire d'une évaluation formative de travailler sur les différentes étapes de l'activité de modélisation. La modélisation est mise en place progressivement en jouant sur différentes tâches.

Scénario pédagogique

La démarche scientifique¹ comporte une étape de modélisation qui fait le lien entre observation et théorie, et produit ainsi de la connaissance.

Cette ressource propose d'amener les élèves du descriptif à l'explicatif par une stratégie d'évaluation de l'activité de modélisation. Cette stratégie doit être mise en synergie avec une réflexion plus globale sur la progressivité de l'enseignement de la modélisation à l'échelle temporelle d'un niveau ou d'un cycle.

Afin d'accompagner l'activité de modélisation, on propose de dissocier les différentes « tâches modélisatrices » en trois types.

Tâches modélisatrices de type 1 : tâches à vocation descriptive

On sélectionne une partie du système pour le décrire et le rendre intelligible, en l'extrayant de la complexité globale du système qui le rend souvent inaccessible à la compréhension. C'est l'élaboration d'outils pour le passage d'un objet réel à une situation étudiable.

Tâches modélisatrices de type 2 : tâches visant à établir des corrélations et des comparaisons.

Il s'agit des premières objectivations de données s'appuyant uniquement sur des éléments communs d'analyse, de culture ou de modèles acquis antérieurement et pouvant être mobilisés sans être conscientisés. Il s'agit de tâches qui sont de l'ordre

¹ Lire préalablement le document introductif sur « la démarche scientifique / les démarches scientifiques »

du constat, fondées sur un registre théorique solidement ancré et antérieur aux objectifs de formation de la séquence.

Tâches modélisatrices de type 3 : tâches à visées explicatives faisant appel aux connaissances théoriques en lien avec la séquence d'apprentissage.

Il s'agit de formaliser une explication de la situation contextualisée en s'appuyant sur les connaissances théoriques.

À partir d'un même contexte, deux versions d'une activité sont présentées. Chaque type de « tâches modélisatrices » est représenté dans ces deux versions, mais leur poids relatif est modulé. Ainsi, selon le moment de l'année et/ou du niveau d'expertise des élèves, l'accent est mis sur les tâches modélisatrices de type 1 et 2 ou sur celles de type 3.

Type ou modalité d'évaluation

Cette évaluation formative peut être réalisée en groupe, ouvrant ainsi la possibilité d'une collaboration et d'échange entre pairs.

De plus, elle peut accompagner la mise en œuvre d'une différenciation pédagogique.

Références aux programmes

Prérequis / repères de progressivité

Transformation totale / Transformation non totale

Avancement d'une transformation chimique

Référence au programme de Terminale, spécialité Physique-Chimie

Objectifs de formation

« Le programme de physique-chimie de la classe terminale s'inscrit dans la continuité de celui de la classe de première, en promouvant la pratique expérimentale et l'activité de modélisation ainsi qu'en proposant une approche concrète et contextualisée des concepts et phénomènes étudiés. La démarche de modélisation y occupe une place centrale pour former les élèves à établir un lien entre le « monde » des objets, des expériences, des faits et celui des modèles et des théories. Aussi l'enseignement proposé s'attache-t-il à poursuivre l'acquisition des principaux éléments constitutifs de cette démarche. »

Contenus disciplinaires :

Constitution et transformations de la matière

3. Prévoir l'état final d'un système, siège d'une transformation chimique

A) Prévoir le sens de l'évolution spontanée d'un système chimique

Notion et contenu

- État final d'un système siège d'une transformation non totale : état d'équilibre chimique.
- Modèle de l'équilibre dynamique
- Quotient de réaction Q_r .
- Système à l'équilibre chimique : constante d'équilibre $K(T)$.
- Critère d'évolution spontanée d'un système hors équilibre chimique.

Capacités exigibles – Activités expérimentales support de la formation

- Relier le caractère non total d'une transformation à la présence, à l'état final du système, de tous les réactifs et de tous les produits.
- Mettre en évidence la présence de tous les réactifs dans l'état final d'un système siège d'une transformation non totale, par un nouvel ajout de réactifs.
- Déterminer le sens d'évolution spontanée d'un système.
- Déterminer un taux d'avancement final à partir de données sur la composition de l'état final et le relier au caractère total ou non total de la transformation.
- Déterminer la valeur du quotient de réaction à l'état final d'un système, siège d'une transformation non totale, et montrer son indépendance vis-à-vis de la composition initiale du système à une température donnée.

Compétences travaillées dans le cadre d'une démarche scientifique

Toutes les compétences de cette démarche scientifique.

Présentation de la séance

Les élèves sont plus performants dans l'élaboration et l'utilisation de modèles pour décrire des situations d'une manière scientifique et pour interpréter des données, que dans l'utilisation de modèles pour fournir des éléments d'explications aux phénomènes observés. Autrement dit, les élèves sont souvent plus performants dans le constat et l'objectivation de données que dans leur mise en synergie avec leurs connaissances scientifiques pour en extraire du sens. Ainsi les compétences travaillées dans le cadre de la démarche scientifique, nommées « Analyser » et « Réaliser » dans les programmes de lycée, sont mieux maîtrisées que la compétence « Valider », où la confrontation du modèle aux résultats expérimentaux reste souvent superficielle sans investir le champ explicatif.

Organisation de la séance d'évaluation

Après avoir mis en œuvre les notions et contenus, le professeur propose une situation d'évaluation formative se déroulant sur une séance de 2 heures.

La situation est proposée en deux versions :

- la version 1 contient une majorité des « tâches modélisatrices » du type 1 et 2 ;
- la version 2 contient un nombre plus important de « tâches modélisatrices » du type 3.

Selon le moment dans l'année, le professeur peut proposer l'une ou l'autre des versions à des groupes d'élèves différents et ainsi mettre en œuvre une réelle progressivité dans l'évaluation de la démarche de modélisation.

Recommandation

Au regard de la complexité de certaines tâches à réaliser, il est recommandé de privilégier un travail de groupe et de n'évaluer qu'une partie des tâches.

La grille d'évaluation collaborative proposée par le GRIESP peut être avantageusement utilisée pour évaluer les tâches sélectionnées.

Travaux d'élèves et analyse

Analyse pédagogique des deux versions de l'activité proposée en annexe 1

Analyse du type de questionnement dans la version 1 de l'activité

La version 1 de l'activité contient des questions de « tâches modélisatrices » de type 2 (tâches visant à établir des corrélations et des comparaisons). Elle sollicite des capacités d'analyse des données fournies, de mise en relation des données et de synthèse. La réponse à l'objectif proposé est donc fondée principalement sur une modélisation phénoménologique. De même, l'étape de validation s'appuie sur la comparaison d'une grandeur calculée et d'une grandeur observée. La discordance entre ces grandeurs permet de critiquer le modèle utilisé pour identifier son caractère limité, sans expliquer les paramètres du modèle à l'origine de cette discordance. Les tâches proposées sont parfois complexes et permettent de faire travailler les compétences, analyser – valider et communiquer.

Une dimension explicative fondée sur des éléments théoriques est présente dans cette version 1 de l'activité pour retrouver une valeur numérique d'un tableau fourni. Elle se limite néanmoins à des tâches procédurales permettant de travailler la compétence, réaliser.

Cette version de l'activité peut être proposée à des élèves qui :

- se positionnent en début de formation sur la démarche de modélisation ;
- présentent des difficultés pour passer le cap explicatif et ont besoin d'y être amenés progressivement ;
- ont besoin de travailler sur l'analyse et la mise en relation de données ou de travailler leur capacité de synthèse.

Analyse du type de questionnement dans la version 2 de l'activité

Cette version de l'activité contient des questions de « tâches modélisatrices » du type 3 (tâches à visées explicatives faisant appel à un corpus de connaissances théoriques en lien avec les objectifs de formation de la séquence d'apprentissage).

La dimension explicative mobilise des notions et des compétences allant au-delà de la seule compétence, réaliser, et investit le champ des compétences, analyser et valider.

Cette version de l'activité peut être proposée à des élèves qui :

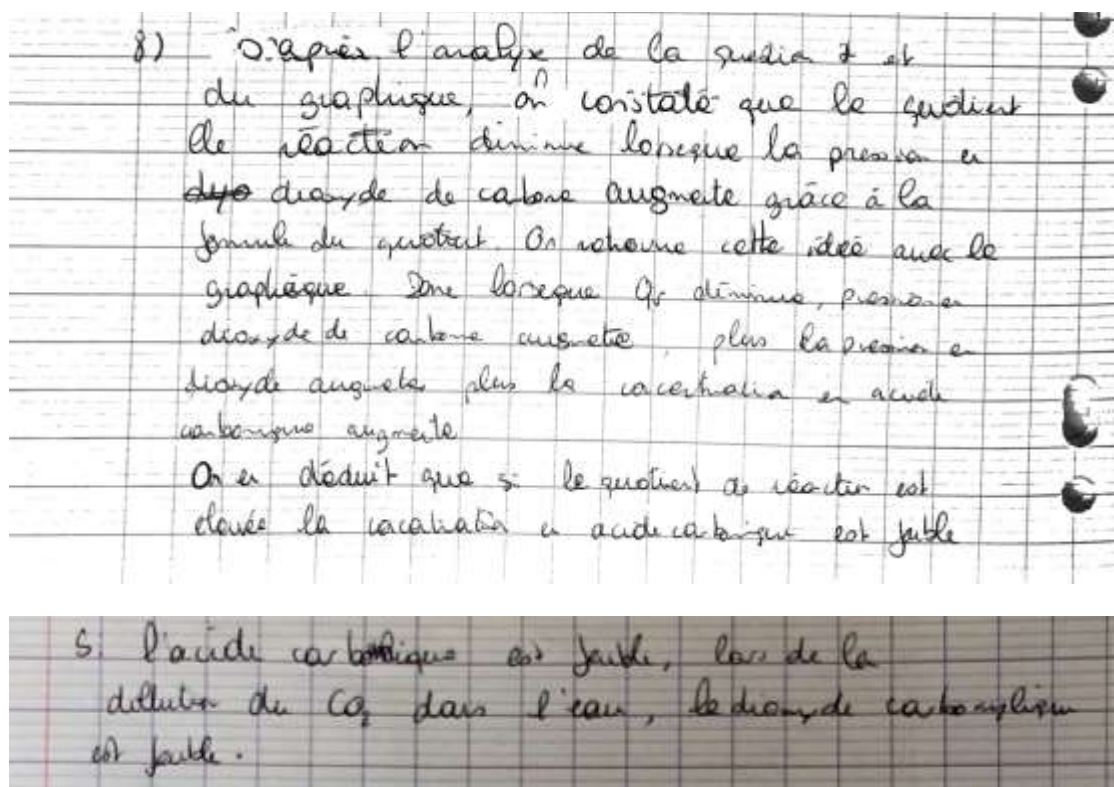
- possèdent un premier niveau de maîtrise dans la démarche de modélisation ;
- ont besoin de travailler la capacité à expliquer des phénomènes en utilisant des lois scientifiques.

Analyse de productions d'élèves

L'analyse des copies d'élèves montre que les questions sur l'approche qualitative et quantitative sont bien traitées dans chacune des deux versions.

En revanche, la conclusion de l'étude a posé des difficultés aux élèves par le fait de devoir rédiger une synthèse. De plus, on observe que dans la deuxième version les élèves sont rarement parvenus à rédiger une explication robuste et en lien avec les notions et contenus appris pendant l'année. Ainsi le critère de comparaison du quotient de réaction à la constante d'équilibre n'est que très rarement évoqué, ce qui conduit l'élève à développer des raisonnements alternatifs erronés.

Copie 1



Copie 2

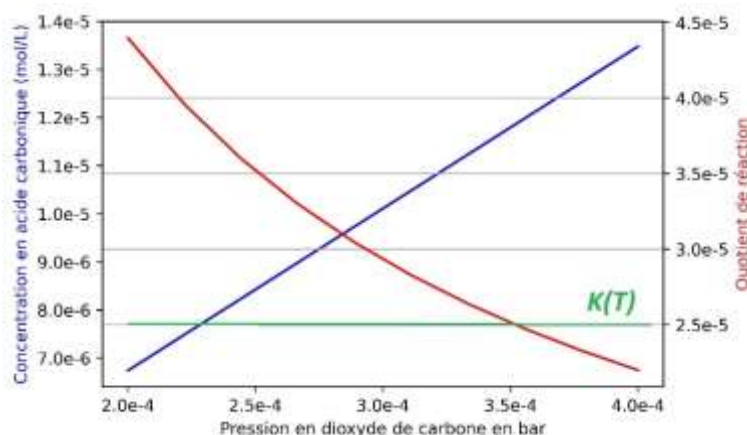
8) D'après l'analyse de la question 7 et du graphique, on observe que si la Q_r diminue, alors, la pression en dioxyde de carbone augmente, ainsi, la concentration en acide carbonique. En effet dans $Q_r = \frac{[Ca^{2+}] \times [B]}{[H_2CO_3] \times C^0}$ on observe que si $[H_2CO_3] \uparrow$ alors $Q_r \downarrow$.

~~De plus on remarque que si Q_r augmente de façon à devenir supérieure à K , alors~~

On remarque que si, dans l'équation $CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3$, $[CO_2] \downarrow$ alors $[H_2CO_3] \downarrow$, ainsi dans l'équation (R) si $[H_2CO_3] \downarrow$, la réaction

s'effectue dans le sens inverse, donc il y a précipitation. Or si $[H_2CO_3] \downarrow$, $Q_r \uparrow$. Ainsi, si $Q_r \uparrow$, l'équation (R) a lieu en sens indirect, donc précipitation.

Les élèves raisonnent sur la croissance ou la diminution de Q_r sans utiliser la relation d'ordre avec $K(T)$. Cette erreur est à la fois classique et tenace, car on l'observe aussi fréquemment pour des élèves de niveau bac +2. Pour y remédier, il est possible de rajouter sur le graphique de la figure 2 de la version 2 une représentation de la constante d'équilibre (voir ci-dessous).



Il semble également que le terme de « modélisation » dans la question 9 de la version 2 ait été un obstacle à la bonne compréhension des élèves. S'il est conservé par le professeur, il convient que ce dernier prenne du temps pour en expliquer le sens et les attentes. La distinction entre le monde des modèles et le monde des objets

est un point de fragilité. Les élèves n'ont pas le réflexe de comparer la valeur obtenue suite à l'utilisation du modèle à la valeur de référence fournie.

Bilan global

Les élèves ont apprécié d'étudier le phénomène de formation des stalactites et des stalagmites au travers d'une activité qu'ils ont jugée intéressante. Si les élèves montrent une aisance sur les compétences, analyser / raisonner et réaliser, on observe des difficultés dans la compétence, valider, et dans la capacité à conclure une étude scientifique par la rédaction d'une synthèse s'appuyant sur l'ensemble des éléments construits à la faveur d'un raisonnement développé sur plusieurs questions. La pleine appropriation de la démarche de modélisation reste par ailleurs un sujet chez les élèves de terminale générale.

Des pistes d'amélioration peuvent être envisagées. La partie, conclusion de l'étude, visant à faire rédiger une synthèse et à comparer la valeur issue de la modélisation à une valeur de référence, peut être modifiée en faisant apparaître quelques questions intermédiaires, afin de guider les élèves. Un QCM permettant de faire un bilan de l'étude et de rassembler l'information peut être réalisé, afin d'aider les élèves à rédiger ensuite la synthèse.

ANNEXES : supports d'activités d'élèves et éléments de corrections

Annexe 1 : Énoncé de l'évaluation (document élève)

Situation contextualisée (commune aux deux versions)

L'aven² d'Orgnac est une grotte située dans le Sud de l'Ardèche découverte en 1935 par le spéléologue français Robert de Joly. Classé « Grand Site de France » il accueille 140 000 visiteurs annuels.

À l'entrée du site, un panneau à disposition des touristes explique la formation de cet aven, et évoque la « balance chimique de l'eau » pour évoquer l'équilibre chimique pouvant s'opérer dans l'eau entre le calcaire, le dioxyde de carbone dissous et les ions calcium Ca^{2+} .



Source : photographie de l'auteur

² Un aven est un gouffre naturel creusé par les eaux d'infiltration dans un terrain calcaire.

L'objectif est d'étudier le phénomène chimique décrit par cette affiche à visée de vulgarisation scientifique, afin de comprendre la formation des stalactites et des stalagmites dans la cavité.

Présentation du phénomène de formation des stalactites et des stalagmites

L'eau de pluie est légèrement acide, car le dioxyde de carbone de l'atmosphère se dissout dans l'eau qui se charge alors en acide carbonique $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq})$. En s'infiltrant à travers le plateau calcaire, l'eau de pluie chargée en acide carbonique dissout le calcaire.

Une fois dans la cavité, la teneur en dioxyde de carbone dans l'air est moins importante qu'à l'extérieur de la grotte. Du dioxyde de carbone est alors dégazé par les gouttes d'eau pendant leur trajet de chute du plafond de la grotte au sol de la grotte, ce qui entraîne une diminution de la concentration en quantité de matière d'acide carbonique dissous dans les gouttes d'eau. Le calcaire précipite.

Selon le débit de l'eau qui s'infiltré et entre dans la grotte par un endroit particulier du plafond, deux situations peuvent se produire :

la précipitation a lieu au niveau du plafond, ce qui fait croître les stalactites,

la précipitation a lieu au niveau du sol ce qui fait croître les stalagmites.

Ces structures croissent à la vitesse moyenne d'un centimètre par siècle.

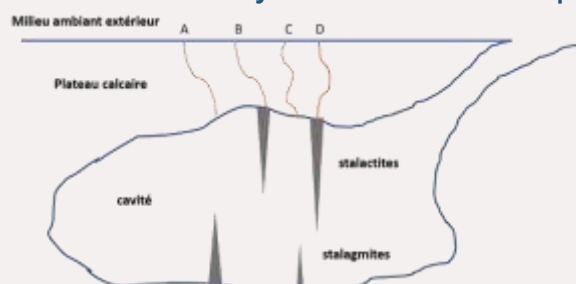


Figure 1 : schématisation de la grotte

Modélisation du système chimique

Au contact de l'eau, le dioxyde de carbone gazeux se dissout pour former de l'acide carbonique $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq})$ dissous dans l'eau.

L'équation de la réaction modélisant la dissolution du calcaire par une eau de pluie chargée en acide carbonique est la suivante :



où $\text{B}^{-}(\text{aq})$ représente les ions hydrogénocarbonate qui constituent la base conjuguée de l'acide carbonique $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq})$

Les tâches à réaliser pendant l'activité s'appuient essentiellement sur l'étude de la réaction (R).

Version 1 : questionnaire avec une majorité de tâches des groupes 1 et 2

Approche qualitative

Tâche du type 1 :

1. Après avoir analysé l'équation de sa réaction de dissolution (R), donner la formule chimique du calcaire.

- Donner la formule des ions hydrogénocarbonate, base conjuguée de l'acide carbonique $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq})$, notés $\text{B}^-(\text{aq})$ dans la réaction modélisant la dissolution du calcaire.

Tâche du type 2 :

- Sur le schéma de la figure 1, identifier une zone où la transformation chimique se fait dans le sens direct de la réaction (R) et une zone où la transformation chimique se fait dans le sens indirect de la réaction (R).
- Classer le débit relatif de l'eau infiltrée par les chemins A à D en justifiant.

Approche quantitative

On donne dans le tableau ci-dessous les résultats de calculs de concentrations en ions calcium à l'équilibre chimique pour diverses pressions extérieures en dioxyde de carbone dans l'air avec lequel la goutte d'eau est au contact.

Pression en CO_2 (g) dans l'air	Concentration en ions Ca^{2+} à l'équilibre
20 Pa	$3,5 \times 10^{-4} \text{ mol.L}^{-1}$
30 Pa	$4,0 \times 10^{-4} \text{ mol.L}^{-1}$
35 Pa (conditions atmosphériques à l'extérieur)	$4,2 \times 10^{-4} \text{ mol.L}^{-1}$
50 Pa	$4,4 \times 10^{-4} \text{ mol.L}^{-1}$

Tâche du type 2 :

- Établir une corrélation entre la pression de dioxyde de carbone dans l'air et la solubilité du calcaire.

On modélise l'eau de pluie chargée en acide carbonique par une goutte d'eau de volume V_0 constant contenant l'espèce $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq})$

La goutte d'eau étant au contact d'une atmosphère contenant $\text{CO}_2(\text{g})$ on admet que l'état final du système est un état d'équilibre chimique où $[\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq})]_{\text{eq}} = 1,18 \times 10^{-5} \text{ mol.L}^{-1}$.

Cette condition est valable si on considère que la dissolution du dioxyde de carbone est instantanée. La constante de cet équilibre vaut $K(T) = 2,5 \times 10^{-5}$.

Tâche du type 3 :

- Donner l'expression du quotient de réaction associé à la réaction (R).
- Après avoir donné la relation entre les quantités de matières d'ions calcium et d'ions hydrogénocarbonate, retrouver la valeur numérique de la concentration en ions Ca^{2+} dans la goutte d'eau au contact du plateau calcaire et à l'équilibre chimique avec l'atmosphère.

Conclusion de l'étude

Tâche du type 2 :

1. Rédiger une synthèse de l'étude menée permettant d'expliquer le processus de formation des stalactites d'une part et des stalagmites d'autre part.

On suppose que l'ensemble des ions calcium dissous dans l'eau précipite dans la grotte à l'extrémité d'une stalactite. Le débit de l'égouttement est de 400 gouttes par heure. Le volume d'une goutte est de 0,05 mL. La masse volumique du calcaire déposé (sous forme de calcite) vaut $2,71 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. La masse molaire du calcaire vaut $100 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$. On considère que la section de la stalactite est d'environ 10 cm^2 .

Tâche du type 3 :

2. Montrer que la modélisation proposée dans cette étude n'est pas concordante avec les observations expérimentales de croissance des stalactites.

Version 2 : questionnement avec une majorité de tâches des groupes 3

Approche qualitative

Tâche du type 1 :

1. Après avoir analysé l'équation de sa réaction de dissolution, donner la formule chimique du calcaire.

Tâche du type 2 :

2. Sur le schéma de la figure 1, identifier une zone où la transformation chimique se fait dans le sens direct de la réaction (R) et une zone où la transformation chimique se fait dans le sens indirect de la réaction (R).
3. Classer le débit relatif de l'eau infiltrée par les chemins A à D en justifiant.

Approche quantitative

Après un contact prolongé de l'eau avec le plateau calcaire, entraînant une dissolution de ce dernier modélisée par la réaction (R), on admettra que la concentration en acide carbonique dissous dans l'eau à l'équilibre vaut $[\text{H}_2\text{CO}_3^*(\text{aq})]_{\text{eq}} = 1,18 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

La constante de la réaction (R) vaut $K(T) = 2,5 \times 10^{-5}$.

Tâche du type 3 :

4. Donner l'expression du quotient de réaction associé à la réaction (R) en fonction des concentrations en quantité de matière en ion calcium, en ion hydrogénocarbonate (noté B^-), en acide carbonique et de la concentration standard notée c .
5. Traduire mathématiquement le fait que le système étudié est à l'équilibre chimique.
6. Après avoir donné la relation entre les quantités de matière d'ions calcium et d'ions hydrogénocarbonate (noté B^-), calculer la valeur numérique de la

concentration à l'équilibre du système (après un contact prolongé avec le plateau calcaire) des ions Ca^{+2} et des ions B^- notées respectivement C_1 et C_2 .

On représente sur la figure 2 :

- la concentration en quantité de matière d'acide carbonique dissous dans l'eau en fonction de la pression extérieure en dioxyde de carbone (courbe bleue, échelle à gauche) ;
- le quotient de la réaction (R) pour un système contenant des ions calcium à la concentration C_1 et des ions hydrogénocarbonate à la concentration C_2 . (les concentrations ont été calculées précédemment) (courbe rouge, échelle à droite).

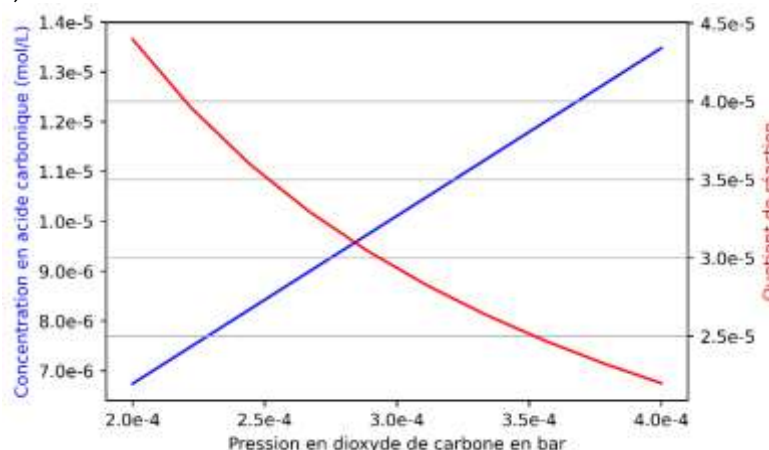


Figure 2 : représentation de la concentration en acide carbonique dissous (en bleu) et du quotient de la réaction (R) (rouge) en fonction de la pression en CO_2

Une fois dans la grotte, la goutte d'eau issue du plateau calcaire rencontre une pression en dioxyde de carbone plus faible que la pression à l'extérieur de la grotte.

Tâche du type 2 :

7. Analyser le graphique de la figure 2 afin de dégager l'effet d'un abaissement de la pression en dioxyde de carbone dans l'atmosphère sur l'acide carbonique dissous dans l'eau.

Conclusion de l'étude

Tâche du type 3 :

8. Rédiger une synthèse de l'étude permettant d'expliquer la formation des stalactites ou des stalagmites. Pour cela,
 - expliquer, avec l'aide de l'analyse de la question 7, la décroissance du quotient de réaction avec la pression de dioxyde de carbone observée sur la figure 2 ;
 - en déduire une explication de la formation du calcaire à l'aide d'un argument fondé sur la comparaison du quotient de réaction à la constante de la réaction (R).

On suppose que l'ensemble des ions calcium dissous dans l'eau précipite dans la grotte à l'extrémité d'une stalactite. Le débit de l'égouttement est de 400 gouttes par heure. Le volume d'une goutte est de 0,05 mL. La masse volumique du calcaire déposé

(sous forme de calcite) vaut $2,71 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. La masse molaire du calcaire vaut $100 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$. On considère que la section de la stalactite est d'environ 10 cm^2 .

9. Montrer que la modélisation proposée dans cette étude n'est pas concordante avec les observations expérimentales de croissance des stalactites et proposer une explication à cette discordance.

Annexe 2 : Éléments de correction de la version 2

Au contact de l'atmosphère, les gouttes d'eau se chargent en acide carbonique pour atteindre une concentration en acide carbonique dissous de $1,18 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Dans la grotte, la pression en CO_2 gazeux diminue. Le quotient de réaction Q_r (courbe rouge) a alors une valeur plus grande que la constante d'équilibre, ce qui entraîne une évolution du système dans le sens indirect de la réaction (R). Le calcaire précipite. Il se forme une stalactite si le débit est faible, car la précipitation intervient avant que la goutte ne quitte le plafond de la cavité. Si le débit est élevé, il se forme une stalagmite, car la précipitation se fait une fois que la goutte a atteint le sol.

La quantité d'ions calcium dissous est obtenue en écrivant à pression atmosphérique la condition d'équilibre :

$$\frac{[\text{Ca}^{2+}]_{\text{eq}} [\text{HCO}_3^-]_{\text{eq}}^2}{[\text{H}_2\text{CO}_3]_{\text{eq}}} = K(T).$$

Comme à l'équilibre, on a $[\text{HCO}_3^-]_{\text{eq}} = 2 [\text{Ca}^{2+}]_{\text{eq}}$.

Il vient $4 [\text{Ca}^{2+}]_{\text{eq}}^3 = K(T) \times [\text{H}_2\text{CO}_3]_{\text{eq}}$.

L'application numérique donne : $[\text{Ca}^{2+}]_{\text{eq}} = 4,2 \cdot 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

En 1 heure s'écoulent 400 gouttes soit un volume d'eau de 20 mL d'eau. En supposant que l'intégralité du calcium dissous dans la goutte précipite sous forme de calcaire, il se forme une quantité de matière de calcaire :

$$n(\text{CaCO}_3) = 4,2 \cdot 10^{-4} \times 20 \cdot 10^{-3} = 8,4 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

Cela correspond à un volume de calcaire :

$$V = \frac{n(\text{CaCO}_3) \times M(\text{CaCO}_3)}{\rho(\text{CaCO}_3)} = \frac{8,4 \times 10^{-6} \times 100}{2,91} = 2,9 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3$$

soit une hauteur pour une stalactite de section 10 cm^2 de $2,9 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3$.

Un siècle correspond à 876 000 heures, ce qui conduirait, dans le cadre de la modélisation réalisée, à une croissance de 25 cm. Cela n'est pas concordant avec l'observation expérimentale, car le modèle utilisé, purement thermodynamique, ignore les effets cinétiques lors de la précipitation. Lors de la chute de la goutte, l'intégralité des ions calcium qu'elle contient ne précipite pas.