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

Construire progressivement une démarche de modélisation

Les documents suivants ont été proposés aux élèves lors des séances décrites dans la ressource «Goutte après goutte : formation des stalactites ou des stalagmites dans l’Aven d’Orgnac », accessible depuis la page éduscol : <https://eduscol.education.fr/225/recherche-et-innovation-en-physique-chimie>.

Les ressources proposées sur cette page ont pour vocation d'explorer et de promouvoir des pratiques innovantes dans l'enseignement de la physique-chimie au collège et au lycée. Les activités qui y sont présentées intègrent régulièrement des résultats de travaux de recherche et ont été testées auprès d’élèves.

Afin de faciliter leur appropriation, chaque ressource inclut un scénario pédagogique détaillé, des extraits de travaux d’élèves analysés ainsi que l’ensemble des documents proposés lors de séances d’enseignement.

Elles ont été produites par le groupe de recherche et d'innovation pour l'enseignement des sciences physiques (Griesp).

Les documents sont au format texte modifiable afin que les professeurs puissent les adapter au contexte de leur établissement : répartition du programme dans le cycle, organisation prévue pour l’année, etc.

Énoncé de l’évaluation (document élève)

Situation contextualisée (commune aux deux versions)

L’aven[[1]](#footnote-1) 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 Ca2+.

Source : photographie de l’auteur

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 H2CO3 (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’infiltre 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.

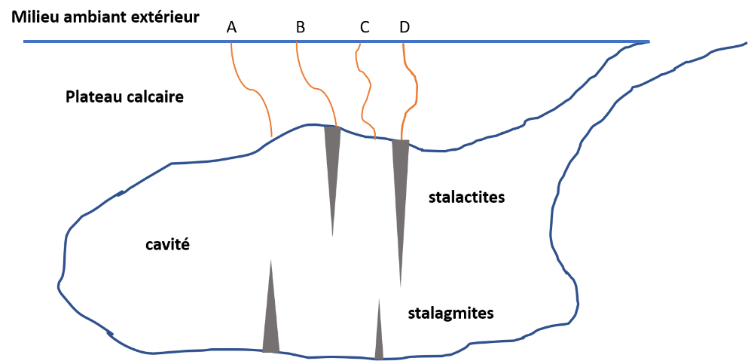


Figure 1 : schématisation de la grotte

Modélisation du système chimique

Au contact de l’eau, le dioxyde de carbone gazeux se dissout pour former de l’acide carbonique H2CO3 (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 :

CaCO3(s) + H2CO3(aq) = Ca2+(aq) + 2B −(aq) réaction (R)

où B −(aq) représente les ions hydrogénocarbonate qui constituent la base conjuguée de l’acide carbonique H2CO3 (aq)

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

Version 1 : questionnement 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.
2. Donner la formule des ions hydrogénocarbonate, base conjuguée de l’acide carbonique H2CO3 (aq), notés B −(aq) dans la réaction modélisant la dissolution du calcaire.

**Tâche du type 2 :**

1. 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).
2. 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 CO2 (g) dans l’air | Concentration en ions Ca2+ à l’équilibre |
| 20 Pa | 3,5 × 10 −4 mol.L −1 |
| 30 Pa | 4,0 × 10 −4 mol.L −1 |
| 35 Pa (conditions atmosphériques à l’extérieur) | 4,2 × 10 −4 mol.L −1 |
| 50 Pa | 4,4 × 10 −4 mol.L −1 |

**Tâche du type 2 :**

1. 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 V0 constant contenant l’espèce H2CO3 (aq)

La goutte d’eau étant au contact d’une atmosphère contenant CO2 (g) on admet que l’état final du système est un état d’équilibre chimique où [H2CO3 (aq)] éq = 1,18 × 10 −5mol.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 × 10 −5.

**Tâche du type 3 :**

1. Donner l’expression du quotient de réaction associé à la réaction (R).
2. 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 Ca2+ 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 g∙ cm −3. La masse molaire du calcaire vaut 100 g∙mol −1. On considère que la section de la stalactite est d’environ 10 cm2.

**Tâche du type 3 :**

1. 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 :**

1. 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).
2. 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 [H2CO −3 (aq)] éq= 1,18 × 10 −5 mol∙L −1.

La constante de la réaction (R) vaut K (T) = 2,5 × 10 −5.

**Tâche du type 3 :**

1. 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*.
2. Traduire mathématiquement le fait que le système étudié est à l’équilibre chimique.
3. 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 équilibre du système (après un contact prolongé avec le plateau calcaire) des ions Ca+2 et des ions B − notées respectivement *C1* et *C2.*

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 *C1* et des ions hydrogénocarbonate à la concentration *C2*. ( les concentrations ont été calculées précédemment) (courbe rouge, échelle à droite).

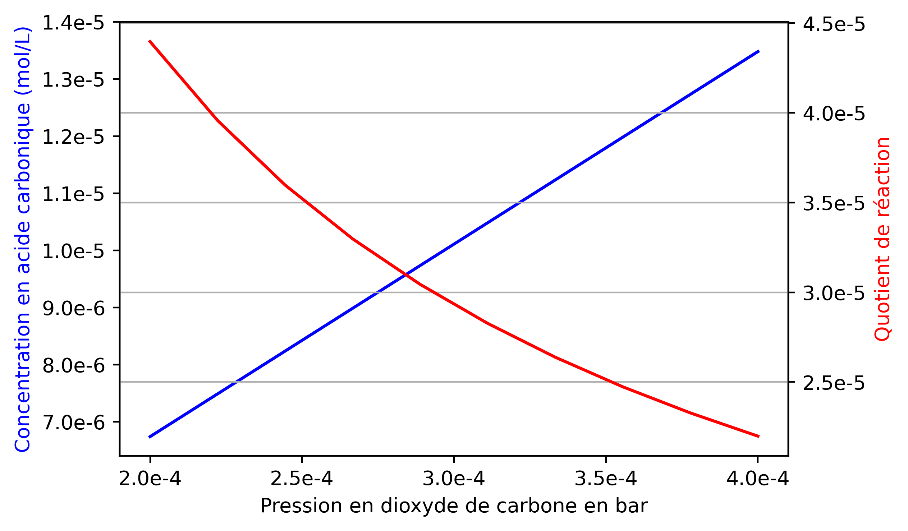


Figure 2 : représentation de la concentration en acide carbonique dissous (en bleu) et du quotient de la réaction (R) (rouge) en fonction de la pression en CO2

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 :**

1. 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 :**

1. 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 g∙ cm −3. La masse molaire du calcaire vaut 100 g∙mol −1. On considère que la section de la stalactite est d’environ 10 cm2.

1. 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.

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 × 10 −5 mol∙L −1. Dans la grotte, la pression en CO2 gazeux diminue. Le quotient de réaction Qr (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 :

.

Comme à l’équilibre, on a [HCO3 −] éq = 2 [Ca2+] éq.

Il vient 4 [Ca2+] éq3 = K (T) × [H2CO3] éq.

L’application numérique donne : [Ca2+] éq = 4,2∙10 −4 mol∙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 (CaCO3) = 4,2∙10 −4 × 20∙10 −3= 8,4 × 10 −6 mol∙L −1.

Cela correspond à un volume de calcaire :

V=  = 2,9∙10-4 cm3

soit une hauteur pour une stalactite de section 10 cm² de 2,9∙10-4 cm3.

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.

1. Un aven est un gouffre naturel creusé par les eaux d’infiltration dans un terrain calcaire. [↑](#footnote-ref-1)