



Simulation Acidification des océans

Tutoriel à disposition des enseignant-e-s

1. Contrôles et affichage

Bref tutoriel du mode séquentiel

Le mode séquentiel simule une à une les réactions induites par la présence dans l'atmosphère du dioxyde de carbone ($\text{CO}_2(\text{g})$, gaz à effet de serre) qui se produisent dans l'air et l'eau.

- Pour **afficher la réaction suivante**, cliquer sur l'**icône Play bleue** .
- Pour **rejouer la réaction précédente**, cliquer sur la **flèche orange** .
- Pour **réinitialiser les réactions**, cliquer sur l'**icône retour jaune** .

Les réactions peuvent être visualisées avec ou sans les équations des réactions chimiques correspondantes. Pour **visualiser** les équations chimiques, activer **Équation des réactions**.

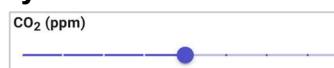
La visualisation peut être activée au cours d'une séquence. L'équation correspondant à l'animation de molécules en cours est mise en évidence.

Six réactions successives qui présentent un aller-retour de chaque réaction d'équilibre [1,2].

Réaction 1	Équilibre 1 dans le sens direct →	Dissolution du $\text{CO}_2(\text{g})$ dans l'eau pour devenir $\text{CO}_2(\text{aq})$.
Réaction 2	Équilibre 2 dans le sens direct →	Formation de l'acide carbonique H_2CO_3 à partir de $\text{CO}_2(\text{aq})$ et de H_2O .
Réaction 3	Équilibre 3 dans le sens direct →	Dissociation de l'acide carbonique H_2CO_3 pour former des ions H^+ et HCO_3^- . Seulement la 1 ^{ère} dissociation de l'acide carbonique est prise en compte dans cette simulation.
Réaction 4	Équilibre 3 dans le sens indirect ←	Formation d'acide carbonique H_2CO_3 à partir des ions H^+ et HCO_3^- .
Réaction 5	Équilibre 2 dans le sens indirect ←	Transformation de l'acide carbonique H_2CO_3 pour former du $\text{CO}_2(\text{aq})$ et H_2O .
Réaction 6	Équilibre 1 dans le sens indirect ←	Transfert du $\text{CO}_2(\text{aq})$ dans l'air, pour redevenir $\text{CO}_2(\text{g})$.

Bref tutoriel du mode continu

L'attention du mode continu est portée sur la découverte de la notion d'équilibre et sa réaction face aux perturbations. Toutes les réactions chimiques qui étaient détaillées dans le mode séquentiel sont alors simulées en même temps. Le mode continu simule la cascade de réactions qui se produisent entre l'atmosphère et l'océan initiées par la présence dans l'atmosphère du dioxyde de carbone ($\text{CO}_2(\text{g})$, gaz à effet de serre).

- Pour lancer l'**animation des réactions**, cliquer sur la **flèche play verte** .
- L'animation est **arrêtée** avec le **bouton stop rouge** . L'arrêt n'est pas instantané, les réactions commencées sont animées jusqu'à l'achèvement du cycle avant de s'arrêter.
- Cliquer sur la **flèche orange**  pour **réinitialiser les réactions et les présélections de valeurs de $\text{CO}_2(\text{g})$** .
- Pour **modifier la quantité de dioxyde de carbone** dans l'atmosphère de la simulation, déplacer le **curseur $\text{CO}_2(\text{ppm})$** :  vers la valeur désirée.
- Les molécules de $\text{CO}_2(\text{g})$ apparaissent et disparaissent directement dans la partie atmosphérique de la simulation, plaçant alors le système en déséquilibre, tant que la simulation n'est pas lancée avec la **flèche play verte** .

Trois présélections de valeurs de $\text{CO}_2(\text{g})$ dans l'atmosphère peuvent être choisies sous le curseur. Elles correspondent aux valeurs de $\text{CO}_2(\text{g})$ relevées en 1900, en 2015 et à la valeur prédictive pour 2050 selon le *scénario pessimiste* du rapport du GIEC. Cliquer sur une des présélections équivaut à déplacer le curseur des ppm de $\text{CO}_2(\text{g})$ sur la valeur correspondante.

Le tableau illustre le décompte dynamique du nombre de molécules présentes dans la simulation. Une fois la simulation lancée, ces valeurs changent, le système tend vers un équilibre et les flèches bleues indiquent le sens de déplacement du système pour l'atteindre.



À gauche, le système est momentanément à l'équilibre. À droite, l'excès de H^+ et de HCO_3^- est en train d'être consommé pour produire du H_2CO_3 .

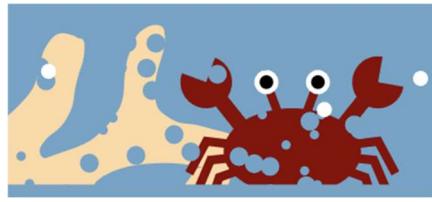


La balance en haut à droite du tableau signale si le système est, dans sa globalité, à l'équilibre ou pas. La balance en jaune, avec les plateaux horizontaux signale que l'équilibre est atteint, à contrario, en rouge, avec les plateaux inclinés, le système est hors équilibre dans sa globalité.

En passant sur la balance avec le pointeur, une petite phrase indique aux élèves si le système est/n'est pas à l'équilibre.

Même après que les valeurs du tableau se sont globalement stabilisées, la balance signale leurs variations ponctuelles, illustrant ainsi l'équilibre comme un phénomène dynamique.

L'interrupteur  en bas à gauche de la simulation permet d'afficher l'échelle de pH, son effet sur la vie marine, et surligne le nombre de H^+ dans le tableau pour illustrer son lien avec la valeur du pH.



À gauche, le crabe et les coraux en bonne santé indiquent un pH propice à la vie marine. À droite, lorsque le pH diminue, les squelettes des organismes se détériorent, ce qui est indiqué par une vie marine "poreuse".

Note : Il peut être pertinent de rappeler aux élèves, qu'on parle d'acidification des océans car le pH s'acidifie, mais dans le scénario d'une grosse augmentation de CO_2 dans l'air il resterait plus élevé que 7, donc par définition basique.

2. À découvrir par les étudiants

Les étudiants (qui n'ont pas tous appris ce qu'est un équilibre chimique ou ne connaissent pas encore la définition d'un acide) peuvent découvrir d'abord le mouvement des modèles moléculaires des espèces chimiques.

En rejouant les six réactions avec l'affichage des équations chimiques, ils découvrent les écritures associées, peuvent s'interroger sur la notion d'équilibre chimique, sur la signification des ions, sur l'identité de l'acide.

3. Modélisation et choix didactiques

Explication des choix didactiques et simplifications de la simulation

- La simulation représente un agrandissement de l'interface air-eau pour distinguer les molécules.
- Nous avons fait le choix d'enlever les molécules de l'air, autres que le CO_2 , pour que les réactions soient plus visuelles.
- La balance indique un équilibre ou un déséquilibre pour le système dans sa globalité. Et ne peut donc pas être rapportée à chaque équilibre individuellement.
- Pour simplifier, la dissociation de HCO_3^- est négligée au vu de la quantité de molécules représentées et de la valeur très faible de la constante d'équilibre.

- Nous avons représenté une **porosité** dans les squelettes des organismes vivants (CaCO_3) alors qu'il s'agit en réalité d'une fragilisation (voir Cadre 1 pour plus d'informations).
- Certaines molécules ne bougent pas dans le mode continu pour alléger le visuel. De plus, nous n'avons pas distingué le mouvement des molécules gazeuses ou aqueuses.
- Les **comptes des molécules et proportions** (valeurs dans le tableau) sont **fictifs** dans le mode continu car elles seraient trop basses si on calcule les véritables quantités avec les constantes d'équilibre.
- Les trois périodes 1900, 2015 et 2050 ont été choisies pour que les valeurs de concentrations atmosphériques de CO_2 puissent être arrondies à la centaine de ppm. La valeur de 300 ppm en 1900 a été tirée du Chap. 2 (Tableau 2.1) du rapport du GIEC (2021) [3]. La valeur de 400 ppm en 2015 a été estimée d'après la courbe de Keeling [4] et la valeur de 500 ppm correspond à la projection du SSP 2-4.5 (Socio-economic pathway intermédiaire représentant une trajectoire moyenne d'émission de gaz à effet de serre) selon le Chap. 4 du rapport du GIEC (2021) [3].

Calibration de la relation entre concentration atmosphérique de CO_2 et pH

Pour déterminer comment le pH s'ajuste lorsque la concentration atmosphérique de CO_2 varie sur une large plage de 200 ppm à 600 ppm, nous avons repris les valeurs moyennes de pH pour quatre époques (avant 1900, 1990-2000, 2005-2014 et 2010-2019) mesurées dans les eaux océaniques [1, 7, 8, 9, 10]. Nous avons ensuite établi une tendance linéaire avec les valeurs de concentration atmosphériques de CO_2 correspondant à ces époques à partir de la courbe de Keeling [4], comme présenté dans la Fig.1.

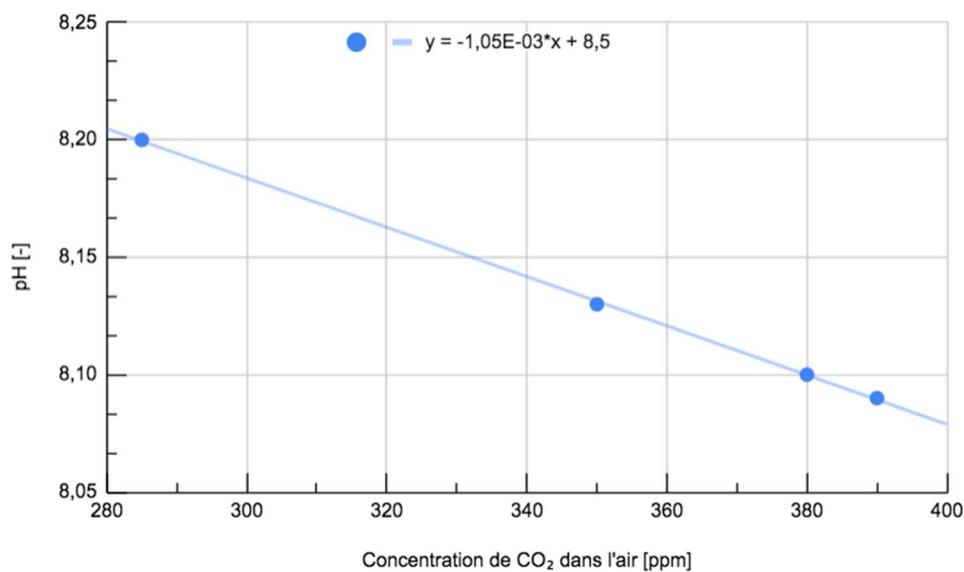


Fig. 1 : Relation linéaire entre les valeurs de pH et la concentration atmosphérique de CO_2

Cette relation linéaire est cohérente avec la régression linéaire de la série temporelle de pH obtenue au nord de Hawaii sur la période plus réduite 1990-2008, période pendant laquelle la concentration atmosphérique de CO_2 peut également être linéarisée [2].

Cadre 1. Effet sur les coraux (et autres organismes qui contiennent du calcaire)

Chimiquement, un acide comme l'acide carbonique (H_2CO_3) réagit avec le calcaire (CaCO_3) dans une réaction dite **réaction de neutralisation** [1,2].

Beaucoup d'organismes marins sont composés en partie de calcaire (par exemple les coraux mais également la coquille/carapace des coquillages ou crustacés) et sont donc affectés par la **diminution du pH des océans**, mais pas tout à fait aussi clairement que le montre la simulation. L'augmentation de la quantité de H^+ **dans l'eau de mer** se fait de manière très lente, donc les réactions qui se produisent vont surtout affecter la flore naissante en l'empêchant de fixer le calcium nécessaire à leur coquille/squelette. En conséquence, les **nouveaux organismes auront une coque plus fragile que celles des animaux du siècle passé** et seront donc moins bien protégés [5].

Le **blanchiment des coraux**, comme représenté dans plusieurs documentaires et photos alarmants, trouve également une cause dans le **réchauffement climatique**, mais de manière plus directe : c'est **l'augmentation de la température de l'eau océanique** qui fait blanchir cet organisme, à cause de l'augmentation de gaz à effet de serre comme le CO_2 dans l'air [6].

Références

- [1] S. Barker & A. Ridgwell (2012), [Ocean acidification](#), Nature Ed. Knowledge
- [2] Feely, R. et al. (2021), *An international observational network for ocean acidification*, Proceedings of Ocean Obs.
- [3] GIEC (2021). [Climate change 2021: the physical science basis](#), Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change
- [4] Scripps Institution of Oceanography, [the Keeling curve](#)
- [5] NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration USA) – [Understanding Ocean & Coastal Acidification : For Teachers](#)
- [6] NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration USA) – [Investigating Coral Bleaching : For Teachers](#)
- [7] European Environ Agency, [Decline in ocean pH measured Aloha station and yearly mean surface seawater pH reported on a global scale](#) (adapted from Dore, J.E., R. Lukas, D.W. Sadler, M.J. Church, and D.M. Karl. 2009. Physical and biogeochemical modulation of ocean acidification in the central North Pacific. Proc Natl Acad Sci USA 106:12235-12240)
- [8] United States Environmental Protection Agency, [Understanding the Science of Ocean and Coastal Acidification](#)
- [9] Encyclopédie Universalis Éducation Avancé, [Acidification des océans](#), Paul Tréguier
- [10] Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, [Réchauffement et acidification des océans](#)