

Mesures dans les processus de dégazage du CO₂ en solution avec une référence particulière aux éruptions limniques provoquées par le CO₂

Comptes Rendus. Géoscience, Tome 352 (2020) no. 2, pp. 115-126.

Zhiwei Cui ; Xinli Lu ; Jialing Zhu ; Wei Zhang

(traduction de DeepL post-éditée par N. Bacaër, suggestions d'amélioration : nicolas.bacaer@ird.fr)



Résumé

Les éruptions limniques provoquées par le CO₂ sont des phénomènes mortels qui se produisent dans les lacs dont les solutions aqueuses de CO₂ deviennent sursaturées. L'exsolution de CO₂ massif dissous dans l'eau peut se produire en très peu de temps, pouvant conduire à une catastrophe naturelle comme celle du lac Nyos (Cameroun, Afrique) en 1986. Plus de 1700 personnes sont mortes. Ces dernières années, avec l'utilisation de la technologie de séquestration du CO₂ dans les saumures des réservoirs géologiques, il existe des possibilités de fuite de saumure de CO₂. La saumure peut rester dans l'eau de surface proche, ce qui pourrait entraîner une éruption. Dans cette étude expérimentale, des mesures ont été effectuées pour étudier les processus de dégazage des solutions de CO₂ dans différentes conditions de dépressurisation. Sur la base des données expérimentales et en utilisant l'ImagePro Plus® pour traiter les images enregistrées, deux corrélations ont été obtenues : (1) la relation entre la sursaturation (ΔP) nécessaire au dégazage et la pression initiale ; (2) la relation entre le délai (Δt) correspondant à la formation de bulles et la pression initiale. Les variations des quantités clés (fraction de vide, nombre de bulles et diamètre moyen des bulles) dans le temps ont été analysées. En outre, les fractions de vide mesurées de deux manières différentes de dépressurisation ont été comparées. Les données expérimentales et les corrélations obtenues dans cette étude sont utiles pour établir des modèles de dynamique des fluides transitoires pour la simulation d'éruptions dues au CO₂.

1. Introduction

L'étude expérimentale décrite ici est la plus grande simulation à l'échelle du laboratoire, à ce jour, des processus de dégazage qui se produisent en raison de la dissolution du CO₂ dans l'eau, comme cela s'est produit de manière catastrophique au lac Nyos au Cameroun (Afrique) en 1984 et 1986. Bien que peut-être rares, ces éruptions limniques sont mortelles. Nos travaux fournissent les données de laboratoire nécessaires aux simulations de ces événements. Plus précisément, nous examinons les conditions de sursaturation du CO₂ requises pour le dégazage, et les délais correspondant à la nucléation et à la croissance des bulles.

Une éruption limnique provoquée par le CO₂ est une éruption explosive qui se produit dans de grands volumes d'eau stagnante avec une solution de CO₂. Habituellement, ces solutions restent au fond d'un lac, mais en 1986, une quantité massive de CO₂ a été libérée du lac Nyos en très peu de temps. Cette catastrophe a causé la mort de plus de 1700 personnes et le gaz CO₂ libéré s'est écoulé en bas de la colline vers le village situé à environ 26 km du lac [Kling 1987]. Deux ans plus tôt, en 1984, une catastrophe similaire s'était produite au lac Monoun (Cameroun), causant la mort d'environ 40 personnes [Sigurdsson et al. 1987]. De nombreux chercheurs s'accordent à dire que l'exsolution rapide du CO₂ des lacs est la principale raison des éruptions à l'origine des catastrophes [Kerr et al. 1987 ; Kling et al. 1987 ; Zhang et al. 1996]. L'hypothèse a été émise que le CO₂ s'est échappé dans le lac par les fissures des roches environnantes et s'est ensuite dissous dans l'eau [Schmid et al. 2004]. Après une longue période de temps, la concentration de CO₂ dans l'eau a atteint un niveau relativement élevé. Une éruption peut avoir été déclenchée par des facteurs déstabilisants tels qu'un glissement de terrain ou de fortes pluies [Tassi et Rouwet 2014], provoquant un déplacement de la solution de CO₂ vers le haut et sa sursaturation en raison de la diminution de sa pression hydrostatique. Dans ces deux situations, d'énormes quantités de gaz CO₂ avec des gouttelettes d'eau entraînées ont fait éruption dans le lac et ont provoqué des catastrophes mortelles.

Le risque de fuite de CO₂ doit être examiné avec soin en raison du développement, ces dernières années, de la technologie du CSC (captage et stockage du dioxyde de carbone), en particulier de la technologie de séquestration du CO₂ à l'aide de réservoirs géologiques [Benson et al. 2002 ; Butt et al. 2012 ; Kim et al. 2018 ; Proust et al. 2016]. La technologie CSC signifie qu'une énorme quantité de CO₂ serait stockée dans des formations géologiques dans les champs de pétrole et de gaz. Une fois que des fuites de CO₂ se produisent dans ces réservoirs, il existe des possibilités de fuite de saumure de CO₂ par des failles. La saumure peut migrer et éventuellement atteindre les eaux proches de la surface, ce qui pourrait entraîner une éruption [Jung et al. 2015 ; Lewicki et al. 2007 ; Shipton et al. 2005]. Des études relatives aux éruptions limniques ont également été menées récemment.

Hirslund et Morkel [2020] ont étudié le lac Kivu, l'un des Grands Lacs africains. Ils ont analysé les paramètres liés à la sécurité pour une gestion durable et à long terme de l'extraction du gaz afin d'éviter que le lac n'entre en éruption à l'avenir. Sánchez-España et al [2020] ont étudié une application de dégazage artificiel pour un cas d'accumulation de CO₂ au fond d'un lac à ciel ouvert provenant d'une mine en Espagne. Afin de prévenir une éruption limnique, plusieurs systèmes de dégazage ont été analysés et utilisés. Il a été constaté que les systèmes conçus pouvaient extraire avec succès la majeure partie du CO₂ au fond du lac de manière contrôlée.

Les études sur la composition des eaux lacustres ont été menées pour la première fois après les éruptions lacustres catastrophiques au Cameroun. Kling et al (1989) avaient mesuré la quantité physique et la composition chimique du lac Nyos. Les résultats ont montré que la concentration de CO₂ au fond du lac continue d'augmenter après l'éruption alors que la distribution de la température reste invariable. Giggenbach et al (1990) ont analysé la composante gazeuse dissoute dans le lac et ont proposé que plus de 24 tonnes de CO₂ ont été rejetées d'une profondeur supérieure à 100 m pendant l'éruption. Evans et ses collègues (1993) ont conclu que le CO₂ dissous dans le lac provient d'une fissure au fond du lac et que la concentration de CO₂ sous la profondeur de 150 m augmente à une vitesse de $2,6 \times 10^8$ mol par an.

Des études sur l'utilisation de tuyaux de dégazage pour réduire la concentration de CO₂ au fond du lac ont également été réalisées. Freeth et al (1994) ont proposé plusieurs plans sur la façon de réaliser le processus de dégazage dans des conditions contrôlées. L'un des moyens consistait à installer un ou plusieurs tuyaux verticaux qui relient le fond et la surface du lac. Une pompe était utilisée pour faire remonter l'eau du tuyau du fond à la surface jusqu'à ce que le processus de dégazage devienne stable et spontané. Ce système de dégazage a effectivement réduit la concentration de CO₂ au fond du lac. En 1995, des ingénieurs français et suisses ont installé un tuyau vertical (200 m de long et 0,14 m de diamètre) dans le lac Nyos. Un mélange de gaz et d'eau s'est échappé de la sortie du tuyau et a atteint une hauteur de 21 m [Halbwachs et al. 2004]. Kling et al (2005) ont constaté que l'installation des tuyaux de dégazage a réduit la teneur en CO₂ au fond du lac de 12 à 14 % après une longue période de fonctionnement. Deux tuyaux de dégazage supplémentaires d'un diamètre de 0,26 m ont été installés en 2011, ce qui a permis d'augmenter le taux d'élimination des gaz jusqu'à 1,2 Gmol par an [Kusakabe et al. 2017].

Des études sur la théorie de l'éruption ont été menées par plusieurs chercheurs. Zhang et al. ont analysé le mécanisme de l'éruption du lac provoquée par le CO₂ et ont établi un modèle unidimensionnel en régime permanent pour calculer la vitesse maximale et la hauteur maximale que le mélange gaz-eau pourrait atteindre pendant l'éruption. Zhang et ses collègues (1997) ont étudié expérimentalement les processus dynamiques des éruptions provoquées par le CO₂ en décompressant soudainement la pression dans un système de polymère CO₂-H₂O à petite échelle. Zhang et Kling [2006] ont également étudié les éruptions océaniques et les éruptions lacustres possibles, en utilisant un modèle unidimensionnel en régime permanent basé sur une analogie avec les mécanismes des éruptions volcaniques.

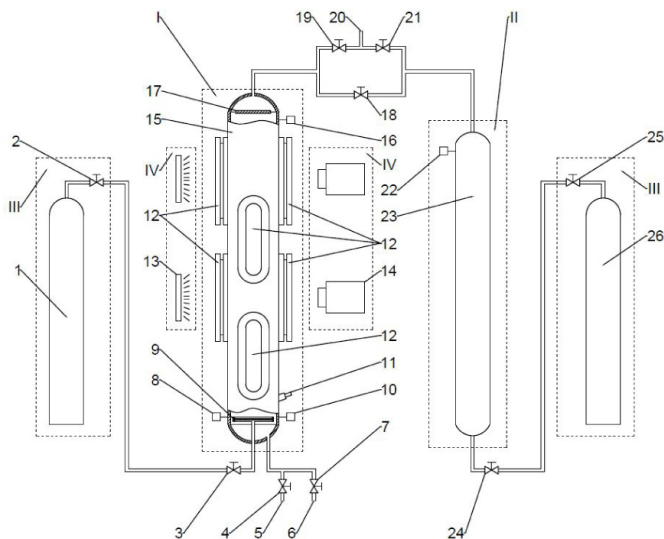
Bien que le modèle unidimensionnel en régime permanent puisse prédire la vitesse et la hauteur maximales d'une éruption, il ne peut révéler aucun processus "transitoire" d'éruption. Par conséquent, un modèle 3D à grande échelle est nécessaire pour étudier l'ensemble du processus, depuis le tout début de la formation des bulles, jusqu'à l'écoulement biphasique ascendant vigoureux, en passant par la fin des éruptions dynamiques. Pour ce faire, une étude expérimentale détaillée est nécessaire afin d'obtenir des corrélations entre les variables pour établir le modèle dynamique.

Dans le cadre de cette étude, un appareil expérimental, d'une échelle beaucoup plus grande que celle de l'étude précédente de Zhang et al (1997), a été conçu, installé et utilisé pour mesurer les paramètres clés des processus de dégazage dans différentes conditions de dépressurisation. Le diamètre du récipient de solution de CO₂ est 100 fois plus grand que le diamètre moyen des bulles et réduit donc considérablement l'effet de paroi de la cuve sur le fluide. L'objectif de cette étude est d'obtenir expérimentalement les corrélations suivantes, utiles pour établir un modèle de simulation numérique transitoire : (1) la corrélation de la sursaturation de la solution de CO₂ (ΔP) nécessaire au dégazage ; (2) la corrélation du délai (Δt) correspondant à la formation de bulles. De plus, les variations des quantités clés (fraction de vide, nombre de bulles et diamètre moyen des bulles) ont été analysées. Les fractions de vide mesurées de différentes manières de dépressurisation sont également étudiées et comparées.

2. Méthodes

2.1. Conception du système expérimental

Le système expérimental est conçu pour : (1) produire une solution saturée de CO₂ dans le récipient contenant la solution de CO₂ ; (2) simuler le processus de dégazage en diminuant la pression dans le récipient contenant la solution ; (3) recueillir des données de pression et de température pendant le processus de dégazage, et (4) utiliser une caméra à grande vitesse pour enregistrer les images pendant l'expérience. Le système expérimental se compose de quatre sous-systèmes illustrés dans la figure 1(a) : Système de conteneur de solution de CO₂ (I), système de cuve sous pression (II), bouteille de gaz (III) et système d'enregistrement d'images (IV).



(a) Schematic diagram



(b) Photo of the system

Figure 1. Système expérimental. I - Système de conteneurs de solution de CO_2 ; II - Système de récipients sous pression ; III - Bouteille de gaz ; IV - Système d'enregistrement d'images ; 1 - Bouteille de CO_2 ; 2, 3, 24, 25 - Vannes d'entrée de gaz ; 4 - Vanne d'entrée d'eau ; 5 - Entrée d'eau ; 6 - Sortie d'eau ; 7 - Vanne de sortie d'eau ; 8 - Capteur de température ; 9 - Diffuseur de gaz ; 10, 16, 22 - Capteurs de pression ; 11 - Capteur de pH ; 12 - Fenêtres d'observation ; 13 - Source d'éclairage de la plaque ; 14 - Caméra haute vitesse ; 15 - Conteneur de solution de CO_2 ; 17 - Ecran liquide ; 18 - Vanne de jonction ; 19, 21 - Vannes de sortie de gaz ; 20 - Sortie de gaz ; 23 - Réservoir sous pression ; 26 - Cylindre de N_2 .

Il y a 4 paires de fenêtres d'observation à différentes hauteurs autour du conteneur de solution de CO_2 , et chaque paire de fenêtres est placée face à face. Une source de lumière sur plaque est placée derrière une fenêtre et une caméra à grande vitesse est placée derrière la fenêtre opposée. Les capteurs de pression, les capteurs de température et le capteur de pH sont montés au fond de la solution de CO_2 . Des capteurs de pression sont également montés en haut du conteneur de la solution de CO_2 ainsi qu'en haut de la cuve sous pression pour mesurer les pressions du gaz. La bouteille de CO_2 est connectée au fond du conteneur de solution de CO_2 ; le haut du conteneur de solution de CO_2 est connecté à la cuve sous pression. La bouteille de N_2 est raccordée au fond du récipient sous pression.

Les fonctions des différentes parties de l'appareil expérimental sont les suivantes : Le gaz CO_2 s'écoule de la bouteille de CO_2 (1) dans le récipient de solution de CO_2 (15) et se dissout dans l'eau après avoir passé le diffuseur de gaz (9). La vanne d'entrée d'eau (4) et la vanne de sortie d'eau (7) sont utilisées pour contrôler respectivement le débit d'entrée et de sortie d'eau. Le capteur de température (8) est utilisé pour mesurer la température de la solution. Deux capteurs de pression (10 et 16) sont utilisés pour mesurer les pressions respectivement du bas et du haut du réservoir de solution de CO_2 (15). Afin de mesurer le pH de la solution dans différentes conditions expérimentales, un capteur de pH (11) est également installé. Les 8 fenêtres d'observation (12) autour du conteneur transmettent la lumière et enregistrent l'image. La source lumineuse de la plaque (13) est utilisée pour éclairer les

bords des bulles afin que la caméra à haute vitesse (14) puisse enregistrer les images plus clairement. L'écran liquide (17) est conçu pour empêcher les gouttelettes d'eau transportées par le gaz à grande vitesse de s'engouffrer dans la sortie du gaz. Le gaz CO₂ qui sort de la solution s'écoule vers la sortie de gaz (20) après être passé par la vanne de sortie de gaz (19). Le gaz contenu dans le récipient sous pression (23) s'écoule vers la sortie de gaz (20) en passant par la vanne de sortie de gaz (21). La vanne de jonction (18) relie le récipient de solution de CO₂ et le récipient sous pression. Le gaz N₂ s'écoule de la bouteille de N₂ (26) vers le récipient sous pression (23) par les vannes d'entrée de gaz (24 et 25). Le capteur de pression (22) est utilisé pour mesurer la pression dans le récipient sous pression (23). La bouteille de N₂ (26) était principalement utilisée pour accélérer la vidange de la solution de CO₂ dans le récipient (15) et pour sécher son intérieur après chaque mesure, ce qui était réalisé en ouvrant les vannes (18, 24 et 25) pour relier le récipient de solution de CO₂ (15) et la bouteille de N₂ (26) et donc pour augmenter la pression à l'intérieur du récipient de solution de CO₂ (15).

Dans le système expérimental, figure 1(b), le récipient de solution de CO₂ a une hauteur de 2000 mm et un diamètre extérieur de 325 mm. La hauteur réelle du niveau de liquide dans le récipient de solution de CO₂ n'est que de 1560 mm, de sorte qu'il y a suffisamment d'espace au-dessus du niveau du liquide pour empêcher la solution de déborder pendant les processus de dégazage. Le volume du liquide dans le conteneur de solution de CO₂ est d'environ 0,11872 m³ et le volume du gaz dans la cuve sous pression est d'environ 0,05376 m³. Les capteurs de pression ont une plage de mesure de 0 à 4 MPa avec une précision de 0,5%. Dans cette expérience, les processus de dégazage ont été mesurés pour des pressions allant de 0,1 MPa à 2,0 MPa (toutes les pressions mentionnées dans cette étude sont des pressions manométriques), correspondant à une profondeur d'eau allant de 10 m à 200 m. L'appareil expérimental est entouré de plaques de polycarbonate fixées sur un cadre en acier pour des raisons de sécurité.

2.2. Procédure expérimentale

La première étape a consisté à fabriquer une solution saturée en CO₂. De l'eau pure a d'abord été injectée dans le récipient de la solution de CO₂. Ensuite, la vanne 3 a été ouverte pour laisser le CO₂ de la bouteille de CO₂ s'écouler et se dissoudre dans l'eau du conteneur sous une certaine pression. Selon Zhang et al. 1997, plus de 99% du CO₂ dissous dans l'eau était du CO₂ moléculaire, et le reste a réagi avec l'eau et est devenu du H₂CO₃. Seule une petite partie de l'H₂CO₃ a généré du CO₃²⁻, du HCO₃⁻ et du H⁺ par ionisation primaire et secondaire. Comme l'ionisation de l'H₂CO₃ modifie le pH de la solution, le degré de saturation peut être déterminé à partir de la valeur du pH. La surveillance des lectures sur le capteur de pH permet de déterminer si la solution est saturée en CO₂. Pour que la solution soit saturée en CO₂, on a fait des bulles de CO₂ dans l'eau jusqu'à ce que les lectures du capteur de pH cessent de changer. La température ambiante était de 20 °C pendant les expériences. Seule l'eau du robinet a été utilisée dans cette expérience. L'effet des particules sur la nucléation des bulles n'a pas été étudié dans le cadre de cette étude.

Afin d'observer les différents phénomènes de dégazage et d'obtenir les corrélations souhaitées, les types de dégazage suivants ont été adoptés :

- A. Dépressurisation avec une vanne complètement ouverte ;
- B. Dépressurisation avec une vanne semi-ouverte ;
- C. ΔP - mesure pendant le dégazage ;
- D. Δt - mesure pendant le dégazage.

Le processus de dégazage A était le plus rapide qui pouvait être réalisé, et le processus de dégazage B a été utilisé pour la comparaison avec le processus A. Le processus C a été appliqué pour mesurer la sursaturation de la solution de CO₂ (ΔP) nécessaire pour le dégazage. Le procédé de dégazage D a été utilisé pour mesurer le délai (Δt) correspondant à la formation de bulles. La figure 2 montre le changement de pression au fil du temps dans les quatre procédés de dégazage, avec une pression initiale de 1,0 MPa. Les procédures expérimentales détaillées des quatre processus de dégazage se trouvent dans l'annexe A.

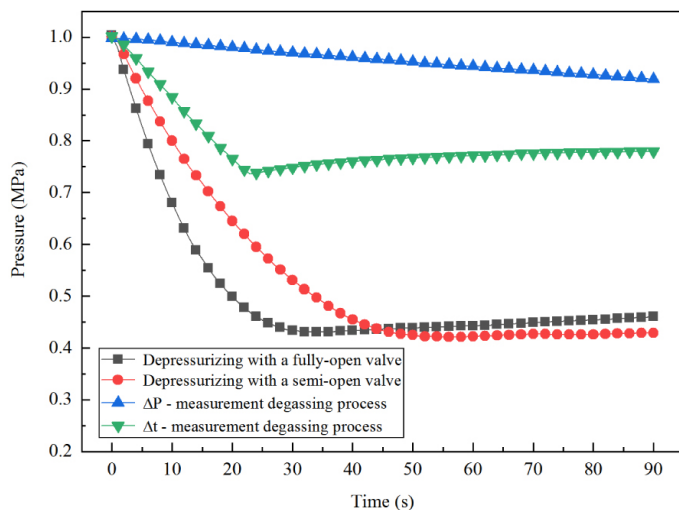


Figure 2. La pression varie dans le temps en fonction des différents processus de dégazage. (Pression initiale = 1,0 MPa.)

3. Résultats et discussions

Sur les quatre couples de fenêtres autour du conteneur de solution de CO_2 , le troisième couple en partant du haut a été choisi parce que les fenêtres étaient situées près de la moitié du niveau de l'eau. Les images que nous avons traitées se trouvent au centre de la fenêtre, qui mesure 60 mm de large et 100 mm de haut. ImagePro Plus® a été utilisé pour traiter les images.

Dans la série d'images de dégazage enregistrées sur la figure 3, la pression initiale était de 0,5 MPa, et le processus de dégazage a été déclenché par l'ouverture complète de la valve. Les images ont été enregistrées pendant 70 s après l'ouverture de la valve. La nucléation des bulles se produit peu après l'ouverture de la valve (figures 3(a), et (b)). Ensuite, le nombre de bulles commence à augmenter avec la croissance du diamètre des bulles (figure 3(c)). La distance entre les bulles reste faible à ce stade. Le diamètre des bulles continue à augmenter et la distance entre les bulles commence à augmenter légèrement (figure 3(d)). Ensuite, la vitesse de montée des bulles atteint une valeur maximale et le processus de dégazage devient violent (figures 3(e), et (f)). Les distances entre les bulles deviennent plus petites alors que le diamètre des bulles continue à augmenter (figure 3(g)). Enfin, le nombre de bulles diminue (figure 3(h)) ; de nombreuses bulles minuscules apparaissent et les diamètres des bulles commencent à diminuer.

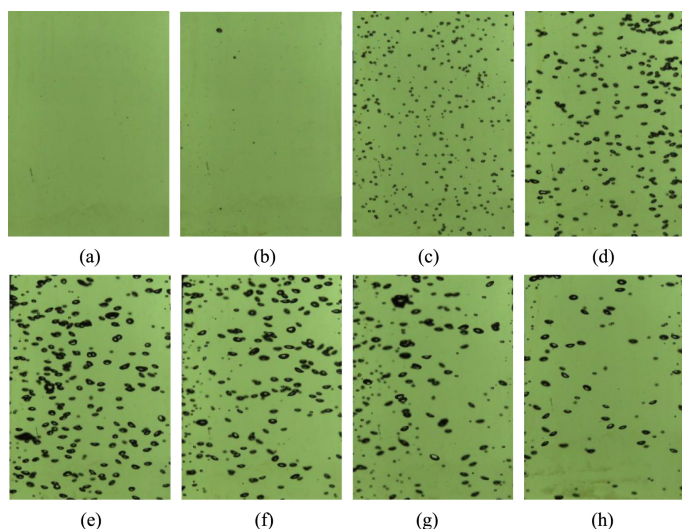


Figure 3. Images des processus de dégazage. (Pression initiale : 0,5 MPa ; dépressurisation avec une vanne complètement ouverte ; durée d'enregistrement : 70 s après l'ouverture de la vanne ; intervalle de temps entre les images : 10 s.) (a) temps 0 s ; (b) temps 10 s ; (c) temps 20 s ; (d) temps 30 s ; (e) temps 40 s ; (f) temps 50 s ; (g) temps 60 s ; (h) temps 70 s.

Nous avons constaté que, bien que le taux de dépressurisation ait été élevé au début (figure 4), la fraction de vide est restée presque nulle pendant un certain temps au début (c'est-à-dire qu'aucune bulle n'est apparue immédiatement). Cela implique qu'il existe une sursaturation de la solution nécessaire au dégazage, et qu'il peut y avoir un délai pour la formation des bulles. Cette observation a motivé les enquêtes rapportées ci-dessous.

3.1. Mesure de la sursaturation de la solution de CO_2 (ΔP) requise pour le dégazage

Lorsque nous dépressurisons la solution de CO_2 , la pression de saturation initiale est supérieure à la pression à laquelle la solution de CO_2 finit par se dégazer, ce qui indique qu'il existe une différence de pression, ΔP , nécessaire au dégazage. Toute chute de pression inférieure à la ΔP n'entraînera pas de dégazage. Afin de minimiser l'influence du processus, ΔP a été mesuré

dans un processus de chute de pression très lent, appelé processus de dégazage par mesure ΔP , en ajustant finement l'ouverture de la vanne de sortie du gaz.

Comme le montre la figure 5, avec l'augmentation de la pression initiale de 0,1 MPa à 1,0 MPa, la sursaturation nécessaire au dégazage augmente de façon monotone de 0,025 MPa à 0,27 MPa, c'est-à-dire que plus la pression initiale est élevée, plus le degré de sursaturation est important. Cependant, lorsque la pression initiale est supérieure à 1,5 MPa, la sursaturation approche une valeur constante d'environ 0,35 MPa.

La corrélation entre la pression initiale et la chute de pression à la saturation (courbe d'ajustement de la figure 5) est

$$\Delta P = 0.36564 - \frac{0.33168}{1 + (P_0/0.73136)^{3.96091}} \quad (1)$$

où ΔP et P_0 sont en MPa. Le R-carré ajusté est de 0,9813.

Cette corrélation est basée sur les données expérimentales dans la plage de pression initiale : 0,1 MPa-2,0 MPa. Le logiciel, la catégorie d'ajustement et la fonction d'ajustement utilisés sont respectivement Origin®, Growth/Sigmoidal et Logistic/Slogistic1. Pour plus d'informations sur les erreurs d'ajustement, voir l'annexe B, tableau 1.

3.2. Mesure du délai (Δt) correspondant à la formation de bulles

Nous avons également observé que les bulles ne sortent de la solution qu'après un certain délai (Δt), une fois que la chute de pression atteint la valeur requise, ΔP . Ce délai est défini comme l'intervalle de temps entre le moment où la chute de pression est égale à la valeur de ΔP et le moment où les bulles apparaissent dans la solution. La mesure de la temporisation (Δt) est basée sur le résultat de la mesure de ΔP . Une fois que la chute de pression est égale à la valeur correspondante de ΔP , la vanne est immédiatement fermée et le temps jusqu'à la première apparition de bulles dans la solution est mesuré.

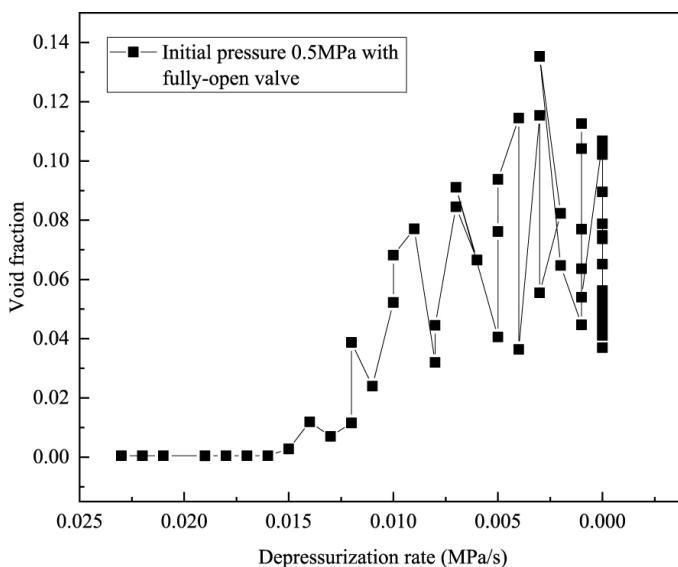


Figure 4. Changement de la fraction de vide par rapport au taux de dépressurisation. (Pression initiale : 0,5 MPa ; dépressurisation avec une vanne complètement ouverte).

La figure 6 montre le délai (Δt) par rapport aux différentes pressions initiales, ainsi que la courbe d'ajustement correspondante. Comme on peut le voir, le délai est plus long lorsque la pression initiale est faible. Il atteint 20 s lorsque la pression initiale est de 0,1 MPa. Avec l'augmentation de la pression initiale, le délai devient plus court et finit par approcher 10 s environ lorsque la pression initiale est supérieure à 1,0 MPa.

La relation entre le délai Δt (en s) et la pression initiale P_0 (en MPa) est la suivante :

$$\Delta t = 9.33055 + 15.14538 * 0.01755^{P_0} \quad (2)$$

Cette corrélation est générée sur la base des données expérimentales dans les mêmes conditions que celles de la mesure ΔP , avec une plage de pression initiale = 0,1 MPa-2,0 MPa et $T = 20$ °C. Le R-carré ajusté est de 0,5760. De plus amples informations sur les erreurs d'ajustement sont présentées dans le tableau 2 de l'annexe B. Le logiciel, la catégorie d'ajustement et la fonction d'ajustement utilisés sont respectivement Origin®, Exponentiel et Asymptotique1.

3.3. Variations de la fraction de vide, du nombre et du diamètre moyen des bulles

En utilisant ImagePro Plus® pour traiter les images des processus de dégazage, nous avons obtenu la fraction de vide, le nombre de bulles et le diamètre moyen des bulles. La figure 7 montre les variations de ces variables dans le temps avec différentes pressions initiales dans des conditions de dégazage à vanne complètement ouverte.

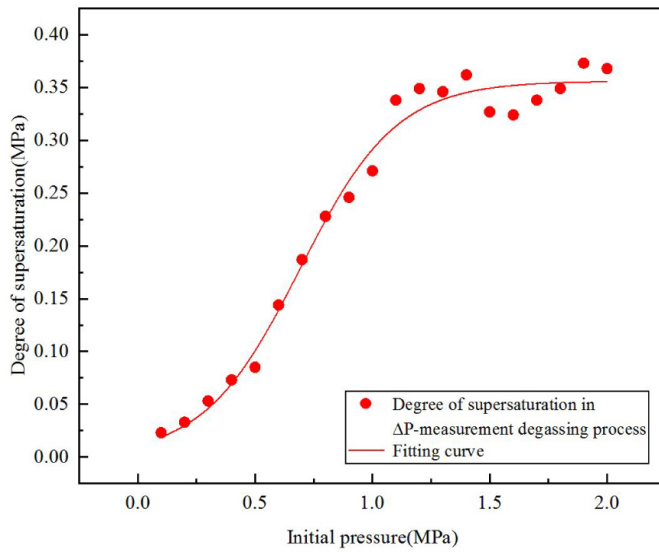


Figure 5. Supersaturation (ΔP) par rapport aux pressions initiales, ainsi que la courbe d'ajustement correspondante.

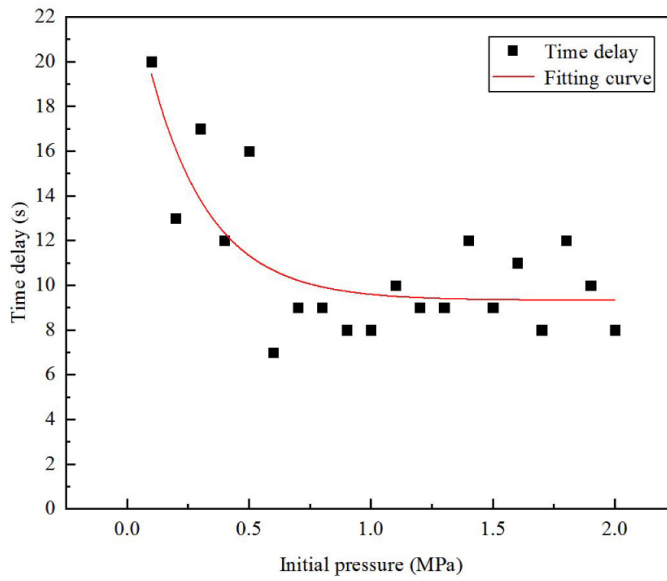
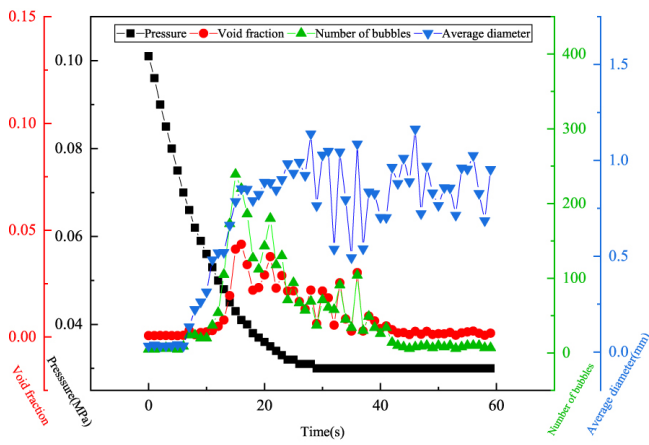
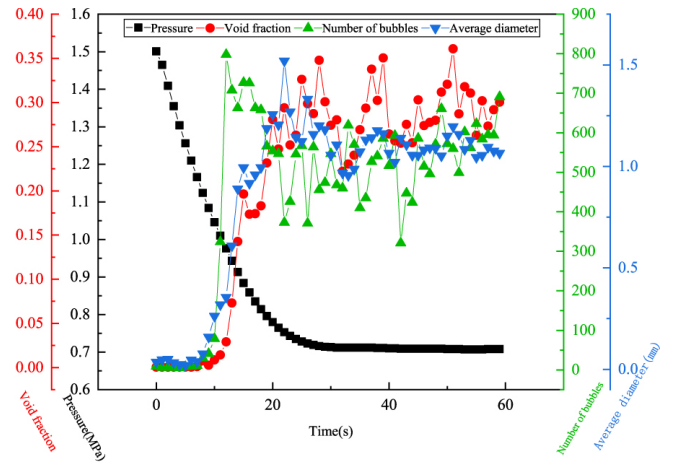


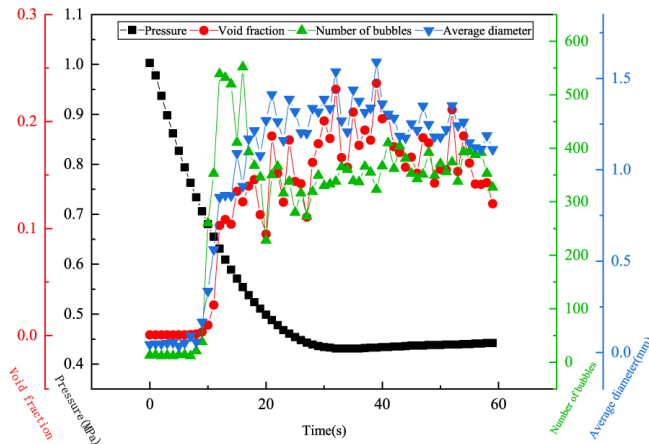
Figure 6. Time delay data with respect to the initial pressures, along with the fitting curve.



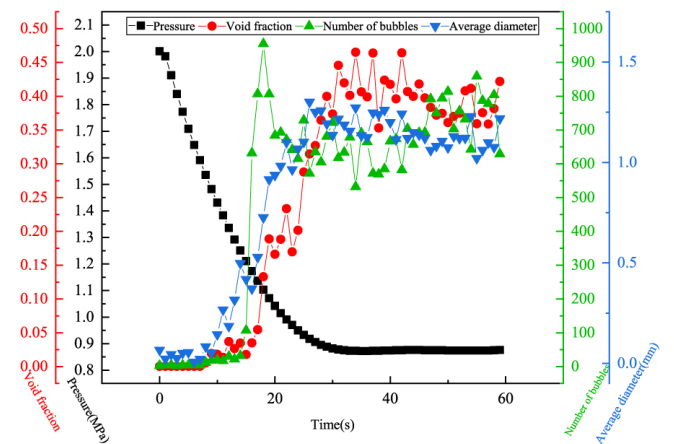
(a) Initial pressure = 0.1MPa



(c) Initial pressure = 1.5MPa



(b) Initial pressure = 1.0MPa



(d) Initial pressure = 2.0MPa

Figure 7. Variations de la pression, de la fraction de vide, du nombre de bulles et du diamètre moyen des bulles au fil du temps, dans le cadre d'un processus de dégazage à valve entièrement ouverte.

La fraction de vide augmente dans les 10 à 15 premières secondes après le début du dégazage (figures 7(a) à 7(d)). La valeur maximale de la fraction de vide augmente avec la pression initiale, et la région de la valeur maximale de la fraction de vide devient plus plate, et couvre une période plus longue.

La forte augmentation du nombre de bulles apparaît plus tôt que celle de la fraction de vide. Plus la pression initiale est élevée, plus le nombre de bulles est important. Lorsque la pression initiale est faible (0,1 MPa), comme le montre la figure 7(a), le nombre de bulles diminue de façon presque monotone après avoir atteint la valeur de crête. Mais lorsque la pression initiale est supérieure à 1,0 MPa, le nombre de bulles monte et descend plusieurs fois après sa valeur maximale. La dispersion des variables indiquées dans les figures 7(b), (c), (d) est principalement due à un grand changement (avec le temps) du volume des bulles mesuré à travers une petite fenêtre d'observation de l'appareil (c'est-à-dire mesuré à travers un petit corps à deux phases). Dans une fenêtre d'observation relativement petite, de nombreuses bulles sont apparues en un seul mouvement, mais elles ont disparu très rapidement par la suite. Ainsi, la fluctuation de la fraction de vide indiquée dans chaque figure pertinente est le reflet de ce phénomène. Selon la définition de la fraction de vide, il n'est pas non plus difficile de comprendre les dispersions des deux autres variables (diamètre moyen des bulles et nombre de bulles).

Les petites bulles qui se sont collées sur la paroi du récipient se sont élevées au début du processus de dégazage et ont produit des bulles de diamètre irrégulier pendant les 10 premières secondes. Le diamètre moyen des bulles atteint sa valeur maximale au bout de 20 à 30 secondes (figure 7). Ensuite, il continue à fluctuer et devient stable après 30 secondes. La pression initiale n'a pas d'influence évidente sur le diamètre moyen des bulles.

Nous avons également constaté que lorsque nous diminuons la pression, le nombre de bulles augmente d'un pas plus tôt que la fraction de vide, quelles que soient les conditions de pression initiale. Ce phénomène devient plus évident avec l'augmentation de la pression initiale. Comparé à la fraction de vide et au nombre de bulles, le diamètre moyen semble relativement stable dans la dernière étape du processus de dégazage lorsque la pression initiale est supérieure ou égale à 1,5 MPa (figure 7c, d).

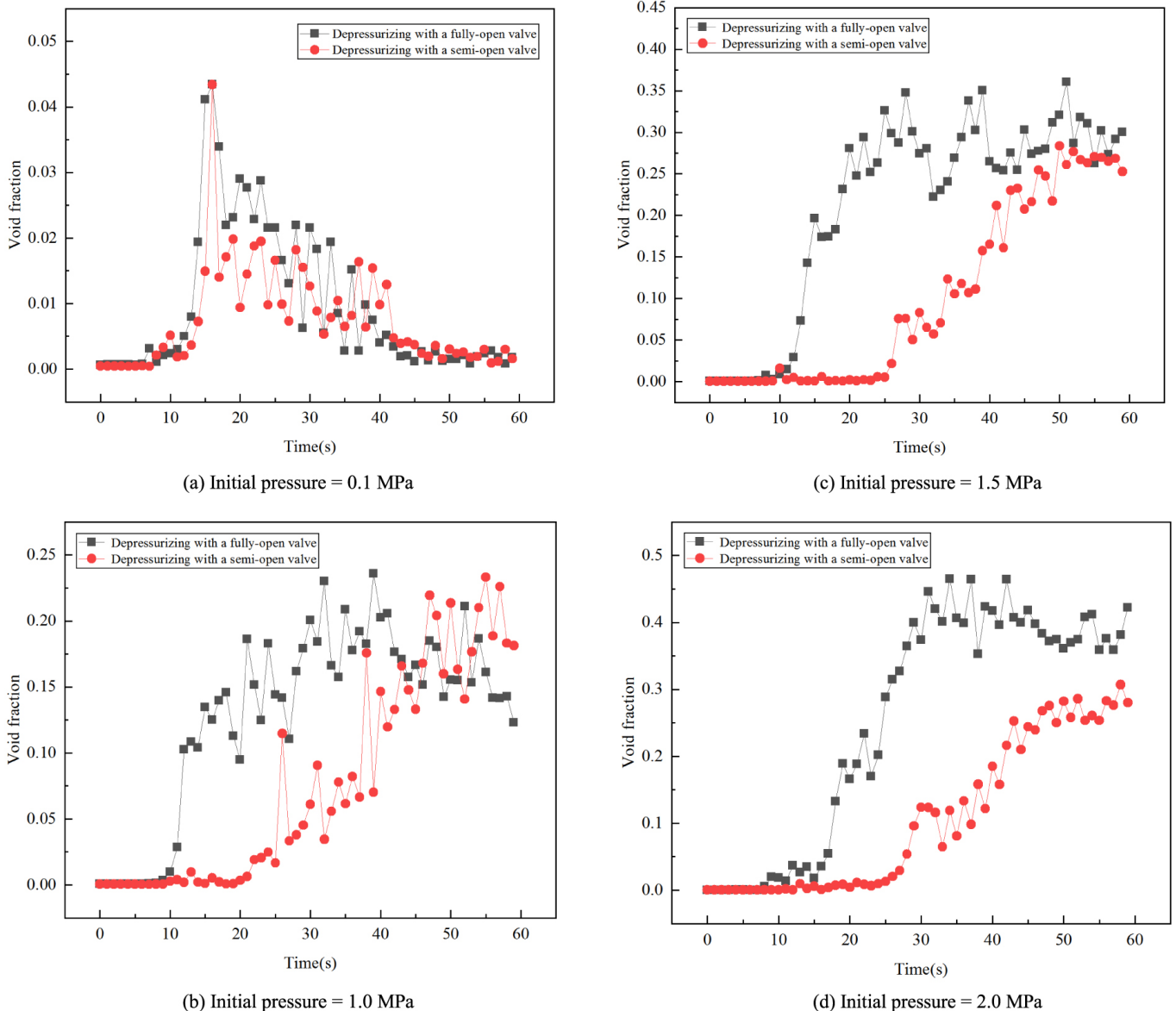


Figure 8. La fraction de vide change au fil du temps dans deux conditions de dégazage (dépressurisation avec une vanne entièrement ouverte et une vanne semi-ouverte).

3.4. Variation de la fraction de vide au fil du temps dans différentes conditions de dégazage

Deux procédés de dégazage par dépressurisation (vanne entièrement ouverte et vanne semi-ouverte) ont donné des résultats différents en ce qui concerne le comportement de la fraction de vide. La figure 8 montre l'évolution de la fraction de vide dans le temps avec quatre pressions initiales différentes (0,1 MPa, 1,0 MPa, 1,5 MPa et 2,0 MPa) dans les deux conditions du processus de dégazage.

Lorsque la pression initiale est faible (0,1 MPa), figure 8(a), les changements de la fraction de vide au fil du temps sont à peu près les mêmes dans les deux conditions du processus de dégazage, ce qui indique que les détails du dégazage ont moins d'influence sur les fractions de vide lorsque la pression initiale est faible.

Toutefois, lorsque la pression initiale est supérieure ou égale à 1,0 MPa, comme le montrent les figures 8(b) et 8(c), la fraction de vide correspondant aux processus de dégazage avec une vanne entièrement ouverte augmente plus tôt et plus rapidement que celle avec une vanne semi-ouverte. Cela montre que le processus de dégazage a une influence sur la fraction de vide lorsque la pression initiale est élevée. Cette influence devient plus importante lorsque la pression initiale est aussi élevée que 2,0 MPa, figure 8(d). La fraction de vide dans une condition de valve complètement ouverte est toujours plus importante que celle dans une condition de valve semi-ouverte pendant des périodes égales.

Les méthodes de contrôle des vannes (conditions de vanne complètement ouverte et semi-ouverte) utilisées dans les mesures ont été principalement conçues pour nous permettre de mener l'expérience avec une relative facilité. Le taux de chute de pression dans la condition de la valve complètement ouverte est plus élevé que dans la condition de la valve semi-ouverte. Bien que les conditions de vanne complètement ouverte et semi-ouverte puissent d'une certaine manière être liées aux scénarios de débit ascendant plus rapide et plus lent respectivement, nous avons trouvé qu'il était difficile de simuler expérimentalement les scénarios de dégazage du lac en utilisant un appareil expérimental aussi petit. Afin de déterminer les changements de régime d'écoulement dans un lac (y compris la distribution de la taille des bulles à différents moments et à différentes profondeurs du lac), nous réaliserons une simulation numérique dans le cadre de notre étude de deuxième phase afin d'étudier les scénarios de

dégazage transitoire réels du lac sur la base des données expérimentales et des corrélations obtenues dans cette étude de première phase.

4. Conclusions

Nos expériences fournissent les relations et les résultats suivants :

(1) Une corrélation entre la sursaturation ΔP (en MPa) nécessaire au dégazage et la pression initiale P_0 est :

$$\Delta P = 0.36564 - \frac{0.33168}{1 + (P_0/0.73136)^{3.96091}}$$

(Valable pour : pression initiale $P_0=0,1$ MPa à 2,0 MPa ; température de la solution = 20 °C).

(2) Une corrélation entre le délai Δt (en s) correspondant à la formation de bulles et la pression initiale P_0 est :

$$\Delta t = 9.33055 + 15.14538 * 0.01755^{P_0}$$

(Valable pour : pression initiale $P_0=0,1$ MPa à 2,0 MPa ; température de la solution = 20 °C).

(3) La pression initiale n'a pas d'influence évidente sur le diamètre moyen des bulles. Plus la pression initiale est élevée, plus la valeur de pointe de la fraction de vide est importante. Le nombre de bulles change toujours un pas plus tôt que la fraction de vide, quelles que soient les conditions de pression initiale.

(4) La méthode de dépressurisation pour le dégazage a moins d'influence sur les fractions de vide lorsque la pression initiale est faible. L'influence devient évidente lorsque la pression initiale est supérieure ou égale à 1,0 MPa.

Ces expériences ont contribué à notre compréhension des processus de dégazage du CO_2 en termes de sursaturation du CO_2 nécessaire au dégazage, et des temps de retard correspondant à la nucléation et à la croissance des bulles. Si elles sont intégrées dans des simulations numériques des processus d'éruption des lacs provoqués par le CO_2 , notre compréhension du dégazage dans la nature sera grandement améliorée.

Bibliographie

- [Benson et al., 2002] S. M. Benson; R. Hepple; J. Apps; C. F. Tsang; M. Lippmann, 2002 (Lessons learned from natural and industrial analogues for storage of carbon dioxide in deep geological formations. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports)
- [Butt et al., 2012] T. E. Butt; R. D. Giddings; K. G. Jones Environmental sustainability and climate change mitigation-CCS technology, better having it than not having it at all!, Environ. Prog. Sustain. Energy, Volume 31 (2012) no. 4, pp. 642-649
- [Evans et al., 1993] W. C. Evans; G. W. Kling; M. L. Tuttle; G. Tanyileke; L. D. White Gas build up in Lake Nyos, Cameroon: The recharge process and its consequences, Appl. Geochem., Volume 8 (1993), pp. 207-221
- [Freeth, 1994] S. J. Freeth Lake Nyos: can another disaster be avoided?, Geochem. J., Volume 28 (1994), pp. 163-172
- [Giggenbach, 1990] W. F. Giggenbach Water and gas chemistry of Lake Nyos on the eruptive process, J. Volcanol. Geotherm. Res., Volume 42 (1990) no. 4, pp. 337-362
- [Halbwachs et al., 2004] M. Halbwachs; J. C. Jean-Christophe Sabroux; J. Grangeon; G. Kayser; J. C. Tochon-Danguy; A. Felix; J. C. Béard; A. Villeveille; A. Gérardvitter; P. Richon; A. Wüest; J. Hell Degassing the "Killer Lakes" Nyos and Monoun, Cameroon, EOS, Volume 85 (2004) no. 30, pp. 281-287
- [Hirslund and Morkel, 2020] F. Hirslund; P. Morkel Managing the dangers in Lake Kivu - How and why, J. Afr. Earth Sci., Volume 161 (2020)
- [Jung et al., 2015] N.-H. Jung; W. S. Han; K. Han; E. Park Regional-Scale advective, diffusive and eruptive dynamics of CO_2 and brine leakage through faults and wellbores, J. Geophys. Res., Volume 120 (2015) no. 5, pp. 3003-3025
- [Kerr, 1987] R. Kerr Lake Nyos was rigged for disaster, Science, Volume 235 (1987), p. 528-529
- [Kim et al., 2018] C. Y. Kim; W. S. Han; E. Park; J. Jeong; T. Xu CO_2 leakage-induced contamination in shallow potable aquifer and associated health risk assessment, Geofluids, Volume 2018 (2018), pp. 1-19
- [Kling et al., 1987] G. W. Kling; M. A. Clark; G. N. Wagner; H. R. Compton; A. M. Humphrey; J. D. Devine; W. C. Evans; J. P. Lockwood The 1986 Lake Nyos Gas Disaster in Cameroon, West Africa, Science, Volume 236 (1987) no. 4798, pp. 169-175
- [Kling et al., 1989] G. W. Kling; M. L. Tuttle; W. C. Evans The evolution of thermal structure and water chemistry in Lake Nyos, J. Volcanol. Geotherm. Res., Volume 39 (1989) no. 2-3, pp. 151-165
- [Kling et al., 2005] G. W. Kling; W. C. Evans; G. Tanyileke; M. Kusakabe; T. Ohba; Y. Yoshida; J. V. Hell Degassing Lakes Nyos and Monoun: Defusing certain disaster, Proc. Natl Acad. Sci. USA, Volume 102 (2005) no. 40, pp. 14185-14190
- [Kling, 1987] G. W. Kling Seasonal mixing and catastrophic degassing in tropical lakes, Cameroon, West Africa, Science, Volume 237 (1987) no. 4818, p. 1022
- [Kusakabe, 2017] M. Kusakabe Lakes Nyos and Monoun gas disasters (Cameroon) - Limnic eruptions caused by excessive accumulation of magmatic CO_2 in crater lakes, Geochem. Monogr. Ser., Volume 1 (2017), pp. 1-50

- [Lewicki et al., 2007] J. L. Lewicki; J. Birkholzer; C. F. Tsang Natural and industrial analogues for leakage of CO₂ from storage reservoirs: identification of features, events, and processes and lessons learned, *Environ. Geol.*, Volume 52 (2007) no. 3, pp. 457-467
- [Proust et al., 2016] E. Proust; G. Bentivegna; S. Leconte; L. L. De; A. Loschetter; Z. Pokryszka What may be the consequences of a CO₂ leakage? Insights from soil gas measurements in an urban area - Clermont-Ferrand, French Massif Central, *Energy Procedia*, Volume 114 (2016) no. 2017, pp. 3006-3019
- [Schmid et al., 2004] M. Schmid; K. Tietze; M. Halbwegs; A. Lorke; D. McGinnis; A. Wuest How hazardous is the gas accumulation in Lake Kivu? Arguments for a risk assessment in light of the Nyiragongo Volcano eruption of 2002, *Acta Vulcanol.*, Volume 14 (2004), pp. 115-121
- [Shipton et al., 2005] Z. K. Shipton; J. P. Evans; B. Dockrill; J. Heath; A. Williams; D. Kirchner Natural leaking CO₂-charged systems as analogs for failed geologic storage reservoirs, *Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations*, Volume 2 (2005), pp. 699-712
- [Sigurdsson et al., 1987] H. Sigurdsson; J. D. Devine; F. M. Tchuva Origin of the lethal gas burst from Lake Monoun, Cameroon, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Volume 31 (1987) no. 1, pp. 1-16
- [Sánchez-España et al., 2020] J. Sánchez-España; I. Yusta; B. Boehrer Degassing Pit Lakes: Technical Issues and Lessons Learnt from the HERCO₂ Project in the Guadiana Open Pit (Herrerías Mine, SW Spain), *Mine Water Environ.*, Volume 11 (2020), p. 3
- [Tassi and Rouwet, 2014] F. Tassi; D. Rouwet An overview of the structure, hazards, and methods of investigation of Nyos-type lakes from the geochemical perspective, *J. Limnol.*, Volume 73 (2014) no. 1, pp. 55-70
- [Zhang and Kling, 2006] Y. Zhang; G. W. Kling Dynamics of Lake Eruptions and Possible Ocean Eruptions, *Annu. Rev. Earth Planet Sci.*, Volume 34 (2006), pp. 293-324
- [Zhang, 1996] Y. Zhang Dynamics of CO₂-driven lake eruptions, *Nature*, Volume 379 (1996), pp. 57-59
- [Zhang, 1997] Y. Zhang Dynamics of gas-driven eruptions: Experimental simulations using CO₂-H₂O polymer system, *J. Geophys.*, Volume 102 (1997) no. B2, pp. 3077-3098