

La cyclicité des geysers

Indiquez vos ref par des numéros ds le texte.

Rq générales : je trouve vos explications plutôt claires (même si certaines sont à revoir) et je vous en félicite.

C'est vraiment dommage que vous n'ayez rien exploité sur le geyser froid :

Ne pouvez vous vraiment rien en tirer ?
Je me rappelle avoir fait des mesures de temps et de hauteur, non ?

même si vous n'arrivez pas à pointer sur vos films ?
→ faut qu'on arrive à régler ça à la rentrée.

Si il vous manque de la place, vous devriez pouvoir remanier la 1^{ère} partie très descriptive (cf Rq en gris p 5).

(décompression et découpe vidéo).
(découper le fichier en plusieurs bouts et compression des fichiers morceaux si c'est trop lourd ?
On va y arriver ...

SOMMAIRE

INTRODUCTIONp.2

I. Modélisation d'un geyser p.3

- A. Etude théorique
- B. Approche expérimentale
- C. Comparaison avec un geyser froid

II. Facteurs influents sur la cyclicité p.7

- A. Diamètre de la cheminée
- B. Puissance de chauffage
- C. Taille du réservoir

*D. éventuellement mult pour le geyser froid :
- forme du réservoir ?
(distance à la source de CO₂ ?)*

III. Comparaison du modèle avec un geyser réel : exemple du Strokkur en Islande

- A. Observations communes avec notre modélisation
- B. Critiques de notre modèle

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

Introduction

Les geysers présentent des phénomènes périodiques de jaillissement d'eau à haute pression. L'éruption varie de la seconde à la dizaine de minutes et peut projeter de l'eau jusqu'à 80 mètres de haut. Les geysers sont constitués de plusieurs réservoirs d'eau dont le principal est relié à la surface par un conduit ou une cheminée. Il existe deux types de geysers : le type chaud et le type froid. Ils se différencient par le mécanisme déclenchant l'expulsion d'eau. Dans le cas des geysers froids, c'est la présence de gaz (méthane, dioxyde de carbone) dans le réservoir qui cause la remontée de l'eau vers la surface. Dans le cas d'un geyser chaud, c'est une source géothermique (point chaud, panache).

Près de 30 champs de geysers sont recensés dans le monde et la plupart se situe au niveau de régions à forte activité géothermique. De plus, il existe deux types de geysers chauds qui diffèrent de part leur cheminée ; si la cheminée est fine et que le cône de fin est étroit alors on les dits "fontaines"; si celles-ci expulsent du gaz, ce qui fait remonter des bulles d'eau dont l'explosion au contact de la surface crée une large colonne d'eau : on les dit "canon".

Dans le cas des geysers chauds, l'eau est expulsée du réservoir, elle se refroidit au contact de la température atmosphérique lorsqu'elle arrive à la surface, puis retombe au niveau du bassin à la surface du geyser, pour enfin redescendre dans le réservoir. L'eau arrivant étant plus froide que celle au sein du réservoir, cela va refroidir l'eau contenue dans la chambre, entraînant la fin du jaillissement. Puis, l'eau est de nouveau chauffée par la source chaude, ce qui augmente la pression dans le réservoir et provoque une nouvelle expulsion d'eau.

Problématique : Peut-on reproduire en laboratoire un geyser et son activité cyclique ? Quels sont les facteurs qui peuvent influencer sur cette cyclicité ?

forme de question : je pense que Mme Beaux vous proposera 1 autre formulation.

I- Modélisation d'un geyser chaud

A- Étude théorique

Pour étudier le fonctionnement d'un geyser, on est obligé de simplifier la réalité, car sa structure interne est difficilement accessible. On peut néanmoins le représenter de manière assez simple comme un réservoir d'eau situé en profondeur, relié à la surface par un conduit étroit. Ce réservoir est chauffé en permanence par les roches chaudes environnantes, elles-mêmes liées à l'activité géothermique. L'eau qui s'y trouve provient d'infiltrations et reste piégée entre deux éruptions, ce qui permet au système de se recharger progressivement. Dans un premier temps, l'eau se réchauffe lentement. Si l'on suppose que les pertes de chaleur sont faibles et que la puissance thermique reçue est constante, on peut décrire cette évolution avec un bilan énergétique simple :

$$m c_p dT/dt = P$$

(R9) Utilisez l'équation d'équation pour que ce soit + joli.
(je peux vous montrer comment faire si vous voulez).

où m est la masse d'eau, c_p sa capacité thermique massique et P la puissance thermique reçue.

Cette relation montre que la température augmente progressivement au cours du temps. Cette phase correspond à ce que l'on peut appeler la phase de « recharge » du geyser. Toutefois, le comportement de l'eau dans ces conditions est différent de ce que l'on observe

à la surface. En profondeur, la pression est plus élevée à cause du poids de la colonne d'eau. Cette pression supplémentaire augmente la température d'ébullition, ce qui permet à l'eau de rester liquide au-delà de 100°C : on parle alors d'eau surchauffée.

Au fur et à mesure du chauffage, le système devient instable. Lorsque l'eau proche de la surface atteint sa température d'ébullition, des bulles de vapeur commencent à apparaître. Cela modifie localement la densité du fluide et entraîne une diminution de la pression dans le conduit. Cette baisse de pression se transmet vers le bas, là où l'eau est justement surchauffée. Il en résulte une vaporisation très rapide d'une partie de l'eau, ce qui correspond à une sorte d'emballement du système.

Cette transformation brutale provoque la remontée violente du mélange eau-vapeur vers la surface : c'est l'éruption du geyser. Une fois cette phase terminée, une partie de l'eau a été expulsée, la pression diminue et le système se refroidit légèrement. Le réservoir se remplit à nouveau et le cycle recommence. La cyclicité des geysers peut donc être comprise comme une alternance entre une accumulation lente d'énergie et une libération rapide.

B- Approche expérimentale

Pour tester la validité de cette étude théorique, il est intéressant de mettre en place une expérience permettant de reproduire le fonctionnement d'un geyser à petite échelle. L'objectif n'est pas de reproduire fidèlement un geyser réel, mais plutôt de retrouver les grandes étapes du cycle. On peut modéliser le geyser de la façon suivante :

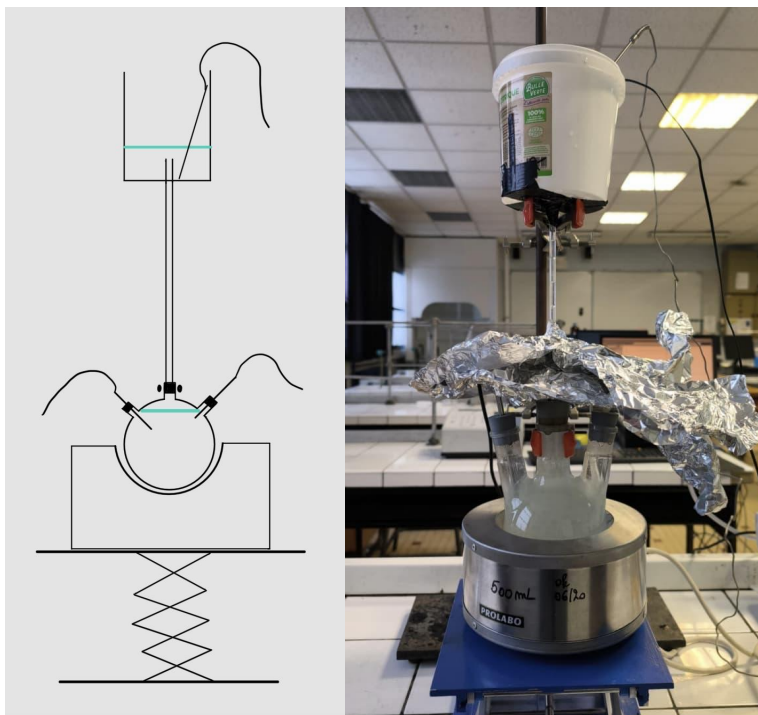


Figure 1 : Schéma et photo légendés du montage expérimental du geyser chaud

Le ballon tricol rempli d'eau représente le réservoir souterrain chauffé par une source de chaleur géothermique, ici ce rôle est joué par le chauffe-ballon. Le tube vertical étroit auquel est relié le ballon modélise le conduit par lequel l'eau remonte jusqu'au bassin de surface, représenté par le seau en haut du montage. Pour assurer l'étanchéité au niveau de la jonction entre le tube en verre et le seau, nous avons utilisé du joint siliconé.

indiquer la jonction.

Pour pouvoir rendre compte des variations de pression et de température au sein du ballon et du seau, on dispose d'un manomètre et de deux thermomètres connectés à un modem transmettant les données à un logiciel Latispro sur l'ordinateur. Nous obtenons ainsi des courbes exploitables correspondant aux grandeurs mesurées en fonction du temps.

Pour comprendre l'origine de la cyclicité et la durée des cycles nous avons réalisé le montage précédent avec un ballon de 500 mL. Nous obtenons les résultats suivants :

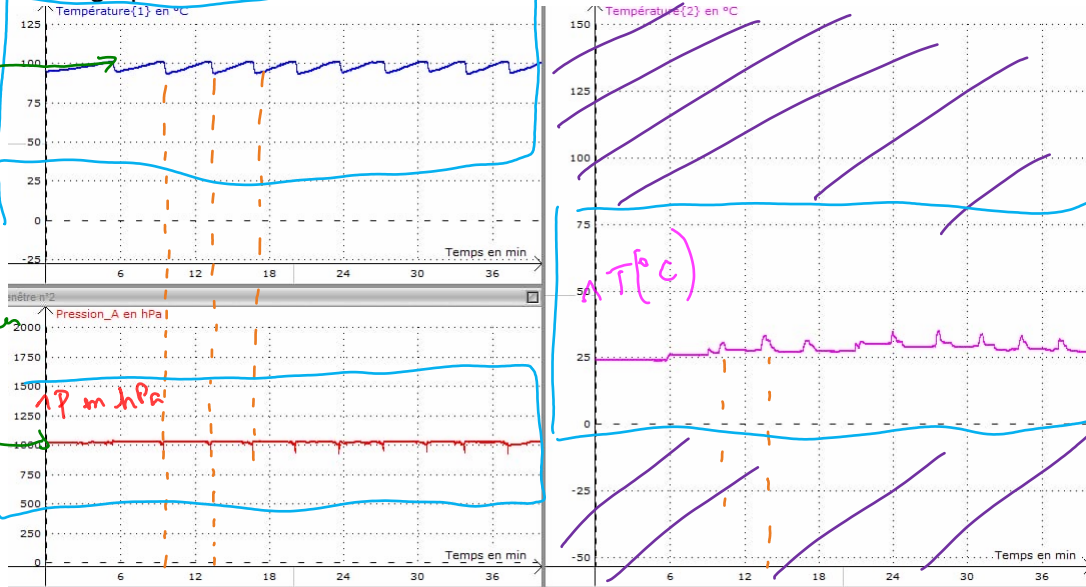


Figure 2 : Évolution de la température au sein du ballon (en bleu), dans le réservoir de surface (en rose) et de la pression au sein du ballon (en rouge) en fonction du temps.

Au début de l'expérience, l'eau se réchauffe progressivement sans bouillir. Cela correspond bien au modèle théorique : la pression dans le ballon empêche l'ébullition immédiate, même lorsque la température devient élevée. Pour suivre l'évolution du système, on peut mesurer la température avec un thermomètre et la pression avec un manomètre.

Après un certain temps, des bulles apparaissent et le système devient instable. On observe alors une remontée rapide du fluide dans le tube, accompagnée d'une expulsion d'eau vers l'extérieur, lorsque la température atteint environ 101°C. Cette phase correspond à une éruption dans le modèle expérimental. Une fois l'éruption terminée, le niveau d'eau dans le récipient diminue et la température de l'eau dans le ballon baisse légèrement, vers 90°C.

Le système recommence ensuite à chauffer, ce qui permet d'observer plusieurs cycles successifs d'une durée moyenne, calculée en divisant la durée totale par le nombre de cycles, de 3 minutes 27.

Cette expérience permet donc de retrouver qualitativement le comportement d'un geyser. Elle montre que la cyclicité repose bien sur une alternance entre accumulation d'énergie et libération brutale.

C- Comparaison avec un geyser froid

Un geyser froid est un phénomène périodique de jaillissement d'eau sous pression, par poussée de gaz (CO₂) à mettre en indice

On a modélisé de façon expérimentale un geyser froid en utilisant un ballon tricol, représentant le réservoir où s'accumule le gaz, un ballon bicol, représentant un réservoir

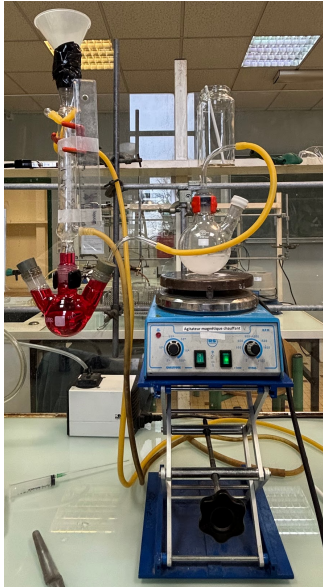
Ⓟ avec vos points, vos valeurs exactes ?

Ⓟ tout ce qu'on ne dispose pas des 100°C ça n'est pas à l'échelle qu'on n'observe pas d'ébullition.

Suggestion : vous pouvez peut-être rajouter pour que les vos graphes pour qu'ils soient des 1 en dessous des autres (:) pour et les autres (:) pour qu'on voit bien que toutes les périodes sont liées. et mettre votre schéma de la page précédente à côté pour qu'on voit de suite en se dit que que vous avez mesuré (meilleure clarté) et de m, ce sera plus clair pour votre oral.

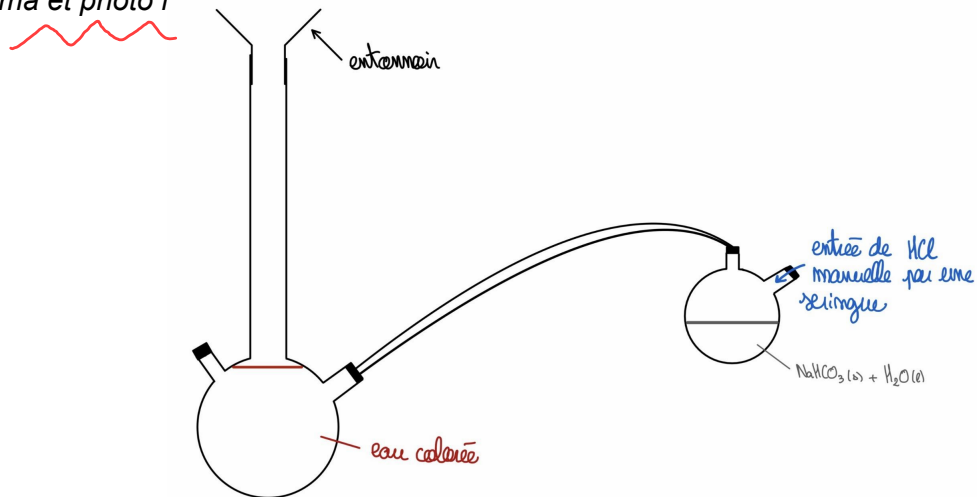
c'est juste 1 (kg) : je trouve ça clair mais bon juste pour aborder à 1 résultat qualitatif.

secondaire dans lesquels les gaz sont produits, et un réfrigérant droit modélisant la cheminée du geyser, surmonté d'un entonnoir.



légendez votre schéma

Figure 3 : Schéma et photo



à réviser

L'éruption d'un geyser froid est déclenchée par une émission de gaz, produit lors d'une réaction à fort dégagement gazeux. Dans notre cas, nous avons utilisé la réaction entre l'acide chlorhydrique et l'hydrogénocarbonate de sodium, qui a pour équation :

On a cherché à optimiser la production de gaz sous forme de CO_2 à l'aide du déplaçement de l'équilibre. **$\text{NaHCO}_3(\text{s}) + \text{H}^+(\text{aq}) \rightarrow \text{Na}^+(\text{aq}) + \text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l})$** cé en défaut par rapport à l'autre réactif, on peut modifier l'avancement de la réaction et donc la quantité de produit.

pourquoi le choix

Le geyser est modélisé par un ballon tricol, rempli d'eau colorée au rouge de méthyle, afin de mieux repérer la hauteur du jet, qui est relié à un réfrigérant droit et à un ballon bicol, dans lequel se produit la réaction de formation de CO_2 .

Par comparaison avec le geyser chaud, dont la force motrice des éruptions est la chaleur géothermique générée par du magma ou des roches, les éruptions d'un geyser froid sont quant à elle provoquées grâce à la saturation en CO_2 de l'eau souterraine. De plus, la

température du réservoir d'un geyser chaud est proche de 100°C alors que l'eau d'un geyser froid est à température ambiante. Ainsi, les éruptions d'un geyser chaud sont plus explosives car la vapeur d'eau prend instantanément un gros volume dans le réservoir, alors que les éruptions d'un geyser froid sont plus progressives : la vitesse d'éjection de l'eau augmente lentement au début puis diminue au cours du temps.

ça se passe à l'oral
à amener des questions

Q) avez-vous 1 moyen de garantir cette vitesse d'éjection ?

II- Facteurs influents sur la cyclicité

Même si le mécanisme général est assez simple, la durée entre deux éruptions peut varier fortement d'un geyser à l'autre. Elle dépend en réalité de plusieurs paramètres physiques.

A- Puissance de chauffage

Le premier facteur important est la puissance thermique apportée par le sous-sol. Plus cette puissance est élevée, plus l'eau se réchauffe rapidement, ce qui réduit le temps nécessaire pour atteindre les conditions d'ébullition. À l'inverse, si l'apport de chaleur est plus faible, la phase de chauffage est plus longue et les éruptions sont plus espacées.

[expériences à faire potentiellement] OK

B- Diamètre de la cheminée

Un autre facteur pouvant influencer sur la durée des cycles est le diamètre de la cheminée, modélisée par le tube en verre. Pour voir l'effet qu'un changement de diamètre a sur la cyclicité, nous avons réalisé l'expérience de modélisation du geyser chaud avec des tubes de diamètres différents : un tube fin de 7 mm de diamètre et un tube large de 9 mm de diamètre interne. Nous obtenons les acquisitions suivantes :

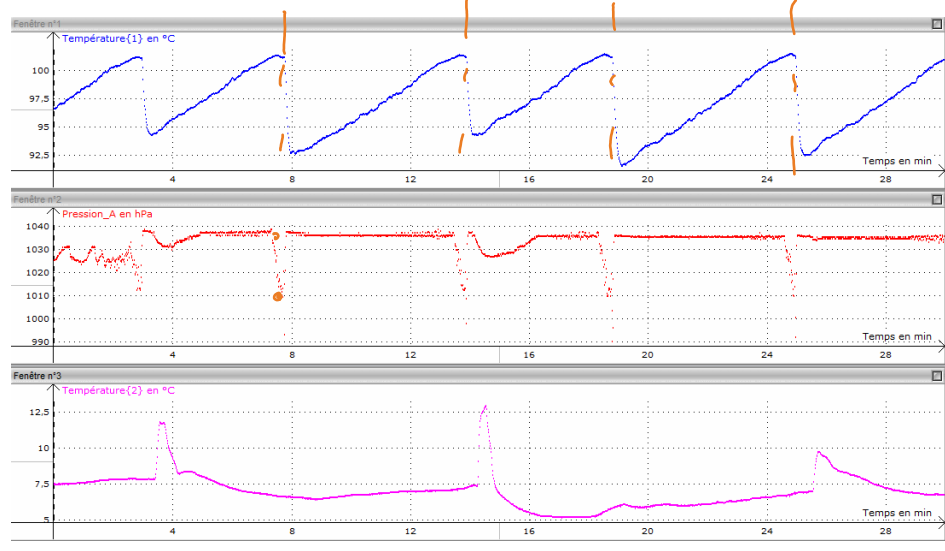
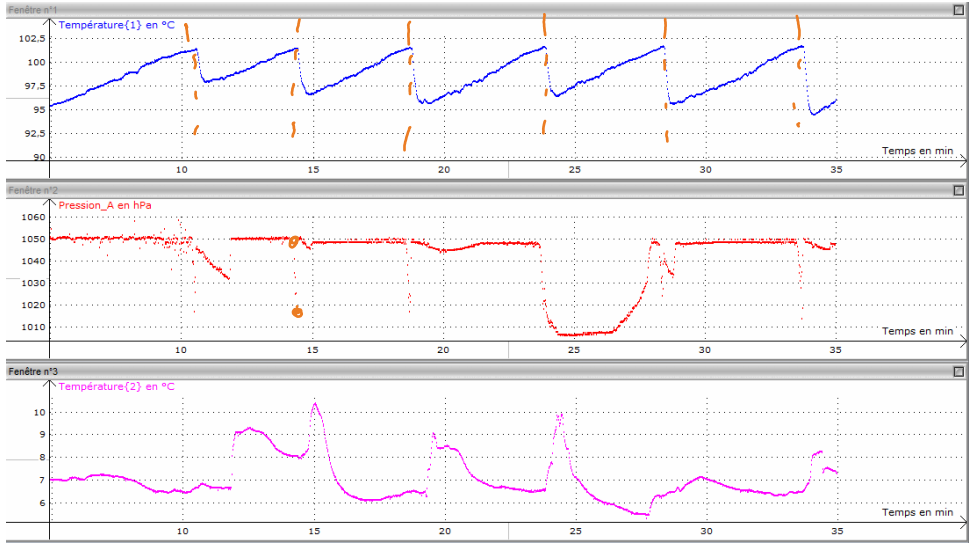


Figure 4 : Évolution de la température au sein du ballon (en bleu), dans le réservoir de surface (en rose) et de la pression au sein du ballon (en rouge) en fonction du temps pour le tube de 7mm de diamètre.

Les graphes roses et magenta permettent d'amener des questions sur la cyclicité, les sont plus intéressants. Comme vous l'avez vu dans la figure 2. Du coup je les ai inclus pour ne laisser que des bleus qui sont + fréquents et vous permettent de bien comparer les périodes.

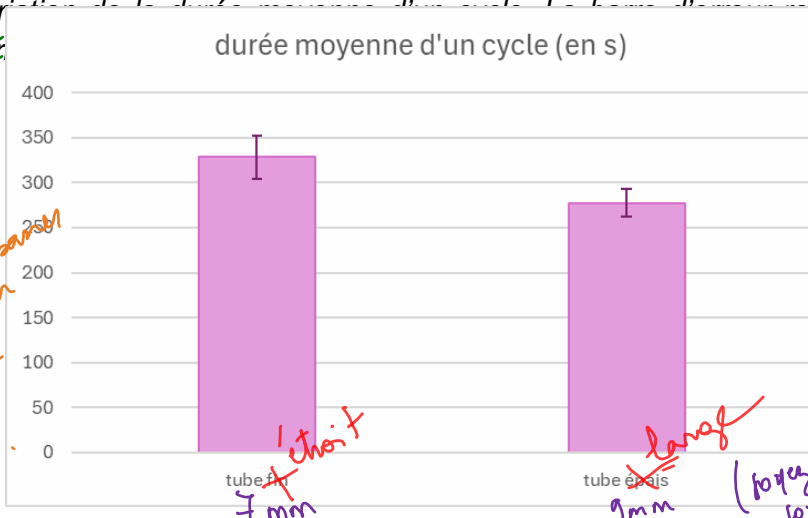


Cela pourra arriver des fois

Figure 5 : Évolution de la température au sein du ballon (en bleu), dans le réservoir de surface (en rose) et de la pression au sein du ballon (en rouge) en fonction du temps pour le tube de 9mm de diamètre.

En calculant la durée moyenne des cycles, en divisant la durée totale par le nombre de cycles, on obtient pour le tube fin des cycles de 328 secondes soit 5 minutes 28 s avec un écart-type échantillon de 48,34 s et, pour le tube large, des cycles de 277 secondes soit 4 minutes 37 s avec un écart-type échantillon de 35,37 s.

Figure 6 : Variations de la durée moyenne d'un cycle en fonction du diamètre du tube. Présente l'erreur standard à la fois.



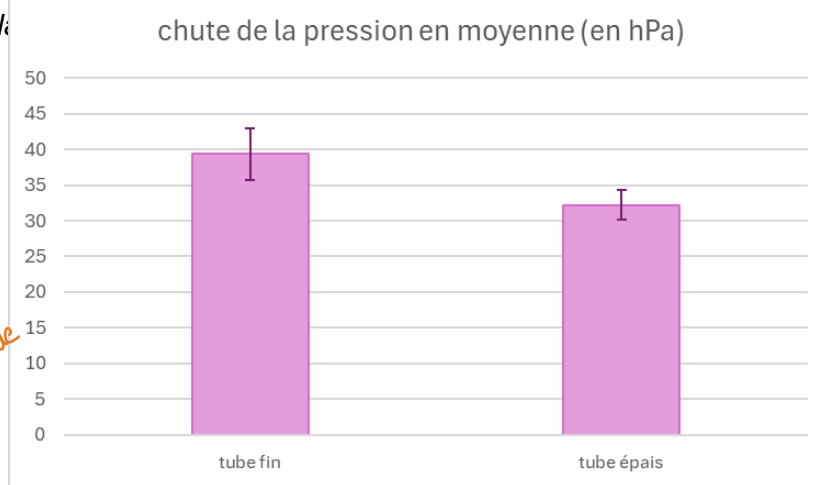
Il y donc une différence significative dans la durée des cycles entre la modélisation avec le tube fin et celle avec le tube épais : on observe qu'avec un conduit plus large les cycles sont plus courts. De plus, en évaluant la chute de pression au moment de l'éruption pour chacun des tubes en faisant la moyenne des chutes de pression de chaque cycle, et en faisant abstraction de l'anomalie vers 25 minutes pour le tube épais, on obtient pour le tube épais une chute d'en moyenne 32,212 hPa, avec un écart-type échantillon de 4,55 hPa, et 39,365 hPa, avec un écart-type échantillon de 8,03 hPa, pour le tube fin.

au nbre de cs.
 précision sur le nombre de cycles vous avez fait la moyenne
 et indiquer : les bases d'erreur correspondantes sur les valeurs de confiance à 95% calculées à l'aide du coeff de Student
 et là je pense que vos bases d'erreur vont se recouper
 mais vous pouvez même dire que vous obtenez 1 lendemain...
 ce qui n'est pas aberrant

présente l'erreur
 (avez-vous pu le faire pas ça ne choise...)

la QD réel : "quelques-uns si + de temps?"
 ça fait à la fois
 comme réponse à

Figure 7 : Variation de la chute de pression moyenne. La barre d'erreur représente l'erreur standard à la



des choses considérées de :

$P_A > P_A' ???$

\Rightarrow Non c'est la paradoxe hydrostatique

mais faut être que la hauteur atteinte avant l'explosion est \neq le des les 2 cas?

On remarque ainsi que la chute de pression est plus importante pour le conduit plus fin, pour lequel on remarque des cycles plus longs. En effet, un conduit étroit favorise l'accumulation de pression et empêche les bulles de s'échapper facilement, ce qui rend les éruptions plus franches et plus violentes. En revanche, si le conduit est plus large, la vapeur peut s'échapper progressivement, ce qui limite les phénomènes explosifs. Dans certains cas, la présence de cavités ou de réservoirs secondaires peut compliquer le fonctionnement et rendre la cyclicité moins régulière.

Ainsi, la périodicité observée résulte d'un équilibre entre plusieurs effets, ce qui explique pourquoi elle est très variable dans la nature.

C- Taille du réservoir

III- Comparaison du modèle avec un geyser réel : exemple du Strokkur en Islande

A- Observations communes avec notre modélisation

Nous avons comparé nos modélisations avec les données d'un geyser réel : le Strokkur en Islande.

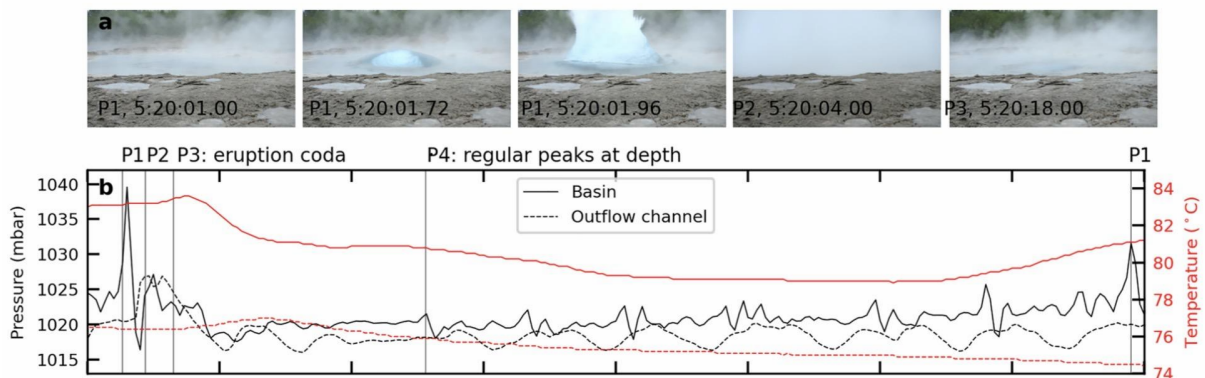


Figure 8 : Le cycle éruptif du Strokkur du 7 juin 2018 divisé en quatre phases. (a) Photos des phases 1 (P1), 2 (P2), et 3 (P3). (b) Pression (en noir) et température (en rouge)

mesurées dans le bassin (trait plein) et dans le conduit (en pointillés). Les traits verticaux marquent les débuts de phases.

On observe que l'éruption correspond à une chute de pression dans le bassin, qui est suivie d'une augmentation de la température de l'eau du bassin, à cause de l'apport de l'eau chaude venue des profondeurs. La température du bassin se stabilise ensuite au contact de l'air avant d'augmenter de nouveau lors de l'éruption suivante.

L'augmentation de la pression dans le bassin au moment de l'éruption correspond à une arrivée d'eau et de gaz de la chambre en profondeur. La pression dans la chambre a donc diminué, ce qu'on observe avec nos modélisations.

On retrouve ainsi les cycles de pression et de température qu'on observe avec notre modélisation

B- Limites de notre modèle

Même s'il reproduit qualitativement la cyclicité d'un geyser, ce qui est assez satisfaisant vu sa simplicité, notre montage expérimental présente néanmoins des limites car le dispositif expérimental ne prend pas en compte la complexité de sa structure interne. De plus, les conditions de pression et de température sont assez différentes de celles rencontrées dans la nature.

CONCLUSION

Nos modélisations ont permis de mettre en évidence la cyclicité des éruptions des geysers chauds et froids par des variations de température et de pression au sein du réservoir et par des variations de la hauteur d'eau éjectée. Ainsi, chaque geyser présente des éruptions cycliques de différentes périodes à cause de la différence de taille de la cheminée et du réservoir, et de la puissance du chauffage généré par la géothermie.

Cette cyclicité, si elle peut être calculée ou prédite sur la base de quelques paramètres (géométrie, puissance géothermique), pourrait permettre de prévoir les éruptions des geysers sur la durée et leur degré de corrélation à des phénomènes sismiques.

BIBLIOGRAPHIE

- Modélisation d'un geyser en laboratoire, par Vincent DE ZOTTI, Antoine GRISART, Charles-Édouard LECOMTE, Paco MAURER, Raphaël MENU et Hélène PIOT-DURAND. Le Bup n°993, vol 111, p. 445-454, avril 2017 https://www.armelmartin.mon-site-a-moi.fr/doc/tipe/Article-BUP_22478_Modelisation_geyser_en_lab.pdf
- Crystal Geyser - Utah's cold one. Tony Waltham, Geology Today, 2001, Vol 17 (1) 22-24.
- The Operation and Geography of Carbon Dioxide-Driven, Cold-Water « Geyser ». J. Alan Glennon et Rhonda M. Plaff. The GOSA Transactions, 2004, vol IX, p. 184-192
- Hydrovolcanologie appliquée à la phase hydrothermale : fumerolles, solfatares, geysers, lacs acides, mofettes, sources chaudes. Michel Detay, Pierre Thomas et Olivier Dequinsey, Mars 2013 <https://zenodo.org/records/15873236>

- Etude de la dynamique du Geyser Old Faithful, USA, à partir de méthodes de sismique passive. Estelle Cros, Thèse en Sciences de la Terre. Université de Grenoble, 2011. Français. <https://theses.hal.science/tel-00765878v1>
- Eruptive Cycle and Bubble Trap of Strokkur Geyser, Iceland par Eva P.S.Eibl, Daniel Müller, Thomas R. Walter, Masoud Allahbakhshi, Philippe Jousset, Gylfi Páll Hersir, Torsten Dahm. JGR : Solid Earth, février 2021. https://gfzpublic.gfz.de/rest/items/item_5007267_7/component/file_5007289/content