

# Modélisation d'un geyser en laboratoire

par Vincent DE ZOTTI, Antoine GRISART, Charles-Édouard LECOMTE,  
Paco MAURER, Raphaël MENU et Hélène PIOT-DURAND

Laboratoire junior *Explique-moi la géophysique*  
École normale supérieure de Lyon (ENS de Lyon) - 69007 Lyon  
vincent.de\_zotti@ens-lyon.fr

**N**OUS PROPOSONS UN MODÈLE de geyser, facilement reproductible en laboratoire ou en classe, constitué d'un ballon relié à une source d'eau par un tube, et chauffé par un chauffe-ballon. Grâce à une mesure en continu de la température et de la pression, il est possible d'expliquer les cycles observés et de comprendre le processus clef de l'éruption. Un modèle thermodynamique simple est ensuite proposé, il permet de remonter aux différentes grandeurs d'intérêt, et de décrire l'influence de la température de la source d'eau.

## INTRODUCTION

Un geyser est une source d'eau chaude qui jaillit à intervalles réguliers grâce à la surpression de la vapeur d'eau formée en profondeur. La chaleur provient d'une activité thermique terrestre proche de la surface. Un des geysers les plus connus est le Old Faithful, situé dans le parc du Yellowstone, aux États-Unis. Il produit toutes les quatre-vingt-dix minutes un jet d'eau chaude atteignant jusqu'à cinquante-six mètres de hauteur. Sa source thermique est la chambre magmatique du supervolcan du Yellowstone, l'une des plus vastes de la planète.

L'étude des geysers et leur modélisation ont permis aux scientifiques d'obtenir des informations sur les structures et la dynamique de la croûte terrestre. Le principe est relativement simple : il s'agit d'un réservoir de fluide semi-fermé, constamment chauffé par la Terre et évacuant un surplus d'énergie par une ouverture menant à la surface. L'eau chaude en convection, poussée par la surpression des gaz, s'échappe *via* un long conduit étroit. Les cycles observés dépendent essentiellement de deux paramètres : la température de la source de chaleur et la hauteur du conduit.

Dans cet article, nous allons présenter une expérience permettant de modéliser, de façon simplifiée, un geyser ayant des éruptions à intervalles réguliers [1-2]. Celle-ci pourrait facilement être reproduite en laboratoire ou dans une salle de classe. Grâce à un suivi de la température et de la pression dans le système, nous pouvons décrire pas à pas le comportement de ce geyser. Un modèle thermodynamique simple permet de retrouver et d'expliquer les cycles observés. Cette expérience pourrait donc s'inscrire

dans le cadre d'une démarche scientifique expérimentale en lycée ou dans l'enseignement supérieur (observation du phénomène, émission d'hypothèses, réalisation de mesures, développement d'un modèle...). Elle pourrait également faire l'objet d'un TIPE (Travail d'initiative personnelle encadré), d'un TP ou d'une analyse documentaire.

## 1. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Le schéma de l'expérience réalisée est présenté en figure 1.

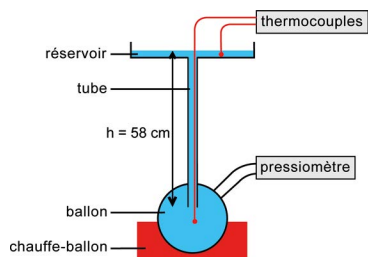


Figure 1 - Modèle expérimental de geyser.

Le geyser est modélisé par un ballon de 500 mL rempli d'eau, en contact avec un chauffe-ballon. Un tube vertical rigide, long de 56 cm et de 8 mm de diamètre, est inséré de 4 cm à l'intérieur du ballon et le relie à un réservoir placé au-dessus de lui. La pression dans le ballon est mesurée au niveau de l'un de ses cols par un pressiomètre. Des mesures de température sont réalisées par deux thermocouples. L'un est plongé dans le ballon *via* le tube vertical et mesure sa température, tandis que l'autre mesure la température du réservoir en surface. Le suivi de la pression et des températures est réalisé grâce à un logiciel informatique.

Le système est rempli d'eau jusqu'au réservoir sur une hauteur d'eau de 2 cm. La colonne d'eau entre l'embouchure en bas du tube et la surface a une hauteur  $h = 58 \text{ cm}$ . Le chauffe-ballon est ensuite réglé à puissance maximale pendant toute la durée de l'expérience.

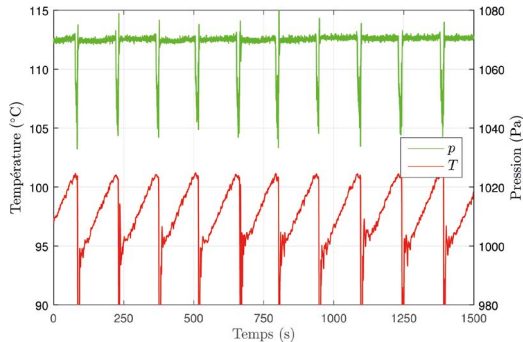
## 2. RÉALISATION DES EXPÉRIENCES

Nous avons réalisé deux expériences sur ce dispositif : la première en maintenant la température du réservoir constante, et la seconde en laissant le système évoluer librement.

### 2.1. Expérience 1 : description d'un cycle

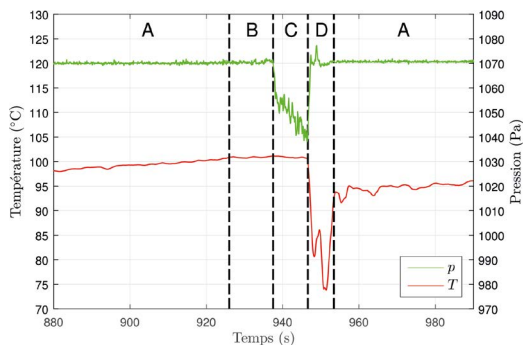
Tout au long de cette expérience, l'eau dans le réservoir est maintenue à la température  $T_r = 0 \text{ }^\circ\text{C}$  grâce à un mélange eau-glace. L'eau dans le ballon est portée

à ébullition à l'aide du chauffe-ballon. La pression atmosphérique dans la salle vaut  $p_0 \approx 1015$  hPa. Les conditions de fonctionnement du geyser étant stables, les cycles d'éruptions obtenus sont stationnaires. Un exemple du suivi de la pression  $p$  et de la température  $T$  dans le ballon réalisé sur une dizaine de cycles est présenté en figure 2.



**Figure 2** - Évolution de la température et de la pression lorsque  $T_r = 0$  °C.

La période des cycles observés est constante, elle correspond à l'intervalle entre deux éruptions successives du geyser. Nous la mesurons pour chaque cycle de notre expérience, et nous obtenons une période moyenne  $\tau_0 = 149 \pm 5$  s. Les cycles sont composés de deux phases : un temps de chauffe de quelques minutes qui permet d'amener l'eau à ébullition, puis le temps de l'éruption qui ne dure qu'une dizaine de secondes. Un cycle centré sur l'éruption est présenté en figure 3.



**Figure 3** - Évolution de la température et de la pression sur un cycle lorsque  $T_r = 0$  °C.

En complément de l'acquisition, nous avons réalisé des vidéos<sup>(1)</sup> de l'éruption que nous comparons à l'évolution de la pression et de la température dans le ballon. Il est

(1) Des vidéos du ballon et de l'ensemble du geyser, réalisées lors d'éruptions dans des mêmes conditions, sont disponibles sur le site de l'UdPPC.

alors possible de décrire le phénomène de geyser en quatre étapes, représentées schématiquement en figure 4.

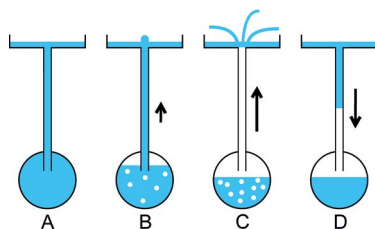


Figure 4 - Les quatre étapes d'un cycle.

- ◆ **Étape A** : La température de l'eau augmente linéairement jusqu'à atteindre environ  $101\text{ }^{\circ}\text{C}$ . L'eau reste sous forme liquide tout au long de cette étape, aucune bulle n'est observée dans le ballon. La pression dans le ballon est constante et vaut  $p_A \approx 1070\text{ hPa}$  (elle est supérieure à la pression atmosphérique).
- ◆ **Étape B** : Une fois la température  $T_B \approx 101\text{ }^{\circ}\text{C}$  atteinte, l'eau rentre en ébullition et des bulles se forment. La vapeur d'eau s'accumule progressivement en haut du ballon. Le volume occupé par la vapeur pousse une partie de l'eau à remonter le long du tube, ce qui produit un léger jet d'eau à la surface. La température et la pression sont constantes au cours de ce changement d'état.
- ◆ **Étape C** : Lorsque le niveau de la vapeur d'eau atteint l'embouchure du tube, celle-ci s'y engouffre en chassant l'eau sur son passage. De l'eau et de la vapeur jaillissent hors du tube, et l'ébullition devient plus importante : le geyser s'emballe. La pression dans le ballon chute jusqu'à  $p_C \approx 1037\text{ hPa}$ , et la température diminue très légèrement au cours de cette étape.
- ◆ **Étape D** : À la fin de l'éruption, de l'eau froide du réservoir retombe dans le ballon et remplit le volume libéré par la vapeur évacuée. La pression augmente en conséquence jusqu'à  $p_D \approx 1070\text{ hPa}$ . Le mélange de l'eau froide avec l'eau chaude du ballon provoque des variations de température, jusqu'à atteindre un équilibre autour de  $T_D \approx 92\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Une fois l'étape D terminée, la température dans le ballon est à nouveau homogène. C'est le retour à l'étape A : le chauffage reprend et un nouveau cycle commence.

## 2.2. Expérience 2 : évolution du cycle avec la température du réservoir

L'eau dans le réservoir est initialement à la température  $T_r = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mais celle-ci n'y est pas maintenue constante contrairement à l'expérience précédente. Au fil des éruptions, l'eau chaude et la vapeur évacuée du ballon sont récupérées par le réservoir, ce qui le réchauffe progressivement. Un exemple du suivi des températures  $T$  dans le

ballon et  $T_r$  dans le réservoir, et de la pression  $p$  sur une dizaine de cycles est présenté en figure 5.

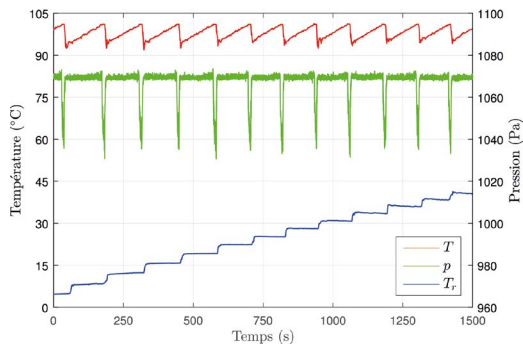


Figure 5 - Évolution de la température et de la pression lorsque  $T_r$  augmente.

Au fur et à mesure de l'augmentation de la température dans le réservoir, les cycles d'éruptions sont de plus en plus courts. Nous avons réalisé cette expérience trois fois, en partant de  $T_r = 0^\circ\text{C}$  pour chacune et en laissant le réservoir se réchauffer progressivement sur une vingtaine de cycles. À partir des courbes obtenues, nous avons mesuré pour chaque cycle (de chaque expérience) la période  $\tau$  en fonction de la température  $T_r$  du réservoir. L'évolution est représentée en figure 6 (chaque couleur correspond à une expérience).

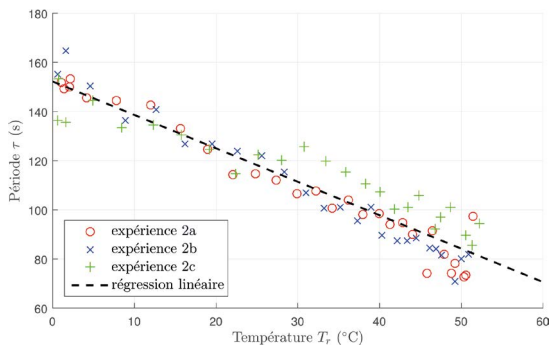


Figure 6 - Évolution de la période des cycles en fonction de la température du réservoir.

La décroissance de la période du geyser est linéaire. En réalisant une régression linéaire de la forme  $\tau = a T_r + b$ , nous aboutissons aux coefficients  $a = -1,36 \pm 0,09 \text{ s}/^\circ\text{C}$  et  $b = 152 \pm 3 \text{ s}$ . On remarque par ailleurs que pour  $T_r = 0^\circ\text{C}$ , on retrouve la période  $\tau_0$  mesurée lors de l'expérience 1.

### 3. INTERPRÉTATION ET MODÉLISATION

Dans cette partie, nous allons expliquer étape par étape les différents résultats obtenus par le biais de la thermodynamique et de l'hydrostatique.

#### 3.1. Étape A : surpression et puissance de chauffage

Lors de l'étape A de chauffage, la pression à l'intérieur du ballon est constante et supérieure à la pression atmosphérique. Cela s'explique par le théorème de Pascal : la surpression induite par la colonne d'eau de hauteur  $h = 58$  cm et de masse volumique  $\rho = 1000$  kg/m<sup>3</sup> s'ajoute à la pression atmosphérique  $p_0 = 1015$  hPa telle que :

$$p = p_0 + \rho gh.$$

D'où une pression théorique  $p = 1072$  hPa, que l'on retrouve expérimentalement avec  $p_A \approx 1070$  hPa.

De cette première étape, on peut également déterminer la puissance fournie par le dispositif de chauffage. Considérons que la puissance  $P_c$  transmise par le chauffe-ballon au système soit constante au cours de cette étape (et donc que les pertes thermiques sont également constantes). L'énergie  $dE_c$  fournie durant un temps  $dt$  au système s'exprime :

$$dE_c = P_c dt = Mc_{eau} dT$$

avec  $M = 500$  g la masse d'eau dans le ballon,  $c_{eau} = 4,181$  J/kg/°C sa capacité calorifique massique et  $dT$  son élévation de température pendant  $dt$ . On en déduit la puissance :

$$P_c = Mc_{eau} \frac{dT}{dt}.$$

L'évolution de  $T$  est linéaire durant la phase de chauffage. Une régression linéaire permet alors de remonter à  $\frac{dT}{dt}$ , d'où on obtient  $P_c = 114 \pm 3$  W.

#### 3.2. Étape B : température d'ébullition

La température d'ébullition de l'eau lors de l'étape B est légèrement supérieure à 100 °C. C'est une conséquence de la surpression, qui va provoquer une élévation de la température d'ébullition suivant la formule de Clapeyron :

$$\frac{dp_{\dot{e}b}}{dT_{\dot{e}b}} = \frac{L_{vap}}{T_{\dot{e}b} \Delta V_m}$$

avec  $p_{\dot{e}b}$  et  $T_{\dot{e}b}$  la pression et la température lors du changement d'état,  $L_{vap} = 40,7$  kJ/mol la chaleur latente de vaporisation de l'eau, et  $\Delta V_m = V_{m,v} - V_{m,e}$  la différence de volume molaire entre la vapeur d'eau et l'eau. Le volume molaire de l'eau liquide ( $V_{m,e} \approx 18$  mL/mol) est négligeable devant celui de la vapeur d'eau (plusieurs dizaines

de litres par mole). Dans l'approximation des gaz parfaits, nous avons :

$$\Delta V_m \approx V_{m,v} = \frac{RT_{\dot{e}b}}{p_{\dot{e}b}}$$

avec  $R$  la constante des gaz parfaits. On aboutit alors à l'équation différentielle suivante :

$$\frac{dp_{\dot{e}b}}{p_{\dot{e}b}} = \frac{L_{vap}}{R} \frac{dT_{\dot{e}b}}{T_{\dot{e}b}^2}.$$

Sachant que l'ébullition de l'eau a lieu à  $T_{réf} = 373,15 \text{ K}$  pour  $p_{réf} = 1013 \text{ hPa}$ , on obtient pour des variations faibles de pression et de température d'ébullition :

$$\Delta T_{\dot{e}b} = \frac{RT_{\dot{e}b}^2}{L_{vap}} \frac{\Delta p_{\dot{e}b}}{p_{\dot{e}b}}.$$

Cette formule conduit à une température d'ébullition  $T_{\dot{e}b}(1072 \text{ hPa}) = 101,7 \text{ }^\circ\text{C}$ , en accord avec les valeurs tabulées. Expérimentalement, l'ébullition est obtenue pour  $T_B \approx 101 \text{ }^\circ\text{C}$ . Nous retrouvons l'augmentation de la température d'ébullition avec la pression. Il faut cependant garder à l'esprit que la mesure de température est effectuée au centre du ballon, alors que l'ébullition se produit sur la surface en contact avec le chauffe-ballon.

### 3.3. Étape C : éruption

Lorsque la vapeur d'eau atteint l'embouchure du tube, celle-ci remonte dans le tube en entraînant l'eau sur son passage. La colonne d'eau n'étant plus présente pour maintenir la surpression, celle-ci tend vers la pression atmosphérique  $p_0 = 1015 \text{ hPa}$ . Une chute de la pression entraîne une baisse de la température d'ébullition suivant la relation de Clapeyron. Cela confère un surplus d'énergie au système, qui se traduit par une accélération de l'ébullition, et un emballement du geyser.

La décroissance de la pression est observée jusqu'à  $p_C \approx 1037 \text{ hPa}$  pour le cycle présenté en figure 3. Le système n'a pas le temps d'atteindre l'état d'équilibre à la pression  $p_0$ , car de l'eau froide du réservoir tombe dans le ballon avant, et le système passe à l'étape D.

### 3.4. Étape D : mélange

L'eau froide contenue dans le réservoir tombe dans le ballon et remplit la partie supérieure précédemment occupée par la vapeur. La colonne d'eau dans le tube s'étant reformée, la pression dans le ballon remonte rapidement jusqu'à  $p = p_0 + \rho gh$ . Le mélange de l'eau froide avec l'eau chaude met plusieurs secondes à s'homogénéiser, puis se stabilise autour de  $T_D \approx 92 \text{ }^\circ\text{C}$ . Le bilan énergétique du mélange de la masse  $m$  d'eau froide à la température  $T_r = 0 \text{ }^\circ\text{C}$  avec la masse  $(M - m)$  d'eau chaude à la température  $T_C \approx 100 \text{ }^\circ\text{C}$  s'écrit :

$$m(T_D - T_r) + (M - m)(T_D - T_C) = 0.$$

On déduit du bilan la masse d'eau froide :

$$m = M \frac{(T_C - T_D)}{(T_C - T_r)}$$

Nous obtenons  $m \approx 40$  g, mais ce résultat n'est pas très précis à cause de l'incertitude sur la mesure de  $T_D$ . Nous allons voir qu'il est possible de remonter à cette masse de façon plus rigoureuse grâce à l'évolution de la période du geyser.

### 3.5. Période des cycles

Lors de la seconde expérience, l'eau du réservoir se réchauffe progressivement au cours des éruptions successives, ce qui raccourcit la période des cycles du geyser. Cette période  $\tau$  peut être séparée en deux phases :

- ◆ un temps de chauffage  $\tau_c$  permettant d'amener l'eau à ébullition (étapes D et A) :
- ◆ un temps d'éruption du geyser  $\tau_e$  (étapes B et C), plus court que le précédent.

Nous avons remarqué que  $\tau_e$  est à peu près constant au cours d'une expérience, et donc indépendant de la température du réservoir  $T_r$ . Nous l'avons mesuré pour plusieurs cycles, et avons obtenu  $\tau_e = 18 \pm 4$  s.

Pour le temps de chauffage  $\tau_c$ , nous allons obtenir son expression en fonction des paramètres du problème. Le système étant chauffé avec une puissance  $P_c$  constante, l'énergie nécessaire pour l'amener de la température  $T_D$  à la fin d'un cycle jusqu'à la température d'ébullition  $T_B = 102$  °C s'exprime :

$$E = P_c \tau_c = M c_{eau} (T_B - T_D)$$

d'où on déduit :

$$\tau_c = \frac{M c_{eau} (T_B - T_D)}{P_c}$$

À partir du bilan énergétique lors du mélange de l'étape D, nous pouvons exprimer  $T_D$  telle que :

$$T_D = T_C + \frac{m}{M} (T_r - T_C)$$

En remplaçant  $T_D$  par cette expression, on retrouve la dépendance linéaire de la période totale  $\tau$  en fonction de la température du réservoir  $T_r$  :

$$\tau = \tau_c + \tau_e = \left( -\frac{c_{eau} m}{P_c} \right) T_r + \left[ \frac{c_{eau} M}{P_c} (T_B - T_C + \frac{m}{M} T_C) + \tau_e \right]$$

À partir du coefficient directeur  $a = -1,36$  s/°C de la régression linéaire, on déduit la masse d'eau  $m \approx 37$  g. Cette valeur est très proche de celle obtenue précédemment lors du mélange. L'interprétation de l'ordonnée à l'origine est plus difficile, car elle dépend fortement des variations de température mesurées dans le ballon.



## CONCLUSION

L'expérience présentée dans cet article montre qu'il est possible de modéliser de façon simple un geyser en laboratoire. Nous avons caractérisé l'évolution de ses cycles en fonction de la température du réservoir, mais il est aussi possible d'étudier l'influence de la puissance de chauffage [2], de la longueur du tube [2] ou de sa profondeur dans le ballon [1]. L'étude de ce système présente donc l'avantage de pouvoir être adaptée plus ou moins quantitativement en fonction du niveau d'enseignement considéré.

Enfin, bien que le comportement thermodynamique décrit soit semblable à celui qui régit les éruptions du Old Faithful, il faut rester conscient que le phénomène des geysers dans la nature est bien plus complexe. Ils sont sensibles à de nombreux paramètres, tels que les flux d'eau dans leurs réservoirs, les contraintes tectoniques ou les connexions avec d'autres réservoirs.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] S. Lasic, "Geyser model with real-time data collection", *European Journal of Physics*, vol. 27, n° 4, p. 995-1005, juin 2006.
- [2] M. Brandenbourger, S. Dorbolo et B. Darbois Texier, "Physics of a toy geyser", *arXiv:1603.04925*, mars 2016.

## Compléments de l'article

*Cet article comporte des compléments nommés :*

- ◆ *Eruption\_ballon.avi*
- ◆ *Eruption\_geyser.avi*

*L'ensemble est disponible sous la forme d'un fichier zippé 09930445.*



**Vincent DE ZOTTI**

*Doctorant au laboratoire de physique*  
Laboratoire junior *Explique-moi la géophysique*  
École normale supérieure de Lyon (ENS de Lyon)  
Lyon (Rhône)



**Antoine GRISART**

*Étudiant en Licence 3 Géosciences*  
Laboratoire junior *Explique-moi la géophysique*  
École normale supérieure de Lyon (ENS de Lyon)  
Lyon (Rhône)

**Charles-Édouard LECOMTE**

*Doctorant au laboratoire de physique*

Laboratoire junior *Explique-moi la géophysique*

École normale supérieure de Lyon (ENS de Lyon)

Lyon (Rhône)

**Paco MAURER**

*Doctorant au laboratoire de physique*

Laboratoire junior *Explique-moi la géophysique*

École normale supérieure de Lyon (ENS de Lyon)

Lyon (Rhône)

**Raphaël MENU**

*Étudiant en Master 1 Sciences de la matière*

Laboratoire junior *Explique-moi la géophysique*

École normale supérieure de Lyon (ENS de Lyon)

Lyon (Rhône)

**Héliane PIOT-DURAND**

*Étudiante en Master 1 Sciences de la matière*

Laboratoire junior *Explique-moi la géophysique*

École normale supérieure de Lyon (ENS de Lyon)

Lyon (Rhône)