

Annexe I :

A. Eruption sans remplissage. Complément du paragraphe VIII.

Pendant une durée de Δt , l'énergie apportée à la cocotte minute par la plaque vaut $\Delta W = P_{\text{plaque}} \cdot \Delta t$. Cette énergie sert à vaporiser $\Delta m = \frac{\Delta W}{L}$ où L est la chaleur latente de vaporisation, ce qui correspond à un volume :

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho_{\text{vapeur}}} = \frac{P_{\text{plaque}} \cdot \Delta t}{L \cdot \rho_{\text{vapeur}}}$$

et $\Delta V = S \cdot \Delta l$ où $S = \pi \cdot R^2$ est la section du tube et Δl la longueur du tube occupé par le volume ΔV . On en déduit : $\frac{P_{\text{plaque}} \cdot \Delta t}{L \cdot \rho_{\text{vapeur}}} = S \cdot \Delta l$. A l'équilibre cette vapeur produite va être éjectée par le tube en un temps Δt . Elle va donc parcourir Δl en Δt ce qui correspond à une vitesse :

$$v = \frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{P_{\text{plaque}}}{L \cdot \rho_{\text{vapeur}} \cdot \pi \cdot R^2}$$

Cette vitesse d'éjection de la vapeur par le tube crée une pression dynamique $P_{\text{dyn}} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{vapeur}} \cdot v^2$ qui peut, si elle est suffisante, compenser la pression hydrostatique $P = \rho_{\text{eau}} \cdot g \cdot h_{\text{bassine}}$ produite par l'eau de la bassine au-dessus de la sortie du tube.

Un régime d'ébullition continue (sans remplissage de la cocotte minute) apparaît si $P_{\text{dyn}} > \rho_{\text{eau}} \cdot g \cdot h_{\text{bassine}}$. Il faut alors une puissance de chauffe :

$$P_{\text{plaque}} > L \cdot \pi \cdot R^2 \sqrt{2 \cdot \rho_{\text{eau}} \cdot \rho_{\text{vapeur}} \cdot g \cdot h_{\text{bassine}}}$$

pour empêcher le remplissage.

B. La température comme une suite. Complément du paragraphe III.

Dans ce paragraphe nous allons modéliser l'évolution de la température de la cocotte au fur et à mesure des remplissages successifs de la cocotte minute. Pour cela nous utilisons des suites récurrentes. Ainsi à chaque indice n correspond la fin d'une éruption. En reprenant le résultat du §III, nous pouvons écrire :

$$(T(E))_{n+1} \approx \frac{(M - \Delta M) \cdot T(C) + \Delta M \cdot (T_{\text{bassine}})_{n+1}}{M}$$

La température de la bassine à la fin d'une éruption dépend bien sûr de la température de la bassine à la fin de l'éruption précédente, de l'eau reçue à la température d'ébullition entre T(A) et T(B) mais aussi de la quantité de vapeur reçue par la bassine pendant la phase 4 (Fig.12) qui est de durée variable. Ainsi nous obtenons le système :

$$\begin{cases} (T_{\text{bassine}})_{n+1} \approx a \cdot (T_{\text{bassine}})_n + b \\ (T(E))_{n+1} \approx c \cdot (T_{\text{bassine}})_{n+1} + d \end{cases}$$

Nous avons simulé ces deux suites avec pour conditions initiales $(T(E))_0 = 71+273$ et $(T_{\text{bassine}})_0 = 20.4+273$. Les résultats des deux suites sont marqués avec des étoiles à Fig. 25.

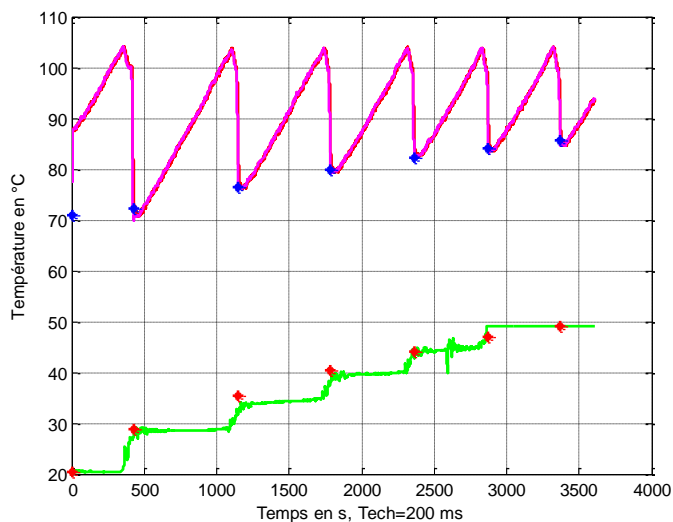


Figure A1.1 : Comparaison des éruptions du geyser de 2,2 m et de la suite récurrente.

En rose la température de la cocotte minute et les étoiles bleues correspondant à $(T(E))_n$, en vert la température de la bassine et les étoiles rouges correspondant à $(T_{\text{bassine}})_n$.

La suite donne un résultat qui s'approche des mesures. Le modèle est assez simple mais il faudrait l'améliorer pour plus de précision.

Annexe II :

Détails de l'expérience avec la colonne de 6 m.



Figure All.1 : contrepoids pour maintenir l'équilibre de la bassine.



Figure All.2 : bassine réceptionnant l'eau à la verticale de la cocotte-minute.

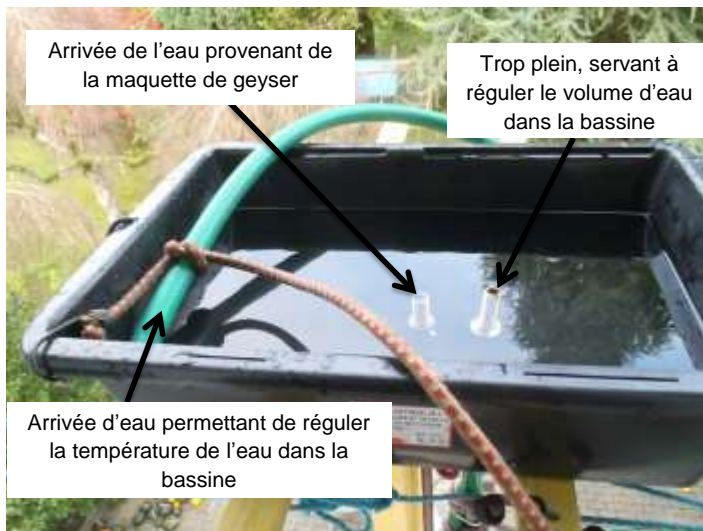


Figure All.3 : vue supérieure du montage.



Figure All.4 : vue du dessous de la bassine avec les trois tuyaux.



Figure All.5 : dispositif pour la prise de mesures avec Latis pro.



Figure All.6 : capteur de température et joints d'étanchéité.



Figure All.7 : vue globale du système de prise de mesures.

Annexe III :

Quelques photos de l'éruption de notre geyser avec colonne de 6 m.



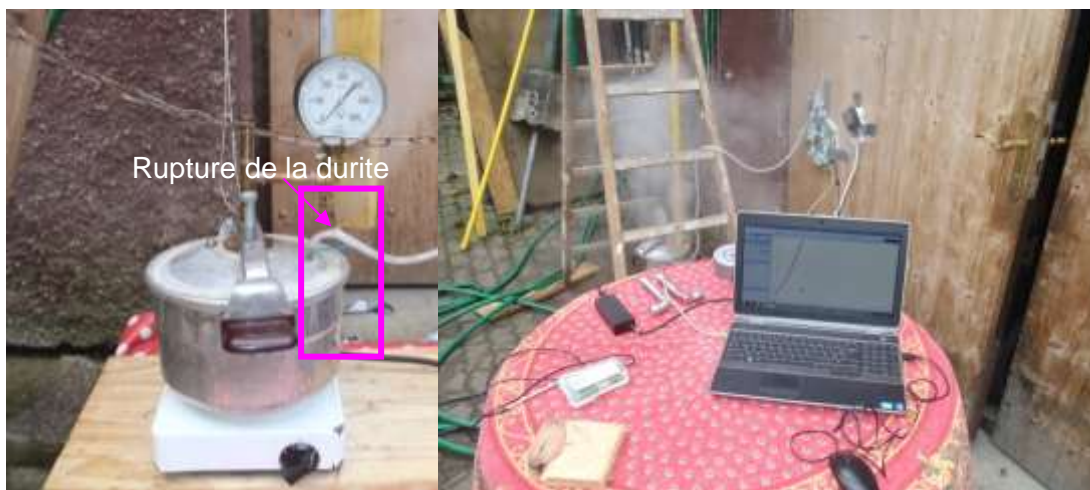
Figure AIII.1, AIII.2 : la vapeur remonte dans la colonne et l'eau jaillit dans la bassine au début de l'ébullition explosive.



Figure AIII.3 : éruption nocturne.



Figure AIII.4 : apparition d'un vortex lors de la dépression dans la cocotte-minute.



Figures AIII.5 et AIII.6 : mesure de pression dans la cocotte minute fermée.

Annexe IV :

Nous souhaitons préciser ici les différentes caractéristiques des geysers que nous avons pris en compte lors de la réalisation de notre maquette.

I. Analyse du phénomène

1. Les geysers

Par définition, un geyser est une source d'où jaillit de manière intermittente de l'eau très chaude et de la vapeur d'eau sous forte pression. Les éruptions de geyser peuvent également se faire avec des dégagements de soufre. Il s'agit d'un phénomène physique naturel impressionnant : le plus grand geyser du monde provoque des éruptions d'eau qui peuvent monter jusqu'à 80 mètres de haut.

Le terme « geyser » a été donné à cause d'un célèbre geyser islandais nommé *Geysir*.

2. Les trois conditions naturelles pour avoir des geysers

Pour permettre la formation d'un geyser, trois conditions sont nécessaires et doivent être réunies : de l'eau souterraine, combinée à une forte source de chaleur et à un réseau de galeries approprié dans des roches très résistantes. Etudions ces conditions de plus près.

a. Première condition : être dans une région volcanique

En superposant la localisation des geysers dans le monde avec le découpage des plaques tectoniques, on remarque que les geysers sont principalement présents à proximité de zones de contacts entre deux plaques tectoniques (Fig.AIV.1).

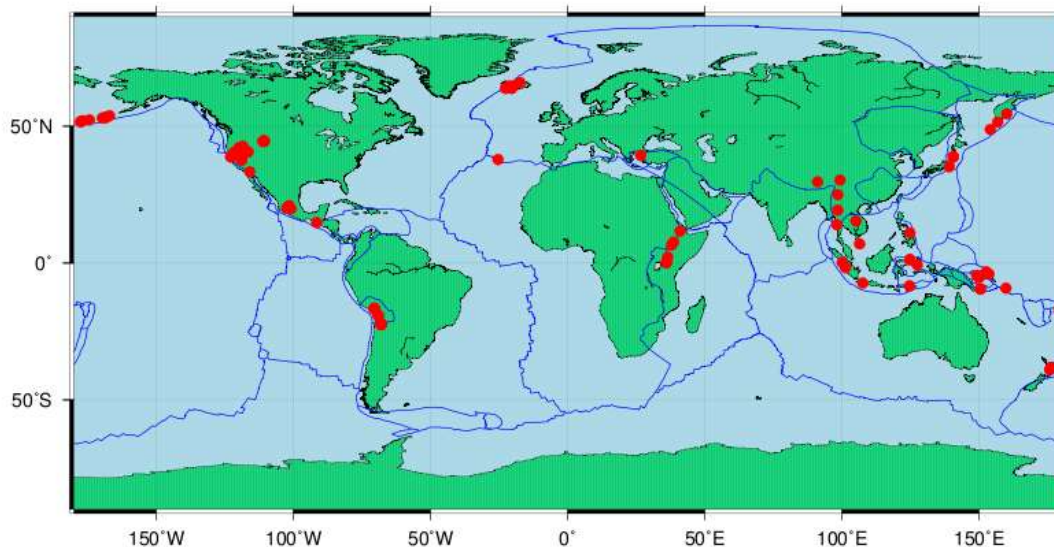


Figure AIV.1: répartition des principaux geysers répertoriés en activité, ou inactifs depuis peu, dans le monde (●). D'après [1].

Les plaques tectoniques se déplacent à cause de l'intense chaleur qui règne dans la terre, ce qui provoque une activité volcanique qui peut entraîner l'apparition de geysers. Néanmoins, on peut voir que certains geysers ne se situent pas à la frontière entre deux plaques ; cela s'explique par un volcanisme de point chaud (c'est le cas par exemple du Yellowstone et de l'Islande).

b. Deuxième condition : avoir un système hydrothermal particulier

L'eau dont un geyser a besoin pour fonctionner vient principalement de l'atmosphère, des précipitations, des eaux souterraines et des cours d'eau avoisinant le geyser.

Le fonctionnement d'un geyser met en jeu des poches d'eau souterraines qui se remplissent et se vident au gré des éruptions (Fig.AIV. 2) par l'intermédiaire de cheminées conduisant l'eau et la vapeur à la surface.

Plus l'eau est située en profondeur, plus elle sera chaude. Cette augmentation de température est de l'ordre de $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (gradient géothermique) à Strasbourg. Pour les zones volcaniques, le gradient géothermique est beaucoup plus élevé et peut atteindre des valeurs de l'ordre de $150^{\circ}\text{C}/\text{km}$.

c. Troisième condition : avoir des roches résistantes

Pour avoir un geyser, il est indispensable que le sous-sol ait une structure rocheuse résistante (comme la silice par exemple). En effet, les éruptions font intervenir de l'eau à très forte pression ; pour maintenir un geyser en état, il faut que sa géométrie sous-terrainne ne soit pas modifiée par les éruptions et donc que la roche qui la constitue soit très résistante.

On peut ainsi affirmer que les geysers dépendent de trois conditions précises très rarement réunies. De plus les geysers ont une durée de vie limitée car souvent une des conditions disparaît et c'est précisément cela qui les rend si fragiles. Lorsque ces conditions sont modifiées les geysers risquent de se dégrader et donc de s'éteindre. Les causes principales de destruction sont les causes naturelles, l'exploitation géothermique et le vandalisme lié au tourisme [3].

II. Compréhension / Etude du phénomène

1. Les geysers, un fonctionnement particulier.

Les geysers sont des phénomènes naturels qui reposent sur un fonctionnement physique ; en effet comment serait-il possible de projeter de l'eau bouillante à des dizaines de mètres de hauteur sans un moteur naturel ?

Etude thermodynamique expérimentale simplifiée des phases de fonctionnement d'un geyser particulier : le type bassin.

Nous allons maintenant essayer de comprendre comment toutes ces caractéristiques amènent le geyser à se distinguer des autres sources d'eau chaudes en entrant en éruption à des intervalles de temps plus ou moins réguliers. Nous verrons aussi comment se passe une éruption.

Pour commencer, intéressons-nous à l'eau, qui, située en profondeur, est soumise à une forte surpression hydrostatique

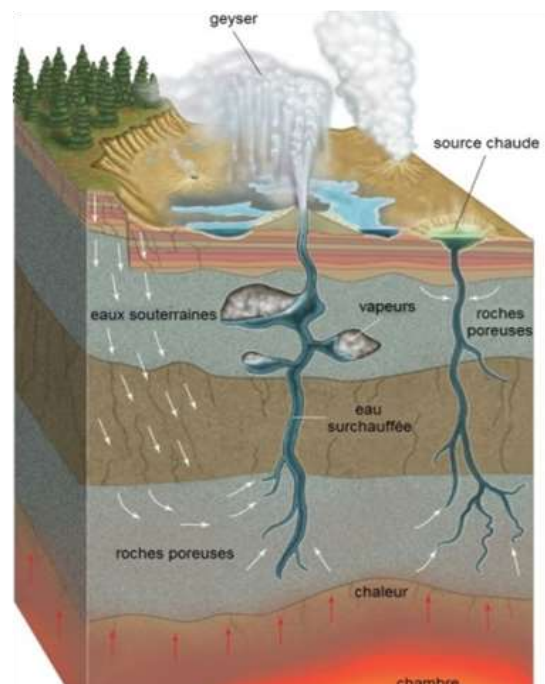


Figure AIV.2 : système hydrothermal propice à la formation de geyser. D'après [1]

proportionnelle au poids de la colonne d'eau présente dans la cheminée et donnée par la formule $P=\rho gh$, où ρ est la masse volumique de l'eau ($1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), g l'accélération de la pesanteur terrestre (environ $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) et h la hauteur de la colonne d'eau. Par exemple, nous pouvons calculer la surpression exercée dans la cavité d'un geyser située à 80 m de profondeur, soit $800\,000 \text{ Pa}$ ou 8 bar de surpression, soit une pression totale de 9 bar en ajoutant la pression atmosphérique.

Il faut se rappeler que l'eau prend différentes formes suivant le couple pression-température qui lui est associé (Fig.AIV.3). Ainsi, à pression atmosphérique normale (1 bar), l'eau bout à 100°C . Mais dans la chambre du geyser, l'eau est soumise à une pression plus forte et doit donc atteindre une température plus élevée pour se vaporiser. On retrouve le même phénomène dans les cocottes minutes qui possèdent une enceinte pressurisée ; la soupape ne permet à la vapeur de sortir qu'au-delà d'une certaine pression ($1,5 \text{ bar}$), l'eau peut donc bouillir à une température plus élevée que 100°C ; ainsi les aliments sont cuits à une température supérieure à 100°C plus rapidement (environ 115°C).

Programme ThermoVapor
<http://www.thermexcel.com/french/index.htm>

Pression absolue	Température	Volume massique vapeur	Masse volumique	
			Vapeur	Eau condensée
bar	$^\circ\text{C}$	m^3/kg	kg/m^3	kg/m^3
7	164,96	0,2727	3,667	902,37
7,5	167,76	0,2554	3,915	899,57
8	170,42	0,2403	4,162	896,88
8,5	172,94	0,2268	4,409	894,28
9	175,36	0,2148	4,655	891,79
9,5	177,67	0,2040	4,901	889,37
10	179,88	0,1943	5,147	887,02

Tableau AIV.1 : température d'ébullition de l'eau en fonction de la pression absolue. D'après [9]

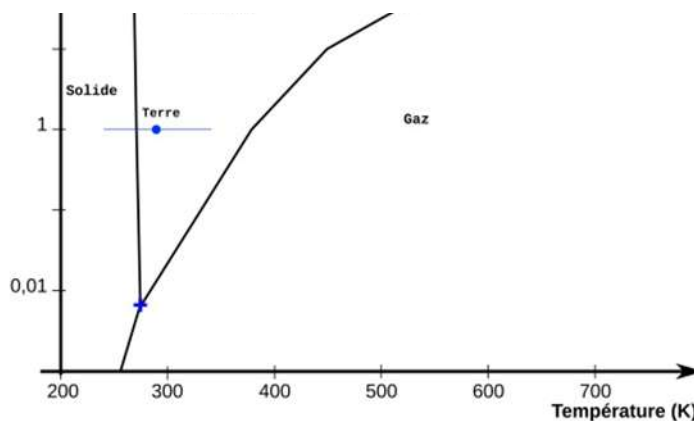


Figure AIV.3 : le diagramme de phase de l'eau. [11]

Pour le geyser, la colonne d'eau présente dans la cheminée exerce une forte pression sur la chambre, ce qui va changer le point d'ébullition de l'eau (température à laquelle la première bulle de vapeur se forme) selon le diagramme de phase de l'eau. Nous pouvons déterminer le point d'ébullition de l'eau présente dans la chambre à 80 m de profondeur grâce à des tables qui reprennent les valeurs du diagramme de phase de l'eau. Ainsi pour une pression de 9 bar nous trouvons une température d'ébullition de 175°C environ. Imaginons la ou les chambres remplies d'eau, ainsi que la cheminée. Après une phase de chauffe pouvant durer de quelques minutes à quelques heures, voire plusieurs jours, l'eau de la chambre a atteint la température d'ébullition qui correspond à la pression de 9 bar ; des bulles de vapeur vont se former et remonter dans la cheminée pour arriver à l'air libre : c'est le début de l'éruption et celle-ci peut durer plusieurs minutes. Mais lorsque la première bulle remonte, elle transporte avec elle de l'eau à 175°C . En remontant, cette eau liquide à 175°C est alors soumise à une pression moins forte ($P=\rho gh$ et h diminue) qui va lui permettre de passer à l'état gazeux, créant ainsi d'autres bulles de vapeur. Ces bulles de vapeur vont alors continuer à remonter, en transportant de l'eau très chaude qui se transforme en vapeur dès que la pression hydrostatique devient plus faible que la pression de

vapeur saturante, formant ainsi d'autres bulles et ainsi de suite. Par ailleurs la colonne n'est plus remplie d'eau mais d'un mélange eau et vapeur moins dense que l'eau. La pression dans la chambre chute et permet à une grande quantité d'eau de bouillir rapidement. Cette ébullition est dite « ébullition explosive », elle va faire remonter à la surface une grande quantité de vapeur qui va éjecter toute l'eau de la colonne formant ainsi une éruption. L'éruption se finit lorsqu'il n'y a plus d'eau dans la ou les chambres ou lorsque l'eau devient trop froide et ne se vaporise plus (l'eau a perdu de la chaleur en s'évaporant). La fin de l'éruption est aussi le début du remplissage ; celui-ci s'effectue soit par des canaux souterrains soit par la cheminée où retombe l'eau éjectée lors de l'éruption. Le cycle éruptif recommence si les trois éléments essentiels à son fonctionnement (eau, chaleur, cavité souterraine et cheminée) sont encore présents.

Dans son fonctionnement, le geyser est donc disposé à avoir un fonctionnement plus ou moins périodique.

2. Identification des phases d'éruption du geyser sur un geyser réel : le Strokkur

Voici en photographie (Fig.AIV.4) les différentes phases visibles de l'éruption du geyser Strokkur : ces phases sont espacées de quelques dixièmes de secondes. Bien sûr nous ne voyons que la partie à l'air libre mais nous imaginons bien que « le moteur du geyser » est sous terre.

(1) : L'eau de la chambre et de la colonne monte poussée par les bulles de vapeur de l'ébullition explosive.

(2) : Il apparaît à la surface une grosse bosse d'eau surchauffée dans un état métastable.

(3) : L'eau surchauffée se vaporise très rapidement au contact de l'air à la pression de 1 bar. L'ébullition explosive se poursuit.

(4) : Toute l'eau de la colonne s'est vaporisée.

(5) : L'éruption est terminée, la colonne se remplit. L'eau est comme aspirée par la colonne, il semble donc qu'il y ait une dépression dans la chambre.

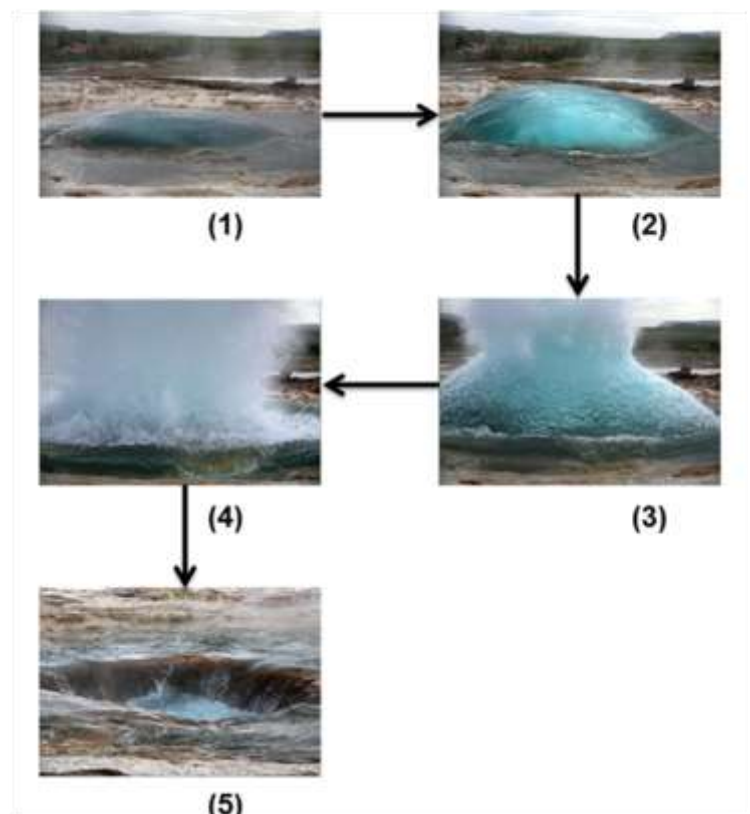


Figure AIV.4: cinq phases d'une éruption du geyser Strokkur en Islande [8]

Une fois la colonne et la chambre remplie, le cycle peut recommencer.