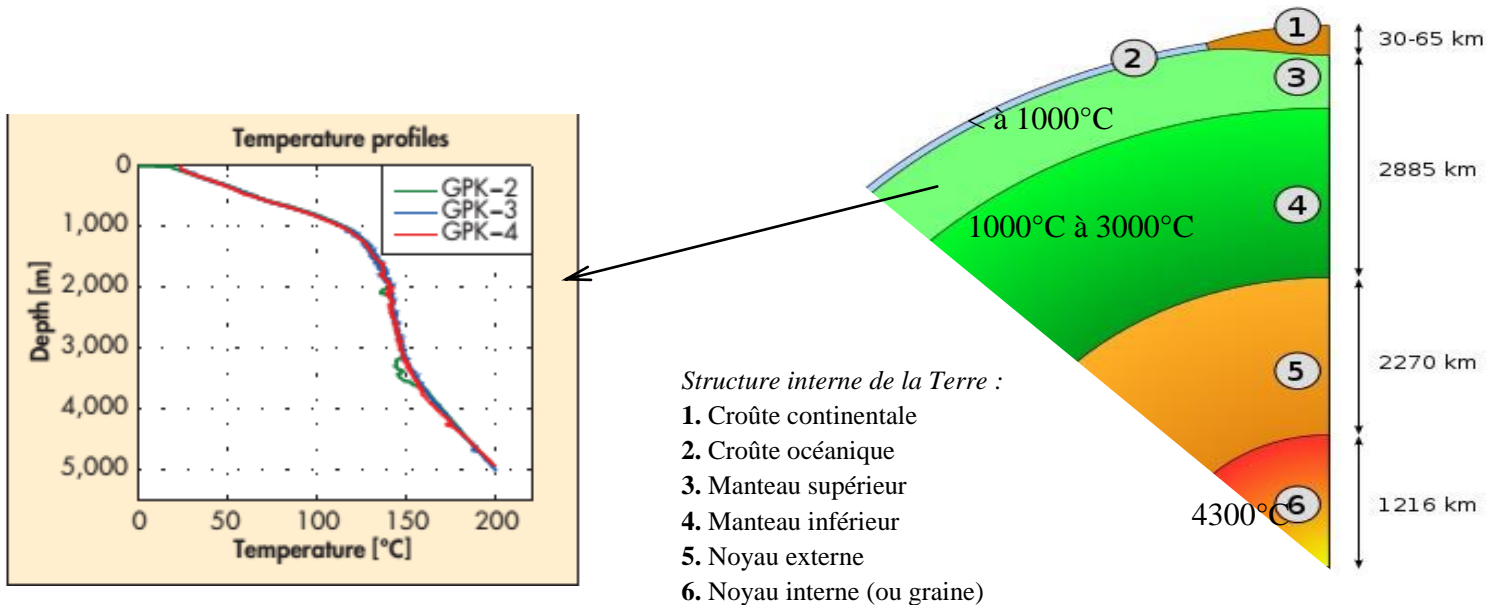


## Energie géothermique

L'énergie géothermique (du grec géo = la terre et thermie = la chaleur) donc la géothermie est l'utilisation de la chaleur de la terre pour produire de l'énergie. La terre renferme une intense chaleur en son noyau tant que sa température est 4300°C. Le manteau qu'il entoure (1000 à 3000°C) est recouvert de l'écorce (Croûte) dont la température varie selon la composition chimique des roches. Le gradient de changement moyen est de 30°C/Km (dans les zones stables) et peut être 10 fois plus important et atteindre ainsi une valeur de 500°C/Km dans les zones actives (comme L'Islande)



## Un peu d'histoire

Ce sont les peuples du centre de l'Italie qui ont exploité les sources chaudes en premier : Ils développèrent des systèmes de bains thermaux. Les romains ont perfectionné ces bains ensuite : ils créaient des établissements constitués d'une succession de salles allant de la plus chaude à la plus froide. Après l'an 1000, cette tradition de balnéothérapie (=hydrothérapie) s'est répandue dans les pays arabes et en Islande. D'autres régions s'y intéressent aussi : les îles du Japon, la Grèce, la Turquie, le Mexique....Quelques années après viennent les systèmes de tuyaux réalisés en bois qui permet d'acheminer l'eau des sources chaudes vers les habitations pour qu'elle serve à quelques usages «industriels» comme le lavage de la laine et des peaux.

Le 19ème siècle marque le début industriel de la géothermie. Malgré ça la géothermie ne représente actuellement que 0,4% de la consommation mondiale d'électricité, elle est ainsi la quatrième source d'électricité renouvelable.

Les principales régions productrices sont situées dans des zones volcaniques, en Amérique du Nord et en Asie. En 2010, le monde comptabilise plus de 350 installations géothermiques productrices d'électricité. Leur puissance totale était estimée à 10700 MW, contre 8000 MW en 2000. Les principaux producteurs mondiaux sont les États-Unis, les Philippines, l'Indonésie, le Mexique, l'Italie, la Nouvelle-Zélande, l'Islande et le Japon.

Contrairement aux énergies solaire et éolienne qui dépendent des conditions météorologiques, la géothermie peut donner de l'électricité 24/24, mais les centrales géothermiques ne peuvent reposer que sur des zones chaudes, et ces zones occupent moins de 10% de la surface terrestre, à la différence des centrales solaires et éoliennes constructibles presque partout.

## La production géothermique

Seulement une petite fraction des ressources géothermiques à haute température sont convenables à produire de l'électricité. Les centrales géothermiques actuelles peuvent fonctionner selon plusieurs cycles thermodynamiques le cycle le plus simple est le cycle de vapeur directe (i.e la vapeur extraite au niveau du puits de production propulse la turbine avant qu'elle soit rejetée dans l'atmosphère ou dans un condenseur).

### Centrale à flash unique :

Dans une centrale à flash unique (schéma) la pression du fluide géothermique se fait diminuée jusqu'à une valeur spécifique dans la chambre de Flash, Le résultat (Mélange à pression adéquate) est séparé alors dans un séparateur en liquide et vapeur, la vapeur est canalisée vers la turbine alors que le liquide est orienté vers la sortie du condenseur pour qu'il soit réinjecté de nouveau dans le puit d'injection.

L'analyse thermodynamique d'une centrale à flash est similaire à l'étude du cycle de Rankine ;

Au niveau de la turbine en négligeant l'énergie potentielle et cinétique de la vapeur on écrit :

$$\dot{W}_{out} = \dot{m}_3 (h_3 - h_4)$$

L'efficacité de la centrale sera alors :

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{out}}{\dot{E}_{in}}$$

L'énergie fournie à l'installation est l'énergie géothermique qui représente le produit du débit massique  $\dot{m}_1$  donné par le puits de production, par la différence d'enthalpie du fluide à l'état géothermique et un état de référence (aux conditions environnementales) soit :

$$\dot{E}_m = \dot{m}_1 (h_1 - h_0)$$

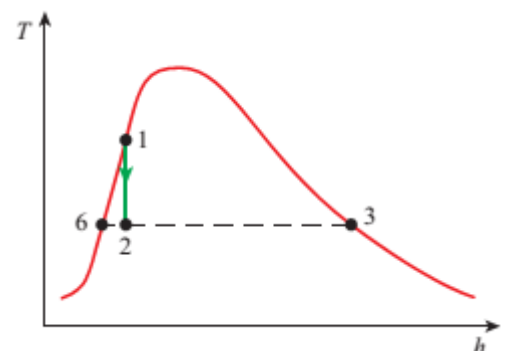
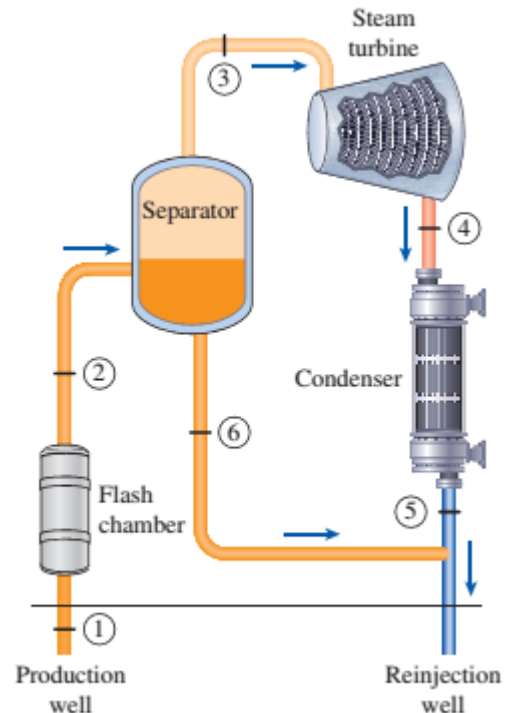
L'enthalpie aux conditions environnementales peut être prise égale à l'enthalpie de saturation à 25°C c'est-à-dire :  $h_0 = h_f @ 25^\circ C$

$$\text{Donc : } \eta_{th} = \frac{\dot{W}_{out}}{\dot{E}_m} = \frac{\dot{m}_3 (h_3 - h_4)}{\dot{m}_1 (h_1 - h_0)}$$

Or, l'énergie totale du fluide géothermique  $\dot{E}_m$  est en fait divisée en une énergie pulsatrice de la turbine  $\dot{W}_{out}$  et une autre rejetée  $\dot{E}_{out}$  telle que :

$$\dot{E}_{out} = \dot{m}_6 (h_6 - h_0) + \dot{m}_4 (h_4 - h_0)$$

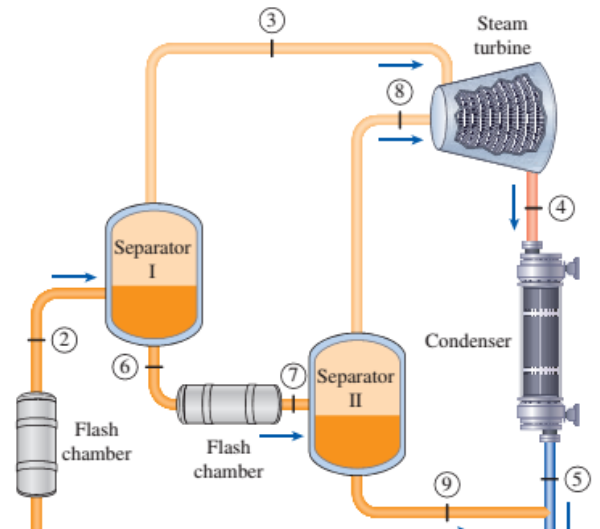
Le processus de Flash 1—2 dans la chambre de Flash s'effectue à enthalpie constante



## Centrale Double Flash

Dans une centrale à double flash le fluide géothermique sortant du premier séparateur est accueilli dans une deuxième chambre de Flash où on réduit sa température et sa pression. La vapeur ainsi résultante du processus est canalisée vers l'étage de basse pression de la turbine pour améliorer la production électrique. L'analyse thermodynamique est similaire à celle faite pour une centrale mono flash. Dans cette configuration l'énergie produite par la turbine est due à la détente de deux vapeurs qui sont rentrées aux états 3 et 8 l'efficacité sera alors :

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{out}}{\dot{E}_{in}} = \frac{\dot{m}_3(h_3 - h_4) + \dot{m}_8(h_8 - h_4)}{\dot{m}_1(h_1 - h_0)}$$

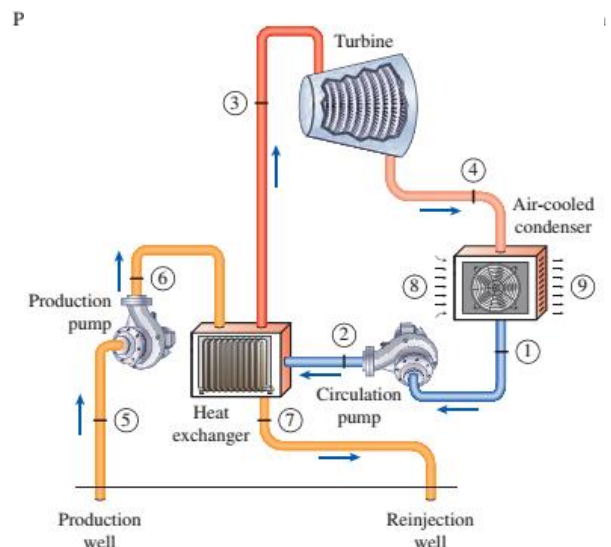


## Cycle Binaire

Lorsque la pression ou la température en sortie de puits de production sont basses il ne devient plus possible de faire appel à des cycles de détente directe ou à Flash, on utilise alors un deuxième fluide thermodynamique (Fluide binaire) tels que L'isobutane, le pentane le R114 qui ont des basses température d'ébullition. Le fluide binaire est complètement vaporisé et surchauffé par de l'eau géothermique dans un échangeur avant qu'il soit détendu dans la turbine et condensé en fin dans un deuxième échangeur. En utilisant le points schématisés on écrit le rendement de la centrale comme suit :

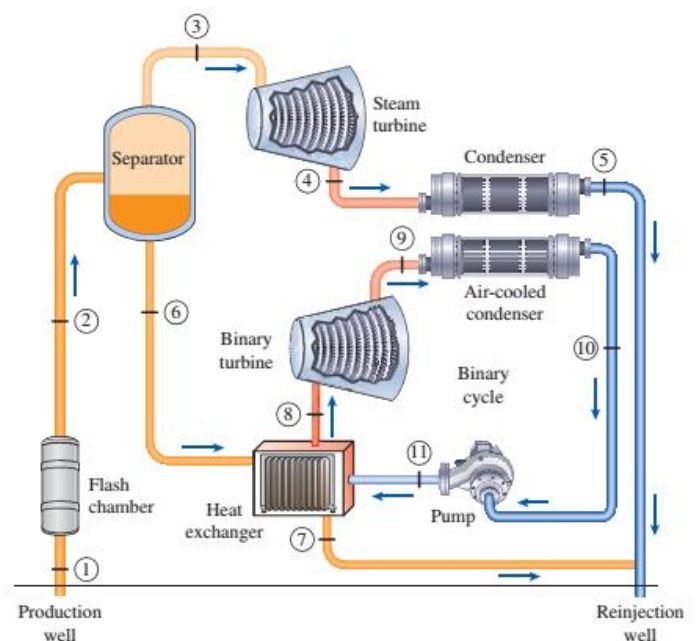
$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\dot{E}_{in}} = \frac{\dot{W}_{turb} - \dot{W}_{pomp} - \dot{W}_{vent}}{\dot{E}_{in}}$$

Avec :  $\dot{E}_{in} = \dot{m}_5(h_5 - h_0)$  ;  $\dot{W}_{turb} = \dot{m}_3(h_3 - h_4)$  ;  $\dot{W}_{pomp} = \dot{m}_1(h_2 - h_1)$



## Cycle combiné (Flash /Binaire) :

Afin de profiter des avantages de chaque procédé une association des deux techniques a été mise en application schéma. La portion liquide du mélange géothermique servira de gain de chaleur pour le cycle binaire alors que la portion de vapeur propulse la turbine pour produire de l'énergie. L'énergie est obtenue de la turbine à vapeur et la turbine du cycle binaire. Le liquide géothermique est réinjecté au sol à une basse température état 7.



On écrit ainsi le rendement du groupe :

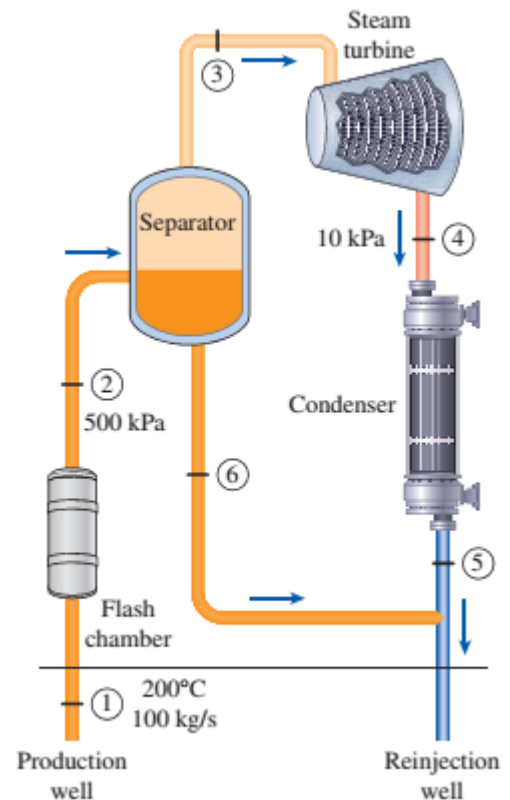
$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\dot{E}_{in}} = \frac{\dot{W}_{turb} - \dot{W}_{pomp} - \dot{W}_{vent}}{\dot{E}_{in}}$$

$$= \frac{\dot{m}_3(h_3 - h_4) + \dot{m}_8(h_8 - h_9) - \dot{W}_{pomp} - \dot{W}_{vent}}{\dot{m}_1(h_1 - h_0)}$$

### Application :

Un débit de 100 kg/s d'eau géothermique à 200°C est extrait d'un puits de production. Supposons que ce débit effectuera un cycle mono flash (figure ci-contre). Le condenseur est maintenu à la pression 10kPa et le rendement isentropique de la turbine est de 83%.

1. Quelle est la masse de vapeur d'eau qui rentre dans la turbine
2. Déterminer la puissance produite par la turbine.
3. Déduire le rendement de la centrale.



### Solution :

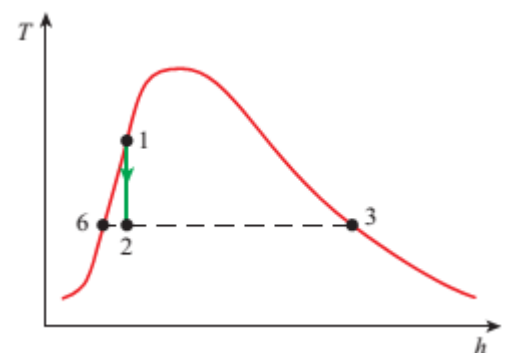
Puisque à l'entrée de la chambre de flash on a de l'eau à l'état saturé **1** qui se trouve à une température de  $T_1=200^\circ\text{C}$  ; cette température correspond à une pression de  $P_1=1554.9 \text{ kPa}$ .

À travers cette chambre il effectuera une évolution isenthalpique  $h_1=h_2=852.26 \text{ kJ/kg}$ . Et Il sortira de cette chambre sous forme de mélange à la pression  $P_2=500\text{kPa}$  et  $T_2=151,83^\circ\text{C}$  (on note que :  $T_2=T_3=T_6$  et  $P_2=P_3=P_6$ )

Nous lisons sur les tables de la vapeur d'eau les deux enthalpies  $h_6=(\text{enthalpie du liquide saturé @ } T_2)=640.09\text{kJ/kg}$

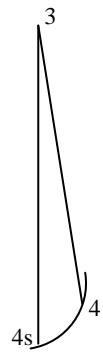
Et  $h_3=(\text{enthalpie de la vapeur saturante @ } T_2)=2748.1\text{kJ/kg}$

Nous lisons aussi des tables l'entropie au point **3**  $S_3=6.8207 \text{ kJ/kg}$  cette entropie est égale exactement à l'entropie du point **4s** (sortie isentropique de la turbine) on déduit alors, d'après les tables, (@  $S=6.8207 \text{ kJ/kg}$  et  $P=10\text{kPa}$ ) que



point 4

$$\left. \begin{array}{l} s_{4s} = 6.8207 \text{ kJ/kg.K} \\ s_{4sv} = 8.1488 \text{ kJ/kg.K} \\ s_{4sl} = 0.6492 \text{ kJ/kg.K} \end{array} \right\} \Rightarrow x_4 = \frac{s_4 - s_{4l}}{s_{4v} - s_{4l}} = 0.823$$



Alors;  $h_{4s} = x_4(h_{4v} - h_{4l}) + h_{4l} = 0.823(2583.9 - 191.81) + 191.81 = 2160.2 \text{ kJ/kg}$

Et utilisons la définition du rendement isentropique de la turbine on définit l'enthalpie réelle à la sortie de la turbine :

$$\eta_{turb} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} = 0.83 \text{ Ce qui donne ;}$$

$$h_4 = h_3 - 0.83(h_3 - h_{4s}) = 2748.1 - 0.83(2748.1 - 2160.2) = 2260.1 \text{ kJ/kg} .$$

On définit aussi le titre de vapeur en 2 (après flashage) comme suit:  $h_2 = (1 - x_2)h_6 + x_2h_3$  ; Ce qui

$$\text{donne } x_2 = \frac{h_2 - h_6}{h_3 - h_6} = \frac{852.26 - 640.09}{2748.1 - 670.09} = 0.102$$

Puisque le débit au point 2 (=100 kg/s) rentrant au séparateur va être divisé en débit de vapeur canalisée vers la turbine et un débit de liquide. Le débit de vapeur sera :  $\dot{m}_3 = x_2\dot{m}_1 = 0.102 \times 100 = 10.2 \text{ kg/s}$  ;

$$\text{Le travail fourni par la turbine : } \dot{W}_{out} = \dot{m}_3(h_3 - h_4) = 10.2(2748.1 - 2260.1) = 4977.6 \text{ kW} ;$$

Le rendement thermique de la centrale ;  $\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{out}}{\dot{E}_{in}} = \frac{\dot{W}_{out}}{\dot{m}_1(h_1 - h_0)}$  avec  $h_0$  l'enthalpie de référence égale

l'enthalpie du liquide saturé @ 25°C soit  $h_0 = 104.83 \text{ kJ}$  ; donc

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{out}}{\dot{m}_1(h_1 - h_0)} = \frac{4977.6}{100(852.26 - 104.83)} = 0.0665 = 6.65\%$$

Ce rendement maigre témoigne de la faible exploitation de l'énergie géothermique disponible; il est très petit en le comparant au rendement de Carnot =37%