

Les experts en physico-chimie

Le système hydrothermal

Problème : d'où vient l'eau chaude des sources d'Escaldes ?

1) Flux de chaleur et gradient géothermique

Une faible partie de la chaleur interne de la Terre est le produit de sa formation par accréation il y a 4,55 milliards d'années.

Mais la chaleur interne est due essentiellement aux **désintégrations d'éléments radioactifs** (uranium, thorium, potassium). Cela correspond à **90% de l'énergie dissipée**.

La Terre se refroidit...

En effet la chaleur interne de la Terre est lentement dissipée en surface.

Dans la partie supérieure de la croûte terrestre la chaleur diffuse par conduction thermique dans les roches. Le **flux thermique** par unité de surface est estimé à **80 mW. m⁻²** (milliwatt par m²) en moyenne à la surface du globe (mais très variable selon les lieux).

Dans le sous sol « proche » (sur quelques kilomètres de profondeur) le **gradient géothermique** $\frac{dT}{dz}$ est à peu près constant et estimé à **30 degrés par kilomètre**. Il est déterminé par des mesures de températures précises dans des forages.



Vérification du gradient thermique pour un massif granitique (simplifié !)

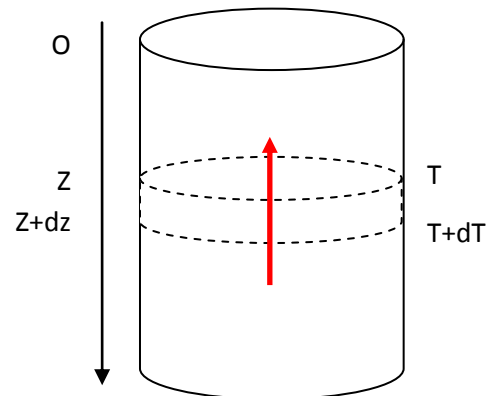
Loi de Fourier :

Le flux de chaleur est proportionnel au gradient de température :

$$\Phi = \lambda S \frac{dT}{dz}$$

λ est la conductivité thermique du milieu concerné, ici le granite supposé « homogène » :

$$\lambda = 2,8 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$



Evaluer le gradient thermique (supposé constant) dans ce granite simplifié.



La température maximum atteinte par les eaux d'Escaldes au cours de leur cheminement dans le sous sol est estimée à 80 ± 5 degré.

Evaluer la profondeur atteinte par les eaux d'Escaldes.

2) Zone de recharge des eaux d'Escaldes

L'analyse isotopique de l'eau permet d'estimer l'altitude de la zone de recharge du système hydrothermal (zone à partir de laquelle l'eau s'infiltré dans le sous-sol).



Les isotopes stables :

Oxygène	hydrogène
^{16}O (99.63%)	^1H (99.9852%)
^{17}O (0.0375%)	^2H (0.0148%)
^{18}O (0.1995%)	

On définit le rapport isotopique R comme celui de l'isotope rare sur l'isotope abondant, par exemple :

$$R_{18} = \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}$$

On définit les variations par rapport à un rapport standard qui est celui de l'eau de mer à 25°C appelé SMOW (Standard Mean Ocean Water) : $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{SMOW}} = 2,0052 \cdot 10^{-3}$ et on calcule une variation relative (en pour 1000) par exemple :

$$\delta_{18} = \frac{^{18}R - ^{18}R_{\text{SMOW}}}{^{18}R_{\text{SMOW}}} \times 1000$$

Ce rapport isotopique est (légèrement) variable, en particulier au cours des changements d'état de l'eau. **Les molécules les plus lourdes sont moins volatiles et donc se concentrent dans les phases condensées (eau liquide, neige, glace) au cours des changements d'états (condensation de la vapeur d'eau en pluie ou neige...).**

Il est alors démontrable, et constaté expérimentalement, que l'altitude des précipitations a une influence sur le rapport isotopique et donc sur la valeur de δ .

Dans la région la variation de δ_{18} en fonction de l'altitude est estimé entre - 0,15 et - 0,18 pour 100 mètres.

La comparaison des eaux de pluie d'Andorra la Vella et des eaux thermales d'Escaldes a donné les valeurs moyennes annuelles suivantes : *(valeurs reconstituées, en l'absence de données précises)*

Eaux de pluie Andorra la Vella : - 9,35 > δ_{18} > - 10,92

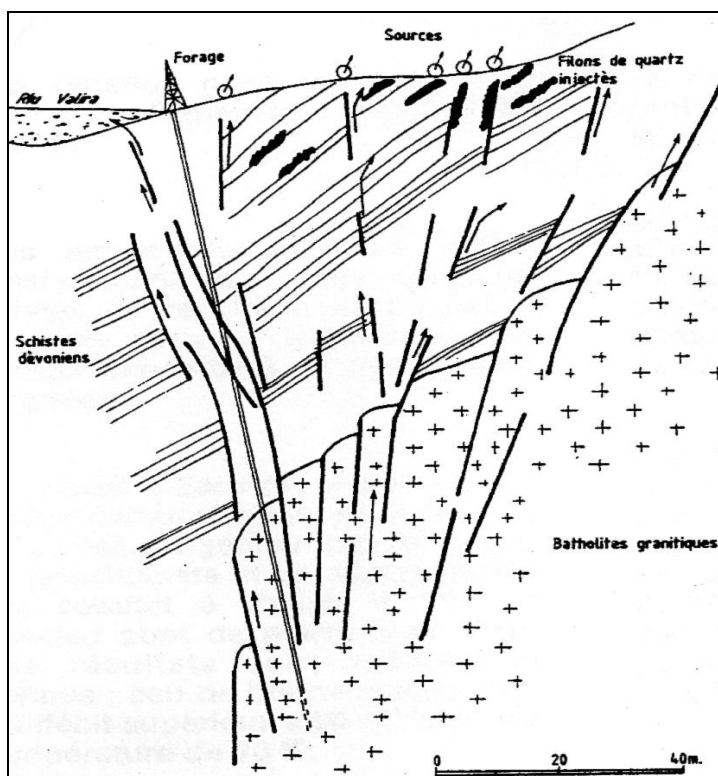
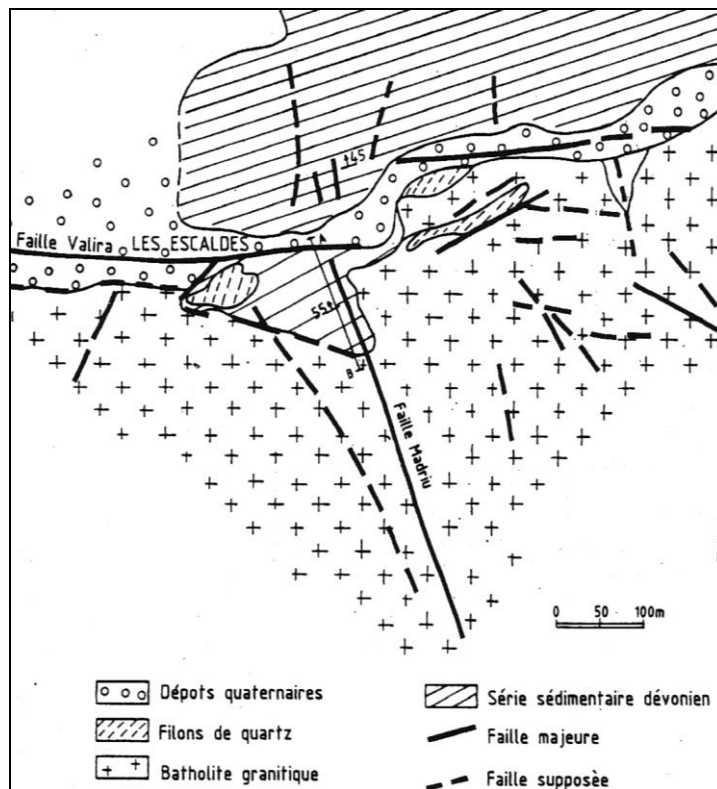
Eaux de la source d'Escaldes : - 11,25 > δ_{18} > - 13,57



**Evaluer l'altitude de la zone de recharge du système hydrothermal d'Escaldes.
Situer géographiquement la zone probable.**



3) Le système hydrothermal



“Site géothermal d’Escaldes-Engordany” Michel Bouvet – revue Géothermie Actualités vol. 2 n°3 - 1985

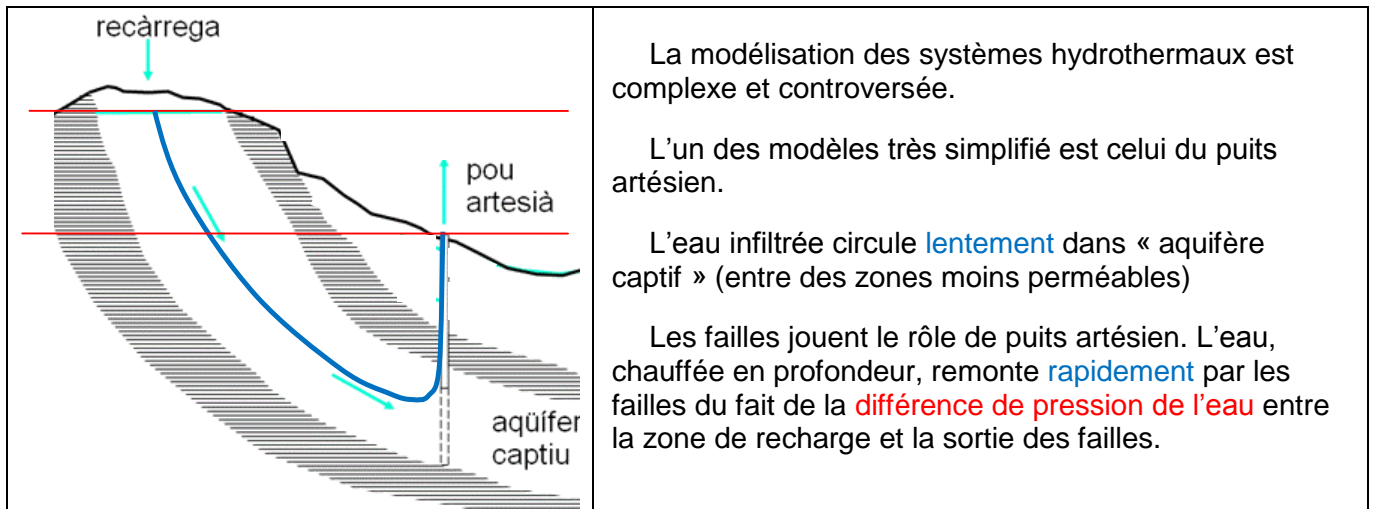


Situer cette zone sur la carte géologique.
C’est une zone de contact entre deux types de roches : lesquelles ?
Situer Escaldes par rapport au système de failles.



4) L'âge des eaux d'Escaldes

Les documents diffusés par Caldea donnent un « âge » de 11 500 ans.
Peut-on vérifier cette indication ?



La mécanique des fluides permet de déterminer **la conductivité hydraulique K** du milieu où l'eau s'infiltré.

Elle dépend des propriétés du milieu poreux où l'écoulement a lieu (granulométrie, forme des grains, répartition et forme des pores, porosité inter-granulaire) et des propriétés du fluide concerné par les écoulements (la viscosité, la masse volumique).

$$K = \frac{k \cdot \rho \cdot g}{\mu}$$

Avec :

k : la perméabilité intrinsèque du milieu poreux (m²).

ρ : la masse volumique du fluide, l'eau (10³ kg.m⁻³).

g : l'accélération de la pesanteur (9,8 m.s⁻²).

μ : la viscosité dynamique du fluide, l'eau (comprise entre 1,8.10⁻³ et 0,3.10⁻³ kg.m⁻¹.s⁻¹ selon la température)

Quelle est l'unité de K ; quelle est sa signification ?

Calculer la conductivité hydraulique en supposant que le milieu poreux est du granite homogène (perméabilité moyenne k comprise entre 10⁻¹⁶ et 10⁻¹⁴ m²).



Estimer la distance parcourue par l'eau (sans compter la remontée par les failles).

Estimer l' « âge » de l'eau d'Escaldes.

Discuter la validité du modèle !