Géothermie

Résumé

Cette partie étudie l'origine de la chaleur terrestre, les différents types de ressources géothermiques, leur exploration, leur exploitation et les conditions d'une gestion durable des réservoirs.

Mots-clés

flux de chaleur • gradient géothermique • aquifère • réservoir • forage • réinjection • pompe à chaleur • sismicité induite

Plan de la partie

CM 7	**Géothermie : origine, gisements et exploitation** Origine de la chaleur interne du globe • Chaleur primordiale et production radiogénique • Gradient géothermique, flux de chaleur et anomalies thermiques • Transfert de chaleur par conduction et convection • Conditions nécessaires à un gisement géothermique • Géothermie très basse, basse, moyenne et haute énergie • Aquifères géothermiques et systèmes hydrothermaux • Géothermie volcanique • Géothermie profonde et systèmes géothermiques stimulés • Exploration géologique, géophysique et géochimique • Forage, production, échange thermique et réinjection • Réseaux de chaleur et usages directs • Pompes à chaleur géothermiques et géothermie superficielle • Durabilité de la ressource et refroidissement du réservoir • Risques : sismicité induite, corrosion, dépôts et pollution des fluides	**Lundi 19 octobre** 14h45-16h15 · B005
TD 5	**Exploitation d'un réservoir géothermique** Étude de cas : géothermie profonde de Soultz-sous-Forêts • Lecture de données géologiques et thermiques • Calcul de gradient géothermique et de température en profondeur • Calcul de puissance thermique extraite d'un fluide • Bilan énergétique d'un doublet géothermique • Géothermie basse température et réseau de chaleur • Géothermie superficielle et pompe à chaleur • Analyse des risques de sismicité induite • QCM de synthèse sur les différents types de géothermie	**Jeudi 22 octobre** 9h30-11h00 · B104

Fig. 1

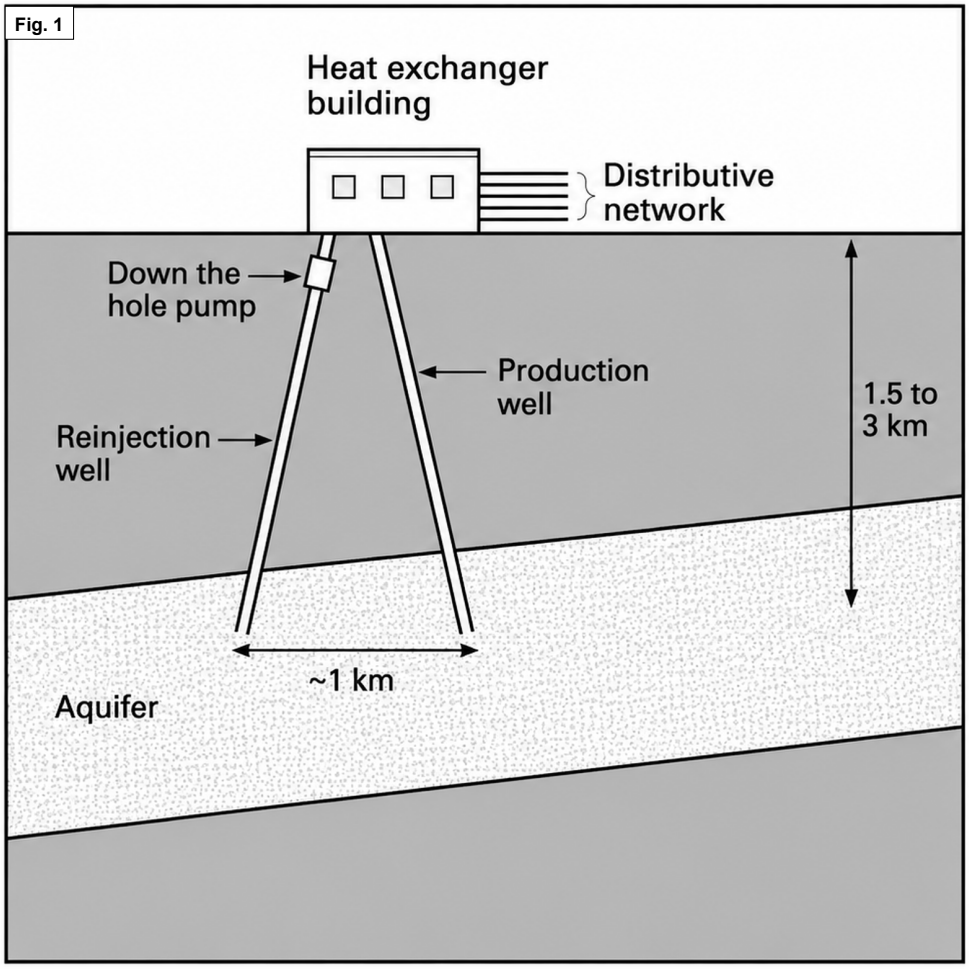
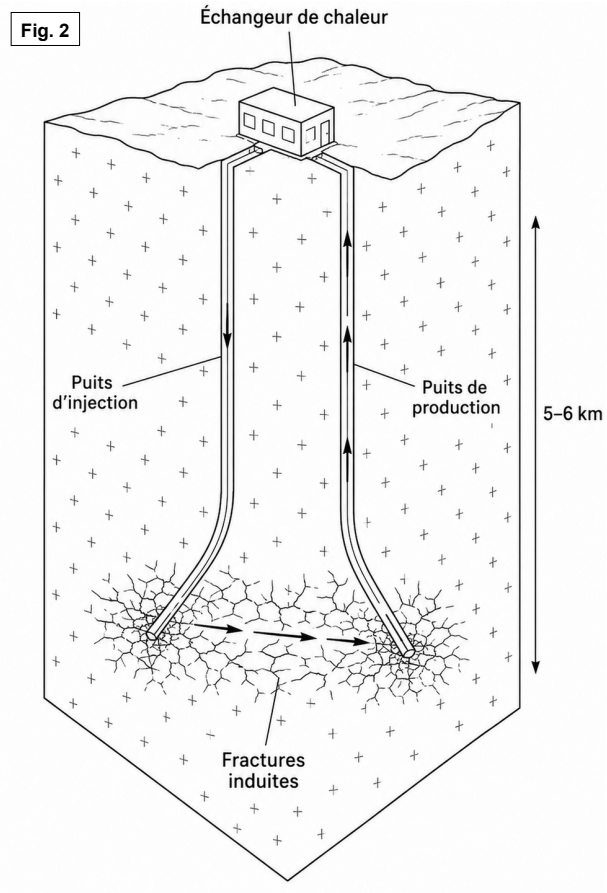


Fig. 27.1 Exploitation of a geothermal aquifer lying between two low thermal conductivity aquicludes.

Fig. 2



Principe d'un système géothermique en roches chaudes sèches (HDR)

Fig. 3

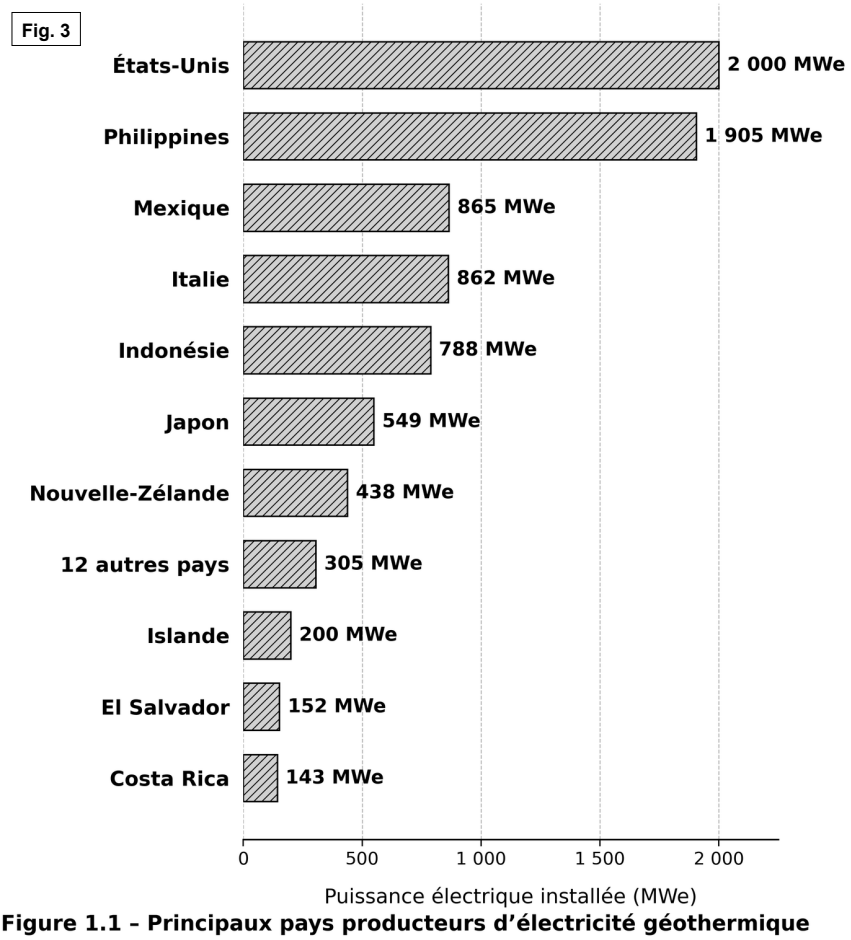


Figure 1.1 – Principaux pays producteurs d'électricité géothermique

Fig. 4

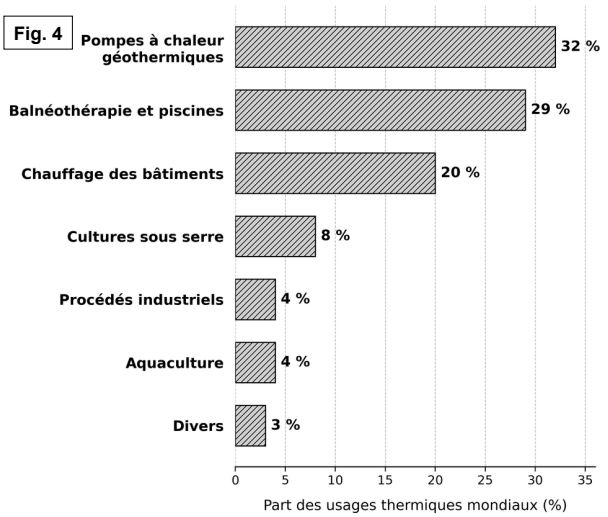


Figure 1.2 – Répartition mondiale des usages thermiques de la géothermie
Source : World Geothermal Congress, 2005

Fig. 5

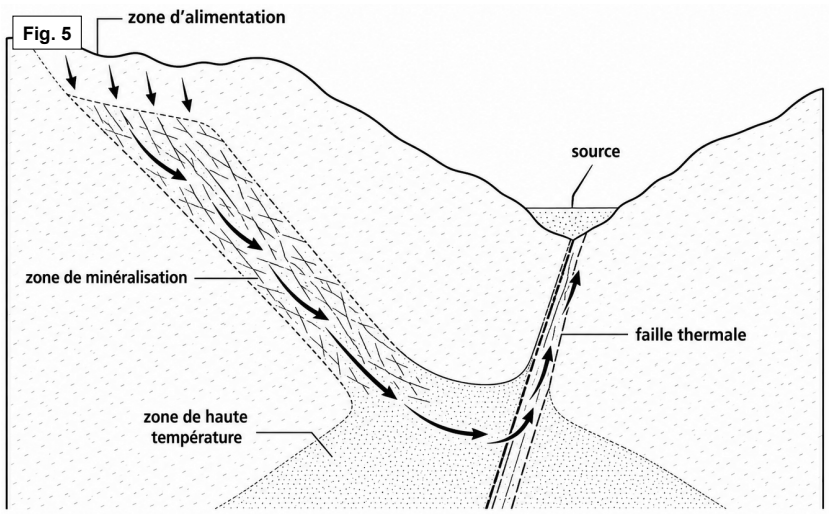


Figure 1.7 – Principe d'une source chaude

Fig. 6

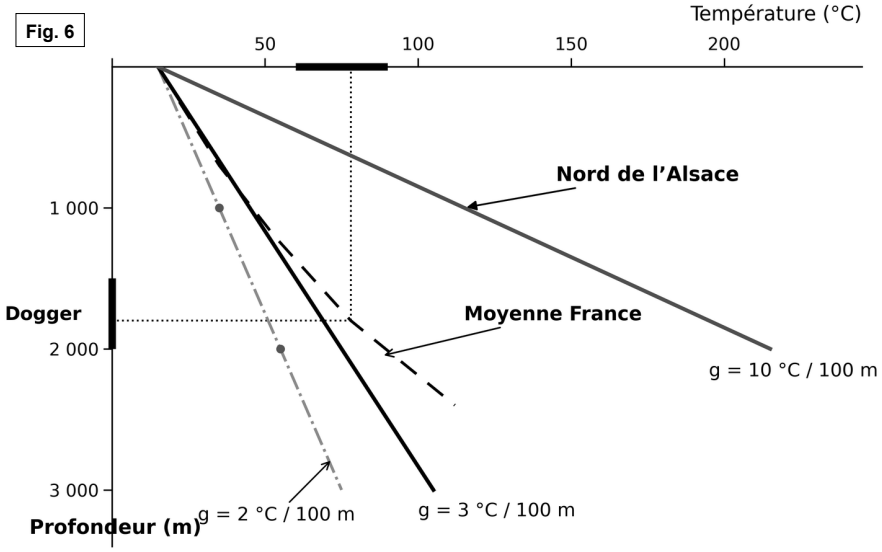


Figure 1.9 – Gradient géothermique (fourchette rencontrée en France)

Fig. 7

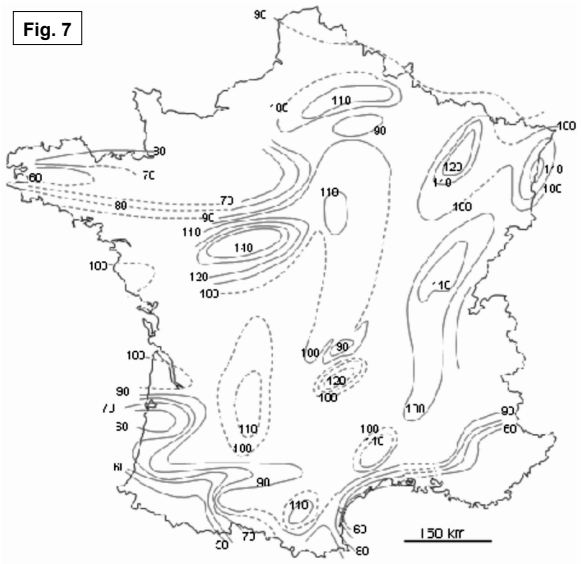
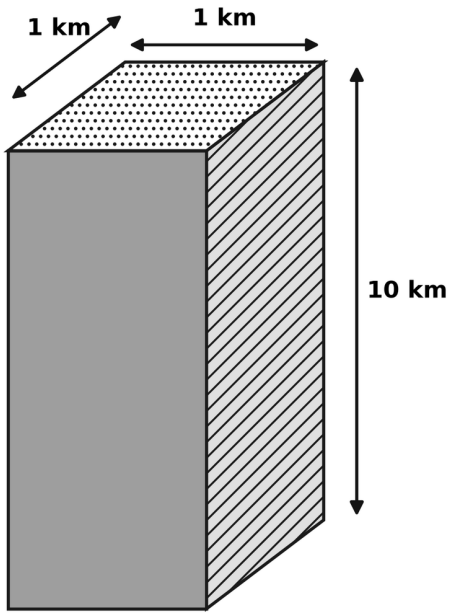


Figure 1.10 – Flux géothermique (courbes d'iso flux mW/m²) d'après J. Goguel, 1979

Fig. 8

Énergie thermique libérée par refroidissement

Exemple d'un volume rocheux de 1 km × 1 km × 10 km



$V = 10\ \text{km}^3$

Propriétés du volume rocheux

Masse volumique : $\rho = 2{,}5 \times 10^3\ \text{kg m}^{-3}$

Capacité thermique massique : $c_p = 1\,000\ \text{J kg}^{-1}\,\text{K}^{-1}$

Énergie thermique récupérable

$E = \rho V c_p \Delta T$ soit $2{,}5 \times 10^{16}$ J par degré

Refroidissement	Énergie libérée
$\Delta T = 1\ ^\circ\text{C}$	**0,6 Mtep**
$\Delta T = 20\ ^\circ\text{C}$	**12 Mtep**
$\Delta T = 40\ ^\circ\text{C}$	**24 Mtep**

Superficie de la France : 550 000 km²

Mtep : million de tonnes équivalent pétrole.

Figure 1.12 — Énergie libérée par refroidissement d'un volume rocheux.

Fig. 9

Tableau 1.6 — Classification des roches selon leur perméabilité

Désignation	Coefficient de perméabilité K (m·s⁻¹)
Roches perméables	$K > 10^{-4}$
Roches semi-perméables	$10^{-9} < K < 10^{-4}$
Roches imperméables	$K < 10^{-9}$

Fig. 10

Rabattement dans un aquifère captif

Pompage à débit constant et cône de dépression

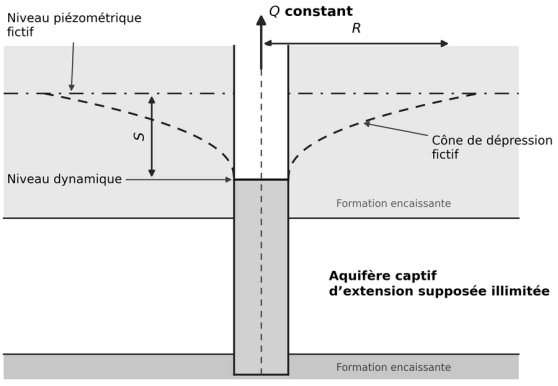


Figure 1.16 — Rabattement dans un aquifère captif pour un débit constant Q.

S : hauteur de rabattement ; R : rayon d'influence.

Fig. 11

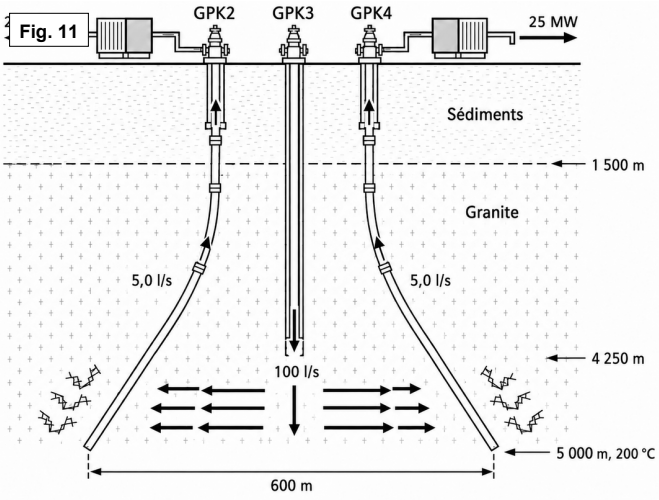


Figure 1.21 – Schéma de principe du pilote européen de géothermie profonde de Soultz-sous-Forêts

Fig. 12

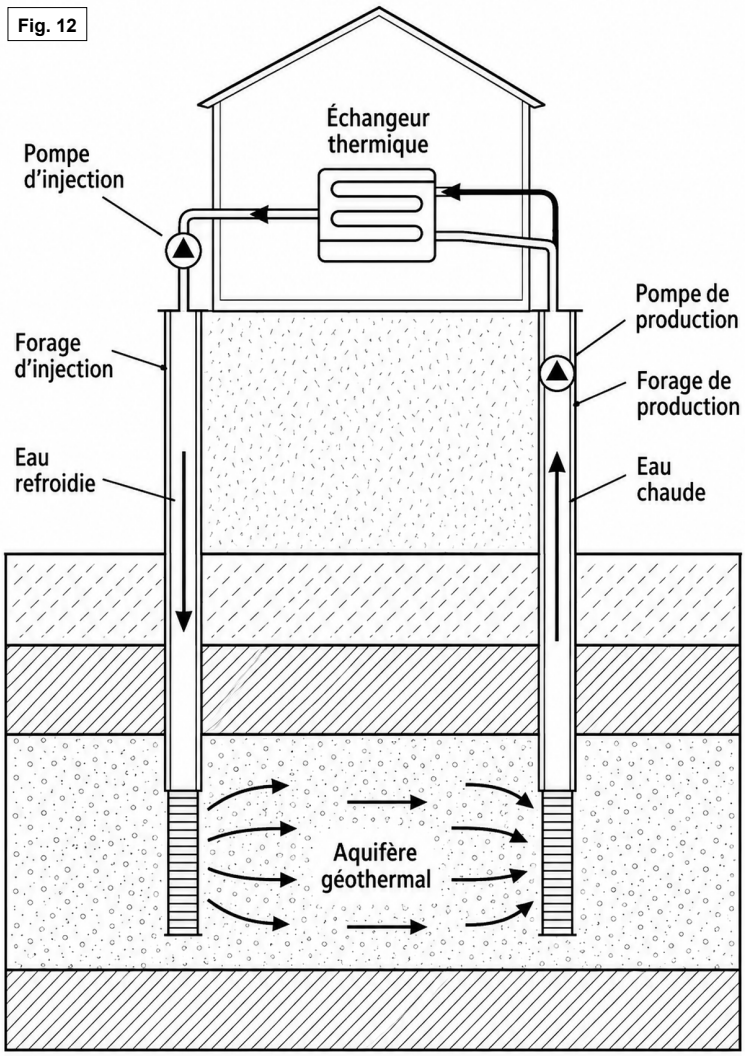


Figure 1.23 – Schéma de principe d'un doublet géothermique
Source : ADEME – BRGM

Fig. 13

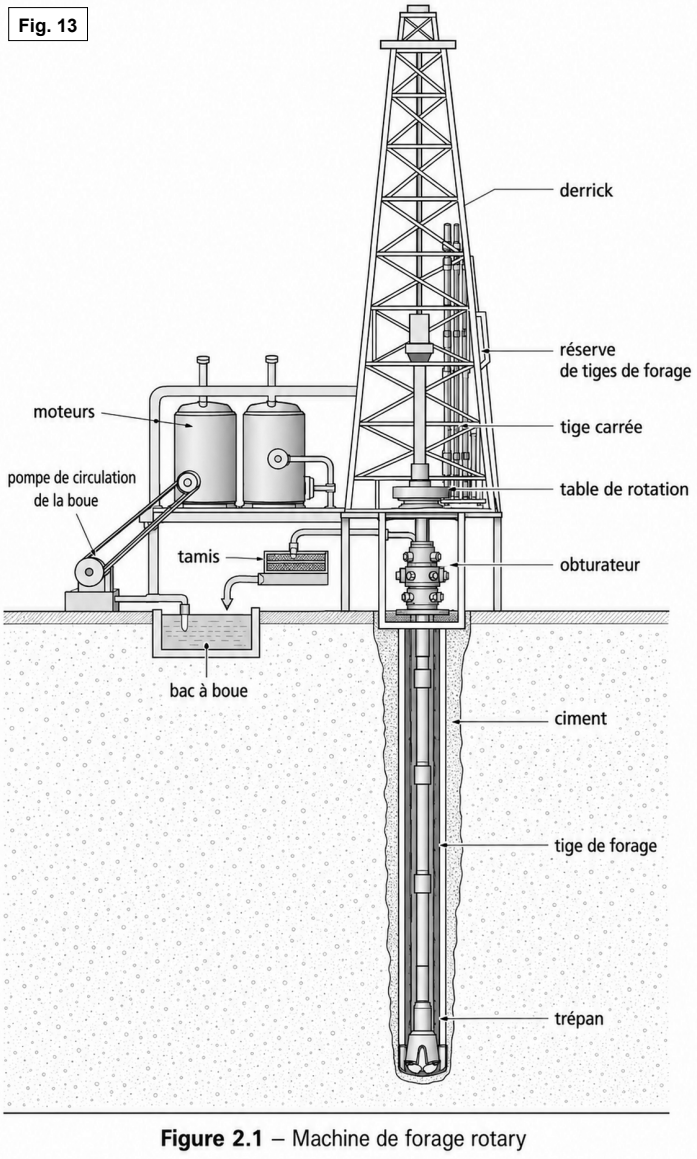
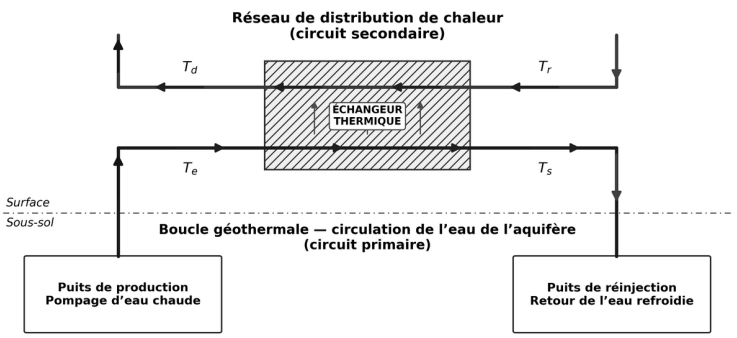


Figure 2.1 – Machine de forage rotary

Principe d'un échangeur thermique géothermique

Fig. 14

Transfert de chaleur entre la boucle géothermale et le réseau de distribution



T_d : départ du réseau ; T_r : retour du réseau ; T_e : entrée géothermale ; T_s : sortie géothermale.

Figure 2.11 — Principe d'un échangeur thermique géothermique.

Fig. 15

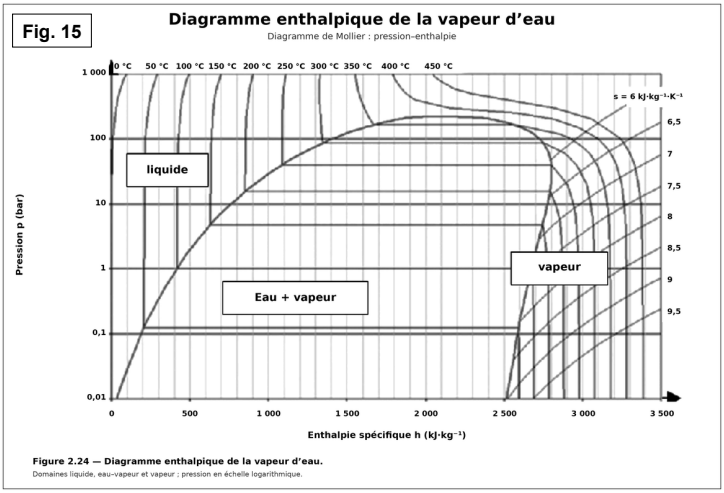


Figure 2.24 — Diagramme enthalpique de la vapeur d'eau.
Domaines liquide, eau–vapeur et vapeur ; pression en échelle logarithmique.

Fig. 16

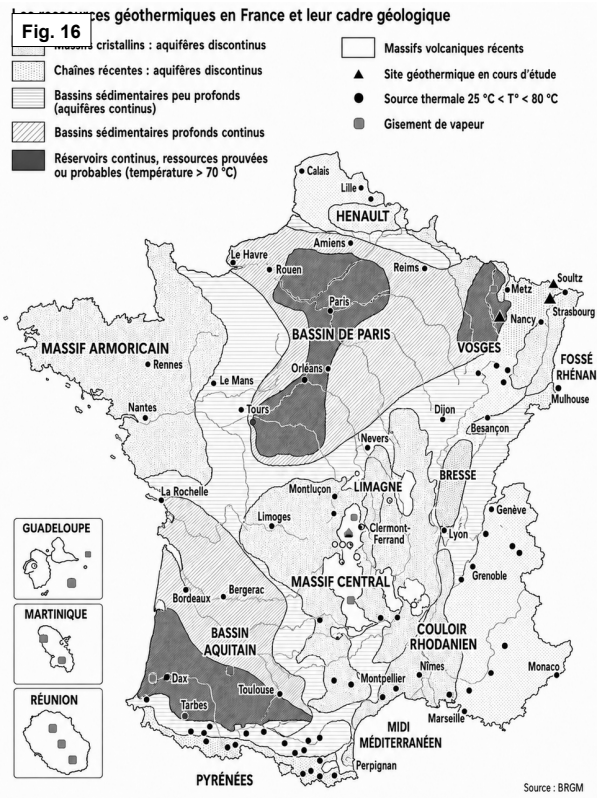


Figure 3.2 – Principaux bassins renfermant des nappes d'eau chaude

Fig. 17

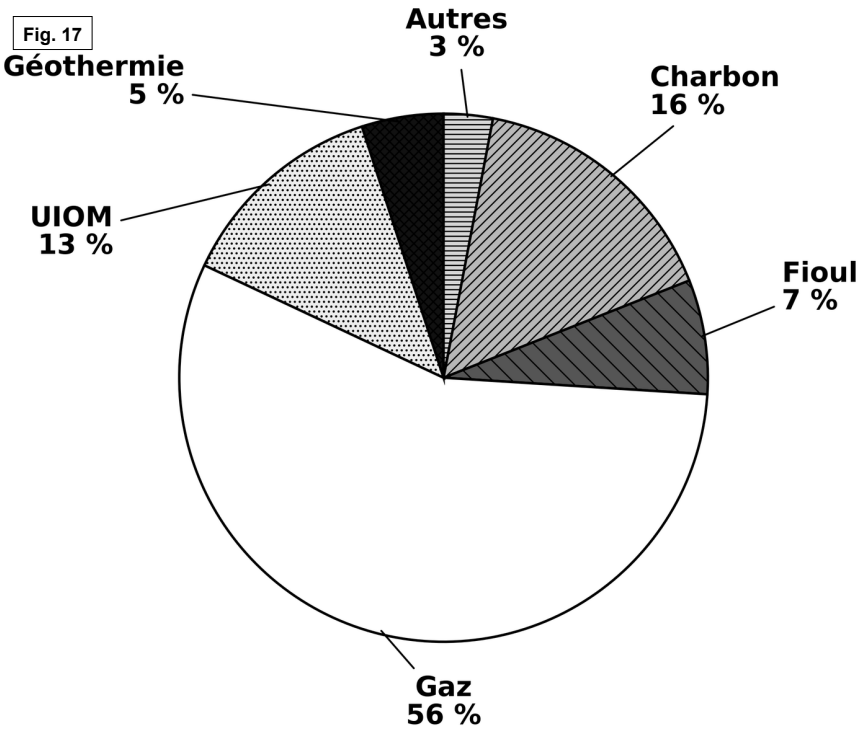
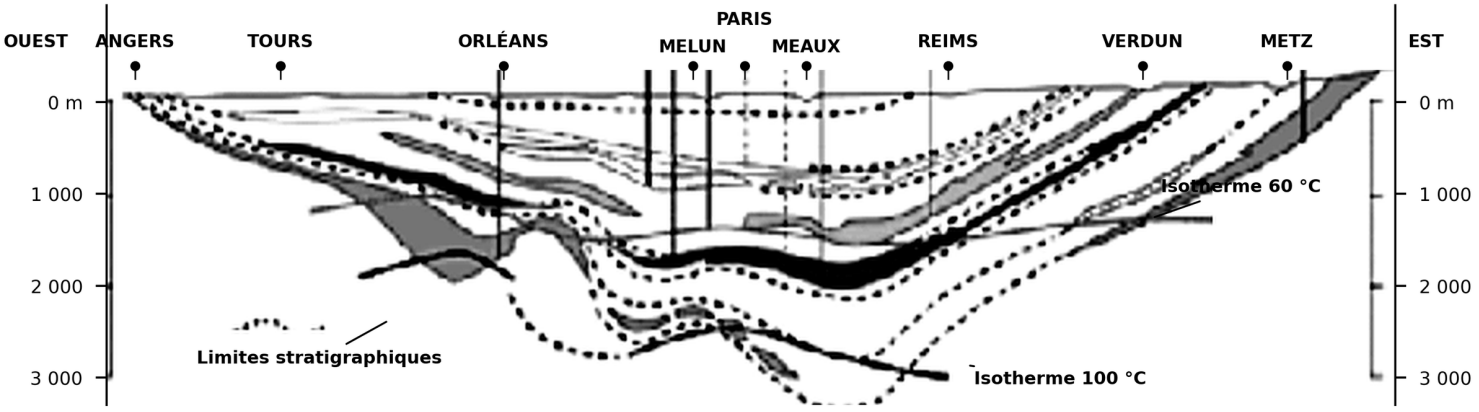


Figure 3.1 – Réseaux de chaleur en France

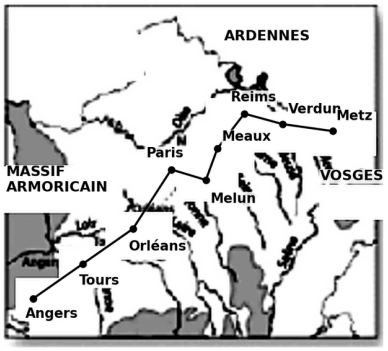
Fig. 18

Coupe hydrogéologique du Bassin parisien

Profil ouest–est : géométrie des formations, aquifères et isothermes



Localisation du tracé de la coupe



PÉRIODES		AQUIFÈRES
TERTIAIRE 65 Ma		
CRÉTACÉ 140 Ma	Néocrétacé Éocrétacé	Sables de l'Albien Sables du Néocomien
JURASSIQUE 195 Ma	Malm	Calcaire du Lusitanien
	Dogger	Calcaire du Dogger
	Lias	
TRIAS 225 Ma	Trias	Grès du Rhétien Grès de Lorraine à l'est Grès fluviatiles à l'ouest
PRIMAIRE		

Figure 3.3 — Coupe du Bassin parisien et principaux aquifères.

Source de la coupe : ADEME–BRGM, reprise dans Eau de Paris (2014). Âges conservés tels qu'indiqués dans la figure source.