

# FONCTIONNEMENT D'UN DOUBLET HYDRAULIQUE DE REFROIDISSEMENT

PAR  
A. HOUPEURT \*  
J. DELOUVRIER \*\*  
ET  
R. IFFLY \*\*

## Introduction

Nous appellerons doublet hydraulique de refroidissement le système constitué par un puits de production et un puits d'injection d'eau intéressant la même nappe. Un débit  $Q$  est soutiré par le premier puits, est utilisé dans des circuits de refroidissement, et est ensuite réinjecté à une température plus élevée dans le second puits. On s'interroge sur les conséquences de cet apport de calories dans la nappe.

Sur le plan de la mécanique des fluides, la mise en place d'un doublet dans une nappe qui s'écoule modifie la répartition des potentiels hydrauliques. Cette modification n'est importante que dans une zone limitée autour des deux sondages, l'avantage du doublet étant justement d'éviter une chute générale de la surface piézométrique qui se produirait si l'on réalisait un simple soutirage.

Cette modification des potentiels peut être déterminée dans des cas simples de façon théorique [5, pp. 348-351], ou graphique, par la méthode de superposition des potentiels. Dans des cas plus complexes, l'utilisation de modèles électriques, pétrophysiques ou mathématiques, permet de connaître la nouvelle répartition du potentiel hydraulique [4].

Le calcul de l'évolution, dans le temps et dans l'espace, du front séparant l'eau injectée de l'eau déplacée peut s'effectuer par une méthode devenue classique dans l'industrie pétrolière, qui est rappelée dans l'annexe I.

Sur le plan thermique, l'eau chaude injectée repousse devant elle l'eau qui occupait les pores de la nappe et cède de la chaleur au milieu qui l'entoure, par conduction et convection; sa capacité de source froide se trouve ainsi partiellement rétablie. Un front de chaleur avancera dans la nappe en

fonction des caractéristiques thermiques du milieu aquifère et de ses épontes. Lorsque ce front de chaleur atteindra le puits de production, la température de l'eau soutirée s'élèvera pour tendre peu à peu vers une valeur limite fonction de la quantité d'eau injectée atteignant le puits.

Nous nous proposons d'étudier ce transitoire de chaleur en remarquant que celui-ci n'est lié qu'indirectement au problème hydrodynamique. Sa résolution ne nécessite en effet que la connaissance de la nouvelle répartition des potentiels résultant de la mise en place du doublet dans la nappe, et de l'évolution dans le temps du front séparant l'eau injectée de l'eau déplacée.

## Analyse des différents modes de transfert de la chaleur

Nous supposons que l'on a affaire à une nappe captive, en observant que le cas d'une nappe libre est très peu différent, sauf aux abords immédiats du puits d'injection.

Soit  $T$  la température de l'eau injectée et  $Q$  le débit constant d'injection et de production. La nappe est à une température  $t$ , elle a une épaisseur  $e$ , et une porosité  $\omega$ .

L'injection d'un volume  $V$  de fluide dans la nappe apporte, par convection, une certaine quantité de chaleur. Une partie de cette chaleur augmente par conduction la température des grains du milieu aquifère. Une autre partie est perdue à travers les épontes. Une autre partie enfin a tendance à se déplacer par conduction dans le milieu aquifère dans le sens du fluide injecté.

### 1. CONDUCTION ENTRE L'EAU INJECTÉE ET LA ROCHE.

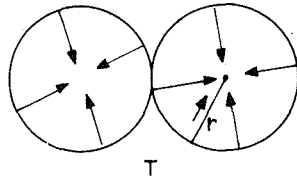
C'est un phénomène quasi instantané. Calculons par exemple le temps  $\tau$  nécessaire pour que la température d'un grain de milieu poreux, de rayon  $r$ ,

\* Directeur scientifique de la Société Géopétrole.

\*\* Ingénieurs à la Société Géopétrole.

soit égale, à 10 % près, à la température de l'eau qui l'entoure : [1, p. 223] :

$$\theta = \frac{\lambda_R \tau}{\rho_R c_R r^2} = 0,5$$



$\theta$  : temps réduit;

$\rho_R$  : masse spécifique de la roche (2,7 g/cm<sup>3</sup>);

$c_R$  : capacité calorifique de la roche (0,2 c/g);

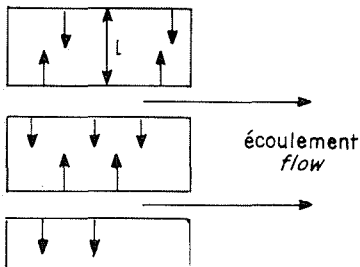
$\lambda_R$  : conductivité thermique de la roche (2.10<sup>-3</sup> CGS);

$r$  : rayon du grain.

soit :  $\tau = 135 r^2$ .

Si  $r = 1$  mm,  $\tau = 1,3$  s : l'équilibre est donc pratiquement instantané.

De même, dans le cas d'un milieu fissuré avec un écoulement du type parallèle :



$$\theta = \frac{4 \pi^2 \lambda_R \tau}{\rho_R c_R l^2} = 10$$

$l$  : distance entre deux fissures,

soit :

$$\tau = 67,5 \cdot l^2$$

Si  $l = 10$  cm,  $\tau = 6700$  s, soit 2 h environ.

## 2. CONDUCTION A TRAVERS LES ÉPONTES.

On peut remarquer en premier lieu que la durée du transitoire correspondant à la mise en équilibre thermique des épontes est très importante. Calculons par exemple le temps  $\tau$  nécessaire pour que le flux de chaleur qui traverse les épontes pendant ce transitoire soit égal, à 10 % près, au flux de chaleur qui traverse les épontes lorsque le régime permanent est atteint [3, p. 45] :

$$\theta = \frac{\pi^2 \tau \lambda_{ER}}{\rho_{ER} c_{ER} L^2} = 3$$

$\rho_{ER} c_{ER}$  : capacité calorifique moyenne de 1 cm<sup>3</sup> de l'ensemble eau + roche (0,7 c/cm<sup>3</sup>);

$\lambda_{ER}$  : conductivité thermique de l'ensemble eau + roche (3.10<sup>-3</sup> CGS);

$L$  : distance séparant le milieu aquifère de la zone d'éponte à température invariable.

soit :  $\tau = 70 L^2$ .

Si  $L = 50$  m,  $\tau = 1,7 \cdot 10^9$  s, soit plus d'un demi-siècle.

Ce résultat n'est pas surprenant, car les quantités de chaleur nécessaires pour mettre en équilibre thermique les épontes sont très importantes. C'est ainsi que si l'on élève la température d'un volume  $(V/\omega) = v$  d'aquifère de  $\Delta T$ , et si l'on suppose que le volume d'éponte  $(V'/\omega') = v'$  de chaque côté de la nappe doit élever sa température de  $\Delta T/2$  en moyenne pour qu'il y ait à nouveau équilibre ther-

mique, il faut apporter les quantités de chaleur suivantes :

$v (1 - \omega) \rho_R c_R \Delta T$  : pour réchauffer le milieu aquifère;

$2 v' (1 - \omega') \rho_R c_R \frac{\Delta T}{2}$  : pour réchauffer la roche formant les épontes;

$2 v' (1 - \omega') \rho_E c_E \frac{\Delta T}{2}$  : pour réchauffer l'eau contenue dans les épontes.

Si  $\omega = \omega' = 1/3$  :

$$\rho_R = \rho_{R'} = 2,7 \text{ g/cm}^3$$

$$c_R = c_{R'} = 0,2 \text{ c/g},$$

on constate qu'il faut apporter 2,1 ( $v'/v$ ) fois plus de chaleur pour chauffer les épontes que pour chauffer le milieu aquifère, et  $v'$  est la plupart du temps très supérieure à  $v$ .

Mais cette déperdition de chaleur est répartie dans le temps et n'est surtout importante qu'au début du transitoire, lorsque les gradients de température entre la couche et les épontes sont importants.

Il est possible de calculer les quantités de chaleur perdues par les épontes en utilisant les fonctions suivantes [1, pp. 92 et 50] :

$$\bar{C} = \frac{1}{3} + \frac{1}{\pi^2} \left[ \theta - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-n^2 \theta}}{n^2} \right] \quad (1)$$

dans le cas d'éponte d'épaisseur limitée, et :

$$\bar{C} = \frac{2}{\pi} \left( \frac{\theta}{\pi} \right)^{1/2} \quad (2)$$

dans le cas d'éponte d'épaisseur infinie, avec :

$\bar{C}$  : quantité cumulée réduite de chaleur ( $C/LS\rho_{ER}c_{ER}\Delta T$ );

$C$  : quantité cumulée de chaleur;

$\theta$  : temps réduit ( $\pi^2 K_{ER} \tau / L^2$ );

$K_{ER}$  : diffusivité thermique ( $\lambda_{ER} / \rho_{ER} c_{ER}$ );

$S$  : surface par laquelle s'effectuent les pertes;

$L$  : pour (1), distance séparant le milieu aquifère de la zone d'éponte à température invariable; pour (2), distance arbitraire;

$\Delta T$  : différence entre la température du milieu aquifère à l'instant  $\theta$  et la température initiale du même milieu.

Ces deux fonctions sont confondues pendant une très longue période de temps, et l'on pourra le plus souvent utiliser directement la fonction (2).

## 3. CONDUCTION A TRAVERS LE MILIEU AQUIFÈRE DANS LA DIRECTION DU FRONT D'INJECTION.

La création d'un gradient de température dans l'aquifère entraîne un transfert de chaleur par conduction dans la direction du front de chaleur.

En permanent, ce phénomène peut être négligé jusqu'à quelques centaines de mètres du puits d'injection [2].

Pendant le transitoire de chaleur, on peut aussi le négliger par rapport à la conduction par les épontes. En effet, la surface par laquelle s'effectuent les pertes en avant du front augmente comme  $2\pi Re$ ,

tandis que celle par laquelle s'effectuent les pertes par les épontes augmente comme  $\pi R^2$ . Par ailleurs, l'influence de ce transfert est minimisée par l'avancement du front chaud qui reprend une partie des calories dispersées.

4. CONVECTION ET MISE EN ÉQUILIBRE DE L'EAU INJECTÉE ET DU MILIEU AQUIFÈRE.

Lorsque l'on injecte un volume  $V$  de fluide, à la température  $T$ , de masse  $\rho_E V$ , et de capacité calorifique  $c_E \rho_E V$ , celui-ci prend place dans un volume  $v = (V/\omega)$  de milieu aquifère, à la température  $t$ , contenant un volume de roche  $v(1 - \omega)$ , de masse

$$\rho_R \cdot v(1 - \omega),$$

et de capacité calorifique:

$$\rho_R c_R v(1 - \omega).$$

Puisque l'équilibre thermique de la roche et de l'eau injectée est quasi-instantané (cf. § 1), la température commune  $t'$  en résultant est donnée par l'équation :

$$(T - t') \rho_E \omega \frac{V}{\omega} c_E = (t' - t) \rho_R \frac{V}{\omega} (1 - \omega) c_R$$

Si l'on pose :

$$\frac{\rho_R c_R (1 - \omega)}{\rho_E c_E \omega} = \alpha,$$

on obtient :

$$t' = \frac{T + \alpha t}{1 + \alpha} \tag{3}$$

**Principe du calcul de l'évolution au cours du temps de la température dans le milieu aquifère**

On étudie l'évolution de la température dans une couche de température initiale  $t$ , d'épaisseur  $e$ , de porosité  $\omega$ , lorsqu'on y injecte de l'eau à température  $T$  avec un débit  $Q$ . Un premier calcul sera fait en négligeant les pertes par les épontes. Celles-ci seront prises en compte dans un second calcul.

On suppose que l'on injecte pendant des intervalles de temps unitaires  $\tau$  des volumes d'eau unitaires  $V$ . Ceux-ci prennent place dans des cellules d'espace successives. Tant que le front d'injection n'atteint pas le puits de production, l'eau injectée n'est pas produite : l'injection du volume  $V$  se traduit par l'envahissement d'une cellule d'espace de milieu aquifère de volume  $V/\omega$ ; les cellules d'espace successives ont donc des volumes égaux. Lorsque ce front atteint le puits de production, une partie de l'eau injectée est produite : l'injection du volume  $V$  se traduit par l'envahissement d'une cellule d'espace de milieu aquifère de volume :

$$(V'/\omega) < (V/\omega);$$

les cellules d'espace successives ont cette fois des volumes décroissants.

1. PRINCIPE DU CALCUL DANS LE CAS OÙ LES PERTES DE CHALEUR PAR LES ÉPONTES SONT NÉGLIGÉES.

L'injection du premier volume unitaire  $V$  dans la première cellule d'espace remplit un volume de mi-

lieu poreux  $V/\omega$ . La température d'équilibre  $t_1^1$  en résultant est égale à :

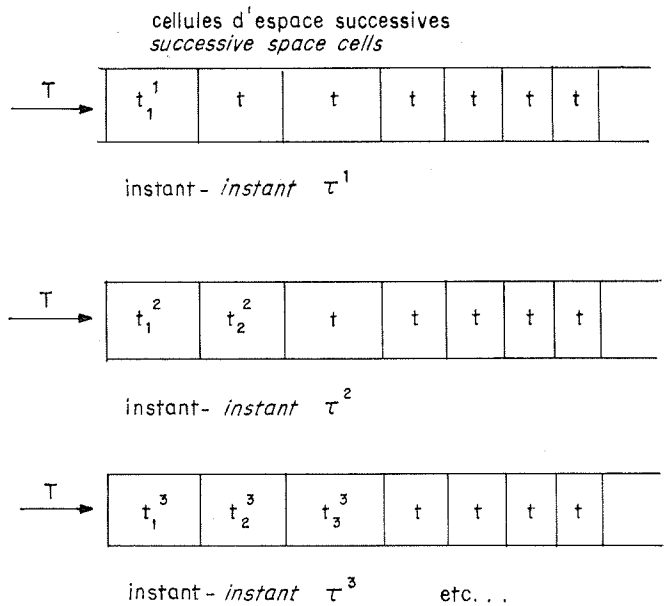
$$t_1^1 = \frac{T + \alpha t}{1 + \alpha}$$

Lors de la mise en place dans la couche d'un second volume  $V$ , la première cellule d'espace est le siège d'une température  $t_1^2$  telle que :

$$t_1^2 = \frac{T + \alpha t_1^1}{1 + \alpha}$$

La seconde cellule d'espace est envahie par un volume d'eau à température  $t_1^1$  et la température d'équilibre de cette cellule est :

$$t_2^2 = \frac{t_1^1 + \alpha t}{1 + \alpha}$$



La  $n^{\circ}$  cellule d'espace contenant de l'eau à la température  $t_{n-1}^{m-1}$  au temps  $\tau^{m-1}$  est envahie au temps  $\tau^m$  par de l'eau à la température  $t_{n-1}^{m-1}$  provenant de la cellule  $n - 1$ . La nouvelle température d'équilibre,  $t_n^m$ , est :

$$t_n^m = \frac{t_{n-1}^{m-1} + \alpha t_n^{m-1}}{1 + \alpha}$$

etc.

2. PRINCIPE DU CALCUL LORSQUE L'ON TIENT COMPTE DES PERTES DE CHALEUR PAR LES ÉPONTES.

L'injection d'un volume  $V$  d'eau dans la cellule 1 donne lieu à une température d'équilibre  $t_1^1$  égale à :

$$t_1^1 = \frac{T + \alpha t}{1 + \alpha}$$

Il y a ensuite perte de chaleur par conduction à travers les épontes. On utilise, pour la calculer, la fonction simplifiée correspondant à une déperdition dans des épontes de longueur infinie, qui représente valablement le phénomène pendant une longue période de temps [1, p. 58] :

$$C_1^1 = 2 A \sqrt{\tau} (t_1^1 - t)$$

$$A = \frac{2}{\sqrt{\pi}} S \rho_{ER} c_{ER} \sqrt{K_{ER}}$$

$$S = \frac{V}{e\omega}$$

$$K_{ER} = \frac{\lambda_{ER}}{\rho_{ER} c_{ER}}$$

$\lambda_{ER} \rho_{ER} c_{ER}$  étant les caractéristiques moyennes de l'ensemble eau-roche.

La quantité de chaleur  $C_1^1$  perdue par les épontes est retirée de la chaleur apportée par l'injection d'un nouveau volume  $V$  d'eau dans la première cellule d'espace, laquelle est donc supposée entrer à  $T - \varepsilon_1^2$ . La température d'équilibre avec le milieu aquifère de température  $t_1^1$  devient :

$$t_1^2 = \frac{(T - \varepsilon_1^2) + \alpha t_1^1}{1 + \alpha}$$

Pendant ce temps, l'eau à température  $t_1^1$  de la première cellule d'espace est passée dans la seconde et s'est mise en équilibre à la température  $t_2^2$  :

$$t_2^2 = \frac{t_1^1 + \alpha t}{1 + \alpha}$$

Il y a alors pertes par les épontes dans la première et dans la seconde cellule d'espace. Celles-ci peuvent se calculer en utilisant une formule du type 2 pour la seconde cellule d'espace, et en utilisant la même formule et le principe de superposition pour la première cellule, ce qui conduit à :

$$C_1^2 = 2 A \sqrt{\tau} [(t_1^1 - t) (\sqrt{2} - 1) + (t_2^2 - t_1^1)]$$

$$C_2^2 = 2 A \sqrt{\tau} (t_2^2 - t)$$

On envahit de proche en proche toutes les cellules d'espace. Ainsi la température d'équilibre de la  $n^e$  cellule d'espace à l'instant  $\tau^m$  est :

$$t_n^m = \frac{(t_{n-1}^{m-1} - \varepsilon_n^m) + \alpha t_n^{m-1}}{1 + \alpha}$$

avec :

$$\varepsilon_n^m = \frac{C_n^{m-1}}{\rho_E c_E V^m}$$

et :

$$C_n^{m-1} = 2 A \sqrt{\tau} \left[ \begin{aligned} &(t_n^{m-1} - t_n^{m-2}) + (t_n^{m-2} - t_n^{m-3}) \times \\ &\times (\sqrt{2} - \sqrt{1}) + \dots + (t_n^2 - t_n^1) \\ &(\sqrt{m-2} - \sqrt{m-3}) \\ &+ (t_n^1 - t_n) (\sqrt{m-1} - \sqrt{m-2}) \end{aligned} \right]$$

### 3. REMARQUE. INFLUENCE DES VARIATIONS DE TEMPÉRATURE DE L'EAU INJECTÉE.

Dans ce qui précède la température de l'eau injectée était considérée comme constante : on a étudié ainsi les échanges thermiques dans une nappe soumise à un apport constant de chaleur (impulsion  $[T - t]$ ).

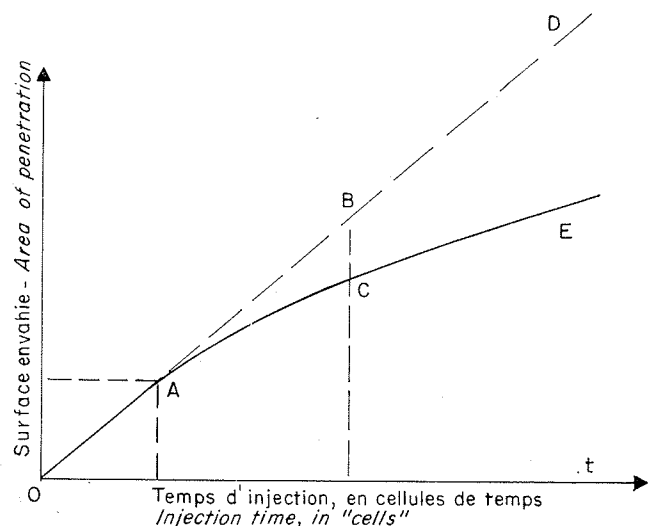
Dans la pratique, c'est la différence de température entre l'eau injectée et l'eau produite qui est constante. De ce fait, l'élévation de température de l'eau produite après la percée du front thermique

se traduit par une élévation de température de l'eau injectée.

Par ailleurs, l'élévation de température consécutive au passage de l'eau dans les circuits de réfrigération peut varier suivant les saisons.

La méthode qui vient d'être exposée s'applique aussi dans ce cas, car on peut décomposer les variations de température de l'eau injectée en paliers successifs et superposer les impulsions obtenues : c'est ainsi que, du point de vue thermique, un palier de 15 °C suivi d'un palier de 20 °C se traduira par une impulsion de + 15 °C suivie d'une nouvelle de + 5 °C.

### Principe du calcul de l'évolution au cours du temps de la température au puits de production



La figure ci-dessus représente l'évolution, en fonction du temps, de la surface envahie dans la nappe par le fluide d'injection. Tant que le front d'injection n'atteint pas le puits de production, les cellules d'espace ont des volumes successifs égaux et la surface envahie varie linéairement avec le temps (OA). Après la percée du fluide au puits de production, une partie de l'eau injectée est produite. Les cellules d'espace ont alors des volumes décroissants et la surface envahie augmente moins vite que précédemment (AC). A la limite, la quantité d'eau recyclée est constante et la surface envahie varie de nouveau linéairement avec le temps, mais moins rapidement qu'avant la percée (CE). L'évolution de la surface envahie peut se déterminer facilement quand l'évolution des fronts est connue (cf. annexe I). On passe ensuite à l'apport au puits de production de chaque cellule d'espace de la façon suivante :

1. La différence entre les courbes ABD et ACE représente, au coefficient  $e\omega$  près, l'évolution de la production cumulée provenant du puits d'injection.
2. La dérivée première de cette différence représente, au coefficient  $e\omega$  près, les variations de cet apport dans le temps.

3. La dérivée de la courbe obtenue au 2 représente, au coefficient  $\omega$  près, les apports de chaque cellule d'espace. Ces apports se conservent dans le temps pour une cellule donnée, mais varient suivant les cellules.

L'évolution de la température  $t^*$  au puits de production s'obtient ensuite aisément de la façon suivante ( $\beta_n$  étant l'apport de la  $n^o$  cellule d'espace rapporté au débit total  $Q$ ). A l'instant  $p + 1$ , une partie de l'eau de la cellule d'espace  $p$  passe dans la cellule d'espace  $p + 1$ , une autre partie est produite ( $\beta_{p+1}$ ) à la température  $t_{p+1}^{p+1}$ .

La température de l'eau produite sera :

$$t^{*p+1} = t + \beta_{p+1} (t_{p+1}^{p+1} - t).$$

A l'instant  $p + 2$  :

$$t^{*p+2} = t + \beta_{p+1} (t_{p+1}^{p+2} - t) + \beta_{p+2} (t_{p+2}^{p+2} - t)$$

A l'instant  $p + n$  :

$$t^{*p+n} = t + \beta_{p+1} (t_{p+1}^{p+n} - t) + \beta_{p+2} (t_{p+2}^{p+n} - t) + \dots$$

$$\dots + \beta_{p+n} (t_{p+n}^{p+n} - t)$$

etc.

### Application pratique

On a étudié l'évolution de la température dans un milieu aquifère de 40 m d'épaisseur, de 33 % de porosité ( $\alpha \# 1$ ), de température initiale 15 °C, au cours d'une injection d'eau chaude (25 °C), à raison de 50 m<sup>3</sup>/h.

Le volume des premières cellules d'espace a été fixé à 12 000 m<sup>3</sup>, ce qui correspond à des temps unitaires de 10 jours environ.

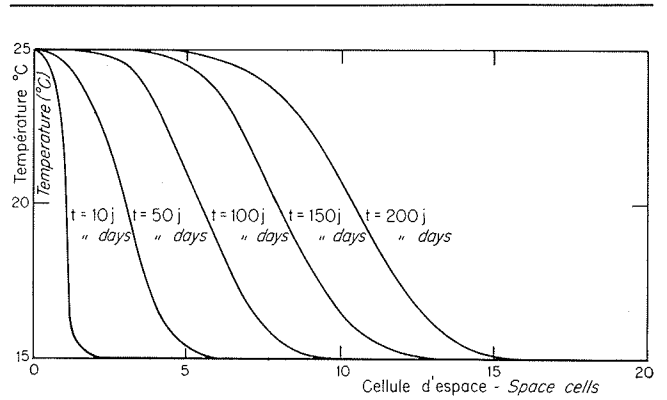
La figure 1 montre l'évolution dans l'espace pour différents temps de la température dans le milieu aquifère, calculée en ne tenant pas compte des pertes par les épontes. On peut remarquer que le front thermique de température moyenne  $(T + t)/2$  se déplace deux fois moins vite que le front d'injection.

La figure 2 montre, pour des cellules d'espace données, l'évolution de la température en fonction du temps : ce sont les courbes que l'on obtiendrait en particulier si l'on étudiait dans des piézomètres placés près d'un forage d'injection l'évolution de la température au cours du temps.

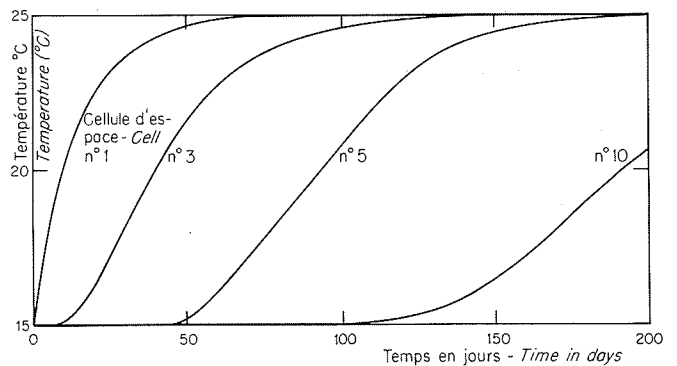
La figure 3 montre, pour les trois premières cellules d'espace, l'évolution comparée des températures en fonction du temps, calculée en négligeant les pertes par les épontes (courbe en trait plein) et en en tenant compte (courbe en pointillé).

On remarquera que, pour une cellule donnée, l'écart de température augmente, puis tend à diminuer dans le temps. Ceci est dû à l'influence antagoniste de l'importance croissante de l'impulsion que constitue la différence de température entre le milieu aquifère et les épontes, et du vieillissement de cette impulsion.

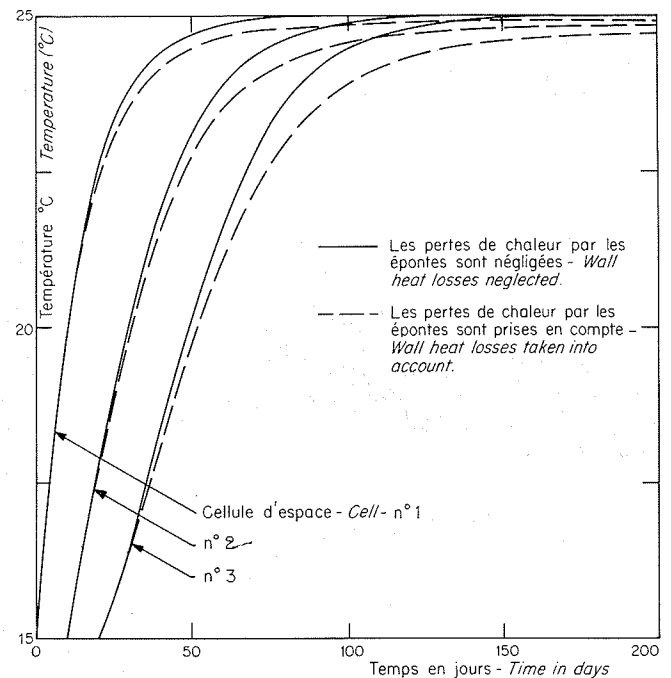
Les écarts de température obtenus sont tels qu'on ne peut négliger sans discernement les pertes de chaleur par les épontes.



1/ Evolution dans l'espace, pour différents temps, de la température dans le milieu aquifère.  
Spatial evolution of aquifer temperatures at different times.



2/ Evolution de la température en fonction du temps dans les cellules d'espace successives.  
Evolution of temperature with time in successive cells.



3/ Calcul de l'évolution de la température en fonction du temps dans les trois premières cellules d'espace.  
Computation of temperature evolution with time in first three cells.

**Conclusions**

1. Le transfert de chaleur par conduction entre l'eau injectée et la roche est un phénomène pratiquement instantané.
2. Le transfert de chaleur par conduction à travers le milieu aquifère dans la direction du front d'injection est négligeable par rapport au transfert par convection et par rapport aux pertes à travers les épontes.
3. Les pertes par les épontes sont variables dans le temps : importantes au début de l'injection, elles décroissent ensuite plus ou moins rapidement, selon les cas.
4. Le transfert de chaleur par convection de l'eau injectée dans le milieu aquifère est le phénomène le plus important.
5. Une méthode générale de calcul tenant compte du transfert de chaleur par convection et des pertes par les épontes est présentée. Cette méthode nécessite des calculs numériques simples, mais longs, qui se traitent aisément sur machine arithmétique.

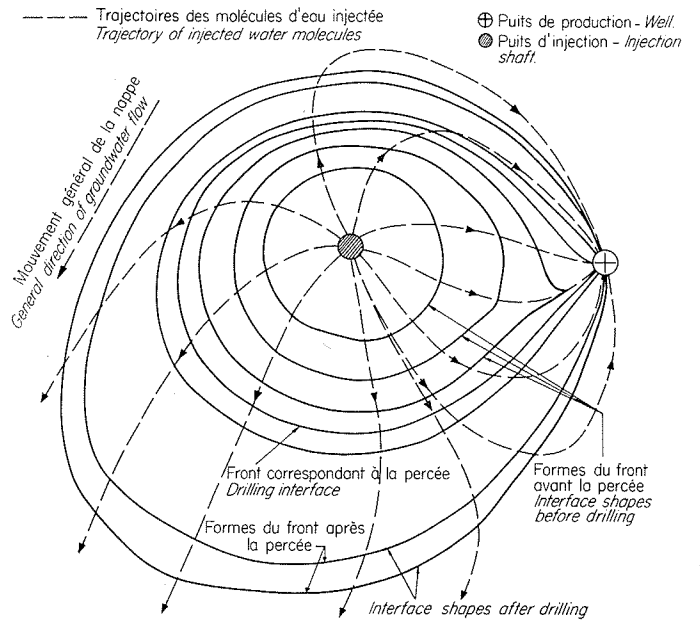
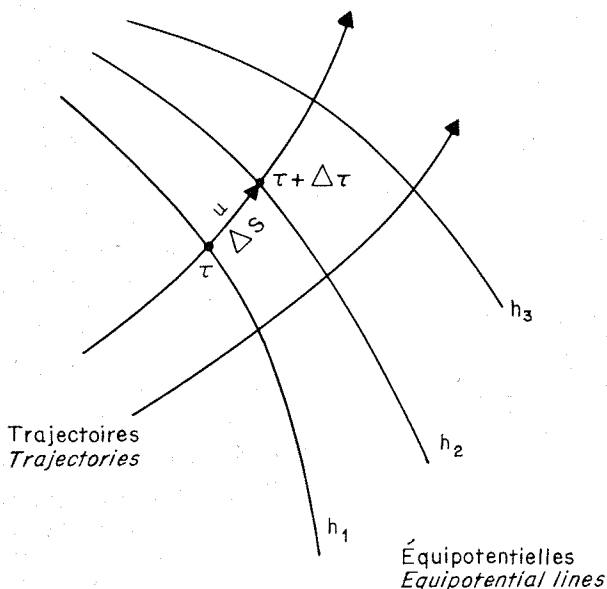
**Annexe I**

**Calcul de l'évolution au cours du temps du front séparant l'eau injectée de l'eau déplacée**

On suppose connue la nouvelle répartition du potentiel hydraulique résultant du fonctionnement du doublet dans la nappe. Les courbes orthogonales définissent les trajectoires des molécules d'eau, puisque le fluide chaud est supposé avoir des caractéristiques hydrodynamiques semblables à celles du fluide froid.

Le long de ces trajectoires, la vitesse de déplacement  $u$  est donnée par :

$$u = \frac{k}{\omega} i$$



4/ Exemple d'évolution dans le temps du front séparant l'eau injectée de l'eau déplacée.  
Example of evolution in time of interfaces between injected and tapped water.

et le chemin  $\Delta s$  parcouru au bout d'un temps  $\Delta\tau$  est donné par :

$$\Delta s = u\Delta\tau = \frac{k}{\omega} i\Delta\tau$$

Si l'on remplace la pente  $i$  de la surface piézométrique par la variation de hauteur piézométrique  $\Delta h$  sur la même longueur  $\Delta s$ , la formule précédente devient :

$$\Delta s = \frac{k}{\omega} \frac{\Delta h}{\Delta s} \Delta\tau$$

soit :

$$\Delta\tau = \frac{\omega}{k} \frac{\Delta s^2}{\Delta h} \tag{4}$$

Partant du puits d'injection au temps  $\tau = 0$ , la formule (4) permet de calculer la position, au bout du temps  $\Delta\tau$ , des molécules ayant emprunté la trajectoire considérée.

On peut faire de même sur les autres trajectoires et finalement graduer en  $\tau$  toutes les intersections des trajectoires et des équipotentiels. La courbe qui joint les points d'égal  $\tau$  définit la position du front d'injection à cet instant (cf. fig. 4).

**Annexe II**

**Caractéristiques thermiques de quelques roches**

	$\lambda$ (CGS)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$c$ (cal/g)
Granite . . . . .	6.10 <sup>-3</sup>	2,64-2,76	0,192
Calcaire . . . . .	4.10 <sup>-3</sup>	2,68-2,76	0,214
Sable . . . . .	6.10 <sup>-3</sup>	2,65	0,188
Moyenne des roches..	4.10 <sup>-3</sup>	2,65	0,2
Moyenne des sols . . . .	4.10 <sup>-3</sup>		
Eau . . . . .	1,4.10 <sup>-3</sup>	1,0	1,0

### Notations utilisées

$e$  : épaisseur du milieu aquifère;  
 $\omega$  : porosité du milieu aquifère;  
 $k$  : coefficient de Darcy du milieu aquifère;  
 $u$  : vitesse de déplacement de l'eau;  
 $i$  : pente de la surface piézométrique;  
 $\Delta h$  : accroissement de la hauteur piézométrique  $h$ ;  
 $\Delta s$  : accroissement de trajectoire des molécules d'eau;  
 $Q$  : débit constant d'injection et de production;  
 $T$  : température de l'eau injectée;  
 $t$  : température initiale du milieu aquifère;  
 $V$  : volume unitaire d'injection;  
 $S$  : surface unitaire d'éponte balayée par l'injection d'un volume unitaire  $V$ ;  
 $\tau$  : temps;  
 $t_n^m$  : température existant dans la cellule d'espace  $n$  pendant le  $m^{\text{e}}$  intervalle de temps;  
 $t^{*m}$  : température de l'eau produite pendant le  $m^{\text{e}}$  intervalle de temps;  
 $C_n^m$  : calories perdues par les épontes dans la cellule d'espace  $n$  pendant le  $m^{\text{e}}$  intervalle de temps;  
 $\epsilon_n^m$  : perte de température du volume unitaire d'eau qui entre dans la cellule d'espace  $n$  pendant le  $m^{\text{e}}$  intervalle de temps, par suite des calories perdues par les épontes dans la cellule  $n$  pendant le  $(m-1)^{\text{e}}$  intervalle de temps;  
 $\rho_E, \rho_R, \rho_{ER}$  : masse spécifique de l'eau, du milieu aquifère et de l'ensemble eau-milieu aquifère;

$c_E, c_R, c_{ER}$  : capacité calorifique de l'eau, du milieu aquifère et de l'ensemble eau-milieu aquifère;  
 $\lambda_E, \lambda_R, \lambda_{ER}$  : conductivité thermique de l'eau, du milieu aquifère et de l'ensemble eau-milieu aquifère;  
 $K : \frac{\lambda}{\rho c}$  ;  
 $\alpha : \frac{\rho_R c_R (1 - \omega)}{\rho_E c_E \omega}$  ;  
 $A : \frac{2}{\sqrt{\pi}} S \rho_{ER} c_{ER} \sqrt{K_{ER}}$  ;  
 $v$  : volume de milieu aquifère;  
 $v'$  : volume d'éponte;  
 $r$  : rayon d'un grain de milieu aquifère;  
 $l$  : distance entre deux fissures du milieu aquifère;  
 $R$  : distance du puits d'injection à un point donné;  
 $L$  : distance entre le milieu aquifère et la zone d'éponte où la température peut être considérée comme invariable.

### Références

- [1] H. S. CARSLAW and J. C. JAEGER. — Conduction of heat in solids. Clarendon Press, Oxford, 1959.
- [2] A. CAZAL. — Injection d'eau chaude dans une nappe à l'aide de forage; Etude thermique. Extrait de la publication n° 63 de l'A.I.H.S., Symposium Eaux de surface, pp. 421-431.
- [3] A. HOUEPURT. — Eléments de mécanique des fluides dans les milieux poreux. Extrait de la Revue de l'Institut Français du Pétrole et Annales des combustibles liquides. Editions TECHNIP.
- [4] P. PRUDHOMME et J. RICOUR. — Evaluation et exploitation des ressources hydrauliques souterraines : Emploi de modèles de laboratoire. Novembre 1963.
- [5] ROUSE. — Engineering Hydraulics : John Wiley and Sons, Inc., New York. Chapman and Hall Lim., London.

### Discussion

Président : M. BANAL

M. le Président remercie M. DELOUVRIER d'avoir bien voulu présenter cette communication, qui a paru à tous très claire et très convaincante, et ouvre la discussion.

M. René LÉVY n'a pas très bien compris pourquoi, après le temps  $t_1^1$ , l'eau injectée a une température inférieure. Est-ce pour rattraper la perte de chaleur?

M. DELOUVRIER répond que cet abaissement de température correspond à la quantité de chaleur perdue par les épontes de la première cellule d'espace pendant la première cellule de temps.

Ce départ de calories provoque un abaissement de température qui peut être imputée soit à l'eau déjà en place dans la première cellule d'espace, juste avant son passage dans la seconde cellule d'espace, soit à l'eau arrivant dans la première cellule d'espace pendant la seconde cellule de temps.

Les deux représentations du phénomène sont équivalentes dans la mesure où le découpage spatio-temporel est suffisamment fin.

M. LÉVY souligne que l'eau est toujours injectée à la température  $T$  mais qu'elle agit à la température  $T - t_1^1$ .

M. LAGARDE fait la remarque suivante :

« Puisque la méthode de discrétisation utilisée pour le calcul des fronts de température est critiquée, il semble qu'il serait souhaitable de comparer les résultats obtenus avec ceux que donne la méthode de Marx et Langenheim (T.P. 8092 - AIME, 1959, p. 312-315) qui schématise la forme du front, mais utilise une expression analytique exacte pour le même problème (convection dans couche, conduction dans les épontes) que celui discuté par les auteurs de Géopétrole. Cette comparaison serait à faire pour les temps courts tant que le système est encore radial. L'avantage de cette méthode est son extrême simplicité; elle est couramment utilisée en tout cas pour les calculs de récupération thermique, par injection de vapeur ou d'eau chaude, des gisements de pétrole.

M. DELOUVRIER précise que la méthode de Marx et Langenheim ne permet pas de calculer l'évolution de la température dans des puits de production situés dans la zone d'influence du puits d'injection, point qui intéresse particulièrement les hydrauliciens.

M. LÉVY demande quels sont les résultats obtenus du point de vue pratique.

M. DELOUVRIER répond qu'une application de la méthode exposée à un exemple typique a été faite. Elle montre que, généralement, les pertes par les épontes sont importantes au début de l'injection et deviennent progressivement négligeables.

Par ailleurs, Géopétrole utilise actuellement cette méthode pour prévoir à long terme les conséquences d'une injection d'eau chaude dans une des nappes du bassin parisien.

M. LÉVY indique que cette application existe depuis longtemps.

M. DELOUVRIER connaît des réalisations de ce genre, mais ne pense pas qu'elles aient donné lieu à des études préliminaires poussées.

M. LÉVY demande la nature des épontes.

M. DELOUVRIER mentionne que les calculs ont été faits avec une conductivité de  $3 \cdot 10^{-8}$  CGS, une densité de 2,7, une capacité calorifique de roche de 0,2 calories par gramme et une porosité de 1/3.

M. le Président demande quel est l'ordre d'importance du rôle des épontes dans le maintien d'une différence de température entre l'eau de production et l'eau d'injection. En combien de temps retrouverait-on la même température au puits et au piézomètre s'il n'y avait pas de perte par les épontes?

M. DELOUVRIER estime ce temps à quelques centaines de jours. Toutefois, dans le cas où on étudierait l'évolution de la température au puits de production, il faudrait tenir compte dans ce calcul de l'accroissement de température de l'eau injectée consécutif à l'arrivée du front thermique au puits de production.

Dans la méthode mentionnée par M. LAGARDE (voir plus haut), il faudrait sans doute avoir une température d'injection constante.

M. LAGARDE ajoute que l'on peut aussi supposer une température variable.

M. le Président demande si, en l'absence de perte par les épontes, et l'eau injectée ayant une température constante, l'on arriverait à avoir au point de prélèvement la même température qu'au point d'injection.

M. DELOUVRIER répond négativement. L'eau qui arrive au puits de production, lorsque le régime est stationnaire, est composée en partie d'eau chaude injectée et en partie d'eau froide provenant des régions de la nappe non perturbée du point de vue thermique.

M. RÉMÉNIÉRAS ajoute qu'il y a toujours un mélange de la nappe à température naturelle et de la nappe à température réchauffée.

M. LÉVY-LAMBERT indique que l'on a intérêt à mettre l'eau d'injection en aval de l'écoulement pour que le pourcentage d'eau qui revient au puits de soutirage soit le plus faible possible.

M. DELOUVRIER ajoute, après une remarque de M. le Président, que, s'il n'y avait pas d'écoulement général, la température de l'eau de production serait égale à la température de l'eau injectée.

M. LAMOUREUX demande à M. RÉMÉNIÉRAS si Electricité de France a étudié ce phénomène du doublet pour le refroidissement de certaines centrales thermiques.

M. RÉMÉNIÉRAS répond que les ordres de grandeurs des débits ne sont pas tout à fait du même ordre : il faut pour les centrales thermiques  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  par tranche de 100 000 kW, soit, pour une usine moderne de 500 000 kW,  $25 \text{ m}^3/\text{s}$  pour l'ensemble de l'installation. N'est-ce pas un débit trop important pour la plupart des captages d'eau souterraine?

M. LÉVY-LAMBERT estime que cela pourrait être intéressant, non pas pour servir de base de refroidissement, mais pour permettre, en cas d'étiage exceptionnellement bas, de décaler dans le temps l'accroissement de température qui, finalement, est trop vaste.

M. LAMOUREUX pense que, si l'on a une certaine déficience en eau, il n'est pas impossible que l'on puisse utiliser les puits déjà faits, quitte à réinjecter de l'eau, ainsi qu'on le fait dans le Nord où l'on a voulu utiliser la nappe profonde que l'on a découverte.

M. le Président dit que c'est un rôle tout à fait transitoire et que les débits sont tels qu'il faudrait réchauffer le tout.

M. LÉVY-LAMBERT souligne l'importance de la technique étudiée ici dans une région telle que la région parisienne, où il s'avère que plus de la moitié des forages effectués dans la nappe d'eau potable servent uniquement au refroidissement et que l'eau non polluée ou pouvant ne pas être polluée est rejetée à l'égout : on aurait une énorme économie d'eau souterraine.

M. le Président remercie à nouveau les auteurs de cette communication.