

MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE, DU COMMERCE ET DE L'ARTISANAT

**BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES**

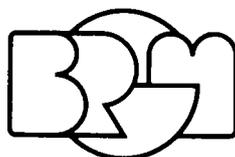
SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

B.P. 6009 - 45018 Orléans Cédex - Tél.: (38) 63.80.01

**CALCUL DE LA TEMPÉRATURE  
EN TÊTE D'UN FORAGE GÉOTHERMIQUE  
INFLUENCE DE L'ISOLATION DES TUBAGES  
AU Puits DE PRODUCTION**

par

Ch. BAUDOIN



**Département géothermie**

B.P. 6009 - 45018 Orléans Cédex - Tél.: (38) 63.80.01

**77 SGN 389 GTH**

Orléans, juin 1977

## R E S U M E

---

Cette étude, réalisée sur fonds propres, définit les pertes de chaleur existant entre un réservoir géothermique et la tête de puits dans trois cas différents :

- a) dans le cas où le casing de production est normalement cimenté ;
- b) dans le cas où la cimentation serait idéale ;
- c)  *dans le cas où l'annulaire casing terrain serait rempli par un isolant.*

Or, on sait qu'un fluide véhiculé dans un forage du réservoir à la surface perd une certaine quantité de chaleur (voir rapport N°77 SGN 199 GTH : "Transmission de chaleur dans un forage" par H.J. RAMEY ; Traduction : Ch. BAUDOUIN).

Les différences de température constatées entre les mesures enregistrées au toit du réservoir et celles relevées en tête de puits sont fonction de nombreux facteurs, en particulier :

- . de la température de fond
- . de la profondeur du réservoir
- . du gradient géothermique de la région considérée
- . du temps de production
- . du débit de production
- . de la viscosité, de la densité et de la conductivité thermique du fluide
- . de la conductivité thermique des roches encaissantes
- . de la conductivité thermique de l'acier constitutif des tubages et notamment *de conductivité thermique du matériau de l'annulaire casing terrain* si la production se fait par le casing.

La connaissance de ces différents paramètres plus ou moins facilement appréciables, permet d'évaluer par le calcul la température du fluide en tête de puits de production.

Les principaux résultats montrent que, selon les débits, la différence de température dans un forage entre le réservoir et la surface se situe entre 2 et 4°C pour un tubage cimenté normalement, dans les forages au Dogger du Bassin Parisien,

Si ces mêmes casings étaient isolés, les calculs montrent que la chute de température ne serait que de l'ordre du demi degré.

Les frais supplémentaires qu'entraînerait la mise en place d'un tel isolant sont relativement peu élevés par rapport à ceux d'une cimentation normale. Une brève étude économique conclue que ces dépenses sont amorties sur une période de 2 à 3 ans.

## TABLE DES MATIERES

---

	Pages
I - INTRODUCTION.....	4
II - APPLICATION POUR LE CALCUL DE LA TEMPERATURE EN TETE DU PUIITS PRODUCTEUR Cr GTH 4 (Creil n° 4) POUR UN DEBIT DE 80 M <sup>3</sup> /H.....	7
2.1. <i>Données préliminaires</i> .....	8
2.1.1. Développement.....	8
2.2. <i>Comparaison des températures calculées et des températures         mesurées</i> .....	13
III - APPLICATION POUR LE CALCUL DE LA TEMPERATURE EN TETE DU PUIITS PRODUCTEUR Cr GTH 4 POUR UN DEBIT DE 150 M <sup>3</sup> /H.....	15
3.1. <i>Données préliminaires</i> .....	15
3.2. <i>Développement</i> .....	15
IV - APPLICATION AUX FORAGES GEOTHERMIQUES DE MELUN - L'ALMONT.....	18
4.1. <i>Données préliminaires</i> .....	18
4.2. <i>Développement</i> .....	19
4.3. <i>Comparaison des températures calculées et des températures         enregistrées</i> .....	20
V - CALCUL DE LA TEMPERATURE EN TETE DE PUIITS D'UN FORAGE PARFAITEMENT CIMENTE	
5.1. <i>Généralités</i> .....	23
5.2. <i>Nous allons maintenant appliquer le raisonnement dans le cas où         la cimentation du casing de production serait idéale</i> .....	27

VI - EQUILIBRE DE LA TEMPERATURE.....	32
6.1. <i>Exemple de Creil</i> .....	32
6.2. <i>Melun-l'Almont</i> .....	33
VII - CALCUL DE LA TEMPERATURE EN TETE D'UN PUIIS DONT LE CASING EST ISOLE.....	34
7.1. <i>Données préliminaires</i> .....	34
7.2. <i>Développement</i> .....	35
VIII - INFLUENCE DE L'ISOLATION DES CASING.....	38
8.1. <i>Exemple de Creil</i> .....	38
8.1.1. Débit 80 m <sup>3</sup> /h.....	38
8.1.2. Débit 150 m <sup>3</sup> /h.....	38
8.1.3. Remarque sur l'influence d'un isolant.....	40
8.2 <i>Un gel isolant imperméable à l'eau</i> .....	40
8.2.1. Gains de température en tête de puits.....	42
8.3. <i>Bilan comparatif</i> .....	44
IX - ETUDE ECONOMIQUE.....	45
9.1. <i>Cas de Creil</i> .....	45
9.2. <i>Cas de Melun</i> .....	46
X - L'ISOLANT.....	47
10.1. <i>Choix de l'isolant</i> .....	47
10.2. <i>Les gels isolants</i> .....	47
10.2.1. Présentation des gels et mise en place.....	48
10.2.2. Propriétés.....	48
CONCLUSION.....	50

## P R E A M B U L E

---

On a vu que la théorie de RAMEY exposée dans le rapport 77 SGN 199 GTH permettait de calculer, grâce à certaines équations, les différences de température entre la surface et un réservoir profond. Cette théorie s'applique à l'injection d'un fluide (eau, vapeur, gaz) à travers un tubing ou un casing isolé, cimenté ou non cimenté.

Cette méthode est aussi valable lors de la production d'un fluide dans les mêmes conditions.

Il suffit, dans le développement des équations, de considérer l'origine des profondeurs au niveau où l'on a enregistré la température de fond. On considère alors que le refroidissement du fluide géothermal commence à cette profondeur.

Les calculs seront appliqués aux forages de Creil et de Melun à différents débits, puis seront comparés aux résultats effectivement constatés.

## LEXIQUE DES TERMES UTILISES

A	= Coefficient de profondeur
Aa	= moyenne logarithmique des surfaces du matériel remplissant l'annulaire.
Ac	= moyenne logarithmique des surfaces du casing.
A'a <sub>1</sub>	= surface externe du matériel remplissant l'annulaire
A'a	= surface interne du matériel remplissant l'annulaire en m <sup>2</sup>
A'c <sub>1</sub>	= surface externe du casing en m <sup>2</sup>
A'c	= surface interne du casing en m <sup>2</sup>
a	= gradient géothermique en °C/m.
B	= nombre de Biot
b	= température moyenne du sol en surface °C
C	= capacité calorifique de l'eau en Kcal/kg °C.
D	= Diamètre du casing en m
f(t)	= fonction temps
g	= accélération de la pesanteur m/s/s.
h	= coefficient de couche limite à l'intérieur du casing en Kcal/m h °C.
K	= conductivité thermique moyenne des roches en Kcal/m h °C.
k	= conductivité thermique du fluide géothermal Kcal/m h °C
Ka	= conductivité thermique du matériel remplissant l'annulaire en Kcal/m h °C.
Kc	= conductivité thermique du casing en Kcal/m h °C.
P	= nombre de Prandlt
Q	= débit du fluide géothermal en m <sup>3</sup> /h ou m <sup>3</sup> /j.
r <sub>2</sub>	= rayon intérieur du casing en m
r' <sub>2</sub>	= rayon extérieur du casing en m
r <sub>3</sub>	= rayon extérieur du matériel de l'annulaire
R	= nombre de Reynolds.
t	= temps de production en heures.
To	= température mesurée au fond en °C.
T <sub>1</sub>	= température du fluide en surface en °C.
U	= coefficient global de transfert thermique en Kcal/m h °C ou en Kcal/m j °C.

- V = vitesse du fluide géothermal à l'intérieur du casing en m/s.  
W = quantité de fluide produit en kg/j.  
xa = épaisseur de la gaine du matériau de l'annulaire en m.  
xc = épaisseur du casing en m  
Z = profondeur de la mesure de fond par rapport au sol en m.  
 $\alpha$  = diffusivité thermique de la roche  $m^2/j$   
 $\rho$  = masse volumique en  $kg/m^3$  du fluide géothermal  
 $\mu$  = viscosité du fluide géothermal en  $kg\ s/m^2$

## I - INTRODUCTION

En géothermie basse énergie, une connaissance quantitative de la transmission de chaleur dans les puits peut apporter d'appréciables informations. En effet, la température des principaux réservoirs géothermiques français étant relativement basse, la rentabilité d'une installation est très sensible à la température du fluide géothermal. Ainsi, une différence de quelques degrés peut entraîner des modifications techniques susceptibles d'influencer le bilan final d'une opération.

Il est possible de réduire sensiblement les déperditions de chaleur entre le fluide géothermal et l'encaissant pendant son trajet vers la surface. Il suffit simplement pour cela d'introduire dans l'annulaire casing terrain un matériau possédant une conductivité thermique nettement plus faible que celle du ciment.

A l'heure actuelle, il n'existe pas assez d'installations géothermiques fonctionnant depuis suffisamment longtemps pour que des données précises concernant les températures puissent être émises. Cependant, on peut comparer les températures calculées et celles mesurées sur les installations de Creil et de Melun par exemple.

Les mesures effectuées en tête de puits sur ces deux installations ont donné les résultats suivants :

### Creil

Cr GTH<sub>4</sub> à 80 m<sup>3</sup>/h = 55,7°C

Cr GTH<sub>4</sub> à 150 m<sup>3</sup>/h = 57°C

### Melun

PM<sub>2</sub> à 85 m<sup>3</sup>/h = 70°C

PM<sub>2</sub> à 27 m<sup>3</sup>/h = 68°C.

RAPPEL SOMMAIRE DE LA METHODE DE CALCUL

(Voir 77 SGN 199 GTH)

---

La température en tête d'un puits producteur est donnée par l'équation (1):

$$T_1 = aZ + b - aA + (T_0 + aA - b) e^{-Z/a} \quad (1)$$

dans laquelle :

a est le gradient géothermique,

Z la profondeur par rapport au sol à laquelle on a mesuré la température,

b la température moyenne du sol en surface,

T<sub>0</sub> la valeur de la température à la cote Z,

A le coefficient de profondeur.

Ce coefficient A est une fonction du débit massique journalier (W) de la chaleur spécifique (C) du fluide véhiculé, de la conductivité moyenne des roches (K), du rayon intérieur du tubage (r<sub>2</sub>), du coefficient global de transfert thermique (U) et du temps de production (t).

$$A = \frac{WC [K + r_2 U f(t)]}{2 \pi r_2 U K} \quad (2)$$

Le coefficient global de transfert thermique est proportionnel au coefficient de couche limite h, tel que :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{xc}{Kc} \quad (3)$$

dans le cas d'un casing normalement cimenté.

Dans l'hypothèse d'un tubage parfaitement cimenté ou isolé,  
l'équation (3) devient :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{x_c A_1}{K_a A_c} + \frac{x_c A_1}{K_c A_c} \quad (3')$$

$$\text{avec } A_a = \frac{A' a_1 - A' a}{\text{Ln } \frac{A' a_1}{A a}}$$

$$\text{et, } A_c = \frac{A' c_1 - A' c}{\text{Ln } \frac{A' c_1}{A' c}}$$

Le coefficient de couche limite  $h$  peut être calculé à partir  
des 3 nombres sans dimension suivants :

Nombre de Biot

$$B = 0,0225 \times R^{0,8} \times P^{0,4}$$

$R$  étant le nombre de Reynolds,

$$\text{tel que } R = \frac{\rho V D}{\mu g}$$

et  $P$  le nombre de Prandlt,

$$\text{tel que } P = \frac{C \mu g}{K/3600}$$

Le coefficient de couche limite étant égal à :

$$h = \frac{Bk}{D}$$

II - APPLICATION POUR LE CALCUL DE LA TEMPERATURE EN TETE DU PUIITS  
PRODUCTEUR Cr GTH 4 (Creil n° 4) POUR UN DEBIT DE 80 M<sup>3</sup>/H

Le B. R. G. M. a assuré, en 1975-1976, la maîtrise d'oeuvre de quatre forages géothermiques pour le compte de l'OPIHLM de Creil. Deux sont destinés à la production d'eau chaude, deux à la réinjection du fluide refroidi.

Le forage du puits producteur Cr GTH 4 s'est terminé le 3 mai 1976. Les essais se sont déroulés du 11 au 14 mai 1976 (76 SGN 318 GTH)<sup>1</sup>. Les enregistrements thermométriques effectués au cours de ces essais ont donné  $58 \pm 1^\circ\text{C}$  à 1 600 m. Ce forage a fourni l'eau chaude sanitaire aux habitations à loyer modéré de la ZAC du Moulin et de la Cavée de Senlis à Creil à partir du 6 août 1976.

Les valeurs de températures mesurées en tête de puits pendant une période de 55 jours ont été les suivantes :

8 août.....	54,7°C
16 août.....	54,9°C
23 août.....	55°C
1er septembre.....	55,3°C
15 septembre.....	55,5°C
22 septembre.....	55,7°C
1er octobre.....	55,7°C.

°  
° °

Le calcul de la température en tête de puits au bout de 55 jours de production peut se déterminer de la façon suivante :

### 2.1. Données préliminaires

$$Q = 80 \text{ m}^3/\text{h} = 1\,920 \text{ m}^3/\text{j}$$

$$T^\circ \text{ à } 1\,600 \text{ m} = -58^\circ\text{C}$$

$$\text{Sabot du tubage } 7'' \text{ à } 1\,538 \text{ m.}$$

$$a = 0,02875^\circ\text{C}/\text{m}$$

$$D = 0,16 \text{ m}$$

$$K_c = 46 \text{ Kcal}/\text{m h } ^\circ\text{C} \quad \text{acier E 36 V} \quad (\text{donnée Vallourec})$$

Viscosité de l'eau corrigée par rapport à la température et à la salinité

$$\mu = 0,5 \times 1,02 \times 10^{-4} \text{ Kgs}/\text{m}^2$$

Masse volumique en  $\text{kg}/\text{m}^3$  de l'eau thermale

$$\rho = 1\,008 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

Conductivité thermique de l'eau à  $58^\circ\text{C}$

$$k = 4,28 \text{ Kcal}/\text{m h } ^\circ\text{C.}$$

#### 2.1.1. Développement

Le coefficient de couche limite  $h$  peut être calculé à partir des trois nombres sans dimension suivants :

Nombre de Reynolds :

$$R = \frac{\rho V D}{\mu g} = \frac{1008 \times 1,2 \times 0,16}{0,5 \times 10^{-4} \times 1,02 \times 9,8}$$

$$\underline{R = 387\,000}$$

Nombre de Plandlt :

$$P = \frac{C_{\mu g}}{K/3 \ 600} = \frac{1 \times 0,5 \times 10^{-4} \times 1,02 \times 9,8}{4,28 / 3 \ 600}$$

$$\underline{P \approx 0,420}$$

Nombre de Biot :

$$B = 0,0225 \times R^{0,8} \times p^{0,4}$$

$$\underline{B = 465}$$

Coefficient de couche limite

$$h = \frac{B \ k}{D} = \frac{465 \times 4,28}{0,16} = 12 \ 438 \text{ Kcal/m}^2\text{h } ^\circ\text{C}$$

A partir du coefficient de couche limite, on calcule le coefficient global de transfert U :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{x_c}{K_c}$$

avec :  $x_c$  : épaisseur du tubage

$$x_c = 0,008 \text{ m pour un tubage } 7'' ; 23 \text{ lbs/ft}$$

$K_c$  : conductivité thermique de l'acier constitutif du tubage.

Dans ce cas, acier E 36 V  $K_c = 46 \text{ Kcal/m h } ^\circ\text{C}$  (donnée Vallourec).

Dans un premier temps, on ne tiendra pas compte de l'épaisseur de la gaine de ciment, ni de la conductivité thermique de celui-ci dans l'annulaire casing-terrain. En effet, pour utiliser la formule développée :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{x_a \ A_1}{K_a \ A_a} + \frac{x_c \ A_1}{K_c \ A_c}$$

il faudrait que la cimentation soit idéale, c'est-à-dire sans aucune présence de microannulus entre le ciment et l'acier ou entre le ciment et le terrain. Ce qui est très rarement le cas. Cette considération sera développée plus tard.

donc :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{x_c}{K_c}$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{12\,438} + \frac{0,008}{46}$$

$$U = 3\,932 \text{ Kcal.m h } ^\circ\text{C}$$

soit par jour :

$$U \approx \underline{94\,368 \text{ Kcal/mj}^\circ\text{C}}$$

Calcul de la fonction temps f(t)

La fonction temps peut être estimée à partir de la figure 1.  
La période étant de 55 jours, on a calculé :

$$\frac{\alpha t}{r'_2{}^2}$$

avec :  $\alpha = 3,71 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$

$$t = 1\,320 \text{ h}$$

$$r'_2 = 0,09 \text{ m}$$

$$\alpha t / r'_2{}^2 = \frac{3,71 \times 10^{-3} \times 1\,320}{(0,09)^2} \approx 604$$

$$\log \alpha t / r'_2{}^2 = 2,78$$

De la figure 1, on tire :  $\log f(t) = 0,55$   
d'où  $f(t) = 3,54$ .

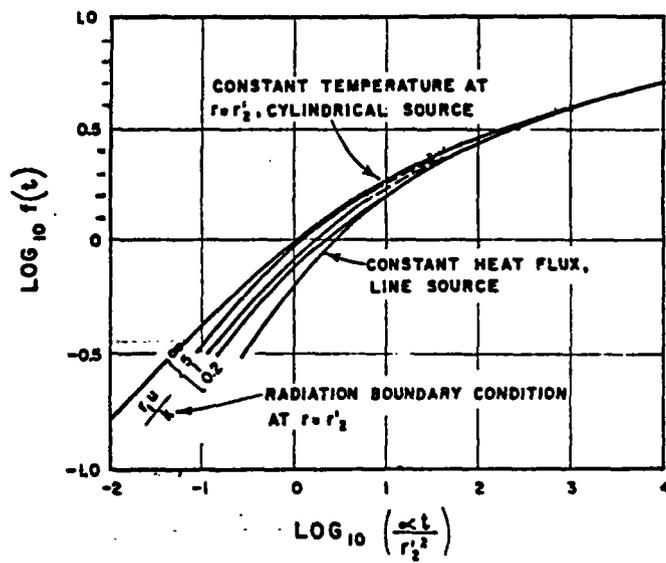


FIGURE 1 :

Conduction de chaleur transitoire dans un système radial infini.

Le coefficient de profondeur, A, peut alors être calculé à partir de la formule

$$A = \frac{Wc [K + r_2 U f(t)]}{2\pi r_2 U K}$$

avec :

$$W = Q\rho = 1\,920 \times 1\,008 = 1\,935\,360 \text{ Kg/j}$$

$$K = 50 \text{ Kcal/m j}^\circ\text{C (d'après RAMEY)}$$

$$r_2 = 0,08 \text{ m}$$

$$U = 94\,368 \text{ Kcal/j m}^\circ\text{C}$$

$$f(t) = 3,54$$

D'ou :

$$A = 21\,848$$

Calcul de la température en tête de puits :

Pour les raisons évoquées précédemment, on considère qu'en débit la température de  $58^\circ\text{C}$  est celle de tout le réservoir.

$$T_1 = aZ + b - aA + (T_0 + aA - b) e^{-\frac{Z}{A}}$$

avec :

$$a = 0,02875 \text{ }^\circ\text{C/m}$$

$$Z = 1\,600 \text{ m}$$

$$b = 12^\circ\text{C}$$

$$T_0 = 58^\circ\text{C}$$

La température en tête de puits est alors égale à

$T_1 = 56,4^\circ\text{C}$
----------------------------

La mesure de température au fond est connue à  $\pm 1^\circ\text{C}$  ( $T_0 = 58 \pm 1^\circ\text{C}$ ). La valeur utilisée pour le calcul a été prise égale à  $T_0 = 58^\circ\text{C}$ . La valeur de  $56,4^\circ\text{C}$  est très proche de la température mesurée sur le forage Cr GTH 4 au bout de 55 jours de production à  $80 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $55,7^\circ\text{C}$ ). La fiabilité du calcul semble correcte puisque le résultat est compris dans la fourchette de la précision de la mesure.

## 2.2. Comparaison des températures calculées et des températures mesurées

La figure 2 établit la comparaison des températures relevées et celles calculées pendant une période de 55 jours (courbes 1 et 2). On constate (courbe 1) que l'élévation de température est de  $1,2^{\circ}\text{C}$  ( $54,5$  à  $55,7^{\circ}\text{C}$ ) pour la période considérée.

Sur la courbe 2 (courbe des températures calculées), cette élévation de température est de  $1^{\circ}\text{C}$  ( $55,4$  à  $56,4^{\circ}\text{C}$ ).

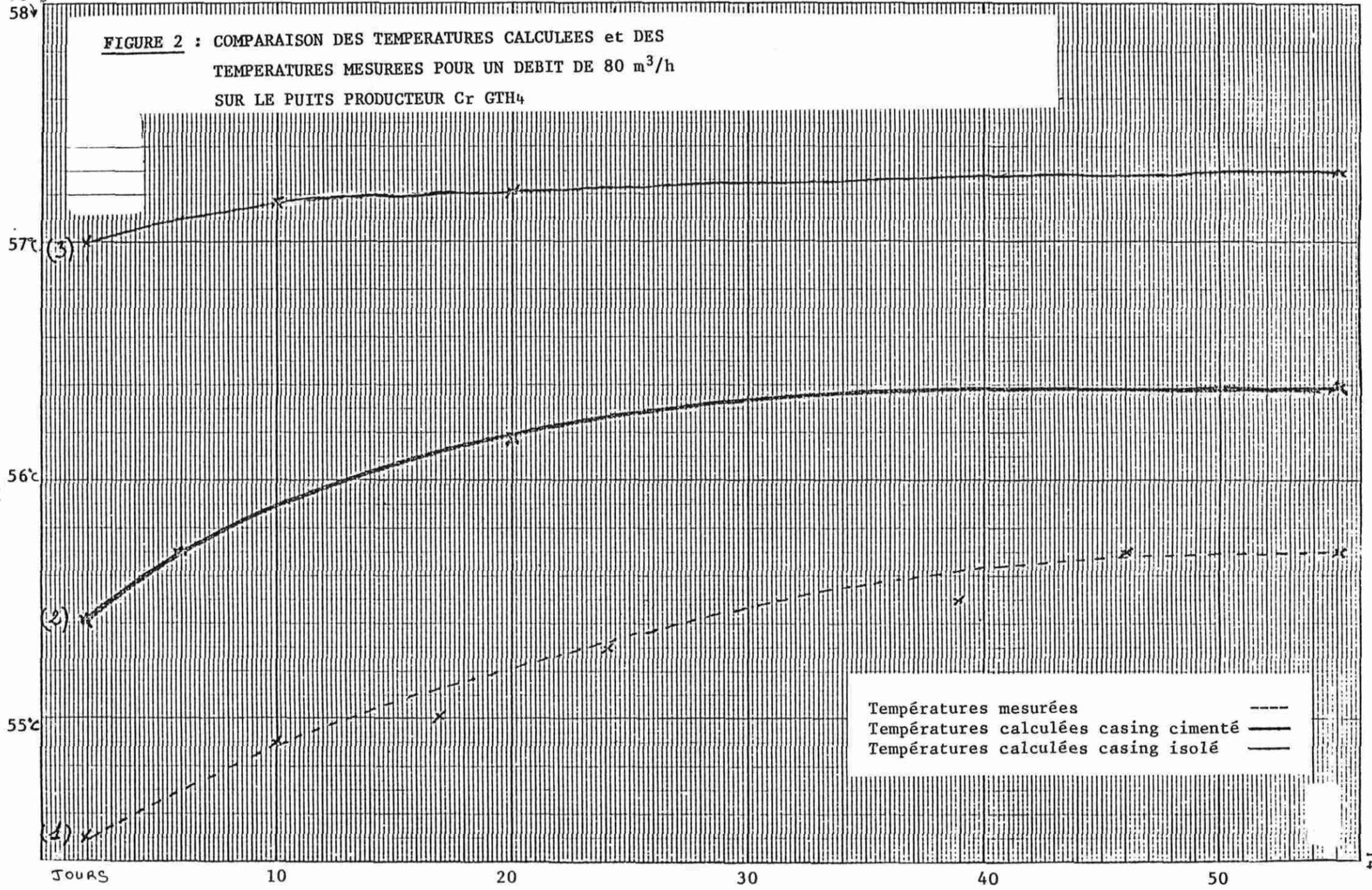
Les deux courbes ne sont donc pas rigoureusement parallèles, c'est-à-dire que la chaleur perdue réellement par le casing n'est pas absolument identique dans le temps. Cependant la différence est toujours remarquable au bout de 55 jours.

La différence est de $1^{\circ}\text{C}$	après 6 jours
$1^{\circ}\text{C}$	" 10 jours
$1^{\circ}\text{C}$	" 20 jours
$0,85^{\circ}\text{C}$	" 30 jours
$0,85^{\circ}\text{C}$	" 40 jours
$0,7^{\circ}\text{C}$	" 50 jours
$0,7^{\circ}\text{C}$	" 55 jours.

La courbe réelle enregistre donc "un rattrapage" par rapport à la courbe théorique de  $0,3^{\circ}\text{C}$  en 55 jours. Les températures relevées après cette période pendant 60 jours sont restées stabilisées à  $55,7^{\circ}\text{C}$ . Après une période de 55 jours, on peut donc considérer que la chaleur perdue par le casing est constante.

°C

**FIGURE 2 : COMPARAISON DES TEMPERATURES CALCULEES et DES TEMPERATURES MASUREES POUR UN DEBIT DE 80 m<sup>3</sup>/h SUR LE PUIS PRODUCTEUR Cr GTH<sub>4</sub>**



Températures mesurées ---  
Températures calculées casing cimenté —  
Températures calculées casing isolé —

### III - APPLICATION POUR LE CALCUL DE LA TEMPERATURE EN TETE DU Puits PRODUCTEUR Cr GTH 4 POUR UN DEBIT DE 150 M<sup>3</sup>/H

#### 3.1. Données préliminaires

$$Q = 150 \text{ m}^3/\text{h} = 3\,600 \text{ m}^3/\text{j}.$$

$$T_o \text{ à } 1\,600 \text{ m} = 58^\circ \text{ C}.$$

Sabot du tubage 7" à 1 538 m.

$$a = 0,02875^\circ \text{ C/m}.$$

$$D = 0,16 \text{ m}.$$

$$K_c = 46 \text{ K cal/m h } ^\circ\text{C} \text{ (donnée VALLOUREC)}$$

Viscosité corrigée par rapport à la température et à la salinité

$$\mu = 0,5 \times 1,02, \times 10^{-4} \text{ Kgs/m}^2.$$

Densité de l'eau par rapport à la température et à la salinité

$$\rho = 1\,008 \text{ Kg/m}^3.$$

$$k = 4,28 \text{ K cal/m h } ^\circ\text{C}.$$

#### 3.2. Développement

Calcul du coefficient de couche limite à partir des 3 nombres sans dimension, R. P. B.

#### Nombre de REYNOLDS

$$R = \frac{\rho \ V \ D}{\mu \ g}$$

A 150 m<sup>3</sup>/h, la vitesse du fluide dans le tubage 7" est voisine de 2,2 m/s,

d'où,

$$R \approx 710\,000.$$

Nombre de Prandtl

$$P = \frac{C \mu g}{k/3600}$$

$$P = 0,420$$

Nombre de Biot

$$B = 0,0225 \times R^{0,78} \times P^{0,4}$$

$$B = 763$$

Coefficient de couche limite

$$h = \frac{B k}{D} = 20\,410 \text{ K cal/m}^2\text{h } ^\circ\text{C}$$

Coefficient global de transfert

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{xc}{Kc}$$

$$U = 4\,486,14 \text{ K cal/m h } ^\circ\text{C}$$

Soit, par jour,

$$U = 107\,667 \text{ K cal/m j } ^\circ\text{C.}$$

Calcul de la fonction temps  $f(t)$ 

La fonction temps est estimée à partir de la figure 1.

La période de production considérée est de 60 j (2 mois).

On a calculé :

$$\frac{\alpha t}{r'^2} \quad \text{avec :}$$

$$\alpha = 3,71 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h (d'après RAMEY).}$$

$$t = 60 \times 24 = 14\,404 \text{ h.}$$

$$r'^2 = 0,09 \text{ m.}$$

$$\alpha t / r'^2 = 659$$

$$\log \alpha t / r'^2 = 2,82$$

De la figure 1, on tire,  $\log f(t) = 0,6$

$$\text{d'où : } f(t) = 3,98.$$

Coefficient de profondeur

$$A = \frac{Wc \cdot [K + r_2 U f(t)]}{2\pi r_2 U K}$$

avec :

$$W = Q \rho = 150 \times 24 \times 1\,008 = 3\,628\,800 \text{ kg/j.}$$

$$C = 1 \text{ K cal/kg } ^\circ\text{C.}$$

$$U = 107\,667 \text{ K cal/m j } ^\circ\text{C.}$$

$$f(t) = 3,98$$

$$A = 46\,039$$

Calcul de la température en tête de puits

$$T_1 = (aZ + b) - aA + (T_0 + aA - b) e^{-Z/A}$$

avec :

$$a = 0,02875^\circ \text{ C/m}$$

$$Z = 1\,600 \text{ m.}$$

$$b = 12^\circ\text{C.}$$

$$T_0 = 58^\circ\text{C.}$$

$T_1 = 57,2^\circ \text{ C}$
------------------------------

#### IV - APPLICATION AUX FORAGES GEOTHERMIQUES DE MELUN - L'ALMONT

Les forages de Melun-l'Almont sont des forages déviés. La profondeur du sabot du 7" est de 1 702 m en vertical et de 1 794 m en dévié. La température de fond a été enregistrée par thermométrie et elle a été relevée à  $72,4^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . Le gradient géothermique peut être évalué sur ce puits à :

$$a = \frac{72 - 12}{1\ 702} \neq 0,0355^{\circ}\text{C/m.}$$

#### 4.1. Données préliminaires (débit 85 m<sup>3</sup>/h)

Le débit de production s'est stabilisé aux alentours de

$$\underline{85\ \text{m}^3/\text{h}}$$

Le forage est tubé en 7", 23 lbs/ft, J 55.

$$Q = 85\ \text{m}^3/\text{h.}$$

$$D = 0,16\ \text{m.}$$

$$K_c = 46\ \text{K cal/m h }^{\circ}\text{C.}$$

$$\mu = 0,3952 \times 1,02 \times 10^{-4}\ \text{Kg/s m}^2$$

Conductivité de l'eau à  $72^{\circ}\text{C}$  :

$$k = 4,33\ \text{K cal/m h }^{\circ}\text{C.}$$

$$\rho = 1,01.$$

$$V = 1,2\ \text{m/s.}$$

Viscosité corrigée en fonction de la température et de la salinité

$$\mu = 0,39 \times 10^{-4} \times 1,02\ \text{Kgs/m}^2$$

Densité corrigée en fonction de la température et de la salinité

$$\rho = 981\ \text{Kg/m}^3$$

#### 4.2. Développement

Calcul du coefficient de couche limite à partir des trois nombres sans dimension R. P. B.

$$R = \frac{\rho V D}{\mu g} = \approx 483\,400$$

$$P = \frac{c \mu g}{K/3600} = 0,3241$$

$$B = 0,0225 \times R^{0,8} \times P^{0,4}$$

$$B \approx 505$$

#### Coefficient de couche limite

$$h = \frac{B k}{D}$$

$$h = 13\,666 \text{ K cal/m}^2\text{h}^\circ\text{C.}$$

#### Coefficient global de transfert pour une cimentation normale.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{xc}{Kc}$$

$$U = 4\,947,15 \text{ K cal/m j}^\circ\text{C.}$$

soit, en jours,

$$U = 97\,132 \text{ K cal/m j}^\circ\text{C.}$$

#### Calcul de la fonction temps

$$\frac{at}{r'^2}$$

avec =

$$t = 1\,000 \text{ jours, soit } 24\,000 \text{ heures}$$

$$\frac{at}{r'^2} = 10\,992$$

$$\log \frac{at}{r'^2} = 4,04$$

De la figure 1, on tire :  
 $\log f(t) = 0,7$  d'où  $f(t) = 5$ .

Coefficient de profondeur

$$A = \frac{Wc [K + r_2 U f(t)]}{2\pi r_2 U K}$$

$$W = Q\rho = 2048328$$

$$A = 32\ 641.$$

Température en tête de puits

$$T_1 = (aZ + b) - aA + (T_0 + Aa - b) e^{-Z/A}$$

avec :

$$a \text{ gradient géothermique} = 0,0355$$

$$z = 1\ 702$$

$$T_0 = 72,4^\circ\text{C}.$$

$T_1 = 70,8^\circ\text{C}$
----------------------------

#### 4.3. Comparaison des températures calculées et des températures enregistrées

Les enregistrements de la température en tête de puits donnent en moyenne  $69^\circ\text{C}$  avec des extrêmes compris entre  $70^\circ$  et  $68^\circ\text{C}$ . (figure 3).

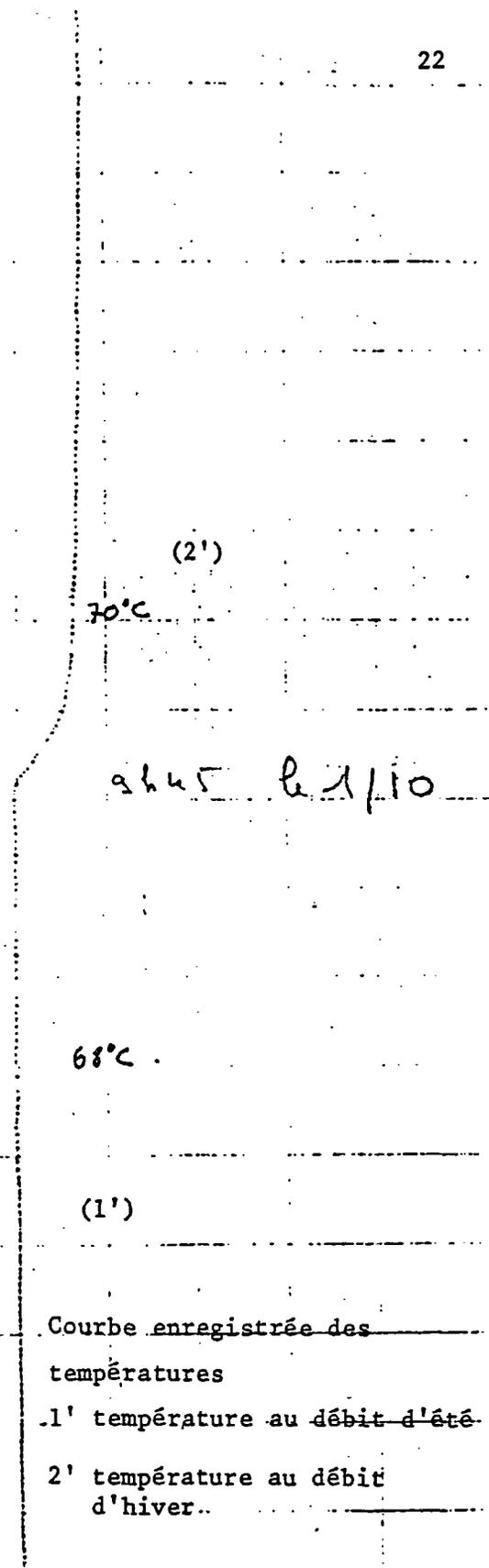
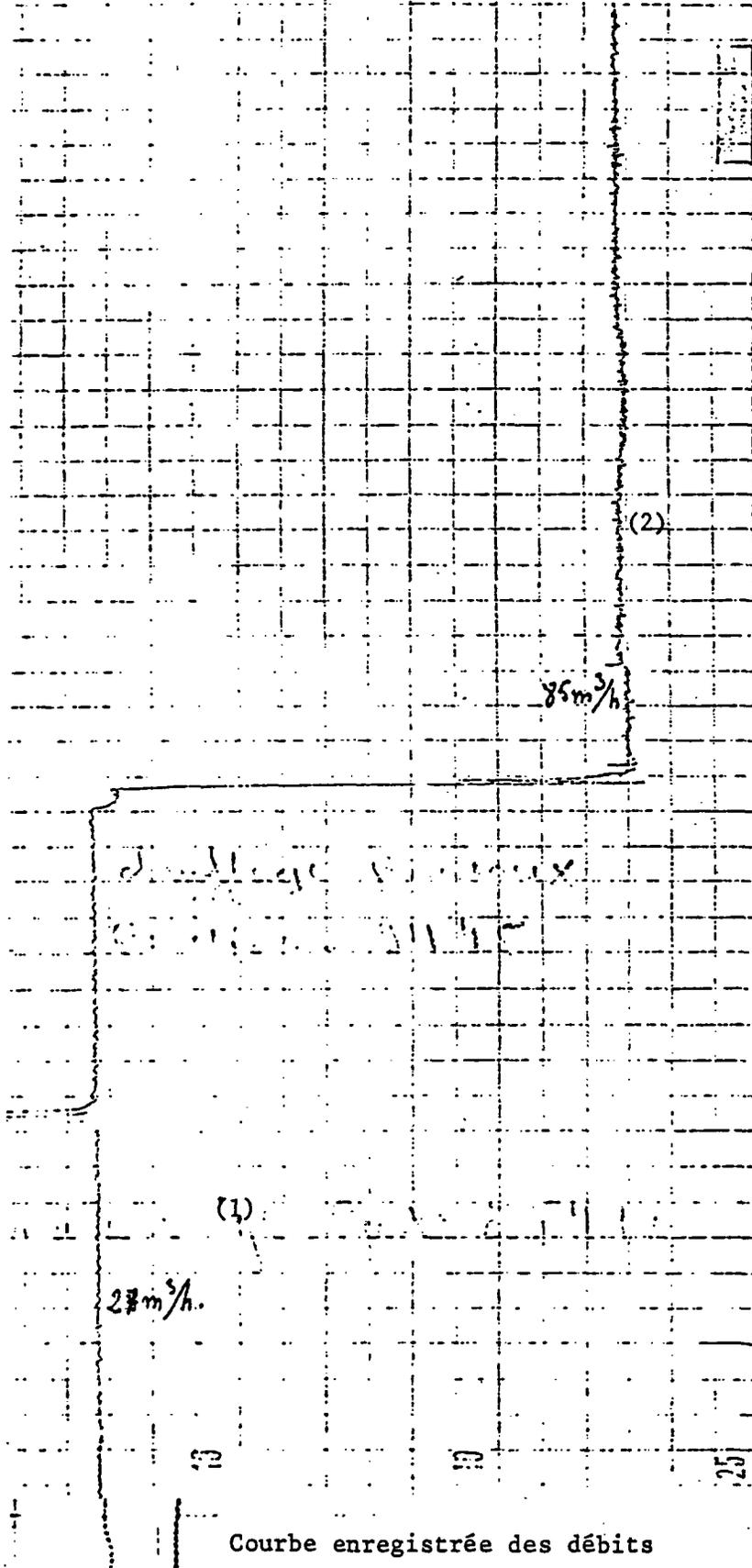
Dans ce nouvel exemple, on constate que les calculs concordent avec les enregistrements.

Durant l'été, la production est réduite à  $27\text{ m}^3/\text{h}$  environ. Les températures mesurées varient entre  $68$  et  $66^\circ\text{C}$ . (figure 3).

Le calcul effectué pour un tel débit donne une température en tête de puits de :

$$\underline{T_1 = 68,6^\circ\text{C}}$$

On remarquera que l'on retrouve ici comme dans les cas précédents un excès de + 0,6 à 0,8°C par rapport à la valeur maximale de la température mesurée.



Courbe enregistrée des débits

- (1) Débit d'été
- (2) Débit d'hiver

Courbe enregistrée des températures

- 1' température au débit d'été
- 2' température au débit d'hiver

**FIGURE 3 : ENREGISTREMENTS DEBIT/TEMPERATURE  
DU FORAGE PRODUCTEUR DE MELUN-L'ALMONT PM2**

## V - CALCUL DE LA TEMPERATURE EN TETE DE PUIITS D'UN FORAGE PARFAITEMENT CIMENTE.

### 5.1. Généralités

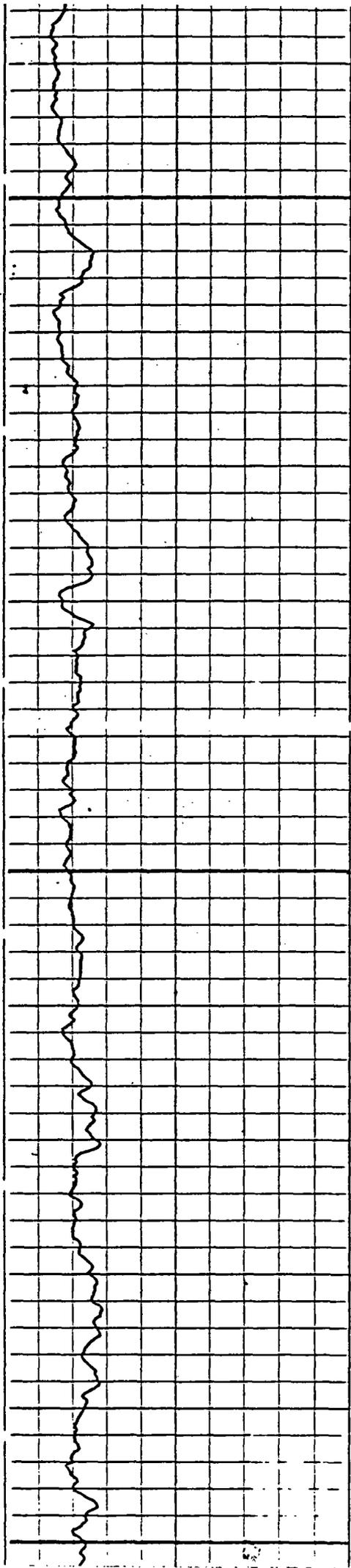
Dans les calculs précédents, on a admis pour l'estimation du coefficient global de transfert thermique que le tubage du puits n'était pas parfaitement cimenté et on a constaté que les résultats obtenus par le calcul étaient très proches de la réalité. Il faut noter cependant qu'il arrive, et c'est heureux, que le log de cimentation indique une adhérence excellente casing-ciment terrain.

Cette hypothèse a été introduite car l'expérience montre que :

1. Un forage présente souvent une allure spiralée ; le tubage peut alors être en contact direct avec le terrain.
2. Il arrive même que lorsque "l'habillage des colonnes" (tubages équipés de centreurs, racleurs, paniers, etc...) est important, la cimentation ne soit pas idéale.
3. On remarque sur les logs de cimentation "des ponts" indiquant que le ciment n'adhère pas parfaitement à la colonne et/ou au terrain. Ceci se constate particulièrement lorsque le trou est "cavé", c'est-à-dire qu'il présente des passages supérieurs au diamètre nominal de l'outil ayant effectué la passe de forage considérée. On peut couramment enregistrer en terrain meuble des diamètres de 16", par exemple, alors que l'outil utilisé possède un diamètre de 8"1/2. Dans ces conditions, il est évident que la zone considérée sera très mal cimentée. Le ciment ne peut plus jouer le rôle d'isolant que lui confère sa conductivité thermique (figures 4 et 5).

FIGURES 4 ET 5

EXEMPLES d'ENREGISTREMENTS DE DIAMETREURS  
DANS UN SONDAGE FORE EN 8 3/4"



0500

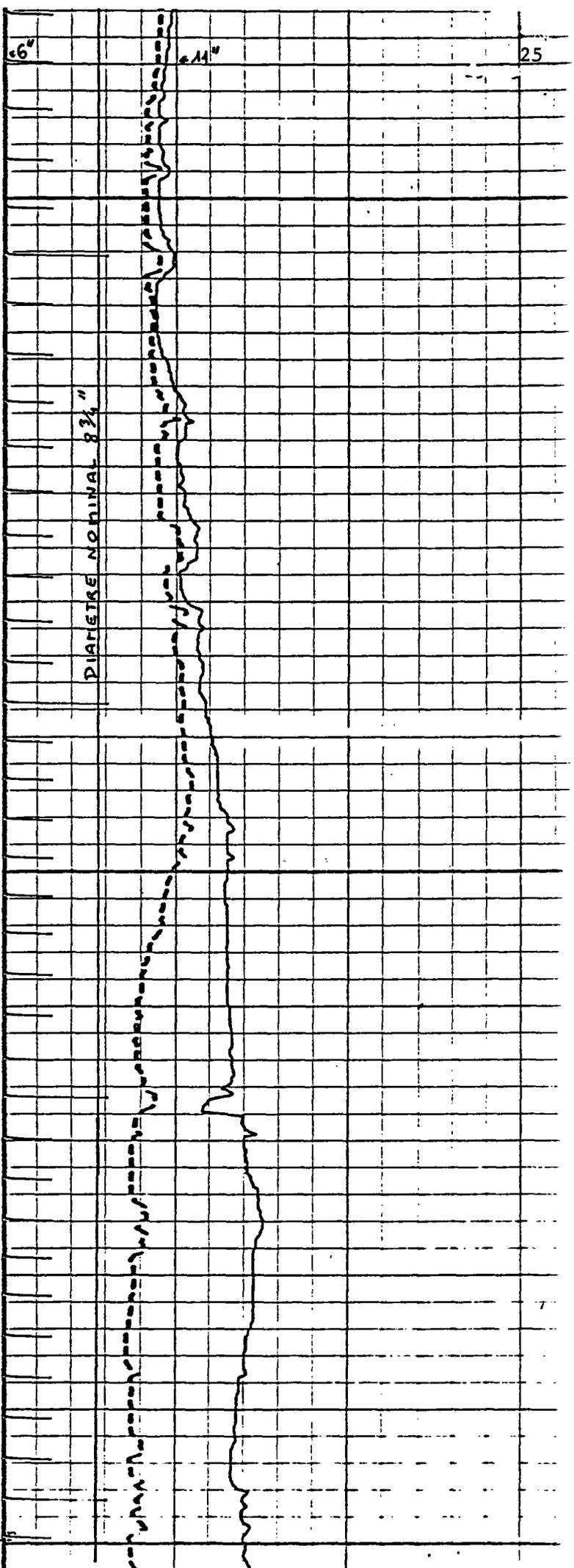
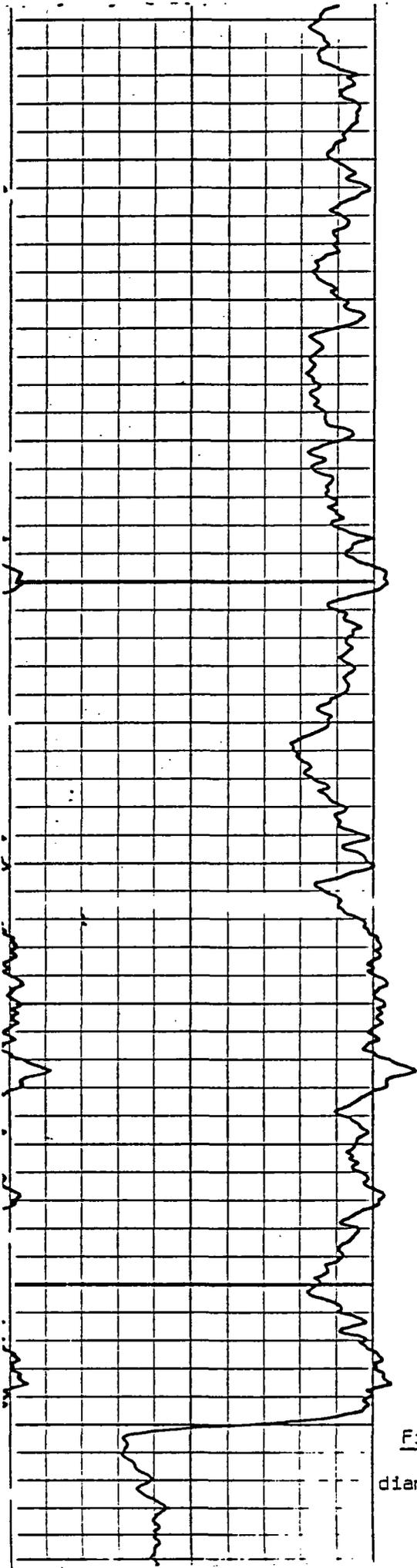


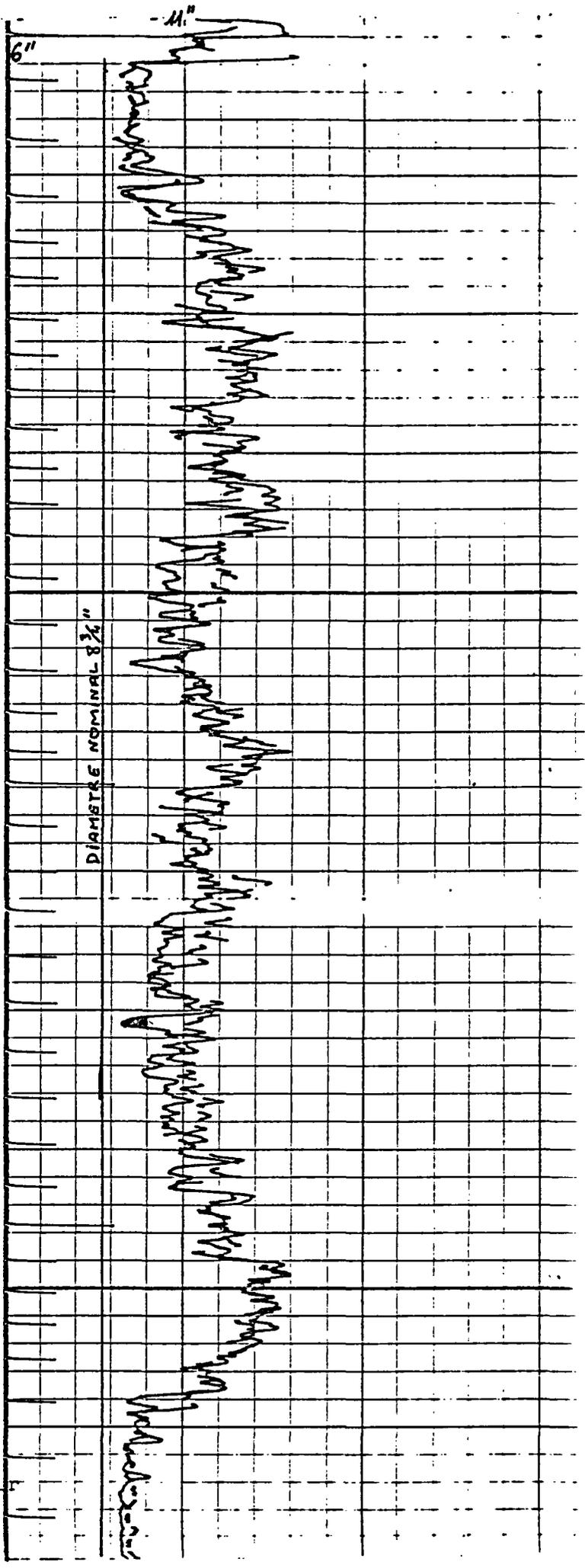
Fig. 4  
diamètre



0700

Fig. 5

diamètre



DIAMÈTRE NOMINAL 3/4"

5.2. Nous allons maintenant appliquer le raisonnement dans le cas où la cimentation du casing de production serait idéale.

Dans cette hypothèse, les calculs de température en tête de puits sont un peu plus complexes. Il faut en effet introduire dans le calcul du coefficient global de transfert de chaleur les termes relatifs à la résistance nette au flux de chaleur résultant de la présence du ciment.

L'application est faite pour le puits producteur Cr GTH 4 (Creil n° 4), pour un débit de 80 m<sup>3</sup>/h.

Les équations conduisant au calcul du coefficient de couche limite  $h$  ne changent pas. Par contre, pour obtenir le coefficient global de transfert thermique  $U$ , il faut introduire dans les équations tous les termes relatifs aux résistances nettes au flux de chaleur.

Ainsi, le coefficient de transfert global U s'écrira :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{x_a A_1}{k_a A_a} + \frac{x_c A_1}{K_c A_c}$$

Dans cette formule développée du coefficient U,

h = coefficient de couche limite de transfert de chaleur pour le liquide considéré à l'intérieur du casing (K cal/h m<sup>2</sup>°C).

x<sub>a</sub> : épaisseur de la gaine de ciment (m)

x<sub>c</sub> : épaisseur du casing (m)

K<sub>a</sub> : conductivité thermique du ciment

K<sub>a</sub> ≈ 0,85 K cal/m h °C (Dowell)

K<sub>c</sub> : conductivité thermique de l'acier

K<sub>c</sub> ≈ 46 K cal/m h °C (Vallourec)

A<sub>a</sub> : moyenne logarithmique des surfaces du ciment

A<sub>c</sub> : moyenne logarithmique des surfaces du casing.

Avec :

$$A_a = \frac{A' a_1 - A'a}{\ln \frac{A' a_1}{A' a}}$$

$$A_c = \frac{A' c_1 - A'c}{\ln \frac{A' c_1}{A' c}}$$

Où :

A'a<sub>1</sub> est la surface externe du ciment

A'a est la surface interne du ciment

A'c<sub>1</sub> est la surface externe du casing

A'c est la surface interne du casing

En supposant un trou parfaitement calibré, foré au 8 1/2", on a :

$$\text{Diamètre } 8 \frac{1}{2}'' = 0,216 \text{ m}$$

$$\text{Diamètre extérieur } 7'' = 0,178 \text{ m}$$

$$\text{Diamètre intérieur } 7'' ; 23 \text{ lbs/ft} \approx 0,161 \text{ m.}$$

Les surfaces moyennes seront calculées à partir du sabot du 7'', soit  $Z = 1\,540 \text{ m}$ .

On obtient :

$$A'a_1 = 56,4 \text{ m}^2$$

$$A'a = 38,3 \text{ m}^2$$

$$A'c_1 = 38,3 \text{ m}^2$$

$$A'c = 31,3 \text{ m}^2$$

D'où :

$$Aa = 46,7$$

et :

$$Ac = 34,7$$

Le coefficient global de transfert est égal à :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{x_a A'c}{K_a Aa} + \frac{x_c A'c}{K_c Ac}$$

On supposera comme précédemment que le trou est parfaitement calibré et que le casing est parfaitement centré dans le trou.

On a alors :

$$x_a = 0,038 \text{ m}$$

$$A'c = 31,3 \text{ m}^2$$

$$K_a = 0,85 \text{ K cal/m h } ^\circ\text{C} \text{ (donnée DOWELL SCHLUMBERGER)}$$

$$Aa = 46,7$$

$$x_c = 0,008 \text{ m}$$

$$K_c = 46 \text{ K cal/m h } ^\circ\text{C} \text{ (donnée VALLOUREC)}$$

$$Ac = 34,7$$

$h$  = coefficient de couche limite calculé à partir de trois nombres sans dimensions. R. P. B.

Pour un débit de  $80 \text{ m}^3/\text{h}$ , la valeur de  $h$  est identique à celle calculée au chapitre 2.

$$h = 12\,438 \text{ K cal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}.$$

d'où :

$$U \approx 26,04 \text{ K cal/m h } ^\circ\text{C}.$$

Soit en jour :

$$U \approx 625 \text{ K cal/m j } ^\circ\text{C}.$$

Calcul de la fonction temps pour un temps de pompage  $t = 55$  jours, soit 1320 h.

avec :

$$t = 1320 \text{ h}$$

$$r_3 = 0,11 \text{ m}.$$

$$\frac{\alpha t}{r_3^2} = \frac{3,71 \times 10^{-3} \times 1320}{(0,11)^2} \approx 404$$

$\log \alpha t / r_3^2 = 2,61$        $\log f(t) = 0,5$  d'après la figure 1  
d'où  $f(t) = 3,16$ .

Calcul du coefficient de profondeur

$$A = \frac{Wc \left[ \frac{K}{2\pi K} + \frac{r_2}{r_2} U f(t) \right]}{r_2 U}$$

$$A = 25\,627.$$

Calcul de la température en tête de puits

$$T_1 = aZ + b - aA + (T_0 + aA - b) e^{-Z/a}$$

Avec :

$$a = 0,02875^\circ\text{C/m}$$

$$Z = 1\,600 \text{ m}$$

$$b = 12^\circ\text{C}$$

$$T_0 = 58^\circ\text{C}$$

$$A = 25\,627$$

$$T_1 = 56,6^{\circ}\text{C}$$

On constate que l'influence de la gaine de ciment est nēgligeable sur la tempēration en tēte de puits :  $56,6^{\circ}\text{C}$  au lieu de  $56,4^{\circ}\text{C}$  pour un puits qui serait cimentē normalement.

Les calculs ont ētē appliquēs pour des dēbits de :

- .  $150 \text{ m}^3/\text{h}$  à Creil
- .  $27 \text{ m}^3/\text{h}$  à Melun
- .  $85 \text{ m}^3/\text{h}$  à Melun.

Les rēsultats sont les suivants :

	CREIL $80 \text{ m}^3/\text{h}$	CREIL $150 \text{ m}^3/\text{h}$	MELUN $27 \text{ m}^3/\text{h}$	MELUN $85 \text{ m}^3/\text{h}$
cimentation normale	56,4	57,2	68,6	70,8
cimentation idēale	56,6	57,4	68,8	71

## VI - EQUILIBRE DE LA TEMPERATURE

Les résultats des chapitres précédents montrent que la température en tête d'un forage géothermique varie en fonction du débit.

Ceci se comprend facilement puisque :

Le coefficient global de transfert (U) est fonction du coefficient de couche limite (h) lui-même proportionnel à la vitesse du fluide dans le casing donc en définitive au débit.

Ce terme U intervient dans le calcul du coefficient de profondeur (A) qui est directement lié au débit par l'intermédiaire de  $W = Q \times \rho$  ( $Q \text{ m}^3/\text{h}$ ). La température calculée étant fonction de A, le débit a donc une influence prépondérante sur la valeur de  $T_1$ .

Ce phénomène a été constaté sur les installations prises comme exemple.

### 6.1. Exemple de Creil

Le débit du forage n°4 a été modifié, pour des raisons de mise au point le 16 Décembre 1976.

La production qui était de  $80 \text{ m}^3/\text{h}$  est passée à  $65 \text{ m}^3/\text{h}$ . On a constaté alors une baisse de température de  $1^\circ\text{C}$ . La nouvelle valeur de température  $54,7^\circ\text{C}$  est restée constante jusqu'à la mi-janvier 1977 où le débit a été augmenté jusqu'à  $72 \text{ m}^3/\text{h}$ . La température s'est alors élevée jusqu'à  $55,4^\circ\text{C}$  et s'y est maintenue.

Le 10 Février 1977, la pompe immergée du forage N°4 a été mise en route et le débit est passé à 150 m<sup>3</sup>/h, la température a alors atteint 57°C.

### 6.2. Melun-l'Almont

Durant l'hiver, le débit du puit producteur est de 85 m<sup>3</sup>/h environ.

Les enregistrements de températures montrent des fluctuations comprises entre 68 et 70°C avec une moyenne se situant vers 69°C.

Pendant l'été, le débit est réduit à 27 m<sup>3</sup>/h. La température chute alors de 2°C et fluctue entre 66 et 68°C.

On constate donc qu'en aucun cas la température d'un forage n'est stabilisée en tête de puits mais qu'il s'établit un équilibre en fonction du débit.

On préférera donc le terme de température équilibrée.

## VII - CALCUL DE LA TEMPERATURE EN TETE D'UN PUIS DONT LE CASING EST ISOLE

---

On peut remplacer la majeure partie de la gaine de ciment entourant le casing par un produit isolant dont la conductivité thermique est très inférieure à celle du ciment :

$$K'a = 0,15 \text{ K cal/m h } ^\circ\text{C} \text{ contre } 0,85 \text{ K cal/m h } ^\circ\text{C} \text{ à } 60^\circ\text{C}$$

Dans ce cas, le processus opératoire peut être le suivant.

On cimente la base du casing sur 150 à 200 m et on maintient une tension suffisante en tête pour que le tubage soit fixé. Après séchage de la partie cimentée, on injecte à l'aide d'un manchon de cimentation multiétagée spécial le produit isolant considéré. On laisse remonter ce produit jusqu'en surface puis on réalise l'étanchéité de l'annulaire. L'isolant est alors emprisonné.

Dans le calcul suivant, nous supposons que le puits producteur Cr GTH<sub>4</sub> possède un casing isolé.

Le calcul de la température en tête de puits, pour un débit de 80 m<sup>3</sup>/h, est alors le suivant :

### 7.1. Données préliminaires

$$Q = 80 \text{ m}^3/\text{h}$$

sabot du tubage 7" à 1 540 m.

200 m de ciment, d'où 1 340 m d'isolant.

$$T_o = 58^\circ\text{C} \text{ à } 1\ 600 \text{ m.}$$

$$a = 0,02875^\circ \text{ C/m}$$

$$D = 0,16 \text{ m.}$$

$$K_c = 46 \text{ K cal/m h } ^\circ\text{C.}$$

$$\mu = 0,5 \times 1,02 \times 10^{-4} \text{ Kg S/m}^2$$

$$\rho = 1\ 008 \text{ Kg/m}^3$$

$$k = 4,28 \text{ K cal/m h } ^\circ\text{C.}$$

$$K_a = 0,85 \text{ K cal/m h } ^\circ\text{C.}$$

$$K'a = 0,15 \text{ K cal/m h } ^\circ\text{C.}$$

## 7.2. Développement

Le calcul du coefficient de couche limite  $h$  à partir des trois nombres sans dimension R. P. B. est identique à celui qui a été effectué au chapitre (1).

d'où,

$$h = 12\,438 \text{ K cal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}.$$

Le coefficient global de transfert  $U$  pour les 200 m cimentés est alors égal à :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{x_a A'c}{K_a A_a} + \frac{x_c A'c}{K_c A_c}$$

Dans le chapitre (5) on a calculé les surfaces externes et internes du ciment et du casing pour 1 540 m. Pour 200 m, on aura :

$$A'a_1 = 7,3$$

$$A'a = 4,9$$

$$A'c_1 = 4,9$$

$$A'c = 4,06$$

Donc :  $A_a = 6,02$

et,  $A_c = 4,47$

d'où :  $U \approx 33,04 \text{ K cal/m h }^\circ\text{C}.$

Soit, en jour,

$$U \approx 793 \text{ K cal/m h }^\circ\text{C}.$$

### Calcul de la fonction $f(t)$

$$\frac{\alpha t}{r_3^2}$$

avec :  $t = 1\,320 \text{ h}$

$$r_3 = 0,11 \text{ m}.$$

d'où,

$$\frac{\alpha t}{r_3^2} \approx 404$$

$$\log \alpha t / r_3^2 = 2,6$$

De la figure 1, on tire :  $\log f(t)$  pour la valeur de  $\log \alpha t / r_3^2$

$\log f(t) : 0,5$  d'où  $f(t) = 3,16$

Le coefficient de profondeur est alors égal à :

$$A = \frac{Wc}{2\pi} \frac{[K + r_2 U f(t)]}{r_2 U K}$$

$A = 24\,311$  avec  $Wc = 1\,935\,360 \text{ Kg/j}$ .

Au toit du ciment, la température du fluide est alors :

$$T'_1 = aZ + b - aA + (T_0 + aA - b) e^{-Z/a}$$

avec :  $Z = 1\,540 - 1\,340 = 200 \text{ m}$

$b$  à  $1\,340 \text{ m} = 50,53^\circ\text{C}$ .

$T_1 = 57,97^\circ\text{C}$
-----------------------------

On constate que cette température est très proche de la température mesurée à  $1\,600 \text{ m}$ , soit  $58^\circ\text{C}$ .

Le calcul de la déperdition de chaleur le long de la colonne isolée, c'est-à-dire de  $1\,340 \text{ m}$  à la surface est similaire à celui effectué ci-dessus.

En effet, le coefficient de couche limite  $h$  est identique, soit :

$$h = 12\,438 \text{ K cal/m}^2\text{h } ^\circ\text{C}.$$

Le coefficient de transfert global est calculé en fonction de :

$$A'a_1 = 49$$

$$A'a = 33,3$$

$$A'c_1 = 33,3$$

$$A'c = 27,2$$

$$Aa = 40,6$$

$$Ac = 30,1$$

D'où,

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{x_c \times A'c}{K'a Aa} + \frac{x_a \times A'c}{Kc Ac}$$

où,

$$U = 5,88 \text{ K cal/m h } ^\circ\text{C}.$$

Soit, en jour,

$$U = 141 \text{ K cal/m j } ^\circ\text{C}.$$

Le calcul de  $f(t)$  est identique à celui effectué précédemment et  $f(t)$  3,16.

D'où un coefficient de profondeur :

$$A = 46 \text{ 773}.$$

La température en tête de puits est alors :

$$T_1 = aZ + b - aA + (T_0 + aA - b) e^{-Z/a}$$

Avec :

$$a = 0,02875 \text{ } ^\circ\text{C/m}$$

$$z = 1 \text{ 340 m}$$

$$b = 12^\circ\text{C}$$

$$A = 46 \text{ 773}$$

$$T_0 = 58^\circ\text{C}.$$

$$T_1 = 50,52 - 1 \text{ 344,72} + (1390,72) \times 0,97176$$

$T_1 = 57,2^\circ\text{C}$
----------------------------

On constate alors que la gain de température en tête de puits n'est pas négligeable. Ce gain est de :

. 1,5°C par rapport aux températures mesurées in situ,  
et de

. 0,8°C par rapport aux températures calculées pour un casing cimenté normalement.

On imagine donc l'intérêt que peut présenter l'isolation des casings de production en géothermie.

## VIII - INFLUENCE DE L'ISOLATION DES CASING

### 8.1. Exemple de Creil (Forage Cr GTH<sub>4</sub>)

On a calculé l'évolution des températures en tête de puits en fonction du temps pour deux débits différents : 80 et 150 m<sup>3</sup>/h.

On a comparé ensuite les températures obtenues par le calcul en tête de puits en considérant

- 1) un casing cimenté
- 2) un casing isolé

On voit sur la figure 5 que les températures calculées dans le cas d'un casing cimenté normalement et dans le cas d'un casing isolé présentent certaines distorsions.

#### 8.1.1. Débit 80 m<sup>3</sup>/h.

Pour un débit de 80 m<sup>3</sup>/h la différence de température entre un casing isolé et un casing cimenté est de 1,2°C au bout de 10 jours. Cet écart se réduit à 0,8°C au bout de 3 mois  
à 0,6°C au bout d'1 an  
à 0,5°C au bout de 10 ans

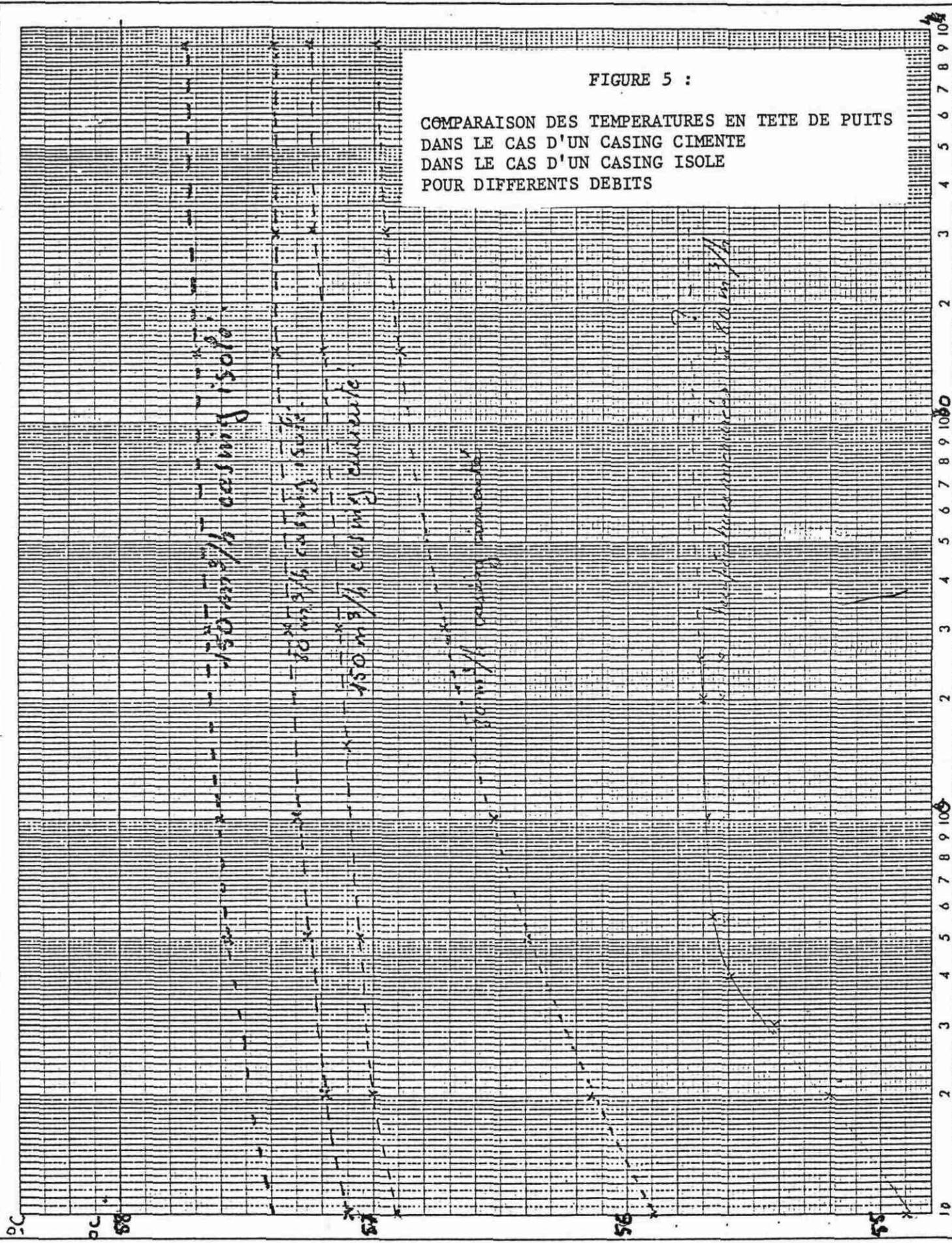
Pour de faibles débits, on peut donc admettre que l'isolant joue surtout son rôle dans les premiers temps de production. Dans un casing non isolé, la déperdition de chaleur vers le terrain est importante car le débit est faible.

#### 8.1.2. Débit 150 m<sup>3</sup>/h.

Dans ce cas on ne constate pratiquement pas de distorsion entre les températures.

FIGURE 5 :

COMPARAISON DES TEMPERATURES EN TETE DE Puits  
DANS LE CAS D'UN CASING CIMENTE  
DANS LE CAS D'UN CASING ISOLE  
POUR DIFFERENTS DEBITS



jours.

En effet, la différence de température est de :

- 0,4°C au bout de 50 jours
- 0,4°C au bout d'1 an
- 0,4°C au bout de 10 ans

Le débit étant important, le terrain autour d'un casing non isolé se réchauffe rapidement et l'écart entre les températures ne varie pratiquement plus.

### 8.1.3. Remarque sur l'influence d'un isolant.

Températures calculées et températures mesurées.

Il faut noter que quelque soit le cas étudié :

- Creil = débit 80 m<sup>3</sup>/h
- Melun = débit 85 m<sup>3</sup>/h
- Melun = débit 27 m<sup>3</sup>/h

Les températures calculées sont toujours supérieures de 0,6 à 0,8°C aux températures enregistrées.

Sur le forage Cr GTH<sub>4</sub> la différence entre la température mesurée et la température calculée à 150 m<sup>3</sup>/h est de 0,2°C.

Lors de la cimentation de la colonne de production du puits Cr GTH<sub>4</sub>, compte tenu des pressions de fracturation rencontrées, le ciment a été allégé avec de la gilsonite. On a constaté par la suite que cet asphalte naturel avait une *conductivité thermique très faible*. Ceci pourrait alors expliquer le faible écart de température que l'on constate sur ce puits.

### 8.2. Un gel isolant imperméable à l'eau

Dans les calculs précédents, on constate un léger écart entre les températures mesurées sur certaines installations géothermiques existantes telles que Melun - Creil et les températures calculées.

En effet les résultats sont en général supérieurs aux mesures de 0,5 à 0,8°C.

Ceci tient en partie à la précision du calcul, RAMEY indique qu'il s'agit d'un calcul approché permettant une estimation.

D'autre part, on ne tient pas compte *d'éventuelles circulations d'eaux souterraines* qui pourraient venir perturber l'équilibre thermique à un niveau donné de la colonne (Albien, nappe de la craie, etc...).

Ces perturbations bien que faibles en valeur absolue, pourraient *expliquer en partie* l'écart constaté entre les températures calculées et celles mesurées.

En empêchant ces éventuelles circulations d'eau "froide" au contact du tubage, les températures mesurées en tête de puits pourraient alors se rapprocher de celles données par le calcul.

Ceci semblerait être confirmé par le cas de Cr GTH 4. En effet, la gilsonite est un asphate imperméable et colmatant. Le mélange ciment-gilsonite est moins poreux et plus "imperméable" qu'un ciment pur. Les perturbations hydrothermiques au niveau du tubage devraient donc en principe être diminuées. De par sa conductivité thermique, la gilsonite isolerait relativement le casing.

En supprimant donc les perturbations hydrothermiques et en isolant le casing, on pourrait alors se rapprocher de la solution théorique.

En remplissant l'annulaire d'un *gel* tixotropique *colmatant et imperméable à l'eau*, on pourrait à priori, résoudre ce problème. Si, d'autre part, ce gel possède une très faible conductivité thermique, il réduira les échanges de chaleur entre le fluide et le terrain.

### 8.2.1. Gains de température en tête de puits.

Si on prend l'exemple étudié plus avant, nous constatons que la température mesurée au bout de 1 320 h soit 55 jours est de 55,7°C pour un débit de 80 m<sup>3</sup>/h. En isolant l'annulaire par un produit défini tel que ci-dessus et en centrant le casing, c'est-à-dire en l'équipant d'un nombre de centreurs suffisant pour que le tubage n'entre pas en contact avec le terrain, la température en tête de puits pourrait atteindre 57,2°C soit un gain de 1,5°C pour 80 m<sup>3</sup>/h.

Ceci paraît à première vue peu important. Cependant, dans la gamme de températures qu'offre la basse énergie, un gain de quelques degrés est appréciable.

---

TABLEAU RECAPITULATIF

	CREIL 80 M <sup>3</sup> /H	CREIL 150 M <sup>3</sup> /H	MELUN 27 M <sup>3</sup> /H	MELUN 85 M <sup>3</sup> /H
Température mesurée au fond.....	58	58	72,4	72,4
Température mesurée en surface (1).....	55,7	57	68	70
Température calculée pour un casing normalement: cimenté (2).....	56,4	57,2	68,6	70,8
Température calculée pour un casing parfaite- ment cimenté (3).....	56,6	57,4	68,8	71
<u>Température calculée pour un casing isolé (4)</u>	57,2	57,6	70,6	71,9
Gain entre 2 et 4.....	0,8	0,4	2	1,1

### 9.3. Bilan comparatif

Dans les conditions économiques du premier semestre 1977, le prix d'une cimentation double étage d'une colonne mixte 10"3/4 x 7" à 1 700 m était de l'ordre de 140 000 F.

Anneau, sabot	}	.....	45 000 F
Centreurs bouchons			
Anneau de cimentation multiétagée			
Opération de cimentation .....			50 000 F
Fourniture et transport de ciment 60 tonnes.....			45 000 F

Si l'on désirait isoler un casing dans les meilleures conditions, le prix de l'opération s'élèverait à :

Anneau, sabot	}	.....	50 000 F
Centreurs bouchons			
Anneau de cimentation multiétagée			
Opérations de cimentation et d'isolation .....			50 000 F
Cimentation de 200 m de tubage au bas de la colonne			-8 000 F
Fourniture et transport de ciment 10 t			
Fourniture et transport des produits	}	.....	110 000 F
composant l'isolant (30 m <sup>3</sup> )			
TOTAL.....			218 000 F
		arrondi à	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">220 000 F</span>

## IX - ETUDE ECONOMIQUE

Si on compare les puissances aux diverses températures à Creil et à Melun, on voit que le gain en puissance est loin d'être négligeable.

En supposant que ce gain en puissance pour les débits d'été (80 m<sup>3</sup>/h à Creil et 27 m<sup>3</sup>/h à Melun) est utilisé pour toute la production d'eau chaude sanitaire d'été (133 jours). La puissance nécessaire au chauffage variant en fonction de la température extérieure et la puissance maximale fournie par la géothermie n'étant utilisable qu'une partie de la saison de chauffe, on admettra que le gain aux débits d'hiver (150 m<sup>3</sup>/h à Creil et 85 m<sup>3</sup>/h à Melun) est utilisé pendant la moitié de la saison de chauffage.

Pour un débit Q (en m<sup>3</sup>/h), la puissance disponible pour une différence de température DT est égale à P exprimée en thermies par heure, tel que :

$$P = QC \times DT$$

C étant la chaleur spécifique de l'eau, soit 1 th/m<sup>3</sup>°C.

### 9.1. Cas de Creil

Pour un débit de 80 m<sup>3</sup>/h et un gain de température de 0,8°C, le gain en puissance est :

$$P_1 : 64 \text{ th/h.}$$

Pour un débit de 150 m<sup>3</sup>/h et un gain en température de 0,4°C, le gain en puissance est :

$$P_2 : 60 \text{ th/h.}$$

Le gain annuel en énergie est alors égal à :

$$(P_1 \times 133 \text{ jours} \times 24 \text{ h}) + (P_2 \times \frac{232}{2} \text{ jours} \times 24 \text{ h}),$$

$371 \times 10^3 \text{ th}$ , soit  $371 \text{ k th}$ .

Pour un prix moyen de 75 F la kth, l'économie serait donc de :

27 825 F par an.

### 9.2. Cas de Melun

Pour un débit de  $27 \text{ m}^3/\text{h}$  et un gain de température de  $2^\circ\text{C}$ , le gain en puissance est :

$$\underline{P_1 = 54 \text{ th/h}}$$

Pour un débit de  $85 \text{ m}^3/\text{h}$  et un gain de température de  $1,1^\circ\text{C}$ , le gain en puissance est :

$$\underline{P_2 = 93,5 \text{ th/h}}$$

Le gain annuel en énergie est donc égal à :

$$432 \times 10^3 \text{ th, soit } \underline{432 \text{ Kth}}$$

L'économie serait alors de 32 400 F par an.

Une opération d'isolation reviendrait donc environ à  $220\ 000 - 140\ 000 = \underline{80\ 000 \text{ F}}$  de plus qu'une cimentation normale.

On voit donc que dans des conditions de fonctionnement définies au chapitre 9, ce surcoût serait rapidement amorti.

## X - L'ISOLANT

### 10.1. Choix de l'isolant

Il existe sur le marché un certain nombre de produits isolants. Certains se présentent sous forme de granulé, de fibre ou de gel.

On a vu aux chapitres 6.2. et 6.3. que les températures calculées étaient toujours plus élevées que les températures constatées.

On a admis que cette distorsion était en partie due à la précision du calcul mais aussi à certaines perturbations hydrologiques. En effet, des circulations d'eau au niveau des nappes froides peuvent entraîner un refroidissement du casing ; l'équilibre thermique se trouverait alors modifié.

Il faut donc neutraliser au maximum ces venues d'eau froide au niveau du casing ce qui impose de remplir l'annulaire d'un produit imperméable à l'eau.

Cette contrainte élimine donc les isolants granuleux et fibreux.

### 10.2. Les gels isolants

Il existe des produits étrangers capables de répondre aux exigences recherchées. Des contacts ont été pris avec des fabricants français mais n'ont donné jusqu'ici aucun résultat positif.

### 10.2.1. Présentation des gels et mise en place

Les gels considérés sont préparés à partir d'huiles asphaltiques et d'agents gélifiants leur donnant les caractéristiques tixotropiques.

Initialement les produits sont fluides et pompables mais après quelques heures de repos la consistance est celle d'une graisse épaisse.

La mise en place du gel se fait d'une manière tout à fait classique :

Le concentré (liquide en fut) est mélangé à l'huile de base et pompé dans le tubage. Pendant le pompage, de la chaux vive est ajoutée au mixer. Le fluide passe dans l'annulaire grâce à un anneau de cimentation double étage. La pression de refoulement est en général inférieure à 1000 psi (69 bars). Le pompage continue jusqu'à ce que 70 à 80 litres de mélange soient évacués de l'annulaire, ceci afin d'obtenir avec certitude un remplissage complet.

### 10.2.2. Propriétés

Les gels sont stables de 50°C à +150°C. De légères modifications étendent la stabilité au-dessus de +300°C.

La densité est de 0,96 à 0,98, mais peut être étendue dans une gamme de densité allant jusqu'à 1,8 - 2.

- Ils sont insensibles et imperméables à l'eau ; ils préviennent donc l'invasion de l'annulaire par l'eau et la formation de dépôts.

- Non corrosifs, ils sont insensibles aux sels, au gaz carbonique, à l'H<sub>2</sub>S et aux bactéries. Ils peuvent donc participer activement à une protection contre la corrosion extérieure du tubage.

- De par la consistance, ils colmatent les fissures éventuelles empêchant les rentrées d'eau dans l'annulaire.

- Lors de la prise en masse ils éliminent le cheminement de l'eau à travers le produit.

- Ils ne subissent aucun déplacement vertical ou horizontal dû à la pression de l'eau.

- Enfin les gels sont de bons isolants ; ils réduisent les pertes thermiques entre le casing et le terrain.

Leur conductivité thermique se situe entre 0,06 et 0,15 K cal/h m°C  
pour des températures comprises entre 55 et 70°C. (Thermal conductivity of thixotropic gels par W.H. Somerton, J.P. Anand, R. Ostromogie ; University of California, Berkeley Masch 1971).

Remarque :

Dans les calculs de températures du chapitre 6, la valeur de la conductivité thermique de l'isolant a été prise égale à 0,15 K cal/h m°C.

## CONCLUSION

A partir de la température du réservoir, on peut apprécier la température en tête de puits. La valeur calculée est toujours intimement liée au débit.

La possibilité de gagner quelques degrés en tête de puits existe par isolation des tubages.

En effet, les colonnes de production des forages géothermiques sont toutes cimentées selon la méthode pétrolière classique.

Les calculs montrent qu'un casing isolé permet un gain de température en tête de puits de 1 à 2°C selon les cas par rapport à un casing cimenté.

Comme dans toute étude théorique, il reste maintenant à vérifier par l'expérimentation la concordance entre les calculs et la réalité.

Pour cela, il suffirait que, lors d'une prochaine réalisation géothermique, la colonne de production soit isolée.

Il serait souhaitable de choisir un projet dans lequel on pourrait disposer de deux puits de production, le premier isolé, le second cimenté normalement. Une étude comparative des résultats obtenus sur les deux puits devrait alors être entreprise.

Cette étude pourrait être réalisée dans le cadre d'une action concertée. Si les conclusions s'avéraient, comme on peut l'espérer, positives, la méthode pourrait alors être largement appliquée.