H. SCHOELLER.- ETUDE SUR LA TEMPERATURE DES EAUX SOUTERRAINES.

La température des sources est la résultante de phénomènes thermiques qui se produisent en amont, dans la nappe ou dans les réseaux aquifères. Mais si la température des sources a été l'objet de maints travaux, seuls quelques auteurs, tels que Mr DIENERT (Vals de Loire, Source de la Blaise, Source du Loiret, etc..) FORCHEIMER, ODDONE ont étudié les échanges de chaleur qui se produisent entre les nappes et les terrains qui les contiennent.

NAPPE ASCENDANTE

Soit une nappe d'étendue infinie, ayant une inclinaison α (fig. I) dont l'eau est ascendante, et circule avec la vitesse V; $\mathcal{E}$ est l'epaisseur de la nappe. $\mathcal{E}'$ l'épaisseur mesurée suivant la verticale, Θ_s la température de la zone neutre du sol, Θ_0 la température de l'eau à l'origine O. Les distances mesurées le long de la nappe sont désignées par ℓ. K = coefficient de conductibilité calorifique, en unités C.G.S.

Considérons en M qui se trouve à une profondeur h sous le sol, une portion de la nappe et ayant une longueur $dl=dx/\cos\alpha$ et une largeur égale à l'unité. Cette portion de la nappe reçoit un certain flux de chaleur. $\mathcal{P}a$ venant de bas en haut de l'intérieur de la terre et que nous pouvons admettre égal à $\mathcal{P}a = I.6 \times IO^{-6}dx$. Nous pouvons en effet supposer que la présence de la nappe ne modifie pas sensiblement ce flux de chaleur, étant données les conductivilités calorifiques relativement voisines de l'eau (0.00I4) et des roches (0.005), et la différence relativement faible entre la température Θ de l'eau et celle du terrain par rapport à la température Θe de la zône émissive qui se trouve à une profondeur très grande. Nous supposerons par conséquent que tout le flux $\mathcal{P}a$ arrive à la nappe, c'est à dire qu'il n'est pas dévié. L'eau reste en contact de dx pendant le temps $dt= dl/V = Dx/V\cos\alpha$, la vitesse V de circulation de l'eau étant mesurée le long de l. La nappe reçoit donc le long de dl

$$qa= \frac{I.6 \times IO^{-6}dx^2}{V\cos\alpha} \text{ calories}$$

Mais il s'échappe par le haut un flux de chaleur $\mathcal{P}\ell$ du fait de la différence de température $\Theta-\Theta s$ qui existe entre la température de l'eau au point M considéré et la température de la zone neutre

$$\mathcal{P}\ell = K\frac{\Theta-\Theta s}{h}dx = K\frac{\Theta-\Theta s}{ho-x\,tg\alpha}dx$$

h_o étant la profondeur à laquelle se trouve la nappe à l'origine. Pendant le temps de contact $dt=dx/V \cos$ il s'échappera

$$q_b = K \frac{\theta - \theta_s}{(h_o - x \operatorname{tg}\alpha) V \cos\alpha} dx^2$$

Il restera donc dans la nappe

$$q = \left(\frac{1.6 \times 10^{-6}}{V \cos\alpha} - \frac{K(\theta - \theta_s)}{(h_o - x \operatorname{tg}\alpha) V \cos\alpha} \right) dx^2$$

et la température de l'eau augmentera de $d\theta = \frac{q \cos\alpha}{\varepsilon dx}$

on aura donc

$$(1) \quad \frac{d\theta}{dx} = \frac{1.6 \times 10^{-6}}{\varepsilon V} - \frac{K(\theta - \theta_s)}{\varepsilon V (h_o - x \operatorname{tg}\alpha)}$$

qui intégrée aux conditions limites $x=0$ et $\theta = \theta_o$

$$\theta = \theta_s - \frac{1.6 \times 10^{-6} (h_o - x \operatorname{tg}\alpha)}{\varepsilon V \operatorname{tg}\alpha - K} + \left(\frac{h_o - x \operatorname{tg}\alpha}{h_o} \right)^{\frac{K}{\varepsilon V \operatorname{tg}\alpha}} \left[\theta_o - \theta_s + \frac{1.6 \times 10^{-6} h_o}{\varepsilon V \operatorname{tg}\alpha - K} \right]$$

on peut ainsi avoir la température de l'eau de la nappe en fonction de la distance à partir de l'origine O. Des exemples sont donnés sur le graphique fig. (2).

Il résulte donc de cette équation que lors l'eau atteint la zone neutre du sol, la température de l'eau est égale à celle de cette zone neutre, ce qui est une conséquence du fait que nous avons admis que le flux de chaleur s'échappant de la nappe est $q_b = K \frac{\theta - \theta_s}{h} dx$ car lorsque l'eau atteint la zone neutre, h=0. De ce fait l'équation donne

$$q_b = \infty \text{ ou } d\theta / dx = -\infty$$

De fait, on constate d'une manière générale que la température des sources des nappes d'interstice, pourvu que l'eau ne séjourne pas un temps trop long dans la zone d'hétérothermie journalière ou dans la zone d'hétérothermie saisonnière, est égale à la température de la zone neutre.

Mais on voit que si le débit de l'eau est très grand, la température de l'eau reste très voisine de celle de l'origine très près de la source, et que cette courte distance serait insuffisante pour ramener l'eau à la température de la zone neutre. Mais de telles vitesses générales n'ont guère de chances de se produire dans les nappes d'interstice.

NAPPE HORIZONTALE

En reprenant l'équation différentielle (I) et en faisant $\alpha = 0$, on a le cas d'une nappe horizontale se trouvant à une profondeur $h=h_0$. On a alors:

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{1.6 \times 10^{-6}}{\varepsilon V} - K\,\frac{(\theta - \theta_s)}{\varepsilon V h}$$

qui intégrée aux conditions limite $x=0$ $\theta = \theta_0$ donne

$$\theta = \left(\theta_0 - \theta_S - 1{,}6 \times 10^{-6}\,\frac{h}{K}\right) e^{-\frac{Kx}{\varepsilon h V}} + \theta_S + 1{,}6 \times 10^{-6}\,\frac{h}{K}$$

Des exemples de la température de la nappe en fonction de la distance à partir de l'origine. sont donnés sur les graphiques D'après l'équation, l'équilibre thermique est réalisé à l'infini.

NAPPE INCLINEE DESCENDANTE

Si nous reprenons l'équation différentielle (I) de la nappe ascendante, changeons l'origine, affectons V et dx du signe négatif et remplaçons $h=h -x \operatorname{tg} \alpha$ par $h=x \operatorname{tg} \alpha$ nous aurons le cas d'une nappe descendante. Et l'équation différentielle devient

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{1{,}6 \times 10^{-6}}{V\varepsilon} - \frac{K\,(\theta - \theta_s)}{V\varepsilon\, x \operatorname{tg}\alpha}$$

qui intégrée aux conditions limites $x_0=0$ $\theta_0 = \theta_s$ donne,

$$\theta = \theta_s + \frac{1{,}6 \times 10^{-6} \operatorname{tg}\alpha}{K + V\varepsilon \operatorname{tg}\alpha}$$

La température de l'eau s'accroit donc suivant une fonction linéaire au fur et à mesure de sa descente. Mais elle sera plus faible que celle du terrain que l'eau traverse. Et l'écart de température ira toujours en s'accroissant au fur et à mesure de la descente de l'eau.

De ces trois cas de nappes sous un sol horizontal on passe facilement aux cas de nappes sous un sol incliné. Ainsi le cas d'une nappe horizontale sous un sol incliné vers la source, conduit à une équation analogue à celle d'une nappe ascendante sous un sol horizontal.

Il est bien évident que ces formules n'ont pas la prétention de donner une solution rigoureuse des phénomènes thermiques. Elles ont simplement pour but de traduire d'une manière aussi précise que possible le sens et l'allure des phénomènes thermiques.

CAS DE LA NAPPE DE L'ALBIEN DU BASSIN DE PARIS

Il était intéressant de rechercher dans une nappe déterminée les phénomènes thermiques dont il vient d'être question. Les sables albiens qui renferment la nappe artésienne, ont une épaisseur de 35 à 80 mètres. Les coupes des forages nous montrent que cette formation est loin d'être homogène et que la nappe est plus ou moins irrégulière. Néanmoins on peut essayer d'examiner, non pas chaque cas particulier de forage, mais les phénomènes dans leur ensemble, ce qui nous conduira à une première approximation. La carte des cotes piézométriques (fig. 3) des forages, relevées entre I930 et I934 permet, malgré les incertitudes de ces cotes, de reconnaitre que la nappe de l'Albien traverse du S ou SSE au N ou NNW l'anticlinal de Beynes pour redescendre dans le synclinal de la Seine.

D'un autre côté la carte du degré géothermique (fig-4) que l'on calculerait d'après la température des eaux des forages, nous montre que sur l'anticlinal de Beynes, le degré est inférieur à 33 m, qu'au contraire sur le flanc N du même anticlinal, c'est-à-dire dans la descente vers le synclinal de la Seine, le degré géothermique est supérieur à 33 m et est d'autant plus élevé que l'on s'approche de la partie basse. Donc tout se passe comme si sur l'anticlinal, l'eau était plus chaude et dans le synclinal plus froide qu'elle ne devrait être. Autrement dit encore tout se passe comme si les eaux en arrivant sur l'anticlinal de Beynes subissaient une diminution de température mais moins rapide que celle du terrain, et comme si les eaux en descendant dans le synclinal de la Seine se réchauffaient, mais subissaient une augmentation de température moins rapide que celle du terrain en fonction de la profondeur.

De même dans la partie NW du synclinal de la Seine le degré géothermique est le plus souvent inférieur à 33 m, comme si ici aussi l'eau en remontant le long de l'axe du synclinal de la Seine se refroidissait, mais avec un certain retard.

Thermique et dynamique des eaux s'accordent ainsi et je dirai aussi qu'elles s'accordent également avec la composi-

...

tion chimique de l'eau. En effet si nous prenons la carte de DELECOURT (I), nous voyons que les eaux de la zone d'alimentation (zone des affleurements de DELECOURT) pénétrent dans la nappe captive et subissent aussi bien dans la zone de dessalure (de DELECOURT) que dans la zone des échanges de base une très faible concentration et un faible échange de base. C'est que les eaux y circulent activement. C'est somme toute la zone de circulation de la nappe albienne. Cette zone de circulation forme une pointe vers l'embouchure de la Seine, indiquant que c'est dans cette direction que se fait le maximum de circulation de l'eau. Par contre latéralement et en aval de cette zone de circulation, dans la zone de salure de Delecourt, la concentration devient importante, les échanges de bases sont considérables. C'est que l'eau n'y circule que lentement, laissant les dits phénomènes chimiques se réaliser pleinement. C'est une zone de stagnation.

CAS DES CHENAUX SOUTERRAINS

Le cas des chénaux souterrains a été également étudié, en prenant le cas idéal d'une conduite cylindrique de diamètre constant. Assimilant les lignes isothermiques aux lignes équipotentielles des nappes exploitées par puits, on arrive à traduire les phénomènes par des équations. On a alors pour un chenal horizontal

$$\theta = \theta_1 - (\theta_1 - \theta_0)\, e \, \frac{2\pi K x}{W \log e \, R_1/\rho}$$

θ_1 étant la température de l'isogéotherme dans lequel est couchée la conduite

θ_0 la température de l'eau de la conduite à l'origine des x
W le débit de l'eau

ρ le rayon de la conduite
K, le coefficient de conductibilité calorifique
Forcheimer avait déjà donné une formule semblable:

$$\theta = \theta_1 - (\theta_1 - \theta_0)\, e \, \frac{2\pi K x}{W \log e \, 2h/\rho}$$

h étant la profondeur à laquelle se trouve la conduite sous le sol
Stanton et Addone aussi étaient arrivés à des formules analogues
Pour un chenal descendant la formule est un peu plus complexe

$$\theta = \theta_S + \frac{1{,}6 \times 10^{-6}\, tg\,\alpha}{K}\, x - \frac{1{,}6 \times 10^{-6} \rho^2 V \log e \, R_1/\rho \,.\, tg\,\alpha}{2K^2} \left(1 - e - \frac{2K}{\rho^2 V \log e \, R_1/\rho}\, x\right)$$

étant la température de la zone neutre
V étant la vitesse de l'eau.

Pour un chenal ascendant la formule est encore plus complexe.

J.Delecourt.Les eaux artésiennes salines du Bassin de Paris, de la Basse et de la Moyenne Belgique.Bull.Soc.belge de Géologie XLVII, 50I, 1937.

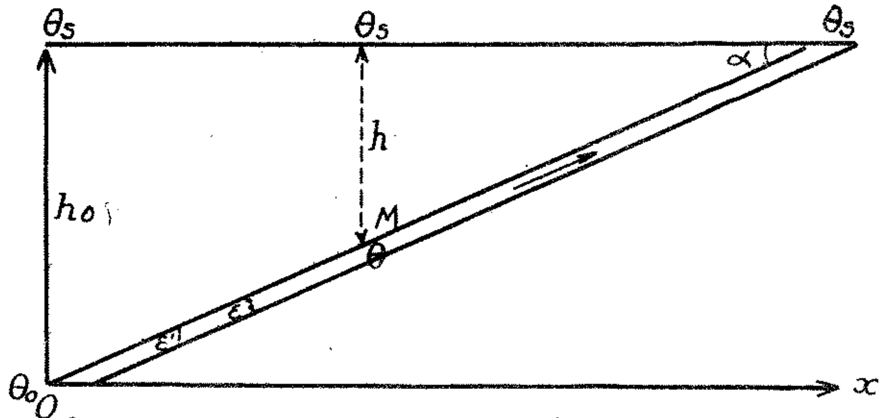


fig. 1 _ *Nappe inclinée ascendante*

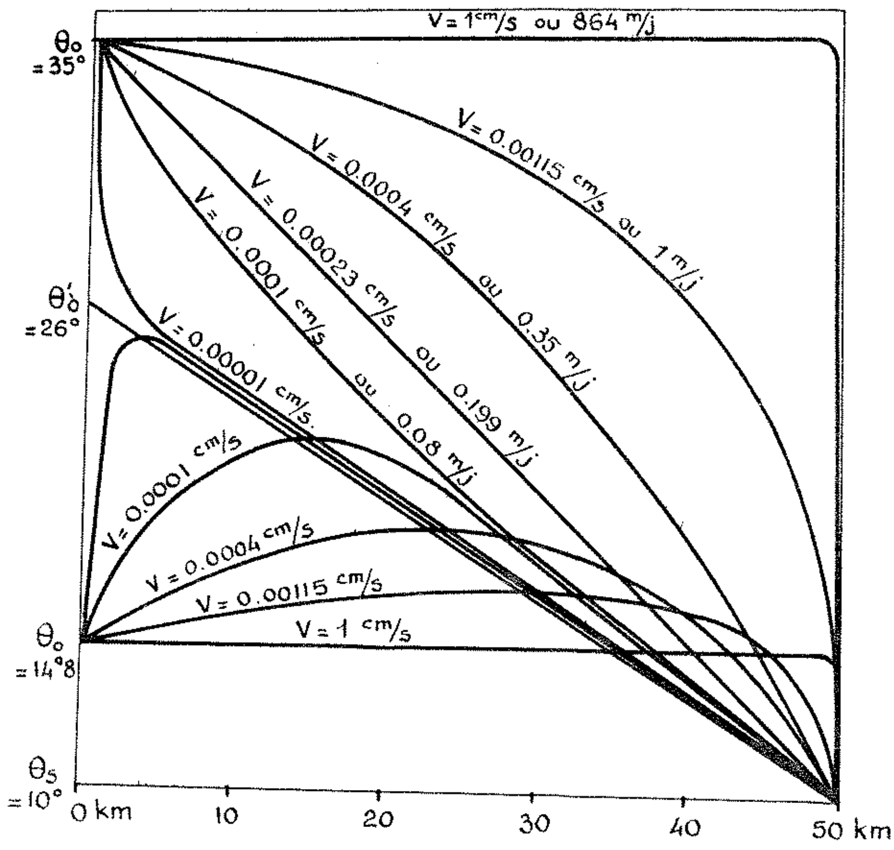


fig 2 _ *Nappe ascendante* $tg\,\alpha = 0.01$

1^er^ cas. *Eau à l'origine ayant* $\theta_0 = 35°$

2^ème^ cas. *Eau à l'origine ayant* $\theta_0 = 14°8$

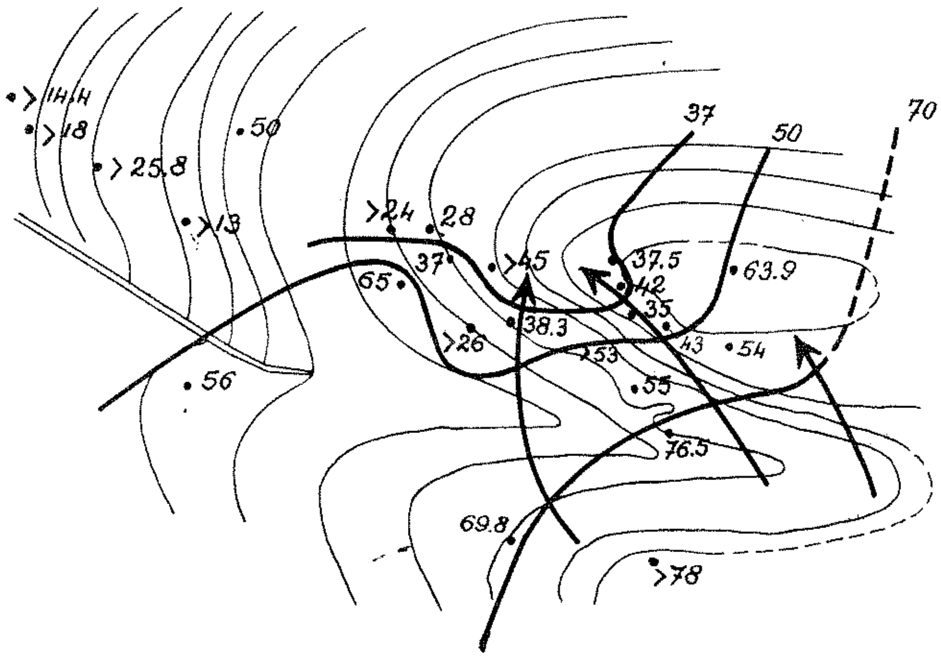
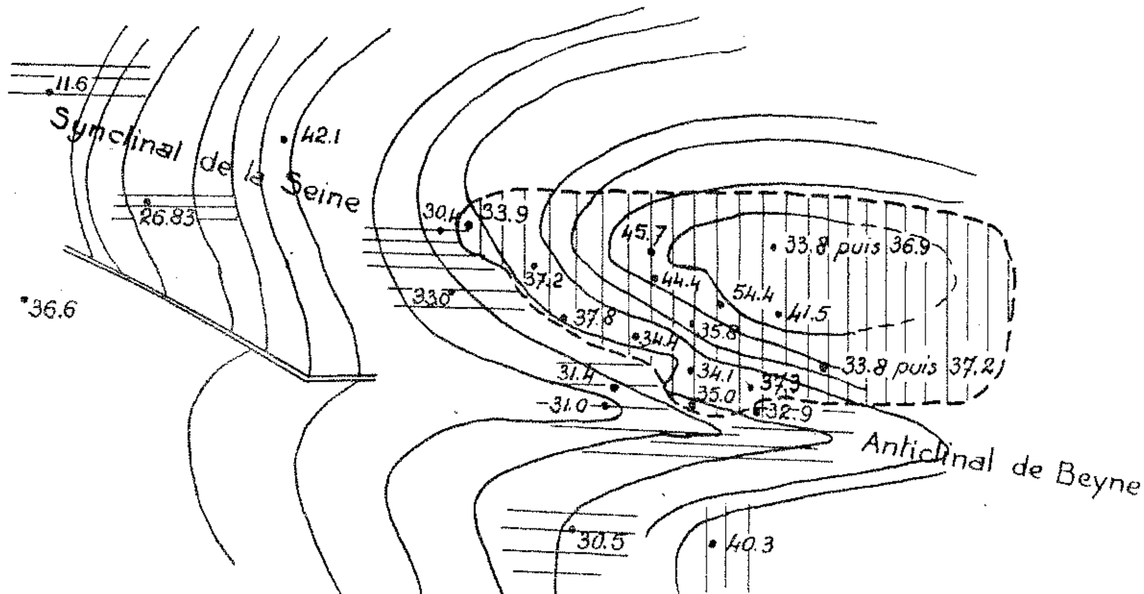


fig. 3 _ Schéma de l'écoulement dans la nappe de l'Albien

• 76.5 Cote piézométrique 1930 _ 1934

—— Courbe isopiézométrique schématique



Nappe de l'Albien

fig 4 _ Degré géothermique

||| degré supérieur à 33 m.

≡ degré inférieur ou égal à 33 m.

Errata de la Note :

H. Schoeller – Etude sur la temperature des eaux souterraines –

Il faut lire :

- à la page 2, 2ème ligne : $\cos\alpha$
- 11e ligne : $\left(\frac{ho - x\,tg\,\alpha}{ho}\right)^{\frac{K}{\varepsilon V tg\alpha}}$
- à la page 3, 13e ligne : $e^{-\frac{Kx}{\varepsilon h V}}$
- 21e ligne : $h = ho - x\,tg\,\alpha$
- à la page 5, 22e ligne : $e^{\frac{2\pi K x}{W \log e\, R_1/\rho}}$
- 30e ligne : $e^{\frac{2\pi K x}{W \log e\, 2h/\rho}}$
- 35e ligne : $1 - e^{-\frac{2Kx}{\rho^2 V \log e\, R_1/\rho}}$